

Messung von Schwingquarz-Kennwerten
 Teil 5: Meßverfahren zur Bestimmung der Ersatzschaltungsparameter von
 Schwingquarzen mit automatischer Netzwerkanalysator-technik und Fehlerkorrektur
 (IEC 444-5 : 1995) Deutsche Fassung EN 60444-5 : 1997

DIN
EN 60444-5

Diese Norm enthält die deutsche Übersetzung der Internationalen Norm

IEC 444-5

ICS 31.140

Deskriptoren: Messung, Parameter, Schwingquarz, Pi-Netzwerk

Measurement of quartz crystal unit parameters Part 5: Methods for the determination of equivalent electrical parameters using automatic network analyser techniques and error correction (IEC 444-5 : 1995);

German version EN 60444-5 : 1997

Mesure des paramètres des résonateurs à quartz Partie 5: Méthodes pour la détermination des paramètres électriques équivalents utilisant des analyseur automatiques de réseaux et correction des erreurs (CEI 444-5 : 1995);

Version allemande EN 60444-5 : 1997

Die Europäische Norm EN 60444-5 : 1997 hat den Status einer Deutschen Norm.

Nationales Vorwort

Für die vorliegende Norm ist das nationale Arbeitsgremium K 642 "Piezoelektrische Bauteile zur Frequenzstabilisierung und -selektion" der Deutschen Elektrotechnischen Kommission im DIN und VDE (DKE) zuständig.

Für den Fall einer undatierten Verweisung im normativen Text (Verweisung auf eine Norm ohne Angabe des Ausgabedatums und ohne Hinweis auf eine Abschnittsnummer, eine Tabelle, ein Bild usw.) bezieht sich die Verweisung auf die jeweils neueste gültige Ausgabe der in Bezug genommenen Norm.

Für den Fall einer datierten Verweisung im normativen Text bezieht sich die Verweisung immer auf die in Bezug genommene Ausgabe der Norm.

Der Zusammenhang der zitierten Normen mit den entsprechenden Deutschen Normen ist nachstehend wiedergegeben. Zum Zeitpunkt der Veröffentlichung dieser Norm waren die angegebenen Ausgaben gültig.

Europäische Norm	Internationale Norm	Deutsche Norm	Klassifikation im VDE-Vorschriftenwerk
–	IEC 302	–	–
–	IEC 1080 : 1991	DIN IEC 1080 : 1993-02	–
–	EIA 512 : 1985	–	–
EN 60444-1 : 1997	IEC 444-1 : 1986	DIN EN 60444-1 : 1997-10	–

Norminhalt war veröffentlicht als E DIN IEC49(CO)248 : 1992-12.

Nationaler Anhang NA (informativ)

Literaturhinweise

DIN IEC 1080 : 1993-02

Leitfaden zur Messung der elektrischen Ersatzparameter von Schwingquarzen; Identisch mit IEC 1080 : 1991

DIN EN 60444-1 : 1997-10

Messung von Schwingquarz-Parametern nach dem Null-Phasenverfahren in einem π -Netzwerk; Teil 1: Verfahren zur Messung der Resonanzfrequenz und des Resonanzwiderstandes von Schwingquarzen nach dem Null-Phasenverfahren in einem π -Netzwerk

Fortsetzung 37 Seiten EN

Deutsche Elektrotechnische Kommission im DIN und VDE (DKE)

ICS 31.140

Deskriptoren: Schwingquarze, Messung von Kennwerten, elektrische Ersatzschaltungsparameter, Meßverfahren, Kalibrierung, Meßgeräteausrüstung und Prüfaufbau

Deutsche Fassung

Messung von Schwingquarz-Kennwerten

Teil 5: Meßverfahren zur Bestimmung der Ersatzschaltungsparameter von
Schwingquarzen mit automatischer Netzwerkanalysator Technik und Fehlerkorrektur
(IEC 444-5 : 1995)

Measurement of quartz crystal unit parameters
Part 5: Methods for the determination of equivalent electrical parameters using automatic network analyser techniques and error correction
(IEC 444-5 : 1995)

Mesure des paramètres des résonateurs
à quartz Partie 5: Méthodes pour la
détermination des paramètres électriques
équivalents utilisant des analyseur
automatiques de réseaux et correction des
erreurs (CEI 444-5 : 1995)

Die Europäische Norm wurde von CENELEC am 1997-03-11 angenommen.

Die CENELEC-Mitglieder sind gehalten, die CEN/CENELEC-Geschäftsordnung zu erfüllen, in der die Bedingungen festgelegt sind, unter denen dieser Europäischen Norm ohne jede Änderung der Status einer nationalen Norm zu geben ist.

Auf dem letzten Stand befindliche Listen dieser nationalen Normen mit ihren bibliographischen Angaben sind beim Zentralsekretariat oder bei jedem CENELEC-Mitglied auf Anfrage erhältlich.

Diese Europäische Norm besteht in drei offiziellen Fassungen (Deutsch, Englisch, Französisch). Eine Fassung in einer anderen Sprache, die von einem CENELEC-Mitglied in eigener Verantwortung durch Übersetzung in seine Landessprache gemacht und dem Zentralsekretariat mitgeteilt worden ist, hat den gleichen Status wie die offiziellen Fassungen.

CENELEC-Mitglieder sind die nationalen elektrotechnischen Komitees von Belgien, Dänemark, Deutschland, Finnland, Frankreich, Griechenland, Irland, Island, Italien, Luxemburg, Niederlande, Norwegen, Österreich, Portugal, Schweden, Schweiz, Spanien, Tschechische Republik und dem Vereinigten Königreich.

CENELEC

EUROPÄISCHES KOMITEE FÜR ELEKTROTECHNISCHE NORMUNG
European Committee for Electrotechnical Standardization
Comité Européen de Normalisation Electrotechnique

Zentralsekretariat: rue de Stassart 35, B-1050 Brüssel

Vorwort

Der Text der Internationalen Norm IEC 444-5 : 1995, ausgearbeitet von dem IEC TC 49 "Piezoelectric and dielectric devices for frequency control and selection", wurde der formellen Abstimmung unterworfen und von CENELEC am 1997-03-11 ohne irgendeine Abänderung als EN 60444-5 angenommen.

Nachstehende Daten wurden festgelegt:

- spätestes Datum, zu dem die EN auf nationaler Ebene durch Veröffentlichung einer identischen nationalen Norm oder durch Anerkennung übernommen werden muß (dop): 1997-12-01
- spätestes Datum, zu dem nationale Normen, die der EN entgegenstehen, zurückgezogen werden müssen (dow): 1997-12-01

Anhänge, die als "normativ" bezeichnet sind, gehören zum Norm-Inhalt.

Anhänge, die als "informativ" bezeichnet sind, enthalten nur Informationen.

In dieser Norm sind die Anhänge A und ZA normativ und die Anhänge B und C informativ.

Der Anhang ZA wurde von CENELEC hinzugefügt.

Anerkennungsnotiz

Der Text der Internationalen Norm IEC 444-5 : 1995 wurde von CENELEC ohne irgendeine Abänderung als Europäische Norm angenommen.

