

7 Grundanwendungen mit dem Smith-Diagramm (Widerstandsdiagramm)

Kompensation von Blindanteilen

Im vorletzten Kapitel haben wir den Weg aufgezeigt, wie eine Impedanz in das Smith-Diagramm eingezeichnet wird und welche Werte anschließend aus dem Diagramm abgelesen werden können. Als Beispiel nehmen wir unseren Leitungsabschluss A, der einen Reflexionsfaktor $|\underline{r}| = 0,6$ aufweist, was wiederum ein SWR von 4 bedeutet. Sollte sich hinter diesen Werten eine Antenne verbergen, dann wird man nach Verbesserung des Reflexionsfaktors bzw. VSWR streben.

Der Blick ins Smith-Diagramm zeigt uns weiterhin, dass sich die Schaltung bei der angenommenen Frequenz induktiv verhält. Am ohmschen Widerstand (33 Ohm) können wir nichts verändern und sehen ihn vorerst als fixe Größe an. Ein weiterer Blick ins Smith-Diagramm zeigt, dass der rein ohmsche Widerstand für sich allein betrachtet einen Reflexionsfaktor von $|\underline{r}| = 0,2$ aufweisen würde. Der Ge-

danke liegt nun nahe, durch entsprechende Beschaltung die Impedanz in diese Richtung zu verschieben, d.h. den induktiven Blindanteil zu eliminieren, wie im Bild 7.1 mit einem Pfeil (grün) gekennzeichnet.

Die Induktivität von 470 nH kann durch Reihenschaltung einer Kapazität kompensiert werden. Dafür muss die Kapazität so gewählt werden, dass sie bei der gegebenen Frequenz (20 MHz) den gleichen Wert als Blindwiderstand aufweist, im Beispiel 59 Ohm.

$$C = \frac{1}{\omega * X_c} \quad C = \frac{1}{20\text{MHz} * 2\pi * 59\Omega} = 134,8\text{pF}$$

Im Versuchsaufbau fiel die Wahl auf einen Trimmer, der auf die berechneten 135 pF eingestellt wurde. Am Messgerät kann beim Verstellen des Trimmers genau beobachtet werden wie der Punkt A auf dem Kreis des Wirkwider-

