

Fernauslesbarer Oberflächenwellen-Feuchtesensor

Martin Dierkes, Ulrich Hilleringmann

Universität Paderborn, Fachgebiet Sensorik, Institut für Elektrotechnik und Informationstechnik
 Warburger Str. 100, 33098 Paderborn; Email: dierkes@sensorik.uni-paderborn.de

Einleitung

Die Isoliereigenschaften von Ölen in Hochspannungstransformatoren hängen sehr stark von deren Wassergehalt ab. Durch langsam verlaufende Alterungsprozesse wird die Isolierung, die auf Isolieröl und Zellulose basiert, negativ beeinträchtigt. Wasser wird aus der Zellulose freigesetzt, reichert sich im Öl an und setzt somit dessen Isoliereigenschaften herab. Für einen sicheren Betrieb, der an die Durchschlagfestigkeit des Isolieröls gekoppelt ist, darf ein kritischer Wassergehalt von 50 ppm [1] nicht überschritten werden.

Bisher wird der Isolierzustand durch eine Probenentnahme mit anschließender Laboranalyse überprüft, wozu der Transformator abgeschaltet wird. Der Einsatz von konventionellen, kabelbestückten Sensoren ist nicht zulässig, womit eine kontinuierliche Überwachung ausscheidet.

Der verfolgte Ansatz ist nun, mit einem passiven fernauslesbaren Oberflächenwellensensor eine „online“ Überwachung des Feuchtegehalts von Isolierölen zu gewährleisten und diesen in den Trafos zu integrieren. Das Folgende beschreibt die Besonderheiten beim Einsatz von akustischen Oberflächenwellen zur Flüssigkeitsanalyse, erläutert den Herstellungsprozess derartiger Sensoren und stellt erste Messergebnisse vor.

Anregung von akustischen Oberflächenwellen

Die Anregung von akustischen Oberflächenwellen erfolgt mit interdigital transducers (IDT) auf piezoelektrischen Substratmaterialien (Quarz, LiNbO₃ etc.). Bei IDT's handelt es sich um kammartig ineinandergreifende Elektroden aus Aluminium oder Chrom. Das "Pad", welches die einzelnen Finger eines Kamms miteinander verbindet, generiert aufgrund des inversen piezoelektrischen Effekts beim Anlegen einer hochfrequenten Spannung periodische

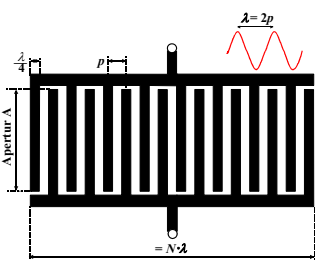


Abbildung 1: interdigital transducer (IDT)

mechanische Verzerrung mit der räumlichen Periode $2p$ (Abbildung 1) und der zeitlichen Periode $1/f$, und somit Partialwellen an jedem einzelnen Fingerpaar. Diese interferieren konstruktiv, wenn die Laufzeit zwischen benachbarten Fingerpaaren im Abstand $2p$ gerade der Periode der Wechselspannung oder ihren ungeraden Vielfachen entspricht, d.h., für $\lambda = v/f = 2p$. Bei dieser Frequenz, der Resonanzfrequenz, wird die eingespeiste Energie am effizientesten in eine mechanische Welle umwandelt. Somit hat die Geometrie des

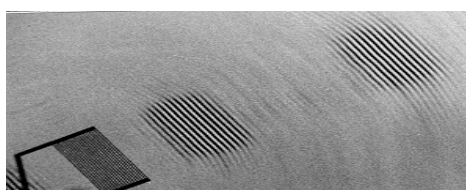


Abbildung 2: Oberflächenwelle (REM Aufnahme) [2]

IDT maßgeblichen Einfluss auf die Frequenz der angeregten akustischen Welle.

Oberflächenwellen für die Flüssigkeitsanalyse

Prinzipiell können mit einer IDT verschiedenste Oberflächenwellen angeregt werden, aber nicht alle sind für eine Analyse von Flüssigkeiten geeignet. Stellvertretend sei die Rayleigh Welle angeführt. Die gesamte Wellenausbreitung setzt sich hier aus einer longitudinalen wie auch transversalen Komponente zusammen, wobei letztere verantwortlich für einen Energieübertrag der Welle in die Flüssigkeit ist.

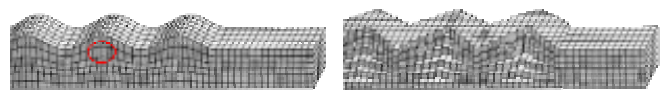


Abbildung 3: a) Rayleigh Welle und b) Love Welle

Anders dagegen bei der Love Welle. Diese horizontal polarisierte Transversalwellen oder Scherwellen, die eine Teilchenauslenkung parallel zur Oberfläche besitzt, vermeidet nahezu jede akustische Dämpfung und zeigt entsprechend wenig Verluste. Da auch publizierte Ergebnisse [3],[4] der Love Welle die höchste Empfindlichkeit bei der Analyse in flüssigen Umgebungen bescheinigen, wird die Realisierung eines Oberflächenwellen-Sensors auf Basis einer Love Welle favorisiert.

