

Schmierölzustandsüberwachung mittels nicht-dispersiver spektroskopischer Online-Sensoren

Dr. Thomas Klotzbücher

Fraunhofer ICT-IMM

Einleitung

Der Gebrauchszustand von Schmierölen ist ein essentieller Faktor für den sicheren, verschleißarmen Betrieb unterschiedlichster Verbrennungsmotoren, wie z.B. Schiffs, KFZ- und Deponiegasmotoren, aber auch von Kompressoren und Hydrauliksystemen oder Getrieben, wie z.B. denen in Windkraftgeneratoren. In vielen Fällen wird das hochwertige, kostenintensive Schmieröl in regelmäßigen Intervallen vorsorglich ausgetauscht, um hinreichende Betriebssicherheit sicherzustellen. Dies bedeutet eine Erhöhung der Betriebskosten, wenn die Qualität des Schmieröls zu diesem Zeitpunkt noch gut ist. Umgekehrt kann dieses Vorgehen aber auch zu erhöhtem Verschleiß und Ausfall des Motors führen, falls das Schmieröl bereits vor dem turnusmäßigen Wechsel nicht mehr in einem ordnungsgemäßen Zustand ist. Um einen optimierten Austauschzeitpunkt festzulegen, werden daher insbesondere bei Großmotoren (z.B. Schiffsmotoren), regelmäßig Ölproben gezogen, die an ein Speziallabor gesendet und dort analysiert werden. Diese vorbeugende Maßnahme stellt allerdings einen nicht unerheblichen, mit Kosten und Wartezeiten verbundenen Aufwand dar. Durch den Einsatz geeigneter Online-Sensoren zur Überwachung des Schmierölzustands können die o.g. Probleme umgangen werden. Dabei werden neben einer Reduktion der laufenden Wartungs- und Betriebskosten auch eine Ressourceneinsparung und damit eine Reduktion der Gesamtkosten über den Lebenszyklus der Maschine erreicht.

Obwohl Online-Sensoren bisher noch nicht die Qualität einer umfangreichen Laboranalyse erreichen, ermöglichen sie durch kontinuierliche Überwachung unsichere Betriebszustände frühzeitig zu detektieren oder solche durch präventive Maßnahmen vermeiden. Um ein möglichst breites Einsatzfeld für solche

Sensoren zu erreichen, ist ein einfaches, robustes Messprinzip erforderlich, welches aber dennoch eine genügend hohe Aussagekraft besitzt, um die o.g. Anforderungen auch hinsichtlich des Kostenaufwands, zu erfüllen. Als Lösungsansatz wurden am Fraunhofer ICT-IMM nicht-dispersive spektroskopische Online-Sensoren entwickelt, die auf dem Prinzip der optischen Transmissionsspektroskopie im mittleren Infrarotbereich (MIR) basieren

(Abbildung 1). Dieser Fachartikel gibt einen Überblick über die Funktionsweise sowie mögliche Anwendungsgebiete.

Sensorprinzip

Im MIR-Bereich des Spektrums treten charakteristische Absorptionsbanden auf, die mit Molekülschwingungen korreliert sind und somit ein fingerabdruckartiges Merkmal für eine bestimmte Substanz darstellen, die darüber identifiziert und quantifiziert werden kann. Die Absorption von MIR-Strahlung in einem Medium der Dicke d (Abbildung 2) folgt dabei dem Lambert-Beer-Gesetz:

$$I(\lambda, d) = I_0(\lambda) \cdot \exp(-\varepsilon(\lambda) \cdot c \cdot d)$$

Hierbei ist $I_0(\lambda)$ die wellenlängenabhängige eingestrahlte Intensität, $\varepsilon(\lambda)$ der wellenlängenabhängige Extinktionskoeffizient, c die Konzentration der absorbierenden Substanz und d die Dicke des absorbierenden Mediums in Strahlrichtung. Der Extinktionskoeffizient $\varepsilon(\lambda)$ ist dabei die entscheidende, materialspezifische Größe.

