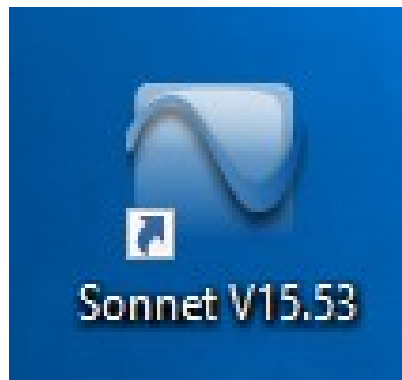


EM-Simulation einer Patchantenne für 5,8 GHz mit Sonnet Lite



Einsteiger -Tutorial für die Sonnet Lite- Version 15.53

(<http://www.sonnetsoftware.com>)

Verfasst von Gunthard Kraus, Oberstudienrat i. R. an der Elektronikschule Tettnang.

Email: mail@gunthard-kraus.de

Homepage: www.gunthard-kraus.de

07. April 2020

Inhaltsverzeichnis	Seite
1. Einführung	3
2. Installation und Lizenzierung	3
3. Grundlagen der Patchantennen	5
3.1. Beispiel für den Einsatz einer Patchantenne im Tettlinger Elektronikmuseum	6
4. Antennenentwicklung mit Sonnet Lite	6
4.1. Informationen und Vorgaben	6
4.2. Patchentwurf für 5,8 GHz	7
4.3. Auf geht's mit Sonnet Lite	8
4.3.1. Nötige Vorarbeiten und Einstellungen	8
4.3.2. Specify Units	9
4.3.3. Dielectric Layers	9
4.3.4. Metal Types	10
4.3.5. Box-Einstellungen	12
4.3.6. Zeichnen des Patches	13
4.3.7. Vorbereitung des Frequency Sweeps	15
4.3.8. Estimate Memory	15
4.4. Simulation	16
4.4.1. Vorbereitung	17
4.4.2. Ergebnis der S11-Simulation	17
4.4.3. Die Stromverteilung bei Resonanz	18
4.4.4. Aus Neugier: Bestimmung des reinen Antennen- Strahlungswiderstandes	19
5. Anpassung des Patches an 50 Ω	20
5.1. Anpassung mit Lambda -Viertel-Leitung	20
5.1.1. Praktische Umsetzung und Simulation	21
5.2. Anpassung durch „Inserted Feed“	25

Einführung

SONNET ist eine wunderbare Sache, nämlich ein EM-Simulator (nach der Momenten-Methode) für alle denkbaren planaren = flächenhaften Strukturen. Das sind vor allem Microstrip-, Stripline- oder Coplanar-Schaltungen, wobei von Kopplern über Transformationsleitungen, Filtern, Gaps und Stubs bis hin zu Patchantennen usw. alles untersucht werden kann. **Sogar die Simulation von Yagi-Antennen ist möglich, wenn man dazu die Antennenstäbe durch Streifenleitungen ersetzt!**. Wer allerdings von der SPICE-Simulation oder der S-Parameter-Simulation herkommt, der hat so seine Probleme beim Einstieg, **denn bei einer EM-Simulation ist alles, aber auch alles anders**. Da muss zuerst die zu untersuchende Struktur vom Anwender in lauter kleine „Zellen“ (= cells) zerlegt werden und da gibt es schon Vieles zu beachten. Die Eigenschaft jeder einzelnen Zelle wird dann vom Programm untersucht, berechnet, gespeichert und am Ende durch Integration zur Gesamtwirkung zusammengefasst. Dabei benützt Sonnet **eine rechteckige Metallkiste (= „box“)**, in der das Messobjekt platziert werden muss und da sind wieder mehrere Grundeinstellungen vorzunehmen.

Bei der Box sind die Wände immer aus verlustfreiem Metall, deshalb wirken sie als „Spiegel“. Aber beim Deckel oder beim Boden sieht es anders aus, denn wenn wir z. B. Antennen simulieren, muss die Energie ja irgendwo raus aus der Kiste (..in diesem Fall natürlich raus beim Deckel....). Deshalb gibt es hier unterschiedliche Optionen, nämlich „verlustfrei = lossless“, „WG load = Hohlleiter-Übergang“, „free space = Freier Raum“ oder ein selbst auszuwählendes Metall, z. B. Kupfer.

Die Feldverteilung in einer solchen Box ist bekannt und berechenbar und so erreicht die damit ausgeführte Simulation eine recht hohe Genauigkeit. Sie hängt von der gewählten Zellengröße ab (...je kleiner, desto genauer....aber die Rechenzeit, die dazu nötige Rechenzeit...) und liegt bei Beachtung der Spielregeln, speziell mit den Beschränkungen der Lite-Version, normalerweise irgendwo zwischen 1% und 4%. Wobei speziell bei resonanzfähigen Gebilden (wie z. B. Patchantennen) die Resonanzfrequenz IMMER etwas zu hoch simuliert wird -- das muss man halt wissen und sich darauf einstellen.

Doch sollte sich der Einsteiger immer zwei wichtige Tatsachen vor Augen halten, um nicht enttäuscht zu sein:

Sonnet ist ein Analyseprogramm und KEIN Entwurfsprogramm. Es testet nur die fertigen Ideen des Anwenders!

Der Umgang mit einem EM-Simulator wie SONNET unterscheidet sich deshalb vollständig von einer SPICE- oder S-Parameter-Simulation -- er ist deutlich aufwendiger. Wenn man das akzeptiert, steht dem erfolgreichen Einstieg nichts im Weg. Wir werden das in Form von Praxisprojekten tun, bei denen der ganze steinige Weg „von der Idee bis zum fertigen Produkt“ mit allen erforderlichen Schritten und Tricks samt Messergebnissen genau beschrieben ist.

Aber wo stecken nun die (einzigen) negativen Seiten von Sonnet Lite? Das ist schnell gesagt, denn die **Simulation von Fernfeldern (= Strahlungsdiagrammen von Antennen) ist in der Lite-Version gesperrt** und alles Jammern, Flehen und Betteln der Fans hat bisher noch nicht geholfen.

2. Installation und Lizenzierung

Die Software-Beschaffung ist kein Problem: nach dem Aufruf der Homepage (www.sonnetsoftware.com) lädt man die gepackte Datei kostenlos herunter und installiert sie auf dem heimischen Rechner. Sie ist sofort betriebsfähig, aber

es steht dem Anwender nur ein Arbeitsspeicher von 1 Megabyte zur Verfügung, doch dem kann man abhelfen.

Hinter „Admin“ in der Taskleiste des installierten Programms versteckt sich nämlich „Register Sonnet Lite“ und das sollte man unbedingt tun.

Nach der Registrierung erhält man per Email ein Lizenzfile, mit dessen Hilfe der freigegebene Arbeitsspeicher von 1 Megabyte auf 32 Megabyte vergrößert wird. Das reicht fast für alle Anwendungen (...notfalls über Verzicht an Simulationsgenauigkeit durch größere Zellenabmessungen...). Aber da die Sonnet-Entwickler dauernd versuchen, die eigentliche Rechenmaschine zu immer größerer Einsparung an Speicherplatz zu erziehen, wird die Situation für den Sonnet Lite – Anwender dauernd günstiger.

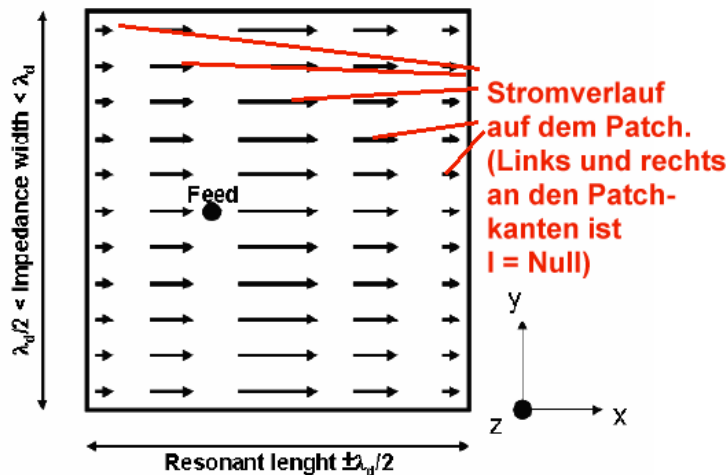
3. Grundlagen der Patchantennen

Sie bestehen aus einem Stück Leiterplattenmaterial (= „PCB“) das beidseitig mit Kupfer kaschiert ist. Die Unterseite bildet eine durchgehende Massefläche und auf der Oberseite der Platine finden wir in der einfachsten Form ein Quadrat oder Rechteck aus Kupfer (= „Patch“). Dabei muss die Platine für eine korrekte Arbeitsweise deutlich größer sein als der Patch (Richtwert für den Überstand: wenigstens 3... 5 mal Platinendicke -- und noch mehr ist noch besser).

Dieser Patch wird nun so ausgelegt, dass er eine **elektrische Länge von etwa $\lambda / 2$** aufweist. Etwas genauer ist:

$$\text{Strahlerlänge} = 0,49 \times (\lambda / 2)$$

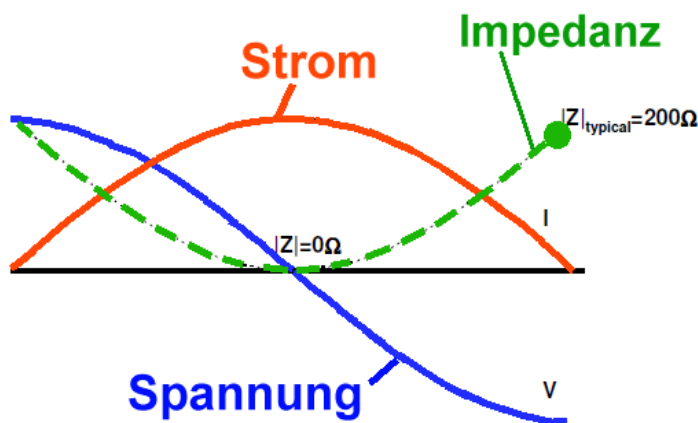
und man betrachtet ihn als **leer laufende Microstrip-Leitung**. Speist man diese Leitung am Eingang mit einem Sinussignal, dessen Frequenz genau der Resonanzfrequenz entspricht, dann erhält man diese Strom- und Spannungsverteilung (der **Speisepunkt liegt dabei exakt auf der Symmetrie-Achse des Patches**).



An beiden Leitungsenden ist die Spannung gleich groß, aber gegenphasig ($\lambda / 2$ bedeutet nämlich 180 Grad Phasenverschiebung), aber genau in Patchmitte ist die Spannung Null. **Beim Strom ist es umgekehrt: bei einer reinen verlustlosen Leitung ist er am Leitungsanfang und am Leitungsende Null, hat aber in Leitungsmitte sein Maximum.** Dies ist im nebenstehenden Bild gut zu erkennen.

Figure 2: Current distribution on the patch surface

Quelle: Urban Microwaves



Zur Repräsentation der Leistungs-Abstrahlung müssen wir uns am Leitungsanfang sowie am Leitungsende noch je einen gleich großen Strahlungswiderstand denken. Im Diagramm ist ein Gesamtwiderstand von typisch 200Ω eingetragen; also sind es 400Ω an jeder **Patch-Querseite**, denn die beiden Lastwiderstände sind von der Leistungsaufnahme her parallel zu denken (...das ist ja eine spezielle Eigenschaft der Lambda-Halbe-Leitung.....)