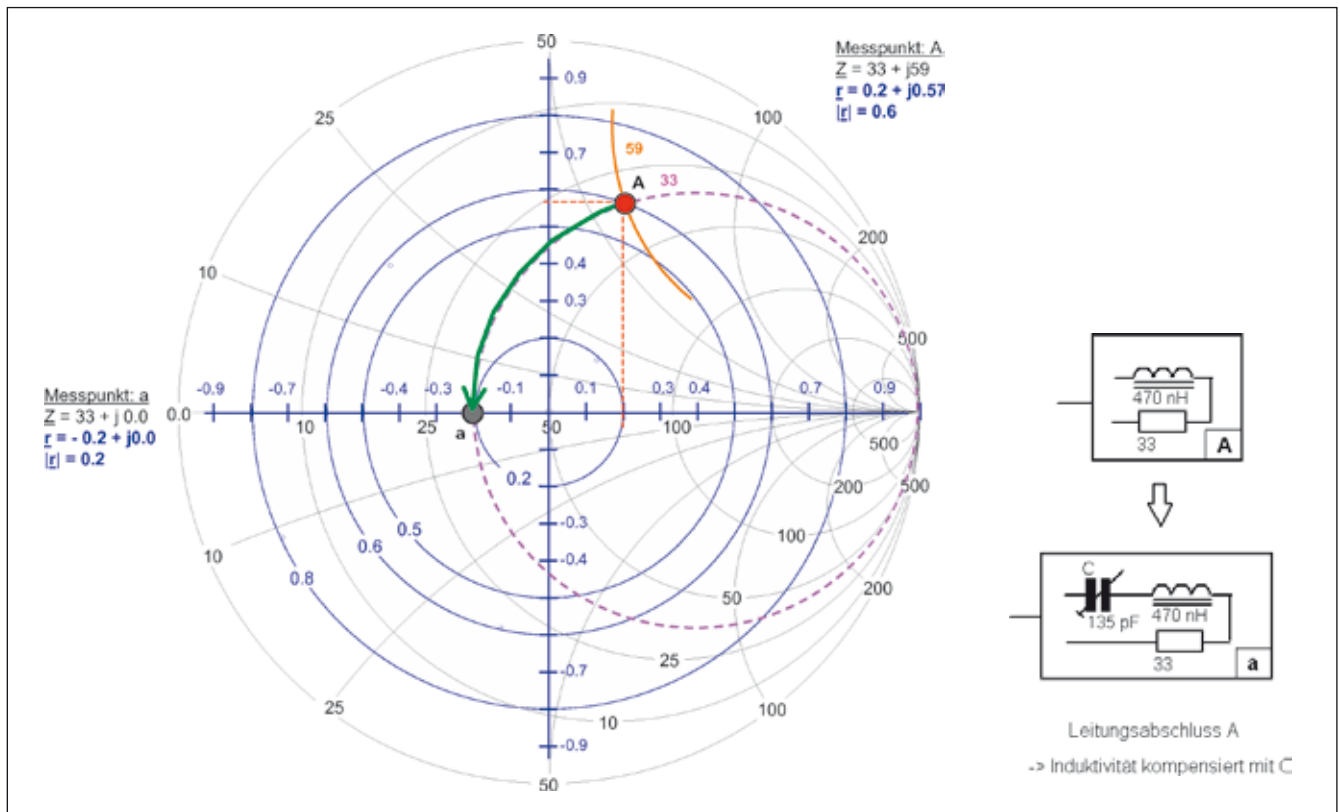


Bild 7.1 Anwendung der Kompensation am Leitungsabschluss Typ A

Grundanwendungen mit dem Smith-Diagramm

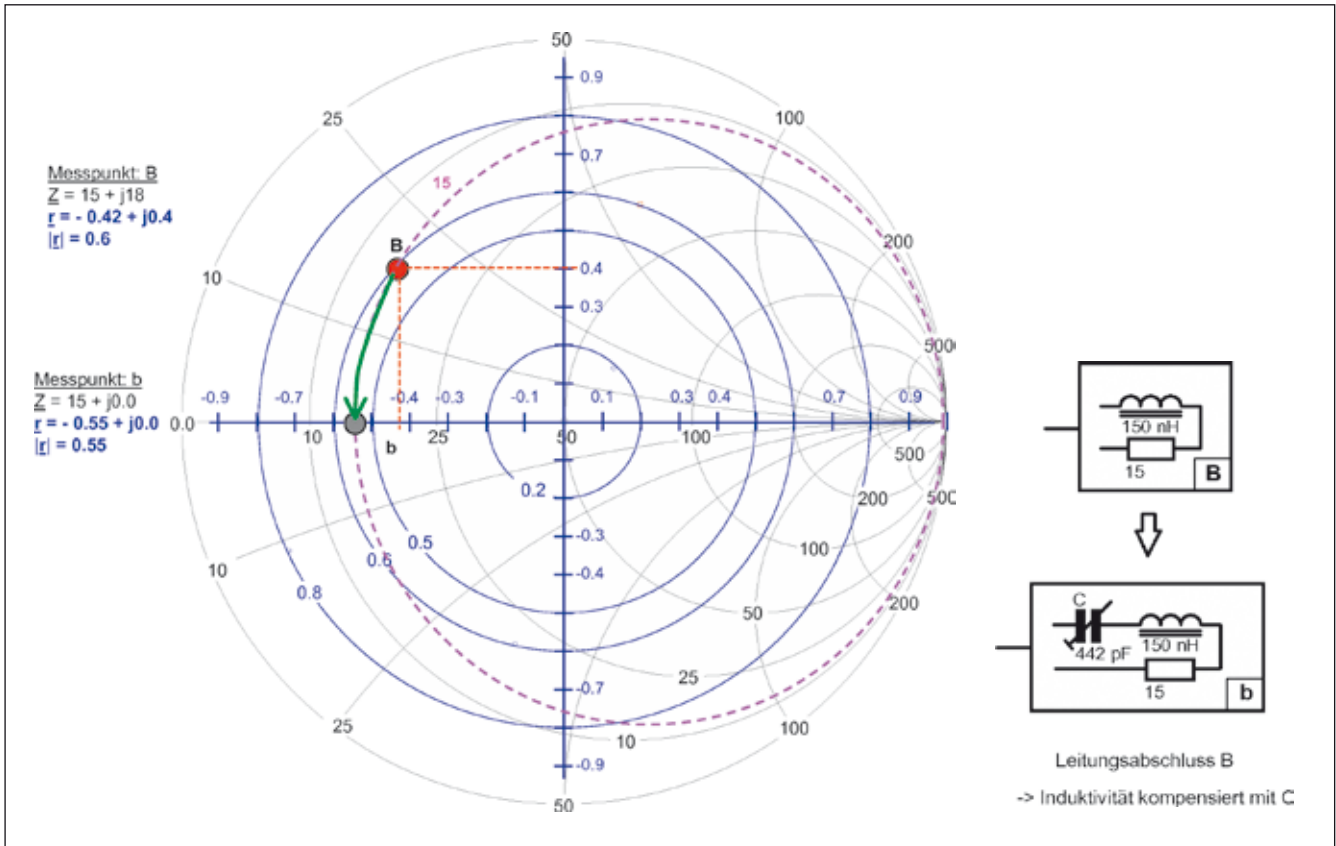


Bild 7.2 Anwendung der Kompensation am Leitungsabschluss Typ B

standes (33 Ohm, gestrichelt dargestellt) „herunterwandert“. Der Leitungsabschluss soll direkt am Messgerät aufgesteckt werden um Effekte durch Transformation auszuschließen, ein Thema das wir noch separat behandeln werden.

Wir erreichen durch die Kompensation eine wesentliche Verbesserung des Reflexionsfaktors, wie das Smith-Diagramm zeigt, nämlich $|\Gamma| = 0,2$, was einem VSWR von 1,5 entspricht. Dieser Zustand stellt sich bei einer Frequenz von 20 MHz ein; wie sich die Schaltung bei anderen Frequenzen verhält werden wir später sehen, hier zeigen sich die Stärken des Smith-Diagramm.

Ob diese Beschaltung nun in der Praxis zielführend ist steht auf einem anderen Blatt, es führen bekanntlich viele Wege nach Rom. Die dargestellten Beispiele erheben nicht den Anspruch die „beste“ Anpassschaltung zu diskutieren sondern dienen lediglich der Veranschaulichung, wie man sich im Smith-Diagramm bewegen kann.

Das Smith-Diagramm illustriert sehr anschaulich, in welchem Bereich des Reflexionsfaktors sich der Punkt A befindet und wohin er durch Kompensation (Reihenschaltung von C) bewegt werden kann. Das folgende Beispiel für den Leitungsabschluss B läßt erkennen, dass die im Vorfeld durchgeführte Simulation mit dem Smith-Diagramm Arbeit und Misserfolge ersparen kann.

Der Leitungsabschluss B weist den selben Reflexionsfaktor ($|\Gamma| = 0,6$) wie der Leitungsabschluss A auf, hat aber eine

völlig andere Lage im Diagramm, weil ihm unterschiedliche elektrische Werte zugrunde liegen. Wir kompensieren (grüner Pfeil) ebenfalls den induktiven Blindwiderstand durch eine Reihenschaltung mit einem Kondensator (berechneter Wert 442 pF, für $f = 20$ MHz) bis auf den reinen Wirkwiderstand von 15 Ohm (Bild 7.2).

Das Smith-Diagramm illustriert sehr deutlich, dass mit dieser Beschaltung der Reflexionsfaktor nur geringfügig ($|\Gamma| = 0,6$ auf $|\Gamma| = 0,55$) verändert werden kann. An der Lage der komplexen Impedanz im Smith-Diagramm kann bereits im Vorfeld geklärt werden, wie sinnvoll eine Maßnahme und deren Auswirkungen auf den Reflexionsfaktor sein werden.

