

Die Modellierung der Sensorfunktion von SAW-Resonatoren

St. Klett, M. Binhack, W. Buff, M. Hamsch, R. Hoffmann

Technische Universität Ilmenau, Institut für Festkörperelektronik, Ilmenau; Email: stefan.klett@tu-ilmenau.de

Einleitung

SAW-Resonatoren eignen sich wegen ihrer hohen Güte zur Aufnahme und zum Zwischenspeichern von HF-Energie in passiven Telemetriesystemen [1]. Für den Einsatz in Sensorsystemen spricht die Beeinflussbarkeit ihrer Resonanzeigenschaften unter Einwirkung physikalischer Messgrößen [2] durch die Verwendung spezieller Substrate (Temperaturmessung), durch eine veränderte Gestaltung ihres Aufbaus (Änderung der Ausbreitungsbedingungen der SAW) oder durch eine elektrische Beeinflussung (Verstimmung) infolge der äußeren Beschaltung. Die letztgenannte Variante gestattet eine Separation des sensitiven Elementes vom Resonator, der dann geschützt vor extremen Umwelteinflüssen betrieben werden kann. Hintergrund für dieses Funktionsprinzip bildet eine Anwendung als Temperatur- und mechanischer Spannungssensor im Kraftwerksanlagenbereich.

Die Grundidee für dieses Sensorprinzip ist die Integration eines kapazitiven Sensors in das Anpassnetzwerk des Antenne – SAW-Resonator – Systems. Durch Änderung der Parameter des Anpassnetzwerkes (zum Beispiel ΔC) wird die Resonanzfrequenz des Resonators verschoben. Diese Frequenzänderung wird mit der Abfrageeinheit detektiert und ausgewertet.

Abbildung 1 veranschaulicht dieses Prinzip am Beispiel einer Doppelresonatoranordnung. Bei geeigneter Wahl der Resonatorparameter und der Anpasseelemente ergibt sich nur bei einem Resonator eine merkliche Frequenzverschiebung, sodass der andere Referenzzweck dient [3].

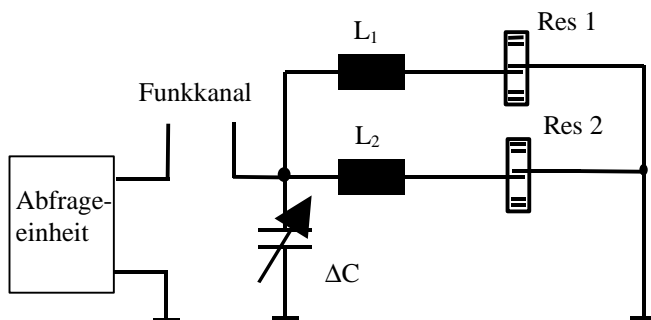


Abbildung 1: Hybrid Sensor mit Doppelresonatoranordnung

Obwohl nur wenige Elemente zu fixieren sind, ist es schwierig allen Anforderungen im Design-Prozess zu entsprechen, wie: Einhaltung gesetzlichen Restriktionen zur Nutzung des ISM-Bandes, Umsetzung der hohen Resonatorgüte, Realisierung eines Ziehbereiches Δf innerhalb eines akzeptablen Bereiches der resultierenden Fehlanpassung, Implementierung der Sensorfunktion mit vorgegebener Empfindlichkeit und Bandbreite sowie Berücksichtigung der sich aus dem Abfrageregime ergebenden Anforderungen. Weiterhin ist aus Gründen der Energieeffizienz bei passiven Systemen die Anzahl zusätzlicher (verlustbehafteter) Elemente zu minimieren.

Es ist die Aufgabe des computergestützten Entwurfs solche Arbeits-/Parameterbereiche einzugrenzen, bei denen ein praktikabler Kompromiss eine technische Umsetzung gestattet.

Parameterextraktion für das Resonatormodell

Die gemessenen elektrischen Eigenschaften von Eintor-Resonatoren, welche ihr elektro-mechanisches Verhalten wieder spiegeln, können mit dem bekannten Ersatzschaltbild [4] nach Abbildung 2 modelliert werden.

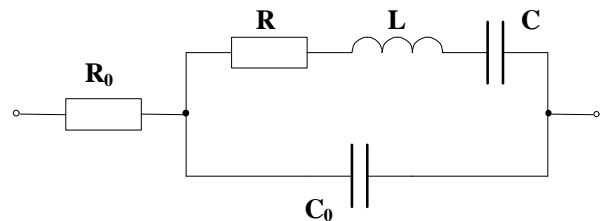


Abbildung 2: Resonatorersatzschaltbild

Die Hauptresonanz des RLC-Serienkreises (mechanisches Analogon) wird durch eine Parallelresonanz, hervorgerufen durch C_0 (hauptsächlich statische Kapazität), erweitert. Beide Resonanzen werden mit einem Impedanz- oder Netzwerk-Analysator in Form von S_{11} -Parametern bestimmt. Zur besseren Darstellung eignen sich \underline{Y} - als auch \underline{Z} -Parameter in Polardarstellung wie in Abbildung 3.

