



*Gunthard Kraus, DG 8 GB*

## **Ansoft Designer-SV Projekt: Umgang mit Streifenleitungs- Interdigitalkondensatoren, Teil 1**

**Bei Bandpass-Filtern im Frequenzbereich zwischen 100 MHz und 1 GHz benötigt man sehr kleine Koppelkondensatoren, oft mit Werten deutlich unter 0,5 pF. Werden diese Bauteile als Interdigital-Kondensatoren in Streifenleitungstechnik ausgeführt, bringt der Umstieg auf diese Technologie etliche Vorteile. Dies soll nachfolgend an einer praktischen Entwicklung gezeigt werden.**

### **1. Vorbemerkungen**

Zur Einführung wird hier erst einmal ein Mikrostreifenleitungs-Interdigitalkondensator (**Bild 1**) gezeigt, als Auszug aus der Online-Hilfe des verwendeten CAD-Programms mit allen erforderlichen Erläuterungen und Details.

Der Entwurf selbst ist nicht einfach, wird aber durch moderne Simulationsmöglichkeiten sehr erleichtert. Moderne Mikrowellen-CAD-Programme sollten dieses

Bauteil bereits in ihrer „Component List“ als Mikrostreifenleitungs-Modell enthalten! So ist es auch beim kostenlosen „ANSOFT-Designer SV“. Hier die Liste der Vorteile:

- a.) Nach Optimierung des Platinenlayouts erreicht man in der Serienfertigung sehr geringe Toleranzen mit entsprechend guter Reproduzierbarkeit der Filterdaten ohne zusätzliche Bauteil- oder Bestückungskosten.
- b.) Es müssen keine diskreten Bauteile eingelötet werden, die mit solch kleinen Kapazitätswerten nur schwer erhältlich sind und größere Toleranzen aufweisen.
- c.) Setzt man hochwertiges, bis zu mehr als 10 GHz brauchbares Leiterplattenmaterial mit geringsten Verlusten ein, besitzen diese Kondensatoren eine sehr hohe Güte.



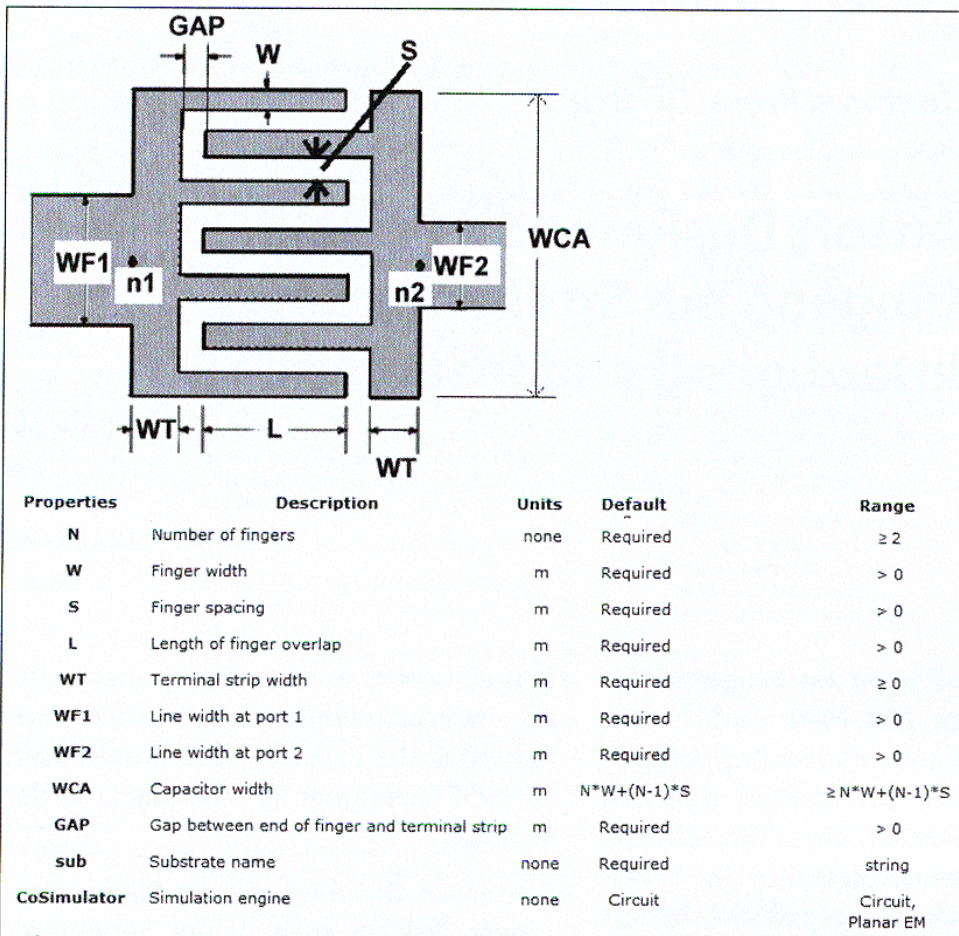


Bild 1: Das ist der berühmte Interdigitalkondensator. Leicht zu fertigen, aber wegen der vielen erforderlichen Maßangaben erwartet einen etwas Arbeit beim Entwurf

## 2. Das Anwendungsprojekt „145 MHz-Bandpass“

Es soll ein Bandpass mit folgenden Daten entworfen, gebaut und vermessen werden:

Mittenfrequenz: 145 M  
 Ripple-Bandbreite: 2 MHz  
 Systemwiderstand Z: 50  $\Omega$   
 Filtergrad: n=2  
 Platinenmaße: 30 mm x 50 mm

Tschebyschev-Narrow-Bandpass-Typ mit einem Ripple von 0,3 dB („Coupled Resonators“)

Platinenwerkstoff: Rogers RO4003  
 Dicke: 32MIL = 0,813 mm  
 $\epsilon_r = 3,38$   
 TAND = 0,001

Gehäuse: Aluminium, gefräst  
 Anschluß: SMA-Stecker

Vorabgegl. Filterspulen NEOSID (Reihe 7.1 E, versilb. Abschirmbecher, L = 67...76 nH, 1 Wicklung, Güte Q = 100...150, Messing-Abgleichkern)



SMD-Keramikkondensatoren 0805 aus dem Werkstoff NPO

Hier soll ein anderer Weg beschrieben werden: Der Entwicklungsstand der Schaltung nach dem Entwurf und einer kurzen Optimierung ist in **Bild 2** zu sehen. Dazu verwendet wurde das Filterprogramm, das im „Design SV“ enthalten ist. Von diesem ausgehend werden nachfolgend die weiteren erforderlichen Arbeitsschritte beschrieben, die schließlich das fertige Platinenlayout ergeben. Davon wird ein Prototyp erstellt, mit dem Netzwerk-Analysator vermessen und das Messergebnis präsentiert und kommentiert.