Inhalt

	Seite		Seite
1 Anwendungsbereich	2	5 Kalibriertechniken	7
2 Einführung	3	5.1 Verfahren für S -Parameter	7
2.1 Allgemeines	3	5.2 Direktes Übertragungsverfahren	8
2.2 Verfahren der Scheinleitwertmessung	3	5.3 Überprüfung der Kalibrierung	8
2.3 Scheinleitwertanalyse und Abschätzung der Ersatzschaltungsparameter	4	6 Niederfrequenzmessungen	8
2.4 Normative Verweisungen	5	7 Analyse der Ersatzschaltung	8
3 Meßverfahren	5	7.1 Allgemeine Anpassung mit Hilfe des Fehlerquadratverfahrens	8
3.1 Allgemeines	5	7.2 Lineare Anpassung mit Hilfe des Fehlerquadratverfahrens	9
3.2 Umgebungsbedingungen	5	7.3 Kreisanpassungsverfahren	11
3.3 Kalibrierung	5	7.4 Zweipunktitration	12
3.4 Ansteuerungspegel	5	8 Meßunsicherheiten, Meßgeräteausrüstung und Prüfaufbau	14
3.5 Messung von C_0	5	8.1 Allgemeine Bemerkungen	14
3.6 Wahl der Meßfrequenzen	6	8.2 Meßbedingungen	14
3.7 Datensammlung	6	8.3 Reproduzierbarkeit	14
3.8 Datenkorrektur	6	8.4 Meß- und Prüfaufbau	14
3.9 Scheinleitwertberechnung	6	Anhang A (normativ) Kalibrierung	27
3.10 Analyse des Scheinleitwertes und Abschätzung der Ersatzschaltungsparameter	6	Anhang B (informativ) Niederfrequenzmessung	36
4 Auswahl des Scheinleitwertmeßverfahrens	7	Anhang C (informativ) Schrifttum	38
4.1 Allgemeines	7	Anhang ZA (normativ) Normative Verweisungen auf internationale Publikationen mit ihren entsprechenden europäischen Publikationen	39
4.2 Vorteile und Nachteile der Zweipol- S -Parameter des Reflexionsverfahrens	7		
4.3 Vorteile und Nachteile des Übertragungsverfahrens	7		
4.4 Vorteile und Nachteile des direkten Übertragungsverfahrens	7		

1 Anwendungsbereich

Das Ziel dieses Schriftstückes ist es, Verfahren für die Ermittlung der besten Darstellungsweisen von Quarzresonatoren durch lineare Ersatzschaltungen anzugeben. Die Schaltungs-darstellung basiert auf elektrischen Parametern, die mit Vektornetzwerkanalysegeräten unter Verwendung automatischer Fehlerkorrektur gemessen wurden. Die Ermittlung der Ersatzschaltungsparameter mit dem Verfahren dieser Norm basiert auf der Messung auf der Bauelementeimitanz in der Nähe der Serienresonanz. Das weitere Problem der Kennzeichnung des Bauelementes für den Betrieb mit Serienlastkapazität wurde nicht weiter angesprochen, obwohl erkannt

wurde, daß einige Anwendungen solche Kennzeichnung erfordern. Die gleiche Meßeinrichtung und grundsätzlich die gleiche Meßart liefern die Hilfsmittel, um die Einfügung der Prüflastkapazität als auch die Serienkombination der Lastkapazität und des Schwingquarzes vollständig darzustellen.

2 Einführung

2.1 Allgemeines

2.1.1 Dieses Schriftstück beschreibt Verfahren für die Ermittlung der Werte von elektrischen Parametern piezoelektrischer

Schwingquarzbaulemente unter Verwendung automatischer Vektornetzwerkanalysegeräte. Das empfohlene Verfahren für S-Parameter-Systeme verwendet abgeschirmten Leerlauf, Kurzschluß und Widerstandsabschluß und (im Fall von Übertragungsverfahren) "thru-line" Verbindungen. Im Leerlauf betriebene, kurzgeschlossene und durch einen Widerstand abgeschlossene Koaxialabschlüsse für das 50 W-System bemessene Koaxialnormale sind ohne weiteres erhältlich und können mit nationalen Scheinwiderstandsnormen über einen breiten Frequenzbereich geeicht werden. Zur Zeit müssen "thru-line"-Verbindungen, die zur Kalibrierung der Prüfeinrichtung geeignet sind, vom Anwender oder Zulieferer kalibriert werden; die Techniken hierfür sind jedoch gut bekannt. Nicht-Koaxialnormale-Widerstände zur Verwendung in den direkten Übertragungs-(π -Netzwerken)-Verfahren sind ebenfalls erhältlich, sind jedoch nicht einfach in Nationale Normen rückführbar. Weitere Hinweise über die Anwendung dieses Schriftstückes können in IEC 1080 gefunden werden.

2.1.2 Das Verfahren schließt die Messung des Scheinleitwertes des Quarzresonators bei festgelegten Frequenzpunkten durch eines einer Anzahl von Verfahren ein, der die Darstellung und Bestimmung der Daten der Ersatzschaltungsparameter folgt (Bild 1).

2.1.3 Die beschriebenen Meßverfahren sind vorgesehen, um Referenzwerte für die elektrischen Ersatzschaltungsparameter zu liefern. Hersteller und Anwender dürfen andere Meßverfahren anwenden, wobei die dabei erhaltenen Werte mit denen korrelieren müssen, die durch das Referenzverfahren erhalten werden.

2.1.4 Diese Norm bezieht sich nur auf die Darstellung von Quarzresonatoren durch lineare Ersatzschaltungen, die in einem engen Frequenzband, das meistens einige Prozent der Resonanzfrequenz umfaßt, gültig sind.

2.1.5 Im allgemeinen wird ein bestimmter Grad von Nichtlinearität vorhanden sein, und die Schaltungsparameter können eine spürbare Abhängigkeit von dem Einspeisungspegel besitzen. Wenn Wirkungen der Nichtlinearität sehr groß sind, können angenommene Schaltungsdarstellungen unbrauchbar sein.

2.1.6 Normalerweise wird die Ersatzschaltung verwendet, um einen getrennten Schwingungsmodus darzustellen, jedoch können vereinzelt zusätzliche Schwingungsmoden außergewöhnlich eng bei der Hauptanregung auftreten. Es darf dann eine komplexere Schaltungsdarstellung verwendet werden, und die Berücksichtigung dieses Problems wird in diesem Schriftstück aufgenommen. Siehe Schrifttum [1]¹⁾.

2.2 Verfahren der Scheinleitwertmessung

2.2.1 Es werden die folgenden Begriffe verwendet, um die Schaltungselemente zu beschreiben. Siehe Bild 3 und Bild 4:

C_0	statische Kapazität (für ein Zweipolmodell)
C_{01}	Kapazität zwischen Elektrode und Gehäuse
C_{02}	statische Kapazität (für ein vereinfachtes Vierpolmodell)
C_{03}	Kapazität zwischen Elektrode und Gehäuse
G_0	mit C_0 verbundener Wirkleitwert
G_{01}	mit C_{01} verbundener Wirkleitwert
G_{02}	mit C_{02} verbundener Wirkleitwert
G_{03}	mit C_{03} verbundener Wirkleitwert
R_1	dynamischer Widerstand
L_1	dynamische Induktivität
C_1	dynamische Kapazität
$\omega_s = \frac{1}{(L_1 C_1)^{1/2}}$	Serienresonanzfrequenz (Rad/s).

Die Übertragungsfunktion des Scheinleitwertes, Y_{12} , für die in Bild 3 und Bild 4 dargestellten Ersatzschaltbilder beschreibt eine kreisförmige Ortskurve in der komplexen Scheinleitwertebene, wie es in Bild 5a beschrieben wird. Die Transfor-

mation dieser Ortskurve auf die Scheinwiderstand- ($Z = 1/Y$)-Ebene ist, wie in Bild 5b dargestellt, ebenfalls ein Kreis. Es gibt sechs Eigenfrequenzen, die mit solch einer Schaltung verbunden sind:

f_s	Serien-Resonanzfrequenz
f_m	Frequenz des größten Scheinleitwertes (kleinster Scheinwiderstand)
f_r	Resonanzfrequenz (Phase Null)
f_a	Parallelresonanzfrequenz (Phase Null)
f_p	Parallelresonanzfrequenz (verlustfrei)
f_n	Frequenz des kleinsten Scheinleitwertes (größter Scheinwiderstand).

