

# Schallemission von scherbeanspruchten Schmierfetten – Rheoacoustics-

M. LÖHR, MISTRAS BV (Physical Acoustics BV), Hamburg  
E. KUHN, T. RIELING, Ö. ÖLCEN, D. RAJABI, Hochschule für angewandte  
Wissenschaften, Labor für Maschinenelemente und Tribologie, Hamburg

Nach DIN 51825 sind Schmierfette konsistente Schmierstoffe, die aus Mineralöl und/oder Syntheseöl, sowie einem Dickungsmittel (Verdicker) bestehen. Im Maschinenbau ist der Verdicker meist eine Metallseife. Der Verdicker bildet im Schmierfett dreidimensionale Netzwerke, die aus Fibrillen und/oder Agglomeraten bestehen. Neben diesen zwei Anteilen können auch entsprechende Additive im Schmierfett enthalten sein. Schmierfette besitzen eine durch die Geometrie und Anordnung des Verdickers determinierte Struktur. Sie unterliegen bei tribologischer Beanspruchung (Tribologie= Lehre von der Reibung) einem rheologischen Verschleiß, der zu einem starken Absinken der Schubspannung führt. „Unter rheologischem Verschleiß versteht man eine infolge tribologischer Beanspruchung eintretende irreversible Eigenschaftsänderung beanspruchter Stoffbereiche eines strukturviskosen Schmierstoffes“ [1]. Nach einem anfänglich starken Strukturabbau stellt sich je nach Systembedingungen ein energetisches Gleichgewicht ein, welches sich in einem nahezu linearen Verschleißverlauf äußert. Der rheologische Verschleiß stellt eine irreversible Strukturveränderungen dar und kann durch Schallemissionsanalyse detektiert werden. Der detektierbare Verschleiß kann nur aus dem Verdicker kommen, da nur er elastische Energie speichern kann und bei Zerstörung wieder freisetzen kann

## 1. Zur Tribologie von Schmierfetten

Schon seit Jahrhunderten befasst sich die Menschheit mit dem Problem der Reibung und des sich daraus ergebenden Verschleißes. Besonders im metallischen Kontakt von Festkörpern ist eine Minderung der Reibung und die somit einhergehende Verschleißminimierung eine Hauptaufgabe. Durch den Einsatz eines dritten Reibungskörpers, repräsentiert durch das Schmierfett, wird der direkte Festkörperkontakt unterbunden. Auf diese Weise wird zwar die vom System erfahrene Reibungsenergie nicht minimiert, aber der (Festkörper-)Verschleiß; denn die im Schmierfett enthaltene Verdickerstruktur besitzt die Eigenschaft mechanische Energie elastisch zu speichern (viskoelastische Eigenschaften). Somit kann ein Teil der Reibungsenergie vom Schmierfett aufgenommen werden, während der andere Teil den Festkörper beansprucht. Je nach dem wie hoch der Verdickeranteil ist, ist dementsprechend das Potential Energie aufnehmen zu können. Allerdings ist die Schmierung des Festkörperkontaktes nicht eine Maßnahme zur Unterbindung der Reibung bzw. des Verschleißes, sondern eine aus energetischer Sicht gesehene (Um-)Verteilung der dem System zugeführten Reibungsenergie. Der Teil der Reibungsenergie, der durch das

Schmierfett aufgenommen wird, hat einen Verschleiß zur Folge. Man bezeichnet den Verschleiß eines Schmierfetts in der Tribologie als rheologischen Verschleiß [2]. Der rheologische Verschleiß ist eine Irreversibilität, die sich in der Zerstörung von Strukturbindungen in der Molekülstruktur des Schmierfetts widerspiegelt.

## 2. Charakterisierung im Rheometer

Die Rheometrie dient vorwiegend der Charakterisierung der Fliesseigenschaften von Flüssigkeiten, z.B. Ermittlung der dynamischen Viskosität. Das eingesetzte Physica Rheometer MCR 300 arbeitet mit einem stufenlos regelbaren Permanentmagnet-Synchronmotor. Diese Messmotortechnologie ermöglicht hochdynamische Messungen bei Schubspannungs- oder Schergeschwindigkeitsvorgabe über einen breiten Drehmoment- und Frequenzbereich (siehe Tabelle 1). Alle rheologischen Versuche können sowohl in der Oszillation als auch in der Rotation durchgeführt werden.

Motor-Lagertyp	Luftlager
Drehmomentbereich	0,5 $\mu\text{Nm}$ bis 120 $\text{mNm}$
Drehmomentauflösung	0,002 $\mu\text{Nm}$
Drehzahlbereich	$10^{-7}$ bis 1200 $\text{min}^{-1}$
Normalkraftbereich	0,01 bis 50N
Normalkraftauflösung	0,002 N
Temperaturbereich	-20°C bis 120°C
Frequenzbereich	$10^{-4}$ bis 100 Hz
<b>Tabelle 1: Technische Daten Physica Rheometer MCR 300</b>	

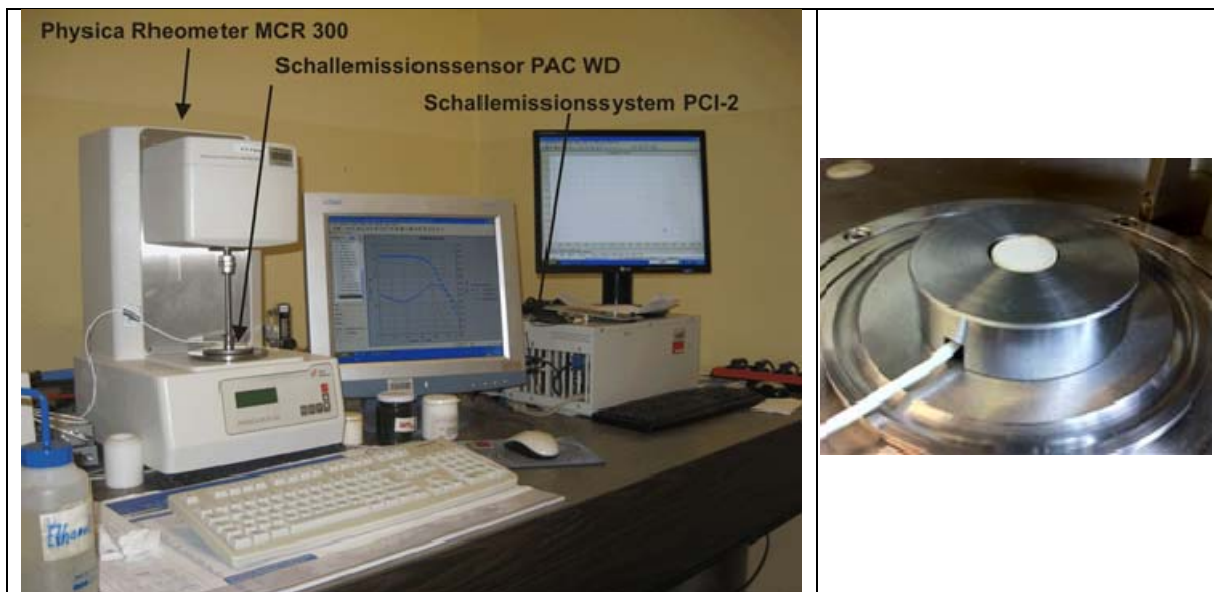
Die Versuche im Rahmen dieser Untersuchung werden mit dem Platte- Platte- System durchgeführt. Das Platte- Platte- Messsystem besteht aus zwei ebenen Platten, wobei die untere Platte feststeht und die obere Platte rotiert bzw. oszilliert. Das Schmierfett befindet sich zwischen den beiden Platten. Es wird von einer laminaren Schichtenströmung im Schmierfett ausgegangen. Der Messspalt zwischen den beiden Platten ist sehr viel kleiner als der Plattenradius. Die Scherrate ist nicht im gesamten Spalt gleich, sie nimmt mit dem Radius zu und erreicht ihr Maximum am äußeren Rand. Somit beziehen sich die Angaben der Scherrate viel mehr auf den Rand der Platte, d.h. dass alle Berechnungen und Auswertungen mit der maximalen Scherrate ausgeführt werden. Die eigentliche rheologische Messung und damit auch Schallemissionsmessung beginnt nach einer vorherigen Beruhigungszeit des Schmierfettes von 300 Sekunden.

