

Biogene Schmierstoffe in Windkraftanlagen

Kurztitel: WINLUB

# Abschlussbericht

des Projektes vom 01.08.2004 bis 31.07.2007

mit Verlängerung

vom 01.08.2007 bis 31.07.2008

## Inhaltsverzeichnis

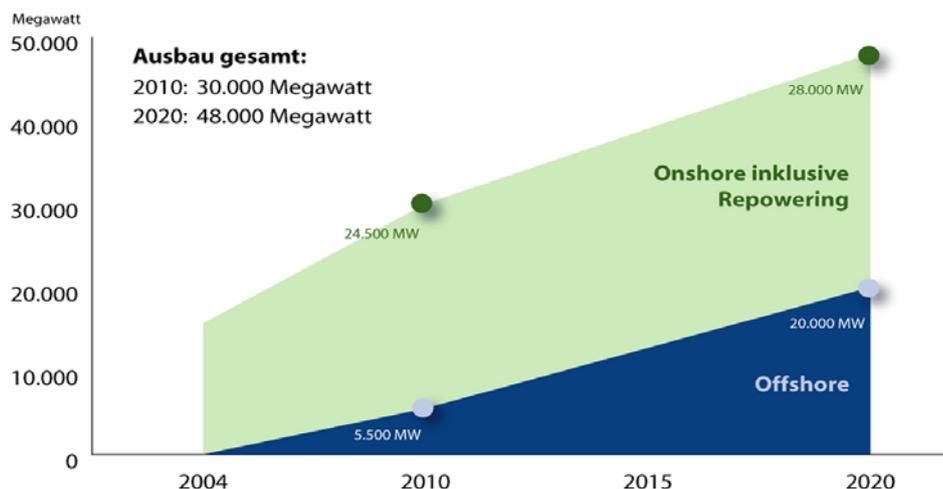
<b>Inhaltsverzeichnis .....</b>	<b>I</b>
<b>I Ziele.....</b>	<b>1</b>
<b>1 Aufgabenstellung und Zielsetzung.....</b>	<b>1</b>
1.1 Wissenschaftlich-technisches Ergebnis des Vorhabens, erreichte Nebenergebnisse und wesentliche Erfahrungen .....	3
1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde .....	4
1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens Winlub .....	5
<b>2 Stand der Technik .....</b>	<b>7</b>
2.1 Angabe bekannter Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte, die für die Durchführung des Vorhabens benutzt wurden .....	8
2.2 Angabe der verwendeten Fachliteratur sowie der benutzten Informations- und Dokumentationsdienste .....	11
<b>3 Zusammenarbeit mit anderen Stellen .....</b>	<b>14</b>
<b>II Ergebnisse.....</b>	<b>15</b>
<b>4 Erzielte Ergebnisse .....</b>	<b>15</b>
4.1 Schmieröle .....	18
4.1.1 Bereitstellung und Modifikation eines biogenen Schmierstoffes.....	18
4.1.2 Grundlagenuntersuchungen.....	18
4.1.3 Prüfstandsuntersuchungen .....	31
4.1.4 Feldversuche .....	70
4.1.5 Partikelgehaltssimulation.....	74
4.1.6 Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele.....	74
4.2 Schmierfette .....	75
4.2.1 Bereitstellung eines biogenen Schmierfettes und Optimierung der Additivierung.....	75
4.2.2 Grundlagenuntersuchungen.....	76
4.2.3 Prüfstandsuntersuchungen .....	86
4.2.4 Feldversuche .....	107
4.2.5 Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele.....	112
4.3 Condition Monitoring .....	113
4.3.1 Prüfstandsuntersuchungen .....	113
4.3.2 Feldversuche .....	113
4.3.3 Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele.....	129
<b>5 Kurzfassung der Ergebnisse.....</b>	<b>129</b>
<b>6 Verwertung .....</b>	<b>133</b>
<b>7 Erkenntnisse von Dritten.....</b>	<b>135</b>
<b>8 Veröffentlichungen .....</b>	<b>135</b>

## I Ziele

### 1 Aufgabenstellung und Zielsetzung

Vor dem Hintergrund weltweit abnehmender Ressourcen fossiler Energieträger, gewinnt die Erschließung regenerativer Energiequellen permanent an Bedeutung. In den nächsten Jahrzehnten wird sich diese Tendenz verstärken, sodass neben der - größtenteils bereits erschlossenen - Wasserkraft die direkte Nutzung der Sonnenenergie durch Solarthermie- und Photovoltaik-Anlagen sowie die Windenergie mit zunehmend größeren Anteilen zur Energieerzeugung beitragen werden. Insbesondere die Erzeugung elektrischer Energie aus Windenergie hat bereits in den vergangenen Jahren vor allem aufgrund der vergleichsweise geringen Kosten weltweit eine rasante Entwicklung genommen, dabei stand zunächst die Erschließung geeigneter Binnenstandorte im Vordergrund. In jüngerer Zeit werden verstärkt Versuche unternommen, das Energiepotenzial von Offshore-Standorten zu erschließen (Bild 1.1). In Zukunft wird ein signifikanter Zuwachs der installierten elektrischen Leistung vor allem Offshore zu realisieren sein, wobei die elektrische Leistung pro Windpark dabei aus heutiger Sicht bis etwa 500 MW betragen wird. In den häufig ökologisch sehr sensiblen küstennahen Aufstellungsgebieten können Ölleckagen, die bei Störungen, Ölwechseln oder Havarien der Anlagen auftreten können, eine ernst zu nehmende Umweltbelastung darstellen.

#### Entwicklung der Windenergie in Deutschland bis 2030



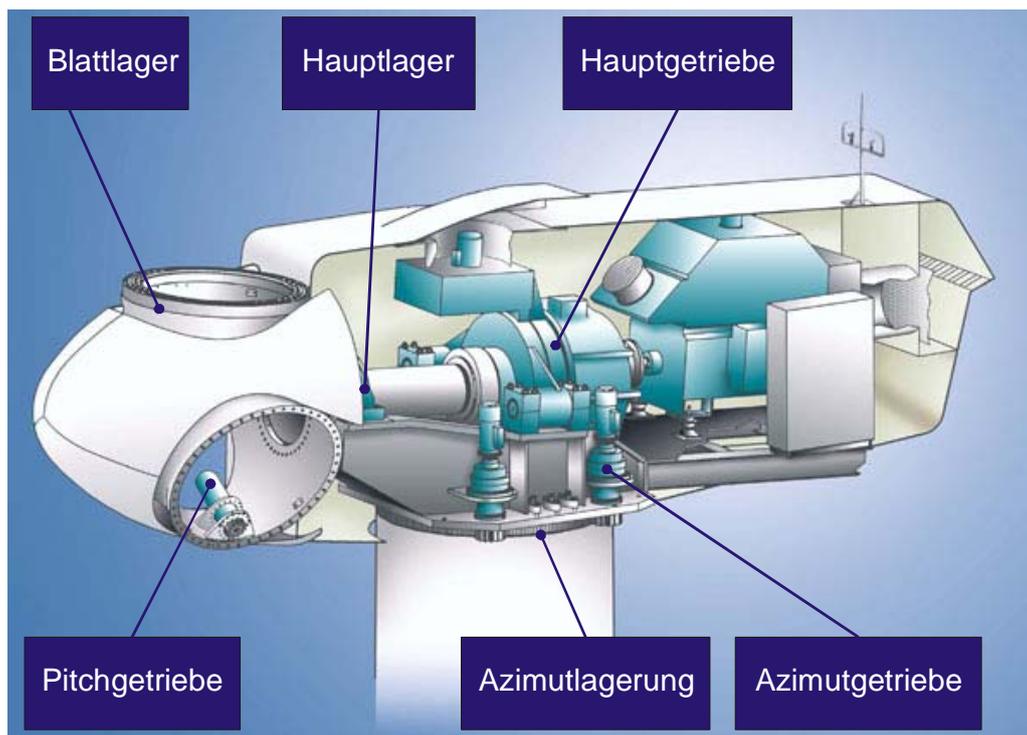
**Bild 1.1:** Prognostizierte Entwicklung der Windenergie [BWE07]

Daher muss hier in besonderem Maße, wie grundsätzlich auch an Land, eine Minimierung von Umweltbelastungen durch Schmieröleintrag angestrebt werden. Angesichts allgemeiner Erfahrungen mit einer sehr hohen Freisetzungquote von

Schmierstoffen und Hydraulikölen in Deutschland von 50% der eingesetzten Gesamtmenge [Bie05] ergibt sich zwangsläufig die Forderung nach einer möglichst guten Umweltverträglichkeit.

Die Projektpartner haben es sich daher im Verbundvorhaben „Biogene Schmierstoffe in Windkraftanlagen“, Kurztitel Winlub, zum Ziel gesetzt, die Eignung umweltverträglicher Schmierstoffe für Windkraftanlagen unter den unterschiedlichsten Bedingungen zu erproben und nachzuweisen. Neben dem grundsätzlichen Ziel des Nachweises der Leistungsfähigkeit dieser Schmierstoffe sollte im Hinblick auf den Offshore-Einsatz insbesondere der Einfluss von Feuchtigkeit auf die tribologischen Eigenschaften der Schmierstoffe untersucht werden.

Eine große Herausforderung ergibt sich für die Schmierungstechnik grundsätzlich aus dem Ziel der Verminderung unterschiedlicher Schmierstofftypen auf einer Windkraftanlage. Dem stellen sich die sehr unterschiedlichen Betriebsbedingungen, wie sie beispielsweise bei Blatt- im Vergleich zu Hauptlagern oder bei Azimut- im Unterschied zu Pitchantrieben vorliegen entgegen (Bild 1.2).



**Bild 1.2:** Schmierstellen einer Windkraftanlage

Darüber hinaus stellen stark wechselnde Umgebungsbedingungen aufgrund der exponierten Aufstellung der Anlagen in Kombination mit sehr instationären Lastzuständen einen erheblichen Beanspruchungsfaktor dar.

Ziel der durchgeführten Untersuchungen ist daher der Nachweis der Leistungsfähigkeit biogener Schmierstoffe an mehreren Schmierstellen mit einer möglichst geringen Anzahl unterschiedlicher Formulierungen unter Berücksichtigung einer Vielzahl möglicher Einsatzbedingungen. Als komplexeste mechanische

Komponente des Antriebsstranges bildete dabei das Hauptgetriebe mit seiner Ölschmierung einen Schwerpunkt.

Wichtige Aspekte der Betriebsführung von Windkraftanlagen sind die Zustandsüberwachung und Schadensfrüherkennung der unterschiedlichen Komponenten des Antriebsstranges. Die dafür eingesetzten Condition Monitoring (CM) Systeme werden aufgrund der komplexen Mechanik und der Teilevielfzahl vorrangig am Hauptgetriebe eingesetzt. Insbesondere vor dem Hintergrund der zukünftig geplanten Erschließung von Offshore-Standorten gewinnt ein verlässliches Condition Monitoring zunehmend an Bedeutung, da es eine zustandsorientierte Wartung der Anlagen sowie eine frühzeitige Planung von Reparaturmaßnahmen ermöglicht und so einerseits Wartungskosten direkt und andererseits Kosten durch lange Anlagenstillstände vermindern kann. Ein weiterer Schwerpunkt des Vorhabens war daher, verschiedene Komponenten von Condition Monitoring Systemen durch Feld- und Prüfstandsversuche zu validieren.

Das, mit der Gesamtheit aller im Rahmen dieses Vorhabens durchgeführten Untersuchungen, verfolgte Ziel ist die Überwindung von Vorbehalten gegenüber biogenen Schmierstoffen auf Anwenderseite. Die Arbeiten folgen dabei dem Ansatz, mangelnde Praxiserfahrung durch Prüfstands- und Feldversuche zu kompensieren, Vorurteile abzubauen und so die Marktdurchdringung biogener Schmierstoffe deutlich zu verbessern.

### **1.1 Wissenschaftlich-technisches Ergebnis des Vorhabens, erreichte Nebenergebnisse und wesentliche Erfahrungen**

Sowohl in den durchgeführten Feldversuchen als auch in den praxisnahen Prüfstandsuntersuchungen hat der untersuchte biogene Schmierstoff seine technische Leistungsfähigkeit und Einsatzzeichnung für Windkraftanwendungen unter Beweis gestellt. Verschleiß- und Ermüdungsschutzverhalten lagen auch unter verschärften Bedingungen auf dem Niveau des konventionellen Referenzschmierstoffes. Als wesentliches Nebenergebnis kann die deutlich bessere Handhabbarkeit des biogenen Schmierstoffes, charakterisiert vor allem durch eine unkomplizierte Filtrierbarkeit, sowohl auf den Feldversuchs-Windkraftanlagen als auch bei den Prüfstandsuntersuchungen, genannt werden. Der konventionelle Schmierstoff neigt hier wohl aufgrund seiner hohen Additivierung zu einer Verschlammung, die auf den Feldversuchs-Windkraftanlagen einen sehr häufigen Filterwechsel erforderlich machte. Gerade in Bezug auf eine möglichen Eignung der Schmierstoffe für den Offshore-Einsatz sind bei dem biogenen Schmierstoff daher deutliche Vorteile zu sehen, sind doch Wartungsarbeiten auf See ungleich aufwändiger und teurer als an Land.

Im Bereich von Fetten auf Basis biogener Grundöle zeichnen sich ebenfalls positive Versuchsergebnisse ab, der Stand der Feldversuche erlaubt hier allerdings bisher nur erste tendenzielle Aussagen. Demnach scheint das Fett auf Basis eines biogenen

Grundöls die Reibungsverhältnisse im Hauptlager positiv zu beeinflussen. Inwieweit sich diese Tendenz auch durch einen geringeren Lagerverschleiß bestätigen lässt, muss die weitere Begleitung der Feldversuche zeigen. In Prüfstandsuntersuchungen hat das biogene Fett auch unter verschärften Bedingungen ein Verschleißschutzverhalten auf dem Niveau vergleichbarer konventioneller Fette gezeigt.

Condition Monitoring Systeme zur Ölzustandsüberwachung konnten im Rahmen des Vorhabens erfolgreich an Windkraftanlagen getestet werden. Hier konnte sich das biogene Schmieröl beispielsweise aufgrund der guten Auszählbarkeit von Partikeln positiv vom Referenzöl abheben. Ursache dafür ist die hellere Grundfarbe dieses Öls im Vergleich zum Referenzöl. Zusätzlich erschwert die bereits erwähnte Tendenz des Referenzöls zur Verschlammung die optische Partikelanzählung.

## **1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde**

Das Forschungsvorhaben Winlub wurde unter der Trägerschaft der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. als Verbundvorhaben von sechs Industriepartnern und einem Hochschulinstitut, im Zeitraum vom 01.08.2004 bis zum 31.07.2007 durchgeführt (Tabelle 1). Aufgrund einer sinnvoll erscheinenden verlängerten Begleitung der Feldversuche an verschiedenen Standorten durch Inspektionen und Ölanalysen sowie begleitenden theoretischen Betrachtungen zum Verlauf der Partikelbelastung des Getriebeöls wurde die Laufzeit des Vorhabens um ein weiteres Jahr bis zum 31.07.2008 verlängert.

Teilprojekt A:	<b>Schmierstoffentwicklung und Laboruntersuchungen</b>
	FUCHS Lubritech GmbH, Weilerbach FKZ: 22005002
Teilprojekt B:	<b>Praxisnahe Aggregatversuche</b>
	Institut für Maschinenelemente und Maschinengestaltung der RWTH Aachen (IME) FKZ: 22005002
Teilprojekt C:	<b>Bewertung der Eignung in Planetengetrieben</b>
	Bosch Rexroth GmbH, Witten FKZ: 22001104
Teilprojekt D:	<b>Feldversuche in Windkraftanlagen</b>
	GE Wind GmbH, Salzbergen FKZ: 22000904
Teilprojekt E:	<b>Lagerdiagnose, -überwachung und Prüfung von Wälzlagerschmierstoffen</b>
	SKF GmbH, Schweinfurt FKZ: 22000704
Teilprojekt F:	<b>Bewertung der Eignung für Blattverstellungs- und Azimutlager</b>
	Rothe Erde GmbH, Dortmund FKZ: 22000804
Teilprojekt G:	<b>Entwicklung geeigneter Schmierstoffpflege- und -überwachungssysteme</b>
	HYDAC Fluidtechnik GmbH, Sulzbach FKZ: 22001004

**Tabelle 1:** Die Partner im Forschungsvorhaben Winlub

Bei der Auswahl der Projektpartner ist es gelungen, für das Vorhaben Firmen zu gewinnen, die einerseits seit Jahren in der Windenergiebranche erfolgreich tätig sind und deren Produktportfolio andererseits insgesamt einen Großteil der für Erstellung und Betrieb von Windkraftanlagen-Antriebssträngen erforderlichen mechanischen Komponenten und Schmierstoffe umfasst.

### 1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens Winlub

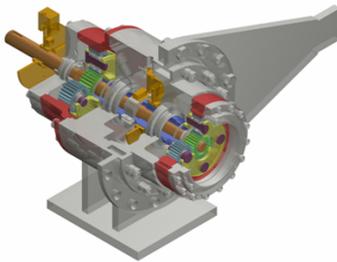
Das Vorhaben Winlub begann am 01.08.2004. Zu Beginn standen naturgemäß sowohl für die praxisnahen Aggregatversuche als auch für die Feldversuche vorbereitende Arbeiten auf dem Plan (Bild 1.3). Mit Beginn des Jahres 2005 waren die ersten Prüftandsversuche geplant, an die sich zum dritten Quartal 2005 nach Identifizierung geeigneter Windkraftanlagen die ersten Feldversuche zum Nachweis der Einsetzeignung biogener Schmierstoffe in Windkraft-Hauptgetrieben anschlossen.



## 2 Stand der Technik

Das Forschungsvorhaben Winlub muss als folgerichtige Fort- und Zusammenführung der beiden vorangegangenen und ebenfalls unter der Trägerschaft der FNR durchgeführten Vorhaben Lupus und Afrilub gesehen werden (Bild 2.1). Im Vorhaben Afrilub sind zunächst grundlegende Anforderungsprofile in Form von Lastenheften für Getriebeöle und Schmierfette auf Basis nachwachsender Rohstoffe erarbeitet worden, die dann in Tests mit neu entwickelten Produkten abgeprüft wurden. Ein neu entwickeltes Produkt aus dem Vorhaben Afrilub, die Fett-Formulierung Afrilub FLT 1, wurde in das Vorhaben Winlub übernommen, dort zunächst mit Hilfe von Prüfstandsuntersuchungen weiter verbessert, vgl. Kapitel 4.2.3.8, und schließlich für Feldversuche auf Windkraftlagen freigegeben, die noch heute (Stand Ende 2008) andauern.

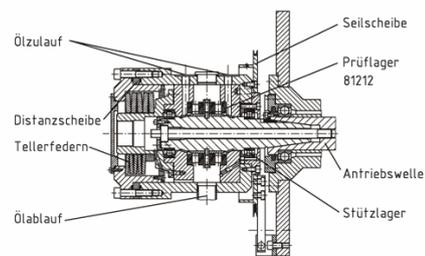
### Forschungsvorhaben Lupus



#### Zielsetzung:

Substitution von Mineralölprodukten durch biologisch abbaubare Schmierstoffe auf Basis nachwachsender Rohstoffe

### Forschungsvorhaben Afrilub



#### Zielsetzung:

Entwicklung von biologisch schnell abbaubaren Lagerschmierstoffen (Öl und Fett) für den Einsatz in Windkraftanlagen



### Forschungsvorhaben WinLub

#### Zielsetzung:

Erhöhung der Akzeptanz biogener Schmierstoffe für WEA durch Getriebe- und Wälzlageruntersuchungen unter praxisnahen klimatischen Bedingungen



**Bild 2.1:** Einordnung des Vorhabens Winlub

Im Rahmen des Vorhabens Lupus wurde durch verschiedene Prüfstandsuntersuchungen aufgezeigt, dass ein umweltverträglicher Schmierstoff auf Basis eines synthetischen Esters eine leistungsfähige Alternative zu konventionellen Getriebschmierstoffen darstellen kann. Die prinzipiell hohe technische Performance und die gute Umweltverträglichkeit der Ester wurden auch in weiteren zahlreichen Forschungsvorhaben aufgezeigt und veröffentlicht [Sch99], [Bar01]. Die Ergebnisse beziehen sich zumeist auf Prüfstandsversuche des FZG-Tests DIN 51 350-2 (Standard und verschärft), auf den Graufleckentest nach FVA Nr. 54 I–IV und die FAG-FE 8 Wälzlagerprüfmaschine [Boc01, Kem01].

Das hohe Leistungsniveau esterbasischer Schmierstoffe ist vor allem durch Ausnutzung der in Tabelle 2 angegebenen positiven Grundeigenschaften von

synthetischen Estern im Vergleich zu Mineralölen und synthetischen Ölen auf Basis von Polyalphaolefin (PAO) möglich. Diese positiven Grundeigenschaften wiederum ermöglichen es, esterbasische Schmierstoffe mit einer geringen Additivierung auszuführen, wodurch eine gute biologische Abbaubarkeit begünstigt wird.

Um die trotz positiver Prüfstandsergebnisse bestehenden Vorbehalte gegen den Einsatz biogener Schmierstoffe auf Anwenderseite zu überwinden, werden als Schwerpunkt des Vorhabens Winlub bewusst Feldversuche auf Windkraftanlagen, ergänzt durch begleitende praxisnahe Prüfstandsuntersuchungen, durchgeführt. Bei den Prüfstandsuntersuchungen stand der Einfluss wechselnder klimatischer Bedingungen, im Wesentlichen charakterisiert durch wechselnde Betriebstemperaturen und Schmierstoffverunreinigungen durch eingetragene Feuchtigkeit, auf die Leistungsfähigkeit der Schmierstoffe im Mittelpunkt der Untersuchungen.

	<b>Mineralöl</b>	<b>PAO</b>	<b>Ester</b>	<b>Polyglykole</b>
<b>Verschleißschutz</b>	gut	gut	gut	hervorragend
<b>Kälteeignung</b>	mäßig	gut	gut	gut
<b>Hochtemperatureignung</b>	mäßig	gut	gut	sehr gut
<b>V-T-Verhalten</b>	mäßig	gut	sehr gut	sehr gut
<b>Korrosionsschutz</b>	hervorragend	hervorragend	gut	gut
<b>Wasserabscheidung</b>	mäßig	gut	gut	schlecht
<b>Schaumverhalten</b>	gut	sehr gut	sehr gut	mäßig
<b>Mischbarkeit mit Min.</b>	gegeben	hervorragend	gut	schlecht
<b>Lackverträglichkeit</b>	sehr gut	sehr gut	mäßig	mäßig
<b>Dichtungsverträglichkeit</b>	sehr gut	sehr gut	mäßig	mäßig
<b>Verdampfungsverlust</b>	mäßig	sehr gut	gut	mäßig
<b>Hydrolysebeständigkeit</b>	sehr gut	sehr gut	mäßig	gut
<b>Biol. schnell. abbaubar</b>	nein	nein	> 80%	i.d.R. nein

**Tabelle 2:** Eigenschaften von nicht-additivierten Basisölen [Kem01]

## **2.1 Angabe bekannter Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte, die für die Durchführung des Vorhabens benutzt wurden**

Die Prüfstandsuntersuchungen im Rahmen des Vorhabens Winlub wurden unter Nutzung der in den entsprechenden Kapiteln eingehend vorgestellten Prüfeinrichtungen durchgeführt, die entweder genormt sind oder deren Verwendung zur Realisierung vorhabensrelevanter Untersuchungsschwerpunkte sinnvoll erschien. Die Feldversuche werden auf zwei Windkraftanlagen GE Wind 1,5 MW im Windpark Bockelwitz (Öl-Feldversuch, Condition Monitoring), sowie auf weiteren Anlagen in den Windparks Neu Zauche (Fett-Feldversuch, Blatt- und Turmlager) und Saubusch (Fett-Feldversuche, Hauptlager) durchgeführt. Zur Benennung der dabei verwendeten Schmierstoffe wurde die in den folgenden Tabellen dargestellte Nomenklatur verwendet.

**Fette:***Referenzfette:***WinLub Grease Reference + Nummer**

<b>Kurzbez. WinLub</b>	<b>erweiterte Bezeichnung</b>	<b>Name</b>	<b>Kurzbez. Afrilub</b>	<b>Sonstiges</b>
WLGR A1		AEROSHELL GREASE 7	AFGR 1	**)
WLGR A3		MOLYKOTE LONGTERM PLUS	AFGR 3	**)
WLGR A4		OPTIMOL OPTIPIT	AFGR 4	**)
WLGR 1		Gleitmo 585 K	AFGR 5	Chr.-Nr.: 37065
WLGR 2		LGEP2	AFGR 6	

\*\*) aus Vorhaben AFRILUB

*Biogene Fette:***WinLub Grease Bio + Nummer**

<b>Kurzbez. WinLub</b>	<b>erweiterte Bezeichnung</b>	<b>Name</b>	<b>Kurzbez. Afrilub</b>	<b>Sonstiges</b>
WLGB A2		Plantogel 2 S	AFGR 2	**)
WLGB 1A		Afrilub FLT 1	AFGN1	AF-Marius
WLGB 1B		Afrilub FLT 1	AFGN2	
WLGB 1C		Afrilub FLT 1	AFGN3	AF-Ralf, Chr.-Nr.:41664

\*\*) aus Vorhaben AFRILUB

**Öle:***Referenzöle:***WinLub Oil Reference + Nummer**

<b>Kurzbez. WinLub</b>	<b>erw. Bezeichnung</b>	<b>Name</b>	<b>Kurzbez. Afrilub</b>	<b>Sonstiges</b>
WLOR 1	_PGP_320	Gearmaster PGP		
WLOR 2	_PAO_320	Gearmaster SYN		
WLOR 3	_Min_320	Renolin CLP 320		
WLOR 4	_PAO_320	Optimol Optigear Synth. A320		

*Biogene Öle:***WinLub Oil Bio + Nummer**

<b>Kurzbez. WinLub</b>	<b>erw. Bezeichnung*)</b>	<b>Name</b>	<b>Kurzbez. Afrilub</b>	<b>Sonstige s</b>
WLOB A0	_gSe_Ao_AW1_MD_Esch_320	AFRILUB 0	AFON 0	**)
WLOB A0.A	_gSe_Ao_AW1_EP_MD_Esch_320	AFRILUB 0A	AFON 0.A	**)
WLOB A1	_gSe_Ao_AW2_MD_Esch_320	AFRILUB 1	AFON 1	**)
WLOB A0.2	_gSe_320	AFRILUB 0-2	AFON 0.2	**)
WLOB A2	_gSe_Add_Esch_320	AFRILUB 2	AFON 2	**)
WLOB 1	_gSe_320	Gearmaster ECO		

- \*) \_gSe: gesättigter Säureester  
 \_Ao: Antioxidant  
 \_Add: Additivpaket  
 \_AW: AW-Additiv  
 \_EP: EP-Additiv  
 \_MD: Metall-Deaktivator  
 \_Esch: Entschäumer  
 \_320: ISO-VG-Klasse

- \*\*) aus Vorhaben AFRILUB

## 2.2 Angabe der verwendeten Fachliteratur sowie der benutzten Informations- und Dokumentationsdienste

[Bar01]	Bartz, W. J.	Biologisch schnell abbaubare Schmierstoffe und Arbeitsflüssigkeiten, Teil I und II, Technische Akademie Esslingen, Ostfildern, 13. / 16. Feb. 2001
[Bie05]	Biese, S.	Tribologie + Schmierungstechnik, 52. Jahrgang, 3 / 2005, S. 69 ff.
[Boc01]	Bock, H. Feßenbecke r, A.	Additive für biologisch schnell abbaubare Schmierstoffe, Rhein Chemie Rheinau GmbH, Lehrgang: Biologisch schnell abbaubare Schmierstoffe und Arbeitsflüssigkeiten, Teil I, Technische Akademie Esslingen, Ostfildern, 13. / 16. Feb. 2001
[BWE04]	N. N.	Bundesverband Windenergie e.V. "Offshore", Informationsbroschüre, Osnabrück, 2004
[BWE07]	N. N.	Bundesverband Windenergie e.V.; Foliensatz „Szenarien Potenziale“ Link: <a href="http://www.windenergie.de/de/materialien/foliensammlung/#1714">http://www.windenergie.de/de/materialien/foliensammlung/#1714</a> , 2007
[CEC L -33A-93]	N. N.	Biodegradability of Two-Stroke Cycle Outboard Engine Oils in Water. The Co-ordinating European Council for the Development of Performance Tests for Transportation Fuels, Lubricants and other Fluids, December 1997
[DIN 51354]	N. N.	FZG-Zahnrad-Verspannungs-Prüfmaschine, Teil 2, Beuth Verlag, Berlin, April 1990
[DIN 51777]	N. N.	Bestimmung des Wassergehaltes nach Karl Fischer, Teil 1, März 1983
[DIN 51819-2]	N. N.	Mechanisch-dynamische Prüfung auf dem Wälzlagerschmierstoff-Prüfgerät FE8, Teil 2, Dezember 1999
[DIN 3990]	N. N.	Tragfähigkeitsberechnung von Stirnrädern, Teil 2
[DIN ISO 13357]	N. N.	Mineralölerzeugnisse - Bestimmung der Filtrierbarkeit von Schmierölen.

[DNV93]	N. N.	Calculation of Gear Rating for Marine Transmissions, Det Norske Veritas Classification AS, Høvik / Norwegen, Juli 1993
[Flender]	N. N.	„Flender-Schaumtest“, A. Friedrich Flender GmbH, Bocholt, 2001
[FVA54/7],	N. N.	FVA Informationsblatt Nr. 54/7, Forschungsvereinigung Antriebstechnik e. V., Juli 1993
[GL04]	N. N.	Richtlinie für die Zertifizierung von Windenergieanlagen, Errata und Neufassung der Abschnitte 7.3 und 7.4 zur Ausgabe 2003, Germanischer Lloyd WindEnergie GmbH, Hamburg 2004
[Gol01]	Gold P.W., Aßmann C., Van de Sandt, N.	Feuchtigkeitseinfluss bei fettgeschmierten Wälzlagern, ATK 2001, Tagungsband S. 127-152
[Her03]	Hermsmeier , J.	Umweltverträgliche Schmierstoffe in Windkraftanlagen, Kurztitel: Winlub Projektantrag, Institut für Maschinenelemente und Maschinengestaltung der RWTH Aachen, 2003
[Her04]	Hermsmeier , J.	Tribologische Eignung synthetischer Esteröle auf Basis nachwachsender Rohstoffe in Planeten- und Schneckengetrieben, Dissertation RWTH Aachen, 2004
[Hoe01]	Höhn, B.-R., Oster, P.	Von vergüteten zu einatzgehärteten Zahnrädern, Antriebstechnik (2001), Nr. 7, S. 39-42
[Hol84]	Hollatz, J.	Start- und Reibungsverhalten von ölgeschmierten Wälzlagern bei Umgebungstemperaturen bis -40°C, Dissertation, Universität Hannover, 1984
[Hub77]	Hubmann, A., Pass, F.	Luft im Schmieröl - Auswirkungen auf Öleigenschaften und Maschinenbetrieb, Erdoel- Erdgas-Zeitschrift, 93. Jg. Heft 10, S. 353 – 358, 1977, ISSN 0342-5622

[Kem01]	Kempkes, D.	Einsatz biologisch abbaubarer Schmierstoffe in Windkraftanlagen, FUCHS Lubritech GmbH, Tagungsband, ATK 2001, RWTH Aachen, 2001
[Möl86]	Möller, U. J.	Schmierstoffe im Betrieb, VDI-Verlag, Düsseldorf 1986, ISBN 3-18-400739-1
[Nag81]	Nagler, B.	Breathing - dangerous to gearcase health, Power Transmission Design, Volume 23, S.132-134, Jan 1981, ISSN 0032-6070
[Nie83]	Niemann, G., Winter, H.	Maschinenelemente, Band II, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg 1983
[O+P]	N. N.	O+P Zeitschrift Fluidtechnik, Sonderdruck in O+P 4/2005 Vereinigte Fachverlage, Mainz, 2005
[OP05]	N. N.	O+P Zeitschrift Fluidtechnik, Sonderdruck in O+P 4/2005 Vereinigte Fachverlage, Mainz, 2005
[Opp79]	Oppelt, J.	Einfluss von Lufteinschlüssen im Schmieröl auf die Freßtragfähigkeit und den Verschleiß von Zahnradpaarungen. FVA Forschungsvorhaben Nr. 43, Heft 59, 1979
[Pet05]	Peterek, G.	Markteinführung von Bioschmierstoffen, Seminarreihe Bioschmierstoffe, FNR 2005.  Link: <a href="http://www.fnr.de/cms35/fileadmin/pflanzenoel/pdf/aktuelles/Vortrge_K_H_K/peterek.pdf">http://www.fnr.de/cms35/fileadmin/pflanzenoel/pdf/aktuelles/Vortrge_K_H_K/peterek.pdf</a> , 2008
[Sch99]	Schütte, A.	Bioschmierstoffe in der kommunalen Praxis, Fachtagung Lokale Agenda 21, Gölzower Fachgespräche, Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V., Hamm, 26. Mai. 1999
[Sey05]	Seyfert, C., Schlinck, O.	Spurenfeuchtesensorik in Kältemaschinenölen. Beitrag zur Fachtagung der Gesellschaft für Tribologie, (GfT), Göttingen 2005

### **3 Zusammenarbeit mit anderen Stellen**

Das Vorhaben Winlub wurde von den in Kapitel 1.2 genannten Partnern bearbeitet, eine Zusammenarbeit mit anderen Stellen hat, abgesehen von der Beauftragung der Firma WearCheck für Ölanalysen, nicht statt gefunden.

## **II Ergebnisse**

### **4 Erzielte Ergebnisse**

Die vom Projektträger bewilligten Mittel wurden während der Projektlaufzeit von den Projektpartnern für Untersuchungen entsprechend der folgenden Übersicht eingesetzt. Gegliedert in die Untersuchungsbereiche Schmieröle und Schmierfette sowie Condition Monitoring sind in Bild 4.1 die Tätigkeiten der Projektpartner bzw. ihre Kooperationen im Berichtszeitraum dargestellt.

Neben den Schmierstoff-Untersuchungen an Ölen und Fetten stellt die Validierung von Schmierstoff-Condition Monitoring-Systemen einen weiteren Schwerpunkt des Projektes dar. Die parallele Erprobung und Qualifizierung von Sensoriksystemen zur Ölzustandsdiagnose an Prüfständen und in der Feldanwendung Windkraftanlage zielte darauf ab, Kenntnisse und Erfahrungen zur frühzeitigen Erkennung einer alterungs- oder verschleißbedingten Verschlechterung der Schmiereigenschaften zu gewinnen. Im Berichtszeitraum konnten mit Hilfe der auf den Feldversuchs-Windkraftanlagen installierten Condition Monitoring-Systeme umfangreiche Daten gesammelt werden, deren Auswertung detaillierte Bewertungen des Anlagenzustandes zulässt.

Die von den Projektpartnern bearbeiteten Fragestellungen lassen sich thematisch den Bereichen Grundlagenuntersuchungen, Prüfstandsuntersuchungen und Feldversuche zuordnen (Bild 4.2). Es wird deutlich, dass bei den Schmierstoffen im Bereich der Grundlagen- und Prüfstandsuntersuchungen deutlich größere Untersuchungsumfänge absolviert worden sind als im Themenbereich Condition Monitoring. Untersuchungen in diesem Themenbereich sind aber im Rahmen von Feldversuchen auf Windkraftanlagen besonders umfangreich durchgeführt worden. In diesem Kapitel werden die einzelnen Untersuchungspunkte entsprechend der in Bild 4.2 dargestellten Struktur geordnet nach Grundlagenuntersuchungen, Prüfstandsuntersuchungen und Feldversuchen jeweils für Schmieröle, Schmierfette sowie das Thema Condition Monitoring behandelt.

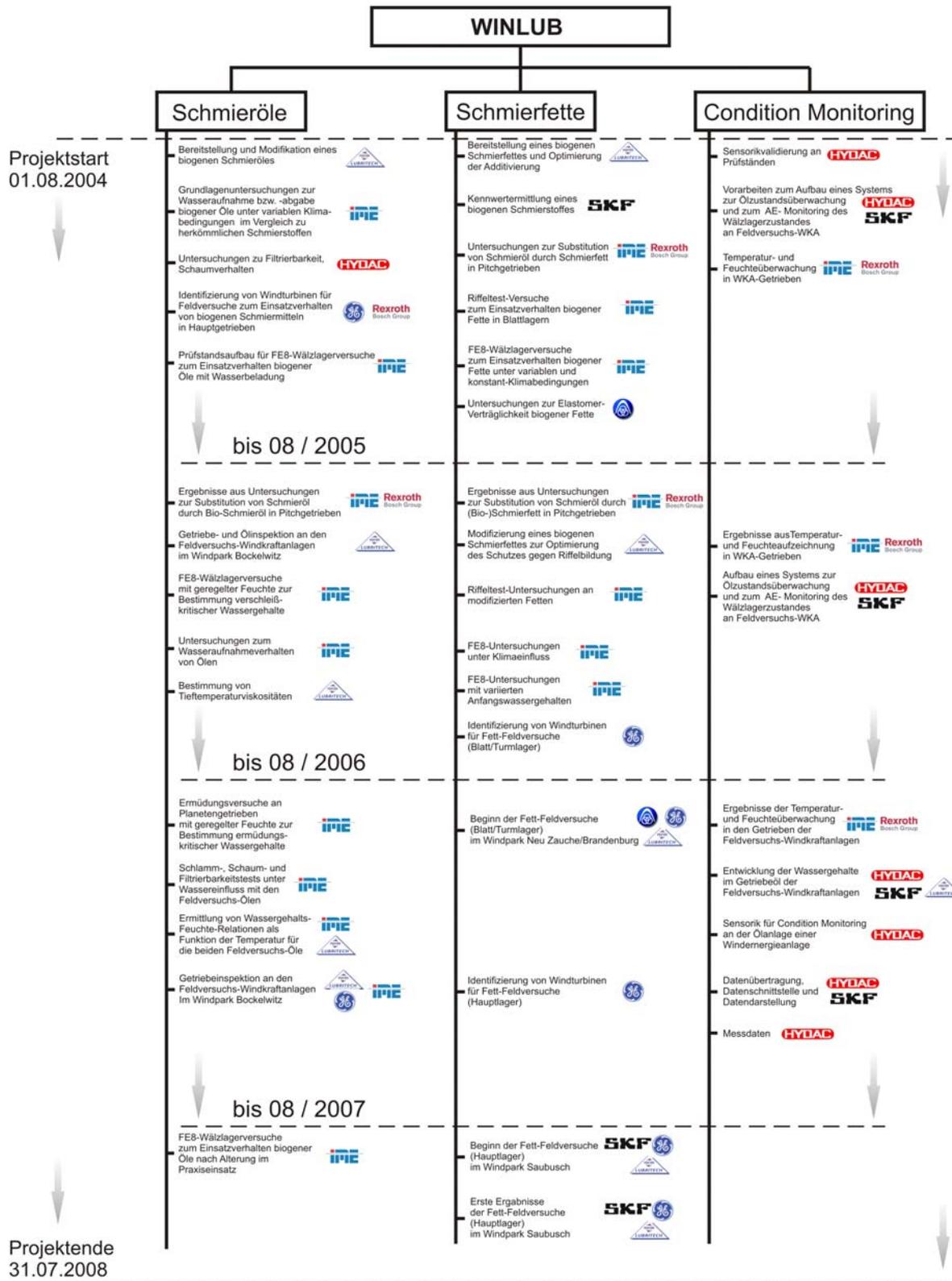


Bild 4.1: Tätigkeitsfelder der Projektpartner chronologisch

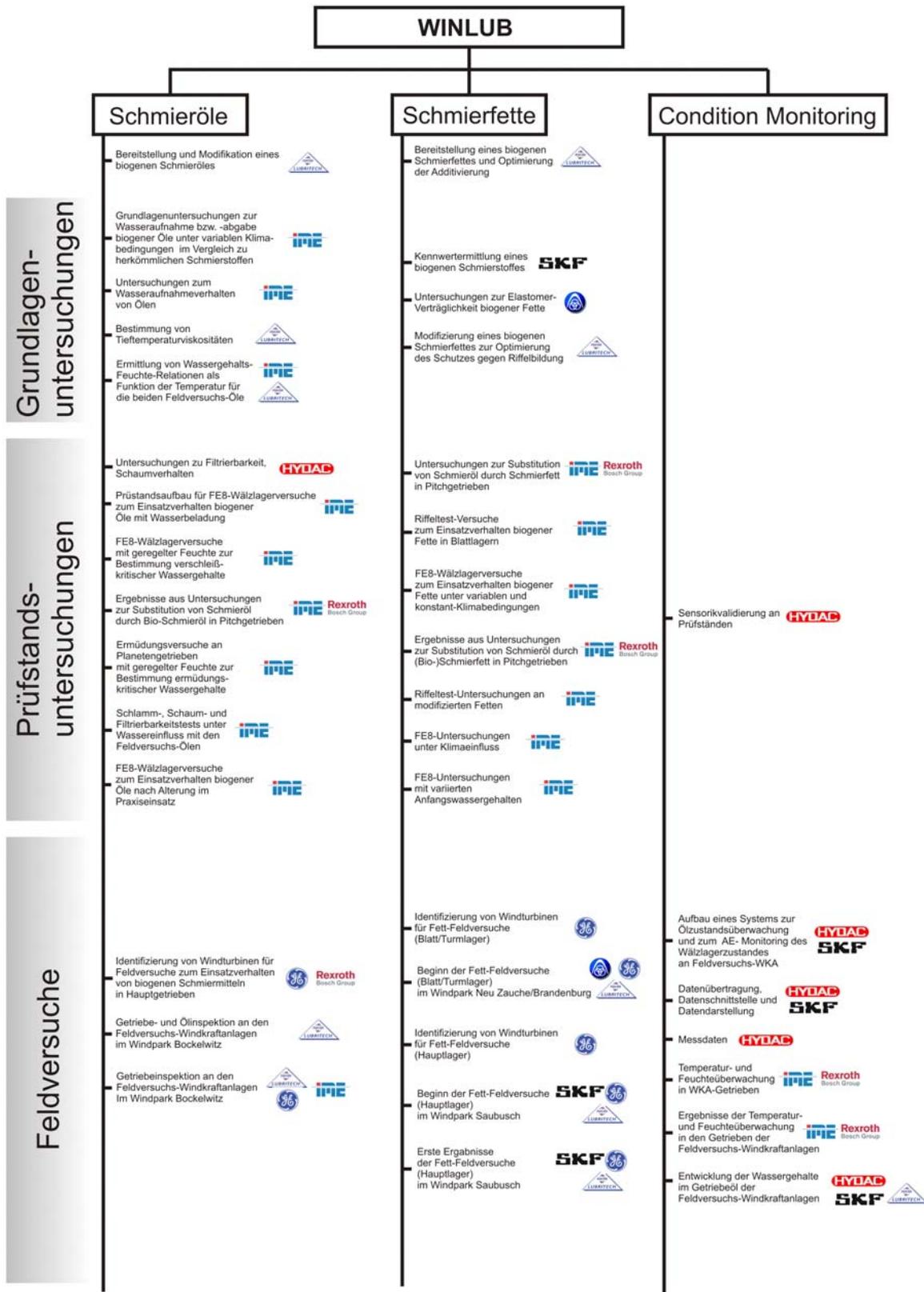


Bild 4.2: Tätigkeitsfelder der Projektpartner thematisch

## 4.1 Schmieröle

Schmieröle werden in Windkraftanlagen zur Schmierung der Haupt-, Pitch- und Azimutgetriebe eingesetzt. In Abhängigkeit vom Einsatzort ergeben sich für den Schmierstoff stark variierende Einsatzbedingungen. Während es sich bei Pitch- und Azimutgetrieben um Stellantriebe mit relativ langen Stillstandszeiten handelt, sind die Einsatzbedingungen von Hauptgetrieben neben ebenfalls vorhandenen Stillstandszeiten durch längerfristige Betriebszeiten charakterisiert. So ergeben sich aus den spezifischen Betriebsbedingungen zum einen unterschiedliche Beanspruchungen für den eingesetzten Schmierstoff, zum anderen wirken sich Umwelteinflüsse wie Temperatur- und Feuchteschwankungen unterschiedlich auf die Schmierstoffe aus.

Um das Einsatzverhalten biogener Schmieröle an den unterschiedlichen Schmierstellen einer Windkraftanlage bewerten und mit denen herkömmlicher Schmierstoffe vergleichen zu können, wurden im Rahmen dieses Vorhabens sowohl feld- und praxisnahe Aggregatversuche, als auch Grundlagenuntersuchungen zur Wasseraufnahme der Schmierstoffe bei verschiedenen Temperaturen durchgeführt.

### 4.1.1 Bereitstellung und Modifikation eines biogenen Schmierstoffes

Der Projektpartner FUCHS Lubritech hat zu Beginn des Vorhabens Schmierstoffe biogenen Ursprungs bereitgestellt. So wurde für die Getriebeschmierung das Getriebeöl „GEARMASTER ECO 320“ auf Basis vollgesättigter Ester ausgesucht. Es besitzt eine biologische Abbaubarkeit > 90% gemäß CEC L -33A-93. Darüber hinaus wurde für das Getriebeöl ein Additiv zur Verbesserung des Korrosionsschutzes entwickelt und erfolgreich getestet. Insbesondere die Ergebnisse im EMCOR-Test konnten dadurch signifikant verbessert werden.

### 4.1.2 Grundlagenuntersuchungen

#### 4.1.2.1 *Untersuchungen zur Wasseraufnahme bzw. -abgabe unter variablen Klimabedingungen*

Betriebserfahrungen mit Windkraftanlagen zeigen, dass der Wassergehalt in den eingesetzten Schmierstoffen nach einer gewissen Betriebszeit z. T. deutlich über dem Anlieferungszustand liegt. Die grundsätzliche Neigung zur Feuchteakkumulation ist vom verwendeten Schmierstofftyp abhängig und wird darüber hinaus von den klimatischen Umgebungsbedingungen beeinflusst. Um die Zusammenhänge zwischen Umgebungsbedingungen und den durch sie induzierten Wassergehalten im Schmierstoff systematisch zu untersuchen, wurden am IME Versuche zum Wasseraufnahme- und Abgabeverhalten an Schmierölen durchgeführt.

Darüber hinaus sollten die Versuche dazu dienen, Erkenntnisse zu gewinnen, inwieweit wechselnde klimatische Bedingungen die Langzeitstabilität biogener Schmierstoffe durch Begünstigung von Hydrolysevorgängen negativ beeinflussen

können. Der Schmierstoffzustand kann nach einer entsprechenden Verweildauer unter Prüfklimaten durch Bestimmung der Neutralisationszahl bewertet werden.

Die Versuchsergebnisse können schließlich dazu genutzt werden, den Wassergehalt im Schmierstoff in Abhängigkeit von Umwelteinflüssen wie Temperatur, Feuchtigkeit und Wirkdauern formelmäßig beschreiben zu können. Zur Verifikation dieses gefundenen Zusammenhanges ist ein Abgleich mit Felddaten möglich, die durch Temperatur-, Feuchte- und Wassergehaltsmessungen an Windkraftanlagen gewonnen wurden.

#### 4.1.2.1.1 Versuchsbedingungen

Die Untersuchungen zur Wasseraufnahme bzw. -abgabe wurden mit Ölen entsprechend folgender Winlub-Kurzbezeichnungen durchgeführt:

- WLOB 1
- WLOR 1
- WLOR 2
- WLOR 3
- WLOR 4

Die Bezeichnungen stehen für WinLub Oil Bio und WinLub Oil Reference, nähere Informationen zur Nomenklatur finden sich im Kapitel 2.1. Die Versuche wurden im Klimaprüfschrank des IME durchgeführt (Bild 4.3). Die im rechten Bildteil dargestellte externe Prüfbox ist für Aggregatversuche mit FE8-Wälzlagerprüfköpfen vorgesehen. Mit dem Prüfschrank können Versuche in einem Temperaturbereich von -60°C bis 180°C durchgeführt werden. Klimaprüfungen, d.h. Prüfungen mit einer geregelten



**Bild 4.3:** Klimaprüfschrank und externe Prüfbox am IME

Feuchte zwischen 10% rel. Feuchte und 95% rel. Feuchte sind in einem Temperaturbereich von +10°C bis +90°C möglich, weitere technische Daten sind in Tabelle 3 wiedergegeben.

<b>Technische Daten</b>		
<b>externe Box:</b>		<b>Klimaprüfschrank:</b>
<b>100 l</b>	<u>Prüfraumvolumen</u>	<b>200 l</b>
<b>-40°C..160°C</b>	<u>Temperaturbereich</u>	<b>-60°C..180°C</b>
	<u>Temperaturschwankung zeitlich</u>	<b>±0,5..1K/min</b>
<b>3,5 K/min</b>	<u>Temperaturänderungsgeschwindigkeit</u>	<b>5 K/min</b>
<b>+10°C..95°C</b>	<u>Temperaturbereich für Klimaprüfungen</u>	<b>+10°C..+95°C</b>
<b>15%..80% rel. F.</b>	<u>Feuchtebereich für Klimaprüfungen</u>	<b>10%..98% rel. F.</b>
	<u>Feuchteschwankung zeitlich</u>	<b>±1..2% rel. F.</b>
	<u>Endtemperatur</u>	<b>-70°C</b>
<b>1000 W</b>	<u>Wärmekompensation bei -30°C</u>	

**Tabelle 3:** Technische Daten Klimaprüfschrank und externe Box

Für die Untersuchungen zur Wasseraufnahme bzw. -abgabe war zunächst die Festlegung geeigneter Temperatur- und Feuchtwerte erforderlich. Zum einen sollten diese geeignet sein, eine signifikante Wasseraufnahme bzw. -abgabe der Schmierstoffe zu bewirken, andererseits sollten sie sich an realen Klimadaten orientieren. Es wurden daher vom deutschen Wetterdienst Temperatur- und Feuchtedaten aus dem Zeitraum 2002 bis 2005 in stündlicher Auflösung von Stationen an der deutschen Nord- und Ostseeküste bezogen. Die Daten der Station UFS TW/Ems sollen die Bewertung der klimatischen Verhältnisse eines Offshore-Standortes ermöglichen, die Klimadaten der Binnenstandorte Braunschweig und Aachen wurden aus Vergleichsgründen ebenfalls angefordert (Bild 4.4).

Mit dem Ziel, Veränderungen der tribologischen Eigenschaften biogener Schmierstoffe aufgrund klimaverursachter Wassergehalte zu untersuchen, wurden die Klimadaten zunächst hinsichtlich des Auftretens besonders hoher Luftfeuchtigkeiten bzw. besonders großer Temperaturwechsel untersucht.

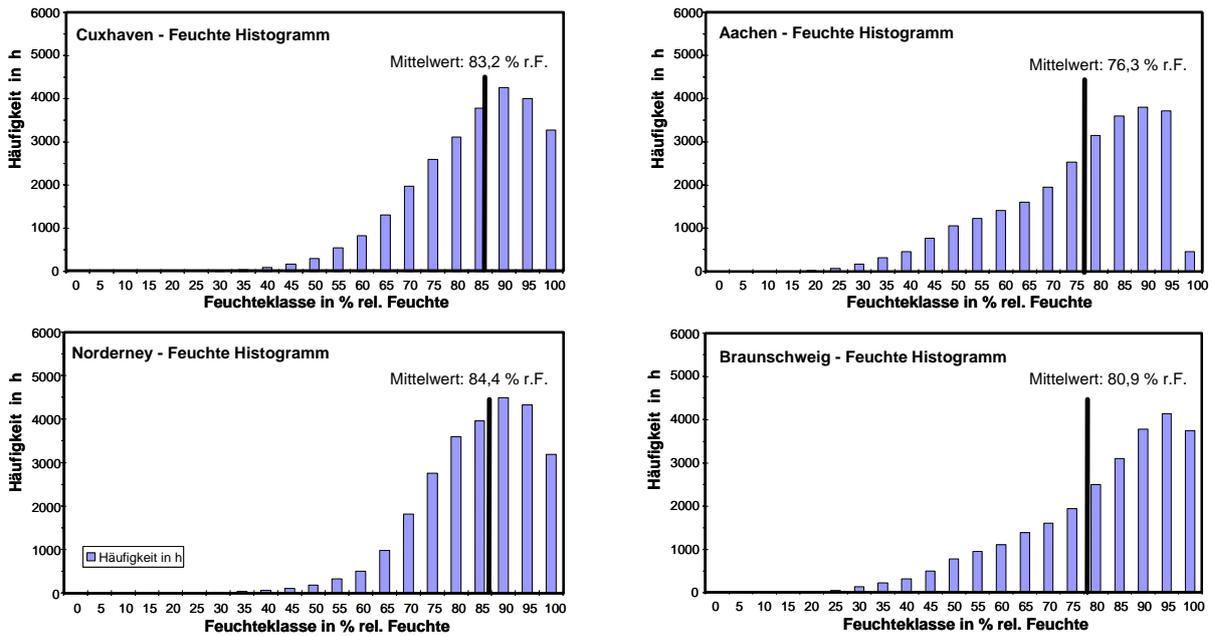
1228: UFS TW/EMS  
 3631: Norderney  
 5640: Wittmundhafen  
 0891: Cuxhaven  
 4393: Sankt-Peter-Ording  
 5930: Olpenitz  
 5930: Greifwalder Oie  
 0662: Braunschweig  
 0003: Aachen

Es liegen vor:  
 Temperatur und Feuchte in stündlicher  
 Auflösung von 2002-2004



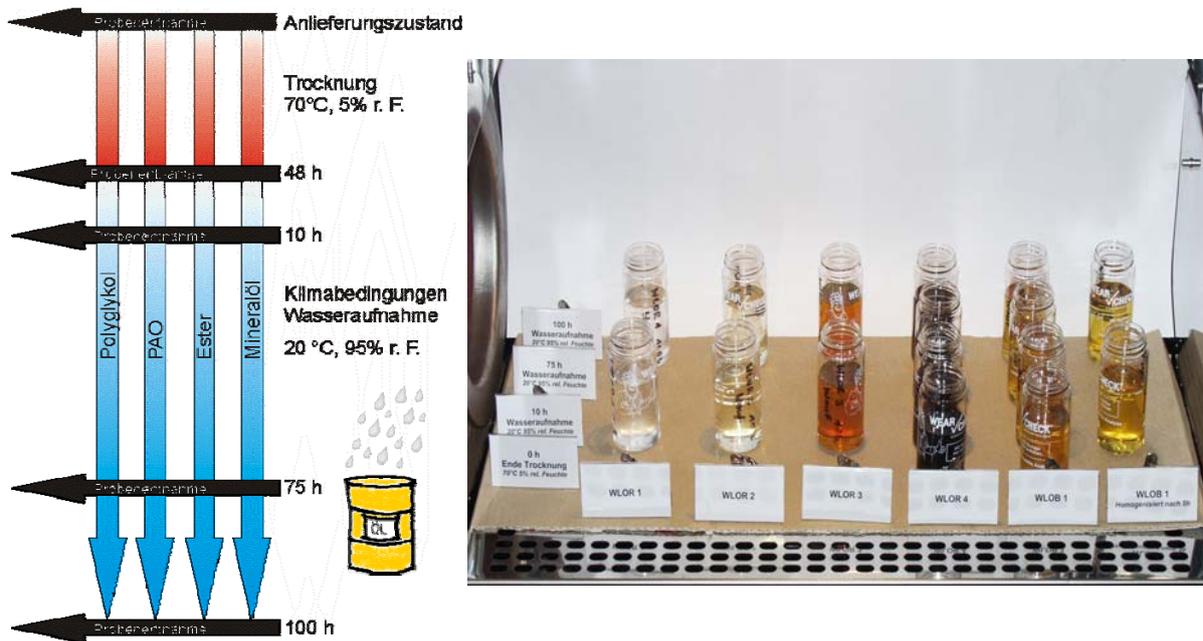
**Bild 4.4:** Klimadaten ausgewählter Stationen, Quelle: DWD

In Bild 4.5 sind für je zwei Küsten- und Binnenstandorte die Feuchtwerte über drei Jahre in Feuchteklassen eingeteilt dargestellt. Den Diagrammen ist zu entnehmen, dass Binnenstandorte geringfügig niedrigere Mittelwerte der relativen Feuchte aufweisen als die Küstenstandorte, insbesondere aber mittlere bis niedrige Feuchtwerte von 30% bis 55% rel. Feuchte deutlich häufiger auftreten als bei Küstenstandorten. Aufgrund dieser Daten wurde der für Versuche zum Wasserabgabeverhalten geeignete Wert auf  $\varphi = 40\%$  rel. Feuchte festgelegt. Alle Histogramme zeigen die größten relativen Zeitanteile bei Werten zwischen  $\varphi = 90\%$  rel. Feuchte und  $\varphi = 95\%$  rel. Feuchte. Um eine signifikante Wasseraufnahme der Schmieröle zu erzielen, wurde der Feuchtwert für aufwässernde Bedingungen auf  $\varphi = 95\%$  rel. Feuchte festgelegt. Die Versuche wurden bei einer Temperatur von einheitlich  $20^\circ\text{C}$  durchgeführt, um eine Beeinflussung der Versuchsergebnisse durch wechselnde Temperaturen ausschließen zu können. Die Schmierstoffe wurden in Probengefäße der Firma Wearcheck eingefüllt, dabei wurden für die Schmierstoffe WLOB 1 und WLOR 4 fünf Proben vorgesehen, um neben dem Wassergehalt im Anlieferungszustand auch die Wassergehalte nach der Trocknung und nach 10 h, 75 h und 100 h unter aufwässernden Umgebungsbedingungen bestimmen zu können. Bild 4.6 zeigt die Aufstellung der Probengefäße im Prüfraum des Klimaschranks.



**Bild 4.5:** Klassierte Feuchtedaten verschiedener Standorte, Quelle: DWD

Der Wassergehalt der Proben wurde bei der Firma Wearcheck mit Hilfe der Titrationmethode nach Karl Fischer (DIN 51777) bestimmt.

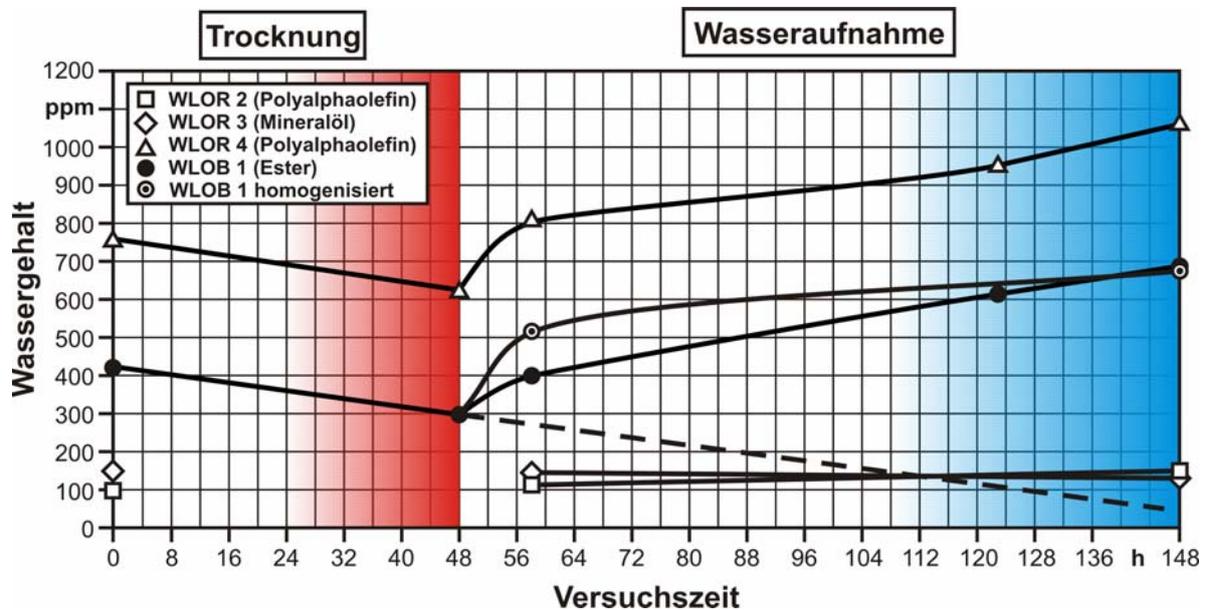


**Bild 4.6:** Versuchsführung und Aufstellung der Probengefäße im Prüfraum

4.1.2.1.2 Ergebnisse

Die folgenden beiden Bilder zeigen die Ergebnisse der Versuche zur Wasseraufnahme bzw. -abgabe im Klimaschrank des IME. Die vor Versuchsbeginn genommenen Proben repräsentierten den Anlieferungszustand der Getriebeöle und wiesen eine große Spannbreite der Wassergehalte auf (Bild 4.7). So wurden in den Schmierölen der Bezeichnungen WLOR 2 (Polyalphaolefin) und WLOR 3 (Mineralöl)

mit 100 ppm bzw. 150 ppm vergleichsweise geringe Wassergehalte nachgewiesen. Demgegenüber befanden sich in einem anderen Schmieröl (WLOR 4) aus der Familie der Polyalphaolefine im Anlieferungszustand ca. 750 ppm Wasser. Der Anfangswassergehalt des biogenen Schmierstoffes auf Esterbasis (WLOB 1) bewegte sich auf einem mittleren Niveau von ca. 420 ppm.



