

# **Schwingquarze und Oszillatoren**

## **Möglichkeiten und Grenzen bei der Erzeugung von stabilen Mikrowellensignalen**

**Bernd Neubig**  
**Dipl.-Phys. Dipl.-Ing.**

© AXTAL GmbH & Co.KG  
Wasemweg 5  
74821 Lobbach

[www.axtal.com](http://www.axtal.com)  
[info@axtal.com](mailto:info@axtal.com)  
Fon: 06261 939834

# Erzeugung von quarzstabilen Mikrowellensignalen

## ✘ Mögliche Quellen:

### ■ Quarze:

- ◆ Hochfrequente Grundwellen- oder Obertonquarze
- ◆ AT- Quarze oder SC-Quarze
- ◆ HFF- Quarze
- ◆ SAW- Resonatoren

### ■ OCXO oder TCXO

- ◆ im Bereich 5 MHz ~ 30 MHz
- ◆ Im Bereich um 100 MHz

# Erzeugung von quarzstabilen Mikrowellensignalen

- ✘ Mögliche Aufbereitung:
  - Frequenzvervielfachung
  - Injection Locking
  - PLL-Anbindung OCXO oder TCXO an VCO
    - ◆ VCO mit Stripline,
    - ◆ Koax-Resonator,
    - ◆ Dielektr. Res,
    - ◆ SAWR

# Erzeugung von quarzstabilen Mikrowellensignalen

## ✘ Herausforderungen:

### ■ Frequenzstabilität

- ◆ Kurzzeit, Langzeit, Temperatur, Pushing, Pulling

### ■ Spektrale Reinheit

- ◆ Harmonics, Subharmonics, Anharmonics

### ■ Phasenrauschen / Phasenjitter

- ◆ Trägernah, Weitab

### ■ Mikrofonie / g-sensitivity

# Quarze

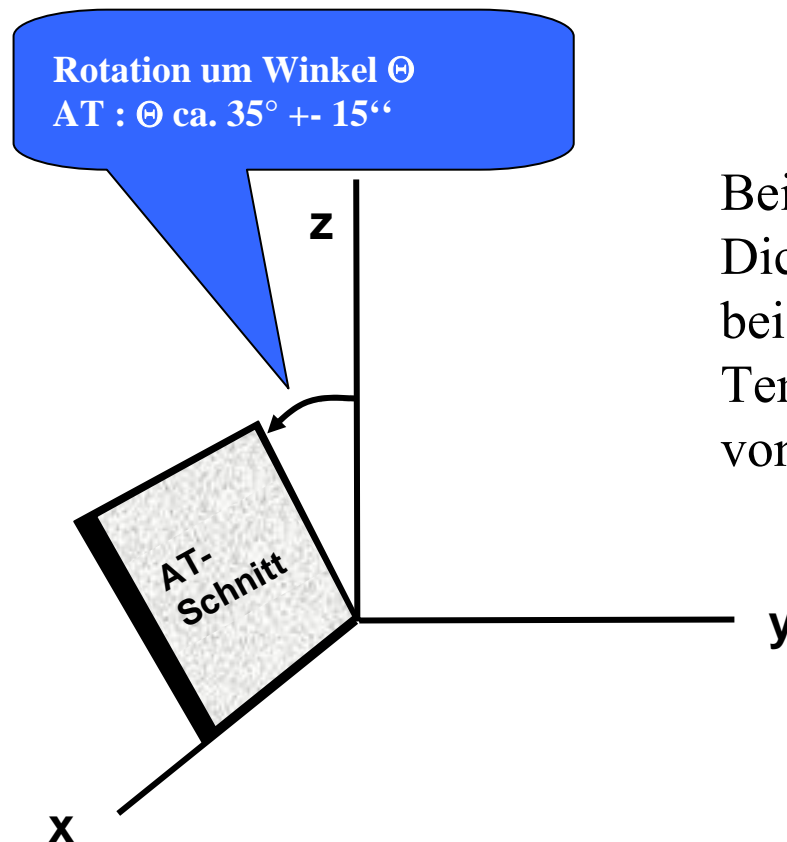
## ■ Quarze:

- ◆ AT- Quarze oder SC-Quarze
- ◆ HFF- Quarze
- ◆ SAW- Resonatoren

## ■ OCXO oder TCXO

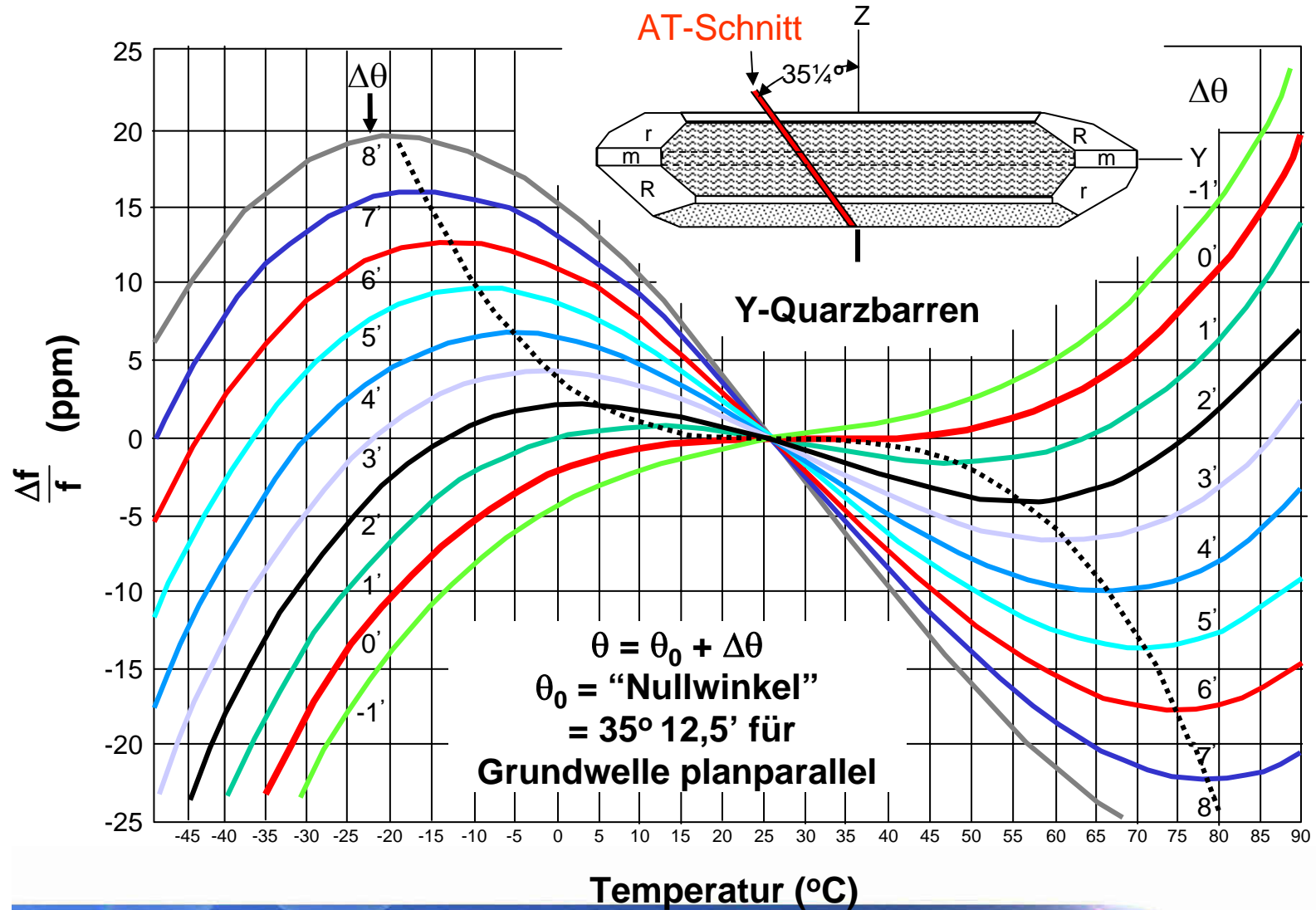
- ◆ im Bereich 5 MHz ~ 30 MHz
- ◆ Im Bereich um 100 MHz