Love Wellen werden generiert, indem man auf den IDT's eine weitere Schicht aufbringt, die die Funktion eines Wellenleiters ausübt. Als Bedingung für ein Ausbreiten einer Love Welle muss erfüllt sein, dass die Ausbreitungsgeschwindigkeit in dieser Schicht kleiner als die des Substratmaterial ist [5]. Als geeignet hat sich u. a. SiO₂ herausgestellt. So wird im Falle einer Wellenausbreitung der Grossteil der akustischen Energie in der Wellenleiterschicht an der Grenzfläche zur zu untersuchenden Flüssigkeit konzentriert, woraus die hohe Empfindlichkeit abzuleiten ist.

Aufbau und Herstellung der Bauelemente

Die Herstellung von Oberflächenwellen Bauelemente basiert auf der in der Halbleitertechnologie angewendeten Planartechnik. Der

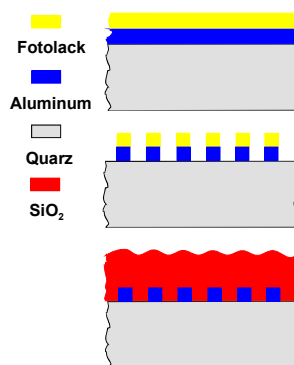


Abbildung 4: Herstellung der Oberflächenwellensensoren

Aufbau erfolgt im Allgemeinen aus einer exakt festgelegten Folge von ganzflächig abgeschiedenen mikrostrukturierten Schichten aus leitenden und nichtleitenden Materialien auf piezoelektrischem Quarzsubstrat. Nachdem Aluminium ganzflächig aufgesputtert worden ist, werden die Strukturen mittels Fotolithographie in den Fotolack übertragen. In einem Plasmaätzter erfolgt das Trockenätzen, woran sich ein Veraschen des Fotolacks anschließt. Unter Verwendung von Silan und N₂O (Lachgas) wird SiO₂ (Oxid) über eine PECVD Abscheidung aufgebracht. Abschließend

werden durch eine weitere Fototechnik und einem Ätzschritt die Anschlüsse zum Kontaktieren der Bonddrähte freigelegt.

Sensorprinzip

Siliziumdioxid und hier besonders das poröse PECVD Oxid stellt einen einfachen feuchtempfindlichen Film dar, der Wasserstoff und OH-Gruppen adsorbiert. Diese Kopplung beeinflusst im erheblichen Maße Amplitude und Geschwindigkeit der akustischen Oberflächenwelle (OFW). In Folge der Adsorption ändert sich die Ausbreitungsgeschwindigkeit der OFW, das in einer Veränderung der Resonanzfrequenz resultiert. So wird über die Massenbelegung (*saw mass loading*) auf die mechanischen (akustischen) Eigenschaften der angrenzenden Flüssigkeit geschlossen. Ein Maß für den Wassergehalt stellt in diesem Zusammenhang die resultierende Frequenzänderung dar, die nach dem Auskoppeln in der Auswertereinheit detektiert werden kann. Im Allgemeinen zeigt die Empfindlichkeit der Wellenleiterschicht ein Optimum bei einem bestimmten Verhältnis von h/λ . Da die Materialparameter von PECVD Oxid nicht genau bekannt sind, wurden die Parameter von geschmolzenem Glass verwendet. Auf ST Quarz als Substratmaterial ergibt sich dann ein Verhältnis von $h/\lambda = 0,18$ [6].

Sollte die Empfindlichkeit des Oxids nicht ausreichend sein, ist darüber hinaus das Aufbringen einer weiteren Schicht auf dem PECVD Oxid angedacht. Dieser (bio)chemische Film sollte nicht dicker als 100 nm sein, da er andernfalls selbst schon eine signifikante Massenbelegung darstellt.

Für die Sensoren ist eine Maske entworfen worden, die Resonatorstrukturen und Verzögerungsleitungen (*delayline*) in verschiedenen Ausführungen berücksichtigt. Für die Funkabfrage wird der Eintorresonator favorisiert, einem IDT, der links und rechts von einigen hundert Reflektoren umgeben ist und nur eine Antenne benötigt. Für die drahtlose Funkauslesung wurde beim Layout entsprechend das ISM-Band von 433.07 MHz bis 434.77 MHz berücksichtigt.