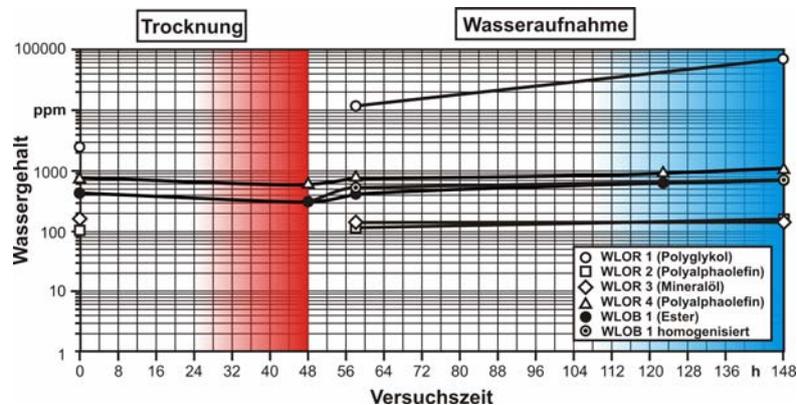
**Bild 4.7:** Ergebnisse der Versuche zur Wasseraufnahme

Die zu erwartende Wasserabgabe der Schmieröle während der anschließenden Versuchsperiode unter entwässernden Klimabedingungen von  $\vartheta = 70^{\circ}\text{C}$  und  $\varphi = 5\%$  rel. Feuchte wurde durch Probenentnahme bei dem biogenen Schmierstoff WLOB 1 und zum Vergleich bei WLOR 4 als Referenz bestimmt. Beide Schmierstoffe zeigen einen vergleichbaren Wasserabgabe-Gradienten; nach 48 h ergibt sich für den Referenzschmierstoff ein Wassergehalt von ca. 610 ppm und für den biogenen Schmierstoff von etwa 300 ppm. Sowohl der biogene als auch der Referenzschmierstoff erreichen also nach dem Versuchsabschnitt unter entwässernden Bedingungen nicht die geringeren Wassergehalte der beiden Schmierstoffe WLOR 2 und WLOR 3. Ein vergleichbares Niveau hätte beispielsweise der biogene Schmierstoff erst nach mehr als 100 h erreicht. Übertragen auf praktische Anwendungsfälle lässt dies die tendenzielle Aussage zu, dass erhöhte Wassergehalte im Schmierstoff nur relativ langsam durch Wasserabgabe an ein geringer gesättigtes Umgebungsmedium wie beispielsweise Luft reduziert werden können.

Während des anschließenden Versuchsabschnittes unter aufwässernden Klimabedingungen bei  $\vartheta = 20^{\circ}\text{C}$  und  $\varphi = 95\%$  relativer Feuchte kam es bei den Schmierstoffen WLOB 1 und WLOR 4 zu einem signifikanten Anstieg der Wassergehalte, während bei den Schmierstoffen WLOR 3 und WLOR 2 kein bzw. nur ein sehr geringer Anstieg des Wassergehaltes beobachtet werden konnte. Dies lässt auf eine

vergleichsweise geringe Wasseraffinität dieser Schmierstoffe schließen, die auch die geringen Anfangswassergehalte erklärt.

Für den biogenen Schmierstoff WLOB 1 wurden parallel zu drei Proben, die nach 10 h, 75 h und 100 h entnommen wurden, zwei weitere Proben untersucht, die nach 5 h unter aufwässernden Bedingungen durch Umrühren homogenisiert wurden (vgl. Bild 4.7). Dadurch sollten reale Betriebsbedingungen beispielsweise in einem Getriebe simuliert werden, bei dem ein vertikaler Sättigungsgradient, wie er sich bei den unbewegten Probegefäßen im Schmierstoff während des Versuches einstellt, nicht auftritt. Nach dem Homogenisieren kommt vergleichsweise gering gesättigter Schmierstoff an der Oberfläche mit der aufwässernden Umgebungsluft in Kontakt, wodurch zunächst eine schnellere Wasserzunahme als bei der entsprechenden nicht homogenisierten Probe auftritt. Dieser Effekt gleicht sich allerdings bis zum Ende des Versuches wieder aus, sodass sich nach 148 h ein vergleichbarer Wassergehalt von etwa 700 ppm einstellt. Der Referenzschmierstoff WLOR 4 zeigt unter aufwässernden Bedingungen mit einer Zunahme um ca. 400 ppm eine ähnliche Wasseraufnahme wie der biogene Schmierstoff, allerdings ergibt sich aufgrund des höheren Startniveaus nach der Trocknungsphase ein entsprechend höherer Endwert von über 1000 ppm. Im Bild 4.8 sind die Verläufe der Wassergehalte aus dem vorigen Bild mit logarithmischer Teilung der Ordinate noch einmal dargestellt.



**Bild 4.8:** Ergebnisse der Versuche zur Wasseraufnahme mit Polyglykol

Dadurch ist es möglich, den Wassergehalt des Polyglykols WLOR 1 über der Versuchsdauer darzustellen. Bereits im Anlieferungszustand vor Versuchsbeginn wies dieser Schmierstoff einen Wassergehalt von ca. 2500 ppm auf, der bis zum Versuchsende auf etwa 70000 ppm (7%) anstieg. Dies ist mit der bekannt hohen Wasseraffinität der Polyglykole gut erklärbar.

#### 4.1.2.2 Untersuchungen zum zeitlichen Wasseraufnahmeverhalten von Ölen

Zur detaillierteren Untersuchung der Frage, wie und insbesondere in welchen Zeiträumen Wasser aus der Umgebung durch Ausgleichsvorgänge in Schmierstoffe eindringen kann, wurden in der Klimakammer des IME Wasseraufnahmeversuche mit

und ohne erzwungene Konvektion durch Rühren des Schmierstoffes durchgeführt (Bild 4.9). Dazu wurde eine exakt abgemessene Ölmenge in eine quadratische Edelstahlwanne eingebracht, an dessen Seitenwand ein Umwälzthermostat angebracht war. Ohne Nutzung der Heizfunktion konnten durch wahlweisen Umwälzbetrieb Bedingungen mit erzwungener Konvektion im Schmierstoff oder natürliche Konvektion als Rahmenbedingung für die Befeuchtungsversuche eingestellt werden.

▪ **Versuchsbedingungen**

**Lufttemperatur:**

konstant 55 °C

**relative Luftfeuchte:**

stufenweise Erhöhung,  
20 %, 30 %, 50 %, 90%

**Öltemperatur:**

gleich bleibend ca. 58 °C

**relative Ölfeuchte:**

Messpunkt in Wannemitte,  
50 mm unter der Oberfläche

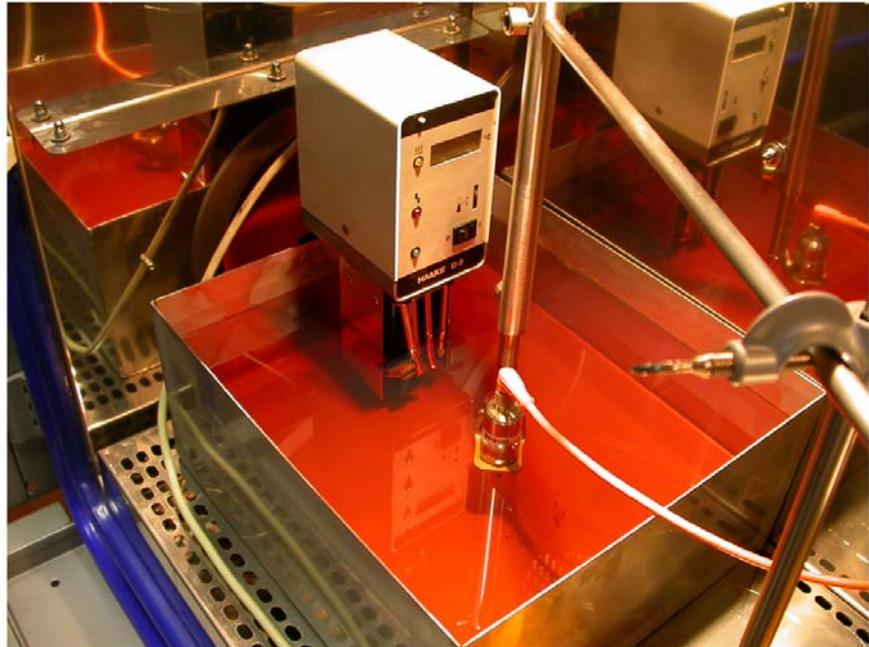
**Oberfläche Ölspiegel:**

1206 cm<sup>2</sup>

**Ölvolumen:**

14,2 l;

Temperierung und  
Umwälzung aggregat-  
unterstützt möglich



**Bild 4.9:** Wasseraufnahmeverhalten WLOB 1, erzwungene Konvektion

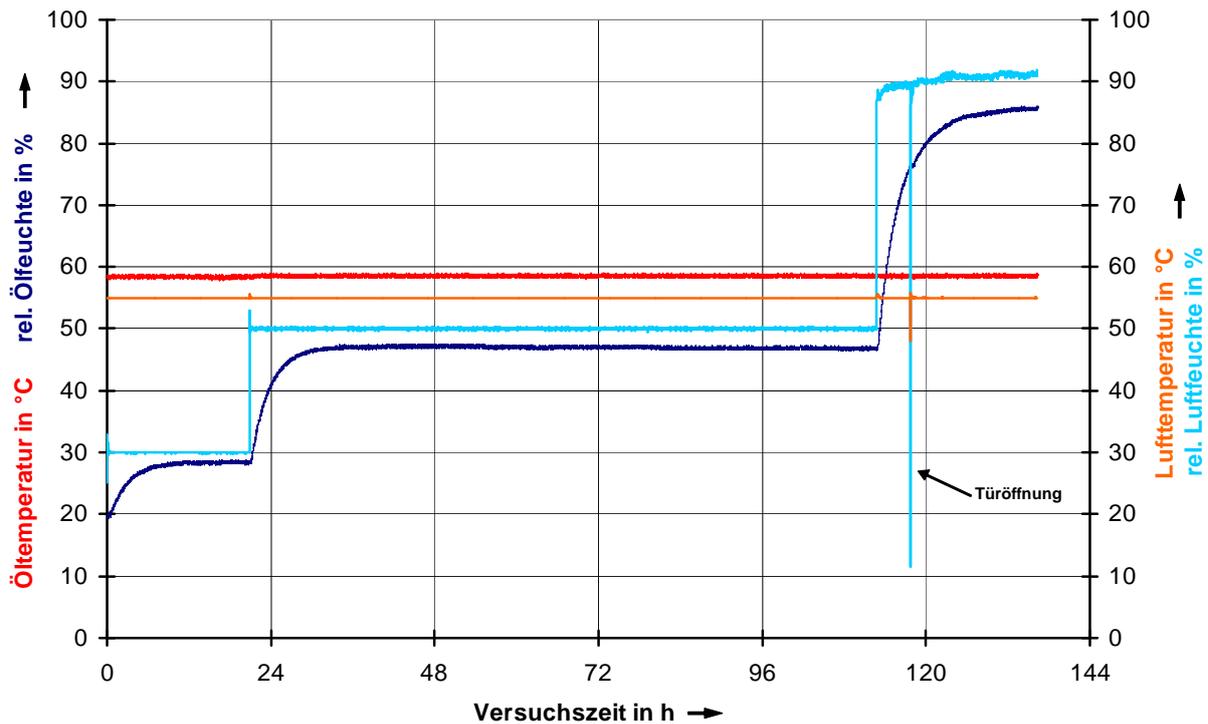
Dabei zeigte sich erwartungsgemäß bei erzwungener Konvektion eine vergleichsweise schnelle Anpassung der Ölfeuchte von WLOB 1 an eine sprunghaft geänderte Luftfeuchte innerhalb von ca. 12 h (Bild 4.10). Das Verhalten der Ölfeuchte  $\varphi_{\text{öI}}$  in Abhängigkeit der Umgebungsfeuchte  $\varphi_{\text{U}}$  lässt sich für WLOB 1 mit Hilfe des formelmäßigen Zusammenhanges

$$\varphi_{\text{öI}}(t) = \varphi_{\text{U}} + (\varphi_{\text{Start}} - \varphi_{\text{U}}) \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad 4.1$$

mit der Zeitkonstanten

$$\tau \approx 170 \text{ min} \quad 4.2$$

beschreiben.



**Bild 4.10:** Wasseraufnahmeverhalten WLOB 1, erzwungene Konvektion

Von besonderem Interesse hinsichtlich der Wasseraufnahme während Stillstandszeiten der WEA sind Versuche ohne erzwungene Konvektion, also mit ruhendem Ölspiegel. Wiederum erwartungsgemäß verlängern sich hierbei die Anpassungsvorgänge, sodass erst nach etwa 40 h ein Angleich der relativen Feuchten von Öl und Umgebungsluft eintritt (Bild 4.11).

Die Untersuchungen zur Wasseraufnahme von WLOB 1 zeigen, dass sich Schwankungen der Luftfeuchte in unmittelbarer Umgebung des Öls in technisch relevanten Zeiträumen auf die Ölfeuchte und damit auch auf den Wassergehalt im Öl auswirken. Die Luft im Getriebegehäuse steht in stetigem Austausch mit der Umgebungsluft, [Nag81], so dass ein Netto-Wassertransport in das Getriebe hinein unter bestimmten Umständen denkbar ist. In diesem Zusammenhang sei auf die Aufzeichnungen der Lufttemperatur und -feuchte im Getriebeinnenraum in den beiden Feldversuchs-Windkraftanlagen im Windpark Bockelwitz verwiesen, s. Kapitel 4.3.2.5.

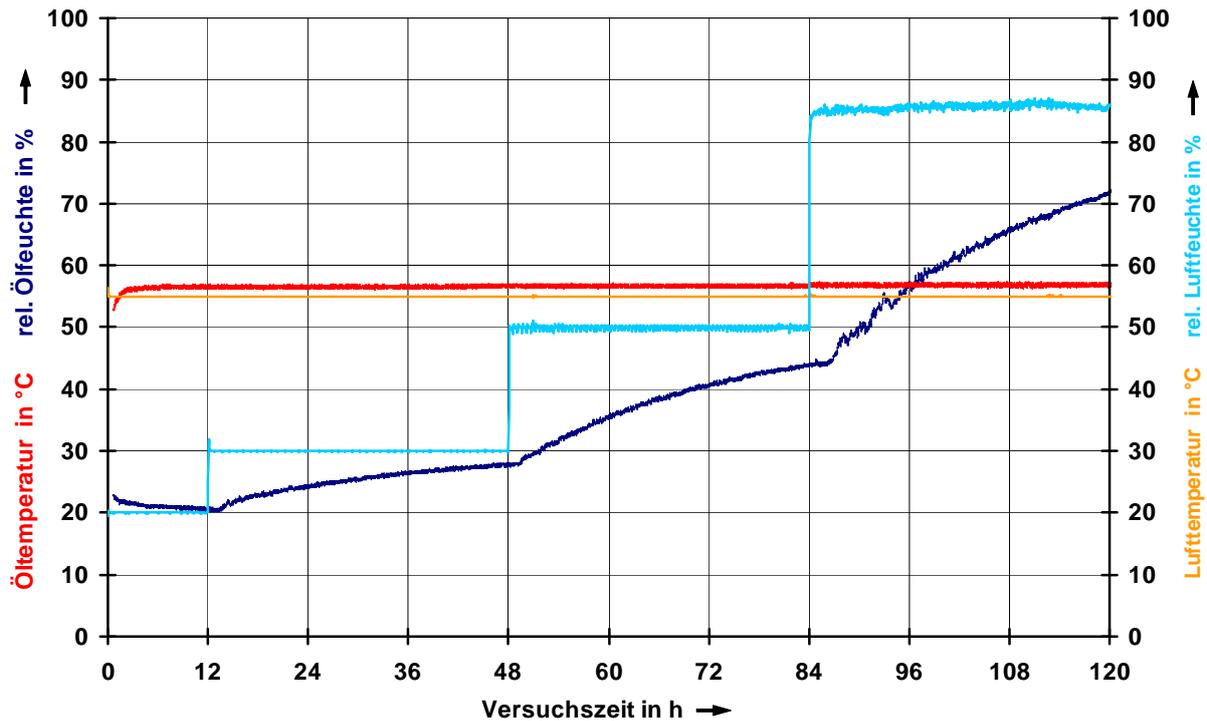
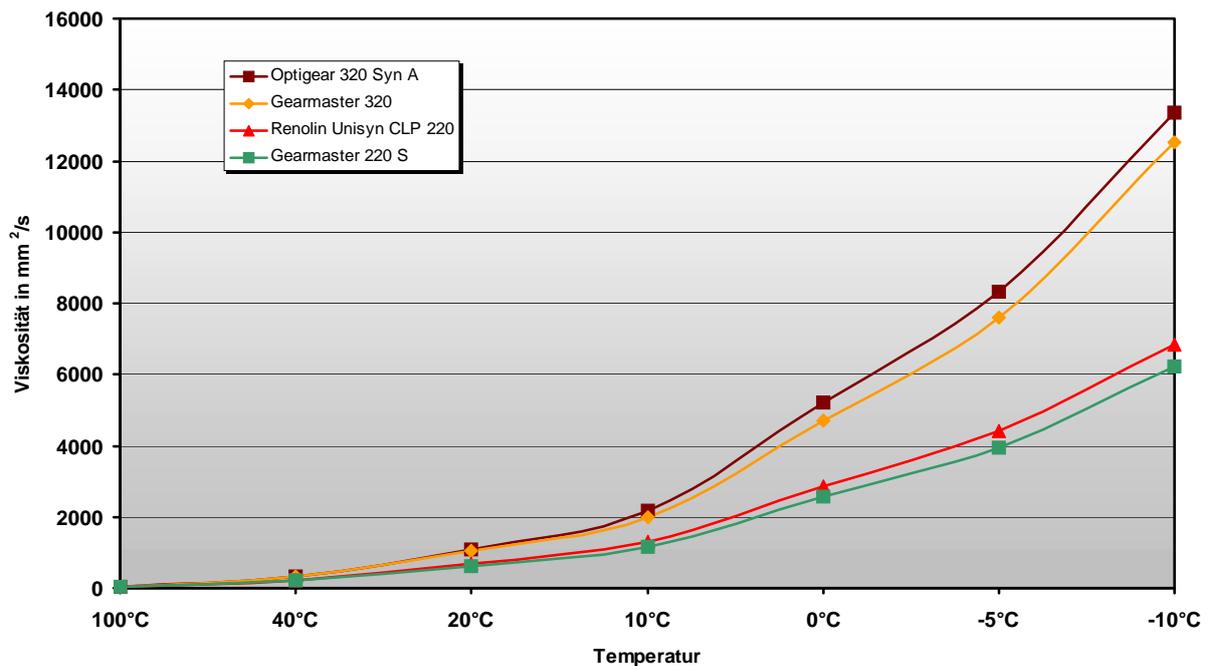


Bild 4.11: Wasseraufnahmeverhalten WLOB 1, natürliche Konvektion

#### 4.1.2.3 Bestimmung von Tieftemperaturviskositäten

Als Vorarbeit zu den Untersuchungen zur Substitution von konventionellem Schmieröl durch biogenes Schmieröl bzw. Schmierfett in Pitchgetrieben, s. Kapitel 4.2.3.1, wurden von der Firma FUCHS für die Schmieröle WLOR 4 und WLOB 1 sowie für die beiden niedrigviskoserer Schmieröle Renolin Unisyn CLP 220 und Gearmaster 220S die Viskositäten in einem Temperaturbereich von  $\vartheta = 100^{\circ}\text{C} \dots -10^{\circ}\text{C}$  bestimmt (Bild 4.12). Dabei zeigten sich erwartungsgemäß insbesondere im negativen Temperaturbereich zwei deutlich unterscheidbare Viskositäts-Niveaus, wobei die beiden Öle mit einer Viskosität von  $\nu = 320 \text{ mm}^2/\text{s}$  ( $40^{\circ}\text{C}$ ) bei der Temperatur von  $\vartheta = -10^{\circ}\text{C}$   $\nu = 12000 \text{ mm}^2/\text{s}$  erreichen, die niedrigviskoserer Öle mit einer Viskosität von  $\nu = 220 \text{ mm}^2/\text{s}$  ( $40^{\circ}\text{C}$ )  $\nu = 6500 \text{ mm}^2/\text{s}$ .

In den Verläufen der Viskosität über der Temperatur zeigt sich nur ein sehr geringer Unterschied zwischen dem konventionellen Schmierstoff WLOR 4 und dem biogenen WLOB 1. Im Hinblick auf den erforderlichen Nachweis einer Einsetzeignung von Schmierstoffen in Windkraftanlagen bis  $\vartheta = -40^{\circ}\text{C}$  lassen die Untersuchungsergebnisse den Schluss zu, dass sinnvollerweise niedrigviskosere Öle bzw. Fette mit einer niedrigen Grundölviskosität von  $\nu < 220 \text{ mm}^2/\text{s}$  ausgewählt werden müssen. Dies gilt in besonderer Weise für den Einsatz bei Pitchgetrieben, da hier die Betriebsbedingungen durch vergleichsweise lange Stillstandszeiten bei relativ kurzen Laufzeiten charakterisiert sind. Darüber hinaus befinden sich die Pitchgetriebe in exponierter klimatischer Lage in den Blattwurzeln bzw. der Nabe und weisen durch ihre Ausführung als



**Bild 4.12:** Tieftemperaturviskositäten

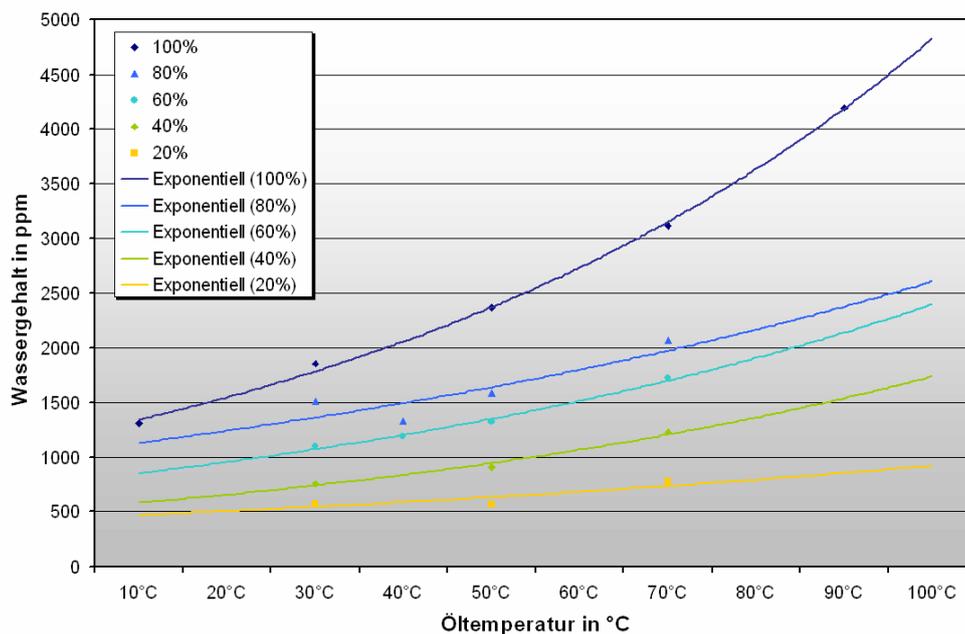
mehrstufige Planetengetriebe großvolumige umlaufende Bauteile (Planetenstege, Planetenräder) auf, deren Bewegung in einer hochviskosen Umgebung (geplanter Einsatz von Fetten!) hohe Antriebsmomente erfordert. Eine nennenswerte Erwärmung des Getriebes und eine damit verbundene Verringerung der Viskosität ist hier im allgemeinen Fall nicht zu erwarten, sodass mit Schwierigkeiten (hohe Anlaufmomente bzw. -ströme) bei der Verwendung von höherviskosen Schmiermitteln zu rechnen ist.

#### 4.1.2.4 Ermittlung von Wassergehalts-Feuchte-Relationen als Funktion der Temperatur für die beiden Feldversuchs-Öle

Die am IME durchgeführten praxisnahen Aggregatversuche zum Einfluss von Wasser auf die Leistungsfähigkeit der untersuchten Schmierstoffe waren nur möglich durch den Aufbau einer Wassergehaltsregelung wie in Kapitel 4.1.3.2 für das FE8-Wälzlager-Prüfgerät und in Kapitel 4.1.3.4 für den Planetengetriebeverspannungsprüfstand beschrieben.

Da des Messprinzip des HYDAC-Sensors auf der Bestimmung relativer Ölfeuchten über den Ausgleich von Wasserdampf-Partialdrücken zwischen dem Öl und einem Polymer, das als Dielektrikum durch Wasseraufnahme die elektrischen Eigenschaften eines Kondensators verändert, beruht, wird mit der Wassergehaltsregelung eigentlich die Ölfeuchte geregelt. Zur Realisierung eines konstanten Wassergehaltes über den gesamten Versuchszeitraum muss eine gleich bleibende Temperatur sichergestellt sein, denn die relative Ölfeuchte ist eine Funktion der Öltemperatur, ähnlich der relativen Luftfeuchte. Steigt also beispielsweise während des Versuches die Öltemperatur an, nimmt sofort die Ölfeuchte ab und die Regelung würde Wasser zugeben, um das alte Feuchteniveau wieder zu erreichen. Dies würde natürlich zu einem höheren Wassergehalt führen.

Darüber hinaus ist für die Praxis weniger die relative Ölfeuchte für die Wasserbeladung relevant als die Angabe des Wassergehaltes in ppm, denn bei der Entnahme von Ölproben aus Windkraftgetrieben wird üblicherweise der Wassergehalt in ppm bestimmt. Um eine Zuordnung der Feuchten aus den Aggregatversuchen zu praxisüblichen Wassergehalten zu ermöglichen, wurden am IME für die beiden Feldversuchs-Öle WLOB 1 und WLOR 4 durch systematische Befeuchtung bei unterschiedlichen Temperaturen und anschließende Bestimmung der Wassergehalte nach der indirekten Karl-Fischer-Methode bei der Firma Wearcheck Relationen von Wassergehalten zu relativen Feuchten für einen weiten Temperaturbereich ermittelt. Bei WLOB 1 hat dieses Verfahren die in Bild 4.13 dargestellte Kurvenschar ergeben. Die so am IME ermittelten Verläufe für  $\varphi = 20\% \dots 80\%$  ordnen sich sehr gut unter der von FUCHS Lubritech zur Verfügung gestellten Kurve für  $\varphi = 100\%$  (Sättigungskurve) ein. Lediglich der Verlauf für  $\varphi = 80\%$  erscheint bei höheren Temperaturen oberhalb etwa  $\vartheta = 40^\circ\text{C}$  zu flach, hier haben sich bereits während der Versuche aufgrund von Verdunstungsvorgängen Probleme ergeben, den hohen Feuchtwert von  $\varphi = 80\%$  zu erreichen. Hier ist bei einer Gesamtbetrachtung aller Verläufe eine Lage in etwa in der Mitte zwischen den Verläufen von  $\varphi = 60\%$  und  $\varphi = 100\%$  als realistisch anzusehen.

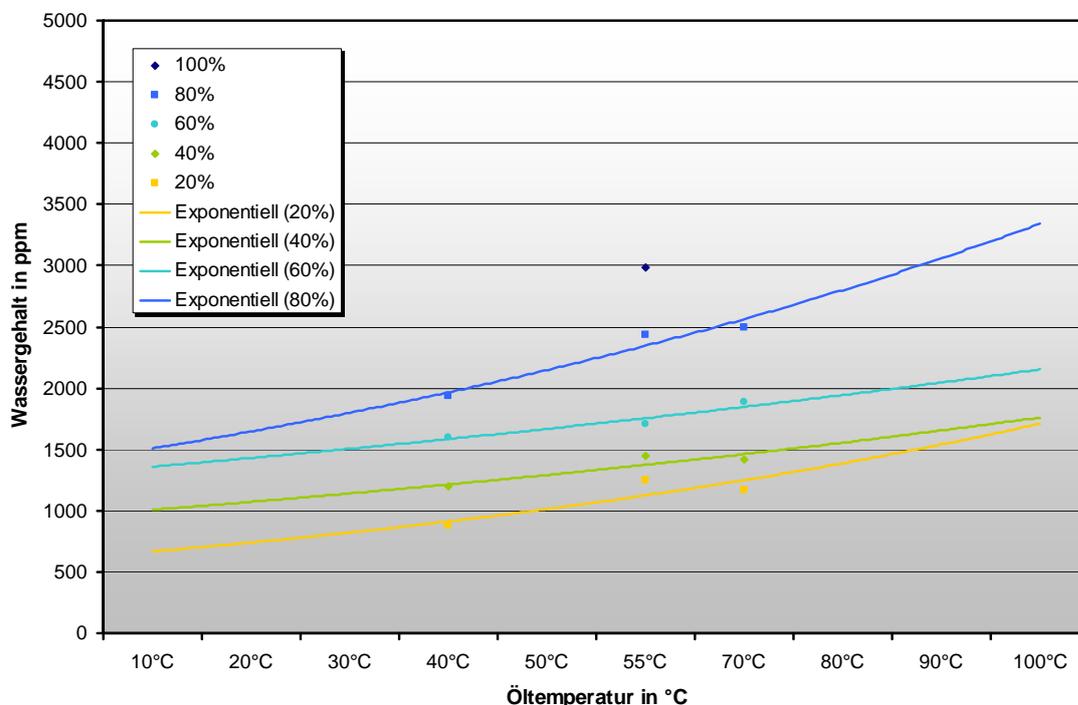


**Bild 4.13:** Wassergehalt von WLOB 1 in Abhängigkeit von Temperatur und Feuchte

Die gleiche Vorgehensweise hat bei dem Referenzschmierstoff WLOR 4 die in Bild 4.14 dargestellten Ergebnisse erbracht. Es lassen sich ebenfalls verschiedene Feuchteniveaus unterscheiden, wobei insgesamt Wassergehaltsbestimmungen nach der Karl-Fischer-Methode dann problematisch sein können, wenn die Schmierstoffprobe mit den in den unpolaren Schmierstoff inhomogen verteilten Wassermolekülen ohne vorherige Homogenisierung der Analyse zugeführt wird. Darüber hinaus ist bei einem hoch additivierten Schmierstoff in Anwesenheit von

Wasser immer auch eine mögliche hydrolytische Spaltung, d. h. der Zerfall der Additive unter Wasserverbrauch zu berücksichtigen.

Die Zugabe von Wasser führt bei WLOR 4 bereits ohne mechanische oder thermische Belastung zu schlammartigen Ablagerungen, vgl. Kapitel 4.1.3.5, in denen sich zu hohen Anteilen anorganische Elemente wie Phosphor oder Molybdän finden, die nur aus Additiven stammen können. Die in den Feldversuchen beobachtete Schlammbildung bei WLOR 4 tritt bereits bei niedrigeren Wassergehalten auf, vgl. Kapitel 4.3.2.6, als sie bei der Befeuchtung vor den Filtrierbarkeitstests erreicht werden (vgl. Bild 4.14 und Bild 4.46). Als Erklärung hierfür ist eine Begünstigung der hydrolytischen Spaltung der Additive durch die Temperatur- und Druckverhältnisse der elasto-hydrodynamischen Kontakte (EHD) in Wälzlagern und Zahneingriffen denkbar.



**Bild 4.14:** Wassergehalt von WLOR 4 in Abhängigkeit von Temperatur und Feuchte

Insgesamt zeigen beide Schmierstoffe für mittlere Schmierstofffeuchten über den untersuchten Temperaturbereich ähnliche Wassergehalte, bei der niedrigsten Feuchte von  $\varphi = 20\%$  liegen die bei WLOR 4 bestimmten Wassergehalte sogar über den für WLOB 1 gemessenen. Dies widerspricht auf den ersten Blick Angaben in der Literatur, [Sey05], wird aber mit Blick auf die in WLOR 4 in hoher Konzentration vorhandenen Additive verständlich, die durch ihren häufig polaren Charakter die Lösungsfähigkeit des Schmierstoffes für polare Wassermoleküle deutlich erhöhen.

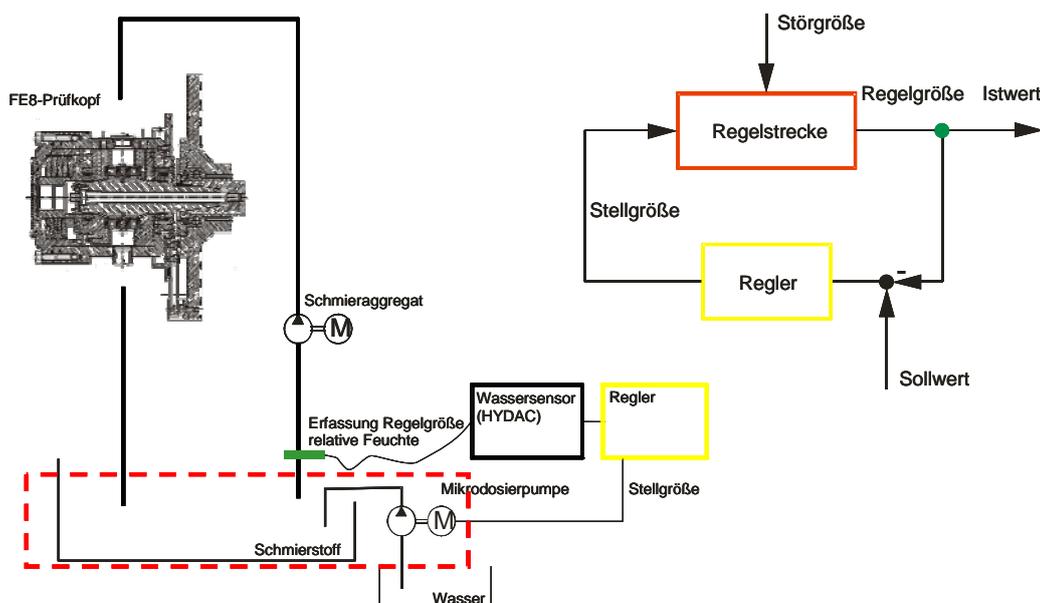
Die in den beiden Bildern dargestellten Relationen zwischen Schmierstofffeuchten und Wassergehalten bei verschiedenen Temperaturen ermöglichen eine Zuordnung der bei vielen Versuchen eingestellten Schmierstofffeuchte zu den praxisüblicheren Wassergehalten.

### 4.1.3 Prüfstandsuntersuchungen

#### 4.1.3.1 Prüfstands Aufbau für FE8-Wälzlagerversuche zum Einsatzverhalten biogener Öle mit Wasserbeladung

Im Rahmen des Vorhabens Winlub sind Untersuchungen zum Einsatzverhalten biogener Öle in FE8- und Getriebeprüfständen geplant. Ein Schwerpunkt bildet dabei die Ermittlung kritischer Wassergehalte der Schmierstoffe hinsichtlich Bauteilermüdung und -verschleiß. Bei den dafür erforderlichen langen Versuchszeiten von bis zu 500 h tritt aber insbesondere bei erhöhten Schmierstofftemperaturen durch die Reibung im Wälz- bzw. Zahnkontakt sowohl bei Öl- als auch bei Fettuntersuchungen eine deutliche Abnahme des Wassergehaltes auf, vgl. Kapitel 4.2.3.4.

Zur Identifizierung kritischer Wassergehalte ist es hingegen erforderlich, den Wassergehalt über die gesamte Versuchsdauer konstant zu halten. Zu diesem Zweck wurde am IME als Vorarbeit für die im Rahmen des Vorhabens geplanten FE8- und Getriebeuntersuchungen zunächst eine Versuchs-Regelung zur Konstanthaltung des Wassergehaltes im Schmierstoff konzipiert. Bild 4.15 zeigt den schematischen Aufbau dieser Regelung. Die Regelstrecke bildet der Tank des Schmieraggregates, der Istwert der relativen Feuchte des Schmierstoffs wird mit einem Feuchtesensor der Firma HYDAC gemessen. Der so ermittelte Feuchte-Istwert wird im Regler mit dem Sollwert verrechnet und daraus eine Stellgröße gebildet, die zur Ansteuerung einer Mikrodosierpumpe dient. Mit Hilfe der Mikrodosierpumpe wird dem Schmieröl im Tank Wasser in dem Maße zugegeben, wie es durch Verdunstungsvorgänge im Prüfbetrieb aus dem Schmierstoff austritt.



**Bild 4.15:** Schema der Regelung des Wassergehaltes im Schmierstoff am FE8-Prüfstand

Zur Ermittlung geeigneter Regelparameter waren zunächst Voruntersuchungen zum Verhalten der Regelstrecke erforderlich. Dafür wurde dem Schmieröl im Tank mit einem Volumen von 4,5 l Wasser bei verschiedenen Temperaturen Öl zugegeben und

die Antwort der Regelstrecke auf diese impulsförmige Anregung in Form einer Zunahme der relativen Feuchte aufgezeichnet (Bild 4.16). Den Diagrammen in der oberen Bildhälfte ist zu entnehmen, dass die Antwortzeit der Regelstrecke, d.h. die Zeit, die von der Wasserzugabe bis zum Erreichen des maximalen Feuchtwertes vergeht, mit zunehmender Temperatur abnimmt. Diese Zeit liegt bei den beschriebenen Bedingungen und einer Öltemperatur von  $\vartheta_{\text{Öl}} = 25^\circ\text{C}$  bei etwa 40 min und nimmt bei einer Öltemperatur von  $\vartheta_{\text{Öl}} = 78^\circ\text{C}$  bis auf etwa 8 min ab. Mit zunehmender Öltemperatur gewinnen Verdunstungsvorgänge an Einfluss, sodass die Wasserzugabe bei  $\vartheta_{\text{Öl}} = 78^\circ\text{C}$  von  $V_{\text{H}_2\text{O}} = 2 \text{ ml}$  auf  $V_{\text{H}_2\text{O}} = 5 \text{ ml}$  erhöht wurde. Nach Erreichen eines Feuchte-Maximalwertes von etwa 40% rel. Feuchte ist hier deutlich beginnende Verdunstung in Form einer beginnenden Feuchteabnahme zu erkennen.

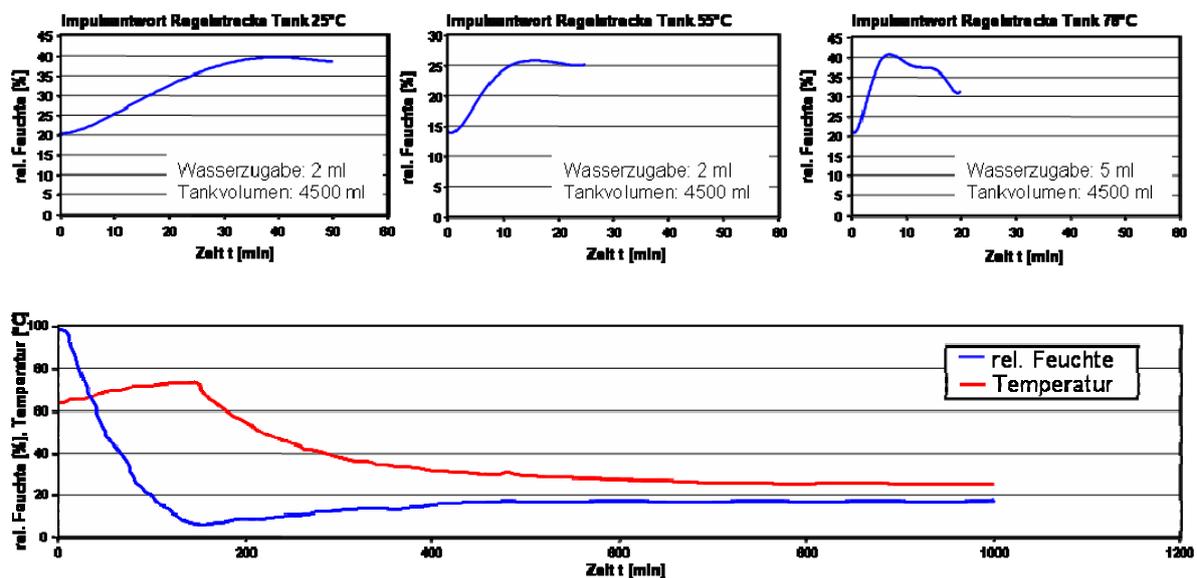


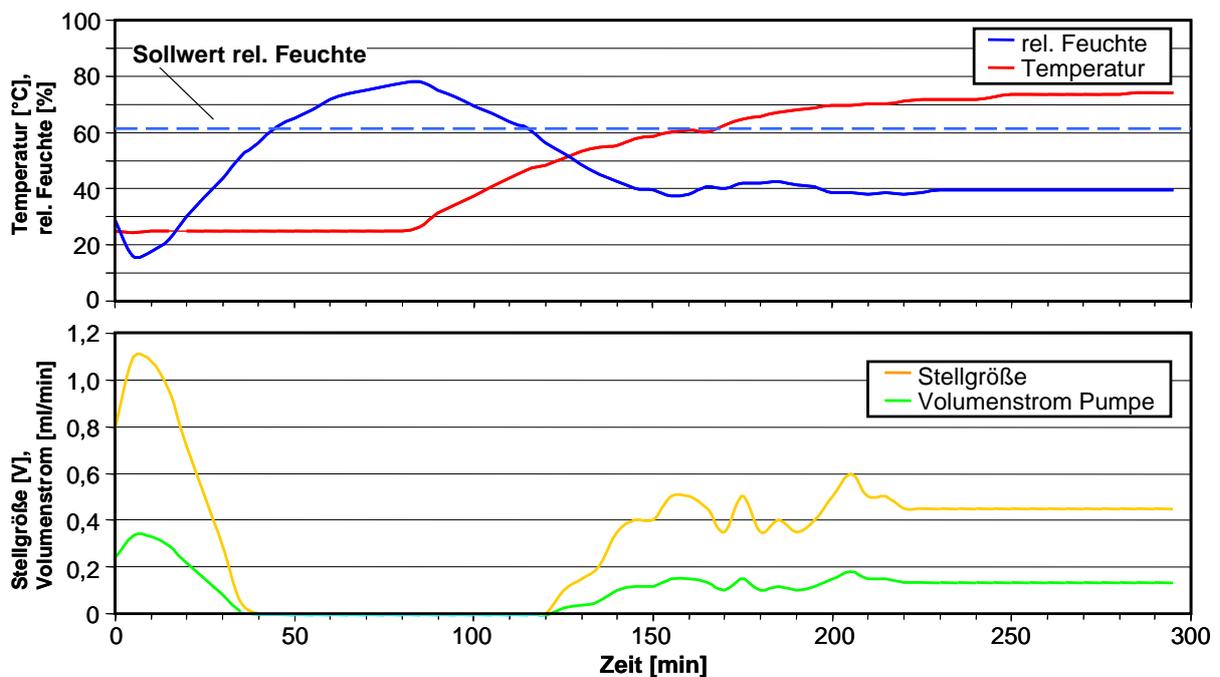
Bild 4.16: Studien zum Verhalten der Regelstrecke

Um den „Trocknungsvorgang“ des Öls näher zu untersuchen, wurden die Verläufe von Temperatur und rel. Feuchte über 1000 min aufgezeichnet (vgl. Bild 4.19 untere Bildhälfte). Zu Beginn der Aufzeichnung wies das Öl eine relative Feuchte von etwa  $\vartheta_{\text{Öl}} = 100\%$  bei einer Temperatur von  $\vartheta_{\text{Öl}} = 63^\circ\text{C}$  auf. Dann wurde das Öl auf  $\vartheta_{\text{Öl}} = 75^\circ\text{C}$  aufgeheizt, die relative Feuchte nahm im Lauf von etwa 170 min auf etwa  $\vartheta_{\text{Öl}} = 10\%$  ab. Nach 170 min wurde die Heizung abgeschaltet, die Öltemperatur nahm daraufhin in etwa 9 Stunden bis auf Raumtemperatur ab, die relative Feuchte nahm auf etwa  $\vartheta_{\text{Öl}} = 19\%$  zu.

Da zu Versuchsende des „Trocknungsvorganges“ eine geringere relative Feuchte bei niedrigerer Temperatur als zu Versuchsbeginn vorlag, muss Verdunstung stattgefunden haben, d. h. der absolute Wassergehalt reduziert worden sein.

Diese Grundlagenuntersuchungen sind auch für den Anwendungsfall Windkraftanlage interessant, da sie zeigen, in welchen Zeiträumen und in welchem Umfang im Öl befindliches Wasser durch die Erwärmung im Betrieb aus dem Öl verdunstet. Mit den durch die Untersuchungen zum Verhalten der Regelstrecke gewonnenen Kenntnissen

war es möglich, geeignete Parameterwerte für die Einstellung des Reglers zu berechnen. Dabei wurde der Regler zunächst nur als Proportional (P-) Regler eingestellt. Das Ergebnis eines ersten Betriebsversuches der Regelung ist im Bild 4.17 dargestellt. Der Versuch begann bei Raumtemperatur mit einer relativen Ölfeuchte von  $\vartheta_{\text{Öl}} = 30\%$ . Bei einer Sollwertvorgabe von  $\vartheta_{\text{Öl, soll}} = 60\%$  gab der Regler eine Stellgröße von 0,8 V aus, worauf die Pumpe dem Öl Wasser mit einem Volumenstrom von  $\dot{V}_{\text{H}_2\text{O}} = 0,2 \text{ ml/min}$  zuführt. Die Wasserzufuhr wird (mit abnehmendem Volumenstrom) fortgesetzt, bis der Feuchte-Sollwert im Öl erreicht ist. Aufgrund der Trägheit der Regelstrecke läuft der Feuchte-Istwert über den Sollwert auf ca.  $\vartheta_{\text{Öl}} = 80\%$  hinaus. Daraufhin wurde das Öl aufgeheizt, um so die Verdunstung zu beschleunigen und den Wert der relativen Feuchte wieder zu reduzieren. Bei Unterschreiten des Feuchte-Sollwertes setzt die Regelung wieder ein und führt nach Einschwingvorgängen dem Öl Wasser mit einem gleich bleibenden Volumenstrom von  $\dot{V}_{\text{H}_2\text{O}} = 0,15 \text{ ml/min}$  zu.



**Bild 4.17:** Das Verhalten der Regelung

Aufgrund des Betriebs der Heizung stellt sich ab einem Zeitpunkt von  $t = 230 \text{ min}$  eine Temperatur von  $\vartheta_{\text{Öl}} = 75^\circ\text{C}$  ein. Da ab diesem Zeitpunkt die relative Feuchte bei  $\vartheta_{\text{Öl}} = 40\%$  konstant bleibt, muss der zugeführte Wasser-Volumenstrom gleich dem Verdunstungs-Volumenstrom  $\dot{V}_{\text{H}_2\text{O, Verdunstung}}$  sein.

Dies ist der für die Versuchsdurchführungen an den FE8- und Getriebepfprüfständen gewünschte Zustand, allerdings weist eine reine P-Regelung eine prinzipbedingte bleibende Regelabweichung auf, in diesem Fall von 20 Prozentpunkten Differenz zum Feuchte-Sollwert. Eine bleibende Regelabweichung kann durch die Eingabe geeigneter Parameter für ein integratives (I-) Verhalten des Reglers kompensiert

werden. Versuche mit entsprechenden PI- Reglereinstellungen haben ein Regelverhalten mit einer Feuchte-Istwertschwungung von  $\pm 10\%$  um den Sollwert ergeben. Ein solcher Feuchte-Istwertverlauf wurde für die geplanten Versuche als hinreichend genau angesehen. Nach Abschluss der Voruntersuchungen wurde die Regeleinrichtung vom Versuchsaufbau auf ein reales Schmieraggregat übertragen, um zeitnah mit den geplanten Versuchen unter konstanten Wassergehalten beginnen zu können.

#### 4.1.3.2 FE8-Wälzlagerversuche mit geregelter Feuchte zur Bestimmung verschleißkritischer Wassergehalte

Zur Bestimmung kritischer Wassergehalte hinsichtlich Wälzlagerverschleiß wurden FE8-Versuche mit einem Schmieraggregat durchgeführt, das es durch Implementierung der in Kapitel 4.1.3.1 vorausgelegten Regelung ermöglichte, die Feuchte im Schmierstoff stufenförmig von 10% rel. Feuchte bis 90% rel. Feuchte zu steigern (Bild 4.18). Da bei diesen Versuchen die Öltanktemperatur während der gesamten Versuchsdauer gleich bleibend bei ca. 49°C lag, kann in sehr guter Näherung davon ausgegangen werden, dass die stufenweise Erhöhung der Feuchte gleichbedeutend mit einer stufenweisen Erhöhung des Wassergehaltes war.

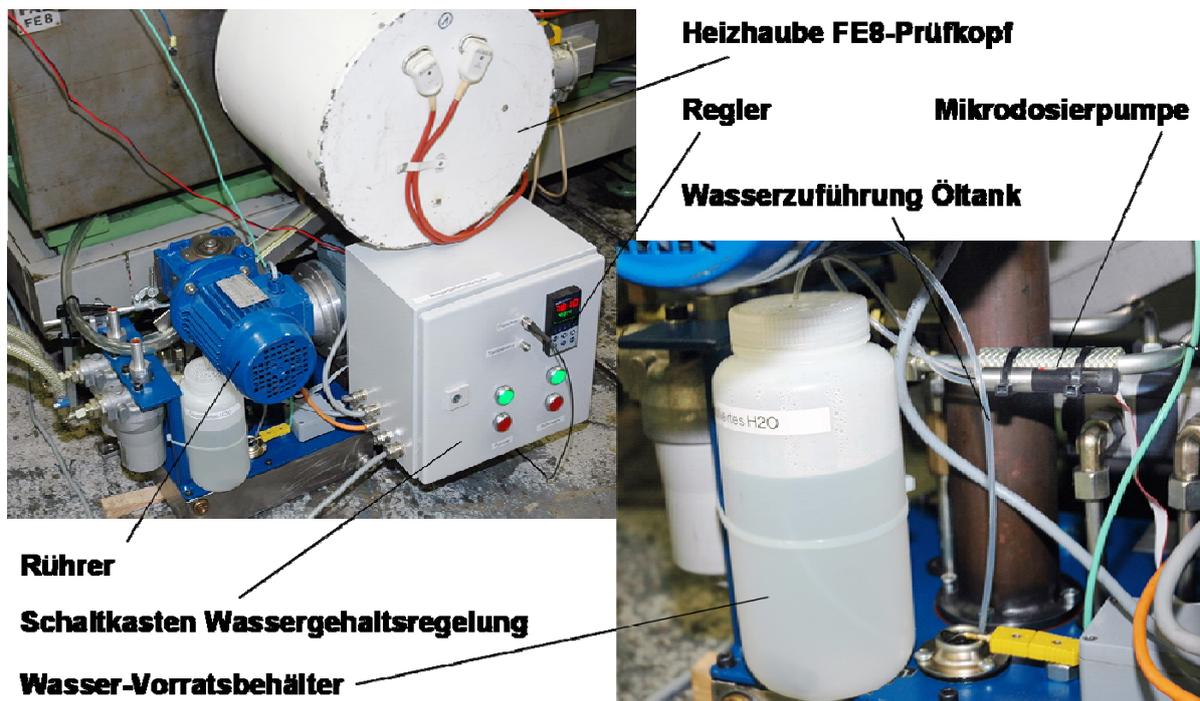


Bild 4.18: Schmieraggregat mit Wassergehaltsregelung

Begleitend wurde zur Versuchsüberwachung eine Kontaktspannungsmessung eingesetzt (Bild 4.19). Diese ermöglicht es, Veränderungen des elektrischen Kontaktwiderstandes zwischen Wälzkörpern und Laufbahnen durch Ausbildung einer Reaktions- oder Triboschutzschicht bzw. deren unterbleibende Ausbildung permanent zu überwachen. Direkt gemessen wird bei dieser Anordnung der Spannungsabfall am Kontakt, verursacht durch den Ohm'schen Widerstand der Triboschutzschicht. In der

Folge wird vereinfachend von der Kontaktspannung gesprochen. Die Kontaktspannungsmessung erlaubt in Kombination mit der stufenweisen Erhöhung der Schmierstofffeuchte einen Übersichtsversuch zur Beantwortung der Frage, ob überhaupt oder auf welchem Feuchteniveau eine Beeinträchtigung der Schmierwirkung zu erwarten ist.

Für den Versuchslauf mit WLOB 1 wurden die FE8-Standardversuchsbedingungen für Verschleißuntersuchungen gewählt (Tabelle 4), allein die Versuchsdauer wurde beim Wasser-Stufentest auf 120 h erhöht, um so für jede Feuchtigkeitsstufe eine Wirkdauer von etwa  $t_{St} = 14$  h zu erzielen.

<b>Prüflast</b>	$F_{PI} = 80$ kN
<b>Drehzahl</b>	$U = 7,5$ min <sup>-1</sup>
<b>Öltemperatur</b>	$\vartheta_{Öl} = 49$ °C
<b>Ölfeuchte</b>	$10\% \leq \varphi_{ÖL} \leq 90\%$
<b>Versuchsdauer</b>	$T_{Versuch} = 120$ h (Wasser-Stufentest)

Tabelle 4: Versuchsbedingungen FE8-Wasser-Stufentests

#### ▪ Messaufbau

die an der Gehäusescheibe des antriebsseitigen Zylinderrollenlagers anliegende Spannung bewirkt aufgrund der Isolierung zwischen Gehäusescheibe und Gehäuse einen Stromfluss durch die Lager

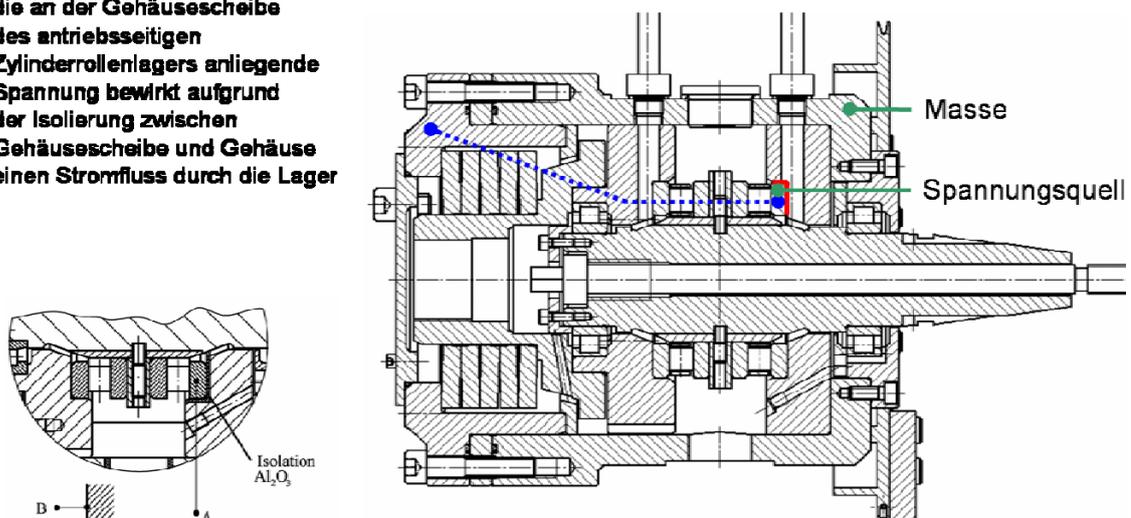
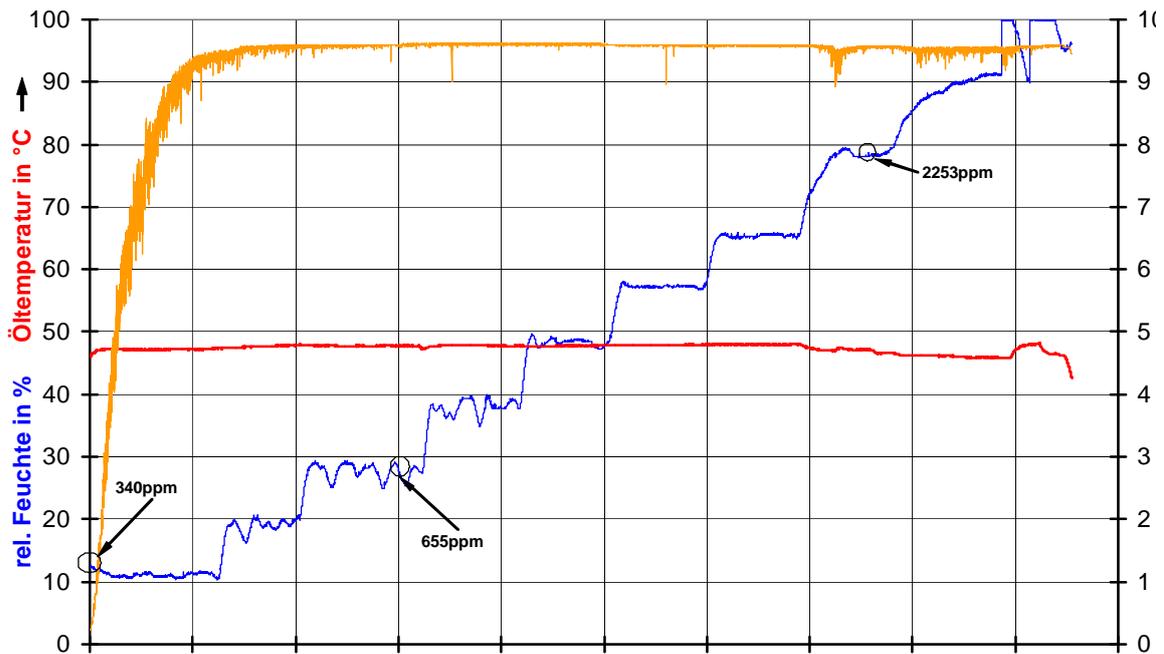


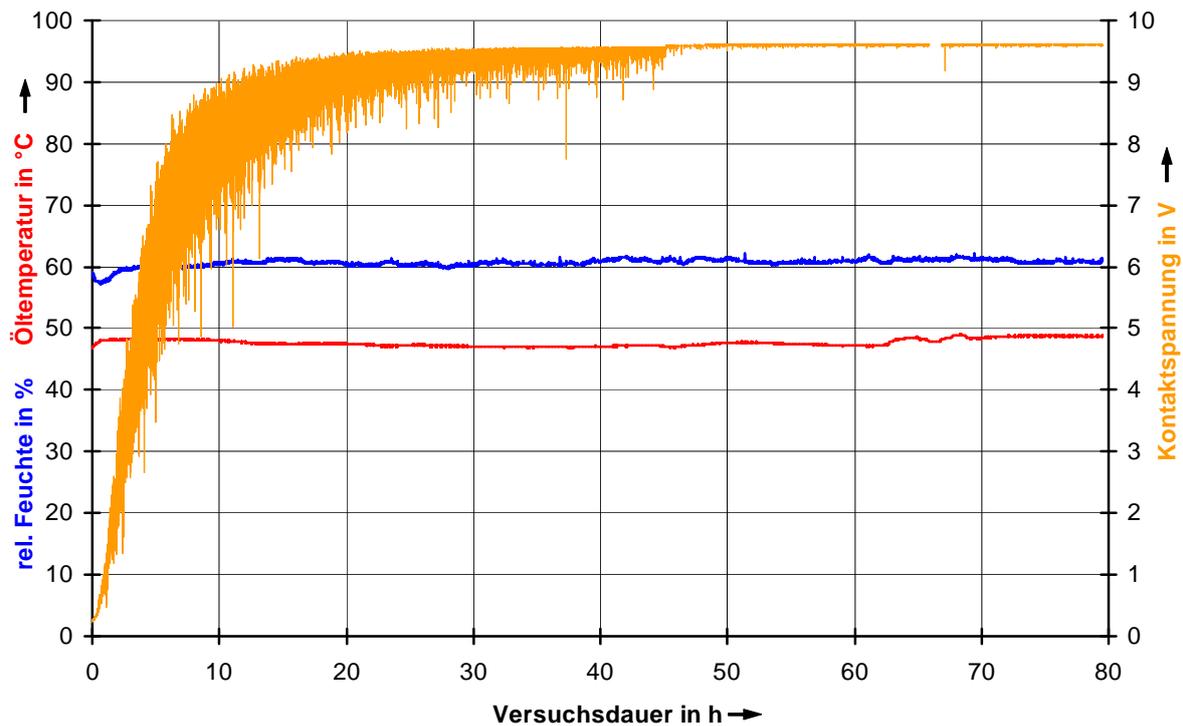
Bild 4.19: Kontaktspannungsmessung

Zu Beginn des Versuchs mit WLOB 1 baut sich eine Kontaktspannung auf, die bei Feuchtestufen von 10% bzw. 20% (entspricht etwa 300 ppm bis 400 ppm) nach ca. 24 h ein Niveau von 9,5 V erreicht (Bild 4.20).