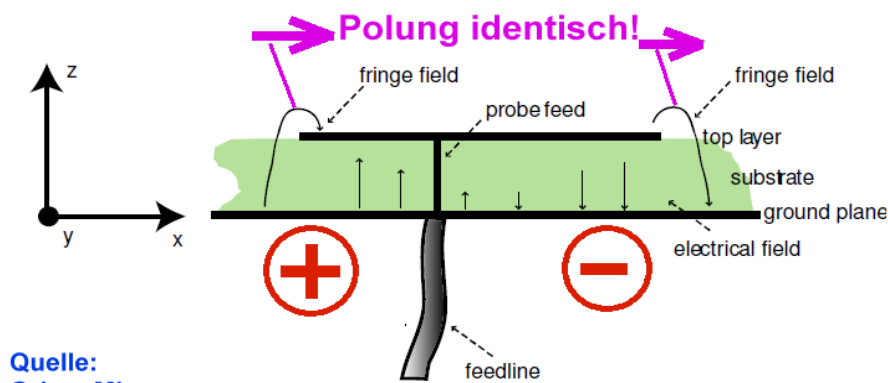
Die Patchbreite (= Leitungsbreite) beeinflusst bei dieser Bauweise die **Eigenresonanzfrequenz** nur wenig. Man geht in der Praxis dabei immer vom

quadratischen Patch aus und dann gilt: wird sie erhöht (= der Patch breiter als länger gemacht), **dann steigt die Bandbreite und der Strahlungswiderstand** wird kleiner.

Eine Frage wurde allerdings bisher nicht beantwortet:

Weshalb und wie strahlt ein solcher Kupferfleck überhaupt?

Dazu brauchen wir dieses Bild.



Quelle:
Orban Microwaves

Figure 1: Cross section of a patch antenna in its basic form

Wer genau hinschaut, der sieht die an jeder Patch-Querkante überstehenden elektrischen **Streiffelder** (= fringe fields) **und da steckt die Lösung!** An der linken und rechten Kante ist die Spannung ja gegenphasig (Siehe das vorige Bild), aber interessanterweise **zeigen dort die Feldlinien auf beiden Seiten in dieselbe Richtung und sind deshalb gleichphasig!**

Damit wirken diese beiden Patchkanten mit ihren Streufeldern als zwei parallel geschaltete „Schlitzstrahler“

(...ein Schlitzstrahler ist der „Komplementärtyp“ zu einem Antennenstab. Bei dem haben wir einen Draht und als Umgebung die Luft. Beim Schlitzstrahler ist das genau vertauscht: der Antennenstab wird durch Luft ersetzt und anstelle der umgebenden Luft haben wir nun Kupferflächen. Dadurch vertauschen sich auch die Richtungen von elektrischem und magnetischem Feld).

Damit ist die Frage der Polarisation des ausgestrahlten elektrischen Feldes gleich mit beantwortet, denn die entspricht natürlich exakt den beiden violetten Pfeilen im obigen Bild. Und wenn die Metallisierung der Platinenunterseite genügend gegenüber dem Patch übersteht, dann wirkt sie als Abschirmung und verhindert die Abstrahlung „nach unten“ (...im obigen Bild wird die Antenne also nur nach oben strahlen). Das Richtdiagramm einer einfachen Dipolantenne ist die berühmte „liegende Acht“. Bei der Patchantenne fehlt dann im Idealfall eine Hälfte dieser Acht und man erhält einen einfachen Kreis ohne Abstrahlung nach rückwärts.

Wichtiger Hinweis:

Im Beispiel findet sich die Speisung der Antenne (= Feed) links von der Patchmitte. Da steckt folgende Tatsache dahinter:

a) In Patchmitte geht die Spannung durch Null – also ist dort der Eingangswiderstand = Null.

b) Am Patch-Anfang (= also ganz links oder ganz rechts im Bild) messen wir die Parallelschaltung der Strahlungswiderstände von beiden Schlitz – im Beispiel sind das 200 Ω .

Folglich muss es zwischen Patch-Anfang und Patchmitte einen Punkt mit einem Eingangswiderstand von 50 Ω zur Einspeisung geben. Den muss man aber erst finden....

Eine weitere Möglichkeit ist die **Speisung direkt am Patch-Anfang**. Der dort herrschende Eingangswiderstand (...in der Praxis liegt er zwischen 200 und 500 Ω) muss aber durch eine **geeignete Anpass-Schaltung auf 50 Ω gebracht werden. Oft verwendet man dazu eine Lambda-Viertel-Leitung.**

3.1. Beispiel für den Einsatz einer Patchantenne im Tettninger Elektronikmuseum

Als in Tettning das neue Elektronikmuseum eingeweiht wurde, stellte sich schnell die Frage nach einer geeigneten Video-Überwachung der Exponate. Da das Museum im zweiten Stock eines historischen Gebäudes untergebracht ist, musste das Kamerasignal bis zum Eingang und zur Kasse im Erdgeschoss geleitet werden. Aber jegliche Art von Veränderung am Gebäude (= die für eine Kabelverbindung erforderlichen Löcher zu bohren oder Schlitze zu klopfen) war strikt verboten. So wurde folgende Lösung gewählt:

Auf dem Fensterbrett der Museumsetage im zweiten Stock wurde ein käuflicher und lizenzfreier ISM-Modul für 5,8 GHz aufgestellt, der über ein kurzes Semirigid-Kabel eine selbst gebaute Patchantenne speist. An den Modul ist die Videokamera angeschlossen und die Antenne wurde so auf die Außenwand des gegenüberliegenden Hauses gerichtet, dass die abgestrahlten 5,8 GHz-Signale genau in den Museumseingang reflektiert wurden. Dort wartet der Empfänger und versorgt den Überwachungsmonitor. Funktioniert prima!

Weitere Einsatzmöglichkeiten bieten das 5,8 GHz-Band der Funkamateure und das Stichwort „5G“ weist auf den kommenden Mobilfunkstandard in diesem Frequenzbereich hin. Ganz zu schweigen von in Zukunft geplanten Vernetzungen aller Dinge.

Beim eigenen aktuellen Entwicklungsprojekt (= 5,8 GHz-Empfänger aus Gainblocks) wird ebenfalls eine Antenne benötigt – **also entwerfen wir jetzt so ein Ding!**

4. Antennenentwicklung mit Sonnet Lite

4.1. Informationen und Vorgaben

Im Internet findet man folgende Details des **ISM-Bandes** (= Industrial- + Scientific- + Medicine Band):

Es sind 16 Kanäle mit 9 MHz Kanalaraster vorgesehen. Zu Kanal 1 gehört die Mittenfrequenz 5732 MHz, zu Kanal 16 die Frequenz 5867 MHz.

Die Antenne muss also eine Eigenresonanzfrequenz von **5800 MHz** aufweisen, wobei eine Mindest-Bandbreite von $9 \text{ MHz} \times 16 = 144 \text{ MHz}$ erforderlich ist.

Gefordert wird ein Eingangswiderstand von 50Ω bei 5800 MHz.

Verwendet wird Rogers RO4003C als Platine.

Daten des RO4003-Materials:

Dielektrizitätskonstante ϵ_r	= 3,38
Platinendicke = 32 MIL	= 0,508 mm
Verlustfaktor	= 0.0024 bei 6 GHz
Kupferauflage	= 18 μm

Die mechanische Platinengröße soll ca. 50 mm x 50 mm betragen.

4.2. Patchentwurf für 5,8 GHz

Erste Möglichkeit:

Die ist die einfachste und dabei nicht einmal die schlechteste. Sie geht so:

Die Patchlänge „L“ bestimmt die Polarisation des E-Feldes und die Resonanzfrequenz. Dafür muss sie etwa einer halben elektrischen Platinen-Wellenlänge entsprechen (= ca. 14 mm).

Davon sind allerdings bei der Bestimmung der echten mechanischen Länge für eine halbe elektrische Wellenlänge die „Open End Extensions“, wie sie bei leer laufenden Microstrip-Leitungen auftreten, abzuziehen. Diese Extension beträgt auf jeder Seite etwa die halbe Platinendicke. Also muss man noch die Strahlerlänge von 14 mm um $2 \times 0,25 \text{ mm} = 0,5 \text{ mm}$ verkleinern und landet etwa bei 13,5 mm Kantenlänge. Man wählt eine quadratische Patchform und prüft in einem ersten Entwurf die Bandbreite -- sie nimmt mit der Patchbreite (= waagrechte Kante) zu, aber der Strahlungswiderstand nimmt dabei ab. Dabei ändert sich die Resonanzfrequenz recht wenig. In dieser Richtung entwickelt man weiter.

Zweite Möglichkeit:

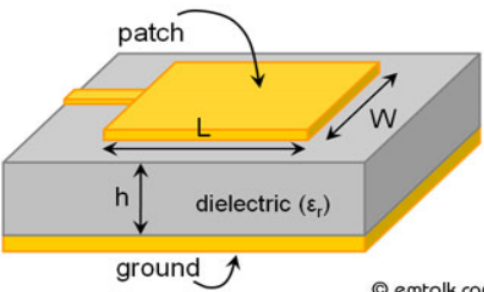
Im Internet findet sich nach der Eingabe von „microstrip patch antenna calculator“ in die Suchmaschine sehr schnell ein Link zu einem Online-Calculator, der viel benützt wird (<http://www.emtalk.com/mpacalc.php>) und auf den sich etliche Leute bei Veröffentlichungen beziehen. Sehen wir uns das mal an.

Microstrip Patch Antenna Calculator

Ad closed by Google

Report this ad

Why this ad? ↗



Substrate Parameters

Dielectric Constant (ϵ_r): 3.55

Dielectric Height (h): 0.508 mm

Resonant Frequency

f_r : 5.8 GHz

Synthesize

Analyze

Physical Parameters

Length (L): 13.6019402796 mm

Width (W): 17.146384762 mm

Input Impedance (Edge): 204.75 Ohm

Description

The microstrip patch antenna calculator determines the length (L) and width (W) of a rectangular microstrip patch antenna for a given resonant frequency or vice versa. The substrate parameters (ϵ_r and h) are required. If the ratio (L/W) is close to unity, the radiation pattern will be symmetric but may not provide a reasonable input impedance. Therefore, this calculator also suggests a value for W. The radiation edge input impedance is also calculated and is based on W.

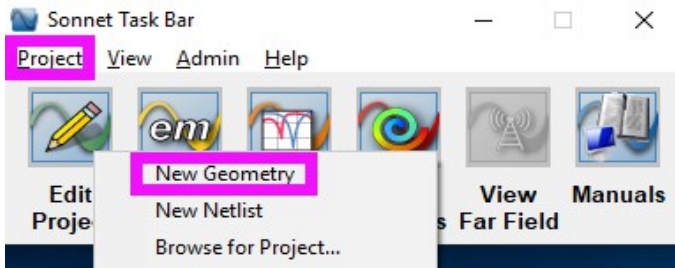
Nach dem Aufruf geben wir für das verwendete **Rogers R4003C – Material** seine Dielektrizitätskonstante (3.55), die Platinendicke (0,508 mm) sowie die Resonanzfrequenz (5,8 GHz) ein und drücken den „Synthesize“-Button. Das Programm liefert damit eine **Strahlerlänge von 13,6 mm und schlägt eine Patchbreite von 17,146 mm vor. Diesen Vorschlag wollen wir näher untersuchen.**

Als Strahlungswiderstand erhält man 204,75 Ω und das ist Absicht vom Programm! Der Patch wurde nämlich automatisch soviel breiter ausgelegt, dass der Strahlungswiderstand auf etwa 200 Ω sinkt. Und 200 Ω lassen sich mit einem 2:1 – Übertrager direkt auf 50 Ω transformieren.....