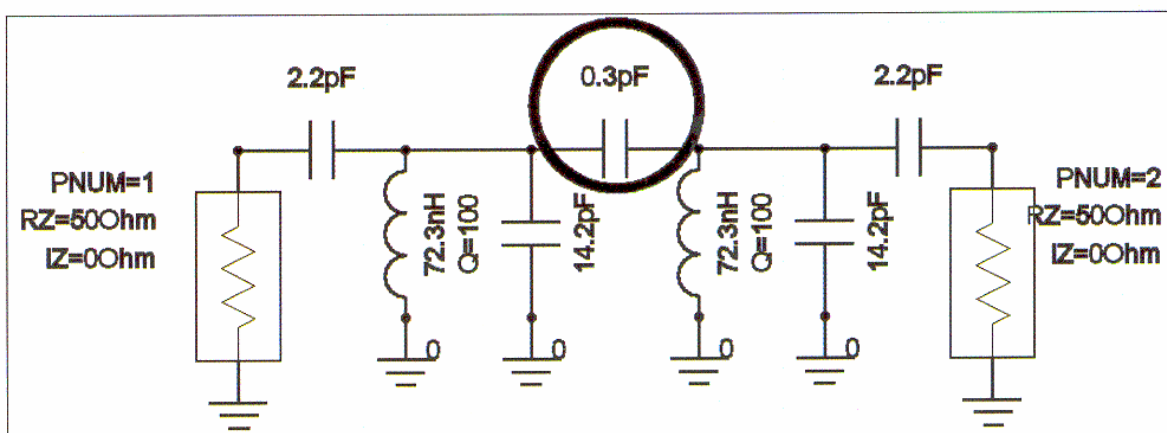
Die genaue Beschreibung des eigentlichen Filterentwurfs mit dem ANSOFT-Designer SV (der zu Bild 2 führt) und aller dabei erforderlichen Schritte folgen im **Anhang 1**.

Weiter enthält **Anhang 2** eine genaue Anleitung zur erfolgreichen Kontrollsimulation der Schaltung mit dem „Designer SV“.

Sehr hilfreich ist dabei ein vorheriger Download und anschließend ein Blick in das vom Autor erstellte „ANSOFT-Designer SV – Tutorial für Einsteiger“ [1]; kostenlos und wahlweise in einer deutschen und einer englischen Version.

Weiter geht es mit der Filterentwicklung; ein Blick in die Schaltung von Bild 2 lässt erkennen:

- Dick markiert ist der problematische Koppelkondensator mit  $C = 0,3 \text{ pF}$ . Das Problem ist nicht nur der sehr kleine Kapazitätswert, sondern die hohen Anforderungen an die Präzision. Eine Abweichung von mehr als 1% führt schon zu einer merkbaren Veränderung der Filter-Durchlasskurve!
- Es wurde solange optimiert, bis sich alle übrigen Kondensatoren mit Normwerten verwirklichen ließen - notfalls durch Parallelschaltung mehrerer Exemplare mit unterschiedlichen Werten.



*Bild 2: So liefert das Ansoft-Filtertool die fertige Schaltung. Der Koppelkondensator, der hier näher betrachtet werden soll, ist dick markiert*



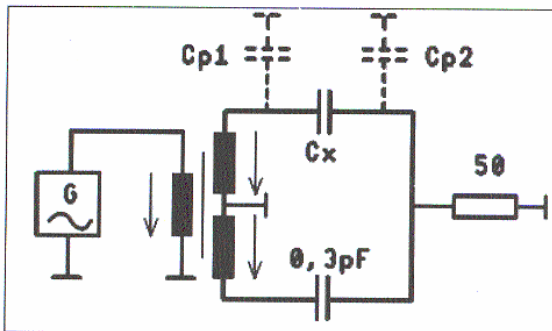


Bild 3: Mit dieser aus der Quarzfilter-Technik entlehnten Schaltung kommt man beim Interdigitalkondensator an den genauen Wert des Koppelanteils heran (siehe Text)

### 3. Entwurfsprozedur für Interdigitalkondensatoren mit ANSOFT-Designer SV

#### 3.1. Einstieg mit Problemen

In der Modellbibliothek findet sich auf der Karteikarte „Components“ unter „Circuit Elements / Microstrip / Capacitor / MSICAPSE“ das bereits in Bild 1 dargestellte Layout des Interdigitalkondensators in Serienschaltung. An die Liste der Größen, die der Anwender selbst eintragen muss, kommt man nach einem Doppelklick auf das Schaltzeichen heran. Ganz am Ende der Liste findet man einen Button „MSICAP...“, der die Online-Hilfe mit genauer Erläuterung der einzelnen Eingaben bzw. Abmessungen aufruft. Zu diesen Eingaben gehört Erfahrung; wer sich jedoch an folgende Spielregeln

hält, kann beim Einstieg nichts falsch machen:

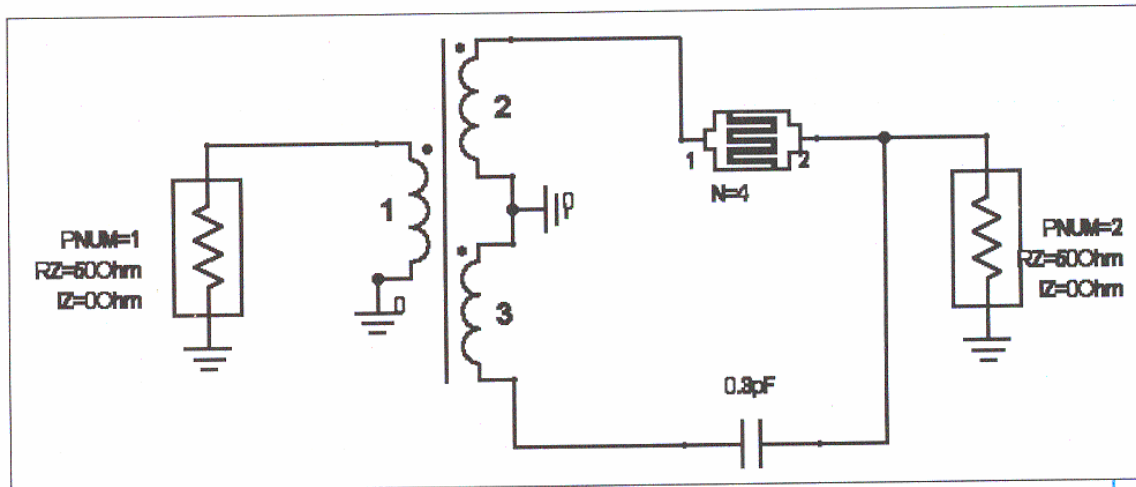
a) die Fingerbreite „ $W$ “ wird zu 0,5 mm gewählt. Damit ist sichergestellt, dass einerseits das Gebilde nicht zu groß wird und andererseits beim Ätzen der Platine der Einfluss der „Unterätzung bei den Leiterbahnkanten“ - die zu einer merklichen Verkleinerung der Fingerbreite bei gleichzeitiger Vergrößerung der Spaltbreite „ $S$ “ führen kann - reduziert ist.

b) Die Spaltbreite „ $S$ “, also der Fingerabstand, sollte nicht zu klein sein, denn sonst „stöhnt“ der Platinenhersteller. Da gilt: ein Wert von 0,25 mm lässt sich auch in der eigenen Werkstatt realisieren. Andererseits sollte sie auch nicht zu groß sein, denn dann sinkt die Kapazität und man braucht eine größere Fingerlänge und / oder mehr Finger.

c) Der richtige Kapazitätswert wird durch die Zahl der Finger und die Fingerlänge festgelegt. Man startet beispielsweise mit 4 Fingern, variiert die Fingerlänge und achtet darauf, dass diese nicht zu groß wird. Man sollte etwa 8 bis 10 mm als Obergrenze setzen, sonst bekommt man bei kleinen Platinen Platzprobleme. Statt also die Finger noch länger zu machen, erhöht man einfach ihre Anzahl.