## 3. Schallemissionsanalyse am Rheometer

Vorherige Untersuchungen zeigen, dass die einzig günstige Position für den Schallemissionssensor gegenüber der oberen Platte im Rheometer Physica MCR 300 ist [3]. Es wird eine untere Platte gebaut, die mittig eine Bohrung aufweist, in die der Sensor eingefasst ist (siehe Abb. 1 rechts). Ein sonst notwendiges Koppelmittel für das Ankoppeln des Sensors entfällt, da das Schmierfett sowohl Koppelmittel als auch Prüfmedium ist.

Die verwendeten Einstellungen zur Messung der Schallemission finden sich in Tabelle 2. Die Messungen werden mit einem Breitbandsensor WD von Physical Acoustics durchgeführt. Dieser Schallemissionssensor hat einen Arbeitsbereich von 100 kHz – 1.000 kHz. In diesem Frequenzbereich zeigt der Sensor eine nahezu gleichbleibende Empfindlichkeit. Die eingestellte Schwelle von 24  $\text{dB}_{\text{AE}}$  ist als empfindlich zu bezeichnen.

Die Schwelle unterdrückt die Störgeräusche und es werden nur Signale aus der belasteten Verdickerstruktur detektiert. Diese Signale werden durch den maximalen Signalausschlag, der Amplitude in  $\text{dB}_{\text{AE}}$ , und durch die absolute Energie in  $\text{aJ}$  ( $\text{a} = 10^{-18}$ ) beschrieben.



**Abb. 1:** Messaufbau

Links: Versuchsaufbau zur Messung der Schallemission an belasteten Schmierfetten in einem Rheometer vom Typ Physica MCR 300.

Rechts: Konstruktion der unteren Platte mit Bohrung für den Schallemissionssensor.

Messgerät	PCI-2 2-Kanal System, Physical Acoustics
Vorverstärker	2/4/6 Vorverstärker, Physical Acoustics
Sensor	PAC WD, 100 kHz - 1.000 kHz, Physical Acoustics
Vorverstärkung	40 $\text{dB}_{\text{AE}}$
Filter Vorverstärker	100 kHz – 1.200 kHz
Auswerteschwelle	24 $\text{dB}_{\text{AE}}$
Abtastrate	10 MHz
Messgrösse	Amplitude in $\text{dB}_{\text{AE}}$ und absolute Energie in $\text{aJ}$ ( $\text{a} = 10^{-18}$ )

**Tabelle 2: Verwendete Einstellungen zur Schallemissionsmessung**

#### 4. Versuche

Im Rahmen der Versuche werden unterschiedliche biogene Schmierfette und ein Modellfett (Li 16%) im Rheometer auf reine Scherung beansprucht. Besonderes Augenmerk gilt dem Fließübergangsbereich, also dem Bereich um den Fließpunkt herum. Der Fließpunkt markiert den Übergang von quasi festen Eigenschaften zu eher flüssigen Struktureigenschaften; hier definiert als Berührungspunkt zwischen Speicher- und Verlustmodul (siehe 4.1). In diesem Bereich erfährt das Schmierfett eine Belastung, die eine irreversible Strukturänderung für das Fett mit sich zieht. Die Verdickerstruktur, die den elastischen Anteil im Fett ausmacht, beschreibt die Fähigkeit des Fettes elastische Energie speichern zu können. Wird nun aufgrund einer Deformation der Fließpunkt erreicht und überschritten, so wird die Verdickerstruktur irreversibel zerstört und das Vermögen Energie zu speichern wird stark reduziert/ „geht verloren“.

#### 4.1 Einstellungen im Rheometer

Für alle Versuche wird das Platte-Platte-System verwendet, wobei der eingesetzte Durchmesser 25 mm beträgt. Die Prüffrequenz wird stets auf 1 Hz gesetzt und mit einer Spalthöhe von 0,5 mm am Rheometer gearbeitet. Alle Versuche finden bei einer Temperatur von etwa 20 °C unter Laborbedingungen statt. Es werden am Rheometer Oszillationsversuche durchgeführt. Hierbei wird ein sogenannter Amplitudensweep gefahren, d.h. die obere Platte oszilliert sinusförmig mit 1 Hz, wobei die Amplitude von 0.01% logarithmisch auf 1000% bzw. 6000% gesteigert wird. Die Amplitudenhöhe entspricht einer Auslenkung von 0.00005 mm, die schrittweise auf 5 mm bzw. 30 mm gesteigert wird. Die Versuche dauern 300 Sekunden pro Schmierfett (Kurzzeit- Oszillationsversuche). Weitere Versuche am Modellfett werden über einen längeren Zeitraum durchgeführt (Langzeit- Oszillationsversuche). Die verwendeten Messgrößen zur rheologischen Charakterisierung der Schmierfette sind:

Speichermodul  $G'$  [Pa]: als Mass für reversibel gespeicherte Deformationsenergie

Verlustmodul  $G''$  [Pa], als Mass für irreversibel verlorene Deformationsenergie

Viskosität  $\eta$  [Pa s], als Kenngrösse zur Fliesseigenschaft des Schmierfettes

#### 4.2 Verwendete Schmierfette

Es werden insgesamt 12 unterschiedliche biogene Schmierfette und ein Modellfett untersucht.