Die Intensität der transmittierten Strahlung $I(\lambda, d)$ bezogen auf die eingestrahlte Intensität $I_0(\lambda)$ ist die Messgröße und wird für eine charakteristische Absorptionsbande (z.B. für Wasser bei 2950 nm) durch einen speziell auf diese Wellenlänge abgestimmten Bandpassfilter selektiert (Abbildung 3). Diese Methode ist aus der Gasmesstechnik bekannt und wird nicht-dispersiv genannt, weil keine optischen Elemente wie z.B. Gitter zur Aufspaltung in die einzelnen Wellenlängen erforderlich sind.

Dadurch kann der Aufbau des Sensors kompakt, robust und kostengünstig realisiert werden. Die Anzahl der erfassten Wellenlängenbereiche ist aber dafür auf

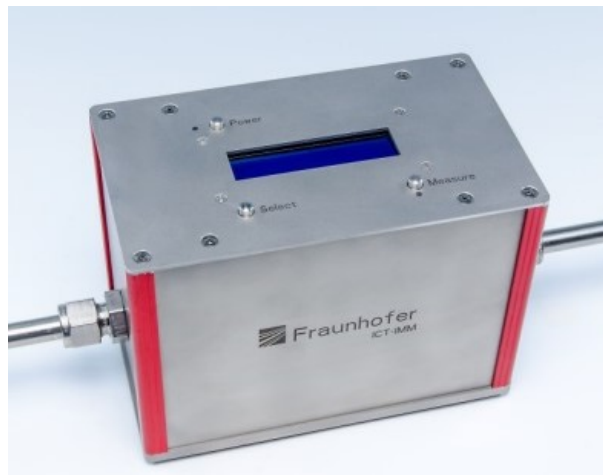


Abb. 1: Multiparameter Stand-Alone Online-Ölsensor mit integriertem Mikroprozessor und Display (15x10x9 cm).

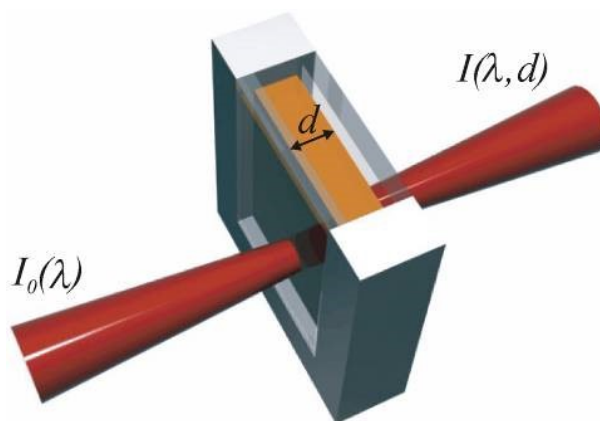


Abb. 2: Schematische Darstellung der Strahlungsabsorption in einer mit einem Medium gefüllten optischen Zelle der Dicke d .

einige wenige Bereiche beschränkt (typischerweise 4 bei einem 4-Feld Thermopile-Detektor). Die Intensität hinter dem auf eine bestimmte Substanz (Absorptionsbande) abgestimmten Bandpassfilter kann direkt mit der Konzentration der Substanz im Ölmedium korreliert werden. Dies ist exemplarisch in Abbildung 3 für den Wassergehalt in Öl gezeigt: Je höher der Wasseranteil, desto höher die Absorbanz im Filterbereich (bzw. desto niedriger die transmittierte Intensität).

Als Strahlquelle $I_0(\lambda)$ wird ein breitbandig emittierender thermischer Strahler (IR-Emitter) eingesetzt, dessen Temperatur auf maximale Abstrahlung bei den benötigten Wellenlängen optimiert wird. Die Strahlung wird durch einen ellipsoidalen Reflektor, in dessen ersten Brennpunkt der Strahler sitzt, in den zweiten Brennpunkt gebündelt, in dem der Detektor sitzt (Abbildung 4). Zwischen der Strahlquelle und dem Detektor befindet sich eine optische Durchflusszelle. Diese besteht aus zwei

ZnSe-Fenstern (durchlässig im MIR) und einem Spacer, der die Dicke d der optischen Zelle bestimmt, sowie einer mikrofluidischen Ein/Auslauf-Struktur, welche eine laminare und blasenfreie Befüllung bzw. Durchströmung der Zelle erlaubt.