Beim Leitungsabschluss B wird die Beschaltung mit einem Reihenkondensator also verworfen, denn durch diese Art der Kompensation tritt keine wesentliche Verbesserung des Reflexionsfaktors ein. Das Durchspielen verschiedener „Kompensationsszenarien“ mit unterschiedlichen Leitungsabschlüssen (z.B. A-E) kann mit realer Hardware, also z.B. dem FA-VA Analyser oder auch mit Software erfolgen, es vermittelt tiefere Einblicke in die Materie.

Bisher haben wir nur statische Verhältnisse in Bezug auf die Frequenz betrachtet. Blindwiderstände sind aber frequenzabhängig. Wie verhält sich die Konfiguration bei unterschiedlichen Frequenzen? Dieses Thema soll nun näher betrachtet werden.

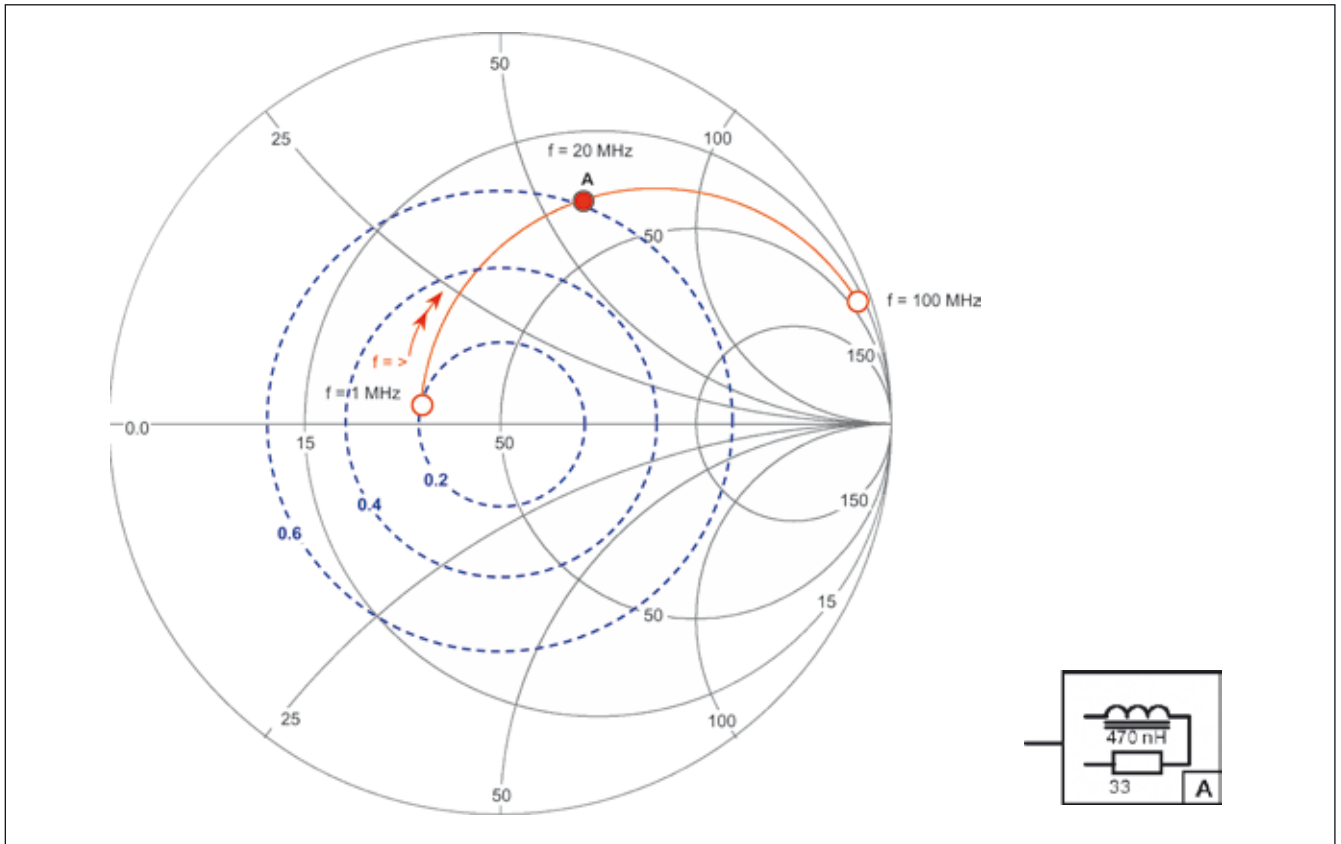


Bild 7.3 Entstehung der Ortslinie durch eine variable Frequenz von 1-100 MHz für Leitungsabschluss Typ A

Ortslinie über die Frequenz

Die Stärke des Smith-Diagramm zeigt sich erst mit der zusammenhängenden Darstellung von kontinuierlich veränderlichen Parametern und deren Abhängigkeiten zueinander.

Betrachten wir den Leitungsabschluss A in Bild 7.3: Der induktive Blindwiderstand erreicht bei 20 MHz einen Wert von 59 Ohm, der Reflexionsfaktor liegt somit bei $|\Gamma| = 0,6$ (siehe Punkt A). Mit Erhöhung der Frequenz steigt der induktive Blindwiderstand, und Punkt A verschiebt sich entlang des konstanten Wirkwiderstandskreises zu den höherwertigen induktiven Blindwiderständen. Beim Absenken der Frequenz verschiebt sich der Punkt A in die andere Richtung, da der induktive Blindwiderstand abnimmt. Verändert man die Frequenz kontinuierlich (wobeln) und platziert alle Punkte der zur Frequenz berechneten Blindwiderstände auf dem Kreis des konstanten Wirkwiderstandes (33 Ohm) aneinander, so entsteht eine Linie, die sogenannte Ortslinie (rot).

In diesem Beispiel wurde der Leitungsabschluss A im Frequenzbereich von 1 MHz bis 100 MHz betrachtet.