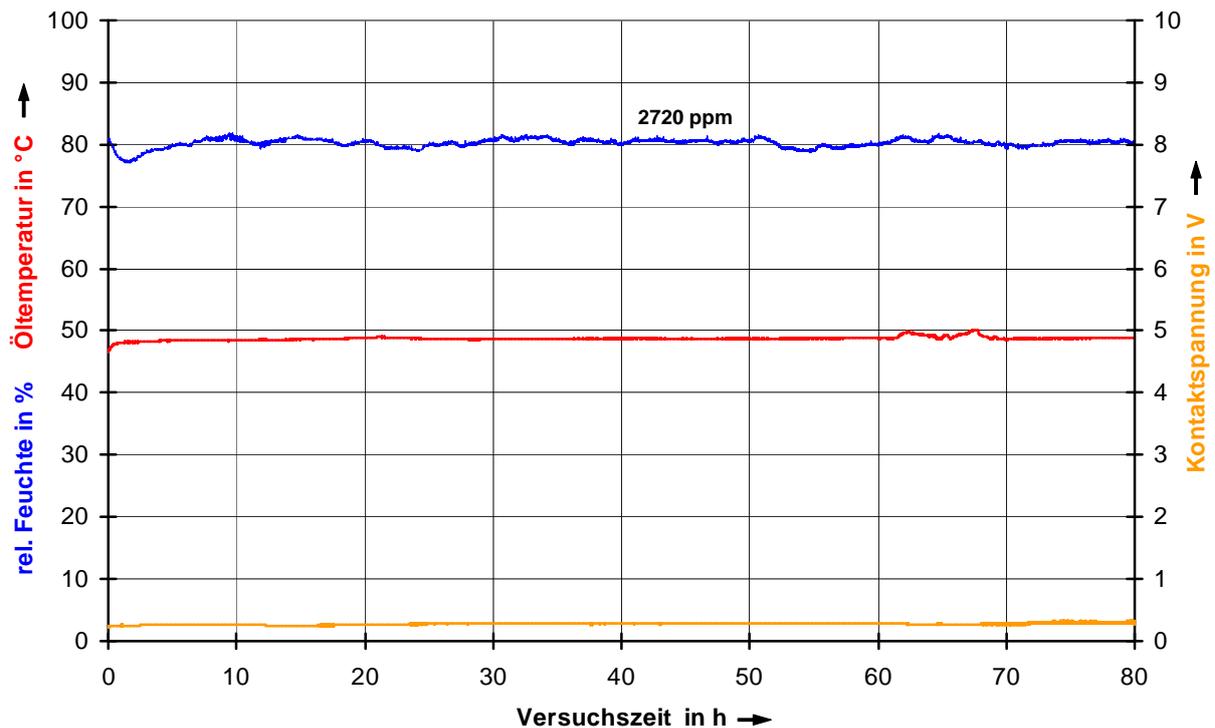
**Bild 4.20:** FE8-Wasserstufentest mit WLOB 1

Erste merkliche Einbrüche der Kontaktspannung treten ab einer relativen Feuchte von über 80% auf (etwa 2700 ppm), daher wurden im Anschluss zwei FE8-Versuche mit konstanten relativen Feuchten von 60% (entspricht etwa 1600 ppm) bzw. 80% (entspricht etwa 2300 ppm) bei einer Versuchsdauer von 80 h durchgeführt (Bild 4.21 und Bild 4.22). Es zeigte sich bei einer relativen Feuchte von 60% ein gegenüber dem Wasser-Stufenversuch verzögerter Aufbau der Kontaktspannung, die nach etwas mehr als 40 h ein konstantes Niveau von ebenfalls etwa 9,5 V erreicht. Dieser verzögerte Kontaktspannungsaufbau lässt sich als Zeichen dafür werten, dass offenbar bei 60% rel. Feuchte ungünstigere Bedingungen für den Aufbau einer Triboschutzschicht vorgelegen haben als beim Wasser-Stufenversuch, bei dem sich diese Schicht und in diesem Zuge die Kontaktspannung bei Feuchten von  $\varphi_{\text{Öl}} = 10\%$  bis 20% innerhalb von ca. 16-20 h aufgebaut hatte.



**Bild 4.21:** Konstant-Feuchte-Versuch mit WLOB 1,  $\varphi_{\text{Öl}} = 60\%$

Bestätigt wird die Tendenz zur erschwerten Schutzschicht-Ausbildung bei hohen Feuchten durch den Konstant-Feuchte-Versuch mit 80% relativer Feuchte. Hier konnte über die gesamte Versuchsdauer von 80 h keine Ausbildung einer Kontaktspannung bzw. Triboschutzschicht beobachtet werden, dementsprechend war hier ein deutlich höherer Verschleiß zu erwarten als bei den vorangegangenen Versuchen. Dies wird sowohl durch die visuelle Bewertung als auch durch die gravimetrische Verschleißbestimmung bestätigt. Ein kritischer Wassergehalt hinsichtlich Verschleiß kann somit für WLOB 1 bei 1800 ...2000 ppm (entspricht in etwa 60% rel. Feuchte) identifiziert werden.

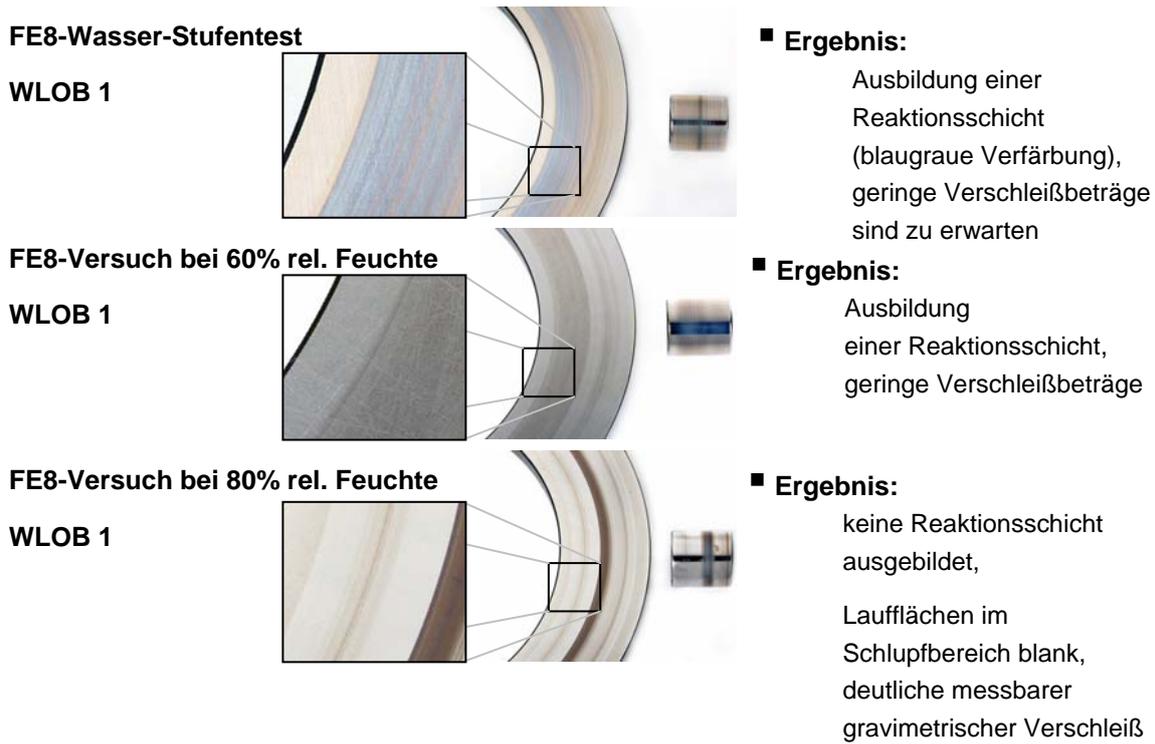


**Bild 4.22:** Konstant-Feuchte-Versuch mit WLOB 1,  $\varphi_{\text{ÖI}} = 80\%$

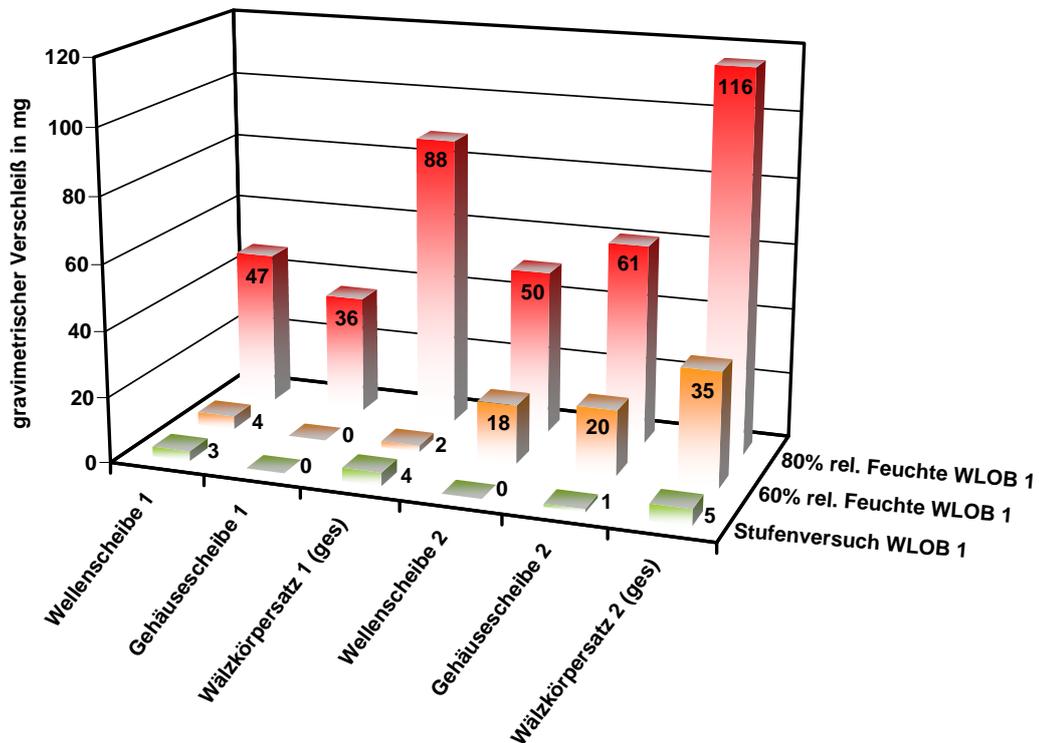
Die versuchsbegleitende visuelle Begutachtung der Laufflächen der Gehäuse- und Wellenscheiben der Axial-Zylinderrollenlager bestätigt die Ergebnisse der Kontaktspannungs-Messungen. Während beim Feuchte-Stufenversuch und beim Konstant-Feuchte-Versuch mit  $\varphi_{\text{ÖI}} = 60\%$  die bereits durch den Kontaktspannungsverlauf zu erwartende Triboschutzschicht ausgebildet wurde (Bild 4.23), ist diese beim Konstant-Feuchte-Versuch mit  $\varphi_{\text{ÖI}} = 80\%$  nur sehr gering im Bereich geringen Schlupfes etwa in der Mitte des Wälzkontaktes ausgeprägt.

In den Bereichen der Wälzkörper-Laufbahnen, in denen sich eine Reaktionsschutzschicht ausgebildet hat, sind noch die Riefen der Hartfeinbearbeitung der Laufbahnen zu erkennen. Dies lässt geringe Verschleißbeträge erwarten, die durch die Ergebnisse der gravimetrischen Verschleißbestimmung bestätigt werden (Bild 4.24).

So zeigten sich nach dem Feuchte-Stufenversuch die geringsten Verschleißbeträge aller Versuche mit WLOB 1. Der Konstant-Feuchte-Versuch mit  $\varphi_{\text{ÖI}} = 60\%$  zeigt im Vergleich hierzu insbesondere an Lager 2 erhöhte Verschleißwerte, die sehr gut mit der verzögerten Ausbildung der Kontaktspannung und damit der Reaktionsschutzschicht korrelieren (vgl. Bild 4.21).



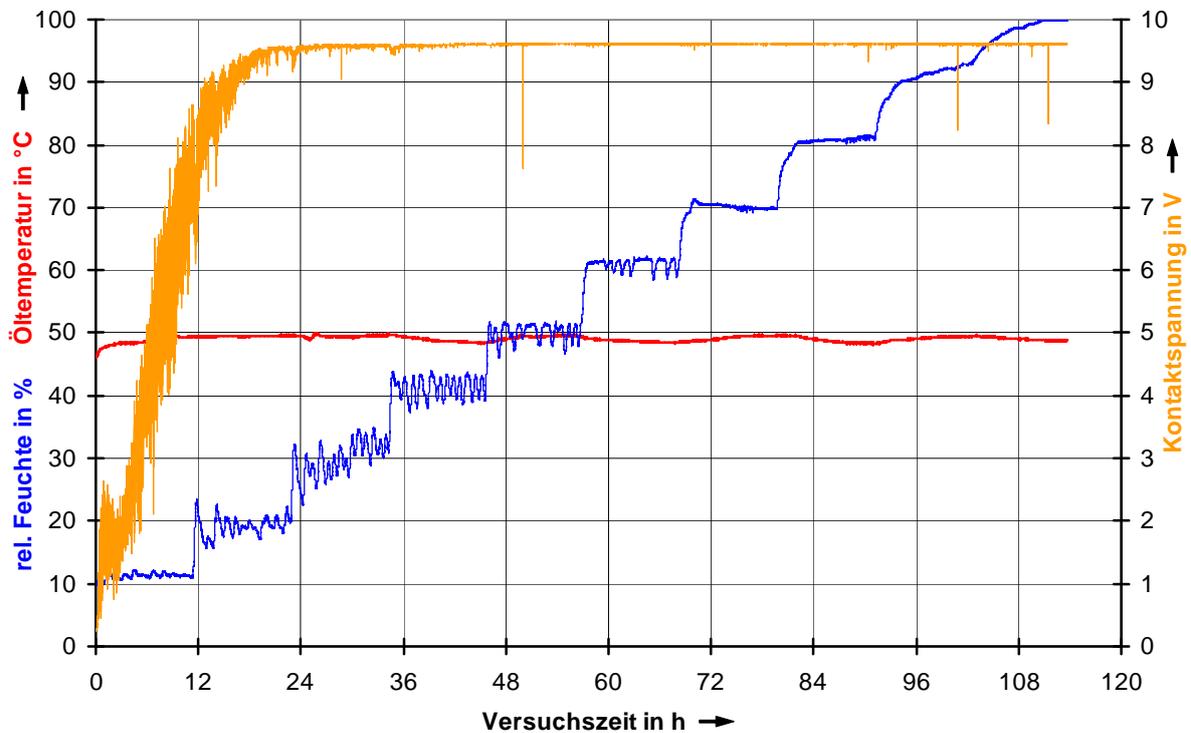
**Bild 4.23:** Visuelle Begutachtung der Lagerscheiben-Laufflächen, Versuche mit WLOB 1



**Bild 4.24:** Ergebnisse der gravimetrischen Verschleißbestimmung, Versuche mit WLOB 1

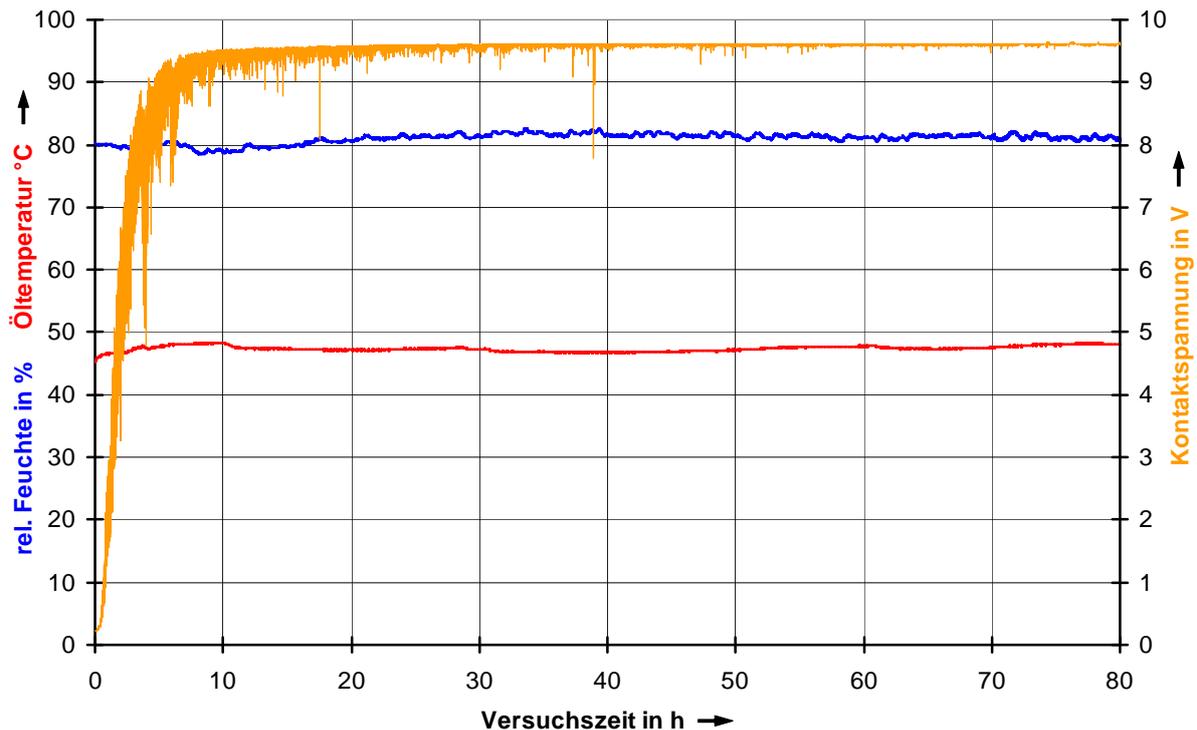
Demgegenüber sind die gravimetrischen Verschleißwerte nach dem Konstant-Feuchte-Versuch mit  $\varphi_{\text{Ö1}} = 80\%$ , bei dem es nicht zur Ausbildung einer Kontaktspannung und einem nur sehr kleinen Bereich mit einer Reaktionsschutzschicht kam, deutlich erhöht und erreichen einen Maximalwert mit  $\Delta m = 116 \text{ mg}$  am Wälzkörpersatz des Lagers 2.

Beim Versuchslauf mit WLOR 4 konnte mit zunehmenden Feuchten bzw. Wassergehalten keine Veränderung des Verlaufes der Kontaktspannung festgestellt werden (Bild 4.25). Da also im Unterschied zu dem Versuch mit WLOB 1 mit dem Feuchte-Stufenversuch keine Voreingrenzung eines kritischen Wassergehaltes möglich war, wurde in Anlehnung an den Versuch mit WLOB 1 ein 80 h-FE8-Versuch mit einer Konstantfeuchte von 80% durchgeführt (Bild 4.26).



**Bild 4.25:** Feuchte-Stufenversuch mit WLOR 4

Im Unterschied zu WLOB 1 bildete sich bei dieser Feuchte bei WLOR 4 eine Kontaktspannung aus, sodass mit einer Reaktionsschutzschichtbildung und damit mit geringem Verschleiß gerechnet werden konnte. Dies wurde durch visuelle Begutachtung ebenso wie durch gravimetrische Verschleißbestimmung bestätigt.

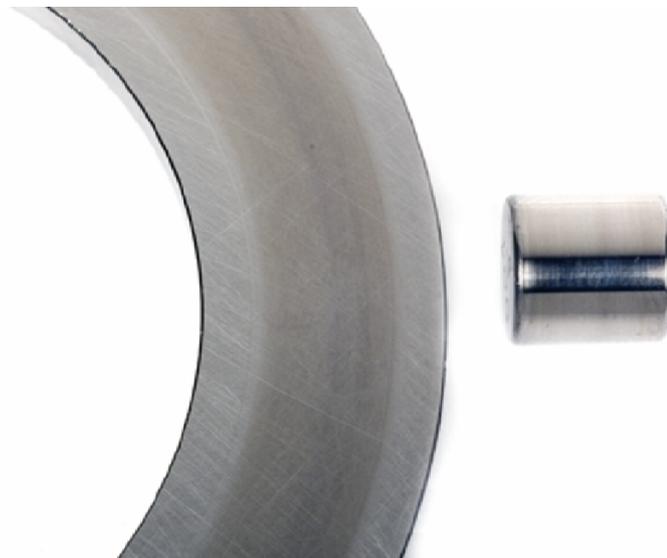


**Bild 4.26:** Konstant-Feuchte-Versuch mit WLOR 4,  $\varphi_{\text{Öl}} = 80\%$

Die Aufnahme der Wälzkörper-Laufbahn (Bild 4.27) zeigt deutlich die Reaktionsschutzschicht als grau verfärbter Bereich der Wälzbahn, darüber hinaus sind in diesem Bereich auch noch die Bearbeitungsriefen des Honprozesses als feine weiße Linien zu erkennen, sodass geringe Verschleißbeträge zu erwarten sind. Dies wird

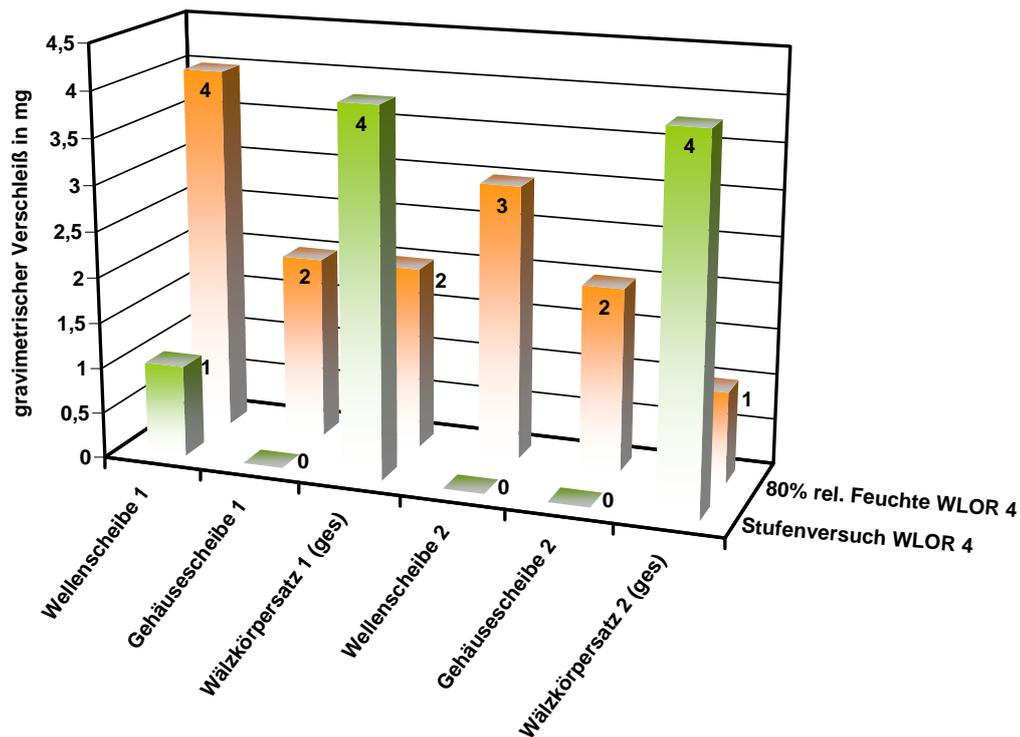
#### FE8-Wasser-Stufentest mit WLOR 4

- **Ergebnis:**  
Ausbildung einer Reaktionsschicht,  
geringe Verschleißbeträge sind  
zu erwarten



**Bild 4.27:** Visuelle Begutachtung der Lagerscheiben-Laufflächen, Versuche mit WLOR 4

durch die gravimetrischen Untersuchungen bestätigt (Bild 4.28), bei denen sowohl beim Feuchte-Stufenversuch als auch beim Konstant-Feuchte-Versuch mit  $\varphi_{\text{Öl}} = 80\%$  sehr geringe Verschleißbeträge in etwa auf dem Niveau des Feuchte-Stufenversuches mit WLOB 1 (vgl. Bild 4.24) bestimmt wurden.



**Bild 4.28:** Ergebnisse der gravimetrischen Verschleißbestimmung, Versuche mit WLOR 4

#### 4.1.3.3 FE8-Wälzlagerversuche zum Einsatzverhalten biogener Öle nach Alterung im Praxiseinsatz

Um eine Bewertung des Verschleißschutzverhaltens unter dem Einfluss von Alterungsvorgängen zu ermöglichen, wurden FE8-Wälzlagerversuche unter Standard-Versuchsbedingungen mit den beiden Schmierstoffen WLOR 4 und WLOB 1 nach einer Einsatzzeit von ca. 2 Jahren auf den Feldversuchs-Windkraftanlagen im Windpark Bockelwitz durchgeführt. In einem ersten Versuch ergab sich dabei mit einem Wälzkörperverschleiß an einem der beiden Prüflager von 31 mg ein grenzwertiger Verschleißbetrag im Hinblick auf die Anforderungen für Schmieröle CLP nach DIN 51517-3 (Bild 4.29). Entsprechend dieser Norm ist die Verschleißschutzeignung eines Schmierstoffes durch zwei FE8-Versuche nachzuweisen. Das Ergebnis nach Durchführung eines Wiederholversuches ist in Bild 4.33 dargestellt. Mit einem Wert von  $m_{W50} = 15 \text{ mg}$  erfüllt der Schmierstoff WLOB 1 die Anforderung nach DIN 51517-3 von  $m_{W50} < 30 \text{ mg}$  mit deutlichem Abstand.

▪ **Versuchsbedingungen**

**Prüflast:**

80 kN

**Drehzahl:**

7,5 min<sup>-1</sup>

**Öltemperatur:**

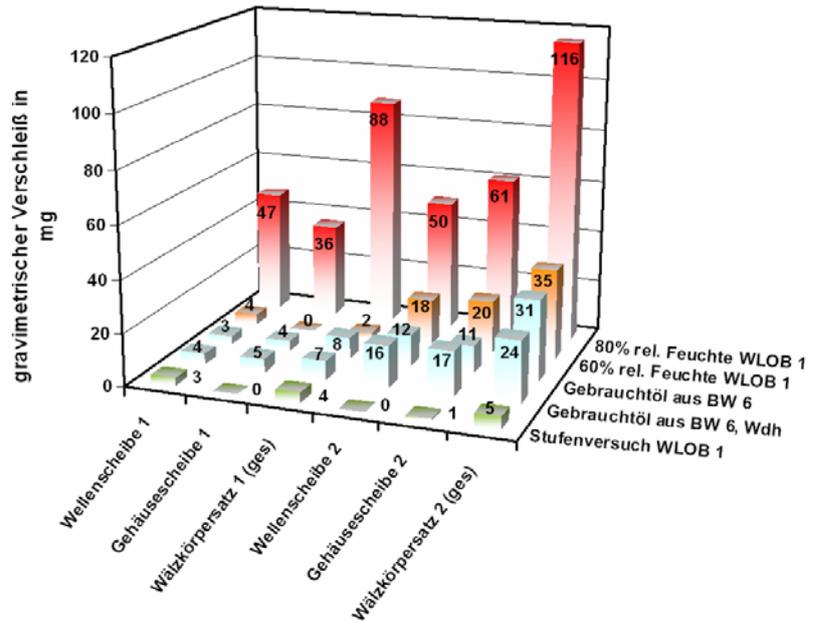
gleich bleibend ca. 48,5 °C  
Standardversuch mit gebrauchtem  
WLOB1: 80°C

**Versuchsdauer:**

80h

**Schmieröl:**

WLOB 1



**Bild 4.29:** Ergebnisse der gravimetrischen Verschleißbestimmung, Versuche mit WLOB 1 aus Feldversuch

▪ **Versuchsbedingungen**

**Prüflast:**

80 kN

**Drehzahl:**

7,5 min<sup>-1</sup>

**Öltemperatur:**

Standardversuch mit gebrauchtem  
WLOB1: 80°C

**Versuchsdauer:**

80h

**Schmieröl:**

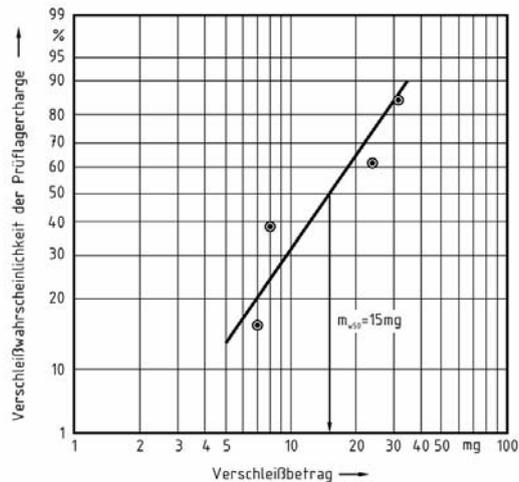
WLOB 1, gebraucht

**Versuchszahl:**

2

▪ **Ergebnis**

Anforderung für Schmieröle CLP  
nach DIN 51517-3 mit  
 $m_{w50}=15\text{mg}$  erfüllt



$$V_w = \frac{i - 0,3}{n + 0,4}$$

Dabei ist

n die Anzahl der Prüflager je Prüfung, bei zwei Prüfläufen mit je zwei Prüflagern beträgt n = 4;  
i die Ausfallnummer des Lagers (Verschleißwerte der Lager in steigender Reihenfolge).

DIN 51819-3

**Bild 4.30:** Ergebnisse der gravimetrischen Verschleißbestimmung, Versuche mit WLOB 1 aus Feldversuch

Für den Referenzschmierstoff WLOB 4 wurde nur ein FE8-Wälzlagerversuch durchgeführt, der mit 1 mg am Wälzkörpersatz eines Prüflagers nur einen Verschleiß am Rand der Nachweisgrenze ergeben hat, wie in Bild 4.31 im Vergleich mit den Verschleißergebnissen aus Versuchen mit geregelter Feuchte dargestellt ist. Aufgrund der Eindeutigkeit des Ergebnisses und im Kontext der anderen Versuchsergebnisse im FE8-Versuch mit diesem Schmierstoff wurde auf einen Wiederholversuch verzichtet.

- **Versuchsbedingungen**

- **Prüflast:**

- 80 kN

- **Drehzahl:**

- 7,5 min<sup>-1</sup>

- **Öltemperatur:**

- gleich bleibend ca. 48,5 °C

- Standardversuch mit gebrauchtem

- WJOR 4: 80°C

- **Versuchsdauer:**

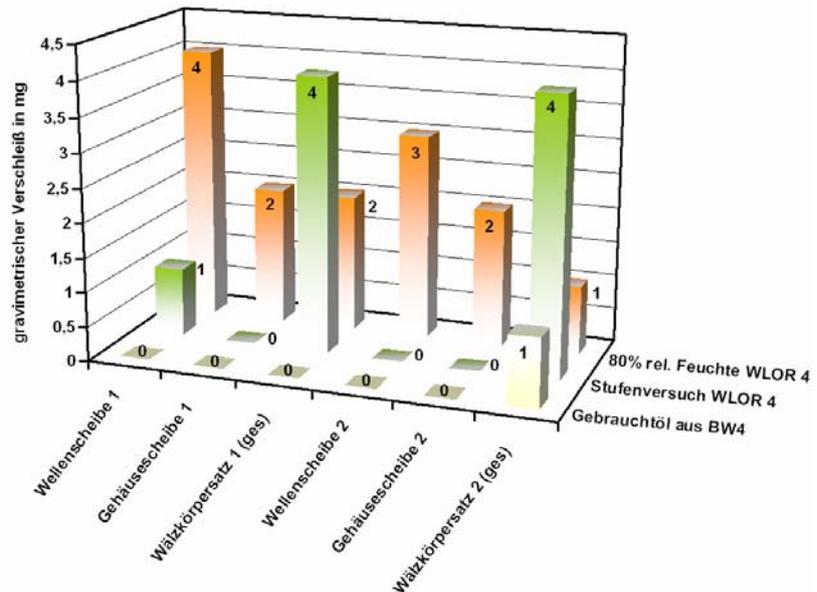
- 80h

- **Schmieröl:**

- WJOR 4

- **Ergebnis**

- Anforderung für Schmieröle CLP nach DIN 51517-3 erfüllt



**Bild 4.31:** Ergebnisse der gravimetrischen Verschleißbestimmung, Versuche mit WJOR 4 aus Feldversuch

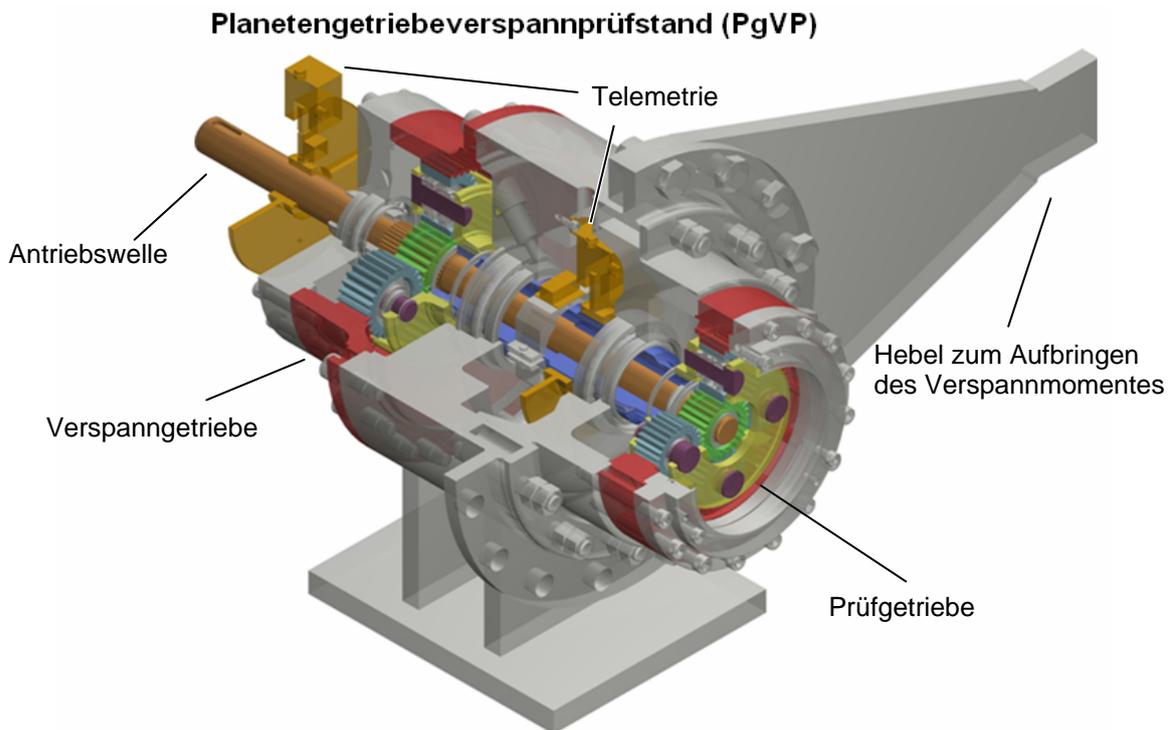
#### 4.1.3.4 Ermüdungsversuche an Planetengetrieben mit geregelter Feuchte zur Bestimmung ermüdungskritischer Wassergehalte

Zur Untersuchung des Ermüdungsschutzverhaltens der Versuchsöle WLOB 1 und WJOR 4 unter Wassereinfluss ist im Berichtszeitraum ähnlich zu der Anordnung am FE8-Prüfstand (vgl. Kapitel 4.1.3.2) auch am Planetengetriebe-Verspannprüfstand des IME eine Wassergehaltsregelung aufgebaut worden. Mit Hilfe dieser Regelung war es möglich, vergleichende Graufleckentests mit „trockenen“ und „feuchten“ Ölen mit konstanten Wassergehalten während der gesamten Versuchsdauer durchzuführen.

Im Sinne einer praxisnahen Versuchsdurchführung wurden die Untersuchungen am IME-Planetengetriebe-Verspannprüfstand mit serienmäßigen Industrieplanetengetrieben durchgeführt, die mit ihren Abtriebsseiten in „back to back-Anordnung“ über eine gemeinsame Abtriebswelle miteinander verbunden sind (Bild 4.51). In der hohlgebohrten Abtriebswelle wird eine Torsionswelle geführt, die die Antriebsseiten der Getriebe miteinander verbindet. Dazu ist es notwendig, dass auch beide Sonnenräder mit einer Durchgangsbohrung versehen werden. Durch die relative Verdrehung der beiden Hohlräder bzw. der An- und Abtriebswelle mit einem Hebel werden die Planetengetriebe gegeneinander verspannt. Der Antrieb erfolgt, wie in der Praxis, über die Antriebsseite eines Planetengetriebes. Der Vorteil dieses Konzeptes besteht darin, dass als Antriebsleistung nur die Verlustleistung beider Getriebe angeboten werden muss. Aufgrund der coaxialen Anordnung der An- und Abtriebsachse verläuft der Leistungskreislauf des Planetengetriebe-Prüfstandes ebenfalls coaxial.

Als Prüfgetriebe kommt ein Planetengetriebe vom Typ REDULUS IP 50 ( $T_{2max} = 2100 \text{ Nm}$ ) zum Einsatz, als Verspanngetriebe dient der nächst größere Typ

der Baureihe REDULUS IP 65 ( $T_{2\max} = 4150 \text{ Nm}$ ). Die maximale Antriebsdrehzahl beider Getriebe beträgt  $n_{1\max} = 3000 \text{ U/min}$ . Prüf- und Verspanngetriebe sind durch eine gemeinsame Abtriebswelle verbunden. In der hohlgebohrten Abtriebswelle läuft die Torsionswelle, mit der die ebenfalls hohlgebohrten Sonnenräder der beiden Planetengetriebe über Steckverzahnungen verbunden sind. Die Torsionswelle dreht sich um den Faktor der Übersetzung ( $i = 3,82$ ) schneller als die Abtriebswelle.



**Bild 4.32:** Planetengetriebe-Verspannprüfstand des IME

Die Antriebsnabe des Verspanngetriebes ist über eine Kupplung mit dem Antriebsmotor verbunden. Die antriebsseitige Öffnung des Prüfgetriebes wird mit einem Deckel verschlossen, in dem die Antriebswelle gelagert ist. Zwischen dem Prüfgetriebe und dem Gehäuse ist ein verdrehbarer Flansch mit Hebelarm montiert. Das Verspannmoment der Getriebe wird über den Hebelarm aufgebracht, über den der drehbare Flansch mit definierter Kraft gegenüber dem festen Gehäuse verdreht wird. Dadurch wird auch das innenverzahnte Hohlrad des Prüfgetriebes gegenüber dem des Verspanngetriebes verdreht, und es ergibt sich aufgrund der gemeinsamen An- und Abtriebswellen ein definiertes Verspannmoment. Die Torsionsmomente werden mit Hilfe von Dehnungsmessstreifen (DMS), die auf der Hohl- und Torsionswelle appliziert sind, gemessen. Die DMS-Signale werden via Telemetrie an der freien Seite der Torsionswelle bzw. vom Inneren des Gehäuses an die Auswerteeinheiten übertragen. Die qualitativ hochwertige Messeinrichtung ist mit einem Sender-Empfänger-System ausgerüstet, das ohne separate Energieversorgung (Batterie) im Getriebe auskommt, sodass Langzeitversuche ohne Unterbrechungen durchgeführt werden können. Zusätzlich wird die Drehzahl an einer der beiden Wellen gemessen.

Das Verspanngetriebe REDULUS IP 65 kann nahezu die doppelte Leistung übertragen wie das Prüfgetriebe REDULUS IP 50. Die Untersuchungen der Tragfähigkeit beziehen sich daher ausschließlich auf das Prüfgetriebe, da dort die Grenzen der Tragfähigkeit deutlich niedriger liegen. Die Verzahnungsdaten des Prüfgetriebes sind in Tabelle 5 angegeben.

Planetengeräte-Prüfradsatz				
		Sonnenrad	Planetenrad	Hohlrad
Verzahnungsart		Außenverzahnung	Außenverzahnung	Innenverzahnung
Werkstoff		18 CrNiMo 7-6	17 CrNiMo 6	42 CrMo 4V
Achsabstand a	mm	53,7		
Standübersetzung $i_0$		-2,852		
Zahnbreite b	mm	32	30	30
Normalmodul $m_n$	mm	2		
Zähnezahl z		27	25	-77
Eingriffswinkel a	°	20		
Schrägungswinkel b	°	0		
Profilverschiebungsfaktor x		0,428	0,517	-1,462
Teilkreisdurchmesser	mm	54	50	-154
Wälzkreisdurchmesser	mm	55,77	51,64	-159,04
Grundkreisdurchmesser $d_g$	mm	50,74	46,98	-144,71
Kopfkreisdurchmesser $d_k$	mm	59,5	55,1	-155,9
Kopfüberdeckung $e_a$		1,297		1,298

**Tabelle 5:** Daten des Prüfradsatzes

Die Planetengetriebe vom Typ REDULUS IP werden üblicherweise mit Tauchschmierung betrieben. Die Getriebegehäuse werden bis zur Mitte der Sonnenwelle mit Öl gefüllt, sodass die Planetenräder bei jedem Umlauf um die Sonnenradachse in den Ölsumpf eintauchen und mit dem Schmierstoff benetzt werden. Ablaufendes und verspritzendes Öl sorgt für die Schmierung der Lager und Dichtungen. Die Temperierung des Versuchöls erfolgt mit einer Heizpatrone im Versuchöltank, erforderlichenfalls kann bei hohen Kraftstufen der Temperaturanstieg der Öle in Versuchs- und Verspannkreislauf mit einer Wasserkühlung begrenzt werden. Eine Ölpumpe fördert das Öl in die Gehäuse von Prüf- und Verspanngetriebe, von wo es nach Erreichen des Soll-Füllstandes über einen Überlauf wieder zurück in den Öltank fließt.

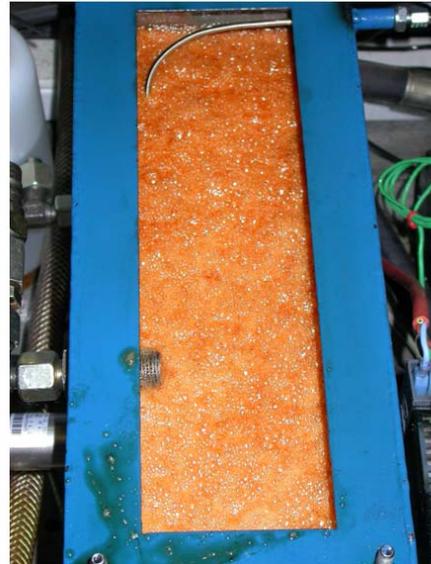
Bei der Konstruktion wurde besonders auf die Funktion eines einfachen Zugriffs auf das Prüfgetriebe Wert gelegt. Bei der Montage und Demontage können das Sonnenrad und die Planetenräder durch wenige Handgriffe leicht gewechselt werden, und durch das Schauglas lässt sich der Zustand des Schmierstoffs jederzeit gut

beobachten. So konnte beispielsweise bei den Versuchen unter Wassereinfluss bei  $\vartheta = 67^\circ\text{C}$  und  $\varphi = 76\%$  rel. Feuchte eine Kondensatbildung an der Innenfläche des Schauglases über dem Ölspiegel beobachtet werden (Bild 4.33, linke Seite).



Kondensatbildung am Schauglas beim Stufenversuch mit WLOR4

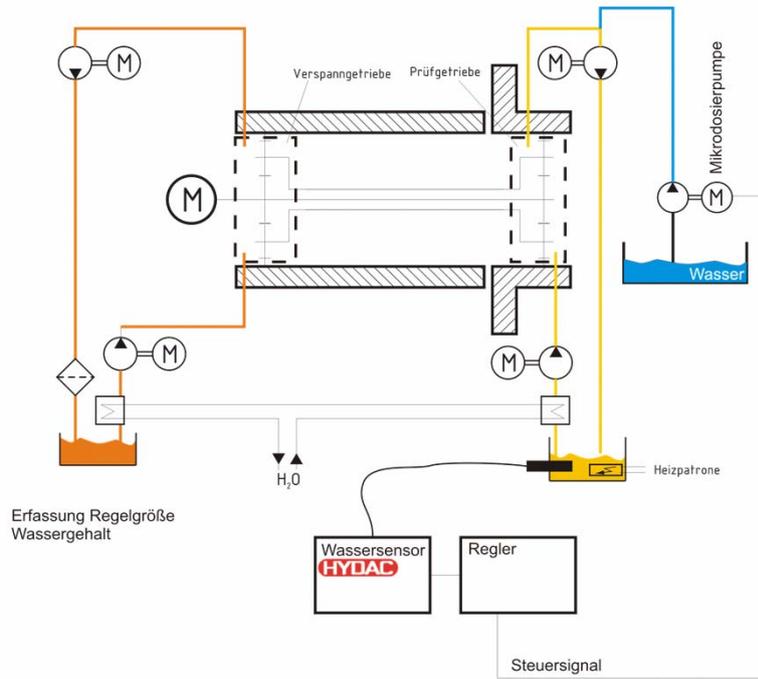
Schaumbildung im Versuchsöltank beim Stufenversuch mit WLOR4



**Bild 4.33:** Versuche mit geregelten Schmierstofffeuchten am Planetengetriebe Verspannprüfstand

In der rechten Bildhälfte ist der Versuchsöltank zu sehen, in dem bei diesem Versuch eine starke Schaumbildung auftrat. Diese Schaumbildung hat den Feuchtigkeitsaustausch mit der Umgebungsluft stark behindert, sodass sich bei WLOR 4 trotz gleichem Feuchte-Sollwert ein höherer Feuchte-Istwert eingestellt hat als bei dem entsprechenden Versuch mit WLOB 1 (Bild 4.35). Die Schaumbildung bei WLOR 4 ist jedoch, wie weitere Versuche zeigen, vgl. Kapitel 4.1.3.5, nicht allein mit der Anwesenheit von Wasser zu begründen, sondern hauptsächlich auf Verwirbelung und Lufteintrag durch den Freistrahlerücklauf des Öles in den Tank zurückzuführen.

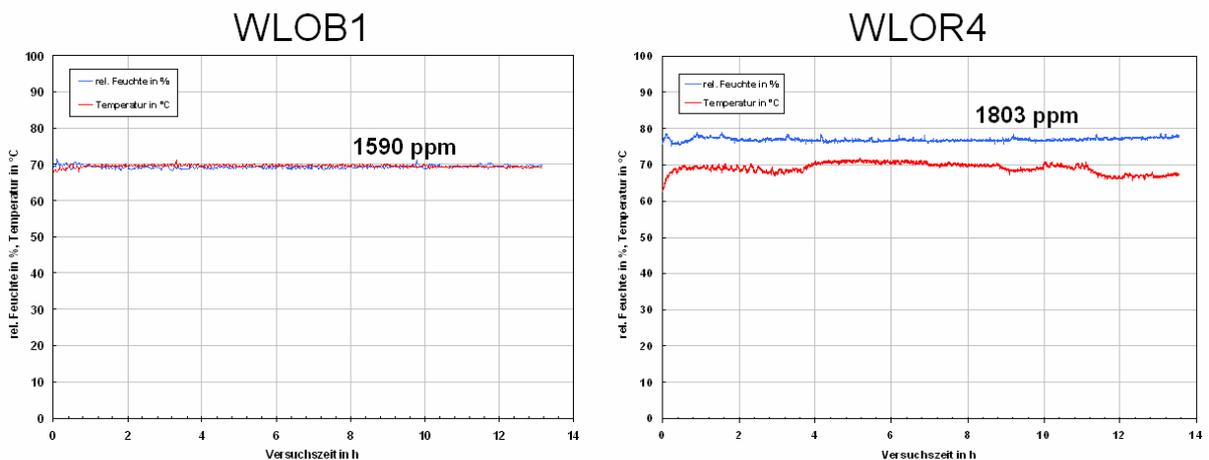
Die Wassergehaltsregelung am Planetengetriebe-Verspannprüfstand ist in Bild 4.34 schematisch dargestellt. Der Prüfkreislauf stellt hier die Regelstrecke dar, wobei die Regelgröße Schmierstofffeuchte im Versuchsöltank mit einem HYDAC-Feuchtesensor AS1000 gemessen wird. Über einen Regler mit geeignet eingestellten Parametern wurde dem Prüfkreislauf mit einer Mikrodosierpumpe gezielt Wasser zugegeben. Als Ort für die Wasserzugabe wurde bewusst die Saugleitung der Rückförderpumpe gewählt, um durch die Pumpe selbst eine gute Durchmischung des Wassers mit dem Öl und damit einen schnellen Lösungsvorgang des Wassers zu begünstigen. Dadurch konnte ein Rührwerk, wie es am entsprechenden Ölaggregat für den FE8-Prüfstand erforderlich war, eingespart werden.



**Bild 4.34:** Wassergehaltsregelung am Planetengetriebeverspannungsprüfstand

Insgesamt zeigt sich, dass auch am Planetengetriebe-Verspannprüfstand mit Hilfe der Wassergehaltsregelung ein annähernd konstantes Feuchtigkeitsniveau während der gesamten Versuchsdauer realisiert werden konnte, wie es in Bild 4.35 beispielhaft für die Dauer der ersten Kraftstufe (13h) dargestellt ist. Für WLOB 1 entspricht eine relative Feuchte von  $\varphi = 70\%$  bei  $\vartheta = 70^\circ\text{C}$  einem Wassergehalt von 1590 ppm, wie eine Analyse nach der indirekten Karl-Fischer-Methode bei der Firma Wearcheck ergeben hat, vgl. auch Kapitel 4.1.2.4.

Verhalten der Wassergehaltsregelung am Planetengetriebeverspannungsprüfstand bei:



Aufzeichnung während der ersten Kraftstufe des jeweiligen Versuches

**Bild 4.35:** Ölfeuchte und -temperatur am Planetengetriebe-Verspannprüfstand

Von der Einstellung eines konstanten Wassergehaltes abgesehen, orientieren sich die Versuchsbedingungen für die Bestimmung ermüdungskritischer Wassergehalte an den Bedingungen des FVA-Graufleckentests [FVA54/7], [DIN 51354]. Dieser ist zweigeteilt und umfasst einen Stufentest und einen anschließenden Dauertest, die Hertz'schen Pressungen und Zahnnormalkräfte sind in der nachfolgenden Tabelle 6 aufgeführt. Die wichtigsten der im folgenden Abschnitt erläuterten Prüfbedingungen sind in Bild 4.36 zusammenfassend dargestellt. In Anlehnung an die Stufung der Hertz'schen Pressungen im FVA-Graufleckentest wird die Pressung im Wälzpunkt auch beim IME-Graufleckentest von Kraftstufe zu Kraftstufe um jeweils etwa  $150 \text{ N/mm}^2$  erhöht.

Bei der Ausführung der Prüfstandsgetriebe als Planetengetriebe mit vier Planeten muss von einer ungleichförmigen Lastverteilung ausgegangen werden, die nach [GL04] und [DNV93] für den Fall, dass genauere Werte aus Messungen nicht vorliegen, durch einen Lastverteilungsfaktor von  $K_g = 1,25$ , d. h. eine 25-prozentige Lastüberhöhung in den Zahneingriffen des Planeten zur Sonne und zum Hohlrad, zu berücksichtigen ist. Für den IME-Graufleckentest wird ein etwas geringerer Lastverteilungsfaktor von  $K_g = 1,20$  angesetzt, da dieser grundsätzlich nur eine grobe Abschätzung darstellen kann und die Annahme eines zu hohen Lastverteilungsfaktors u. U. dazu führt, dass zu niedrige Verspannmomente bzw. Flächenpressungen aufgebracht werden.

Aus den geforderten Flächenpressungen ergeben sich nach Formel 4.3, [DIN3990], unter Berücksichtigung des Lastverteilungsfaktors, des Zonenfaktors  $Z_H$  und des Elastizitätsfaktors  $Z_E$  die erforderlichen Tangentialkräfte und daraus mit Formel 4.6 die nötigen Verspannmomente  $T_1$ .

$$p_c = Z_H \cdot Z_E \cdot \sqrt{\frac{F_t}{b \cdot d_1} \cdot K_\gamma \cdot \frac{u+1}{u}} \quad 4.3$$

mit dem Zonenfaktor

$$Z_H = \sqrt{\frac{2 \cdot \cos \alpha_{wt}}{\cos^2 \alpha_t \cdot \sin \alpha_{wt}}} = 2,229, \quad 4.4$$

dem Elastizitätsfaktor

$$Z_E = \sqrt{\frac{1}{\pi \cdot \left( \frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \right)}} = 189,8 \sqrt{\frac{\text{N}}{\text{mm}^2}} \quad 4.5$$

und der Tangentialkraft

$$F_t = \frac{2 \cdot T_1}{d \cdot z_e} = F_N \cdot \cos \alpha. \quad 4.6$$

Stufentest	Dauertest	Kraftstufe	Hertz'sche Pressung im Wälzpunkt $p_c$ in N/mm <sup>2</sup>	Zahnnormalkraft im Einzeleingriff $F_n$ in N	Verspannmomen t an der Antriebswelle $T_1$ in Nm
		0	0	0	0
		1	166	106	10
		2	292	330	31
		3	475	873	82
		4	641	1586	149
		5	772	2299	216
		6	927	3320	312
		7	1081	4512	424
		8	1234	5874	552
		9	1389	7450	700
		10	1540	9152	860

**Tabelle 6:** Hertz'sche Pressungen in Abhängigkeit der Kraftstufe im Stufen- und Dauertest

Zur Prüfung von Schmierstoffen für unterschiedlichste Anwendungen können die Betriebsbedingungen, d. h. Umfangsgeschwindigkeit und Schmierstofftemperatur, den jeweiligen Anwendungsfällen entsprechend angepasst werden, [FVA54/7]. Graufleckigkeit tritt an einsatzgehärteten Zahnrädern bereits bei Beanspruchungen unterhalb der Grübchen-Dauerfestigkeit in einem Umfangsgeschwindigkeits-Bereich  $< 10$  m/s auf, [Hoe01]. Für den IME-Graufleckentest wird die Umfangsgeschwindigkeit am Wälzkreis der Sonne auf  $v_c = 2$  m/s reduziert und liegt damit im Bereich der Umfangsgeschwindigkeiten der langsam laufenden Stufen von Windkraftgetrieben. Die Umfangsgeschwindigkeit der Sonne berechnet sich aus dem Produkt von Wälzkreisradius der Sonne, vgl. Tabelle 5, und Relativgeschwindigkeit der Sonne gegenüber dem Steg  $n_{1s}$ , die sich aus der Willis-Gleichung

$$n_1 - i_{013} \cdot n_3 = (1 - i_{013}) \cdot n_s \quad 4.7$$

zu

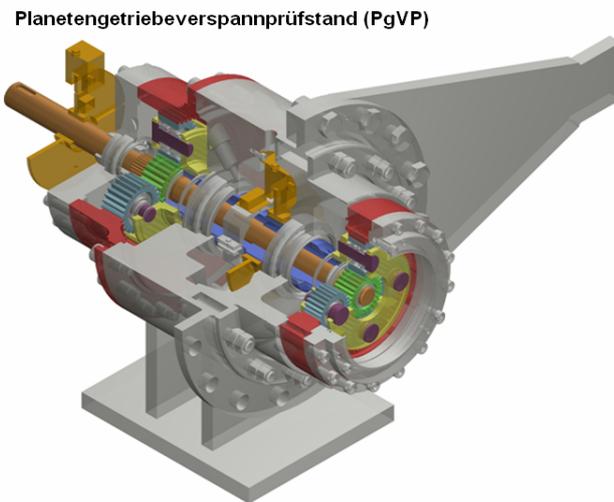
$$n_{1s} = n_1 - n_s = n_1 \cdot \frac{-i_0}{1 - i_0} \quad 4.8$$

ergibt. Für eine Umfangsgeschwindigkeit am Wälzkreis der Sonne von  $v_c = 2$  m/s ist eine Relativedrehzahl der Sonne zum Steg von  $n_{1s} = 685 \text{ min}^{-1}$  erforderlich, daraus folgt mit Gleichung 4.8 eine erforderliche Antriebsdrehzahl von  $n_1 = 925 \text{ min}^{-1}$ .

Der Graufleckentest ist zweigeteilt und umfasst einen Stufentest und einen anschließenden Dauertest. Im Stufentest wird die Graufleckentragfähigkeit des tribologischen Systems Zahnrad-Schmierstoff bei gegebenen Betriebsbedingungen (Schmierstofftemperatur, Umfangsgeschwindigkeit) in Form einer Schädigungskurve in Abhängigkeit der Kraftstufen beschrieben. Der Dauertest gibt Aufschluss über den Schadensfortschritt bei größeren Lastspielzahlen, [FVA54/7].

## ■ Versuchsbedingungen

- **Stufentest:**  
Kraftstufen 5 bis 10 je 13h entsprechend Öltest nach DIN 51354 mit Herz'schen Pressungen nach FVA-Graufleckentest
 
$$p_C = Z_H \cdot Z_E \cdot \sqrt{\frac{F_t}{b \cdot d_1} \cdot K_\gamma \cdot \frac{u+1}{u}}$$
 mit  $Z_H$  und  $Z_E$  nach DIN 3990
- **Dauertest:**  
1x 64h Kraftstufe 8 + max. 5x 64h Kraftstufe 10
- Anzahl der Lastwechsel pro Stufe im Stufentest:  $2,1 \cdot 10^6$  entsprechend FVA-Graufleckentest, werden bei  $925 \text{ min}^{-1}$  Antriebsdrehzahl nach etwa 13h erreicht
- Anzahl der Lastwechsel pro Stufe im Dauertest:  $10,5 \cdot 10^6$  entsprechend FVA-Graufleckentest, werden bei  $925 \text{ min}^{-1}$  Antriebsdrehzahl nach etwa 64h erreicht
- Schmierstofftemperatur entspricht praxisüblichen  $70^\circ\text{C}$
- rel. Feuchte im Schmierstoff: 70%



**Bild 4.36:** Prüfstand und Versuchsbedingungen

Bei der gewählten Antriebsdrehzahl ist die Lastspielzahl pro Laststufe im Stufentest an den Sonnen entsprechend [FVA54/7] von  $LW = 2,1 \cdot 10^6$  nach ca. 13 h erreicht, für jede Stufe im Dauertest ergibt sich bei  $10,5 \cdot 10^6$  Lastwechseln an den Sonnen eine Laufzeit von ca. 64 h. Die Öltemperatur im IME-Graufleckentest beträgt  $\vartheta_{\text{Öl}} = 70^\circ\text{C}$  und liegt damit ca.  $10^\circ\text{C}$  über der in der Praxis bei Windkraftgetrieben im Nennlastbereich auftretenden Temperatur, vgl. Kapitel 4.3.2.4. Hinsichtlich der Entstehung von Graufleckigkeit stellt dies eine leichte Verschärfung der Testbedingungen gegenüber den Praxisbedingungen dar, da Graufleckigkeit durch geringere Schmierfilmdicken infolge einer verminderten Viskosität begünstigt wird [Nie83].