# AT-Schnitt, Dickenscherschwinger

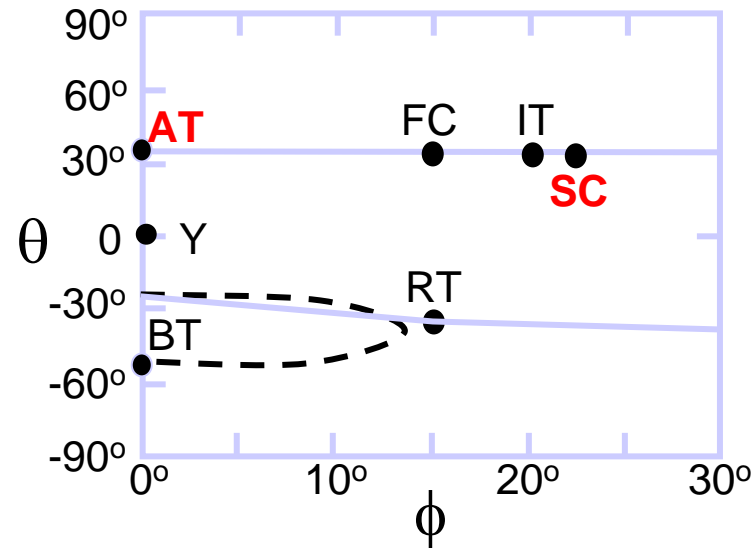
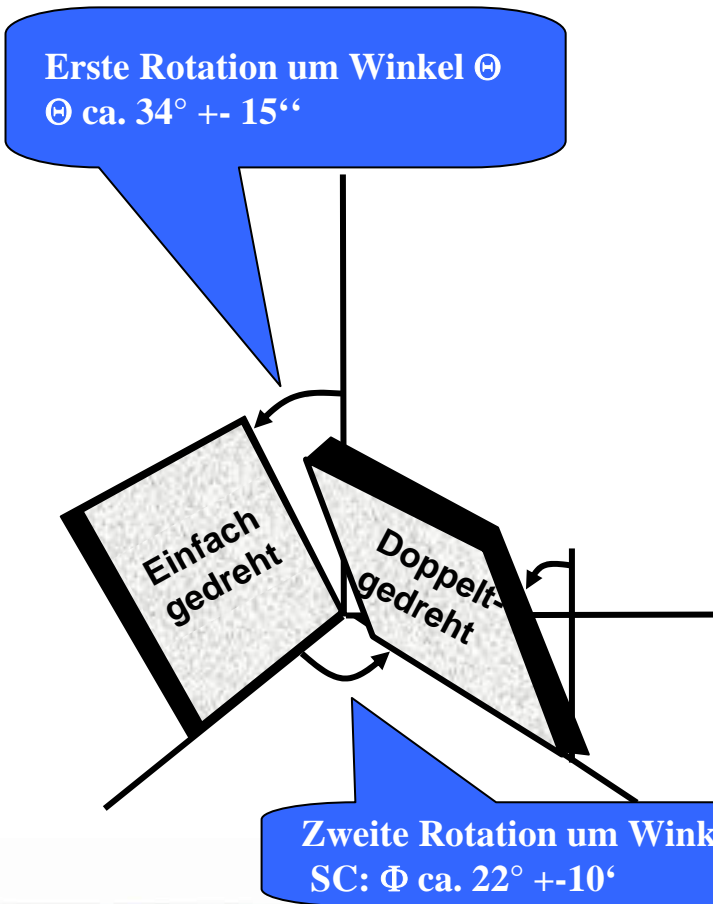


Beim AT-Schnitt besitzt die Dickenscherschwinger bei Raumtemperatur einen Temperaturkoeffizienten (TK) von Null.