Die Ortslinie stellt bei näherer Betrachtung den Verlauf der komplexen Impedanz Z bei variabler Frequenz dar, $R = \text{konstant}$ und $X = \text{frequenzabhängig}$. Betrachten wir die Lage der Ortslinie im Smith-Diagramm so ist es möglich

zu jedem Wert der Frequenz den zugehörigen Reflexionsfaktor abzulesen, der im Beispiel mit steigender Frequenz immer größere Werte annimmt. Zur Orientierung wurden im Bild 7.3 die Kreise des Reflexionsfaktors der Einzelwerte $|\Gamma| = 0,6 / 0,4 / 0,2$ gestrichelt dargestellt.

In Bild 7.4 sind aus Platzgründen die Ortslinien der restlichen Leitungsabschlüsse B-E zusammengefasst in einem Smith-Diagramm dargestellt, auch hier gilt: Die Messung bzw. Simulation erfolgte ohne Anschlussleitung, direkt auf das Meßgerät aufgesteckt, um Beeinflussung der Ergebnisse durch Transformation auszuschließen.

Der Wobbelbereich der Frequenz beträgt 1 MHz – 100 MHz, die Richtung der Frequenzänderung ist durch entsprechende Pfeile an den Ortslinien markiert. Gut zu erkennen sind die gegenläufigen Verhältnisse im induktiven und kapazitiven Bereich, steigende Frequenz entspricht zunehmendem X_L im Gegensatz zum abnehmenden X_C . Die Darstellung der Ortslinie ermöglicht damit eine Aussage über die sich einstellenden Werte des Reflexionsfaktors innerhalb eines definierten Frequenzbereiches. Fassen wir die bisher aufgezeigten Parameter, die uns das Smith-Diagramm auf einen Blick übersichtlich darstellen kann, zusammen:

- Das Verhalten der Schaltung, induktiv/kapazitiv über einen gewählten Frequenzbereich

Grundanwendungen mit dem Smith-Diagramm

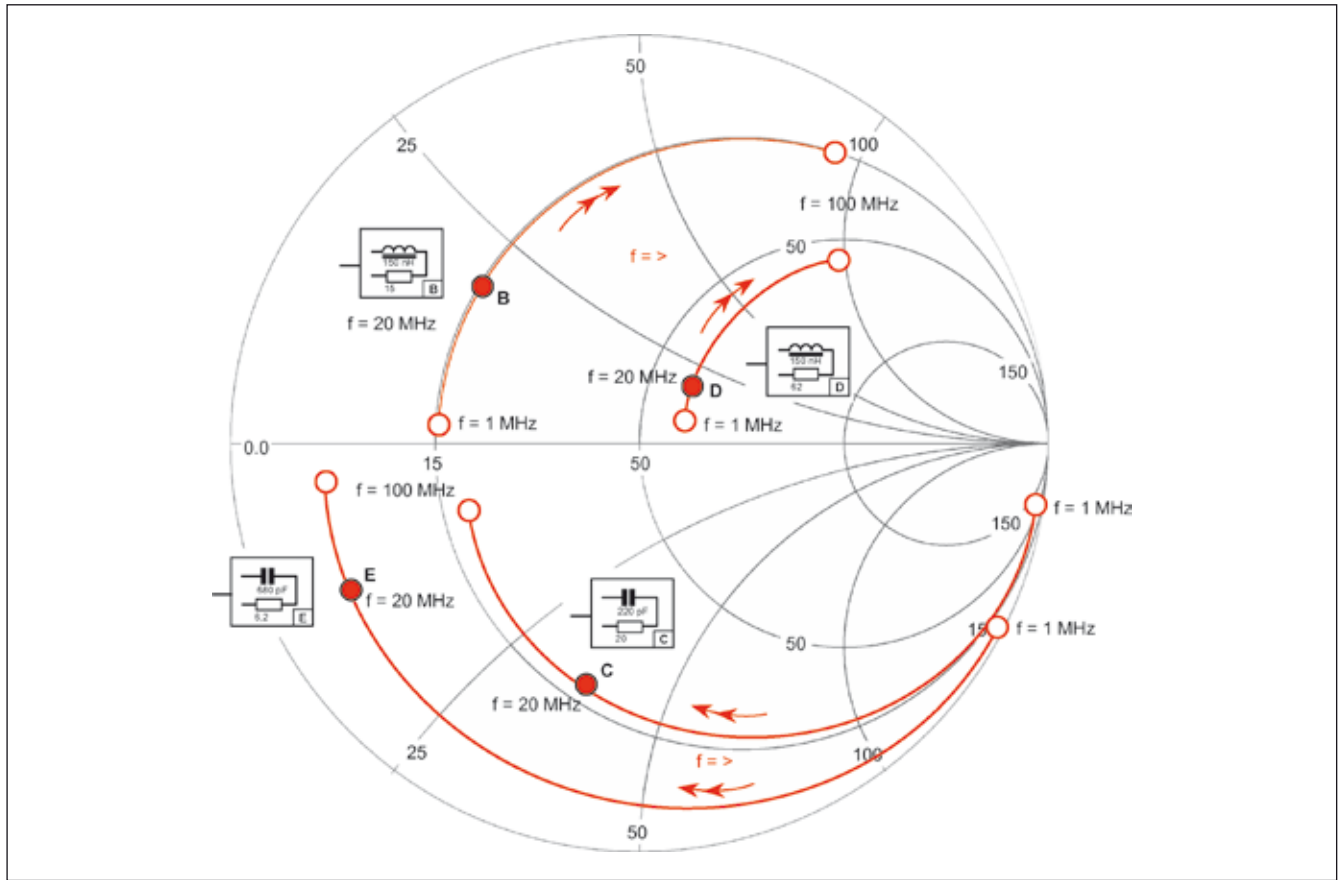


Bild 7.4 Ortslinien der Leitungsabschlüsse B-E, zusammengefasst in einem Diagramm

- Reflexionsfaktor oder Stehwellenverhältnis über einen Frequenzbereich
- Bestimmen div. Parameter (r , Γ , R , X_L , X_C) für eine genau definierte Frequenz

Es liegt nun nahe, das Anpassverhalten des Leitungsabschlusses A nach der durchgeführten Kompensation in einem bestimmten Frequenzbereich zu untersuchen. Ursprünglich haben wir die Kompensation, wie erwähnt, bei 20 MHz berechnet und auch realisiert. Das Bild 7.5 zeigt die „neue“ Ortslinie für einen Frequenzbereich von 1 MHz – 100 MHz.