Bild 4.37 zeigt den Verlauf der Zunahme der Graufleckenfläche im Laufe des Stufen- bzw. Dauertests an den Sonnen des Prüfradsatzes. Zunächst ist festzustellen, dass sich die beiden Öle WLOB 1 und WLOR 4 in trockenem Zustand in Bezug auf die Zunahme der Graufleckenfläche über der Versuchsdauer sehr ähnlich verhalten. Sowohl der gut biologisch abbaubare Schmierstoff auf Basis eines synthetischen Esters als auch der Referenzschmierstoff zeigen im Stufentest eine hohe Graufleckentragfähigkeit, im Dauertest kommt es nach ca. 128 h bei beiden Ölen zu einer deutlichen Zunahme der Graufleckenfläche und zum Auftreten von Grübchen. Nach [FVA54/7] ist der Graufleckentest zu diesem Zeitpunkt zu beenden, in Anlehnung an [Her04] wird der Test jedoch fortgesetzt, um Informationen über den weiteren Fortgang der Schädigungen zu gewinnen. Bei beiden Ölen ist auch in befeuchtetem Zustand kein erhöhtes Auftreten von Flächenanteilen mit Graufleckigkeit auf den Flanken der Sonnen festzustellen.

## ■ Versuchsbedingungen

### ■ Stufentest:

Kraftstufen 5 bis 10 je 13h entsprechend Öttest nach DIN 51354 mit Herz'schen Pressungen nach FVA-Graufleckentest

$$p_C = Z_H \cdot Z_E \cdot \sqrt{\frac{F_t}{b \cdot d_1} \cdot K_\gamma \cdot \frac{u+1}{u}}$$

mit  $Z_H$  und  $Z_E$  nach DIN 3990

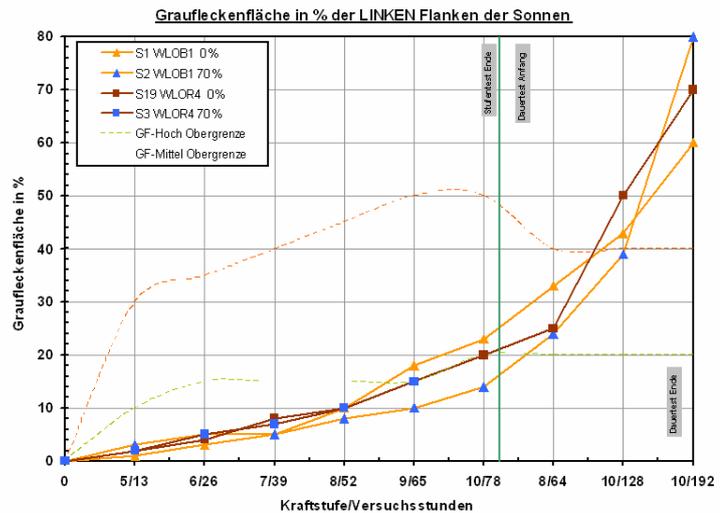
### ■ Dauertest:

1x 64h Kraftstufe 8 + max. 5x 64h Kraftstufe 10

- Anzahl der Lastwechsel pro Stufe im Stufentest:  $2,1 \times 10^6$  entsprechend FVA-Graufleckentest, werden bei ca.  $925 \text{ min}^{-1}$  Antriebsdrehzahl nach etwa 13h erreicht

- Anzahl der Lastwechsel pro Stufe im Dauertest:  $10,5 \times 10^6$  entsprechend FVA-Graufleckentest, werden bei ca.  $925 \text{ min}^{-1}$  Antriebsdrehzahl nach etwa 64h erreicht

- Schmierstofftemperatur entspricht praxisüblichen  $70^\circ\text{C}$
- rel. Feuchte im Schmierstoff: 70%



**Bild 4.37:** Zunahme der Graufleckenfläche an den Sonnen

Der Vergleich der Verläufe von WLOB 1 zeigt bei Wasserzugabe (blaue Symbole) in großen Abschnitten des Versuches sogar ein geringfügig niedrigeres Niveau als der des trockenen WLOB 1 WLOR 4. Bei dem Referenzschmierstoff sind die Verläufe im trockenen und befeuchteten Zustand bis Kraftstufe 9 im Stufentest annähernd deckungsgleich.

Ähnlich stellt sich die Situation an den Planeten dar (Bild 4.38). Auch hier weisen die Verläufe der Graufleckenfläche im Stufentest sowohl für WLOB 1 als auch für WLOR 4 eine hohe Graufleckentragfähigkeit aus. Dies gilt für beide Öle sowohl im trockenen als auch im befeuchteten Zustand, wobei an den Planeten unter Wassereinfluss ein leicht erhöhtes Niveau des Graufleckenflächen-Verlaufes festzustellen ist.

## ■ Versuchsbedingungen

### ■ Stufentest:

Kraftstufen 5 bis 10 je 13h entsprechend Öltest nach DIN 51354 mit Herz'schen Pressungen nach FVA-Graufleckentest

$$p_C = Z_H \cdot Z_E \cdot \sqrt{\frac{F_t}{b \cdot d_1} \cdot K_y \cdot \frac{u+1}{u}}$$

mit  $Z_H$  und  $Z_E$  nach DIN 3990

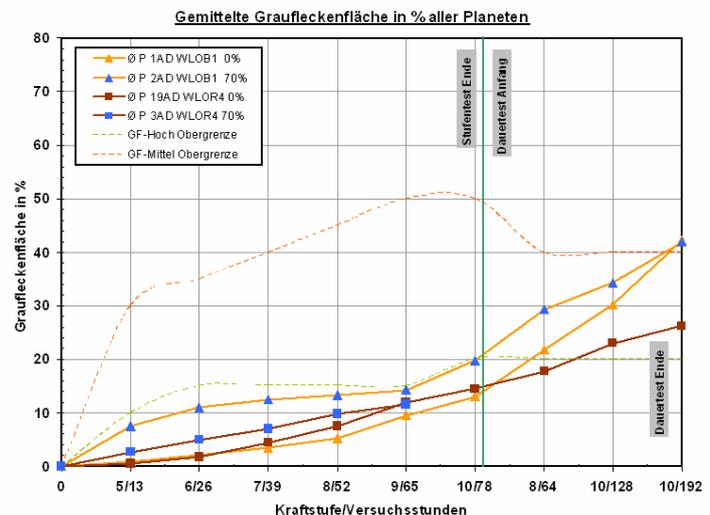
### ■ Dauertest:

1x 64h Kraftstufe 8 + max. 5x 64h Kraftstufe 10

- Anzahl der Lastwechsel pro Stufe im Stufentest:  $2,1 \times 10^6$  entsprechend FVA-Graufleckentest, werden bei ca.  $925 \text{ min}^{-1}$  Antriebsdrehzahl nach etwa 13h erreicht

- Anzahl der Lastwechsel pro Stufe im Dauertest:  $10,5 \times 10^6$  entsprechend FVA-Graufleckentest, werden bei ca.  $925 \text{ min}^{-1}$  Antriebsdrehzahl nach etwa 64h erreicht

- Schmierstofftemperatur entspricht praxisüblichen  $70^\circ\text{C}$
- rel. Feuchte im Schmierstoff: 70%

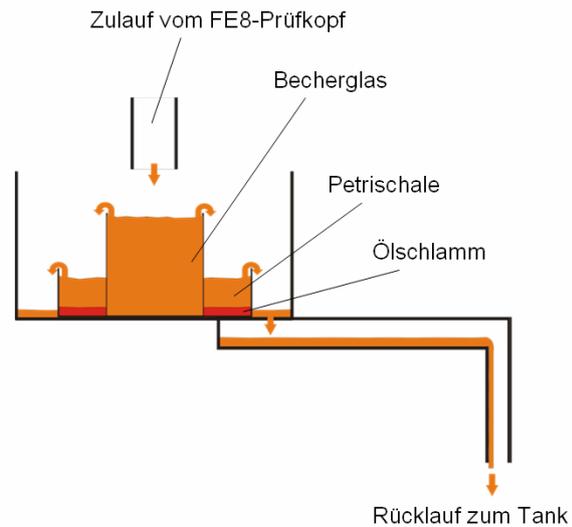


**Bild 4.38:** Zunahme der Graufleckenfläche an den Planeten

### 4.1.3.5 Schlamm-, Schaum- und Filtrierbarkeitstests unter Wassereinfluss mit den Feldversuchs-Ölen

Vor dem Hintergrund einer in den Feldversuchen beobachteten Tendenz zur Schlamm- und Schaumbildung bei dem Referenzschmierstoff WLOR 4, werden am IME Untersuchungen zur Schlamm- und Schaumbildung mit dem biogenen Schmierstoff WLOB 1 und dem Referenzschmierstoff WLOR 4 durchgeführt. Dabei steht aufgrund des Projektschwerpunktes der klimatischen Exposition in Windkraftanwendungen der Einfluss von Wasser auf die Schlamm- und Schaumbildung im Mittelpunkt der Untersuchungen. Für den entsprechenden Versuchsaufbau wird am IME der RWTH Aachen ein FE8-Schmieraggregat modifiziert, indem eine Vorrichtung in den Rücklauf von Prüfkopf zum Tank integriert wird, die ein Becherglas als Beruhigungsbecken und eine Petrischale als Absetzgefäß für den Ölschlamm enthält (Bild 4.39).

- Aufbau auf modifizierten FE8-Schmieraggregat mit Wassergehaltsregelung, Temperaturregelung über Heizhaube am Prüfkopf
- Integration in Rücklauf vom FE8-Prüfkopf zum Tank
- Becherglas dient als erstes Beruhigungsbecken
- Absetzvorgang findet in der Petrischale statt



**Bild 4.39** Prüfaufbau zur Bewertung der Schlammbildungsneigung

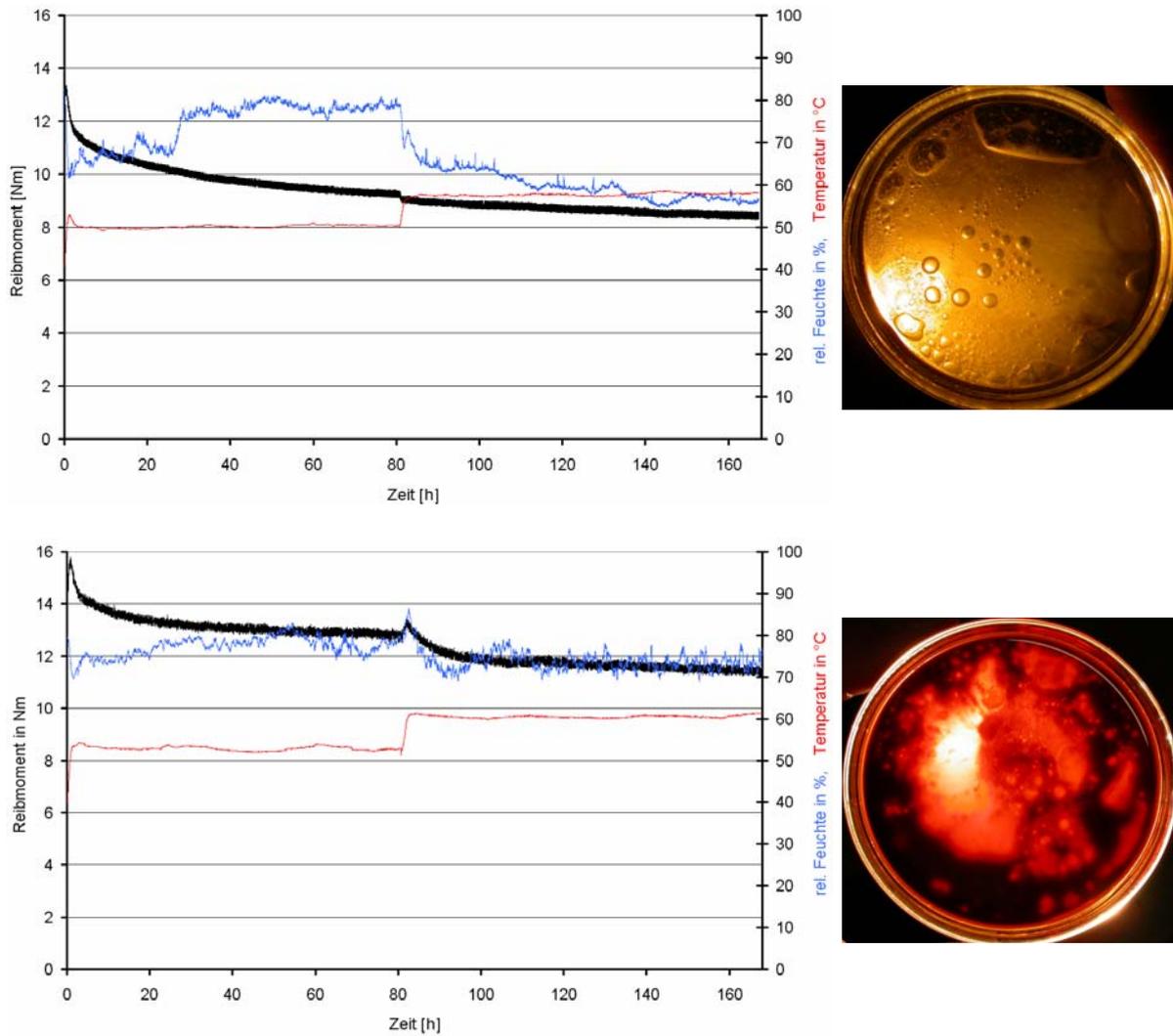
Mit Hilfe der ebenfalls in das Schmieraggregat integrierten FE8-Wassergehaltsregelung, vgl. Kapitel 4.1.3.1, wird die Tanktemperatur für beide Öle zunächst bei einer relativen Feuchte von  $\varphi = 70\%$  auf einen Wert von  $\vartheta_{\text{Tank}} = 50^\circ\text{C}$  eingestellt, nach etwa der halben Versuchsdauer von  $t = 80\text{ h}$  wird die Temperatur auf  $\vartheta_{\text{Tank}} = 60^\circ\text{C}$  erhöht.

Alle weiteren relevanten Versuchsbedingungen sind in Tabelle 7 zusammengefasst. Gegenüber den FE8-Standard-Verschleißbedingungen wird die Drehzahl auf  $U = 75\text{ min}^{-1}$  erhöht und entspricht damit FE8-Ermüdungsbedingungen.

<b>Prüflast</b>	$F_{\text{PI}} = 80\text{ kN}$
<b>Drehzahl</b>	$U = 75\text{ min}^{-1}$
<b>Öltemperatur</b>	$\vartheta_{\text{Öl}} \approx 50^\circ\text{C}$ , nach 80 h Erhöhung auf $\vartheta_{\text{Öl}} \approx 60^\circ\text{C}$
<b>Ölfeuchte</b>	$\varphi_{\text{Öl}} \approx 70\%$
<b>Versuchsdauer</b>	$t_{\text{Versuch}} = 168\text{ h}$ (Wasser-Schlammtest)

**Tabelle 7:** Versuchsbedingungen FE8-Wasser-Schlammtests

Die folgenden Darstellungen in Bild 4.40 zeigen die Verläufe von Öltemperatur und Ölfeuchte im Tank des Schmieraggregates gemeinsam mit dem Reibmoment über der gesamten Versuchsdauer von  $t_{\text{Versuch}} = 168\text{ h}$ . Deutlich ist die Temperaturerhöhung zur Mitte der Versuchszeit zu erkennen, entsprechend sinkt der Reibmomentverlauf aufgrund der Viskositätsverminderung der Schmierstoffe auf ein geringeres Niveau ab.



**Bild 4.40:** Temperatur- und Feuchteverlauf, qualitative Bewertung der Schlammbildung

Der Verlauf der relativen Feuchte weist bei dem Versuch mit WLOB 1 (oberes Diagramm und Foto) eine deutliche Schwankung von  $\varphi = 60\%$  bis  $\varphi = 80\%$  auf, zumindest in zeitlicher Mittelung kann hier aber dennoch von einem Wert von etwa  $\varphi = 70\%$  ausgegangen werden. Gegenlichtaufnahmen der Petrischalen nach Ende der Gesamtlaufzeit von  $t_{\text{Versuch}} = 168 \text{ h}$  zeigen die signifikant unterschiedlichen Absetzmengen der beiden Öle. Während bei WLOB 1 nur eine leichte Beeinträchtigung der Lichtdurchlässigkeit festzustellen ist, die auch als Trübung durch ausgefallenes Wasser aufgefasst werden kann, wird das Gegenlicht bei WLOR 4 durch Absetzprodukte deutlich abgeschattet. Diese hier qualitativ dargestellten Ergebnisse bestätigen die Tendenz der Feldversuche, die gezeigt haben, dass aufgrund von Zusetzungen der Hauptfilter auf der Anlage Bockelwitz 4 (Schmierstoff: WLOR 4), deutlich früher gewechselt werden musste als auf der mit dem biogenen Schmierstoff befüllten Anlage Bockelwitz 6. Offenbar zeigt also der Referenzschmierstoff eine deutliche Tendenz zur Schlammbildung, die im Vergleich mit dem sehr gering additivierten biogenen Schmierstoff im Wesentlichen auf Reaktionsvorgänge der Additive untereinander, mit dem Grundöl oder auch mit Wasser,

begünstigt durch hohe Temperatur- und Druckbelastung in den Lagerstellen, zurückgeführt werden muss.

Im laufenden Betrieb von Zahnradgetrieben kommt es durch Verwirbelung des Getriebeöles mit der Luft des Getriebeinnenraumes zu einem Lufteintrag in den Schmierstoff, der die Luft sowohl in gelöster als auch in ungelöster Form aufnimmt. In welchem Umfang der Schmierstoff in der Lage ist, Luft zu lösen, hängt zum einen von der Art und Zusammensetzung des Grundöles ab, zum anderen von äußeren Faktoren wie Druck und Temperatur, [Her04].

Während, zumindest bei niedrigen Drücken, der Einfluss der im Schmierstoff gelösten Luft auf Viskosität und Kompressibilität gering ist, [Hub77], ist das vom Schmierstoff aufgenommene ungelöste Luftvolumen, das einerseits als Luft-in-Öl-Dispersion und andererseits als Oberflächenschaum auftritt, aufgrund einer verschlechterten Wärmeabgabe nach [Opp79] und einer beschleunigten Ölalterung durch Oxidation [Her04] in der überwiegenden Anzahl praktischer Anwendungen unerwünscht.

Ziel der am IME durchgeführten Untersuchungen ist es, den biogenen Schmierstoff WLOB 1 und das Referenzprodukt WLOB 4 hinsichtlich ihres Schaumverhaltens zu untersuchen und mögliche Einflüsse durch erhöhte Wassergehalte nachzuweisen. Die Versuche zur Schaumbildung finden im Planetengetriebe-Verspannprüfstand statt, dessen Prüfgetriebegehäuse zu diesem Zweck mit einer Glasscheibe versehen ist (vgl. Kapitel 4.1.3.4, Bild 4.33). Die Versuchsdurchführung erfolgt analog zu [Her04] in Anlehnung an den „Flender-Schaumtest“ [Fle01], bei dem mit Hilfe einer Stirnradpaarung Luft in das zu prüfende Öl eingemischt wird. Die Versuchsparameter sind in Tabelle 8 zusammengestellt.

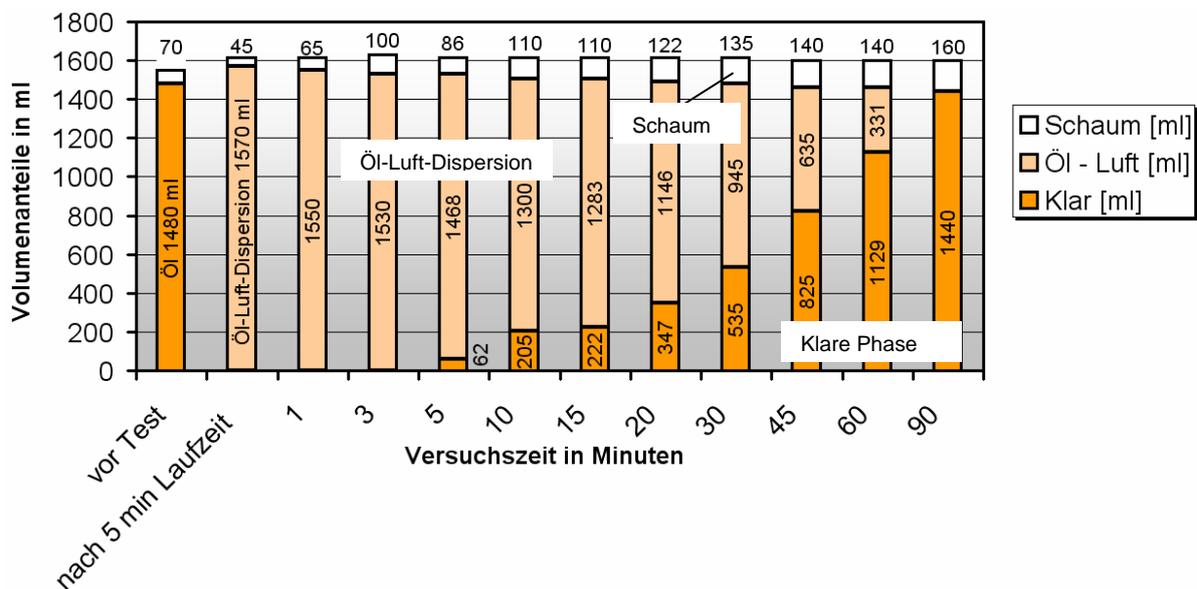
<b>Prüflast</b>	Versuche finden lastfrei statt
<b>Drehzahl</b>	$U = 1500 \text{ min}^{-1}$
<b>Ölvolumen</b>	$V = 1500 \text{ ml}$
<b>Öltemperatur</b>	$\vartheta_{\text{Öl}} \approx 70^\circ\text{C}$ zu Versuchsbeginn, Abkühlung auf Umgebungstemperatur während der Versuchszeit
<b>Ölfeuchte</b>	$\varphi_{\text{ÖL}} \approx 80\%$ zu Versuchsbeginn (Öl befeuchtet), $\varphi_{\text{ÖL}} \approx 6...8\%$ zu Versuchsbeginn (Öl im Anlieferungszustand)
<b>Vermischung</b>	$t_{\text{misch}} = 5 \text{ min}$
<b>Versuchsdauer</b>	$t_{\text{Versuch}} = 90 \text{ min}$

**Tabelle 8:** Versuchsbedingungen Schaumtest

In das Prüfgetriebegehäuse wird ein Ölvolumen von  $V = 1500 \text{ ml}$  (dies entspricht etwa einer Füllhöhe bis zur Achsmittle der Sonne) des Versuchsöls eingefüllt und auf  $\vartheta_{\text{Öl}} = 70^\circ\text{C}$  erwärmt. Bei den Versuchen unter Wassereinfluss wird mit Hilfe der Wassergehaltsregelung zusätzlich eine Ölfeuchte von  $\varphi_{\text{Öl}} = 80\%$  aufgeprägt. Das Versuchsöl wird bei einer Antriebsdrehzahl von  $n_{\text{an}} = 1500 \text{ min}^{-1}$  für einen Zeitraum von  $t_{\text{misch}} = 5 \text{ min}$  lastfrei mit der Luft des Prüfgetriebeinnenraumes vermischt. Nach Abschalten des Antriebes wird durch das Schauglas die Bildung und Rückbildung der entstandenen Öl-Luft-Dispersion und des Oberflächenschaums nach 1, 3, 5, 10, 15,

20, 30, 45, 60 und 90 Minuten fotografiert und bewertet. Während der gesamten Versuchszeit von  $t_{\text{Versuch}} = 90 \text{ min}$  kühlt das Prüföl deutlich ab, was bei vorheriger Anfeuchtung zu einer Eintrübung durch Taupunktunterschreitung im Öl führen kann.

Der Referenzschmierstoff WLOR 4 zeigt bei 8% relativer Feuchte, d. h. ohne zusätzlich Befeuchtung, nach einer Laufzeit des Prüfgetriebes von  $t_{\text{misch}} = 5 \text{ min}$  eine Zunahme des Gesamtvolumens durch dispergierte Luft um etwa 4,2% von 1550 ml auf 1615 ml (Bild 4.41). Auf dem Ölspiegel ist zu diesem Zeitpunkt vergleichsweise wenig Oberflächenschaum zu beobachten, er nimmt mit ca. 45 ml nur etwa 2,7% des Gesamtvolumens zu diesem Zeitpunkt ein. Im Lauf des Versuchs steigen permanent Luftbläschen an die Oberfläche und führen dort zu einer kontinuierlichen Zunahme des Oberflächenschaums bis zum Ende der Beobachtung.



**Bild 4.41:** Schaumtest WLOR 4, 70°C, 8% relative Feuchte

Etwa 5 Minuten nach Abschalten des Antriebsmotors bildet sich im unteren Bereich des Getriebegehäuses eine klare Phase aus, die am Ende der Beobachtungszeit nach 90 Minuten 90% des Gesamtvolumens von 1600 ml einnimmt. Anhand der Zunahme der klaren Phase über der Beobachtungszeit lässt sich die Luftabgaberate der Schmierstoffe bewerten. Bildet man den Quotienten aus der Differenz des Volumens der Öl-Luft-Dispersion nach 5 Minuten Laufzeit und dem der Öl-Luft-Dispersion nach 60 Minuten zu der zwischen diesen beiden Zeitpunkten verstrichenen Zeit, so lässt sich die Luftabgaberate als Luftvolumenstrom in ml/min nach Formel 4.9 quantifizieren

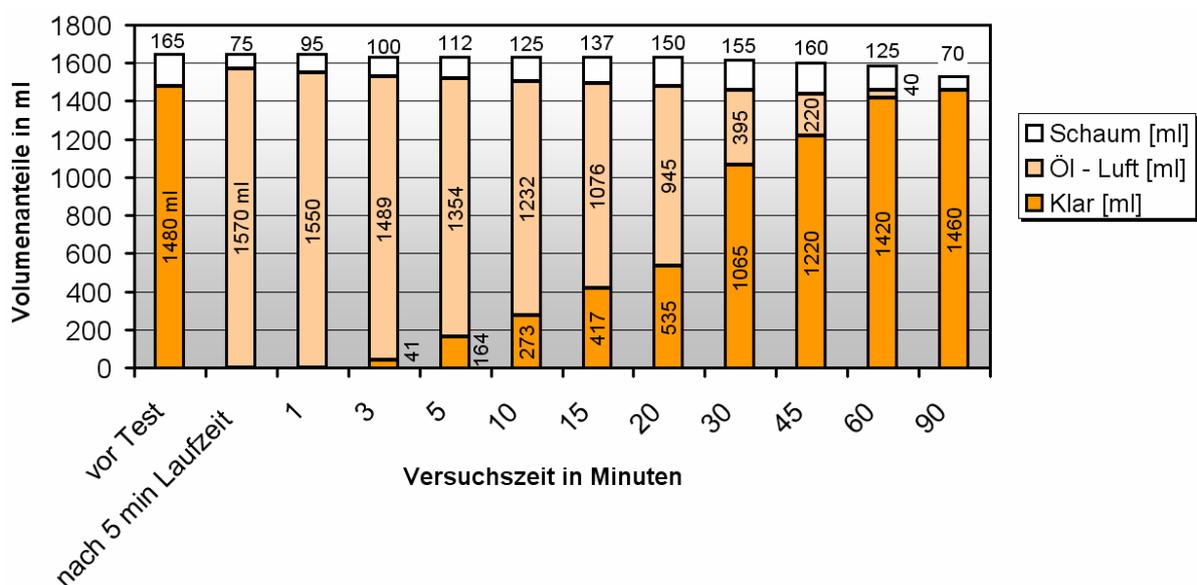
$$v_{\text{Luft}} = \frac{\Delta V_{\text{Luft}}}{\text{Zeit}} = \frac{V_{\text{Luft dispergiert nach } t_{\text{misch}}} - V_{\text{Luft dispergiert nach 60min}}}{60 \text{ min}} \quad 4.9$$

Das dispergierte Luftvolumen  $V_{\text{Luft, dispergiert nach } t_{\text{misch}}}$  bestimmt sich aus der Differenz des Volumens der Öl-Luft-Dispersion nach der Vermischung mit dem Volumen klaren Öls vor Testbeginn, für WLOR 4 in unbefeuchtetem Zustand beispielsweise zu  $1570 \text{ ml} - 1480 \text{ ml} = 90 \text{ ml}$ . Bezogen auf das Gesamtvolumen nach der Durch-

mischung von 1570 ml entspricht dies einem Anteil von 5,73%. Nimmt man für den Zeitpunkt  $t = 60$  min nach Ende der Vermischung ebenfalls einen Luftanteil von 5,73% in der Öl-Luft-Dispersion von 331 ml an (vgl. Bild 4.41), entspricht dies einem dispergierten Rest-Luftvolumen von ca. 19 ml. Innerhalb von 60 Minuten ist aus dem Öl also ein Luftvolumen von  $\Delta V_{\text{Luft}} = 90 \text{ ml} - 19 \text{ ml} = 71 \text{ ml}$  abgegeben worden. Für WLOR 4 mit 8% relativer Feuchte ergibt sich daraus nach Formel 4.9 eine Luftabgaberate von  $\dot{v}_{\text{Luft}} = 1,18 \text{ ml/min}$ .

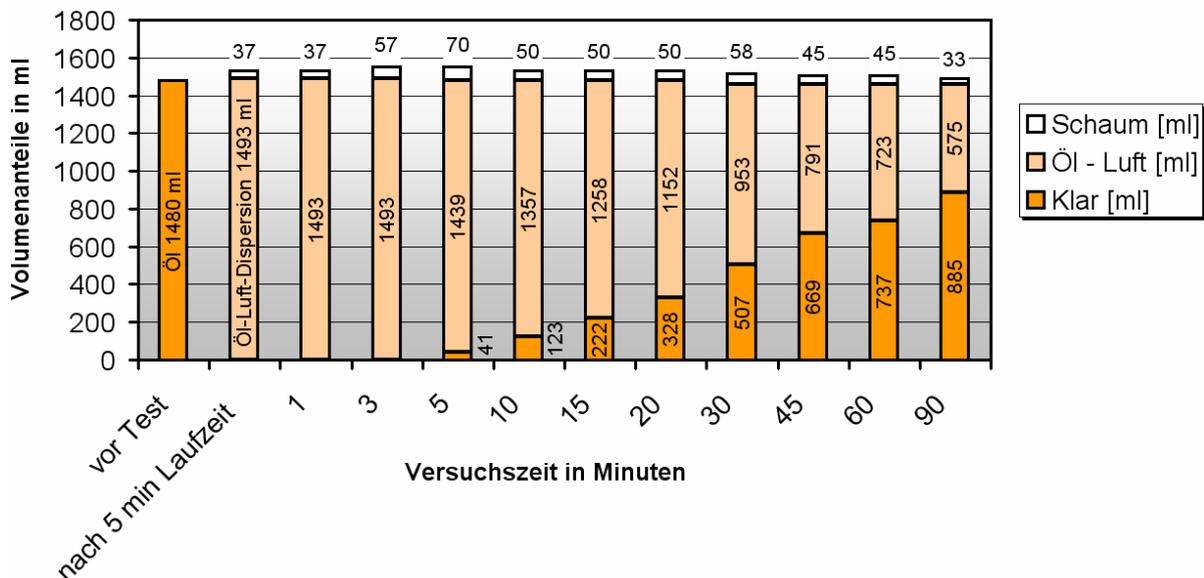
Durch die Zugabe von Wasser treten bei WLOR 4 keine signifikanten Veränderungen hinsichtlich der Schaumbildung ein (Bild 4.42). Das Volumen nimmt durch die Dispersion von Luft während der fünfminütigen Laufzeit ebenso wie beim trockenen Öl um 5,73%, bezogen auf das Volumen der Öl-Luft-Dispersion zu, diese enthält damit zu diesem Zeitpunkt ein Luftvolumen von 90 ml.

Eine Stunde nach Stillsetzen des Antriebs nimmt die Öl-Luft-Dispersion noch ein Volumen von 40 ml mit einem Luftvolumen von ca. 2,3 ml ein, sodass sich nach Formel 1.8 eine Luftabgaberate von  $\dot{v}_{\text{Luft}} = 1,46 \text{ ml/min}$  ergibt, die sogar etwas höher ist als bei unbefeuchtetem Öl. Ebenso wie bei dem Versuch mit trockenem WLOR 4 nimmt das Volumen des Oberflächenschaums bis etwa 60 Minuten nach Stillsetzen des Antriebs durch an die Oberfläche aufsteigende Luftblasen kontinuierlich zu. Dieser Vorgang ist zwischen 60 min und 90 min nach Ende der Durchmischung abgeschlossen, der Oberflächenschaum beginnt zusammenzufallen und nimmt nach 90 min nur noch ein Volumen von 70 ml ein. Diese Schaummenge ist geringer als die vor dem Test, was auf Verwirbelungen und Lufteintrag im Zuge der Befüllung des Prüfgetriebes mit Hilfe von Umwälzpumpen zurückzuführen ist.



**Bild 4.42:** Schaumtest WLOR 4, 70°C, 80% relative Feuchte

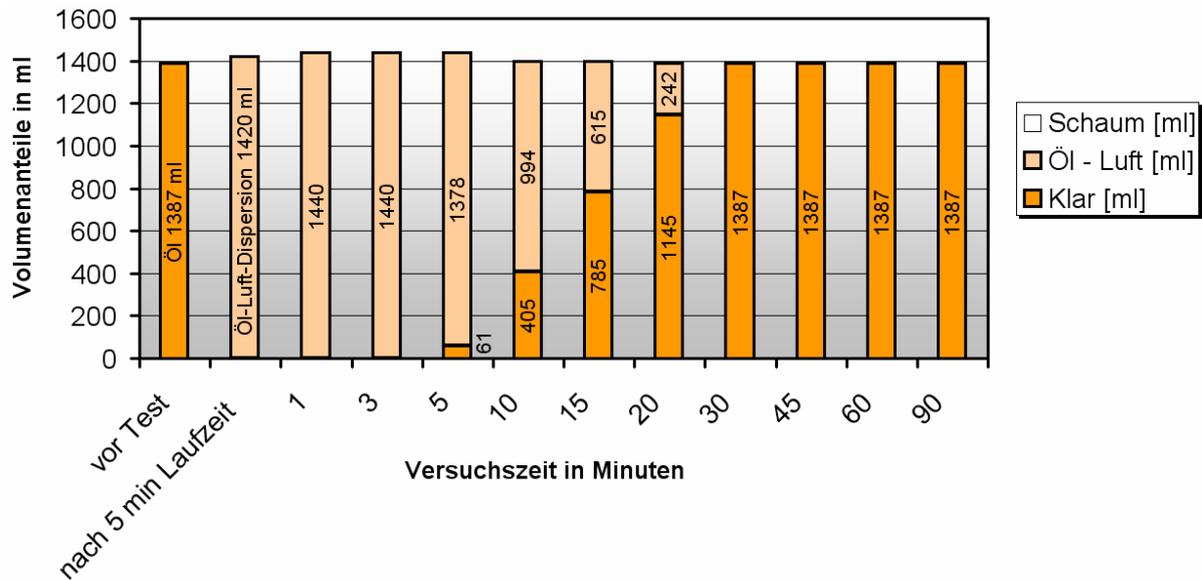
Die Neigung zur Bildung von Oberflächenschaum ist bei dem biogenen Schmierstoff WLOB 1 sowohl im trockenen als auch im befeuchteten Zustand geringer ausgeprägt als bei dem konventionellen Referenzschmierstoff (vgl. Bild 4.43 und Bild 4.44). Bei WLOB 1 im nicht befeuchteten Zustand (Bild 4.43), zeigt sich nach Ende der Vermischung darüber hinaus eine geringere Volumenzunahme von 1480 ml auf 1493 ml als beim trockenen Referenzschmierstoff WLOR 4. Der Vergleich der beiden Schmierstoffe im nicht befeuchteten Zustand zeigt einen signifikanten Unterschied in Bezug auf die Luftabgaberate: während bei WLOR 4 nach 90 Minuten das Öl wieder vollständig klar erscheint, ist nach der selben Zeit bei WLOB 1 noch ein etwa 40-prozentiger Anteil von Öl-Luft-Dispersion am Gesamtvolumen zu beobachten. Nach



**Bild 4.43:** Schaumtest WLOB 1, 70°C, 6% relative Feuchte

Formel 4.9 ergibt sich für das nicht befeuchtete Öl WLOB 1 mit  $\dot{v}_{Luft} = 0,11$  ml/min eine deutlich geringere Luftabgaberate als die von WLOR 4 in trockenem Zustand.

Bei Befeuchtung verändert sich das Schaumverhalten von WLOB 1 deutlich. Einerseits kann nach Ende der Durchmischungszeit kein Oberflächenschaum festgestellt werden, auch durch das Aufsteigen und Austreten dispergierter Luft während der nachfolgenden Beobachtungszeit entsteht kein Oberflächenschaum. Andererseits geschieht die Luftabgabe aus der Öl-Luft-Dispersion nun bedeutend schneller, sodass das Öl bereits nach 30 Minuten wieder vollständig klar erscheint.



**Bild 4.44:** Schaumtest WLOB 1, 70°C, 80% relative Feuchte

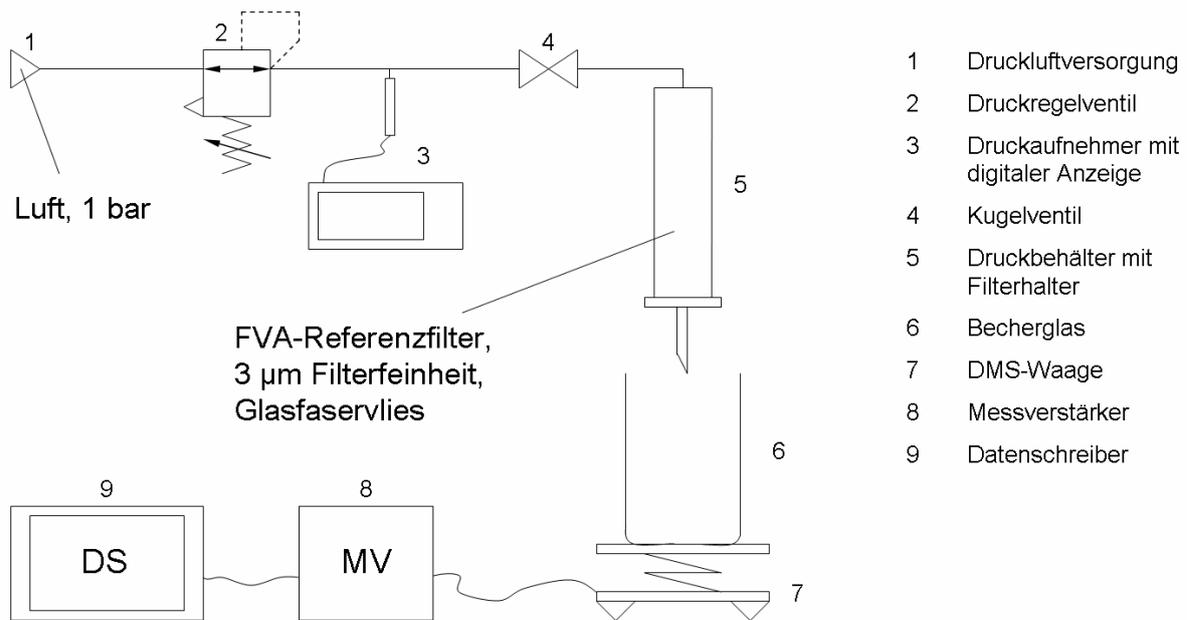
Wird die dispergierte Luft in weniger als einer Stunde wieder abgegeben, wird die Menge abgegebener Luft durch Differenzbildung der Volumina der dispergierten Luft nach Durchmischung und der zum letzten Beobachtungszeitpunkt, bevor das Öl wieder vollständig klar erscheint, bestimmt. Bei WLOB 1 mit 80% relativer Feuchte (Bild 4.44), ist dies der Beobachtungszeitpunkt nach 20 Minuten.

$$\dot{v}_{Luft} = \frac{\Delta V_{Luft}}{Zeit} = \frac{V_{Luft \text{ dispergiert nach } t_{misch}} - V_{Luft \text{ Öl nicht vollst. klar}}}{20 \text{ min}} \quad 4.10$$

Für WLOB 1 mit 80% relativer Feuchte ergibt sich nach Formel 4.10 eine Luftabgaberate von  $\dot{v}_{Luft} = 1,36 \text{ ml/min}$ .

Insgesamt ist der Einfluss von Wasser auf die Bildung von Oberflächenschaum bei beiden Ölen gering, bei WLOB 1 kann bei einer erhöhten Feuchte von 80% kein Oberflächenschaum beobachtet werden. Sowohl der Referenzschmierstoff WLOR 4 als auch das biogene Produkt WLOB 1 zeigen bei erhöhter Feuchte ein beschleunigtes Abgabevermögen für dispergierte Luft. Während sich das Luftabgabevermögen bei WLOR 4 unter Wassereinfluss aber nur geringfügig erhöht, ist bei WLOB 1 eine deutliche Steigerung zu verzeichnen. Hinsichtlich der Schaumneigung ist bei keinem der beiden Öle eine negative Beeinflussung der Einsatzfähigkeit unter Praxisbedingungen zu erwarten.

Vor dem Hintergrund der in den Feldversuchen im Windpark Bockelwitz beobachteten deutlich unterschiedlichen Filterstandzeiten der Anlagen 4 (WLOR 4) bzw. 6 (WLOB 1) wurde unter den Projektpartnern vereinbart, am IME Prüfstandsuntersuchungen zur Filtrierbarkeit unter Feuchteinfluss mit den beiden Feldversuchsölen WLOR 4 und WLOB 1 durchzuführen. Am IME steht dafür ein modifizierter Single-Pass-Filtrierbarkeitsprüfstand nach [DIN ISO 13357] zur Verfügung (Bild 4.45).



**Bild 4.45:** Single-Pass Filtrierbarkeitsprüfstand am IME, modifiziert nach ISO 13357

Über ein Druckregelventil wird einem Druckbehälter Luft mit einem Druck von  $p_L = 1$  bar zugeführt. Der Luftdruck wird mit einem Druckaufnehmer permanent kontrolliert und dient dazu, den zu prüfenden Schmierstoff unter einer definierten Vorspannung durch den im Druckbehälter in einem Filterhalter aufgenommenen FVA-Referenzfilter mit einer Feinheit von  $3\ \mu\text{m}$  hindurchzudrücken. Der filtrierte Schmierstoff wird in einem Becherglas aufgenommen und das Volumen durch Wägung mit Hilfe einer DMS-Waage und Umrechnung über die Dichte bestimmt.

Über einen Messverstärker wird die Zunahme des filtrierten Ölvolumens über der Zeit mit einem Datenschreiber aufgezeichnet und der Zeitbedarf zur Filtrierung eines Ölvolumens von  $V_{\text{Öl Filtr}} = 300\ \text{ml}$  bestimmt. Die Filtrierbarkeitsversuche werden aufgrund der sehr sensiblen Reaktion des Verfahrens auf Temperaturschwankungen im Klimaschrank des IME bei einer Standard-Prüftemperatur von  $\vartheta = 21^\circ\text{C}$  durchgeführt.

Um den Einfluss verschiedener relativer Ölfeuchten bzw. Wassergehalte auf die Filtrierbarkeit untersuchen zu können, wurden Frischölproben mit Hilfe der Wassergehaltsregelung am Planetengetriebeverspannungsprüfstand, vgl. Kapitel 4.1.3.4, zunächst bei  $\vartheta = 40^\circ\text{C}$  im Prüfkreislauf auf die in Bild 4.46 dargestellten Feuchteniveaus befeuchtet. Zur Untersuchung einer besonders hohen Wasserbeladung wurde eine Ölprobe bei  $\vartheta = 70^\circ\text{C}$  auf  $\varphi = 80\%$  befeuchtet. Bei der Lagerung der Ölproben in luftdicht verschlossenen Glasflaschen bis zum Beginn der Filtrierbarkeitsversuche konnten bei den beiden Proben mit WLOR 4, die bei  $\vartheta = 40^\circ\text{C}$  und  $\vartheta = 70^\circ\text{C}$  mit  $\varphi = 80\%$  befeuchtet wurden, deutliche schlammartige Ablagerungen auf den Innenflächen der Glasflaschen beobachtet werden, wie die rechte Aufnahme in Bild 4.46 zeigt.

Konditionierung der Öle vor den Filtrierbarkeitsuntersuchungen:  
 bei  $\vartheta = 40^\circ\text{C}$  mit  $\varphi = 15\%$ ,  $20\%$ ,  $30\%$ ,  $60\%$ ,  $80\%$  und  
 bei  $\vartheta = 70^\circ\text{C}$  mit  $\varphi = 80\%$



**Bild 4.46:** Konditionierte Ölproben von WLOR 4 für Filtrierbarkeitsversuche

Diese beiden Ölproben wiesen erwartungsgemäß mit 1465 ppm bzw. 2211 ppm auch die höchsten Wassergehalte auf, wie die in Tabelle 9 dargestellten Ergebnisse der

Temperatur	WLOR 4					
$\vartheta = 40^\circ\text{C}$	$\varphi = 15\%$	$\varphi = 20\%$	$\varphi = 30\%$	$\varphi = 60\%$	$\varphi = 80\%$	rel. Feuchte
	950 ppm	534 ppm	681 ppm	993 ppm	1465 ppm	Wassergehalt
$\vartheta = 70^\circ\text{C}$					$\varphi = 80\%$	rel. Feuchte
					2211 ppm	Wassergehalt

**Tabelle 9:** Feuchten und Wassergehalte von WLOR 4 für die Filtrierbarkeitsversuche

Wassergehaltsbestimmung nach der Karl-Fischer-Methode [DIN 51777] zeigen. Unerklärbar und vermutlich auf einen Messfehler zurückzuführen ist der hohe Wassergehalt bei der mit  $\varphi = 15\%$  befeuchteten Probe. Eine entsprechende Probenvorbereitung erfolgte auch für den biogenen Schmierstoff WLOB 1. Hierbei konnten auch bei den hochbefeuchteten Proben keine Ablagerungen in den Probegefäßen festgestellt werden. Die im Rahmen der Probenvorbereitung ermittelten Wassergehalte nach Karl-Fischer sind in der folgenden Tabelle 10 zusammengefasst.

Temperatur	WLOB 1					
$\vartheta = 40^\circ\text{C}$	$\varphi = 15\%$	$\varphi = 20\%$	$\varphi = 30\%$	$\varphi = 60\%$	$\varphi = 80\%$	rel. Feuchte
	385 ppm		701 ppm	1187 ppm	1321 ppm	Wassergehalt
$\vartheta = 70^\circ\text{C}$					$\varphi = 80\%$	rel. Feuchte
					2068 ppm	Wassergehalt

**Tabelle 10:** Feuchten und Wassergehalte von WLOB 1 für die Filtrierbarkeitsversuche

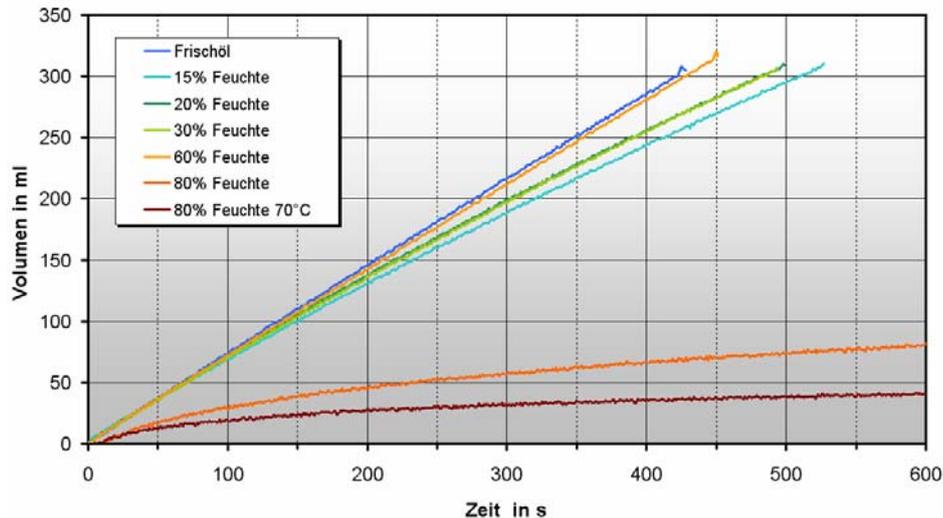
Die Ergebnisse der Filtrierbarkeitsversuche zeigen für WLOR 4 die beste Filtrierbarkeit für das unbefeuchtete Frischöl. Mit  $t_{\text{Filt}} = 423$  s wird hierbei der geringste Zeitbedarf für die Filtrierung eines Ölvolumens von  $V_{\text{Öl Filtr}} = 300$  ml benötigt (Bild 4.47). Grundsätzlich kann die Aussage getroffen werden, dass bei Befeuchtung von WLOR 4 auf  $\varphi = 15\%$ ,

$\varphi = 20\%$  und  $\varphi = 30\%$  relative Feuchte der Zeitbedarf für die Filtrierung des gleichen Volumens tendenziell deutlich ansteigt, auch wenn sich keine Reihenfolge entsprechend der Höhe der Befeuchtung einstellt.

Konditionierung der Öle vor den Filtrierbarkeitsuntersuchungen:

bei  $\vartheta = 40^\circ\text{C}$  mit  $\varphi = 15\%, 20\%, 30\%, 60\%, 80\%$  und

bei  $\vartheta = 70^\circ\text{C}$  mit  $\varphi = 80\%$



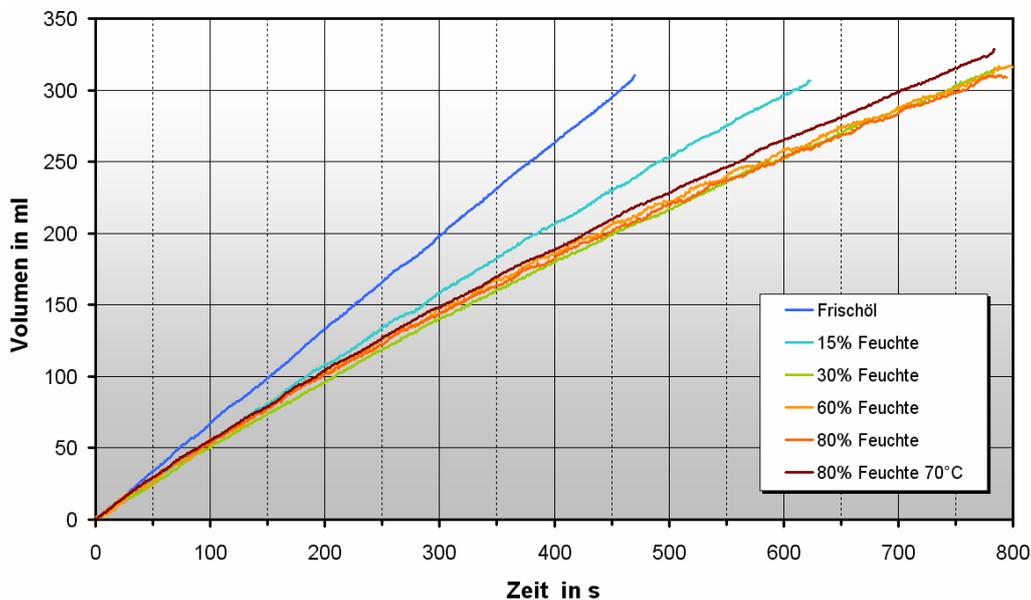
**Bild 4.47:** Filtrierbarkeit von WLOR 4 in Abhängigkeit von der relativen Ölfeuchte

Eine signifikante Verschlechterung des Filtrierungsverhaltens zeigt sich bei den beiden Ölproben mit der höchsten Befeuchtung von  $\varphi = 80\%$ . Der Zeitbedarf steigt so deutlich an, dass nach einer Zeit von 600 Sekunden nur etwa 45 ml bzw. 80 ml filtriert werden konnten. Offenbar ist es bei den Versuchen mit den hochbefeuchteten Ölproben zu Filterverblockungen gekommen. Dieses Ergebnis korreliert sehr gut mit der Beobachtung schlammartiger Ablagerungen an den Innenwänden der Probengefäße (vgl. Bild 4.46). Ähnlich wie der Referenzschmierstoff WLOR 4 zeigt auch der biogene Schmierstoff WLOB 1 eine tendenzielle Verschlechterung der Filtrierbarkeit mit zunehmender relativer Ölfeuchte (Bild 4.48). Dabei ergeben sich Filtrierzeiten für das Standardvolumen  $V_{\text{Öl Filtr}} = 300 \text{ ml}$ , die beim Frischöl bzw. dem mit  $\varphi = 15\%$  niedriger befeuchteten Öl um ca. 8% (Frischöl) oder ca. 20% ( $\varphi = 15\%$ ) über denen des konventionellen Schmierstoffes liegen.

Konditionierung von WLOB1 vor den Filtrierbarkeitsuntersuchungen:

bei  $\vartheta = 40^\circ\text{C}$  mit  $\varphi = 15\%, 30\%, 60\%, 80\%$  und

bei  $\vartheta = 70^\circ\text{C}$  mit  $\varphi = 80\%$



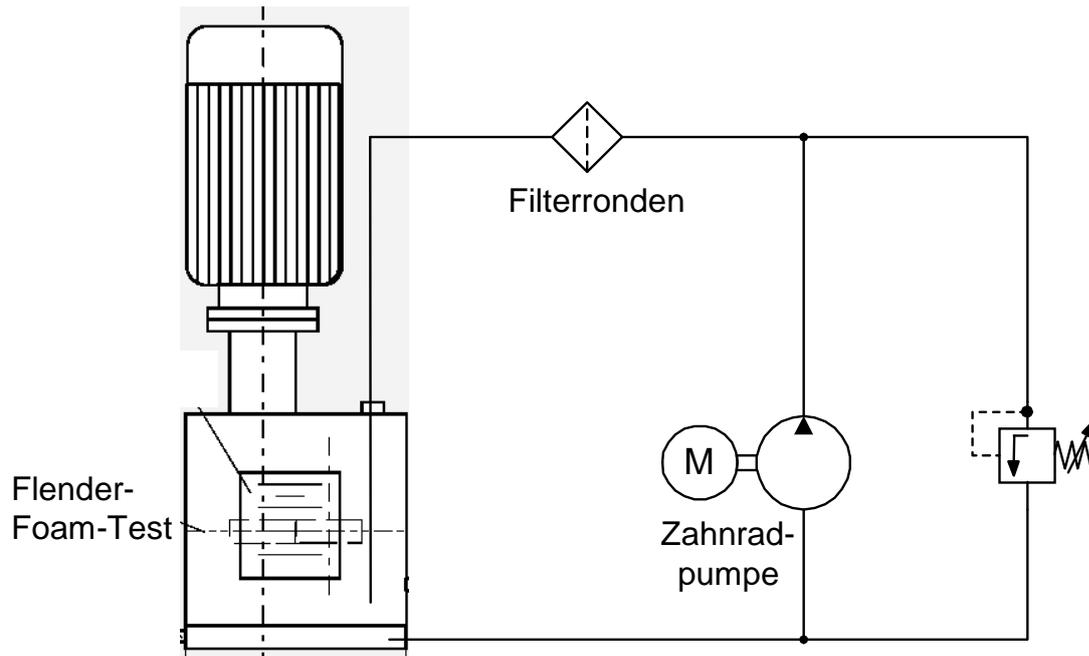
**Bild 4.48:** Filtrierbarkeit von WLOB 1 in Abhängigkeit von der relativen Ölfeuchte

Als deutlicher Unterschied zwischen den beiden untersuchten Ölen zeigt sich jedoch bei WLOB 1 kein völliger Einbruch der Filtrierbarkeit bei hohen Feuchten wie bei der konventionellen Referenz WLOR 4.

Die auf der Feldversuchs-Windkraftanlage Bockelwitz 4 durch WLOR 4 verursachten Filterverblockungen lassen sich mit Hilfe der Prüfstandsuntersuchungen am IME sehr gut nachvollziehen. Als Ursache für die Bildung der schlammartigen Ablagerungen kann in der vergleichenden Betrachtung der beiden Schmierstoffe vor allem eine Reaktion der Additivelemente von WLOR 4 mit dem eingebrachten Wasser angesehen werden. Wenn auch in der Praxis eine geringe Feuchtigkeitsbelastung vorliegt, so wird auf der anderen Seite eine Reaktion der Additivelemente durch die wesentlich höhere thermische und mechanische Belastung des Schmierstoffes stark begünstigt, sodass sich dadurch Ablagerungen bzw. Verblockungen der Filter erklären lassen.

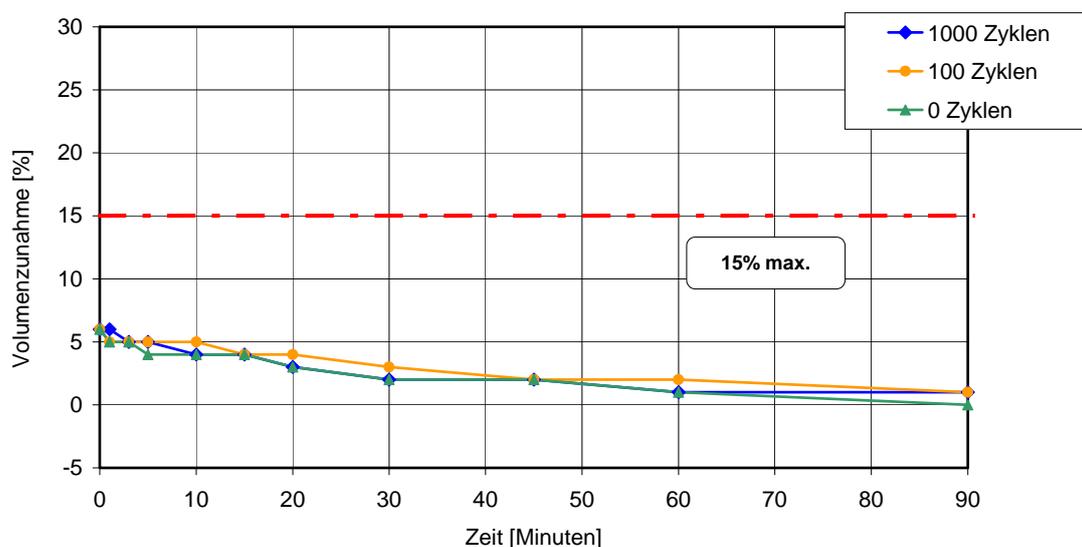
#### 4.1.3.6 Prüfstandsaufbau Schaumtest nach Flender

Im Rahmen des Projektes wurde ein Prüfverfahren für die Filtrierbarkeit von Getriebeölen (Multi-Pass) mit integriertem Flender Schaumtester entwickelt und der Prüfstand aufgebaut (Bild 4.49). Ziel der mit diesem Prüfaufbau durchgeführten Untersuchungen ist die Bewertung der Schaumneigung in Abhängigkeit der Anzahl von Filtrierungsvorgängen. Darüber hinaus kann durch eine Variation der eingesetzten Filterrunden auch der Einfluss der Filterfeinheit auf das Schaumverhalten untersucht werden. Die Versuchsergebnisse zeigen zunächst, dass die beiden eingesetzten Getriebeöle grundsätzlich kompatibel mit den untersuchten Filtermaterialien sind.



**Bild 4.49:** Filtrierbarkeitsprüfstand mit integriertem Flender Schaumtester

WLOB 1 erzielte dabei bessere Ergebnisse als einige andere marktüblichen Getriebeöle. Das Diagramm in Bild 4.50 zeigt, dass das biogene Schmieröl auch nach über 1000 Filtrierungszyklen, d. h. nachdem im statistischen Mittel jedes Volumenelement des Schmierstoffes 1000 Mal durch den Filter hindurchgetreten ist, kein verstärktes Schaumverhalten aufweist, im Gegensatz zum Referenzprodukt WLOR4, welches die maximale Grenze von 15 % markant überschritten hat. Da die an diesem Prüfstand praxisnah untersuchte Verschäumungsneigung von Getriebeölen eine wichtige Anwendungseigenschaft ist, stellt das gute Ergebnis von WLOB 1 ein weiteres Argument für die Eignung und die Sinnhaftigkeit des Einsatzes von WLOB 1 dar.