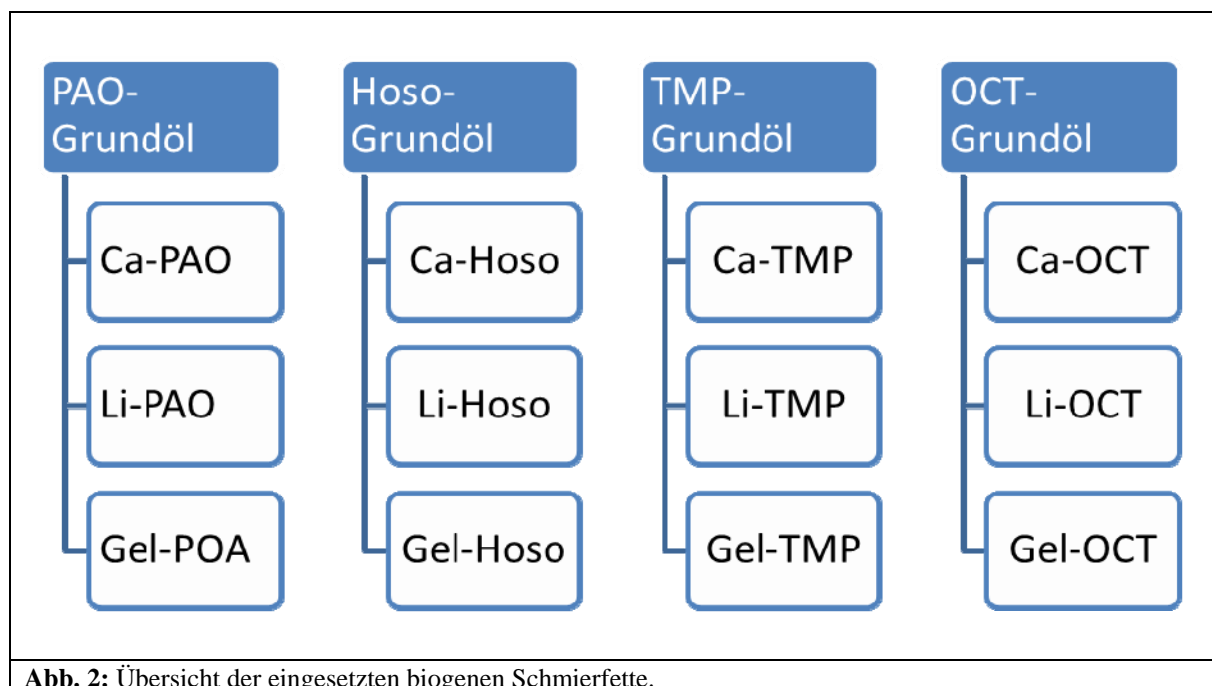


Abb. 2: Übersicht der eingesetzten biogenen Schmierfette.

Der Hauptnutzungsvorteil der Bioschmierstoffe gegenüber den mineralischen Ölen besteht darin, dass die Anwendung in umweltsensiblen Bereichen erfolgen kann. Die Bioschmierstoffe sind je nach Zusammensetzung in ihren Eigenschaften mit den mineralischen Schmierstoffen gleichwertig und können theoretisch in allen Anwendungsbereichen gewöhnlicher Schmierstoffe Verwendung finden. Nur bei Spezialanwendungen, sowie bei Anwendungen mit extrem hohen Temperaturentwicklungen sind sie den mineralischen Schmierstoffen unterlegen. Die verwendeten biogenen Schmierfette bestehen aus der Kombination von vier unterschiedlichen Grundölen und 3 Verdickern (siehe Abb. 2). Das Modellfett ist ein Lithium- Modellfett der Unternehmung

Fuchs auf Mineralöl- Basis, wobei 16% Lithiumseife als Verdicker enthalten ist. Dieses Modellfett erwies sich in ersten Untersuchungen als sehr schallemissionsaktiv und soll hier als Vergleich dienen [3].

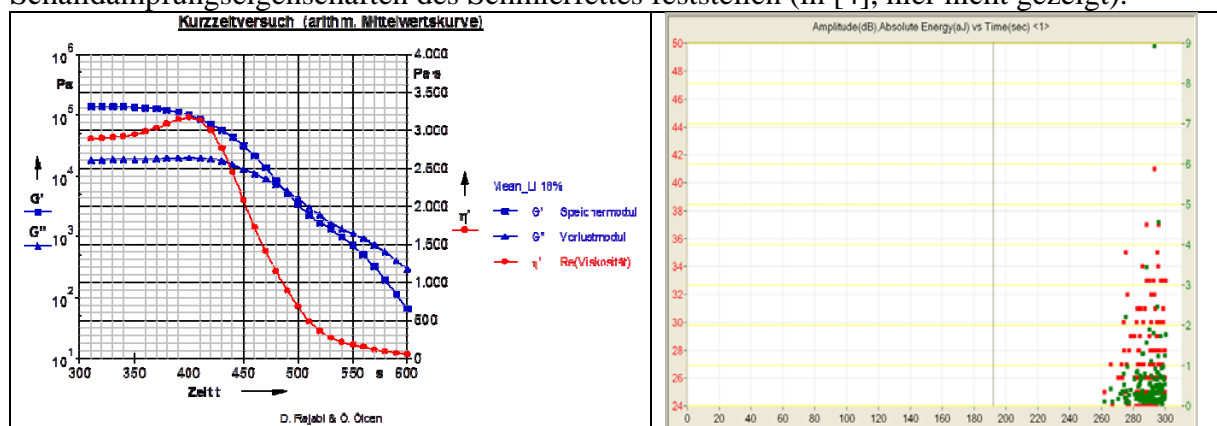
#### 4.3 Kurzzeit- Oszillationsversuche

In den Abbildungen 3-5 sind jeweils links der zeitliche Verlauf der Messgrößen aus dem Rheometer gezeigt. Diesen Darstellungen liegen jeweils mindestens 5 reproduzierbare Messungen zugrunde, worüber anschließend arithmetisch gemittelt wird. Diese Darstellungen zeigen einen typischen Verlauf:

Das Speichermodul  $G'$  ist zu Beginn stets höher als das Verlustmodul  $G''$ . Nach Zunahme der Zeit bzw. der Amplitudenhöhe beginnt das Speichermodul und Verlustmodul zu sinken, wobei das Speichermodul stärker als das Verlustmodul sinkt. Die Viskosität  $\eta$  sinkt dramatisch (Vergleichswerte bei 20 °C, 1 bar:  $\eta_{\text{Honig}}$ : 50.000 Pa s,  $\eta_{\text{Oliveneröl}}$ : 1.000 Pa s,  $\eta_{\text{Wasser}}$ : 0,001 Pa s).

