

Einleitung

Mobile Kommunikation und Information nimmt in privaten und industriellen Bereichen derzeit einen sehr hohen Stellenwert ein. Durch die Entwicklung von Mobiltelefonen, Wireless-LAN-Modems, Bluetooth-Headsets und anderen Hardwarekomponenten ist es heutzutage möglich, flexibel und mobil an vielen Orten der Welt Informationen zu versenden und zu empfangen. Grundvoraussetzung dafür sind eine entsprechende Funknetzabdeckung und leistungsfähige Empfangs- und Sendegeräte. Deshalb arbeiten Mobiltechnologiefirmen mit Hochdruck an der Verbesserung und Erneuerung derzeitiger Standards, um die mobile Kommunikation der Zukunft noch schneller und effizienter zu gestalten. Ein wichtiges Ziel ist der Zugang zum globalen Kommunikationsnetz von jedem Ort der Welt.

Auf die Optimierung des Hochfrequenz-Schaltungsteils (engl. *HF-Frontend*) der Kommunikationsgeräte wird dabei ein Hauptaugenmerk gelegt, da dieses Schaltungsteil einen erheblichen Einfluss auf die Übertragungs- und Empfangseigenschaften hat. Die vorliegende Arbeit leistet einen Beitrag zur Optimierung von Filterbauelementen, die in HF-Frontends von z.B. Mobiltelefonen zum Einsatz kommen, um die Sende- und Empfangseigenschaften dieser Geräte an die Bedürfnisse der Kommunikationstechnologie von heute und morgen anzupassen.

Die elektrischen Eigenschaften der HF-Frontends von Mobiltelefonen müssen auf die Anforderungen mobiler Kommunikation ausgelegt sein, und dabei kommt Oberflächenwellen(OFW)-Filterbauelementen aufgrund ihrer elektrischen Eigenschaften eine Schlüsselrolle zu. Diese Bauelemente werden zur Filterung hochfrequenter Signale eingesetzt, so zum einen von Eingangssignalen, die von der Antenne empfangen werden, als auch von Ausgangssignalen, welche im Digitalteil des Telefons generiert und im Analogteil verstärkt und aufbereitet werden.

Die Vorteile von Oberflächenwellen-Filterbauelementen gegenüber konventionellen Filterbauelementen liegen in der mit dieser Technik möglichen hohen Sperrdämpfung, der niedrigen Durchgangsdämpfung und der hohen Flankensteilheit der Filterkennlinie. Außerdem können zusätzliche elektrische

Funktionen, z.B. Symmetrie- oder Wellenwiderstandstransformationen, integriert werden. Darüberhinaus sind Oberflächenwellen-Filterbauelemente aufgrund der hochintegrierten und kompakten Bauform (mit minimalen Abmessungen von aktuell $1,4\text{ mm} \times 2,0\text{ mm} \times 1,2\text{ mm}$ ($B \times H \times T$)) sowie der relativ hohen Leistungsfestigkeit prädestiniert für den Einsatz in mobilen Kommunikationsgeräten.

Aufgrund des ständigen Bestrebens der Hersteller der Mobilkommunikationsgeräte die Abmessungen Ihrer Produkte zugunsten der Portabilität zu minimieren, wird die Entwicklung größenreduzierter Bauelemente forciert. Da die verwendeten Gehäuse im Vergleich zum ungehäusten Chip generell relativ große Abmessung aufweisen, wie in Abbildung 0.1 erkennbar ist, wird versucht, diese Diskrepanz durch neue Häusungstechniken zu minimieren. Aus mechanischer Sicht stehen der Verkleinerung nur geringe fertigungsbedingte Einschränkungen entgegen. Durch die Reduktion der Gehäusegröße können sich jedoch die elektrischen Eigenschaften merklich verschlechtern, da verstärkte parasitäre Effekte im Gehäuse sich nun auf die elektromagnetischen Eigenschaften des gehäusten Bauteils auswirken. So haben z.B. innere Verkopplungen im Gehäuse negativen Einfluss auf das Dämpfungsniveau im Sperrbereich des Filters, oder elektrische Eigenschaften von Leiterstrukturen beeinflussen die Flankensteilheit. Somit werden die elektrischen Eigenschaften der Filterstrukturen im gehäusten Zustand nicht unverändert an die äußeren Anschlüsse des Gehäuses übertragen. Um die Einflüsse des Gehäuses auf die Filtercharakteristik trotz reduzierter Gehäusegröße zu minimieren, müssen bei hochintegrierten Gehäusen auf das jeweilige Filter abgestimmte Optimierungs- und Anpassungsmaßnahmen angewandt werden. Die Darstellung geeigneter entwickelter Maßnahmen ist ein Ziel dieser Arbeit.