**Bild 4.50:** WLOB 1 – Verschäumungsbedingte Volumenzunahme und Abklingen der Schaumbildung

#### 4.1.3.7 Ergebnisse aus Untersuchungen zur Substitution von Schmieröl durch biogenes Schmieröl in Pitchgetrieben

Pitchgetriebe werden an Windkraftanlagen zur Verstellung der Rotorblatt-Anstellwinkel eingesetzt. Sie ermöglichen zum einen eine Leistungsregulierung der WEA, zum anderen stellt die Blattverstellung das primäre Bremssystem der pitchgeregelten Windkraftanlagen dar. Pitchgetriebe übernehmen also entscheidende sicherheitsrelevante Funktionen und sind gleichzeitig aufgrund ihrer exponierten Position in der Rotornabe stark wechselnden klimatischen Bedingungen unterworfen. Darüber hinaus laufen Pitchgetriebe mit der Rotornabe um, wodurch sich bei der bisher üblichen Ölschmierung besondere Anforderungen an die Abdichtung der Gehäuse stellen.

Vor diesem Hintergrund werden im Rahmen des Winlub-Projektes Versuche unternommen, die bisherige Ölfüllung durch das biogene Schmieröl WLOB 1 zu ersetzen. Von besonderem Interesse ist in diesem Zusammenhang das Tiefemperaturverhalten das durch Versuchsläufe bei  $-10^{\circ}\text{C}$  und bei  $-30^{\circ}\text{C}$  den Schwerpunkt der Untersuchungen bildet (Bild 4.51).

Die Versuche beginnen mit der Messung M1 bei  $(+)30^{\circ}\text{C}$ , um das Getriebeverhalten bei niedriger Viskosität zu beurteilen. Anschließend wird in  $20^{\circ}\text{C}$ -Stufen über die Messungen M2 und M3 schließlich die Messung M4 bei  $-30^{\circ}\text{C}$  erreicht. Nach einer Stillstandszeit von einigen Stunden (etwa 12 h), wird stichprobenartig eine weitere Messung M5 durchgeführt, um ggf. eine Zeitabhängigkeit der Viskosität festzustellen. Sollte es sich ergeben, dass bei einem Schmierstoff dieser Effekt eine untergeordnete Rolle spielt, kann auf dieses Stillstandsintervall verzichtet werden. Abschließend wird - ebenfalls stichprobenartig - eine Referenzmessung M6 bei  $(+)30^{\circ}\text{C}$  durchgeführt. Diese Messung kann dazu dienen, die Ergebnisse des Versuchslaufes M1 zu verifizieren.

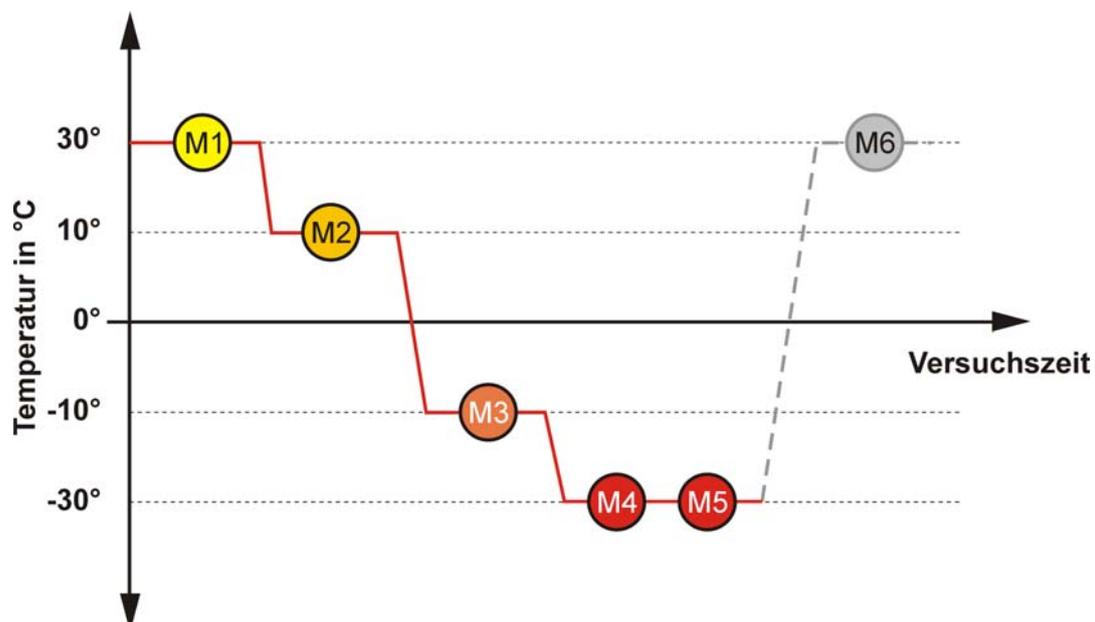
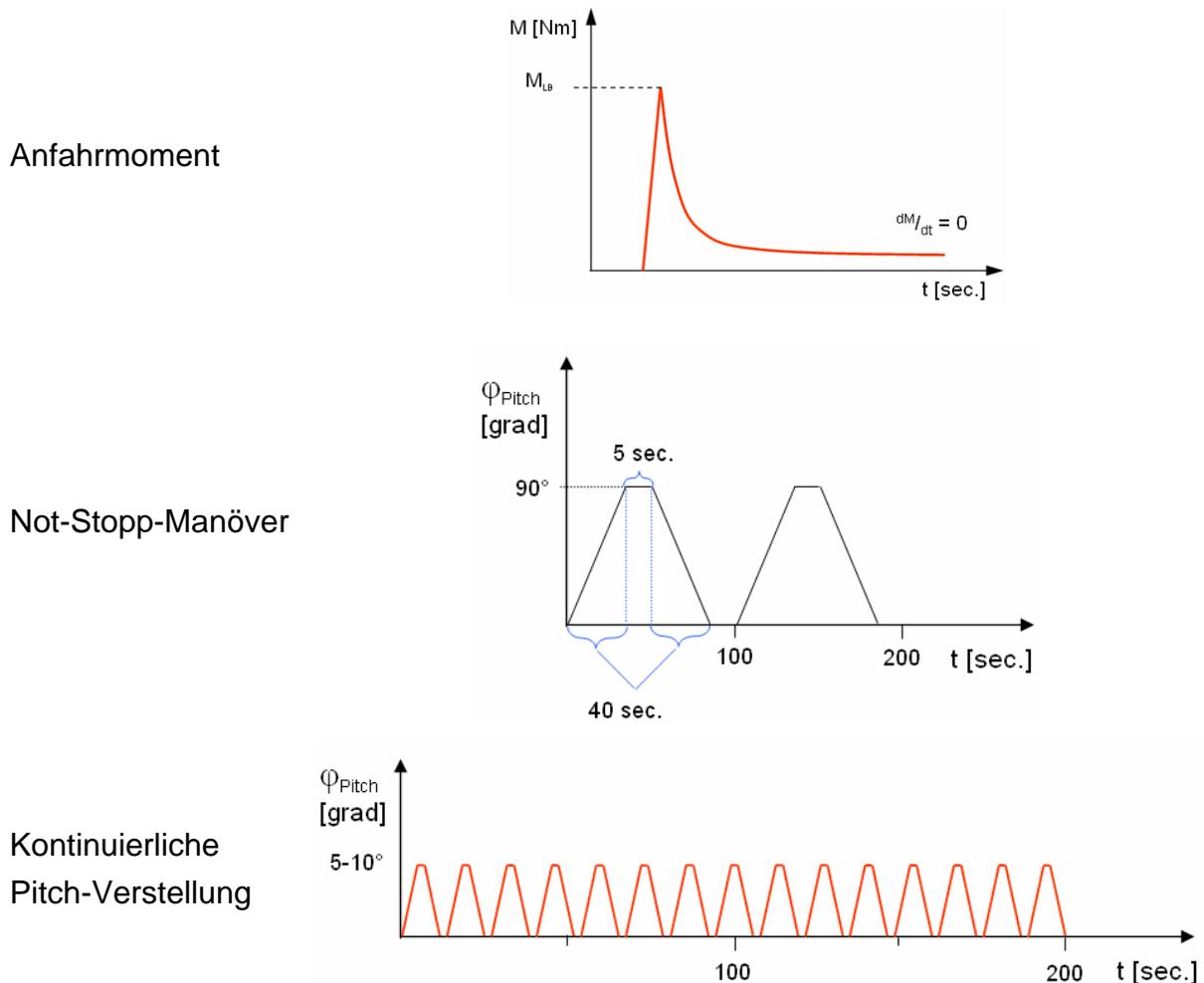


Bild 4.51: Temperaturführung bei den Pitchgetriebe-Untersuchungen

Die Pitchgetriebe werden ohne äußere Last untersucht. Dennoch sollen drei unterschiedliche Manöver im Versuch gefahren werden, um die Einsatzbedingungen praxisnah nachzubilden. Sobald das Getriebe die gewünschte Temperatur erreicht hat, werden bei jeder Temperaturstufe die im Bild 4.52 dargestellten Einsatzbedingungen simuliert:

- Anfahrmoment
- Not-Stopp-Manöver
- Kontinuierliche Pitch-Verstellung



**Bild 4.52:** Pitchgetriebe-Versuche: simulierte Einsatzbedingungen

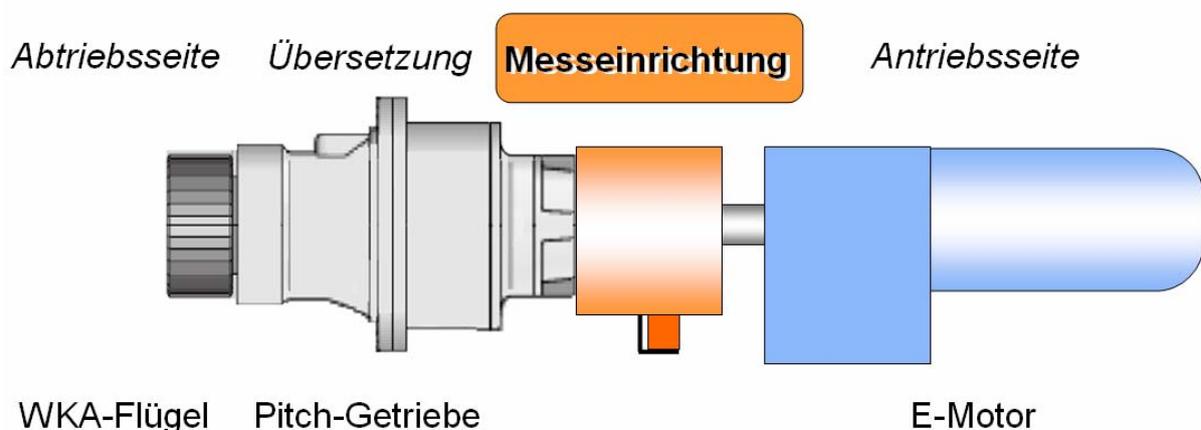
Im ersten Schritt wird das Anfahrmoment  $M_{AN}$  bestimmt. Dazu wird das Getriebe angefahren und solange betrieben, bis ein annähernd gleich bleibendes Antriebsmoment ( $dM/dt = 0$ ) festgestellt werden kann (Darstellung oben in Bild 4.52). Unter Anfahrmoment wird in Anlehnung an [Hol84] das größte beim Start (Anfahren) auftretende Moment bezeichnet.

Ist das Anfahrmoment  $M_{AN}$  bestimmt, folgen anschließend zwei Praxis-Flügelschwenkmanöver. Zunächst soll der Flügelschwenk in Fahnenstellung (WEA-Not-Stopp), also eine Drehung des Flügels um ca.  $90^\circ$  in etwa 40 Sekunden

(entspricht dem realen Manöver) erfolgen. Ist die Fahnenstellung erreicht, wird nach kurzer Verweilzeit (etwa 5 - 10 Sekunden) in entgegengesetzter Richtung verfahren. Wie man der Darstellung in der Mitte von Bild 4.52 entnehmen kann, dauert dieser Zyklus bei vier 90°-Schwenks etwa 3 Minuten.

Durch die kontinuierliche Pitch-Verstellung, also die Veränderung des Anstellwinkels der WEA-Flügel, werden die stochastischen Schwankungen der Eingangsgröße Wind so ausgeglichen, dass eine weitgehend gleichförmige Energieabgabe der Anlagen möglich wird. Insbesondere bei WEA der MW-Klasse führt diese kontinuierliche Verstellung zu einer gleichmäßigeren Betriebsbelastung und zu einer besseren Netzeinspeisung als bei WEA mit Stall-Regulierung. Dem unteren Teil von Bild 4.52 ist der zeitliche Ablauf der kontinuierlichen Pitchverstellung zu entnehmen. Dabei wird analog zum eben dargestellten Versuchslauf das Abtriebsritzel in beide Richtungen verdreht. Diesmal aber nur wenige Grad (5°- 10° am Flügel) in beide Richtungen. Insgesamt dauert auch dieser Zyklus etwa drei Minuten.

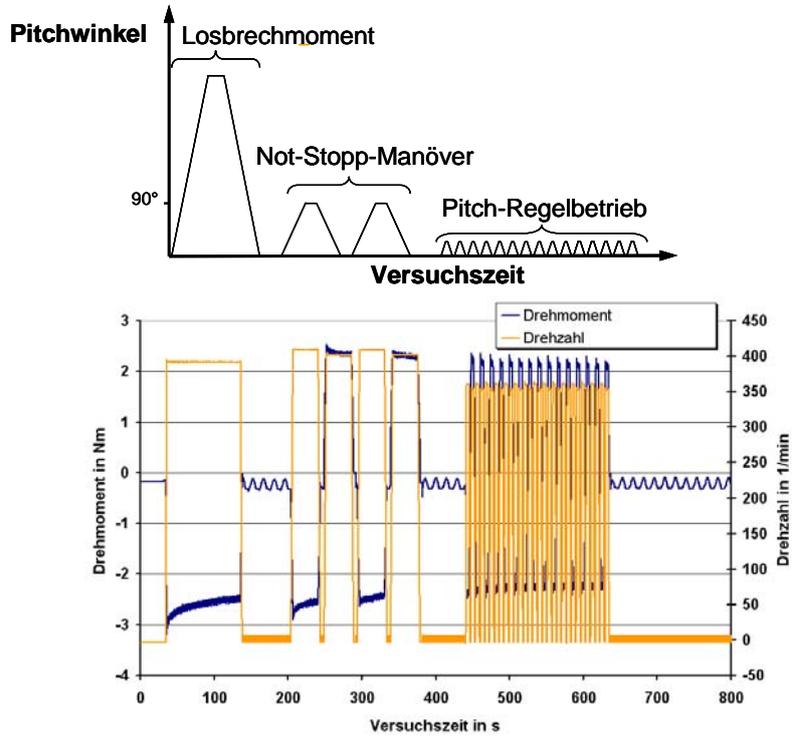
Während der Versuche wird mit einer Messwelle von Hottinger Baldwin Messtechnik (HBM) das Antriebsmoment an der Getriebeeingangswelle zwischen Antriebsmotor und der ersten Stufe des Planetengetriebes gemessen (Bild 4.53).



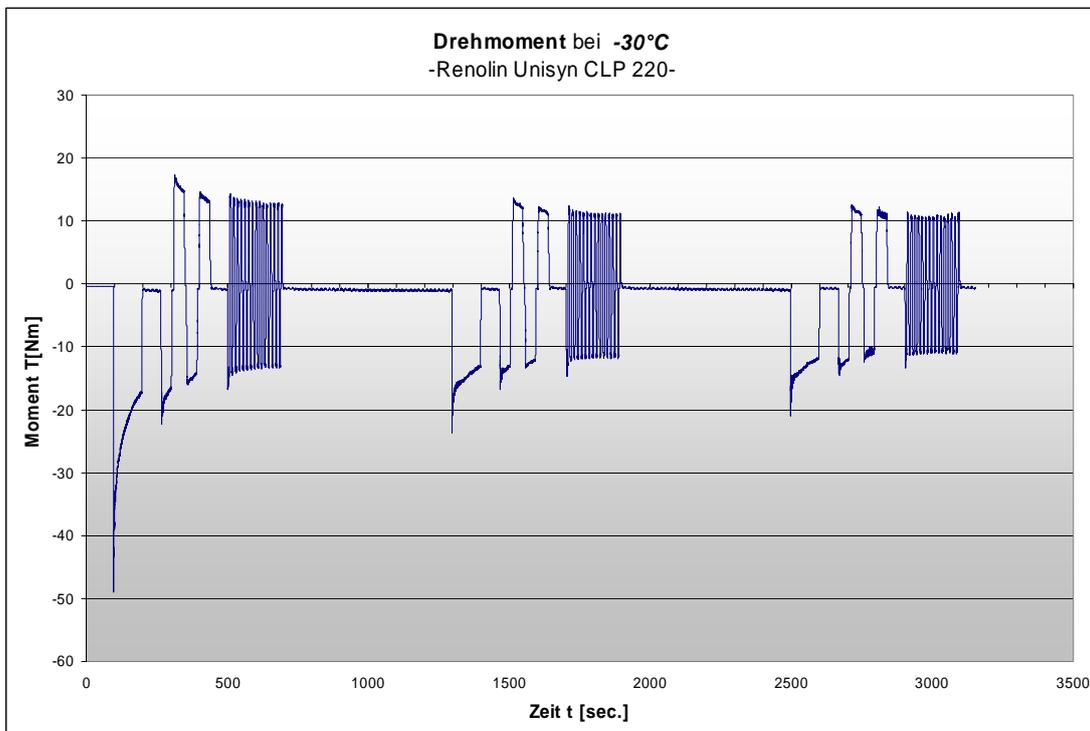
**Bild 4.53:** Versuchsaufbau Pitchgetriebe-Untersuchungen

Eine Gegenüberstellung der Prüfzyklen und des aufgezeichneten Momentenverlaufes zeigt Bild 4.54 beispielhaft für eine Getriebetemperatur von  $\vartheta_G = +10^\circ\text{C}$  mit dem Schmierstoff WLOB 1. Man erkennt das Auftreten von Momentenspitzen beim Anfahr- und beim Not-Stopp-Zyklus. Das höchste Moment wird beim ersten Anfahren erreicht, was darauf zurückgeführt werden kann, dass bei den folgenden Zyklen bereits eine geringfügige Erwärmung des Getriebes durch die Verlustleistung eingetreten ist. Insgesamt bewegen sich die Anfahrmomente bei dieser Versuchstemperatur aber auf einem sehr geringen Niveau von etwa  $T_{AN} = 3 \text{ Nm}$ . Mit abnehmender Versuchstemperatur nehmen die Spitzenmomente sehr schnell zu und erreichen beispielsweise bei dem üblicherweise eingesetzten konventionellen Schmierstoff

Renolin Unisyn CLP 220 bei  $\vartheta_G = -30^\circ\text{C}$  Spitzenwerte bis ca.  $T_{AN} = 50\text{ Nm}$  im Anfahrzyklus (Bild 4.55).



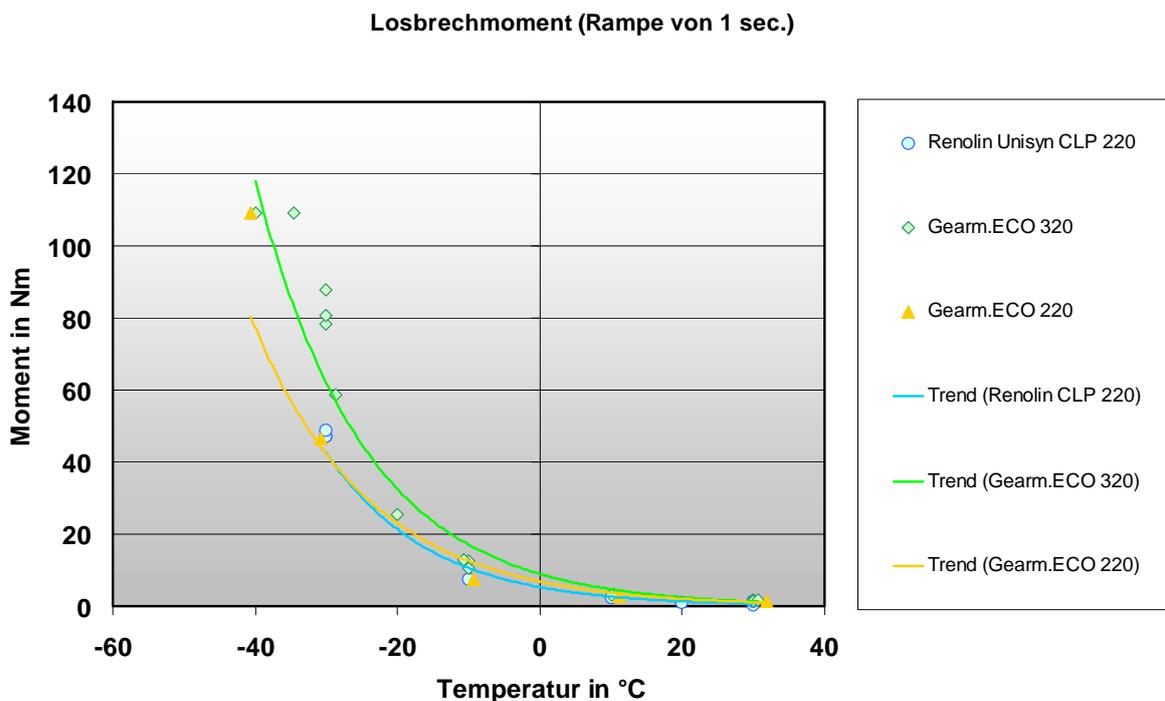
**Bild 4.54:** Momentenverlauf bei WLOB 1 und  $\vartheta_G = +10^\circ\text{C}$



**Bild 4.55:** Momentenverlauf bei Renolin Unisyn CLP 220 und  $\vartheta_G = -30^\circ\text{C}$

Erste Versuche zur Substitution des konventionellen Referenzschmierstoffes durch den biogenen Schmierstoff WLOB 1 ergaben im Tieftemperaturbereich von

$\vartheta_G = -30^\circ\text{C} \dots -40^\circ\text{C}$  deutlich höhere Anfahrmomente als beim Referenzschmierstoff (Bild 4.56). Dies ist keine originäre Eigenschaft des biogenen Schmierstoffes, sondern auf die höhere ISO-VG-Klasse 320 zurückzuführen, wie anschließende Untersuchungen mit dem biogenen Schmierstoff der ISO-VG-Klasse 220 zeigen. Hierbei liegen die Anfahr-Spitzenmomente bis etwa  $\vartheta_G = -30^\circ\text{C}$  auf einem sehr ähnlichen Niveau wie bei der konventionellen Referenz Renolin Unisyn CLP 220.



**Bild 4.56:** Tieftemperatur-Anfahrmomente verschiedener Öle in Pitchgetrieben

Insgesamt ist das Niveau der Anfahrmomente im Tieftemperaturbereich als sehr hoch einzuschätzen, sodass je nach Windkraft-Anlagentyp Probleme beim Anlauf der Pitchverstellung denkbar sind. Die Viskositätsklasse hat offenbar einen signifikanten Einfluss auf das Anfahrmoment, eine Verringerung könnte hier eine Senkung der Anfahrmomente bewirken. Der biogene Schmierstoff verhält sich hinsichtlich der erforderlichen Anfahrmomente nicht schlechter als die konventionelle Referenz.

#### 4.1.4 Feldversuche

##### 4.1.4.1 Identifizierung von Windturbinen für Feldversuche zum Einsatzverhalten von biogenen Schmiermitteln in Hauptgetrieben

Zu Beginn des Vorhabens wurden von der GE Wind Energy GmbH Windturbinen identifiziert, auf welchen ein Test des neuen biologisch abbaubaren Getriebeöls durchgeführt werden kann. An die Windturbinen waren folgende Ideal-Anforderungen gestellt:

- Idealerweise Neuanlagen in Küstennähe am selben Standort für Mitte 2005.

Getriebetyp und Befüllung:

- 1 x GPV451 Castrol Optimol Optigear A320 (Referenzöl),
- 1 x GPV451 Gearmaster Eco 320 (Testöl).

Selber Zustand der Getriebe und Lager an beiden Testanlagen.

Es wurden zwei Testanlagen des Typs GE Wind 1.5s im Windpark Bockelwitz (Sachsen) gefunden (Bild 4.57). Die Anlagen wurden im Juli 2005 mit neuen Getrieben der Firma Bosch Rexroth vom Typ GPV451T ausgerüstet. Das Getriebe der Anlage Bockelwitz Nr. 6 wurde bereits während des Testlaufes bei Bosch Rexroth mit dem neuen Öl befüllt. Die Anlagen stehen zwar nicht in Küstennähe, jedoch am selben Standort und sind daher denselben Belastungen und Umweltbedingungen ausgesetzt.



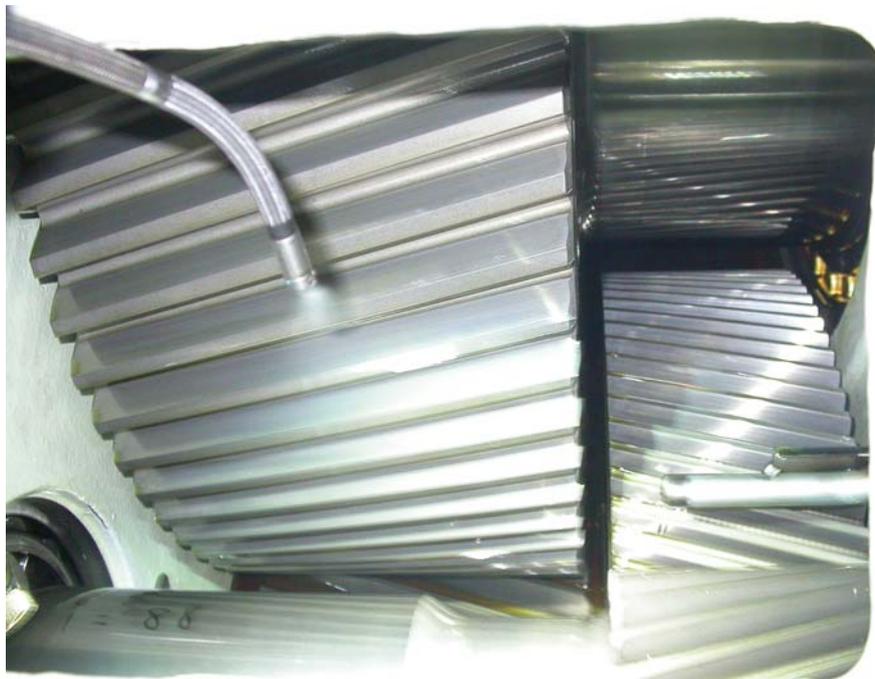
**Bild 4.57:** Der Windpark Bockelwitz

Auf beiden Testanlagen wurden im August 2005 umfangreiche Condition Monitoring Systeme installiert, um den Verlauf des Tests genau verfolgen zu können und um gleichzeitig die neu entwickelten Condition Monitoring Systeme zu validieren. Hierfür hat HYDAC ein Öl-Monitoring System zur detaillierten Überwachung des Ölzustandes an das Vibrations-Monitoring System von SKF angekoppelt, sodass die Daten gemeinsam abgerufen werden können, vgl. Kapitel 4.3.2.1.

Parallel zu diesen Öltests wurden von der GE Wind Energy GmbH Anlagen für die Validierung des von FUCHS Lubritech neu formulierten Fettes gesucht. Da das Fett in den Pitch- und Yaw-Lagern eingesetzt und getestet werden soll, kommen für diese Versuche nur Neuanlagen in Frage, da ein Tausch bzw. das Umfetten dieser Lager nicht möglich ist.

#### 4.1.4.2 *Getriebe- und Ölinspektion an den Feldversuchs-Windkraftanlagen im Windpark Bockelwitz*

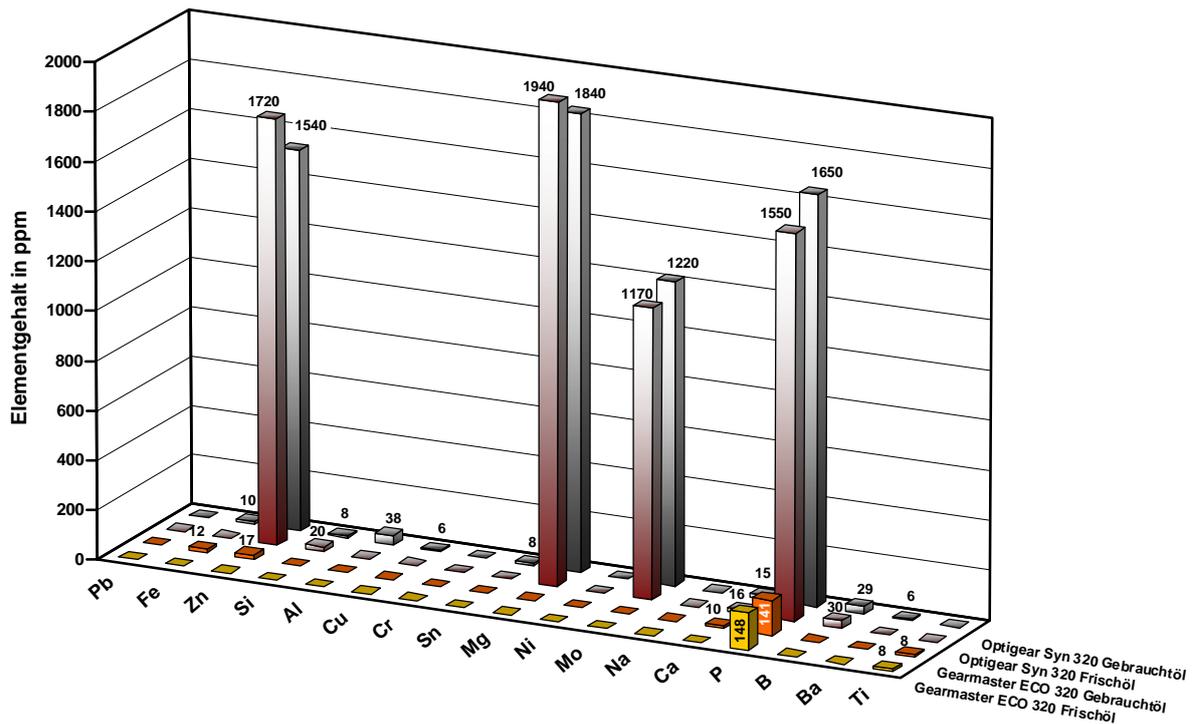
Einige Monate nach dem Start der Feldversuche wurde auf den beiden Versuchsanlagen im Windpark Bockelwitz sowohl eine visuelle Getriebeinspektion als auch eine Ölanalyse durchgeführt. Die visuelle Begutachtung wurde durch eine Inspektionsöffnung mit Hilfe eines Endoskops vorgenommen (Bild 4.58). Dabei wurden an den Verzahnungen (im Bild die Stirnradstufen hinter der Generatorwelle, die im unteren Bildteil waagerecht verläuft) weder bei dem mit dem biogenen Schmierstoff WLOB 1 noch bei dem mit dem Referenzschmierstoff WLOR 4 befüllten Getriebe Schädigungen festgestellt.



**Bild 4.58** Aufnahme der Stirnradstufen des Getriebes auf Anlage 6, befüllt mit Gearmaster ECO 320

Die Elementanalyse der beiden Schmierstoffe zeigt die deutlich geringere Additivierung des Schmierstoffes WLOB 1 (Bild 4.59). Im Frischöl ist lediglich das Element Phosphor, das nach [Möl86] in EP-Additiven Verwendung findet, in erhöhter Menge nachzuweisen. Im biogenen Gebrauchtöl finden sich gegenüber dem Frischöl geringfügig erhöhte Mengen von Eisen und Zink, was auf eine Eintragung von Abrasivpartikeln aus den Zahn- und Wälzkörperkontakten in den Schmierstoff sowie Käfigverschleiß zurückzuführen ist.

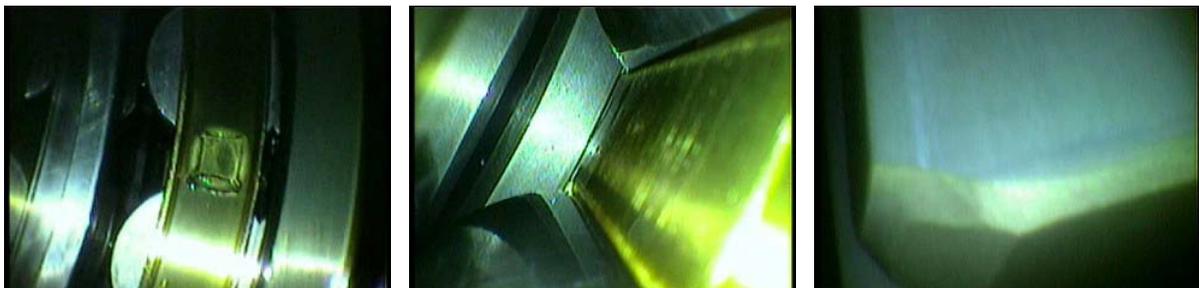
Im Gegensatz dazu finden sich in dem Referenzschmierstoff im Neu- und Gebrauchzustand deutlich höhere Mengen von Zink, Magnesium, Molybdän, Phosphor und Bor, was auf die ungleich höhere Additivierung zurückzuführen ist und eine deutlich schlechtere Ökoverträglichkeit erwarten lässt.



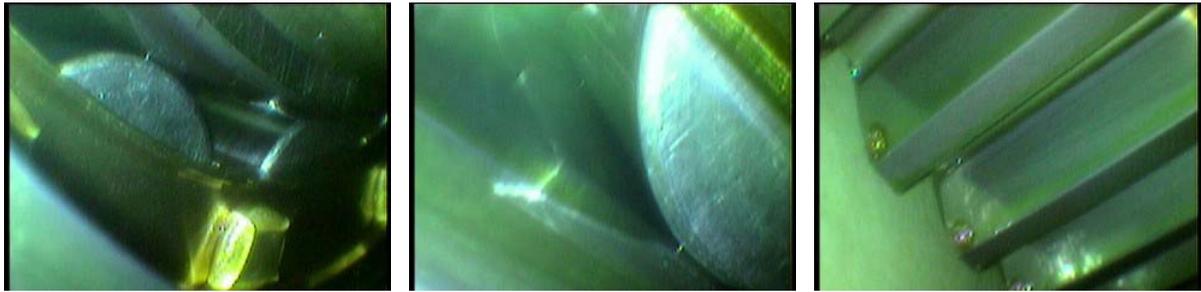
**Bild 4.59:** Elementgehalte in Frisch- und Gebrauchtölproben der Feldversuchs-Windkraftöle

#### 4.1.4.3 Getriebeinspektion auf den Feldversuchs-Windkraftanlagen im Windpark Bockelwitz

Am 24.05.2007 wurde an den beiden Feldversuchs-Windkraftanlagen im Windpark Bockelwitz eine erneute Hauptgetriebeinspektion mit Hilfe der Videoendoskopie durchgeführt. Standbilder der damit aufgenommenen Videos sind im folgenden Bild 4.60 und Bild 4.61 dargestellt. Die beiden linken Einzelbilder zeigen jeweils Aufnahmen eines Zylinderrollenlagers an der Stirnradstufe der Abtriebswelle wobei das mittlere Bild eine Detailaufnahme der Wälzkörper bzw. der Laufbahn zeigt. Bei beiden Anlagen konnten an keinem der untersuchten Lager Schädigungen festgestellt werden, weder an den Laufbahnen noch an den Wälzkörpern. Ebenso zeigen sich die Verzahnungen in sehr gutem Zustand, wie durch die rechten Einzelbilder verdeutlicht wird. An den Zahnflanken sind lediglich normale Laufspuren zu erkennen, keinerlei



**Bild 4.60:** Aufnahmen der Getriebeinspektion im Windpark Bockelwitz, Anlage 4



**Bild 4.61:** Aufnahmen der Getriebeinspektion im Windpark Bockelwitz, Anlage 6

Verschleiß- oder Ermüdungsschäden wie beispielsweise Riefen, Graufleckigkeit oder Grübchen. Insgesamt zeigen sich also beide Getriebe nach der visuellen Bewertung in gutem Zustand, zwischen dem mit dem Referenzschmierstoff WLOR 4 und dem mit dem biogenen WLOB 1 befüllten Getriebe lassen sich keine Unterschiede feststellen.

#### **4.1.5 Partikelgehaltssimulation**

Der Partikelgehalt von Getriebeölen hat einen großen Einfluss auf die Wälzlagerlebensdauer. Ziel des Forschungsvorhabens FVA 493 „Partikelgehalt“ der Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V. ist es eine Berechnungsgrundlage für die Berechnung des Partikelgehaltes in Abhängigkeit der Betriebsbedingungen zu entwickeln. Das entwickelte Berechnungsmodell ermöglicht die Berechnung des Partikelgehaltes in Getriebeölen für Stirn- und Planetenradgetriebe mit und ohne Filterung.

Exemplarisch ist die Berechnung für einen Betriebszeitraum von zwei Tagen der Anlage Bockelwitz 4 durchgeführt und mit einer Ölprobenanalyse verglichen worden. Nach ISO4406 weist der Partikelgehalt zum Entnahmezeitpunkt der Ölprobe eine Konzentration (17/15/12) auf. Demgegenüber entspricht der Partikelgehalt gemäß der Berechnung (17/15/10). Es kann also eine Abweichung der Berechnung vom Analyseergebnis von ( $<1/<1/2$ ) angegeben werden. Dies zeigt, dass sich der Partikelgehalt im gezeigten Beispiel anhand der Betriebsbedingungen berechnen lässt und so ein gezieltes Abschätzen von Ölpflegemaßnahmen und eine Ausnutzung der Lebensdauerreserve bei der Auslegung von Wälzlagerungen ermöglicht. Aus Datenschutzgründen wird an dieser Stelle die Berechnung des Partikelgehaltes nicht erläutert. Es wird auf das Forschungsvorhaben FVA493 verwiesen, wo die Berechnung detaillierter beschrieben ist.

#### **4.1.6 Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele**

Für das globale Ziel des Verbundvorhabens Winlub, die Eignung umweltverträglicher Schmierstoffe für Windkraftanlagen unter den unterschiedlichsten Bedingungen in Prüfstands- und Feldversuchen zu erproben bzw. nachzuweisen und so Vorbehalte gegenüber biogenen Schmierstoffen auf Anwenderseite zu überwinden, haben die Versuche im Bereich Schmierstoffe einen wichtigen Beitrag leisten können. So konnte

gezeigt werden, dass das biogene Schmieröl WLOB 1 im Bereich praxisüblicher Wassergehalte im Wälzlagerversuch gleich gute Verschleißschutzeigenschaften aufweist wie der konventionelle Referenzschmierstoff WLOR 4 und dass die Ermüdungsschutzeigenschaften bei beiden Schmierstoffen ebenfalls auf einem vergleichbar hohen Niveau liegen. Hinsichtlich der Praxiseignung ergeben sich für den biogenen Schmierstoff mit Blick auf die unter Feuchteinfluss gegebene Verschlammungsproblematik bei der konventionellen Referenz WLOR 4 sogar deutliche Vorteile.

Diese Ergebnisse konnten durch die Feldversuche bestätigt werden. Die beiden Hauptgetriebe der Feldversuchs-Windkraftanlagen befinden sich in gleich gutem Zustand, wie durch mehrmalige endoskopische Untersuchungen nachgewiesen werden konnte. Hinsichtlich des Schutzes gegen Verschleiß- und Ermüdungsschäden, erreicht der biogene Schmierstoff in der Praxis das gleiche Niveau wie der Referenzschmierstoff, was durch die regelmäßigen Laboranalysen dokumentiert wurde. Ebenfalls entsprechend der Laborergebnisse zeigt sich auf den Feldversuchs-Windkraftanlagen das Verschlammungsproblem bei WLOR 4. Hinsichtlich der Handhabbarkeit hat auch in der Praxis der biogene Schmierstoff Vorteile, denn im Unterschied zu WLOR 4 sind unplanmäßige Filterwechsel nicht erforderlich.

## **4.2 Schmierfette**

Schmierfette kommen in Windkraftanlagen an Rotorblatt- und Turmhauslagern sowie als Verzahnungsschmierstoff der offenen Verzahnungen der Pitch- und Azimutverstellung zum Einsatz, biogene Schmierfette sind in diesen Anwendungsfeldern bisher aber noch wenig verbreitet.

Die Hauptaufgabe von Schmierfetten ist es ganz allgemein, die Lagerteile vor Schwingungen und Mikrogleitbewegungen schützen. Bei Windkraftanlagen treten hierzu im Anwendungsbereich Turmhaus- oder Blattlager noch weitere Anforderungen wie Verträglichkeit mit Dichtungs- und Käfigmaterialien, Einsatztemperaturen von -40°C bis 60°C, Verhinderung von false brinelling und Korrosionsschutz hinzu.

Im Rahmen des Vorhabens Winlub wird das Einsatzverhalten biogener Schmierfette sowohl in praxisnahen Aggregatversuchen als auch in Feldversuchen bewertet. Darüber hinaus werden Versuche unternommen, die bisher bei Pitchgetrieben eingesetzte Ölschmierung durch Fettschmierung zu ersetzen.

### **4.2.1 Bereitstellung eines biogenen Schmierfettes und Optimierung der Additivierung**

Aus dem Vorgänger Projekt „Afrilub“ ist ein dort entwickeltes Schmierfett in einer geeigneten Formulierung für die Versuche im Rahmen des Vorhabens Winlub ausgewählt und vom Projektpartner FUCHS Lubritech GmbH zur Verfügung gestellt worden. Zur Verbesserung der Ergebnisse im IME-Riffeltest (vgl. Kapitel 4.2.3.8)

wurden verschiedene modifizierte Additivierungen formuliert und für Untersuchungen am IME bereitgestellt.

## 4.2.2 Grundlagenuntersuchungen

### 4.2.2.1 Kennwertermittlung eines biogenen Schmierstoffes

Teilziel dieses Vorhabens ist der Einsatz und die praktische Erprobung eines für den Windkraftbereich entwickelten, biologisch abbaubaren Schmierfettes in Pitch- und Hauptlagerungen. Im Vorgängerprojekt des jetzigen Vorhabens, Schmierstoffe auf Basis nachwachsender Rohstoffe in Wälzlager - Kurztitel Afrilub, wurde ein Schmierfett auf Basis eines biologisch schnell abbaubaren Esters entwickelt, welches sowohl in Wälz- als auch in Gleitlagern zum Einsatz kommen kann. Hierbei konzentrierte man sich auf die Anforderungen für Turmhaus- und Blattlagerungen in Windkraftanlagen.

Es wurde ein Pflichtenheft erstellt, in dem neben der mechanischen Beständigkeit des Schmierfettes unter anderem auch Dichtungs- und Kunststoffverträglichkeit, das Tieftemperaturverhalten, Ölabgabeverhalten bei verschiedenen Temperaturen, Verschleißschutzeigenschaften sowie die für die Anwendung im Offshore Bereich wichtigen Korrosionsschutzeigenschaften definiert sind. Herkömmliche Schmierfette, mit denen für die oben genannten Lagerungen bereits positive Felderfahrungen vorlagen, sind hierbei als Referenzwerte herangezogen worden.

Um einen umfassenderen Einblick in die Leistungsfähigkeit des Afrilub FLT 1 Fettes zu erhalten, wurden vom Projektpartner SKF zusätzliche Kennwerte ermittelt, die, zusammen mit denen des Pflichtenheftes, in Tabelle 11 aufgeführt sind. Das Fett Afrilub WLGB1A wurde ursprünglich lediglich für Wälz- und Gleitlager in Turmhaus- sowie für die Wälzlager der Blattlagerung konzipiert. Idealerweise ist jedoch der Einsatz eines einzigen Schmierstoffes für die verschiedenen Lagerstellen der Windkraftanlage gewünscht, um eine Standardisierung zu erreichen. Dies würde die Verwechslungsgefahr unterschiedlicher Fette beim Nachschmieren und somit einen eventuellen Frühausfall aufgrund Schmierstoffversagens ausschließen.

Wegen der überwiegend positiven Testergebnisse ist der Einsatz des Fettes Afrilub WLGB1A innerhalb dieses Projektes neben der Schmierung der Pitchlagerung auch in Hauptlagerungen vorgesehen.

			AFRILUB FLT 1
<b>Verdicker</b>			Li-12-OH
<b>Grundöl</b>			synthetischer Ester
<b>Viskosität, 40°C</b>	mm <sup>2</sup> /s	DIN 51562	320
<b>Biologische Abbaubarkeit</b>	%	CEC L-33-A-93 DIN 51825	> 80
<b>Ruhepenetration</b>			295
<b>Walkpenetration, 60 DH</b>			305
<b>Walkpenetration, 100000 DH</b>	0,1 mm	DIN ISO 2137	328
delta WP100000-WP60			+23
<b>Shell Roller (50 h, 40°C)</b>			347(+42)
<b>Shell Roller (50 h, 60°C)</b>	0,1 mm	ASTM D 1831	355(+50)
<b>Shell Roller (50 h, 80°C)</b>			351(+46)
<b>Topfpunkt [°C]</b>	°C	DIN ISO 2176	193
<b>Ölabscheidung (18 h,20°C)</b>			0,2
<b>Ölabscheidung (18 h,40°C)</b>			1,1
<b>Ölabscheidung (18 h,60°C)</b>			1,4
<b>Ölabscheidung (18 h,100°C)</b>			3,4
<b>Ölabscheidung (7 d,20°C)</b>	%	DIN 51817	1,1
<b>Ölabscheidung (7 d,40°C)</b>			2,8
<b>Ölabscheidung (7 d,60°C)</b>			4,1
<b>Ölabscheidung (7 d,80°C)</b>			6,5
<b>Ölabscheidung (7 d,100°C)</b>			12,1
<b>Ölabscheidung (7 d,120°C)</b>			18,2
<b>Fließdruck (-40°C)</b>	kPa	DIN 51805	650
<b>Low Temperature Torque Test (-40°C)</b>			
<b>Startdrehmoment</b>	mNm	IP 186	<1000
<b>Laufdrehmoment</b>	mNm		<100
<b>Wasserbeständigkeit (3 h,90°C)</b>	Bewertung	DIN 51807T1	0
<b>Kupferkorrosion (18 h, 100°C)</b>	Bewertung	DIN 51811	1a
<b>VKA</b>			
Verschleißkalotte (600 N,1 h)	mm	DIN 51350T5	0,9
Verschleißkalotte (1000 N,60 s)			0,8
Verschleißkalotte (1400 N,60 s)			1,5
<b>EMCOR (0,5% NaCl)</b>			0/0
<b>EMCOR (1,0% NaCl)</b>	Bewertung	DIN 51802	1/1
<b>EMCOR (3,0% NaCl)</b>			2/2
<b>EMCOR (5,0% NaCl)</b>			3/3
<b>SRV-Stufentest</b>			
µmittel			
Fresslastgrenze			
(Kugel/Platte, 100-1200 N, 1000 µm, 50 Hz, 50°C, 2 min pro Laststufe)	N	ASTM D 5706	0,107 1200
<b>FE9 - A/1500/6000-120 F<sub>10</sub> / F<sub>50</sub></b>			244 / 297
<b>FE9 - A/1500/6000-140 F<sub>10</sub> / F<sub>50</sub></b>	h	DIN 51821T2	45 / 73
<b>FE 8</b>			
Wälzkörperverschleiß mw	mg		2,5
Summenverschleiß	mg	DIN 51819	15
Beharrungstemp.	°C		30-35
Reibmoment	Nm		ca. 6,5
(SchräKuLA / 7,5 U/min / 80 kN / Behar.-temp.)			
<b>Riffeltest (IME/Aachen)</b>			
Maximale Riffeltiefe	µm		11,2
Mittlere Riffeltiefe	µm		1,6
Korrosionsgrad	Bewertung		1-2
<b>ROF (10000 rpm, 120°C) L<sub>50</sub></b>	h		174
<b>ROF (10000 rpm, 80°C) L<sub>50</sub></b>	h		>2000

Tabelle 11: Kennwerte des Fettes Afrilub WLGB1C

#### 4.2.2.2 Untersuchungen zur Elastomerverträglichkeit biogener Fette

Im Rahmen des Verbundvorhabens "Biogene Schmierstoffe für Windkraftanlagen" wurde durch Rothe Erde die Verträglichkeit des Muster-Schmierstoffes "FUCHS Afrilub FLT 1" mit den in Rothe-Erde-Großwälzlagern eingesetzten Kunststoffen und Elastomeren überprüft. Bei dem Schmierstoff FUCHS Afrilub FLT 1 handelt es sich um ein mit Lithiumseife eingedicktes Öl auf Basis synthetischer Ester. Der Schmierstoff ist in der Wassergefährdungsklasse 1 eingestuft und biologisch abbaubar.

Die Überprüfung der Verträglichkeit durch Rothe Erde ergab, dass der Schmierstoff "FUCHS Afrilub FLT 1" mit den bei RE typischen Kunststoffen und Elastomeren verträglich ist. Der Schmierstoff konnte in Bezug auf die Verträglichkeit mit den von Rothe Erde eingesetzten Kunststoffteilen für den Einsatz in Blatt- und Turmlagern in Windkraftanlagen freigegeben werden. Diese Freigabe bezog sich auf die Verträglichkeit des Schmierstoffes mit den in Großwälzlagern von Rothe Erde verwendeten Dichtungen aus Acrylnitrilbutadien- und Fluor-Kautschuk sowie den Distanzhaltern aus Polyethylen hoher Dichte und Polyoxymethylen. Vorbehaltlich des Nachweises eines positiven Riffeltestergebnisses durch die Untersuchungen am IME in Aachen, vgl. Kapitel 4.2.3.7, kann der biogene Schmierstoff Afrilub FLT 1 für den Einsatz im Feldversuch mit Blattlagern für Windkraftanlagen freigegeben werden. Die Verträglichkeitsprüfung des Schmierstoffes ist abgeschlossen.

Der Schmierstoffhersteller FUCHS stellte Rothe Erde ein Probemuster, die technischen Daten und die Sicherheitsdatenblätter zur Verfügung. Die Prüfung erfolgt durch entsprechende Lagerung der eingesetzten Kunststoffteile in dem zu prüfenden Schmierstoff und anschließende mechanische Prüfung der Kunststoffteile.

Die Untersuchungen umfassten vier Teilversuche:

- Versuche zur Volumenänderung

Von einer Dichtungsschnur, die nicht älter als 12 Monate ist, wurden je Werkstoffvariante 5 Prüfstücke von 2 bis 3 cm Länge geschnitten und auf einer Analysenwaage nach Gewicht und Volumen bestimmt. Die Volumenbestimmung erfolgte nach DIN EN ISO 1183-1 mittels Auftriebverfahren, zusätzlich erfolgte eine Messung der Shore-Härte von Hand. Da bei Rothe Erde unterschiedliche NBR-Werkstoffe zum Einsatz kommen, wurden diese Prüfstücke von den Profilen D 70 N, R 16 und L 16, die aus unterschiedlichen Werkstoffen hergestellt werden, geschnitten.

- Zerreißversuche

Von diesen Profilen werden für den Zerreißversuch 250 mm lange Prüfstücke geschnitten, die vor und nach der Schmierstofflagerung auf der Universalprüfmaschine bis zum Bruch belastet werden.

- Versuche zur Klebefestigkeit

Für die Versuche zur Klebefestigkeit werden von den beschriebenen Profilen ebenfalls 250 mm lange Prüfstücke geschnitten, in der Mitte geteilt und mit einem in der Fertigung eingesetzten Cyanacrylat-Kleber verbunden. Vor und nach der Schmierstofflagerung werden die Prüfstücke bis zum Bruch auf der Universalprüfmaschine belastet.

- Versuche zum Schmierstoffeinfluss auf die Kugelzwischenstücke

Um den Schmierstoffeinfluss auf die Kugelzwischenstücke zu prüfen, wurden 24 Zwischenstücke für Kugeln ( $\varnothing$  30 mm) in dem Schmierstoff Afrilub FLT 1 bei 70°C gelagert. Alle vier Wochen wurden 4 Teile entnommen und nach Abkühlung auf Raumtemperatur zwischen zwei Kugeln im Kugeldruckversuch bis zum Berühren belastet.

Die Prüfstücke werden zur Lagerung vom Prüfmittel, dem Schmierstoff Afrilub FLT 1, völlig umschlossen. Der Prüfmittelbehälter wird über  $168 \pm 2$  h bei + 70°C im Wärmeschrank gelagert. Unmittelbar nach dem Angleichen an die Raumtemperatur werden die Probestücke aus dem Prüfmittel entnommen. Anhaftende Reste des Prüfmittels werden mit einem sauberen, trockenen Lappen entfernt.

Im Folgenden sind die Ergebnisse der Untersuchungen tabellarisch zusammengefasst:

- **Ergebnisse Volumenänderung:**

**Verträglichkeit NBR-A mit FUCHS FLT Afrilub 1**

Werkstoff-Bezeichnung: NBR - A

	Gewicht	Auftrieb	Volumen	Dichte
	[g]	[g]	[cm <sup>3</sup> ]	[g/cm <sup>3</sup> ]
vor der Lagerung	2,0232	0,4506	1,5726	1,2865
nach der Lagerung	1,9601	0,4420	1,5181	1,2912
Differenz	- 3,12%		- 3,47%	
vor der Lagerung	1,9835	0,4420	1,5415	1,2867
nach der Lagerung	1,9209	0,4330	1,4879	1,2910
Differenz	- 3,16%		- 3,48%	
vor der Lagerung	1,9388	0,4318	1,5070	1,2865
nach der Lagerung	1,8760	0,4235	1,4525	1,2926
Differenz	- 3,24%		- 3,62%	
vor der Lagerung	1,9208	0,4277	1,4931	1,2865
nach der Lagerung	1,8615	0,4192	1,4423	1,2906
Differenz	- 3,09%		- 3,40%	
vor der Lagerung	1,8611	0,4141	1,4470	1,2862
nach der Lagerung	1,8060	0,4068	1,3992	1,2907
Differenz	- 2,96%		- 3,30%	
Summe vor der Lagerung	<b>9,7274</b>	<b>2,1662</b>	<b>7,5612</b>	<b>1,2865</b>
Summe nach der Lagerung	<b>9,4245</b>	<b>2,1245</b>	<b>7,3000</b>	<b>1,2910</b>
Summe Differenz	<b>- 3,1%</b>		<b>- 3,5%</b>	

**Tabelle 12:** Verträglichkeit NBR-A mit FUCHS FLT Afrilub 1

**Verträglichkeit NBR-B mit FUCHS FLT Afrilub 1****Werkstoff-Bezeichnung: NBR-B**

	Gewicht	Auftrieb	Volumen	Dichte
	[g]	[g]	[cm <sup>3</sup> ]	[g/cm <sup>3</sup> ]
vor der Lagerung	1,7012	0,3155	1,3857	1,2277
nach der Lagerung	1,6963	0,3040	1,3923	1,2183
Differenz	- 0,29%		+ 0,48%	
vor der Lagerung	1,6377	0,3039	1,3338	1,2278
nach der Lagerung	1,6327	0,2922	1,3405	1,2180
Differenz	- 0,31%		+ 0,50%	
vor der Lagerung	1,5886	0,2947	1,2939	1,2278
nach der Lagerung	1,5871	0,2835	1,3036	1,2175
Differenz	- 0,09%		+ 0,75%	
vor der Lagerung	1,5616	0,2896	1,2720	1,2277
nach der Lagerung	1,5592	0,2786	1,2806	1,2176
Differenz	- 0,15%		+ 0,68%	
vor der Lagerung	1,5590	0,2892	1,2698	1,2278
nach der Lagerung	1,5549	0,2790	1,2759	1,2187
Differenz	- 0,26%		+ 0,48%	
Summe vor der Lagerung	<b>8,0481</b>	<b>1,4929</b>	<b>6,5552</b>	<b>1,2277</b>
Summe nach der Lagerung	<b>8,0293</b>	<b>1,4373</b>	<b>6,5920</b>	<b>1,2180</b>
Summe Differenz	<b>- 0,2%</b>		<b>+ 0,6%</b>	

**Tabelle 13:** Verträglichkeit NBR-B mit FUCHS FLT Afrilub 1

**Verträglichkeit NBR-C mit FUCHS FLT Afrilub 1****Werkstoff-Bezeichnung: NBR-C**

	Gewicht	Auftrieb	Volumen	Dichte
	[g]	[g]	[cm <sup>3</sup> ]	[g/cm <sup>3</sup> ]
vor der Lagerung	3,3050	1,0102	2,2948	1,4402
nach der Lagerung	3,2388	0,9923	2,2465	1,4417
Differenz	- 0,29%		+ 0,48%	
vor der Lagerung	3,1832	0,9720	2,2112	1,4396
nach der Lagerung	3,1162	0,9555	2,1607	1,4422
Differenz	- 0,31%		+ 0,50%	
vor der Lagerung	3,0836	0,9417	2,1419	1,4397
nach der Lagerung	3,0171	0,9253	2,0918	1,4423
Differenz	- 0,09%		+ 0,75%	
vor der Lagerung	2,9920	0,9136	2,0784	1,4396
nach der Lagerung	2,9300	0,8976	2,0324	1,4416
Differenz	- 0,15%		+ 0,68%	
vor der Lagerung	2,9441	0,8988	2,0453	1,4394
nach der Lagerung	2,8877	0,8830	2,0047	1,4405
Differenz	- 0,26%		+ 0,48%	
Summe vor der Lagerung	<b>15,5079</b>	<b>4,7363</b>	<b>10,7716</b>	<b>1,4397</b>
Summe nach der Lagerung	<b>15,1898</b>	<b>4,6537</b>	<b>10,5361</b>	<b>1,4417</b>
Summe Differenz	<b>- 0,2%</b>		<b>+ 0,6%</b>	

**Tabelle 14:** Verträglichkeit NBR-C mit FUCHS FLT Afrilub 1

- **Änderung der Shore-Härte:**

Werkstoff	vor der Lagerung	nach 168 h bei +70°C in FUCHS FLT Afrilub 1
NBR-A	70	73
NBR-B	70	72
NBR-C	70	72

**Tabelle 15:** Änderung der Shore-Härte

- **Festigkeitsänderung der Dichtungsschnur:**

**Einfluss auf die Festigkeit und Dehnung nach Lagerung 168 h bei +70°C mit FUCHS FLT Afrilub 1**

Werkstoff	NBR-A	
Profil-Form	D 70 N	
Querschnittsfläche	54 mm <sup>2</sup>	
Festigkeit Stammwerkstoff	9,21 N/mm <sup>2</sup>	328 %
	Reißfestigkeit	Reißdehnung
	[N/mm <sup>2</sup> ]	[%]
Lagerung		
bei Raumtemperatur	9,21	328
168 h bei 70°C gelagert	9,50	200
168 h bei 70°C in FUCHS FLT Afrilub 1 gelagert	10,19	221

**Einfluss auf die Festigkeit und Dehnung nach Lagerung 168 h bei +70°C mit FUCHS FLT Afrilub 1**

Lieferant	Schieffer	
Werkstoff	NBR-C	
Profil – Form	L 16	
Querschnittsfläche	75 mm <sup>2</sup>	
Festigkeit Stammwerkstoff	7,67 N/mm <sup>2</sup>	533 %
	Reißfestigkeit	Reißdehnung
	[N/mm <sup>2</sup> ]	[%]
Lagerung		
bei Raumtemperatur	7,67	533
168 h bei 70°C gelagert	9,30	452
168h bei 70°C in FUCHS FLT Afrilub 1 gelagert	8,40	410

**Einfluss auf die Festigkeit und Dehnung nach Lagerung 168 h bei +70°C mit FUCHS FLT Afrilub 1**

Lieferant	Freudenberg	
Werkstoff	NBR-B	
Profil - Form	R 16	
Querschnittsfläche	60 mm <sup>2</sup>	
Festigkeit Stammwerkstoff	16,38 N/mm <sup>2</sup>	548 %
	Reißfestigkeit	Reißdehnung
	[N/mm <sup>2</sup> ]	[%]
Lagerung		
bei Raumtemperatur	16,38	548
168 h bei 70°C gelagert	17,45	508
168h bei 70°C in FUCHS FLT Afrilub 1 gelagert	16,37	422

**Tabelle 16:** Festigkeitsänderung der Dichtungsschnur bei drei Elastomerwerkstoffen

- **Festigkeitsänderung der Klebverbindung:**

**Einfluss auf die Klebefestigkeit geklebt mit Sicomet 8400 nach Lagerung**

**168 h bei +70°C mit FUCHS FLT Afrilub 1**

Werkstoff	NBR-A	
Profil - Form	D 70 N	
Querschnittsfläche	54 mm <sup>2</sup>	
Festigkeit Stammwerkstoff	9,21 N/mm <sup>2</sup>	328 %
	Reißfestigkeit	Reißdehnung
	[N/mm <sup>2</sup> ]	[%]
Lagerung der geklebten Dichtung		
bei Raumtemperatur	6,05	217
168 h bei 70°C gelagert	2,94	62

**Einfluss auf die Klebefestigkeit geklebt mit Sicomet 8400 nach Lagerung****168 h bei +70°C mit FUCHS FLT Afrilub 1**

Werkstoff	NBR-C	
Profil - Form	L 16	
Querschnittsfläche	75 mm <sup>2</sup>	
Festigkeit Stammwerkstoff	7,67 N/mm <sup>2</sup>	533 %
	Reißfestigkeit	Reißdehnung
	[N/mm <sup>2</sup> ]	[%]
Lagerung der geklebten Dichtung		
bei Raumtemperatur	4,85	323
168 h bei 70°C gelagert	2,43	91

**Einfluss auf die Klebefestigkeit geklebt mit Sicomet 8400 nach Lagerung****168 h bei +70°C mit FUCHS FLT Afrilub 1**

Werkstoff	NBR-B	
Profil - Form	R 16	
Querschnittsfläche	60 mm <sup>2</sup>	
Festigkeit Stammwerkstoff	16,38 N/mm <sup>2</sup>	548 %
	Reißfestigkeit	Reißdehnung
	[N/mm <sup>2</sup> ]	[%]
Lagerung der geklebten Dichtung		
bei Raumtemperatur	12,42	423
168 h bei 70°C gelagert	3,87	155

**Tabelle 17:** Festigkeitsänderung der Klebverbindung bei drei Elastomerwerkstoffen

- **Änderung der Festigkeit von Kugelzwischenstücken für Kugel  $\varnothing$  30 mm:**

**Distanzhalterverträglichkeit mit FUCHS FLT Afrilub 1:**

Lagerungs- zeit	Belastung	Weg	Belastung	Weg	Bemer- kung
	im "B"-Punkt	im "B"-Punkt	im "P"-Punkt	im "P"-Punkt	
Wochen	[N]	[mm]	[N]	[mm]	
0	12 500	4,6	4 500	1,0	
4	12 250	4,7	4 500	0,9	keine Verfärbung
8	12 000	4,7	4 500	0,9	keine Verfärbung
12	12 000	4,8	4 500	1,0	keine Verfärbung
16	12 000	4,7	4 500	1,0	keine Verfärbung
20	12 200	4,7	4 500	1,0	keine Verfärbung
24	12 000	4,8	4 500	1,1	keine Verfärbung

**Tabelle 18:** Festigkeitsänderung von Kugelzwischenstücken

## 4.2.3 Prüfstandsuntersuchungen

### 4.2.3.1 Untersuchungen zur Substitution von Schmieröl durch biogene Schmierfette in Pitchgetrieben

Mit zunehmender Anlagenleistung haben in den letzten Jahren pitchgeregelte Anlagen die zuvor weit verbreitete Stallregelung größtenteils verdrängt. Gegenwärtig werden in Windkraftanlagen zur Rotorblattwinkel- (Pitch-) Verstellung mehrstufige Planetengetriebe mit Schmierölfüllung eingesetzt. Die Versorgung der Drehkränze für den Pitch- und Azimutantrieb mit Schmierfett erfolgt in Windkraftanlagen über automatisch arbeitende Zentralschmieranlagen. Diese drücken über Verteilungsleitungen in zeitlich festgelegten Abständen jeweils neue geringe Schmierstoffmengen in die Wälzlager und Verzahnungseingriffe, wobei die Bevorratung des Schmierstoffes in zentralen Behältern erfolgt. Somit ist auch ein eventuell notwendig werdendes Nachfüllen unabhängig von der Betriebsweise der Anlage und erfordert keine Stillsetzung des Systems.