Ein charakteristischer Punkt ist der Fließpunkt; hier nehmen das Speicher- und Verlustmodul gleiche Werte an. Der Zeitpunkt findet sich markiert als schwarze, senkrechte Linie in den Darstellungen der Schallemission auf der rechten Seite der Abbildungen 3-5. Allen Versuchen gemeinsam ist die Messung von Schallemission erst nach dem Erreichen des Fließpunktes. Die Detektion von Schallemission vor dem Fließpunkt, also dem Kreuzungspunkt von Speicher- und Verlustmodul, der charakterisierend für jedes Schmierfett ist, findet bei keinem Schmierfett statt. Der Kreuzungspunkt eben genannter Module ist deshalb wichtig, weil dort das elastische Verhalten des Schmierfettes endgültig, also irreversibel, verändert wird. Die eingebrachte Energie kann aufgrund der Zerstörung der Verdickerstruktur zunehmend weniger bzw. nach Fließpunktüberschreitung kaum oder überhaupt nicht mehr gespeichert werden. Eine Zerstörung der Strukturbindungen erfolgt um den Bereich des Fließpunktes, dem Fließübergangsbereich und wurde im Rahmen dieser Versuche eindeutig, schmierfettunabhängig und reproduzierbar in Form akustischer Signale gemessen.

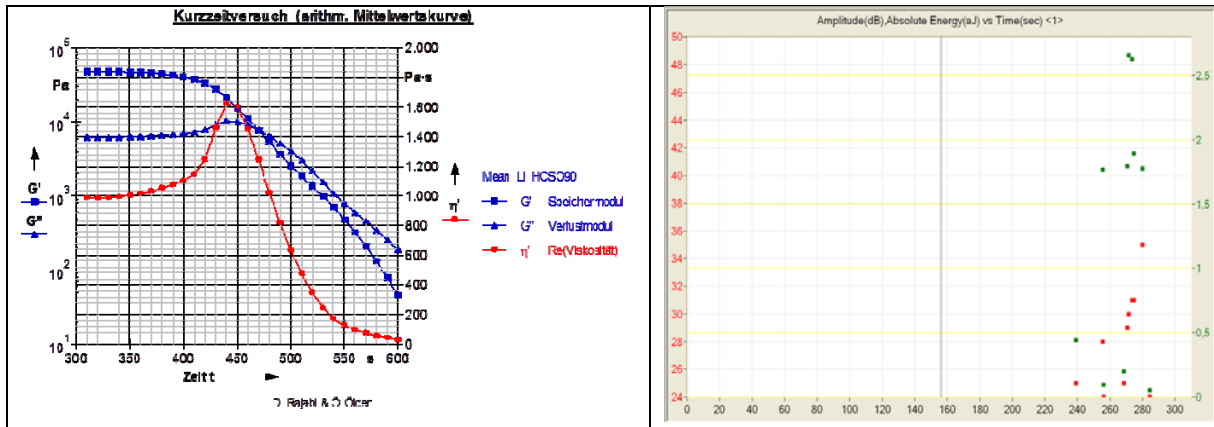
Von den 12 untersuchten Schmierfetten erwiesen sich nur 5 unter dem gegebenen Belastungsregime als schallemissionsaktiv. Eine Übersicht liefert die Tabelle 3. Die Anzahl der gemessenen Signale ist beim Modellfett eindeutig am höchsten. Interessant ist der Umstand, dass die Art des Verdickers keinen alleinigen Einfluss auf die Detektierbarkeit mit Schallemission hat. Eine anfängliche Ursachenforschung kann keinen Zusammenhang zwischen Schallemissionsaktivität und rheologischen Größen, Betrachtung weiterer physikalischer Eigenschaften des Grundöls und Schmierfettes (Ziehversuch) und Schalldämpfungseigenschaften des Schmierfettes feststellen (in [4], hier nicht gezeigt).



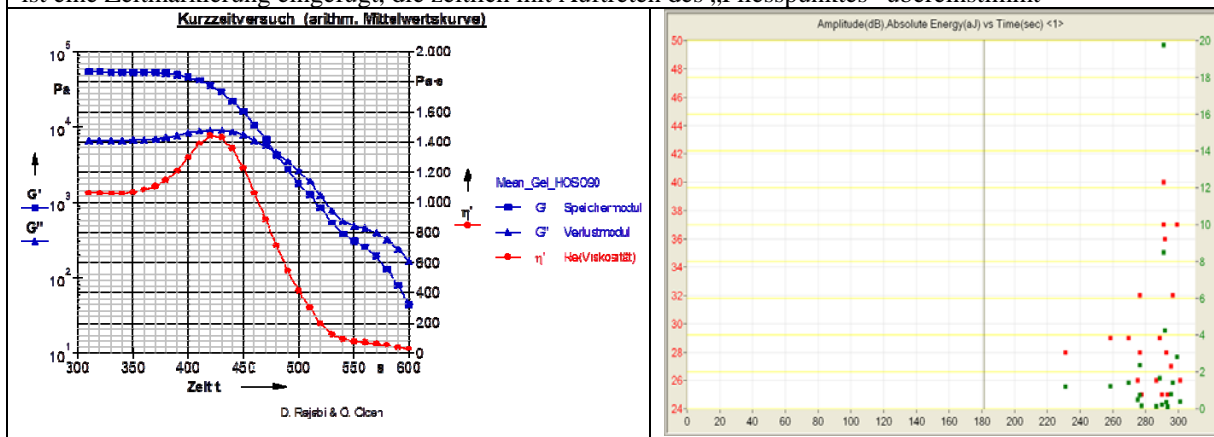
**Abb. 3:** Diagramme vom Kurzzeit- Oszillationsversuch am Modellfett.

Links: Zeitlicher Verlauf der Messgrößen vom Rheometer

Rechts: Zeitlicher Verlauf der simultanen Schallemissionsmessung. Im zeitlichen Verlauf der Schallemission ist eine Zeitmarkierung eingefügt, die zeitlich mit Auftreten des „Fließpunktes“ übereinstimmt



**Abb. 4:** Diagramme vom Kurzzeit- Oszillationsversuch am Li- Hoso Schmierfett.  
 Links: Zeitlicher Verlauf der Messgrößen vom Rheometer  
 Rechts: Zeitlicher Verlauf der simultanen Schallemissionsmessung. Im zeitlichen Verlauf der Schallemission ist eine Zeitmarkierung eingefügt, die zeitlich mit Auftreten des „Fließpunktes“ übereinstimmt



**Abb. 5:** Diagramme vom Kurzzeit- Oszillationsversuch am Gel- Hoso Schmierfett.  
 Links: Zeitlicher Verlauf der Messgrößen vom Rheometer  
 Rechts: Zeitlicher Verlauf der simultanen Schallemissionsmessung. Im zeitlichen Verlauf der Schallemission ist eine Zeitmarkierung eingefügt, die zeitlich mit Auftreten des „Fließpunktes“ übereinstimmt

Grundöl → ↓ Verdicker	POA	HOSO	TMP	OCT
Lithiumseife	⊘	☺	⊘	⊘
Calciumseife	⊘	☺	☺	⊘
Gelfett	⊘	☺	☺	⊘

