



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication DETEC
Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti, dell'energia e delle comunicazioni DATEC

Bundesamt für Strassen
Office fédéral des routes
Ufficio federale delle Strade

Entwicklung eines Pflanzenöl- Blockheizkraftwerkes mit eigener Ölmühle

**Développement d'une centrale de cogénération à base
d'huile végétale avec propre moulin à huile**

**Development of a vegetable oil block heat and power
plant with own oil mill**

**Schweizerische Hochschule für Landwirtschaft
Martin Meyer
Matthias Stettler**

**combustion and flow solutions GmbH
Dr. Gabriel Barroso**

**Abgasprüfstelle FH Biel
Dr. Jan Czerwinski
Yan Zimmerli
T. Neubert**

**Forschungsauftrag ASTRA2006/004 auf Antrag der
Schweiz. Hochschule für Landwirtschaft SHL, Zollikofen**

Der Inhalt dieses Berichtes verpflichtet nur den (die) vom Bundesamt für Strassen beauftragten Autor(en). Dies gilt nicht für das Formular 3 "Projektabschluss", welches die Meinung der Begleitkommission darstellt und deshalb nur diese verpflichtet.

Bezug: Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)

Le contenu de ce rapport n'engage que l' (les) auteur(s) mandaté(s) par l'Office fédéral des routes. Cela ne s'applique pas au formulaire 3 "Clôture du projet", qui représente l'avis de la commission de suivi et qui n'engage que cette dernière.

Diffusion : Association suisse des professionnels de la route et des transports (VSS)

Il contenuto di questo rapporto impegna solamente l' (gli) autore(i) designato(i) dall'Ufficio federale delle strade. Ciò non vale per il modulo 3 «conclusione del progetto» che esprime l'opinione della commissione d'accompagnamento e pertanto impegna soltanto questa.

Ordinazione: Associazione svizzera dei professionisti della strada e dei trasporti (VSS)

The content of this report engages only the author(s) commissioned by the Federal Roads Office. This does not apply to Form 3 'Project Conclusion' which presents the view of the monitoring committee.

Distribution: Swiss Association of Road and Transportation Experts (VSS)



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication DETEC
Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti, dell'energia e delle comunicazioni DATEC

Bundesamt für Strassen
Office fédéral des routes
Ufficio federale delle Strade

Entwicklung eines Pflanzenöl- Blockheizkraftwerkes mit eigener Ölmühle

**Développement d'une centrale de cogénération à base
d'huile végétale avec propre moulin à huile**

**Development of a vegetable oil block heat and power
plant with own oil mill**

**Schweizerische Hochschule für Landwirtschaft
Martin Meyer
Matthias Stettler**

**combustion and flow solutions GmbH
Dr. Gabriel Barroso**

**Abgasprüfstelle FH Biel
Dr. Jan Czerwinski
Yan Zimmerli
T. Neubert**

**Forschungsauftrag ASTRA2006/004 auf Antrag der
Schweiz. Hochschule für Landwirtschaft SHL, Zollikofen**

Januar 2010

Impressum

Forschungsstelle und Projektteam

Projektleitung

Martin Meyer, Schweizerische Hochschule für Landwirtschaft, Zollikofen

Projektbegleitung

Karsten Lorenz, SEnergie GmbH, D-Heitersheim

Projektteam

Matthias Stettler, Schweizerische Hochschule für Landwirtschaft, Zollikofen

Martial Suchert, Liebherr Machines Bulle S.A., Bulle

Dr. Jan Czerwinski, Abgasprüfstelle FH Biel, Nidau

Yan Zimmerli, Abgasprüfstelle FH Biel, Nidau

Patrick Keller, Ölmühle Möriken GmbH, Lenzburg

Christoph Hug, HUG Engineering AG, Elsau

Peter Stähli, Lohnunternehmen, Suberg

Gabriel Barroso, combustion and flow solutions GmbH, Zürich

Philippe Müller, BKW FMB Energie AG, Bern

KO-Finanzierung des Forschungsauftrags

Kommission für Technologie und Innovation, KTI

Bundesamt für Energie BFE

Amt für Umweltkoordination und Energie des Kantons Bern AUE

BKW FMB Energie AG

Antragsteller

Martin Meyer, Schweizerische Hochschule für Landwirtschaft, Zollikofen

Bezugsquelle

Das Dokument kann kostenlos von <http://partnershop.vss.ch> herunter geladen werden.

Die Originaldaten der Motorenprüfstandversuche sind vertraulich. Sie sind bei den Motorenlaboratorien und der Abgasprüfstelle der Berner Fachhochschule in Biel archiviert.

Inhaltsverzeichnis

Impressum	4
Zusammenfassung	7
Résumé	8
Summary	9
Einleitung und Problemstellung	10
Projektbeteiligte	11

Teil A:

Gewinnung von Rapsölkraftstoff

Zusammenfassung	15
Résumé	15
Summary	16
1 Grundlagen der Ölgewinnung	17
2 Die Forschungsanlage in Suberg	25
3 Raps als Energieträger	37
4 Versuche, Erkenntnisse und Erfahrungen	39
5 Ökonomische Betrachtungen	48
Literaturverzeichnis	52

Teil B:

Dieselmotorische Nutzung von Rapsölkraftstoff

(1) Brennraum-Simulation (3D-CFD)

Zusammenfassung	55
Résumé	55
Summary	56
1 Einleitung und Zielsetzung des Projektteiles 3D-CFD	57
2 Geometrie und Berechnungsnetz	57
3 Numerische Modellierung	59
4 Resultate	60
5 Diskussion und Folgerungen	73

(2) Motorprüfstanduntersuchung

Abkürzungen	77
Zusammenfassung	79
Résumé	79
Summary	80
1 Einleitung und Ziele	81
2 Vorhandene Informationen über ROR-Betrieb	82
3 Versuchsträger	84
4 Prüfstands Aufbau, Messtechnik, Auswertung	87
5 Versuchsdurchführung	94
6 Ergebnisse	96
7 Schlussfolgerungen	123
Literaturverzeichnis	125

(3) Blockheizkraftwerk

Zusammenfassung	129
Résumé	129
Summary	129
1 Das Pflanzenöl-Blockheizkraftwerk	130
2 Die Pflanzenöleignung des Motors bestätigt sich	133
3 Das Pflanzenöl-BHKW erfüllt die Luftreinhalteverordnung (LRV)	137
4 Fazit	140
Literaturverzeichnis	140

Zusammenfassung

Ende 2008 konnte das KTI-Projekt „Rapsöl-BHKW“ des Bereiches Agrartechnik der SHL und seiner Wirtschafts- und Förderpartner erfolgreich abgeschlossen werden. Es hinterlässt zwei bleibende Werte: Eine Klein-Ölmühle zur Gewinnung von qualitativ hochwertigem Rapsölkraftstoff und ein modernes Pflanzenöl-BHKW.

Das Projekt war ein gemeinsames Referenzvorhaben von Privatwirtschaft, Förderstellen und Hochschulen. Seine Hauptansprüche waren das exemplarische Aufzeigen der Gewinnung von kraftstofftauglichem Rapsöl und seiner störungsfreien dieselmotorischen Nutzung mit minimalen Schadstoffemissionen.

Mit der Inbetriebnahme der Forschungs-Ölmühle Suberg und der Einführung eines Verfahrens zur adsorptiven Reduktion der Motor- und Katalysatorgifte Phosphor, Magnesium und Kalzium im Rapsöl, wurde eine europaweit beachtete Musteranlage für die Gewinnung von qualitativ hochwertigem Rapsölkraftstoff (RK) mittels Kaltpressung vorgestellt. Mit der Verarbeitung von Rapssaat aus dem Lyssbachtal hat das Referenzvorhaben einen lokalen Nischenenergiekreislauf verwirklicht.

In den umfassenden Prüfstandmessungen an der TI Biel, mit einer Reihe von Vergleichskraftstoffen, hat RK beim Betrieb des Liebherr-Projektors im Volllast- und oberen Teillastbereich sowohl bezüglich spezifischem Verbrauch (Wirkungsgrad) und Leistung als auch bei den Emissionen - inklusive Nanopartikel - vorteilhaft abgeschlossen. Im Leerlauf und unteren Teillastbereich ist der RK-Einsatz wegen der ungenügend intensiven Verbrennung nachteilig.

Mit der SCR-Denox/DPF-Anlage von Hug Engineering AG konnten die Grenzwerte der Luftreinhalte-Verordnung LRV im Betrieb bei Generatorbedingungen unterboten werden. Im Oktober 2008 wurden mit dem von SEnergie GmbH (Stulz Hager+Elsässer Group) aufgebauten BHKW und mit RK aus regional angebautem Raps in einem Dauerlauf von 559 Stunden wichtige Erfahrungen für den Langzeiteinsatz gesammelt und dargestellt. Es stellte sich heraus, dass der für den RK-Betrieb optimierte Motor einen durchgehenden Betrieb mit reinem RK problemlos erfüllen kann.

Mitte November 2008 erfolgte die geplante Übergabe von Ölmühle und BHKW zur privatwirtschaftlichen Weiterführung an Projektpartner und Lohnunternehmer Peter Stähli in Suberg bei Grossaffoltern BE.

Die bisherigen Resultate und die Entwicklung in der Energieversorgung geben Anlass, in diesem Referenzprojekt ein vielversprechendes Nischenmodell für eine lokale, wenig kapitalintensive Energieversorgung mit weitgehend geschlossenen Stoffkreisläufen zu sehen.

Résumé

Fin 2008, le projet CTI intitulé «Centrale de cogénération à base d'huile de colza», géré par l'équipe de technologie agricole de l'HESA et ses partenaires économiques, a pu être achevé avec succès. Il laisse deux installations d'avenir importantes: un petit moulin à huile servant à extraire du carburant haute qualité à base d'huile de colza et une centrale de cogénération à base d'huile végétale.

Le projet de référence a été réalisé en commun par l'économie privée, les pouvoirs publics et les hautes écoles spécialisées. Ses objectifs principaux sont de montrer de manière exemplaire comment obtenir une huile de colza répondant aux exigences des carburants et comment l'utiliser sans incidents techniques dans un moteur diesel tout en minimisant les émissions de substances nocives.

La mise en service du moulin à huile expérimental de Suberg et l'introduction d'un procédé de réduction par adsorption du phosphore, du magnésium et du calcium, substances contenues dans l'huile de colza et nocives pour le moteur et le catalyseur, ont permis de présenter une installation pilote remarquée au niveau européen qui sert à produire du carburant haute qualité à base d'huile de colza par pression à froid. La transformation du colza en provenance du Lyssbachtal peut servir de référence pour la production de niche énergétique locale en cycle fermé.

Dans le cadre des mesures de comparaison détaillées réalisées avec une série d'autres carburants sur le banc d'essai de la Haute école spécialisée technique et informatique de Bienne, le carburant à base d'huile de colza a affiché des résultats favorables sur le moteur Liebherr tant à pleine charge qu'à charge partielle (niveaux supérieurs) et en ce qui concerne la consommation spécifique (degré d'efficacité), la puissance et les émissions (y compris les nanoparticules). Au ralenti et aux niveaux inférieurs du fonctionnement à charge partielle, l'utilisation du carburant à base d'huile de colza présente des inconvénients car la combustion intensive n'est pas suffisante.

Grâce à l'installation SCR-Denox/filtres à particules diesel de la maison Hug Engineering AG, les valeurs d'émissions mesurées sont inférieures aux valeurs limites prescrites dans l'Ordonnance sur la protection de l'air (OPair) dans le mode de fonctionnement génératrice. En octobre 2008, on a réalisé un test continu de 559 heures dans la centrale de cogénération de la maison SEnergie GmbH (Stulz Hager+Elsässer Group) avec le carburant à base d'huile de colza provenant de cultures locales. Ces essais ont permis de recueillir et de représenter des valeurs d'expériences précieuses pour l'utilisation longue durée. On a constaté que le moteur optimisé pour l'utilisation avec le carburant à base d'huile de colza fonctionne sans problème sur une durée continue avec un carburant pur de ce type.

Mi-novembre 2008, le moulin à huile et la centrale de cogénération ont été remis à Peter Stähli à Suberg près de Grossaffoltern (Canton de Berne), partenaire du projet et entrepreneur agricole, pour une utilisation dans le secteur privé.

Les résultats actuels et les évolutions dans le domaine de l'approvisionnement énergétique font de ce projet de référence un modèle de niche prometteur pour une production énergétique locale en cycle largement fermé, demandant peu de capitaux.

Summary

The end of 2008 saw the successful conclusion of the CTI-Project „Rapeseed Oil Block Heat and Power Plant“ (BHKW) carried out by the Agricultural Engineering department of the Swiss College of Agriculture (SHL) and its commercial and sponsorship partners. Two lasting values remain: a small oil mill for extracting high quality rapeseed oil fuel and a modern block heat and power plant run with the locally produced oil.

The reference project was a communal effort on the part of the private sector, funding agencies, and institutes of higher education. Its main success was the exemplary extraction of rapeseed oil fit for energy purposes and its trouble-free application for diesel motors with a minimum of polluting emissions.

The operation of the Suberg research oil mill and the introduction of the process of adsorptive reduction of motor and catalytic toxins of phosphorus, magnesium and calcium in rapeseed oil mark the introduction of a model cold press system acclaimed throughout Europe for extracting high quality rapeseed oil for energy purposes (RK). With the processing of rapeseed from the Lyssbachtal, this reference project has created a niche market for local energy cycles.

In extensive test bench measurements at the HTA Biel with a series of fuels to be compared, the RK showed advantageous results when the Liebherr project motor was set in operation, at full capacity or the upper end of partial capacity. Results were also positive with regard to specific consumption (efficiency), performance, and emissions – including nanoparticles. However when idling, and when at the lower end of partial capacity, running the RK is unfavourable due to insufficiently intense combustion.

Hug Engineering AG`s SCR-Denox/DPF-Unit achieved levels below the limits of the Ordinance on Air Pollution Control (LRV) under generator conditions. In October 2008 the BHKW constructed by SEnergie GmbH (Stulz Hager+Elsässer Group) was set in operation for 559 hours using RK from locally grown rape. Here important observations for longterm operation were collected and presented. The results showed that there is no problem operating the engine optimised for RK round the clock.

The oil mill and the BHKW were delivered, as planned, to project partner and contractor, Peter Stähli in Suberg bei Grossaffoltern BE by mid-November 2008 for use in the private sector. Results so far and the expected development in the energy sector show this reference project to be a promising niche model for a local, not very capital-intensive energy supply with largely closed cycles.

Einleitung und Problemstellung

Der Ersatz der endlichen fossilen Energieträger ist unausweichlich. In einer zukünftigen nachhaltigen Energieversorgung könnten nachwachsende Rohstoffe aus der Land- und Forstwirtschaft eine wichtige Rolle spielen.

Vielversprechend als nachwachsende Rohstoffe zur mittelfristigen Ergänzung der Kraftstoffversorgung sind besonders Holz, stärke-, resp. zuckerhaltige Feldfrüchte (z.B. Zuckerrüben) und Ölkulturen (z.B. Raps).

Native Pflanzenöle bestechen durch ihre hohe Energiedichte sowie eine kompakte und unkomplizierte Anlagentechnik für ihre Gewinnung. Die Bemühungen zur Nutzung von Alternativtreibstoffen konzentrierten sich in der Schweiz aber bisher auf Raps-Methylester (RME) für den Betrieb in Fahrzeugmotoren. Verantwortlich dafür waren in erster Linie die einfache, günstige Motoradaptation bei RME-Einsatz und die politischen und marktwirtschaftlichen Rahmenbedingungen, welche Blockheizkraftwerke (BHKW) auf der Basis erneuerbarer Energien benachteiligten: keine kostendeckenden Einspeisetarife, billiges Heizöl, strengere Abgasvorschriften für Stationärmotoren (LRV) als für Fahrzeugmotoren.

Ein BHKW zeichnet sich aufgrund der Wärme-Kraft-Kopplung durch einen hohen Gesamtwirkungsgrad von bis zu 90% aus. Im Vergleich zur entkoppelten Bereitstellung von Strom und Wärme wird eine Einsparung an Primärenergie von rund 20% erreicht. Mittlerweile wird der ökologische Vorteil beim Einsatz unveränderter Pflanzenöle in umgerüsteten Dieselmotoren gegenüber der aufwändigen Umesterung erkannt.

Die Ziele des Projektes können wie folgt zusammengefasst werden:

- Aufbau einer dezentralen Ölmühle mit Kaltpressung als Referenzanlage zur Gewinnung von Rapsölkraftstoff in der erforderlichen Qualität (DIN V 51 605).
- Bereitstellung der wissenschaftlich erprobten und optimierten Technologie zur Nutzung kaltgepresster, unveränderter Pflanzenöle in einem Dieselmotor im mittleren Leistungsbereich (100 – 500 kW).
- Aufbau eines Blockheizkraftwerkes (BHKW) im mittleren Leistungsbereich, das den störungsfreien Dauerbetrieb mit unverändertem Pflanzenöl und die Emissionsgrenzwerte gemäss LRV erfüllt.

Projektbeteiligte

Die wichtigsten Projektbeteiligten und ihre Funktionen:

- Schweizerische Hochschule für Landwirtschaft, CH-3052 Zollikofen (Projektleitung, Expertise, Rapsölgewinnung, Koordination Rapsanbau)
- Hochschule für Technik und Informatik BGH-TI, AFHB, CH-2560 Nidau (Untersuchungen am Motorprüfstand)
- LAV / ETHZ, CH-8092 Zürich und combustion and flow solutions GmbH, CH-8005 Zürich (Simulation des Einspritz- und Verbrennungssystems)
- SEnergie GmbH, D-79423 Heitersheim (Aufbau BHKW)
- Liebherr Machines Bulle S. A., CH-1630 Bulle (Versuchsmotor, Sensoren, Parametrierung)
- Ölmühle Möriken GmbH (ehemals Biodrive AG), CH-5600 Lenzburg (Motorumrüstung)
- HUG Engineering, CH-8352 Elsau (Abgasnachbehandlung)
- Lohnunternehmen Peter Stähli, CH-3262 Suberg (Aufbau Ölmühle, Rapsölgewinnung, Betrieb BHKW)
- BKW FMB Energie AG, CH-3000 Bern 25 (Wirtschaftlichkeitsberechnungen)
- Landi Lyssbachtal, CH- 3054 Schüpfen (Rapsannahme und Lagerung)
- Wirtech AG, CH-3661 Uetendorf (Verfahrenstechnik, Aufbau Ölmühle)

Das Projekt wurde von folgenden öffentlichen Institutionen gefördert und finanziell unterstützt:

- Förderagentur für Innovation KTI, CH-3003 Bern
- Bundesamt für Energie BFE, CH-3003 Bern
- Bundesamt für Strassen ASTRA, CH-3003 Bern
- Amt für Umweltkoordination und Energie AUE des Kt. Bern, CH-3011 Bern

Das Projekt wurde zudem von der BKW FMB Energie AG mit einem namhaften Beitrag unterstützt.

Teil A: Gewinnung von Rapsölkraftstoff

Matthias Stettler
Martin Meyer

Schweiz. Hochschule für Landwirtschaft, Zollikofen

Zusammenfassung

Die Integration der Forschungs-Ölmühle in Suberg in die bestehenden Gebäude der landwirtschaftlichen Genossenschaft Suberg erlaubte die Nutzung der bereits vorhandenen Infrastrukturen und Räumlichkeiten zur Förderung und Lagerung von Raps und Rapsölkraftstoff (RK).

Herzstück der Anlage ist die Schneckenpresse AP 10/06 der Maschinenfabrik Reinartz, D-Neuss (Durchsatz: 100 kg Rapssaat pro Stunde), in welcher das Rapsöl im Kaltpressverfahren gewonnen wird.

Im Gegensatz zu Speiseöl, wo sensorische Ansprüche im Vordergrund stehen und Phosphor-, Kalzium- und Magnesiumgehalte keine Rolle spielen, muss RK sehr strenge Qualitätsanforderungen erfüllen, die in der Vornorm DIN V 51605 festgeschrieben sind. In der Forschungs-Ölmühle kommt deshalb eine mehrstufige Filtration mit Technik aus dem Hause PALL SeitzSchenk Filtersystems GmbH zu Einsatz.

Die Hauptfiltration besteht aus einer Kammerfilterpresse, die Feinfiltration umfasst Beutel und Kerzenfilter sowie eine Tiefenfiltration mit VELAdisc Modulfilter. Im Sommer 2007 konnte im Rahmen einer Diplomarbeit und in enger Kooperation mit dem deutschen Labor Analytik-Service Gesellschaft ASG in D-Neusäss der Frage nachgegangen werde, wieweit sich der Gehalt an unerwünschten Elementen im Rohöl durch adsorptiv wirkende Zuschlagstoffe über die nachgeschaltete Filtration weiter absenken lässt. Eine solche Variante stimmt bezüglich verfahrenstechnischer Einfachheit mit der Kaltpressung ideal überein und verteuert den Liter RK lediglich um ca. 5 Rappen. Mit der erzielten Absenkung der entscheidenden Parameter Phosphor und Erdalkali auf unter 2 mg/kg übertraf man die Erwartungen und man konnte die Optimierung der Ölausbeute angehen, die wegen befürchteten Grenzwertüberschreitungen bei P, Ca und Mg bisher nicht ausgeschöpft wurde.

Die mittlere Ölausbeute (kg Reinöl/kg Rapssaat) des verarbeiteten Inland-Rapses der Ernte 2007 (total 306 t) betrug 38.5%, was einem für Kaltpressung unüblich hohen Abpressgrad von über 80% entsprach.

Der Gesamtenergieaufwand für die Verarbeitung der Rapssaat ab Silo bis zum auslieferbereiten RK beträgt knapp 2% des Gesamtenergieinhaltes des gewonnenen Öls. Diese günstige Bilanz bestätigt die hohe prozesstechnische Energieeffizienz der dezentralen Ölgewinnung mit Kaltpressung.

Die Investitionskosten für die ausgereifte Klein-Anlage, die täglich 2,5 Tonnen Raps zu rund 830 l RK und 1'650 kg Rapskuchen verarbeiten kann, beliefen sich auf rund CHF 240'000.--.

Résumé

L'intégration du moulin à huile expérimental à Suberg dans les bâtiments existants de la coopérative agricole Suberg a permis d'utiliser l'infrastructure et les locaux existants pour la production et le stockage du colza et du carburant.

L'élément central de l'installation est constitué par la presse à vis AP 10/06 de la Maschinenfabrik Reinartz, D-Neuss (débit: 100 kg de colza par heure) qui permet de produire de l'huile de colza par pression à froid.

Contrairement à l'huile de consommation pour laquelle les aspects sensoriels sont importants et non pas les teneurs en phosphore, calcium et magnésium, le carburant à base d'huile de colza doit respecter les exigences de qualité très sévères prescrites par la prénorme DIN V 51605. C'est pourquoi le moulin à huile expérimental utilise une méthode de filtration à plusieurs niveaux développée par la maison PALL SeitzSchenk Filtersystems GmbH.

La filtration principale s'effectue par un filtre-presses cellulaire. La filtration fine est assurée par des filtres à sac et des filtres en forme de bougie ainsi que par une filtration en profondeur au moyen d'un filtre modulaire VELAdisc.

En été 2007, un travail de diplôme a pu être réalisé en étroite coopération avec le laboratoire allemand Analytik-Service Gesellschaft ASG à Neusäss et a permis d'examiner dans quelle mesure la teneur en éléments inopportuns dans l'huile brute peut être réduite par la filtration placée en aval et l'addition de substances à effet d'adsorption. Cette variante est simple techniquement et parfaitement compatible avec la pression à froid. Elle se traduit par une augmentation de seulement 5 centimes du prix du litre de carburant à base d'huile de colza. Grâce à la réduction des paramètres déterminants que sont les teneurs en phosphore et en métaux alcalino-terreux à un niveau inférieur à 2 mg/kg, on a dépassé les attentes et pu optimiser la production d'huile de colza, ce que l'on n'avait pas fait jusque-là par crainte que les teneurs en P, Ca, Mg ne dépassent les valeurs limites.

La production moyenne d'huile (kg d'huile pure/kg de colza) à partir du colza suisse récolté en 2007 (306 t au total) s'élevait à 38.5%, ce qui correspondait à un taux d'extraction extraordinairement élevé pour la pression à froid (plus de 80%).

L'énergie totale nécessaire pour le traitement du colza, du silo jusqu'au carburant prêt à utilisation, s'élève à presque 2% de la teneur énergétique totale de l'huile produite. Ce bilan favorable confirme l'efficacité énergétique élevée des processus techniques nécessaires à la production décentralisée d'huile par pression à froid.

Les coûts d'investissements nécessaires pour la petite installation perfectionnée permettant de produire environ 830 l de carburant et 1650 kg de tourteaux par jour sur la base 2,5 tonnes de colza se montaient à environ CHF 240'000.-.

Summary

Thanks to the integration of the research oil mill in the agricultural cooperative building in Suberg, existing infrastructures and premises could be used for the extraction and storage of rapeseed and rapeseed oil fuel (RK).

The heart of the unit is the screw press AP 10/06 manufactured by Reinartz, D-Neuss (Capacity: 100 kg rapeseed per hour) which extracts cold pressed rapeseed oil.

In contrast to cooking oil, where sensory requirements are most important and where the presence of phosphorus, calcium and magnesium do not matter, RK must meet very strict requirements of quality, as set down in the DIN V 51605 standards. That is why the research oil mill employs multi-step filtration using PALL SeitzSchenk Filter-systems GmbH technology.

The main filtration takes place in a chamber filter press. The fine filtration consists of a bag and cartridge filter, and a deep filter using a VELAdisc module filter. In summer 2007, we evaluated how far the content of undesirable elements in crude oil can be further reduced via adsorptive additives in downstream filtration. The work was carried in the framework of a diploma thesis, and in close cooperation with the German laboratory, Analytik-Service Gesellschaft ASG in D-Neusäss. Thanks to its technical simplicity such an option would fit very well with the cold press extraction, and would only increase the price per litre of RK by about 5 centimes. With the successful reduction of the decisive parameters of phosphorus and earth alkali to less than 2 mg/kg, all expectations were exceeded, and it was possible to tackle the problem of optimising the oil yield. This had not yet been fully exploited for fear of exceeding limits of P, Ca and Mg.

The average oil yield (kg pure oil/kg rapeseed) of the processed domestic rapeseed of the 2007 harvest (total 306 t) amounted to 38.5%, which corresponded to over 80%, an unusually high rate for cold pressing.

The entire energy expenditure for the processing of the rapeseed from silo to "ready for delivery RK" amounted to barely 2% of the overall energy content of the extracted oil. This favourable result confirms the energy efficiency of decentralised cold press oil extraction.

Investment costs for the fully developed Small-Unit, with a daily capacity to process 2.5 tons of rapeseed to about 830 l RK and 1'650 kg canola meal, amount to approximately CHF 240'000.--.

1 Grundlagen der Ölgewinnung

1.1 Anatomie der Rapssaat

Die Raster-Elektronen-Mikroskop-Aufnahme (Abb. 1) zeigt einen Schnitt durch ein Rapskorn. Der Durchmesser eines Kornes beträgt rund 1 mm (1000µm). Gut zu erkennen ist die Saathülle mit einer Schichtdicke von 50 µm, welche das Parenchym (Kernfleisch) mit dem Embryo umschliesst. Der Embryo besteht aus der Keimwurzel und zwei Keimblättern, wobei das innere Keimblatt vom äusseren umschlossen wird. Die gekrümmte Keimwurzel liegt seitlich zwischen den Keimblättern.



Abbildung 1: REM-Schnitt durch ein Rapskorn (Rass 2001).

Die Zellwände der lipidhaltigen Parenchymzellen ähneln der feinen Struktur eines Gitters. Sie bestehen aus einer primären, pektinhaltigen und aus einer sekundären, zellulosehaltigen Schicht. Um die Rapskörner entölen zu können, müssen durch Druckausübung die Zellwände aufgebrochen und das Öl herausgepresst werden.

1.2 Prinzip der Ölpresung

Ein wichtiger Durchbruch zur effizienten Entölung von Ölsaaten gelang im Jahre 1903 dem Amerikaner V. D. Anderson mit der Seiherschneckenpresse. Die Pressschnecke ist das Kernstück der Presse, sie wird mittels Elektromotor und Reduktionsgetriebe angetrieben. Die Schnecke dreht sich in einem Zylinder aus eng aneinander liegenden Stäben, dem sogenannten Seiher. Durch Verkleinerung des Pressvolumens zwischen Schnecke und Seiher und der Steigung der Schneckenwindungen wird die Saat komprimiert und entölt (Abb. 2).

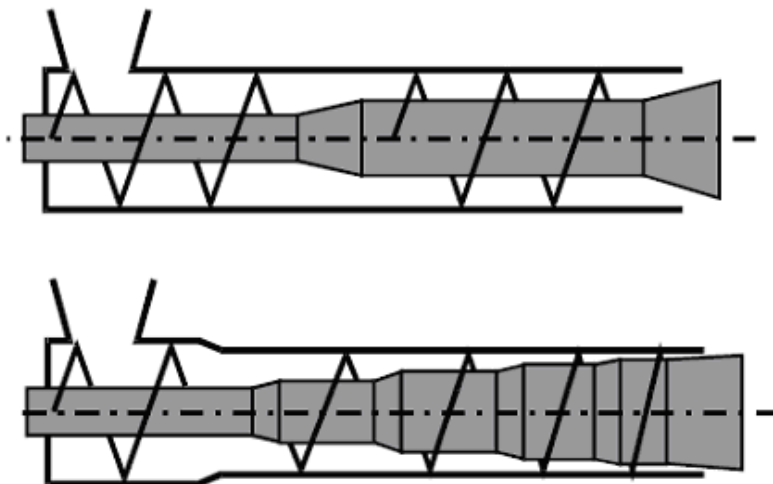


Abbildung 2: Konstruktion von Rapspressen im Schnitt (Pressgut wird von links nach rechts abgepresst). Oben die erste industrielle Bauform von 1904 der V. D Anderson Company in Cleveland, Ohio, USA. Unten eine moderne Presskonstruktion (Schein 2003).

Um ein leichtes Abfließen des Öls zu gewährleisten, nimmt die Komprimierung vom Einzug zum Auslauf auf den maximalen Druck von bis zu 3000 bar zu und wird von Entlastungsphasen unterbrochen. Wird das Druckoptimum beim Auspressen überschritten, kann der Kapillardurchmesser der Ölsaart so stark verkleinert werden, dass der Ölausfluss behindert wird. Fehlen ausreichende Entlastungsphasen, so werden die Drainage und der Ölabfluss beeinträchtigt. Im Erfolg dieser sehr anspruchsvollen Auslegung ergeben sich denn auch wesentliche Unterschiede zwischen den verschiedenen Anbietern. Die hohe Kunst des Kaltpressens ist die saatabhängige Einstellung der Anlage mit dem Ziel einer möglichst hohen Ölausbeute, aber gleichzeitiger Erhaltung einer ausreichenden Kapillarkapazität im Komprimat, um den ungehinderten Ölabfluss sicherzustellen.

Die Verdichtung kommt zustande, weil das Pressgut erstens in axialer Richtung von Position 1 nach Position 2 transportiert wird und zweitens das Öl (und die Luft) durch die spaltförmigen Öffnungen im Seiher aus dem Pressgut austreten können (Abb. 3).

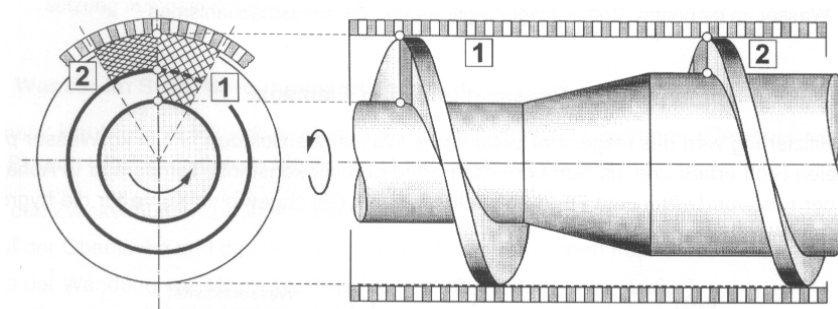


Abbildung 3: Links die Kompression durch Verringerung des Pressvolumens von Zustand 1 nach 2 und rechts der damit verbundene axiale Transport von Pos. 1 nach 2 (Schneider 1999).

Bereits Anderson erkannte, dass mit auf Keil – also leicht schräg - gestellten Seiherstäben eine Rotation des Pressgutes verhindert und die gewünschte Kompression mittels axialem Transport erreicht werden kann. Der Ölabfluss geschieht über die Spalten zwischen den Seiherstäben.

Ein richtig konstruierter Seiher muss also die Bedingung erfüllen, dass die Reibungskraft zwischen Pressgut und Seiher (F_{RS}) grösser ist als die Reibungskraft zwischen Pressgut und Schnecke (F_{RH}) (Abb. 4).

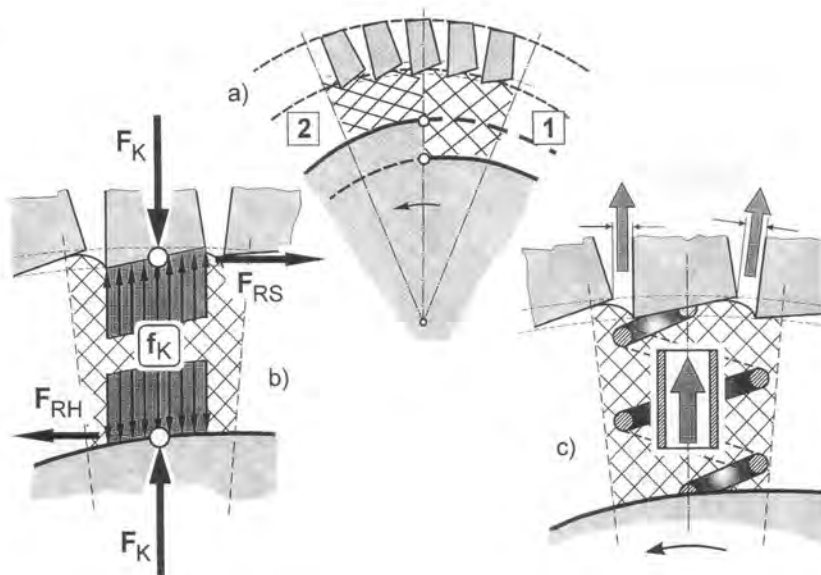


Abbildung 4: Bedingungen für das Funktionieren einer Seiherschneckenpresse im Detail: a) Kompression durch Verengung des Pressraumes von 1 nach 2, b) hohe Reibung am Seihers dank schräg gestellten Stäben zur Verhinderung einer Pressgutrotation, c) Drainage des Öls durch die Seiherspalt während der Entlastungsphase (Schneider 1999).

Die Durchsatzleistungen (kg/h) von Schneckenpressen sind sehr verschieden und abhängig von der Pressraumdimensionierung (Durchmesser Seiherkorb und Schnecke, Länge des Pressraumes), der Schneckengeometrie und der Schneckendrehzahl (Verweildauer des Pressgutes im Pressraum). Für kleine Leistungen (< 100 kg Saatedurchsatz/h) kann der Zylinder auch mit radialen Bohrungen anstelle eines Seihers ausgeformt werden (Lochsneckenpressen).

Im Gegensatz zur Raffination erfolgen bei der Kaltpressung weder eine hohe Erhitzung des Pressgutes, noch eine anschließende Extraktion des Restöls aus dem Presskuchen. Die unmittelbar nach Seihersabfluss gemessene Öltemperatur darf maximal 50° C erreichen. Der erwartete Abpressgrad bei der Kaltpressung von Rapssaat liegt im Durchschnitt bei 80 % (vgl. Kap. 4.1).

Ein hoher Abpressgrad (kg Öl/kg Pressgut) wird erreicht dank:

- ausgereifter Konstruktion (Schneckengeometrie, Seihersstabgeometrie, Pressraumgeometrie)
- richtig abgestimmtem Ablauf von Druck- und Entlastungszyklen im Pressraum (Zufuhrmenge, Schneckendrehzahl, Presskopfgeometrie)
- gut eingestellter Verweildauer des Pressgutes im Pressraum (Zufuhrmenge, Schneckengeometrie und -drehzahl)
- angepasster Prozesstemperatur
- korrekter Pressgutbehandlung (Reifegrad, Wassergehalt, Lagerung)

1.3 Prinzipien der Ölfiltration

Die Reinigung des Trüböls, das nach der Pressung 2 bis 4 Volumenprozent an Trübstoffen enthält, geschieht in dezentralen Ölmühlen in der Regel mit einer mehrstufigen Filtration. Dabei unterscheidet man zwischen Hauptfiltration und Feinfiltration. Mit der Hauptfiltration wird der grösste Teil der Feststoffe - über 99% - aus dem Öl entfernt. Die nachfolgende Feinfiltration soll eine möglichst hohe Reinheit des Öls und die Erfüllung der Mindestanforderungen der Ölqualitätsnormen sicherstellen, die für Pflanzenölkraftstoffe wesentlich strengere Mindestanforderungen verlangen, als etwa für Speiseöl.

Für die Hauptfiltration verwendet man vorwiegend die kuchenbildende Filtration, für die Feinfiltration Beutel-, Kerzen- und Tiefenfilter.

Hauptfiltration: Kuchenbildende Filtration

Bei der kuchenbildenden Filtration werden die Feststoffe in der Suspension unter der Wirkung eines Druckgefälles an einem perforierten Filtermittel (z.B. Gewebe, Vlies) zurückgehalten. Sie bilden dabei Brücken und wachsen zu einem Filterkuchen an, der die eigentliche Funktion des Filtermittels übernimmt (Abb. 5). Mit wachsender Filterkuchendicke nimmt die Filtrationsgüte zu, die Durchströmleistung - bei gleich bleibendem Druck - hingegen ab. Um ein schnelles Verstopfen des Filtermaterials zu vermeiden, wird der Porendurchmesser des Filters grösser gewählt, als der Durchmesser der Partikel, die zurückgehalten werden sollen. Deshalb gelangen zu Beginn des Filtrationsvorganges, in der sogenannten Anschwemmphase, so lange feinere Trubanteile zurück in das Filtrat, bis sich über dem Filtermittel stabile Brücken aus den Feststoffpartikeln gebildet haben. Zur Verbesserung der Brückenbildung können Filterhilfsmittel, z.B. Cellulosepräparate wie Filtracel, eingesetzt werden. Ist die maximale Filterkuchendicke erreicht, muss der Filtrationsprozess unterbrochen und der Filterkuchen entfernt werden (Chargensystem). Neben manuellen Systemen bietet der Markt auch solche mit automatisierter, elektro-pneumatischer Regeneration an, wie z.B. den Vertikal-Druckkerzenfilter des Herstellers Amafilter.

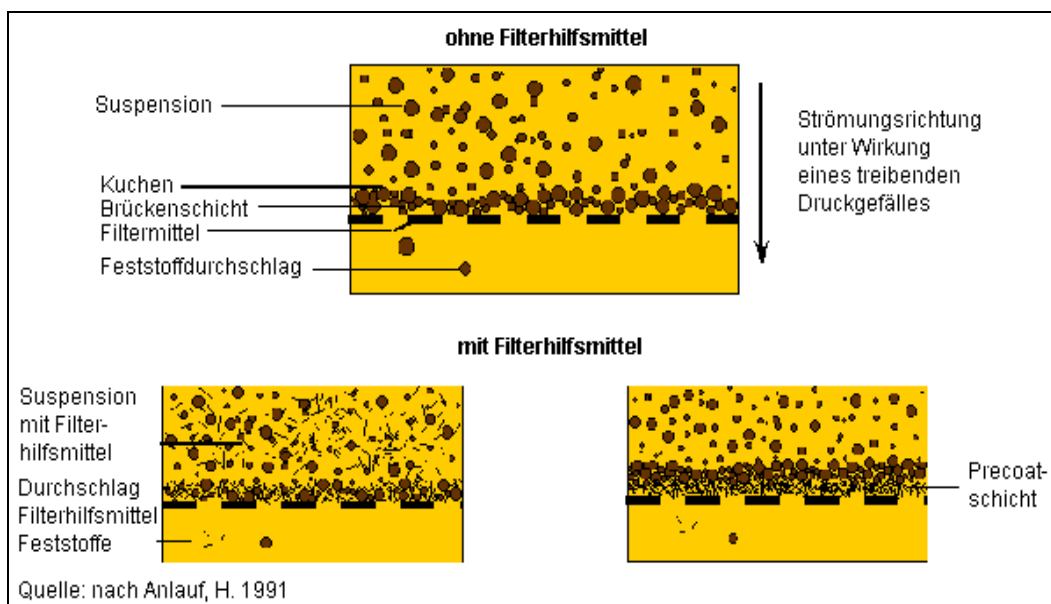


Abbildung 5: Funktionsprinzip der kuchenbildenden Filtration (Hauptfiltration).

Feinfiltration: Tiefenfiltration

Die Tiefenfiltration bedient sich poröser Filtermittelschichten, in deren Innern sich die Trubstoffe festsetzen (Abb. 6). Die Filtermittelschichten bestehen in der Regel aus maschinell gefertigter Pappe, z.B. aus Zellstoffen. Die Tiefenfilterschicht kann sich nicht selbst regenerieren. Sobald ihre innere Oberfläche belegt ist, bzw. wenn die Druckdifferenz zu gross wird, müssen die Elemente ausgetauscht werden.

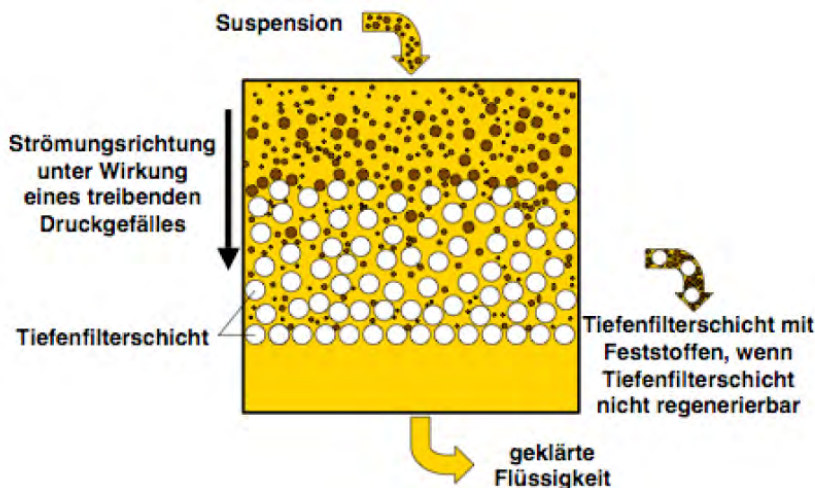


Abbildung 6: Funktionsprinzip der Tiefenfiltration (Remmele, 2002).

1.4 Anforderungen an die Qualität von Rapsölkraftstoff

Die Vornorm DIN V 51 605

Bereits seit den 90er Jahren wird unter Federführung des Technologie- und Förderzentrums TFZ in D-Straubing und in Zusammenarbeit mit dem Labor ASG Analytik-Service Gesellschaft in D-Neusäss an den Qualitätsanforderungen für Rapsölkraftstoff für den störungsfreien und umweltfreundlichen Betrieb in pflanzenötauglichen Motoren geforscht. Die Mindestanforderungen wurden zuerst im "Qualitätsstandard für Rapsöl als Kraftstoff 5/2000" zusammengefasst, der als „Weihenstephaner Norm“ bekannt ist. Auf Basis dieses Qualitätsstandards wurde ab 2003 in einer Arbeitsgruppe des Fachausschusses Mineralöl- und Brennstoffnormung die Vornorm DIN V 51'605 "Rapsölkraftstoff - Anforderungen und Prüfverfahren" erarbeitet (Tab. 1).

Tabelle 1: Vornorm DIN 51605 für Rapsölkraftstoff, Grenzwerte und Prüfverfahren.

Eigenschaften / Inhaltsstoffe	Einheiten	Grenzwerte		Prüfverfahren
		min.	max.	
für Rapsöl charakteristische Eigenschaften:				
Visuelle Begutachtung		Frei von sichtbaren Verunreinigungen und Sedimenten sowie freiem Wasser		
Dichte (15 °C)	kg/m ³	900	930	DIN EN ISO 3675 oder DIN EN ISO 12185
Flammpunkt nach P.-M.	°C	220		DIN EN 2719
Heizwert	kJ/kg	36'000		DIN 51900-1, -2, -3
Kinematische Viskosität (40 °C)	mm ² /s		36	DIN EN ISO 3104
Zündwilligkeit (Cetanzahl)		39		IP 498
Koksrückstände	%		0.40	DIN EN ISO 10370
Jodzahl	g/100 g	95	125	DIN EN 14111
Schwefelgehalt	mg/kg		10	DIN EN ISO 20884 oder DIN EN ISO 20846
variable Qualitätseigenschaften:				
Gesamtverschmutzung	mg/kg		24	DIN EN 12662
Säurezahl (Neutralisationszahl)	mg KOH/g		2.0	DIN EN 14104
Oxidationsstabilität (110 °C)	h	6.0		DIN EN 14112
Phosphorgehalt	mg/kg		12	DIN EN 14107
Aschegehalt (Oxidasche)	%		0.01	DIN EN ISO 6245
Wassergehalt	%		0.075	DIN EN ISO 12937
Summengehalt an Magnesium und Calcium	mg/kg		20	E DIN EN 14538

Erläuterungen zu den Kennwerten

(In Anlehnung an: Widmann B., Remmele E., 2008. "Gelbes Heft" Nr. 69, Bayerisches Staatsministerium für Landwirtschaft und Forsten, D-München.)

Dichte

Dichte ist die Masse eines Kraftstoffvolumens bei einer bestimmten Temperatur. Anhand der Dichte lassen sich Pflanzenölkraftstoffe voneinander unterscheiden. Rapsöl hat eine rund 10% höhere Dichte als Dieselöl.

Flammpunkt

Der Flammpunkt ist die gemessene Temperatur, bei der sich die in einem geschlossenen Gefäß bildenden Dämpfe entzünden lassen. Er dient der Einstufung von Flüssigkeiten in Gefahrenklassen. Entsprechend der Gefahrenklasse müssen Sicherheitsvorkehrungen für Lagerung und Transport getroffen werden. Bereits geringfügige Mischungen verschiedener Kraftstoffe haben Abweichungen vom charakteristischen Flammpunkt zur Folge.

Heizwert

Der spezifische Heizwert (frühere Bezeichnung: unterer Heizwert) entspricht der bei vollständiger Verbrennung einer bestimmten Masse freigesetzten, nutzbaren Wärmemenge, (ohne die im entstehenden Wasserdampf gebundene Wärme). Die Messung erfolgt im Bombenkalorimeter. Rapsöl hat mit 37.5 MJ/kg einen rund 13 % tieferen Heizwert als Dieselöl, der indessen über die höhere Dichte weitgehend kompensiert wird.

Kinematische Viskosität

Die Viskosität ist ein Maß für die Fließwilligkeit einer Flüssigkeit. Mit dem Viskosimeter wird die Zeit gemessen, die eine Probemenge bei einer bestimmten Temperatur benötigt, um durch eine definierte Kapillare zu fließen. Die Viskosität eines Kraftstoffs nimmt Einfluss auf das Förderverhalten und die Zerstäubung des Kraftstoffes an den Einspritzdüsen und ist in hohem Masse temperatur- und druckabhängig. Dies ist besonders bei den vorherrschenden hohen Drücken in modernen Einspritzsystemen zu berücksichtigen. Hohe Viskositäten führen durch das verschlechterte Fließ-, Pump- und Zerstäubungsverhalten zu Kaltstartproblemen. Rapsöl hat unterhalb von 70 °C eine deutlich höhere kinetische Viskosität als Dieselöl.

Zündwilligkeit (Cetanzahl)

Die Bestimmung erfolgt nach dem Prinzip der dieselmotorischen Verbrennung. Bei der Messung wird der zu prüfende Kraftstoff in eine Verbrennungskammer mit konstantem Volumen, in der sich komprimierte und erhitzte Luft befindet, eingespritzt. Der Kraftstoff zündet und verbrennt. Über den Zeitpunkt der Einspritzung und den Zeitpunkt des Druckanstiegs in der Verbrennungskammer wird der Zündverzug und somit die Zündwilligkeit ermittelt. Rapsöl hat eine tiefere Zündwilligkeit als Dieselöl, die es allerdings mit einem Anteil von rund 12.5 Massenprozent Sauerstoff teilweise wieder wettmacht.

Koksrückstände

Bei Rapsöl erfolgt die Bestimmung des Koksrückstandes an der Gesamtprobe. Dabei wird die Verbrennung von Kraftstoff an einer Oberfläche ohne Sauerstoff simuliert. Der Koksrückstand besteht aus organischen und anorganischen Bestandteilen und ist ein Maß für die Verkokungsneigung des Kraftstoffs an den Einspritzdüsen und Rückstandsbildung im Verbrennungsraum. Da Rapsölkraftstoff nicht raffiniert wird, sind seine Verbrennungsrückstände im Kaltstart- und Warmlaufbetrieb höher als im Betrieb mit Dieselkraftstoff.

Jodzahl

Die Jodzahl ist ein Mass für die Anzahl Doppelbindungen der Fettsäuremoleküle. Der Kennwert gibt an, wie viele Gramm Jod von 100 g Pflanzenöl oder Fettsäuren gebunden werden. Die Bestimmung der Jodzahl erfolgt durch Titration. Je niedriger die Jodzahl ist, desto höher ist der Sättigungsgrad der Moleküle. Die Jodzahl ist ein charakteristisches Merkmal für unterschiedliche Pflanzenölkraftstoffe. Sie gibt Aufschluss über die Neigung zu Ablagerungen im Brennraum und an Einspritzdüsen bei der motorischen Verbrennung. Ein zunehmender Anteil an ungesättigten Fettsäuren ist ausserdem ein Hinweis auf erhöhte Polymerisationsgefahr des Motorenöls durch Pflanzenöleintrag. Schliesslich lässt sich von der Jodzahl die Oxidationsneigung während der Lagerung ableiten.

Schwefelgehalt

Rapsöl weist von Natur aus einen geringen Schwefelgehalt auf, der jedoch beim Ölsaatenanbau über die Schwefeldüngung beeinflusst wird. Bei der Kraftstoffverbrennung werden mehr als 95 % des Schwefels zu SO_2 umgesetzt. Der verbleibende Schwefel wird an Partikel angelagert. Im Oxidationskatalysator steigt in Abhängigkeit von Katalysatortyp und Katalysatortemperatur der Anteil des Schwefels der zu SO_3 umgesetzt wird. Aus SO_3 und Wasserdampf bilden sich Schwefelsäuretröpfchen, die sich am Russ anlagern und zur Erhöhung der Gesamtpartikelmasse führen. Schwefelverbindungen können sich an die katalytisch aktive Seite des Katalysators anlagern und bewirken dadurch eine irreversible Verminderung der Konvertierungsleistung.

Gesamtverschmutzung

Die Gesamtverschmutzung ist der Masseanteil ungelöster Fremdstoffe (Partikel) im Kraftstoff. Die Bestimmung erfolgt durch Filtration der Probe über eine Membran mit einer mittleren Porenweite von $0.8 \mu\text{m}$. Der Rückstand wird mit Lösungsmitteln gewaschen, anschliessend getrocknet und gewogen. Hohe Fremdstoffgehalte führen zu Filterverstopfungen, Verstopfungen von Einspritzdüsen und können Ursache sein für Verschleiss an Einspritzpumpe und -düsen sowie Ablagerungen im Verbrennungsraum.

Säurezahl (Neutralisationszahl)

Die Säurezahl ist ein Mass für den Gehalt an freien Fettsäuren im Rapsöl und beschreibt die Menge Kaliumhydroxid (Kalilauge), die für die Neutralisation der freien Fettsäuren erforderlich ist. Die Säurezahl ist stark vom Alterungsgrad eines Öls abhängig. Durch Wasser im Öl sowie Mikroorganismen und Enzyme kann eine hydrolytische Spaltung der Triglyceride auftreten und zu einem Anstieg der Neutralisationszahl führen. Saure Verbindungen im Kraftstoff führen zu Korrosion, Verschleiss und Rückstandsbildung im Motor. Freie Fettsäuren können ausserdem mit basischen Komponenten des Motorenöls reagieren.

Oxidationsstabilität

Bei der Lagerung von Rapsölkraftstoffen können Oxidations- und Polymerisationsvorgänge einsetzen. Mögliche Folgen sind die Bildung unlöslicher Verbindungen und dadurch verursachte Filterverstopfungen. Ausserdem können zwischen dem gealterten Rapsöl und dem Motorenöl Wechselwirkungen auftreten. Die Oxidationsstabilität von Rapsölkraftstoffen wird bestimmt, indem bei konstanter Temperatur in einem geschlossenen Gefäss ein gereinigter Luftstrom durch die Kraftstoffprobe geleitet wird. Die freiwerdenden flüchtigen Zersetzungsprodukte werden in ein Gefäss mit destilliertem Wasser überführt, in dem die Leitfähigkeit gemessen wird. Der Messwert für die Oxidationsstabilität repräsentiert das Ende der Induktionsperiode, nach der es zu einem schnellen Anstieg der Leitfähigkeit kommt. Die Oxidationsstabilität ist ein Kennwert, der den Alterungszustand und zugleich die Lagerfähigkeit von Rapsöl beschreibt.

Phosphorgehalt

Phosphor liegt in Rapsöl in Form von Phospholipiden - vor allem Lecithinen - vor. Mit steigendem Anteil an Phospholipiden verringert sich die Oxidationsstabilität, ausserdem neigen die Phospholipide zur Hydratisierung (Quellung in Wasser) und können dadurch zum Beispiel Filterverstopfungen hervorrufen. Phosphor senkt die Verbrennungstemperatur, fördert die Bildung von Ablagerungen im Brennraum und ist möglicherweise für Veränderungen im Emissionsverhalten mitverantwortlich. Eine hohe Empfindlichkeit gegenüber Phosphorverbindungen weisen Oxidationskatalysatoren aus. Phosphor ist ein Katalysatorgift, mit starkem Einfluss auf Umsetzungsrate bzw. Dauerfunktion. Saubere Saat und die sorgfältige Einhaltung der bekannten Eckparameter in der Prozessführung helfen die Phosphorgehalte in kaltgepressten Rapsölen niedrig zu halten. Mit adsorptiven Hilfsmitteln und einer guten Filtrationsanlage lassen sich diese weitgehend eliminieren.