Als Detektor wird ein sogenannter Thermopile-Detektor verwendet. Dieser hat bis zu 4 Detektorfelder in einem Gehäuse integriert, von denen jedes auf der Vorderseite durch einen speziell ausgewählten Bandpassfilter funktionalisiert ist. Jedes Detektorfeld misst also einen spezifischen Bereich des MIR-Spektrums, wodurch bis zu 4 Parameter gleichzeitig mit hoher Abtastrate untersucht werden können.

Anwendungsbeispiele

An Kompressorölen *Betico Turbo 200* und synthetischem *Betico Rotosint* wurden mittels des oben beschriebenen 4-Parameter-Online-

Sensors (Wasser, Ruß, TAN, TBN) vergleichende Untersuchungen durchgeführt. Dabei zeigt sich für die Messungen des Wassergehalts eine sehr gute Korrelation zwischen den mit dem Sensor und den im Labor mittels FTIR-Spektroskopie gemessenen Daten (Abbildung 5).

Eine weitere Größe zur Qualitätsbewertung eines Schmieröls ist der durch verschleißbedingte Oxidationsgrad. Die Oxidation eines Schmieröls geht einher mit der Bildung von Carbonyl-Bindungen (C=O), welche sich im MIR sehr gut verfolgen lässt. Sie zeigt eine sehr starke Korrelation zur totalen Säurezahl (TAN), die im Labor mittels Titration bestimmt wurde (Abbildung 6). Auf diese Weise lassen sich mittels der MIR-Spektroskopie auch solche Parameter adressieren, die an sich nicht infrarotaktiv sind.

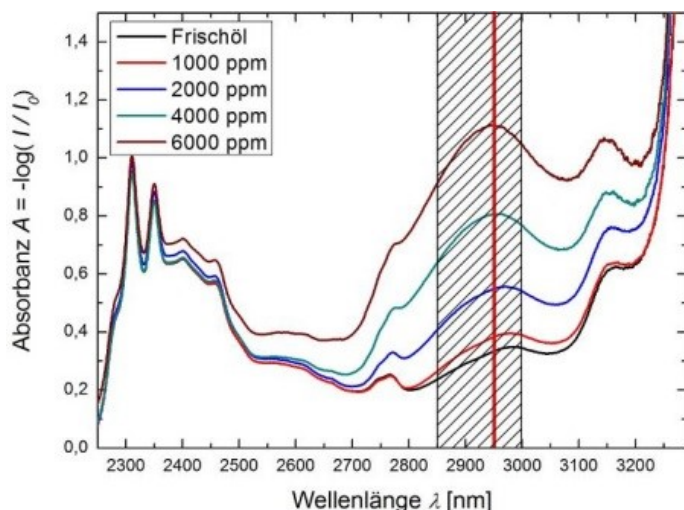


Abb. 3: Absorptionsspektren eines Öls mit unterschiedlichen Wasserkonzentrationen (schraffierter Bereich: Durchlassbereich des verwendeten Bandpassfilters).

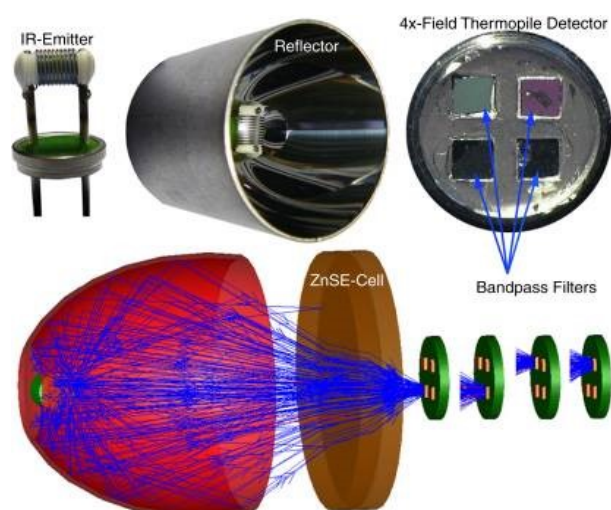


Abb. 4: Darstellung der wesentlichen Komponenten des nicht-dispersiven Sensors (optischer Strahlverlauf jeweils dargestellt nur für die Strahlen, die auf das jeweilige Element fallen).