**Tabelle 3: Übersicht zur Schallemissionsaktivität der 12 untersuchten biogenen Schmierfetten bei den Kurzzeit- Oszillationsversuchen. Es wird bei 5 Schmierfetten eine Schallemissionsaktivität festgestellt.**

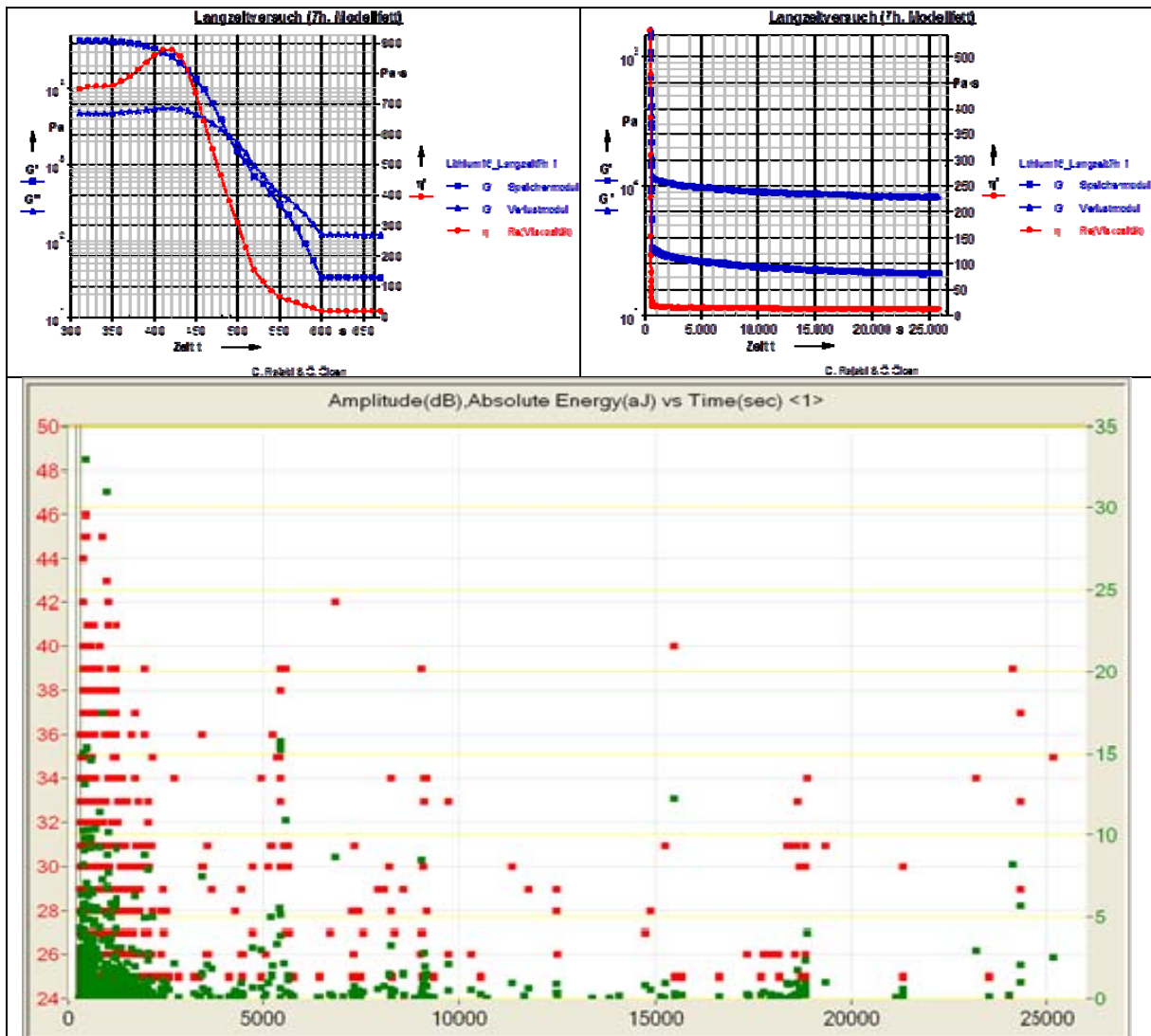
Legende: ⊘ Keine Schallemission detektiert ☺ Schallemission detektiert

Es werden auch Versuche mit einer extremen Auslenkung von 6000% über eine Messzeit von 300 Sekunden durchgeführt. Eine höhere Auslenkung bewirkt eine höhere Belastung für das Schmierfett. Das Modellfett zeigt eine starke Zunahme an Aktivität und Intensität der Schallemissionssignale. So konnten aber auch, an vorher nicht schallemissionsaktiven biogenen Schmierfetten, durch Erhöhung der maximalen Auslenkung Schallemission gemessen werden (in [4], hier nicht gezeigt).

#### 4.4 Langzeit- Oszillationsversuche am Modellfett

In diesem Versuch wird der Kurzzeit-Oszillationsversuch gefahren und danach die Auslenkung für einen längeren Zeitraum konstant gehalten. Es wird hier nur auf die Ergebnisse des Modellfetts eingegangen (weitere finden sich in [4]). In Abbildung 6 ist das Modellfett nach dem Kurzzeit- Oszillationsversuch (oben links) über einen Zeitraum von 7 Stunden mit der maximalen Amplitude von 1000% (oben rechts) belastet.

Es ist deutlich in Abb. 6 zu erkennen, dass am Anfang zunächst mehr Schallemissionssignale detektiert werden; zum Ende hin nimmt die Anzahl der akustischen Signal tendenziell ab. Besonders herauszuheben ist, dass beim Modellfett innerhalb der ersten Stunde ein großer Teil der Verdickerstruktur zerstört ist – höhere Signaldichte/Signalvorkommen – und über die Beanspruchungszeit allmählich die Signale abnehmen. (vgl. hierzu auch Tabelle 4), aber nicht zum Erliegen kommen. Eine mögliche Erklärung für eine anhaltende akustische Signalemission durch das Schmierfett wäre ein Zustand bei dem ein dynamisches Gleichgewicht zwischen zerstörenden und sich wieder aufbauenden Strukturbindungen erreicht wird. Diesen Zustand kennt man auch oft aus der Chemie, dort bezeichnet man dieses Gleichgewicht, als das chemische Gleichgewicht. In der Chemie reagieren sogenannte Edukte zu sogenannten Produkten. Im Laufe der Zeit stellt sich ein Zustand ein, der durch einen Stillstand der Stoffmengenänderung charakterisiert ist. Dann ist die Anzahl der zerfallenden und der sich neu bildenden Moleküle in der Zeiteinheit gleich. Die Geschwindigkeit der Hinreaktion ist also gleich der Geschwindigkeit der Rückreaktion, womit sich ein chemisches Gleichgewicht einstellt. Diesem Reaktionssystem ähnelnd könnte der Zustand sein, den man erreicht, wenn man ein Schmierfett, wie beim Modellfett hier geschehen, über eine lange Zeit beansprucht. Dabei sind die zerfallenden und sich wieder aufbauenden Moleküle aus dem chemischen Gleichgewicht in der Rheologie die Strukturbindungen. Eine weitere Erklärung könnte aus der sehr unterschiedlichen Verteilung und Geometrie des im Schmierfett enthaltenen Verdickers liegen. Aufgrund der unterschiedlichen innermolekularen Struktur des Schmierfettes können Bereiche des Verdickers vorkommen, wo die Fibrillen ein Energieniveau erreicht haben, das der Energiefreisetzung kurz bevor steht. Ebenso können Bereiche vorhanden sein, die bezüglich der aufgetragenen Beanspruchung resistenter sind/ oder zeitlich später zur Energiefreisetzung führen.