Aschegehalt (Oxidaschegehalt)

Der Aschegehalt beschreibt den Anteil anorganischer Feststoffe im Kraftstoff. Hohe Aschegehalte können zum Beispiel durch Eintrag von Staub in den Kraftstoff verursacht werden. Mit zunehmendem Aschegehalt steigt die Gefahr von Verschleiss an der Einspritzpumpe, an den Einspritzdüsen und von Ablagerungen im Brennraum. Im Weiteren bedeutet Asche stets auch eine zusätzliche Belastung der Dieselpartikelfilter.

Wassergehalt

Der Wassergehalt im Rapsöl wird hauptsächlich durch die Saatfeuchte beeinflusst. Eine Wasserkontamination ist bei allen Kraftstoffen während dem Transport und durch unsachgemässe Lagerung - etwa bei Kondenswasserbildung - möglich. Bei niedrigen Temperaturen kann Wasser durch Kristallbildung Filterverstopfung mit begünstigen. In modernen Einspritzsystemen besteht die Gefahr, dass es durch die vorherrschenden hohen Drücke zum Austreten von freiem Wasser und zu Schäden im Einspritzsystem kommt. An der Grenzschicht zwischen freiem Wasser und Kraftstoff können Mikroorganismen wachsen und Ursache für Filterverstopfungen werden. Mikroorganismen beschleunigen zudem die Ölalterung. Generell ist korrekt in die Verbrennung eingebrachtes Wasser nicht von Nachteil. Der Einsatz von Kraftstoff-Wasser-Emulsionen, wie er etwa für Stationär-, Schiffs- und Lokomotivbetrieb propagiert wird, erlaubte eine wirksame Reduktion der Stickoxid und Rußemissionen. Eine ganze Reihe verschiedener Probleme - nicht zuletzt der durch den erforderlichen Emulgator höhere Kraftstoffpreis - hat einen Einsatz von Diesel/Wasser-Emulsionskraftstoffen bisher weitestgehend verhindert.

Summengehalt an Magnesium und Calcium

Magnesium und Calcium sind in ihren Eigenschaften dem Phosphor sehr ähnlich, begünstigen Ablagerungen im Brennraum, wirken als Katalysatorgift und stellen als Aschebildner eine Belastung der Dieselpartikelfilter dar. Zwischen diesen drei Elementen sind gemäss den Untersuchungen von Remmele et al. (2003) lineare Zusammenhänge zu vermuten. Ein wichtiger Hinweis, dass verfahrenstechnische Massnahmen, die auf eine Reduktion des Phosphorgehaltes abzielen, ebenfalls für Magnesium und Calcium wirksam sind.

Erfreulicherweise schreitet der standardmässige Einsatz des Dieselpartikelfilters ab Werk auch in der Landtechnik voran. Wir gehen davon aus, dass die Nutzung von Rapsölkraftstoff in mit DPF ausgerüsteten Motoren eine weitere Absenkung des Gehaltes an Phosphor und Erdalkali voraussetzt und in der schlussendlichen Norm DIN 51'605 eine entsprechende Anpassung der Grenzwerte berücksichtigt wird.

2 Die Forschungsanlage in Suberg

2.1 Überblick

Abbildungen 9 und 10 sind Visualisierungen des Steuerungsinterfaces und zeigen den schematischen Aufbau der aus dem Projekt entstandenen Forschungs-Ölmühle in Suberg. Die Anlage konnte 2006 im Rahmen eines Mietverhältnisses in die bestehenden Gebäude der Landi Suberg integriert und bereits vorhandene Infrastrukturen zur Rapslagerung und Förderung genutzt werden. 2008 entschied sich die Landi Lyssbachtal zur Verstärkung des Standortes Schüpfen und zum Verkauf ihrer Liegenschaft in Suberg. Als Glücksfall für die Zeit nach Projektabschluss ist diese mittlerweile in den Besitz von Projektpartner Peter Stähli übergegangen.

Die Rapssaat gelangt aus dem Lagersilo via Becherelevator in das 3. OG. Dort wird sie über einen elektropneumatisch gesteuerten Klappenkasten auf die raumquerende Trogschnecke geführt, die das Tagesdepot im 2. OG befüllt. Zwischen Auslauf Trogschnecke und Einlauf Tagesdepot ist zum Schutz der Anlage ein Permanentmagnet eingebaut, der Metallteile zurückhält, die namentlich in der Presse teure Schäden anrichten würden. Das Tagesdepot fasst rund 2500 kg und ist mit je einem Voll- und Leermelder ausgerüstet.

Ebenfalls im 2. Obergeschoss sind die beiden Ventilatoren und der Zyklon der Aspiration für das Speisedepot und den Kuchenaustrag untergebracht.

Die Hauptelemente der Anlage stehen im 1. OG. Sie umfassen Schneckenpresse, Haupt- und Feinfiltration, Transportschnecken für Press- und Filterkuchen, Austragsschleuse für den Zyklon im 2. OG, den Steuerschrank und die Befüllstation für die Container, resp. die Ölleitung zum Erdtank (Abb. 7).



Abbildung 7: Die Kernelemente der Ölmühle im 1. OG: Kammerfilterpresse (links), Rapspresse und Pressenspeisung (hinten), IBC-Container mit Pumpe, Steuerschrank und Feinfilter (rechts).

An der Decke des 1. OG, ist das Speisedepot für die Ölpresse angebracht. Seine Belüftung geschieht über einen ansaugseitigen elektrischen Luftherhitzer, der via Steuerung nach Bedarf zur Vorwärmung der Saat eingesetzt wird. Der Erhitzer wurde aus versuchs-

technischen Gründen elektrisch ausgeführt, obwohl bei der Rapspressung Prozesswärme entsteht, die als Warmluft genutzt werden könnte. Die exakte Regulierung der Temperatur ab Steuerung liess sich indessen elektrisch am einfachsten realisieren. Das Bedürfnis zur Vorwärmung der Rapssaat tritt vor allem im Winter auf. Einem späteren Umbau zur Nutzung einer günstigeren Wärmequelle steht vom Platzbedarf her nichts im Weg (Abb. 8).



Abbildung 8: Die Presse (unten), mit beheizbarem Speisedepot und Dosierschnecke (oben und rechts).

Die Saatterperierung muss sehr überlegt eingesetzt werden. Sie entspricht in jedem Fall einem Kompromiss zwischen erleichterter Entölung und ansteigendem Gehalt der unerwünschten Elemente Phosphor und Erdalkalien.

Eine Dosierschnecke mit stufenlos variabler Drehzahl führt den Raps aus dem Speisedepot zur Presse und erlaubt die genaue Einstellung der Beschickung. Über die gleiche Technik der Frequenzumformung wird die Drehzahl des Antriebsmotors der Seierschneckenpresse gesteuert. Mit Saatvorwärmung und stufenloser Wahl der Drehzahlen von Dosierapparat und Pressschnecke sind wir in der Lage, Verweildauer des Pressgutes und damit Abpressgrad und Durchsatz sowie Presstemperatur und Ölqualität zu beeinflussen sowie Schwankungen in der Rohstoffqualität wirksam auszugleichen. Das erfolgreiche Spiel auf dieser Klaviatur erfordert indessen viel Erfahrung. Erfolgreicher Ölmüller wird man nicht im ersten Jahr! Ab Schneckenpresse fließt das Öl direkt in den Rohöltank im EG. Ein Rührwerk hält die Trubstoffe in Schwebe, damit sich diese nicht auf dem Tankboden absetzen und später in Leitungen und Ventilen der Filtrationsanlage Verstopfungen verursachen.

Der Presskuchen verlässt den Pressenausgang durch eine Lochmatrize und wird so zu kleinen, wurstchenförmigen Pellets geformt. Wir unterdrücken damit Staubbildung, entlasten die im Gegenstrom über die erste Presskuchenschnecke geführte Aspiration und verbessern Kühlung und Trocknung während der Förderung über die beiden Transportschnecken zur ausserhalb des Gebäudes aufgestellten Hakenmulde.

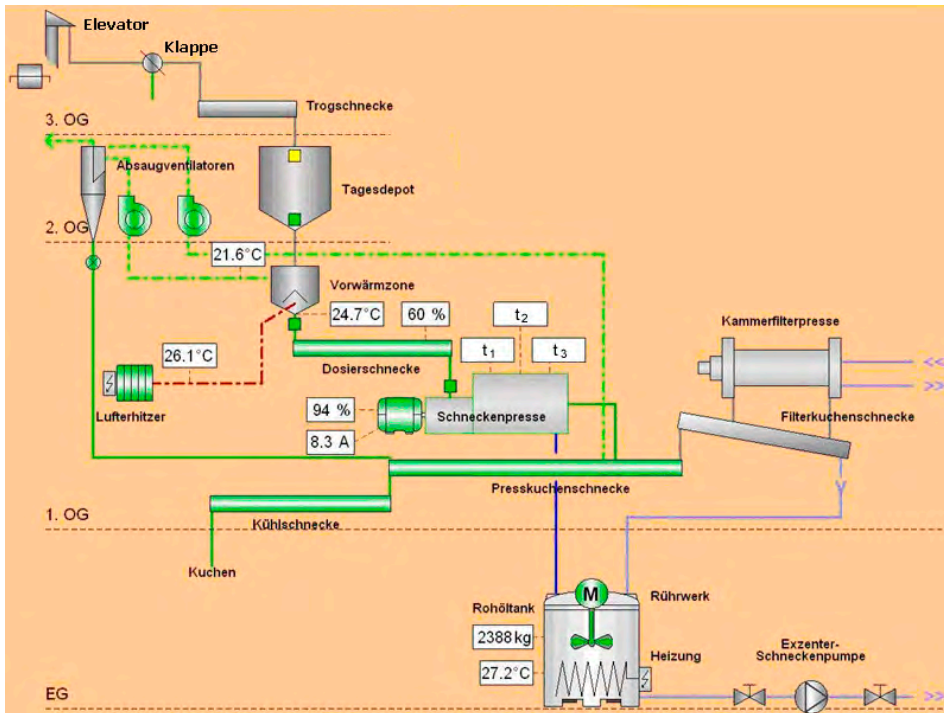


Abbildung 9: Diagramm der Ölmühle Suberg (Pressung).

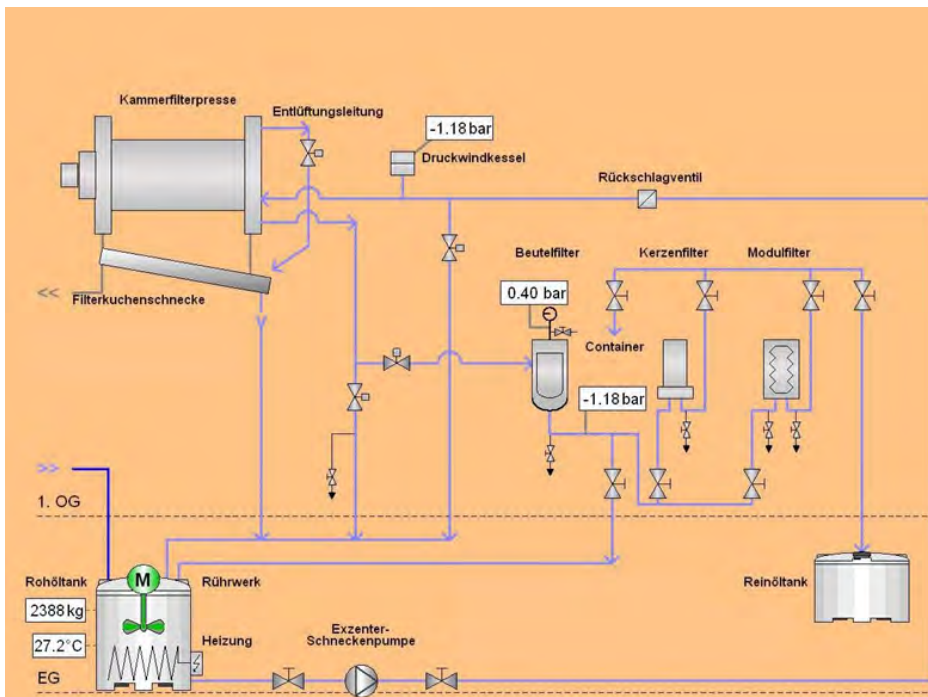


Abbildung 10: Diagramm der Ölmühle Suberg (Filtration).

Nach der Pressung muss das Rohöl in mehreren Filtrationschritten auf das sehr hohe Reinheitsniveau von maximal 24 mg Restverschmutzung pro kg Reinöl gebracht werden. Das Rohöl gelangt vom Tank über eine Exzenter-schneckenpumpe in die Kammerfilterpresse. Hier werden unter einem Druck von rund 10 bar über 95 % der Trubanteile abgetrennt. Das Öl läuft dann mit wenigem Druck noch über ein Sicherheitsfilter (Beutelfilter) und die abschließende Feinfiltration (Kerzen- und Modulfilter).

Das Reinöl leiten wir entweder in einen 20'000 Liter Erdtank mit Zapfsäule und Tankwagenanschluss oder füllen dieses in IBC-Container mit 1'000 Liter Inhalt, die dank Palett-Unterbau einfach transportiert werden können.

Die Forschungs-Ölmühle ist das Resultat einer gefreuten und gelungenen Kooperation der deutschen Lieferanten von Presse (Reinartz GmbH & Co. KG) und Filtration (PALL Seitz Schenk GmbH), des Anlagenbauers Wirtech AG, des Ingenieurbüros Aregger AG (Steuerung), des Rohrbauers Romo GmbH, der Elektro Burkhalter AG, der Landi Lyssbachtal, des Unternehmers Peter Stähli und unserem Bereich Agrartechnik der SHL.

Zur Ausführung der Ölmühle wurden ursprünglich lediglich die Hauptelemente Presse und Filtration vorgesehen und mit CHF 60'000.-- budgetiert (KTI-Gesuch von Dezember 2004). Bald nach der Bewilligung unseres Vorhabens setzte hingegen ein in dem Umfang nie erwarteter Boom und Nachfrageanstieg für biogene Energieträger ein, der ebenfalls unsere Arbeit beeinflusste.

Es wurde rasch offensichtlich, dass der zukünftige Markt an mehr als lediglich einer Rumpfanlage interessiert sein wird. Wir haben auf das gewachsene Interesse an unserem Projekt schliesslich mit dem Ausbau einer auf die zukünftigen Anforderungen als Versuchs- und Demonstrationsanlage ausgerichteten, beispielhaften Musterlösung reagiert, die vor allem auch vom Steuerungskomfort her die heutigen Möglichkeiten aufzeigt und schliesslich ebenfalls noch die Lebensmittelzulassung erhielt.

Um auch in der zunehmend wichtigen Diskussion zur verarbeitungstechnischen Beeinflussung der Qualität von Rapsölkraftstoff mitreden zu können, wurde die Ölmühle zudem als Versuchsanlage konzipiert (elektronische Überwachung und Aufzeichnung der Betriebszustände, Datenlogger und Fernüberwachung via Internet).

Die Investitionskosten für diese ausgereifte Ölmühle mit Vorzeigecharakter beliefen sich schlussendlich auf rund CHF 250'000.--. Die Anlage gilt mittlerweile auch international als besonders gut gelungenes Beispiel. Besonders freut uns, dass die Firma Reinartz unsere Anlage als Musterbeispiel auf ihrer Website aufgeschaltet hat.

2.2 Die Hauptkomponenten der Anlage im Detail

Seiherschneckenpresse

Als Herzstück der Ölmühle Suberg kommt die Seiherschneckenpresse Reinartz AP 10/06 zum Einsatz (Abb. 11 und Tab. 2). Diese Kaltpresse für Weichsaaten verarbeitet 100 kg Rapssaat pro Stunde, kann indessen mit kleinen Modifikationen ebenfalls Sonnenblumenkerne, Leinsaat, Distelsamen, oder die Purgiernuss entölen.



Abbildung 11: Die Seiherschneckenpresse Reinartz AP 10/06.

Einer der schwierigsten Entscheide war die Auswahl der richtigen Presse. Das Angebot am Markt ist gross, hingegen ebenso die Unterschiede in Qualität, Komfort, Einsatzbreite und Erfahrungstiefe bei den Details der Pressraumgestaltung. Nach einer breiten Vorevaluation, Gesprächen mit Experten der Kaltpressung und Betriebsbesuchen, ergab sich anlässlich der Tagung „Erzeugung von Rapsöl in dezentralen Ölmühlen“ vom 16. und 17.

Juni 2005 in D-Veitshöchheim die Gelegenheit zu einer intensiven Konsultation mit Dr. Michael Rass, Geschäftsführer der Teutoburger Ölmühlen in D-Ibbenbüren. Dr. Michael Rass und seine rechte Hand Dr. Christian Schein, sind herausragende Kenner der Detailabläufe bei der Kaltpressung von Ölsaaten. Sie waren bereit, ihre langjährigen Erfahrungen mit dem Projektverantwortlichen zu teilen, der sich mit diesem Wissen in der Folge für eine Seiherschneckenpresse von Reinartz entschied, die sich seit der Inbetriebnahme anfangs 2006 einwandfrei bewährt. Die Maschinenfabrik Reinartz wurde im Jahre 1853 gegründet und ist heute ein weltweit tätiges Unternehmen mit Sitz in D-Neuss am Rhein. Schwerpunkt von Reinartz ist seit mehr als 70 Jahren die Entwicklung und Produktion von Schneckenpressen. Dank konsequenter und nuancierter Weiterentwicklung der Entölungstechnik - speziell auch der Elemente Schnecke und Seiher - nehmen Reinartzpressen heute im Marktsegment Kaltpressung eine Spitzenstellung ein.

Tabelle 2: Technische Daten der Seiherschneckenpresse Reinartz AP 10/06.

Länge	1900 mm
Breite	600 mm
Höhe	1100 mm
Nettogewicht	900 kg
Anschlussleistung	7,5 kW
Verarbeitungskapazität für Raps:	
Stundendurchsatz	100 kg
Jahresdurchsatz (bei 8'000 h/Jahr)	800'000 kg
Funktionsprinzip:	Stabseiher

Dass Reinartz ebenfalls Wert auf einen speditiven und kulantem Kundendienst legt, erfahren wir, als unsere Presse anlässlich der Inbetriebnahme wegen der werkseitig falsch angebrachten Drehrichtungsanzeige kurzzeitig rückwärts lief, wobei die Schnecke den auf Keil gestellten Seiherstäben partiell zu nahe kam, diese verschob und einige wenige gar beschädigte. Unter der Leitung eines langjährigen, erfahrenen Reinartz Monteurs erfolgten am 06. Februar 2007 die Demontage des Seiherkorbes und die Neujustierung aller Seiherstäbe (Abb. 12). Die Rückverfolgung des falsch angebrachten Drehrichtungsklebers ergab, dass Reinartz bei seinen Maschinen sowohl den direkten, drehrichtungsumkehrenden, als auch den indirekten, drehrichtungserhaltenden Antrieb einsetzt. Der Elektromotor unserer Maschine hatte aus Versehen einen falsch markierten Schutzdeckel erhalten.

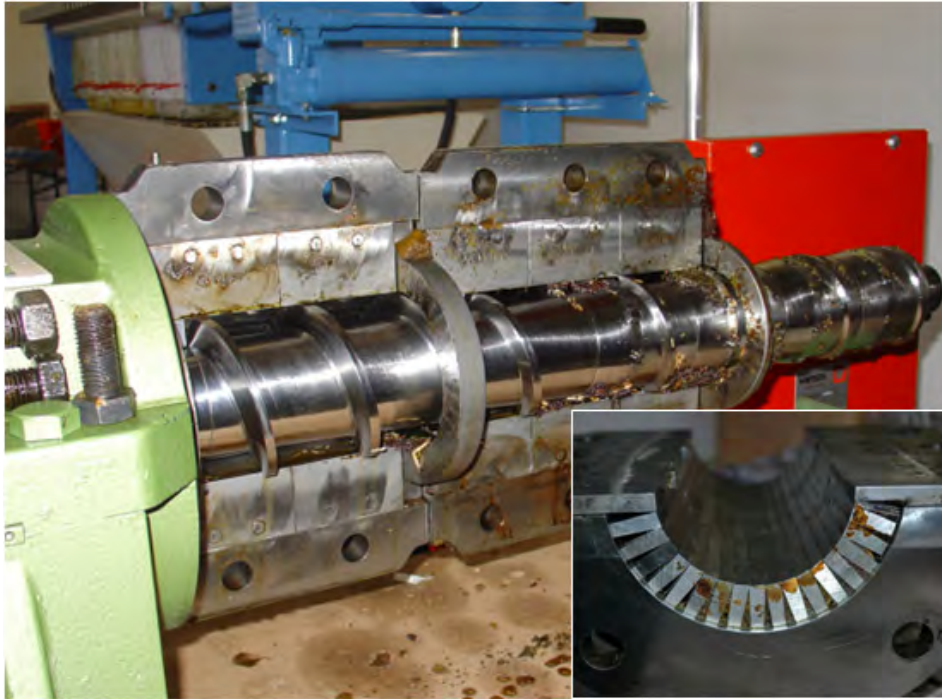


Abbildung 12: Innenansicht der Presse AP 10/06: Oben die freigelegte Schnecke, rechts unten eine Nahaufnahme eines einzelnen Seiherkorbsegmentes mit den auf Keil gestellten Seiherstäben aus speziell gehärtetem Werkzeugstahl.

Bei dieser Gelegenheit ergänzten wir den Austritt am Presskopf mit einer Lochscheibe, um den Presskuchen beim Verlassen des Pressraumes zu Pellets zu formen, damit die Staubbildung zu unterdrücken und die Trocknung und Kühlung zu erleichtern (Abb. 13).



Abbildung 13: Links eine Nahaufnahme eines Seihersegmentes mit laufender Öldrainage, rechts der Presskopf mit den heraustretenden Presskuchensträngen.

Kammerfilterpresse

Für die Hauptfiltration wählten wir die Kammerfilterpresse Typ KFP 470/30 der Firma PALL SeitzSchenk Filtersystems GmbH in D-Bad-Kreuznach (Abb. 14, Tab. 3).

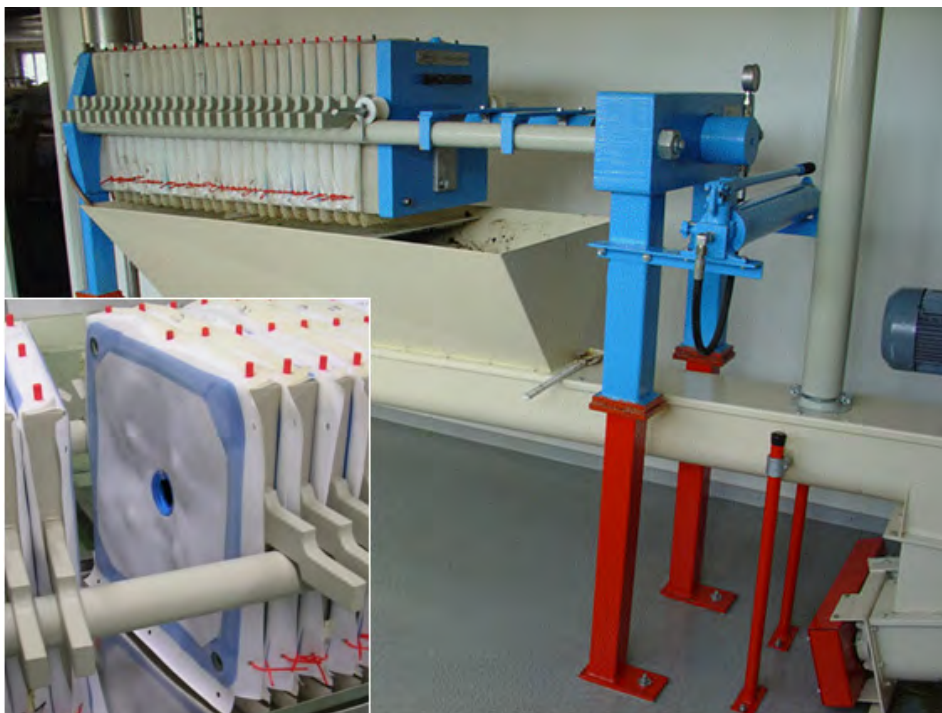


Abbildung 14: Die mit 600 bar Schliessdruck arbeitende Kammerfilterpresse KFP 470/30 von PALL SeitzSchenk mit Trog und Schnecke für Aufnahme und Abtransport des Filterkuchens. Links unten eine Nahaufnahme eines Filtersegmentes mit Filtertuch.

Kammerfilterpressen sind in der Lebensmittelindustrie verbreitet. Klassisches Einsatzgebiet ist die Trennung von hohen Trubanteilen aus Suspensionen, wie z. B. bei der Filtration von Bier und Fruchtsäften, aber auch von Speiseöl und technischen Pflanzenölen. Kammerfilterpressen sind einfach aufgebaut und sehr wirtschaftlich, weil das an die Filtertücher angelagerte Trub zugleich das Filtermedium darstellt. Die Filtertücher lassen sich einfach und schnell wegnehmen und wieder montieren. Im Ersatz sind sie günstig. Alle 1 bis 2 Jahre sollten Filtertücher wegen den sukzessive verschlammenden Poren in der Waschmaschine im Schongang, oder mit einer 1%-igen Natronlaugenlösung wieder regeneriert werden.

Die Kammerfilterpresse besteht aus einer Reihe von parallel angeordneten und von einem Rohrrahmen getragenen Filterplatten aus Polypropylen, die beidseitig mit je einem Filtertuch aus Polyamid bespannt sind. Diese Plattenkörper sind am Rand dichtend und weisen innen eine Vertiefung auf, in der sich das Trub ansammelt. Zum gegenseitigen Abdichten werden die Filterplatten hydraulisch mit dem hohen Druck von 600 bar gegeneinander gepresst. Das Truböl strömt über eine durchgängige Bohrung in der Plattenmitte in die Filtrationsräume und trifft auf die Filtertücher, an denen sich zuerst die groben und mit fortschreitendem Filtrationsgrad zunehmend feinere Trubteile absetzen (Abb. 15).

Das Reinöl kann zwischen Filtertuch und den genoppten Filterplatten ablaufen, wird im Filtratablaufkanal am unteren Plattenrand gesammelt und - in unserem Fall - auf die Fein- und Tiefenfiltration weitergeleitet. Die Kammerfilterpresse arbeitet nach dem Chargenprinzip. Zu Beginn jedes Filtrationszyklus werden die Filtertücher mehrere Minuten lang angeschwemmt, um den Aufbau der Trubschicht zu beschleunigen. Sobald sich im Ausgleichsgefäß ein Druck aufbaut, hat der Filtrationsprozess eingesetzt und der Filtratablauf aus der Kammerfilterpresse kann auf die Feinfiltration geleitet werden. Wenn nach ungefähr 3 m³ Trubölaufbereitung die Kammern mit Filterkuchen gefüllt sind und der Druck trubölseitig stark ansteigt, müssen die Filterplatten geöffnet und vom Filterkuchen befreit werden.

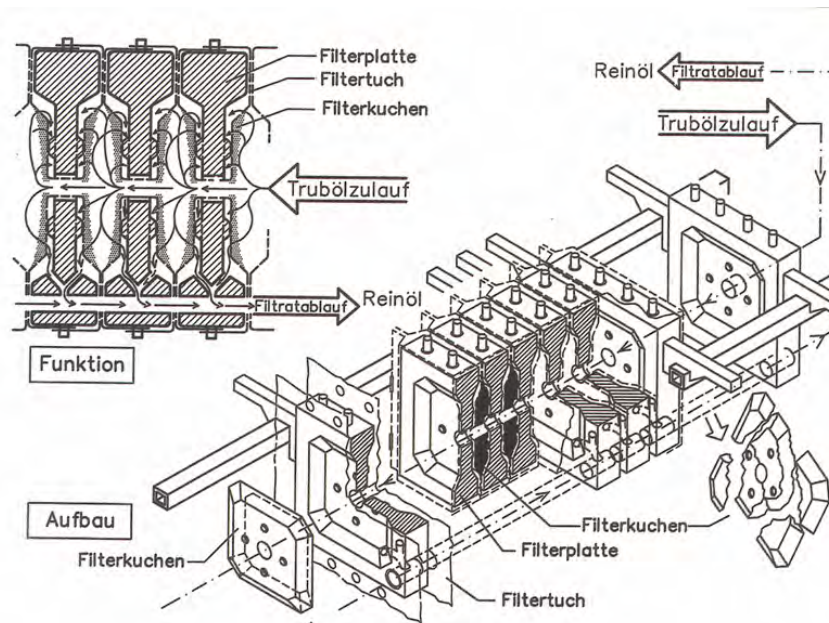


Abbildung 15: Aufbau und Funktion der Kammerfilterpresse (Remmele, 2002).

Tabelle 3: Technische Daten der Kammerfilterpresse KFP 470/30.

Länge	2550 mm
Breite	890 mm
Höhe	870 mm
Nettogewicht (ohne Filterplatten)	650 kg
Anzahl Kammerplatten (erweiterbar)	22
Filterfläche	7,7 m ²
Presseninhalte, Kammervolumen	99 l
Druckwindkesselinhalt	12 l
max. Betriebsdruck	16 bar
Filterkuchendicke	30 mm
Betriebstemperatur	10 – 40 °C
Filtrationskapazität bei 3% Trub	ca. 3200 l
Filtertücher:	NKD 2396, randgummiert
Luftdurchlässigkeit	250 Liter/100 cm ² /min/20 mm Wassersäule
Gewicht	300 g/m ²
Dicke	0.43 mm
Beschickungspumpe:	Exzentrerschneckenpumpe
Pumpenleistung	ca. 0,8 m ³ /h gg. 12 bar
Antriebsleistung	1,2 kW

Feinfiltration

In der Ölmühle Suberg folgt nach der Hauptfiltration in der Kammerfilterpresse eine zwei-stufige Feinfiltration. Zuerst durchströmt das Öl einen Beutelfilter, danach kommt wahlweise ein Kerzenfilter oder ein Modulfilter (Abb. 16). Diese Wahlmöglichkeit wurde aus versuchstechnischen Gründen zum Vergleichen der beiden wichtigsten Feinfiltrationsverfahren so eingerichtet. In Zukunft sollen alle 3 Filter in Serie geschaltet werden (weitere Absenkung der Restverschmutzung bei erhöhter Standzeit der Filterelemente). Sämtliche Filter stammen aus dem Hause PALL SeitzSchenk Filtersystems GmbH.



Abbildung 16: Feinfiltration mit - der Fließrichtung des Öls folgend - Beutelfilter (rechts), Kerzenfilter (Mitte) und Modulfilter (links).

Beutelfilter

Der Beutelfilter ist ein Oberflächenfilter und besteht aus einem beutelförmigen Filtereinsatz in einem zylinderförmigen Chromstahlbehälter. Dieser einfach aufgebaute Filter dient in unserem Fall als Sicherheitsfilter zur Verlängerung der Standzeiten der nachfolgenden Fein- und Tiefenfiltereinsätze (Kerzenfilter, Modulfilter). Das als Beutel geformte Filtermittel besteht aus Nadelvlies (Polypropylen) und ist in einen stützenden Filterkorb aus Drahtgeflecht eingelegt. Beutelfilter arbeiten mit niedrigen Differenzdrücken und erlauben hohe Volumenströme bei hoher Schmutzaufnahmefähigkeit (Abb. 17).

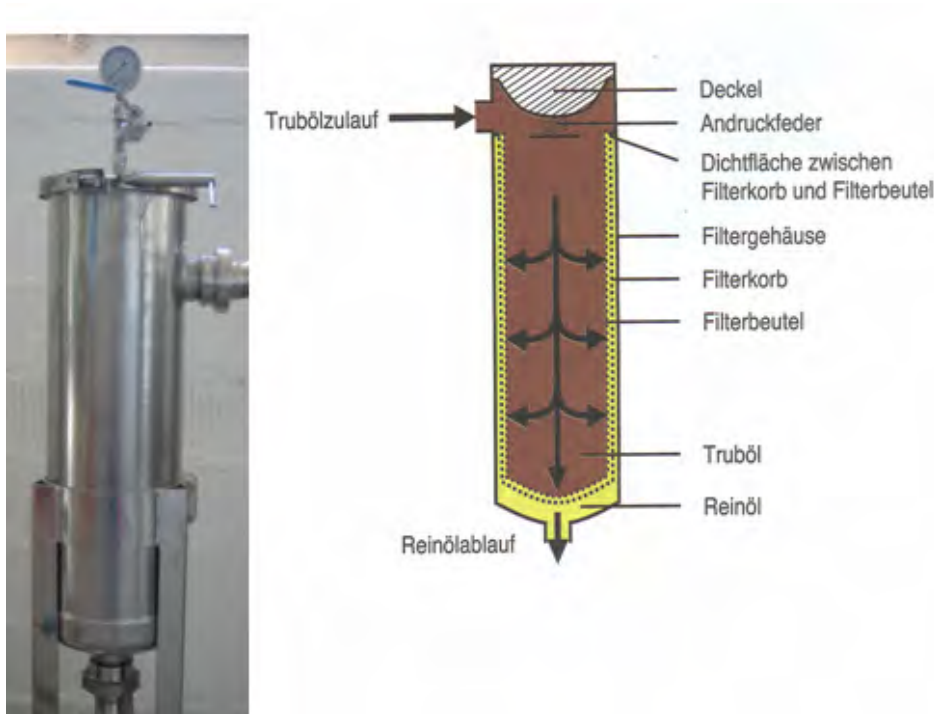


Abbildung 17: Beutelfiltergehäuse von PALL SeitzSchenk (links) und Funktionsprinzip des Beutelfilters (Remmele, 2002).

Tabelle 4: Technische Daten des Beutelfilters der Ölmühle Suberg.

Typ / Modell	LBVS 11
Volumen Gehäuse	19 l
Filterfläche	0.26 m ²
Filterfeinheit	1 µm
Wasserfluss bei 150 mbar	6,5 m ³ /h
max. Druck	6 bar
min./max. Temp.	20/60 °C

Kerzenfilter

Kerzenfilter sind Tiefenfilter. In einem langen, zylindrischen Gehäuse sind eine oder mehrere Filterkerzen untergebracht, die - im Gegensatz zum Beutelfilter - von aussen nach innen durchströmt werden. Die eigentliche Filterkerze besteht aus einem zylindrischen Stützkörper, der vom Filtermittel aus natürlichen oder synthetischen Fasern umgeben ist (Abb. 18).

Die Vielzahl der Poren erlaubt ein hohes Feststoffsammelvermögen bei gleichzeitig guten Durchsatzleistungen. Trotz steigender Beladung der Filterelemente mit Feststoffen findet die Suspension immer noch offene Poren und Kanäle, die ein Durchströmen des Elementes erlauben. Der Aufbau des Filterkuchens auf der Oberfläche der Filterelemente geschieht deshalb nur langsam und erklärt die langen Standzeiten von Filterkerzen.

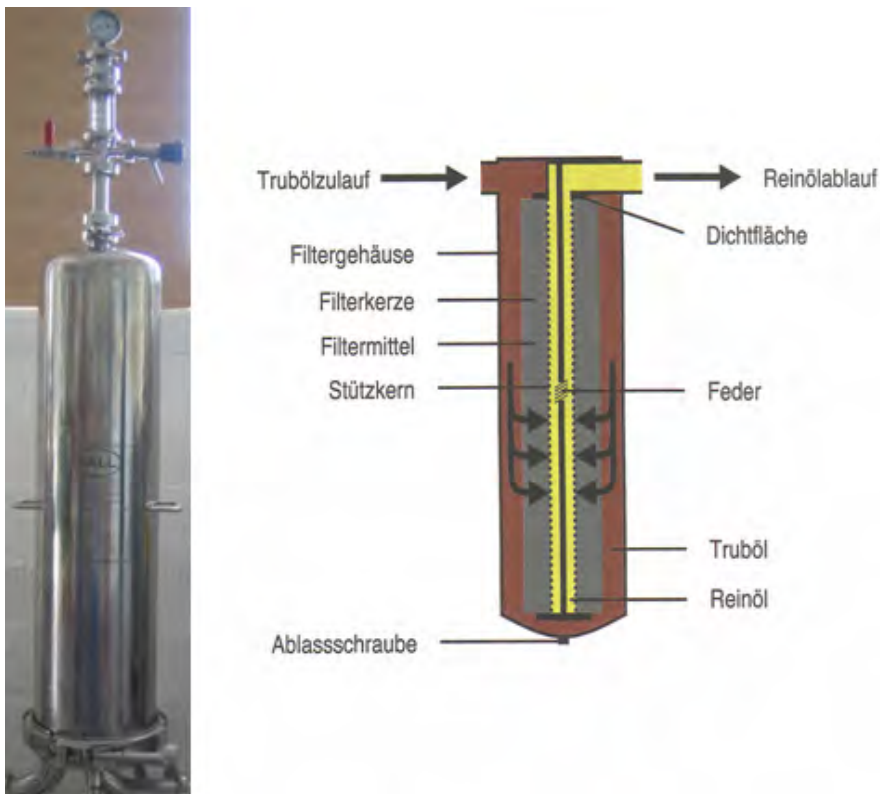


Abbildung 18: Kerzenfiltergehäuse von PALL SeitzSchenk (links) und Funktionsprinzip eines Kerzenfilters (Remmele 2002).

Tabelle 5: Technische Daten des Kerzenfilters der Ölmühle Suberg.

Filterkerzen-Typ	Nexis T
Volumen Gehäuse	31.7 l
Anzahl Filterkerzen	5
Filterfeinheit	5 µm
max. Druck	10 bar
max. Temp.	95 °C

Modulfilter

Der Modulfilter ist ein Tiefenfilter und besteht im Wesentlichen aus drei Teilen: Zentralrohr, Filterzellen und Adapter. Die Filterzellen, welche im Spritzgussverfahren hergestellt werden, bestehen aus Gewebe und dem Drainagesystem. Es werden bis zu 21 Filterzellen mit dem Zentralrohr thermisch verschweisst. Der gesamte Modulfilter – in unserem Fall mit Supradisc Filtermodul - wird in einen Chromstahlkessel eingesetzt, bei PALL SeitzSchenk unter dem Namen VELAdisc gehandelt. Das Filtermedium fließt von außen durch die Filterzellen (Abb. 19). Diese sind labyrinthartig angeordnet und mit zahllosen Kanälen versehen, welche sich verengen. Dabei können auch kleinste Partikel, wie Bakterien und Viren herausgefiltert werden.

Der spezielle Herstellungsprozess sorgt für ein leicht zu durchströmendes Gefüge, welches ein sehr grosses Schmutzaufnahmevermögen aufweist. Diese Tiefenfiltration ist in dessen wegen den teuren Wegwerf-Filtermodulen die kostspieligste Variante. Aus diesem Grund wird bei der Rapsölkraftstoffherstellung in den meisten Fällen darauf verzichtet.

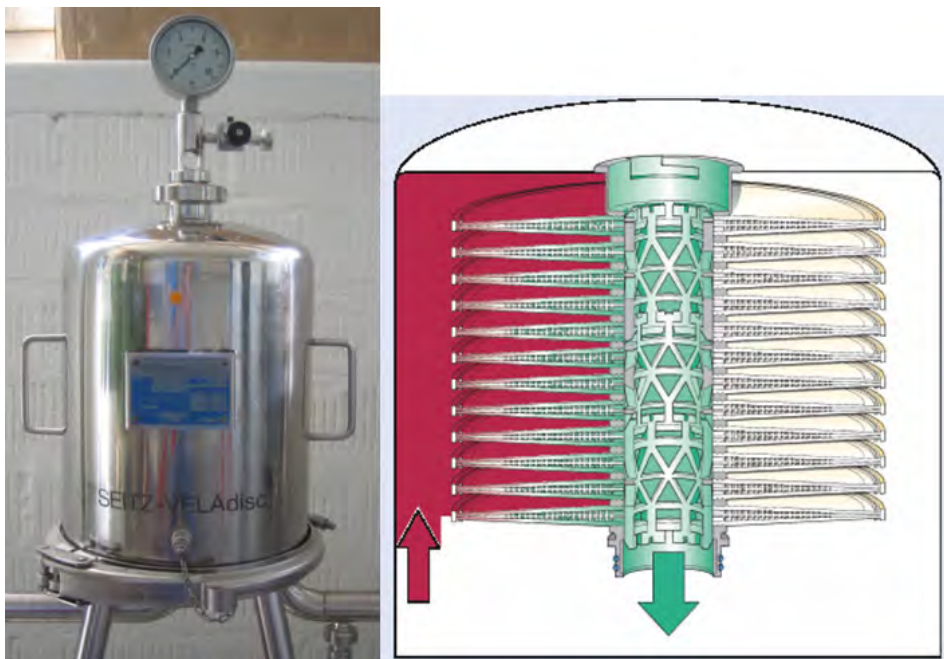


Abbildung 19: VELAdisc-Gehäuse von PALL SeitzSchenk (links) und das Funktionsprinzip des Modulfilters (PALL, 2007).

Tabelle 6: Technische Daten des VELAdisc-Modulfilters.

Supradisc-Typ	K300
Volumen Gehäuse	37 l
Durchlässigkeit bei 100 mbar	785 l/m ² /min
Filterfeinheit	5 - 12 µm
max. Druck	8 bar
min./max. Temp.	-10/150 °C

Rohöltank

Als Rohöltank dient in Suberg ein gebrauchter 3'000 l Milchtank der Schweizer Metallbau-firma Franke (Abb. 20). Die stehende Bauweise erleichtert das Umrühren des Inhaltes. Nach häufigen Verstopfungen des fälschlicherweise horizontal eingebauten Rückschlag-ventils, mit Dichtsitz Stahl - Elastomer, in der Speiseleitung eingangs Kammerfilterpresse, ergänzten wir den zentralen Untenauslauf durch einen zweiten, höher gelegenen An-schluss an der Tankwand. Gleichzeitig wurde das horizontale durch ein vertikales Stahl auf Stahl dichtendes Rückschlagventil ersetzt. Läuft die Anlage ohne Anwesenheit von Personal (Wochenenden, Nachtbetrieb), erfolgt die Obenentnahme. Ist jemand in der An-lage, wird auf Untenentnahme umgeschaltet. Auf diese Weise verhindern wir eine suk-zessive Trubansammlung unten im Tank. Kommt es während einer laufenden Filtration bei Untenentnahme zu einer der sehr selten gewordenen Verstopfungen, kann über das Druckgefäß kurz rückgespült und ohne Arbeitsunterbruch auf Obenentnahme umge-schaltet werden.

Als weitere Ergänzung wurde der Tankboden aussen mit elektrischen Heizmatten von Prang + Partner, Pfungen, ausgestattet, damit bei tiefen Temperaturen während der kal-ten Jahreszeit die Möglichkeit besteht, das Rapsöl zu temperieren und seine Fliessfähig-keit und Filtrationswilligkeit zu verbessern.

Der Tank steht auf elektronischen Kraftmessdosens, die laufend das Netto-Tankgewicht, resp. die Füllmenge in Kilogramm Rohöl an die Steuerung übertragen.



Abbildung 20: Der Rohöltank mit den Rohranschlüssen (links), den zwei Ausläufen zur Schneckenpumpe (rechts unten), den Kraftmessdosen zur Gewichtserfassung und der Heizmatte zur Temperierung des Rapsöles (rechts oben).

3 Raps als Energieträger

3.1 Überlegungen des Projektleiters

Die drohende Übernutzung des beschränkten, nachhaltig vorhandenen biogenen Energiepotentials, namentlich in Nord- und Südamerika sowie Südostasien, hat eine wenig hilfreiche Kontroverse ausgelöst, die sich zunehmend einem generellen Schlechtmachen jeglicher flüssiger Treibstoffgewinnung ebenfalls aus Ölfrüchten nähert. Wenn unsere mit mehreren hunderttausend Franken geförderte Arbeit - am 27. April 2006 noch mit dem Prix Evenir geehrt – auch nicht in der direkten Kritik stand, war sie doch von dieser Entwicklung anschliessend ebenfalls stark betroffen. Es sind hier deshalb einige Grundsatzinformationen am Platz.

Wie wenig überlegt bei alleine emotionalem Angehen der Sache argumentiert wird, mag das strapazierte Zitat der „explodierenden Nahrungsmittelausgaben“ zeigen, die bei uns bereits deutlich unter 8 % der Gesamtlebenskosten gefallen sind! Zu einer Zeit notabene, in der wir uns netto noch zu 54 % selbst versorgen und für die Vermeidung und Entlastung von Lebensmittelflächen jährlich einige Hundert Millionen Franken an die Landwirtschaft abgeben. Die parallel zu dieser Entwicklung steigende Importabhängigkeit ist beunruhigend. Der Landwirtschaftsbericht 07 nennt Einfuhrsteigerungen seit der Periode 1990/92 bis 2004/06 von 57.3 % bei Rind-, 454 % bei Schweinefleisch, 342.9 % bei Kartoffeln (für Euro 08 sogar Importe aus dem selbst versorgungskritischen Ägypten!?) und 95.8 % bei pflanzlichen Ölen u. Fetten.

Bezüglich Kraft- und Treibstoffen hängen wir gar zu 100 % am Tropf von mehrheitlich demokratischen Verhältnissen wenig zugeneigten, oder gar im eigentlichen Sinn des Wortes problematischen Lieferstaaten.

Vision des Autors – der die Ausbildung vom Landwirt zum Agronomen auf dem zweiten Bildungsweg beschritt – ist der Einbezug der gesamten, bedenklich schrumpfenden Ackerfläche in die korrekte, verantwortungsvolle Nutzung, wie sie der Boden zeitlos mitmacht und der Verzicht auf die Extreme und den unredlichen Versuch, mit Ökoanteilen eine Gewissensberuhigung für im Namen von Strukturbereinigung und Schlagkrafterhöhung begangene Sünden herbeizuführen.

Der Treibstoff vom eigenen Acker, gewonnen aus einer wegen ihren agronomischen Vorteilen in der Fruchtfolge geschätzten Ölsaart, mit 2/3 der Erntemasse wertvollem Eiweiss- und Energiefutter, steht in keinstem Gegensatz zu ökologischen Bestrebungen. Im Gegenteil, solche lokalen Kreisläufe sind die nachhaltigsten! Das schweizerische Nischenpotential an technischen Ölkulturen in einer mindestens 4-jährigen Fruchtfolge ist auf höchstens 25'000 ha beschränkt und wird anteilmässig zur schwindenden Ackerfläche kleiner. Damit lassen sich jährlich 30'000 bis 35'000 Tonnen Pflanzenöl und 60'000 bis 70'000 Tonnen Presskuchen gewinnen. Mit dem Ölertrag – er entspricht 1/3 der Ausbeute – sind, bei voller Erhaltung eines vernünftigen, ökologischen Anspruchs, bis zu 1/4 des jährlichen Dieselölbedarfs der schweizerischen Landwirtschaft substituierbar. Der in Ökobilanzen verschiedentlich unsorgfältig oder nicht berücksichtigte Kuchenanteil stellt ein substanzielles Ersatzpotential für Futtermittel aus Soja dar, die als Devisenbringer ganzer Länder eine enorme Flächenausweitung in Regen- und Tropenwälder erfährt. Dieser Fakt scheint indessen in den mannigfaltigsten erstellten Ökopapieren wiederholt der aufgeregt und teils nicht ohne Profiliersucht geführten „Teller-Tank“ Kontroverse zum Opfer zu fallen. Hinweise auf die Problemkette Fleischkonsum, Futtermittelbedarf, Flächenkonkurrenz zu Brotgetreide, Methanausstoss etc. geschehen vor allem der Form halber. Das Gleiche gilt für weitere Fakten. So entsteht aus der bedenklich fehlerbehafteten „Ökologischen Bewertung von Biotreibstoffen“ der EMPA St. Gallen der Eindruck einer eigentlichen Verunglimpfung des schweizerischen Rapsanbaus, während die tatsächlichen, öko-toxikologischen Belastungen der Erdölprodukte von einer vergleichbar akribischen Würdigung verschont blieben.

Es ist eminent, bei der Nutzung des Potentials an biogenen Kraftstoffen keine Fehlentwicklungen einreissen zu lassen, wie z. B. Energiekorn (das Verbrennen von Weizen, weltweit assoziiert mit dem täglichen Brot), Importe von sozial und ökologisch schwer belastetem brasilianischem Bioethanol aus Zuckerrohr, oder die hemmungslose Anlage von Jatropha-Plantagen, mit dem zu kurz greifenden Argument, dass diese Ölnuss wegen ihrer Ungenussbarkeit keine Konkurrenz zu Nahrungsmitteln darstelle. Ebenso wichtig ist indessen die Erkenntnis des Oberflächlichen, Banalen im medial angerichteten Eintopf „Energiefläche frisst Nahrungsmittelfläche“, das sich auch durch penetrante Wiederholung nicht wegverdünnen lässt. Fundamental und undifferenziert mit globalen Argumenten gegen die verschiedenen Erneuerbaren Energiequellen gerichtete Kritik übersieht den Sachzwang der unabwendbaren Auffächerung unserer zukünftigen Energiequellen. Damit behindert oder verhindert sie Investitionsbereitschaft und die mit beträchtlichen Fördermitteln gestützten Anstrengungen zum Aufbau dezentraler, geschlossener Kreisläufe, die die Besorgten eigentlich meinen, aber im Pulverdampf der profilierungsorientierten Medienkampagnen momentan nicht erkennen. Wenn auch lediglich im Nischenbereich, sind sie die wirkungsvollste und nachhaltigste Antwort auf den weltweiten Nachfrageanstieg bei den beiden Lebens-Mitteln Nahrung und Energie.

Mit unserem Vorhaben wollten wir einen solchen, exemplarischen Kreislauf verwirklichen.

Wenn das Projekt trotz aller Hindernisse mit etwas Verspätung erfolgreich abschliessen kann, in Suberg in einer der komplettesten Klein-Ölmühlen Europas trotz aller Widerlichkeiten nun einheimischer Raps aus dem Lyssbachtal zu Rapsölkraftstoff verarbeitet und in Landmaschinen und einem BHKW mit Referenzcharakter genutzt wird, verdanken wir dies dem tollen, unbeirrten Zusammenstehen und Durchhalten unseres sehr geschätzten Projektkonsortiums aus Wirtschafts-, Hochschul- und Förderpartnern. Die schönste Bestätigung für des Projekt war seine bis zuletzt erfolgreiche Finanzierung. Der Grossbetrag seitens BKW FMB Energie AG im April 2008 bedeutete eine dezidierte Rückenstärkung unseres Gesamtvorhabens und seine abschliessende finanzielle Sicherung.

Das Projekt ist aus langjährigen Vorarbeiten zur motorischen Nutzung frischer pflanzlicher und rezyklierter Öle sowie tierischer Abfallfette herausgewachsen. In Gemeinschaftsprojekten mit Willi Mahler, Obfelden, Prof. Dr. Willy Schlachter, FHNW Brugg-Windisch, Same Deutz-Fahr Schweiz, Schwarzenbach, Ford Schweiz, den seinerzeitigen K+W, Thun, sowie den Förderstellen KTI und BFE, wurden seit 1990 die Grundlagen für ein Referenzvorhaben erarbeitet. Das Thema „Bereitstellung und Nutzung klassischer und alternativer Energien“ war ebenfalls für den Unterricht relevant. Über viele Jahre haben interessierte Studierende mit wertvollen Semester und Diplomarbeiten am Fundament für das spätere Projekt mit gebaut.

3.2 Anbauverträge und Ertragsdaten

Das Ziel war immer, in der Anlage Suberg Raps aus der Region zu verarbeiten. Weil nach der Inbetriebnahme im September 2006 noch kein Schweizer Raps verfügbar war, wurde im Winter 06/07 zuerst ein Posten Raps aus Frankreich verarbeitet. Zudem mussten mit Schweizer Produzenten Anbauverträge gemacht werden. Im Juni 2006 richteten wir einen entsprechenden Aufruf an die Landwirte der Region Lyssbachtal. Hauptkriterium bei der Auswahl der Adressaten war die Entfernung von Suberg, welche höchstens 30 km betragen durfte. Von rund 1400 angeschriebenen Produzenten haben sich 80 für den Rapsanbau angemeldet und mit 56 davon konnten Verträge abgeschlossen werden. Schliesslich wurden von 53 Landwirten auf einer Fläche von ca. 90 ha rund 300 t Raps produziert und in der Landi Schüpfen abgeliefert. Der durchschnittliche Ernteertrag pro Produzent lag bei 33.4 dt Raps/ha (netto, mit 7 % Feuchtigkeit). Einige Produzenten erreichten Spitzenerträge von deutlich über 40 dt Raps pro Hektare. Die durchschnittliche Ölausbeute betrug 38.5%, was einen durchschnittlichen Ölertrag von rund 1'400 Liter Rapsölkraftstoff pro ha ergab. Berechnet man den totalen Ölertrag (inkl. Restfettgehalt im Rapskuchen) bei einem durchschnittlichen Ölgehalt von 46.5%, dann kommt man auf rund 1'700 Liter Rapsöl. Dies entspricht bei einem Energiegehalt von 34.5 MJ/l Rapsöl einem Energieertrag von rund 58 GJ/ha. Berücksichtigt man den gesamten Energieinhalt des Rapskuchens, so ist der Energieertrag pro Fläche rund doppelt so gross.

4 Versuche, Erkenntnisse und Erfahrungen

4.1 Abpressgrad

Im Zusammenhang mit der Diplomarbeit von Andreas Siegrist (2007) wurden in der Ölmühle Suberg Versuche zum Abpressgrad und seiner Abhängigkeit von Pressschneckenfrequenz, Durchsatz und Rapssaat durchgeführt.

Als Abpressgrad bezeichnet man den prozentualen Anteil des gewonnenen Öls im Verhältnis zum Gesamtfettgehalt der Ölsaart. Er ist ein zentrales Kriterium für Güte und Wirtschaftlichkeit einer Rapspresse. Mit modernen Seiherschneckenpressen wird ein Abpressgrad von 80% angestrebt. Den Abpressgrad (APG) kann man aus dem Gesamtfettgehalt der Saat (GF) und dem Restfettgehalt des Presskuchens (RF) berechnen (immer bezogen auf die Trockensubstanz):

$$APG [\%] = \frac{GF - RF}{GF \cdot (1 - RF)} \cdot 100$$

$$\text{Beispiel: } GF = 46\%, RF = 13\% \rightarrow APG [\%] = \frac{0.46 - 0.13}{0.46 \cdot (1 - 0.13)} \cdot 100 = 82.5 \%$$

Die Rohfettgehalte zur Bestimmung des APG wurden im Labor der Schweizerischen Hochschule für Landwirtschaft an gemahlenden Proben mittels Extraktionsverfahren nach Soxhlet analysiert.

Die bei den Versuchen gewählten Drehzahlen der Pressschnecke und ihr Verhältnis zur Nenndrehzahl können Tabelle 7 entnommen werden.

Tabelle 7: Pressschneckendrehzahlen der Reinartz AP 10/06.