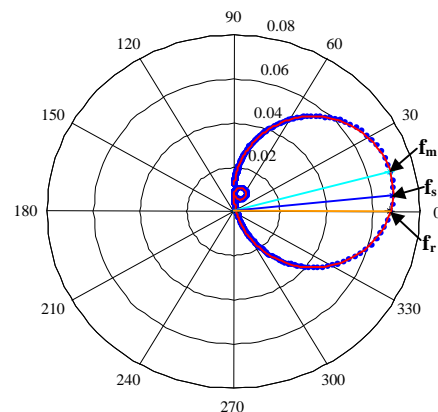


Abbildung 3: \underline{Y} Polardarstellung eines RFM ro2112.

Der RLC Zweig formt einen Kreis mit dem Durchmesser $1/R_0$ symmetrisch zur reellen Achse der durch die Paralleladmittanz $j\omega_s C_0$ nach oben und durch $1/R_0$ nach rechts verschoben wird. Bedingt durch das Auftreten von Serien- und Parallelresonanz ist die klassische Resonanzbedingung aufgebrochen. Es treten drei Serien- (gekennzeichnet in Abbildung 3) und drei Parallelresonanzfrequenzen auf.

Über einfache Beziehungen [5] für die Resonanzen und Hilbert-Transformation können die Ersatzelemente bestimmt werden. Nebenmoden werden durch weitere aufgestockte RLC-Kreise modelliert. Abbildung 3 zeigt die Messdaten punktiert und eine Modellrückrechnung als Linie. Ein Nebenmode ist durch den kleineren Kreis dargestellt. Die Ersatzelemente wurden wie folgt bestimmt:

$$\begin{aligned} R_0 &= 1.55 \, \Omega, & C_0 &= 3.76 \, \text{pF}, \\ R &= 12.85 \, \Omega, & L &= 65.83 \, \mu\text{H}, & C &= 2.05 \, \text{fF}, \\ Q &= 13 \, 955, & f_s &= 433.489 \, \text{MHz}. \end{aligned}$$

Anpassung von Resonatoren

Zur maximalen Energieübertragung ist eine Anpassung von Resonatoren an die Antennenimpedanz (meist 50 Ω reell) notwendig. Dies wird durch Blindkomponenten in Form von L-, Pi-, oder T-Vierpolen erreicht. Allerdings beeinflusst das Anpassnetzwerk das Resonanzverhalten der Resonators in ähnlicher Weise wie das "Ziehen" der Frequenz. Mit den üblichen analytischen Formeln kann dies nicht berücksichtigt werden, das Anpassnetzwerk muss numerisch bestimmt werden. Abbildung 4 zeigt den Resonator aus Abbildung 3 angepasst mit einem L-Glied im Smith-Diagramm.

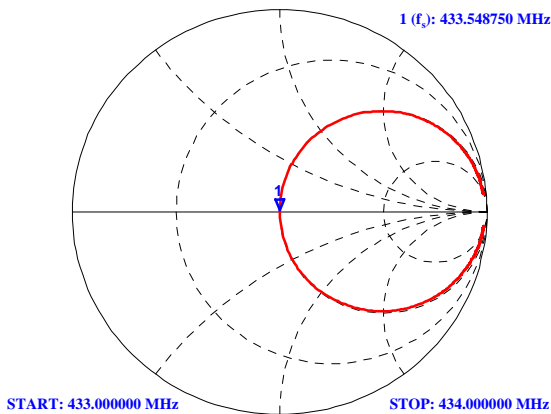


Abbildung 4: Angepasster Resonator, $R_m = 50.1 \Omega$, $L_m = 242.8 \mu\text{H}$ und $C_m = 0.555 \text{ fF}$

Ein angepasster Resonator verhält sich wie ein einfacher RLC-Kreis und wird mit seiner Eigenfrequenz und entsprechender Abklingzeit auf das Signal der Abfrageeinheit antworten. Seine Güte entspricht der des akustischen Zweiges im Ersatzschaltbild.

Ziehen der Frequenz

Das Ziehen der Frequenz ist eine altbewährte Praxis beim Abgleich von Quarzoszillatoren. Wir übertragen dieses Prinzip in das Anpassnetzwerk hinein. Das ziehende Element ist der eigentliche Sensor, im Beispiel ein variabler Kondensator.