Ein weiterer Schwerpunkt der Arbeit ist die Optimierung der Testumgebung für Oberflächenwellen-Filterbauelemente (Abbildung 0.1). Auf ähnliche Weise, wie bei Gehäusen beobachtet, beeinflussen die elektrischen Eigenschaften bisheriger Testplatinen die Messergebnisse gehäuster Filterbauelemente, die zur Ermittlung der Spezifikation seitens des Herstellers und zur Musterprüfung durch den Kunden verwendet werden. Um die Eigenschaften der gehäusten Filter möglichst unbeeinflusst durch die Platine messen zu können, wurden bestehende Platinen auf ihre parasitären Effekte hin untersucht und Designrichtlinien entwickelt, deren Anwendung eine gezielte Unterdrückung parasitärer Effekte ermöglicht. Diese Arbeiten führten zu modular kombinierbaren Designs für die unterschiedlichen Teilbereiche der Platine. Eine Gesamtkonzeption von Platinen wurde hier nicht durchgeführt, da diese speziell auf das jeweilige zu messende Filter angepasst werden müssen. Eine Anpassung muss hier hinsichtlich der elektrischen Anschlüsse, der Gehäusebauform, des zu verwendenden Platinenmaterials und der Testumgebung

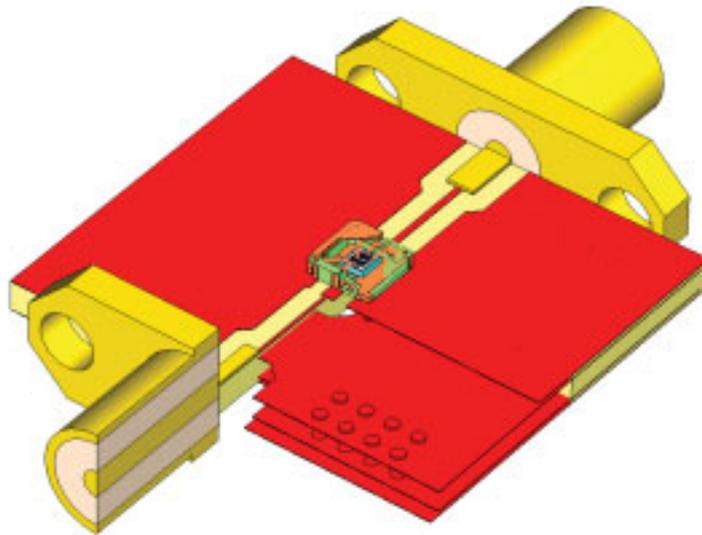


Abb. 0.1: Schnittbild des Simulationsmodells eines gehäuseten Filters kontaktiert auf der Testumgebung aus Platine und Anschlussbuchsen.

vorgenommen werden. Die erzielten optimierten elektrischen Eigenschaften von Testplatinen wurden in einem weiteren Schritt auf den Kontaktbereich für die Anwendungsplatine, z.B. in einem Mobiltelefon, übertragen. Auf diesem kann die Funktion des Bauteils in der Anwendung entsprechend den Spezifikationen garantiert werden.

Um die in der Arbeit untersuchten Gehäuse und Platinenstrukturen simulieren und damit auch optimieren zu können, waren komplexe Simulationsmethoden und -techniken nötig. Diese werden in Kapitel 2 genauer erläutert. In Abschnitt 2.3.3 wird ausblickend ein modernes Optimierungsverfahren erläutert, das eine effiziente automatisierte Bearbeitung von Problemstellungen mit einer großen Anzahl an Freiheitsgraden ermöglicht, wie sie bei den in der Arbeit untersuchten Gehäuse- und Platinenstrukturen vorkommen. Dieses Optimierungsverfahren wurde implementiert und beispielhaft an einer komplexen planaren Mikrowellenschaltung getestet.