% der Nenndrehzahl	80 %	85 %	90 %	95 %	100 %
min ⁻¹	10.4	11.1	11.7	12.4	13.0

Die Seiherschneckenpresse AP 10/06 ist ausgelegt für einen Durchsatz von 100 kg Rapssaat (Frischsubstanz) pro Stunde (Werksangabe). Für die Versuche konnte der Durchsatz dank der verstellbaren Dosierschneckendrehzahl verändert werden (Tab. 8).

Tabelle 8: Rapssaatdurchsatz bei unterschiedlichen Dosierschneckendrehzahlen.

Durchsatz-Stufe	reduziert	leicht reduziert	normal	erhöht
% der Nenndrehzahl	50	55	60	70
kg Rapssaat pro Stunde	85	94	103	120

Resultate mit Rapssaat reduzierter Qualität (Importware)

Ein erster Versuch wurde mit importierter Rapssaat aus Frankreich durchgeführt. Es handelte sich um teilweise unvollständig ausgereifte Saat, welche relativ feinkörnig war, resp. ein tiefes Tausendkorngewicht (TKG) aufwies. Der GF lag bei bescheidenen 40.6%. Der Feuchtigkeitsgehalt war mit 6% in Ordnung.

Die Resultate zeigten den klaren Trend, dass der APG durch sinkende Pressschneckendrehzahlen ansteigt (Abb. 21). Diese Charakteristik wurde schon von Widmann (1994) beschrieben. Weil mit der Dosierschnecke der Saatdurchsatz vorgegeben war, konnte die Pressschneckendrehzahl nicht beliebig reduziert werden, da sonst ein Materialstau in der Presse und ein Rückstau im Einfülltrichter riskiert wurden. Der angestrebte APG von 80% blieb unerreicht. Im Mittel lag der APG bei ca. 78%, dies ergab mit dem GF von 40.6% eine mittlere Ölausbeute von rund 32%.

Am meisten Einfluss auf den APG nimmt verständlicherweise die Drehzahl der Pressschnecke. Sekundiert von der zeitlichen Beladung der Presse bestimmt sie die Verweilzeit des Komprimates im Pressraum. In diesem Spiel entscheidet sich nun die Intensität der Pressgutbehandlung und damit APG, Restfettgehalt im Kuchen, aber auch die Anteile an unerwünschten Inhaltsstoffen, die bei allzu intensivem Aufschluss von Schalen und Zellwänden in das Öl übertreten. Hier bestätigte sich die generell vorliegende Erkenntnis, dass die Kunst der hohen Ausbeute einer guten Öl-Grundqualität im Beherrschen der richtigen Abstimmung von Saatdurchsatz, Schneckenendrehzahl und Verweilzeit liegt.

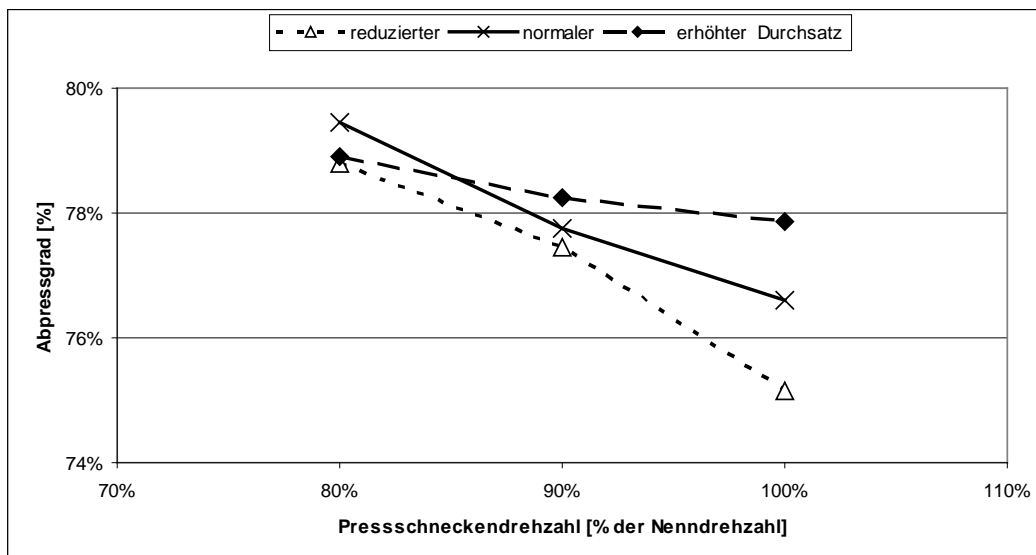


Abbildung 21: Abpressgrade mit der AP 10/06 in Abhängigkeit von Durchsatz und Pressschneckendrehzahl. Resultate für importierte Rapssaat mit tiefem TKG und tiefem Fettgehalt (40.6%).

Resultate mit Rapssaat hoher Qualität (Sorte Oase)

Ein weitgehend identischer Versuch wurde anschliessend mit gut ausgereiftem Schweizer Raps der Sorte Oase aus der Region durchgeführt. Die Rapssaat unterschied sich von der französischen Importware durch ausgeglichene grössere, schwarze und feste Körner, ein entsprechend höheres TKG und einen deutlich besseren GF von 46.6%. Um eine unrealistische und wirtschaftlich uninteressante Absenkung der werkseitig ausgelegten Auslastung zu vermeiden, wurden nur noch die Bereiche mit Pressschneckendrehzahlen ab 11 Umdrehungen pro Minute untersucht.

Der APG von über 82%, bei 90% der Pressschnecken-Nenndrehzahl, lässt den Unterschied zur französischen Importware und die direkte Korrelation zwischen Rapsqualität, FG und erreichbarem APG deutlich werden (Abb. 22). Ausgereifte, gut ausgebildete Rapskörner mit einer Feuchtigkeit um 7%, lassen sich mit gutem Durchsatz, hohem Abpressgrad und gleichzeitig tiefem Gehalt an Phosphor, Kalzium und Magnesium verarbeiten.

Etwas salopp ausgedrückt, lassen sich reifgeerntete, zellwandfeste und dennoch „elastische“ frische und öltreiche Sorten schonender und mit weniger Beanspruchung von Schalen und Zellwänden entölen, als unreife, mit grünen und braun-rötlichen Samen versetzte, gealterte und „sperrige“ Saaten mit tiefem Ölgehalt. Ab 30% Anteil unreifer Saat lässt sich über die Kaltpressung ohne Nachbehandlung kaum mehr ein motorisch brauchbarer Rapsölkraftstoff gewinnen. Tendenziell wird man hier mit einer heraufgesetzten Verweilzeit des Komprimates in der Presse eine höhere Ölausbeute anstreben. Unausweichliche Konsequenz sind ein intensiverer Aufschluss von Schalen und Zellwänden und ein Anstieg der unerwünschten Phospholipide und Erdalkalien. Die Versuche mit der Inlandware Oase ergaben den für Kaltpressung sehr guten mittleren APG von ca. 81%, einer mittleren Ausbeute von ca. 38% des Gesamtfettgehaltes von 46.6% entsprechend.

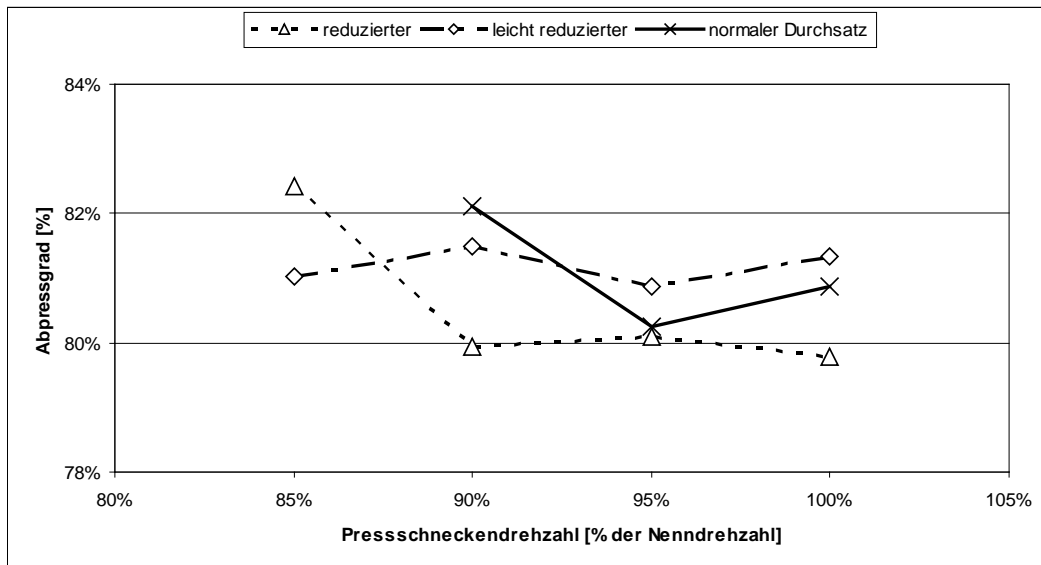


Abbildung 22: Abpressgrade mit der AP 10/06 in Abhängigkeit von Durchsatz und Pressschneckendrehzahl. Resultate für Schweizer Raps (Sorte Oase) mit hohem TKG und hohem Fettgehalt (46.6%).

Gute Ölausbeute dank Rapssaat mit hohem Ölgehalt und hohem Abpressgrad

Der hohe Abpressgrad der AP 10/06 bei Beschickung mit Rapssaat hoher Qualität konnte während des Projektes bestätigt werden.

Mit einem Gemisch der ötreichen Rapssorten Billy und Lorenz (GF von 47.8%) resultierte bei einer Pressschneckendrehzahl von 90% und einem Durchsatz von 102 kg Rapssaat pro Stunde eine Ölausbeute von 39.2% entsprechend einem APG von 82% (RF von 14.3%).

Das Gesamtergebnis der Verarbeitung der im Projekt verwendeten Schweizer Rapssaat (Herbst 2007 bis Frühling 2008) kann Tabelle 9 entnommen werden. Es wurde folgende Rapssorten verarbeitet (in Klammer der Prozentanteil an der Gesamtmasse):

- Expert (52%)
- Elektra (24%)
- Oase (18%)
- Remy (2%)
- Billy (2%)
- Lorenz (2%)

Tabelle 9: Resultate der Verarbeitungskampagne im Projekt.

Verarbeitungsperiode	17.08.07 - 31.03.08
Rapssaat [kg]	306'625
Ölgehalt [%] ¹⁾	46.5
Ölertrag [l]	128'450
Rapskuchen [kg]	188'450
Ölausbeute [%]	38.5
Abpressgrad [%]	83

¹⁾ geschätzter mittlerer Ölgehalt aufgrund von Einzelproben

4.2 Rapssaatqualität, Ölpressung und Ölqualität

Im Rahmen der Diplomarbeit von Andreas Siegrist (2007) wurden ebenfalls die Zusammenhänge zwischen Presseneinstellung, Rapssaatqualität und der Ölqualität untersucht. Hier zeigte sich deutlich, dass eine ungenügende Rapssaatqualität die Ölqualität stark negativ beeinflusst. Gerade bei den Schlüsselkennwerten für Phosphor- und Erdalkaligehalt (Summengehalt an Calcium und Magnesium) kann es zu Problemen bei der Einhaltung der Qualitätsnorm V DIN 51605 kommen. Die Analyse des unter Kap. 4.1.1 beschriebenen Importtrapses zeigte uns dies klar auf (Tab. 10). Trotz aufwändiger Filtration und einem entsprechend guten Ergebnis bei der Gesamtverschmutzung, konnten die Grenzwerte für Phosphor (P) nur knapp und für Calcium (Ca) und Magnesium (Mg) nicht eingehalten werden.

Tabelle 10: Analyseergebnis für Rapsölkraftstoff vom 28.12.2006. Rohstoff: Importtraps ungenügender Qualität.

Kennwert	Einheit	Analyseergebnis	Grenzwert (V DIN 51605)
Gesamtverschmutzung	mg/kg	5	24
Phosphorgehalt	mg/kg	10.5	12
Erdalkaligehalt	mg/kg	24.3	20

Bei Verwendung guter Rapssaatqualität ist die Einhaltung der Grenzwerte für P, Ca und Mg normalerweise unproblematisch. Schwierigkeiten können allenfalls auftauchen, wenn die Presstechnik und die Einstellung der Ölpresse nicht korrekt sind. Mit einem Versuch konnte die Charakteristik der Schneckenpresse AP 10/06 aufgezeigt werden. Zum Einsatz kam Schweizer Raps der Sorte Oase (analog Kap. 4.1.2). Untersucht wurde die Abhängigkeit der P- und Erdalkaligehalte von Pressschneckendrehzahl und Saatchurchsatz. Die P-, Mg- und Ca-Gehalte reagierten ähnlich auf die unterschiedlichen Pressparameter (Abb. 23 und 24). Die Werte konnten mit der Reduktion der Pressschneckendrehzahl abgesenkt werden, aber nur bis zu einem bestimmten Punkt. Danach stiegen sie wieder an.

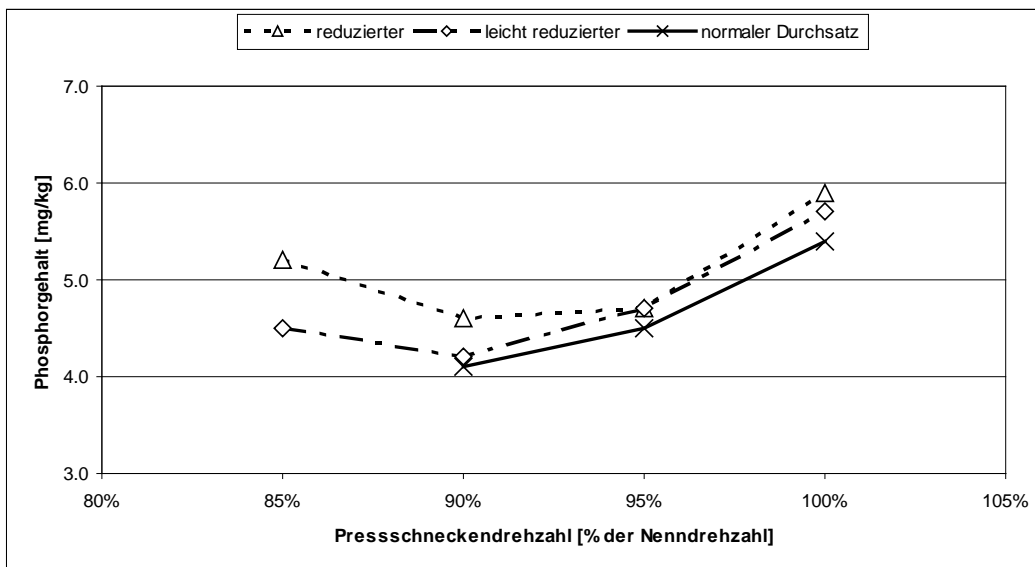


Abbildung 23: Phosphorgehalte in Abhängigkeit von Durchsatz und Pressschneckendrehzahl der AP 10/06. Resultate für Schweizer Raps hoher Qualität (Sorte Oase).

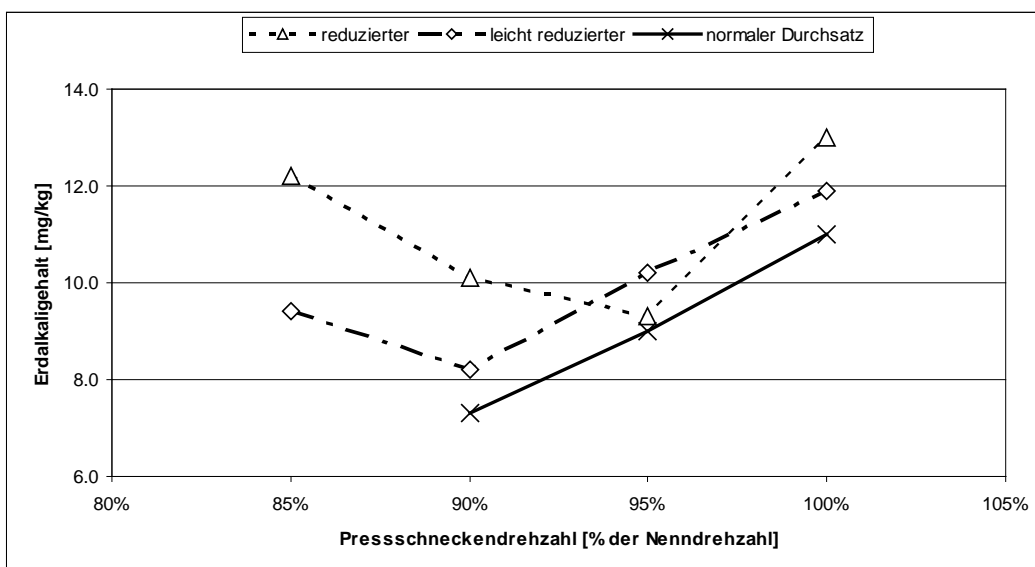


Abbildung 24: Erdalkaligehalte (Ca und Mg) in Abhängigkeit von Durchsatz und Pressschneckendrehzahl der AP 10/06. Resultate für Schweizer Raps hoher Qualität (Sorte Oase).

Die Ergebnisse wurden so interpretiert, dass für einen bestimmten Saatchdurchsatz ein optimaler Bereich existiert, der zwischen einer zu langen Verweildauer in der Presse bei zu tiefer Schneckendrehzahl mit allzu intensiver Bearbeitung der Zellwandbestandteile und allzu massiver Reibung bei hoher Schneckendrehzahl und ungenügender Austrittszeit für das Öl liegt.

Im Vergleich zur heute gültigen Qualitätsnorm (V DIN 51605) zeigte sich, dass trotzdem bei sämtlichen Betriebspunkten die Grenzwerte klar unterschritten wurden. Entscheidender als die Presseneinstellung scheint demzufolge die Rapssaatqualität, insbesondere der Reifegrad, zu sein. Diese Erkenntnis deckt sich mit den Untersuchungen von Remmele et. al. (2007).

4.3 Filtration und Filterhilfsmittel

Die Qualität der Ölsaat war nicht nur bei der Pressung von grossem Einfluss, auch die Hauptfiltration mit der Kammerfilterpresse (KFP) verlief je nach Rapssaatposten unterschiedlich. Grosse Probleme gab es beim Importraps verminderter Qualität. Trotz der guten Durchlässigkeit des verwendeten Filtertuches (Luftdurchlässigkeit: 250 l pro dm² und min), kam es schon nach kurzer Zeit zu Verstopfungen. Grund war feinkörniges Trub, das sich als schmierige Schicht am Filtertuch der KFP ablagerte und die Filtrationsleistung, resp. den Öldurchfluss stark reduzierte (Abb. 25). Ein weiteres Problem war, dass sich durch die Verstopfungen die Filterkammern gar nicht vollständig mit Trub füllen liessen. Beim Öffnen der KFP musste so zuerst viel Rohöl abgelassen werden und der Filterkuchen war sehr ölig und bildete in den Trögen der Förderschnecken klebrige Ablagerungen. Mit der Zugabe des Filterhilfsmittels Filtracel verbesserte sich die Situation. Der Öldurchfluss wurde markant besser und der Filterkuchen bekam die gewünschte, kompakte Form. Filtracel besteht aus ungebleichten Naturfasern auf Cellulose-Basis und ist auch für die Speiseöl-Filtration zugelassen. Es wird in verschiedenen Korngrössen angeboten. Wir haben die beiden Produkte EFC-450 und EFC-250 (feinkörniger) von J. Rettenmeier und Söhne GmbH & Co getestet, konnten aber in der Wirkung keine wesentlichen Unterschiede feststellen.



Abbildung 25: Filterkuchen in der Kammerfilterpresse ohne (links) und mit Filterhilfsmittel (rechts). Ohne Filterhilfsmittel baute sich kein kompakter Kuchen auf.

Eine vergleichende Messung des gefilterten Ölvolumens über der Zeit zeigte auf, dass mit der Zugabe von 1 kg Filtracel auf 100 l Rohöl (1% Filterhilfsmittel im Rohöl, Gesamttrubgehalt stieg von 2% auf 3%) die Filtrationsleistung mehr als verdoppelt werden konnte.

Ohne diese Massnahme sank die Filtrationsleistung unter die Leistung der Schneckenpresse und verlangte deren zeitweiliges Abstellen, weil die Filtration mit dem Ölanfall nicht mehr Schritt halten konnte. Es liegt auf der Hand, dass eine solche Situation aus wirtschaftlichen Gründen inakzeptabel ist.

Mit dem frischen, besser aufzuschliessenden Schweizer Raps hoher Qualität gab es kaum Probleme mit der Filtration. Dank höherem Trubanteil in diesem Rohöl konnte die Zugabe von Filterhilfsmittel stark reduziert und teilweise sogar ausgesetzt werden. Die Filtrationsleistung lag nun wesentlich über der Presseleistung.

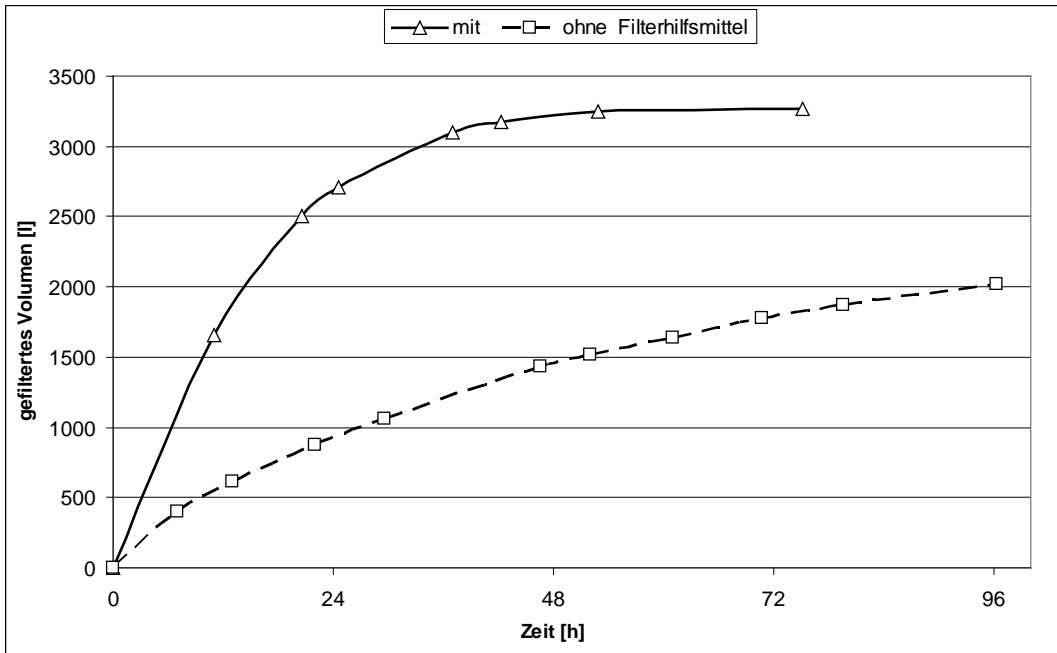


Abbildung 26: Filtrationsleistung der KFP 470 mit und ohne Zugabe von Filterhilfsmittel. Ohne Filterhilfsmittel konnte das Kammervolumen, resp. das Filterkuchenvolumen nicht ausgeschöpft werden.

Bessere Ölqualität dank Adsorbtiionsmitteln

Aufgrund von Vorversuchen im Labor bei der Firma ASG durch Andreas Siegrist (2007) konnte vermutet werden, dass die Ölqualität in Suberg dank der Zugabe des Adsorbtiionsmittels Magnesol weiter verbessert werden könnte.

Magnesol ist ein Adsorbtiionsmittel von der US-Firma Dallas Group in Jeffersonville, Indiana (Abb. 27). Es wird auf der Basis von Tonmineralien, genauer von Magnesiumsilikaten hergestellt und ist laut Auskunft von ASG bisher unerreicht in seiner Wirkung. Es wird auch in Biodieselanlagen verwendet. Durch die Mahlfeinheit von 10 - 15 µm wird eine riesige negativ geladene Adsorbtiionsoberfläche von 300 m²/g erreicht, was die Bindung von hohen Mengen positiv geladener Teilchen ermöglicht.



Abbildung 27: Das Adsorbtiionsmittel Magnesol in der Verpackung (20 kg Sack, links) und auf einer Schöpfkelle (rechts).

Das Pulver ist so fein, dass es annähernd wie eine Flüssigkeit fließen kann. Ein Problem ist die hohe Staubentwicklung bei seiner Dosierung in den Rohöltank. Der Tank sollte deshalb unmittelbar nach der Zugabe des Pulvers dicht verschlossen werden können.

Optimal wäre eine kontinuierliche, automatische Beimischung mittels einer Dosieranlage. Magnesol ist mit einem Kilopreis von rund CHF 4.- relativ teuer.

Tatsächlich konnten die Laborresultate auch im praktischen Einsatz bestätigt werden (Abb. 28). Die Versuche geschahen mit Rohölchargen von jeweils rund 2'000 l. Sämtliche Ölanalysen wurden im Labor der Firma ASG durchgeführt. Die ersten 1'000 l wurden unbehandelt (resp. nur mit Zugabe von Filtracel) filtriert und beprobt. Danach wurde Magnesol in einer Konzentration von ca. 1% (Masseprozent) zugegeben und während rund 14 h eingerührt. Das so behandelte Rohöl wurde dann ebenfalls über die Filtrationsanlage geleitet. In den ersten beiden Versuchen erfolgten drei Probenahmen zu unterschiedlichen Zeitpunkten: zu Beginn, in der Mitte und gegen Ende der Filtration. Es zeigte sich, dass die Wirkung über die gesamte Filtrationsdauer hinweg gleich gut war. Die Phosphor- und Erdalkaligehalte nach einer Magnesolbehandlung bewegten sich an der Nachweisgrenze.

Eine heikle Frage war, ob die Zugabe des Pulvers die Gesamtverschmutzung und insbesondere den Aschegehalt erhöhen würde. Bedenklich wäre vor allem ein Übertritt von mineralischen Partikeln ins Reinöl gewesen. Diese könnten in den empfindlichen Bauteilen moderner Hochdruck-Einspritzsysteme – etwa an den Einspritzdüsen - einen Effekt ähnlich einer Sandstrahlung bewirken und zu Materialschädigungen führen. Beim Vergleichen der Werte für Gesamtverschmutzung und für den Oxidaschegehalt konnten erfreulicherweise gegenüber unbehandelten Ölproben keine Zunahmen festgestellt werden. Der Aschegehalt der mit Magnesol behandelten Proben lag bei tiefen 0.001% (Grenzwert nach DIN V 51605: 0.01%). Unsere zweistufige Filtrationsanlage kann also auch sehr fein gemahlene Adsorptionshilfen mit einer mittleren Körnung von 10 bis 15 µm wirksam wieder abscheiden.

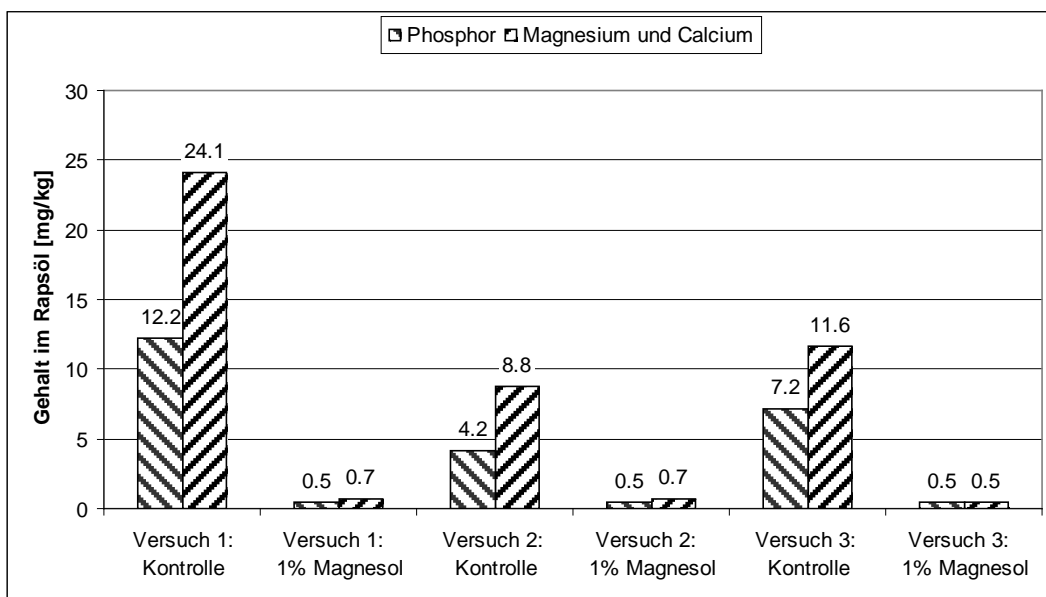


Abbildung 28: Markante Herabsetzung von Phosphor- und Erdalkaligehalten dank Zugabe des Adsorptionsmittels Magnesol.

Die deutsche Vertretung von PQ Europe hatte uns eingeladen, ebenfalls ihr Produkt Britesorb BK 390 - mittlere Körnung 15 bis 21 µm - zu prüfen. Laut Hersteller übertrifft Britesorb BK 390 mit 550 m²/g die innere Oberfläche von Magnesol mit 300 m²/g. Trotzdem gelang im mit Britesorb BK 390 behandelten Öl nie eine Absenkung des Phosphor- und Erdalkaligehaltes unter 1 mg/kg, während mit Magnesol deren eigentliche Elimination erreicht wurde. Beide Ergebnisse sind indessen hervorragend, wir bewegen uns hier an der Nachweisgrenze. Unbefriedigend beim Einsatz von Britesorb BK 390 war, dass 1 Masseprozent in das Rohöl eingerührt den Zusammenbruch des Öldurchsatzes in der KFP auslöste. Offensichtlich liegt das Körnungsband dieses Additivs in einem für unsere Filtertücher ungünstigen Bereich, neigt bei Überdosierung zu deren Verstopfung und stört den Aufbau des Filterkuchens, der am Filtertuch stets mit dem groben Trub beginnen und gegen Ende einer Charge die Kammer mit den zunehmend feinen Anteilen vollständig füllen

muss. Eine Herabsetzung der Dosierung auf 0.5 Masseprozent löste das Problem. Selbst diese Konzentration reichte ohne weiteres, um die Gehalte an Phosphor- und Erdalkalien - im Vergleich zu unbehandeltem Rapsölkraftstoff - mehr als zu halbieren. Weil das eigentlich bevorzugte Magnesol aus den USA für Kleinverbraucher nur in Zusammenarbeit mit Bezüglern grösserer Mengen erhältlich ist und sich die PQ Europe Deutschland für die Weiterentwicklung ihrer Additive in unserer gut ausgerüsteten Versuchsanlage sehr interessiert zeigte, werden uns Fragen zur Wahl und Konzentration von Additiven auch zukünftig beschäftigen.

5 Ökonomische Betrachtungen

5.1 Gestehungskosten der Rapsölgewinnung

Die Investitionskosten für die Ölmühle Suberg beliefen sich auf rund CHF 250'000.--. Wir hatten das Glück, die Anlage in den gut eingerichteten Gebäuden der Landi-Suberg realisieren zu können und damit sämtliche Kosten für Erschliessung, Gebäude, Siloanlagen und Beschickung unseres Anlagenbereiches zu umgehen. Für die Nutzung dieser bestehenden Einrichtungen war - vor dem Erwerb durch Projektpartner Peter Stähli im 2008 - ein Mietzins zu entrichten. Die Abschreibungsdauer der Anlage wurde auf 12 Jahre festgelegt.

Über die ein- und ausgehenden Geldbeträge und Warenflüsse (Rapssaat, Rapskuchen, Rapsöl) wird Buchhaltung geführt. Der Zeitaufwand für den Betrieb der Anlage, der neben der eigentlichen Betriebsbetreuung auch grössere Anteile für Untersuchungen und Systemoptimierungen beinhaltete, wurde auf der Grundlage der Präsenzzeit des Projektteams abgeschätzt. Die Kosten für Arbeit, Wartung, Administration, Miete, Energie und Betriebsstoffe (B+I-Kosten) konnten so mit rund 25 Rappen pro Liter Rapsölkraftstoff definiert werden. Versicherungskosten wurden nicht berücksichtigt.

Die Berechnung der Rapsöl-Gestehungskosten erfolgte in vier Varianten (Tab. 11). Die erste Variante betrifft den Importraps (ca. 300 Tonnen), dessen Beschaffung zu CHF 55.--/dt im Herbst 2006 durch die Landi Schüpfen erfolgte. Bei der zweiten Variante handelt es sich um den ersten Inlandraps aus dem Jahre 2007, der im Vertrag speziell für das Projekt angebaut worden war (ca. 300 Tonnen). Der Produzentenpreis lag bei CHF 73.--/dt. Dieser Inlandraps wurde zusammen mit dem Importraps innerhalb von rund einhalb Jahren verarbeitet, einer durchschnittlichen Verarbeitungsmenge von rund 400 t pro Jahr entsprechend.

Die dritte Variante stellt die Situation für den Vertragsraps der Ernte 2008 dar (ca. 200 t), der durch den Lohnunternehmer Peter Stähli übernommen wurde. Wegen den in dieser Zeit stark angestiegenen Rapshandelspreisen musste der Produzentenpreis auf CHF 100.--/dt erhöht werden. Annahme, Reinigung, Lagerung und Zwischenfinanzierung erfolgten jeweils über die Landi Lyssbachtal in Schüpfen. Sie verrechnete für diese Dienste CHF 5.--/dt und für die Zwischenfinanzierung (Kredit) einen Zins von 4.5 %.

Zuverlässiger Abnehmer des Rapskuchens ist die Firma Hauert HBG Dünger AG in Grossaffoltern, die diesen Rohstoff für die Produktion von organischen Handelsdüngern einsetzt. Der Preis stieg von CHF 36.--/dt auf gegenwärtig CHF 42.--/dt. Regelmässig bezieht das Unternehmen ebenfalls kleinere Mengen an Rapsöl für die Staubbindung im Prozess.

Inlandraps für technische Verwendungszwecke, in anerkannten Pilot- und Demonstrationsanlagen gepresst, wurde mit einem Verarbeitungsbeitrag von CHF 28.--/dt gestützt. Die Auszahlung erfolgte über swissgranum. Ab Ernte 2009 (Variante 4) soll diese staatliche Förderung unverständlicherweise wegfallen. Für dieses hypothetische Zukunftsszenario wurde ein Rapspreis von CHF 90.--/dt und ein Erlös für den Rapskuchen von CHF 40.--/dt angesetzt.

Varianten 3 und 4 gehen davon aus, dass die leider reale, zunehmende Erschwerung der Anlagenauslastung mit Vertragsraps aus der Region ergänzende Importe erforderlich macht. Die jährliche Auslastung dürfte im gegenwärtig schwierigen Umfeld auf etwa die Hälfte - rund 300 verarbeitete Jahrestonnen - sinken. Hauptverantwortlich dafür sind Negativeinflüsse der inkorrekten EMPA-Studie und einseitiger Medienkampagnen zur Pauschalverurteilung flüssiger Energieträger aus der Landwirtschaft, vorübergehend tiefe Mineralölpreise und gestiegene Rohstoffkosten für Raps.

Aus Tab. 11 gut ersichtlich ist der Haupteinfluss der Rohstoffkosten auf die Gesteungskosten von Rapsölkraftstoff. Da die bisherigen Verarbeitungsbeiträge für Ölsaaten wie erwähnt zukünftig wegfallen sollen, wird der Rapspreis zur dominanten Einflussgrösse auf der Kostenseite. Im Vernehmlassungspapier zur neuen Ackerbaubearbeitungsverordnung (AP 2011) war allerdings für P- und D-Anlagen auch weiterhin eine sehr bemerkenswerte Förderung für Inlandware von bis zu CHF 100.--/hl Rapsölkraftstoff vorgesehen! Es bleibt abzuwarten, wieweit diese sinnvolle und in den Gesamtaufwendungen günstige Stützung definitiv wird, den verfahrenstechnisch erfolgreich dargestellten, lokalen Nischenenergiebeitrag weiterhin fördern kann, oder dem sehr bedenklichen Verhinderungspotential in unserem hochabhängigen Land zum Opfer fällt. Kann die Ölmühle in Suberg die BLW-Anerkennung als P- und D-Anlage auch nach 2009 behalten, lassen sich die Gesteungskosten von schätzungsweise 225 Rp./l Rapsölkraftstoff gemäss Variante 4 bis auf 125 Rp./l reduzieren.

Tabelle 11: Kalkulation der Rapsölgesteungskosten für die Ölmühle Suberg.

1. Variante	Nr. Name	1 Import 2006	2 1.7.07-30.6.08	3 1.7.08-30.6.09	4 ab 1.7.09
2. Investitionskosten					
	Total Anlagekosten	250'000.00	250'000.00	250'000.00	250'000.00
3. Parameter für die Kostenrechnung					
	Abschr. Dauer (Jahre)	12	12	12	12
	Zins (%)	4.50	4.50	4.50	4.50
	Annuität (%)	10.97	10.97	10.97	10.97
	B+I-Kosten und Administration (Rp./l)	25.00	25.00	25.00	25.00
	Rapspreis (Fr./dt)	55.00	73.00	100.00	90.00
	Zins Sammelstelle (%)	4.50	4.50	4.50	4.50
	Pauschale für Manipulation (Fr./dt)	5.00	5.00	5.00	5.00
	Verarbeitungsbeitrag (swissgranum, Fr./dt)	0.00	28.00	28.00	0.00
	Rapskosten bereinigt (Fr./dt)	62.48	53.29	81.50	99.05
	Presskuchenpreis (Fr./dt)	36.00	37.00	42.00	40.00
4. Technische Daten					
	Ölausbeute	32.0%	38.5%	38.5%	38.5%
	Ölertrag (kg/Rapstonne)	320	385	385	385
	Ölertrag (l/Rapstonne)	348	418	418	418
	Presskuchenproduktion (kg/Rapstonne)	680	615	615	615
	Verarbeitungskapazität (kg/h)	100	100	100	100
	Auslastung (h/a)	4000	4000	3000	3000
	Rapsverarbeitung (t/a)	400	400	300	300
5. Mengen, Kosten und Erlöse					
Mengen:					
	Rapsöl (l/a)	139'130	167'391	125'543	125'543
	Rapskuchen (kg/a)	272'000	246'000	184'500	184'500
Jährl. Kosten (Fr.):					
	B+I-Kosten und Administration	34'782.61	41'847.83	31'385.87	31'385.87
	Annuität	27'416.55	27'416.55	27'416.55	27'416.55
	Rohstoffkosten (Raps)	249'900.00	213'140.00	244'500.00	297'150.00
	Kosten total	312'099.16	282'404.37	303'302.42	355'952.42
Jährl. Erlöse (Fr.):					
	Verkauf Rapskuchen	97'920.00	91'020.00	77'490.00	73'800.00
Bereinigte Kosten Rapsölgewinnung (Fr.):					
		214'179.16	191'384.37	225'812.42	282'152.42
6. Gesteungskosten Rapsöl					
	Beiträge AP 2011 (Rp./l) (Rp./l)	154	114	180	0 - 100 125 - 225

5.2 Marktsituation und Rentabilität

Über die Rentabilität einer dezentralen Ölmühle zur Gewinnung von Rapsölkraftstoff entscheiden folgende Faktoren:

- Rohstoffpreis (Kostenseite)
- Preis für Rapsölkraftstoff (Erlösseite)
- Preis für Rapskuchen (Erlösseite)
- Staatliche Förderung

Der Kernauftrag der Landwirtschaft heisst Nahrungsmittelversorgung. Erfolgt eine auf nackten Realitäten beruhende und differenzierte Analyse und wird das Ausklingen des Erdölzeitalters als definitive Tatsache nicht länger verdrängt, werden unzweideutig 3 Fakten klar:

1. Die Zeit zur Erschliessung eines breiten Spektrums an Alternativenergien ist definitiv gekommen.
2. Der landwirtschaftliche Beitrag bleibt beschränkt und wird sich zunehmend auf die nationale Eigenversorgung mit den beiden Lebens-Mitteln Nahrung und Energie konzentrieren.
3. Die entscheidenden Alternativen sind Wind, Wasserkraft, Sonne und Erdwärme.

Überall auf der Welt sind indessen Pflanzenöle für dezentrale Kreisläufe verfügbar, die nicht mit der Ernährung in Widerspruch stehen. Als biogene Energieträger mit der höchsten Energiedichte sind sie am besten für den alternativen Betrieb der weitgehend auf der Dieselseite basierenden, landwirtschaftlichen Infrastruktur geeignet. Bleibt die CO₂-Absenkung ein Thema, gehören alle Einsparungen, auch durch Transportvermeidung dank lokalem Einsatz der Koppelprodukte für die Nahrungsmittelbereitstellung, in die öffentlichen Bilanzen.

Die staatliche Förderung der Pflanzenölpressung für technische Zwecke besteht aus der Befreiung von der Mineralölsteuer bis 2011 (Anlagen ohne P- und D-Akkreditierung nur mit Ökonachweis) und aus den vorerwähnten Beiträgen im Rahmen der neuen Ackerbaubeitragsverordnung AP 2011. Diese gelten ausschliesslich für Inlandware und ihre Verarbeitung in P- und D-Anlagen. Wenn es mit rechten Dingen zugeht, darf kaltgepresster, naturbelassener Rapsölkraftstoff als CO₂ entlastender, vollständig erneuerbarer Energieträger nicht von der Stiftung Klimarappen ausgeschlossen werden.

Neben diesen Förderungen, die die CO₂-Entlastung und die Erneuerbarkeit anerkennen, sind die Preisniveaus für Rapssaat und Dieselöl die zentralen Kriterien für die Festlegung des Preises für Rapsölkraftstoff. Grundsätzlich müssen die Gestehungskosten für Rapsölkraftstoff deutlich tiefer liegen, als die Marktpreise für Dieselöl. Um einen ausreichenden Absatz für Rapsölkraftstoff im mobilen Bereich zu garantieren, sollte dessen Verkaufspreis erfahrungsgemäss den Referenzpreis für Dieselöl um 30 bis 40 Rappen unterschreiten. Nach Berücksichtigung der Kosten für Vertrieb, Marketing und Mehrwertsteuer ist demnach eine Differenz zwischen den Rapsölgestehungskosten und dem Dieselölpreis von 40 bis 50 Rappen anzustreben. Die beiden Preisverläufe in Abb. 29 zeigen, dass sich hier innerhalb kurzer Zeit erhebliche Abweichungen nach unten und oben ergeben können.

Nach der Inbetriebnahme der Ölmühle, in der Periode Herbst 06 bis Spätsommer 07, war Dieselölkraftstoff relativ günstig, während wir einen für damalige Verhältnisse eher teuren Posten Importware verarbeiten mussten, für die keine Selbstpresserbeiträge entrichtet werden. In der Folge verbesserte sich die Situation dank steigendem Dieselölpreis und dem beitragsberechtigten Schweizerraps aus dem Vertragsanbau 2007 markant. Die Gestehungskosten für Rapsöl lagen im Mittel rund 80 Rappen unter dem Verkaufspreis für Dieselöl.

Ab Sommer 2008 begann der Zusammenbruch der Treibstoffpreise als Folge der heftigen globalen Finanzkrise. Der Produzentenpreis für Schweizer Raps der Ernte 2008 stieg markant auf CHF 100.-- bis 110.--/dt und der Dieselölpreis sank seit Sommer 08 kontinuierlich ab. Die Differenz zwischen den beiden Preisverläufen war per Oktober 2008 bis auf rund 20 Rappen zusammengeschmolzen.

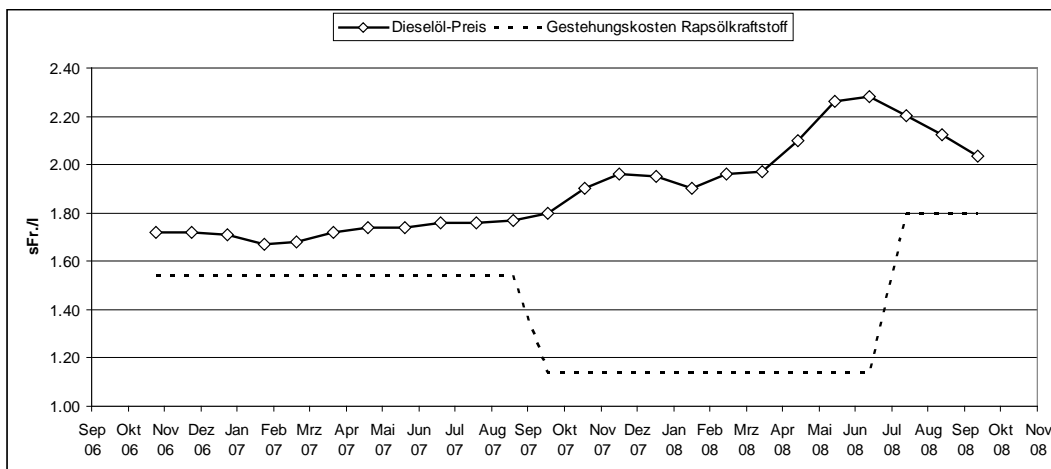


Abbildung 29: Die Entwicklung des Dieselölpreises in der Schweiz und der Verlauf der Gestehungskosten für Rapsölkraftstoff der Ölmühle Suberg.

Fazit

Bei Projektabschluss, Ende 2008, war die Rentabilität der Ölmühle Suberg nicht gegeben. Angesichts der dramatischen Umwälzungen an den Energiemärkten und in der Energiepolitik wäre es allerdings nicht seriös, hier Zukunftsprognosen anzustellen. Allerdings zeigt die Entwicklung seit Ende 2008, dass der Erdölpreis weiterhin starken Schwankungen unterworfen ist und sich die Konkurrenzfähigkeit alternativer Energiequellen wieder verbessert hat.

Aktuelle Situation zum Zeitpunkt der Berichtsverfassung (Januar 2010): Dank den Bestimmungen über die kostendeckende Einspeisevergütung (KEV) in der geänderten Energieverordnung (EnV), welche am 1. Januar 2009 in Kraft getreten ist, kann das Projekt-BHKW im Wärme geführten Betrieb kostendeckend mit Rapsölkraftstoff betrieben werden. Der Strom-Einspeisetarif gemäss KEV-Entscheid beträgt für die Anlage 39 Rp./kWh.

Literaturverzeichnis

- Anlauf H. (1991). Physikalische Prinzipien der Fest/Flüssig-Trennung. In: Hess und Thier (Hrsg.): Maschinen und Apparate zur Fest/Flüssig-Trennung. Vulkan Verlag, Essen (D), S. 2 – 12.
- Dallas (Dallas Group of America, Inc.), 2005. Datenblatt Magnesol Synthetic Magnesium Silicyte. Dallas Group, Jeffersonville, Indiana.
- Lindegger L., 2006. Grundlagen, Technik und Management der Naturdieselgewinnung. Diplomarbeit an der Schweizerischen Hochschule für Landwirtschaft SHL in Zollikofen.
- Pall (Pall SeitzSchenk Filtersystems GmbH) 2007. Pall Food & Beverage [CD- ROM], 2007 edition. Pall SeitzSchenk Filtersystems GmbH, Bad Kreuznach, D, 1 CD.
- Pozo-Rodríguez F., 2007. Prolonged Respiratory Symptoms in Clean-up Workers of the Prestige Oil Spill. Department of Respiratory Medicine and Clinical Epidemiology Unit, University Hospital 12 de Octubre, Madrid, Spain; American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine, Vol. 176, pp. 610-616.
- Rass M., 2001. Zur Rheologie des biogenen Feststoffes unter Kompression am Beispiel geschälter Rapsaat. Dissertation. Fachbereich Maschinenwesen der Universität Essen (D).
- Remmele E., Widmann B., Breun J. und Rocktäschel A., 2002. Reinigung kaltgepresster Pflanzenöle aus dezentralen Anlagen - „Gelbes Heft Nr. 75“. Bayerisches Staatsministerium für Landwirtschaft und Forsten, München (D).
- Remmele E., Thuncke K., Widmann B., Wilharm T. und Schön H., 2000. Begleitforschung zur Standardisierung von Rapsöl als Kraftstoff für pflanzenöltaugliche Dieselmotoren in Fahrzeugen und BHKW - „Gelbes Heft Nr. 69“. Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten, München (D).
- Schein C., 2003. Zum kontinuierlichen Trennpresen biogener Feststoffe in Schneckengeometrien am Beispiel geschälter Rapsaat. Dissertation, unveröffentlicht, Universität Duisburg- Essen (D), 126 S.
- Schmidt, Ch., 2007. Helfer leiden noch heute. NZZ am Sonntag vom 18.11.2007. S. 78.
- Schneider F. H., 1999. Die Merkmale der Raps-Saat unter den Aspekten Trennpresen und Schälen. Dezentrale Ölsaatenverarbeitung warum und wie?. Arbeitspapier 267. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL), Darmstadt (D). S. 33 – 45
- Siegrist A., 2007. Absenkung der Erdalkali- und Phosphorgehalte in kaltgepresstem Rapsölkraftstoff aus dezentralen Anlagen. Diplomarbeit an der Schweizerischen Hochschule für Landwirtschaft SHL in Zollikofen.
- TFZ Bayern, 2007. Variable Eigenschaften von Rapsölkraftstoff. Website des Technologie- und Förderzentrums TFZ in Straubing. Aufgerufen am 20.10.08, <http://www.tfz.bayern.de/biokraftstoffe/16704/>.
- Widmann B., Remmele E., 2008. Biokraftstoffe - Fragen und Antworten. Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe, Straubing (D), 16 S.
- Widmann B., 1994. Gewinnung und Reinigung von Pflanzenölen in dezentralen Anlagen - Einflussfaktoren auf die Produktqualität und den Produktionsprozess - „Gelbes Heft Nr. 51“. Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten, München (D).

Teil B:
Dieselmotorische Nutzung von
Rapsölkraftstoff

(1) Brennraum-Simulation
(3D-CFD)

Auszug aus dem Bericht von
Dr. Gabriel Barroso
(Redaktion: Martin Meyer)



Zusammenfassung

Rapsölkraftstoff (RK) hat im Vergleich zu Dieselöl nicht nur eine unterschiedliche Viskosität sondern auch unterschiedliche Verdampfungs- und Entzündungseigenschaften. Die CFD – Simulation bietet die Möglichkeit, im Brennraum und eingriffsfrei die Verbrennung der zwei Kraftstoffe miteinander zu vergleichen. Mit Hilfe von dreidimensionaler, zeitaufgelöster numerischer Simulation wurden die Verdampfungseigenschaften, sowie die Verbrennung bei der Einspritzung von Diesel und RK qualitativ (mit Hilfe von Visualisierungen) und quantitativ mit verdampften Kraftstoffmassen und Wärmefreisetzungen untersucht.

1. Wie gut ist die Übereinstimmung der 3D-CFD Simulation sowohl bei Diesel- wie Rapsölbetrieb?

Für die Simulationen wurde der genaue Einspritzverlauf verwendet. Für die Verbrennung wurde ein modifiziertes Eddy-Break-up Modell verwendet. Dieses von Dr. G. Barroso entwickelte Modell ist eine Weiterentwicklung des Eddy-Break-up Modells und erlaubt eine exakte Nachbildung des gemessenen Druckverlaufes um eine exakte Analyse des Experimentes zu ermöglichen. Das modifizierte Modell regelt die Modellkonstanten kurbelwinkelaufgelöst, um eine hervorragende Übereinstimmung zwischen dem simulierten und dem gemessenen Druckverlauf (respektive der Wärmefreisetzung) zu erzielen.

2. Gibt es sichtbare Unterschiede bei der Verdampfung beider Kraftstoffe?

Die Simulationen zeigen, dass mit den gegebenen Randbedingungen infolge der geringeren Kompressibilität der RK früher in den Brennraum eintritt. Das führt dazu, dass verdampfter RK früher ersichtlich ist. Insgesamt verdampft jedoch der Dieselmotorkraftstoff in einer leicht kürzeren Zeit. Deutlich zu sehen ist im Weiteren, dass die letzten Tropfen, die während dem Schliessvorgang der Düse austreten, im RK-Betrieb länger im Brennraum schweben.

3. Gibt es Unterschiede in der Lage der Flamme im Brennraum?

Für beide Kraftstoffe beginnt die Verbrennung im Bereich der maximalen Eindringtiefe der Flüssigphase. Die Flamme wandert danach in Richtung Kolbenmulde und Zylinderwand. Da ein grosser Teil des Kraftstoffes während der Expansion eingespritzt wird, sind sehr hohe Temperaturen auch in der Nähe der Zylinderwand ersichtlich. Die Spitzentemperaturen sind bei Betrieb mit RK höher.

Résumé

Par comparaison à l'huile diesel, le carburant à base d'huile de colza présente non seulement une viscosité différente mais aussi d'autres caractéristiques en ce qui concerne l'évaporation et l'allumage. La simulation CFD permet de comparer la combustion des deux carburants dans la chambre de combustion sans aucune intervention. Au moyen de la simulation tridimensionnelle numérique avec résolution temporelle, on a pu examiner les caractéristiques d'évaporation ainsi que la combustion lors de l'injection de diesel et de carburant à base de colza de manière qualitative (au moyen de visualisations) et de manière quantitative sur la base des masses de carburant évaporées et du dégagement de chaleur.

1. Quel est le degré de conformité de la simulation 3D-CFD en cas du fonctionnement à base de diesel et d'huile de colza?

Les simulations se basaient sur la courbe exacte de l'injection. Pour la combustion, on a utilisé un modèle Eddy-Break-up modifié, développé par le Dr G. Barroso et permettant la reproduction exacte de la courbe de pression mesurée et l'analyse détaillée de l'expérience. Le modèle modifié règle les constantes à partir de l'angle du vilebrequin afin

d'obtenir une conformité parfaite entre la courbe de pression simulée et celle mesurée (respectivement du dégagement de chaleur).

2. Y a-t-il des différences visibles au niveau de l'évaporation des deux carburants?

Les simulations montrent que dans les conditions données le carburant à base d'huile de colza entre plus vite dans la chambre de combustion à cause de la compressibilité moins élevée. Par conséquent, ce type de carburant évaporé est visible plus tôt. Dans l'ensemble, le carburant diesel s'évapore toutefois légèrement plus vite. En outre, on voit bien que les dernières gouttes qui sortent de la buse pendant le processus de fermeture restent plus longtemps en suspension dans la chambre de combustion lors de l'utilisation de carburant à base d'huile de colza.

3. Y a-t-il des différences en ce qui concerne la position de la flamme dans la chambre de combustion ?

Pour les deux carburants, la combustion commence au niveau de la profondeur de pénétration maximale de la phase liquide. La flamme avance en direction de la chambre de combustion du piston et de la paroi du cylindre. Comme une grande partie du carburant est injectée pendant l'expansion, les températures sont également très élevées près de la paroi du cylindre. Les températures maximales sont plus élevées en cas d'utilisation de carburant à base d'huile de colza.