Von diesen ist allein die dynamische Resonanzfrequenz im wesentlichen unabhängig vom Wert der statischen Kapazität und daher der Auswahlparameter für Spezifikationszwecke, da er durch Streuungen wenig beeinflusst wird. Die Beziehungen der Eigenfrequenzen zu f_s können in IEC 302 oder EIA 512 (1985) gefunden werden.

2.2.2 Es werden drei Grundmeßverfahren beschrieben (Bild 2a):

a) Zweipolreflexionsverfahren. Der Quarzresonator wird als ein Zweipolbauelement mit einer gespeisten Elektrode charakterisiert, bei dem alle anderen Elektroden und das Schwingquarzgehäuse geerdet sind.

Für eine Reflexionsmessung kann der Scheinleitwert Y aus dem gemessenen Wert von S_{11} berechnet werden.

$$R_0 Y = \frac{1 - S_{11}}{1 + S_{11}} \quad (2.1)$$

ANMERKUNG: R_0 ist der Wert des Standardanschlusses, der bei der Kalibrierung des Systems verwendet wird.

b) Vierpolübertragungsverfahren. Der Quarzresonator wird als ein Vierpolbauelement mit zwei gespeisten Elektroden angesehen, bei dem alle anderen Elektroden und das Schwingquarzgehäuse geerdet sind.

Bei der Übertragung des Übertragungsscheinleitwertes auf die Vierpolschaltung nach Bild 4 ist

$$Y_{12} = - \left(G_{02} + j\omega C_{02} + \frac{1}{R_1 + j\omega L_1 + 1/j\omega C_1} \right) \quad (2.2)$$

Unter Verwendung der Beziehung zwischen dem Scheinleitwert und den Streuparametern kann man wie oben eine Größe Y definieren,

$$R_0 Y = R_0 \left(G_{02} + j\omega C_{02} + \frac{1}{R_1 + j\omega L_1 + 1/j\omega C_1} \right) \quad (2.3)$$

$$= \frac{2S_{12}}{(1 + S_{11})(1 + S_{22}) - S_{21}S_{12}},$$

die leicht aus den gemessenen S-Parametern berechnet werden kann.

c) Verfahren der direkten Amplituden-/Phasen-Übertragung. Der Quarzresonator wird als ein Zweipolbauelement nach Bild 3 in einer Übertragungsprüfvorrichtung angesehen, die, wie in IEC 444, normalerweise ohmsche Elemente verwendet. Der Scheinwiderstand des Bauelementes wird aus der Amplitude und Phasenlage des Signales über der Prüfvorrichtung ermittelt. Unter Verwendung von Standardgleichungen wird dieser Scheinwiderstand in einen Scheinleitwert umgewandelt.

$$Y = G_0 + j\omega C_0 + \frac{1}{R_1 + j\omega L_1 + 1/j\omega C_1} \quad (2.4)$$

¹⁾ Die Ziffern in eckigen Klammern beziehen sich auf das Schrifttum in Anhang C.

2.2.3 Die *S*-Parameter-Reflexionsmessung ist potentiell die genaueste Messung, wenn nur koaxialrückführbare Normalimpedanzen für die Kalibrierung verwendet werden. Die *S*-Parameter-Vierpolmessung läßt die meisten Angaben über das Bauelement zu, während die direkte Übertragung die Übertragungsimpedanz des Bauelementes bestimmt.

2.2.4 Beschränkung der Gültigkeit der Modelle

Die folgenden Näherungen sind in die Ersatzschaltungen einbezogen:

- a) Es wird angenommen, daß die Darstellung der Schaltung mit konzentrierten Bauelementen gültig ist.
- b) Es wird angenommen, daß das Bauelement stark eine ideale verlustfreie Komponente annähert und daß daher alle bedeutenden Resonanzen hohe Gütefaktoren besitzen.

Über schmalen Bandbreiten, die meistens wenige Prozent der Resonanzfrequenz einhalten, liefern die Schaltungen nach Bild 6 und Bild 7 jedoch eine sehr gute Darstellung der Resonanzen in der überwältigenden Überzahl der Fälle.

2.2.5 Meßunsicherheit und Nachweisbarkeit

Die Meßunsicherheit und Nachweisbarkeit der Messungen sind direkt auf die Kalibrierbauelemente bezogen und größtenteils unabhängig von dem besonderen Netzwerkanalysatorsystem. Das System muß jedoch mit den in Anhang A beschriebenen theoretischen Modellen übereinstimmen und daher ein lineares Vektornachweissystem mit geringer Meßunsicherheit in der Verhältnisbetriebsweise (*A/R* usw.) sein. Darüber hinaus braucht keine besondere Spezifikation angegeben zu werden. Eine Frequenzquelle, die auf ein nationales Frequenznormal bezogen ist, ist ebenfalls erforderlich.

2.2.6 Meßausrüstung

Die Verwendung rechnergesteuerter Geräte ist für die Datensammlung, Fehlerkorrektur, Scheinleitwertberechnungen und für die Abschätzung der Schwingquarzparameter wesentlich. Die Fehlerkorrektur erwächst aus der Notwendigkeit, die Meßschaltung zu charakterisieren. Dieses wird durch eine Kalibrierung unter Verwendung bekannter Scheinwiderstandsnormale erreicht. Die Datensammlung einer großen Anzahl von Meßpunkten ist für die nachfolgenden Scheinleitwertberechnungen erforderlich.

2.2.7 Anwendung auf andere Bauelemente

Dieses Schriftstück bezieht sich besonders auf die Messung an Einzelresonatoren. Viele der Techniken treffen jedoch direkt auf komplexere Bauelemente wie zweipolige und monolithische Filter zu. Diese Verallgemeinerungen werden, wo zutreffend, angegeben.

2.3 Scheinleitwertanalyse und Abschätzung der Ersatzschaltungsparameter

Es gibt drei Verfahren der Scheinleitwertanalyse, die zu einer Schwingquarzersatzschaltung führen. Wenn der zu messende Schwingquarz durch die normale Ersatzschaltung beschrieben wird und sich das Bauelement linear verhält, sind alle diese Verfahren äquivalent.

- a) Allgemeine Anpassung mit Hilfe des Fehlerquadratverfahrens
Dies ist die allgemeine, nicht-lineare Technik, die in allen Situationen angewendet werden kann. Das Verfahren kann Mehrfachresonanzen, wie Nichtharmonische, messen.
- b) Lineare Anpassung mit Hilfe des Fehlerquadratverfahrens
Dieses Verfahren minimiert die Summe der Quadrate gewichteter Differenzen zwischen den gemessenen und theoretischen Scheinleitwerten und gilt für Einzelresonanzmodelle.
- c) Anpassung des Scheinleitwertkreises

Dieses Verfahren paßt einen Kreis an eine ungerade Anzahl von Punkten mit gleichem Abstand auf der rechten Seite des Scheinleitwertkreises des Quarzresonators an ($\pm 45^\circ$).

d) Iteratives Zweipunktverfahren

Dieses ist das potentiell schnellste Verfahren und könnte für die Produktion verwandt werden. Es schließt das Erhalten zweier Frequenzen ein, die etwa $\pm 45^\circ$ auf dem Scheinleitwertkreis des Resonators liegen. Die berechneten Schwingquarzparameter werden verwendet, um bessere Werte dieser zwei Frequenzen neu zu bewerten. Die Iterationen werden fortgesetzt, bis die Bewertung innerhalb einer gegebenen Grenzabweichung liegt.