Zu Beginn sollen zur Einführung in das Thema in Kapitel 1 die Grundlagen der Oberflächenwellenbauelemente vermittelt und die verschiedenen Filterstrukturen erklärt werden. Darüber hinaus sind die unterschiedlichen Häusungstechniken erläutert, die bei Oberflächenwellenbauelementen zum Einsatz kommen. Damit werden die Grundlagen für die in der Arbeit dargestellten Untersuchungen gelegt, die letztendlich mobile Kommunikation noch effizienter machen werden.

1 Motivation und Einführung

Um die prinzipielle Funktionsweise von Oberflächenwellen-Filterbauelementen verstehen zu können, werden im Folgenden die physikalischen Grundlagen, die möglichen Filterstrukturen und die zum Design verwendeten Simulationmethoden erläutert. Anschließend werden die bei diesen Bauelementen zum Einsatz kommenden Häusungstechniken dargestellt, die einen technischen Einsatz erst ermöglichen.

1.1 Oberflächenwellen-Filterbauelemente

1.1.1 Funktionsweise von Oberflächenwellen-Bauelementen

Akustische Oberflächenwellen-Bauelemente (OFW-Bauelemente, engl.: *Surface Acoustic Wave (SAW) devices*) basieren auf der oberflächengeführten Ausbreitung elastischer Wellen auf Substratmaterialien mit piezoelektrischen Eigenschaften. Aufgrund des piezoelektrischen Effekts [1] ergibt sich bei manchen Materialien bei anliegender elektrischer Spannung eine elektromechanische Wechselwirkung. Diese zeigt sich in einer mechanischen Verformung, die durch die, von der anliegenden Spannung bewirkte, elektrische Ladungstrennung im Material hervorgerufen wird. Dieser Effekt tritt bei Materialien auf, deren Kristallstrukturen nicht punktsymmetrisch sind. Einige Beispiele sind Quarz (SiO_2), Lithiumtantalat (LiTaO_3) und Lithiumniobat (LiNbO_3) [2, 3].

Durch geeignete Formgebung von Metallstrukturen auf der Oberfläche des Substratmaterials lassen sich verschiedene Funktionselemente, genauer Kontakt- bzw. Wandlerstrukturen und Reflexionsstrukturen, für OFW-Bauelemente erzeugen. Im linken Teil von Abbildung 1.1 ist die Skizze einer Wandlerstruktur (Interdigitalwandler (IDT)) gezeigt, an der elektrische Spannung angelegt und abgegriffen werden kann [4]. Die unterschiedliche Polarität der benachbarten Finger bewirkt eine Verformung der Kristalloberfläche. Bei kontinuierlich anliegender sinusförmiger Spannung (Wechselspannung) an den Fingerstrukturen wird eine akustische Welle angeregt, die sich entlang der Oberfläche in beide Richtungen der Wandlerstruktur ausbreitet.

Über Reflexionsstrukturen, die im rechten Teil des Bildes 1.1 skizziert sind, kann die Oberflächenwelle reflektiert und somit deren Ausbreitungsrichtung umgekehrt oder gelenkt werden. Abhängig von der Anzahl der Metallstreifen wird die Welle anteilig reflektiert und transmittiert oder vollständig reflektiert.

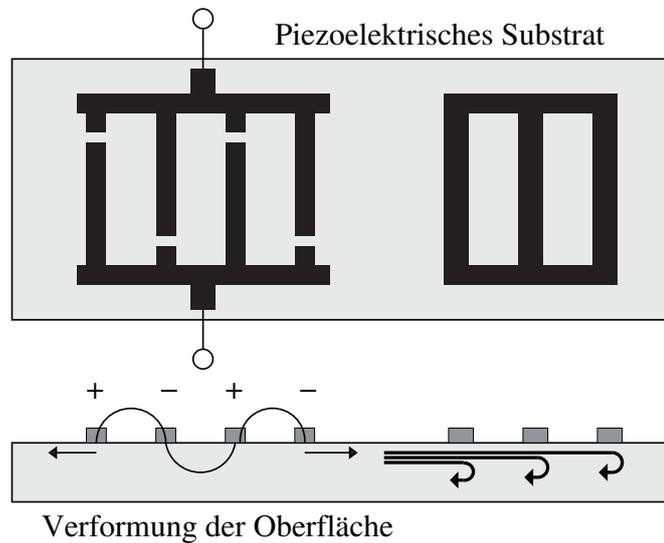


Abb. 1.1: Basis-Funktionselemente von akustischen Oberflächenwellen-Bauelementen.