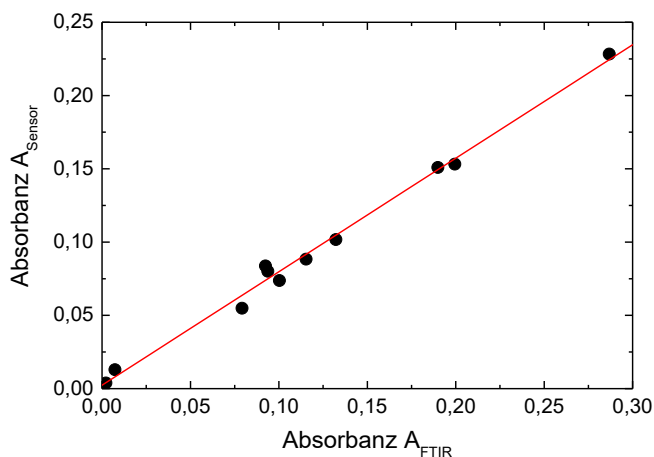


Abb. 5: Korrelationsplot des Wassergehalts in Öl von Sensordaten mit Labordaten (FTIR).

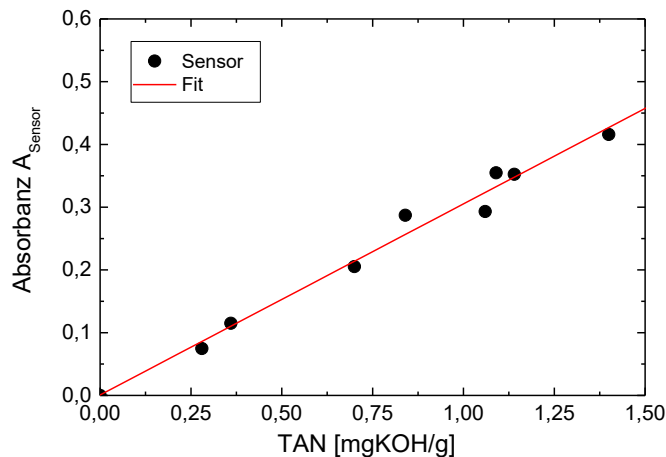


Abb. 6: Korrelation der Absorbanz auf der Oxidationsbande von Öl mit dem Labor-TAN-Wert.

Ähnlich aufgebaute Sensoren wurden an Ölen für Zweitakt- und Viertakt-Schiffsmotoren anhand der Öle OEHT30 und HFX404 getestet. Dabei spielte neben der Detektion des Wassergehalts insbesondere auch der Nachweis der Rußkonzentration eine Rolle. Da Ruß im MIR-Spektrum breitbandig absorbiert und daher keine charakteristischen Banden aufweist, wird die Transmission in einem Bereich ohne ausgeprägte Spektralbanden mit der Rußkonzentration korreliert. Die mittels Sensor bestimmten Rußkonzentrationen stimmen dabei gut mit denen aus Plasmaspektroskopie (ICP) bestimmten Werten überein (Abbildung 7).

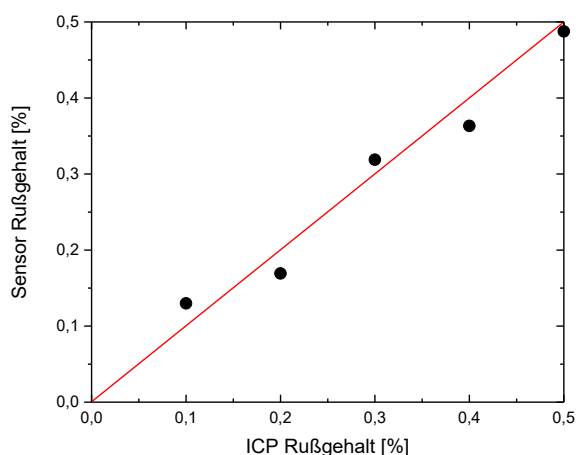


Abb. 7: Korrelationsplot des Rußgehalts von HFX404-Öl mit dem mittels ICP bestimmten Labor-Rußgehalts.