2.4 Normative Verweisungen

Die folgenden Normen enthalten Festlegungen, die durch Verweisungen in diesem Text Bestandteil der IEC 444 sind. Zum Zeitpunkt der Veröffentlichung dieser Norm gelten die angegebenen Ausgaben. Alle Normen unterliegen der Überarbeitung, und Anwender dieses Teils der IEC 444 werden gebeten, die jeweils neueste Ausgabe der im folgenden genannten Normen anzuwenden. Mitglieder von IEC und ISO führen Verzeichnisse der gültigen Internationalen Normen.

IEC 302 : 1969

Standard definitions and methods of measurement for piezoelectric vibrators operating over the frequency range up to 30 MHz

IEC 1080 : 1991

Guide to the measurement of equivalent electrical parameters of quartz crystal units

EIA 512 : 1985

Standard methods for measurement of equivalent electrical parameters of quartz crystal units, 1 kHz bis 1 GHz

3 Meßverfahren

3.1 Allgemeines

Der Ablauf für die Messung der Ersatzschaltungsparameter eines Schwingquarzresonators ist in Bild 8 dargestellt. Es wird empfohlen, das Schwingquarzgehäuse auf Massepotential zu legen. Bei einem Glasgehäuse wird das Bauelement mit einer auf Massepotential liegenden Abschirmung versehen.

3.2 Umgebungsbedingungen

Alle Schwingquarzbauelemente werden mindestens zu einem gewissen Grad durch die Temperatur, die Änderungsgeschwindigkeit der Temperatur und der Belastung beeinflusst. Es ist daher erforderlich, das Bauelement während der Meßdauer vor Temperaturänderungen zu schützen und seine wirkliche Temperatur zum Meßzeitpunkt so genau wie möglich zu bestimmen, so daß gemessene Werte bei Temperaturunterschieden zwischen zwei Messungen korrigiert werden können. Es muß sorgfältig darauf geachtet werden, daß der bei der Messung angelegte Pegel der Ansteuerspannung jener ist, der für das Bauelement festgelegt ist. Eine andere mögliche Fehlerquelle, besonders bei der Messung niederfrequenter Bauelemente mit hoher Güte, ist eine unvermeidbare kleine Temperaturdrift während des Meßablaufes, da relativ lange Wartezeiten erforderlich sind. Solche niedrigen Driften zwischen dem ersten und letzten aufgezeichneten Wert verursachen eine Verformung auf der Scheinleitwertsortskurve. In einer ersten Näherung kann dieses vermieden werden, wenn abwechselnde Punkte mit dem Ansteigen der Frequenz aufgezeichnet und dann die restlichen Werte bei Verminderung der Frequenz erhalten werden. Die Bewertung mit Hilfe des Fehlerquadratverfahrens mittelt die so erhaltenen Werte wirksam und kompensiert damit in hohem Maße die durch die Temperaturdrift hervorgerufenen Unterschiede.

3.3 Kalibrierung

Die Kalibrierung wird für jedes Verfahren in Abschnitt 5 beschrieben.

3.4 Ansteuerungspegel

Der Ansteuerungspegel bei f_s muß für die darauffolgende Messung entweder als Leistung oder als Strom für jeden Schwingquarztyp angegeben werden. Das erfordert, daß der Ausgangspegel des Generators einstellbar ist. Wenn eine vernünftige Bewertung von R_1 des Schwingquarzes bekannt ist, kann diese verwendet werden, um diesen Pegel zu berechnen. Alternativ kann eine schnelle Bewertung von R_1 aus einem anfänglichen Frequenzhub durch die Resonanz ermittelt werden.

3.5 Messung von C_0

3.5.1 Bei einer Zweipolmessung bei niedrigen Frequenzen darf der Scheinwiderstand von C_0 nicht größer als 50Ω sein. Dieses ergibt sich aus der niedrigen Empfindlichkeit und daher schlechten Bewertung der statischen Kapazität. Die Empfindlichkeit kann durch Ausführen einer Messung bei einer etwas höheren, ausreichend von der Resonanz entfernten Frequenz gesteigert werden. Es ist jedoch möglich, daß die wirksame statische Kapazität bei dieser Frequenz von der bei der Resonanzfrequenz abweicht. Bei den meisten Schwingquarztypen für die gewöhnliche Verwendung bleibt C_0 über einen Frequenzbereich unter etwa 100 MHz im wesentlichen konstant. Bei höheren Frequenzen ist es ratsam, C_0 und die anderen statischen Parameter bei Frequenzen innerhalb weniger Prozent der Resonanzfrequenz zu messen. Wenn das Bauelement das Verhalten von Breitbandschaltungen beeinflusst, kann es erforderlich sein, die statischen Parameter über einen breiten Frequenzbereich zu ermitteln.

3.5.2 Die Messung der direkten Kapazität zwischen den Anschlüssen C_0 darf unter Verwendung eines der beiden Verfahren ausgeführt werden:

- Bei Schwingquarzen bis zu 30 MHz ist die Messung bei fünf Frequenzen etwas über 30 MHz auszuführen (d. h. 30,1; 30,2; 30,3; 30,4 und 30,5 MHz), und der Durchschnitt der drei Werte, der dem Mittelwert der fünf Werte am nächsten liegt, sollte als die beste Bewertung verwendet werden.
- Bei Schwingquarzen oberhalb 30 MHz wird empfohlen, daß drei Meßpaare ausgeführt werden, wobei jedes Paar äquidistant von der Serienresonanzfrequenz f_s ist, d. h. $f_s (1 \pm 0,05)$, $f_s (1 \pm 0,06)$ und $f_s (1 \pm 0,07)$. Für jedes Paar ist der Mittelwert aus den bei der unteren und oberen Frequenz ermittelten Werten von C_0 zu berechnen und dann als beste Bewertung der Mittelwert der beiden Werte zu verwenden, die am nächsten beieinander liegen.

Vor jeder Messung a) und b) oben sollte bestätigt werden, daß kein unerwünschtes Verhalten des Schwingquarzes bei der Meßfrequenz auftritt.

3.5.3 Die Messung der beiden Kapazitäten zwischen den Anschlüssen und dem Gehäuse (gewöhnlich als C_{13} und C_{23} bezeichnet) sollte, wenn es durch die Spezifikation gefordert wird oder die Modellierung der Übertragungsprüfvorrichtung unterstützt, durch eine getrennte Messung mit einer abgeschirmten Kapazitätsmeßbrücke vorgenommen werden.

3.6 Wahl der Meßfrequenzen

Es können zwei alternative Verfahren zum Erhalten der Scheinleitwerte eines Quarzresonators verwendet werden. Das erste ist ein Mehrfrequenzverfahren, das sowohl durch die in 7.1 und 7.2 beschriebene Anpassung mit Hilfe der Fehlerquadrate als auch durch das in 7.3 beschriebene Anpassungsverfahren des Scheinleitwertkreises verwendet wird.

Hier wird empfohlen, daß insgesamt neun Frequenzpunkte verwendet werden, die so gewählt werden, daß die ermittel-

ten Durchgangsscheinleitwertpunkte innerhalb des rechtsseitigen Halbkreises der Ortskurve in der Y-Ebene liegen (siehe Bild 5a), was einschließt, daß mehrere Frequenzen innerhalb der "Q-Bandbreite" liegen, deren Mittelpunkt die Serienresonanzfrequenz ist.