Während der Anregung oder Ausbreitung der Oberflächenwelle können parasitäre Effekte, wie die Streuung der Oberflächenwelle [5] oder die Anregung von Volumenwellen [6], auftreten. Diese müssen durch geeignete Maßnahmen unterdrückt werden [7].

Oberflächenwellen-Bauelemente werden heutzutage in den verschiedensten Geräten und über ein großes Frequenzspektrum eingesetzt. Einige Beispiele hierzu sind [8–13]:

- **Zwischenfrequenzfilter in TV- und Satellitenempfängern**

Der Durchlassbereich liegt hier im 35-40 MHz Bereich (TV) bzw. bei bis zu 500 MHz (Satellit). Für diese Anwendung wird eine geringe Welligkeit (ca. 0,5 dB) der Filterkennlinie im Durchlassbereich und eine konstante Gruppenlaufzeit gefordert. Die Einfügedämpfung ist unkritisch. Das Sperrdämpfungsniveau muss größer gleich 40 dB betragen.

- **Resonatoren**

OFW-Resonatoren werden im Bereich von 100 MHz bis 1 GHz zur Frequenzstabilisation oder als Messwertaufnehmer, die über Umgebungsein-

flüsse verstimmt werden, eingesetzt. Dabei können Güten von 5000 bis 11000 erreicht werden.

- **Filter im Mobilfunkbereich (GSM und CDMA)**

Im Mobilfunk übernehmen OFW-Bauelemente sowohl die Funktion des Zwischenfrequenz- als auch des Eingangs- und Ausgangsfilters. Für Frontendfilter reicht der Frequenzbereich bis zu 5 GHz. Wichtig ist für diesen Einsatzzweck vor allem eine niedrige Einfügedämpfung und eine hohe Sperrdämpfung. Die verwendeten Filter besitzen hier Bandbreiten von 2% bis 5%.

- **Verzögerungsleitungen**

Verzögerungsleitungen werden hauptsächlich in der Radar- und Peiltechnik eingesetzt. Mit diesen kann eine elektrisch lange Signal-Strecke aufgebaut werden. Wichtige Kenngröße ist hier ein speziell abgestimmte elektrische Länge.

Die in dieser Arbeit dargestellten Untersuchung beschränken sich auf das Gebiet der OFW-Filterbauelemente im Mobilfunkbereich, die zur Verarbeitung hochfrequenter Signale eingesetzt werden.

1.1.2 Realisierbare Filterstrukturen

Durch die Kombination der Funktionselemente lassen sich unterschiedliche Filterstrukturen aufbauen, die für verschiedene Einsatzzwecke entwickelt wurden. Die einfachste Bauform, die in Abbildung 1.2 gezeigt ist, lässt sich durch in Serie positionierte IDTs auf einem Chipsubstrat erreichen.

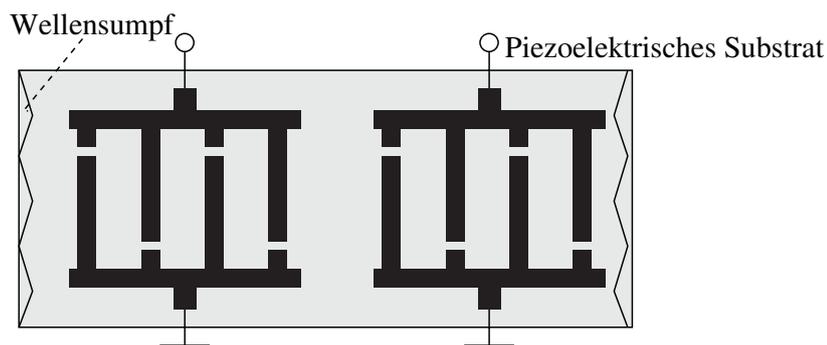


Abb. 1.2: Klassische OFW-Filterstruktur.