Messaufbau und Ergebnisse

Die ausgesägten Sensoren werden auf einen Chipträger geklebt und über dünne Bonddrähte mit den als 50 Ω Mikrostreifenleitungen ausgelegten Leiterbahnen kontaktiert. Über ein Anpassnetzwerk, im einfachsten Fall einer Induktivität, welche die statische Kapazität des IDT kompensiert, erfolgt der Anschluss an einen Netzwerkanalysator. Im Verlauf der Charakterisierung befindet sich der gesamte Chipträger in der Klimakammer. Der PC dient der Sollwertsteuerung von Temperatur und relativer Feuchte und startet bei Erreichen die Messung mit dem Netzwerkanalysator.



Abbildung 5: Messaufbau zur Charakterisierung der Sensoren

Eine erste Charakterisierung der Sensoren erfolgte über die in der Netzwerkanalyse im höheren Frequenzbereich gebräuchlichen Streu- oder kurz S-Parameter. Bei dieser Zweitor-Beschreibung treten an die Stelle von Spannungen und Ströme normierte Wellen, die in bzw. aus dem Zweitor herauslaufen. Maßgeblich für den untersuchten Eintorresonator ist der Eingangs-Reflektionskoeffizient S_{11} . Er ist ein Maß, wie viel der eingekoppelten elektromagnetischen Welle **nicht** in eine akustische Welle konvertiert d.h. reflektiert wird. Minimal ist der S_{11} Parameter im Bereich der Resonanzfrequenz.

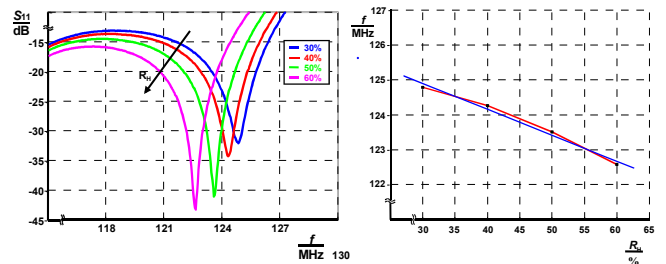


Abbildung 6: rechts) Verhalten der Resonanzfrequenz in Abhängigkeit der relativen Feuchte R_H . Empfindlichkeit der Sensoren

Die ersten Messergebnissen wurden an einem Eintorresonator mit 20 Fingerpaaren und 500 Reflektoren bei einer Temperatur von $T = 50^\circ\text{C}$ vorgenommen. Aus dem Diagramm (Abbildung 6 links) kann man eine deutliche Verschiebung der Resonanzfrequenz für höhere relative Feuchten R_H hin zu kleineren Frequenzen entnehmen. Trägt man die Minima von S_{11} über die Feuchte (Abbildung 6 rechts) auf, kann aus der Steigung der Ausgleichsgeraden eine Empfindlichkeit von $-74 \text{ kHz}/\% R_H$ entnommen werden.

Ausblick

In den Voruntersuchungen konnte eine geeignete akustische Oberflächenwelle für die Flüssigkeitsanalyse gefunden werden. Auf diesen Kenntnissen basieren der Entwurf und die Layouts der Sensoren. Über angefertigte Fotomasken wurden Sensoren auf Quarz-Wafer hergestellt, die über einen Messaufbau untersucht worden sind. Die ersten Ergebnisse bestätigen das hohe Potenzial derartiger Sensoren durch die gemessenen hohen Empfindlichkeiten.

In den anstehenden Arbeiten wird der Aufbau einer Übertragungsstrecke vorangetrieben, die eine Signalanalyse bzw. Auswertung der Funksignale nach sich zieht. Untersuchungen der Sensoren in Öl und der anschließende praktischer Einsatz in Transformatoren runden das Arbeitsprogramm ab.

- ¹ F. Flottmeyer, G. Lange, T. Miksa, W. Neldner, U. Sundermann, Betrachtung zum Problem der Nutzungsdauer von Hochspannungs-Transformatoren und -Wandler, ETG-Fachbericht 55, VDE-Verlag, (1995)
- ² L. Reindl, G. Scholl, F. Schmidt, Funksensorik und Identifikation mit OFW Sensoren, VDI Berichte Nr. 1530 (2000), p. 799-810
- ³ J.C. Andle, J.F. Vetelino, Acoustic wave biosensors, Sensor and Actuators A44, (1994), p. 167-176
- ⁴ B. Jakoby, Michael J. Vellekoop, Viscosity sensing using a Love-wave device, Sensor and Actuators 68A, (1998), S. 275-281
- ⁵ J. Du, G. L. Harding, P.R. Dencher, D. Barnett, E. Howe, A study of Love wave acoustics sensors, Sensor and Actuators A56, (1996), Seite 211-219
- ⁶ G. Kovacs, G.W. Lubing, M.J.Vellekoop, A. Venema, Love waves for (bio)chemical sensing in liquids, IEEE Ultrasonics Symposium, (1992), Seite 281-285