**Abb. 6:** Diagramme vom Langzeit- Oszillationsversuch am Modellfett.

Links oben: Zeitlicher Verlauf der Messgrößen vom Rheometer der ersten 360 Sekunden

Rechts oben: Zeitlicher Verlauf der Messgrößen vom Rheometer während der anschließende Zeit von 7 Stunden bei maximaler Amplitude von 1000 % (nach erneutem Mess- Start).

Unten: Zeitlicher Verlauf der simultanen Schallemissionsmessung über die gesamte rheologische Belastungsdauer. Im zeitlichen Verlauf der Schallemission kennzeichnet die erste Zeitmarkierung, das Auftreten des „Fließpunktes“, und die zweite Zeitmarkierung den Beginn der Belastung über 7 Stunden.

Zeitintervall [s]	Anzahl der Schallemissionssignale [-]
bis 5.000	625
5.000 – 10.000	46
10.000 – 15.000	15
15.000 – 20.000	34
20.000 - 25.000	10

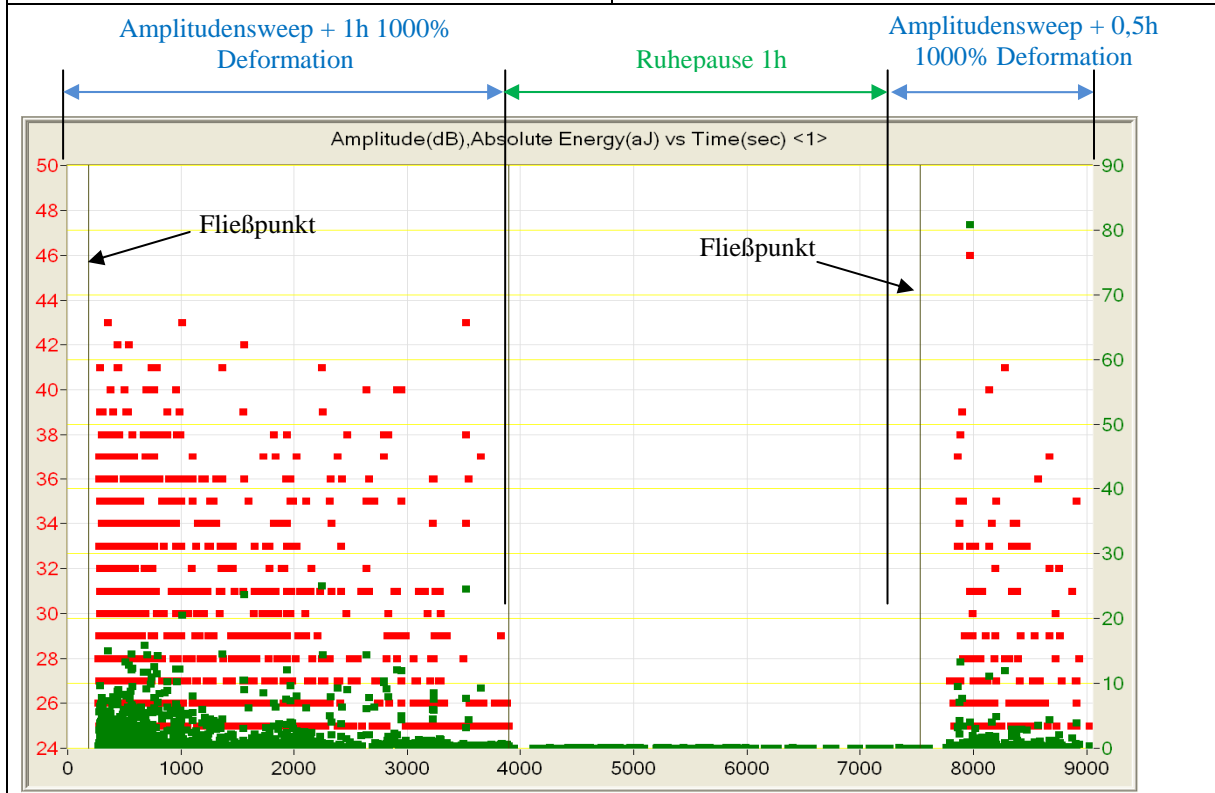
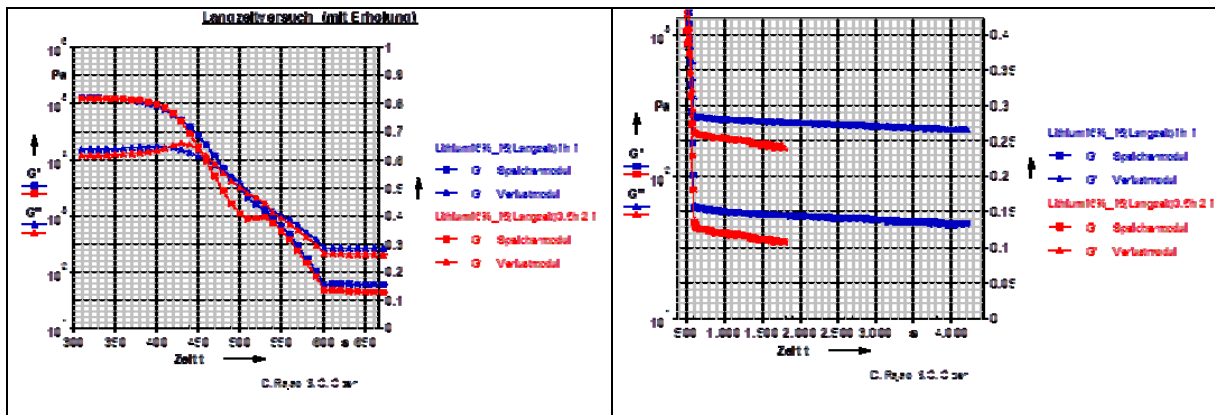
**Tabelle 4:** Übersicht zur Schallemissionsaktivität im Langzeit- Oszillationsversuch des Modellfettes.