Das Meßprogramm muß daher eine vorläufige Suche nach der Frequenz der Serienresonanz ausführen und danach die Gruppierung der Frequenzen festlegen, bei denen die Messungen auszuführen sind, die entweder auf der durch den Bearbeiter vorgenommenen Bewertung der Güte Q oder auf der Prüfung der Werte basiert. Die Meßfrequenzen dürfen der Einfachheit halber den gleichen Abstand besitzen, und alle Punkte sollten innerhalb eines Bereiches von $(\pm f_s/2Q)$ um f_s liegen. Zusätzliche Punkte außerhalb dieses Bereiches dürfen auch verwendet werden, aber es sollten kurze Angaben zu den dynamischen Parametern des Bauelementes gemacht werden. Ein engerer Abstand der Meßfrequenzen und die Erfassung eines breiteren Bereiches können nützlich sein, wenn der Nachweis schwacher ungewollter Schwingungsmoden verlangt wird. Für den allgemeinen Gebrauch sind neun bis fünfzehn Punkte angemessen und ergeben schnelle Messungen. Für die geringste Meßunsicherheit sind jedoch zwanzig bis dreißig Meßpunkte zusammen mit stabilen Umgebungsbedingungen zu bevorzugen.

Das zweite Verfahren ist das in 7.4 beschriebene iterative Zweipunktverfahren.

3.7 Datensammlung

Ein Dauerstrichbetrieb mit angemessener aus der Bewertung der Güten berechneter Einschwingzeit wird für die Messung empfohlen (eher als Wobbelbetrieb). Es gibt dafür zwei Gründe – erstens ist bei den meisten verfügbaren Signalquellen die Frequenzgenauigkeit bei einem langsamen Wobbeln herabgesetzt, und zweitens erfordern die Quarzbauelemente mit hoher Güte eine endliche Zeit, um nach Anlegen der Erregerfrequenz den eingeschwungenen Zustand zu erreichen. Es gibt drei verschiedene Verzögerungszeiten, die bei solch einem Frequenzstufenbetrieb auftreten: Für die Frequenzquelle ist eine endliche Zeit erforderlich, um sich nach der Programmierung eines festgelegten Wertes T_{ins} zu stabilisieren, der Empfänger erfordert eine endliche Zeit, um sich auf diese neue Frequenz (T_{rec}) zu stabilisieren. Es gibt auch eine endliche Verzögerung, während der das vorhergehend erzeugte Frequenzverhalten abklingt und das neue Verhalten bis zu dem Wert des eingeschwungenen Zustandes (T_r) aufgebaut wird. Bei Schwingquarzen hoher Güte und niedriger Frequenz kann T_r mehrere hundert Millisekunden oder auch Sekunden betragen.

Die Analyse der Ersatzschaltung des in einer Vierpolübertragungsprüfvorrichtung installierten Schwingquarzes zeigt, daß das neue Verhalten innerhalb eines Bereiches innerhalb von 0,1 % seines Endwertes in einer Zeit von etwa $2,5(Q_{eff}/f_s)$ nach Anlegung des Anregungssignales erreicht wird, wobei Q_{eff} der Gütefaktor der Schwingquarz-Prüfeinrichtung ist. Der Phasenausgleichsvorgang für einen Bereich innerhalb von etwa $0,1^\circ$ seines Endwertes wird in dem gleichen Zeitraum abgeschlossen. Für die meisten Zwecke ist dieser Genauigkeitsgrad angemessen. Für höchste Genauigkeit wird jedoch empfohlen, diesen Zeitraum auf mindestens $3,5(Q_{eff}/f_s)$ zu erweitern, so daß keine bedeutende durch Ausgleichsvorgänge verursachte Verzerrung der Daten auftreten kann. Daher sollte das Programm die Frequenzquelle auf eine festgelegte Frequenz einstellen und dann vor der Messung des Systemverhaltens über eine Dauer von $T_d = T_{ins} + T_r$ warten. Zu dieser Zeit sollten mehrere Messungen ausgeführt und der Durchschnittswert aufgezeichnet werden, so daß durch elektrisches Rauschen verursachte zufällige Abweichungen und Digitalisierungsfehler minimiert werden – die wirkliche Anzahl der zu mitteln den Anzeigen kann als eine Funktion der Größenordnung der Anzeige ausgeführt werden, da der relative Rauschpegel mit kleiner werdendem Signal ansteigt.

Die Geschwindigkeit der stufenweisen Frequenzumschaltung kann aus wiederholten Messungen bei jeder Frequenz, bis das Phasenverhalten sich stabilisiert hat, ermittelt werden. Die Mittelung mehrerer Anzeigen wird auch empfohlen, da dieses die Wirkungen des zufälligen und des Quantisierungsrauschens vermindert.

3.8 Datenkorrektur

Bei den S -Parameterverfahren ist es erforderlich, die Daten mit Fehlermatrizen zu korrigieren. Dieses wird in Anhang A behandelt. Diese Behandlungsweise ist für Verfahren mit direkter Übertragung nicht erforderlich.

3.9 Scheinleitwertberechnung

Bei den S -Parameterverfahren ist dieses durch die Umwandlungsgleichungen der Standard- S -Parameter in Y -Parameter gegeben. Für die Verfahren mit direkter Übertragung wird diese Behandlungsweise in Anhang A ausgeführt.

3.10 Analyse des Scheinleitwertes und Abschätzung der Ersatzschaltungsparameter

Es wird für die verschiedenen Verfahren auf Abschnitt 7 verwiesen.

4 Auswahl des Scheinleitwertmeßverfahrens

4.1 Allgemeines

Bei der überwiegenden Mehrheit von Resonatoren ist entweder die Prüfung der Eigenschaften als Zweipol oder Vierpol vollkommen angemessen. Da es zu einer vollständigeren Beschreibung führt, wird das Vierpolübertragungsverfahren als die primäre Referenznorm angesehen. In bestimmten Situationen kann jedoch die Zweipoltechnik Angaben liefern, die den Endgebrauchsbedingungen näher liegen.

4.2 Vorteile und Nachteile der Zweipol- S -Parameter des Reflexionsverfahrens

- Dieses Verfahren besitzt höhere Meßunsicherheit und Nachweisbarkeit, da nur koaxiale Bezugsimpedanzen für die Kalibrierung benötigt werden.
- Dieses Verfahren ist bei Schwingquarzen mit niedrigem R_1 empfindlicher als das Übertragungsverfahren und ermöglicht höhere Meßgeschwindigkeiten als Vierpol- S -Parameter-Übertragungsmessungen, wenn die Fehlerberichtigungsroutinen einfacher sind und weniger Ergebnisse gemessen werden.
- Es ist nicht sehr zufriedenstellend bei Schwingquarzen mit sehr hohem R_1 , obwohl Werte bis zu 1 kW angepaßt werden können.
- Es beschreibt das Bauelement als ein Vierpolelement, und dieses kann einigen Anwendungen nicht entsprechen.
- Schlechtere Meßunsicherheit bei Frequenzen unter 100 kHz.

4.3 Vorteile und Nachteile des Übertragungsverfahrens

- Der Schwingquarz wird als ein Bauelement mit drei Anschlüssen bewertet, und es sind mehr Angaben verfügbar.
- Schwingquarze mit hohem R_1 werden einfach gemessen.
- Messung und Kalibrierung sind komplexer, und es können einige zusätzliche Unsicherheiten bei der Kalibrierung vorhanden sein.
- Das Verfahren ist bei niedrigem R_1 weniger empfindlich.
- Wenn der Bereich der Meßfrequenz die Parallelresonanz enthält, können sehr genaue Werte der statischen Kapazität erhalten werden.
- Schlechtere Meßunsicherheit bei Frequenzen unter 100 kHz.

4.4 Vorteile und Nachteile des direkten Übertragungsverfahrens

- Dieses Verfahren ist eine Erweiterung des ursprünglichen Verfahrens nach IEC 444-1, schließt jedoch die vollständige Kalibrierung und Automatisierung ein. Die Meßgrundausrüstung sollte schon vorhanden sein.
- Schwingquarze mit großem R_1 können einfach gemessen werden.
- Das Verfahren ist bei kleinem R_1 unempfindlicher.
- Die Kalibrierung verwendet spezielle nicht-koaxiale Bezugsimpedanzen.
- Die Kapazitäten zwischen Elektroden und Gehäuse C_{01} und C_{03} können, wenn das Gehäuse geerdet ist, unabhängig gemessen werden, oder wenn das Gehäuse nicht geerdet ist, können diese in C_0 einbezogen werden.
- Das Verfahren ist schnell und für die Produktion geeignet.
- Genau bei niedrigen Frequenzen.