Mit diesen Angaben (und den Platinendaten) könnte man bereits mit dem Entwurf beginnen, ABER: das CAD-Programm kann leider nur eine Analyse durchführen!

Das bedeutet, dass man zwar alle Daten und Abmessungen eintragen und die Simulation starten kann, aber als Ergebnis immer nur ein S-Parameter-File des Gebildes erhalten wird. Wie groß die Kapazität



*Bild 4: In dieser Form wird die Idee nach Bild 3 in eine ANSOFT-Simulationsschaltung umgesetzt*

des so entworfenen Koppelkondensators ist, bzw. um welchen Betrag sie zu groß oder zu klein ist, lässt sich NICHT erkennen!

Noch schwieriger wird die Sache dadurch, dass im Ersatzschaltbild dieses Bauteils von jedem Ende des „Koppelkondensators“ noch eine zusätzliche Kapazität nach Masse zu denken ist. Diese beiden unvermeidbaren Parallelkapazitäten verstimmen natürlich gleich die angeschlossenen Schwingkreise. Und wie soll man nun diese drei Teile auseinanderbekommen bzw. die Schaltung optimieren – speziell wenn die Filter aufwendiger sind und mehrere solcher „Interdigitalgebilde“ eingesetzt werden?

### 3.2. Ermittlung der reinen Koppelkapazität

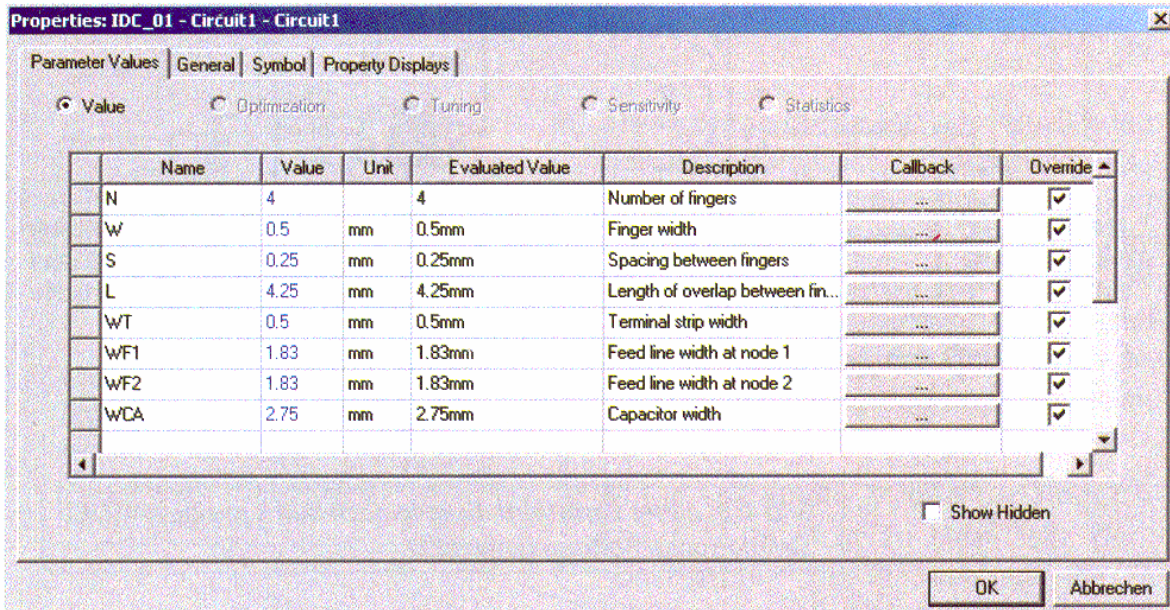
Es ist schon eine Herausforderung, wenn man nach einer Möglichkeit sucht, allein den Wert der Koppelkapazi-

tät auf möglichst einfache Weise zu bestimmen.

Die beiden Parallelkapazitäten sind weniger schwer zu entwirren, denn man muss nur in der Simulation die in der Schaltung eingetragenen Schwingkreis-Kondensatoren solange verkleinern, bis man wieder die gewünschte Durchlasskurve erhält. Die Differenzen entsprechen exakt den durch den Interdigitalkondensator eingebrachten Zusatzkapazitäten. Hier gleich wieder einen Tipp: ihr Wert liegt meistens nicht sehr weit weg von der eigentlichen Koppelkapazität!

Irgendwann hilft einem dann doch die eigene Erfahrung weiter: da z.B. Quarzfilter in Brückenschaltung vor einem ähnlichen Problem stehen. Bei ihnen wird nämlich mit Hilfe einer Transformatorschaltung die unvermeidliche Halter- und Gehäusekapazität des Quarzes eliminiert. Das auf vorliegendes Problem angewandte Prinzip zeigt **Bild 3**.





*Bild 5: Schon etwas aufwendig: die erforderlichen Eingaben für den Interdigitalkondensator. Bitte genau jeden Wert übernehmen und prüfen. Und die nicht sichtbare Zeile darf nicht vergessen werden (siehe Text)!*