#### 4.4 Langzeit- Oszillationsversuche mit Erholungsphase

Im Rahmen dieses Versuchs soll das thixotropische Fließverhalten von Schmierfetten auch akustisch untersucht werden (hier anhand des Modellfetts). Hierzu wird ein Amplitudensweep mit einer Amplitude von 0.001% bis auf 1000% gefahren (Kurzzeit-Oszillationsversuch) und anschließend, d.h. ohne zu pausieren, die Deformation von 1000% über 1 Stunde konstant gehalten (Langzeit- Oszillationsversuch). Zusätzlich erfolgt nach der Beanspruchung eine Ruhephase von einer Stunde, worauf ein erneuter Amplitudensweep gefahren wird mit anschließender konstanter Beanspruchung von 1000% Auslenkung über eine halbe Stunde. In Abb. 7 oben sind das Speicher- und Verlustmodul beider Versuchsabschnitte überlagert dargestellt. Die blauen Linien kennzeichnen den ersten Belastungsabschnitt und rote Linien den zweiten Belastungsabschnitt. In Abb. 7 oben links findet man die beiden durchgeführten Amplitudensweeps und rechts die unmittelbar anschließenden Langzeitbelastungen (1 Stunde und 0,5 Stunden).

Aus der rheologischen Untersuchung geht ein eindeutiges unechtes thixotropisches Fließverhalten des Modellfetts hervor. Zum einen beginnt die Anfangsviskosität beim unbeanspruchten Fett bei ca. 2.380 Pa s, während die Anfangsviskosität beim bereits beanspruchten Schmierfett ca. 1.890 Pas beträgt. Zum anderen gibt es einen Abfall im Speicher- und Verlustmodul jenseits des Fließpunktes. Zusätzlich verlagert sich der Fließpunkt zeitlich gesehen nach vorne und wird somit früher erreicht, obwohl am Versuchsprogramm nichts geändert wird. Die Erscheinung, dass die Viskosität einer Flüssigkeit unter der zeitlichen Einwirkung einer Scherbeanspruchung abnimmt, bezeichnet man als Thixotropie. Die Gerüste der thixotropen Flüssigkeiten werden dabei durch die auftretende Scherung zerstört, sie besitzen aber die Eigenschaft sich nach einer Ruhepause zu regenerieren. Die Messung der Schallemission (Abb. 7 unten) zeigt sich das unechte thixotrope Verhalten des Modellfetts in der abnehmenden Signalanzahl zwischen der Erstbeanspruchung und der erneuten Beanspruchung des Schmierfetts. Im ersten Versuchsabschnitt ist eine höhere Signaldichte kurz nach Überschreiten des Fließpunktes zu erkennen, wobei die Signale über die Zeit abnehmen. Dieses thixotrope Verhalten ist im zweiten Versuchsabschnitt ebenfalls zu beobachten. Allerdings besteht ein wesentlicher Unterschied in der Anzahl der Signale zwischen beiden Versuchsabschnitten. Es ist eine deutliche Abnahme der Signaldichte zwischen der Erstbeanspruchung und der erneuten Beanspruchung des Schmierfetts nach der Ruhepause zu verzeichnen. Somit ist eine vollständige Regenerierung der Schmierfettstruktur durch eine Ruhepause (von 1h) nicht gegeben, d.h. es liegt ein unecht thixotropes Fließverhalten vor. Dies zeigt sich sowohl in den rheologischen Kennwerten, als auch in der Schallemissionsmessung. Ein Schmierfett mit unvollständig regenerierter Struktur emittiert weniger Signale als im unbeanspruchten Zustand.



**Abb. 7:** Diagramme vom Langzeit- Oszillationsversuch mit Pause am Modellfett.

Links oben: Zeitlicher Verlauf der Messgrößen vom Rheometer der ersten 360 Sekunden der Amplitudensweeps beider Belastungsabschnitte (überlagert).

Rechts oben: Zeitlicher Verlauf der Messgrößen vom Rheometer während der unmittelbar anschließende Zeit von 1 Stunde (1. Belastungsabschnitt) und einer halben Stunde (2. Belastungsabschnitt), nach einer Ruhephase von 1 Stunde mit der Amplitude von 1000%.

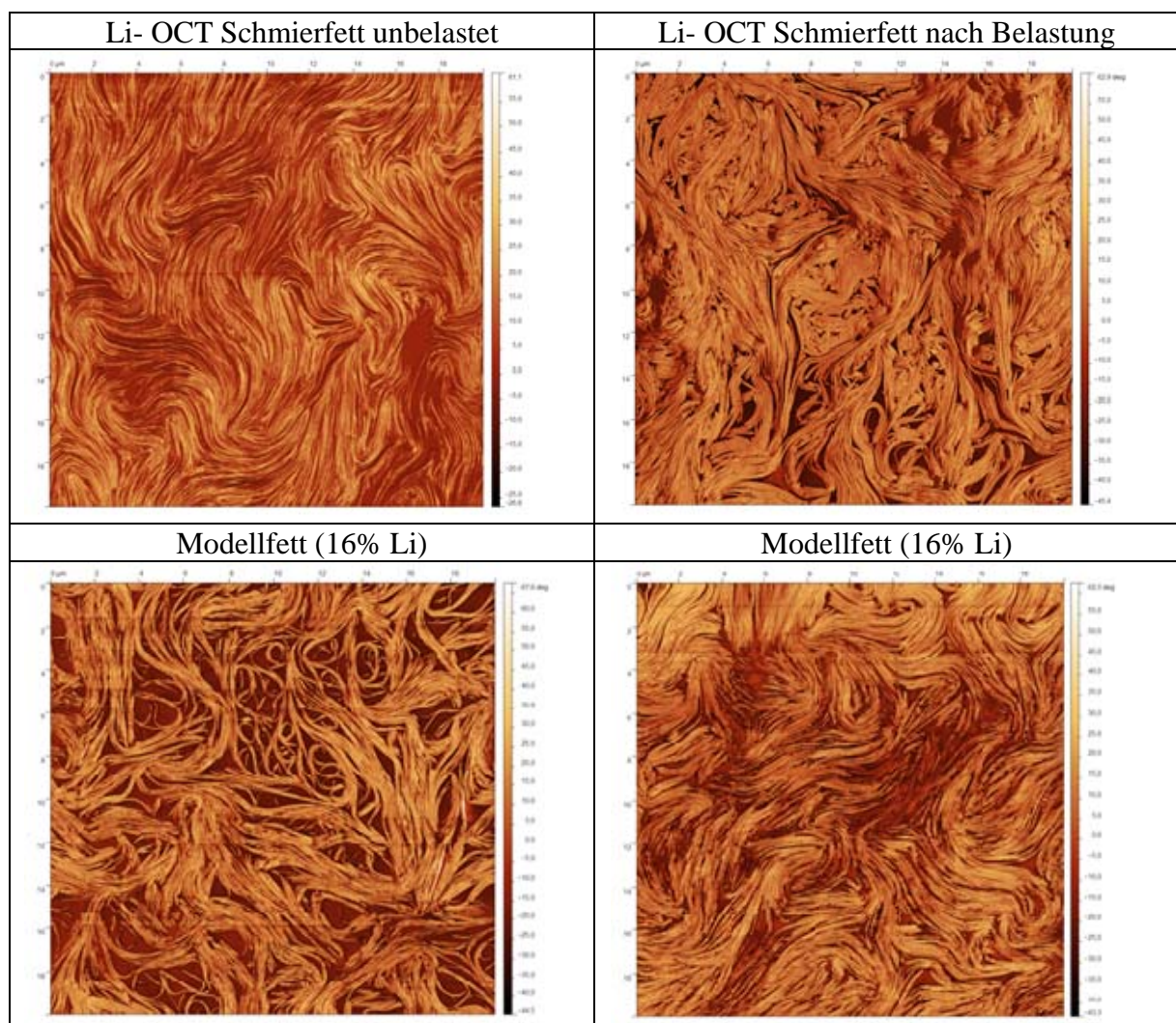
Unten: Zeitlicher Verlauf der simultanen Schallemissionsmessung über die gesamte rheologische Belastungsdauer, einschliesslich Ruhephase von 1 Stunde.