4.3. Auf geht's mit Sonnet Lite

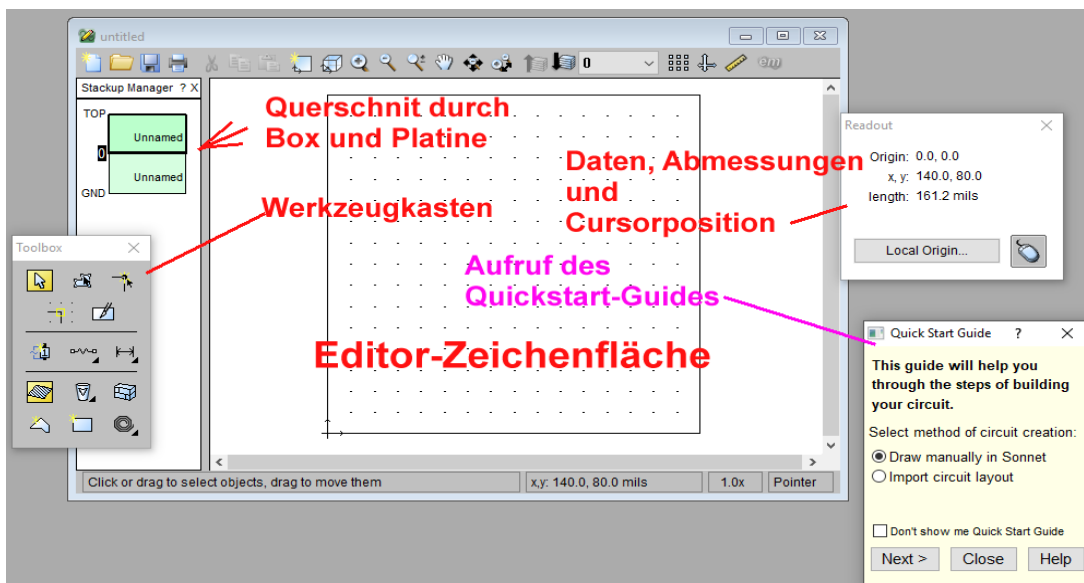
4.3.1. Nötige Vorarbeiten und Einstellungen

Wir gehen davon aus, dass die Lite-Software installiert und anschließend lizenziert wurde. Also können wir mit 32 Megabyte Hauptspeicher arbeiten und starten das Programm.



In der Task Bar wird „Edit Project“ angeklickt und anschließend „New Geometry“ gewählt.

Jetzt taucht dieser Editor-Bildschirm mit vier Zusatz-Informationen auf:



Links oben sieht man einen Querschnitt durch Box und Platine, also die einzelnen Layer samt den zugehörigen Materialien.

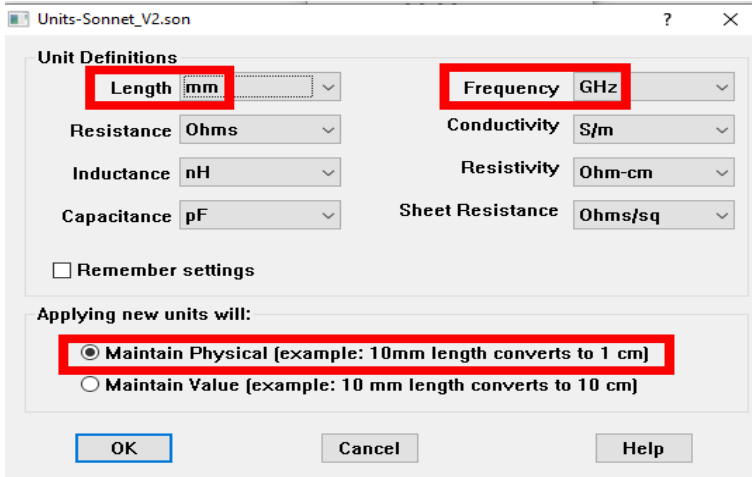
Links unten haben wir den Werkzeugkasten mit den wichtigsten Handwerkszeugen.

Rechts oben werden die Cursorposition, aber auch wichtige Daten (wie Origin, also der Nullpunkt oder die Platinenabmessungen) eingeblendet.

Rechts unten findet man den Zugang zum Quickstart Guide. (Er gibt uns die zu erledigenden Punkte in der korrekten Reihenfolge an, wobei „Create new project“ natürlich schon erledigt und deshalb abgehakt ist).

4.3.2. Specify Units

Diese Einstellung findet sich hinter „Circuit“ und dann „Units“ in der Menüleiste.



Bitte nun genau prüfen und ggf. korrigieren:

Steht die Längeneinstellung auf „mm“?

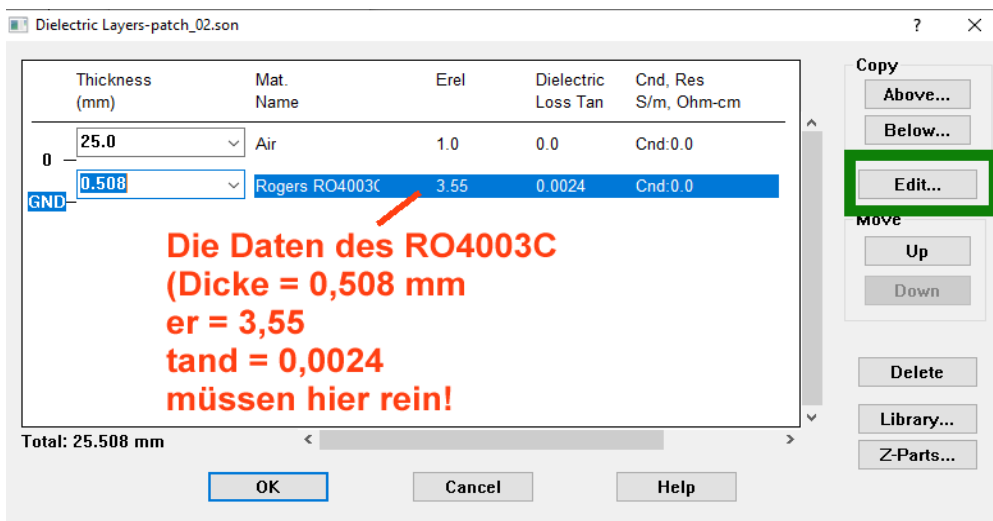
Ist weiter unten „Maintain Physical“ aktiv?

Steht die Frequenzeinstellung auf „GHz“

Stimmen die Einheiten für evtl. verwendete diskrete Bauteile?

4.3.3. Dielectric Layers

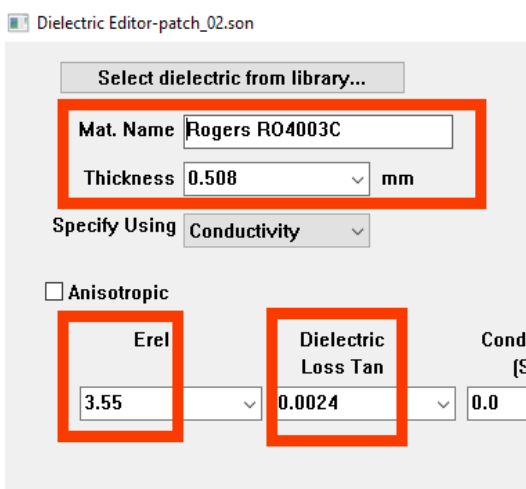
Das zugehörige Menu findet sich als „Dielectric“ hinter „Circuit“ in der Menüleiste.



Da aktivieren wir zuerst durch einen Mausklick die **untere Zeile (= Layer)**, denn das wird unsere Platine. Mit „Edit“ kommen wir dann zum nächsten Menü und holen uns dort aus

„Select dielectric from library“

die Daten für unser **Rogers RO4003C - Material**



Achtung:

Bitte genau nach der folgenden Vorgabe die Library-Einstellungen für Platinen aus „Rogers RO4003“- Material eintippen und mit OK abschließen: **Die Library-Werte müssen wir nämlich laut dem Rogers - Original-Datenblatt für den Einsatz bei 5,8 GHz etwas korrigieren:**

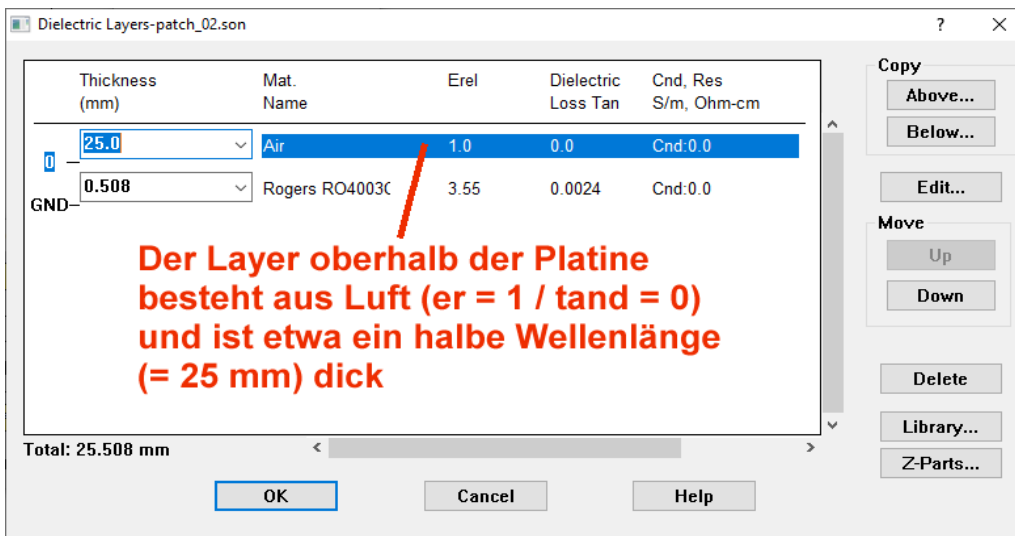
Es gilt da:

er = 3,55
Loss Tangent = tand = 0,0024

Und die **Platinendicke** mit **0,508 mm** dürfen wir auch nicht vergessen...

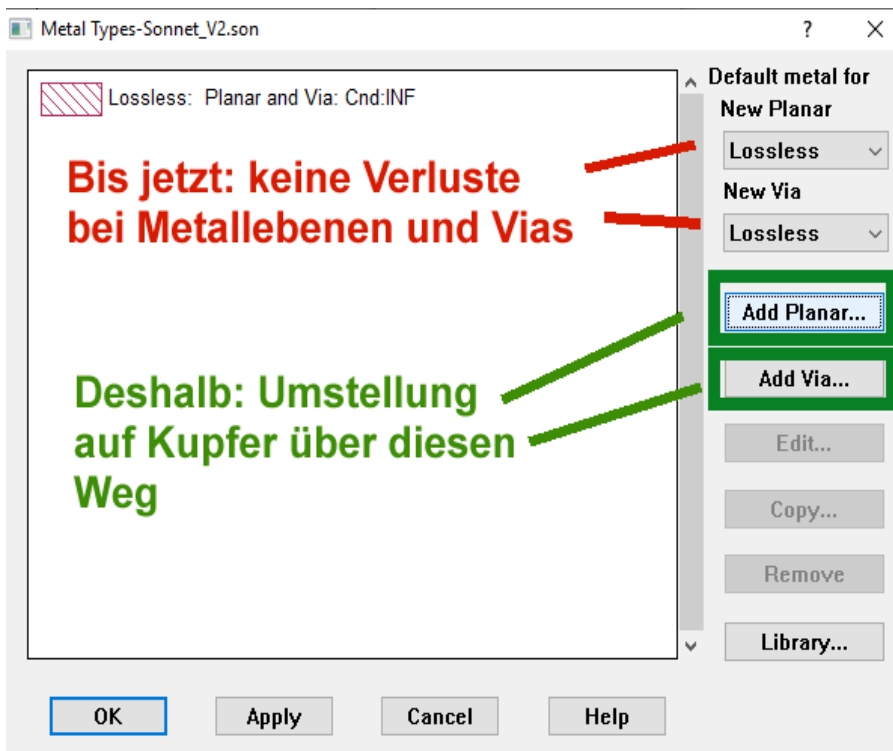
Jetzt folgt nochmals dasselbe Spiel für die **Luft** (mit **er= 1** und **loss tangent = 0**) in der **Box** oberhalb der **Antenne**.