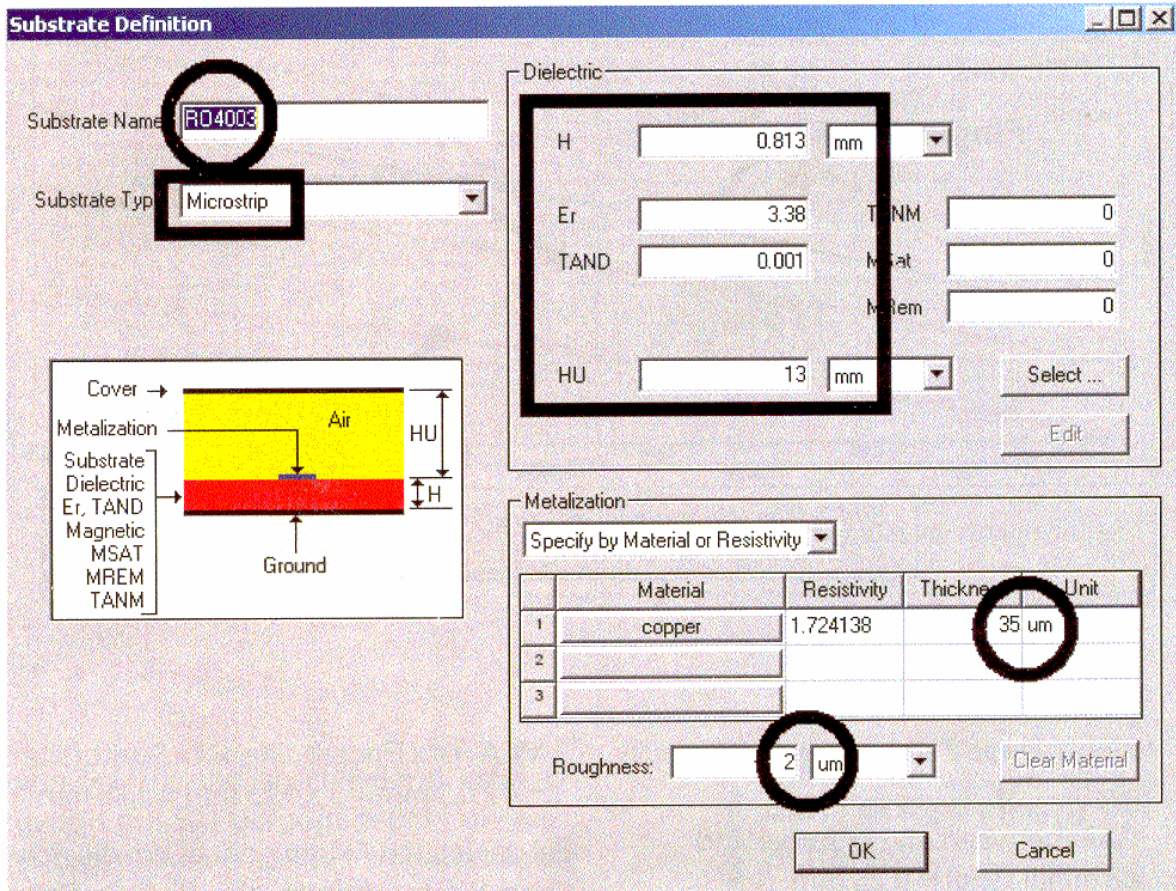
Die beiden Spannungen an den Sekundärwicklungen des Trafos sind gleich groß, aber gegenphasig. Also wird man am Abschlusswiderstand  $R_L$  genau dann die Spannung „Null Volt gegen Masse“ erhalten, wenn die beiden in Reihe geschalteten Kondensatoren  $C_x$  und  $C_2 = 0,3 \text{ pF}$  gleich groß sind. Dabei spielen die beiden Parallelkapazitäten  $C_{p1}$  und  $C_{p2}$  keine Rolle, denn im „abgeglichenen Zustand der Brücke“ haben sie keinen Einfluss auf das Ergebnis.  $C_{p1}$  liegt nämlich parallel zur Sekundärwicklung des Trafos und kann deshalb den Abgleichzustand der Brücke nicht beeinflussen. Ebenso ist es bei  $C_{p2}$ , denn dieser Kondensator liegt parallel zum Lastwiderstand mit  $50 \Omega$ . Im abgeglichenen Zustand misst man an

dieser Parallelschaltung keine Spannung und deshalb ist sie in diesem Fall für den Rest der Schaltung sozusagen „nicht vorhanden“.

Wirft man nun einen Blick auf die Simulationsschaltung für den „Designer SV“, kann man sich mit deren Hilfe an die Lösung herantasten (**Bild 4**). Den Übertrager findet man hierbei in der Bauteilbibliothek (Component Library) unter „Components / Circuit Elements / Lumped / Transformers / TRF1x2“, den Interdigitalkondensator in Serienschaltung (wie bereits erwähnt) unter „Components / Circuit Elements / Microstrip / Capacitors / MSICAPSE“:

Ein Microwave-Port mit dem Innenwiderstand  $50 \Omega$  speist einen Breitband-Über-





*Bild 6: So werden die Daten des Platinenwerkstoffs R04003 korrekt in das „Property Menu“ eingetragen*

trager mit zwei Sekundärwicklungen. Die obere Wicklung ist über den Interdigitalkondensator mit dem Ausgangsport verbunden. Das von der unteren Wicklung gelieferte gegenphasige Signal gelangt über einen zweiten Kondensator ebenfalls zum Ausgangsport.

Wichtig:

Dieser zweite Kondensator muss jetzt den gewünschten „Sollwert“ von 0,3 pF (= geforderte Koppelkapazität beim Interdigitalkondensator) aufweisen.

Die für die Simulation (und den späteren Layout-Entwurf) wichtigen Daten gibt man im „Property Menu“ des Interdigitalkondensators ein. Es öffnet sich nach einem doppelten Mausklick auf ein Symbol im Stromlaufplan und **Bild 5** zeigt die zu übernehmenden, erforderlichen Einträge. Allerdings sind hier zwei Dinge wichtig, die man nicht sofort erkennt:

- a.) In der Fensterdarstellung nach Bild 5 fehlt noch eine Zeile, die nicht mehr angezeigt werden kann (...denn dazu muss man den Inhalt nach unten „sc-

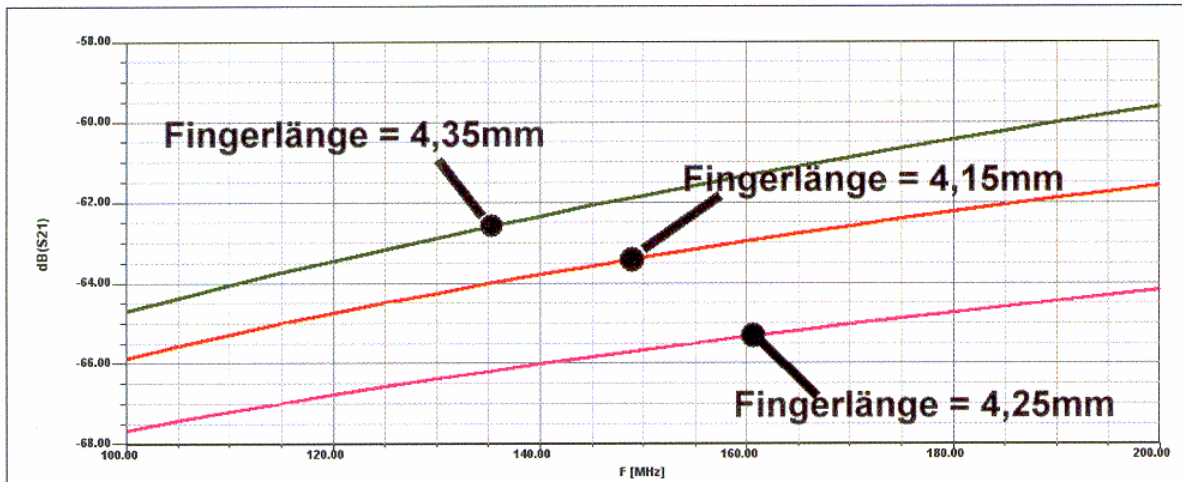


Bild 7: Das Minimum ist gut zu erkennen: mit einer Fingerlänge von 4,25mm liegt man richtig für eine Koppelkapazität von 0,3 pF

rollen“). Diese Zeile muss wie folgt aussehen:

GAP (between end of finger and terminal strip) = 0,25 mm

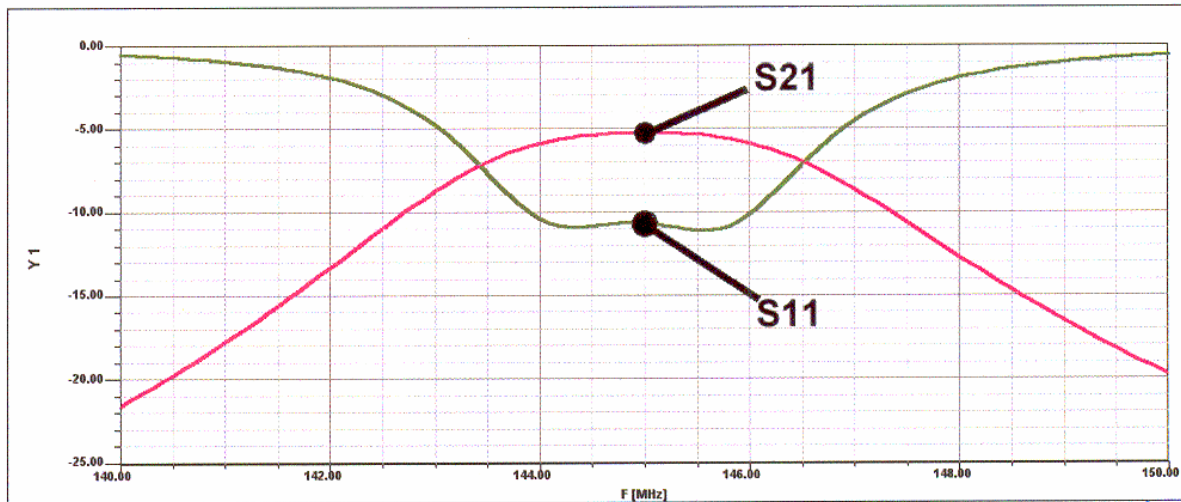
- b.) Die Gesamtbreite „MCA“ muss man selbst „von Hand“ ausrechnen und in das dazugehörige Feld eintragen. Tückisch ist hier lediglich, dass die bei allen übrigen Einträgen voreingestellte Einheit „mm“ in der nächsten Spalte NICHT AUTOMATISCH ÜBERNOMMEN WIRD! So kann es passieren, dass ohne diesen bewussten Eintrag von „mm“ nur Unsinn simuliert wird, weil das Programm automatisch mit der Einheit „Meter“ rechnet! Also bitte Vorsicht und lieber genau hinsehen - und die Einheit bei der Eingabe direkt an den berechneten Zahlenwert **ohne** Leerzeichen anhängen. Dann wird sie korrekt vom Programm akzeptiert!
- c.) Für die vorher festgelegten Abmessungen ist folgender Wert erforderlich:

$$\begin{aligned} \text{MCA} &= 4 \times \text{Fingerbreite} + 3 \times \text{Spaltbreite} \\ &= 4 \times 0,5 \text{ mm} + 3 \times 0,25 \text{ mm} = 2,75 \text{ mm} \end{aligned}$$

Bei der letzten Aktion geht es um die richtigen Werkstoffdaten der Platine. Dazu scrollt man im gerade offenen „Property Menu“ des Interdigitalkondensators weiter nach unten - bis zur Zeile „SUB“ (= Substrat). Ein Klick auf den Button in der zweiten Spalte öffnet das Menü „Select Substrate“ und darin klickt man auf „Edit“. Über das korrekte Ausfüllen dieses Formulars für die verwendete Platine aus RO4003 (Dicke = 32MIL = 0,813 mm, Dielektrizitätskonstante  $\epsilon_r = 3,38$  und  $t_{\text{and}} = 0,001$  informiert **Bild 6**. Die Kupferauflage ist 35  $\mu\text{m}$  dick und die Rauigkeit liegt bei 2  $\mu\text{m}$ ). Ist alles korrekt eingegeben, wird zweimal nacheinander mit OK bestätigt und das „Property Menu“ wieder geschlossen.

Jetzt ist alles bereit für die Simulation! Programmiert wird ein Sweep von 100 MHz bis 200 MHz mit einer Schrittweite





*Bild 8: Dieses Bild wird man ab jetzt immer vor Augen haben, denn dieser Verlauf ist das Ziel ...*

von 5 MHz und anschließend beim Ergebnis nur S21 dargestellt (Wer die dazu erforderlichen einzelnen Eingabeschritte beim Designer SV noch nicht kennt, liest kurz im Anhang 2 dieses Artikels nach).

Schließlich wird noch die Fingerlänge des Interdigitalkondensators solange variiert und erneut simuliert, bis man das Minimum des S-Parameters S21 findet.

Nun ist die Brücke abgeglichen und man kann die mechanischen Daten des Kondensators in das Platinenlayout übernehmen!

Das optimierte Ergebnis zeigt **Bild 7**, denn eine Fingerlänge von ca. 4,25 mm ergibt das S21-Minimum (...noch weiter zu verfeinern ist sinnlos, denn das lässt sich kaum mehr im Layout umsetzen) und es ist interessant zu sehen, welches Ergebnis die Filterschaltung nun liefern wird.

### 3.3. Fertigstellung der Schaltung

Dazu wird ein neues Projekt erstellt, zuerst nochmals die Schaltung nach Bild 2 aus der Einführung (...mit den diskreten Bauteilen...) gezeichnet, ein Sweep von 140 bis 150 MHz in Schritten von 100 kHz eingestellt und anschließend S11 sowie S21 ermittelt. Dieses Ergebnis ist in **Bild 8** zu sehen. Es dient als Mustervorlage für alle folgenden Aktionen. Wenn man das im Endzustand wieder so hinbekommt, kann man durchaus zufrieden sein!