#### 4.5 AFM (Atomic Force Microscope)- Aufnahmen der Schmierfette

Um die Struktur der Schmierfette besser zu begreifen, werden in Kooperation mit der Universität in Huelva am Labor von Herrn Prof. Franco sogenannte AFM-Bilder mit dem Atomkraftmikroskop erstellt. Bei der Atomkraftmikroskopie wird die Oberfläche des Objektes mechanisch abgetastet und ein Oberflächenbild erstellt. Um nicht nur die Struktur des unbeanspruchten Schmierfetts, sondern auch Strukturveränderungen infolge von Beanspruchung nach zu vollziehen, werden Schmierfette sowohl nach einer Beanspruchung, als auch als unbeanspruchte Proben mikroskopisch untersucht. Die aufgegebene Belastung

beinhaltet einen Oszillationsversuch mit einer schrittweise steigenden Amplitude von 1000% auf sogar 6000%. Hierdurch sollte eine eindeutige Strukturzerstörung bewirkt werden, so dass sich diese entsprechend in den AFM-Bildern zeigt.

Das Modellfett zeigt von allen bisher untersuchten Schmierfetten [3,4] die stärkste Schallemission. Das Li-OCT Schmierfett zeigt beim Amplitudensweep bis 1000% Deformation keine Schallemission, erst ab einer Deformation von mehr als 1000% wird Schallemission gemessen. In Abb. 8 oben ist das biogene Schmierfett Li- OCT unbelastet und nach Belastung gezeigt, während unten entsprechend das Modellfett zu finden ist. Das unbelastete Li-OCT Schmierfett besitzt im Vergleich zum unbelasteten Modellfett eine dichtere Verdickerstruktur. Das unbeanspruchte Modellfett zeigt eine Verdickerstruktur, die aus langen und teilweise sehr verdrehten Fibrillen besteht. Die Beanspruchung führt in beiden Fällen zu einer Verkürzung der Verdickerfibrillen. Das Modellfett zeigt im Vergleich zum Li-OCT Schmierfett eine Verdichtung der Verdickerstruktur.



**Abb. 8:** Strukturänderung durch rheologischen Verschleiss am biogenen Schmierfett Li-OCT und dem Modellfett (Li 16%).

Links: unbelastet, Rechts: nach Beanspruchung.

Die Aufnahmen (19  $\mu\text{m}$  x 19  $\mu\text{m}$ ) sind mit einem AFM („Atomic Force Microscope“)- Gerät gemacht und haben den gleichen Grössenmassstab.

## 5. Zusammenfassung und Ausblick

Das rheologische Verhalten von Schmierfetten, dass ihr strukturviskoses Fließverhalten und die unechte Thixotropie beinhaltet, kann bei den durchgeführten Schallemissionsmessungen beobachtet werden. Signale der Schallemission werden bei rheologisch belasteten Schmierfetten erst nach überschreiten des linear-elastischen Bereichs detektiert (sogenannter Fließpunkt). Die Verdickerstruktur kann mechanische Energie elastisch speichern. Bei Überbeanspruchung können einzelne Fibrillen reißen, entflechtet und zerstört werden. Dies geht mit einer entsprechenden Energiefreisetzung einher und kann als akustisches Signal erfasst werden.

Es werden insgesamt 12 unterschiedliche biogene Schmierfette und ein Modellfett (16% Li) untersucht. Schallemission wird beim Modellfett und 5 biogenen Schmierfette registriert. Die Stärke der Schallemission ist von der Höhe der Deformation abhängig. Es kann z.B. gezeigt werden, dass schallemissions- inaktive Schmierfette durch Steigerung der Deformation zu einer Schallemissionsdetektion führen und, dass die Steigerung eine vermehrte und intensivere Schallemission am gleichen Schmierfett bedingt. Die Schmierfette zeigen unterschiedliche Aktivität und Intensität an Schallemission. Eine anfängliche Ursachenforschung führt zu keiner eindeutigen Korrelation zwischen den physikalischen und rheologischen Eigenschaften der Schmierfette, den durchgeführten mikroskopischen Aufnahmen (Strukturinformation) und den Dämpfungseigenschaften.

In der Untersuchung des zeitabhängigen Verhaltens der Schmierfette (hier gezeigt am Modellfett) wird durch längere Belastungszeiten gezeigt, dass der Strukturabbau/ -umbau eines Schmierfetts sich in dessen akustischem Emissionsbild durch Abnahme der erfassten Hits widerspiegelt. Ferner konnte eine Erholung des Fetts durch eine Ruhepause akustisch gezeigt werden. Zwar lag die Hitanzahl nach der Ruhepause nicht auf dem Ausgangsniveau, so konnte aber eine erneute Zunahme der Hits nach Erholung gezeigt werden (unechtes thixotropes Verhalten).

Weitere Untersuchungen sind notwendig, um die bei Schmierfetten auftretende Schallemission zu verstehen. Insbesondere die Mikroskopaufnahmen können hier ein wesentlicher Schlüssel sein.

## Referenzen

- [1] Kuhn, E.: Reibungsenergiwirkungen im fettgeschmierten tribologischen Kontakt. 48. Tribologie-Fachtagung 2007 Band 1
- [2] Kuhn, E. : Zur Tribologie der Schmierfette, Expert- Verlag, 2009
- [3] Löhr, M., Kuhn, E., Rieling, T.: Schallemission von Schmierfetten im Rheometer, DGzFP- Tagungsband Schallemissionskolloquium, Bad Schandau, 2009
- [4] Ölcen, Ö., Rajabi, D.: Akustische Emissionsmessung an biogenen Modellfetten bei rheologischer Beanspruchung, Masterprojekt an der Hochschule für angewandte Wissenschaften Hamburg, 2011