Also öffnen wir nochmals (über „Circuit“ und „Dielectric Layers“) die Layer-Darstellung und klicken auf den **Layer oberhalb der Platine**. Dort schreiben wir nach dem Aufruf von „Edit“ folgende Daten hinein:



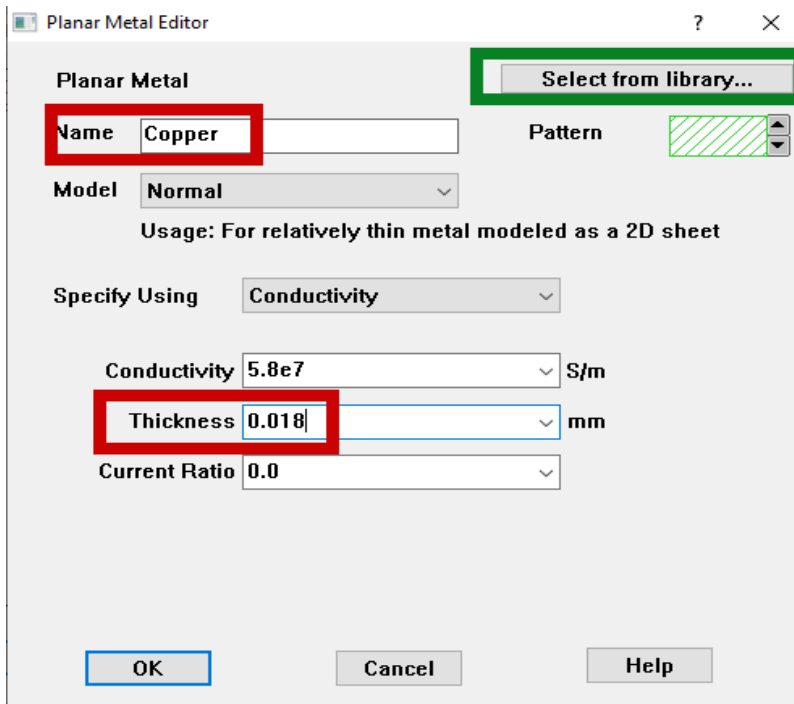
Das mit der Dicke des Luftpolsters (= etwa halbe Wellenlänge) über der Platinenoberfläche muss Einem natürlich vorher gesagt werden, wenn es um Patchantennen geht...steht irgendwo im Sonnet-Handbuch...

4.3.4. Metal Types



Die Metallisierung versteckt sich hinter „Circuit“ und „Metal Types“.

Da steht zunächst in der Liste nur „lossless“, also klicken wir auf „Add Planar“.

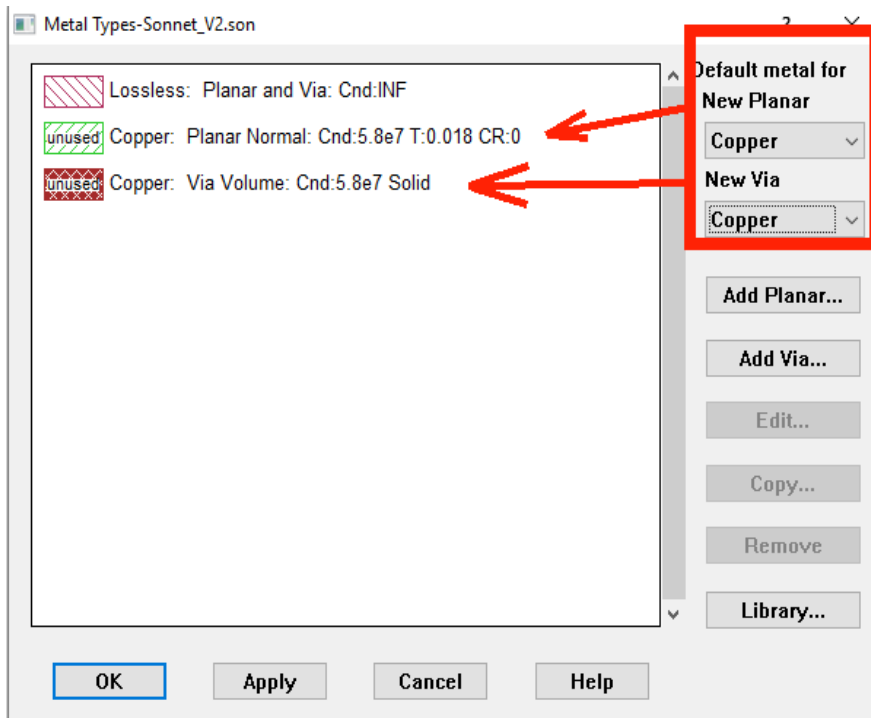


Im auftauchenden Menü holen wir uns aus der Library die Daten für „Copper“ und dürfen nicht vergessen, eine **Schichtdicke („Thickness“)** von 0.018 mm vorzusehen.

Sieht alles so aus -- einschließlich der grün schraffierten Fläche für eine Kupferschicht mit der korrekten Schichtdicke - dann drücken wir OK.

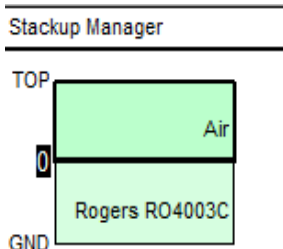
Dann wiederholen wir das ganze Spiel für die **Vias** (= Durchkontaktierungen).

Im Metal-Type-Menü folge nun eine wichtige Sache:



Bitte nicht vergessen, den neuen Ebenen (= Planars) und den neuen Vias auch das Metall „Copper“ zuzuweisen....

....und den Bildschirm mit dem nebenstehenden Bild zu vergleichen.



Übrigens:

Dieses hübsche kleine Bild im linken oberen Eck des Editor-Bildschirms gibt jederzeit Auskunft über die Materialien bei jedem Layer. Außerdem kann man durch einen simplen Mausklick auf „Null“ oder „Ground“ zwischen diesen Ebenen umschalten.

4.3.5. Box-Einstellungen

Wir müssen unseren Patch **in lauter kleine Zellen aufteilen und die Größe der Box festlegen**, in der wir simulieren wollen. (Die Informationen zu Aufbau und Funktion der Box gab es ja schon im Einführungskapitel). Da gibt es einige Spielregeln, die irgendwo im Manual stehen:

Die **Länge „y“ bzw. die Breite „x“ einer Zelle** können wir als Anwender **frei wählen** und die beiden Werte müssen nicht gleich sein. Jedoch sollte **ihr Wert am besten zwischen 1% und 3% der Wellenlänge liegen**. **Werte unter 1% ergeben genauere Ergebnisse**, führen jedoch zu sehr langen Rechenzeiten und starker Belegung des Arbeitsspeichers.

Aber vom empfohlenen Höchstwert (= 5% der Wellenlänge) sollte man entfernt bleiben, denn dann nimmt die Simulationsgenauigkeit rapid ab.

Sonnet empfiehlt, von allen Kanten der zu simulierenden Struktur bis zur Boxenwand zwischen ein und drei Wellenlängen Abstand einzuhalten. Bei Patchantennen wird empfohlen, möglichst in Richtung Höchstwert zu gehen -- wenn das bei der Lite-Version möglich ist, ohne dass das Programm wegen Überschreitung der Lizenzgrenze mit einer Fehlermeldung abbricht....!

Der **Deckel der Box** darf bei einer Antennensimulation **NICHT aus Metall** bestehen. Das muss unbedingt durch „**Free Space**“ ersetzt werden, denn wir wollen ja abstrahlen!
Für den **Boden der Box** verwenden wir **Kupfer**.

Fangen wir an:

Die **Wellenlänge von 5,8 GHz** beträgt in Luft ca. **52 mm**. Der Patch sollte eine **Breite x = 17,15 mm** sowie eine **Höhe y = 13,6 mm** aufweisen (Siehe Kapitel 4.3.) Addieren wir auf allen vier Seiten mindestens ca. 2 Wellenlängen (also je 104 mm) dazu, dann bekommen wir folgende Box-Abmessungen:

X-Richtung:	$17,146 \text{ mm} + 2 \times 104 \text{ mm} = 225,146 \text{ mm}$.	Da wählen wir 225 mm
Y-Richtung:	$13,6 \text{ mm} + 2 \times 104 \text{ mm} = 221,6 \text{ mm}$.	Da wählen wir auch 225 mm

Bei der **Festlegung der Zellabmessungen** sollten wir daran denken, dass die Wellenlänge in Luft ca. 52 mm beträgt.

Wir nehmen für x und y denselben Wert von **0,05 mm**.

Das wäre etwa 0,1 % der Wellenlänge und ein geschickter praktischer Wert für das Zeichnen der Struktur. Und eine sehr feine, gute Auflösung...

(Geprüft habe ich schon vorher den Arbeitsspeicher-Platzbedarf für diese Auflösung: er bleibt unter den zulässigen 32 Megabyte).

Box Settings-calculator_insert_matching_01.son

The screenshot shows the 'Box Settings' dialog box. The 'Sizes' section contains fields for 'Cell Size' (0.05, 0.05) with a 'Lock' checkbox checked, and 'Box Size' (225.0, 225.0) with a 'Lock' checkbox unchecked. Below these are 'Num. Cells' (4500) and 'Set Box Size with Mouse' and 'Cell Size Calculator' buttons. The 'Covers' section has 'Top Metal' set to 'Free Space' and 'Bottom Metal' set to 'Copper', both highlighted with green boxes. There is also a 'Symmetry' checkbox (unchecked) and an 'Estimate Memory' button. At the bottom are 'OK', 'Apply', 'Cancel', and 'Help' buttons.

Bitte hinter „Circuit“ das Box-Menü öffnen und alle diese Vorgaben im roten Kasten eintragen.

Die beiden **grünen Kästen** sind sehr wichtig:

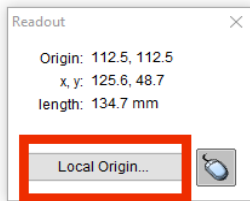
Nach oben wollen wir abstrahlen, also brauchen wir dort „**Free Space**“

Der Boden der Box soll aus **Kupfer** bestehen

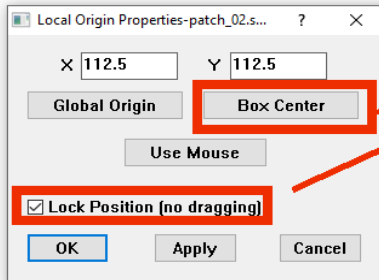
Die vom Online-Calculator ausgespuckten Patch-Abmessungen runden wir auf

17,15 mm x 13,6 mm, damit alles besser in das gewählte Raster passt und leichter zu zeichnen ist.

4.3.6. Zeichnen des Patches



**Erst auf
"Local Origin"
klicken...**



**....und dann den
Origin in Boxmitte
zentrieren**

Schritt 1:

Zunächst sorgen wir dafür, dass der Nullpunkt genau in der Boxmitte sitzt.

Dazu gehen wir in das Menü „Tools“ und suchen dort nach „Local Origin“.

Er muß zum Punkt

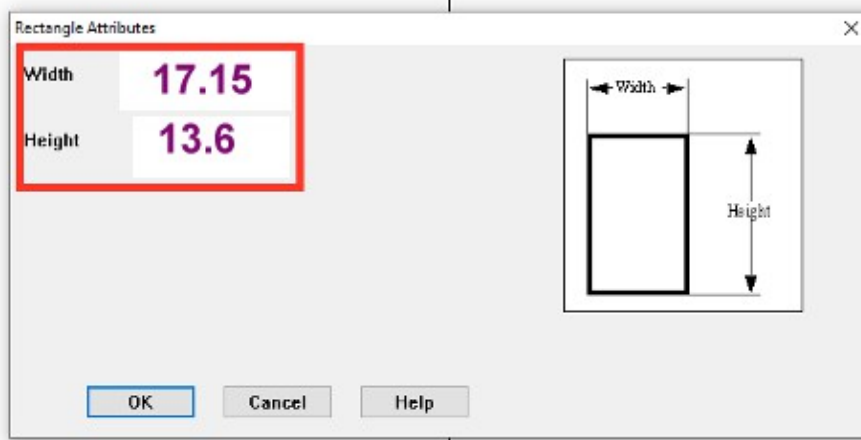
112,5 x 112,5

verschoben werden.