# f(T)-Kurven beim AT-Schnitt



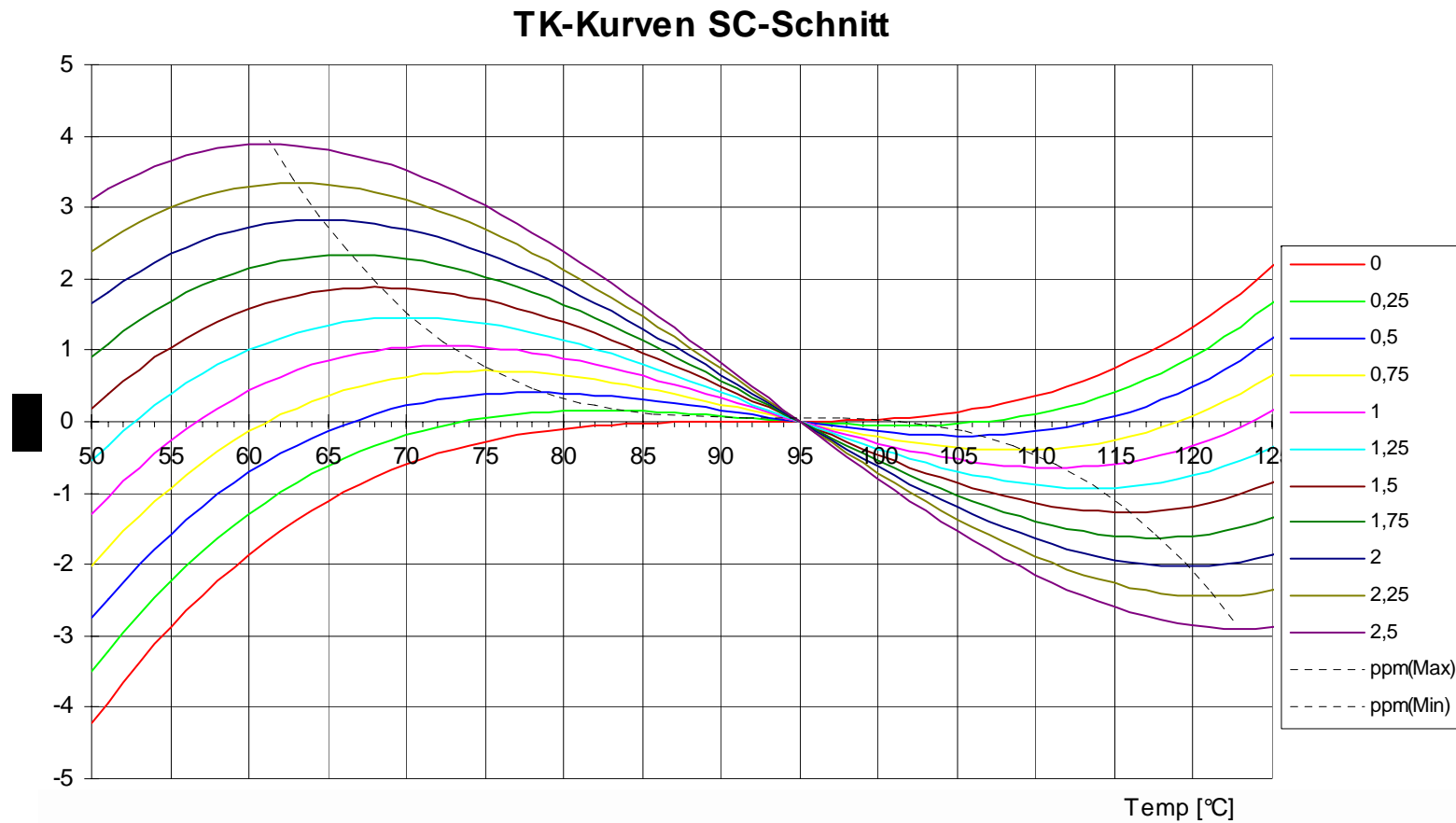
# Doppelt gedrehte Schnitte mit TK= Null



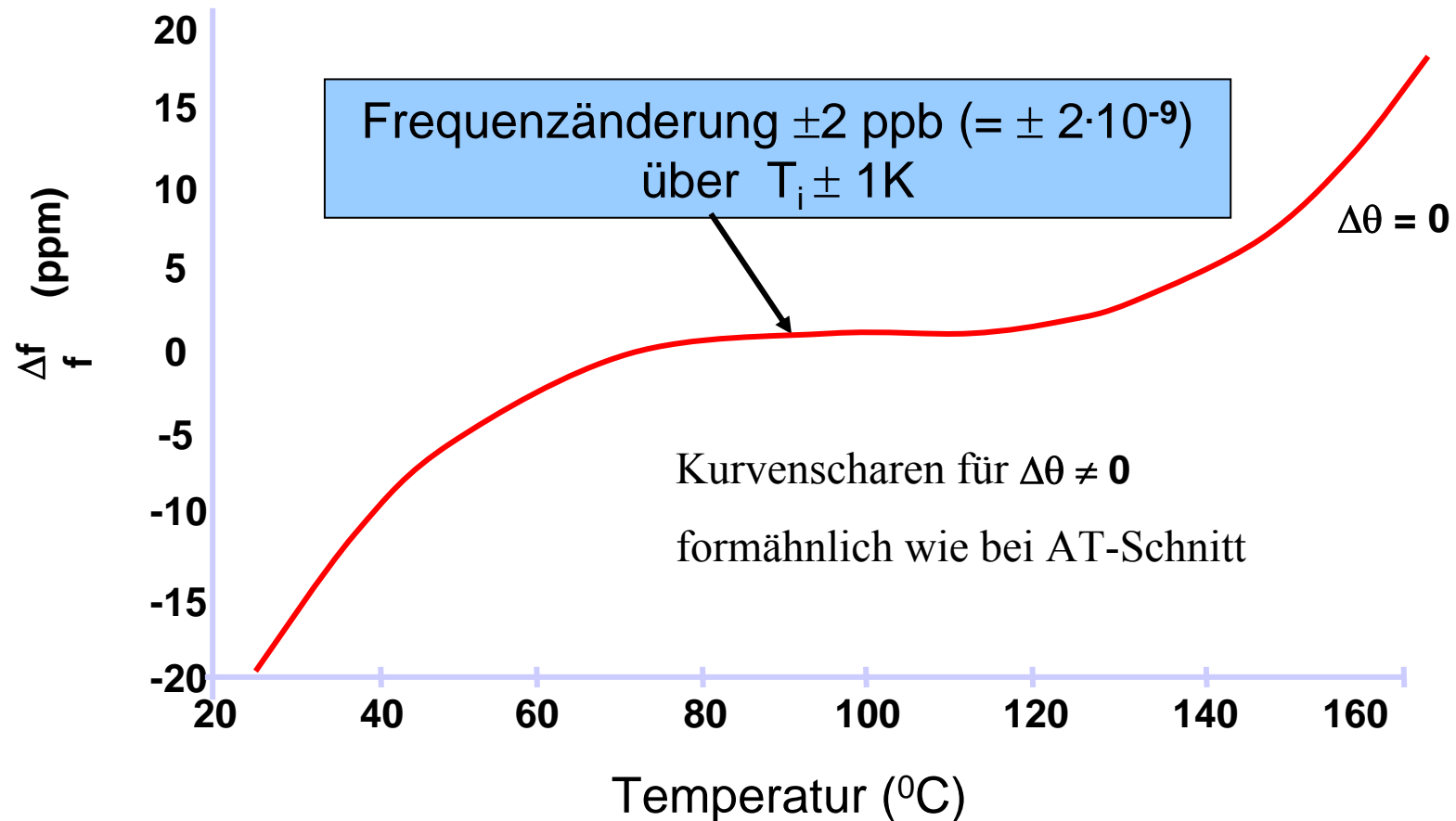
$\Theta \approx 35^\circ$ : AT-Schnitt: TK = 0 ppm/K bei  $\approx 25^\circ\text{C}$   
 SC-Schnitt\*: TK = 0 ppm/K bei  $\approx 95^\circ\text{C}$