Summary

Rapeseed oil fuel (RK) not only has a different viscosity than diesel oil, but also different vaporising and igniting properties. The Combustion Chamber Simulation allows the direct comparison without interference of the two fuels to be compared in the combustion chamber. With the help of a three-dimensional, time-resolved numerical simulation, the vaporising properties and combustion were examined when diesel fuel and RK were injected. Analysis was both qualitative (with the help of visualisation) and quantitative, with vaporised fuel mass and heat release.

1. How congruent is the 3D-CFD simulation for diesel and for rapeseed oil operations?

The precise injection process was used for the simulations. For combustion, a modified Eddy-Break-up model was used. This model, developed by Dr. G. Barroso, is a further development of the Eddy-Break-up model and permits an exact copy of the measured pressing process in order to permit a precise analysis of the experiment. The modified model regulates the crank angle constants to reach excellent conformance between the simulated and measured pressing processes (i.e. the heat release).

2. Are there visible differences in the vaporisation of both fuels?

The simulations demonstrate that with the given constraints resulting from lower compressibility, the RK enters the combustion chamber sooner. This, in turn, means that the vaporised RK is apparent earlier. However, all in all the diesel fuel vaporises in a slightly shorter time. It can also be clearly observed that the last drops which escape from the nozzle during the closing operation remain in the combustion chamber longer in the RK operation.

3. Are there differences in the position of the flames in the combustion chamber?

Combustion begins at maximum penetration of the liquid phase for both fuels. The flames then travel towards the piston cavity and cylinder wall. Since a large amount of the fuel is injected during expansion, very high temperatures are apparent even near the cylinder wall. Peak temperatures in RK operations are higher.

1 Einleitung und Zielsetzung des Projektteiles 3D-CFD

Rapsöl hat im Vergleich zu Dieselöl nicht nur eine unterschiedliche Viskosität, sondern auch unterschiedliche Verdampfungs- und Entzündungseigenschaften. Die CFD – Simulation bietet die Möglichkeit, eingriffsfrei die Verbrennung mit den zwei Kraftstoffen miteinander zu vergleichen. Mit Hilfe von dreidimensionaler, zeitaufgelöster numerischer Simulation sollen die Verdampfungseigenschaften, sowie die Verbrennung bei der Einspritzung von Diesel- und Rapsöl qualitativ (mit Hilfe von Visualisierungen) und quantitativ mit verdampften Kraftstoffmassen und Wärmefreisetzungen untersucht werden. Die Zielsetzung des Projektteiles 3D-CFD soll demzufolge folgende Fragen beantworten:

1. Wie gut ist die Übereinstimmung der 3D-CFD Simulation sowohl bei Diesel- wie Rapsölbetrieb mit experimentellen Daten?
2. Gibt es sichtbare Unterschiede bei der Verdampfung beider Kraftstoffe?
3. Gibt es Unterschiede in der Lage der Flamme im Brennraum?

2 Geometrie und Berechnungsnetz

2.1 Berechnungsgebiet

Die Simulationsmodelle beinhalten für beide Kraftstoffe ein Segment der Brennraumes (Mulde und Hubvolumen). Sie wurden im Massstab 1:1 durchgeführt. Tabelle 12 zeigt die Motordaten des Liebherrmotors.

Tabelle 12: Zusammenfassung der Motordaten des Liebherr D 934 L.

Motorhersteller	Liebherr
Motortyp	D 934 L
Max. Leistung	140 kW bei 2000 1/min
Einspritzung	Pumpe-Düse
Einspritzdüsen	7 Stück, symmetrisch angeordnet
Einspritzloch-Durchmesser	0.191 mm
Hubvolumen	7.01 l
Bohrung	122 mm
Hub	150 mm
Pleuellänge	237 mm
Zündfolge	1-3-4-2
Verdichtungsverhältnis	17.0 : 1
Einlass öffnet	18° KW vor OT
Einlass schliesst	30° KW nach UT

Auslass öffnet	63° KW vor UT
Auslass schliesst	18° KW nach OT
Auslassventildurchmesser	36.0 mm
Einlassventildurchmesser	39.2 mm
Ventilhub Einlass- und Auslassventil	16 mm

2.2 Berechnungsnetze

Die Berechnungsgitter bestehen aus Hexahedral-Zellen. Das CFD Berechnungsnetz besteht aus 58136 Zellen für einen Sektor. Abbildung 30 zeigt das 3D-Netz.

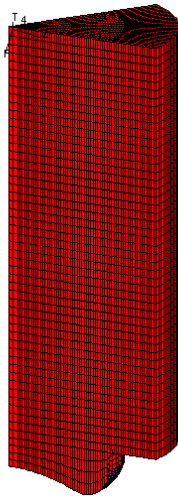


Abbildung 30: 3D-Sektor-Netz des Liebherrmotors

2.3 Betrachteter Lastpunkt

Die experimentellen Daten des Volllastpunktes mit einer Leistung von ca. 140 kW bei 1'500 1/min für Diesel- und Rapsöl (ROR = Rapsöl roh) von der HTI sind in Tabelle 13 zusammengefasst und entsprechen der HTI-Bezeichnung „A5“ und „F5“.

Tabelle 13: Eckdaten der Benchmark-Volllastpunkte aus dem Experiment.

Eckdaten	Diesel (A5)	ROR (F5)
Drehzahl	1502 1/min	1499 1/min
Drehmoment	908 Nm	898 Nm
Leistung	142.8 kW	141.0 kW
Kraftstoffmasse pro Einspritzung und Zylinder	0.177 g	0.184 g
Kraftstoff-Temperatur	50°C	61°C

Der Einspritzverlauf für beide Kraftstoffe stammt aus den Berechnungen mit GT-Fuel.

3 Numerische Modellierung

3.1 Modellannahmen

Die transienten 3D-Simulationen wurden mit dem CFD-Programm STAR-CD v. 3.26 auf einer Linux Maschine durchgeführt. Gelöst wurden die reynoldsgemittelten Navier-Stokes Gleichungen in Kombination mit dem RNG k- ϵ -Turbulenzmodell. Im Allgemeinen gilt, dass - falls nicht explizit erwähnt - die Standard Modellkonstanten verwendet wurden.

3.2 Atomisierung und Tropfenaufbruch

Nach dem Austritt des Kraftstoffes aus der Düse wird der Einspritzstrahl als eine Menge von Tropfen modelliert, welche in die Gasphase im Brennraum eindringen. Da die Anzahl der Tropfen sehr gross ist, werden diese in einzelne Gruppen zusammengefasst, in welcher die Tropfen die gleichen Eigenschaften haben. Die Tropfen folgen Erhaltungsgleichungen für Impuls, Masse und Energie. Aus diesen Gleichungen können Zeitskalen identifiziert werden für Tropfenzerfall, Impulsaustausch und Verdampfung. Nachdem der Kraftstoff die Düse verlassen hat, bricht der Strahl in einzelne Tropfen auf. Star-CD stellt für diesen Vorgang verschiedene Modelle zur Verfügung. In dieser Arbeit wird für den Tropfenaufbruch das Modell nach Reitz-Diwakar verwendet. Es ist das meistgebrauchte Modell. Für die Atomisierung wird das Modell nach Huh verwendet. Die Atomisierung nach Huh basiert auf der Annahme, dass der Tropfenaufbruch hauptsächlich auf der Trägheit des Gases und der Turbulenz, die in der Düse generiert wird, basiert. Die Turbulenz erzeugt Störungen auf der Oberfläche des Sprays. Der Druck des Gases, das den Spray einhüllt, verstärkt die Störungen, bis einzelne Tropfen aus dem Strahl gelöst werden. Nachdem dieser erste Aufbruch abgeschlossen ist, wird der weitere Verlauf nach dem Modell nach Reitz-Diwakar berechnet. Die Tropfengrösse, welche auf einer Wahrscheinlichkeitsverteilung beruht, und der Spraywinkel werden vom Modell berechnet. Eine genauere Betrachtung dieses Modells würde den Rahmen dieser Arbeit sprengen. Der Leser wird auf die Dokumentation von Star-CD verwiesen. Für den Tropfenaufbruch und die Verdampfung unterscheiden sich die beiden Kraftstoffe (Diesel- und Rapsöl) in der Dichte, der Viskosität, der Oberflächenspannung, der Verdampfungsenthalpie, dem Dampfdruck und der spezifischen Wärmekapazität. Diese Unterschiede wurden in der 3D-Simulation berücksichtigt.

3.3 Verbrennung

Die Verbrennung wurde für beide Kraftstoffe mit einer 1-Schritt Chemie modelliert. Für den Diesekraftstoff wurde als Modellkraftstoff n-Dodekan $C_{12}H_{26}$ gewählt. Rapsöl wurde mit $C_{18}H_{34}O_2$ modelliert.

Die Reaktionsgleichung für „Dieselkraftstoff“ ist folgende:



Die Reaktionsgleichung für „Rapsöl“ ist folgende:



Ein modifiziertes Eddy Break-Up Modell wurde für die Verbrennung verwendet. Dieses Modell berechnet eine charakteristische turbulente Zeit aus der turbulenten kinetischen Energie und deren Dissipationsrate. Diese Zeit wird als charakteristische Mischungszeit definiert. Die Reaktionsrate ist proportional zu dieser charakteristischen Mischungszeit multipliziert mit der Dichte, dem Minimum aus Sauerstoff und Kraftstoffkonzentration und einer Modellkonstanten A. Im Standard Eddy Break-up Modell (EBU), wird die Konstante A während der Verbrennung konstant gelassen. Die Erfahrung hat gezeigt, dass mit der

Verwendung einer variablen Modellkonstante, bessere Ergebnisse erzielt werden können.

Diese Annahme ist auch physikalisch tolerierbar, denn die verbrennungsinduzierte Turbulenz wird beim $k-\varepsilon$ Modell nicht berücksichtigt. Im Weiteren geht das $k-\varepsilon$ Modell von isotroper Turbulenz aus, was in Jet-Strömungen nicht zutrifft. Flammlöschung kann mit dem EBU-Modell nicht berücksichtigt werden und zuletzt ist die Einschnittchemie eine Vereinfachung. Durch die Wahl einer zeitabhängigen Modellkonstante können diese Modelldefizite korrigiert werden. Es wird der physikalische Zündverzug (Tropfenaufbruch und Verdampfung) berücksichtigt. Unter den gegebenen Betriebsbedingungen bei einer Einspritzung im OT nahen Bereich ist der chemische Zündverzug verglichen mit dem physikalischen Zündverzug vernachlässigbar. Zündung erfolgt folglich in allen Zellen wo es verdampftes Kraftstoff mit einer Konzentration höher 0.01 hat („Mass fraction“ von 0.01).

Die Erfahrung hat gezeigt, dass das „Shell-Autoignition“ Modell unrealistisch lange chemische Zündverzögerungen berechnet und demzufolge ungeeignet ist. Die Berücksichtigung des rein physikalischen Zündverzuges (Atomisierung, Tropfenaufbruch und Verdampfung) reicht erfahrungsgemäss für den konventionellen Dieselmotor vollkommen aus.

3.4 Fluideigenschaften

Die Dichte der Luft ist abhängig von Druck und Temperatur. Die Werte für das NASA-Polynom der Luft wurde aus der StarCD Datenbank direkt importiert. Die molekulare Viskosität ist konstant. In turbulenten Strömungen ist sie mindestens 2 Größenordnungen geringer als die turbulente Viskosität und ist demzufolge vernachlässigbar. Die spezifische Wärmekapazität ist ebenfalls polynomisch. Alle verwendeten Moleküle ($C_{12}H_{26}$, $C_{18}H_{34}O_2$, O_2 , H_2O , N_2 , CO_2) haben konstante molekulare Viskosität, polynomische Wärmekapazität und konstante Wärmeleitung. Diese Werte und die Bildungswärme wurden aus der StarCD Datenbank importiert. Einzige Ausnahme ist der Modellkraftstoff $C_{18}H_{34}O_2$ für Rapsöl. Der Wert für die Bildungswärme wurde modifiziert um den korrekten Heizwert wiederzugeben. Das Molekulargewicht wurde berechnet.

3.5 Rand- und Anfangsbedingungen

Die Temperatur und der Druck bei „Einlass schliesst“ wurden aus den experimentellen Messdaten übernommen. Für die Wandtemperatur und die Kolbentemperatur wurden 420 K angenommen.

4 Resultate

4.1 Wie gut ist die Übereinstimmung der 3D-CFD Simulation mit gemessenen Werten?

Abbildung 31 und Abbildung 32 zeigen den Vergleich zwischen dem simulierten und dem gemessenen Druckverlauf. Die Übereinstimmung ist bei Dieselbetrieb hervorragend.

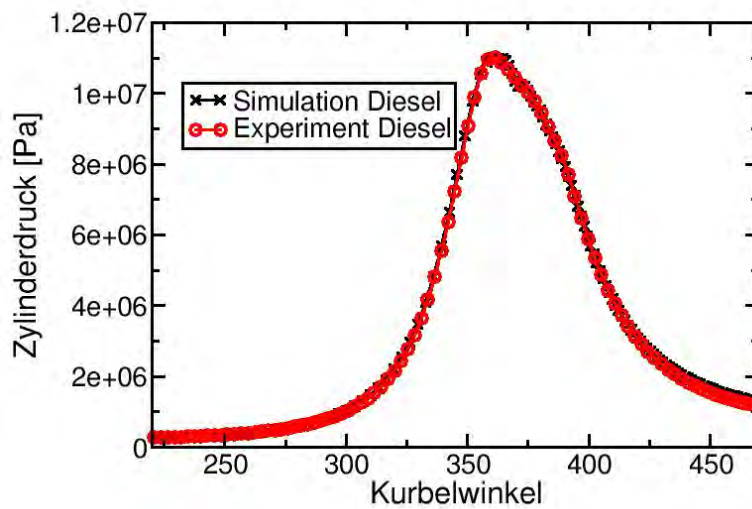


Abbildung 31: Vergleich zwischen simuliertem Druckverlauf und experimentellen Daten bei Dieselbetrieb.

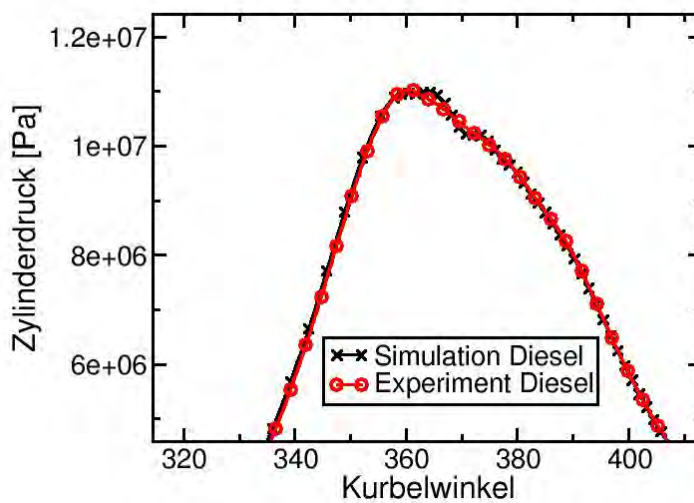


Abbildung 32: Vergleich zwischen simuliertem Druckverlauf und experimentellen Daten bei Dieselbetrieb (Vergrößerung)

Abbildung 33 und Abbildung 34 zeigen den Vergleich zwischen dem simulierten und dem gemessenen Druckverlauf bei Rapsölbetrieb. Die Übereinstimmung ist auch bei Rapsölbetrieb hervorragend.

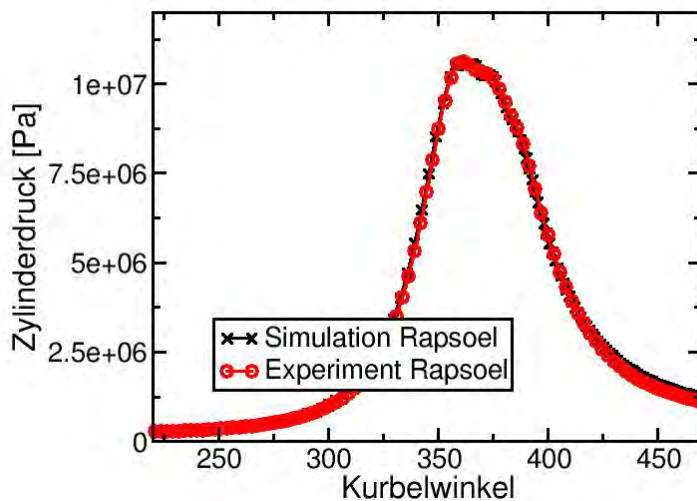


Abbildung 33: Vergleich zwischen simuliertem Druckverlauf und experimentellen Daten bei Rapsölbetrieb

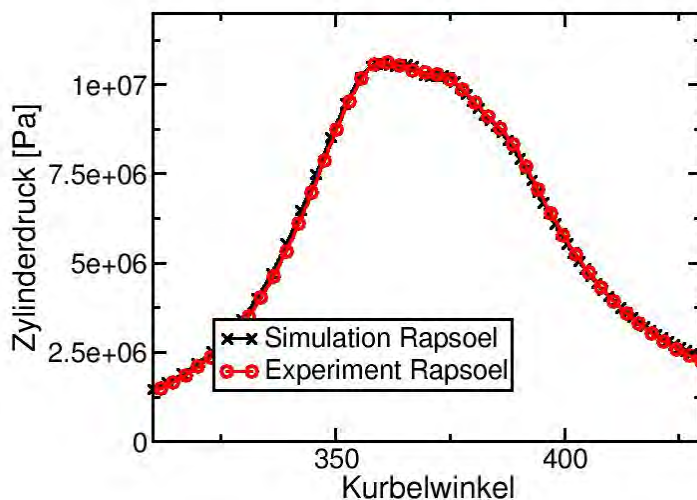


Abbildung 34: Vergleich zwischen simuliertem Druckverlauf und experimentellen Daten bei Rapsölbetrieb (Vergrößerung)

Die globalen simulierten Werte zeigen eine hervorragende Übereinstimmung mit dem Experiment. Aus diesem Grunde kann davon ausgegangen werden, dass auch die lokalen Werte mit dem Experiment eine ebenso gute Übereinstimmung erreichen.

4.2 Gibt es sichtbare Unterschiede bei der Verdampfung beider Kraftstoffe?

Infolge der kleineren Kompressibilität von Rapsöl, verglichen mit Dieselkraftstoff, wird dieser etwas früher in den Brennraum eingespritzt. Abbildung 35 zeigt den Verlauf des eingespritzten Kraftstoffes bei Betrieb mit Diesel- und Rapsöl. Die eingespritzte Rapsölmenge wird leicht höher ausgewiesen, als die eingespritzte Dieselmengen. Dies liegt an der um ca. 3 bis 4% tieferen Energiedichte von Rapsöl.

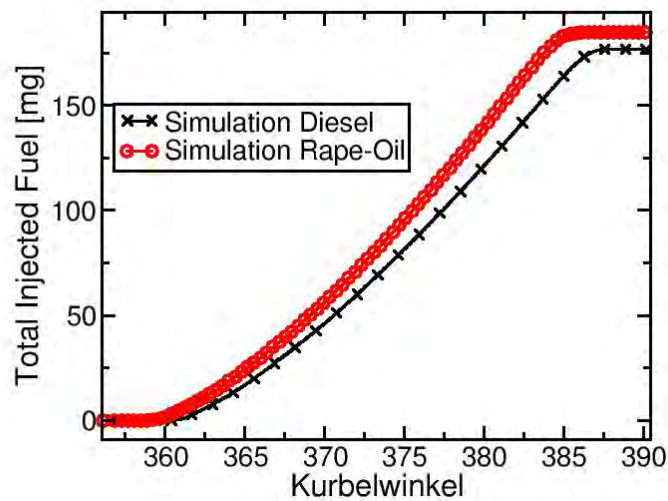


Abbildung 35: Vergleich der eingespritzten Kraftstoffmasse von Diesel und Rapsöl.

Abbildung 36 zeigt den Verlauf des verdampften Kraftstoffes. Es ist gut ersichtlich, dass das Rapsöl - absolut gesehen - vor dem Dieselkraftstoff verdampft. Die genaue Betrachtung des Verlaufes des verdampften, prozentual zum bereits eingespritzten Kraftstoff (Abbildung 37), lässt einen späteren Verdampfungsbeginn des Dieselkraftstoffes, aber ein anschließendes Einholen des Rapsöls erkennen. Der Dieselkraftstoff verdampft folglich in einem kleineren, zeitlichen Fenster.

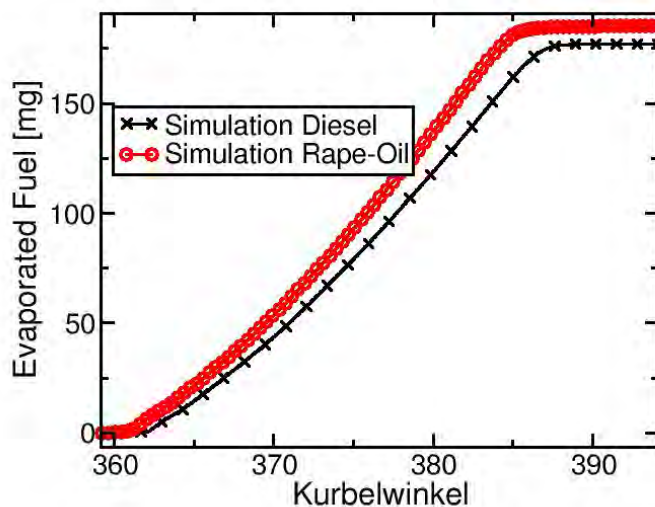


Abbildung 36: Vergleich der Verdampfung von Diesel und Rapsöl.

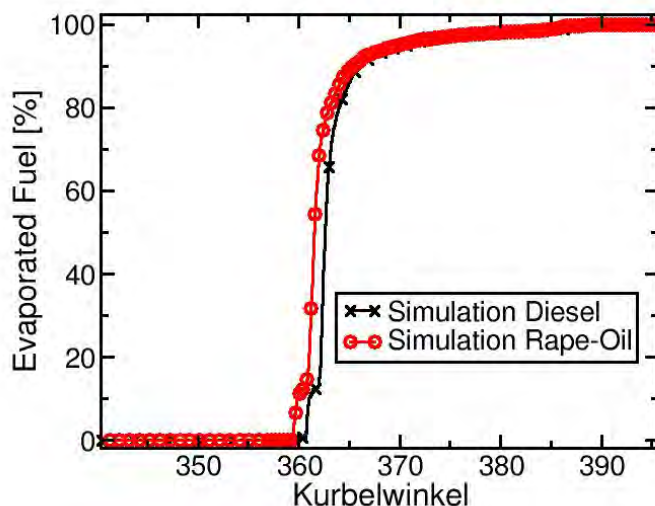


Abbildung 37: Vergleich der Verdampfung von Diesel und Rapsöl prozentual zur bereits eingespritzten Masse.

Der Vergleich der experimentellen Wärmefreisetzungen für Diesel- und Rapsöl in Abbildung 38 zeigt den gleichzeitigen Brennbeginn für beide Kraftstoffe. Obwohl Rapsöl früher in den Brennraum eingespritzt wird und früher zu verdampfen beginnt, ist der Brennbeginn bei beiden Kraftstoffen gleich. Dieses Ergebnis dokumentiert schön den Einfluss der tieferen Cetanzahl von Rapsölkraftstoff, die – teilweise kompensiert durch den Sauerstoffanteil – für eine leicht hinter Dieselöl zurückliegende Zündwilligkeit verantwortlich ist.

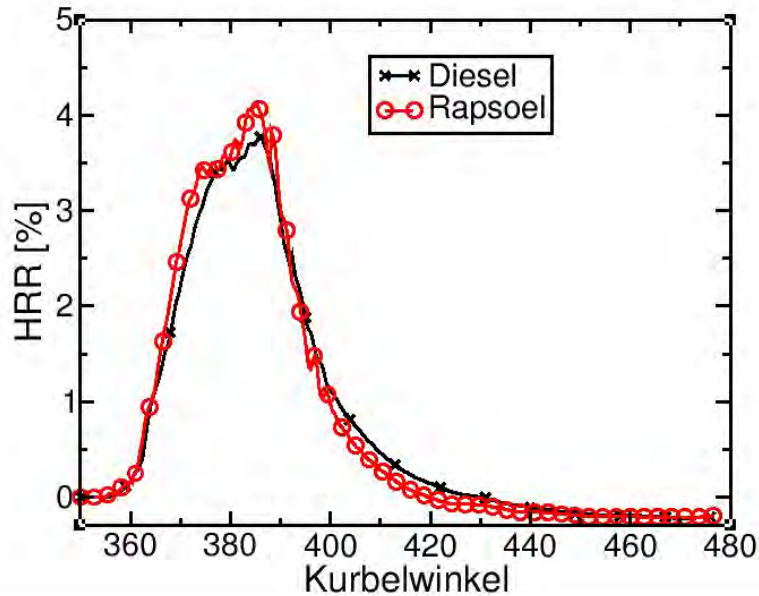
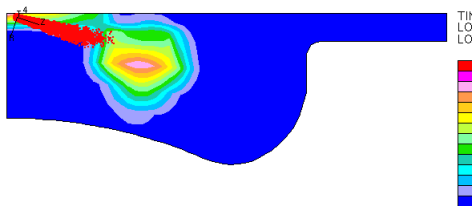


Abbildung 38: Experimentelle Wärmefreisetzung bei Rapsöl und Dieselbetrieb.

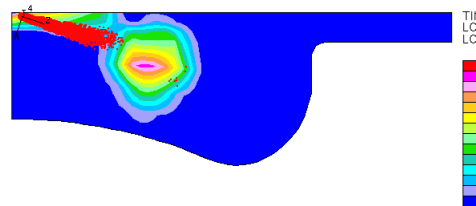
Die Abbildungen 39 bis 52 zeigen 3D-Schnitte durch die Sprayachse des Sprays sowie der Kraftstoffkonzentration für unterschiedliche Kurbelwinkel. Aus Abbildungen 39 und 40 ist ersichtlich, dass die lokale Kraftstoffkonzentration bei Rapsöl 6.3° n. OT an der Sprayspitze leicht höher ist, als bei Dieselöl. Verdampftes Rapsöl penetriert infolge des grösseren Impulses tiefer. Gegen Ende der Expansion sind bei Rapsöl einige Tropfen noch nicht verdampft (Abbildungen 45 bis 52). Bei Dieselöl sind es deutlich weniger. Abbildung 37 dokumentiert, dass es sich nur um sehr geringe Mengen handelt. Der verdampfte Kraftstoff geht jedoch im Fall von Rapsöl früher in die Verbrennung ein, als beim Dieselöl.



Crank Angle 6.30 ATDC

Liebherr
Simulation with Diesel
M. Kueng / G. Barroso / K. Boulouchos / LAV / ETH Zuerich

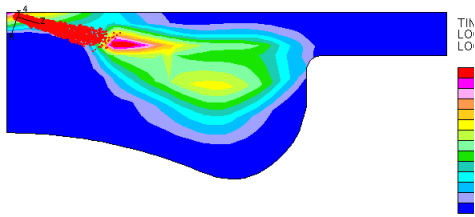
Abbildung 39: Kraftstoffkonzentration und Spray 6.3 n. OT bei Dieselbetrieb



Crank Angle 6.30 ATDC

Liebherr
Simulation with Rape-Oil
M. Kueng / G. Barroso / K. Boulouchos / LAV / ETH Zuerich

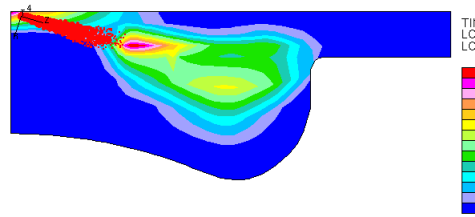
Abbildung 40: Kraftstoffkonzentration und Spray 6.3 n. OT bei Rapsölbetrieb



Crank Angle 13.50 ATDC

Liebherr
Simulation with Diesel
M. Kueng / G. Barroso / K. Boulouchos / LAV / ETH Zuerich

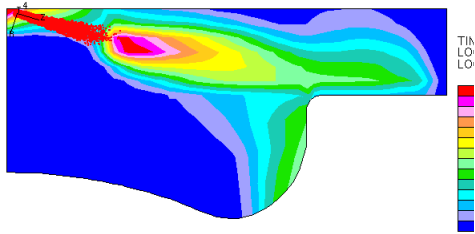
Abbildung 41: Kraftstoffkonzentration und Spray 13.5 n. OT bei Dieselbetrieb



Crank Angle 13.50 ATDC

Liebherr
Simulation with Rape-Oil
M. Kueng / G. Barroso / K. Boulouchos / LAV / ETH Zuerich

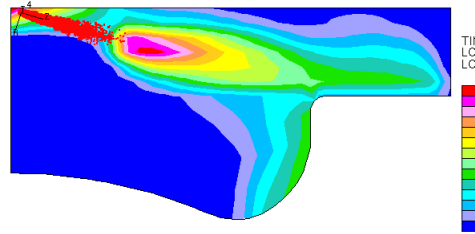
Abbildung 42: Kraftstoffkonzentration und Spray 13.5 n. OT bei Rapsölbetrieb



Crank Angle 24.30 ATDC

Liebherr
Simulation with Diesel
M. Kueng / G. Barroso / K. Boulouchos / LAV / ETH Zuerich

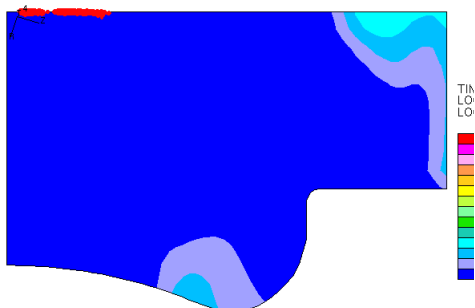
Abbildung 43: Kraftstoffkonzentration und Spray 24.3 n. OT bei Dieselbetrieb



Crank Angle 24.30 ATDC

Liebherr
Simulation with Rape-Oil
M. Kueng / G. Barroso / K. Boulouchos / LAV / ETH Zuerich

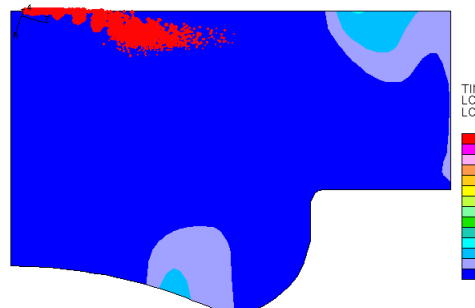
Abbildung 44: Kraftstoffkonzentration und Spray 24.3 n. OT bei Rapsölbetrieb



Crank Angle 38.70 ATDC

Liebherr
Simulation with Diesel
M. Kueng / G. Barroso / K. Boulouchos / LAV / ETH Zuerich

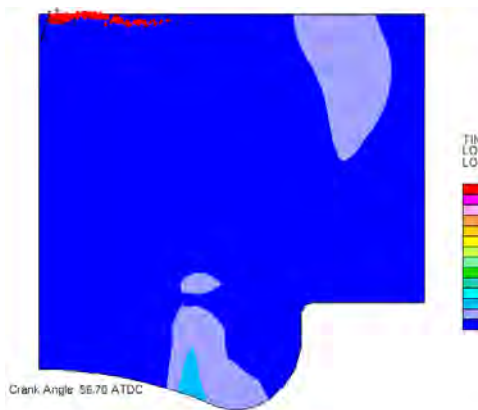
Abbildung 45: Kraftstoffkonzentration und Spray 38.7 n. OT bei Dieselbetrieb



Crank Angle 38.70 ATDC

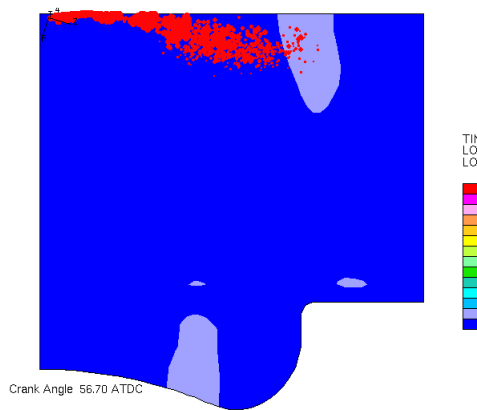
Liebherr
Simulation with Rape-Oil
M. Kueng / G. Barroso / K. Boulouchos / LAV / ETH Zuerich

Abbildung 46: Kraftstoffkonzentration und Spray 38.7 n. OT bei Rapsölbetrieb



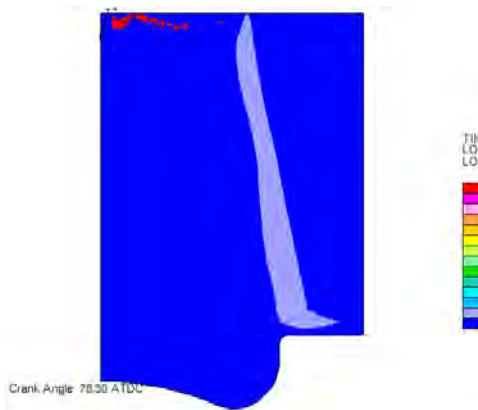
Liebherr
Simulation with Diesel
M. Kueng / G. Barroso / K. Boulouchos / LAV / ETH Zuerich

Abbildung 47: Kraftstoffkonzentration und Spray 56.7 n. OT bei Dieselbetrieb



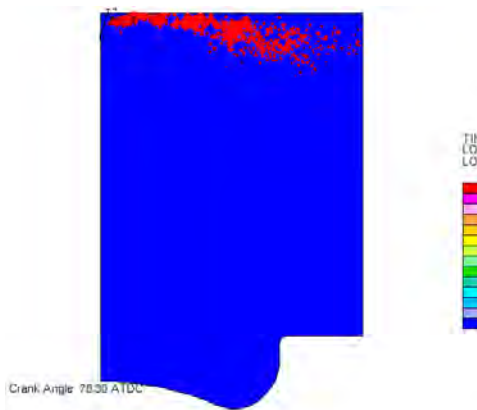
Liebherr
Simulation with Rape-Oil
M. Kueng / G. Barroso / K. Boulouchos / LAV / ETH Zuerich

Abbildung 48: Kraftstoffkonzentration und Spray 56.7 n. OT bei Rapsölbetrieb



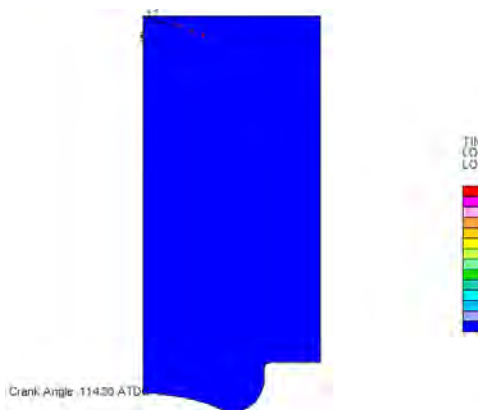
Liebherr
Simulation with Diesel
M. Kueng / G. Barroso / K. Boulouchos / LAV / ETH Zuerich

Abbildung 49: Kraftstoffkonzentration und Spray 78.3 n. OT bei Dieselbetrieb



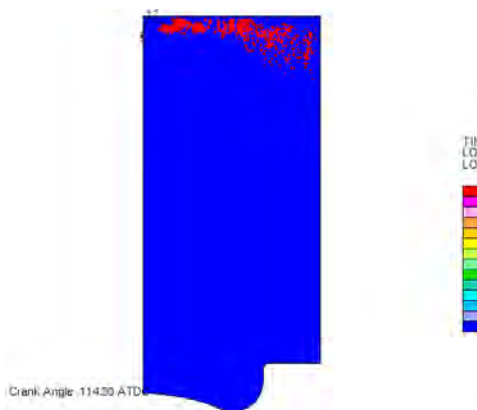
Liebherr
Simulation with Rape-Oil
M. Kueng / G. Barroso / K. Boulouchos / LAV / ETH Zuerich

Abbildung 50: Kraftstoffkonzentration und Spray 78.3 n. OT bei Rapsölbetrieb



Liebherr
Simulation with Diesel
M. Kueng / G. Barroso / K. Boulouchos / LAV / ETH Zuerich

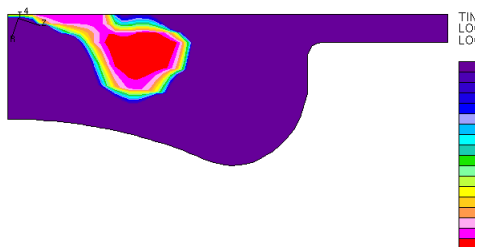
Abbildung 51: Kraftstoffkonzentration und Spray 114.3 n. OT bei Dieselbetrieb



Liebherr
Simulation with Rape-Oil
M. Kueng / G. Barroso / K. Boulouchos / LAV / ETH Zuerich

Abbildung 52: Kraftstoffkonzentration und Spray 114.3 n. OT bei Rapsölbetrieb

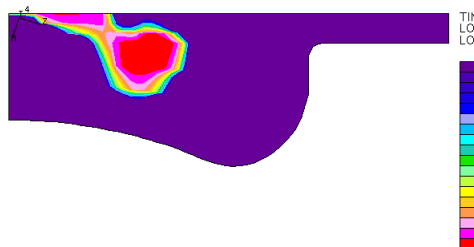
Die Abbildungen 53 bis 66 zeigen das Lambda im Betrieb mit Rapsöl- und Dieselkraftstoff und bei unterschiedlichen Kurbelstellungen. In beiden Fällen gibt es sehr fette Zonen (Lambda < 0.1). Gegen Ende der Expansion verschwindet das Lambda bei Rapsöl, wohingegen beim Dieselöl, infolge der geringen Menge nicht verbrannten Kraftstoffs, ein Lambda noch angezeigt wird.



Crank Angle 6.30 ATDC

Liebherr
Simulation with Diesel
M. Kueng / G. Barroso / K. Boulouchos / LAV / ETH Zuerich

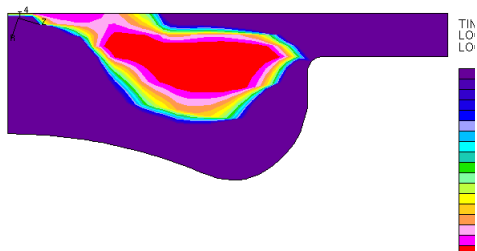
Abbildung 53: Lambda 6.3 n. OT bei Dieselbetrieb



Crank Angle 6.30 ATDC

Liebherr
Simulation with Rapeseed Oil
M. Kueng / G. Barroso / K. Boulouchos / LAV / ETH Zuerich

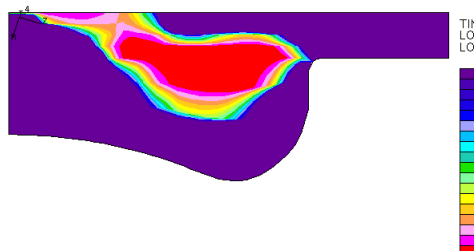
Abbildung 54: Lambda 6.3 n. OT bei Rapsölbetrieb



Crank Angle 13.50 ATDC

Liebherr
Simulation with Diesel
M. Kueng / G. Barroso / K. Boulouchos / LAV / ETH Zuerich

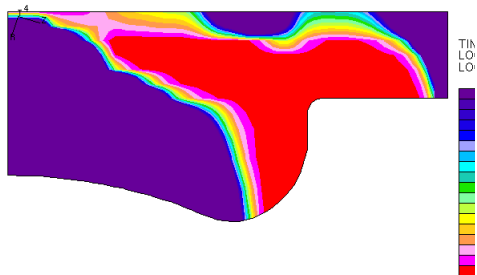
Abbildung 55: Lambda 13.5 n. OT bei Dieselbetrieb



Crank Angle 13.50 ATDC

Liebherr
Simulation with Rapeseed Oil
M. Kueng / G. Barroso / K. Boulouchos / LAV / ETH Zuerich

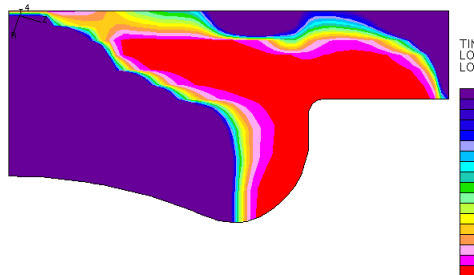
Abbildung 56: Lambda 13.5 n. OT bei Rapsölbetrieb



Crank Angle 24.30 ATDC

Liebherr
Simulation with Diesel
M. Kueng / G. Barroso / K. Boulouchos / LAV / ETH Zuerich

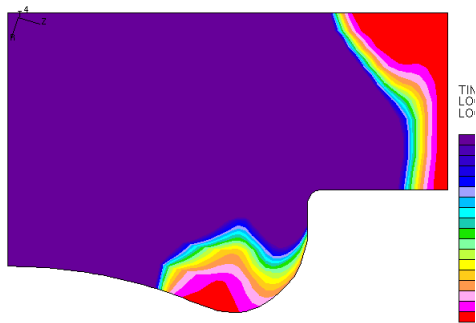
Abbildung 57: Lambda 24.3 n. OT bei Dieselbetrieb



Crank Angle 24.30 ATDC

Liebherr
Simulation with Rapeseed Oil
M. Kueng / G. Barroso / K. Boulouchos / LAV / ETH Zuerich

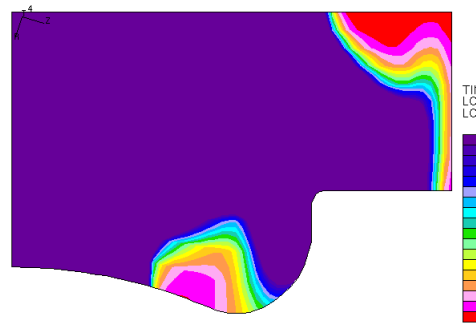
Abbildung 58: Lambda 24.3 n. OT bei Rapsölbetrieb



Crank Angle 38.70 ATDC

Liebherr
Simulation with Diesel
M. Kueng / G. Barroso / K. Boulouchos / LAV / ETH Zuerich

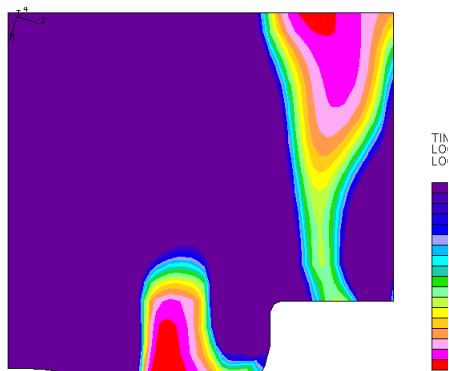
Abbildung 59: Lambda 38.7 n. OT bei Dieselbetrieb



Crank Angle 38.70 ATDC

Liebherr
Simulation with Rape-Oil
M. Kueng / G. Barroso / K. Boulouchos / LAV / ETH Zuerich

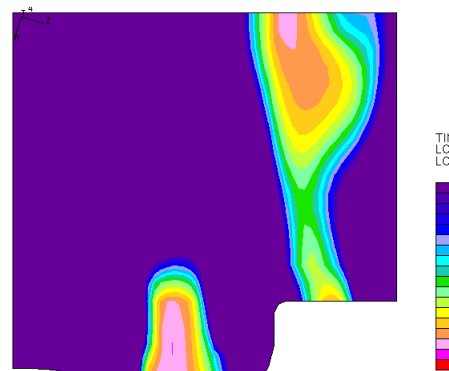
Abbildung 60: Lambda 38.7 n. OT bei Rapsölbetrieb



Crank Angle 56.70 ATDC

Liebherr
Simulation with Diesel
M. Kueng / G. Barroso / K. Boulouchos / LAV / ETH Zuerich

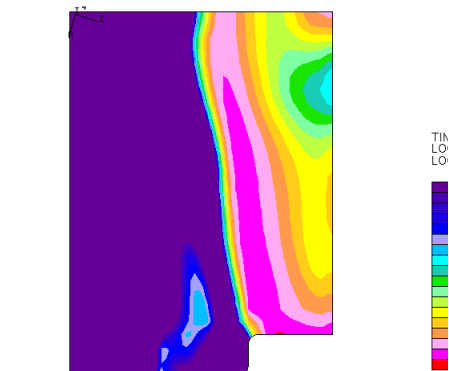
Abbildung 61: Lambda 56.7 n. OT bei Dieselbetrieb



Crank Angle 56.70 ATDC

Liebherr
Simulation with Rape-Oil
M. Kueng / G. Barroso / K. Boulouchos / LAV / ETH Zuerich

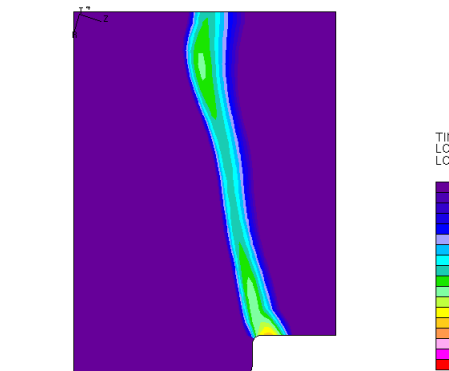
Abbildung 62: Lambda 56.7 n. OT bei Rapsölbetrieb



Crank Angle 78.30 ATDC

Liebherr
Simulation with Diesel
M. Kueng / G. Barroso / K. Boulouchos / LAV / ETH Zuerich

Abbildung 63: Lambda 78.3 n. OT bei Dieselbetrieb



Crank Angle 78.30 ATDC

Liebherr
Simulation with Rape-Oil
M. Kueng / G. Barroso / K. Boulouchos / LAV / ETH Zuerich

Abbildung 64: Lambda 78.3 n. OT bei Rapsölbetrieb

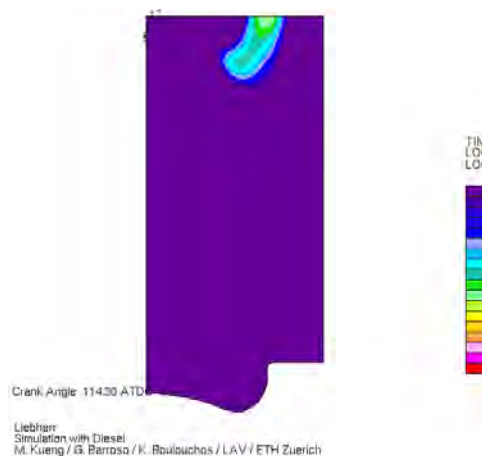


Abbildung 65: Lambda 114.3 n.
OT bei Dieselbetrieb

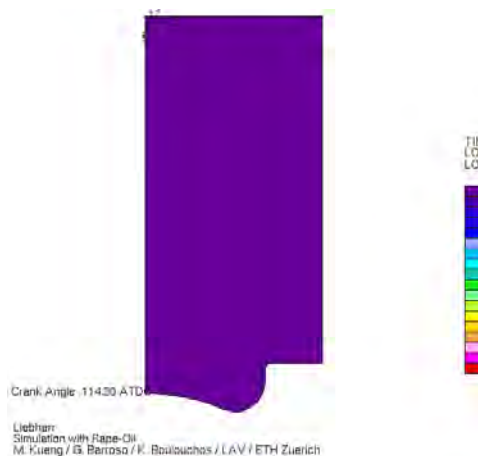


Abbildung 66: Lambda 114.3 n.
OT bei Rapsölbetrieb

4.3 Gibt es Unterschiede in der Lage der Flamme im Brennraum?

Die Abbildungen 67 bis 80 zeigen die Temperaturen im Brennraum bei Diesel- und Rapsölbetrieb. Bei 6.3° KW n. OT ist die Maximaltemperatur mit Rapsöl im betrachteten Schnitt mehr als 100° K höher als mit Dieselmotorkraftstoff. Auch bei 13.5° KW und 24.3° KW n. OT ist die Maximaltemperatur im Rapsölbetrieb höher, als beim Einsatz von Dieselmotorkraftstoff. Dies ist eine Folge der höheren Wärmefreisetzungsrate im Rapsölbetrieb, bedingt durch das Vorhandensein von mehr Rapsöl bei gleichem Kurbelwinkel. In beiden Fällen findet die Verbrennung spät statt, was zu hohen Temperaturen in Wandnähe führt - mit dem Nachteil von vermehrtem Ölverschleiss und Wandwärmeverlusten.

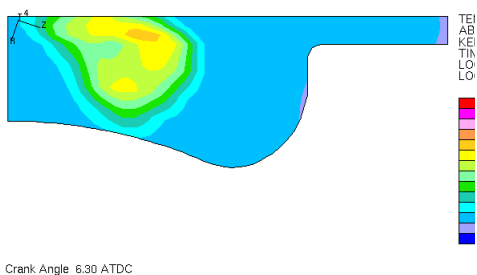


Abbildung 67: Temperatur 6.3 n.
OT bei Dieselbetrieb

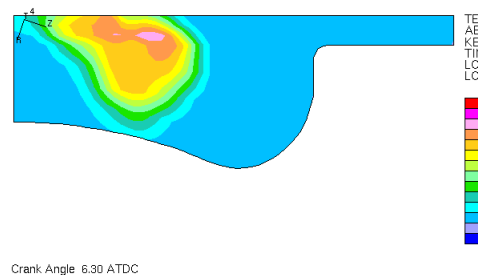
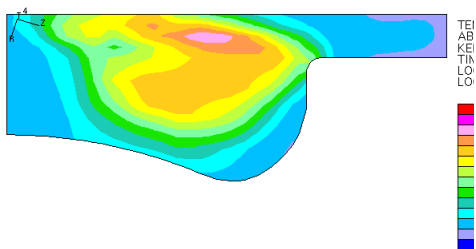


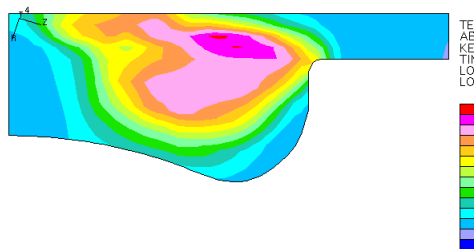
Abbildung 68: Temperatur 6.3 n.
OT bei Rapsölbetrieb



Crank Angle 13.50 ATDC

Liebherr
Simulation with Diesel
M. Kueng / G. Barroso / K. Boulouchos / LAV / ETH Zuerich

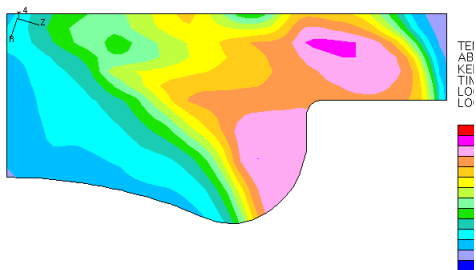
**Abbildung 69: Temperatur 13.5 n.
OT bei Dieselbetrieb**



Crank Angle 13.50 ATDC

Liebherr
Simulation with Rape-Oil
M. Kueng / G. Barroso / K. Boulouchos / LAV / ETH Zürich

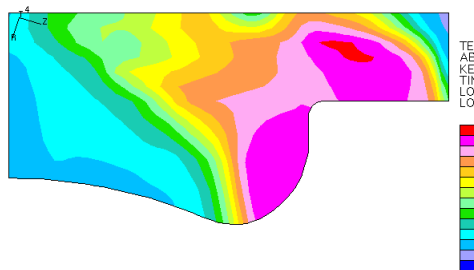
**Abbildung 70: Temperatur 13.5 n.
OT bei Rapsölbetrieb**



Crank Angle 24.30 ATDC

Liebherr
Simulation with Diesel
M. Kueng / G. Barroso / K. Boulouchos / LAV / ETH Zuerich

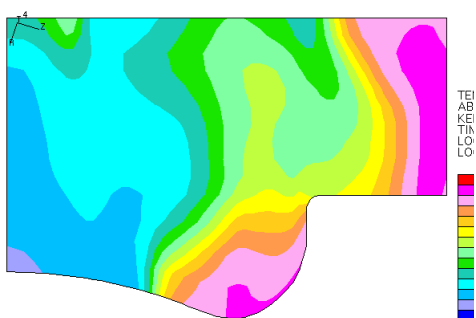
**Abbildung 71: Temperatur 24.3 n.
OT bei Dieselbetrieb**



Crank Angle 24.30 ATDC

Liebherr
Simulation with Rape-Oil
M. Kueng / G. Barroso / K. Boulouchos / LAV / ETH Zürich

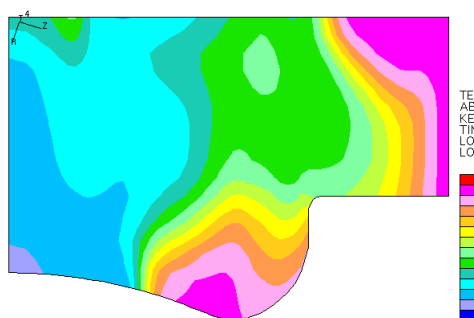
**Abbildung 72: Temperatur 24.3 n.
OT bei Rapsölbetrieb**



Crank Angle 38.70 ATDC

Liebherr
Simulation with Diesel
M. Kueng / G. Barroso / K. Boulouchos / LAV / ETH Zuerich

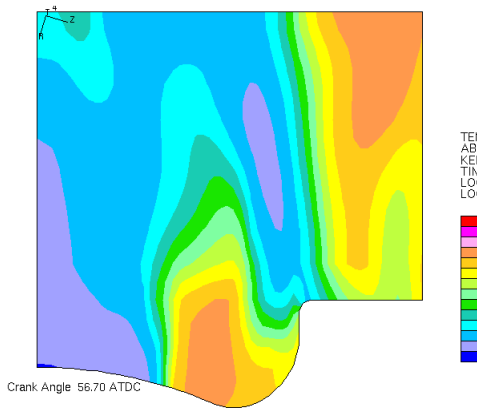
**Abbildung 73: Temperatur 38.7 n.
OT bei Dieselbetrieb**



Crank Angle 38.70 ATDC

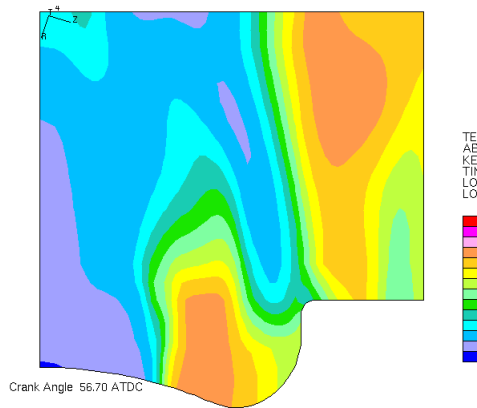
Liebherr
Simulation with Rape-Oil
M. Kueng / G. Barroso / K. Boulouchos / LAV / ETH Zürich

**Abbildung 74: Temperatur 38.7 n.
OT bei Rapsölbetrieb**



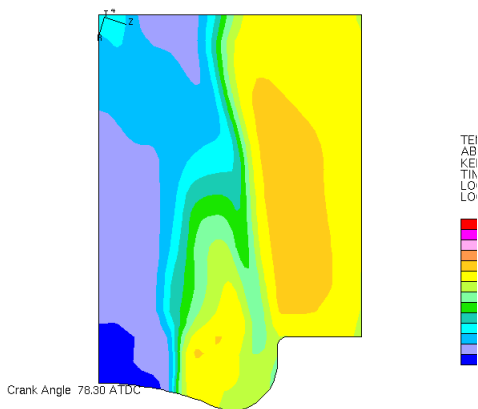
Liebherr
Simulation with Diesel
M. Kueng / G. Barroso / K. Boulouchos / LAV / ETH Zuerich

Abbildung 75: Temperatur 56.7 n. OT bei Dieselbetrieb



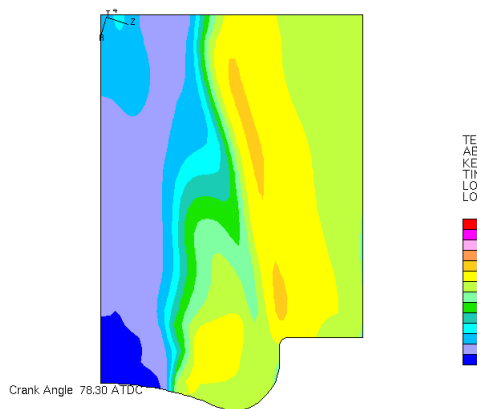
Liebherr
Simulation with Rape-Oil
M. Kueng / G. Barroso / K. Boulouchos / LAV / ETH Zürich

Abbildung 76: Temperatur 56.7 n. OT bei Rapsölbetrieb



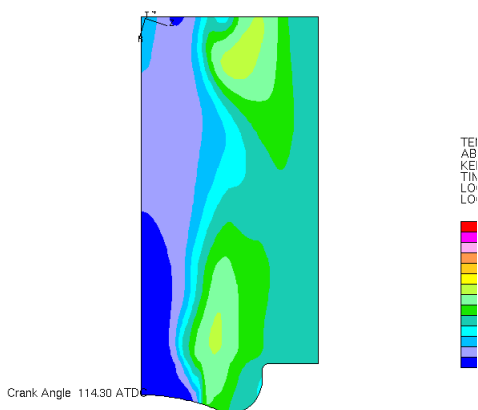
Liebherr
Simulation with Diesel
M. Kueng / G. Barroso / K. Boulouchos / LAV / ETH Zuerich

Abbildung 77: Temperatur 78.3 n. OT bei Dieselbetrieb



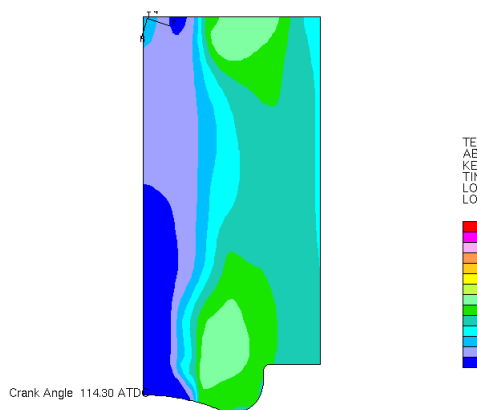
Liebherr
Simulation with Rape-Oil
M. Kueng / G. Barroso / K. Boulouchos / LAV / ETH Zürich

Abbildung 78: Temperatur 78.3 n. OT bei Rapsölbetrieb



Liebherr
Simulation with Diesel
M. Kueng / G. Barroso / K. Boulouchos / LAV / ETH Zuerich

Abbildung 79: Temperatur 114.3 n. OT bei Dieselbetrieb



Liebherr
Simulation with Rape-Oil
M. Kueng / G. Barroso / K. Boulouchos / LAV / ETH Zürich

Abbildung 80: Temperatur 114.3 n. OT bei Rapsölbetrieb

5 Diskussion und Folgerungen

Diese Arbeit hat gezeigt, dass das verwendete erweiterte EBU-Verbrennungsmodell für die Unterstützung von Prüfstandläufen eine Hilfe ist und die Nachbildung von Prüfstandsergebnissen mittels 3D-Simulation sowohl für den Betrieb mit Diesel-, als auch mit Rapsölkraftstoff sehr gute Ergebnisse liefert. Die experimentellen Druckkurven konnten sehr genau nachgebildet werden. Dank dieser Nachbildung wurde es möglich aufzuzeigen, dass die Rapsöleinspritzung den Brennraum effektiv früher erreicht, der Start der Verbrennung für beide Kraftstoffe trotzdem identisch bleibt. Eine klare Andeutung der tieferen Cetanzahl von Rapsöl.