Schritt 2:

Jetzt kommt der Patch als Rechteck dran.



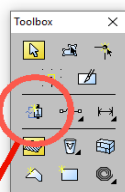
Lösung:

**Wir gehen hinter „Tools“,
klicken dort auf „Add
Metalization“ und dann auf
„Rectangle“.**

Jetzt können wir die
vorgesehenen
Patchabmessungen

(17,15 x 13,6 mm)

eintragen und anschließend
den Patch mit seinem unteren
linken 'Eck genau (durch Ziehen
mit der Maus) auf den Origin in
Boxmitte setzen.



**Erst auf "Add port"
klicken...**



**Jetzt den Port direkt
auf dieser Kante absetzen.
Er schnappt von selbst in
die Mitte!**

Schritt 3:

Nun wird der **speisende Port** etwa in der Mitte
der unteren waagrechten Kante platziert. Dabei
übernimmt Sonnet automatisch seine genaue
Positionierung in Mitte dieser Kante!

Jetzt: mit der rechten Maustaste auf den
abgesetzten Port klicken und dann seine
„Properties“ aufrufen.

Darin wird auf „**Autoground**“ umgestellt.

Port Properties-untitled

Port Number: 1 Type: **Autognd**

Reference Plane

Ref. Plane: 0.0 mm

Cal. Length: Auto mm

—Advanced Options—

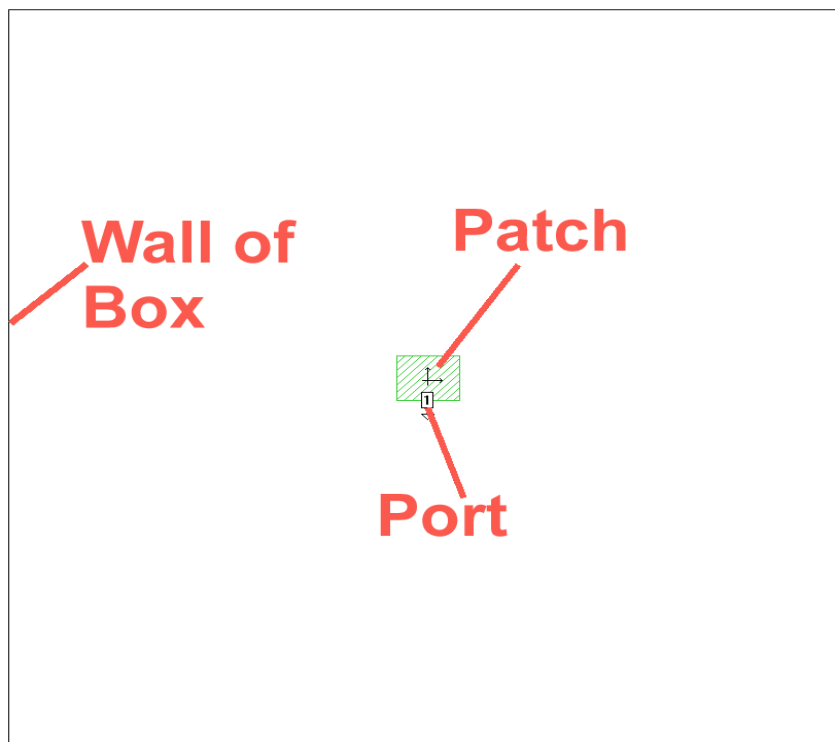
Length: All auto grounded ports are independent

Orientation: Auto grounded ports can not be diagonal

Resistance [Ohms]	Reactance [Ohms]	Inductance [nH]	Capacitance [pF]
50.0	0.0	0.0	0.0

OK Apply Cancel Help

Jetzt markieren wir das komplette Gebilde mit der linken Maustaste und **verschieben es soweit, dass sein Mittelpunkt möglichst genau in der Boxmitte landet.**



Damit ist das Projekt fertiggestellt.

4.3.7. Vorbereitung des Frequency Sweeps

Wir arbeiten mit einem „Adaptive Sweep“ von 5,6 bis 6 GHz und klicken zur Programmierung auf „Analysis“, gefolgt von „Setup“ (der Sweep-Bereich von 5,6 GHz....6 GHz wurde gewählt, damit die geforderte Resonanzfrequenz genau in der Mitte dieses Bereiches liegt).

Bitte auch die Berechnung der Stromverteilung auf dem Patch durch ein Häkchen bei „Compute Current Density“ freigeben.

Analysis Setup-Sonnet_V2.son

Options

☒ Compute Currents

Speed/Memory...

Advanced...

Analysis Control

Adaptive Sweep (ABS)

Start [GHz] Stop [GHz]

5.6 6.0

OK Cancel Help

Zum Schluss klicken wir noch auf „Speed / Memory“...

Dort finden wir die Möglichkeit, die Berechnungszeit und den Speicherbedarf auf Kosten der Genauigkeit zu verkürzen! (...lassen wir aber erst mal unverändert).

Warnung:

Wer auf die Taste „Advanced“ klickt, steigert die Rechengenauigkeit durch eine große Anzahl von untersuchten Frequenzen erheblich.

(Die Kehrseite war bei mir ein Anstieg der Rechenzeit auf etwa

zwei Stunden...)

4.3.8. Estimate Memory

Estimated Memory-patch_HAM_01.son

Estimated memory: 14 MB

Subsection total: 1,314

Subsections by level and type:

Level 0:

Staircase: 971

Ground Plane: Via: 343

Darauf sollte man nicht verzichten!

Falls nämlich der Maximalwert von 32 Megabyte Arbeitsspeicher überschritten wird, gibt es einen Error samt Abbruch. Und dann muss man sich etwas überlegen (z. B. größere Zellen oder kleinere Box), wenn man weitermachen will.

(Diese Option findet sich ebenfalls im „Analysis“-Menü).

4.4. Simulation

4.4.1. Vorbereitung

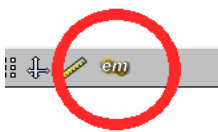
Bevor man loslegt, sollte man sich die Mühe machen, folgende Dinge nochmals zu prüfen:

a) Besteht die Patchfläche wirklich aus Kupfer und leuchtet sie deshalb grün?

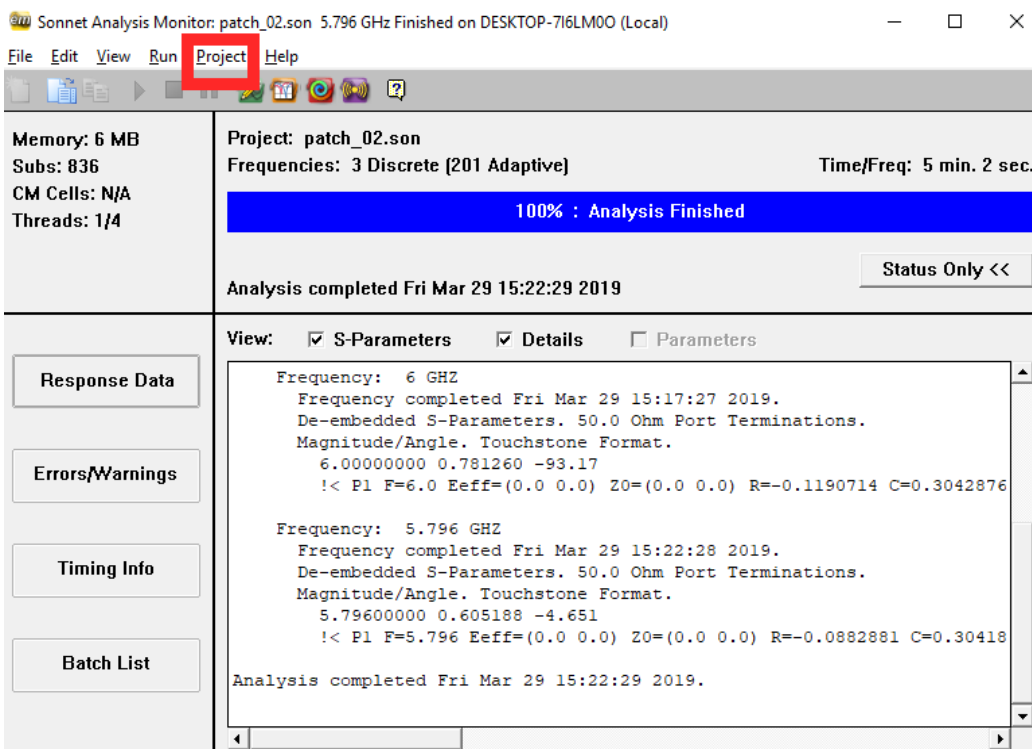
b) Wenn man das Box-Menü öffnet: steht der Deckel wirklich auf „freespace“, der Boden auf „copper“? Ist eine Zellengröße von 0,05 mm x 0,05 mm und eine Boxgröße von 225 mm x 225 mm eingestellt?

c) Stimmen die Einstellungen für Dicke, ϵ_r und $\tan \delta$ bei der Platine, also beim „Dielectric Layer RO4003C“?

d) Wird bei einem Klick auf „Estimate Memory“ (hinter der „Analysis-Karteikarte) weniger als 32 MB an benötigtem Speicherplatz angezeigt?



Startet man nun die Simulation durch einen Klick auf den letzten Button („em“) in der Menüleiste, dann ist anschließend eine gemütliche Wartezeit von ca. 20 Minuten angesagt.

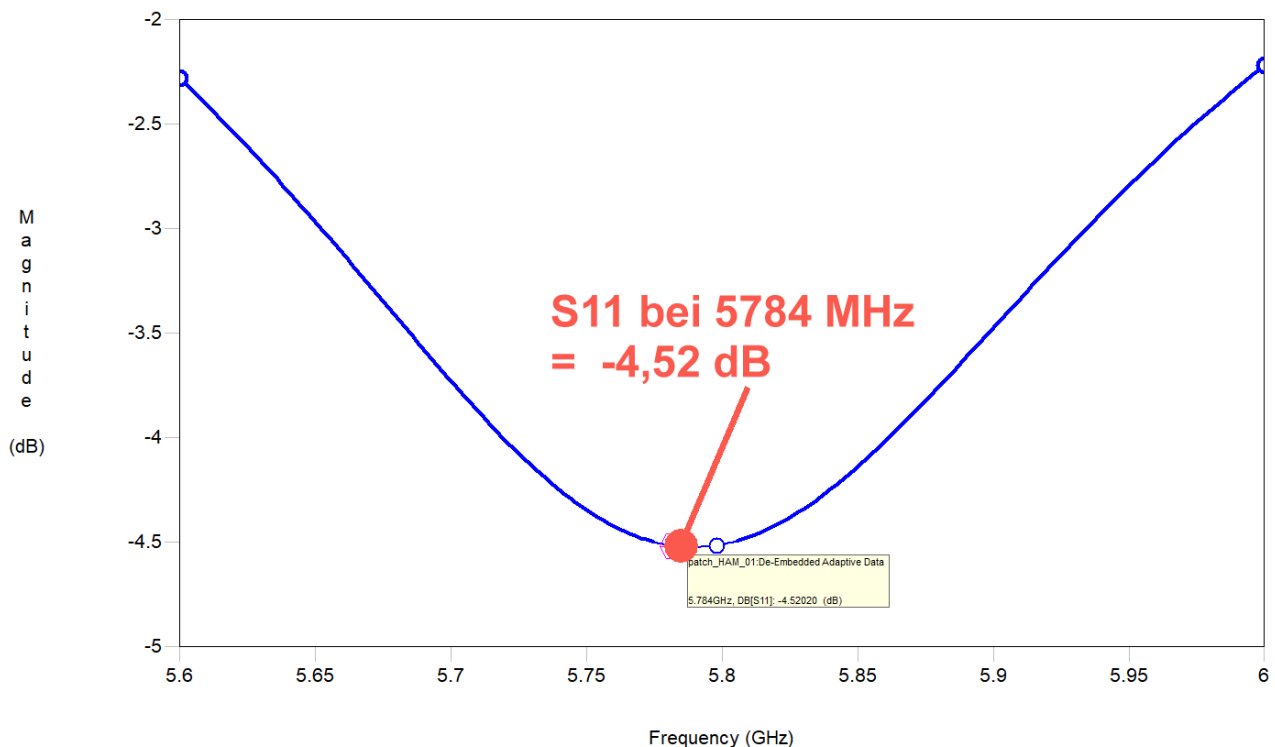


Und wenn dieser blaue Balken auftaucht, dann haben wir es geschafft!