5 Kalibriertechniken

5.1 Verfahren für S -Parameter

5.1.1 Das zugrunde liegende Prinzip des Kalibrierablaufes liegt in einem hypothetischen Fehlermodell des HF-Meßsystems, dessen Parameter durch Messungen an bekannten Normalen [3] ermittelt werden können. Wenn die Kalibrierung abgeschlossen und die Fehlerparameter bekannt sind, können Systemfehler bei wirklichen Bauelementmessungen durch Berechnung entfernt werden.

5.1.2 Die Meßunsicherheit und Nachweisbarkeit der vorgeschlagenen Schwingquarzmeßtechniken bezieht sich auf die Gültigkeit eines automatischen Fehlerkorrekturablaufes; Anhang A gibt die Gleichungen des Fehlermodells an und beschreibt geeignete Kalibrierabläufe.

5.1.3 Jeder Netzwerkanalysator für die Ausführung von Vierpolmessungen, wie sie in diesem Abschnitt beschrieben werden, ist auch für Zweipolmessungen geeignet. Obwohl das Gegenteil dieser Festlegung nicht notwendigerweise wahr ist.

5.1.4 Der Kalibrierfrequenzbereich hängt von der verwendeten Ausrüstung und der Anwendung ab. Es sollte mindestens der Bereich von Frequenzen eingeschlossen werden, in dem Messungen erwartet werden. Die Fehlerbegriffe sind allgemein gleich, leicht mit den Frequenzfunktionen variierend, und es ist nur erforderlich, Werte von ausreichend eng benachbarten Frequenzpunkten zu erhalten, um eine genaue Interpolation der Funktionen beliebiger Frequenzen innerhalb des Bereiches zu erhalten. Bei angegebenen Frequenzgrenzen sollte das Programm so aufgebaut sein, daß es automatisch die benötigten Frequenzen für die entsprechende Kalibrierung auswählt. Außer der Erstellung der Frequenzliste muß das Programm die zutreffenden Geräteeinstellungen, einschließlich des Quellenpegels, der Wobbelgeschwindigkeit, der Nachweisgerätebandbreite, der Anzahl der zu mittelnenden Anzeigen (wenn Dauerstrichbetrieb gewählt wurde) vornehmen.

5.2 Direktes Übertragungsverfahren

Das zugrunde liegende Prinzip liegt in der Berechnung der Scheinwiderstandswerte der Schwingquarzmeßvorrichtung. Diese wird unter Verwendung bekannter Scheinwiderstände, wie einem nominellen Kurzschluß, Leerlauf und Standardwiderstand (25 Ω oder 50 Ω) ausgeführt. Einzelheiten werden im Anhang A beschrieben.

5.3 Überprüfung der Kalibrierung

5.3.1 Die dritte wichtige Funktion, die Bestandteil des Softwaresystems sein sollte, ist die Fähigkeit der Ausführung von Messungen innerhalb des gesamten Kalibrierfrequenzbereichs.

ches, um zu überprüfen, ob das Betriebsverhalten der Ausrüstung und die Meßunsicherheit der Eichungen sich innerhalb der erforderlichen Grenzwerte befinden. Bild 9 zeigt den Ablaufplan eines solchen Programmes für die Verfahren mit S -Parametern. Ein ähnlicher Algorithmus kann auf das direkte Übertragungsverfahren angewendet werden. Die Eingangsinformation dieses Programmes sollte den Frequenzbereich und die Anzahl der Meßpunkte, den Einspeisungspegel, bei dem die Messungen auszuführen sind, sowie die Ausgangsparameter, d. h. Durchgangsscheinwiderstand, Durchgangsscheinleitwert, Eingangsscheinwiderstand usw. enthalten. Dieses Programm würde die Systemfehlerwerte, die vorher durch das "Kalibrier"-Programm gespeichert wurden, und die Fehlerkorrektur- sowie Parameterumwandlungsroutinen, die durch das "Meß"-Programm verwendet werden, verwenden. Die verwendeten Komponenten müssen auf der Meßreferenzebene an das System angeschlossen werden.

5.3.2 Die Überprüfung kann durch Messung der Abschlußelemente, die für den Kalibriervorgang verwendet werden, die bei der Kalibrierung verwendeten Kurzschlußelemente oder durch die Verwendung besonders vorbereiteter Komponenten, wie RC -Netzwerke, die in den gleichen Gehäusetypern untergebracht sind wie die zu messenden Schwingquarze, ausgeführt werden. Mit den Kalibrierbauelementen würden die gemessenen Parameter in Eingangs- und Ausgangsscheinwiderstände, Z_{11} und Z_{22} , umgewandelt, da die Übertragungswerte mit diesen Bauelementen im wesentlichen Null sind. Ein Bauelement, das ein in Serie geschaltetes RC -Glieder zwischen den wirksamen Anschlüssen eines Schwingquarzgehäuses besitzt, würde den Y_{12} (oder $Z = 1/Y_{12}$) Ausgangswert liefern. Solche Komponenten ergeben eine sehr günstige Überprüfung, wobei sie allgemein bestgeeignet für den internen Gebrauch sind, da sie anfangs durch mehrere Messungen mit einem gut überprüften System kalibriert wurden.

5.3.3 Wenn zum Beispiel das Überprüfungsprogramm verwendet wird, um die Abschlußnormalbauelemente, die zur Kalibrierung des Gerätes verwendet werden und die einen Scheinwiderstand sehr nahe von 50Ω besitzen würden sowie genau bekannt wären, zu messen, würde erwartet, daß die erhaltenen Werte von Z_{11} und Z_{22} innerhalb eines Bereiches von 0,2 % des richtigen Wertes liegen und eine Blindkomponente von weniger als 0,2 % des ohmschen Wertes besitzen würden. Wenn die Kurzschlußnormalen gemessen werden, würde von Z_{11} und Z_{22} erwartet, daß sie sowohl eine ohmsche als auch eine Blindkomponente des Scheinwiderstandes von weniger als 0,1 Ω ergeben.

5.3.4 Es ist wünschenswert, daß die Überprüfungsmessungen bei genau den gleichen Frequenzen ausgeführt werden, bei denen die Kalibriermessungen vorgenommen wurden, so daß die Genauigkeit des Interpolationsalgorithmus ebenfalls überprüft wird.

5.3.5 Ausführungen von Software-Systemen, die diese Funktionen bereitstellen, sind kommerziell für einige der Netzwerkanalysatorsysteme, die durch Gerätehersteller angeboten werden, erhältlich.

6 Niederfrequenzmessungen

6.1 Messungen bei Frequenzen unterhalb 100 kHz zeigen zwei besondere Schwierigkeiten. Erstens kann der Scheinwiderstandswert des Resonators sehr hoch sein und einen übermäßigen Einfügungsverlust in einem 50Ω -System erzeugen, und zweitens können die Reflexionsmeßgeräte in dem Netzwerkanalysatormeßplatz eine unzulängliche Richtwirkung bei niedrigen Frequenzen haben.