Durch die Kompensation konnte der ursprüngliche Reflexionsfaktor von $|\Gamma| = 0,6$ auf $|\Gamma| = 0,2$ verbessert werden, aber wie die Ortslinie zeigt gilt diese Veränderung eben nur bei 20 MHz. Mit steigender Frequenz wirkt die Schaltung induktiv und wir bewegen uns nach wie vor zu den Kreisen höheren, und damit schlechteren Reflexionsfaktoren. Genauso ist das Verhalten bei sinkender Frequenz, die Schaltung wirkt nun kapazitiv und bewegt sich ebenfalls in die Richtung höherer Reflexionsfaktoren.

Nehmen wir einfach an, wir setzen uns ein Limit für den maximalen tolerierbaren Reflexionsfaktor, z.B. $|\Gamma| = 0,4$, der für die Schaltung, z.B. eine Antenne, über einen gewissen Frequenzbereich auftreten darf. Ein Blick ins Smith-Dia-

gramm gibt uns sofort Antwort wo die Grenzen für unser gesetztes Limit in Bezug auf „Bandbreite“ der Anpassung liegen. Die Schnittpunkte der Ortslinie mit dem Kreis $|\Gamma| = 0,4$ bilden die beiden Grenzen, die je eine bestimmte Frequenz repräsentieren.

Zugegeben, die Frequenz entlang der Ortslinie ist mit einem auf Papier gezeichneten Diagramm nicht so einfach abzulesen, aber die technischen Entwicklungen der letzten sieben Jahrzehnte, seit Veröffentlichung des Smith-Diagramms, bringen große Erleichterung. Durch Zuhilfenahme entsprechender Software (Kapitel 11) wird das Ablesen damit zum Kinderspiel. Per Software wurde ermittelt, dass im kapazitiven Bereich der Reflexionsfaktor $|\Gamma| = 0,4$ bei 15,5 MHz und im induktiven Bereich bei 26,0 MHz erreicht wird, graue Punkte in Bild 7.5

Was immer sich nun hinter der Schaltung Typ A verbirgt, ob Antenne oder Eingang eines Filters o.ä., erst das Smith-Diagramm ermöglicht uns den Überblick welche Anpassverhältnisse sich nach einer Maßnahme, in diesem Beispiel die Kompensation aus einem Reihencondensator, einstellen. Durch die Anwendung dieses Werkzeuges ist es nun leicht möglich zu entscheiden, ob die Beschaltung auch den Effekt erzielt, den wir erwarten, oder ob sich eher andere unerwünschte Auswirkungen einstellen und somit nach einer anderen Lösung gesucht werden muss.