Neben dem Rußgehalt ist auch die totale Basenzahl (TBN) des Öls ein wichtiger Parameter, der den Alkaligehalt des Öls, welcher durch Additive eingestellt wird, repräsentiert und die Fähigkeit angibt, die bei der Verbrennung erzeugten Säuren zu neutralisieren. Die Referenzmessung des TBN-Wertes erfolgt im Labor ähnlich wie beim TAN-Wert durch Titration oder amperometrisch. Insbesondere im letzteren Fall, kann es zu rußbedingten Verfälschungen kommen. Hier bietet die MIR Spektroskopie, durch Korrelation von Sulphat- (TBN < 20 mg KOH/g) und Carbonat-Banden (TBN < 40 mg KOH/g) im Fingerprintbereich des MIR eine gute Alternative für eine Onlinebestimmung des TBN-Wertes. Insbesondere können mit der Methode auch kleine Konzentrationen < 2 mg KOH/g des TBN-Wertes adressiert werden (Abbildung 8).

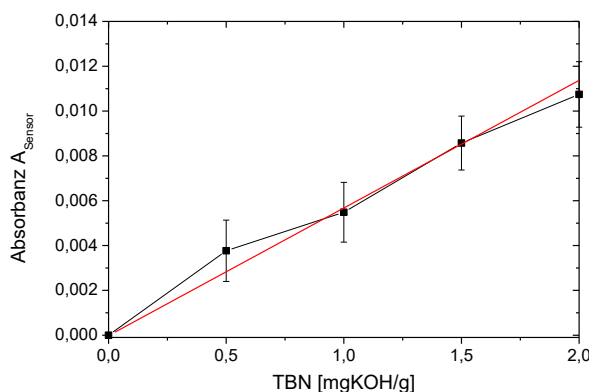


Abb. 8: Sensorabsorbanz als Funktion des TBN-Wertes für geringe Konzentrationen, für ein mit dem TBN Additiv CMC404H versetztes Öl OEHT30.

Die in Abbildung 8 gezeigte Kurve wurde durch gravimetrische Addition eines TBN Additivs CMC404H zum Frischöl OEHT30 mit anschließender Messung durch einen Sensor auf der Sulfatbande gewonnen.

Nächste Sensorgeneration

Einige naheliegenden Anwendungsfelder, hierunter insbesondere der Automotive-Bereich, können für das oben beschriebene Messprinzip erst dann erschlossen werden, wenn es gelingt, die Baugröße um wenigstens eine Größenordnung zu reduzieren und die derzeitigen Stückkosten deutlich nach unten zu treiben. Daran gekoppelt ist auch die Notwendigkeit solche Sensoren wirtschaftlich in großen Stückzahlen fertigen zu können. All diese Anforderungen lassen sich durch den Einsatz der Micro-Electro-Mechanical-Systems (MEMS)-Technologie lösen. Erste Untersuchungen zur Machbarkeit solcher MEMS-basierten Ölsensoren am ICT-IMM weisen vielversprechende Ergebnisse auf (Abbildung 9).

So konnten erste Sensormodule, bestehend aus drei übereinanderliegenden Si-Chips realisiert werden, von denen jeder eine spezifische Funktionalität aufweist. Die erste Lage enthält die thermischen Strahlquellen, welche als Leiterbahnen auf freitragenden Siliziumnitridmembranen aufgebaut sind. Diese werden resistiv geheizt und erreichen Temperaturen von über 600 °C. Die zweite Lage enthält einen fluidischen Kanal zur Führung des

Mediums, auf dessen Rückseite die optischen Bandpassfilter, zur spektralen Selektion relevanter Banden im MIR, aufgebracht sind. Die dritte Lage enthält Platin-basierte Bolometer, die thermoresistiv ausgelesen werden. Eine schwarze, galvanisch aufgetragene Metallschicht dient dabei als breitbandiger Absorber für die Strahlung. In ersten Funktionstests der Module konnte die Machbarkeit erfolgreich demonstriert werden, jedoch sind noch weitere Untersuchungen mit spezifischem Anwendungsbezug zur abschließenden Bewertung des beschriebenen Ansatzes erforderlich. Die Arbeiten hierzu befinden sich derzeit in Vorbereitung.