6.2 Es wird daher empfohlen, daß das Amplituden-/Phasen-Übertragungsverfahren angewendet wird. Bei Bauelementen mit hohem R_1 wird auch empfohlen, daß eine Prüfvorrichtung, die einen hohen Scheinwiderstand für den Schwingquarz darstellt, verwendet wird. Um niedrige Meßausrüstungspegel zu vermeiden, kann ein Scheinwiderstand-Anpassungswandler erforderlich sein. Sollte die Verwendung der Verfahren für S -Parameter gewünscht werden, enthält Anhang B einige grundlegende Einzelheiten.

7 Analyse der Ersatzschaltung

7.1 Allgemeine Anpassung mit Hilfe des Fehlerquadratverfahrens

7.1.1 Als ein allgemeines Kriterium werden die Werte der Ersatzschaltungsparameter als solche definiert, die die Funktion

$$E = \sum_i W_i |Y_i - Y_i^A|^2 = \sum_i W_i ((G_i - G_i^A)^2 + (B_i - B_i^A)^2) \quad (7.1)$$

minimieren, wobei $Y_i = G_i + jB_i$ und W_i Wichtungsfaktoren sind.

Y_i bezeichnet den theoretischen Wert des Scheinleitwertes Y , berechnet bei der Meßfrequenz ω_i und ausgedrückt durch die Parameter G_0 , G_{02} , R_1 , L_1 und C_1 ; Y_i^A stellt den gemessenen Wert von Y bei ω_i , die aus den fehlerkorrigierten S -Parametern abgeleitet wurden, dar. Y besitzt sowohl bei der Reflexions- als auch der Übertragungsmessung die im wesentlichen gleiche Funktion, und von nun an werden seine Parameter auf G_0 , C_0 , R_1 , L_1 , C_1 bezogen. Es dürfen mehrere Auswahlmöglichkeiten für W_i verwendet werden. Wenn C_0 und G_0 durch getrennte Messungen außerhalb der Resonanz ermittelt werden, ist die Wahl $W_i = 1$ gewöhnlich am geeignetsten. Wenn C_0 aus Messungen in der Nähe der Resonanz bewertet wird und es nicht erforderlich ist, zu sichern, daß die Parallelresonanzpunkte genau beschrieben werden, sollte die Wahl $W_i = |Y_i^A|^{-1}$ verwendet werden.

7.1.2 Die Funktion E hat die folgenden Eigenschaften:

a) Da
$$\sum_i W_i |Y_i - Y_i^A|^2 = \sum_i W_i |Y_i^A|^2 \left| \frac{Y_i}{Y_i^A} - 1 \right|^2$$

ist, ist der relative Fehler in Y gewichtet, um die größte Signifikanz in dem Bereich nahe der Serienresonanz zu ergeben (wobei Y_i^A ein Höchstwert ist).

b) Es werden sowohl die Realteile als auch die Imaginärteile von Y verwendet.

c) Wenn W_i als $|Y_i^A|^{-1}$ gewählt wird, wird eine enge Übereinstimmung der theoretischen und experimentellen Werte der Parallelresonanz gesichert, vorausgesetzt, daß sie innerhalb der Meßpunkte ω_i liegt.

7.1.3 Gelegentlich kann ein unerwünschter Schwingungsmodus ganz nahe bei der Hauptanregung auftreten, so daß die Verwendung einer Ersatzschaltung mit einzelner Schwingungsmodus fragwürdig ist. In diesem Fall dürfen die allgemeineren Schaltungen in Bild 6 und Bild 7, die mehrere Resonanzzweige enthalten, verwendet werden. Die Ersatzschaltungsparameter können wie vorher durch Minimierung von E ermittelt werden, jedoch ist die Minimierung jetzt unter Berücksichtigung der erhöhten Anzahl von Variablen durchzuführen. Eine gleichzeitige Minimierung dieser Form ist der einzig vollständige Weg, dieses Problem zu behandeln.

7.2 Lineare Anpassung mit Hilfe des Fehlerquadratverfahrens

7.2.1 Das empfohlene Verfahren der Datenanpassung ist vielseitig anwendbar und leicht verallgemeinert, der Vorgang der Minimierung kann jedoch nur durch ein iteratives Verfahren durchgeführt werden. Es wird zugegeben, daß eine mathematische Verwirklichung dieses Verfahrens für einige Benutzer unzuweckmäßig ist, und es werden aus diesem Grunde bestimmte alternative nichtiterative Verfahren angegeben.

7.2.2 Alle nichtiterativen (linearen) Verfahren verwenden eine Kombination von mindestens zwei Anpassungsvorgängen, und sie sind auf solche komplexeren Probleme wie zwei Resonanzanpassungen, die eine weiterentwickeltere nichtlineare Näherung erfordern, nicht fertig verallgemeinert. Um eine Gesamtübereinstimmung aufrechtzuerhalten, ist es ratsam, lineare Verfahren zu wählen, die so weit wie möglich dem allgemeinen nichtlinearen Kriterium entsprechen.

7.2.3 Für eine ausgezeichnete Näherung in der Nähe der Resonanz gilt

$$\omega C_0 \approx \omega_s C_0 = B_0 \quad (7.2)$$

$$\omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1} = 2(\omega - \omega_s)L_1. \quad (7.3)$$

Dabei ist

$$\omega_s = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}}.$$

Daher ist

$$B = B_0 - \frac{2(\omega - \omega_s)L_1}{R_1^2 + 4(\omega - \omega_s)^2 L_1^2} = B_0 - 2(\omega - \omega_s) \frac{L_1}{R_1} \cdot G, \quad (7.4)$$

wobei

$$G = R_1 / (R_1^2 + 4(\omega - \omega_s)^2 L_1^2)$$

die reelle Komponente der Übertragungsadmittanz ist, wenn alle Querleitwerte vernachlässigt werden.

Der Ausdruck für E kann daher umgeschrieben werden in

$$E = \sum_i W_i \left[(G_i - G_i^A)^2 + \left(B_0 - 2(\omega_i - \omega_s) \frac{L_1}{R_1} G_i - B_i^A \right)^2 \right]. \quad (7.5)$$

7.2.4 Um einen geeigneten Ausdruck zu erhalten, darf angenommen werden, daß die Differenz zwischen G_i und G_i^A vernachlässigt werden kann, so daß gilt

$$G_i = G_i^A,$$

und damit wird

$$E = \sum_i W_i \left(B_0 - 2(\omega_i - \omega_s) \frac{L_1}{R_1} G_i^A - B_i^A \right)^2. \quad (7.6)$$

7.2.5 Durch Definieren der drei unabhängigen Variablen

$$\begin{aligned} p_1 &= -4\pi \frac{L_1}{R_1} \\ p_2 &= \frac{2\omega_s L_1}{R_1} = \frac{4\pi f_s L_1}{R_1} \\ p_3 &= B_0 \end{aligned} \quad (7.7)$$

wird E zu

$$E = \sum_i W_i ((p_1 f_i + p_2) G_i^A + p_3 - B_i^A)^2. \quad (7.8)$$

Die Bedingungen für einen Kleinstwert

$$\frac{\partial E}{\partial p_1} = \frac{\partial E}{\partial p_2} = \frac{\partial E}{\partial p_3} = 0$$

ergeben die linearen Gleichungen

$$\begin{aligned} \left(\sum_i w_i (f_i G_i^A)^2 \right) p_1 + \left(\sum_i w_i f_i (G_i^A)^2 \right) p_2 + \left(\sum_i w_i f_i G_i^A \right) p_3 &= \sum_i w_i f_i G_i^A B_i^A \\ \left(\sum_i w_i f_i (G_i^A)^2 \right) p_1 + \left(\sum_i w_i (G_i^A)^2 \right) p_2 + \left(\sum_i w_i G_i^A \right) p_3 &= \sum_i w_i G_i^A B_i^A \\ \left(\sum_i w_i f_i G_i^A \right) p_1 + \left(\sum_i w_i G_i^A \right) p_2 + \left(\sum_i w_i \right) p_3 &= \sum_i w_i B_i^A \end{aligned} \quad (7.9)$$

Vor dem Gesichtspunkt der numerischen Aufbereitung ist es ratsam, einen Frequenzmaßstab zu verwenden, der von irgendeinem Referenzwert ziemlich nahe zu f_s liegt, wenn diese Gleichungen gelöst werden.

