

1 Einleitung

Elektronische Filter sind wichtige Komponenten in jedem Funk-, Kommunikations-, Mess- oder Regelsystem. So breit wie das Spektrum der Einsatzgebiete und der Frequenzbereich ist, so vielfältig sind die Realisierungsformen. Bei Empfangssystemen steht die Selektion von gewünschten Signalkomponenten aus einer Überlagerung von Störsignalen oder Signalen anderer Funkdienste im Vordergrund, bei Sendesystemen liegt das besondere Augenmerk auf der spektralen Formung des Signals und bei Regelsystemen auf der gezielten Beeinflussung des dynamischen Systemverhaltens.

Viele Jahre dominierten Filterstrukturen aus konzentrierten Bauelementen, und es entwickelten sich Methoden zur systematischen Synthese. Die Nutzung immer höherer Frequenzen des elektromagnetischen Spektrums machten andere Realisierungsformen mit verteilten Elementen wie Hohlraumresonatoren oder Filter in Streifenleitertechnik erforderlich. Eine Revolution im Audiofrequenzbereich löste die Verbreitung des Operationsverstärkers Ende der sechziger Jahre aus, der es ermöglichte, Filter höherer Ordnung ohne den Einsatz von Spulen zu realisieren und mit Fortschreiten der technologischen Entwicklung auch monolithisch zu integrieren. Konnten Toleranzen bis dahin durch mechanisch betätigte Abstimmeelemente kompensiert werden, so stellte sich bei den integrierten Filtern das Problem neu. Neben der Justierung von Elementen auf dem Chip unmittelbar nach der Herstellung wurden auch automatische Abstimmssysteme entwickelt, die in der Lage sind, Toleranzen und Drift im laufenden Betrieb zu kompensieren. Eine wichtige Ergänzung dieser zeitkontinuierlichen Systeme stellen heute im Basisbandbereich abgetastete Systeme wie Switched-Capacitor-Filter und vor allem die digitale Signalverarbeitung dar, bei der die Filtereigenschaften durch Toleranzen im Produktionsprozess nicht beeinflusst werden.

Filter bei Mikrowellenfrequenzen blieben lange Zeit eine Domäne der klassischen Aufbautechniken. Die zunehmende Nutzung von Funkdiensten im höheren Gigahertz-Bereich wie beispielsweise für KFZ-Abstandsradare, WLAN oder Richtfunktechniken für schnelle Internetzugänge durch den Endverbraucher machen auch in diesem Bereich kompaktere Realisierungen bei sinkenden Kosten erforderlich. Obwohl die Bandbreite der integrierten Basisband-Filterkonzepte durch ständige Verbesserungen der Fertigungstechnologie immer größer wird, reicht sie nach wie vor nicht aus, um Filter bei Mikrowellenfrequenzen zu realisieren.

Eine potentiell kostengünstige und platzsparende Lösung stellt die Integration von Mikrowellenfiltern in monolithisch integrierten Mikrowellenschaltungen (MMIC, *Monolithic Microwave Integrated Circuit*) dar. Bedingt durch die relativ hohen Verluste von integrierten Leitungen und Spulen [1] können nur Strukturen mit geringer Güte realisiert werden. Daher bereitet es insbesondere bei schmalbandigen Filtern Probleme [2], bekannte Filterkonzepte wie das Abzweignetzwerk aus konzentrierten Bauelementen oder planare Leitungsfiler direkt zu integrieren [3].

In den letzten Jahren wurden in einer Reihe von Arbeiten verschiedene Lösungen dafür untersucht. Eine Möglichkeit besteht in der Kompensation von Verlusten in den Leitungen [4–6] oder Spulen [7, 8] durch negative Widerstände (NIC, *Negative Impedance Converter*). Ein anderer Ansatz schlägt vor, die Spulen durch eine aktive Schaltung zu ersetzen, die ähnliches Verhalten aufweist, wie zum Beispiel ein mit einem Kondensator terminierter Gyator [9]. Bei Filterstrukturen mit einer Ringleitung als Resonator kann ein Verstärker zur Kompensation der Verluste in den Ring eingefügt werden [10].

Ein prinzipielles Problem bei integrierten Mikrowellenfiltern sind die Auswirkungen von Fertigungstoleranzen im Herstellungsprozess. Ein nachträglicher Abgleich beispielsweise durch Lasertrimmung ist relativ kostenintensiv, daher ist es günstiger, wenn Topologien verwendet werden können, die unempfindlich gegenüber diesen Toleranzen sind. Vorteilhaft ist dabei ebenfalls, dass sich auch Veränderungen durch Temperaturdrift und Alterung weniger stark auswirken.