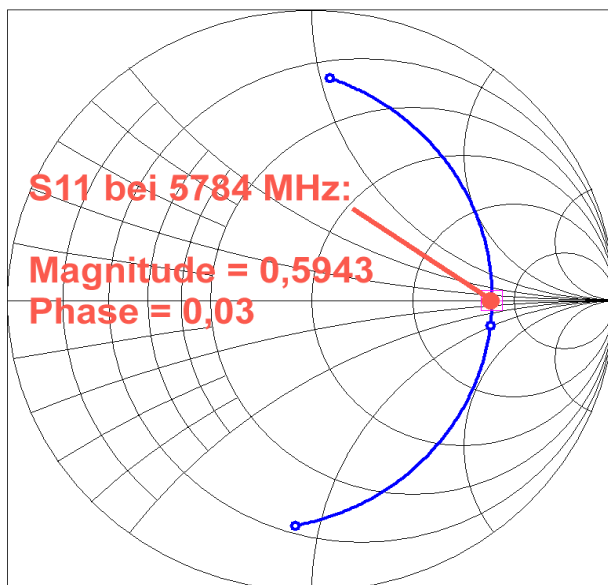
Wichtig ist jetzt das rote Rechteck „Project“, denn dahinter geht es zur Ausgabe der Rechenergebnisse.

4.4.2. Ergebnis der S11-Simulation

Nach dem Klick auf „Project“ rufen wir „View Response“ und „New Graph“ auf. Die Antwort ist dieses Diagramm:



Und wenn wir von „Graph“ über „Type“ zu „Smith“ gehen, bekommen wir das Smithchart zu sehen.



Übrigens:

Der Reflektionsfaktor von 0,5943 entspricht einem Eingangswiderstand von

$$r = 50 \times (1 + r) / (1 - r) =$$

$$50 \times (1,5943 / 0,4057) = \mathbf{196,5 \, \Omega}$$

am Port-Anschluss

Fast genau das hat auch der Online-Calculator aus dem Internet behauptet...

Ein Hinweis:

Die Resonanzfrequenz liegt ja noch einen kleinen Hauch daneben. Aber da machen wir nichts, denn wir müssen ja noch die 50 Ω – Anpassung verwirklichen und wer weiß, was dann geändert werden muss...

4.4.3. Die Stromverteilung bei Resonanz

Darnach muss man natürlich erst (über „Project“ und „View Current“) fahnden, sich das Bild heranzoomen und dann auf die **Resonanzfrequenz von ca. 5,8 GHz** umstellen.

Das ist der Lohn:



4.4.4. Aus Neugier: Bestimmung des reinen Antennen-Strahlungswiderstandes

Das ist nicht sehr schwierig:

Man muss nur vor der Simulation die Verluste im Dielektrikum zu Null setzen und bei allen Metallflächen auf „lossless“ stellen, dann bleibt die reine Abstrahlung als einziger „Verlust“ übrig.

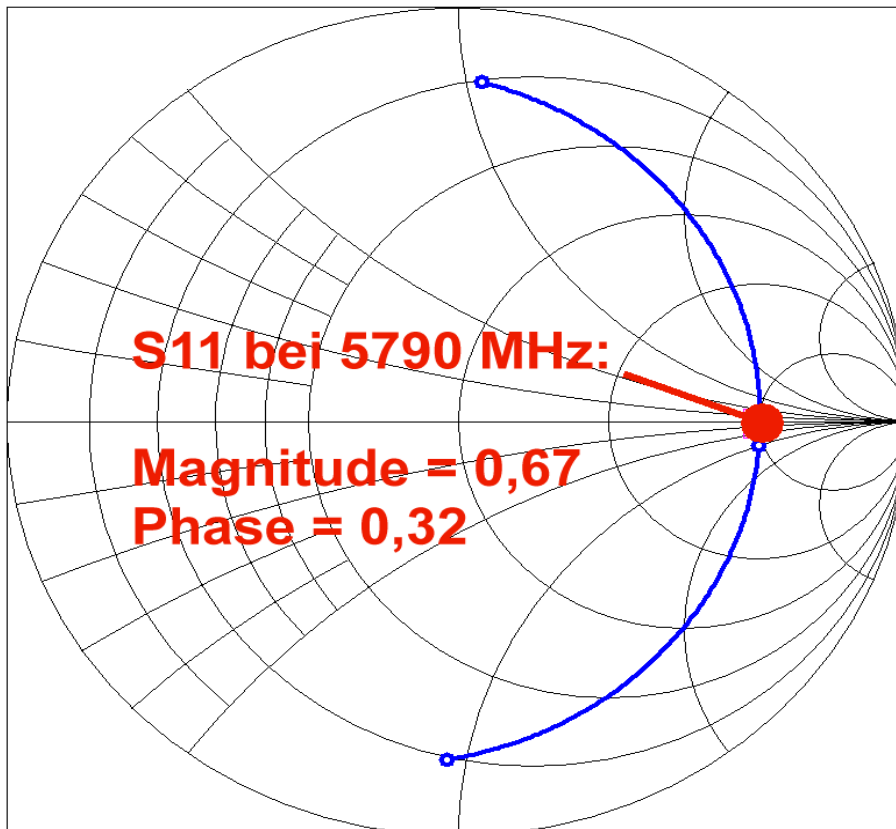
(Achtung: bei den Box-Einstellungen nicht vergessen, auch den Boden der Box „lossless“ zu machen).

Ganz wichtig:

die Patchfläche muss nun rot (= lossless) leuchten!

Die Patchfläche mit 17,15 mm x 13,6 mm darf natürlich nicht angetastet werden.

Und die Berechnung der Stromverteilung auf dem Patch sollten wir auch ausschalten...das spart enorm Rechenzeit...



Dann erhält man für die Reflektion folgendes Ergebnis im Smithchart:

Bei 5,79 GHz weist der Reflektionsfaktor „r“ eine Magnitude von 0,67 auf. Die Phase ist mit 0,3 Grad ca. Null.

So lässt sich nun der reine Strahlungswiderstand berechnen zu

$R =$

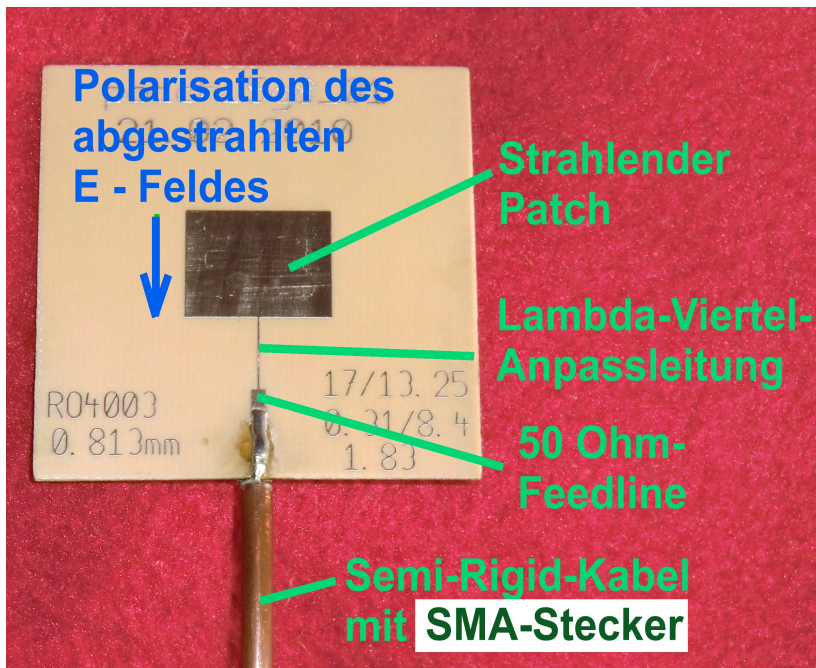
$$50 \times (1+r) / (1-r) =$$

$$50 \times (1+0,67 / (1-0,67)$$

$$= 253 \text{ Ohm}$$

5. Anpassung des Patches an 50 Ω

5.1. Anpassung mit Lambda -Viertel-Leitung



So sieht das in der Praxis aus!

Die **Anpassung** des hochohmigen Eingangswiderstandes (= Summe aus Abstrahlung sowie Verlusten im Dielektrikum und im Kupfer des Patches = **200 Ω**) an den Systemwiderstand mit 50 Ω übernimmt eine $\lambda / 4$ - Leitung.

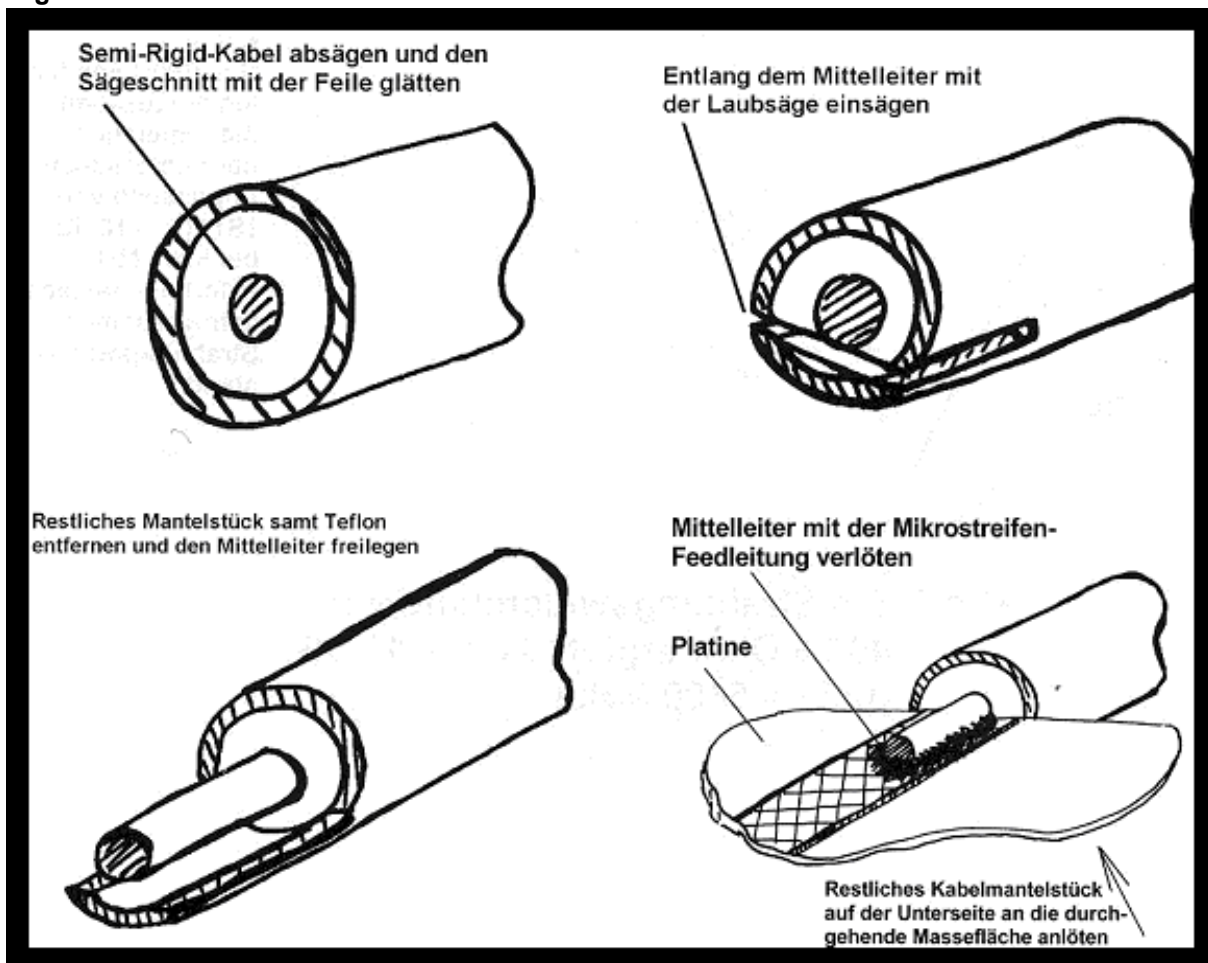
Bei einer solchen Leitung gilt

$$Z = \text{sqr}(R_{\text{in}} \times R_{\text{out}}) = \text{sqr}(50\Omega \times 200\Omega)$$

$$Z_{\lambda/4} = 100 \Omega$$

Von ihrem Ende bis zum Platinenrand führt eine **50 Ω - Microstrip-Leitung**, die mit einem ca. 10 cm langen Semirigid-Kabel verbunden wird. **Am Ende des Semi-Rigid-Kabels ist ein SMA-Stecker angelötet.**