7.2.6 Wenn die gerade ermittelten Werte von ω_s und $\frac{L_1}{R_1}$ in einem genauen Ausdruck für E substituiert werden, können C_0 und R durch eine andere Minimierung von E erhalten werden.

$$\text{Wenn } T = \left(\omega - \frac{\omega_s^2}{\omega} \right) \cdot \frac{L_1}{R_1}$$

$$\text{und } U = \frac{1}{1 + T^2} \text{ sowie } V = TU \text{ ist,} \quad (7.10)$$

$$\text{dann ist } G = G_0 + \frac{U}{R_1} \quad B = \omega C_0 - \frac{V}{R_1} \quad (7.11)$$

$$E = \sum_i w_i \left[\left(G_0 + \frac{U_i}{R_1} - G_i^A \right)^2 + \left(\omega_i C_0 - \frac{V_i}{R_1} - B_i^A \right)^2 \right]. \quad (7.12)$$

Die Minimierung, bezogen auf G_0 , C_0 und R , ergibt:

$$\begin{aligned} \left(\sum_i w_i \right) G_0 + \left(\sum_i w_i U_i \right) \cdot \frac{1}{R_1} &= \sum_i w_i G_i^A \\ \left(\sum_i w_i \omega_i^2 \right) G_0 - \left(\sum_i w_i \omega_i V_i \right) \cdot \frac{1}{R_1} &= \sum_i w_i \omega_i B_i^A \\ \left(\sum_i w_i U_i \right) G_0 - \left(\sum_i w_i \omega_i V_i \right) C_0 + \sum_i (w_i U_i) \cdot \frac{1}{R_1} &= \left(\sum_i w_i U_i G_i^A - V_i B_i^A \right). \end{aligned} \quad (7.13)$$

7.2.7 Dieses Verfahren ermittelt natürlich nicht den wahren Kleinstwert von E . Es werden zwei Parameter durch die Minimierung einer ungefähren Gleichung für E gefunden und dann die genaue Funktion bezogen auf die anderen Parameter minimiert, die die Werte der ersten beiden festen enthalten. Die Schritte der Verfahrensweise können wie folgt zusammengefaßt werden.

7.2.8 Empfohlenes lineares Verfahren:

- Bildung der ungefähren Ausdrücke für E durch Setzen von $G_i = G_i^A$.
- Minimierung des ungefähren Ausdrucks, um die Werte zu ermitteln für:

$$B_0, \frac{L_1}{R_1}, \omega_s.$$

- Mit den festen Werten für L_1/R_1 und ω_s ist der genaue Ausdruck für E zu minimieren, um G_0 , C_0 und R_1 zu ermitteln.

7.2.9 Die obige Ablauffolge kann durch Zurückkehren zum Schritt a) wiederholt werden und anstelle der Annäherung von G_i durch G_i^A die schon berechneten Parameterwerte verwendet werden, um G_i anzunähern. Die Schritte a), b) und c) können dann wiederholt werden, bis die Parameterwerte den aufeinanderfolgenden Näherungen bis zu festgelegten Grenzwerten genügt. Wenn C_0 durch Messungen außerhalb der Resonanz ermittelt wurde, ist ihr Wert in den obigen Ausdrücken konstant zu halten und die Minimierungen nur bezogen auf die anderen Variablen auszuführen.

7.3 Kreisanpassungsverfahren

7.3.1 Allgemeines

Ein lineares alternatives Verfahren, das wahrscheinlich der einfachste und rationellste Weg zur Datenanpassung ist, ist das Kreisanpassungsverfahren.

Von den vollständig berichtigten S -Parametern oder den bei mehreren Frequenzen gemessenen Amplituden- und Phasenwerten werden die $-Y_{21}$ -Scheinleitwertvektoren berechnet. Diese Werte werden verwendet, um die Gleichung für die bestangepaßte kreisförmige Ortskurve in der Y -Ebene aufzustellen.

Es kann gezeigt werden, daß

$$\left(G - G_0 - \frac{1}{2R_1}\right)^2 + (B - B_0)^2 = \frac{1}{4R_1^2} \quad (7.14)$$

ist, so daß die Punkte (G_i, B_i) , die die Real- und Imaginäranteile von $-Y_{21}$ sind, auf einem Kreis mit dem Radius $\frac{1}{2R_1}$ und dem Mittelpunkt $\left(G_0 + \frac{1}{2R_1}, B_0\right)$ liegen.

Wenn dieser Ausdruck erweitert wird, erhält man:

$$\left(G_0^2 + B_0^2 + \frac{G_0}{R_1}\right) - G\left(2G_0 + \frac{1}{R_1}\right) + G^2 + B^2 - 2BB_0 = 0. \quad (7.15)$$

Wenn die Parameter p_1, p_2 und p_3 definiert werden durch

$$p_1 = -\left(G_0^2 + B_0^2 + \frac{G_0}{R_1}\right), p_2 = 2G_0 + \frac{1}{R_1}, p_3 = 2B_0.$$

dann wird
$$\sum_i \left(\frac{1}{4R_1^2} - \left(G_i^A - G_0 - \frac{1}{2R_1}\right)^2 - (B_i^A - B_0)^2 \right)^2 \quad (7.16)$$

$$= \sum_i (p_1 + p_2 G_i^A + p_3 B_i^A - (G_i^A)^2 - (B_i^A)^2)^2.$$

Wenn dieser Ausdruck bezogen auf p_1, p_2 und p_3 minimiert wird, kann eine lineare Gleichungsmenge für p_1, p_2 und p_3 erhalten werden, und es wird

$$B_0 = \frac{p_3}{2}, R_1 = \frac{1}{2} \left(p_1 + \left(\frac{p_2}{2} \right)^2 + B_0^2 \right)^{-1/2} \quad (7.17)$$

$$G_0 = \frac{1}{2} \left(p_2 - \frac{1}{R_1} \right).$$

und der Radius des Kreises ist gegeben durch

$$\text{Rad} = \frac{1}{2R_1} = \left(p_1 + \left(\frac{p_2}{2} \right)^2 + B_0^2 \right)^{1/2}. \quad (7.18)$$

7.3.2 Messung von C_0, G_0

Die statische Parallelkapazität kann ermittelt werden aus

$$C_0 = \frac{B_0}{\omega}.$$

Es kann leicht ermittelt werden, ob eine Nullphasenbedingung möglich ist oder nicht – wenn $\text{Radiant} < B_0$ ist, wird der Kreis die Realteilachse in der Y -Ebene nicht schneiden, und daher kann der Schwingquarz bei der Einfügung niemals eine Nullphase erzeugen. G_0 ist der Querleitwert und darf in die Ersatzschaltung einbezogen werden oder nicht. Wenn $G_0 < 0,0001$ Rad ist, ist der Fehler, der durch die Vernachlässigung des Vorhandenseins von G_0 verursacht wird, sicher nicht bedeutend.

7.3.3 Messung von R_1, C_1, L_1, f_s

Die geometrischen Maße des Scheinleitwertkreises liefern nicht direkt Angaben über die Frequenz und die dynamische Induktivität. Diese Parameter werden aus der Untersuchung der Blindwiderstandsfunktionen in der Z -Ebene gefunden. Zuerst wird der Y -Ebenenkreis verwendet, um die gemessenen Werte in der folgenden Art "abzurunden": Die gemessenen $-Y_{21}$ -Werte werden auf den