Ersetzt man nun den Koppelkondensator von 0,3 pF durch das „Interdigitalgebilde“, erhält man die Simulationsschaltung nach **Bild 9**. Natürlich ist das Ergebnis (**Bild 10**) schlechter, denn es wurden die zusätzlichen Parallelkapazitäten des Interdigitalkondensators noch nicht be-

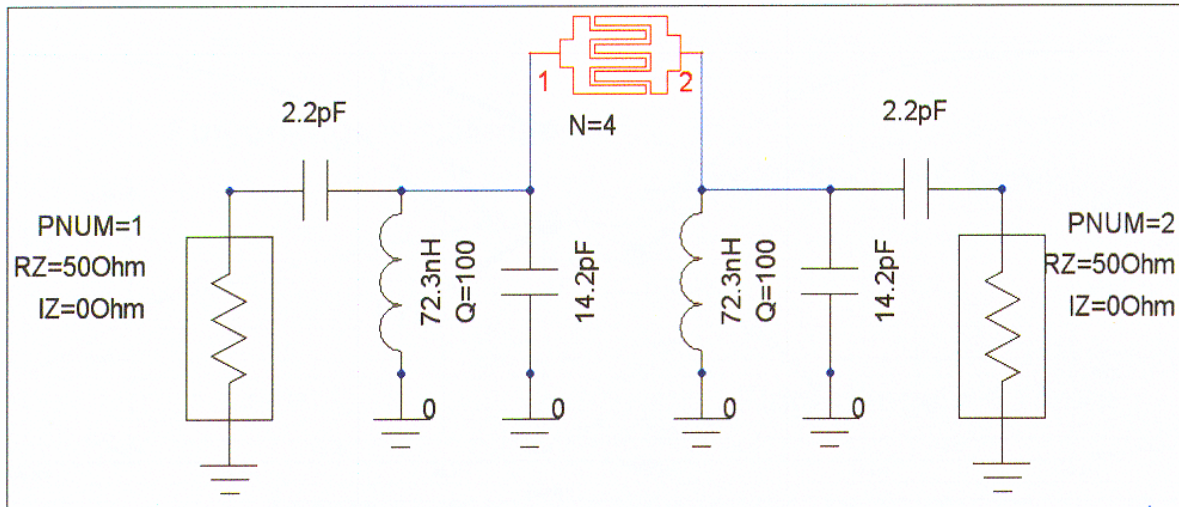


Bild 9: Jetzt wird es ernst: der diskrete Koppelkondensator mit 0,3 pF wird durch das „Interdigitalgebilde“ ersetzt

rücksichtigt. Also braucht man nur schnell in beiden Schwingkreisen die Kreiskapazitäten zu reduzieren, bis man wieder möglichst nah an den Kurven von Bild 8 landet - denkt man! Denn Bild 10 bietet eine kleine zusätzliche Überraschung:

neben der erwarteten Verschiebung der Mittenfrequenz von 145 MHz zu 143,3 MHz (...soviel machen die unvermeidlichen Parallelkapazitäten des Interdigitalkondensators aus!) hängt die S11-Kurve leicht schräg! Und wenn man versucht,

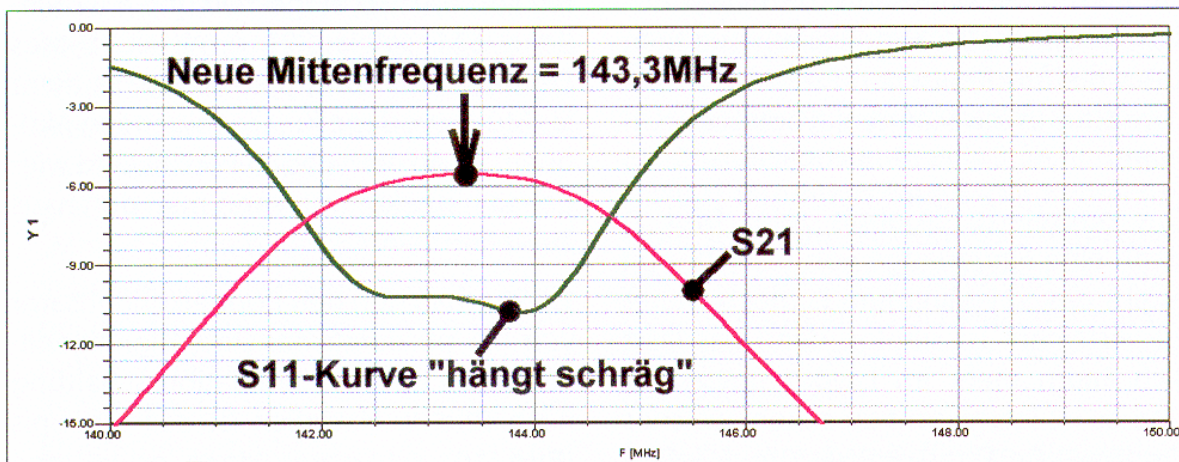
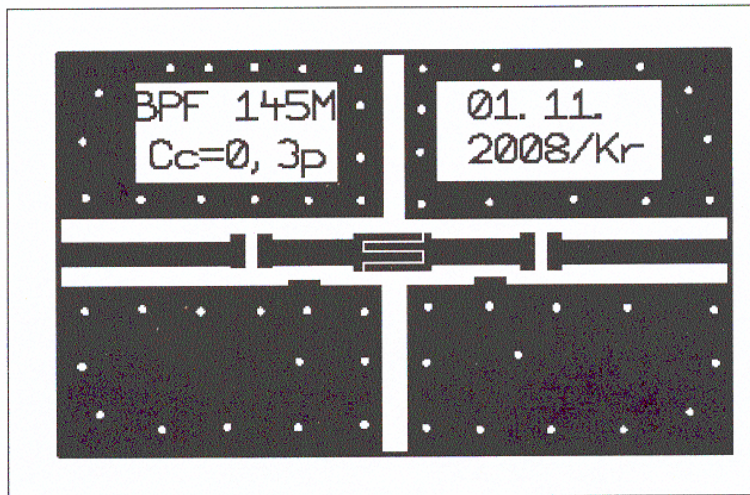


Bild 10: Das war zu erwarten: die Mittenfrequenz liegt nun zu tief; und mit der schräg hängenden S11-Kurve muss man einfach leben





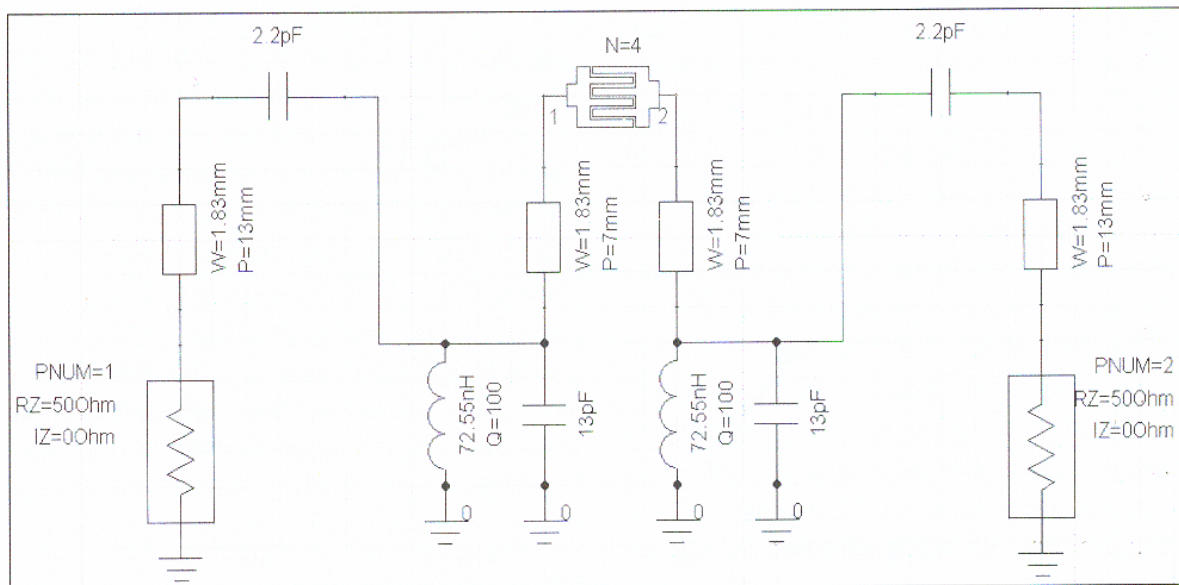
**Bild 11:** Das ist die Leiterplatte mit den Maßen 30 mm x 50 mm (RO4003 mit einer Dicke von 0,813 mm)

S22. Das bedeutet, dass diese Interdigital-Lösung doch so ihre Eigenheiten hat, was auf einer leichten Frequenzabhängigkeit der Kapazitäten beruht!