\* SC = Stress Compensated

# TK-Kurven des SC-Schnitts



# f(T) - Kurve beim SC-Schnitt



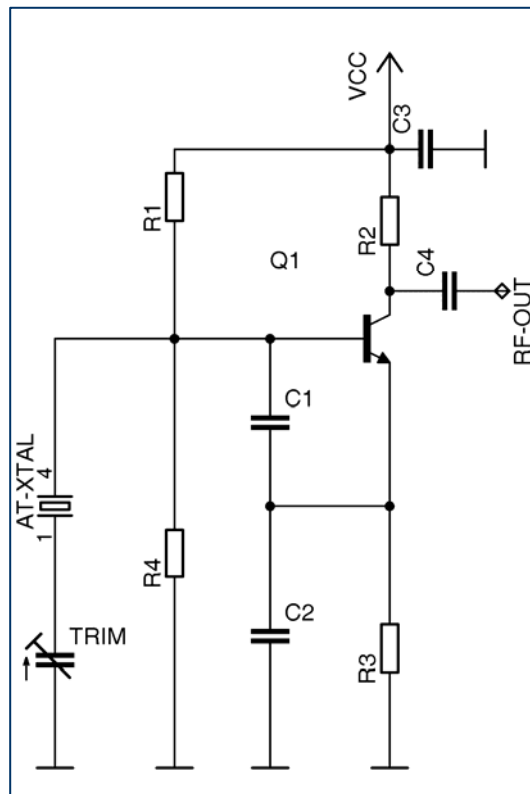
# Eigenschaften des SC-Schnitts

- ✘ SC = „Stress Compensated“, d.h.
  - unempfindlicher gegen mechanischen Stress
  - geringere Empfindlichkeit bei Beschleunigung
    - ◆ g-sensitivity
    - ◆ Mikrofonie
  - höhere Schwingungsamplituden möglich
    - ◆ geringeres Phasenrauschen
    - ◆ geringere Alterung bei gleicher Amplitude wie AT

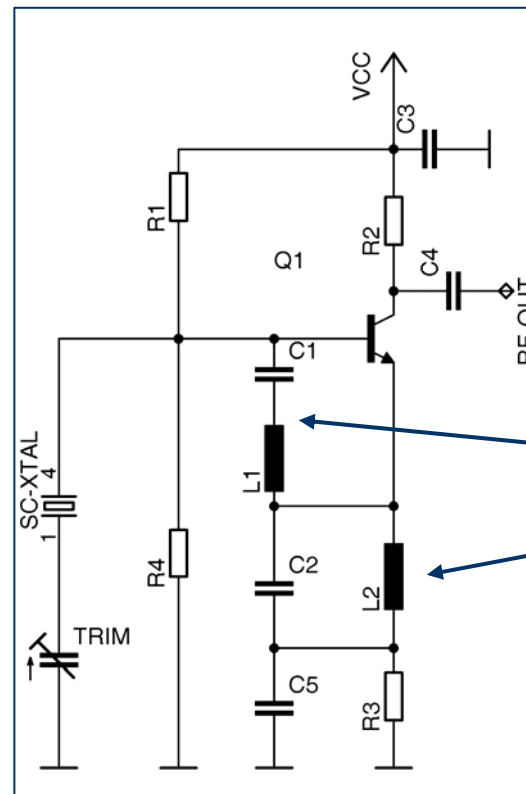
# Eigenschaften des SC-Schnitts

- ✘ TK- Kurve ist bei typischen Thermostat-temperaturen ( $70^{\circ}\text{C} \sim 90^{\circ}\text{C}$ ) flacher
  - höhere Temperaturstabilität bei gleicher OCXO - Baugröße
  - kleinere Baugröße für gleiche Temperaturstabilität
- ✘ Starke (unerwünschte) B-Mode, nur 9% oberhalb der (erwünschten) C-Mode
  - Aufwendigere Selektionsmittel in der Oszillatorstufe
- ✘ Wesentlich teurerer als AT-Schnitt

# Oszillatorstufe mit AT/SC-Quarz



AT-Grundwellen-Quarz



SC-Quarz 3. Oberton

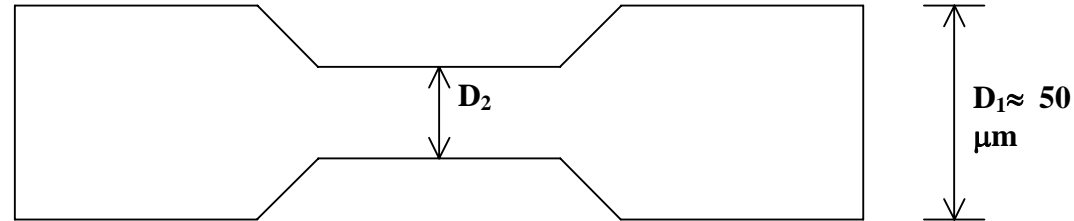
$L_1-C_1$ :  
Unterdrückung B-Mode  
 $L_2-C_2$ :  
Unterdrückung Grundwelle