Die Simulation belegt ebenfalls eindrücklich, dass Rapsöl absolut früher verdampft, Die- selkraftstoff indessen „aufholt“, dessen Verdampfung also in einem kürzeren zeitlichen Fenster abläuft. Am Ende der Expansion waren bei Rapsölbetrieb vereinzelt Tropfen noch nicht in die Verdampfung übergegangen. Ihre Masse, verglichen mit derjenigen der gesamten, eingespritzten Kraftstoffmasse, ist jedoch minimal.

Im Weiteren konnte gezeigt werden, dass die höhere Wärmefreisetzungsrate bei Rapsöl- betrieb höhere lokale Temperaturen im Brennraum veranlasst, was durch höhere experi- mentelle NO_x -Werte nachgewiesen wurde.

Sowohl im Betrieb mit Rapsöl- wie mit Dieselmotoren waren infolge der späten Einsprit- zung die Temperaturen in Zylinderwandnähe während der Expansionsphase sehr hoch, was zu erhöhtem Ölverschleiss und Wandwärmeverlusten führt. Wegen dem höheren C- H-Verhältnis von Rapsöl liegen die CO_2 -Konzentrationen im Rapsöl- über denjenigen im Dieselmotorenbetrieb.

Umgekehrt verhält es sich bei der H_2O -Konzentration. Im Rapsölbetrieb fielen die lokalen Sauerstoffkonzentrationen nie unter 0.4%, was auf den Sauerstoffanteil in diesem biogenen Kraftstoff zurückzuführen ist. Auf Grund der höheren Masse und demzufolge dem höheren Impuls, der vom Spray der Gasphase übertragen wird, ist die Gasgeschwindigkeit bei Betrieb mit Rapsöl tendenziell höher.

Die Simulation hat gezeigt, dass sich der Zeitpunkt des Einspritzbeginns nach einer Um- rüstung von Diesel- auf Rapsölbetrieb - als Folge der geringeren Kompressibilität von Rapsöl - ändert. Die effektive Einspritzrate fällt leicht höher aus, um die knapp 4 % tiefere Energiedichte zu kompensieren. Die Verbrennungstemperaturen sind höher und die Brenndauer etwas kürzer, was zu höheren NO_x -Werten führt.

Diese Problematik könnte mit einer längeren Einspritzdauer bei Rapsöl (geringere Ener- giezufuhr pro Grad Kurbelwinkel) reduziert werden. Diesem Vorteil stünde indessen der Nachteil eines tieferen Wirkungsgrades gegenüber. Da die Anlage mehrheitlich auf weni- gen Lastpunkten und stationär betrieben wird, der Kraftstoff- wie auch der Harnstoffver- brauch wichtig sind, ist der Einsatz von Abgasrückführung (AGR) zu diskutieren.

Bemerkungen von Projektleiter Martin Meyer:

Aus seinen bisherigen Erfahrungen war dem Projektleiter die Problematik von Abgasrück- führung bei Pflanzenölmotoren bekannt. Namentlich die während der Projektlaufzeit bei Liebherr noch praktizierte interne AGR wäre mit der Gefahr verbunden gewesen, in den Kaltstart- und Warmlaufphasen die kühleren Einlassventile mit unverbrannten Pflanzen- ölteilen zu belegen.

Aus diesem Grund und weil unser BHKW im engen Lastkollektiv der Generatorbedingun- gen ($1'500 \text{ min}^{-1}$, ca. 80% Auslastung) und mit einer wirksamen Denox/DPF-Anlage be- trieben wird, gaben wir der Optimierung von Verbrennungsgüte, Rückstandsfreiheit im Brennraum und Wirkungsgrad höhere Priorität, als einer innermotorischen Reduktion der NO_x , erkauft mit allen damit verbundenen Nachteilen. Dieser Ansatz erschien uns umso konsequenter, als die Literkosten für Rapsöl etwa doppelt so hoch sind, wie für die Harn-

stofflösung und deshalb eine Kompensation der nun möglichen Kraftstoffeinsparung kaum zu erwarten wäre.

Es war deshalb das Anliegen des Projektleiters, den mit einer Nockenwelle für interne AGR ausgelieferten Motor noch während der Prüfstandsphase auf Betrieb ohne AGR umzurüsten. Liebherr entsprach diesem Wunsch, übernahm Lieferung und Einbau einer Ersatznockenwelle, die Projektleitung das Wegschleifen der einlassseitigen AGR-Nocken, so dass an der TI Biel noch Vergleichsversuche mit und ohne AGR möglich wurden, der Praxiseinsatz seither hingegen nur noch ohne AGR erfolgt.

(2) Motorprüfstanduntersuchung

Auszug aus dem Bericht Nr. B201 von:
Dr. Jan Czerwinski
Yan Zimmerli
Tobias Neubert
(Redaktion: Matthias Stettler, SHL)

AFHB, TI, Biel

Abkürzungen

AFHB	Abgasprüfstelle FH Biel, CH
AGR	Abgasrückführung
ASTM	American Society for Testing Materials
BAFU	Bundesamt für Umwelt, (Swiss EPA)
BHKW	Blockheizkraftwerk
CDI	Common Rail Diesel Injection
CNC	condensation nuclei counter
CPC	condensation particle counter
CTI	Swiss Commission for Technology and Innovation
D	Diesel
DB	delivery begin
DC	Diffusion Charging Sensor
DI	Direct Injection
DIN	Deutsches Institut für Normung
DMA	differential mobility analyzer
DME	Diesel Motor
DPF	Diesel Particle Filter
EC	Elemental Carbon
ECU	electronic control unit
ELPI	Electric low pressure impactor
EMPA	Eidgenössische Material Prüf- und Forschungsanstalt
EPA	Environmental Protection Agency
FAME	Fatty Acid Methyl Ester
FID	flame ionization detector
FL	full load
GC	gas chromatography
GRPE	UN Groupe of Rapporteurs Pollution & Energie
HD	heavy duty
HP	high pressure
I & PP	inflammation & premixed phase
INSOF	insoluble fraction
IR-MS	infrared mass spectroscopy
LAV	Laboratorium für Aerothermochemie und Verbrennungssysteme der ETH Zürich
LL	Leerlauf
LLK	Ladeluftkühlung
LRV	Luft-Reinhalte-Verordnung
MD19	heated minidiluter
NanoMet	nanoparticle summary surface analyser (PAS + DC + MD19)
NanoMet	PAS + DC + sampling & dilution unit
NP	nanoparticles
NW	Nockenwelle

OC	Organic Carbon
PAH	Polycyclic Aromatic Hydrocarbons
PAS	Photoelectric Aerosol Sensor
PLD	Pumpe Leitung Düse
PM	particulate matter, particle mass
PMAG	Partikelmasse-Abscheidegrad
PMP	Particulate Measurement Program of GRPE
PN	particle number
PZAG	Partikelzahlen-Abscheidegrad
RME	rape methyl ester
ROHR	rate of heat release
ROR	pressed & filtered (crude) rapeseed oil
SCR	selective catalytic reduction
SME	soya oil methyl ester
SMPS	Scanning Mobility Particle Sizer
SOC	start of combustion
SOF	soluble organic fraction
SOI	start of injection
SUVA	Schweiz. Unfallversicherungs-Anstalt
TAN	total acid number
TBN	total base number
US-EPA	US – Environmental Protection Agency
VERT	Verminderung der Emissionen von Realmaschinen im Tunnelbau (Swiss – Austrian – German project, DPF retrofitting in underground)
VFT1	VERT Filter Test Phase 1
VSET	VERT-Sekundäremissionstest

Zusammenfassung

Die Untersuchungen des Betriebes mit unverestertem Rapsölkraftstoff (RK) fanden mit einem modernen Liebherr Baumaschinenmotor für den Einsatz in einem Blockheizkraftwerk der Leistungsklasse 110 kW elektrisch statt. Durch ein Nachrüstsystem mit Motor- und Kraftstoffvorwärmung wurde der Motorstart mit RK ermöglicht. Neben der Startfähigkeit, den üblichen Motorbetriebsparametern, den flüchtigen Schadstoffkomponenten und den Partikelmassenemissionen wurden auch die nichtlimitierten Nanopartikelemissionen analysiert. Als Abgasnachbehandlung wurde die Kombination aus einem Partikelfilter (DPF) und einem deNO_x-System (SCR) verwendet, womit die effiziente Reduktion von Partikelmasse (PM) und Stickoxiden (NO_x) und damit die Erfüllung der Auflagen gemäss Luftreinhalteverordnung (LRV) ermöglicht wurden.

Die Untersuchungen fanden bei mehreren Betriebspunkten statt, schwerpunktmässig auf der Generatorlinie (1500 rpm). Die wichtigsten Ergebnisse im Bezug auf Hochlastbetrieb können folgendermassen zusammengefasst werden:

- Bei gleichem Förderbeginn folgt der Spritzbeginn mit RK um etwa 1° KW (Kurbelwinkel) früher als mit Diesel, die Energiefreisetzung mit RK ist etwa gleich schnell, so dass der Verbrennungsschwerpunkt auch um etwa 1° KW früher liegt.
- Die Emissionen von CO, HC, PM und der spezifische Energieverbrauch sind mit RK tiefer, die NO_x-Werte sind höher.
- Der Charakter des Nanoaerosols im unsichtbaren Grössenspektrum ist durch mehr Spontankondensate und durch den höheren SOF-Anteil (lösliche, organische Fraktion) der Partikel mit RK geprägt – die Zahlenkonzentrationen im Nukleimodus (< 30 nm) sind höher und im Akkumulationsmodus (> 30 nm) tiefer. Die integrierten Partikelzahlen sind für beide Kraftstoffe etwa gleich.
- Das kombinierte Abgasnachbehandlungssystem DPF + SCR mindert sehr effizient die entsprechenden Emissionskomponenten: Partikel mit Abscheidegraden bis 99.9 % und NO_x mit Konvertierungsraten bis 94%. Damit erfüllt das System die aktuellen VERT Qualitätskriterien für DPF.

Die Resultate des vorliegenden Projektteiles liefern wichtige Grundlagenkenntnisse für den Betrieb von BHKW mit RK.

Résumé

Les essais avec le carburant à base d'huile de colza non estérifiée ont été réalisés avec un moteur Liebherr moderne d'engins de chantier pour l'utilisation dans une centrale de cogénération de la catégorie de puissance 110 kW. Le système d'installation a posteriori avec préchauffage du moteur et du carburant a permis de démarrer le moteur avec du carburant à base d'huile de colza. On a analysé l'aptitude de démarrage, les paramètres habituels de fonctionnement du moteur, les composantes volatiles des émissions nocives, les émissions de masses des particules ainsi que les émissions de nanoparticules non limitées. Pour le traitement postérieur des émissions polluantes, on a utilisé un filtre à particules (DPF) combiné avec un système de NO_x (SCR) permettant de réduire efficacement la masse de particule (PM) et les oxydes d'azote et de remplir les prescriptions de l'Ordonnance sur la protection de l'air (OPair).

Les essais ont été réalisés à différents points de mesure durant le fonctionnement, mais surtout sur la ligne du générateur (1500 rpm). Les principaux résultats en ce qui concerne la charge élevée peuvent être résumés comme suit:

- Si l'alimentation débute en même temps, le carburant à base d'huile de colza est injecté environ 1° KW plus tôt (angle du vilebrequin) que le carburant diesel. L'énergie est dégagée en même temps de sorte que la combustion maximale s'effectue environ 1 KW plus tôt.

- Les émissions de CO, de HC, de PM ainsi que la consommation d'énergie spécifique sont moins élevées avec le carburant à base d'huile de colza tandis que les valeurs NO_x sont plus élevées.
- Le nano aérosol dans le spectre granulométrique invisible se caractérise par plus de condensats spontanés et par la part plus élevée de SOF (fraction organique soluble) des particules dans le cas du carburant à base d'huile de colza. Les concentrations sont plus élevées dans le «nuclei mode» (< 30 nm) et moins élevées dans le mode d'accumulation (> 30 nm). Les nombres de particules intégrés sont plus ou moins égaux pour les deux types de carburants.
- Le système combiné de traitement ultérieur des gaz d'échappement (DPF + SCR) permet de réduire nettement les composants d'émissions correspondants: particules avec des taux de séparation jusqu'à 99.9 % et NO_x avec des taux de conversion jusqu'à 94%. Le système remplit les critères actuels de qualité VERT pour les filtres à particules diesel.

Les résultats de cette partie du projet fournissent des informations de base importantes pour le fonctionnement de la centrale de cogénération avec des carburants à base d'huile de colza.

Summary

Tests with non-esterified rapeseed oil fuel RK were carried out using a modern Liebherr construction machine engine for application in a block heat and power plant, power class 110 kW electricity. By means of a retrofit system with engine and fuel preheating, it was possible to start the engine with RK. In addition to the ability to start, other aspects were analysed; namely, the usual engine operating parameters, volatile noxious components, particle mass emissions, and unlimited Nano-particle emissions. To deal with exhaust fumes, a combination of a particle filter (DPF) and a deNO_x-System (SCR) were used, the result of which was an efficient reduction of particle mass (PM) and nitrogen oxides (NO_x). Thus, conditions as set down by the Swiss Air Pollution Control Ordinance (LRV), were met.

These tests were carried out at a number of operation points, focussing on the generator line (1500 rpm). The most significant results with regard to high load operations can be summarised as follows:

- When starting up, RK is injected approximately 1° KW (crank angle) earlier than diesel. Energy release with RK is about as fast, so the combustion centre is also approximately 1° KW earlier.
- CO, HC, PM emissions and the specific energy consumption are lower with RK, but NO_x-values are higher.
- With RK the character of the nano-aerosols in the invisible size spectrum is affected by more spontaneous condensation and higher SOF content of the particles (soluble, organic fraction) – the concentration of particles is higher in the nuclei mode (< 30 nm) and lower in the accumulation mode (> 30 nm). The number of integrated particles are approximately equal for both fuels.
- The combined exhaust treatment systems DPF + SCR efficiently reduce the relevant emission components: particles with filtration efficiency of up to 99.9 % and NO_x with conversion rates to 94%. The system thus meets the current quality VERT criteria for DPF.

The results of this part of the project provide important information for the operation of a BHKW using RK.

1 Einleitung und Ziele

Das Hauptziel des gesamten BHKW-Projektes ist es, den monovalenten Betrieb ausschliesslich mit ROR zu sichern um die Subventionsfähigkeit (im Sektor ~ 110 kW elektrisch) zu erlangen.

Für den Motorenhersteller ist es interessant zu wissen, ob die Verwendung von ROR das Einspritz- und Verbrennungssystem soweit beeinflusst, dass etwaige Modifikationen der Hard- oder Software nötig wären. Zu diesem Zweck wurden die Druckwelle in der Hochdruckleitung des PLD-Einspritzsystems und der Nadelhub gemessen. Die Verbrennung wurde durch die Druckindizierung im ersten Zylinder diagnostiziert. Diese Ergebnisse wurden zur Kalibration der Rechenmodelle des LAV (ETHZ) gebraucht, wo umfangreiche rechnerische Untersuchungen der Einspritzung und Verbrennung durchgeführt wurden.

Für den Benutzer und für den Gesetzgeber ist die Einhaltung der zulässigen Emissionswerte auch im Hinblick auf die möglichen zukünftigen Entwicklungen der Abgasanforderungen von Wichtigkeit.

Die Hauptziele der Motortests waren somit:

- Testen der Startfähigkeit und des Betriebes mit ROR
- Limitierte und nichtlimitierte Emissionen, LRV-Werte
- Einfluss von ROR auf die Einspritzung und Verbrennung

Aus diesen Hauptzielen ergaben sich weitere Zielsetzungen und Forschungsschwerpunkte, welche im Laufe der Arbeiten behandelt wurden:

- Nanopartikelanalytik
- Zusammensetzung der Partikelmasse – EC/OC, SOF/INSOF
- Schmierölanalyse
- veränderte Nockenwelle
- Variation des Spritzbeginnes
- Kombiniertes Abgasnachbehandlungssystem DPF + SCR und Bewertung nach VERT

2 Vorhandene Informationen über ROR-Betrieb

Die gepressten und gefilterten Pflanzenöle können als Dieselmotorkraftstoffe gebraucht werden. Die notwendigen Anpassungen des Motors und die Risiken für den Langzeitbetrieb sind dabei jedoch grösser als beim Betrieb mit FAME's (Biodiesel – RME). In Europa ist das Rapsöl am meisten verbreitet.

Die Qualität des gepressten (rohen) Rapsöls (ROR) kann in einem recht breiten Spektrum variieren und sie ist für den erfolgreichen, dauerhaften Motorbetrieb von grösster Bedeutung. Zu folgenden Themen wurde sehr viel Forschungsarbeit durchgeführt und liegt ein solides Grundlagenwissen vor:

- Produktionsprozesse
- Qualitätskriterien
- Qualitätsprüfung und
- Anwendung von ROR in landwirtschaftlichen Traktoren und Kraft-Wärmekopplungsanlagen [9, 10, 11]

Als wichtigste Qualitätskriterien sind zu erwähnen:

- Gesamtverschmutzung als Mass für die Filtrationsqualität während des Produktionsprozesses – eine ungenügende Filtration des Rohöls verursacht starke Bildung von Ablagerungen im Kraftstoffsystem und im Brennraum.
- Phosphorgehalt – verantwortlich für die Katalysatorenalterung im Auspuffsystem.
- Oxidationsstabilität, Gehalt an Säuren, Aschen und Wasser.

ROR hat etwa eine 10 x höhere Viskosität als RME und eine etwa 20 x höhere Viskosität als Dieselmotorkraftstoff. ROR braucht eine spezielle Kraftstoffbeheizung für den Kaltstart und es führt in einem unveränderten Einspritzsystem generell zu höheren Einspritzdrücken und zu einer schlechteren Zerstäubung und schlechterer Gemischbildung im Einspritzstrahl.

ROR hat auch einen höheren Siedebeginn (~ 300°C), als Diesel (~ 250°C) und eine tiefere Cetanzahl, was zu veränderten Bedingungen für die Selbstzündung und für die vorgemischte Verbrennungsphase führt.

Es ist selbstverständlich, dass sich durch die anderen physikalisch-chemischen Eigenschaften von ROR eine veränderte Interaktion mit dem Schmieröl und auch veränderte Bedingungen zur Entstehung von Schadstoffen (CO, HC, NOx & PM) ergeben.

Die Vergleiche der Motorresultate zwischen Diesel- und Biokraftstoffen hängen meistens von der Motortechnologie und von den Betriebsbedingungen ab.

Verschiedene Studien in der Vergangenheit stellten fest, dass ROR für den Betrieb in DI-Dieselmotoren nicht geeignet ist, [12, 13, 14]. Im Gegensatz zu den untersuchten Vor-kammermotoren litten die Direkteinspritzer unter Schäden, welche meistens durch verkohlte Ablagerungen an den Einspritzdüsen und an anderen Orten im Brennraum, Festsetzen der Kolbenringe, Verschleiss und Fressen von Kolben, Ringen und Buchsen, Ventildichtheit u.ä. verursacht wurden.

Besondere Anstrengungen werden unternommen um das ROR bei der neusten Motoren- und Einspritzsystemtechnologie einzuführen, wo höhere Einspritzdrücke, mehrere Spritzlöcher und deutlich bessere Bedingungen für die Kraftstoffzerstäubung und Gemischbildung vorliegen.

In [16] wurde ein Mercedes Benz Personenwagen 220 C-Klasse mit Common-Rail Diesel Injection (CDI) mit zusätzlicher Kraftstofffiltrierung und mit Kraftstoffheizung ausgestattet. Für den ROR-Betrieb konnte festgestellt werden:

- Die ROR-Vorheizung bis auf 60°C ermöglicht den sicheren Betrieb ohne besondere Motoränderungen. Zur Ergänzung der Kraftstoffsystems war das Ersetzen von Leitungen und vom Filter nötig. Der erhöhte Einspritzdruck und die höhere Kraftstofftemperaturen mit ROR verbessern die Zerstäubung und die Verbrennung. Ein neues spezielles Schmieröl wurde eingesetzt.
- Nähere Untersuchungen des Einspritzvorganges zeigten, dass bis auf 60° C vorgewärmtes Rapsöl ein ähnliches Spritzbild, aber einen deutlich höheren Spritzverzug aufweist.
- Das umgerüstete Fahrzeug legte ohne Beanstandungen eine Fahrstrecke von 265'000 km zurück. Während dieses Langzeittests sank die maximale Leistung um c.a. 10% und der Kraftstoffverbrauch stieg in der Größenordnung von 2-4% an.

Zusammenfassend muss festgehalten werden, dass ein befriedigender Langzeitbetrieb mit ROR nicht selbstverständlich ist. Es braucht dazu die Kombination von verschiedenen Massnahmen, wie:

- Hohe ROR-Qualität (von Produktion, Lagerung und Transport)
- Hilfssysteme am Motor, zwecks zusätzlicher Filtrierung und Heizung des Kraftstoffes.
- Passendes Schmieröl
- Einspritzsystem mit höheren Leistungsparametern
- Sorgfältigen Service und Unterhalt

Fragen wie die Einflüsse des ROR bei hohen AGR-Raten oder neusten Abgasnachbehandlungssystemen (DPF, SCR) müssen weiter untersucht werden.

Mit allen diesen Anstrengungen und mit den neusten technologischen Möglichkeiten darf ein erfolgreicher dauerhafter Motorbetrieb mit ROR und auch mit anderen Pflanzenölen als realistisch angesehen werden.

3 Versuchsträger

3.1 Motor

Hersteller:	Liebherr Machines Bulle S.A., Bulle/Fribourg
Typ:	D934 L
Hubraum:	7.01 Liter
Nennzahl:	2000 min-1
Nennleistung:	140 kW
Model:	4 Zylinder Reihe
Verbrennungsverfahren:	Direkteinspritzung
Einspritzpumpe:	Bosch Steckpumpen
Aufladung:	Turbolader mit Ladeluftkühlung
Abgasnachbehandlung:	keine
Entwicklungszeitraum:	2005
Einsatz im Feld:	seit 2006

Abb. 81 zeigt den Motor und die Messgeräte für die Nanopartikelanalyse SMPS und NanoMet im Motorenlaboratorium der BFH in Biel

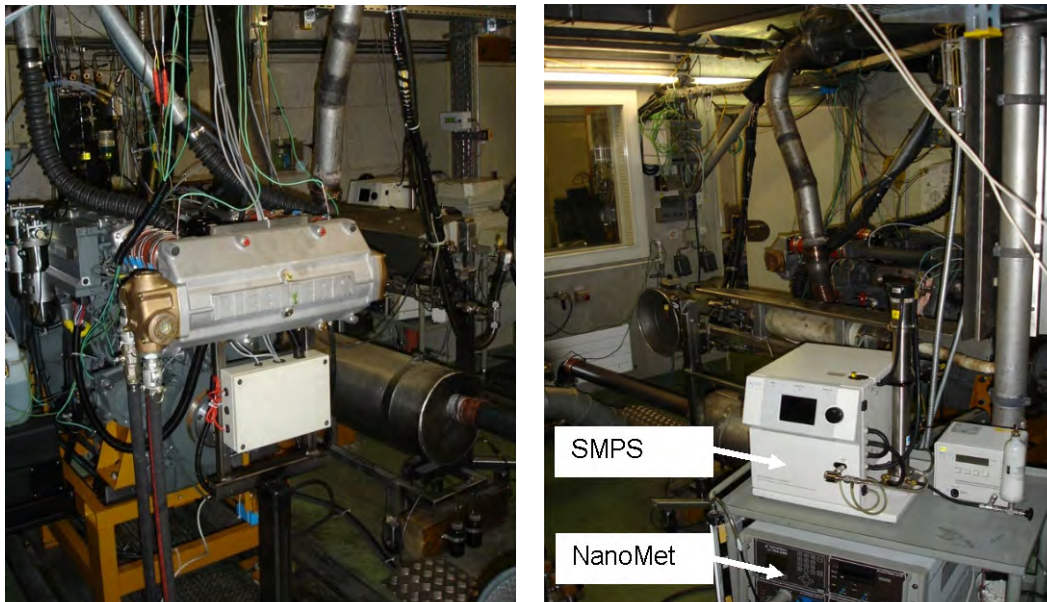


Abbildung 81: LIEBHERR Motor D934 L und die Nanopartikel-Messsysteme im Motorraum.

3.2 Treibstoffe

Folgende Kraftstoffe wurden verwendet:

- Shell Formula Diesel Kraftstoff Schweizer Standard, Sommerqualität (10 ppm S) gemäss SN EN 590
- Kaltgepresstes Rapsöl (ROR) von Eco Energie, Etoy, CH

Hier die wichtigsten Daten dieser Kraftstoffe gemäss Norm und gemäss den Analysenzertifikaten:

Tabelle 14: Kraftstoffeigenschaften gemäss EU-Standards und Analysen

		Diesel	ROR
Density at 15°C	g/m	0.842*	0.925*
Viscosity at 40°C	mm ² /s	2.0 - 4.5	34.9*
Flash point		above 55°C	245°C
Cloud point		max -10°C	-
Filterability CFPP		max -20°C	+15°C
Ash	%	max 0.010	0.004
Sulfur	ppm	<10	2.0 *
Cetane Number		51	40 - 44
Calorific value	MJ/kg	42.7	37.0
C fraction	in %	86.7	77.5
H fraction	in %	13.3	11.5
O fraction	in %	0	11.0
Air _{min}	kg/kg	14.52	12.37
Boiling range 10-90% °C		180 - 340	315 - 360

* Gemessene Werte

Es kann bemerkt werden, dass es Unterschiede gibt von bei Parametern wie Dichte, Heizwert, stöchiometrischer Luftbedarf und Siedebereich. Diese Parameter beeinflussen den Motorbetrieb, speziell bei Vollast. Sie wurden bei den Auswertungen der Messserien berücksichtigt.

In einem von der Erdöl Vereinigung unterstützten Zusatzprojekt wurden auch andere Alternativkraftstoffe GTL und RME, sowie die 10% Vol.-Blends aller diesen Kraftstoffe (GTL, RME und ROR) untersucht [17].

Die Resultate dieser Zusatzuntersuchungen, sowie der Abschlussbericht, [17], sind für alle interessierten Kreise offen und die daraus stammenden Resultate mit ROR 100 und ROR 10 werden in dem vorliegenden Bericht dargestellt.

3.3 Schmieröle

Für die Messungen im Dieselbetrieb und für die ersten Vergleiche Diesel-ROR [17] wurde ein Lubrizol Spezialöl (für Forschungszwecke) OS No. 164713, red, 15W/40 gebraucht. Für den Betrieb mit ROR hat Fa. Strub ein Spezialöl – Struboil – zur Verfügung gestellt.

Hier die Daten dieser Schmieröle, beide ACEA Klasse E4:

Tabelle 15: Daten der gebrauchten Schmieröle.

Property	Lubrizol	Struboil	
Viscosity kin 40°C	104.8		mm ² /s
Viscosity kin 100°C	14.22	14.3	mm ² /s
Viscosity index	139		(--)
Density 20°C	-	866	kg/m ³
Pourpoint	-25	-32	
Total Base Number TBN	13.5	14.2	mg KOH/g
Sulfur ashes	18'000	1'860	mg/kg
Sulfur	6'500		mg/kg
Mg	< 10		mg/kg
Zn	1'270		mg/kg
Ca	4'730		mg/kg
P	1'160		mg/kg

4 Prüfstands Aufbau, Messtechnik, Auswertung

4.1 Prüfstands Aufbau und Standardmesstechnik

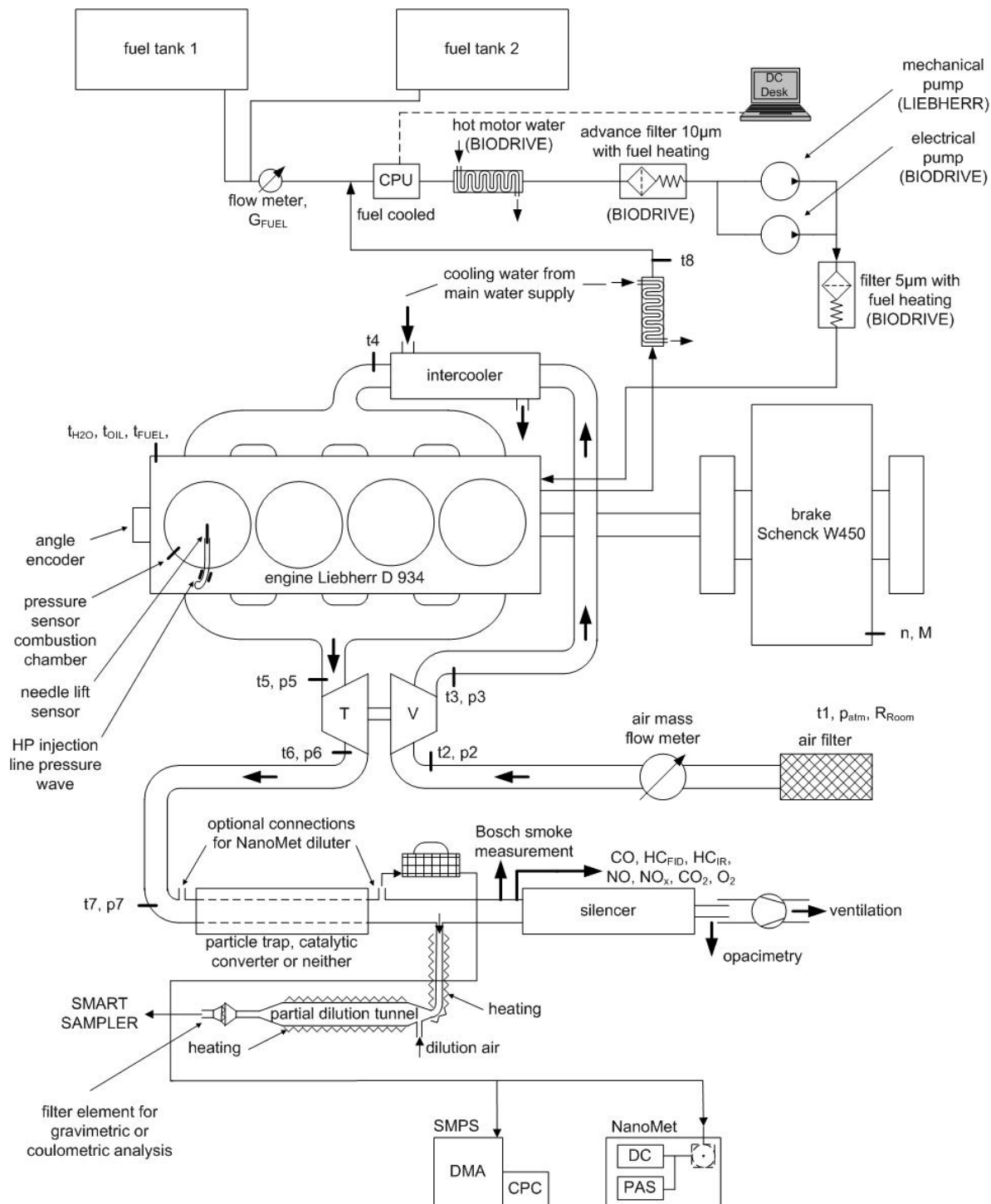


Abbildung 82 Motorprüfstand, Kraftstoffsystem und gemessene Parameter

Abb. 82 zeigt die speziellen Systeme, welche am Motor, oder in seiner Peripherie installiert sind:

- Probenahme und Messapparatur für die limitierten Abgaskomponenten und Nanopartikel.

- Kontrollparameter des Motors (p , T) in dem Luft- und Abgaspfad.
- Kontrollparameter des Einspritzsystems im 1sten Zylinder: Drucksensor in der Hochdruckleitung (p_L) und Nadelhubsensor (NL).
- Hochdruckindizierung im 1sten Zylinder – Verbrennungsdiagnostik.
- Nachrüstsystem der F-a. Biodrive zur Filtration und Beheizung des Kraftstoffes, zwecks Sicherung der Kaltstarts und des Betriebes mit ROR.

Dieses System ist in Abb. 83 detaillierter dargestellt, wobei folgende Elemente zu erwähnen sind:

- Wärmetauscher zur Kraftstoffbeheizung während des Warmbetriebes.
- Beheizte Vor- und Nachfilter zwecks Reinigung und Anwärmung des Kraftstoffes während des Motorstillstandes.
- Elektrische Umwälzpumpe um den Kraftstoff und die Motorteile vor dem Start vorzuwärmen.

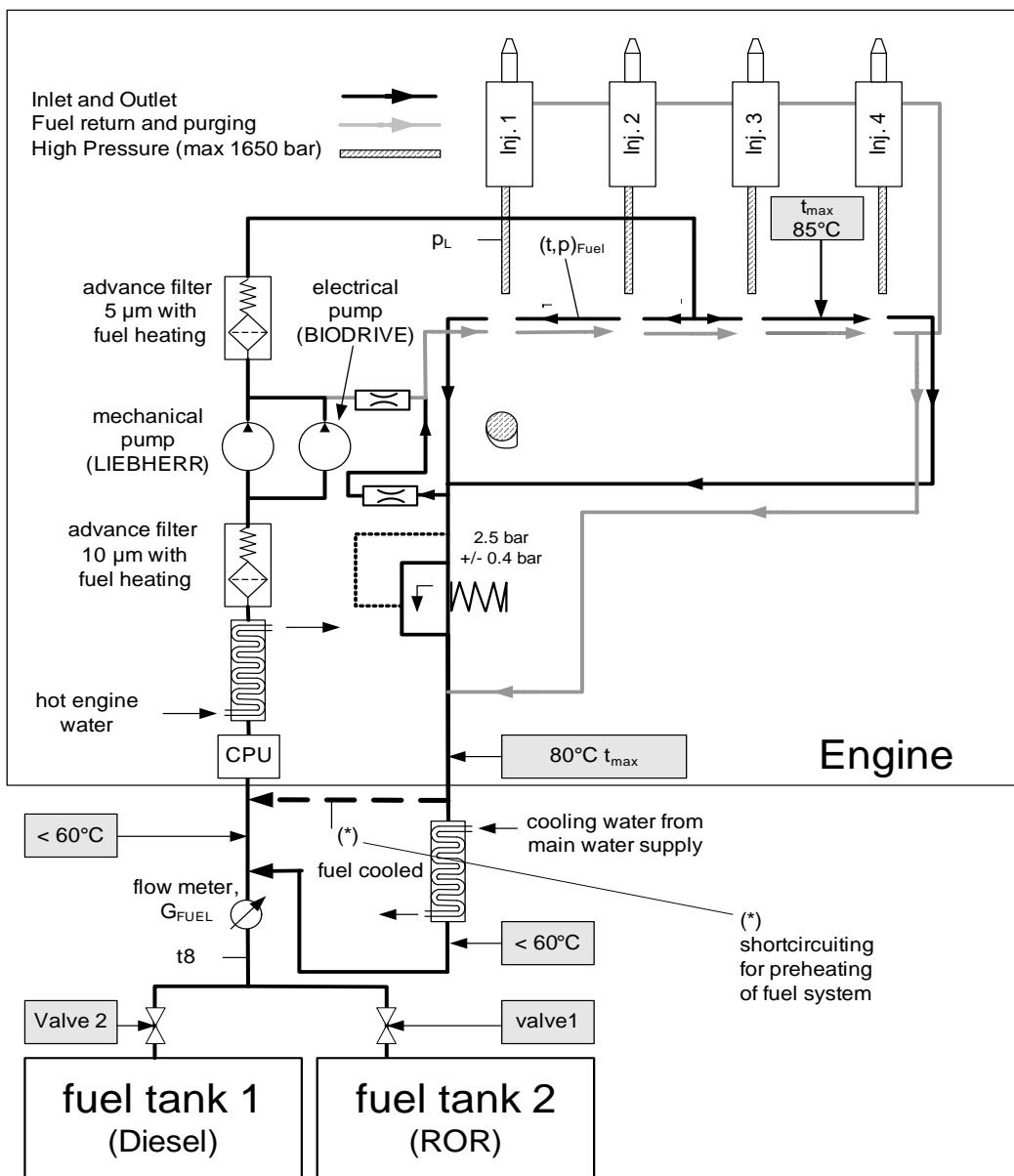


Abbildung 83 Kraftstoffkreis für den ROR-Kaltstart und Betrieb, nachgerüstet von Biodrive.

Folgende Laboreinrichtungen wurden verwendet:

- Wirbelstrom Schenk W 450 mit Kraftmessdose HWM U2
- Verbrauchsmessung AIC 2022 mit Durchflussmesser FS-4/2400
- Luftmassenmesser DEGUSSA Deguflow 8740-20600
- Bosch-Rauchmessung AVL Smoke Meter 409
- Drucksensoren Keller PAA-2/8235, PD-4/8236
- Mantelthermoelemente Typ J, K
- Luftfilter Durulator P77-1558 (Duramont)
- Ansaugluft Konditionierung: keine
- Schalldämpfer: Mercedes, Spezialausführung

Prüfstand und Messkabine sind räumlich getrennt.

Verschiedene Messgrößen werden on-line via PC erfasst. Eine kontinuierliche Aufzeichnung aller Größen ist möglich.

4.2 Standard-Emissionsmesstechnik

Entsprechend der schweizerischen Verordnung über die Abgasemission schwerer Motorwagen (FAV2 vom 22.10.1986), mit entsprechenden Updates gemäss der technischen Entwicklung.

- gasförmige Schadstoffe:
- HORIBA für CO₂, CO, HCIR, O₂: VIA-510; NO, NO₂: CLA-510
- AMLUK FID, Typ FID 2010 für Gesamtkohlenwasserstoffe
- Partikelmessung:
- Teilstrom-Verdünnungstunnel (Beilage 3) AVL Smart Sampler II, Modell 472
Tunneldurchmesser 70 mm
Tunnellänge 700 mm
Massenfluss konstant 2 g/s
Verdünnungsluft, oelfreie Pressluft, in der Regel 1.6 g/s (Verdünnung 1:5)
Verdünnungsverhältnis DF ist variabel, wird aus der CO₂-Analyse ermittelt
- Gravimetrie:
Filtermaterial PALFLEX TX 40 HI 20-WW
Filterwirkungsgrad: 95%, 300 nm bis 99% (10 nm) (siehe SAE 950373, eigene Messungen),
Filtertemperatur: 52°C
Gesamtpartikelmasse in der Regel um 1 mg
Wägegenauigkeit ± 1 µg
Konditionierung: 8 ... 24 h (20°C, rel. Feuchte 50 %)
- Opazimetrie:
- AVL Dismoke 435 (1993)
- Bosch Schwärzungszahl (SZ), AVL Smoke Meter Type 409

Die Berechnungen erfolgen mit dem Normalprogramm MS Excel. Alle Messreihen werden abgespeichert und stehen für mögliche zusätzliche weitere Auswertung zur Verfügung.

Die Berechnung der korrigierten Abgasemissionen erfolgt nach den gesetzlichen Vorschriften gemäss der schweizerischen Verordnung über die Abgasemissionen schwerer Motorwagen FAV 2.

4.3 Nanopartikel – Analytik

Verschiedene gesetzlich noch nicht festgelegte Mess- und Charakterisierungsverfahren der Nanopartikel werden verwendet. Abb. 84 zeigt eine mögliche Anordnung der Probenahme und prinzipielle Zeit- und Grössenauflösung dieser Verfahren.

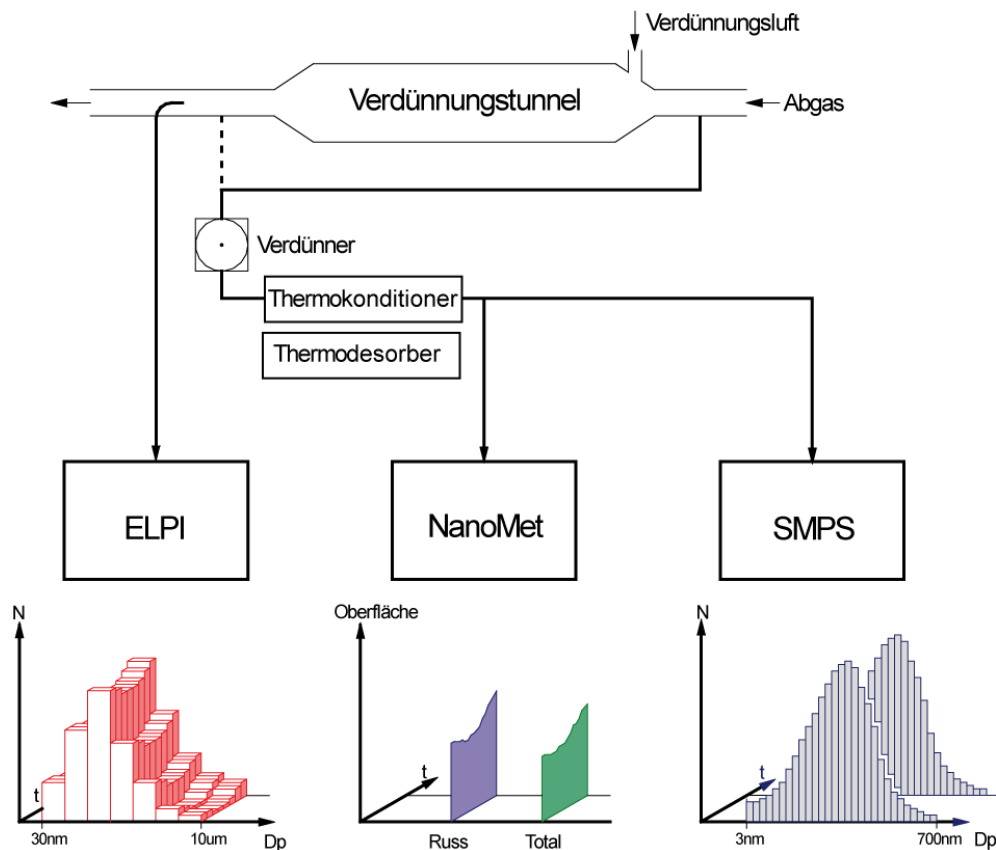


Abbildung 84: Nanopartikel- Messverfahren, Partikel-Charakterisierung und Zeitauflösung

Die Feinpartikel-Messverfahren sind durch folgende Haupteigenschaften gekennzeichnet:

- ELPI, Electrical Low Pressure Impactor. Partikel-Grössenklassierung nach aerodynamischem Durchmesser. Niedrige Auflösung für Grösse, hohe Auflösung für Zeit bis 1 sek.
- SMPS, Scanning Mobility Particle Sizer. Partikel-Grössenklassierung nach Mobilitätsdurchmesser. Hohe Auflösung für Grösse, niedrige Auflösung für Zeit, typische Scanzeit 1-3 min.
- Thermodesorber (oder Thermokonditioner), ein Element zur Unterscheidung der festen und der flüchtigen Partikeln. Die Verdampfungstemperatur der Kondensatpartikel kann mit einer regelbaren Heizung bis zu 330 °C gewählt werden.
- DC, Diffusion Charging Sensor (NanoMet). Integrales Signal für aktive Oberfläche mit Zeitauflösung bis 0,5 sek.
- PAS, Photoelektrischer Aerosol Sensor (NanoMet). Integrales Signal für Russ-Oberfläche mit Zeitauflösung bis 0,5 sek.
- MD19, einstellbare Miniverdünnungseinheit (NanoMet). Probenahme und direkte starke Verdünnung des Rohgases.

Tabelle 16 zeigt die ausgesuchten Eigenschaften der in den Tests gebrauchten Messausrüstung.

Tabelle 16 Typen und Haupteigenschaften der eingesetzten Messgeräte und –Systeme.

Gerät System	Typ, Serien-Nr.	Messgrösse	Grössenbereich Klassierung	Grössen- Auflösung	Zeit- Auflösung
ELPI (DEKATI)	Model 97 2E S/N 24150	Anzahl- Konzentration	30 nm ... 10 µm aerodyn. Durchm.	12 Stufen	>= 1 sek.
SMPS ETH	DMA 3071 + CPC 3025A S/N 253 S/N 1092	Anzahl- Konzentration	16 nm ... 660 nm Mobilitäts- Durchmesser	105 Kanäle	1 – 3 min
SMPS FH Biel (TSI)	DMA 3081 + CPC 3010 S/N 8008 S/N 2230				
Nanomet DC (Matter Eng.)	LQ 1-DC S/N 100282	aktive Oberflä- che	1 nm ... 1 µm	integraler Wert	>= 0.5 sek.
NanoMet PAS (EcoChem)	PAS 2000 S/N 143	Russ- Oberfläche	1 nm ... 1 µm	integraler Wert	>= 0.5 sek.
Thermo- desorber	Matter Eng.	Unterscheidung fest / flüchtig	Geregelte Heiztemperatur 330°C Aktivkohleenteil mit Wasserkühlung		
Rotations- verdünner (Matter Eng.)	MD19-2E	Aerosol- Verdünner	Einstellbare Verdünnung von 1:20 bis 1:2000 Unverdünnter Bereich beheizbar 80 bis 150°C		

4.4 Coulometrische Analyse des PM-Filterrückstandes (EC + OC)

- Kohlenstoff: Untersuchung des Filterrückstandes im Bezug auf Elementarkohlenstoff EC und organischen Kohlenstoff OC ist in Deutschland eine offizielle Referenzmethode zur Bestimmung der Russmengen in Immissionen und am Arbeitsplatz (Richtlinie VDI 2465). In der Schweiz überwacht die SUVA die Diesel-Immissionen am Arbeitsplatz mit Hilfe derselben Methode (gemäss ZH 1/120.44, Oktober 1990: anerkannte Analyseverfahren für Dieselmotoren-Immissionen des Hauptverbandes der gewerblichen Berufsgenossenschaften) und führte auch die entsprechenden Analysen mit den Proben der vorliegenden Arbeit aus.
- Messprinzip: Der im Filterrückstand enthaltene Kohlenstoff und seine Verbindungen werden in einem zweistufigen Verfahren verbrannt und das freiwerdende Kohlendioxid coulometrisch bestimmt.
- Die am Russ adsorbierten Kohlenwasserstoffe werden in Stickstoffstrom ausgetrieben und an CuO oxidiert.
- Der elementare Russ wird im Sauerstoffstrom verbrannt.
- Das in jedem Teilschritt entstandene Kohlendioxid haltige Reaktionsgas wird in die thermostatisierte, mit stark alkalischer Bariumperchlorat gefüllte Messzelle des Coulomaten geleitet, adsorbiert und als Bariumcarbonat ausgefällt. Dies bewirkt eine Abnahme der Alkalität. Die resultierende pH-Veränderung wird potentiometrisch mit

Hilfe einer Glaselektrode verfolgt. Anschliessend wird coulometrisch auf den ursprünglichen pH-Wert der Adsorptionslösung zurück „titriert“.

- Die hierzu erforderliche Ladungsmenge ist zu der absorbierten CO₂-Menge und damit zum Kohlenstoffgehalt der Probe proportional.

Mit dem angewendeten coulometrischen Verfahren wird sowohl die Menge an Elementarkohlenstoff (EC) wie auch an organischem Kohlenstoff (OC), d.h. als Summe der beiden Mengen der Gesamtkohlenstoffgehalt (TC) bestimmt.

4.5 Diagnostik der Einspritzung und der Verbrennung

Abb. 85 zeigt das verwendete Steckpumpensystem (PLD) von Bosch mit den Messstellen p_L (Leitungsdruck) und NL (Nadelhub) im hydraulischen Teil.

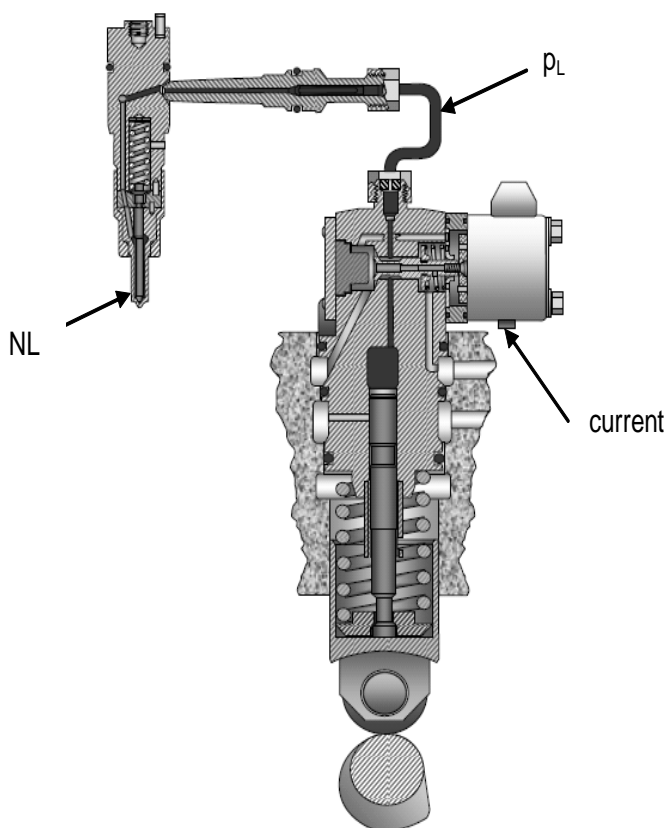


Abbildung 85 Bosch Pumpe-Leitung-Düse (PLD) mit den Messstellen für p_L und NL.

Der Schaltstrom triggert durch das Magnetventil den Förderbeginn und das Förderende (dies mit einem gewissen Zeitverzug). Das zeitaufgelöste Drucksignal p_L in der Hochdruckleitung wurde mit einem Kistler Sensor gemessen (Abb. 86, links). Maximum und Form der Hochdruckwellen sind von den charakteristischen Kraftstoffeigenschaften (Viskosität, Dichte, Elastizitätsmodul und Schallgeschwindigkeit) abhängig. Der Nadelhubsensor NL (Abb. 86, rechts) misst die Nadelbewegung und erlaubt damit den Spritzbeginn und das Spritzende zeitlich genau zu definieren.