Fazit

Viele Anwendungen erfordern den Einsatz von hochwertigen Schmierölen für einen funktionsgerechten Betrieb von beispielsweise Motoren. Die Überwachung dieser Öle erfolgt je nach Anwendung entweder über zeitintensive Laboranalysen oder gar nicht, d.h. die Öle werden in regelmäßigen Intervallen einfach ausgetauscht. Online-Analytik erfolgt i.d.R. nicht oder nur in einigen Spezialfällen, wobei standardmäßig kapazitive oder amperometrische Sensoren zum Einsatz kommen. Diese messen aber nicht spezifisch ausgewählte Zustandsparameter sondern liefern im Wesentlichen einen Summenparameter, auf dessen Basis eine genaue Qualitätsbewertung von Ölen schwierig ist. Hier setzt die Infrarotmesstechnik an, mit deren Hilfe mehrere, relevante Parameter spezifisch adressiert werden können und die mittels nicht-dispersiver, Filter-basierter Spektroskopie relativ einfach in eine kompakte Online-Sensorik umsetzbar ist. Diese Messmethode erreicht zwar noch nicht die Genauigkeit einer

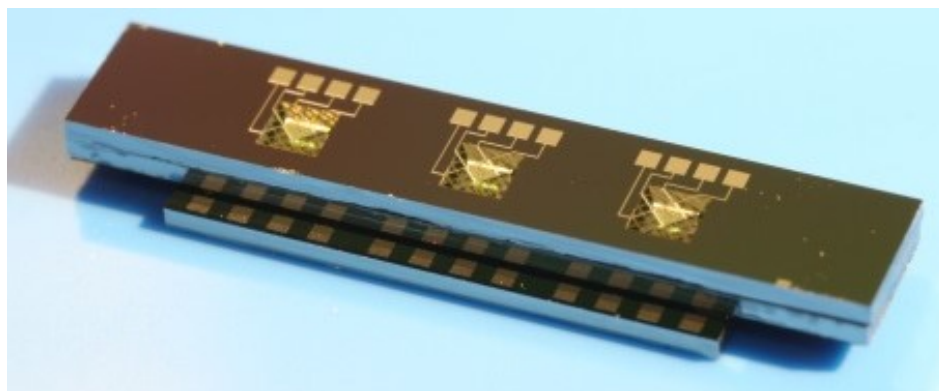


Abb. 9: Nicht gekapseltes MEMS-Ölsensormodul (30mm), bestehend aus drei Lagen Silizium (Strahlquellenmodul mit 3 thermischen Strahlern, Durchflusszelle mit Bandpassfiltern, Detektionsmodul mit 3 Platin-Bolometern).

fundierten Laboranalyse, bietet aber die Möglichkeit einer kostengünstigen Online-Zustandsüberwachung verbunden mit den Vorteilen geringerer Ausfallzeiten und der frühzeitigen Detektion unsicherer Betriebszustände. Trotz der nun bereits seit einigen Jahren verfügbaren Technologie, hat sich diese jedoch am Markt noch nicht in Breite etablieren können. Die Gründe dafür sind vielfältig aber oftmals kostengetrieben. Solange eine Investition in die neue Sensortechnologie gescheut wird, bleiben die Herstellungskosten solcher Sensoren hoch und verhindern so eine stärkere Verbreitung im Markt. Abhilfe könnte hier eine MEMS-basierte Fertigungstechnologie liefern, die eine deutliche Reduktion der Baugröße ermöglicht, massenfertigungstauglich ist und sogar neue Anwendungsfelder erschließen könnte, wie z.B. Automotive oder mobile Endgeräte. Dies erfordert ein umfassendes Know-How sowie innovative Konzepte im Bereich der MEMS-Integration.