# Hochfrequente Grundwellenquarze (HFF)

**Technologische Dickengrenze für mechanische Bearbeitung:**

**$d \approx 40 \mu\text{m}$  ? höchste Grundfrequenz ca. 45 MHz**

**Tiefes Strukturätzen mit Inverted-Mesa-Technik:**

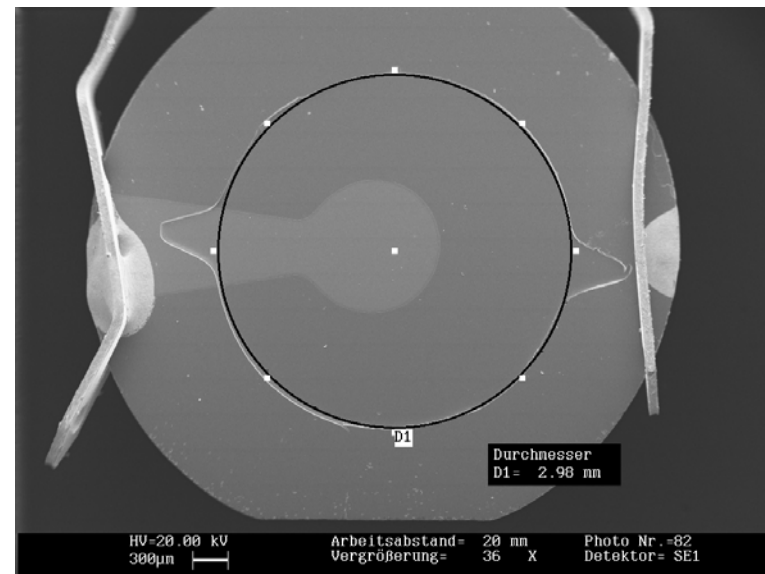
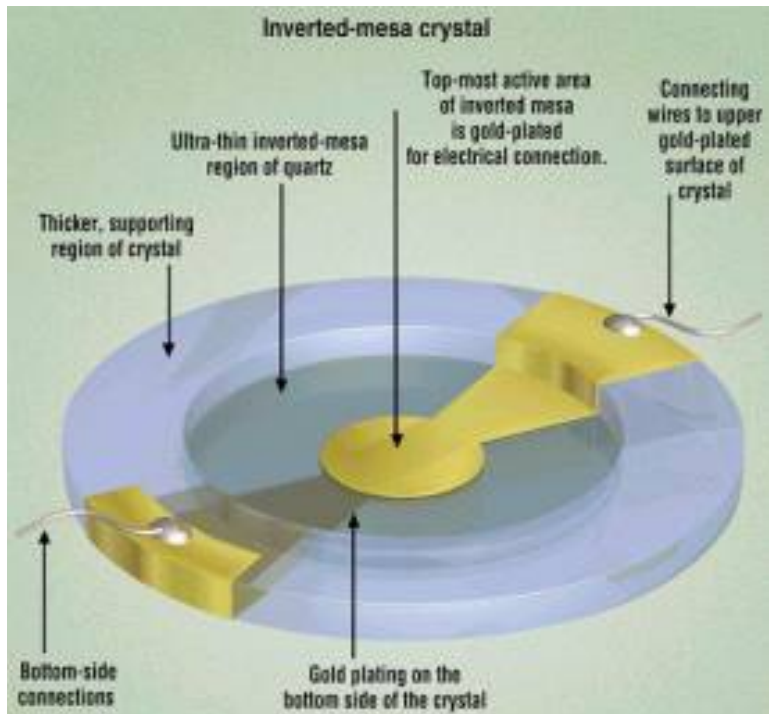


**Stand der industriellen Technik:**

**Grundwelle 150 MHz bis 250 MHz**

**3. Oberton bis 750 MHz**

# HFF-Quarze



# HFF-Quarze

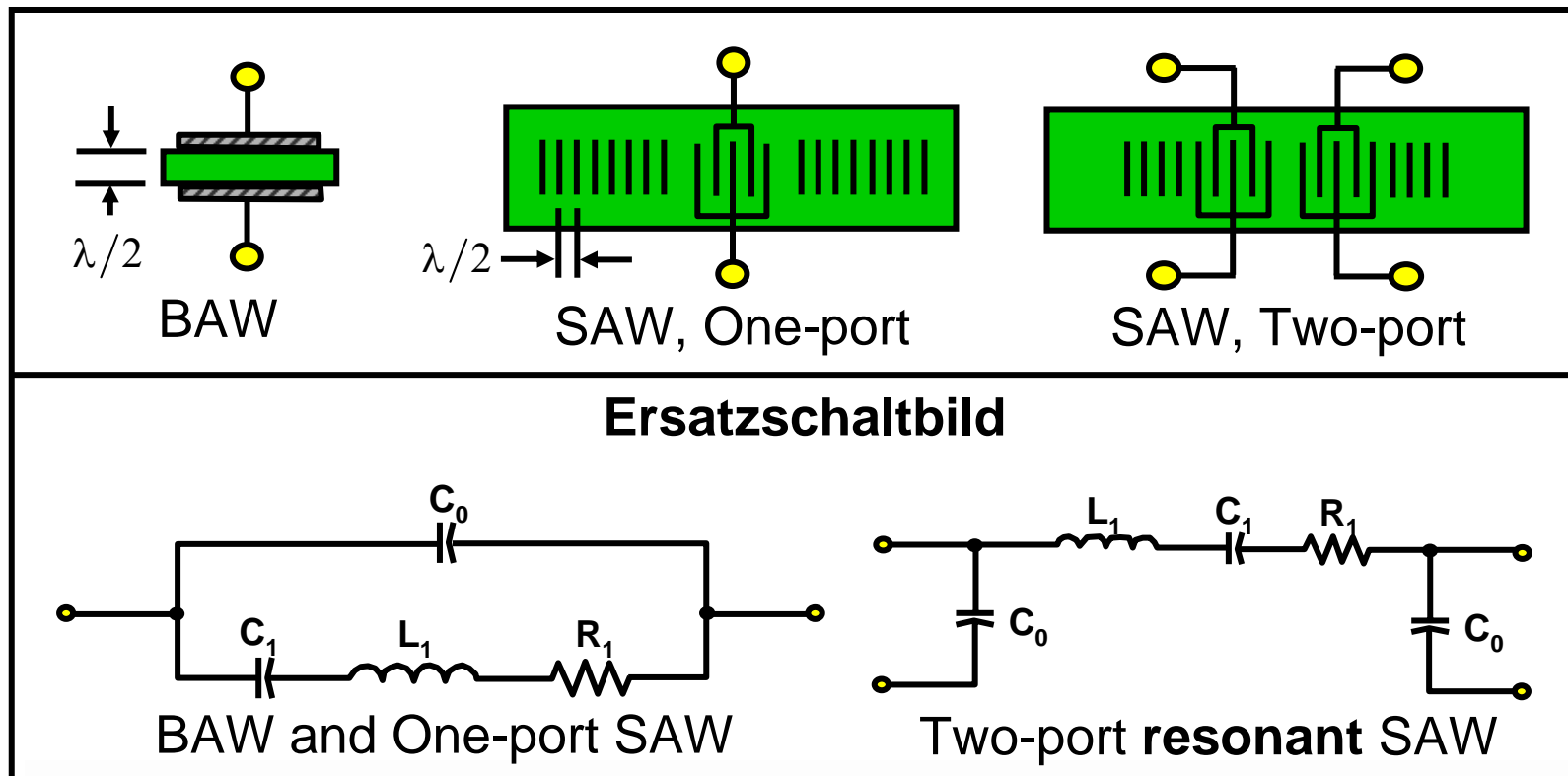
## ✘ Vorteile:

- einfache Oszillatorschaltung ohne Abstimmung
- geringerer Vervielfachungsfaktor
- größere Ziehbarkeit als Obertonquarze  $C_1 \sim 1/n^2$

## ✘ Nachteile:

- geringere Güte ( $Q \cdot f$ ) als Obertonquarze
- Phasenrauschen schlechter
- Kleinststückzahlen schwer erhältlich

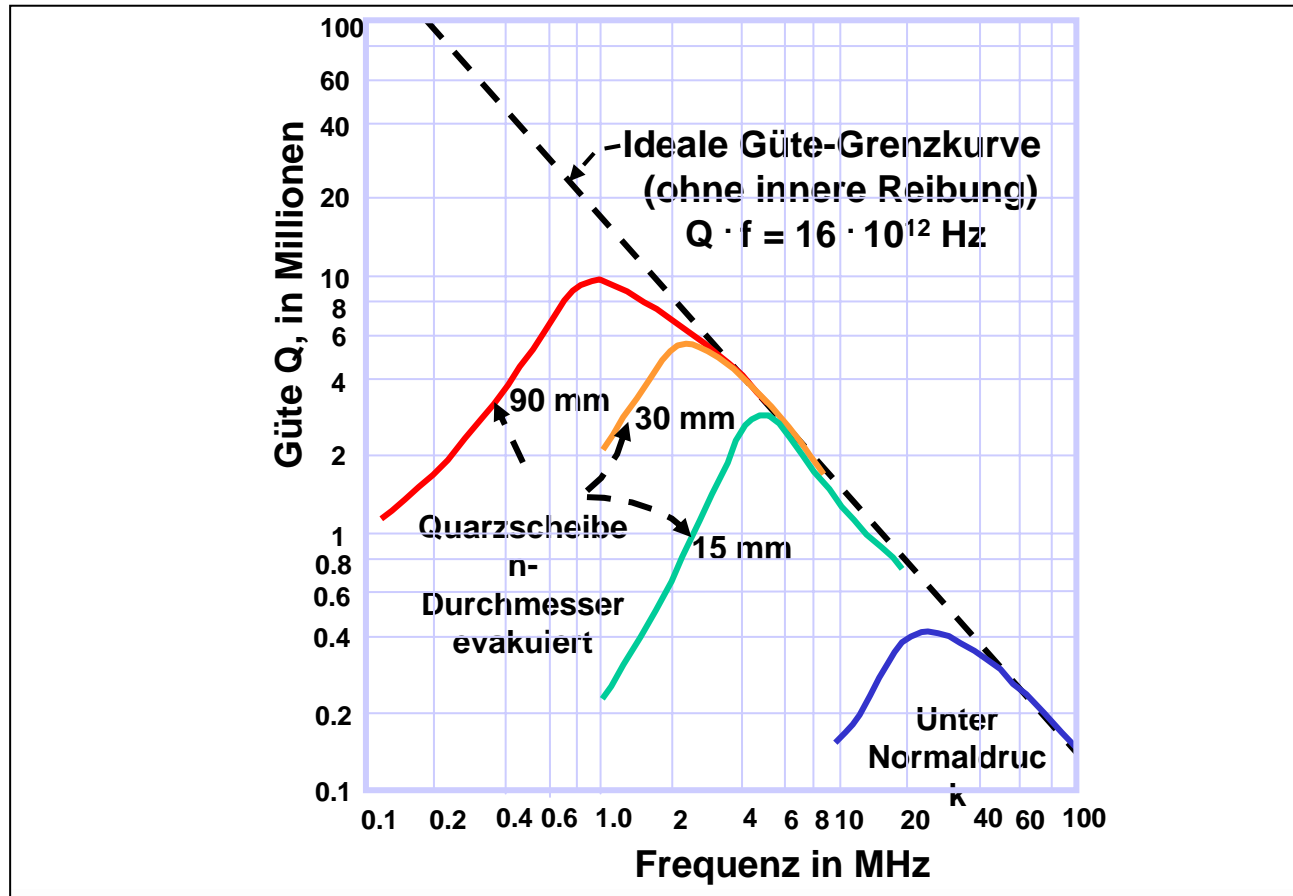
# SAW Resonatoren



# SAW Resonatoren

- ✘ Frequenzbereich ab 100 MHz bis  $> 1$  GHz
- ✘ Güte im Bereich  $n \cdot 1000$
- ✘ Temperaturstabilität im Bereich  $n \cdot 100$  ppm
- ✘ Abgleichgenauigkeit ca.  $\pm 100 \dots \pm 300$  ppm
- ✘ Ziehfähigkeit im Bereich  $n \cdot 100$  ppm