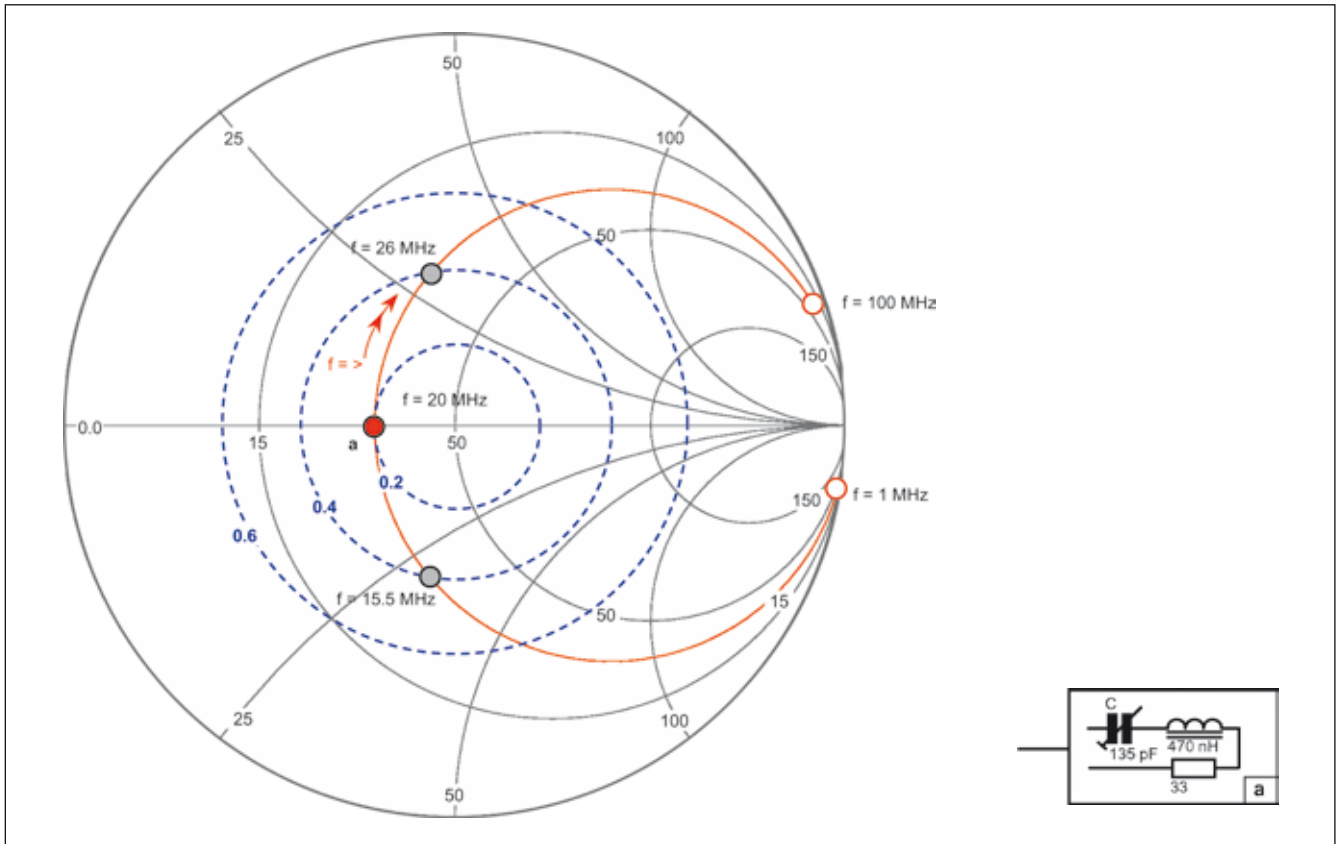


Bild 7.5 Ortslinie des kompensierten Leitungsabschlusses Typ A

Die Anwendung des Smith-Diagramm lohnt sich nicht nur zur Untersuchung der Anpassung komplexer Netzwerke, bei denen die Ortslinie imposante Formen annehmen können, selbst das nähere Betrachten eines einzelnen Bauteils führt mitunter zu „Aha-Effekten“.

Als „einzelnes Bauteil“ wählen wir einen Kondensator, seine Kapazität ist unkritisch. Für diesen Versuch kommt der FA-VA Analyser zum Einsatz, der direkt ein Smith-Diagramm auf dem Display ausgibt. Ein neuer Keramik-kondensator (2,2 nF) wird direkt mit seinen ungekürzten Anschlussdrähten an eine BNC-Buchse gelötet.

Bevor wir die Messung starten noch ein paar grundlegende Überlegungen: Wir erinnern uns, die Basis des Smith-Diagramm stellt die komplexe Reflexionsfaktorebene dar, also wird das Gerät einen Reflexionsfaktor anzeigen. Der kapazitive Blindwiderstand liegt im Smith-Diagramm im unteren Bereich, gleiche Blindwiderstandswerte erscheinen als gekrümmte Linien. Wird die Kapazität unmittelbar an den Messgeräteeingang angeschlossen bzw. in einem Simulationsprogramm nur die Kapazität angegeben, wird der Reflexionsfaktor sich nahe beim Wert 1 bewegen, d.h. bei gewobelter Frequenz liegt auch die entstehende Ortslinie konstant auf dem Außenkreis des Smith-Diagramms. Am äußeren Rand des Diagramms ist das Ablesen von Werten nicht mehr möglich, optimal wäre die Lage der Ortslinie in der Mitte des Diagramms. Das kann durch eine Hilfs-

beschaltung mit einem 50 Ohm Reihenwiderstand zum Messobjekt leicht erreicht werden (Bild 7.6). Die Ortslinie wird dadurch in die Diagramm-Mitte geschoben, je mehr der kapazitive Blindwiderstand zu Null wird (steigende Frequenz) um so näher erreichen wir $|\underline{\Gamma}| = 0,0$ -, verursacht durch den 50-Ohm-Reihenwiderstand.

Damit die Messergebnisse nicht verfälscht werden muss dieser Reihenwiderstand, besonders im Hinblick auf geringe Blindanteile, erhöhten Anforderungen gerecht werden.

Drei Sätze zum Bau eines brauchbaren Reihenwiderstands:

Man „opfert“ ein Festdämpfungsglied z.B. von Minicircuits (Typ HAT), zerlegt dieses, indem die Hülse geöffnet wird (Körnungen vorsichtig mit 2,5-mm-Bohrer aufbohren) und entfernt dann anschließend das Keramikplättchen auf dem das Widerstandsnetzwerk aufgebracht ist. An dessen Stelle wird ein Stück Platinenmaterial eingepasst auf welchem zwei 100-Ohm-SMD-Widerstände parallel aufgelötet werden. Die Hülse kann durch die beim Entfernen entstandenen Bohrungen wieder zugelötet werden (Bild 7.7).

Dieses Messhilfsmittel funktioniert sehr ordentlich bis 1 GHz, auf diese Weise lassen sich auch weitere Meßhilfsmittel herstellen – zugegeben, es ist vielleicht etwas frevelhaft ein neues Dämpfungsglied zu zerlegen nur um ein ordentliches Gehäuse zu gewinnen. Der Keramik-kondensator

Grundanwendungen mit dem Smith-Diagramm

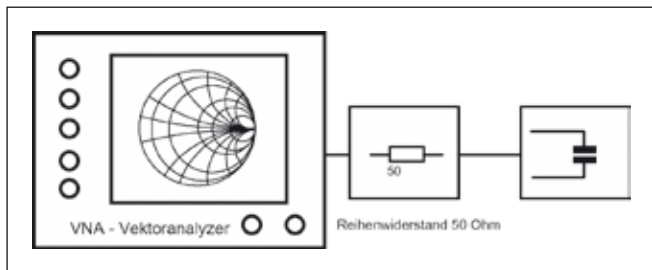


Bild 7.6 Messanordnung mit Reihenwiderstand

wird nun über den Bereich von 1 – 160 MHz gewobbelt und liefert ein interessantes Smith-Diagramm, Bild 7.8.

Ab einer bestimmten Frequenz, hier sind es ca. 18 MHz, wechselt die Ortslinie (rot) in den induktiven Bereich, d.h. die Anordnung wirkt ab dieser Frequenz nur noch induktiv.