Eine andere Lösung stellt der Ansatz dar, in den Filterstrukturen abstimmbare Elemente einzusetzen, die über eine Steuerung oder Regelung die Veränderungen kompensieren. Bei niedrigen Frequenzen werden solche Verfahren erfolgreich in integrierten Schaltungen eingesetzt. Den meisten Konzepten gemein ist das Prinzip, dass die Abweichung an einem separaten Filter oder Teil des Filters (Master) geschätzt und daraus eine Stellgröße für das Filter im Signalpfad (Slave) abgeleitet wird. Dieses Konzept ist insbesondere für integrierte Schaltungen geeignet, da die Toleranzen alle Elemente auf einem Chip gleichermaßen betreffen und so ein guter Gleichlauf zwischen dem Master im Regelkreis und dem gesteuerten Slave erzielt werden kann, was essentiell für die korrekte Funktion des Systems ist. Durch die Trennung der Parameterschätzung im Master-System von der Filterung des Nutzsignals im Slave wird ein Übersprechen des Testsignals in das Nutzsignal vermieden.

Ein etwas anderes Regelverfahren wurde in [11, 12] beschrieben. Dort werden zwei Filter abwechselnd in einem Regelkreis nachgestimmt und dann bei konstant gehaltenem Abstimmsignal in den Signalzweig geschaltet, während das andere Filter abgestimmt wird. Gegenüber dem oben beschriebenen Master-Slave-Ansatz hat dies den Vorteil, dass ein guter Gleichlauf der beiden Filter nicht erforderlich ist; es muss allerdings Sorge getragen werden, dass das Nutzsignal

nicht durch transiente Terme gestört wird, die beim Umschalten entstehen können.

Der Schwerpunkt der Veröffentlichungen zur automatischen Regelung liegt zumeist im Bereich der Schaltungstechnik, regelungstechnische Aspekte wie das dynamische Systemverhalten oder ob das System unter allen äußeren Umständen stabil arbeitet, werden zumeist nicht betrachtet oder durch Simulation der entworfenen Struktur heuristisch verifiziert.

Das Ziel dieser Arbeit ist es, eine systemtheoretische Beschreibung von Master-Slave-Systemen zu geben und geeignete Analysemethoden zu erarbeiten, die es erlauben, die Einflüsse der verwendeten Schaltungstopologie sowie der freien Parameter analytisch zu untersuchen und damit Anhaltspunkte für die Schaltungsauslegung zu geben.

Dazu werden zunächst verschiedene grundlegende Konzepte für die Realisierung des Master-Elements mit ihren Vor- und Nachteilen vorgestellt. Unter den Rahmenbedingungen, wie sie bei Mikrowellenfrequenzen vorliegen scheint es am günstigsten, ein möglichst ähnliches Filter als Master in den Regelkreis einzubinden und aus dem Übertragungsverhalten eines Testsignals eine Schätzung der Mittenfrequenz vorzunehmen. Entscheidenden Einfluss auf die Eigenschaften des Systems hat die Detektorschaltung, die die Parameterschätzung durchführt. Um verschiedene Konzepte vergleichen zu können, wird eine allgemeine Modellierung des Regelkreises eingeführt, eine systemtheoretische Beschreibung erarbeitet und analysiert.

Mit dieser Methodik werden zwei gebräuchliche Strukturen zur Parameterschätzung untersucht; die eine basiert auf dem Amplitudengang des Filters, die andere auf dem Phasengang. Die dabei gewonnenen Erkenntnisse fließen in den Entwurf von vier neuartigen Detektorkonzepten ein, die eingehend analysiert werden. Das Augenmerk liegt dabei weniger auf technologischen Aspekten der konkreten Realisierung als auf den prinzipiellen Wirkmechanismen der untersuchten Strukturen.

Unabhängig vom Detektorkonzept wird bei der Master-Slave-Struktur das Steuersignal des Regelkreises als Abstimmsignal für die Mittenfrequenz des Slave-Filters verwendet, das im Nutzsinalzweig liegt. Im zweiten Teil der Arbeit wird die Fragestellung behandelt, ob und in welcher Weise sich Störsignale aus dem Regelkreis, die der Abstimmspannung überlagert sind, auf das Nutzsinal auswirken, das das Slave-Filter durchläuft; ein Aspekt, der in der Fachliteratur bislang nicht betrachtet wurde.

Bei der Darstellung der analytischen Ergebnisse wird die Kreisfrequenz ω verwendet, während bei numerischen Analysen und Messergebnissen die Frequenz

f verwendet wird, da dies der gängigen Darstellung entspricht und die Interpretation erleichtert. Formelzeichen ω und f mit demselben Index beziehen sich im Folgenden ausnahmslos auf dasselbe harmonische Signal.