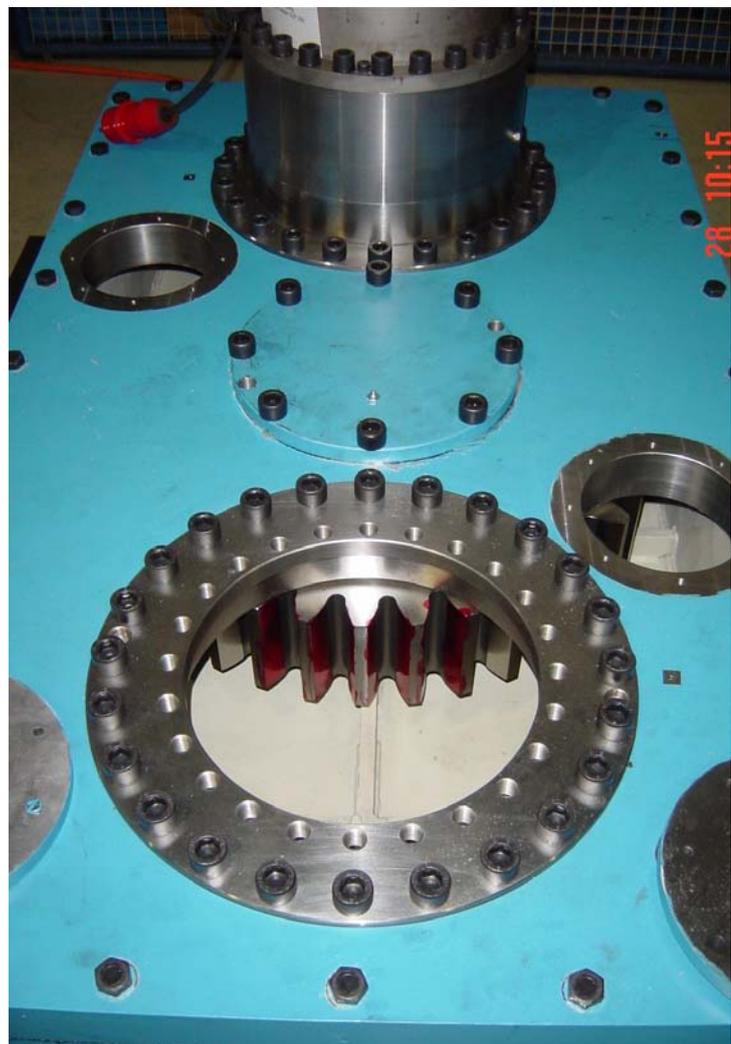
Bei der Durchführung einer z. B. nach Wartungshandbuch planmäßig vorgesehenen Ölstandskontrolle oder eines Ölwechsels an den Pitch- und Azimutgetrieben ist es

aber zwingend erforderlich, die Windkraftanlage stillzusetzen und den Antrieb gegen ungewollte Drehung durch eine mechanische Arretiervorrichtung zu sichern. Insbesondere ein Ölwechsel an einem Pitchgetriebe, welches in der Rotornabe angeordnet ist, ist mit einem sehr hohen Wartungsaufwand verbunden.

Es wäre daher sehr vorteilhaft, die benannten Antriebe mit an das Zentralschmiersystem anzuschließen. Allerdings bestehen nur geringe Kenntnisse darüber, ob in schnelllaufenden Planetenstufen das üblicherweise eingesetzte Öl durch ein Fett ersetzt werden kann.

#### 4.2.3.1.1 Prüfstands Aufbau

Vor diesem Hintergrund wurden an einem Prüfstand (Bild 4.62) bei Bosch Rexroth, Lohmann & Stolterfoht GmbH in Witten im Rahmen des Vorhabens Winlub Versuche zur Substitution von Öl durch Fettschmierung in Pitchgetrieben durchgeführt. Erste Versuche im Leerlauf zeigten, dass zumindest für die Betriebsweise bei den typischen Wälzgeschwindigkeiten in den Eingriffen von bis zu 6 m/sec. ein Betrieb mit Fett möglich erscheint. Auf dem speziell für diese Grundlagenuntersuchungen zu modifizierenden Back-to-back-Prüfstand sollen daher zwei typische Pitchgetriebe, wie sie in der Windenergieanlage von GE Energy in der 1,5 MW-Klasse zum Einsatz kommen, getestet werden.



**Bild 4.62:** Prüfstand mit aufgebautem Pitchantrieb

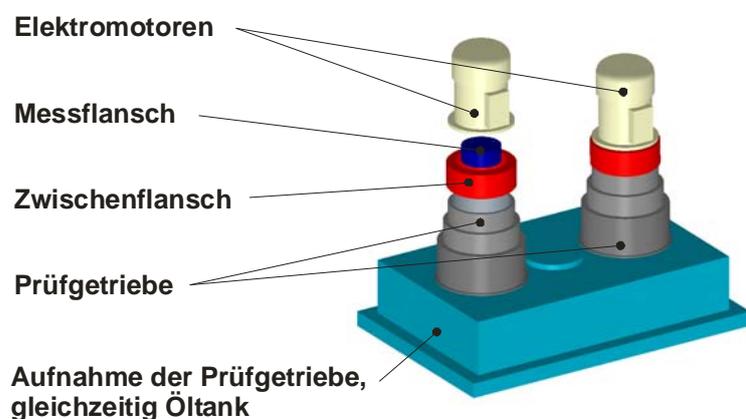
Das Prüfstandsfundament ist als Schweißkonstruktion ausgeführt und bildet die Aufnahme für die beiden Prüfgetriebe. Es fungiert gleichzeitig als Tank für Schmieröl, in dem die beiden Planetengetriebe-Abtriebsritzeln und ein zentral angeordnetes Zahnrad zur Kopplung der beiden Prüfgetriebe laufen. Die Ansteuerung der Antriebe erfolgt über einen Prüfstands-PC, der den elektrischen Antriebsmaschinen eine Soll-Drehzahl bzw. ein Soll-Drehmoment vorgibt. Durch die verwendete Software sind beliebige Belastungszyklen einstellbar,

sodass auch aus z. B. Messungen bekannte Drehmoment- und Drehzahlverläufe nachgefahren werden können.

Im Rahmen des Vorhabens Winlub erforderliche Modifikationen am Prüfstand, wie beispielsweise die Anpassungskonstruktion zur Applikation einer Drehmomentenmesswelle an der Getriebeeingangswelle (Bild 4.63), sowie die Applikation der Messensorik und der Messdatenerfassung werden in Zusammenarbeit mit dem Institut für Maschinenelemente und Maschinengestaltung (IME) der RWTH Aachen durchgeführt.

#### Aufgaben im Rahmen des Vorhabens WinLub:

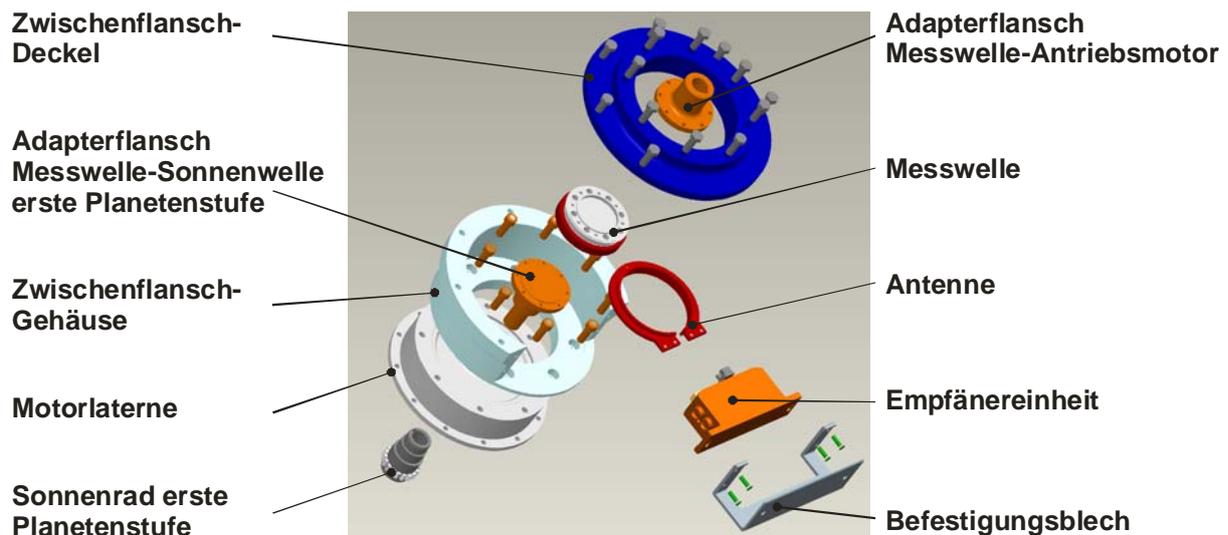
- Konstruktion eines geeigneten Zwischenflansches
- Applikation von Temperatursensoren sowie einer Drehmomentmesswelle mit Telemetrie zur Übertragung der Sensoriksignale
- Leerlauf- und Verspannversuche zur vergleichenden Wirkungsgradbewertung
- Versuchsdurchführung und -auswertung



**Bild 4.63:** Pitchgetriebe-Prüfstand bei Lohmann & Stolterfoht

#### 4.2.3.1.2 Geplante Untersuchungen

In einem in Zusammenarbeit mit GE Energy definierten Prüfzyklus wurden 2 Pitchgetriebe getestet, wobei eins mit dem biogenen Schmieröl aus dem Vorhaben und das andere mit einem biologisch abbaubaren Schmierfett aufgefüllt wird. Zur Beurteilung der praktischen Anwendbarkeit einer Substitution von Öl durch Fett als Schmiermittel der Stufen des Planetengetriebes sollen bei verschiedenen Umgebungstemperaturen Messungen des Leerlaufdrehmomentes an der Antriebswelle sowie Messungen des Verlaufes der Betriebstemperatur an verschiedenen Stellen des Getriebeinnenraumes durchgeführt werden. Die Applikation eines Momenten-Messflansches erfordert verschiedene Adaptionkonstruktionen (Bild 4.64). Zum einen ist ein Flansch zwischen Getriebe und Elektromotor (Zwischenflansch) erforderlich, um den erforderlichen Bauraum für den Messflansch zwischen Getriebe und Antriebsmotor zu gewinnen, zum anderen müssen Adapterflansche zur Getriebeeingangswelle und zur Antriebsmotorwelle hin vorgesehen werden.



**Bild 4.64:** Messflansch-Adaptierung

In fest vorgegebenen Zeitabständen sollten dann die Verzahnungen und Wälzlager hinsichtlich Verschleißes und anderer möglicher Schadensbilder inspiziert und die gegebenenfalls auftretenden Veränderungen dokumentiert werden.

#### 4.2.3.2 Ergebnisse aus Untersuchungen zur Substitution von Schmieröl durch (Bio-) Schmierfett in Pitchgetrieben

Neben der Substitution des konventionellen Schmieröls durch ein biogenes, vgl. Kapitel 4.1.3.7, interessierte auch die Frage, ob es möglich ist, ein (biogenes) Schmierfett zur Schmierung von Pitchgetrieben einzusetzen. Für die entsprechenden Untersuchungen diente derselbe Versuchsaufbau wie für die Öluntersuchungen, es wurden die Fette WLGR 1 und WLGB 1C ausgewählt, deren technische Merkmale in Tabelle 19 und Tabelle 20 aufgeführt sind. Ein wesentlicher Unterschied zwischen den beiden Fetten ist die kinematische Viskosität  $\nu$  ihrer Grundöle. Das Referenzfett WLGR 1 weist eine kinematische Grundölviskosität von  $\nu = 50 \text{ mm}^2/\text{s}$  auf, das biogene Fett WLGB 1C dagegen  $\nu = 320 \text{ mm}^2/\text{s}$ .

Dieser Unterschied wird als Ursache für das deutlich unterschiedliche Verhalten der Fette im Tieftemperaturbereich angesehen (Bild 4.65). Das Referenzfett ermöglichte bei  $\vartheta_G = -30^\circ\text{C}$  und  $\vartheta_G = -40^\circ\text{C}$  Anlaufmomente, die mit unter  $T_{AN} \approx 20 \text{ Nm}$  ( $\vartheta_G = -30^\circ\text{C}$ ) bzw.  $T_{AN} \approx 40 \text{ Nm}$  deutlich geringer waren als bei den Ölversuchen im Tieftemperaturbereich. Im Unterschied dazu konnten mit dem biogenen Fett WLGB 1C keine Versuche bei Temperaturen  $\vartheta_G < -25^\circ\text{C}$  durchgeführt werden, da die Anfahrmomente so groß wurden, dass die Strombegrenzung des Antriebsmotors ansprach.

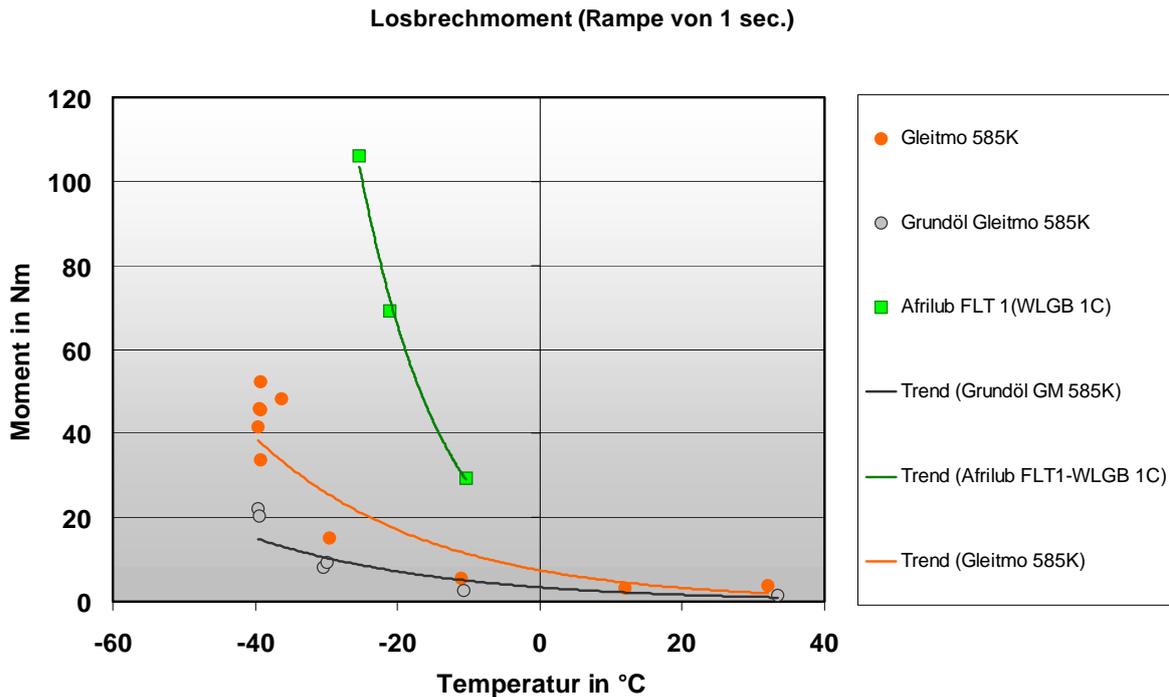
Bezeichnung	Wert	Einheit	DIN/Vorschrift
Kennzeichnung	KPFHC2K-40		DIN 51502
Farbe	beige		
Gebrauchstemperaturbereich	-45 / +130	° C	DIN 51825
Grundöl	syn		
Eindicker	Li		
Festschmierstoffe	weiße		
Grundölviskosität [40°C]	50	mm <sup>2</sup> /s	DIN 51562-1
Walkstabilität/Penetrationsabfall nach: 100 000 Doppelhüben	max. 40	1/10 mm	
NLGI-Klasse	2		DIN 51818
Oxidationsstabilität Druckabfall	<0,30	bar	DIN 51808
Wassergehalt	<0,1	%	DIN ISO 3733
Tropfpunkt	>180	° C	DIN ISO 2176
Wasserbeständigkeit	0-90	Bew.-Stufe	DIN 51807-1
Ölabscheidung [40°C, 7 d]	3	%	DIN 51817
Fließdruck [-40 °C]	1100	hPa	DIN 51805
Kupferstreifenprüfung [24 h / 100°C]	1	Bew.-Stufe	DIN 51811
EMCOR [dest. Wasser]	0-0	Korr.-Grad	DIN 51802
FAG-FE8 [Schräkula 7,5 min-1 / 80 kN] Qualitative Einstufung	mw10=0,4, mw50=0,6 sehr gut	mg	E DIN 51819
FAG-FE9-Prüflauf A/1500/6000-130	F50>200	h	DIN 51821
Drehzahlkennwert [n x dm]	500000	mm/min	
Elastomerverträglichkeit	erfüllt		TL-VW 778 A

Tabelle 19: Technische Merkmale von WLGR 1

<b>Grundöl</b>	synthetischer Ester; $\nu = 320 \text{ mm}^2/\text{s}$ bei 40°C
<b>Verdicker</b>	Lithium-12-hydroxystearat
<b>Ruhepenetration [0,1 mm]</b>	266 (18 h) bei 25°C
<b>Walkpenetration 60 [0,1 mm]</b>	285
<b>WP 100.000 -WP 60 [0,1 mm]</b>	40
<b>Tropfpunkt</b>	194°C
<b>Ölabscheidung [%]</b>	2,6 nach 7 Tagen bei 40°C
<b>Ölabscheidung [%]</b>	7,8 nach 7 Tagen bei 60°C
<b>Ölabscheidung [%]</b>	14,8 nach 7 Tagen bei 100°C
<b>Wasserbeständigkeit [bewertet]</b>	1 (nach 3 Stunden bei 90°C)
<b>Cu-Korrosion [bewertet]</b>	1 (nach 18 Stunden bei 100°C)

Tabelle 20: Technische Merkmale von WLGB 1C

Dies bestätigt den bereits bei den Öluntersuchungen, vgl. Kapitel 4.1.3.7, beobachteten Zusammenhang zwischen Viskosität und Höhe der Anlaufmomente. Die hohen Anlaufmomente sind also nicht auf den biogenen Charakter des Schmierfettes WLGB 1C zurückzuführen, sondern auf dessen vergleichsweise hohe Grundölviskosität.



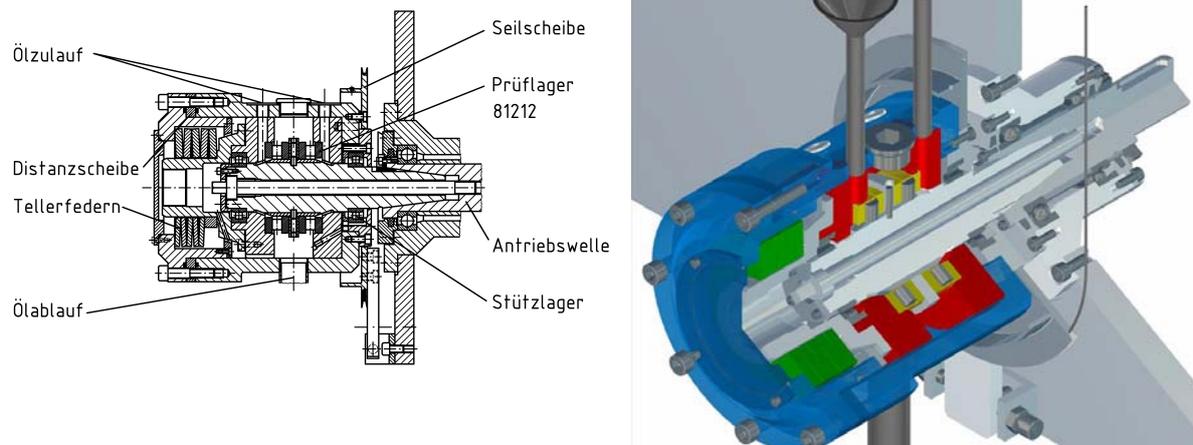
**Bild 4.65:** Tieftemperaturverhalten verschiedener Fette in Pitchgetrieben

Um diesen Zusammenhang zu verifizieren, wurden weitere Versuche mit dem Grundöl des Fettes WLGR 1 durchgeführt. Dabei ergaben sich nochmals geringere Anlaufmomente (Bild 4.65) sodass gefolgert werden kann, dass der Verdicker im Tieftemperaturbereich zumindest zum Teil für die Höhe der Anlaufmomente verantwortlich ist.

#### 4.2.3.3 FE8-Wälzlageruntersuchungen zum Einsatzverhalten biogener Schmierfette

##### 4.2.3.3.1 Prüfstandsbeschreibung

Die Schmierfettversuche wurden auf dem FE8 Wälzlagerschmierstoff-Prüfgerät der Firma FAG Kugelfischer durchgeführt. Bild 4.66 zeigt eine Schnittzeichnung und eine räumliche Darstellung des Prüfkopfes, sowohl der Prüfstand als auch das Verfahren sind in DIN 51819 genormt.



**Bild 4.66:** Schnittzeichnung und räumliche Darstellung des FE8-Prüfkopfes

Die Antriebswelle wird mit einem Elektromotor angetrieben. Auf ihr sind die Wellenscheiben der beiden Prüflager (Axial-Zylinderrollenlager 81212) befestigt. Die Gehäusescheiben sitzen fest im Gehäuse, das fliegend gelagert ist. Die Kraft wird über ein Tellerfederpaket in axialer Richtung auf die Prüflager aufgebracht. Durch den Einbau von Distanzscheiben unterschiedlicher Breite und unterschiedlicher Tellerfedern kann diese Kraft variiert werden. Da die Prüflager nur Kräfte in axialer Richtung aufnehmen können, sind zwei Stützlager erforderlich, die die radialen Kräfte aufnehmen. Das fliegend gelagerte Gehäuse wird von einem über die Seilscheibe geführten Seil und einer daran befestigten Kraftmessdose gegen Drehung festgelegt. Der Wert, den die Kraftmessdose ausgibt, ist dem durch die Lager übertragenen Reibmoment proportional und abhängig von der Oberflächenbeschaffenheit und Beschichtung der Lager und dem Zustand des Schmierstoffes in den Schmierpalten. Für Versuche unter variablen klimatischen Bedingungen kann der gesamte Prüfkopf in die externe Box des IME-Klimaschranks eingebracht werden (vgl. Bild 4.3). Neben dem Reibmoment werden die Lagertemperaturen und der Massenverlust (gravimetrischer Verschleiß) der Lager durch Wägung vor und nach dem Versuch gemessen. Am Prüfstand können die Drehzahl, die Temperatur und die Axialkraft frei eingestellt werden. Die Prüfbedingungen für die FE8-Untersuchungen sind in Tabelle 21 zusammengefasst.

<b>Schmierung:</b>	
Fettschmierung, 3% Wasser, ohne Salz	
<b>Versuchsbedingungen:</b>	
Drehzahl:	7,5 min <sup>-1</sup>
Axiallast:	80 kN
Hertz'sche Pressung:	2000 N/mm <sup>2</sup>
Lagertemperatur:	selbsteinstellend
Prüfzeit:	500 h

**Tabelle 21:** Prüfbedingungen FE8-Untersuchungen

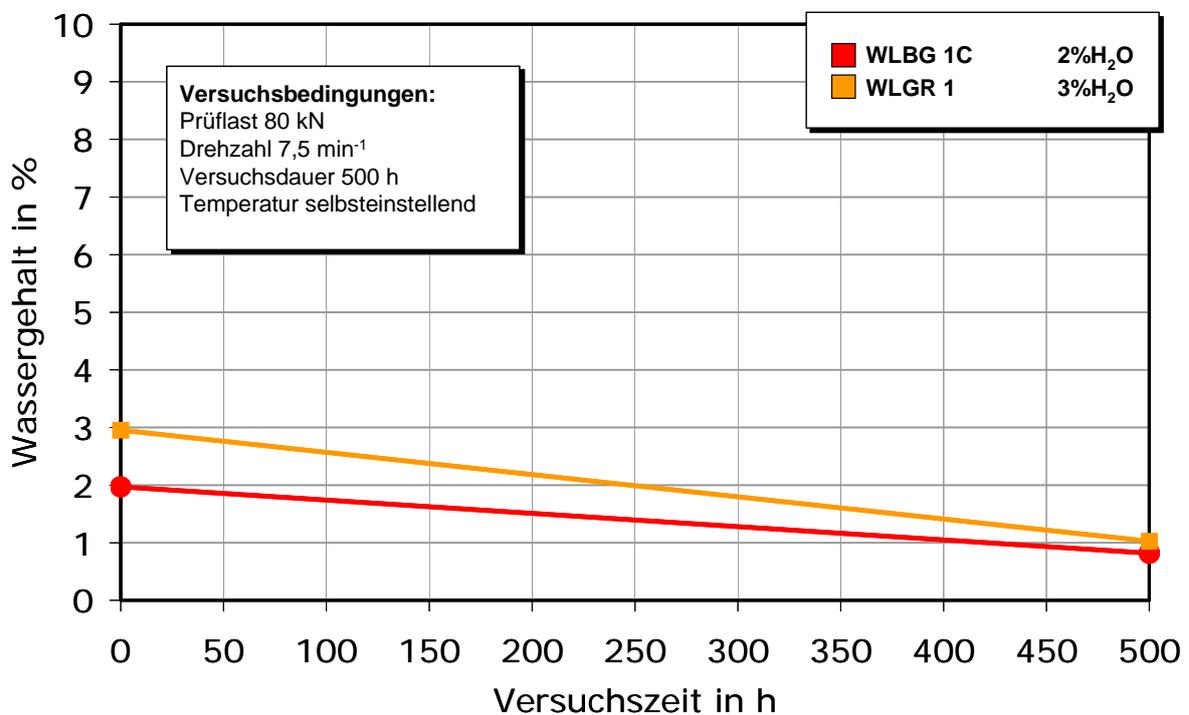
#### 4.2.3.4 Versuchsdurchführung und Ergebnisse

Zur Prüfung standen zwei Schmierfette zur Verfügung:

WLBG 1C als biogenes Schmierfett und

WLGR 1 als Referenz

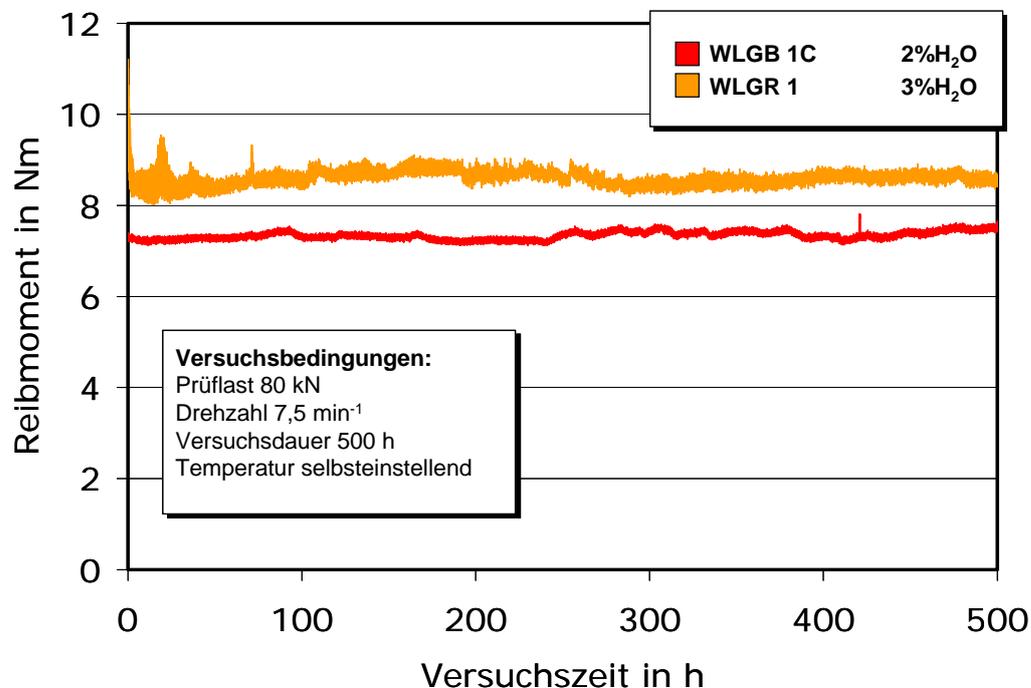
Den beiden Schmierfetten wurden vor Versuchsbeginn 3%-Massenanteile Wasser zugegeben, bei dem biogenen Schmierfett ergab die Analyse des Wassergehaltes nach Karl Fischer dennoch nur einen Anfangswassergehalt von 2% (Bild 4.67).



**Bild 4.67:** Veränderung des Wassergehaltes über der Versuchsdauer

Der Grund hierfür ist in einer lokal inhomogenen Verteilung des Wassers in der entnommenen Probe zu sehen. Während der Versuchsdauer von 500 h fiel der Wassergehalt von 2%, bzw. 3% bis auf etwa 1% ab. Ursache dafür sind Verdunstungsvorgänge während des Versuches aufgrund von Erwärmung (auf ca. 30°C selbsteinstellend) durch die Lagerreibung.

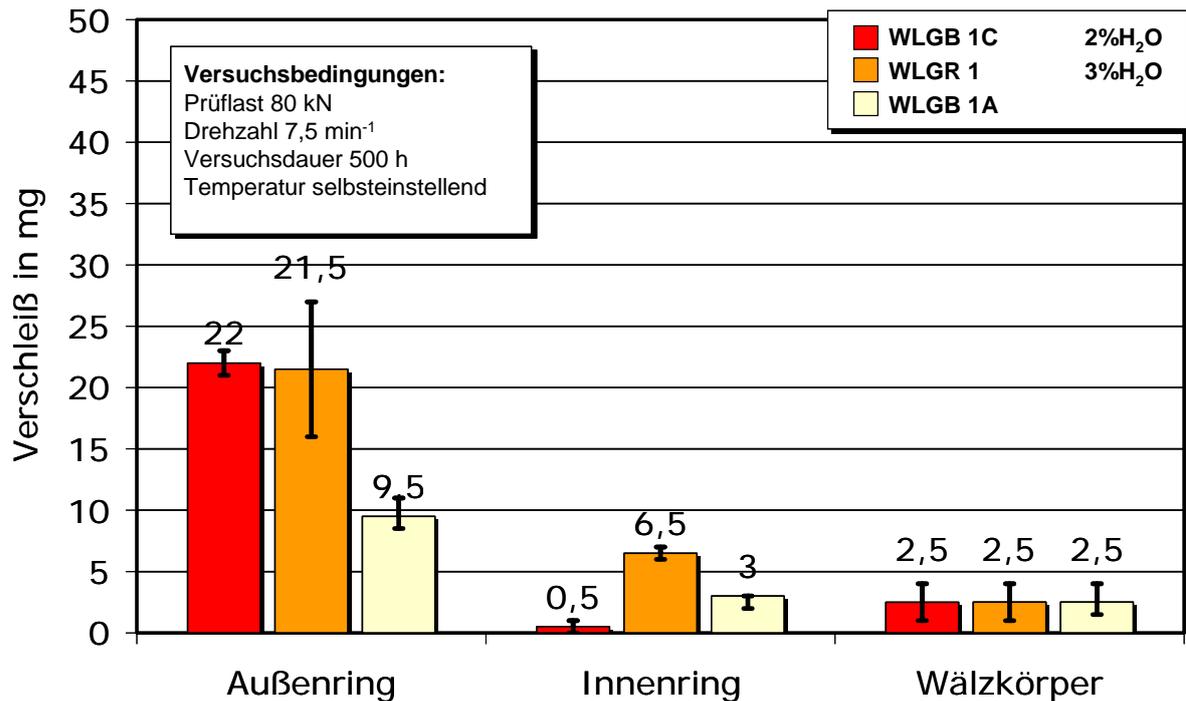
Während des Versuches wurde das Reibmoment aufgezeichnet (Bild 4.68). Dabei zeigte sich über die gesamte Versuchsdauer für das biogene Schmierfett WLGB 1C mit  $T_R \approx 7,3$  Nm ein geringeres Niveau des Reibmomentes als für das Referenzschmierfett WLGR 1 mit  $T_R \approx 8,5$  Nm.



**Bild 4.68:** Der Verlauf des Reibmoments über der Versuchsdauer

Die Schwankungsbreite des Reibmomentenverlaufes ist bei dem biogenen Schmierstoff geringer als beim Referenzschmierstoff, der Verlauf insgesamt erscheint sehr gleichmäßig, was auf einen ruhigen Versuchsverlauf hindeutet.

Hinsichtlich des aufgetretenen gravimetrischen Verschleißes zeigten die Versuche mit dem biogenen Fett WLGB 1C und dem Referenzfett WLGR 1 unter Wassereinfluss vergleichbare Ergebnisse (Bild 4.69). Die höchsten Verschleißbeträge traten mit ca. 22 mg am Außenring auf, die geringsten an den Wälzkörpern mit ca. 2,5 mg. Zum Vergleich sind in dem Diagramm auch die Verschleißwerte aus Versuchen mit der biogenen Fettformulierung WLGB 1A aufgeführt. Dabei traten sowohl an den Lagerringen als auch an den Wälzkörpern die geringsten Verschleißbeträge auf, was darauf zurückzuführen ist, dass diesem Fett kein Wasser zugesetzt wurde.

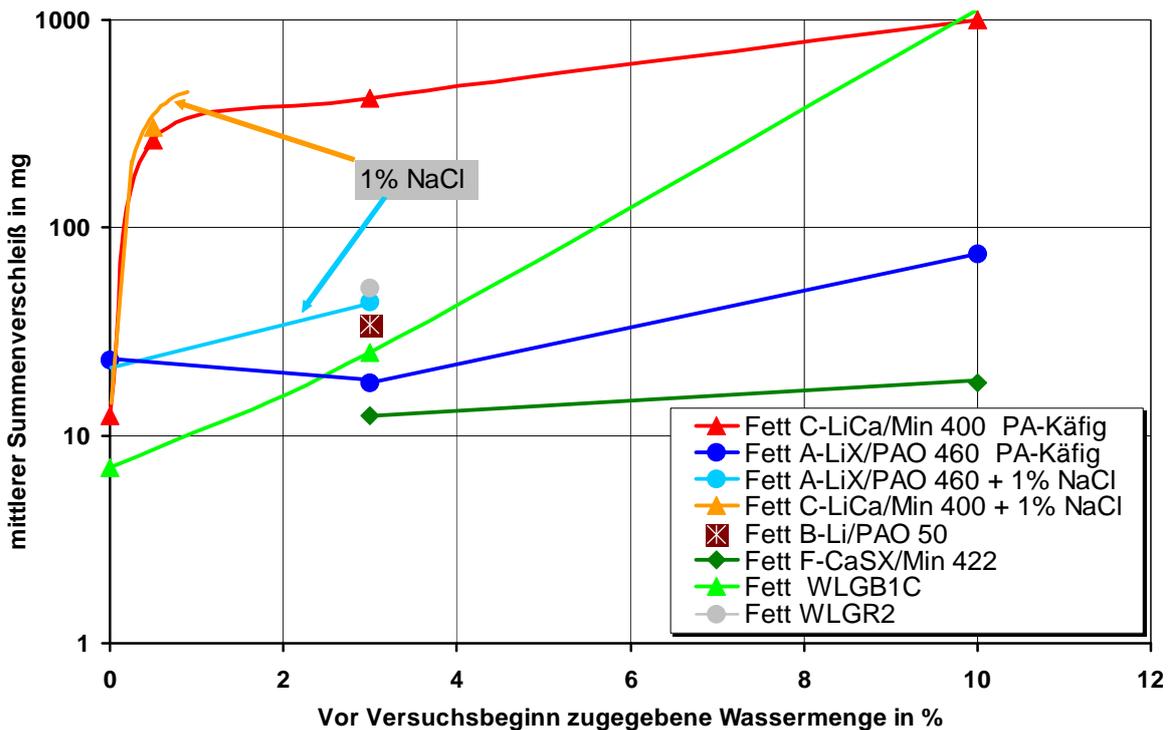


**Bild 4.69:** Der gravimetrisch bestimmte Verschleiß der Lagerkomponenten

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass das biogene Fett in der Formulierung WLGB 1C in den hier vorgestellten FE8-Untersuchungen seine Einsatzzeichnung als Wälzlagerschmierfett im Vergleich mit der Referenz WLGR 1 nachgewiesen hat. Sowohl hinsichtlich des Reibmomentes  $T_R$  als auch des aufgetretenen gravimetrischen Verschleißes wurden vergleichbare Werte wie bei der Referenz erzielt.

#### 4.2.3.5 FE8-Versuche mit variierten Anfangswassergehalten

Zur Untersuchung des Einflusses von Wasser auf die Verschleißschutzeigenschaften verschiedener Fette werden am IME FE8-Versuche durchgeführt, bei denen den Fetten vor Versuchsbeginn Wasser in Massenanteilen von 0%, 1%, 3% und 10% der Versuchs-Fettmenge beigegeben werden. Im Bild 4.70 sind die Ergebnisse dieser Versuche mit dem biogenen Fett der Formulierung WLGB 1C und dem Referenzfett WLGR 2 dargestellt. Um die Ergebnisse einordnen zu können, sind in das Diagramm zusätzlich die Verschleißbeträge aus früheren Untersuchungen mit anderen Fetten eingetragen.



**Bild 4.70:** Verschleißbeträge von WLGB 1C und WLGR 2 über dem Anfangswassergehalt

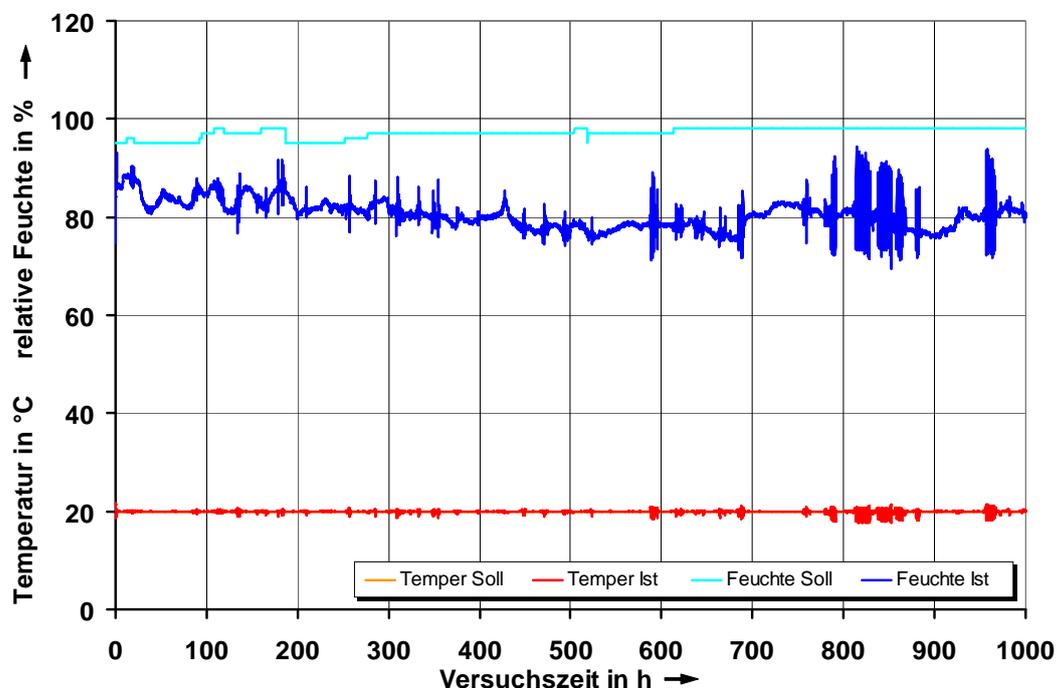
Bei WLGB 1C zeigt sich ohne Wasserzugabe mit  $\Delta m = 7 \text{ mg}$  ein Summenverschleiß auf gleichem Niveau wie bei den Klima-FE8-Versuchen mit dem gleichen Schmierstoff, vgl. Kapitel 4.2.3.6. Bei 3% Wasserzugabe nimmt der Summenverschleiß auf  $\Delta m = 25 \text{ mg}$  zu und erreicht bei 10% einen Wert von  $\Delta m = 1116 \text{ mg}$ . Ohne Wasserzugabe zeigt dieses Fett mit dem biogenen Grundöl einen guten Verschleißschutz, bei 3% Wasserzugabe bewegt sich der gemessene Verschleißbetrag im Mittelfeld der untersuchten Fette.

#### 4.2.3.6 FE8-Untersuchungen unter Klimaeinfluss

Ein am IME durchgeführter FE8-Versuch unter Klimaeinfluss sollte Erkenntnisse darüber erbringen, inwieweit klimainduzierte Wassergehalte einen erhöhten Wälzlagerverschleiß bewirken können. Im Anwendungsfall Windkraftanlage betrifft dies die Blatt-, Haupt- und Turmhauslager, wobei insbesondere Blatt- und Turmhauslager aufgrund ihrer vergleichsweise exponierten Einbauorte in besonderer Weise Klimaeinflüssen ausgesetzt sind.

Für diese Untersuchungen wurde am IME ein Prüfstand aufgebaut, der es ermöglicht, einen FE8-Prüfkopf in einem abgeschlossenen Raum einem geregelten Prüfklima auszusetzen, das vom Klimaschrank des IME bereitgestellt wird. Unter Sollwerten von 95% relativer Feuchte und 20°C wurde ein intermittierender FE8-Versuchslauf durchgeführt, bei dem sich Lauf- und Stillstandszeiten in Intervallen von jeweils 42 h abwechselten, bis in Summe 500 h Laufzeit erreicht waren. Die Stillstandszeiten sollten die Betriebsbedingungen von Blatt- und Turmhauslagern von Windkraftanlagen simulieren und Zeiträume gewährleisten, in denen Ausgleichsvorgänge zwischen der

feuchten Luft und dem Schmierfett eine signifikante Wasseraufnahme des Fettes ermöglichen. Die Prüfbedingungen entsprachen mit einer Prüflast von  $F_{\text{Prüf}} = 80 \text{ kN}$  und einer Drehzahl von  $n = 7,5 \text{ min}^{-1}$  den FE8-Standard-Prüfbedingungen. Die während des Versuchslaufes erreichten relativen Feuchten und Temperaturen sind in Bild 4.71 wiedergegeben. Während die Solltemperatur von  $\vartheta_{\text{Soll}} = 20^\circ\text{C}$  am Prüfkopf sehr gut realisiert werden konnte, zeigen sich bei der relativen Feuchte deutliche Abweichungen zum Sollwert. So wurde der Sollwert während des Versuches zwischen 94% und 98% rel. Feuchte variiert, der Ist-Wert der Feuchte schwankte dagegen deutlich um einen Mittelwert von ca. 80% rel. Feuchte. Dies ist auf Kondensationsvorgänge in den Schläuchen zwischen dem IME-Klimaschrank als Konditioniergerät und der Prüfbox, die den FE8-Prüfkopf enthält, zurückzuführen.



**Bild 4.71:** FE8-Klimaversuch: Temperatur und relative Feuchte über der Versuchszeit

Trotz des nicht sehr gut erreichten Feuchte-Sollwertes zeigten sich nach Versuchsende deutliche Rostspuren am Prüfkopf (Bild 4.72), was auf die Einwirkung von Luftfeuchte zurückzuführen ist. Eine Probenentnahme des Schmierfettes zu Versuchsbeginn und nach Versuchsende ergab im Vergleich mit Proben, denen vor Versuchsbeginn 2% bzw. 3% Wasser (bezogen auf die Fettmasse im Anlieferungszustand) zugegeben wurde, einen Wassergehalt auf sehr geringem Niveau, wie die mittlere Linie in Bild 4.73 verdeutlicht. Mit der Zuführung von feuchter Luft zum Prüfkopf ist es also lediglich gelungen, den Wassergehalt im Schmierfett während des Versuches bei etwa 600 ppm konstant zu halten.

- **Schmierstoff:**  
WLGB 1C
- **Prüfbedingungen:**  
1000 h Versuch gesamt,  
500 h Betrieb bei  
80 kN, 7,5 min<sup>-1</sup> mit  
500 h Stillstand  
20 °C, 95% rel. Feuchte  
Betriebsart-Wechsel alle  
42 h
- **Prüfkopf-Gehäuse (V2A)**  
zeigt deutliche Rostspuren

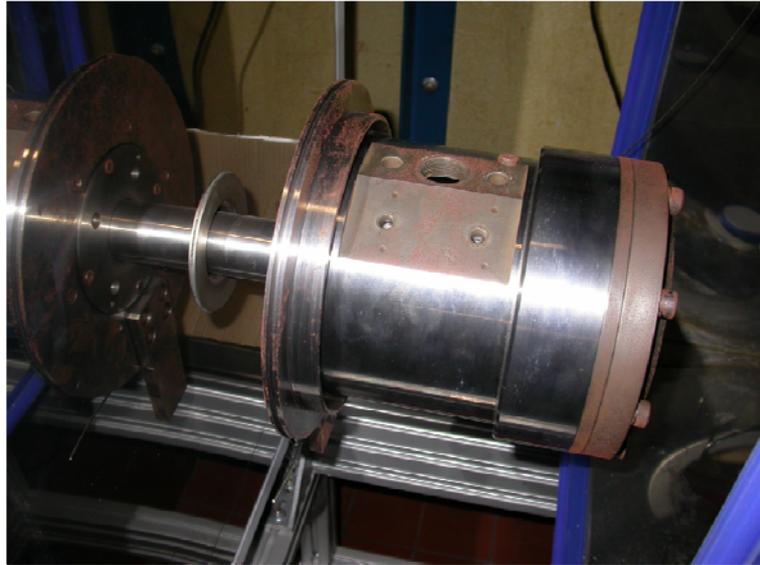


Bild 4.72: FE8-Prüfkopf nach Ende des Klimaversuches

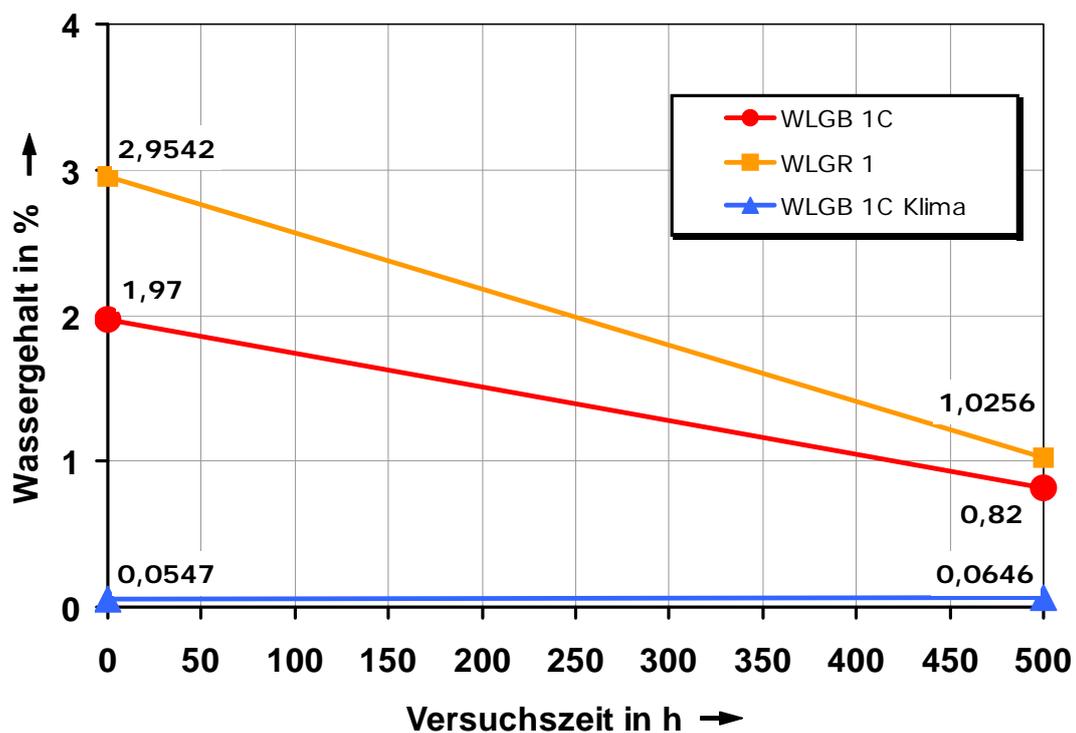
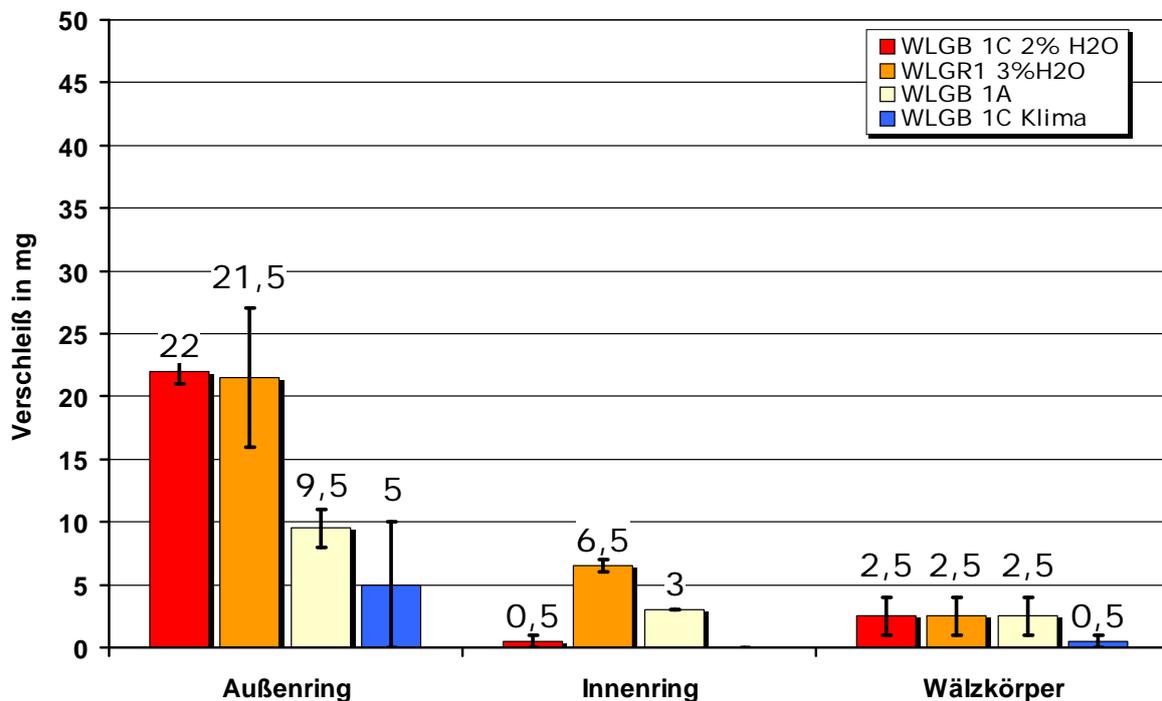


Bild 4.73: Wassergehalte im Schmierfett nach Karl Fischer vor und nach FE8-Versuch

Die Gründe für den geringen Wassereintrag in das Schmierfett sind zum einen in der schlechten Zugänglichkeit des Fettes für die Umgebungsluft aufgrund der wenigen Öffnungen im Prüfkopfgehäuse zu sehen (vgl. Bild 4.72), zum anderen steht im Prüfkopf nur eine verhältnismäßig kleine Oberfläche zum Stoffaustausch zwischen Luft und Fett zur Verfügung. Freies Wasser aus Kondensationsvorgängen im Inneren des Prüfkopfgehäuses konnte nicht beobachtet werden.

Aufgrund des relativ geringen Wassergehaltes während des Versuches von ca. 600 ppm sind im Vergleich zu den Versuchen mit eingerührten Wassergehalten von

2% bzw. 3% (entspricht 20000 ppm bzw. 30000 ppm) nur sehr geringe Verschleißbeträge mit einem Maximalwert des mittleren Verschleißes beider Außenringe von 5 mg aufgetreten (Bild 4.74).



**Bild 4.74:** Gravimetrischer Verschleiß nach Klima-FE8-Versuch

Inwieweit die letztlich vergleichsweise „trockenen“ Versuchsbedingungen eine geeignete Abbildung realer Betriebsbedingungen darstellen, wird nur durch Probenentnahmen im Rahmen von Fett-Feldversuchen und der Bestimmung praxisrelevanter Wassergehalte zu klären sein, die aufgrund des späten Beginns der Fett-Feldversuche erst nach Abschluss dieses Vorhabens sinnvoll durchgeführt werden können.

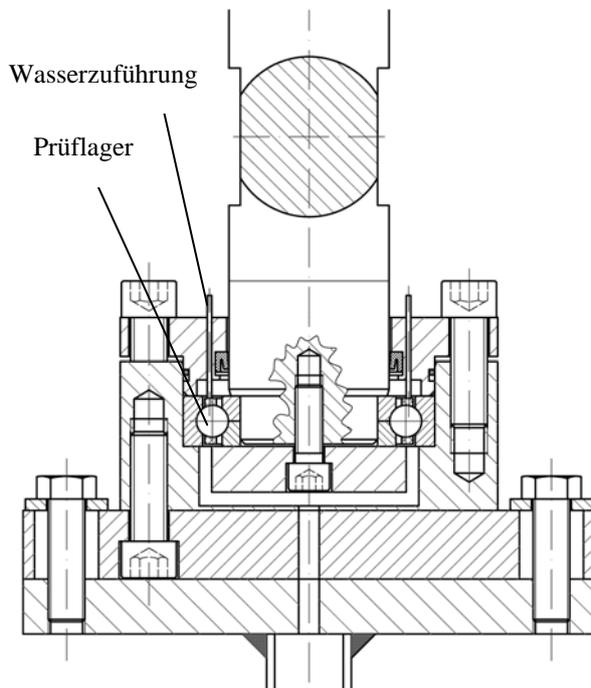
#### 4.2.3.7 Riffeltest-Versuche zum Einsatzverhalten biogener Fette in Blattlagern

Als Blattlager in Windkraftanlagen werden Vierpunktlager eingesetzt, die aufgrund der verhältnismäßig großen Wälzkörperanzahl, hoher Laufbahnschultern und großen Druckwinkeln für die Aufnahme axialer Lasten bei geringen Drehzahlen oder im Stillstand besonders geeignet sind. Als realitätsnahe Untersuchungen zum Einsatzverhalten von Blattlagern werden am IME Untersuchungen am Riffeltest-Prüfstand durchgeführt.

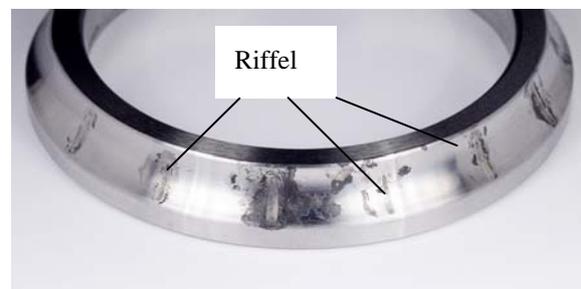
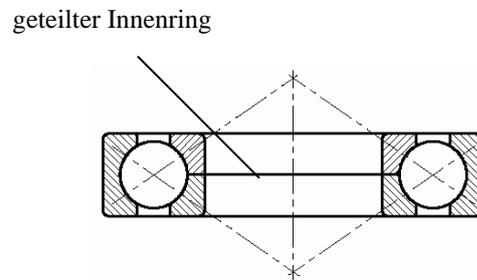
##### 4.2.3.7.1 Versuchsaufbau

Der am IME entwickelte Riffeltest-Prüfstand besteht aus einer Vorrichtung zur Aufnahme eines Vierpunkt-Prüflagers, das über eine geeignete Adaptierung mit einem hydraulischen Linearzylinder axial belastet werden kann (Bild 4.75). Die Innenringe des Prüflagers sind auf einer vertikal eingebauten Welle befestigt, der Außenring ist

fest in einem Gehäuseflansch montiert. Um die Möglichkeit zu haben, die Prüfbedingungen durch (Salz-) Wasserzugabe zu variieren bzw. zu verschärfen, sind in dem Klemmflansch für den Prüflager-Außenring entsprechende Zuführungen für Wasser vorgesehen.