Da die Oberflächenwelle hier einfach durch einen IDT eingespeist und durch den zweiten abgegriffen wird, ist die Übertragungsfunktion durch das Produkt der Übertragungsfunktionen der beiden IDTs gegeben [14]. Da die IDTs

jeweils in eine Richtung in einen Wellensumpf abstrahlen, kann mit dieser Struktur nur eine minimale Einfügedämpfung von 6 dB erreicht werden. Aufgrund dieses hohen Wertes werden derartige Filter heute nur noch für Zwischenfrequenzfilter eingesetzt. Im Hochfrequenzbereich haben sich wegen der geforderten möglichst niedrigen Einfügedämpfung Filter durchgesetzt, die in Abzweigschaltungsstruktur (engl. *ladder-type*) oder als *Dual-Mode-SAW*-Anordnung (DMS) aufgebaut sind.

Ladder-type-Filter Beim *ladder-type*-Filter werden OFW-Resonatoren in einer Abzweigschaltungsstruktur kaskadiert. Diese OFW-Resonatoren bestehen, wie in Abbildung 1.3(a) dargestellt, aus einem Interdigitalwandler und zwei Reflektoren, die in den beiden Wellenausbreitungsrichtungen auf dem piezoelektrischen Substrat positioniert sind [15]. Um die Filtereigenschaften zu realisieren, werden beim *ladder-type*-Filter die elektrischen Eigenschaften der Einzelresonatoren verwendet. Es wird also keine Verkopplung der Interdigitalwandler über akustische Oberflächenwellen herbeigeführt. Diese wird hier gezielt vermieden.

Das elektrische Verhalten eines OFW-Resonators kann ohne Modellierung der Verluste, wie in Bild 1.3(b) gezeigt, durch Parallelschaltung einer statischen Kapazität C_0 [16] und eines Serienresonanzkreises nachgebildet werden [17]. Dabei stellt die statische Kapazität C_0 die kapazitiven Effekte zwischen den Fingerstrukturen dar, und durch den Serienresonanzkreis aus L und C_1 werden die Eigenschaften der OFW-Resonanz modelliert. Aus dem

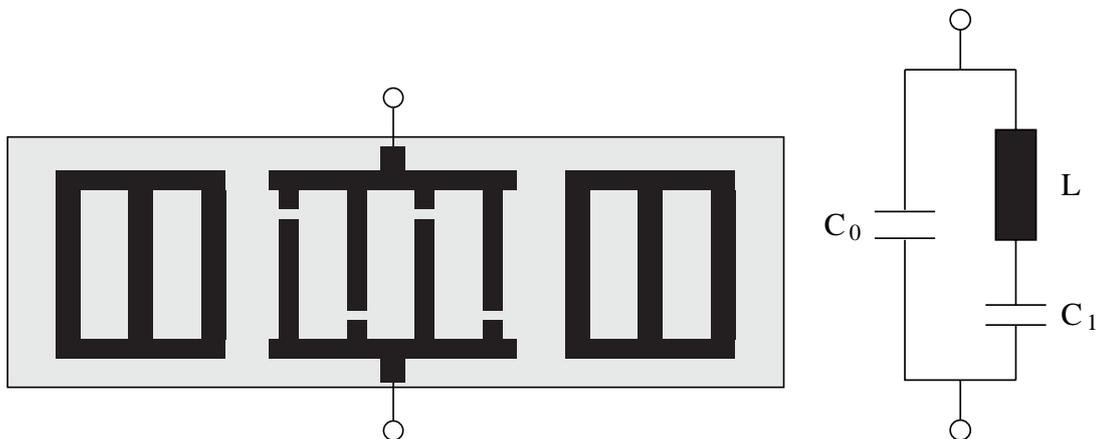


Abb. 1.3: Skizze und Ersatzschaltplan eines OFW-Resonators.

Ersatzschaltplan kann man ableiten, dass die Impedanzkennlinie des modellierten verlustlosen OFW-Resonators eine Nullstelle bei der Serienresonanzfrequenz

$$f_{rs} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_1}} \quad (1.1)$$