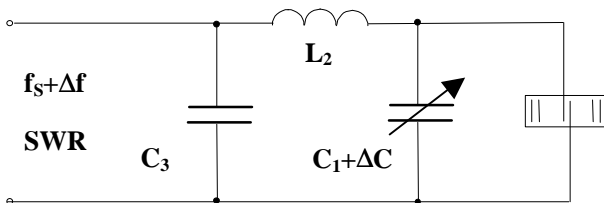


Abbildung 5: Ziehen der Frequenz mit einem π-Glied

T- und Pi-Glieder erweitern die Variationsbreite ihrer Parameter durch einen weiteren Freiheitsgrad gegenüber L-Gliedern. Anpassnetzwerke sind so zu entwerfen, dass sie einen großen Ziehbereich Δf der Frequenz ermöglichen bei kleinem, akzeptablen Bereich der Fehlanpassung ausgedrückt durch das Stehwellenverhältnis (SWR). Eine Fehlanpassung reduziert Reichweite bei der Funkabfrage.

Entsprechend der Schaltung in Abbildung 5 wurde Anpassung bei zwei verschiedenen Sätzen von Parametern erreicht, siehe Tabelle.

C_1 in pF	4.27	66.31
L_2 in nH	49.46	5.53
C_3 in pF	4.18	37.46
f_s in MHz	433.573	433.499

Jeder Satz zeigt unterschiedliches Ziehverhalten bei Änderung von C_1 . Für den ersten Satz ergibt sich für $C_1 = (2-8) \text{ pF}$ eine Ziehbereich von $\Delta f = 97 \text{ kHz}$ und für den zweiten im Bereich $C_1 = (60-70) \text{ pF}$ ein $\Delta f = 2 \text{ kHz}$. Damit eignet sich der erste Satz zur Realisierung als Sensor und der zweite als Referenz. Für beide Parametersätze ist in diesen Bereichen das $\text{SWR} < 3$. Dargestellt ist dies für den ersten Parametersatz in Abbildung 6.

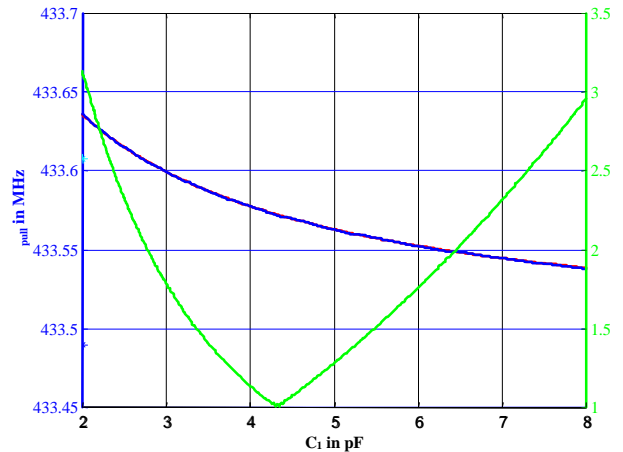


Abbildung 6: Ziehbereich und SWR als Funktion von C_1 .

In Abbildung 6 wurde zusätzlich das Verhalten nach dem Zusammenhang in folgender Gleichung (deckend) dargestellt.

$$f_{pull} = f_s \sqrt{1 + \frac{C}{C_0 + C_1 - \frac{1}{(2pf_s)^2 L_2}}}$$

Zusammenfassung

Für ein neues Sensorkonzept wurde die Simulations- und Design-Strategie umrissen. Ein verbessertes Verfahren zur Berechnung der Ersatzelemente von Resonatoren sichert eine hohe Genauigkeit der folgenden Entwurfsschritte. Das Problem der wechselseitigen Beeinflussung von Anpassnetzwerk und Resonanzverhalten des Resonators wurde erörtert und auf das Ziehen der Frequenz mit Anpassnetzwerken erweitert. Dieser Ansatz eröffnet vielfältige Sensoranwendungen, da das SAW-Element nicht mit der eigentlichen Messgröße beaufschlagt wird, sondern mehr als Transponder dient.

Literatur

- [1] Buff, W., "SAW Sensors", Sensors and Actuators, (17) 1989, S. 55-66
- [2] Buff, W. et al., "A Difference Measurement SAW Device for Passive Remote Sensing", IEEE Ultrasonics Symp., 1996, S. 343-346
- [3] Binhack, M. et al., "A Combination of SAW-Resonators and Conventional Sensing Elements for Passive Remote Sensing", Proc. IEEE Ultrasonics Symp., 2000, S. 495-498
- [4] Smith, W.R. et al., "Analysis of Interdigital Surface Wave Transducers by Use of an Equivalent Circuit Model", IEEE Trans. MTT-17, (11) 1969, S. 856-864
- [5] Klett, S. et al., "Progress in Modeling of Sensor Function for Matched SAW Resonators", IEEE Ultrasonics Symp., 2002