**Bild 4.75:** Schnittzeichnung des Prüfstands



**Bild 4.76:** Prüflager: Vierpunktlager (FAG-QJ 212.TVP), Innenring mit Riffeln

Als Prüflager kommt ein Vierpunktlager mit der Bezeichnung FAG QJ 212.TVP zum Einsatz (Bild 4.76). Durch Fixieren des Lagerkäfigs wird das Abwälzen der Wälzkörper in Umfangsrichtung verhindert, die Wälzkörper rollen unter axialer Belastung in den Laufbahnen axial auf und ab und verursachen in Abhängigkeit von den Schmier- und Korrosionsschutzeigenschaften des Fettes mehr oder weniger stark ausgeprägte Riffel. Nach Versuchsende werden die Lagerinnenringe auf Spuren von Korrosion untersucht und die Riffeltiefe mit einem Rundheitsmessgerät der Firma Perthen bestimmt.

Fette mit gutem Korrosionsschutz lassen nur sehr flache Riffel mit einer Tiefe von ca. 1  $\mu\text{m}$  zu. Bei Fetten mit schlechteren Schutzeigenschaften werden Riffel mit bis zu 40  $\mu\text{m}$  Tiefe erzeugt. Da die Salzwasserlösung nur an einer Stelle in die Prüflageraufnahme eintritt, wird das Lager bei möglicher Korrosion an dieser Stelle besonders stark geschädigt, und dort entstehen meist auch die tiefsten Riffel. Daher wird diese größte Einfurchung als Vergleichswert besonders betrachtet, aber auch die mittlere Riffeltiefe als arithmetisches Mittel der Einzerriffeltiefen wird bestimmt.

Im Bild 4.77 sind die Versuchsbedingungen tabellarisch zusammengestellt. Das Prüflager wird bei einer Frequenz von 10 Hz einer sinusförmigen Axialkraftbelastung von +/- 70 kN mit 10 Millionen Lastwechseln unterworfen. Durch die axiale Belastung

ergibt sich am Prüflagerinnenring eine maximale Flächenpressung von  $p_{\max,i} = 3060 \text{ N/mm}^2$ , am Prüflageraußenring eine maximale Flächenpressung von  $p_{\max,a} = 3015 \text{ N/mm}^2$ . Zur Verschärfung der Versuchsbedingungen kann dem Prüflager während des Versuches eine 1%-ige NaCl-Lösung mit einem Volumenstrom von 6 l/min zugeführt werden.



Prüflager:	Vierpunktlager FAG QJ212.TVP
Prüflast wechselnd:	$F_{ax} = \pm 70 \text{ kN}$ sinusförmig
Maximale Pressung am Innenring:	$p_{\max,i} = 3060 \text{ N/mm}^2$
Maximale Pressung am Außenring:	$p_{\max,a} = 3015 \text{ N/mm}^2$
Frequenz axial:	$f_{ax} = 10 \text{ Hz}$
Lastwechsel axial:	$N_{ax} = 1 \text{ Mio}$
Volumenstrom destilliertes $\text{H}_2\text{O}$ :	6 ml/min
Wassermenge:	4 Liter $\text{H}_2\text{O}$ (1%-NaCl-Lösung)

**Bild 4.77:** Aufbau und Versuchsbedingungen Riffeltest

#### 4.2.3.7.2 Ergebnisse

Die Riffeltests wurden mit folgenden Referenzfetten durchgeführt:

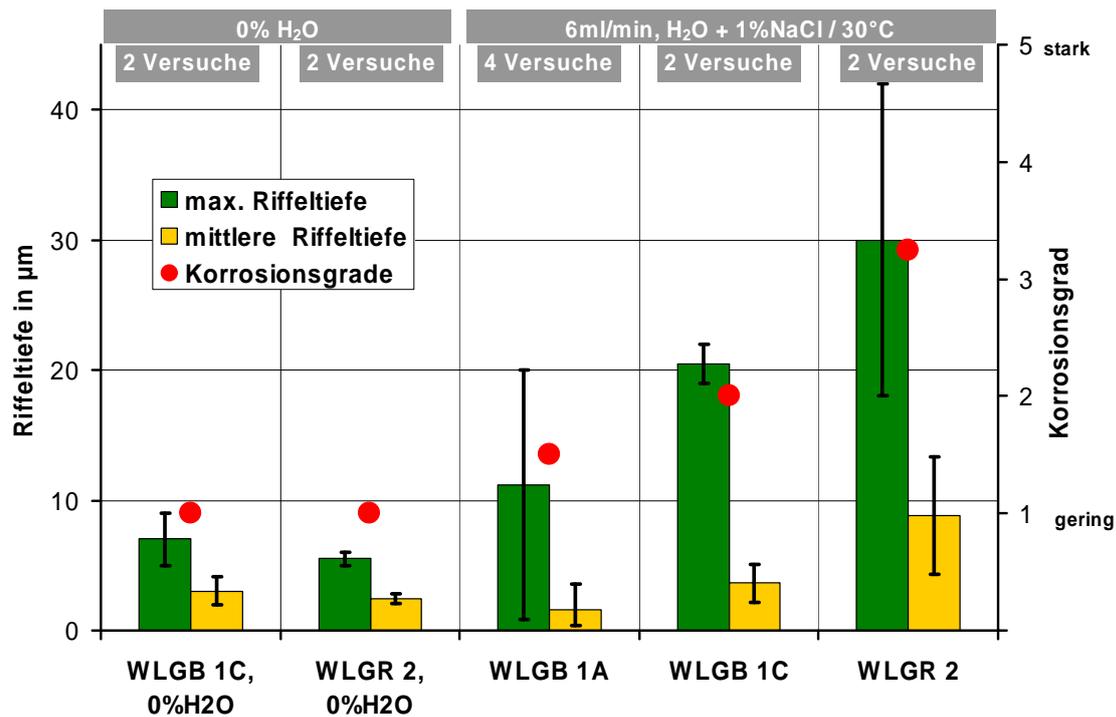
- WLGR 1
- WLGR 2

Vergleichend dazu wurde das folgende biogene Fett in zwei unterschiedlichen Formulierungen getestet:

- WLGB 1A
- WLGB 1C

Die Kurzbezeichnungen stehen jeweils für **W**in**L**ub **G**rease **R**eference und **W**in**L**ub **G**rease **B**io. Nähere Informationen zur Nomenklatur der Kurzbezeichnungen finden sich in Kapitel 2.1.

Bild 4.78 zeigt zur Bewertung der Riffelschutzeignung der untersuchten Schmierfette die maximalen und mittleren Riffeltiefen sowie den Grad der aufgetretenen Korrosion in einer Skala von eins (geringe Korrosion) bis fünf (starke Korrosion). Im linken Teil des Bildes sind die Ergebnisse des biogenen Schmierfettes WLGB in der Formulierung 1C im Vergleich mit dem Referenzfett WLGR 2 in Versuchen ohne Wasser dargestellt.



**Bild 4.78:** Ergebnisse der Riffeltest-Untersuchungen am IME

Diese beiden Fette weisen mit Werten um  $r_{t, \max} = 7 \mu\text{m}$  bzw.  $r_{t, \text{mit}} = 5,5 \mu\text{m}$  sehr ähnliche Ergebnisse hinsichtlich der maximalen und mittleren Riffeltiefen auf. Es wurden jeweils zwei Versuche durchgeführt, wobei die Streuungen der Versuchsergebnisse bei dem Fett WLGB 1C etwas größer waren als bei dem Fett WLGR 2. Bei diesen Versuchen ohne Wasserzugabe weisen beide Fette den geringen Korrosionsgrad 1 auf.

Etwas differenzierter stellen sich die Ergebnisse für die Versuche mit Wasserzugabe dar. Hier wurden die beiden Formulierungen WLGB 1A und WLGB 1C des biogenen Schmierfettes gegen das Referenzfett WLGR2 getestet. Die beiden biogenen Fette weisen mit  $r_{t, \max} = 11,2 \mu\text{m}$  bzw.  $r_{t, \max} = 20,5 \mu\text{m}$  zwar insgesamt ein niedrigeres Niveau der maximalen Riffeltiefen  $r_{t, \max}$  auf als das Referenzfett, die Korrosionsgrade liegen mit 1,5 bzw. 2 ebenfalls niedriger als beim Referenzfett. Bei den mittleren Riffeltiefen, den für die Gesamtbewertung des Riffelschutzverhaltens aussagekräftigeren Größen, zeigen sich tendenziell ähnliche Ergebnisse, jedoch fallen die Unterschiede bedeutend geringer aus. Hier zeigt das Referenzfett WLGR 2 mit einer mittleren Riffeltiefe von  $r_{t, \text{mit}} = 8,84 \mu\text{m}$  den höchsten Wert, die beiden Formulierungen des biogenen Schmierfettes weisen mit  $r_{t, \text{mit}} = 1,63 \mu\text{m}$  bzw.  $r_{t, \text{mit}} = 3,63 \mu\text{m}$  deutlich geringere Werte der mittleren Riffeltiefe auf. Dabei ist allerdings zu beachten, dass die Versuchsergebnisse bei dem Referenzfett WLGR 2 eine starke Streuung aufweisen.

Für eine Freigabe für Feldversuche wurde aber insbesondere das Ergebnis von  $r_{t, \max} = 20,5 \mu\text{m}$  bei WLGB 1C, dem aus dem Afrilub-Vorhaben stammenden Fett, unter den Projektpartnern als zu hoch eingeschätzt. Daher hat der

Schmierstoffhersteller FUCHS Lubritech verschiedene modifizierte Formulierungen entwickelt, die unter den Bezeichnungen WLGB 1D...WLGB 1G erneut getestet wurden. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in den folgenden Kapiteln dargestellt.

#### 4.2.3.8 Modifizierung eines biogenen Schmierfettes zur Optimierung des Schutzes gegen Riffelbildung

Der Projektpartner FUCHS Lubritech hat zur Verbesserung der Riffeltest - Eigenschaften der ursprünglichen Fettformulierung WLGB 1C vier Modifikationen WLGB 1D bis WLGB 1G hergestellt, von denen die Modifikation WLGB 1E die besten Ergebnisse im Riffeltest zeigte, s. Kapitel 4.2.3.9. Physikalische Eigenschaften und Testergebnisse der ursprünglichen und der besten modifizierten Fettformulierung sind in Bild 4.79 einander gegenübergestellt.

	Afrilub FLT 1 #41664	Afrilub FLT1 MOD2 #52928
	WLGB1C	WLGB1E
<b>Verdicker</b>	Lithium-12-hydroxystearat	
<b>Grundöl</b>	synth. Ester 320 mm <sup>2</sup> s (40°C)	
<b>RP (25°C) [0,1mm]</b>	266 (18h)	253 (24h)
<b>WP60 [0,1mm]</b>	285	288
<b>WP100.000 - WP60</b>	40	35
<b>Shell Roller (50h, 80°C)</b>		
delta RP [0,1mm]	-	38
delta WP60 [0,1mm]	-	31
<b>Tropfpunkt [°C]</b>	194	186

	Afrilub FLT 1 #41664	Afrilub FLT1 MOD2 #52928
	WLGB1C	WLGB1E
<b>Ölabsch. (7d, 40°C) [%]</b>	2,6	2,2
<b>Ölabsch. (7d, 60°C) [%]</b>	7,8	5,3
<b>Ölabsch. (7d, 80°C) [%]</b>	-	8,4
<b>Ölabsch. (7d, 100°C) [%]</b>	14,8	12,3
<b>Wasserbest. (3h, 90°C) [Bew.]</b>	1	1
<b>Cu-Korr. (18h, 100°C) [Bew.]</b>	1	1

	Afrilub FLT 1 #41664	Afrilub FLT1 MOD2 #52928
	WLGB1C	WLGB1E
<b>Emcor (3% NaCl)</b>		1 / 2
<b>VKA</b>		
Gutlast [N]	2600	3000
Verschleiß (300N, 1h) [mm]	0,65	0,6
Verschleiß (1000N, 60s) [mm]	0,5	0,45
<b>Fließdruck (-40°C) [mbar]</b>	750	725
<b>FE9 [A/1500/6000-120 F10 / F50 [h]</b>	1	>225 / > 300

**Bild 4.79:** Eigenschaft der Schmierfett-Modifikation WLGB 1E

Mit Ausnahme eines geringfügig verminderten Ölabscheidevermögens bleiben die Eigenschaften durch die Modifizierung weitgehend konstant, sodass davon ausgegangen werden kann, dass sich hinsichtlich Handhabung und Einsatzbereich keine wesentlichen Veränderungen ergeben haben. Die fertige Modifikation WLGB 1E wurde dem IME, SKF und Rothe Erde zunächst als Erprobungsmuster überstellt, nach Abschluss der Tests erhielt Rothe Erde ca. 20 kg zur Befüllung der Feldversuchs-Großlager (vgl. Bild 4.81).

#### 4.2.3.9 Riffeltest-Untersuchungen an modifizierten Fetten

Am Institut für Maschinenelemente und Maschinengestaltung in Aachen wurden ebenso wie bei Rothe Erde Riffeltest-Untersuchungen mit der Ausgangsformulierung des biogenen Fettes WLGB 1C sowie mit den Modifikationen WLGB 1D...1G und dem Referenzfett WLGR 1 durchgeführt. Die Modifikation WLGB 1E entspricht dabei dem Labormuster mod 2 der Untersuchungen bei Rothe Erde. Die Labormuster mod 7 und mod 8 wurden nur bei Rothe Erde untersucht.

##### Überblick der Untersuchungen am IME:

Nachdem das anfänglich zur Verfügung stehende Fett WLGB 1C hinsichtlich der Werte der maximalen bzw. mittleren Riffeltiefen und des Korrosionsgrades deutlich außerhalb der von Rothe Erde geforderten Sollwerte lag, (Vergleich mit dem Referenzfett WLGR 1, Bild 4.80), wurden dem IME von FUCHS Lubritech vier Modifikationen für Riffeltest-Untersuchungen bereitgestellt, die die Bezeichnungen WLGB 1D...1G erhielten. Dabei zeigte die Modifikation WLGB 1E die besten Ergebnisse hinsichtlich Riffeltiefen und Korrosion. Diese Tendenz stimmt mit den Ergebnissen der Riffeltest-Untersuchungen bei Rothe Erde überein.

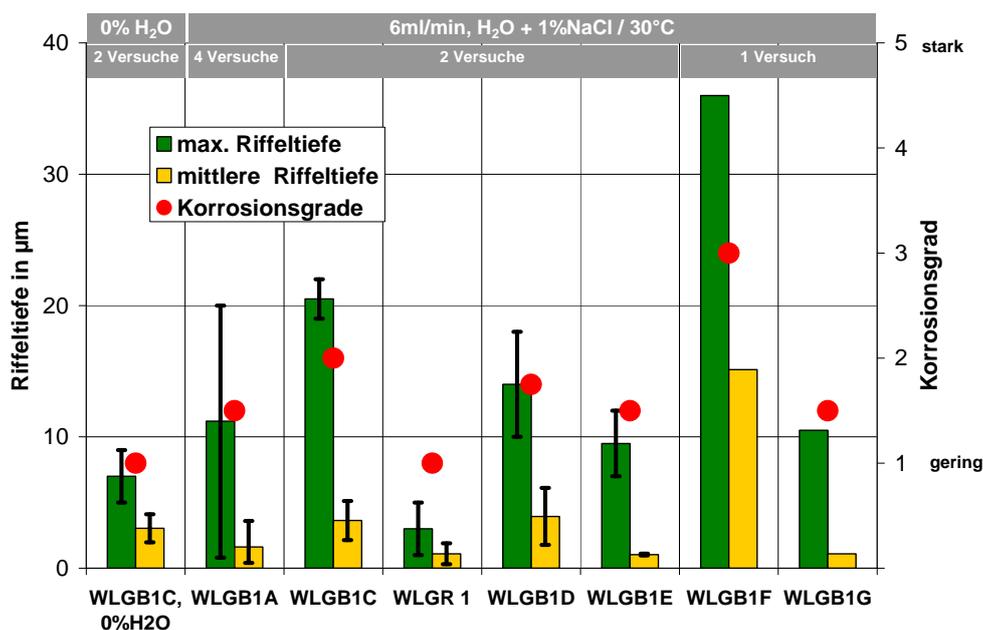


Bild 4.80: Riffeltest-Untersuchungen an Fett-Modifikationen

Aufgrund der Untersuchungsergebnisse wurde das Fett WLGB 1E Anfang 2006 von Rothe Erde für Feldversuche im Rahmen des Winlub-Projektes freigegeben. Daraufhin wurde bei FUCHS Lubritech eine Charge (#52928) dieses Fettes unter Serienbedingungen hergestellt und Rothe Erde zur Befettung der Lager übergeben.

#### *Überblick der Untersuchungen bei Rothe Erde:*

Im Rahmen des Forschungsvorhabens Winlub wurden im Zeitraum August 2005 - August 2006 bei ThyssenKrupp Rothe Erde Riffeltests an Labormustern der Fette Afrilub - mod. 2, - mod. 7 und - mod. 8 durchgeführt. Weitere Riffeltests und Dichtungsverträglichkeitstests wurden an der Serien-Charge des Fettes Afrilub mod. 2 Chargennummer #52928 durchgeführt. Letztere hat sowohl im Riffeltest als auch in der Verträglichkeitsprüfung die von RE gestellten Anforderungen erfüllt. Weiterhin erfolgte die Befüllung von 2 Turm- und 6 Flügelverstelllagern für eine 1,5 MW Windenergieanlage der Fa. GE-Wind mit dem Schmierstoff der Charge #52928. Diese Lager wurden der Fa. GE-Wind bereitgestellt.

#### **Durchgeführte Arbeiten und Untersuchungen im Einzelnen:**

##### Riffeltests

Die Riffeltests und deren Auswertung erfolgte entsprechend der RE Prüfvorschrift 61001

##### Dichtungsverträglichkeit

Die Dichtungsverträglichkeit wurde an der Charge #52928 des Fettes Afrilub mod. 2 analog dem im Zwischenbericht 2005 beschriebenen Verfahren durchgeführt.

##### Bereitstellung der Lager

Nachfolgend bezeichnete Blatt- und Turmlager wurden vor dem Befetten aus der Serienfertigung entnommen, mit dem von der Fa. FUCHS beigestellten Fett Afrilub mod. 2 der Charge #52928 gemäß Steckbrief (Spezifikation) gefettet und mit zusätzlicher Kennzeichnung dem Kunden GE bereitgestellt (Bild 4.81).

##### Turmlager Kennzeichnung:

ID 84679200-0040079576, Lager Nr. 14 und Nr. 17

##### Flügelverstelllager Kennzeichnung:

ID 04496700-0040079611, Lager Nr. 1 und Nr. 2

ID 04496800-0040079614, Lager Nr. 1 und Nr. 2

ID 04496900-0040079694, Lager Nr. 1 und Nr. 2



Flügelverstelllager



Turmlager

**Bild 4.81:** Versandbereite Lager gefettet mit FUCHS Afrilub mod. 2**Ergebnisse:**

- Ergebnisse aus den Riffeltests

**Tabelle 22** enthält die Ergebnisse der bei RE durchgeführten Riffeltests an unterschiedlichen Labormustern und Chargen des Schmierstoffes FUCHS Afrilub. Die Labormuster mod. 7 und mod. 8 lagen deutlich außerhalb der von RE geforderten Sollwerte. Während das Labormuster des Fettes Afrilub mod. 2 noch an der Grenze des Zulässigen lag, ergaben die Versuche mit dem Serienfett (Fett, das nach der Rezeptur des Labormusters mod. 2 unter Serienbedingungen hergestellt wurde) Werte, die innerhalb der RE Spezifikation liegen.

Fettsorte		Test Nr.	Schadensbild aus Riffeltest			
			Max. Riffeltiefe [µm]	Mittl. Riffeltiefe [µm]	Korrosion i. d. Kontaktzonen [Anzahl]	Korrosion i. d. Flächen ohne Kontakt [Anzahl]
Labormuster	mod 2	m2.1	5	0,43	3	2
		m2.2	17	1,27	5	3
	mod 7	m7.1	39	21,8	10	15
		m7.2	47	21,9	14	15
	mod 8	m8.1	20	3,66	6	13
		m8.2	31	4,2	8	12
Serienfett #52928	mod 2	m2.3	3,8	0,36	2	3
		m2.4	3,2	0,49	1	1
<b>Sollwerte</b>			<b>≤ 5</b>	<b>≤ 2</b>	<b>≤ 3</b>	<b>≤ 2</b>

**Tabelle 22:** Ergebnisse der Riffeltests

- Ergebnisse der Dichtungsverträglichkeitsuntersuchung

Die in dem Zwischenbericht 2005 dargestellten Dichtungsverträglichkeitsuntersuchungen wurden mit dem Serienfett der Charge #52928 wiederholt. Tabelle 23 enthält eine Gegenüberstellung der 2005 an Afrilub FLT 1 und der in 2006 an der Seriencharge 52928 festgestellten Gewichts- und Volumenänderungen. Die Ergebnisse sind im Rahmen der Messgenauigkeit des Prüfverfahrens nahezu identisch und liegen im zulässigen Bereich. Die

Härte der geprüften NBR-Werkstoffe blieb nach der künstlichen Alterung im Schmierstoff ebenfalls nahezu unverändert bei ca. 70 Shore A. Der Schmierstoff Fuchs Afrilub mod. 2 der Seriencharge 52928 konnte somit im Rahmen des Forschungsvorhabens für den Einsatz in Blatt- und Turmlagern freigegeben werden.

Fett	Dichtungswerkstoff	Gewichtsänderung nach 168h/70°C im Fett [%]	Volumenänderung nach 168h/70°C im Fett [%]	Härte nach 168h/70°C im Fett [Shore A]
Afrilub FLT 1	A	-3,1	-3,5	73
	B	-0,2	+0,6	72
	C	-0,2	+0,6	72
Afrilub mod 2 #52928	A	-2,9	-2,9	73
	B	+0,1	+0,8	69
	C	-1,3	-1,2	72

**Tabelle 23:** Gegenüberstellung der Gewichts- und Volumenänderungen GWL-typischer Dichtungswerkstoffe bei Alterung in den untersuchten biologisch abbaubaren Afrilub Schmierstoffen

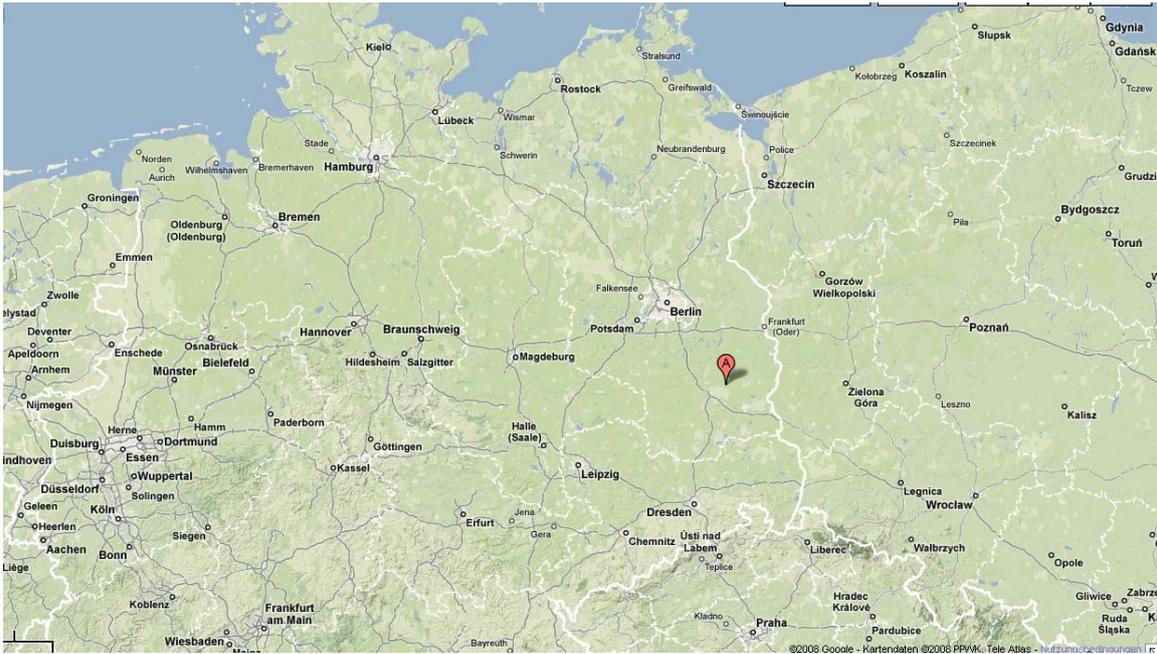
## 4.2.4 Feldversuche

### 4.2.4.1 Identifikation von Windturbinen für Fett-Feldversuche

Im Berichtszeitraum wurden von der GE Wind Energy GmbH Windturbinen identifiziert, auf welchen ein Test des neuen biologisch abbaubaren Lagerfetts Afrilub durchgeführt werden kann. An die Windturbinen waren folgende Ideal-Anforderungen gestellt:

- Drei Neuanlagen am selben Standort mit Errichtung in Mitte / Ende 2006
- Blattlagertyp und Befüllung:  
2 x Blattlagersatz Rothe Erde + Afri-Lub Fett (Testfett)  
1 x Blattlagersatz Rothe Erde + Fuchs Gleitmo 585K Fett (Referenzfett)
- Azimutlagertyp und Befüllung:  
2 x Azimutlager Rothe Erde + Afri-Lub Fett (Testfett)  
1 x Azimutlager Rothe Erde + Fuchs Gleitmo 585K Fett (Referenzfett)

Es wurden drei Testanlagen des Typs GE Wind 1.5sl im Windpark Neu Zauche (Brandenburg) gefunden. Die Anlagen wurden im September / Oktober 2006 am Standort Salzbergen mit den entsprechenden Lagern ausgerüstet. Die Azimut- und Blattlager für die Anlagen Neu Zauche 2 und 3 (Bild 4.82) wurden bereits bei Rothe Erde mit dem Afrilub Fett WLGB 1E versehen. An allen Lagern wurde vor der Befüllung eine Fettprobe (Nullprobe) genommen. Die Anlagen wurden am selben Standort errichtet und sind daher denselben Belastungen und Umweltbedingungen ausgesetzt.



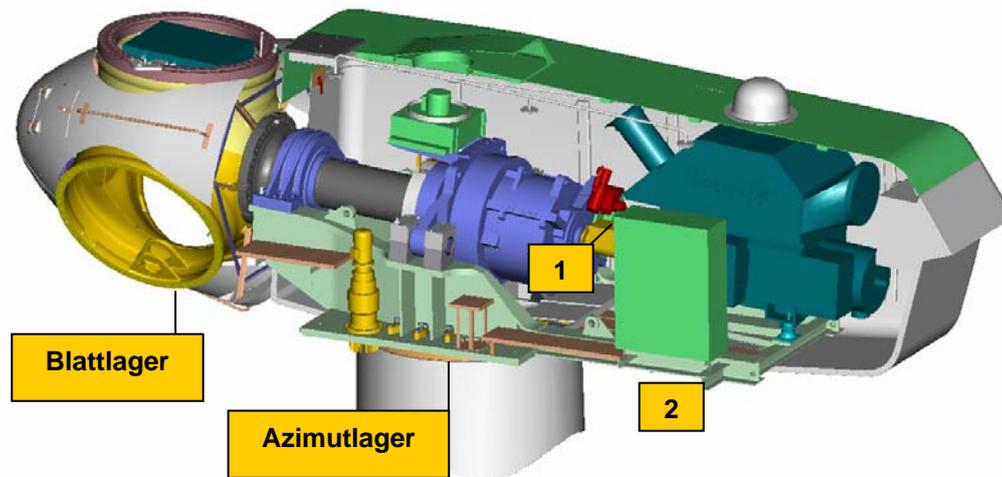
**Bild 4.82:** Position Windpark Neu Zauche

Bei zwei Testanlagen wurde das Schmiersystem für die Außenverzahnung des Azimutlagers ebenfalls mit dem Afrilub Fett ausgerüstet. Zusätzlich bekommt eine Testanlage ein mit Afrilub (WLGB 1E) befülltes Schmiersystem für die Außenverzahnung der Blattlager. Um später eine genaue Analyse der Fettproben zu gewährleisten, ist es notwendig, die Umwelt- und Betriebsbedingungen der Anlagen zu kennen. Um dieses sicherzustellen, nimmt GE in einem 10-Minuten-Intervall die folgenden Daten auf:

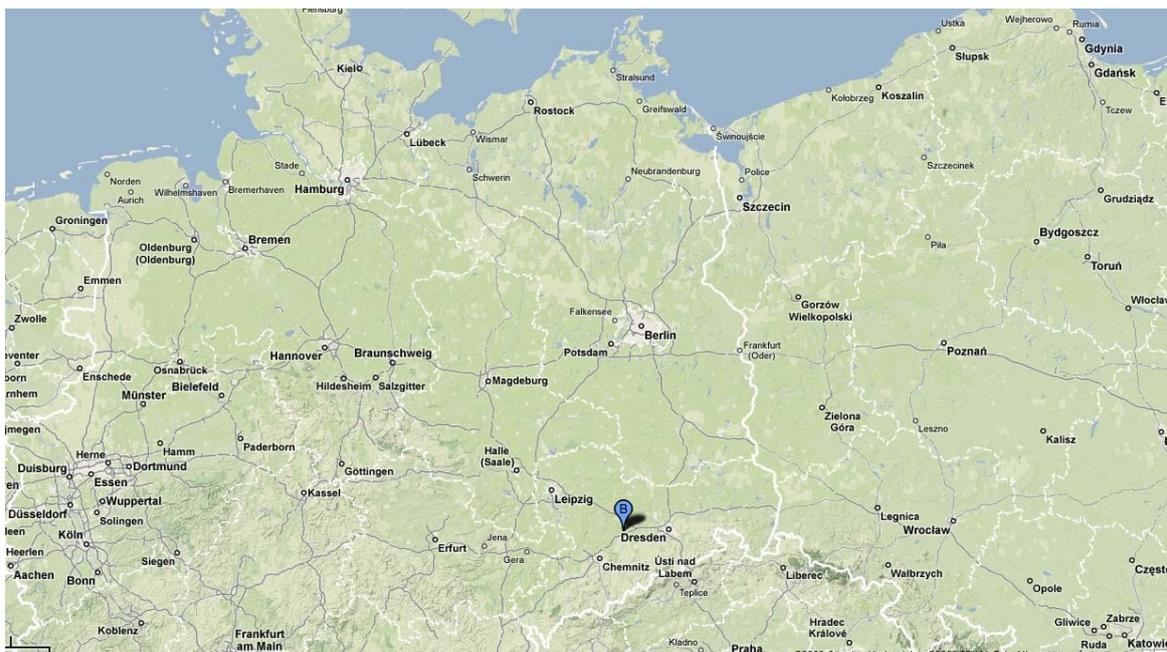
- Anlagenleistung
- Drehzahl
- Gondeltemperatur
- Außentemperatur
- Fehlermeldungen

1

2

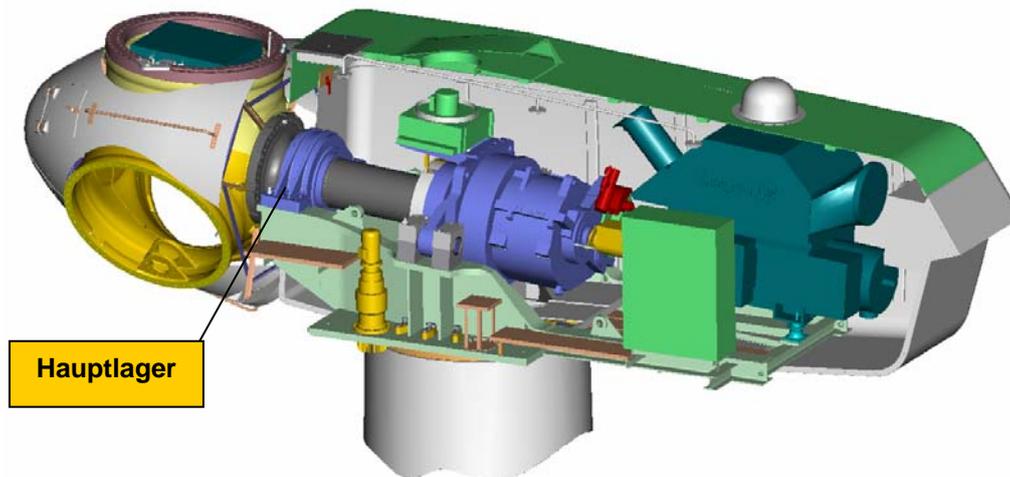


**Bild 4.83:** Turmhaus mit Messstellen für Gondel- und Außentemperatur; Fett-Feldversuch an Blatt- und Azimut-Lagern im Windpark Neu Zauche



**Bild 4.84:** Position Windpark Saubusch

Der Einsatz im Hauptlager von Anlagen im Windpark Saubusch (Bild 4.84), wird grundsätzlich thermisch überwacht, um bereits während der Laufzeit Aufschluss über das Einsatzverhalten des biogenen Schmierfettes zu erhalten. Nach einer beanspruchungsrelevanten Laufzeit ergibt sich grundsätzlich die Möglichkeit, die Leistungsfähigkeit an Proben des biogenen Fettes im Rahmen von Prüfstandsuntersuchungen zu überprüfen.



**Bild 4.85:** Turmhaus mit Messstellen für Gondel- und Außentemperatur; Fett-Feldversuch am Hauptlager im Windpark Saubusch

Bild 4.86 stellt noch einmal die Situation der Fett-Feldversuche als Übersicht dar.

## Sachstandsbericht FLT

### Bemusterungen mit WinLubfett:

- Ende März 2006: jeweils 5 kg an:
  - IME
  - Rothe Erde
  - SKF
- Anfang Mai 2006: 20 kg an Rothe Erde  
(zur Befüllung der Testlager)
- Oktober 2006: Ausrüstung der Referenzanlagen im WP Neu Zauche ; RE-Blatt/Turmlager
- Oktober 2007: Ausrüstung von SKF Lagern der Rotorwelle im WP Saubusch (Betreiber DGE)
- Aktion 2007/08 Fettmuster entnehmen und analysieren  
Datenvergleich zu Frischfett erarbeiten

INLUB 18.11.2007/DGE

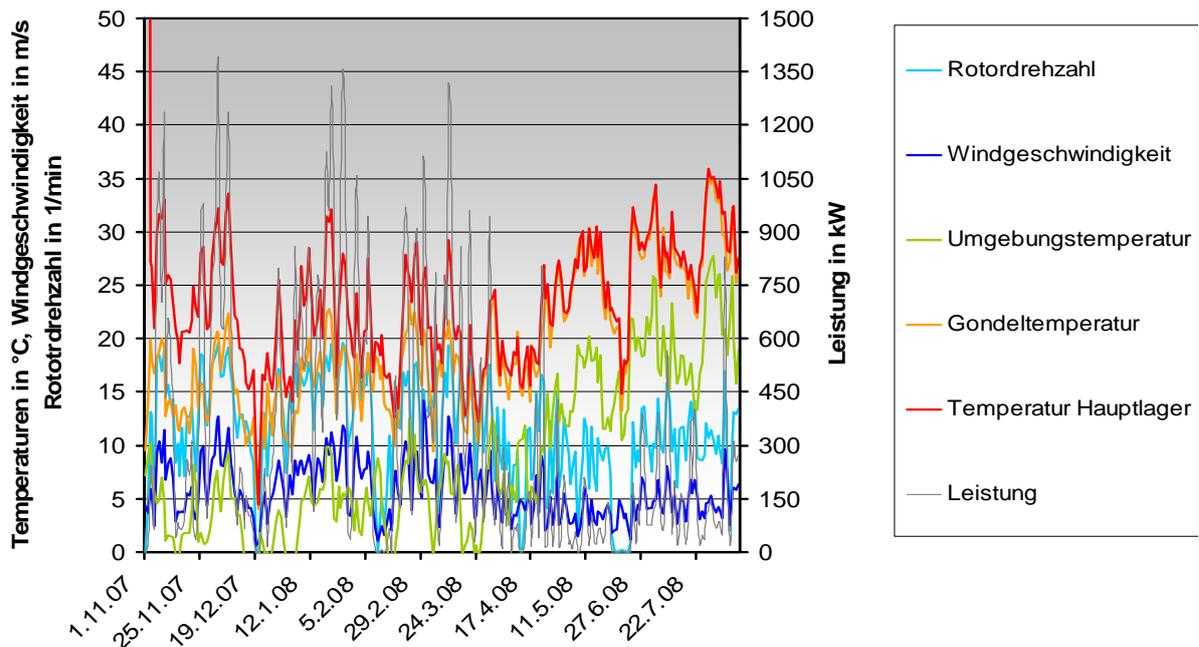


**Bild 4.86:** Status Fett-Feldversuche, FUCHS-Lubritech

#### 4.2.4.2 *Beginn der Fett - Feldversuche in den Windparks Neu Zauche / Brandenburg und Saubusch / Sachsen*

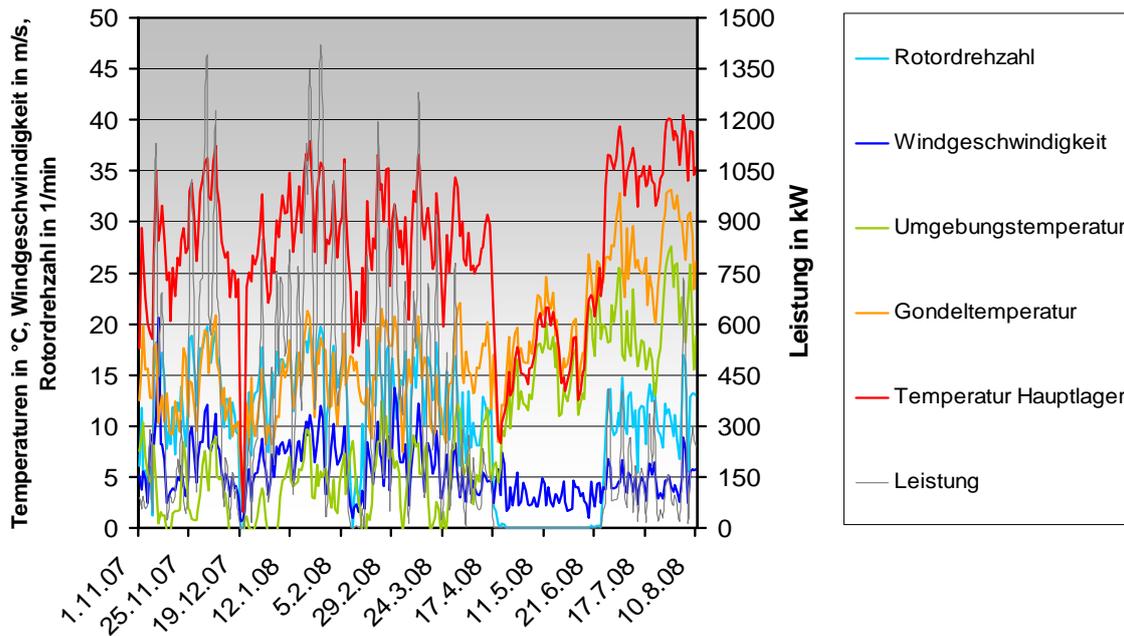
Der Beginn der Fett-Feldversuche erfolgte im Oktober 2006 in Blatt- und Turmlagern von Anlagen im Windpark Neu Zauche in Brandenburg. Aufgrund von Schwierigkeiten bei der Benennung von geeigneten Anlagen konnten die Feldversuche zum Einsatz von WLGB 1E in Hauptlagern von SKF erst im Oktober 2007 im Windpark Saubusch

in Sachsen beginnen, Bild 4.86. Dies und die Notwendigkeit, zur ersten Bewertung des Einsatzverhaltens des biogenen Fettes eine sinnvolle Mindest-Einsatzzeit von etwa einem Jahr einzuhalten, haben zu der Beantragung der bewilligten Projektverlängerung bis zum 31.07.2008 geführt. In den folgenden beiden Diagrammen sind die Aufzeichnungen von Leistungs-, Drehzahl- und Temperaturverläufen für die beiden Feldversuchs-Windkraftanlagen im Windpark Saubusch dargestellt (Bild 4.87 und Bild 4.88).



**Bild 4.87:** Anlage Saubusch 10, Winlub-Fett WLGB 1E

Charakteristisch und für beide Anlagen gleich ist die Tatsache, dass die Hauptlagertemperatur bei geringer Leistung bzw. Rotordrehzahl der Gondeltemperatur sehr eng folgt. Erzeugt die Windkraftanlage elektrische Leistung und liegt ein höheres Niveau der Rotordrehzahl von ca.  $> 12 \text{ min}^{-1}$  vor, hebt sich die Hauptlagertemperatur deutlich von der Gondeltemperatur ab, wie die vergleichende Betrachtung der roten und orangefarbenen Kurvenverläufe zwischen dem 1.11.07 und dem 24.03.08 zeigen. Besonders deutlich wird dies in Drehzahlspitzen von  $> 15 \text{ min}^{-1}$  an der Rotorwelle.



**Bild 4.88:** Anlage Saubusch 9, SKF Fett

Auf einen signifikanten Unterschied in den Hauptlager temperaturverläufen muss allerdings hingewiesen werden: während sich bei beiden Anlagen in der Windsaison zwischen November 2007 und Ende März 2008 gleichermaßen eine Gondeltemperatur in einem Intervall von +10°C bis +20°C einstellt, liegen die Hauptlager temperaturen im gleichen Zeitraum auf deutlich unterschiedlichen Niveaus. Während sich die Hauptlager temperaturen auf Anlage 9 in einem Intervall von +25°C bis +35°C und damit in etwa 15°C über der Gondeltemperatur bewegen, beträgt der Temperaturunterschied auf Anlage 10 mit der WLGB 1E-Füllung nur ca. 10°C. Dies ist ein Indiz für günstigere Reibverhältnisse im Hauptlager der Anlage 10, nach dem derzeitigen Stand der Hauptlagerfett-Feldversuche lässt sich somit das Einsatzverhalten des biogenen Schmierfettes im Vergleich mit dem Referenzfett als gut bezeichnen.

#### 4.2.5 Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

Auch im Bereich der Schmierfette konnten die Untersuchungen sowohl auf Prüfständen wie auch auf den Feldversuchs-Windkraftanlagen zeigen, dass Fette auf Basis biogener Grundöle eine leistungsfähige Alternative zu konventionellen Schmierfetten sind. Ein aus dem Vorgängervorhaben ARILUB stammendes Fett konnte hinsichtlich seiner Formulierung so modifiziert werden, dass es die Freigabe zum Einsatz als Schmierstoff in Blatt- und Turmhauslagern sowie als Hauptlagerschmierstoff in den Feldversuchs-Windkraftanlagen bekommen hat. Beobachtungen zeigen hier für das biogene Fett WLGB 1E im Vergleich mit dem Referenzfett offenbar günstigere Schmierbedingungen am Hauptlager, charakterisiert durch ein geringeres Temperaturniveau am Hauptlager.

## 4.3 Condition Monitoring

### 4.3.1 Prüfstandsuntersuchungen

#### 4.3.1.1 Sensorikvalidierung an Prüfständen

Für die an Prüfständen im Institut für Maschinenelemente und Maschinengestaltung durchgeführten Versuche zur Validierung von Sensorik zur Ölzustandsüberwachung stellte die Firma HYDAC ein Sensorikpaket, bestehend aus dem Partikelzählsystem "CSM" (Bild 4.89), dem Ölsensor "HYDAC-Lab" (Bild 4.90) und der Filter-Verschmutzungsanzeige von Typ "DirtController GW" (Bild 4.91), zur Verfügung. Dieses Sensorikpaket entspricht dem an den Windkraftanlagen für die Feldversuche installierten, vgl. Kapitel 4.2, und wurde am Planetengetriebe-Verspannungsprüfstand des IME getestet.



Bild 4.89: CSM-Modul



Bild 4.90: HYDAC-LAB



Bild 4.91: Sensor GW

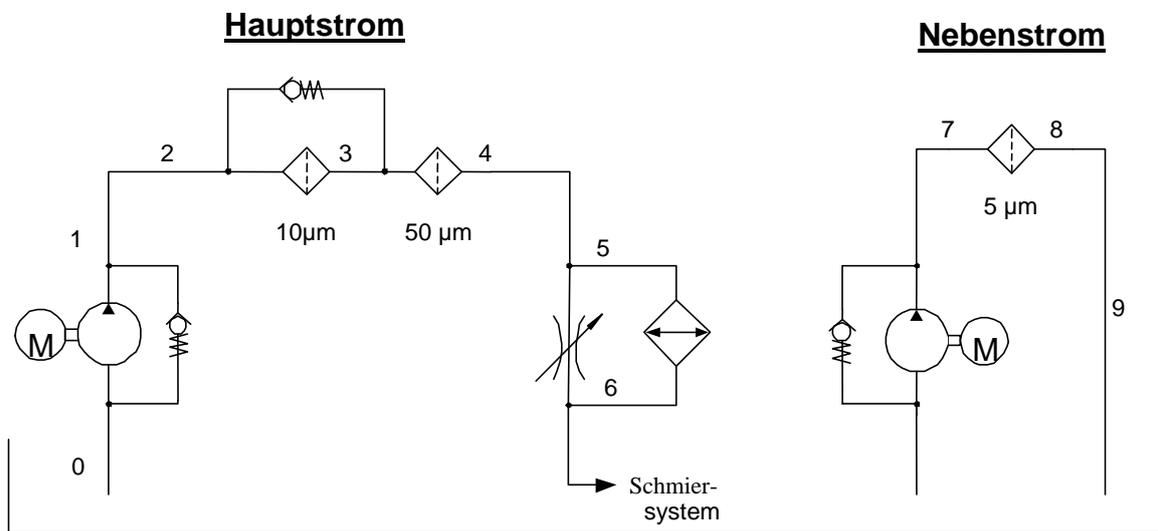
### 4.3.2 Feldversuche

#### 4.3.2.1 Aufbau eines Systems zur Ölzustandsüberwachung und zum Acoustic Emission-Monitoring des Wälzlagerzustandes an Feldversuchs-Windkraftanlagen

Der Test des Getriebeöles FUCHS GEARMMASTER ECO 320 in einer Anlage des Windparks Bockelwitz sah folgende Vorgehensweise vor: im Rahmen eines Getriebetausches, welcher in der KW27 2005 stattfand und den Austausch von zwei Getrieben umfasste, wurde eines dieser Getriebe mit dem FUCHS Getriebeöl befüllt. Damit dieses Getriebe von Anbeginn an mit diesem Öl betrieben werden konnte, wurde bereits der Serientest bei der Firma Bosch Rexroth mit dem genannten Öl durchgeführt. Das zweite Austauschgetriebe dient als Referenz und wird wie üblich mit dem Öl Castrol OPTIMOL OPTIGEAR SYNTHETIC A320 befüllt. Der Zustand von beiden Getrieben sollte mit einem Überwachungssystem dokumentiert werden. Der Test war auf eine Dauer von ca. zwei Jahren angesetzt.

Beide Getriebe werden zur Überwachung mit verschiedenen Condition Monitoring Sensoren ausgerüstet. Auf beiden Anlagen wird zur Sammlung der Sensordaten ein Online-Messsystem von SKF installiert. Zusätzlich zu diesem System zur

Schwingungsmessung wird ein System zur Ölüberwachung von HYDAC installiert. Im Rahmen der Ölüberwachung sollen für künftige Optimierungen und Neuentwicklungen Betriebsdaten der Ölanlage in einem Langzeit-Feldversuch ermittelt werden. Die Ölanlage dient der Schmierstoffzufuhr, -filtration und -kühlung des Getriebes (Bild 4.92).



**Bild 4.92:** Schaltbild der Ölanlage einer Windkraftanlage 1,5 MW

Ziel des Öl Condition Monitoring ist es, durch Ermittlung von Betriebsdaten die Getriebeölanlage einer Windenergieanlage zu überwachen sowie, durch die ermittelten Betriebsdaten eine Basis für künftige Optimierungen und Weiterentwicklungen der Ölanlage zu erlangen. Die Ölanlage dient der Schmierstoffzufuhr, -filtration und -kühlung des Getriebes. Ein weiterer wichtiger Aspekt des Öl Condition Monitoring ist die frühzeitige Verschleißerkennung durch kontinuierliche Trendbeobachtung des Ölzustandes.

Zu Beginn des 4. Projektjahres wurde auf den beiden Feldversuchs-Windenergieanlagen ein Nebenstromfilteraggregat nachgerüstet (Bild 4.93). Ziel war es, durch Einsatz eines ausgewählten Filtermediums das Reinheitsniveau des Öles zu verbessern und die Lebensdauer des Hauptstromelementes zu verlängern.



**Bild 4.93:** Nebenstrom-Filteraggregat

Das HYDAC Sensorpaket besteht aus Sensoren zur kontinuierlichen Analyse des Ölzustandes, dem Contamination Sensor Modul (CSM) mit optischem Partikelzähler, dem AquaSensor (AS) und dem Ölzustandssensor HYDAC-Lab (Bild 4.94 bis Bild 4.99). Des Weiteren beinhaltet das Sensorpaket die Filterverschmutzungsanzeige VL-GW für Filter Condition Monitoring, wie der Überwachung des Differenzdruckes über dem Filterelement und dem Druck vor Filter. Zur Ermittlung der Betriebsparameter der Ölanlage sind zusätzliche Druck- und Temperaturmessumformer dem Paket beigelegt.



**Bild 4.94:** Contamination Sensor Modul CSM



**Bild 4.95:** Ölzustandssensor HYDAC-Lab



**Bild 4.96:** AquaSensor AS 1000



**Bild 4.97:** VL-GW Verschmutzungsanzeige, eingesetzt als Filter Monitoring Tool



**Bild 4.98:** Temperaturmessumformer ETS 7000 Serie



**Bild 4.99:** Druckmessumformer HDA 4100/4300 Serie

SKF-Kanal	Var.	Teilsystem	Messgröße	Sensortyp	Messbereich Sensor
1	Dp <sub>78</sub>	Ölanlage / Nebenstrom	Differenzdruck Nebenstromfilter	VL-GW	0 ... 5 bar
	P <sub>1</sub>	Ölanlage / Hauptstrom	Druck nach der Pumpe	HDA 4700	0 ... 16 bar
2	P <sub>2</sub>	Ölanlage / Hauptstrom	Druck vor Filter	VL-GW	0 ... 25 bar
3	T <sub>0</sub>	Ölanlage / Hauptstrom	Öltemperatur vor Pumpe	ETS 7000	-25 ... 100°C
4	Dp <sub>24</sub>	Ölanlage / Hauptstrom	Druckdifferenz Gesamtfilter	VL-GW	0 ... 5 bar
5	T <sub>9</sub>	Ölanlage / Nebenstrom	Öltemperatur Nebenstromfilter	AS 1000	-25 ... 100°C
	P <sub>0</sub>	Ölanlage / Hauptstrom	Druck vor der Pumpe	HDA 4300	-1 ... 5 bar
6	p <sub>5</sub>	Ölanlage / Hauptstrom	Druck vor Kühler,	HDA 4700	0 ... 16 bar

7	$p_6$	Ölanlage / Hauptstrom	Druck nach Kühler	HDA 4700	0 ... 16 bar
8	HLB <sub>9</sub>	Ölanlage / Nebenstrom	Ölalterung	HLB	-
9	CSM <sub>1</sub>	Ölanlage / Nebenstrom	Partikelzählung	CSM 2000	-
10	T <sub>5</sub>	Ölanlage / Hauptstrom	Öltemperatur vor Kühler	ETS 7000	-25 ... 100°C
11	T <sub>6</sub>	Ölanlage / Hauptstrom	Öltemperatur nach Kühler	ETS 7000	-25 ... 100°C
12	RF <sub>9</sub>	Ölanlage / Nebenstrom	Relative Feuchte	AS 1000	0 ... 100%
	T <sub>LvK</sub>	Umgebung	Lufttemperatur vor Kühler	AS 1000	-25 ... 100°C
Felder mit grauer Schrift: Kanalbelegung bis 01.2008					

**Tabelle 24:** Eingesetzte Sensoren

Die Installation der Sensorik auf den Anlagen erfolgte im August 2005. Es wurde festgelegt, dass die Messdaten mit dem Datenerfassungs- und -übertragungssystem der Firma SKF gespeichert und übertragen werden. Hierzu wurden bereits ausführliche Gespräche und ein Vorversuch durchgeführt.

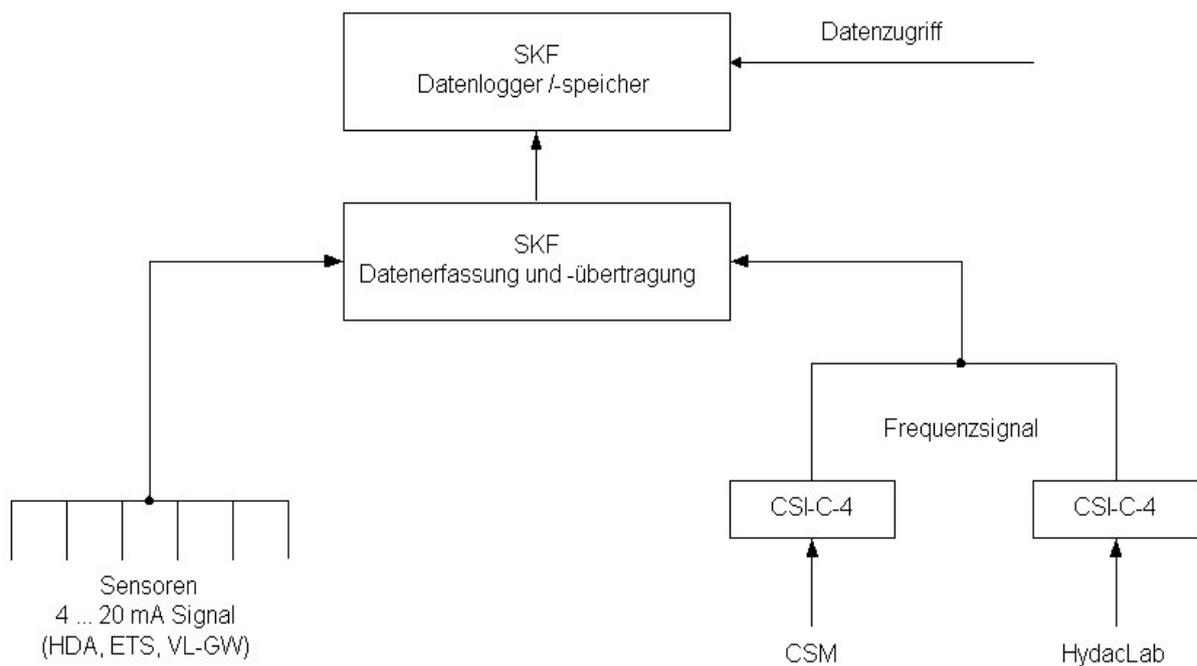
Zum Zusammenfassen von vier Einzelsignalen zu einem gemeinsamen Frequenzsignal wurde von Fa. HYDAC ein neues Elektronikmodul (CSI-C-4) entwickelt. Diese Entwicklung wurde erforderlich, um Eingangskanäle bei der Datenerfassung einzusparen. Weiterhin wird das Datenformat einiger Sensoren hiermit so modifiziert, dass diese an die SKF-Datenerfassung bzw. -übertragung angeschlossen werden können.

Das Online-Datenerfassungs- und -übertragungssystem besteht aus den in Bild 4.100 dargestellten Komponenten und kann neben dem Zustand des Öles, welcher in Form der relativen Feuchte, der Viskosität und der Dielektrizität charakterisiert wird, auch Partikel im Ölstrom und damit mögliche Getriebebeschäden übermitteln.

Erste Vorversuche bei der Firma HYDAC in Sulzbach und bei Bosch Rexroth in Witten zeigten viel versprechende Ergebnisse. Die Auszählbarkeit der Ölsorte WLOB 1 ist gut, d.h. die Ölsorte ist geeignet für die Anwendung von automatischen Partikelzählern, was eine wesentliche Voraussetzung für die Verschleiß-Früherkennung als Teil des Öl-Condition-Monitoring ist.

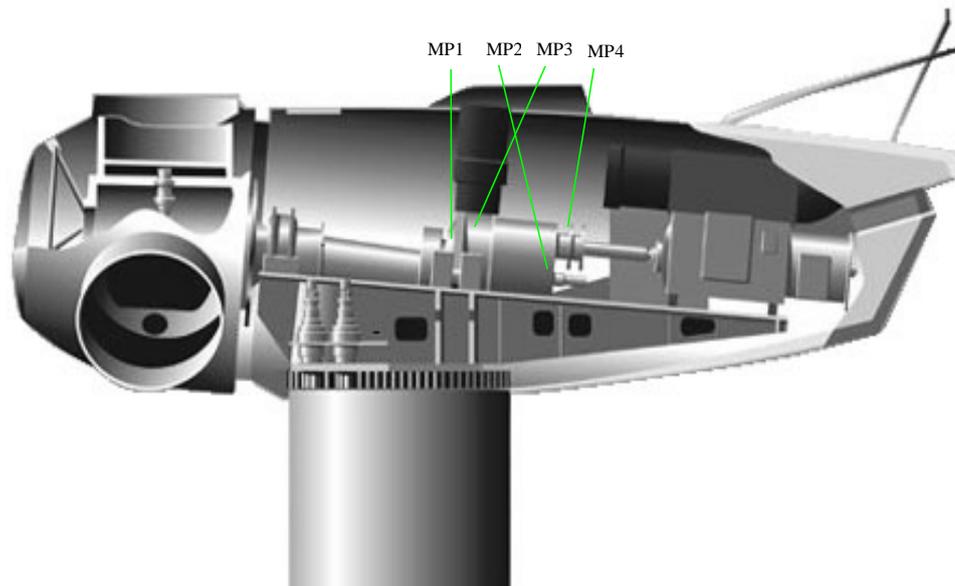
Für die zwei zu überwachenden Getriebe der GE 1,5s Anlagen im Windpark Bockelwitz mit den Messpunkten nach Bild 4.101 ist jeweils 1 Datenerfassungssystem vorgesehen worden. Das Datenerfassungssystem der SKF weist folgende Eingangskanäle auf:

- 16 Analogkanäle, die beliebig mit statischen oder dynamischen Messgrößen beschaltet werden können.
- 2 digitale Eingangskanäle für Drehzahl- / Impulssignale oder digital An / Aus-Zustände.



**Bild 4.100:** Einbindung der Sensorsignale in das SKF Condition Monitoring System

Die Datenerfassungssysteme werden über Ethernet und TCP/IP an eine SQL Datenbank in Schweinfurt angebunden. Je nach Voraussetzung und Vernetzung im Windpark muss für die Kopplung zur Leitwarte in Schweinfurt auf Übertragungskomponenten wie ISDN- oder GPRS-Router zurückgegriffen werden.