# Stabilitätsfaktor Quarzgüte (BAW)



# Stabilitätsfaktor Quarzgüte

- ✘ Höhere Güte bei größerer Quarzscheibe
- ✘ Höhere Güte bei niedriger Frequenz  
Charakteristische Größe:  $Q \cdot f$ ,  
liegt im Bereich  $n \cdot 10^{12}$  Hz ( $n = 1 \sim 16$ )
- ✘ Oberton-Quarze haben höhere Güte als Grundwellenquarze
- ✘ SC-Quarze haben etwas höhere Güte als AT

# Phasenrauschen- Einflussfaktoren

## ✘ Theorie: Leeson-Formel:

$$L(f) = \left( \alpha_R f_0^4 + \alpha_E \frac{f_0^2}{4Q_{\text{eff}}^2} \right) \cdot \frac{1}{f^3} + \left( 2\alpha_R Q_{\text{eff}} f_0^3 + 2 \frac{GFkT}{P_0} \frac{f_0^2}{4Q_{\text{eff}}^2} \right) \cdot \frac{1}{f^2} + \frac{\alpha_E}{f} + 2 \frac{GFkT}{P_0}$$

$\alpha_R$  ... Funkelrauschen des Quarzes

$$\approx 2 \cdot 10^{-39} \text{ rad}^2/\text{Hz}^2$$

$\alpha_E$  ... Funkelrauschen des Verstärkers

$$\approx 6 \cdot 10^{-14} \text{ rad}^2$$

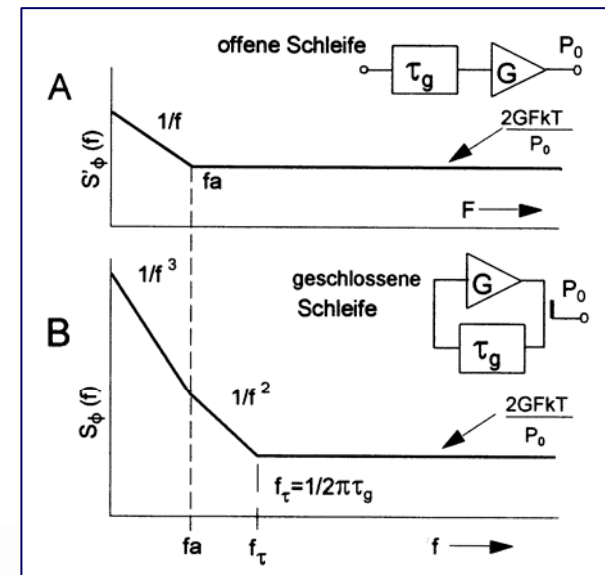
$Q_{\text{eff}}$  ... Betriebsgüte des Resonators