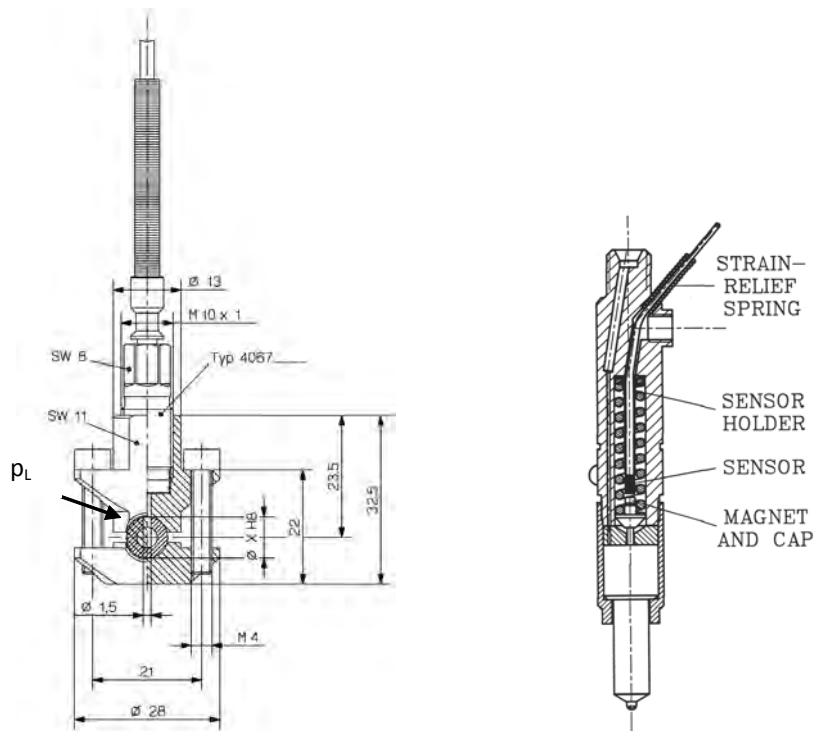


Abbildung 86 KISTLER Sensor für die Hochdruckleitung (links). Wolff Nadelhubsensor (rechts).

Abb. 87 zeigt die Indizierbohrung im Zylinderkopf des Motors, sowie einen KISTLER Drucksensor mit wassergekühltem Adapter.

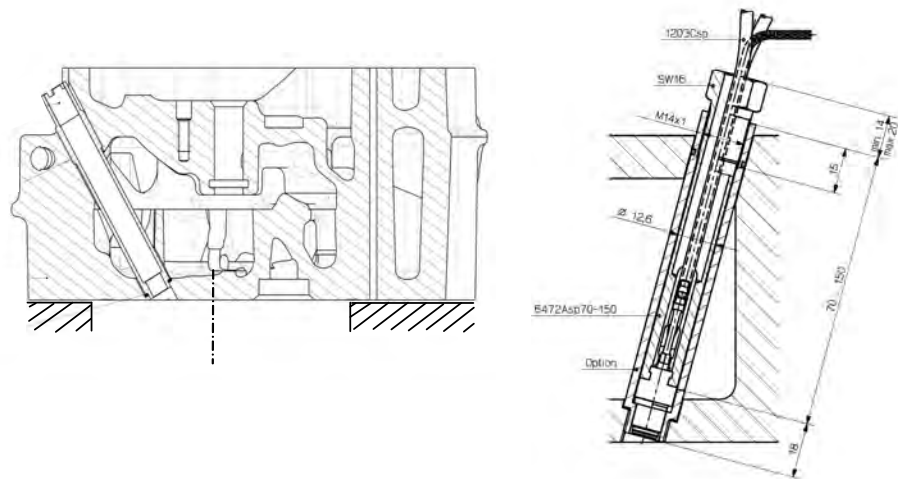


Abbildung 87: Zylinderkopf und Piezo-Drucksensor zur Druckindizierung im Brennraum

Alle diese Messeinrichtungen erlauben interessante Diagnoseparameter auszuwerten, wie:

- Einspritzverzug
- Maximaler Einspritzdruck in der Leitung
- Zündverzug
- Maximale Wärmefreisetzungsgeschwindigkeit
- Lage vom Verbrennungschwerpunkt (50% umgesetzter Wärme, $\alpha 50\%$)
- Umsetzungsdauer eines ausgewählten Verbrennungsintervalls (hier z.B. I&PP = $\alpha 50\% - \alpha SOI$)

5 Versuchsdurchführung

Es wurden folgende Kraftstoff-Schmieröl-Kombinationen getestet:

- Standard Dieseldieselkraftstoff (ULSD S< 10 ppm), Schmieröl Lubrizol
- ROR 100%, Schmieröl Lubrizol
- ROR 10%, gleicher Dieseldieselkraftstoff, Schmieröl Lubrizol
- ROR 100%, Spezialschmieröl Struboil

Mit jedem Kraftstoff wurden die Stufentests gemäss Abb. 88 gefahren. Die Testsequenz, die immer gleich eingehalten wurde entspricht der Nummerierung der Betriebspunkte. Die Tests wurden im warmen Betriebszustand, nachdem das Kühlmittel und das Schmiermittel ihren stationären thermischen Zustand erreicht hatten, durchgeführt.

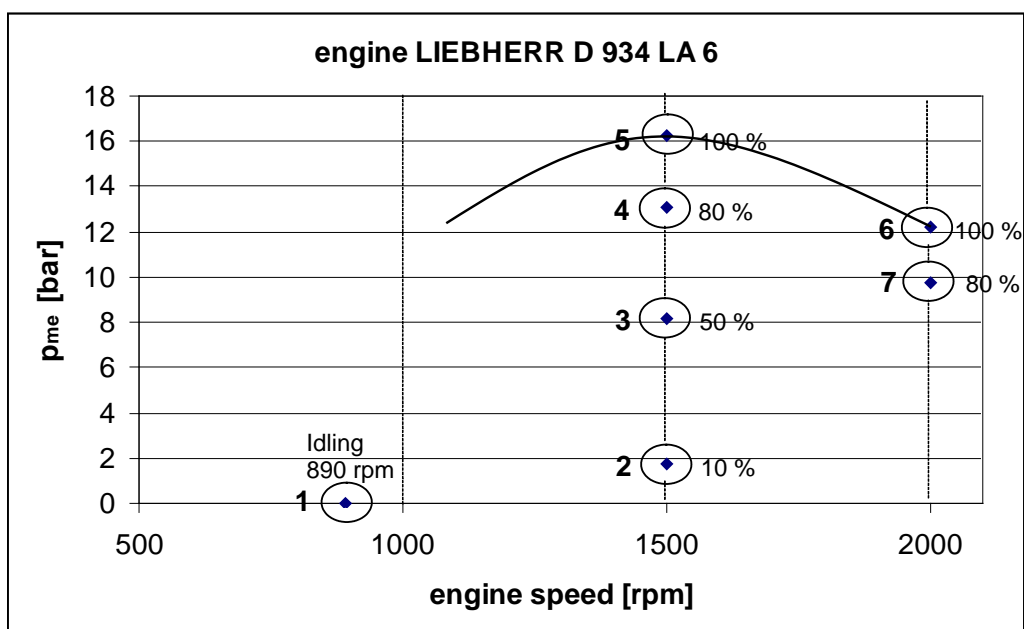


Abbildung 88: Betriebspunkte im Testprogramm.

Bei den Vollastpunkten 5 und 6, welche je nach Kraftstoff verschiedene Leistungswerte erreichen (gleiche Aktivierungszeit der Einspritzung), wurde auf die gravimetrische und granulometrische Partikelanalyse verzichtet.

Alle Teillastbetriebspunkte wurden jeweils bei gleichem Spritzbeginn und bei gleicher Ansteuerungsdauer wie mit Dieseldieselkraftstoff durchgeführt.

Bei den Punkten 2 und 4 wurde bei ausgewählten Messserien eine zusätzliche Probenahme der Partikelmasse auf Quarz-Messfilter durchgeführt. Diese Proben wurden bei dem SUVA Analytischen Laboratorium der coulometrischen Analyse (EC/OC) unterzogen.

Ein anderes Ziel war die mögliche Ölverdünnung mit den Biokraftstoffen analytisch zu untersuchen. Zu diesem Zweck wurde jede Messserie mit dem frischen Schmieröl und mit einem frischen Messfilter gemäss der folgenden Prozedur, durchgeführt:

- Ölwechsel
- Testserie mit dem neuen Kraftstoff 100%

- Ölprobe für Analyse
- Testserie mit demselben Kraftstoff-Blend 10%
- 1h Stationärbetrieb mit Dieselmotorkraftstoff (1500 rpm / 200 Nm)
- erneut Ölprobe für Analyse
- Ölwechsel

Die Ölproben, sowie die gebrauchten Kraftstoffe (100%) wurden bei dem Analytischen Laboratorium Pentosin-Werke (D) analysiert.

In dem zweiten Teil der Untersuchungen, welcher sich spezifisch auf den Generatorbetrieb bei der BHKW-Anwendung konzentrierte, wurden die Untersuchungen bei Motordrehzahl 1500 rpm und bei verschiedenen Lasten durchgeführt. Dabei wurde ausschliesslich das Spezialschmieröl Struboil verwendet.

5.1 Kontrolle der Versuchsbedingungen

- Umgebungstemperatur: eine Messung pro Testsequenz
- Barometerstand: eine Messung pro Testsequenz
- Umgebungsfeuchte: eine Messung pro Testsequenz
- CO₂-Inhalt der Umgebungsluft: eine Messung pro Testsequenz
- Temperatur in der Testzelle: nicht geregelt
- Lufteintrittstemperatur nach Filter: 20° C - 25° C, manuell geregelt durch Aussenluftzufuhr (ausser bei sehr hohen Umgebungstemperaturen)
- Öldruck und Öltemperatur: laufende Überwachung durch Prüfstandssteuerung
- Motorkühlwassertemperatur: laufende Überwachung, gemäss Herstellerangabe.

6 Ergebnisse

6.1 Limitierte Emissionen und Nanopartikel

Abb. 89 und Abb. 90 fassen die Ergebnisse der limitierten Abgaskomponenten (CO, HC, NO_x, PM) und des spezifischen Energieverbrauches bei allen untersuchten Betriebspunkten zusammen.

ROR reduziert CO, HC und PM bei allen Hochlastbetriebspunkten $\geq 50\%$. In diesem Hochlastbereich vermindert das ROR eindeutig den spezifischen Energieverbrauch (bis etwa 2%) und erhöht NO_x (bis etwa 5%).

Im Niedriglast-Betriebsbereich (1500 rpm / 10%) sind die Einflüsse von ROR umgekehrt: keine Beeinflussung von CO und NO_x, Erhöhung von PM und Energieverbrauch (be).

Beim Leerlauf verursacht das ROR ein erhöhtes NO₂/NO_x-Verhältnis, die Absolutwerte von NO₂ und NO_x sind jedoch sehr tief.

Der Mischkraftstoff mit 90% Vol. Diesel zeigt in der Regel Resultate, welche zwischen den beiden Reinkraftstoffen und meistens in der Nähe des Dieselmischkraftstoffes liegen.

Bei den limitierten Emissionsparametern ist kein Einfluss der Schmierstoffqualität feststellbar.

Verallgemeinernd kann gesagt werden:

ROR ist an diesem Motor für CO, HC, PM und Energieverbrauch vorteilhaft, für NO_x dagegen nachteilig,

Diese Tendenzen können sich bei tieferen Motorlasten umkehren, womit verständlich wird, dass in den Vergleichen Diesel-ROR beim Fahrzeugbetrieb die Relationen je nach den Motorbelastungskollektiven (Fahrzyklen) verschieden ausfallen können.

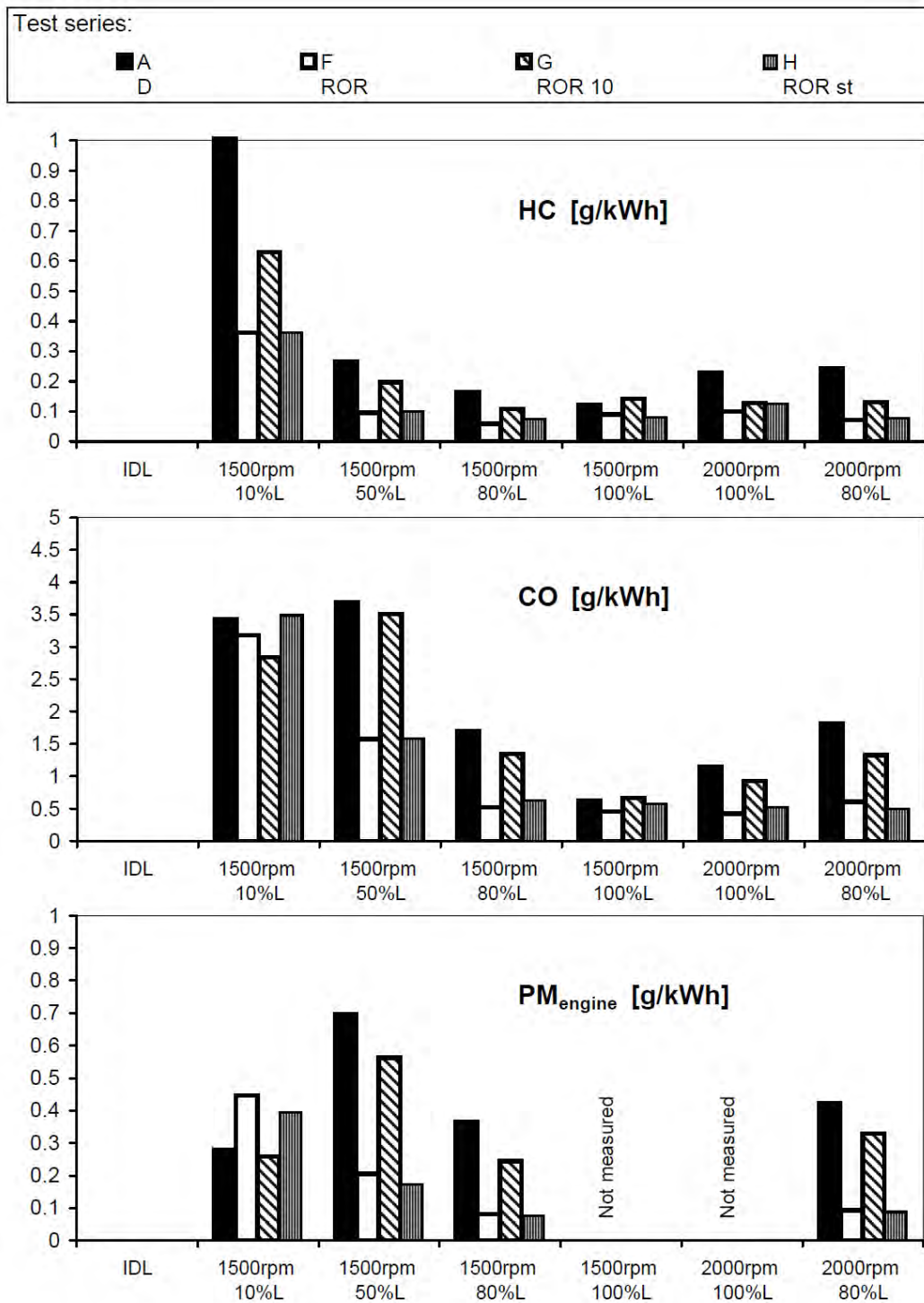


Abbildung 89: Emissionen unterschiedlicher Kraftstoffe bei allen untersuchten Betriebspunkten (D = Diesel, ROR = reiner Rapsölkraftstoff, ROR 10 = nur 10% ROR, ROR st = mit Struboil).

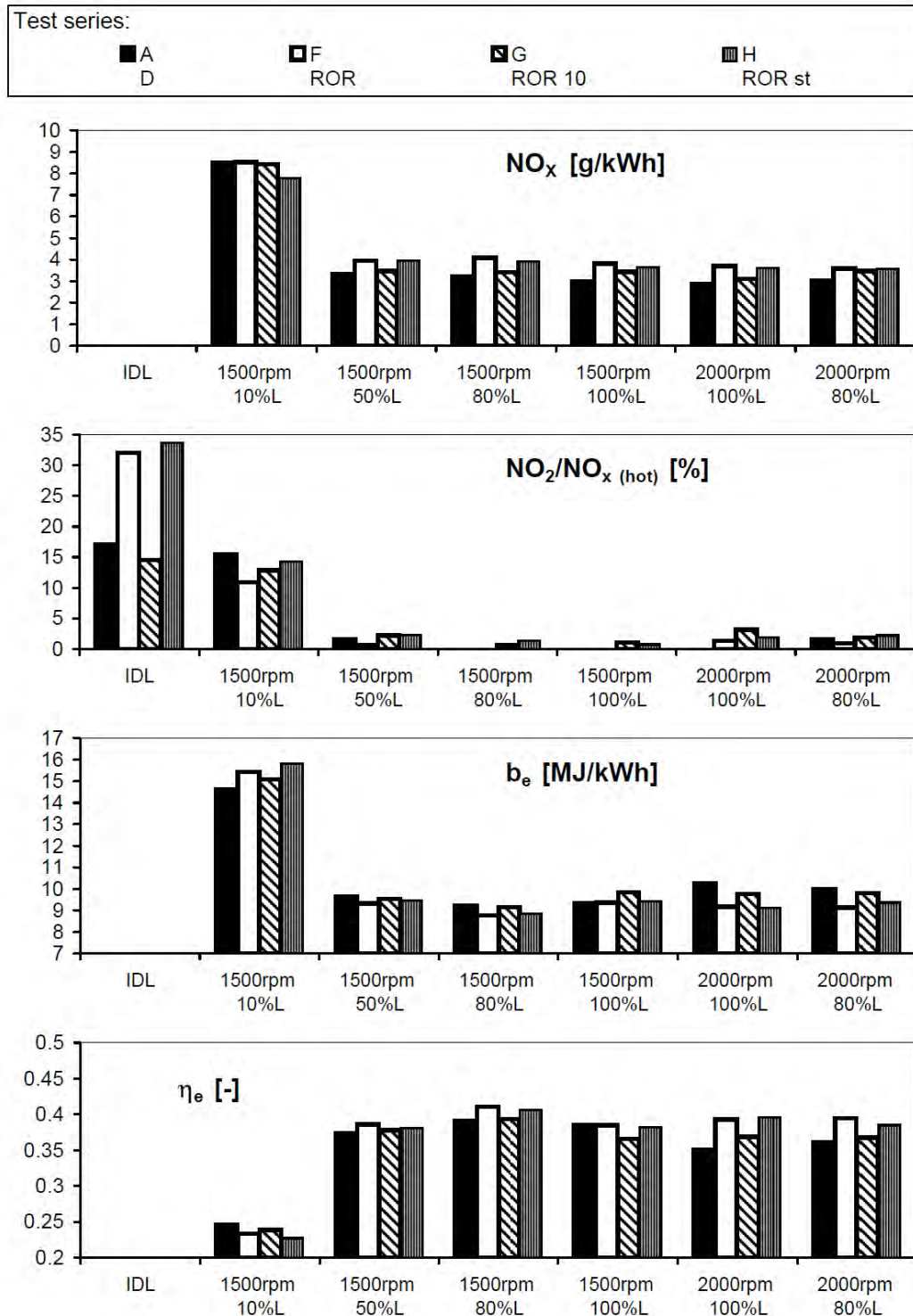


Abbildung 90: Emissionen, spez. Verbrauch und Wirkungsgrad unterschiedlicher Kraftstoffe bei allen untersuchten Betriebspunkten (D = Diesel, ROR = reiner Rapsölkraftstoff, ROR 10 = nur 10% ROR, ROR st = mit Struboil).

In den weiteren Ausführungen wird gezeigt, dass der Einspritzbeginn dieses Motors im Volllastbereich (aus Gründen der Leistungslimitierung und NO_x-Minimierung) recht spät gelegt wurde. Aus diesem Grund fallen die mit ROR erhöhten NO_x-Emissionen noch nicht so stark aus, als bei den modernen Nutzfahrzeugmotoren.

Abb. 91 stellt die SMPS-Partikelgrößen-Verteilungsspektren PSD (als Mittelverläufe aus 3 Proben) für Diesel und ROR dar.

Es ist typisch, dass sich die Form der Verteilungsspektren mit der Motorlast ändert:

Bei hoher Last gibt es eine monomodale Partikelgrößenverteilung (PSD) mit Maximum bei etwa 100nm. Dieser Typ von PSD repräsentiert hauptsächlich die Festpartikel und ist „Akkumulationsmodus“ genannt;

Bei niedrigerer Motorlast verschiebt der Akkumulationsmodus sein Maximum zu tieferen Zahlenkonzentrationen und zu tieferen Partikelgrößen (etwa 60 nm, siehe Serie A). Gleichzeitig erscheint eine Bimodalität der Verteilung, d.h. ein starker Anstieg der Anzahlkonzentrationen in dem kleinsten Größenspektrum < 30 nm. Diese kleinsten Partikel werden als „Nukleationsmodus“ bezeichnet, sie sind meistens ein Gemisch aus festem und aus kondensiertem Material.

Mit ROR ist das Maximum des Akkumulationsmodus zu geringeren Partikelgrößen (etwa 50-60 nm) verschoben und die Nukleationspartikel erscheinen bereits bei hohen Motorlasten. Bei den Schwachlastpunkten (Leerlauf und 10%) ist der Nukleationsmodus viel stärker ausgeprägt als mit Diesel. Alles das ist durch viel mehr Spontankondensate (mehr SOF) mit ROR verursacht.

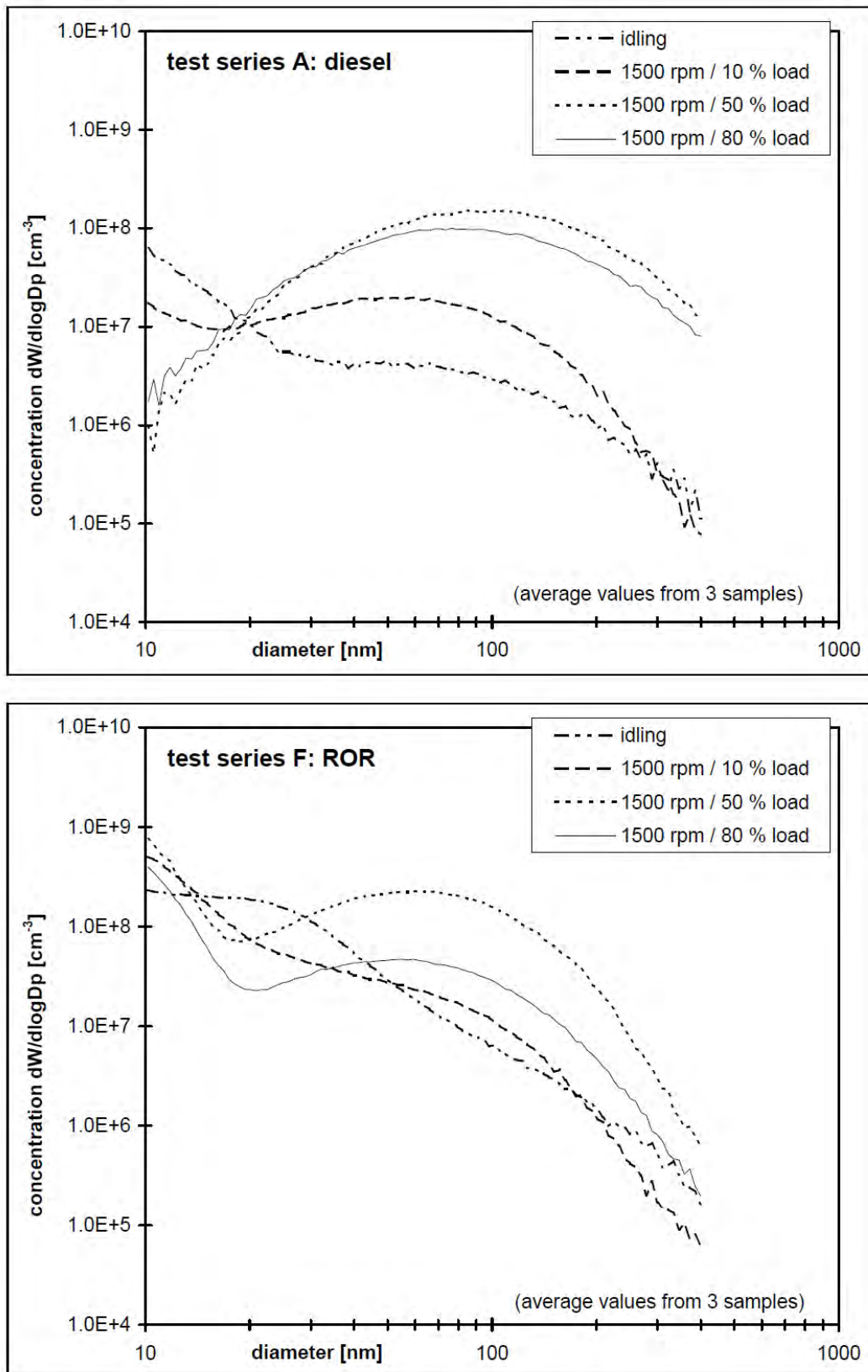


Abbildung 91: Partikelgrößen-Verteilungsspektren.

6.2 Coulometrie EC/OC

Eine Probenahme des PM-Rückstandes auf die Quarz-Messfilter wurde bei den Betriebspunkten: Pkt. 2. 1500 rpm / 10% und Pkt.4. 1500 rpm / 80% durchgeführt. Die coulometrische Analyse des Filterresiduums wurde bei dem Analytischen Laboratorium der SUVA durchgeführt.

Die Standardprozedur besteht aus der thermischen Extraktion von SOF mit N₂ bei 500° C während 8 min und nachher aus der EC-Oxidation mit O₂ bei 650° C.

Da jedoch ROR ein schwererer Kraftstoff ist, welcher mehr und schwerere SOF produziert wurde entschieden die Temperatur der thermischen N₂-Extraktion für alle Proben bis auf 800° C zu steigern.

Weiters wurden die belegten ROR-Messfilter halbiert. Eine Hälfte wurde mit der modifizierten Standardmethode (thermische N₂-Extraktion bis 800° C) analysiert. Die andere Hälfte eines jeden Messfilters wurde einer Lösungsmittel-Extraktion unterzogen, dies mit Toluol-Propanol-Gemisch (50/50 Vol.-%, gemäss VDI Richtlinie 2465 Bl.1).

Die Ergebnisse der coulometrischen Analyse – alle Werte entsprechen 3 min Probenahmezeit auf dem ganzen Messfilter und bei gleichen Probenahmebedingungen – sind in der Tab. 17 zusammengefasst und mit den gravimetrischen PM-Resultaten verglichen.

Tabelle 17: Organischer, elementarer und totaler Kohlenstoff für die untersuchten Kraftstoffe.

fuel / operating points		OC [µg]	EC [µg]	TC [µg]	PM [mg]	OC/TC [%]	reduction relatively to diesel			
							OC [%]	EC [%]	TC [%]	TC/PM -
diesel	pt. 2	669.88	226.08	895.96	1.209	74.767	-	-	-	0.74
	pt. 4	594.88	4692.48	5287.36	5.922	11.251	-	-	-	0.89
ROR	pt. 2	434.88	47.48	482.36	1.471	90.157	35.1	79.0	46.2	0.33
	pt. 4	159.08	247.48	406.56	1.295	39.128	73.3	94.7	92.3	0.31
ROR extracted	pt. 2	96.08	18.08	114.16	1.471	84.163	85.7	92.0	87.3	0.08
	pt. 4	110.28	208.48	318.76	1.295	34.597	81.5	95.6	94.0	0.25

Es kann bemerkt werden:

- höhere Motorlasten erzeugen generell weniger OC und mehr EC, d.i. „trockeneres Russ“,
- ROR verursacht einen höheren OC Anteil (geringeren EC Anteil), was besonders bei tieferer Motorlast ausgeprägt ist,
- ROR reduziert die gesamte Partikelmasse PM bei Hochlast insbesondere durch Verminderung von EC,
- die vorherige Lösungsmittel-Extraktion ermöglicht eine genauere Bestimmung von EC (durch Minimierung eines Artefaktes bezeichnet als „charring“).

Charring (Verkohlen) kommt zustande, wenn die schweren Komponenten in SOF polymerisieren während der thermischen Extraktion (N₂ 500°C, oder 800° C) und verbleiben in dem Probematerial. Dieser verbleibende Teil von SOF erhöht die in der nächsten Phase der Prozedur (EC-Oxidation) gemessene EC-Menge. Die vorherige Lösungsmittel-Extraktion reduziert diesen verbleibenden SOF-Anteil zum Minimum.

6.3 Einspritzung und Verbrennung

Abb. 92 zeigt die Signale folgender Größen bei allen untersuchten Betriebspunkten mit Diesel: Steuerstrom, Einspritzleitungdruck p_L , Nadelhub NL und den Brennraumdruck p_i .

Die üblichen Relationen dieser Parameter sind gut ersichtlich: mit steigender Motorlast wird die Einspritzdauer länger, der Einspritzdruck und der Brennraumdruck erreichen höhere Maximalwerte.

Die Druckwelle in der Hochdruckleitung hat eine für alle nockenbetriebene Einspritzsysteme charakteristische Form mit dem Druckmaximum nahe am Einspritzende.

Es kann auch bemerkt werden, dass mit steigender Motorlast der Spritzbeginn (SOI) von der ECU nach später verschoben wird, was bei dieser Bedatung absichtlich zwecks Reduzierung von NO_x (auf Kosten des spezifischen Verbrauches) eingeführt wurde.

Abb.93 zeigt das Analoge für ROR, wobei die höheren Einspritzdrücke als mit Diesel sofort auffallen.

Zwecks besserer Vergleichbarkeit wurden manche Verläufe (beim Leerlauf und bei 1500 rpm / 80%) überlagert (Abb. 94). Es wird deutlich, dass ROR einen schnelleren Anstieg des Einspritzdruckes, eine schnellere Nadelerhebung und einen früheren Brennbeginn (SOC) verursacht. Beim Hochlastpunkt kriegt die Nadel so einen Impuls, dass sie auf dem Sitz aufspringt.

Die Kompressionslinien, die bis zum oberen Totpunkt sichtbar sind, decken sich nicht ganz – insbesondere bei hohem Lastpunkt. Dies ist dadurch verursacht, dass die Versuchserien jeweils mit gleicher Aktivierungszeit (mit gleicher Einspritzdauer) durchgeführt wurden, was für verschiedene Kraftstoffe verschiedene Drehmomente ($n=const$) liefert. Dementsprechend liefert das Aufladesystem ein wenig unterschiedliche Ladeluftbedingungen (p , t , siehe Tabellen im Anhang).

Die Leistungsdifferenz zwischen Diesel und ROR ist recht gering – bei 1500 /Vollast – Diesel 142.8 kW, ROR 141.0 kW.

ROR mit höherer Zähigkeit (trotz des Vorwärmens) verursacht deutlich höhere Einspritzdrücke, die bei Nennleistung (2000 rpm / Vollast) 1600 bar überschreiten.

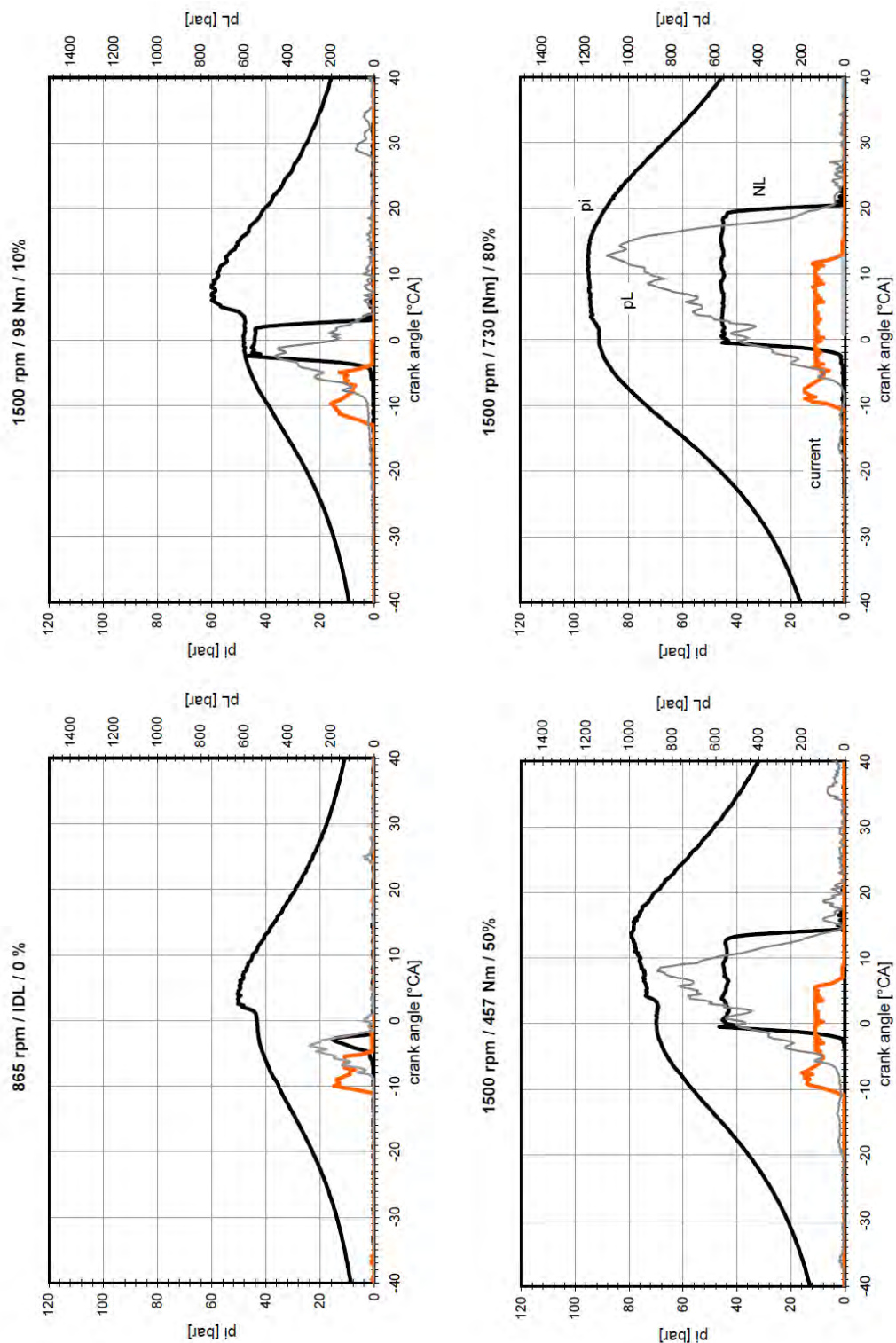


Abbildung 92: Steuerstrom, Einspritzleitungdruck pL, Nadelhub NL und Brennraumdruck pi für Dieselöl.

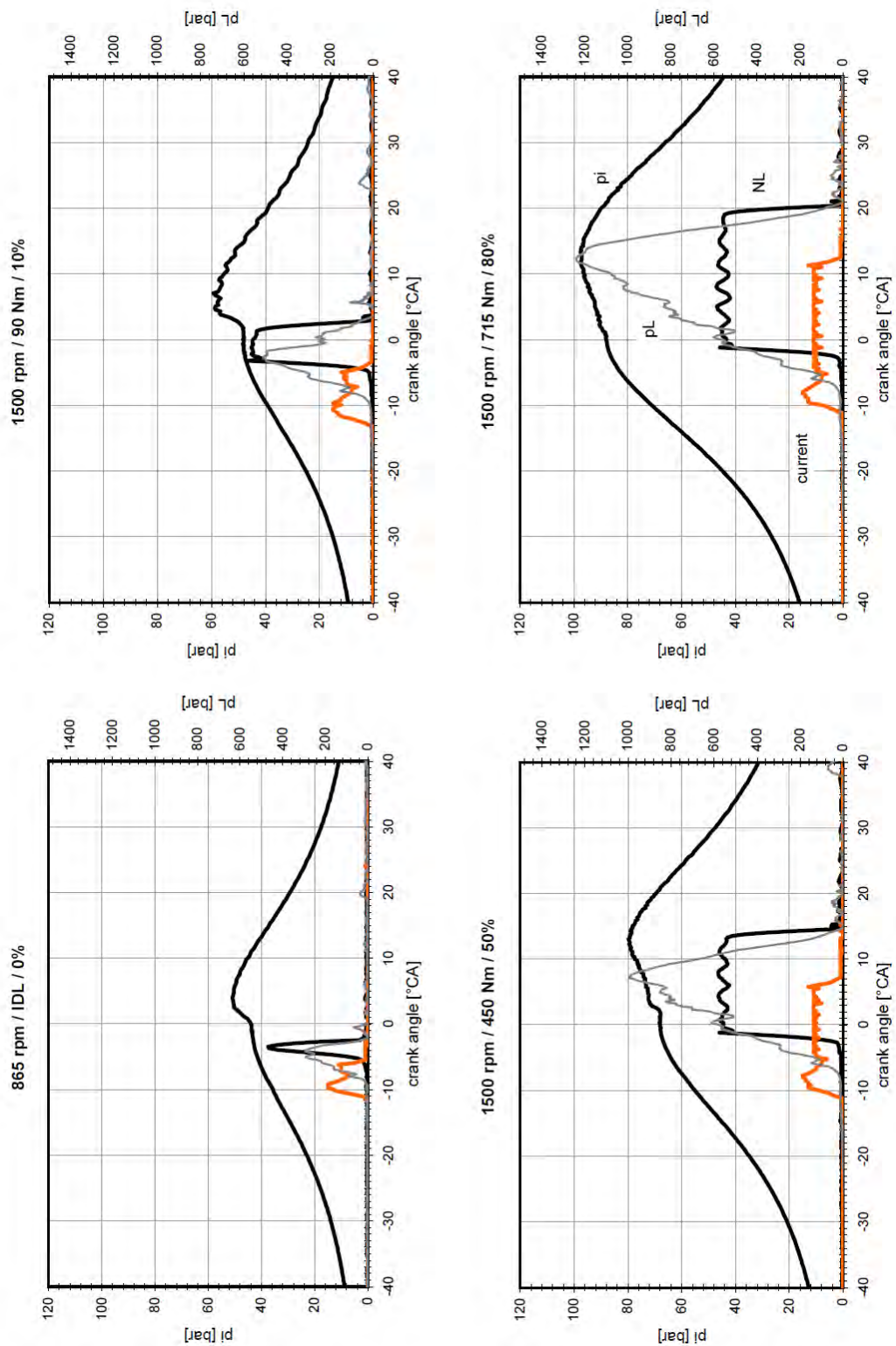


Abbildung 93: Steuerstrom, Einspritzleitungdruck pL, Nadelhub NL und Brennraumdruck pi für ROR.

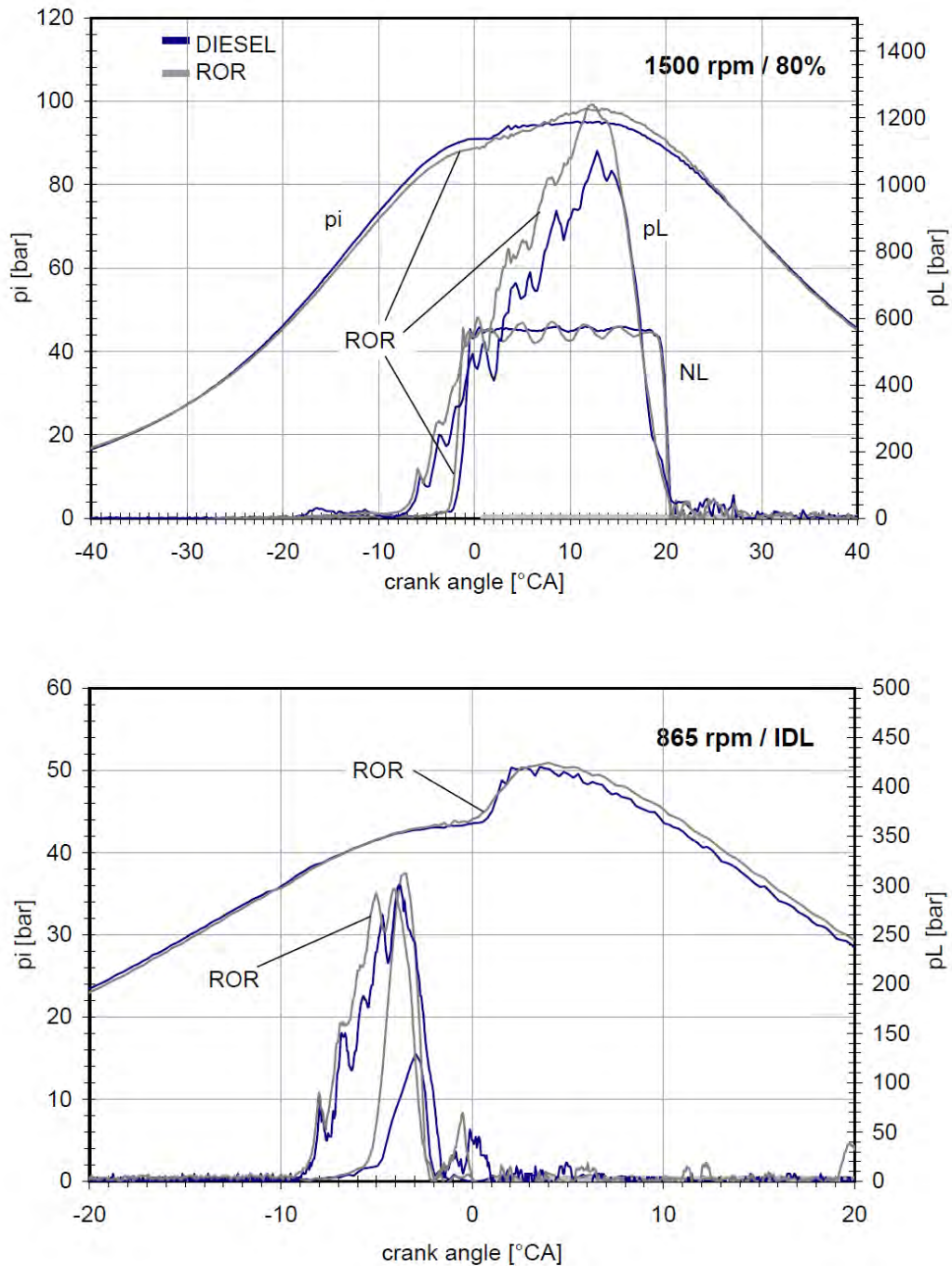


Abbildung 94: Überlagerte Verläufe für Einspritzleitungdruck p_L , Nadelhub NL und Brennraumdruck p_i .

Abb. 95 zeigt die charakteristischen Punkte, welche aus den gemessenen Signalverläufen (current, p_L , NL und p_i) resultieren. Es ist daraus möglich den Einspritzverzug, d.h. das Intervall zwischen Ansteuerbeginn und Spritzbeginn (SOI), zu messen. Ähnlich kann auch der Zündverzug, also die Zeitspanne zwischen Spritzbeginn (SOI) und Brennbeginn (SOC), bestimmt werden.

Die Resultate der beiden Bewertungen sind in Abb. 96 zusammengestellt. Es kann festgestellt werden, dass das ROR tendenziell einen kürzeren Spritzverzug und mit einer Ausnahme (bei 1500 rpm / Vollast) einen kürzeren Zündverzug aufweist.

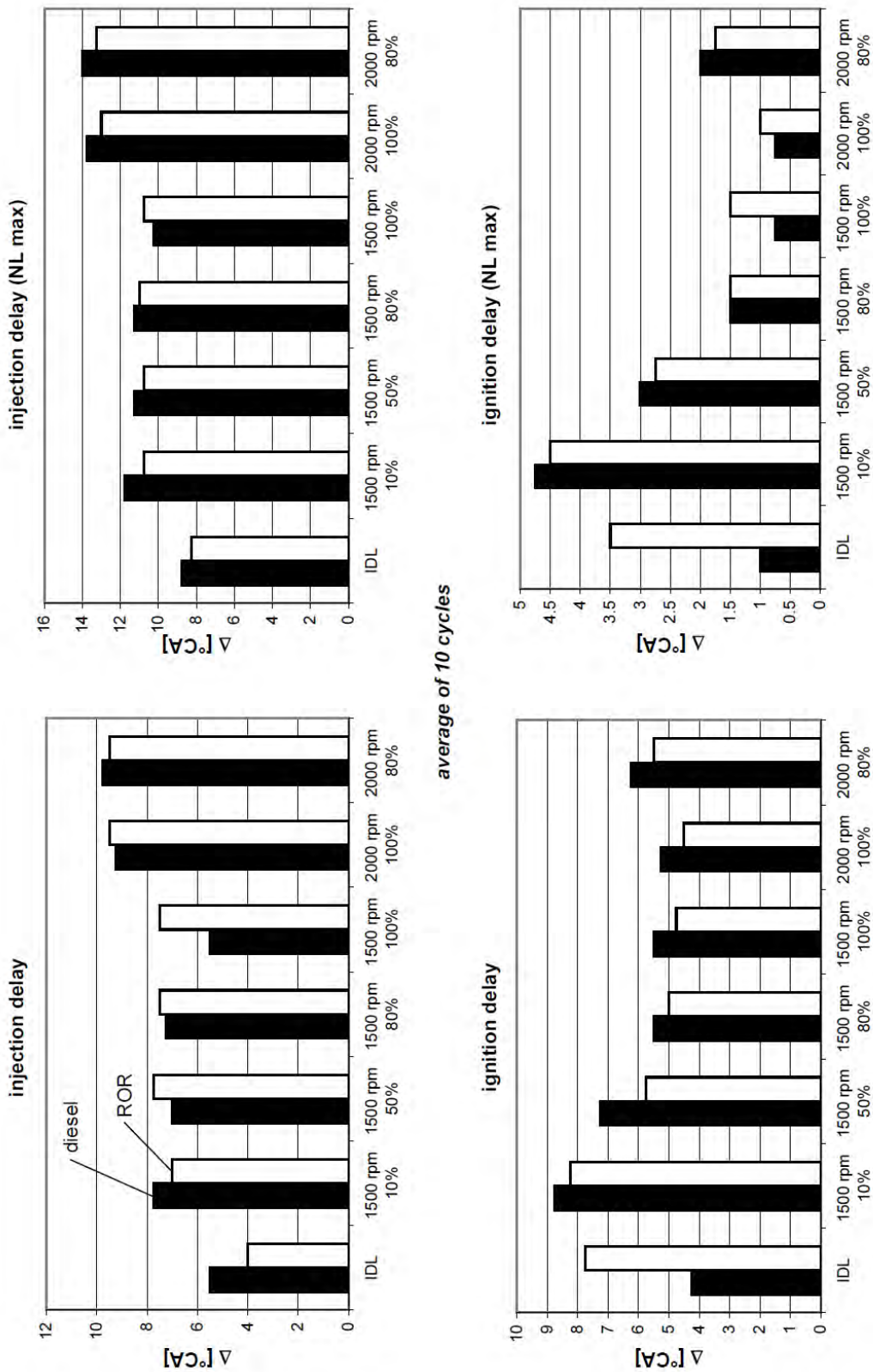


Abbildung 96: Spritz- und Zündverzüge von Dieselöl und ROR mit zwei unterschiedlichen Berechnungsmethoden.

Abb. 97 beschreibt die charakteristischen Parameter der Heizverlaufauswertung, welche nützlich sind um die Einflüsse der untersuchten Kraftstoffe auf die Geschwindigkeit und Intensität der Wärmefreisetzung, insbesondere am Anfang der Verbrennung, aufzuzeigen. Diese Parameter sind:

- maximale Heizgeschwindigkeit $ROHR_{max}$,
- Entflammungs- und vorgemischte Phase I&PP (einschliesslich Gemischbildung und Zündverzug) und
- Kurbelstellung von 50% umgesetzter Energie $\alpha 50\%$

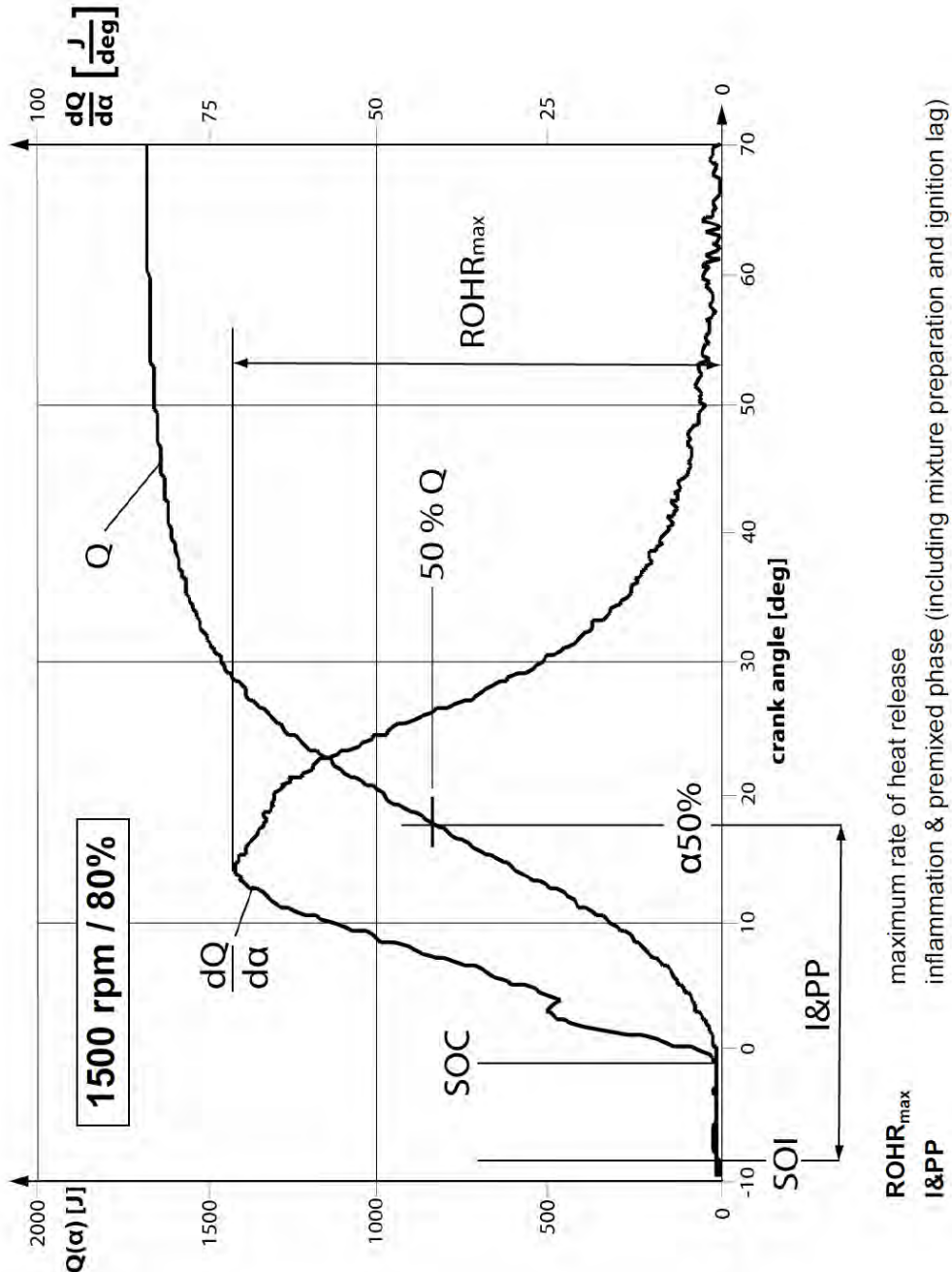


Abbildung 97: charakteristischen Parameter der Heizverlaufauswertung.

Abb. 98 zeigt die Diagramme der Wärmefreisetzung mit den beiden Kraftstoffen bei zwei Betriebspunkten mit unterschiedlicher Last (Mittelverläufe aus 50 Zyklen).

Bei Teillast entflammt ROR eindeutig früher, dies jedoch mit geringerer Umsetzungsge-
schwindigkeit. Bei Volllast gibt es auch etwas frühere Brennbeginne -verursacht haupt-

sächlich durch die Effekte der Einspritzanlage (früherer SOI) – die Brennraten sind jedoch etwa gleich wie bei Dieselöl.

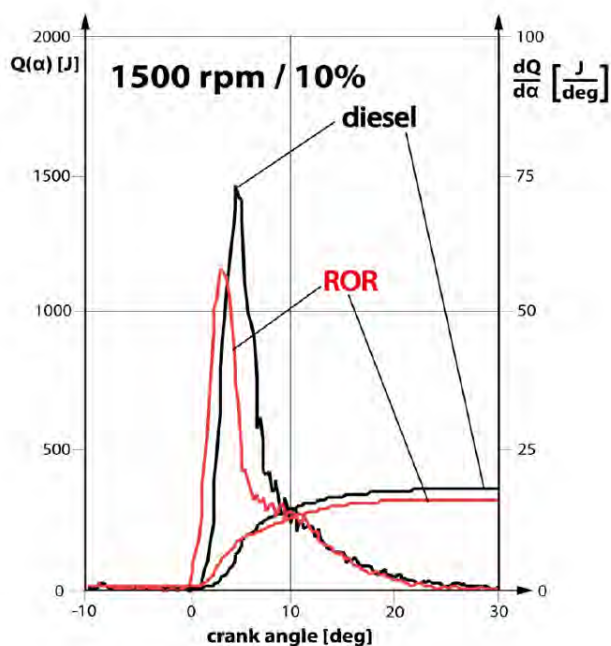
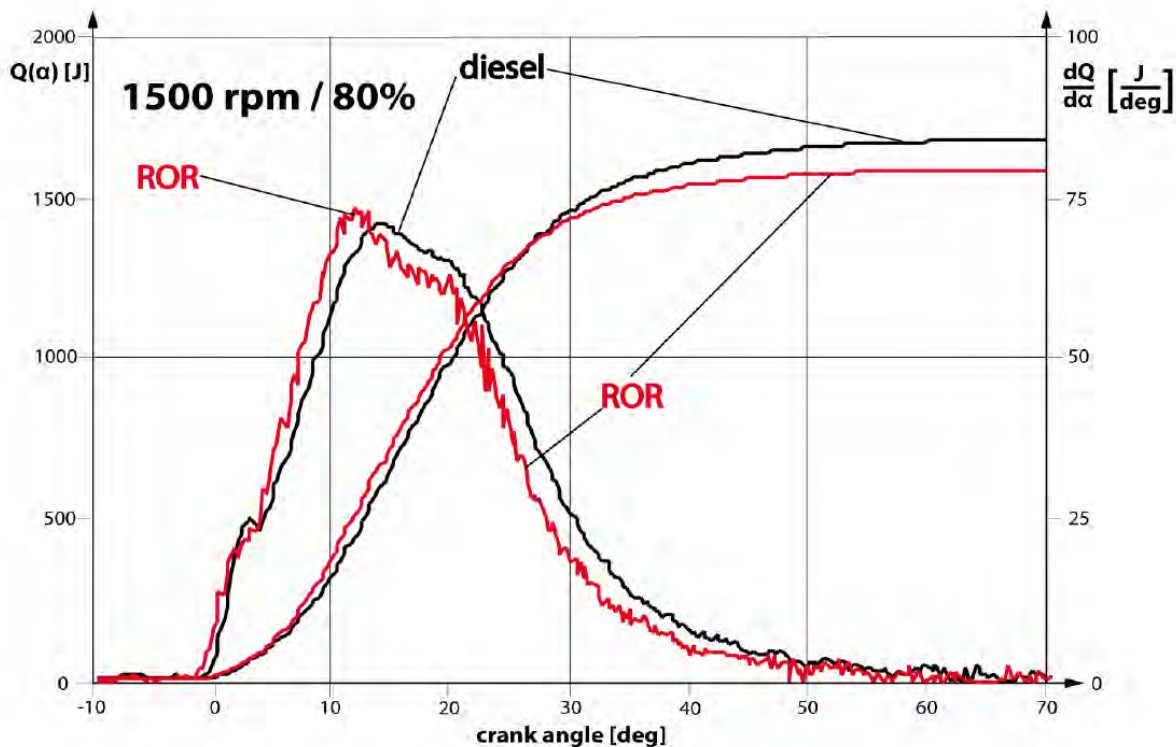


Abbildung 98: Wärmefreisetzung bei zwei Betriebspunkten mit unterschiedlicher Last.