(Wahrscheinlich muss das hier in Gedanken benützte Ersatzschaltbild mit nur 3 Kondensatoren doch noch wesentlich aufwendiger gestaltet sein, denn genau dieses Verhalten kann man sogar an der fertigen Platine feststellen...).

diesen Effekt durch leicht unterschiedliche Werte der beiden Kreisinduktivitäten zu kompensieren, erlebt man sein blaues Wunder: genau um den Betrag, um den dann S11 besser wird, verschlechtert sich

Andererseits ist der Effekt auch nicht so gravierend, als dass man nicht mit ihm leben könnte. Also nimmt man die leichte Schräglage in Kauf und verschiebt einfach die Mittenfrequenz auf den geforderten Wert von 145 MHz.



**Bild 12:** Jetzt sind die Mikrostreifenleitungstücke ebenfalls in die Simulation einbezogen und damit sollte alles erfasst sein

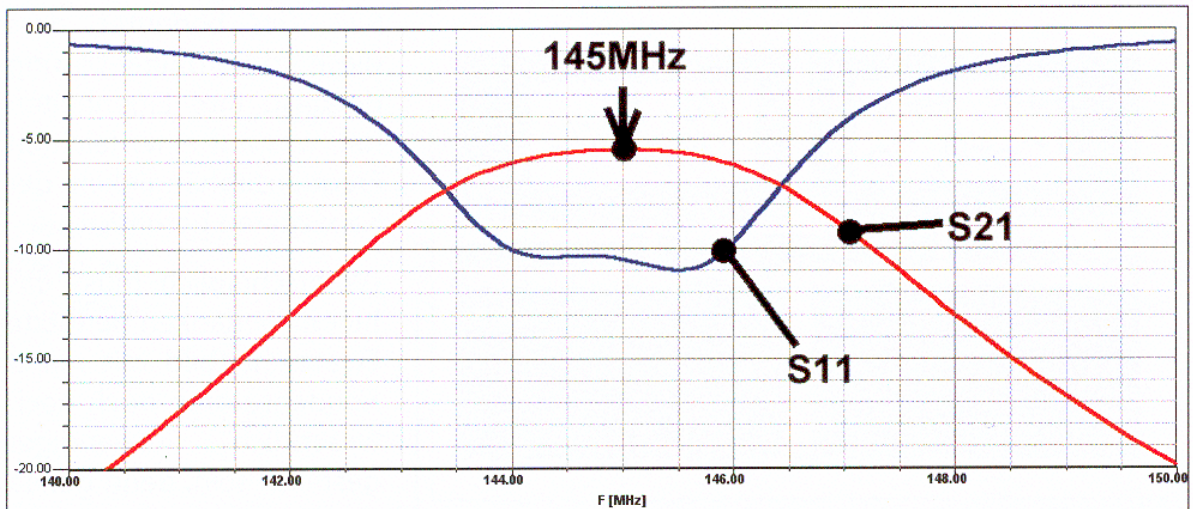


Bild 13: Wenn die Messergebnisse endlich so aussehen, wie dieses Simulationsergebnis, ist man endgültig am Ziel...

Die erste Maßnahme ist eine Verkleinerung der Kreiskapazitäten auf  $13,8 \text{ pF} = 12 \text{ pF} + 1,8 \text{ pF}$ , um wieder auf Normwerte zu kommen, die sich leicht parallelschalten lassen. Den Rest wird man (nicht nur

in der Simulation, sondern auch bei der fertigen Platine) durch Feinabstimmung der beiden Schwingkreisspulen hinbekommen, dafür sind schließlich die Abgleichkerne da. Dazu sind neue Indukti-

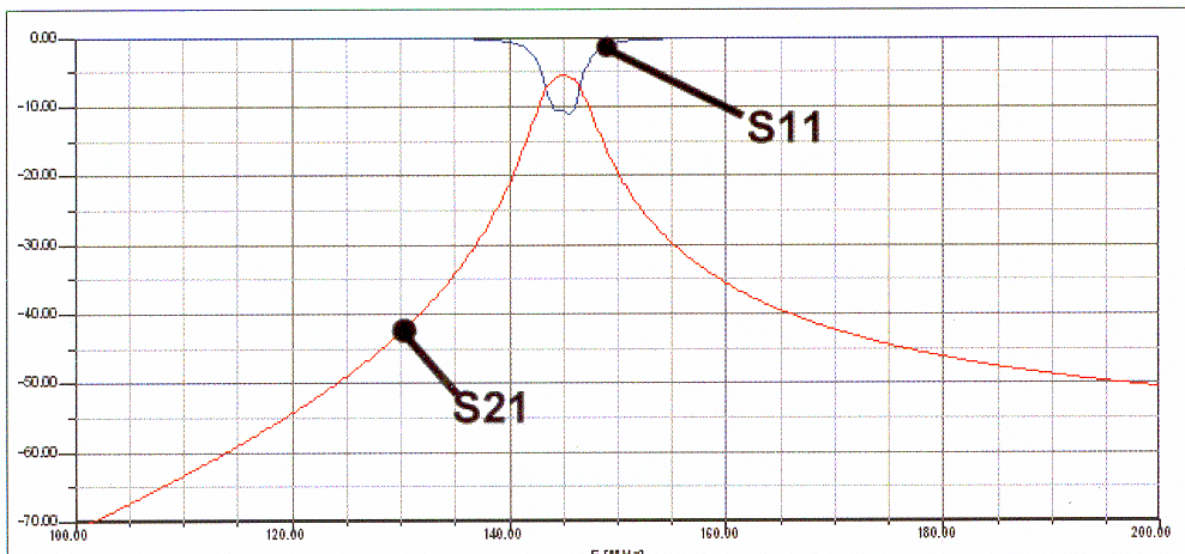
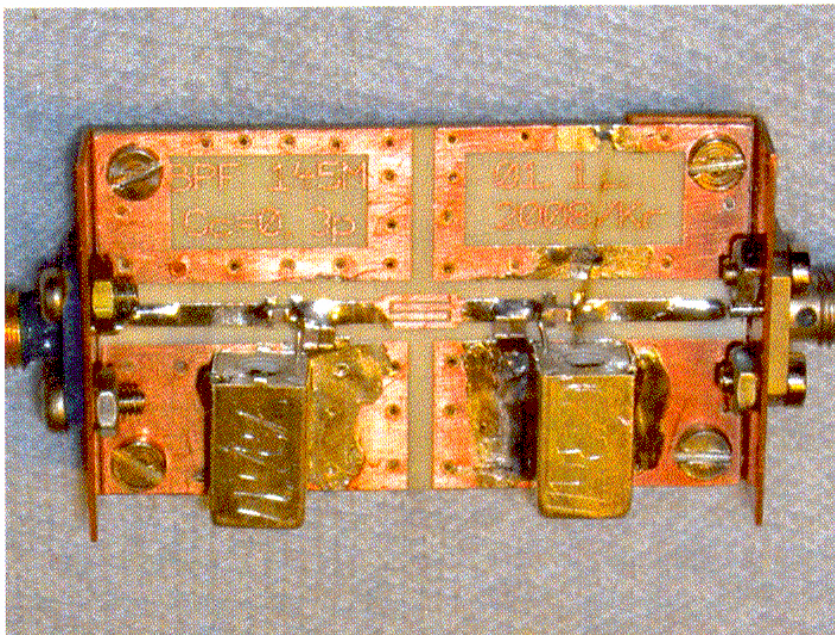