Eine wichtige Sache ist der „stoßfreie“ (= reflexionsarme) Übergang von der Leiterplatte zum Semi-Rigid-Kabel. So wird er verwirklicht:



5.1.1. Praktische Umsetzung und Simulation

Für unsere Antenne gelten folgende Daten bei 5,8 GHz:

Eingangswiderstand des Patches = 200 Ω

Wellenwiderstand der Transformationsleitung: = 100 Ω

Feedline = 50 Ω

(Platine: $\epsilon_r = 3,55$ / $\tan \delta = 0,0024$ / Dicke = 0,508 mm)

Da holen wir uns wieder aus dem Internet einen guten Microstrip-Calculator und entwerfen die beiden Leitungen:

a) Feedline mit 50 Ω

Substrate Parameters	
Dielectric Constant (ϵ_r):	3.55
Dielectric Height (h):	0.508 mm
Frequency:	5.8 GHz

Electrical Parameters	Physical Parameters
Zo: 50 Ω	Width (W): 1.13637868323 mm
Elec. Length: 90 deg	Length (L): 7.75496785287 mm

Synthesize **Analyze**

Gewählt:
Breite = 1,2 mm
Länge = 7,75 mm (für 90 Grad elektrischer Länge)

b) Lambda-Viertel-Leitung für 5,8 GHz mit Z = 100 Ω

Substrate Parameters	
Dielectric Constant (ϵ_r):	3.55
Dielectric Height (h):	0.508 mm
Frequency:	5.8 GHz

Electrical Parameters	Physical Parameters
Zo: 100 Ω	Width (W): 0.28704443140 mm
Elec. Length: 90 deg	Length (L): 8.10507719028 mm

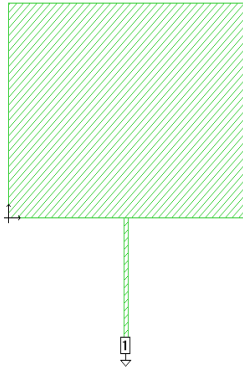
Synthesize **Analyze**

Gewählt:
Breite = 0,3 mm
Länge = 8,1 mm

Die Aufgabe muss aber in zwei getrennten Teilen durchgeführt werden:

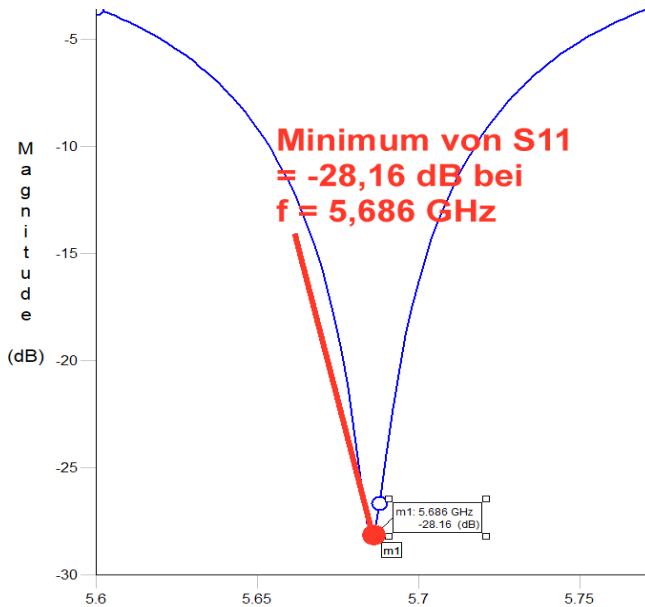
In Teil 1 wird die Anpassung der Lambda-Viertel-Leitung an den Patch optimiert. Wegen des entstehenden Steps (= sehr breiter Patch trifft auf schmale Anpassleitung) müssen wir den Patchentwurf nochmals überarbeiten, denn die Resonanzfrequenz wird sich dadurch erniedrigen.

In Teil 2 vollenden wir den Übergang von der Lambda-Viertel-Leitung zur Feedline.



Teil 1:

Wir verwenden nochmals die Patchabmessungen von 17,15 mm x 13,6 mm und verbinden die Mitte der unteren Patchkante mit der Lambda-Viertel-Leitung (Breite = 0,3 mm / Länge = 8,1 mm). Anschließend simulieren wir S11.



Der entstehende Step reduziert die Resonanzfrequenz von 5784 MHz auf f = 5686 MHz

Also müssen wir die Patch-Höhe (...sie bestimmt ja die Resonanzfrequenz...) von 13,6 mm auf

$$13,6 \times (5686 / 5800) \text{ mm} = 13,3 \text{ mm}$$

vermindern.

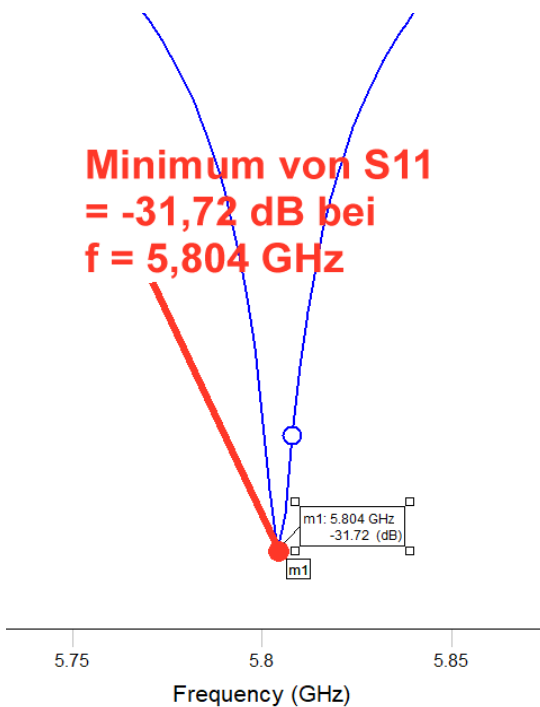
(Die Patchbreite mit 17,15 mm bleibt dabei unverändert, denn sie bestimmt nur den Eingangswiderstand).

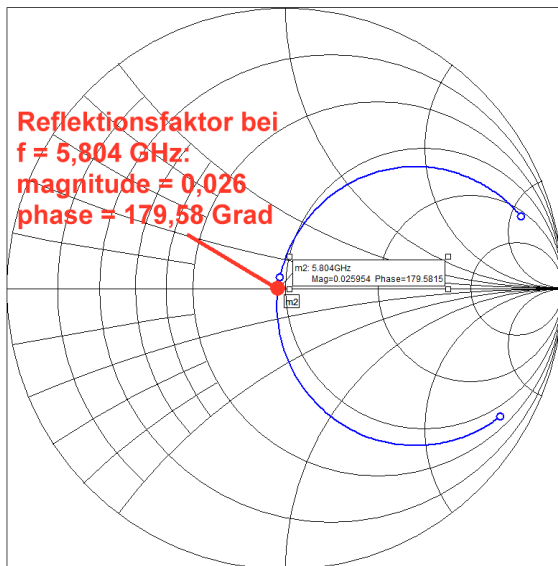
Minimum von S11
= -31,72 dB bei
f = 5,804 GHz

Also nochmals neu zeichnen, Port anbringen, alle Einstellungen kontrollieren, simulieren....

Ergebnis:

Die Frequenzverschiebung hat geklappt, die Anpassung stimmt auch recht gut.



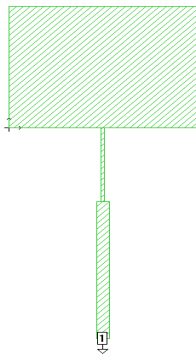


Hier nochmals dasselbe Ergebnis, diesmal aber als **Smithchart**.

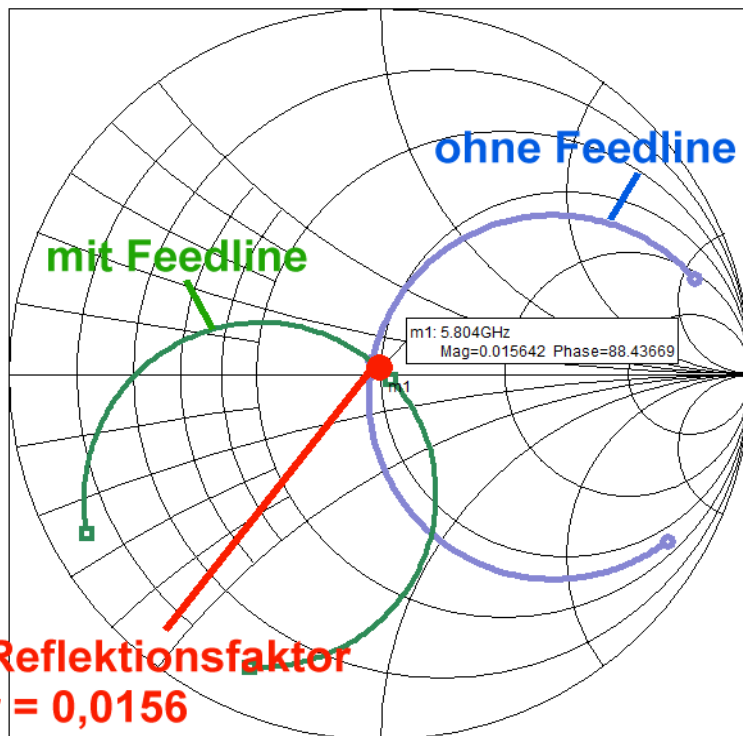
Man sieht, dass man die Impedanz der Transformationsleitung noch einen Hauch größer machen könnte. Dann würde die Kurve genau durch den Diagramm-Mittelpunkt verlaufen.

Doch wir machen einfach weiter und verpassen der Anordnung noch eine **50 Ω -Feedleitung mit 1,2 mm Breite**.