6.4 Startfähigkeit mit ROR

Der Motorstart findet nach einer Vorheizung von 3 Stunden statt. Dies ist eine elektrische Vorheizung des Kraftstofffilters (Biodrive) und des Motorkühlwassers. Der Kraftstoffkreislauf ist kurzgeschlossen und die Kraftstoffzirkulation wird mit einer zusätzlichen elektrischen Kraftstoffpumpe (Biodrive AG) bewerkstelligt.

Die nach 3 Stunden erreichbaren Temperaturen sind:

- Kraftstoffzulauf zu den Hochdruckpumpen ca. 45°C
- Kühlwasser ca. 50°C

Mit diesen Bedingungen startet der Motor problemlos.

Da diese Temperaturen jedoch von den Bedingungen im Motormessraum (tamb ca. 20°C) mit beeinflusst sind, müsste eventuell bei deutlich tieferen Umgebungstemperaturen (in winterlichen Verhältnissen) die Heizleistung erhöht werden.

Beim Motorbetrieb ergeben sich folgende Situationen:

- Leerlauf und Teillast: die Kraftstofftemperatur (Zulauf Hochdruckpumpen) muss durch die elektrische Heizung, oder durch den Kühlwasser-Kraftstoff-Wärmetauscher angepasst werden; beim Laborbetrieb AFHB wurde dies von Hand geregelt.
- 1500 rpm / Vollast (120 kW): durch die Selbstheizung (Anwärmung von Motor und Vermischung mit der Rücklaufmenge) verbleibt die Kraftstofftemperatur vor den Einspritz-Elementen bei 68-70° C (Kraftstofftemperatur am Motoreintritt 13-15° C) – eine zusätzliche Kraftstoffheizung ist nicht nötig.
- 2000 rpm / 50% Last: die Kraftstofftemperatur wird zu hoch, tkr > 75° C, Fehlermeldung, die Motorsteuerung geht in Notprogramm und zieht die Last zurück.

Für den Generatorbetrieb bei 1500 rpm ist also die vorhandene „natürliche“ Kraftstoffkühlung ausreichend.

Bei höheren Umgebungstemperaturen und beim Betrieb mit höheren Drehzahlen wird eine zusätzliche, verstärkte Kraftstoffkühlung notwendig.

Es kann also zusammenfassend festgestellt werden, dass die Kraftstofftemperaturen bei den benötigten Betriebsbedingungen (1500 rpm) und bei den gegebenen Umgebungstemperaturen ohne weiteres in den benötigten Grenzen gehalten werden konnten. Bei den extremen Abweichungen der Umgebungstemperatur müsste entweder zu einer zusätzlichen Kraftstoffheizung für den Kaltstart, oder zu einer zusätzlichen Kraftstoffkühlung für den Dauerbetrieb gegriffen werden.

Abb. 99 zeigt die Zeitverläufe der Temperaturen von Kühlwasser und Kraftstoff beim Kaltstart und Warmlauf. Ab der Lastaufschaltung bis auf nahezu Vollast vergehen etwa 13 min bis zum Erreichen des thermischen Beharrungszustandes von Kühlwasser und Kraftstoff.

Es kann festgestellt werden:

- Die Wiederholbarkeit der Kaltstartversuche ist sehr gut,
- ROR bewirkt veränderte Hydraulik und erhöhte Maximaldruckwerte der Einspritzung,
- ROR verursacht tiefere maximalen Brennraumdrücke im Leerlauf.

cold start & warm up with ROR - 860rpm / idling → 1500 rpm / 700 Nm

Liebherr D 934 L, NW1

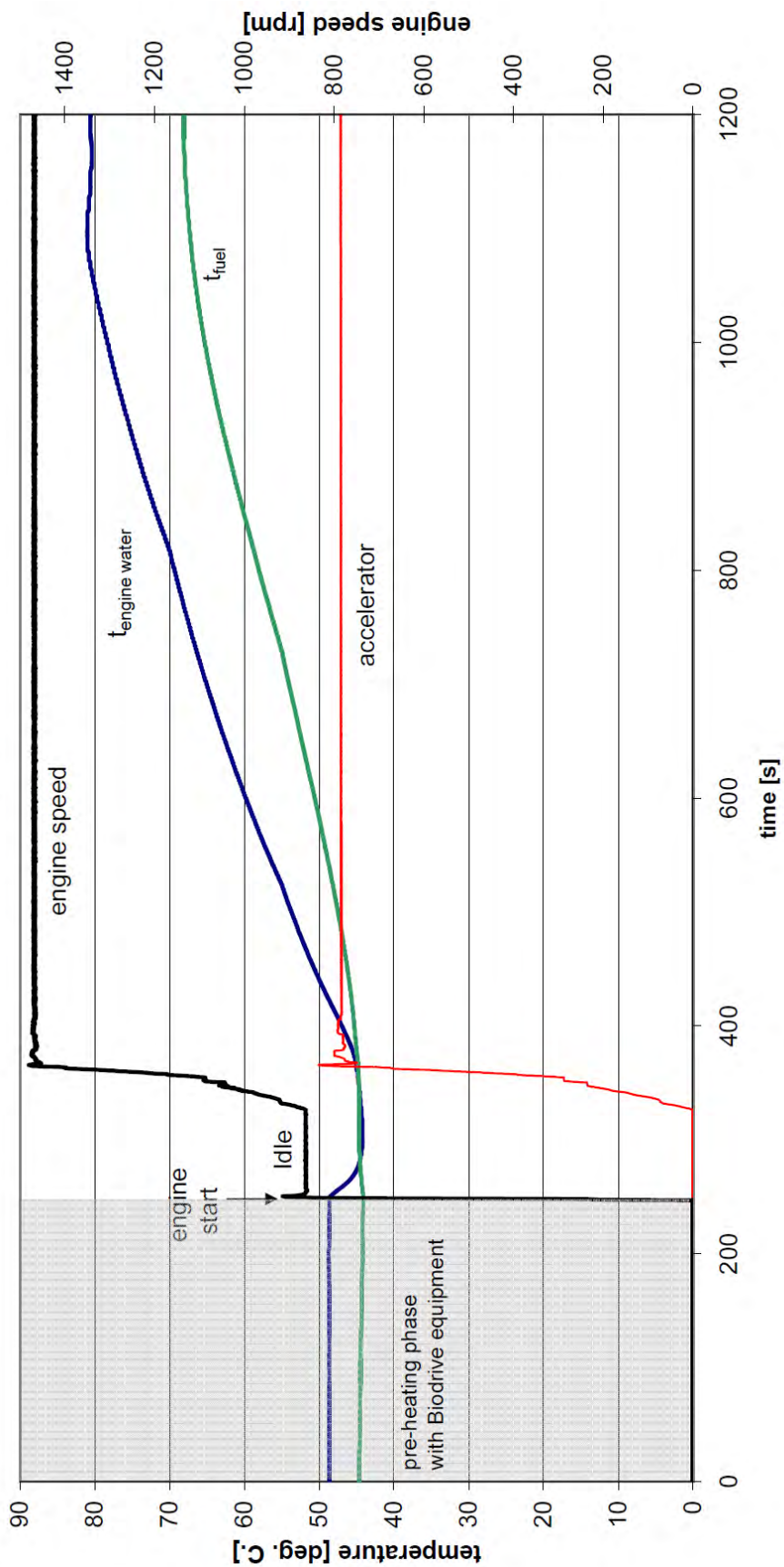


Abbildung 99: Zeitverläufe der Temperaturen von Kühlwasser und Kraftstoff bei Kaltstart und während Warmlauf.

6.5 Veränderte Nockenwelle

Die Originalventilsteuerung des Versuchsträgers (Liebherr D934L) ermöglicht eine innere Abgasrückführung (AGR) durch eine kurze Öffnung des Einlassventils während der Auslassphase (Abb. 100). Dies könnte einerseits beim ROR-Betrieb zu übermäßiger Verschmutzung der Einlassventile und Ventilsitze führen. Andererseits, in Anbetracht der Tatsache, dass der Motor mit SCR deNO_x-System ausgerüstet sein wird, konnte auf die innere AGR verzichtet werden.

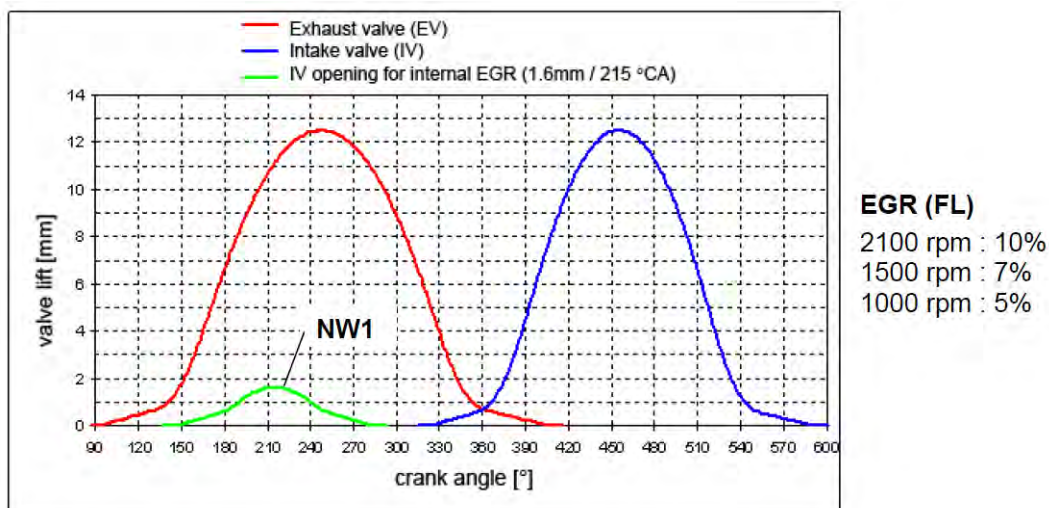


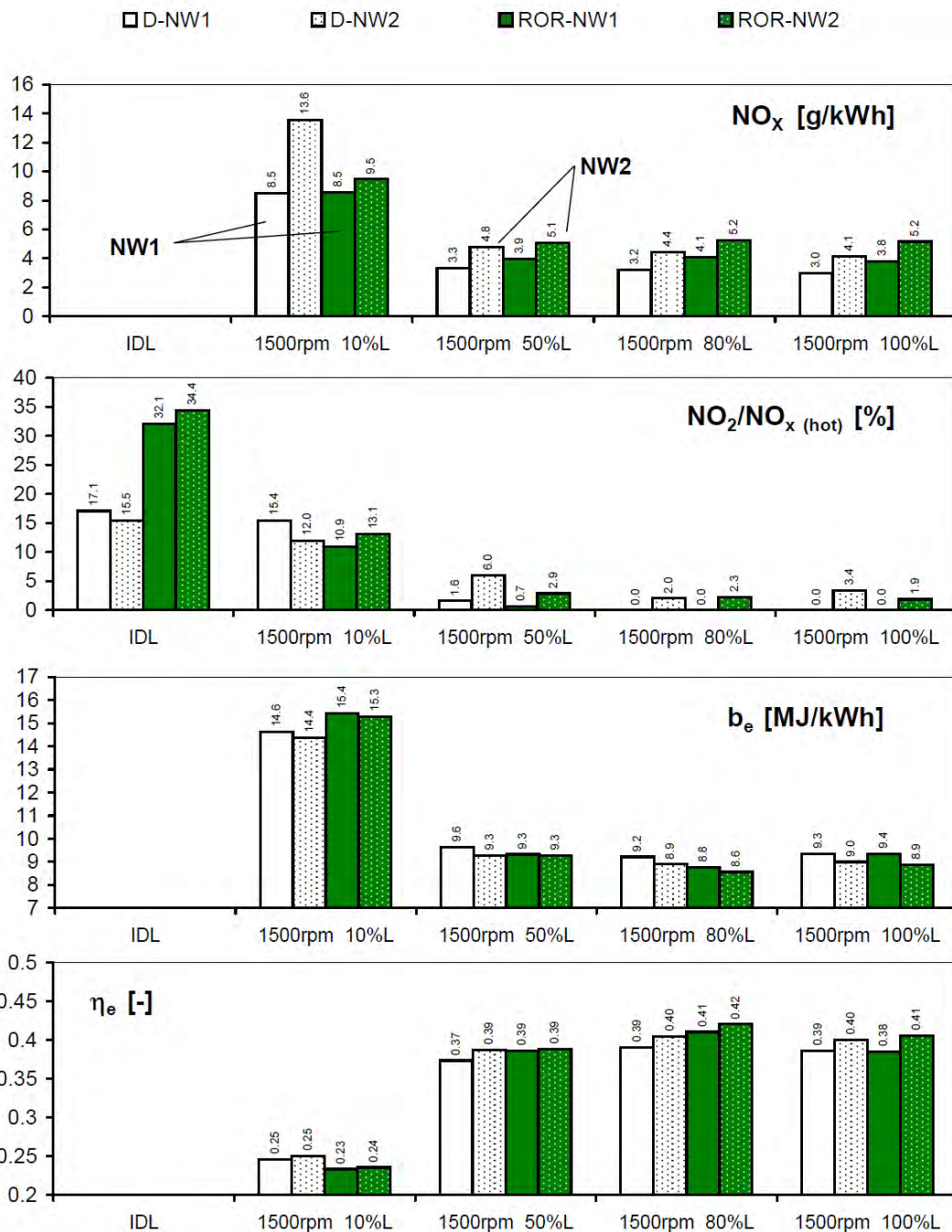
Abbildung 100: Ventilöffnungszeiten bei unveränderter Nockenwelle (NW 1) und Abgasrückführungsrate (rechts).

Es wurde eine entsprechend abgeschliffene Nockenwelle (NW2) angefertigt und in den Versuchsmotor bei Liebherr in Bulle eingebaut.

Einige Messserien mit Diesel und mit ROR wurden mit NW2 wiederholt und mit NW1 verglichen.

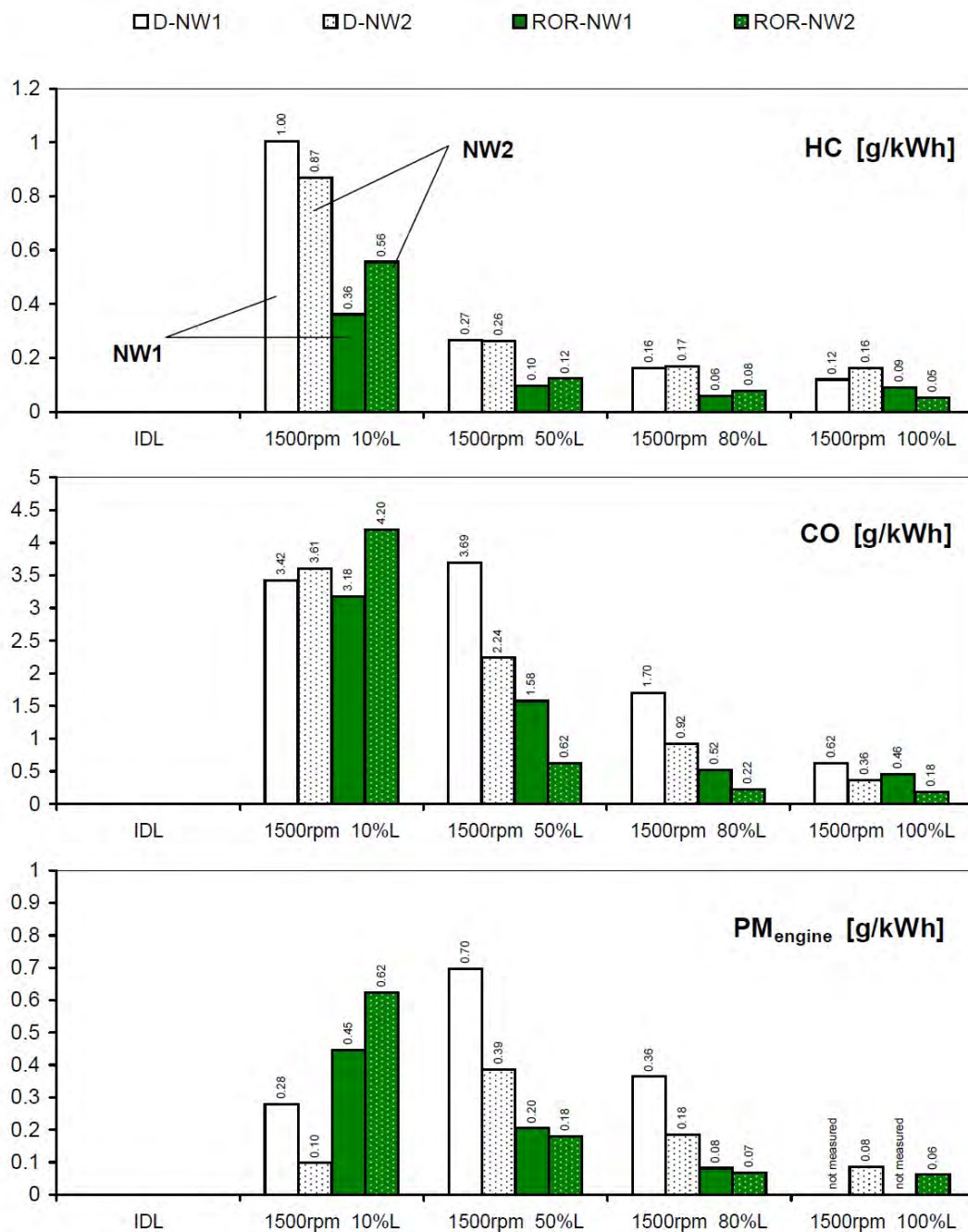
Bei Hoch- und Vollast bewirkt die NW2 (ohne AGR) höhere NO_x- und tiefere CO- und PM-Werte. Der spezifische Verbrauch mit NW2 ist bei Vollast geringer. Bei tiefer Teillast kehren sich diese Relationen meistens um (Abb. 101 und 102).

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die NW2 ohne interne AGR CO, PM, NP und b_e mindert und die NO_x Werte erhöht.



*) camshaft NW1 with internal EGR
 camshaft NW2 without internal EGR

Abbildung 101: Messwerte für Dieselöl und ROR bei unterschiedlicher Last und zwei Nockenwellen.



*) camshaft NW1 with internal EGR
 camshaft NW2 without internal EGR

Abbildung 102: Emissionswerte für Dieselöl und ROR bei unterschiedlicher Last und zwei Nockenwellen.

6.6 Variation des Spritzbeginnes

Der Spritzbeginn wurde im Vollastnahen Motorbetriebsbereich nach früher verlegt, um einen leistungs- und verbrauchsoptimalen Betrieb zu erreichen.

Abb. 103 und 104 zeigen für Diesel und ROR die Verläufe von pi und NL, sowie die Emissionswerte bei der Frühverlegung von Förderbeginn. Es wird deutlich, dass neben NO_x auch die Partikelemissionen steigen bei früherem DB. Für ROR ist diese Steigerung nur für das Nanoaerosol (PAS, DC) sichtbar.

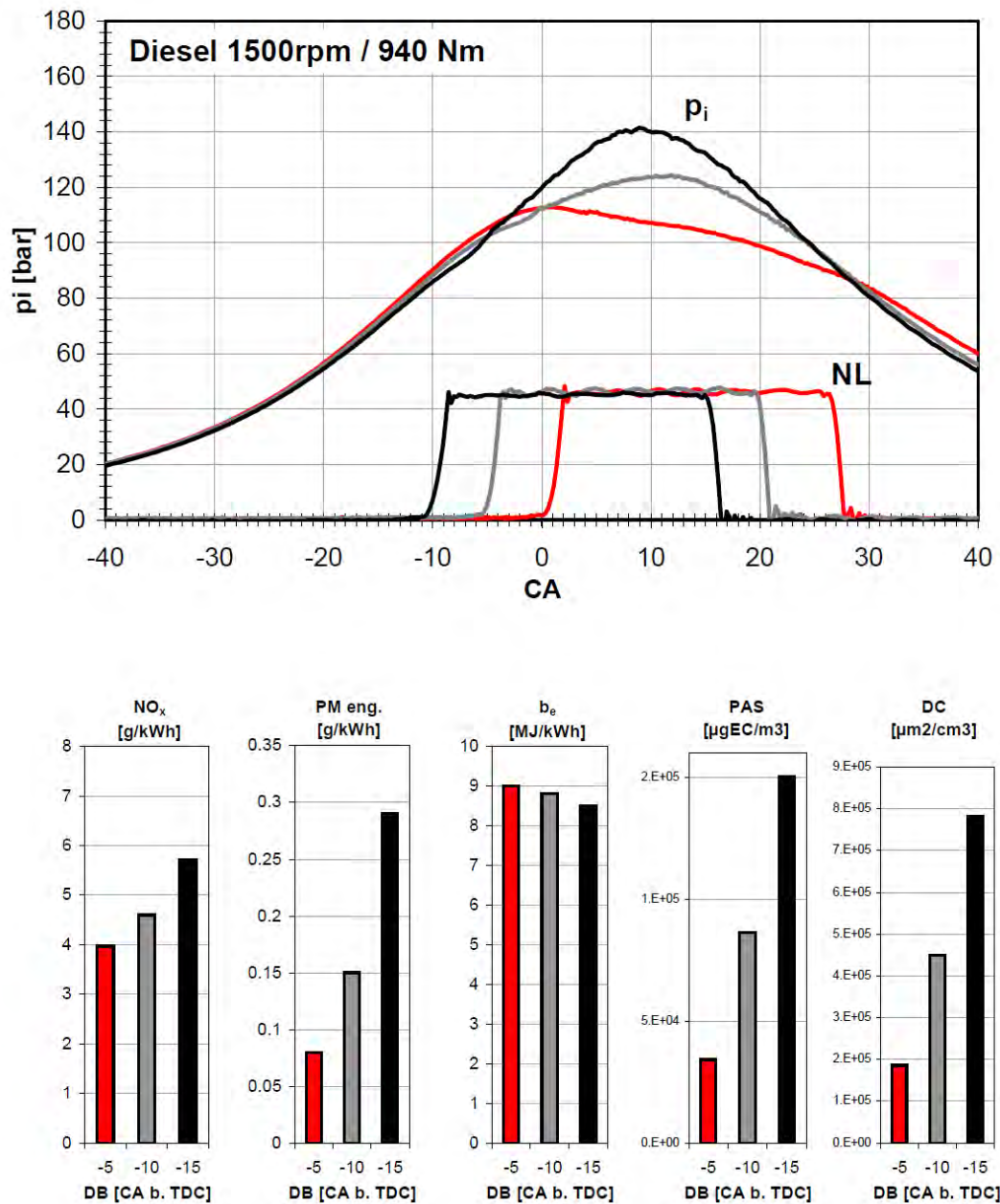


Abbildung 103: Effekte einer Frühverlegung des Förderbeginns bei Dieselöl.

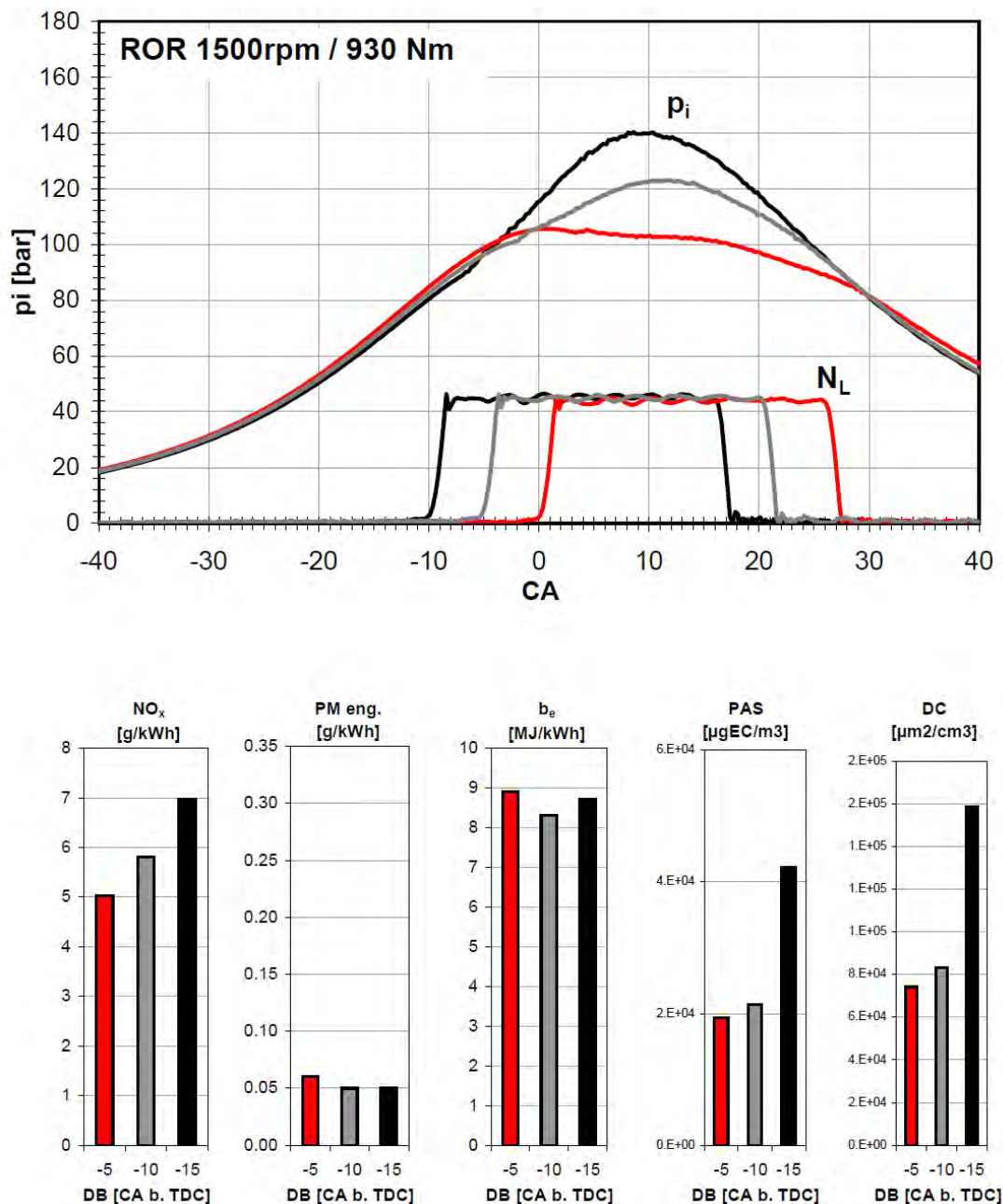


Abbildung 104: Effekte einer Frühverlegung des Förderbeginns bei ROR.

Es ist zu sehen, dass ROR eine mildere vorgemischte Verbrennungsphase als Diesel aufweist, was der höheren Kraftstofftemperatur und den höheren Einspritzdrücken mit ROR zu verdanken ist (Abb. 105).

Zusammenfassend kann festgestellt werden: die Vorverlegung des Spritzbeginns verursacht Nachteile (Erhöhung) von NO_x und PM / NP, welche jedoch mit dem kombinierten Abgasnachbehandlungssystem beseitigt werden können.

Es entstehen in den meisten Fällen energetische Vorteile und die höheren Spitzentemperaturen im Brennraum sind zur Verminderung der Ablagerungsneigung im Brennraum vorteilhaft.

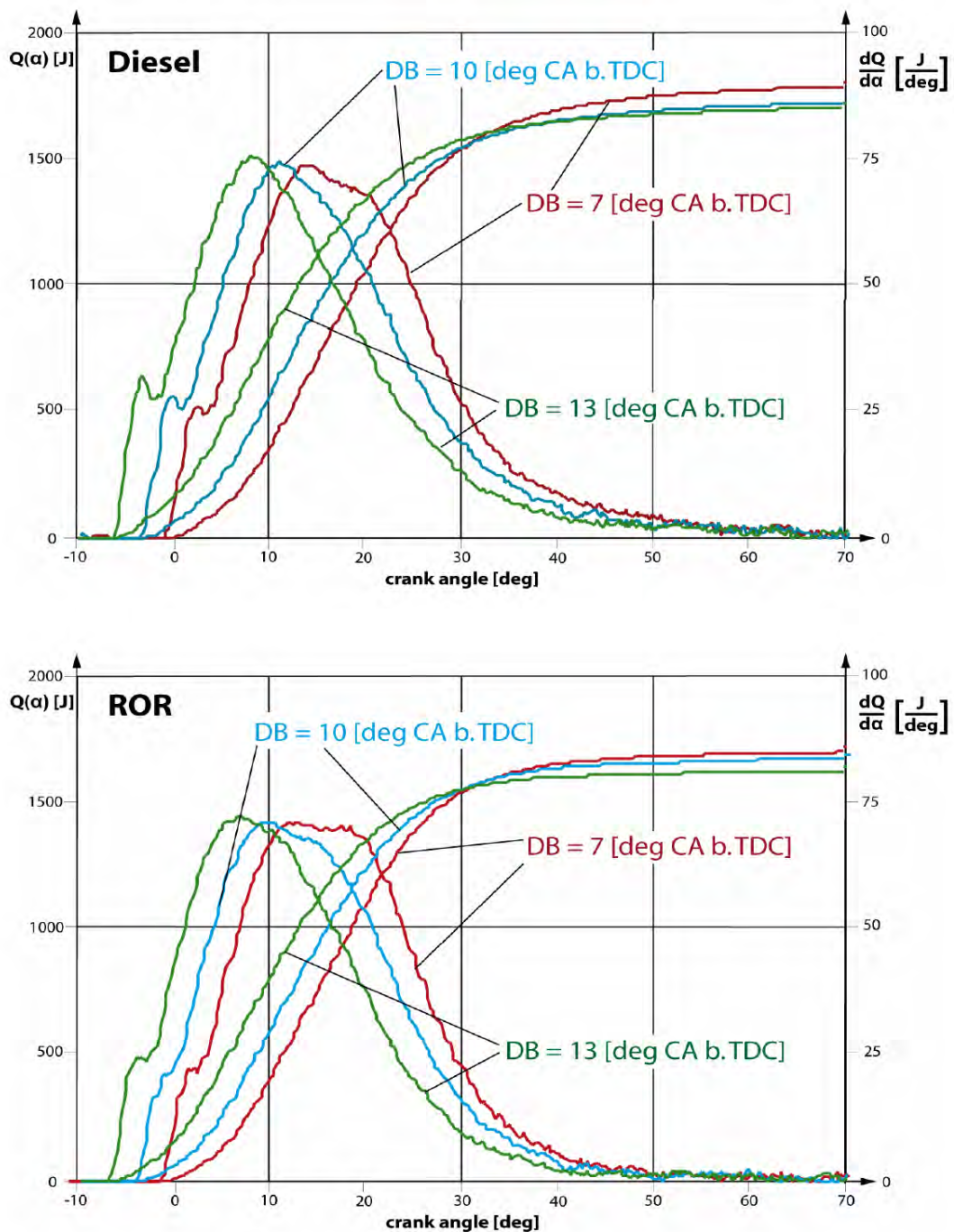


Abbildung 105: Wärmefreisetzung bei Frühverlegung des Förderbeginns.

6.7 Abgasnachbehandlung DPF + SCR

Von der Firma Hug Engineering wurde ein kombiniertes Abgasnachbehandlungssystem DPF + SCR geliefert und im Motorenlaboratorium der TI Biel an dem Versuchsträger durch die AFHB installiert (Abb. 106).

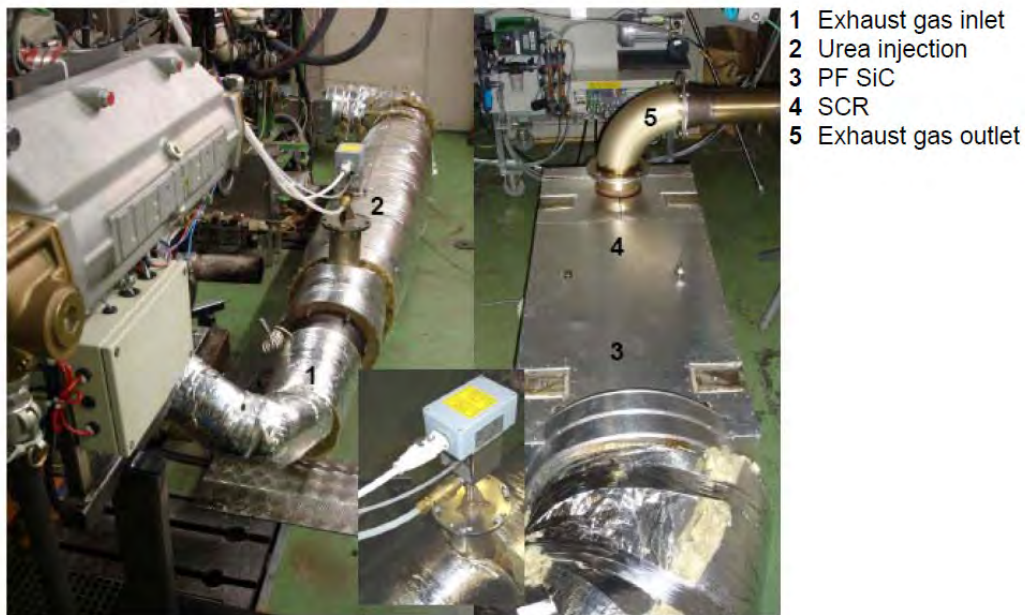
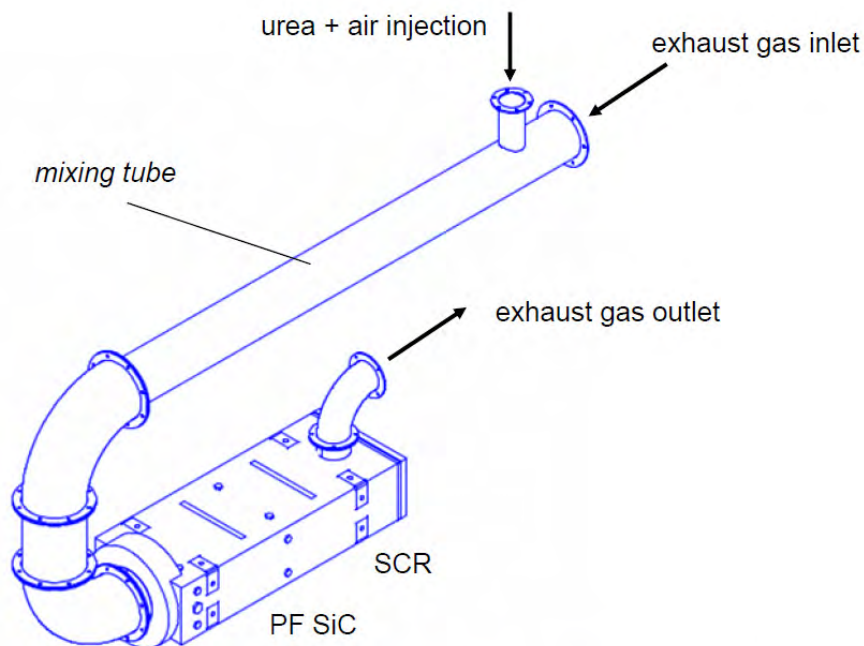


Abbildung 106: Das Abgasnachbehandlungssystem von Hug Engineering, aufgebaut im Motorenlaboratorium der TI Biel.

Dieses System ist für den stationären Motorbetrieb vorgesehen. Es hat keinen Vorkatalysator, braucht jedoch eine entsprechend lange und isolierte Mischstrecke nach der luftunterstützten Harnstoff-Eindüsung. Die Filter- und Katalysatorelemente sind in einem rechteckigen Gehäuse modular austauschbar.

Die Daten des Filters und des Katalysators sind:

- Modulquerschnitt: 176 x 176 mm
- Modullänge: DPF 400 mm, SCR 300 mm
- DPF: Material SiC, Beschichtung nicht-Edelmetall auf Basis von Vanadium
- SCR: Vollkontakt-Waben auf Basis von Vanadium.

Neben den Elementen im Auspuffstrang wurden ein Harnstoff-Behälter und die Eindüsungseinheit mit Pumpen und Steuereinrichtung installiert.

Die Inbetriebnahme fand im November 2006 statt.

Die Untersuchungen des DPF + SCR Systems verfolgten zwei Zielsetzungen:

- Grundsatzuntersuchungen mit Variation des Spritzbeginns und der Harnstoff-Dosierung beim Volllastpunkt der BHKW-Anwendung (120 kW, 85% der MotorVolllast),
- Test gemäss VERT-Prozedur bei verschiedenen Betriebspunkten.

Grundsatzuntersuchungen (120 KW)

Abb. 107 zeigt die Resultate mit vorverlegtem Spritzbeginn - mit und ohne Harnstoff-Dosierung.

Wie zu erwarten war, musste bei erhöhten NO_x-Werten die Harnstoffdosierung ebenfalls erhöht werden, um die NO_x-Konvertierungsrate von ca. 94% aufrechtzuerhalten. Dabei blieb der NH₃-Schlupf im Bereich von 20 bis 30 ppm (Grenzwert LRV 30 ppm).

VERT Test

Für diesen Test wurden 3 Betriebspunkte auf der Generatorlinie festgelegt:

- tiefe Teillast (16 kW, ca. 10% von MotorVolllast 140 kW), wo wegen zu tiefer Abgas-temperatur keine Harnstoff-Dosierung stattfinden kann,
- tiefe Teillast (39 kW, ca. 25%), wo Harnstoff bereits zudosiert werden kann,
- hohe Teillast (121 kW, ca. 85%, BHKW Volllast).

Abb. 108 fasst die wichtigsten Emissionswerte bei diesen 3 Betriebspunkten mit und ohne Harnstoff-Einblasung zusammen.

Dank der Abgasnachbehandlung können die Emissionen bei den 2 höheren Lastpunkten ohne weiteres unterhalb der LRV-Grenzwerte gehalten werden.

Beim tiefsten Betriebspunkt, wo die Harnstoff-Eindüsung wegen der Gefahr der Feststoff-ablagerungen nicht stattfinden kann und die Katalysatoren sich unterhalb der Light-off-Temperatur befinden, kann die LRV bezüglich CO und NO_x nicht eingehalten werden.

Der NH₃-Schlupf liegt im Bereich des LRV-Grenzwertes.

Die verwendete Spritzbeginncharakteristik ist bereits die von AFHB empfohlene mit den früheren DB-Lagen im Hochlastbereich. Bei tiefer Teillast wurde die Originaleinstellung nicht geändert.

Die gemäss integrierten Partikelzahlen berechneten Abscheidegrade PZAG liegen in der Grösse von 99.9%, was die hohe Qualität des DPF bestätigt.

Das vorhandene kombinierte DPF-SCR-System erfüllt die VERT-Kriterien für den Filter. Bei dem deNO_x-Teil (SCR) konnte nachgewiesen werden, dass die NO_x-Konvertierung im Betriebstemperaturfenster sehr gut funktioniert. Dies geschieht mit einem üblichen NH₃-Schlupf und ohne erkennbare Sekundärnanopartikel.

Die Frage der Sekundäremissionen von deNO_x Systemen ist aktuell ein Thema der Diskussionen und der Forschung im Schweizer Netzwerkprojekt VERT dePN (de Partikel, de NO_x).

ROR, 1500 rpm, ~120 kW

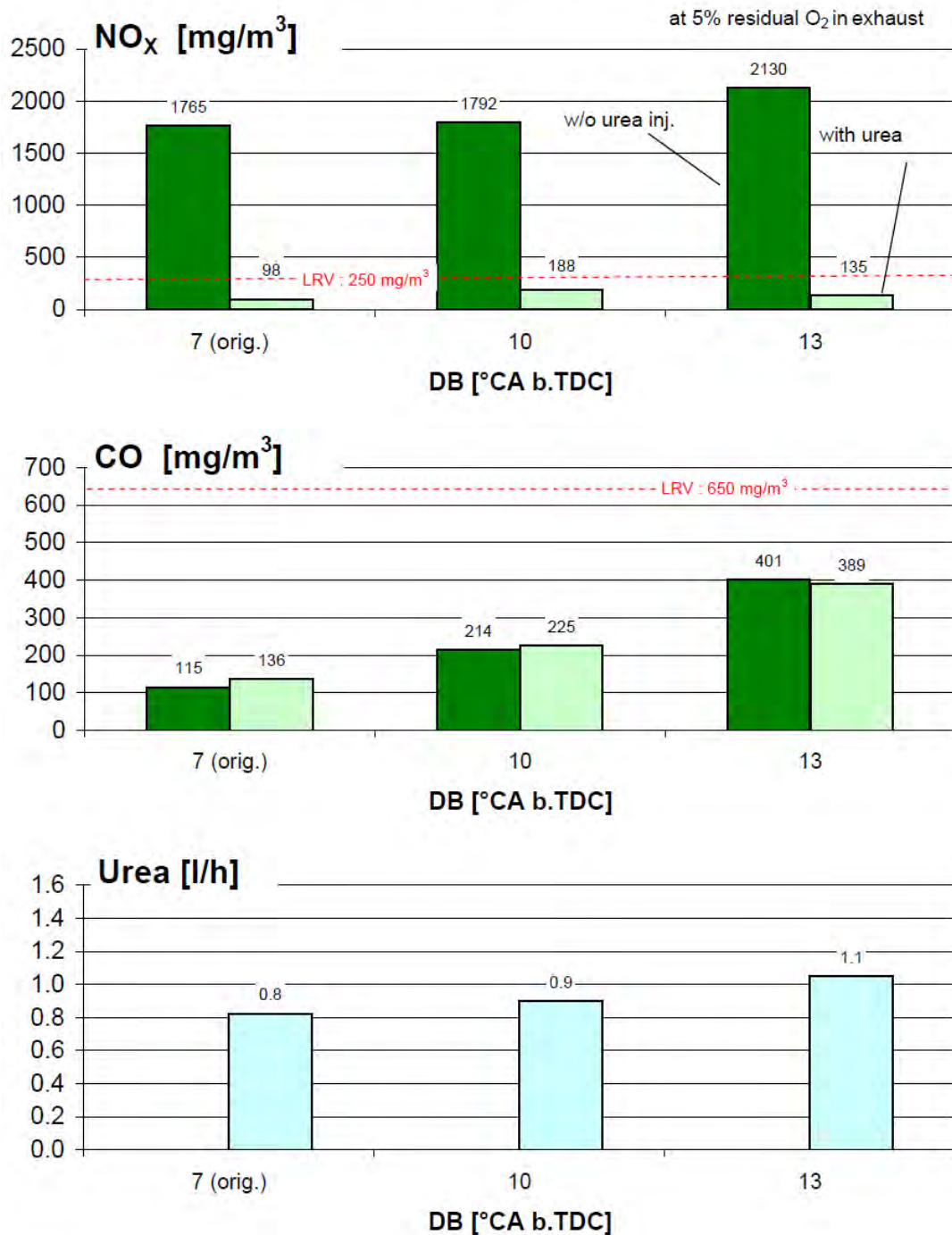


Abbildung 107: Emissionen bei unterschiedlichem Spritzbeginn - mit und ohne Harnstoff-Dosierung - und Harnstoffbedarf.

ROR, 1500 rpm



Abbildung 108: Emissionen bei unterschiedlichen Betriebspunkten - mit und ohne Harnstoff-Dosierung.

6.8 Ergänzende Resultate

Emissionen nach LRV

Abb. 109 fasst die wichtigsten Schritte des Projektes und ihre Einflüsse auf die LRV-relevanten Emissionen bei 120 kW zusammen.

Diese Schritte waren:

- Umstellung von Diesel auf ROR
- Einsatz veränderter Nockenwelle (NW2) ohne interne AGR
- Variation von Spritzbeginn (DB)
- Einsatz des DPF+SCR Kombisystems

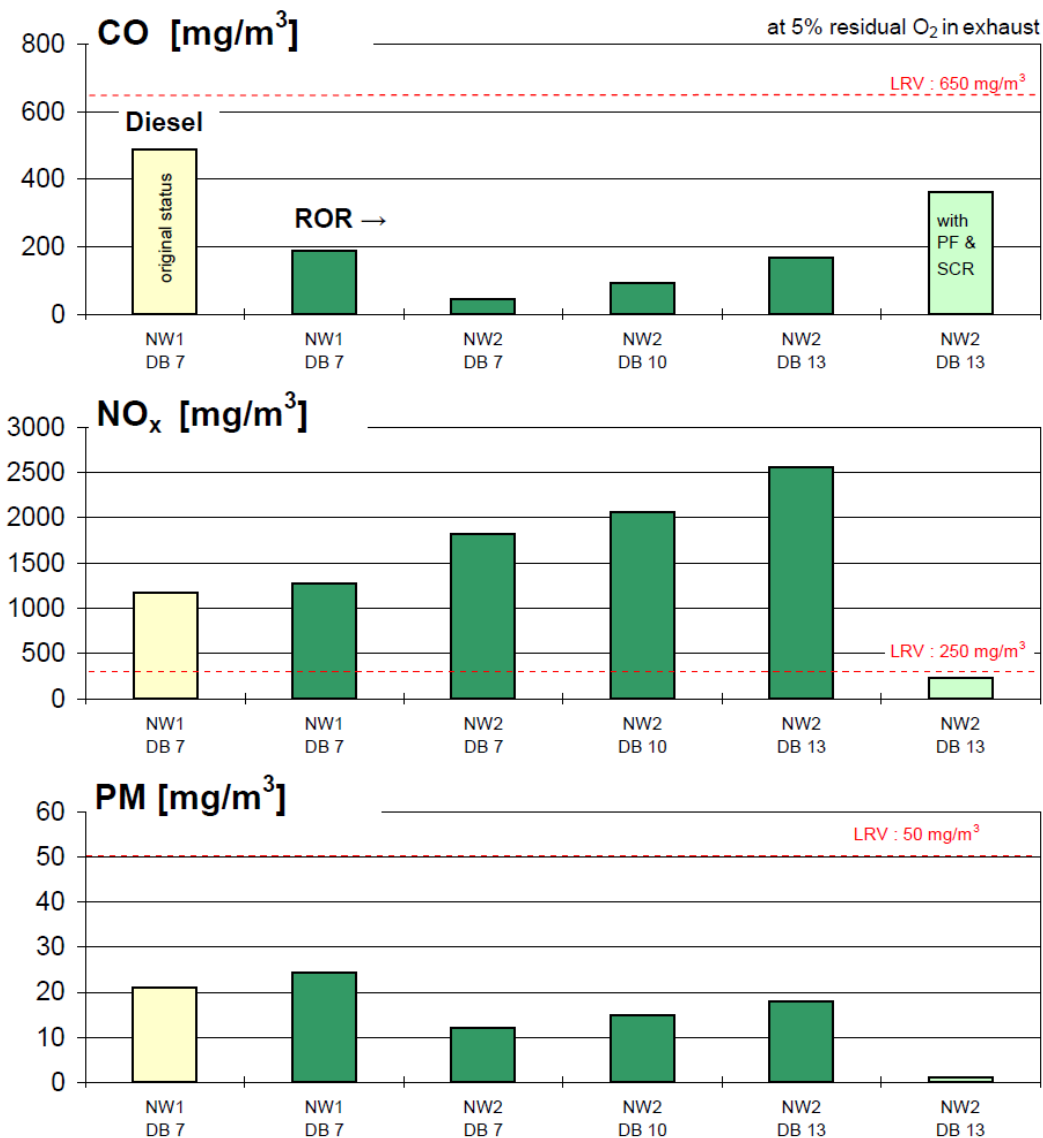


Abbildung 109: Emmissionswerte für ROR bei verschiedenen Nockenwellen (NW1 und NW2), unterschiedlichem Einspritzbeginn (DB 7°, DB 10° und DB 13° KW), sowie ohne und mit Abgasnachbehandlung mit DPF+SCR-System.

Es ist zu sehen, dass die letztere Massnahme (DPF+SCR) die NO_x- und PM-Emissionen drastisch vermindert. Es entsteht jedoch ein Nachteil von erhöhten CO. Der Grund dafür ist einerseits die unvollständige Oxidation der Kohlenwasserstoffe, welche im Abgas parallel zu den deNO_x-Reaktionen abläuft und andererseits die Beeinflussung des Abgasgedruckes durch die DPF+SCR-Anlage.

Dies kann durch entsprechende Anpassungen der Katalysatoren teilweise behoben werden.

Empfehlung der Spritzbeginneinstellung

Die Variationen des Spritzbeginnes fanden bei Volllast statt, da sich dort der Betrieb des BHKW hauptsächlich konzentrieren wird.

Abb. 110 zeigt den Vorschlag, wie sich der Förderbeginn (Ansteuerung des DB) über der Last relativ zu der Originaleinstellung gestalten sollte. Dabei wurde DB zwischen den an der Volllast gemessenen Werten und den bei der Tiefstlast vorliegenden Originalwerten interpoliert.

Wie erwähnt erreicht man damit weniger Ablagerungsrisiko und höhere Wirkungsgrade beim Volllastbetrieb.

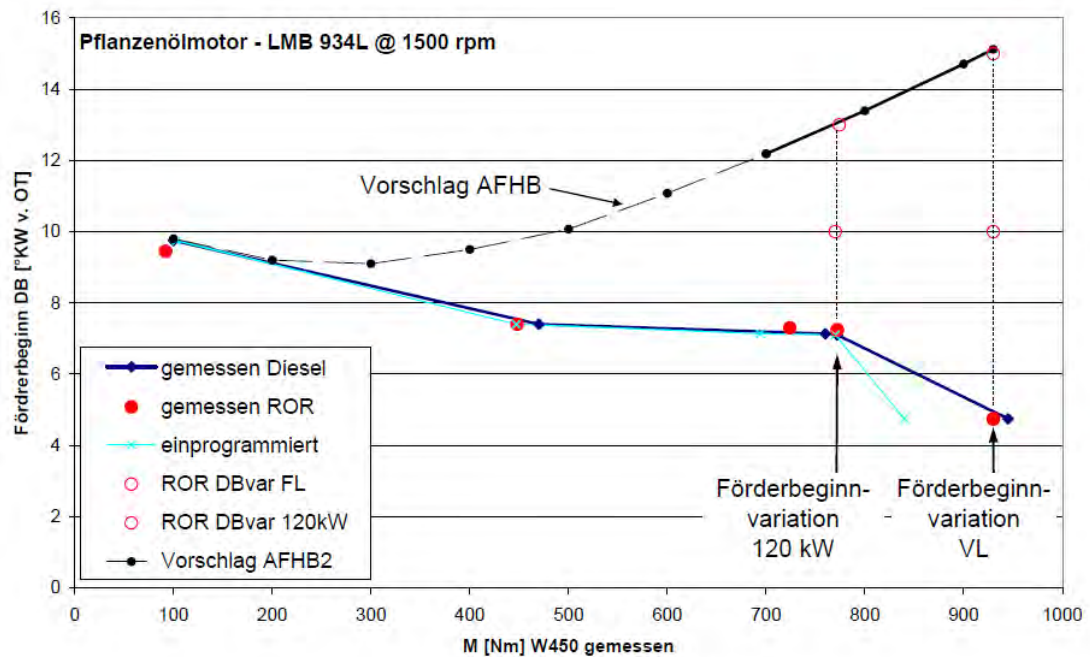


Abbildung 110: Vorschlag zur Anpassung der Spritzbeginncharakteristik.

7 Schlussfolgerungen

Die wichtigsten Schlussfolgerungen zu den untersuchten Themen lassen sich folgendermassen zusammenstellen:

Limitierte Emissionen und Nanopartikel

- ROR ist an diesem Motor für CO, HC, PM und Energieverbrauch vorteilhaft, für NOx dagegen nachteilig.
- Diese Tendenzen können sich bei tieferen Motorlasten umkehren.
- Bei den limitierten Emissionsparametern ist kein Einfluss der Schmierstoffqualität feststellbar.
- ROR verschiebt den Akkumulationsmodus zu kleineren Partikelgrössen und verstärkt den Nukleationsmodus infolge vermehrter Spontankondensate, die im SMPS-Messbereich integrierten Partikelzahlen bleiben annähernd gleich wie für Dieselmotoren.

Coulometrie EC/OC

- Höhere Motorlasten erzeugen generell weniger OC und mehr EC, d.h. „trockeneren Russ“.
- ROR verursacht einen höheren OC Anteil (geringeren EC Anteil), was besonders bei tieferer Motorlast ausgeprägt ist.
- ROR reduziert die gesamte Partikelmasse PM bei Hochlast insbesondere durch Verminderung von EC.

Schmierölanalyse

- Mit Hilfe der Infrarot-Massenspektroskopie konnte nach der Betriebsdauer von ca. 12h der ROR-Eintrag ins Schmieröl von ca. 0.2 Masse-% belegt werden.