Bild 14: Die Weitab-Selektion im Bereich zwischen 100 MHz und 200 MHz gibt keinen Anlass zur Beanstandung...





*Bild 15.  
Das ist das  
Ergebnis der  
Umsetzung der  
Simulation in  
einen echten  
Musteraufbau;  
bereits mit SMA-  
Buchsen verse-  
hen, wartet die  
Schaltung auf die  
Messung  
am Netzwerk-  
Analyseur*

vitäten mit  $L = 72,3 \text{ nH}$  erforderlich und damit entspricht das Simulationsergebnis praktisch dem Ergebnis von Bild 10.

Aber damit ist noch nicht Schluss, denn jetzt geht es an das Platinenlayout und seinen Einfluss. In **Bild 11** ist dies zu sehen und man erkennt gut, dass man es im Prinzip mit einer durchgehenden  $50 \Omega$ -Mikrostreifenleitung zu tun hat. Sie beginnt links (am Eingangs-SMA-Stecker), weist eine Unterbrechung für den SMD-Ankoppelkondensator mit  $2,2 \text{ pF}$  auf und dann erst kommt der Schwingkreis. In der Mitte befindet sich das „Interdigitalgebilde“ und in der rechten Hälfte setzt sich das Ganze spiegelbildlich fort. Das entspricht etwa einer zusätzlichen Leitungslänge von rund  $40 \text{ mm}$  für die Schaltung und hat folgende Konsequenzen:

In die ANSOFT-Schaltung müssen noch vier zusätzliche  $50 \Omega$ -Mikrostreifen-Leit-

ungsstücke (mit einer Breite von  $1,83 \text{ mm}$  für die vorgegebenen Platinendaten) hinzugefügt werden, wenn die Simulation mit der Realität übereinstimmen soll. Die Längen der Leitungsstücke betragen  $2 \times 13 \text{ mm} = 26 \text{ mm}$  (jeweils vom SMA-Stecker bis zum Ankoppelkondensator mit  $2,2 \text{ pF}$ ) und  $2 \times 7 \text{ mm} = 14 \text{ mm}$  (Weiterführung vom Schwingkreis zum Interdigitalkondensator). Wie das gemacht wird zeigt **Bild 12** und nun beginnt das Ganze wieder von vorne: bei diesen relativ niedrigen Frequenzen wirken die Mikrostreifen-Leitungsstücke vor allem als verstimmende Zusatzkapazitäten und so muss man erneut die Kreisbauteile variieren. Wenn man die alten Kurven einigermaßen wieder hinbekommen hat, sollte man schließlich **Bild 13** vor sich haben.

Zum Abschluss folgt noch die Simulation der Weitab-Selektion im Frequenzbe-



reich von 100 MHz bis 200 MHz (**Bild 14**) und das ist endgültig der Zeitpunkt für den Platinenentwurf samt Anfertigung des ersten Prototyps. Das Ergebnis nach einigen Stunden Arbeit sieht so aus (**Bild 15**): die Platine ist geätzt und alle Löcher wurden gebohrt.

Etwa 50 Hohlknoten mit einem Durchmesser von 0,8 mm bilden die bei HF- und Mikrowellen-Platinen nötigen Durchkontaktierungen von den auf der Oberseite angeordneten Masse-Inseln zur durchgehenden unteren Masse-Ebene. Die SMD-Kondensatoren sind bestückt, die Spulen aufgelötet und die Kupferwinkel mit den SMA-Buchsen angeschraubt. Damit sind in der Mess- und Testphase die Abgleichkerne der Spulen gut zugänglich und erfahrungsgemäß ist nach dem Einbau der abgeglichenen Platine keine Nacharbeit mehr nötig, wenn sie in das gefräste Aluminiumgehäuse eingebaut wird.

Doch vor diesem letzten Schritt kommt die Stunde der Wahrheit beim Vergleich der Kurven von Bild 13 und 14 mit dem Schirmbild, das der Netzwerk-Analysator

bei der Untersuchung des Musteraufbaus liefert.

Übrigens: der feine Platinenriß, der in Bild 15 beim genauen Hinsehen zu erkennen ist, wurde durch eine typisch menschliche Schwäche verursacht; wenn man in zäher Arbeit diese vielen kleinen Niete gesetzt hat ist es genug und man möchte Ergebnisse sehen. Beim Feilen der Platinen-Außenmaße beeilt man sich und drückt unvorsichtigerweise zu fest mit der Feile darauf. Und so merkt man, dass sich RO4003-Material zwar wunderbar durch Bohren, Fräsen und Feilen bearbeitet lässt, aber gegen stärkere Biegung massiv protestiert - da ist beim nächsten Mal mehr Sorgfalt gefordert!

... wird fortgesetzt!

## X. Literatur

Hier finden Sie weiterführende Links und Literaturhinweise zum Artikel:

- [1] [www.elektronikschule.de/~krausg](http://www.elektronikschule.de/~krausg)
- [2] [www.ansoft.com](http://www.ansoft.com)

ANZEIGE

### Mikrowellen-CAD-Software

## PUFF Version 2.1

- weiterhin lieferbar! -

DOS-Software auf Diskette  
engl. Original-Handbuch

Art.Nr. 03407 € 25,-



**UKW**Berichte  
Telecommunications



UKW-Berichte, Eberhard L. Smolka  
Jahnstr. 7, D-91083 Baiersdorf  
Tel. 09133-77980, Fax 09133-779833  
Email: [info@ukwberichte.com](mailto:info@ukwberichte.com)  
[www.ukw-berichte.de](http://www.ukw-berichte.de)