Wir kürzen nun die Anschlussdrähte des Keramik-kondensators, d.h. löten ihn direkt an die BNC-Buchse. Die nachfolgende Messung zeigt, dass die Ortslinie (grün) jetzt erst bei einer höheren Frequenz, nämlich ca. 25 MHz, in den induktiven Bereich wechselt. Das Smith-Diagramm zeigt uns auf einen Blick, wie sich unser Bauteil verhält – wir gehen eigentlich davon aus, daß ein eingebauter Kondensator auch als solcher wirkt – die Praxis sieht doch an-

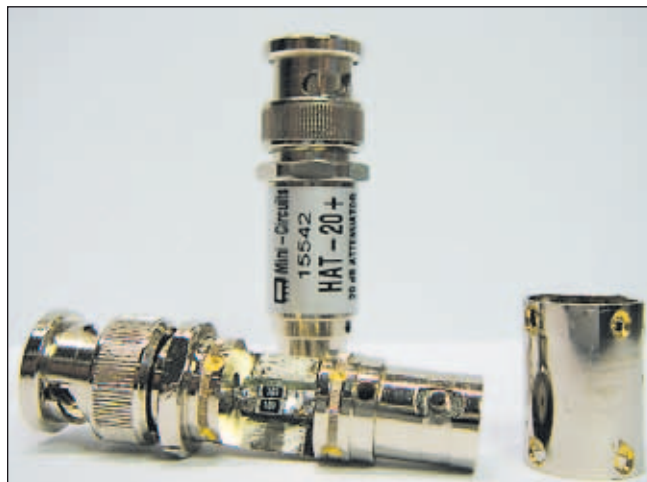


Bild 7.7 Praktische Ausführung des Reihenwiderstands

ders aus. Jeder hat wohl schon, um etwas zu testen, schnell mal einen Kondensator „dazu gelötet“, mit mehr oder weniger Erfolg. Warum der Erfolg oft ausblieb erkennt man am Smith-Diagramm, denn eigentlich wurde ab einer bestimmten Frequenz eine Spule eingebaut. Besonders interessant werden diese Effekte bei Entstörmaßnahmen, kein Wunder wenn die Störung „nicht weg zu bekommen ist“.

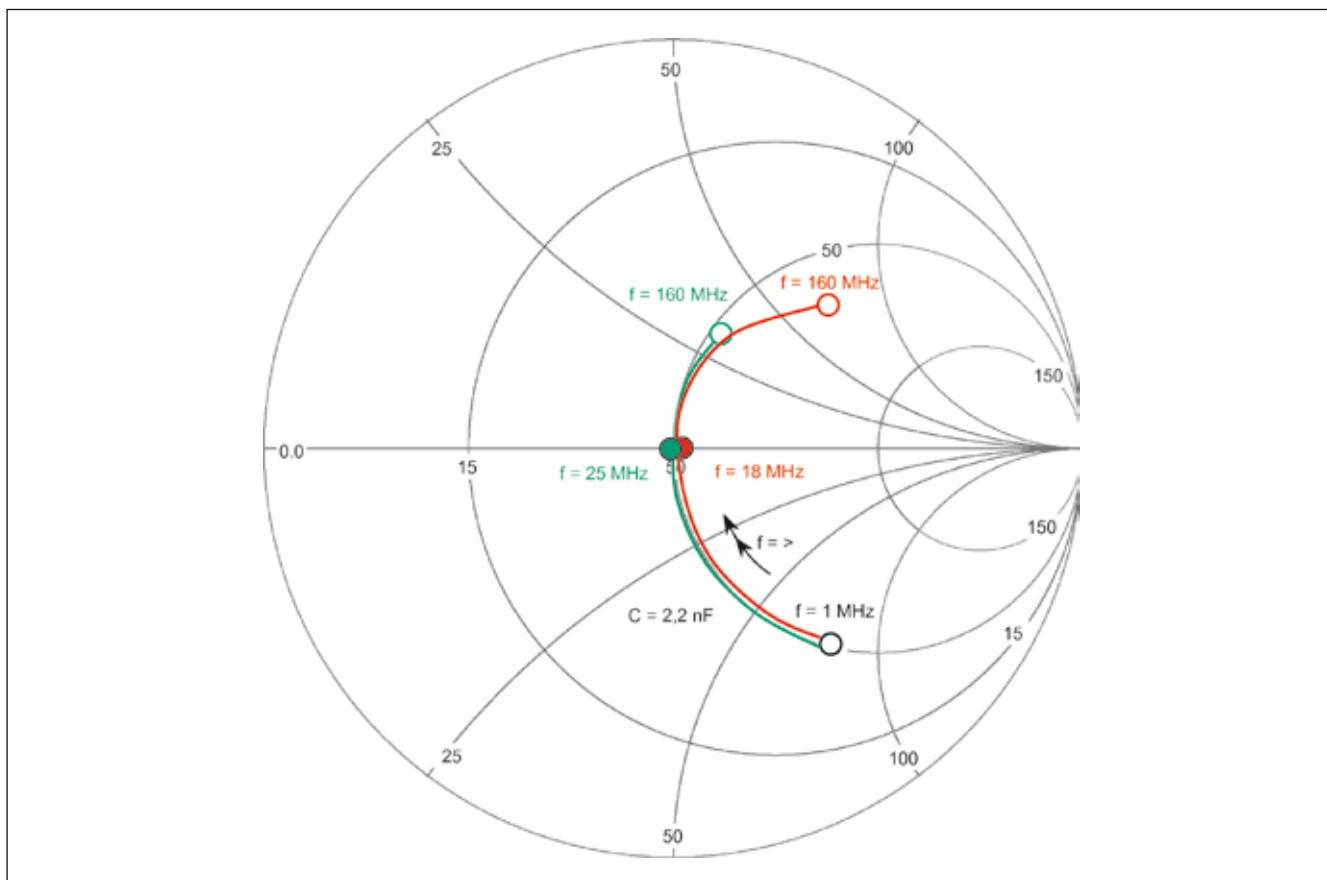


Bild 7.8 Ortslinien eines Kondensators mit unterschiedlich langen Anschlußdrähten