Einspritzung und Verbrennung

- ROR verursacht einen kürzeren Einspritzverzug und eine schnellere Nadelhebung (besonders sichtbar bei hohen Einspritzmengen).
- Die maximalen Einspritzdrücke mit ROR sind höher, liegen jedoch im Toleranzbereich der Einspritzanlage.
- Bei Teillast entzündet ROR früher, hat jedoch eine geringere Umsetzungsgeschwindigkeit als Diesel, der Verbrennungsschwerpunkt ($\alpha_{50\%}$) liegt gleich.
- Bei Hochlast liegen die Brennbeginne früher (aufgrund der kürzeren Spritzverzüge), die Brennraten sind etwa gleich und der Verbrennungsschwerpunkt liegt 1-2° KW früher.
- Zusammen mit der Reaktionskinetik des O₂-haltigen ROR ergibt dies höhere NO_x-Werte bei Hochlast.

Startfähigkeit

- Nach der elektrischen Vorheizung des Kraftstoffes und des Kühlwassers (ca. 3 h) mit Hilfe des Biodrive-Nachrüstsystems ist der Start des Motors problemlos.
- Beim Einsatz des Motors in einer besonders kalten oder besonders warmen Umgebung müsste die Vorheizung für den Kaltstart, bzw. die Kraftstoffkühlung, angepasst werden.

Veränderte Nockenwelle, Spritzbeginn

- Die Nockenwelle ohne interne Abgasrückführung mindert CO, PM, NP und den spezifischen Energieverbrauch, die NO_x-Werte steigen.
- Die Vorverlegung des Spritzbeginnes verursacht Nachteile (Erhöhung) von NO_x und PM / NP, welche jedoch mit dem kombinierten Abgasnachbehandlungssystem beseitigt werden können.
- Beide Massnahmen tragen zur Verminderung des Potentials zur Bildung der Ablagerungen im Ansaugtrakt und im Brennraum bei.

Abgasnachbehandlung DPF + SCR

- Das kombinierte Abgasnachbehandlungssystem DPF + SCR mindert sehr effizient die entsprechenden Emissionskomponenten: Abscheidegrade bis 99.9% für Partikel und Konvertierungsraten bis 94% für NO_x. Der dazu benötigte Harnstoff-Verbrauch liegt bei bis zu 1.1 l/h.
- Der NH₃-Schlupf liegt unterhalb von 30ppm und es entstehen keine Sekundärnanopartikel.
- Mit diesem Abgasnachbehandlungssystem werden die LRV-Grenzwerte im Nominalbetrieb eingehalten.

Bemerkungen

Dauerhaftigkeit:

Während der Untersuchungen wurde der Motor (D934L) insgesamt ca. 100 h mit Diesel und 35 h mit ROR abwechselnd betrieben. Die nachträgliche Demontage zeigte keine Ablagerungen in den Brennräumen, ausser den geringen Ablagerungen im ersten indizierten Zylinder (gekühlter Indizieradapter).

Es muss also betont werden, dass die Problemlosigkeit des Langzeitbetriebes mit ROR in dieser Arbeit noch nicht belegt werden konnte und beim praktischen BHKW – Einsatz aufmerksam verfolgt werden muss.

DPF + SCR:

Die Harnstoff-Dosierung geschieht nach Vorgabe (gesteuert) und wird bei zu tiefen Abgastemperaturen stillgelegt. Empfehlenswert wäre eine Überwachung für die Überschreitung des DPF-Gegendruckes und für den Harnstoffmangel.

Obwohl die Aufrechterhaltung der hohen Qualität des verwendeten ROR ein erklärter Schwerpunkt des BHKW-Projektes ist, muss auf die Alterung der Katalysatoren beim Langzeitbetrieb hingewiesen werden.

Literaturverzeichnis

- [1] Particulate traps for heavy duty vehicles. Environmental Documentation No. 130, Swiss Agency for Environment, Forests and Landscape (SAEFL, since Jan. 06 BAFU), Bern 2000
- [2] VERT, Final Report, 29.2.2000, Available from SUVA (Swiss National Accident Insurance Organization) Lucerne, www.suva.ch.
- [3] VERT Filter List, tested and approved particle trap systems for retrofitting Diesel engines, www.umwelt-schweiz.ch
- [4] Mayer, A.; Czerwinski, J.: VERT Particulate Trap Verification. IX. International Conference "R & D of Internal Combustion Engines", Vladimir, Russia, May 27-29,2003 (ISBN 5-86953-048-2) p. 92 (SAE 2002-01-0435).
- [5] Mayer, A.; Czerwinski, J.; Pétermann, J.-L.; Wyser, M.; Legerer, F.: "Reliability of DPF-Systems: Experience with 6000 Applications of the Swiss Retrofit Fleet. SAE Paper 2004-01-0076, TTM, AFHB, BUWAL, AKPF.
- [6] Minimierung der Partikelemissionen von Verbrennungsmotoren. Teil 1: Grundlagen, Wirkungen, Messtechnik und Grenzwerte. München 15. Mai 2006, Veranstaltung Nr. E-H030-05-185-6, Haus der Technik, Essen, www.hdt-essen.de.
- [7] Sessions: Measurement Technics & Health Effects, 9th ETH & 10th ETH Conference on Combustion Generated Particles, Zürich Aug. 15-17. 2005 & Zürich Aug. 21-23. 2006, www.nanoparticles.ethz.ch
- [8] Mayer, A. & 81 coauthors: Elimination of Engine Generated Nanoparticles, Problems and Solutions. Haus der Technik Handbuch, Band 58, Expert Verlag 2005, www.expertverlag.de
- [9] Gewinnung und Reinigung von Pflanzenölen in dezentralen Anlagen – Einflussfaktoren auf die Produktqualität und den Produktionsprozess. Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten, Heft Nr. 51, RB-Nr. 08/94/06, Feb. 1994
- [10] Begleitforschung zu Standardisierung von Rapsöl als Kraftstoff für pflanzenölaugliche Dieselmotoren in Fahrzeugen und BHKW. Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten, Heft Nr. 69, RB-Nr. 08/00/81, Nov. 2000.
- [11] Rapsölkraftstoff in Traktoren und Blockheizkraftwerken. Tagungsband zum Internationalen Expertenforum, 25-26. Feb. 2002, Straubing, D.; Shaker Verlag Aachen ISBN 3-8322-1194-2.
- [12] Hemmerlein, N.; Korte, V.; Richter, H.; Schröder, G.: Performance, Exhaust Emissions and Durability of Modern Diesel Engines Running on Rapeseed Oil. SAE Techn. Paper 910848, Detroit Feb. 1991.
- [13] Maurer, K.: Motorprüflauf mit Rapsöl – Diesel – Mischungen. Universität Hohenheim, Landesanstalt für Landwirtschaftliches Maschinen- und Bauwesen (740), D-70593 Stuttgart FNR 22026800, Sept. 2003
- [14] <http://www.biodiesel.de>
- [15] Czerwinski, J.: Performance of HD-DI-Diesel Engine with Addition of Ethanol and Rapeseed Oil. SAE Techn. Paper 940545, Detroit, Feb. 1994.
- [16] Bialkowski, M.T.; Pekdemir, T.; Reuben, R.; Brautsch, M.; Towers, D.P.; Elsbett, G.: Preliminary Approach Towards a CDI System Modification Operating on Neat Rapeseed Oil. Journal of KONES International Combustion Engines 2005, vol. 12, p. 31
- [17] Czerwinski, J.; Zimmerli, Y.; Neubert, T.; Kasper, M.; Mosimann, Th.: Analysis of (Nano) Particles with GTL, ME & ROR on a Modern HD-Diesel Engine. Final report for the Swiss Petrol Union, Laboratories for IC-Engines & Exhaust Emission Control (AFHB), Univ. of Appl. Sciences, Biel, CH, B181, July 2006.

(3) Blockheizkraftwerk

Martin Meyer

Schweiz. Hochschule für Landwirtschaft, Zollikofen

Zusammenfassung

Das Herz des BHKW ist der 4-Zylinder Dieselmotor von Liebherr aus der neu entwickelten 930er Serie. In einem 24-tägigen Dauerlauf im Oktober 2008 und der anschliessenden Heizperiode Anfang Jahr 2009 haben sich die hohen Erwartungen an seine Pflanzenöлтаuglichkeit bestätigt. Die Gesamteinheit des kompletten BHKW als saubere Containerlösung stammt von Projektpartner Senergie, D-Heitersheim und die Abgasaufbereitung von Hug Engineering, Elsau.

Mit 39% elektrischem Anlagenwirkungsgrad konnte die Mindestzielgrösse von 37% bereits vor den noch möglichen Optimierungsschritten überboten werden.

Ölmühle und BHKW geniessen national und international den Ruf besonders gut gelungener Referenzanlagen.

Résumé

Le cœur de la centrale de cogénération est le moteur diesel à quatre cylindres de Liebherr de la nouvelle série 930. Son utilisation continue pendant 24 jours en octobre 2008 et la saison de chauffage 2009 ont confirmé son aptitude à fonctionner avec des huiles végétales. Le conteneur, unité globale de la centrale, a été fourni par notre partenaire allemand Senergie à Heitersheim et le système de traitement des gaz d'échappement par Hug Engineering à Elsau.

Avant que les dernières optimisations aient été réalisées, l'installation atteignait un rendement électrique de 39%, dépassant ainsi l'objectif original de 37%.

Le moulin à huile et la centrale de cogénération jouissent d'une renommée nationale et internationale comme installations de référence particulièrement bien réussies.

Summary

The heart of the BHKW is a 4-cylinder diesel engine from the newly developed 930s series manufactured by Liebherr. The high expectations for its suitability for running with plant oil were met in a 24-day non-stop operation in October 2008 and in the subsequent heating period at the beginning of 2009. The totality of the complete BHKW as a container-solution originated from project partner SENERGIE, D-Heitersheim. The exhaust treatment originated from Hug Engineering, Elsau.

With 39% electric efficiency, the lowest target of 37% was surpassed, even before undertaking possible optimization steps.

Oil mill and BHKW are acknowledged in Switzerland and abroad as particularly successful reference facilities.

1 Das Pflanzenöl-Blockheizkraftwerk

Unsere 2005 realisierten Vorabklärungen zum Projekt ergaben eine deutlich erkennbare Marktlücke von Pflanzenöl-BHKW im Bereich 50 bis 500 kW. Mit der Darstellung einer Anlage der 110 kW-Klasse wollten wir dieses für den dezentralen, ländlichen Sektor interessante Segment erschliessen und eine lokale Erfahrungsreferenz für die stationäre Gewinnung von Strom und Wärme aus dem erneuerbaren und CO₂-entlastenden Energieträger Pflanzenöl verfügbar machen. Die aufwendige Ausführung der Anlage als Containerlösung soll einen eventuellen späteren Transport ermöglichen (Abb. 111).



Abbildung 111: Das Pflanzenöl-BHKW im 20-Fuss ISO-Container in Suberg, mit Notkühlaggregaten und Rapsölkraftstoffkühler auf dem Dach.

Die Hauptelemente des Pflanzenöl-BHKW in Suberg sind:

- Der 4-Zylinder-Liebherrmotor in der Langhub-Version, mit Stahlkolben (Abb. 112 u. 114).
- Der 3-Phasen Stamford Synchrongenerator, horizontalachsig, 400 V, mit 175 kVA Nennleistung, Rückleistungsschutz, automatischen Phasen für Warmlauf nach Start

und Abkühlung nach Normalabstellung, sowie der BHKW-Peripherie zu Wärmekraftkoppelung, Steuerung und Notkühlung von Senergie GmbH (Abb. 112).

- Die Abgasaufbereitung mit Dieselpartikelfilter und SCR-Denox-Anlage für Harnstofflösung 40% von Hug (Abb. 113, 118 und 119).

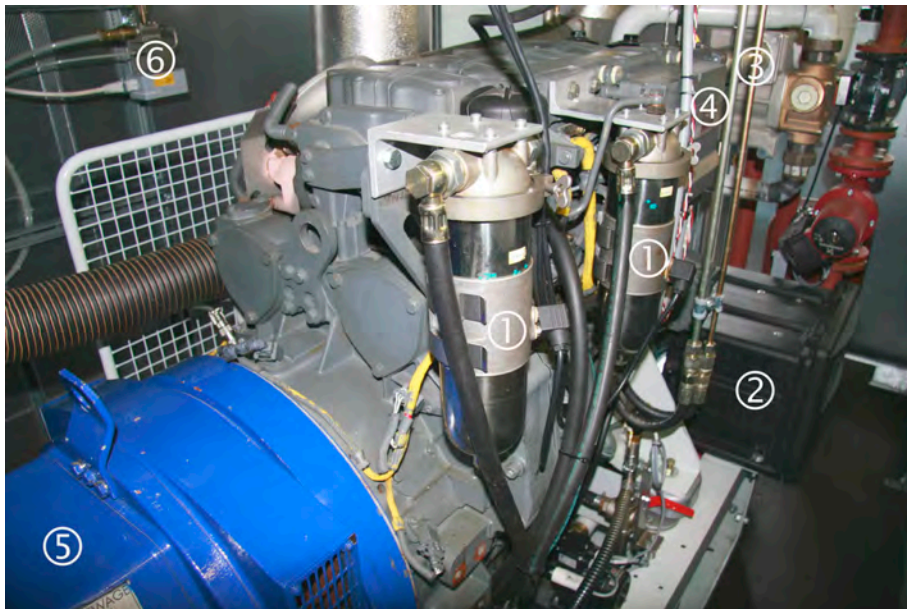


Abbildung 112: Liebherr Motor D 934 L, mit Kraftstoffvorwärmung über beheizte Filter 1 und Kühlwasserwärmetauscher 2; Kraftstoffkühlung im Rücklauf 3; kraftstoffgekühltem Steuergerät 4; Generator 5 und Harnstoffinjektor der Denox-Anlage 6.

Mit Liebherr hatten wir den motorseitigen Wunschpartner gewinnen können und der Vierzylinder aus der neuentwickelten 930er Serie erfüllte den Anspruch einer bereits vorhandenen, hohen Pflanzenöлтаuglichkeit und geringen Umrüstansprüchen geradezu ideal: Robustes PLD-Einspritzsystem, zentral und senkrecht über dem Brennraum angeordnete Einspritzdüse, hoher Einspritzdruck, grosse Bohrung, robuste und wärmeerhaltende Stahlkolben.

Selbst als „Kleinster“ seiner Baureihe erzeugt der Motor eine thermische Leistung, die von der Lohnunternehmer-Halle und dem Restaurant „Seeland Beizli“ nicht voll ausgelastet werden können. Bei wärmegeführtem BHKW-Betrieb sind deshalb zyklische Phasen mit Wärmebezug ab Speicher ohne laufenden Motor nötig.

Unser BHKW verzichtet auf die aufwendige Nutzung von Abstrahlungsenergie und ist auf den in dieser Ausführung üblichen Gesamtwirkungsgrad von 89% ausgelegt. Bei Generatorbedingungen (110 kW el., 1'500 min⁻¹) liegt der mittlere Verbrauch an Rapsölkraftstoff (RK) sowohl im Prüfstands-, als auch im Praxisbetrieb bei 26.60 kg/h, bzw. rund 231 g/kWh spezifisch. RK enthält 37.5 MJ/kg. 26.60 kg/h entsprechen einem Primärenergieeinsatz von 997 MJ/h und einer Gesamtleistung (mechanisch und thermisch) von 277 kW.

Es ergibt sich folgende gerundete Bilanz: 110 kW oder 39.7% wandelt der Generator in elektrische Leistung und gut 136 kW oder 49.3% fallen als nutzbare thermische Leistung an. 31 kW oder 11% sind thermisch nicht genutzte Leistung. Der Generator arbeitet im günstigen Auslastungsbereich von 63% seiner Nennleistung und erreicht 95.5% Wirkungsgrad. Zur Abgabe von 110 kW elektrischer sind demnach am generatorantreibenden Motorschwungrad 115 kW mechanische Leistung erforderlich, 5 kW gehen als Reibungswärme verloren. Nach Abzug dieser 115 kW mechanischer Antriebsleistung für den Generator bleiben 162 kW „anzapfbare“ thermische Leistung. Davon sind 136 kW aus Abgasen, Kühlwasser, Ladeluft- und Motorölkühlung über Wärmetauscher an den Wärmeverbund von Projektpartner Peter Stähli übertragbar. Das BHKW speist einen 3'570 Li-

ter Pufferspeicher, der von Josef Jenni, Oberburg gesponsert wurde. Ab Speicher erfolgt die Wärmeversorgung der Werkstattbereiche von Peter Stähli und Ueli Brauen in der rund 7'000 m³ umfassenden Lohnunternehmerhalle über 5 Heizlüfter und des „Seeland Beizli“ über Zentralheizung. Die verbleibenden knapp 31 kW werden als Restenergie mit den Abgasen, sowie als Motor- und Komponentenabstrahlung via Containerentlüftung abgeführt. Zwei Notkühlaggregate auf dem Containerdach stellen die Abgabe der nicht genutzten Wärme sicher (Abb. 111).

Während des Dauerlaufes von 559 h im Oktober 2008 wurden 16'740 Liter RK in 60'756 kWh_{el} – das sind 3.63 kWh_{el}/Liter RK – umgesetzt. Die Dichte von RK bei den gewünschten 70° C Einspritztemperatur wurde mit 0.89 kg/dm³ gemessen. Daraus ergibt sich eine Energiedichte bei Einspritzbedingungen von 37.5 MJ/kg x 0.89 kg/dm³ = 33.4 MJ/dm³, oder knapp 9.3 kWh/l. Mit 3.63 kWh_{el}/l RK lagen wir bei 39% elektrischem Anlagenwirkungsgrad, d.h. leicht unter den oben erwähnten 39.7%. Hauptursachen für diese kleine Abweichung dürften die nicht geeichte Verbrauchsmessung und die geringere Ladeluftkühlung im Betrieb sein, die in Suberg vorläufig noch mit dem Motorkühlwasser (ca. 84° C) erfolgt, während auf dem Prüfstand ein separat gekühlter Wasserkreis mit ca. 40° C verfügbar war.

Ursprünglich hatten wir auch die Stromversorgung als Insellösung für die Eigenversorgung des Betriebes Stähli geplant. Mit der Annahme des Stromversorgungsgesetzes und der kostendeckenden und damit höheren Einspeisevergütung für erneuerbare Energien (KEV), erwies sich dies jedoch als nicht sinnvoll. Der auf rein biogener Basis gewonnene Strom aus unserem BHKW erfüllt die Bedingungen für die erhöhte Einspeisevergütung (gegenwärtig 39 Rp./kWh).

Die Energie Seeland AG als stromabnehmender Partner verlangte indessen die klare Trennung von Netzeinspeisung und Netzbezug über separate Leitungen und separate Zähler. In unserem Fall bedeutete dies das Verlegen einer Speiseleitung (4 x 95 mm²) vom BHKW zur 75 m entfernten Transformatorstation, die mit der alten Landi ebenfalls an Peter Stähli übergang und von dieser eine 90 m lange Bezugsleitung (4 x 50 mm²) zum gebäudeseitigen Anschlussverteiler zurück.

Der Strom muss also ab BHKW zuerst über die gezahlte Netzeinspeisung fließen und erst von dort kann der Bezug zum entsprechenden Tarif erfolgen. Der Aufwand für diese zusätzlichen Elektroinstallationen für Einspeisung, Bezug und Messung belief sich auf rund CHF 10'000.--, exklusive Erdarbeiten, Verteilschächte und Kabelschutzrohre.



Abbildung 113: Blick auf Tagestank 1; Zusatzförderpumpe für Pflanzenöl 2; Partikelfilter 3; SCR-Katalysator 4 und Harnstoffinjektion vor Mischstrecke 5.

2 Die Pflanzenöleignung des Motors bestätigt sich

Im Vergleich zu Fahrzeugmotoren müssen BHKW-Aggregate - selbst bei hauptsächlich Winternutzung - für wesentlich höhere Jahreslaufleistungen und Dauerbetrieb ausgelegt sein. Ludwig Elsbett, der geniale Pionier der dieselmotorischen Pflanzenölnutzung, hat bereits in den 1970er Jahren sorgfältiges Vermeiden von Wandanspritzung und Erhaltung der relativen Wärmedichtheit des Brennraumes als Grundgesetze der Pflanzenölverbrennung definiert. Verständlich deshalb der Wunsch nach möglichst grossen Zylindereinheiten, gleichen Wandabständen aller Einspritzlöcher, maximalen Einspritzdrücken und den wärmeerhaltenden und robusteren Stahlkolben, wie sie mit dem Konzept des Liebherrmotors D 934 L verwirklicht wurden. Aus den Abb. 114 ist ersichtlich, dass das Konzept dieses Dieselmotors den Idealvorstellungen für Pflanzenöлтаuglichkeit sehr nahe kommt.

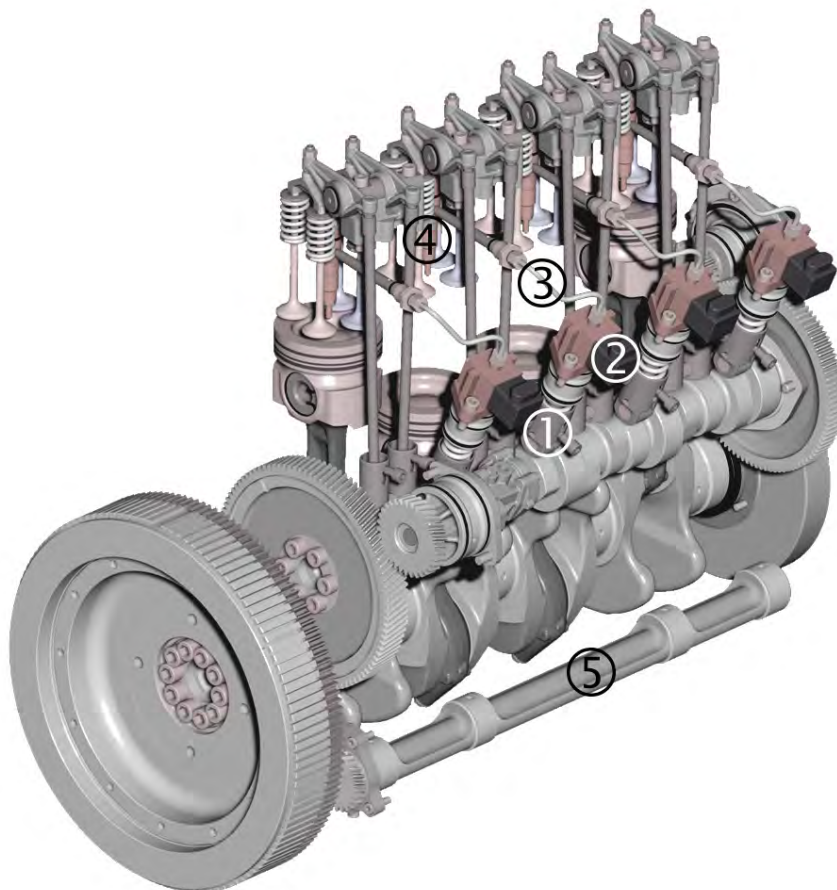


Abbildung 114: Schema des D 934 L, mit Kurbeltrieb, Ventiltrieb und PLD-Einspritzanlage. Legende: Pumpenelement 1; Magnetventil 2; Hochdruckleitung 3 und Einspritzdüse 4. Position 5 zeigt eine der beiden Ausgleichswellen.

Wie geschaffen für den störungsfreien Pflanzenöleinsatz sind namentlich das Vierventilkonzept mit Einzelzylinderköpfen, eine mit dem höherviskosen Alternativkraftstoff kompatible, „steife“ PLD-Einspritzanlage, die Vorwärmung des alternativen Kraftstoffes durch seine Führung im Motorblock und die vertikalzentrale Hochdruckeinspritzung, mit typischen Einspritzdrücken von 1'265 bar bei Generatorbedingungen (732 Nm, 1'500 min⁻¹, 115 kW_{mech}). Vor einem Kaltstart zirkuliert der Rapsölkraftstoff während einer frei programmierbaren Zeitdauer im Niederdruckkreis über die beiden beheizbaren Filter (Abb. 112).

Nach dem Start stellen die Filterheizungen automatisch ab, weil nun der Kühlwasser-Kraftstoff-Wärmetauscher und die starke Erwärmung des Kraftstoffes aus Niederdruckkreis und Rücklauf wirksam werden. Diese „Selbsterwärmung“ auf ca. 65° C bei Generatorbetrieb ist nicht nur völlig ausreichend für die Konditionierung des RK, sondern erfordert im Dauerbetrieb eine zusätzliche Kühlung des Rücklaufes vor dem Tagestank, weil sich sonst die Kraftstofftemperatur über diesen wirksamen Wärmespeicher derart aufschaukelt, dass sie an den Einspritzdüsen 75° C übersteigt und entsprechende Fehlermeldungen an die Motorsteuerung auslöst, welche dann das Notprogramm aktiviert.

Der Kraftstoffkühler auf dem Containerdach wird erst nach der Warmlaufphase zugeschaltet. Den Kühlwasser-Kraftstoff-Wärmetauscher werden wir bei diesem Motor zukünftig weglassen. Über die serielle Schnittstelle RS 232 des Motorsteuergerätes und die Kundensoftware Sculi von Liebherr haben wir die Möglichkeit, Kraftstofftemperatur und sämtliche wichtigen Motorparameter in Echtzeit zu überwachen. Ziel ist das möglichst rasche Erreichen und konstant halten von 70° C des RK. Damit senken wir die Viskosität, verbessern die Brennumdrehdringung des Kraftstoffstrahls in der Warmlaufphase und gewährleisten eine Dieselölähnliche Spraybildung im Dauerbetrieb. Wunschzustand ist

stets der Übergang des Treibstoffes in die Verbrennung, bevor es zu Wandanlagerungen kommt.

Weil die Einspeisevergütung nach KEV nur für biogene Energieträger gilt, betreiben wir unseren Motor ausschliesslich mit Pflanzenöl. Gerne möchten wir unsere beiden Anlagen möglichst mit heimischem Raps auslasten. Leider wird die Etablierung dieses krisensicheren Versorgungsbeitrages durch widersprüchliches Verhinderungspotential und die hohen Schweizerpreise stark gefährdet. Eine nachhaltige Störung der noch 2006 mit dem Prix Evenir ausgezeichneten Aufbauarbeit zur Erschliessung dezentraler Nischenenergie ging vom Papier „Ökologische Bewertung von Biotreibstoffen“ der EMPA St. Gallen aus. Der lediglich selektive Beizug der agrarökologischen Experten der Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon ART und ihrer Datenbank (SALCA), die Ausklammerung der transportgebundenen, ökotoxikologischen Langzeitbelastungen der Erdölprodukte von Quelle zu Raffinerie (siehe Literatur), aber eine akribische Erfassung sämtlicher Negativparameter bei den landwirtschaftlichen Energieträgern, führte zu einer eigentlichen Verunglimpfung des einheimischen Rapsanbaus im Vergleich zur endlichen Referenz „Benzin schwefelarm“. Wir empfindet es als bedenklich, dass anlässlich der Expertenrunde vom 13.08.07 beim Bafu grundsätzliche agronomische Mängel bei der Bewertung des Rapsanbaus in der Schweiz definiert wurden, das Bafu eine von ihm getragene Nachbearbeitung wünschte, eine für die Kaltpresser ersichtliche Korrektur durch die EMPA St. Gallen indessen bisher ausgeblieben ist.

Weil wir für die Ernte 2008 die im Vorjahr vertraglich vereinbarten CHF 100.-/dt bezahlten, resultierten hohe Rapsölgestehungskosten von CHF 1.80/l, was keinen rentablen Einsatz des BHKW alleine für die Stromproduktion erlaubte. Dies führte zusammen mit der Überkapazität bei der Wärmeleistung im Winter 2008/2009 zu einem wärmegeführten Betrieb mit häufigen Kaltstarts. Trotz diesen eigentlich ungünstigen Bedingungen für einen RK-Betrieb, kann das BHKW mittlerweile rund 700 völlig störungsfreie Betriebsstunden ausweisen. Dies ist nicht zuletzt der Bereitschaft des Motorenpartners zuzuschreiben, wichtige Veränderungen zugunsten des Pflanzenölbetriebes umzusetzen.

Die erforderlichen Grundlagen dazu wurden in umfassenden Prüfstandsversuchen und Simulationen der Einspritz- und Verbrennungsabläufe mit Diesel- und Rapsölkraftstoff von der Abgasprüfstelle der Berner Fachhochschule Technik und Informatik TI Biel und dem Institut für Energietechnik der ETHZ erarbeitet (Czerwinski et al. 2007). Die beiden Haupteingriffe waren die Vorverlegung des Förderbeginns von 7° auf 13° vor OT bei Generatorbedingungen und die Elimination der internen Abgasrückführung mit einer umgebauten Nockenwelle. Alle diese Massnahmen zielen auf eine möglichst heisse, rückstandsfreie Verbrennung, mit hohem thermodynamischem Wirkungsgrad ab. Die Reduktion der damit verbundenen höheren NO_x-Emissionen wird mit der Denox-Anlage mit SCR-Katalysator von Hug Engineering gewährleistet.

Auf Wunsch der Erdöl Vereinigung stellten wir den Projektmotor für ein zusätzliches, sechsmonatiges Messprogramm mit sieben Kraftstoffen (Dieselöl, Gas To Liquid, Rapsmethylester, Rapsölkraftstoff und deren Mischungen mit jeweils 10% Dieselöl) zur Verfügung, von dessen Resultaten ebenfalls das Projekt profitierte. In diesen sehr breit angelegten Versuchen, mit einem Schwerpunkt „Nanopartikel-Analytik“, hat Rapsölkraftstoff bei Generatorbedingungen durchwegs sehr gut, oder mit Bestwerten abgeschlossen. Davon ausgenommen sind die NO_x – obwohl unerwünscht, die eigentliche „Referenz für die Güte der Kraftstoffumsetzung“ - die wir in der Denox-Anlage zu Stickstoff und Wasser konvertieren und ihre Absenkung nicht - wie im Fahrzeugmotor - mit einer Verschlechterung der Verbrennungsbedingungen erzwingen müssen.

Die Hauptkenntnisse im Pflanzenölbetrieb, im Vergleich zum Dieselmotor, lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Leistung, effektiver Wirkungsgrad und spezifischer Verbrauch: Vorteile bei belastetem Motor
- Partikelmasse: massive Vorteile bei belastetem Motor
- Einspritzdrücke: höher. Einspritzverzögerung: tiefer

- Zündverzug: leicht grösser (tiefere Cetanzahl, aber Kompensation durch O₂-Anteil in RK)
- Verbrennungstemperatur: höher. Brenndauer: kürzer
- Vorverlegung des Förderbeginns erhöht Verbrennungstemperatur und NO_x, verbessert aber alle anderen Parameter bei Generatorbedingungen.

Der Energiegehalt von Rapsölkraftstoff liegt dank seiner höheren Dichte lediglich 3 bis 4 % hinter demjenigen von Dieselmotorkraftstoff zurück. Ansonsten unterscheiden sich diese beiden Energieträger beträchtlich (Tab. 18).

Tabelle 18: Die charakteristischen Eigenschaften von Diesel- und Rapsölkraftstoff (RK).

	Dieselöl	RK
Dichte (bei 15°C) [kg/m³]	830	920
Kinematische Viskosität (bei 40°C) [mm²/s]	2.5	35
Spez. Heizwert [MJ/kg]	43	37.5
Cetanzahl [-]	51	43
Isothermer Verdichtungskoeffizient [1/GPa]	0.625	0.52
Referenztreibstoff (für 3D-Simulat. der Verbrenn.)	C ₁₂ H ₂₆	C ₁₈ H ₃₄ O ₂

Die Brennraumsimulationen zeigten, dass die lokale Kraftstoffkonzentration bei RK kurz nach OT an der Sprayspitze leicht höher ist und verdampfter RK infolge des grösseren Impulses seiner grösseren und schwereren Tröpfchen tiefer in den Brennraum penetriert als Dieselöl. Gegen Ende der Expansion wurde zudem im Rapsölbetrieb ein merklich höherer Restanteil nicht verdampfter Tropfen ausgewiesen als im Dieselmotorbetrieb. Kleinste Anteile dieser Fraktion gelangen bei jedem Arbeitsspiel über die Zylinderwand in das Motorenöl und führen hier zu einer langsamen Anreicherung, weil RK mit seinem hohen Siedepunkt von über 240° C nicht wieder verdampft, wie das bei Dieselöl der Fall ist.

Aus den Untersuchungen des Technologie- und Förderzentrums für Nachwachsende Rohstoffe TFZ im bayerischen Straubing ist bekannt, dass Pflanzenölkraftstoffe mit niedrigen Sättigungsgraden, bzw. hohen Jodzahlen und vielen Doppelbindungen das Motorenöl stärker belasten als solche mit hohem Sättigungsgrad und niedrigen Werten für Doppelbindungen bzw. Jodzahlen (Widmann und Remmele 2008). Entsprechend schneidet Palmöl mit einer Jodzahl (JZ) von 56 am günstigsten ab, gefolgt von Erdnussöl (JZ 100), Sesamöl (JZ 110), Rapsöl (JZ 115) und den ungünstigeren Soja- und Sonnenblumenölen, (JZ > 130). Die Bedeutung des Einsatzes von RK mit definierter und gleich bleibender Qualität, wie sie nun in der DIN V 51605 festgelegt ist, kann auch aus dieser Sicht nicht genug betont werden. Als sicherer Grenzwert gelten 10 bis 12% Pflanzenölanteil im Motorenöl. Den genannten Gefahren von Motorölverdünnung und Polymerisation begegnet die erfahrene SEnergie beim BHKW mit einem zusätzlichen Motoröltank in der Aggregatewanne. Eine eigene Elektropumpe fördert daraus geringe Mengen zusätzliches Motorenöl zum stirnseitigen Steuerrädertrieb, das dort in die Druckumlaufschmierung eingeht. Eine Siphonierung von der Ölwanne zurück zum Zusatztank regelt den korrekten Ölstand. Auf diese Weise wird die Motorölmenge von 30 Litern um weitere 80 Liter aus dem Zusatztank auf insgesamt 110 Liter erhöht (Abb. 115).

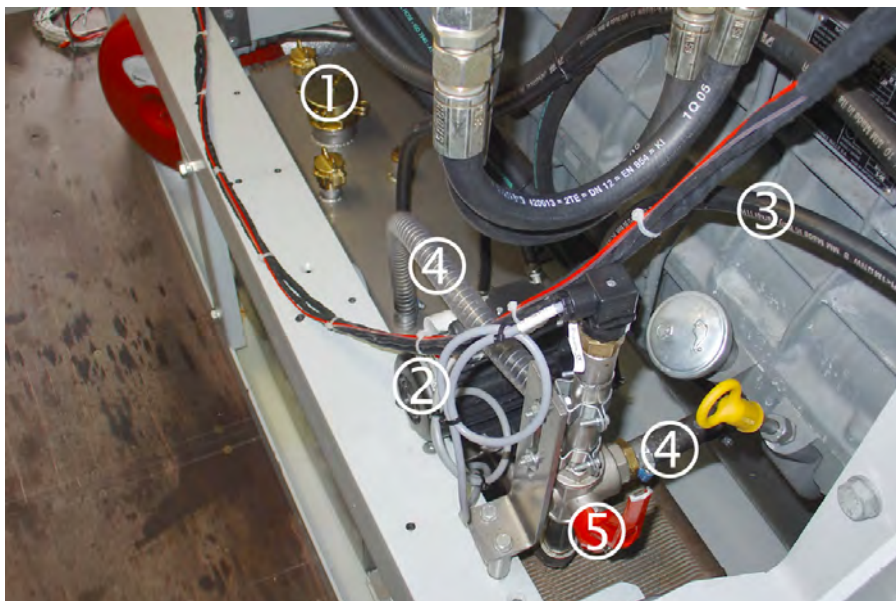


Abbildung 115: Zusätzlicher 80 l Motoröltank 1; mit Elektropumpe 2; Vorlauf 3; niveaueingeregelter Rücklauf 4 und Dreihahn für Ölwechsel 5.

Die Wirksamkeit dieser Massnahme hat sich klar erwiesen: Nach einem Dauerlauf von 416 Betriebsstunden erreichte der Pflanzenölanteil im Schmieröl lediglich 2.1%. Beim genannten Betriebsregime dürfen demnach Motorölstandzeiten von deutlich über 1'000 h erwartet werden – bei 110 Litern pro Wechsel wirtschaftlich relevant. Eine zunehmende Kaltstartfrequenz wirkt vermutlich intervallverkürzend.

3 Das Pflanzenöl-BHKW erfüllt die Luftreinhalteverordnung (LRV)

Die beim Dieselmotor hauptsächlich interessierenden Emissionskomponenten sind die NO_x (Stickstoffmonoxid NO und Stickstoffdioxid NO_2) sowie die Partikelmasse. Für unser Pflanzenöl-BHKW in der Leistungsklasse 110 kW gelten die Grenzwerte 250 mg/m^3 für NO_x und 50 mg/m^3 für die Partikelmasse. Abb. 116 zeigt die Emissionsanteile an NO_x und Partikelmasse sowie den effektiven Wirkungsgrad, für die 4 Kraftstoffe Dieselöl, GTL (Gas To Liquid), Rapsmethylester und Rapsöl, (hier ROR genannt). Im für uns relevanten Generatorbetrieb ($1'500 \text{ min}^{-1}$, knapp 80% Last), emittiert Rapsöl am meisten NO_x , erreicht aber bei den übrigen Positionen Bestwerte. Abb. 117 dokumentiert die hohe Umwandlungsrate der SCR Anlage von Hug.

Bei Generatorbedingungen veranlasst der von 7° auf 13° vorverlegte Förderbeginn einen NO_x -Anstieg von $1'765$ auf $2'130 \text{ mg/Nm}^3$. Mit 1.1 l/h Harnstofflösung 40% und einer Konvertierungsrate von über 90% wird der LRV-Grenzwert mit solider Reserve eingehalten. In Abb. 118 sind Harnstoffdosierung und -eindüsung abgebildet und Abb. 119 zeigt den $1'000$ Liter Tank mit der Harnstofflösung, den Jenni-Heizungsspeicher mit $3'570 \text{ l}$ Inhalt und das Expansionsgefäß. Diese Komponenten sind auf dem Podest des an das BHKW angrenzenden Hallenabschnittes aufgebaut.

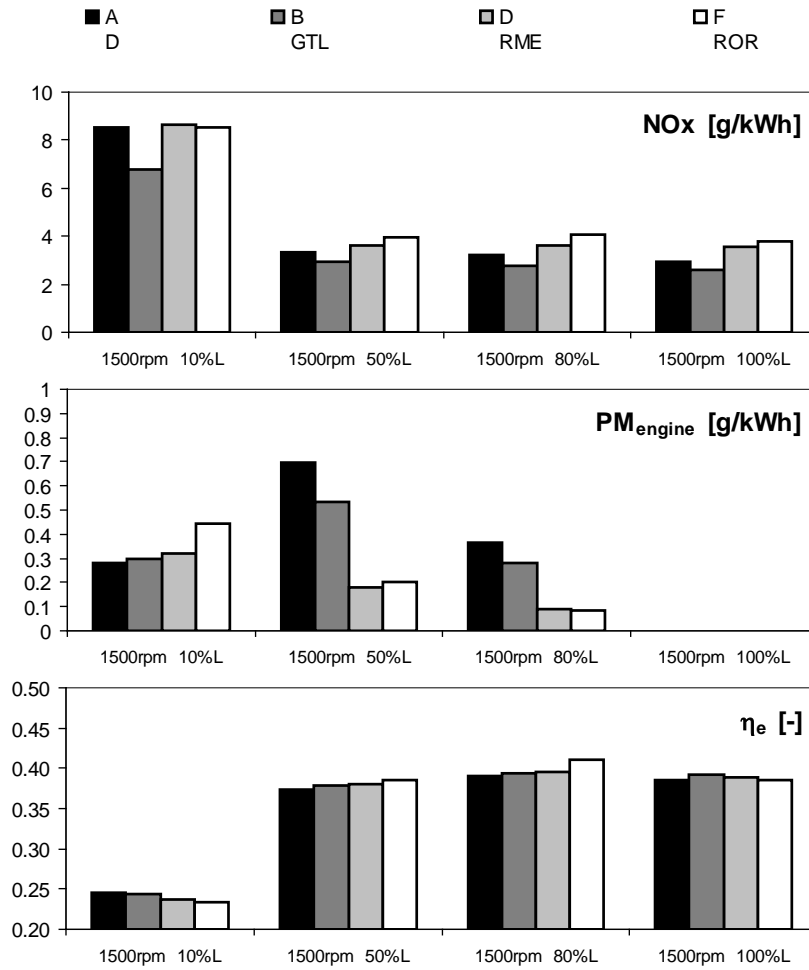


Abbildung 116: Vergleich von NO_x, PM und eff. Wirkungsgrad für 4 verschiedene Kraftstoffe und 4 Lastpunkte.

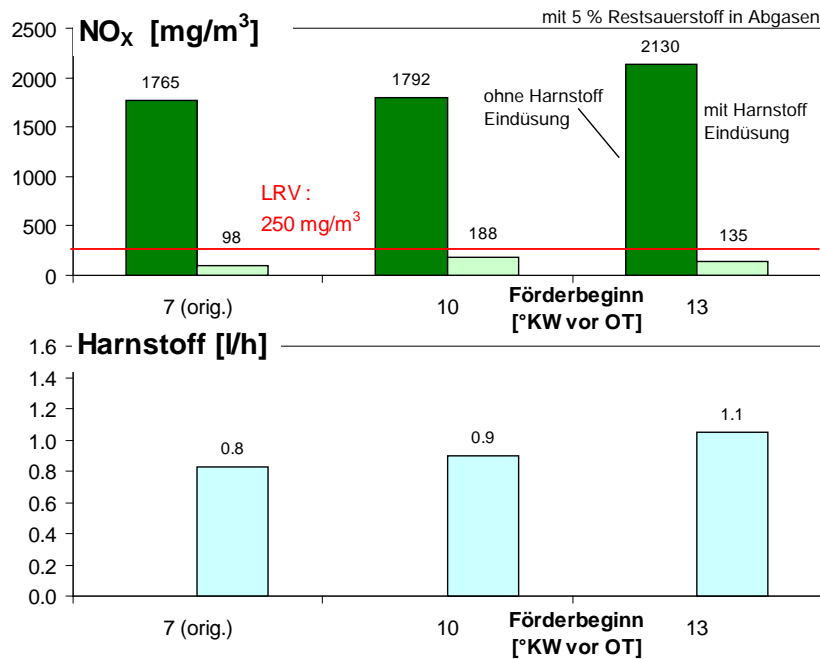


Abbildung 117: Aufwand und Ertrag bei der NO_x-Umwandlung.

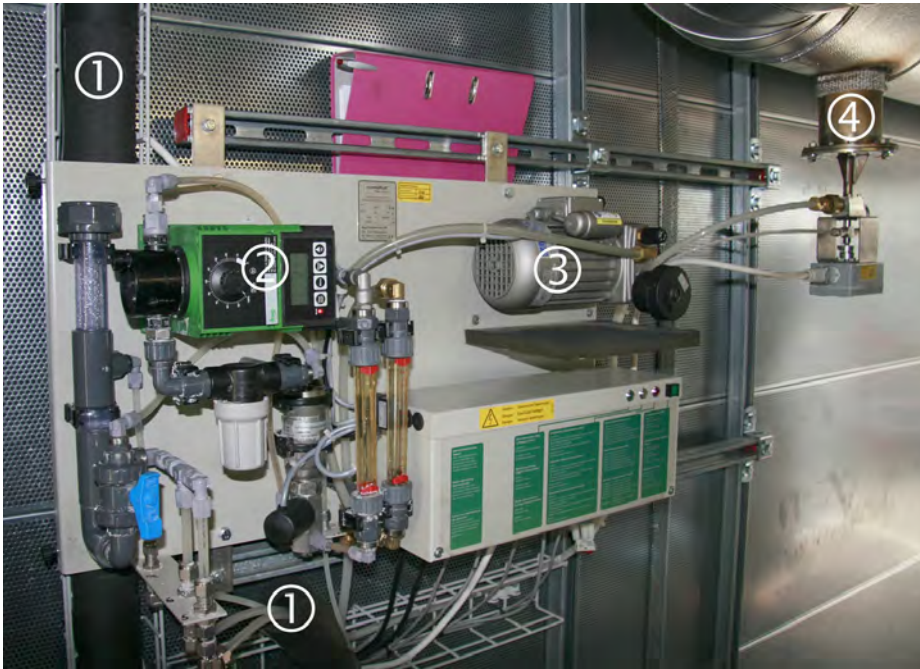


Abbildung 118: Harnstoffdosierung und -eindüsung, mit den isolierten und beheizten Speise- und Rücklaufleitungen 1; Harnstoffpumpe 2; Luftpumpe 3 und Harnstoffinjektor 4.



Abbildung 119: Harnstofftank (links), Jenni-Heizungsspeicher (rechts) und Expansionsgefäß (mitte).

4 Fazit

Das erfolgreich abgeschlossene Projekt vereinte Knowhow aus allen erforderlichen Fachbereichen. BHKW und Ölmühle sind Referenzanlagen, welche exemplarisch und mit modernster Technologie aufzeigen, wie man eine nachhaltige lokale Energiegewinnung unter Einhaltung sämtlicher Vorschriften realisieren kann.

Das technisch und finanziell erfolgreich abgeschlossene Projekt vereinte beste, sich ergänzende Erfahrungen aus allen erforderlichen Sektoren. Die Projektwerte sind Ausdruck eines aussergewöhnlichen Engagements aller Förder- und der Industriepartner, die ihre zugesagten Leistungen um mehr als CHF 440'000.-- aufgestockt haben und die dem Projekt weiterhin verbunden bleiben. Das Beispiel ist als Referenz geeignet - und wird als solche auch genutzt - für den autarken Nischenbeitrag an Energie- und Nahrungssouveränität aus der Region.

Literaturverzeichnis

Czerwinski J., Zimmerli Y., Neubert T. & Meyer M., 2007. Untersuchung des Betriebes eines Baumaschinenmotors Liebherr D 934 L für den Einsatz im Blockheizkraftwerk mit Rapsöl. Laboratory for Exhaust Emission Control of the University of Applied Sciences, Biel-Bienne, report B201, Apr. /June.

Widmann B. & Remmele E., 2008. Biokraftstoffe - Fragen und Antworten. Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe, Straubing (D), 16 S.

Zah R., 2007. Ökologische Bewertung von Biotreibstoffen. Empa, Abt. Technologie und Gesellschaft, St. Gallen.

Pozo-Rodríguez F., 2007. Prolonged Respiratory Symptoms in Clean-up Workers of the Prestige Oil Spill. Department of Respiratory Medicine and Clinical Epidemiology Unit, University Hospital 12 de Octubre, Madrid, Spain; American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine Vol. 176 (2007) pp. 610-616.

Schmidt Ch. 2007. Helfer leiden noch heute. NZZ am Sonntag vom 18.11.2007, S. 78.



FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

ARAMIS SBT

Formular Nr. 3: Projektabschluss

erstellt / geändert am: Februar 2010

Grunddaten

Projekt-Nr.: IDS/DIRR-Nr. 15 / ASTRA 2006/004

Projekttitel: Entwicklung eines Pflanzenöl-Blockheizkraftwerks im unteren Leistungsbereich mit eigener Ölmühle

Enddatum: Ende 2008

Projektleiter

Name: Meyer Vorname: Martin

Amt, Firma, Institut: Schweizerische Hochschule für Landwirtschaft (SHL)

Strasse, Nr.: Länggasse 85

PLZ: 3052 Email: Da Projektleiter im Ruhestand bitte an:
harald.menzi@bfh.ch

Ort: Zollikofen Telefon: 031 910 22 07

Kanton, Land: Bern Fax: 031 910 22 88

Texte:

Zusammenfassung der
Projektresultate:

Das Projekt "Rapsöl-Blockheizkraftwerk" war ein gemeinsames Referenzprojekt von Privatwirtschaft, Förderstellen und Hochschulen. Seine Hauptansprüche sind das exemplarische Aufzeigen der Gewinnung von kraftstofftauglichem Rapsöl und seiner störungsfreien dieselmotorischen Nutzung. Es soll Schrittmacher sein, sowohl in der technologischen Förderung nachhaltiger Energiegewinnung, als auch bei der Suche neuer Impulse für die Entwicklung ländlicher Regionen. Mit der Inbetriebnahme der Forschungs-Ölmühle Suberg und der Entwicklung eines Verfahrens zur adsorptiven Reduktion der qualitätsentscheidenden Parameter Phosphor, Magnesium und Kalzium, ist ein europaweit beachteter Vorwärtsschritt in der Kaltpressung von Rapsölkraftstoff gelungen. In den umfassenden Prüfstandsmessungen an der HTI-Biel, mit einer breiten Reihe von Vergleichskraftstoffen, hat Rapsölkraftstoff beim Betrieb in einem *Liebherr*-Dieselmotor unter Generatorbedingungen sowohl bezüglich spezifischem Verbrauch und Leistungsdaten als auch bei den Emissionen - inklusive Nanopartikel - sehr vorteilhaft abgeschlossen. Mit der SCR-Denox/DPF-Anlage von *Hug Engineering AG* konnten die Grenzwerte der Luftreinhalte-Verordnung LRV im Betrieb bei Generatorbedingungen unterboten werden. Im Oktober 2008 wurden mit dem von der *SEnergie GmbH* aufgebauten BHKW in einem problemlosen Dauerlauf von 559 Stunden die erforderlichen Erfahrungen für den Langzeiteinsatz von Rapsölkraftstoff gesammelt. Mitte November 2008 erfolgte die geplante Übergabe von Ölmühle und BHKW zur privatwirtschaftlichen Weiterführung durch Projektpartner und Unternehmer Peter Stähli.



Zielerreichung:

Die beiden technischen Hauptziele des Projektes - Aufbau einer Referenz-Ölmühle zur Gewinnung von motortauglichem Rapsölkraftstoff und störungsfreier Dauerbetrieb mit Rapsölkraftstoff im modernen Dieselmotor - konnten plangemäss erreicht werden.
Die bisherigen Arbeiten in der Forschungs-Ölmühle Suberg zur Verfahrensweiterentwicklung bei der Rapsölkraftstoff-Gewinnung mittels Kaltpressung haben auf europäischem Niveau Beachtung und Anerkennung gefunden.
Das Projekt wurde mit dem von der Erdöl-Vereinigung gestifteten Prix Evenir ausgezeichnet (2006) und für den Prix Avenir nominiert.

Folgerungen und
Empfehlungen:

Das Projekt hinterlässt zwei bleibende Werte: Eine Klein-Ölmühle zur Gewinnung von qualitativ hochwertigem Rapsölkraftstoff und ein modernes Pflanzenöl-BHKW. Das Beispiel ist als Referenz geeignet für den autarken Nischenbeitrag an Energie- und Nahrungssouveränität aus der Region.

Publikationen:

Heinzelmann E. und Meyer M., 2007. Le colza naturel comme source d'énergie. La Revue Polytechnique Nr. 10, 471-473.
Meyer M., 2009. Rapsölkraftstoff - die krisensichere Ökoenergie vom eigenen Acker. AGRARForschung 16 (07), 262-267.
Meyer M., 2008. Rapeseed Oil as Alternative Fuel in Switzerland - Oil production and Engine Research. Congress Paper Ecoenergètica, College of Industrial Engineering of Igualada EUETII-EAI, E-Igualada.
Meyer M., 2008. Vom Hafer für das Pferd zum Pflanzenöl für die Landmaschine. AGRARForschung 15 (08), 396-401.
Meyer M., 2008. Rapsölkraftstoff in der Schweiz – Statusbericht zu Forschung und Praxiseinsatz. Tagungsband Landtechnik 08, Stuttgart-Hohenheim, VDI-Berichte Nr. 2045, 83-89.
Meyer M., 2008. Vom Hafer für das Pferd zum Rapsölkraftstoff für die moderne Landmaschine. Tagungsband 9. Automotive Day 08 des ACN-CH, Fachtagung SAE Switzerland, BBZ Biel, S. 44-48.
Meyer M., 2007. Rapsölkraftstoff in der Schweiz - Statusbericht zur Motorenforschung. Tagungsband 16. OTTI-Symposium Bioenergie, Kloster Banz, D-Bad Staffelstein, 302-307.
Meyer M. and Zosso C., 2007. Portrait of Project "Development of a combined heat and power plant (CHPP) in the lower wattage range with vegetable oil supply". Swiss Innovators Yearbook 2007, S. 50.



Beurteilung der Begleitkommission:

Diese Beurteilung der Begleitkommission ersetzt die bisherige separate fachliche Auswertung.

Beurteilung:

Das Projekt erfuhr in seinem Verlauf Änderungen, Wachstum, aber auch Erschwernisse. Es schliesst überaus erfreulich und korrekt ab, beanspruchte indessen einen höheren Zeitaufwand, als ursprünglich geplant.

Umsetzung:

Es wurde bewiesen, dass ein dezentral hergestellter Rapsölkraftstoff die hohen Anforderungen an den Motorbetrieb sowie die neue DIN Vornorm 51605 erfüllen kann und die Grenzwerte für die motorschädlichen Elemente weit unterboten werden. Damit wurden die Voraussetzungen für das Gelingen eines serienreifen Produktes geschaffen.

Der ausgewählte 7 Liter 4-Zylinder Projektmotor Liebherr D 934 L mit Stahlkolben und zentraler PLD-Hochdruckeinspritzung mit 7-Lochdüsen bestätigte in einem völlig störungsfreien Dauerlauf seine hohe Pflanzenöлтаuglichkeit.

Die Abgaswerte erreichten mit dem eingesetzten SCR-Katalysator sowie dem Russfilter die gesetzlich vorgeschriebenen Grenzwerte.

Somit wurde der Weg frei, dieses Produkt eines Pflanzenöl-BHKW im mittleren Leistungsbereich auf dem Markt anbieten zu können.

weitergehender
Forschungsbedarf:

Momentan kein weiterer Bedarf.

Einfluss auf
Normenwerk:

Das erreichte hohe Qualitätsniveau des Rapsölkraftstoffs unterstützt die Bestrebungen, die endgültige Fassung der DIN Vornorm 51605 mit schärferen Grenzwerten zu versehen. Dies im Sinne einer nochmals gesteigerten Zuverlässigkeit bei der motorischen Nutzung von naturbelassenem Pflanzenöl.

Präsident Begleitkommission:

Name:	Karsten	Vorname:	Lorenz
Amt, Firma, Institut:	Senergie GmbH		
Strasse, Nr.:	Uhlandstrasse 7		
PLZ:	D-79423	Email:	k.lorenz@senergie.de
Ort:	Heitersheim	Telefon:	+49 (0)7634 50569-10
Kanton, Land:	Deutschland	Fax:	+49 (0)7634 50569-90

Unterschrift Präsident Begleitkommission:

	 senergie saubere energie Senergie GmbH Uhlandstr. 7 79423 Heitersheim fon: +49 (0) 7634 50569-0 fax: -90 mail: info@senergie.com www.senergie.com
---	---