**Bild 4.101:** Schematischer Aufbau der Anlage sowie Anordnung der Messpunkte (MP)

- MP1:** Planetenstufe - Tieffrequenz-Sensor an der Planetenstufe unten Rotor-Seite (6 Uhr)
- MP2:** Hohlwelle (Ausgang) - Standard-Sensor an der Hohlwelle Generator-Seite unten (6 Uhr)
- MP3:** Getriebe Zwischenwelle - Standard-Sensor an der Zwischenwelle Rotor-Seite oben (12 Uhr)
- MP4:** Ausgangswelle - Standard-Sensor an der Ausgangswelle Generator-Seite (12 oder 3 Uhr)

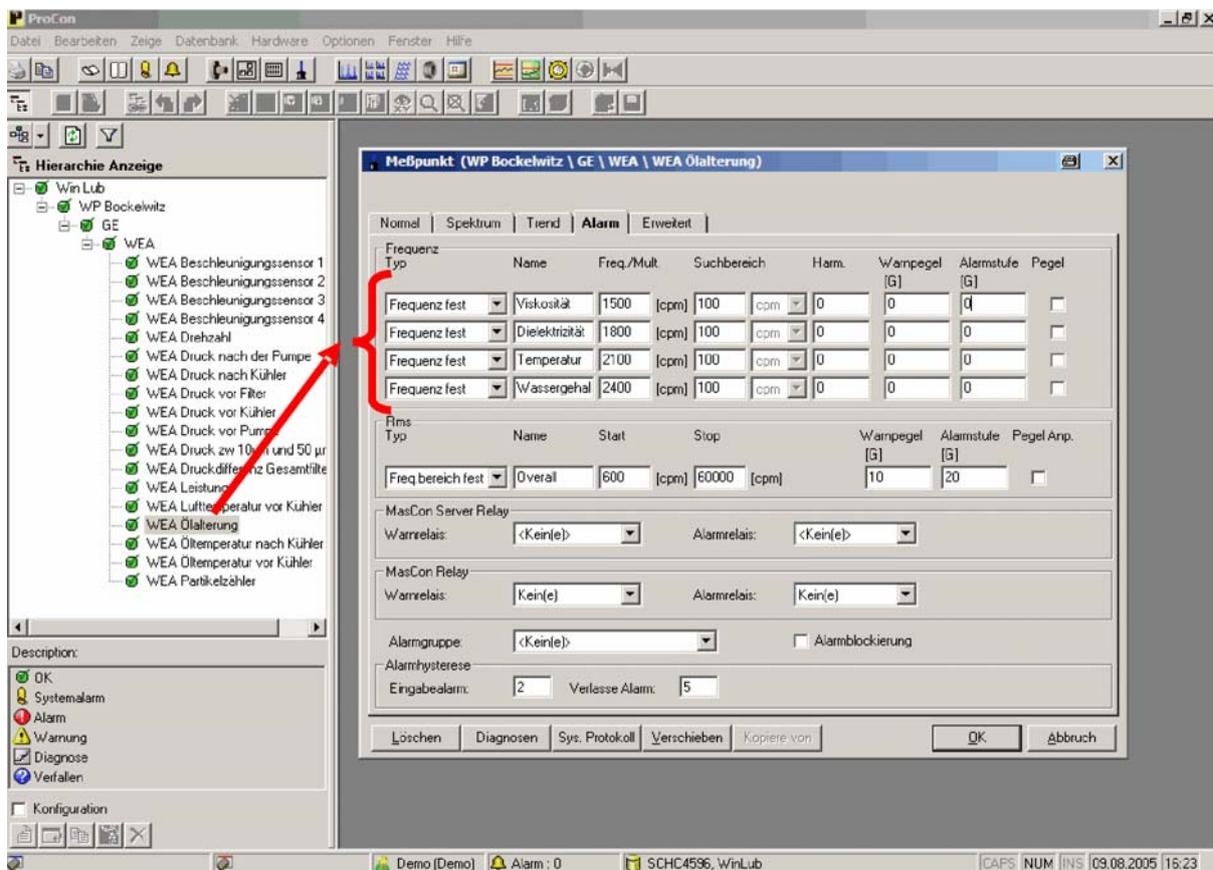
Sensor	Sensortype	Empfindlichkeit	Frequenzbereich ±3 dB	Resonanzfrequenz	Beschleunigungsmessbereich
Standardsensor	CMPT 2310W	100 mV/g	0,8 - 10000 Hz	>19 KHz	±70 g
Tieffrequenzsensor	CMPT 2325W	250 mV/g	0,2 - 5000 Hz	>15 KHz	±25 g

**Tabelle 25:** Eigenschaften der eingesetzten Sensoren

Neben diversen Drücken und Temperaturen sollen weitere Messgrößen zur Ölzustandsüberwachung mit dem System gemessen werden. Hierbei stellte sich jedoch die Frage, ob u. U. für jede Partikelklasse ein einzelner Eingangskanal benötigt wird. Dies würde eine Vielzahl von Eingangskanälen voraussetzen, die auch bei späteren Anwendungen nicht unbedingt an der Anlage vorhanden sind. Letztendlich wurde von der Fa. HYDAC ein Verfahren vorgeschlagen, was die Aufnahme von mehreren Signalen über einen Eingangskanal erlaubt. Das von der Fa. HYDAC entwickelte System ist im Zusammenspiel mit dem SKF System getestet worden. Die

analogen und digitalen Daten der Sensoren werden dabei über ein Umsetzer-Modul in ein Frequenzsignal mit fester Frequenz und variabler Amplitude umgewandelt. Die Information über die Größe des einzelnen Messsignals steckt damit in der Amplitude. Somit lassen sich z.B. alle 4 Partikelgrößenbereiche des Partikelzählers oder die 4 Messgrößen des Ölalterungssensors über einen Eingangskanal mit dem SKF System auswerten.

Seitens SKF ist hierzu die ProCon Auswertesoftware dahingehend angepasst worden, dass die Auswertung z.B. aller vier Ölzustandsmessgrößen mit einem Eingangskanal möglich ist (Bild 4.102). Dies gestattet auch eine Trendbildung der einzelnen Parameter sowie einen Datenexport nach Excel.



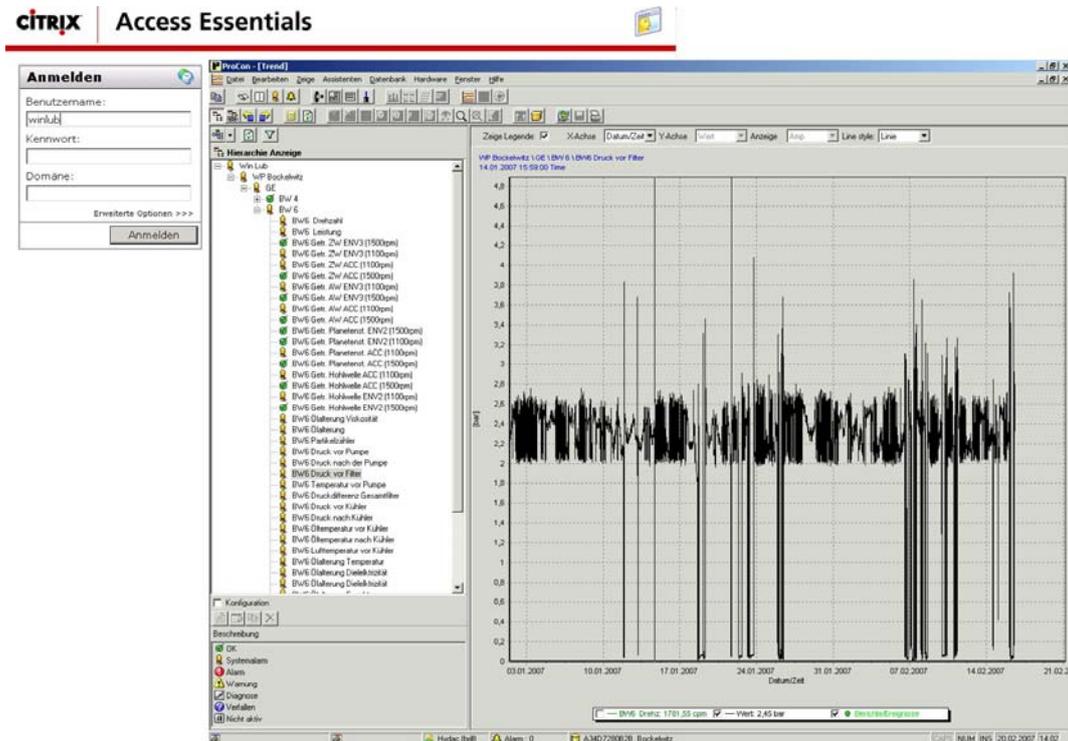
**Bild 4.102:** Praktische Ausführung der Multiparametermessung mit einem Kanal

#### 4.3.2.2 Datenübertragung – Datenschnittstelle und Datendarstellung

Die Messdaten der eingebauten Sensorik werden über das Datenerfassungs- und Datenübertragungssystem der Firma SKF aufgenommen, gespeichert und übertragen. Im Vorfeld waren einige Systemanpassungen und Nachjustierungen erforderlich, allerdings erfolgt die Datenaufzeichnung bzw. -übertragung nun über einen langen Zeitraum erfolgreich und ohne größere Probleme.

Das Abrufen der Daten erfolgt seit Anfang des Jahres 2007 über einen direkten Zugriff auf den SKF Server mithilfe eines Citrix Access (Bild 4.103). Dieser Zugang ermöglicht es, Informationen auch außerhalb des lokalen SKF Netzwerks verfügbar zu machen

und die Daten über das Web bereitzustellen. Mit diesem Zugang werden die bisherigen Probleme über den WebCon Portal Zugang umgangen.



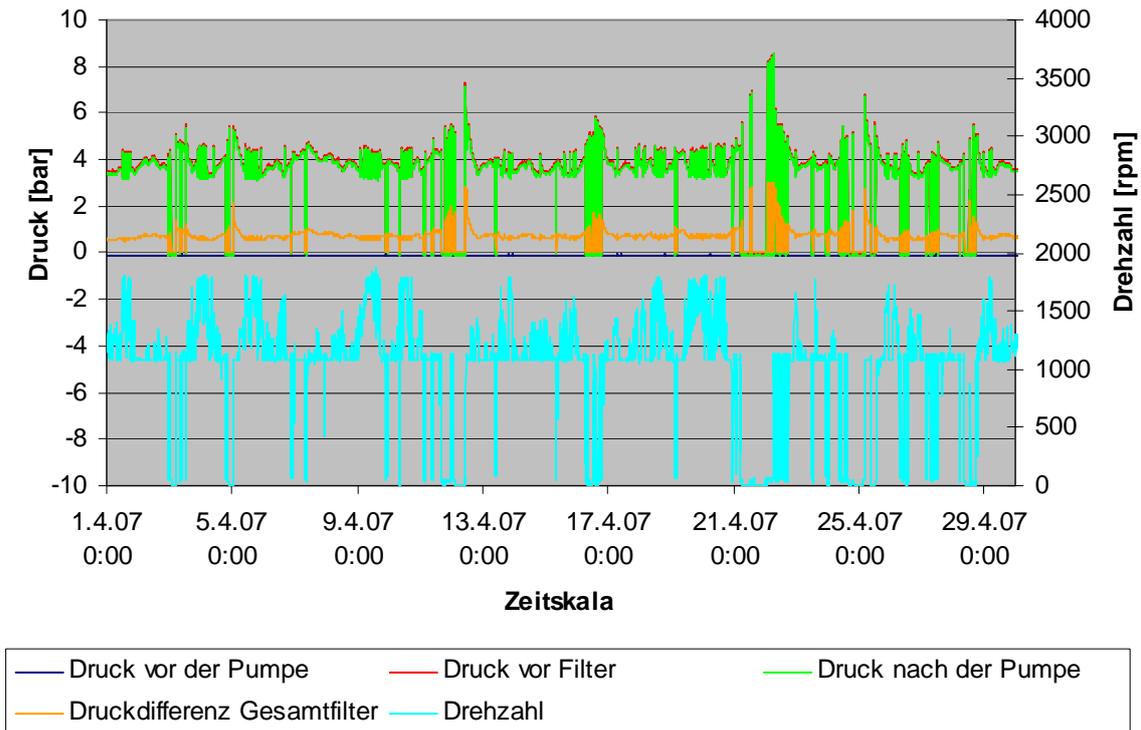
**Bild 4.103:** Datenzugriff über Citrix Access

### 4.3.2.3 Messdaten

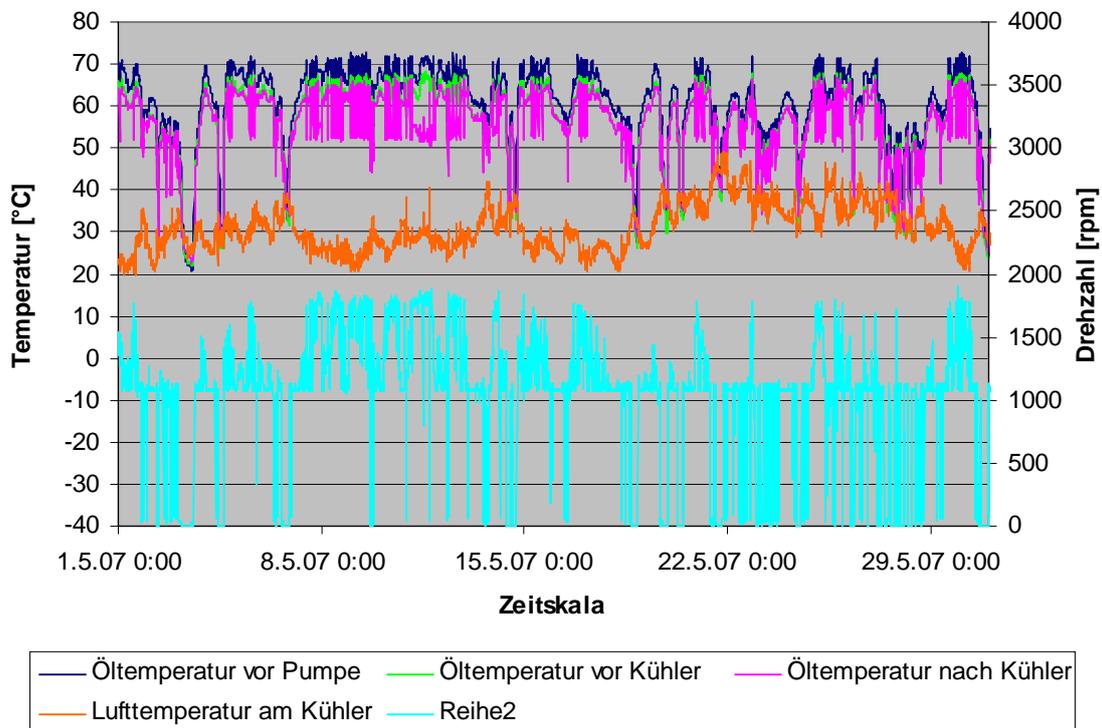
#### 4.3.2.3.1 Druck- und Temperaturmessungen an der Ölanlage

Sowohl für künftige Optimierungen und Neuentwicklungen als auch zur detaillierten Aufzeichnung von Druck- und Temperaturverläufen sind in der Ölanlage Sensoren integriert, die kontinuierlich Daten liefern. Die Ölanlage dient der Schmierstoffzufuhr, -filtration sowie -kühlung des Getriebes und ihr kommt somit eine große Bedeutung zu.

Ziel des Projektes ist es, unter anderem, Algorithmen und Warnfunktionen für die Anlagensteuerung zu entwickeln. Betriebsgrößen wie Druck und Temperatur bilden hierzu die Grundlage und stehen in Relation zu den Anlagenzuständen, dargestellt durch die Anlagen-Drehzahl. In Bild 4.104 und Bild 4.105 sind exemplarisch Messkurven einiger in der Ölanlage integrierter Sensoren dargestellt.



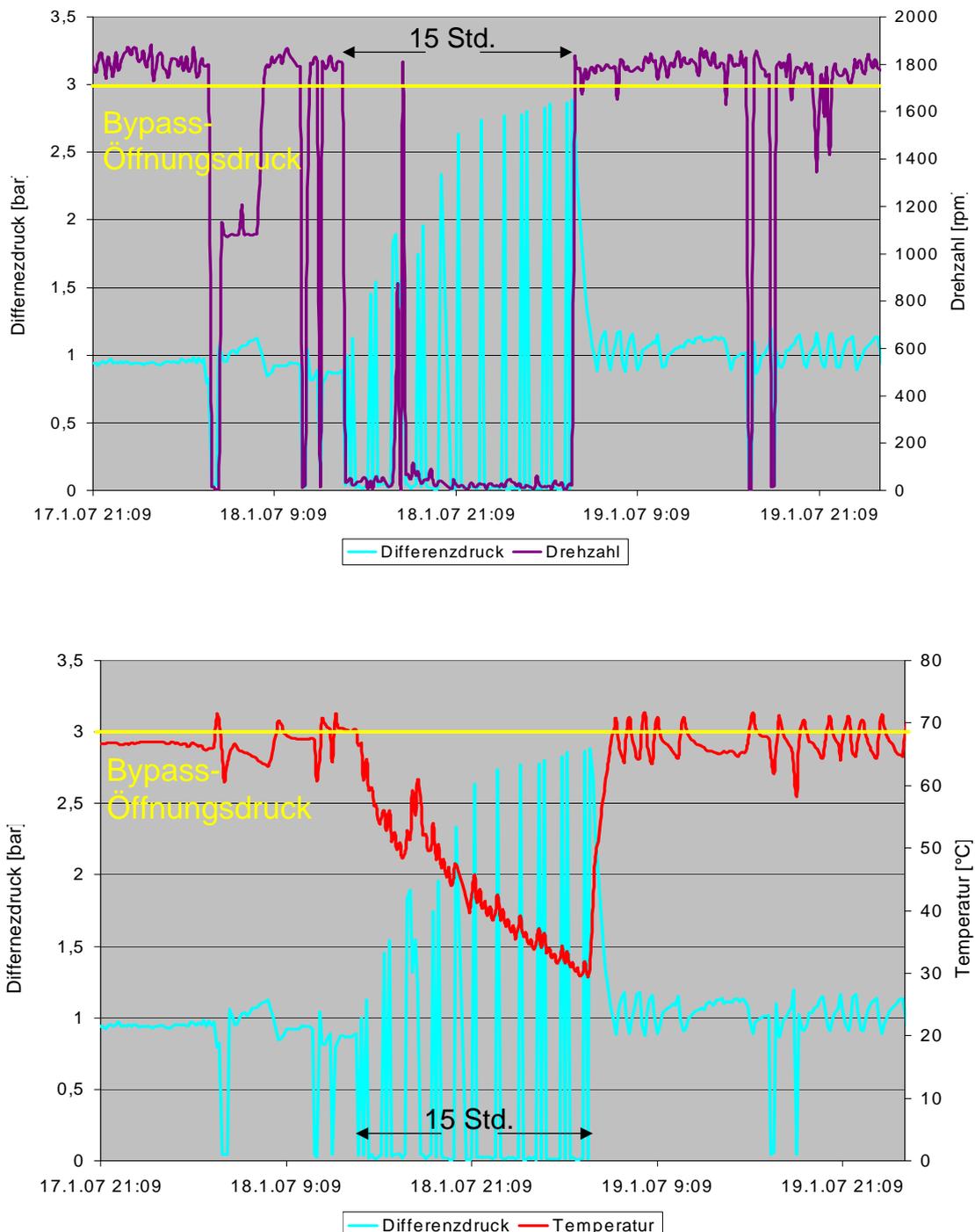
**Bild 4.104:** Temperatur- und Drehzahlverläufe der WEA Bockelwitz



**Bild 4.105:** Temperatur- und Drehzahlverläufe der WEA Bockelwitz

Mit der elektronischen Verschmutzungsanzeige VL-GW wird in den Feldversuchen der Bereich Filter Condition Monitoring bezüglich des Druckes abgedeckt. Der Sensor verfügt über zwei Druckaufnehmer und gibt als Signal den Eingangsdruck sowie den Differenzdruck über dem Filterelement aus. Der Anzeigebereich des Differenzdruckes wurde dabei ausreichend groß gewählt, sodass auch die Funktion des Bypassventils

überwacht werden kann. Der gemessene Eingangsdruck dient zusätzlich zur Überwachung des Pumpendruckes. In Bild 4.106 sind an einem Beispiel die Relation zwischen

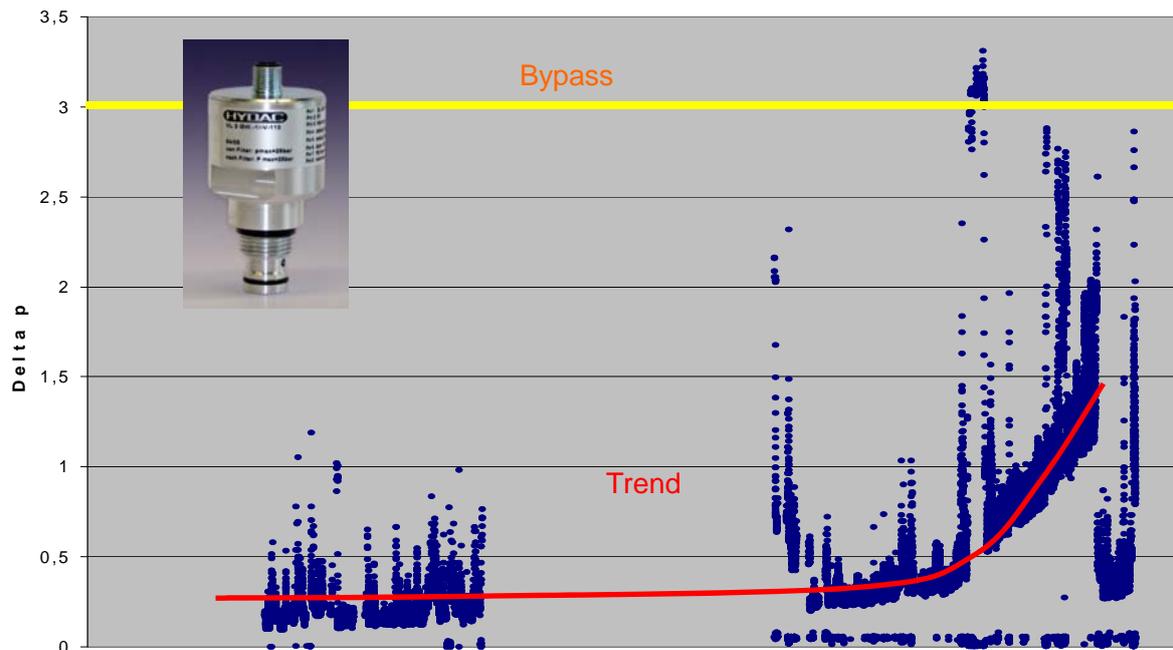


**Bild 4.106:** Überwachung des Differenzdruckes über dem Filterelement

Differenzdruck über dem Filterelement und Drehzahl bzw. Temperatur grafisch dargestellt. Sinkt die Öltemperatur durch Änderung des Anlagenzustandes in Form von geringer Drehzahl ab, beispielsweise beim Trudeln der Windenergieanlage, erhöht sich die Viskosität des Öles und der Differenzdruck über dem Filterelement steigt an. Überschreitet der Druck den Öffnungsdruck des Bypassventils, geht ein Teil des

Volumenstroms über das Bypassventil. Die einzelnen Peaks resultieren aus der kurzzeitigen Einschaltung zur Intervallschmierung im gleichmäßigen Zeitrhythmus.

Des Weiteren kann das Signal des Differenzdrucks zur Trendbildung hinsichtlich des Filter-Wechselintervalls genutzt werden (Bild 4.107). Je höher der Differenzdruck, desto mehr ist das Filterelement verschmutzt. Notwendige Filterwechsel können so frühzeitig geplant werden. Außer Acht gelassen werden müssen bei der Trendbildung die Ausreißer bedingt durch unterschiedliche Anlagenzustände.



**Bild 4.107:** Trendbetrachtung Differenzdruck über dem Filterelement

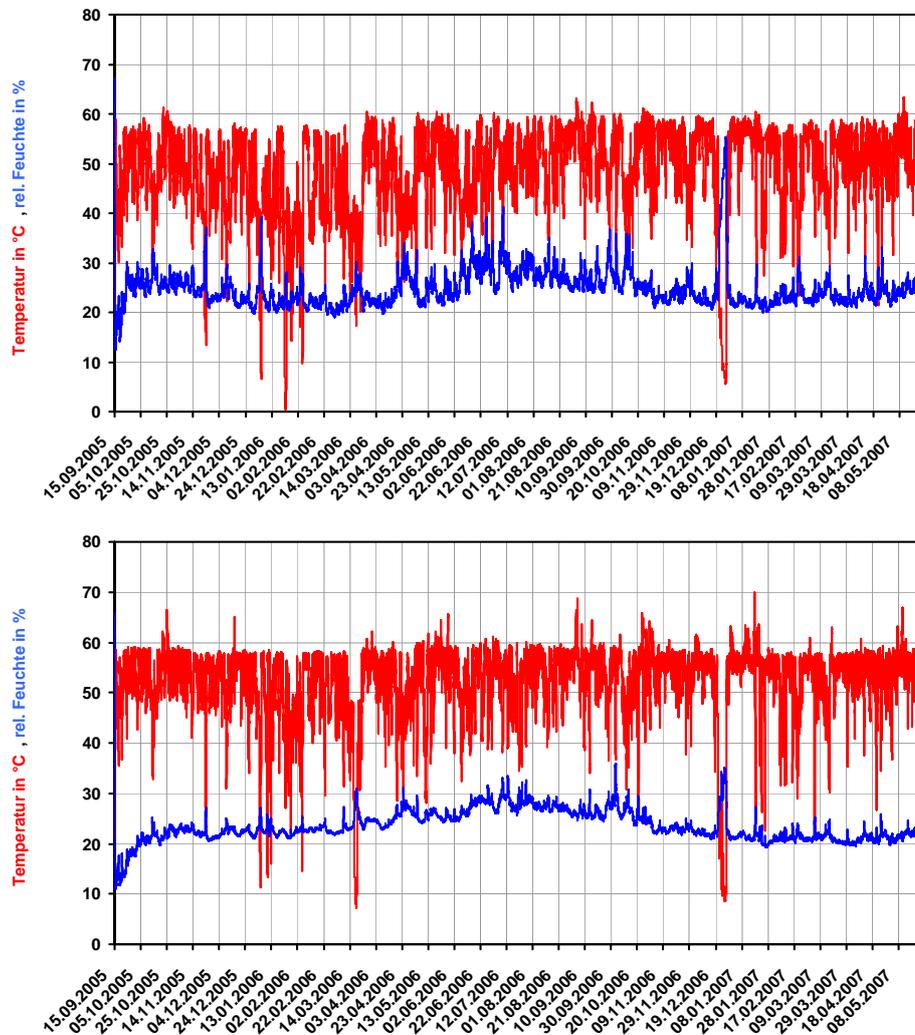
#### 4.3.2.4 Temperatur- und Feuchteüberwachung in den Getriebegehäusen der Feldversuchs-Windkraftanlagen

Praktische Erfahrungen des Schmierstoffeinsatzes an Windkraftanlagen zeigen häufig nach einer gewissen Betriebszeit erhöhte Wassergehalte im Vergleich zum Anfangszustand. Als Ursache des Wassereintrages in den Schmierstoff kommen aus heutiger Sicht vor allem Kondensations- sowie Sättigungsausgleichsvorgänge mit der Luft im Getriebegehäuse in Betracht. So fallen beispielsweise bei einer Abkühlung um 15°C aus einem Zustand 1 (20°C, 80% rel. F.) in einen Zustand 2 (Bild 4.108) aus einem Luftvolumen von 2,5 m<sup>3</sup> (angenommenes Luftvolumen im Getriebegehäuse) 17,38 ml Kondensat aus. Gelangt dieses Kondensat, das sich an den Innenflächen des Gehäuses niederschlägt, durch Planschvorgänge in das Getriebeöl, ergibt sich allein aus diesem einmaligen Kondensierungsvorgang bei einem Getriebeölvolumen von 300 l ein Wassergehalt im Schmierstoff von 58 ppm.

In der Praxis ist durch Atmungsvorgänge des Getriebegehäuses bei Temperaturänderungen (z. B. Wechsel Betrieb / Stillstand der WEA) mit einem zumindest partiellen Luftaustausch mit der Umgebung zu rechnen, sodass in Abhängigkeit von



Luftfeuchte verglichen mit dem zweiten signifikanten Temperaturminimum am 26.12.2006. Diesem Minimum ist ein Anlagenstillstand von etwa 5 Tagen bei einer durchschnittlichen Temperatur von  $\vartheta_a = 2,5^\circ\text{C}$  und einer durchschnittlichen relativen Luftfeuchte von  $\varphi_a = 90,7\%$  vorausgegangen. Mit diesem hohen Wert der relativen Luftfeuchte der Umgebungsluft lässt sich das Maximum der relativen Luftfeuchte im Getriebeinnenraum von  $\varphi_G = 55,2\%$  am 26.12.2006 sehr gut erklären.

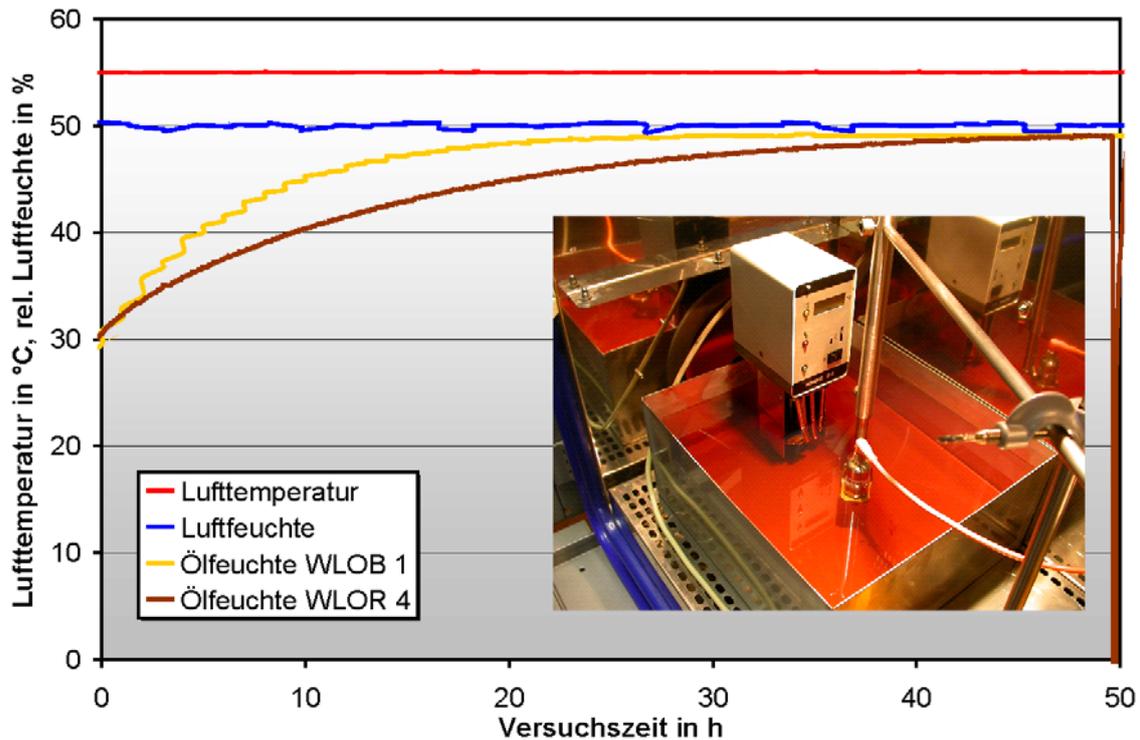


**Bild 4.109:** Temperatur und Feuchte: Anlage 4 (oben) und 6 (unten) über 20 Monate

Die klimatischen Umgebungsbedingungen von Windkraftanlagen können also bei Anlagenstillstand einen signifikanten Einfluss auf die klimatischen Bedingungen in Hauptgetrieben haben. Neben den Umgebungsbedingungen hat aber auch der Grundtyp des verwendeten Schmierstoffes Einfluss auf die klimatischen Bedingungen in Hauptgetrieben, wie im Vergleich der Anlagen 4 und 6 zu erkennen ist (Bild 4.109). Die in der unteren Bildhälfte dargestellten Temperatur- und Feuchteverläufe der mit WLOB 1 befüllten Anlage 6 sind denen von Anlage 4 qualitativ ähnlich, der Verlauf der relativen Feuchte erscheint bei Anlage 4 allerdings deutlich gedämpft.

Der Grund hierfür wurde in Versuchen am IME durch vergleichende Untersuchungen zur Wasseraufnahme von WLOB 1 und WLOR 4 in der Klimakammer gefunden (Bild

4.110). Dazu wurden die beiden Öle nacheinander in einer Edelstahlwanne in die Klimakammer eingebracht und bei einer gleich bleibenden Lufttemperatur von 55°C einer relativen Feuchte von  $\varphi_L = 50\%$  ausgesetzt. Mit Hilfe eines Umwälzthermostates wurde das Öl bewegt, ein an definierter Stelle in der Mitte des Ölbad in halber Füllhöhe platzierter HYDAC-Ölsensor AS1000 diente zur kontinuierlichen Bestimmung der Ölfeuchte.



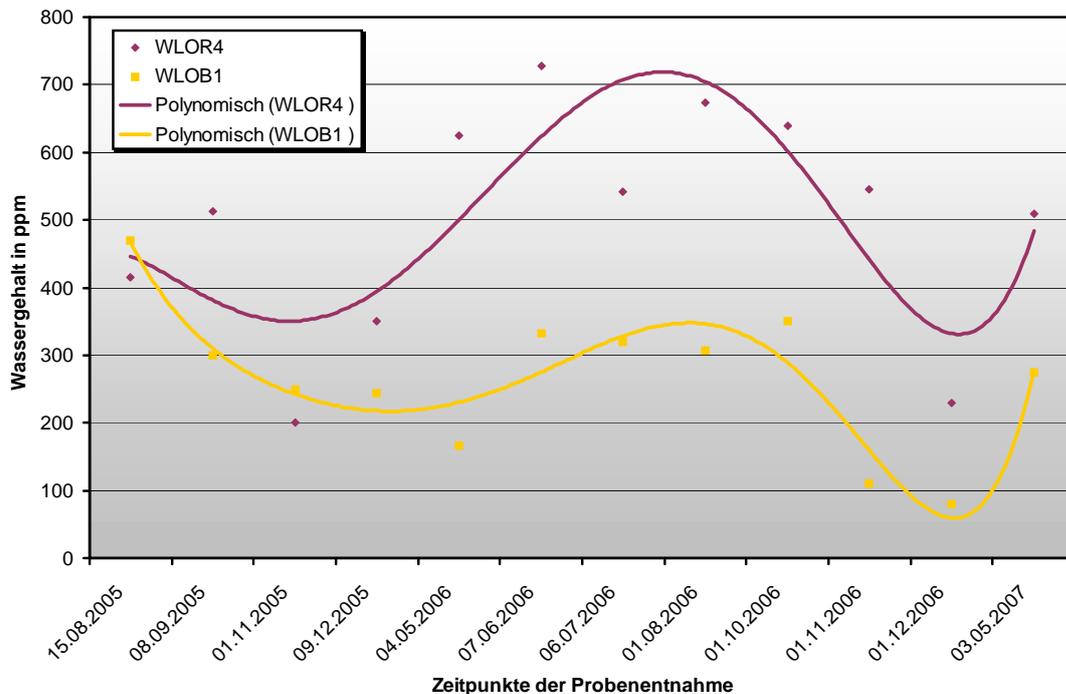
**Bild 4.110:** Unterschiedliche Feuchtigkeitsaufnahme bei WLOB 1 und WLOR 4

Für die beiden Öle WLOR 4 und WLOB 1 wurden die beiden in Bild 4.110 dargestellten Feuchtekurven aufgenommen. Es zeigt sich deutlich die trägere Feuchtigkeitsaufnahme des Referenzöles WLOR 4, was mit der geringeren Affinität des unpolaren Polyalphaolefins (WLOR 4) im Vergleich zum polareren Ester (WLOB 1) erklärt werden kann. Eine trägere Wasseraufnahme bedeutet auf die Verhältnisse in einer Windkraftanlage übertragen, dass durch Atmungs Vorgänge in das Getriebegehäuse eingebrachtes Wasser nur sehr langsam auch in das Öl übergeht, also zum Großteil in der Luft verbleibt und bei einer Temperaturabnahme zu einem deutlichen Anstieg der relativen Feuchte führt. Im Unterschied dazu nimmt der esterbasische Schmierstoff WLOB 1 Wasser schneller auf und wirkt sich dadurch tendenziell puffernd auf die Luftfeuchte aus, die Zunahme der Luftfeuchtigkeit bei abnehmender Temperatur ist deutlich gedämpft.

#### 4.3.2.6 Entwicklung der Wassergehalte im Getriebeöl der Feldversuchs-Windkraftanlagen

Seit Befüllung der Hauptgetriebe der beiden Feldversuchs-Windkraftanlagen mit WLOB 1 und WLOR 4 sind von den Projektpartnern HYDAC, FUCHS Lubritech und

SKF wiederholt Ölproben genommen worden, um allgemein den Ölzustand zu bewerten, zu dem unter anderem auch der Wassergehalt gehört. Bild 4.111 zeigt die Analyseergebnisse zur Wassergehaltbestimmung für den Zeitraum des Beginns der Feldversuche bis zum Mai 2007. Dabei ergeben sich für die beiden Öle ausgehend von einem ähnlichen Startniveau von einem Wassergehalt von ca. 450 ppm qualitativ ähnliche, aber quantitativ deutlich unterschiedliche Verläufe.



**Bild 4.111:** Wassergehalte von Ölproben der Anlagen Bockelwitz 4 und 6 2005-2007

Bei beiden Ölen nimmt der Wassergehalt nach Beginn des Feldversuches im Winter 2005/2006 zunächst ab, um im Sommer 2006 wieder deutlich anzusteigen. Im Herbst 2006 wiederholt sich die Abnahme der Wassergehalte, im Frühsommer 2007 folgt ein erneuter Anstieg. Im Sommer scheint sich also mehr Wasser in den Ölen der Hauptgetriebe zu befinden, ein Umstand, der sicher mit der größeren absoluten Wasserbeladung (bei höheren Lufttemperaturen entsprechen gleiche relative Feuchtwerte wie bei niedrigen Temperaturen einer höheren Wasserbeladung) der Umgebungsluft zu dieser Jahreszeit korreliert werden kann.

Weiterhin ist auffällig, dass sich offenbar zwei deutlich unterscheidbare Bänder für die beiden Öle einstellen, innerhalb derer die Wassergehalte schwanken. Dass dabei der Referenzschmierstoff das höhere Niveau aufweist, scheint zunächst im Widerspruch zu der trägeren Wasseraufnahme zu stehen (vgl. Bild 4.110), wäre aber vor dem Hintergrund einer ebenfalls trägeren Wasserabgabe als bei WLOB 1 durchaus nachvollziehbar.

### 4.3.3 Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

Ein permanentes Condition Monitoring der verschiedenen Schmierstellen einer Windkraftanlage bzw. des Ölzustandes allgemein ist gerade beim Einsatz biogener Schmierstoffe geeignet, das Vertrauen in deren Leistungsfähigkeit auf Anwenderseite zu erhöhen. Vor diesem Hintergrund ist es von großer Bedeutung, dass es gelungen ist, durch die Kombination von Öl- und Lager- (Schwingungen) Condition Monitoring Systemen dem Anwender ein System anbieten zu können, das in der Lage ist, sehr früh mögliche Schäden zu detektieren und so Totalausfälle zu vermeiden bzw. eine zeitgerechte Planung von Wartungsaufgaben zu ermöglichen.

## 5 Kurzfassung der Ergebnisse

Im folgenden Kapitel werden die Untersuchungsergebnisse stichpunktartig aufgelistet. Detaillierte Informationen sind Kap. 4 zu entnehmen.

Im Rahmen des Vorhabens sind für die beiden Schmierstoffe WLOB 1 und WLOR 4 Diagramme erarbeitet worden, die eine Zuordnung der relativen Feuchten zu Wassergehalten in Abhängigkeit der Temperatur ermöglichen.

Im Rahmen von Verschleißuntersuchungen am FE8-Prüfstand konnte nach stufenweiser Steigerung der relativen Schmierstofffeuchte erst auf einem Niveau von 80% rel. Ölfeuchte bei 80°C Lagertemperatur und 50°C Öltemperatur im Tank des Schmieraggregates (entspricht ca. 2000 ppm, also einem Niveau deutlich oberhalb praxisüblicher Wassergehalte in Windkraft-Hauptgetrieben) eine Beeinträchtigung der Verschleißschutzeigenschaften bei WLOB 1 festgestellt werden. Eine entsprechende Beeinträchtigung ist bei WLOR 4 nicht zu verzeichnen. FE8-Untersuchungen mit den beiden Schmierstoffen nach einer Einsatzzeit von ca. 2 Jahren auf den Feldversuchs-Windkraftanlagen im Windpark Bockelwitz ergeben für beide Schmierstoffe mit einem Wälzkörperverschleiß von < 30 mg ein Verschleißschutzverhalten, das die Anforderungen nach DIN 51517-3, Mindestanforderungen Schmieröle CLP, erfüllt. Hinsichtlich des Verschleißschutzverhaltens stellt der biogene Schmierstoff WLOB 1 damit eine leistungsfähige Alternative zum konventionellen Referenzschmierstoff WLOR 4 dar.

Das Ermüdungsschutzverhalten der beiden Schmierstoffe wird durch erhöhte Wassergehalte nicht negativ beeinflusst, wie Versuche am Planetengetriebeverspannprüfstand des IME zeigen. Die beiden Schmierstoffe zeigen sowohl im befeuchteten als auch im unbefeuchteten Zustand eine hohe Graufleckentragfähigkeit. Damit ist auch im Bereich Ermüdungsschutz, sogar unter durch Feuchteinfluss verschärften Bedingungen, WLOB 1 als gleichwertig zum Referenzschmierstoff WLOR 4 bestätigt.

Im Gegensatz dazu wird die Filtrierbarkeit der beiden Öle durch Feuchtigkeit des Schmierstoffes deutlich verschlechtert, wie Single-Pass-Versuche in modifizierter Form nach ISO 13357 ergeben haben. Während sich die Filtrierbarkeit von WLOB 1

stetig und in moderatem Umfang verschlechtert, zeigt sich bei WLOR 4 eine sprunghafte Verschlechterung der Filtrierbarkeit ab einer relativen Ölfeuchte von 80% bei einer Öltemperatur von 40°C. Werden Öltemperatur oder relative Ölfeuchte weiter erhöht, verschlechtert sich die Filtrierbarkeit nochmals deutlich. Diese sprunghafte Verschlechterung ist bei WLOR 4 auf das Auftreten schlammartiger Ausfällungen zurückzuführen, die ein Zusetzen der Filterrunden verursacht haben. Die Bewertung dieses Verhaltens im Hinblick auf den praktischen Einsatz und die Handhabbarkeit der beiden Öle auf Windkraftanlagen ergibt einen klaren Vorteil zugunsten des biogenen Schmieröls WLOB 1.

Untersuchungen zum Schaumverhalten haben bei beiden Ölen im unbefeuchteten Zustand eine moderate Ausbildung von Oberflächenschaum ergeben, wobei WLOR 4 ein etwas besseres Luftabscheidevermögen aufweist als WLOB 1. Unter Wasserzugabe verbessert sich bei beiden Ölen das Luftabscheidevermögen, im Falle von WLOB 1 besonders deutlich.

Neben dem Einfluss von Feuchtigkeit bzw. Wasser auf die Schmierstoffe sind insbesondere auch deren Tieftemperatureigenschaften von Interesse. Gerade bei Pitchgetrieben, die in der Rotornabe platziert und somit nicht durch das Turmhaus bzw. die Massen der mechanischen und elektrischen Komponenten des Antriebsstranges vor starken Temperaturschwankungen geschützt sind, ist das Anlaufverhalten unter Tieftemperaturbedingungen von besonderem Interesse. Entsprechende Untersuchungen in einem Temperaturbereich von -30°C...30°C bei Bosch Rexroth in Witten haben viskositätsabhängig im Tieftemperaturbereich Anfahrmomente von bis zu >100 Nm ergeben. Durch die Wahl entsprechend niedrigviskoser Öle oder sogar Fette hinreichend niedriger Grundölviskosität ist es möglich, die Anfahrmomente im Tieftemperaturbereich deutlich zu vermindern. Neben der Viskosität nimmt auch die Beschleunigung während des Anfahrvorganges Einfluss auf die Höhe des Anfahrmomentes. Dieser Einfluss wirkt sich aber erst bei sehr kurzen Anfahrampen (<1 s) steigernd auf die Höhe des Anfahrmomentes aus. Einem Einsatz des biogenen Schmieröls WLOB 1 in einer verminderten ISO-VG-Klasse, beispielsweise ISO-VG 220 steht nach den Erfahrungen aus den in diesem Vorhaben durchgeführten Untersuchungen nichts entgegen.

Im Mittelpunkt der Untersuchungen an Schmierfetten standen Versuche mit der Formulierung WLGB 1C am FE8- und Riffeltest-Prüfstand, jeweils mit und ohne Wassereinfluss. Am FE8-Prüfstand zeigt die Formulierung WLGB 1C ein Verschleißschutzverhalten, das bei Anfangswassergehalten von 0%, 3% und 10% ein Verschleißschutzverhalten auf dem Niveau vergleichbarer Referenzprodukte zeigt. Beim Riffeltest ergaben sich bei Wasserzugabe mit der Formulierung WLGB 1C gegenüber der Referenz WLGR 1 zunächst deutlich erhöhte Riffeltiefen und Korrosionsgrade. Mit einer optimierten Formulierung WLGB 1E konnten die maximalen Riffeltiefen auf < 10 µm gesenkt werden. Diese Formulierung ist seit

Herbst 2006 in Blattlagern auf Anlagen im Windpark Neu Zauche und seit Herbst 2007 in Hauptlagern auf Anlagen im Windpark Saubusch im Feldtest. Eine erste Bewertung des Feldverhaltens des Fettes in Hauptlagern zeigt ein geringeres Temperaturniveau als beim konventionellen Referenzfett auf einer benachbarten Anlage. Dieses erste, tendenziell positive Ergebnis muss durch eine Entnahme von Fettproben und entsprechende Analysen hinsichtlich Menge, Art und Größe von Verschleißpartikeln überprüft werden.

Die Feldversuchs-Daten zur Aufzeichnung von Temperatur und relativer Luftfeuchte in den Hauptgetrieben zeigen zunächst, dass in den beiden Feldversuchs-WEA eine Taupunktunterschreitung im Beobachtungszeitraum von September 2005 bis Januar 2008 nicht stattgefunden hat. Die relative Luftfeuchte erreichte auch nach mehrtägigem Anlagenstillstand maximal Werte von 60%. Insgesamt erscheint der Verlauf der relativen Feuchte bei der mit WLOB 1 befüllten Anlage 6 gegenüber dem von Anlage 4 deutlich gedämpft, was auf das bessere Löseverhalten von Wassermolekülen in WLOB 1 und ein dadurch bewirktes Pufferverhalten des Schmierstoffvolumens zurückgeführt werden kann. Der Feuchteverlauf im Getriebeinnenraum zeigt bei beiden Anlagen eine leichte jahreszeitliche Schwankung mit tendenziell höheren Feuchtwerten im Sommer. Diese Tendenz wird durch die Schwankung der labortechnisch im Laufe der Feldversuche an Ölproben aus den Anlagen bestimmten Wassergehalte bestätigt, auch bei den Wassergehalten zeigen sich im Sommer höhere Werte als im Winter. Dabei liegen die Wassergehalte bei WLOR 4 auf einem höheren Niveau als bei WLOB 1.

Im Vorhabenszeitraum wurden wiederholt Ölproben genommen. Im Einzelnen wurden vom Beginn der Feldversuche im September 2005 bis zum Februar 2008 folgende Analysen durchgeführt:

- optische Betrachtung nach DIN 10964
- Infrarotanalyse nach DIN 51820
- feste Fremdstoffe nach PS 1061432-4
- Wassergehalt nach DIN 51777
- TAN nach DIN EN 12634
- Reinheitsklasse nach DIN ISO 4406 (1999)

Die optische Betrachtung zeigt bei WLOR 4 nach zweieinhalb Jahren Einsatzzeit in den Hauptgetrieben eine geringe Eintrübung, die allerdings aufgrund der dunklen Farbe bereits des Frischöls schwer zu bewerten ist. Im Vergleich dazu tritt bei WLOB 1 gegenüber dem bernsteinfarbenen Frischöl eine deutliche dunkle Verfärbung auf. Hinsichtlich Viskositätsveränderungen sind beide Öle als unkritisch einzustufen. Bei beiden Ölen hat die Viskosität während der Einsatzzeit geringfügig abgenommen,

sie liegt aber immer noch bei Werten zwischen  $320 \text{ mm}^2/\text{s}$  und  $330 \text{ mm}^2/\text{s}$ . Ebenso ergibt auch die Infrarotanalyse bei beiden Ölen nur Hinweis auf geringfügige Veränderungen bzw. Alterungsvorgänge. Eine detailliertere Interpretation der Veränderungen kann nur in Kooperation mit den Herstellerfirmen der Öle erfolgen. Die Verunreinigung durch feste Fremdstoffe hat bei beiden Ölen über der Laufzeit zugenommen, dabei ist die Art der Verunreinigungen bei den beiden Ölen sehr ähnlich. Sie bestehen im Wesentlichen aus feinem metallischem Abrieb, organischen Rückständen und Zunder. Der Wassergehalt unterliegt bei beiden Ölen den bereits vorgestellten saisonalen Schwankungen, wobei der von SKF empfohlene maximale Wassergehalt von 200 ppm auf der mit WJOR 4 befüllten Anlage über große Zeiträume deutlich und bei der mit WJOB 1 befüllten Anlage zumindest zeitweise geringfügig überschritten wird.

Ein auffälliger Unterschied zwischen den beiden Schmierstoffen zeigt sich in der Entwicklung der Total Acid Number (TAN). Während diese bei WJOR 4 auf einem vergleichsweise konstanten Niveau von ca. 2...3 mg KOH/g liegt, tritt bei dem biogenen Schmierstoff im Laufe des ersten Einsatzjahres ein Anstieg von < 1 mg KOH/g auf ca. 5,5 mg KOH/g auf. In diesem Zusammenhang ist allerdings zu beachten, dass dieser Anstieg zwar durchaus auf Hydrolyseeffekte bei WJOB 1 zurückgeführt werden kann, dass dabei aber langkettige Fettsäuren entstehen, die durch eine deutlich verminderte Aggressivität gekennzeichnet sind als kurzkettige Fettsäuren und daher die alleinige Betrachtung der TAN nur eine geringe Aussagekraft besitzt.

Als Vorarbeit zu den Untersuchungen zum Thema Condition Monitoring wurde im Rahmen des Projektes ein Prüfverfahren für die Filtrierbarkeit von Getriebeölen (Multi-Pass) mit integriertem Flender Schaumtester entwickelt und der Prüfstand aufgebaut. Versuchsergebnisse zeigen, dass die beiden eingesetzten Getriebeöle kompatibel mit den untersuchten Filtermaterialien sind. WJOB 1 erzielte dabei bessere Ergebnisse als einige andere marktüblichen Getriebeöle. Da die an diesem Prüfstand untersuchte Verschäumungsneigung von Getriebeölen eine wichtige Anwendungseigenschaft ist, stellt das gute Ergebnis von WJOB 1 ein weiteres Argument für die Eignung und die Sinnhaftigkeit des Einsatzes von WJOB 1 dar.

Ziel des Öl Condition Monitoring ist es, durch Ermittlung von Betriebsdaten die Getriebeölanlage einer Windenergieanlage zu überwachen sowie durch die ermittelten Betriebsdaten eine Basis für künftige Optimierungen und Weiterentwicklungen der Ölanlage zu erlangen. Die Ölanlage dient der Schmierstoffzufuhr, -filtration und -kühlung des Getriebes. Ein weiterer wichtiger Aspekt des Öl Condition Monitoring ist die frühzeitige Verschleißerkennung durch kontinuierliche Trendbeobachtung des Ölzustandes. Im Rahmen des Projektes wurden in Langzeitfeldversuchen zwei Windenergieanlagen mit einem Öl Condition Monitoring Sensorikpaket zur Ermittlung der Betriebsdaten der Ölanlage und des Ölzustandes ausgestattet. Darüber hinaus

wurden Prüfstandsversuche zur Verschleiß-Früherkennung durchgeführt und der Planetengetriebe-Verspannungsprüfstand des Institutes für Maschinenelemente der RWTH Aachen mit Sensorik ausgestattet. Das HYDAC Sensorikpaket besteht aus Sensoren zur kontinuierlichen Analyse des Ölzustandes, dem Contamination Sensor Modul (CSM) mit optischem Partikelzähler, dem AquaSensor (AS) und dem Ölzustandssensor HYDAC-Lab. Des Weiteren beinhaltet das Sensorikpaket die Filterverschmutzungsanzeige VL-GW für Filter Condition Monitoring, wie der Überwachung des Differenzdruckes über dem Filterelement und dem Druck vor Filter. Zur Ermittlung der Betriebsparameter der Ölanlage enthält das Paket zusätzliche Druck- und Temperaturmessumformer.

Die Installation der Sensorik in der Ölanlage der Windenergieanlage erfolgte im August 2005 und wurde im laufenden Projektzeitraum ergänzt bzw. ausgetauscht. Insgesamt sind zum Ende des Projektes zehn Sensoren in der Ölanlage installiert, die insgesamt 20 unterschiedliche Messsignale liefern. Als Referenzwerte werden zusätzlich die Drehzahl und die Leistung der Windenergieanlage herangezogen.

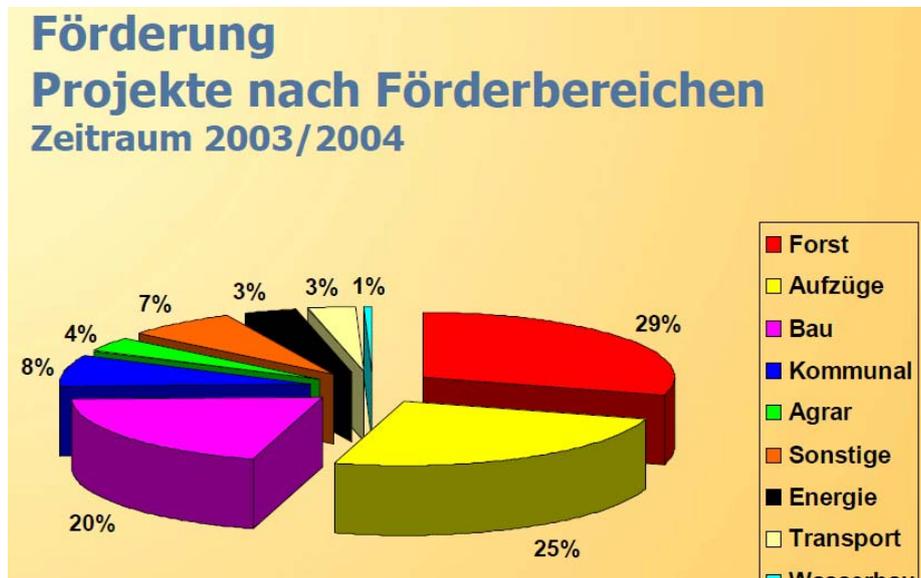
Die Messdaten der eingebauten Sensoren werden in das Condition Monitoring System der Firma SKF implementiert und von dort übertragen und archiviert. Bezüglich der Datenübertragung wurden Vorversuche und Systemanpassungen durchgeführt. Aufgrund der begrenzten Anzahl an Eingangskanälen am SKF Condition Monitoring System ist ein Elektronikmodul (CSI-C-4) entwickelt worden, das bestimmte Messsignale zusammenfasst und das Datenformat entsprechend dem zur Verfügung stehenden Eingangskanal modifiziert. Je Windenergieanlage sind zwei Module für das Contamination Sensor Modul und den Ölzustandssensor HYDAC-Lab eingesetzt.

Über dem gesamten Projektzeitraum erfolgte die Reinheitsbestimmung des Öles sowohl anhand von Ölproben als auch vor Ort auf den Windenergieanlagen durch das Contamination Sensor Modul (CSM) mit optischen Partikelzählern. Beim Vergleich von Ergebnissen aus Laboruntersuchungen, vor Ort gemessenen und online übertragenen Messergebnissen sind Abweichungen von nur wenigen Reinheitsklassen zu erkennen. Diese resultieren aus den leicht voneinander abweichenden Zeitpunkten der Probenahme bzw. der Datenaufzeichnung und den Einflussbedingungen der stationär auf den Windenergieanlagen gezogenen Ölprobe, wie Schmutzeintrag von außen, Wahl der Messstelle, Volumenstrom etc.

## **6 Verwertung**

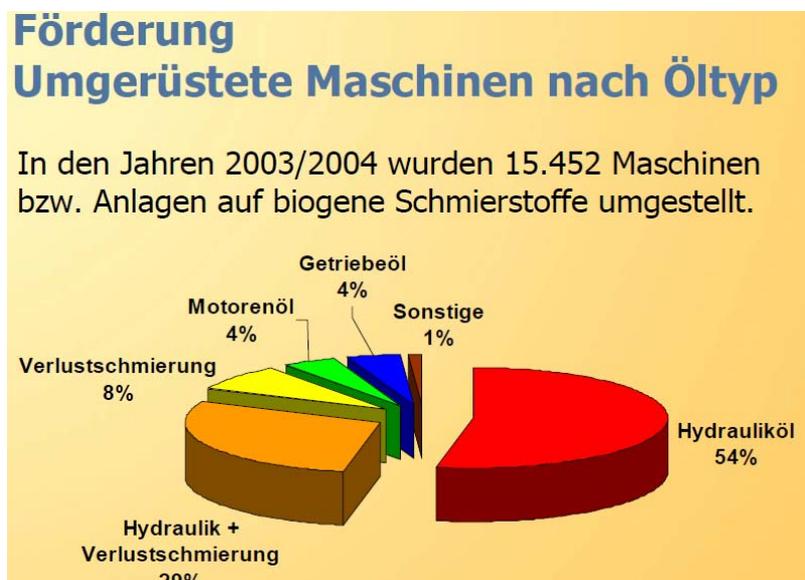
Nach Biese, [Bie05], werden jährlich in Deutschland mehr als eine Million Tonnen Schmierstoffe auf Mineralölbasis verbraucht (Stand 2005). Von dieser Gesamtmenge gelangen ca. 50% durch Leckagen oder systembedingt unkontrolliert in die Umwelt. Die Fachagentur nachwachsende Rohstoffe hat daher im Jahr 2000 ein Markteinführungsprogramm mit dem Ziel aufgelegt, Anwendern durch die Gewährung

eines Zuschusses einen Anreiz für die Umstellung auf umweltfreundliche Produkte zu geben und die Marktstellung der Bioöle langfristig zu stärken, [Bie05]. Auf den Bereich Energie entfielen nach ca. vier Jahren Laufzeit des Programmes nur drei Prozent der Fördermittel, wie das Diagramm in Bild 6.1 verdeutlicht. Bis 2005 hat sich dieser Anteil nach [Bie05] auf ca. 6% erhöht.



**Bild 6.1:** Förderung Projekte nach Förderbereichen [Pet05]

Betrachtet man die Aufschlüsselung der Fördermittel nach dem Öltyp (Bild 6.2), zeigt sich, dass auf Getriebeöle bis 2004 nur 4% entfallen sind. An diesen Zahlen ist abzulesen, dass offenbar in der Energiebranche entweder nur ein geringes Potenzial zur Umstellung besteht oder in diesem Bereich erhebliche Vorbehalte gegen die Umstellung auf biogene Schmierstoffe bestehen. Rechnet man zur Energiebranche auch die zur Energieerzeugung erforderlichen Bereiche der Antriebstechnik mit Getrieben, Lagern etc. hinzu, muss von einem deutlich größeren möglichen Anteil als dem 2005 bestehenden ausgegangen werden.



**Bild 6.2:** Förderung umgerüstete Maschinen nach Öltyp [Pet05]

Im Energiesektor haben in den vergangenen Jahren weltweit Windkraftanlagen stark an Bedeutung gewonnen. Mitte 2008 befanden sich in Deutschland ca. 20000 Windkraftanlagen mit einer installierten Gesamtleistung von 23044 MW im Einsatz. Dies und die Prognosen der in Zukunft neu installierten Leistung, vgl. Bild 1.1, lassen erkennen, welch großes Potenzial das Anwendungsfeld Windenergie - gerade auch Offshore - für den Einsatz biogener Schmierstoffe hat.

Vor dem Hintergrund dieser Situation erschien es sinnvoll und notwendig, mit einem Schwerpunkt auf Praxisversuchen, ergänzt um Prüfstandsversuche zu speziellen Aspekten der Anwendungsbedingungen, das technische Potenzial biogener Schmierstoffe zu verdeutlichen. Angemessen erscheint der Umfang der Feldversuche aufgrund der nahe liegenden Übertragbarkeit auf Anwendungsfälle potenzieller Windparkbetreiber, die Angemessenheit der Prüfstandsuntersuchungen ist durch die Möglichkeit gegeben, Extremsituationen der Einsatzbedingungen gezielt simulieren zu können. Dadurch ist es möglich, etwaige Einsatzgrenzen biogener Schmierstoffe zu erkennen bzw. einen Sicherheitsabstand zwischen praxisüblichen Einsatzbedingungen und simulierten Extrembedingungen zu definieren.

## **7 Erkenntnisse von Dritten**

Während der Durchführung des Vorhabens ist den Zahlungsempfängern kein Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen bekannt geworden.

## **8 Veröffentlichungen**

Ergebnisse aus dem Vorhaben Winlub sind bisher nicht veröffentlicht worden. Die in diesem Bericht vorgestellten Ergebnisse werden entsprechend der durch den Projektträger vorgegebenen Regeln und Vorschriften veröffentlicht.