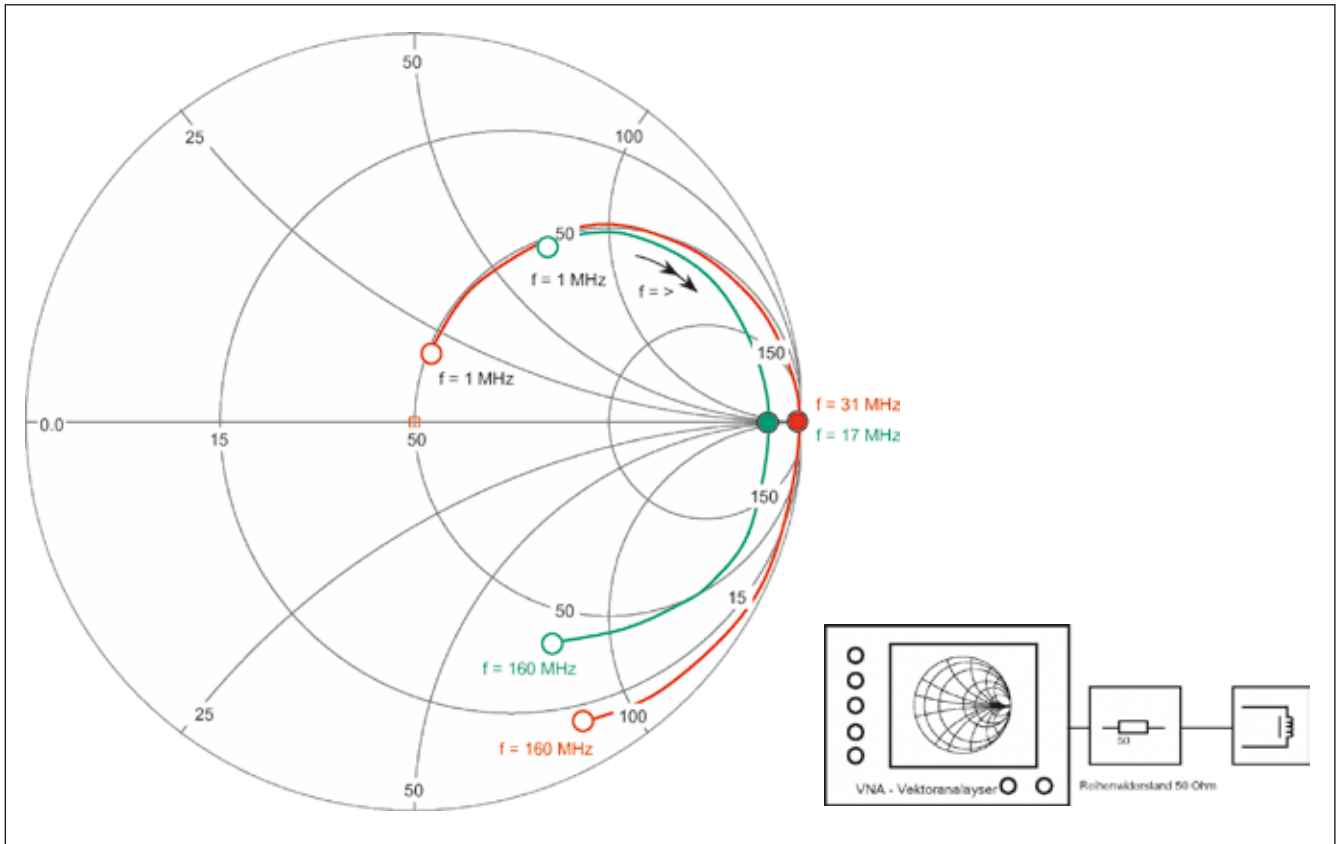


Bild 7.9 Ortslinien unterschiedlicher Spulen

Ein Blick auf das Smith-Diagramm bzw. Untersuchung des Bauteils mit dem VNA erklärt warum.

Diese Ortslinien gleichen dem Verhalten eines Reihenschwingkreises, die Frequenz am Übergang vom kapazitiven in den induktiven Bereich des Smith-Diagramms stellt die Resonanzfrequenz des Kondensators dar. Testen Sie auf diese Weise verschiedene Bauformen von Kondensatoren, es ist wirklich interessant zu sehen ab wann man eine Spule in der Hand hat. Und wie stellt sich das Verhalten von Induktivitäten dar?

Wir schließen eine Induktivität über den Reihenwiderstand von 50 Ohm an den Analyser an, auch hier sind die Werte unkritisch. Im Beispiel wurden eine handelsübliche SMCC HF-Drossel mit $3.3 \mu\text{H}$ (Bild 7.9, rote Ortslinie) und ein Amidon-Ringkern FT37-43 gewählt, der mit sechs Windungen einfachem Schmeltdraht bewickelt wurde. Die Ringkern-Induktivität (Bild 7.9 grüne Ortslinie) erreichte mit dieser Windungszahl ca. $14 \mu\text{H}$.

Auch hier stellen wir fest, dass die Ortslinie in den anderen Bereich wechselt, die Induktivität wird ab einer bestimmten

Frequenz zur Kapazität. Die Spule hat, wie der Kondensator, ebenfalls eine Eigenresonanz, die allerdings im Gegensatz zum Kondensator nun eine Parallelresonanz hochohmig darstellt. Das Smith-Diagramm veranschaulicht, dass die Ringkernspule eine Eigenresonanz von ca. 17 MHz aufweist, ab dieser Frequenz wirkt sie als Kondensator. Die Eigenresonanzfrequenz der SMCC-Drossel liegt bei 31 MHz, die Ortslinie verläuft außerdem mehr nach rechts verschoben zum hochohmigen Bereich des Smith-Diagrammes, das lässt auf eine bessere Güte der SMCC schließen.

Auch hier gilt wieder die Aufforderung zum Test der Bauelemente, die in der Bastelkiste liegen. In ordentlichen Katalogen wird für eine Induktivität die Eigenresonanzfrequenz angegeben. In der Praxis werden noch gewisse Korrekturen notwendig sein, denn die parasitären Kapazitäten nehmen rasch zu. Auch unser Reihenwiderstand und der Messeingang werden dazu beitragen, folglich werden die ermittelten Resonanzpunkte Toleranzen aufweisen. Für die Praxis gilt, dass möglichst ein großer Abstand zum Resonanzpunkt der Bauteile angestrebt wird.