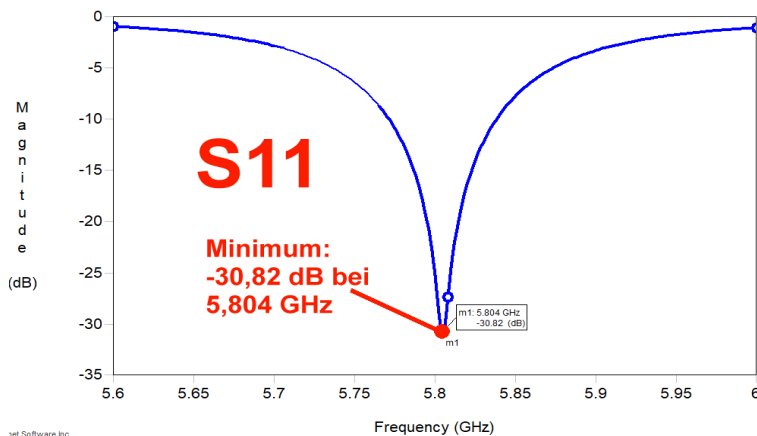
Ihre Länge ist für die Simulation unwichtig. Denn wenn die Anpassung stimmt, dreht sich die bisherige Kurve einfach im Kreis um den Diagramm-Mittelpunkt.



So sieht die Schaltung für diese Simulation aus.



Sehr schön sieht man anschließend die angekündigte Drehung der Kurve im Uhrzeigersinn...



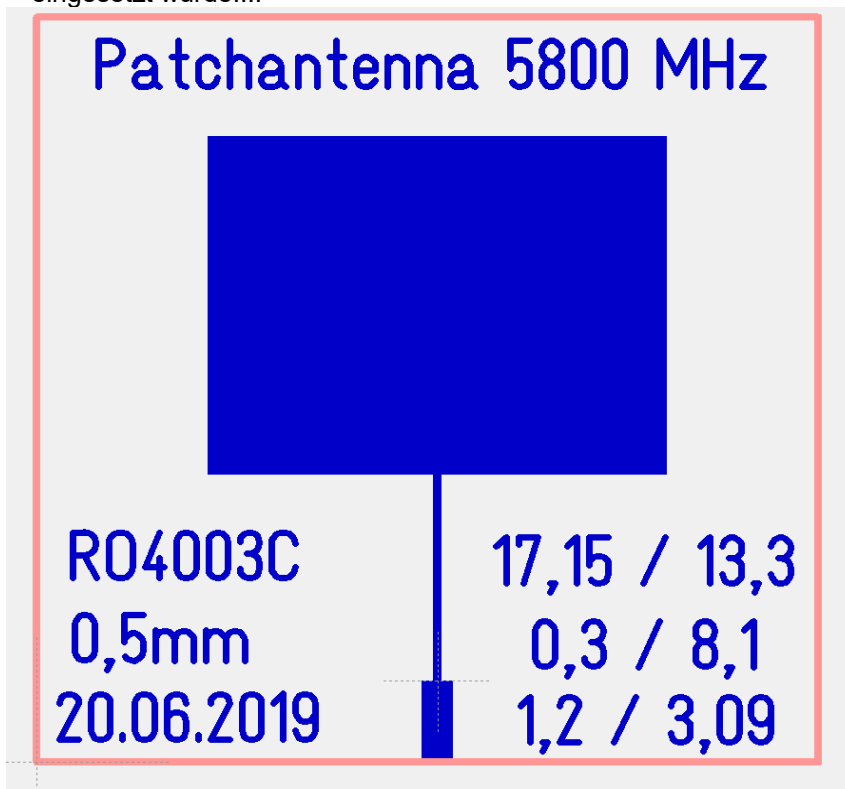
.....aber auch der Blick auf das kartesische Diagramm ist interessant.

So wollen wir das gut sein lassen und an die Leiterplatte gehen.

Das sollte man sich zum Prinzip machen:

Bitte alle Details und Maße mit auf der Platine unterbringen.

Nach einem halben Jahr sucht man sonst verzweifelt nach diesen Daten, wenn das Teil zwischen durch nicht eingesetzt wurde....



Der Rest ist Arbeit für die Firma „micron20“ in Bulgarien.

5.2. Anpassung durch „Inserted Feed“

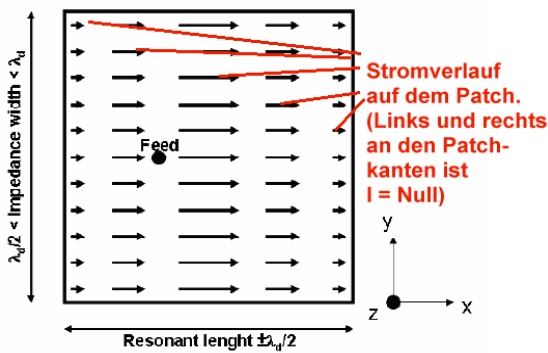
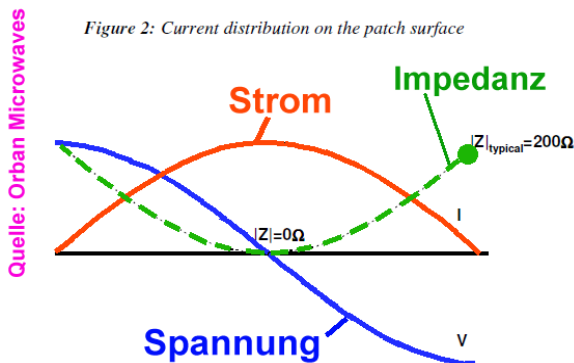


Figure 2: Current distribution on the patch surface



Quelle: Urban Microwaves

Da brauchen wir nochmals dieses Bild aus Kapitel 3 (= Grundlagen der Patchantennen.

Die Antenne wird „von unten her“ über eine dort angebrachte SMA-Buchse gespeist. Ihr Innenleiter geht dabei durch die Platine hindurch und ist auf der Oberseite mit der Patchfläche verlötet.

Wie bei unserer Antenne haben wir einen **Eingangswiderstand von 200 Ω** an der „Querkannte“. Um am Feedpunkt genau auf 50 Ω zu kommen, müssen wir den Punkt finden, an dem die **Spannung auf die Hälfte** abgesunken ist (...so gehört sich das für eine Transformation bei Impedanzen um den Faktor 4...).

Von der Mitte bis zur Kante steigt die Spannung sinusförmig bis zum Maximum an und das entspricht einem Winkel von 90 Grad beim Sinusverlauf der Spannung. Von der Patchmitte bis zum feedpoint sind es dann 30 Grad.

Das Mathematikbuch sagt, dass der Sinus von 30 Grad = 0,5 beträgt und 30 Grad entsprechen **einem Drittel der halben Patchlänge = einem Sechstel der Gesamtlänge = 2,2666 mm**.

Bei einer **Patchlänge = 13,6 mm** müssen wir also das Loch

exakt **2,2666 mm links von der Mitte** bohren. Oder, was für den Platinenentwurf leichter ist, in einer Entfernung von

$$x = 13,6/2 - 2,2666 = 4,533 \text{ mm}$$

vom linken Rand.

5.2.1. Patch-Erstellung und Simulation

Zuerst brauchen wir wieder den Patch in voller Länge (**17,15 mm x 13,6 mm**). Im Abstand von **4,53 mm zur breiten Patchkante** ordnen wir ein „Via“ an. Sein Durchmesser von **0,635 mm** entspricht dem Innenleiter der SMA-Buchse.



Das Via finden wir über „Tools / Add Via / Circular“ und füllen das Attribut-Menü so aus.

Das Via wird anschließend (am **Punkt 8,6 / 4,53 mm** von linken unteren Eck des Patches entfernt) absetzt und mit einem **Port** versehen.

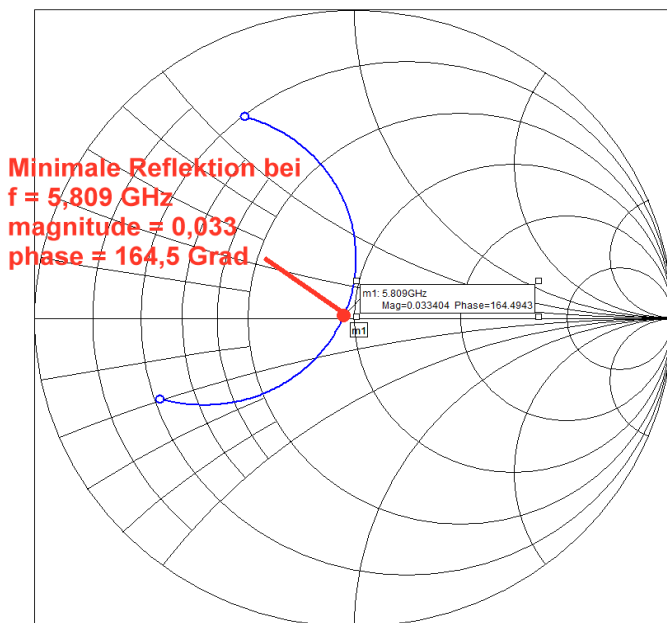
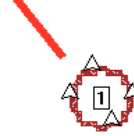
Zur Information:

den Port findet man anschließend nur in der „Ground“ - Ebene!

**Via, wie in Ebene
Null zu sehen**



**Via mit Port, wie in
Ebene "GND" zu sehen**



Das Simulationsergebnis ist sehr erfreulich.

Aber an dieser Stelle ist es besser, erst mal eine Leiterplatte fertigen zu lassen, sie zu vermessen und anschließend in Feinarbeit die

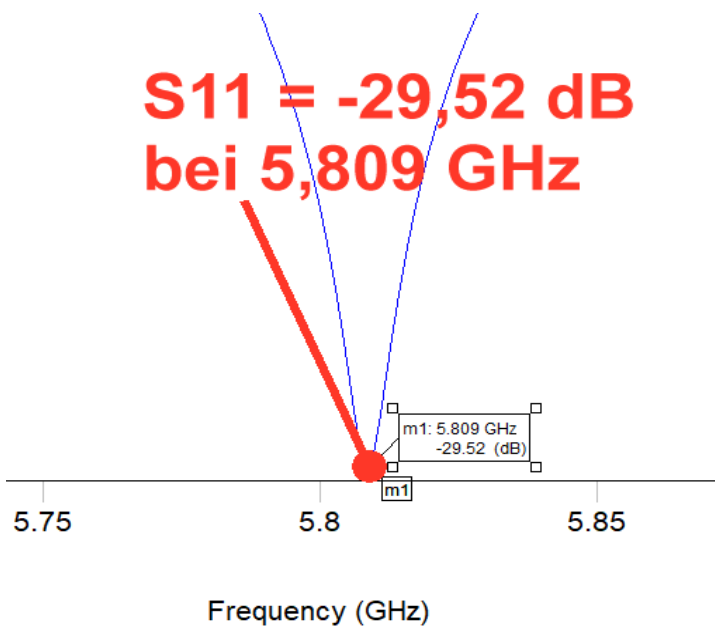
**Resonanzfrequenz über die Platinenhöhe
(Ausgangspunkt = 13,6 mm) und**

**die Anpassung durch leichte Verschiebung
des Feedpoints**

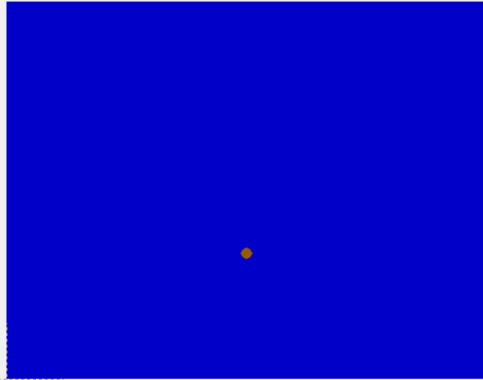
zu korrigieren.

Schließlich sind das jetzt alles Änderungen in der Größenordnung des „Hundertstel Millimeters“

**S11 = -29,52 dB
bei 5,809 GHz**



Patchantenna 5800 MHz
R04003C 0,5mm 20.06.2019



17,15 / 13,6 / 8,57 / 4,53

Nach der Erstellung gehen die Gerber-Files für beide Antennenversionen auf die Reise zu „micron20“ in Bulgarien.

Mal sehen, was später die Messung sagen wird...