$G$  ... Verstärkung

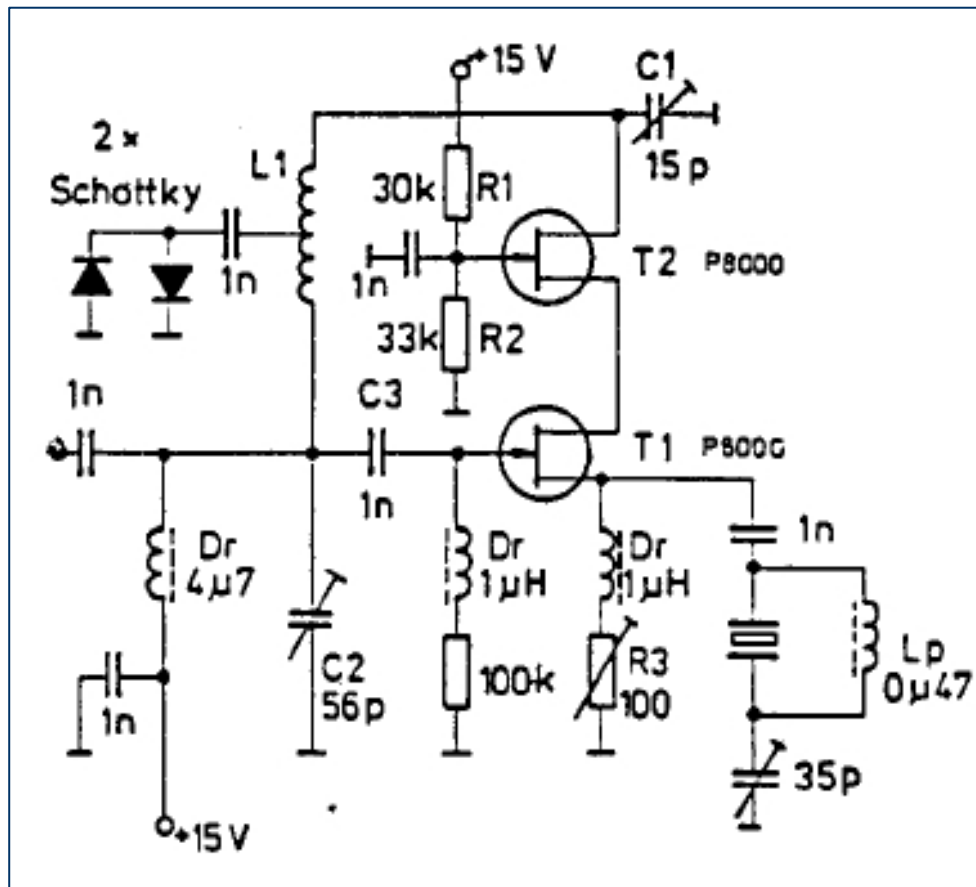
$F$  ... Rauschfaktor

$kT$  ... Boltzmann-Konstante, Temperatur in K

$P_0$  ... Ausgangsleistung



# Rauscharme Oszillatorschaltung

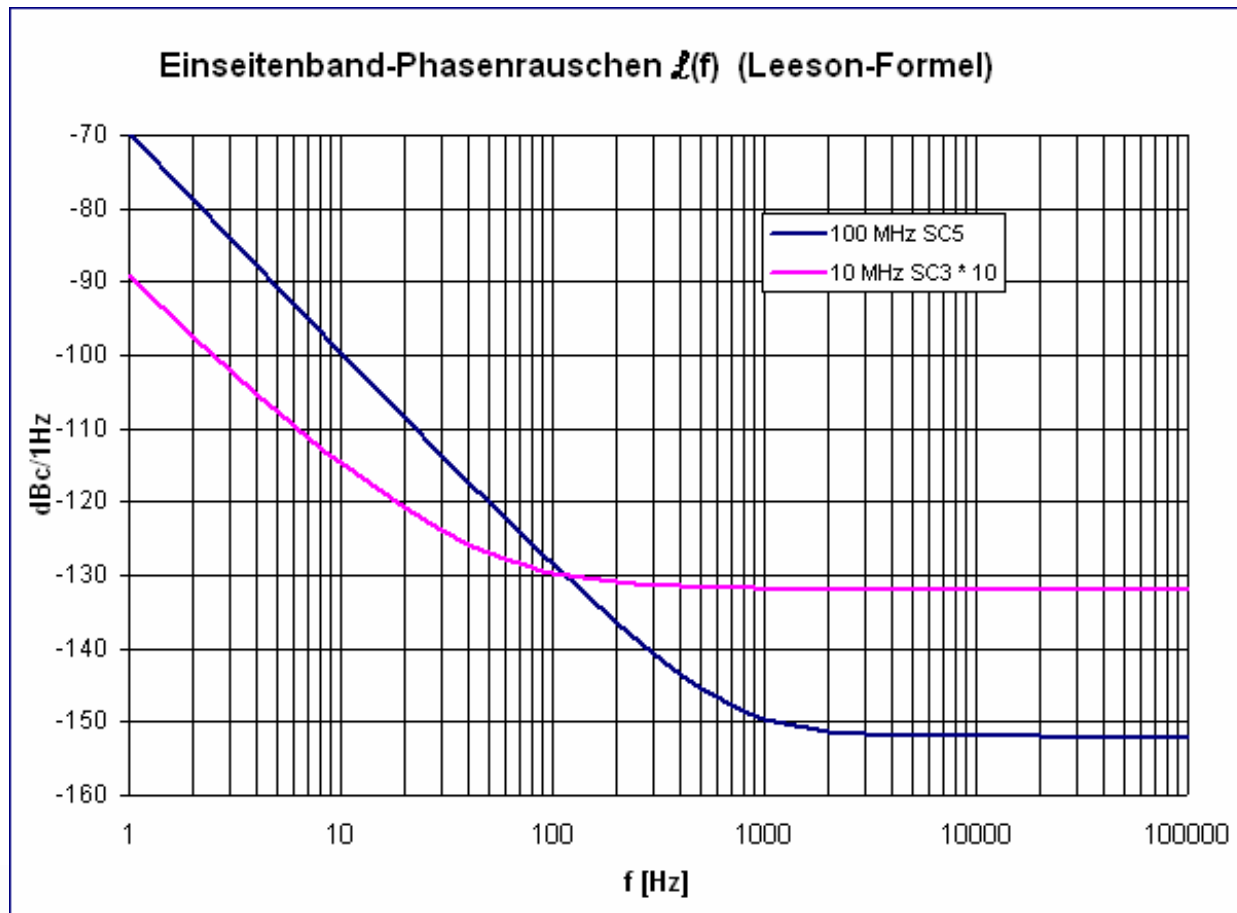


Aus: Bernd Neubig: Entwurf von hochstabilen Quarzoszillatoren; Vortrag 13. GHz-Tagung Dorsten 10.2.1990

# Optimale Quarzfrequenz für Mikrowellenanwendung ?

- ✘ Höhere Frequenz = geringe Subharmonics (Vervielfachung) bzw. Anharmonics (PLL)
- ✘ Höhere Frequenz = geringere Quarzgüte
  - 10 MHz SC3:  $Q = 1.5 \text{ Mio}$
  - 100 MHz SC5:  $Q = 150\,000$
  - $Q \cdot f = 15 \cdot 10^{12} = \text{const.}$
- ✘ Phasenrauschen
  - 100 MHz-Quarz: wegen geringer Güte und größerer Absolutbandbreite trägernah schlechter
  - 10 MHz-Quarz: bei Vervielfachung um  $20 \cdot \log_{10}(10) = 20 \text{ dB}$  weitab schlechter

# Vergleich 10 MHz \* 10 vs. 100 MHz



# Optimale Quarzfrequenz für Mikrowellenanwendung ?

- ✘ Ziehfähigkeit reduziert sich mit dem Quadrat des Obertons
  - Problem Sollfrequenzabgleich bei höherer Frequenz
  - kaum Reserve für Alterungsabgleich
- ✘ Oberton SC - Quarze bei 100 MHz teurer, Oberton AT- Quarzen sind deutlich günstiger
- ✘ Optimale Quarzfrequenz bestimmt sich aus den Anforderungen an Phasenrauschen und Kosten

# Quelle: Vor- und Nachteile

Methode	Vorteile	Nachteile
Höherfrequente Obertonquarze	Höhere Quarzgüte als GW, weniger Subharmonics	Geringere Ziehfähigkeit
SC- Quarze	Hohe Güte, niedriger TK, geringeres Phasenrauschen	Kosten, Ziehfähigkeit, komplexere Schaltung
HFF- Quarze	Weniger Subharmonics, einfache Oszillatorschaltung	Geringe Güte, stärkere Alterung, „krumme“ Frequenzen
SAW-Resonatoren	Hohe Ausgangsfrequenz, niedriges Weitab-Phasenrauschen	Geringere Güte, geringe Temperaturstabilität, „krumme“ Frequenzen

# OCXO / TCXO

## ✘ Mögliche Quellen:

### ■ Quarze:

- ◆ Hochfrequente Grundwellen- oder Obertonquarze
- ◆ AT- Quarze oder SC-Quarze
- ◆ HFF- Quarze
- ◆ SAW- Resonatoren

### ■ OCXO oder TCXO

- ◆ im Bereich 5 MHz ~ 30 MHz
- ◆ Im Bereich um 100 MHz

# Unerwünschte Eigenschaften

- ✘ TK-Diskontinuitäten (Dips)
- ✘ Frequenzhysterese
- ✘ Alterung

# TK-Diskontinuitäten (Dips)

✘ Sprungartige Frequenzänderungen, i.d.R. verbunden mit Widerstands- Einbrüchen in einem schmalen Temperaturbereich.

■ Ursachen (meist):

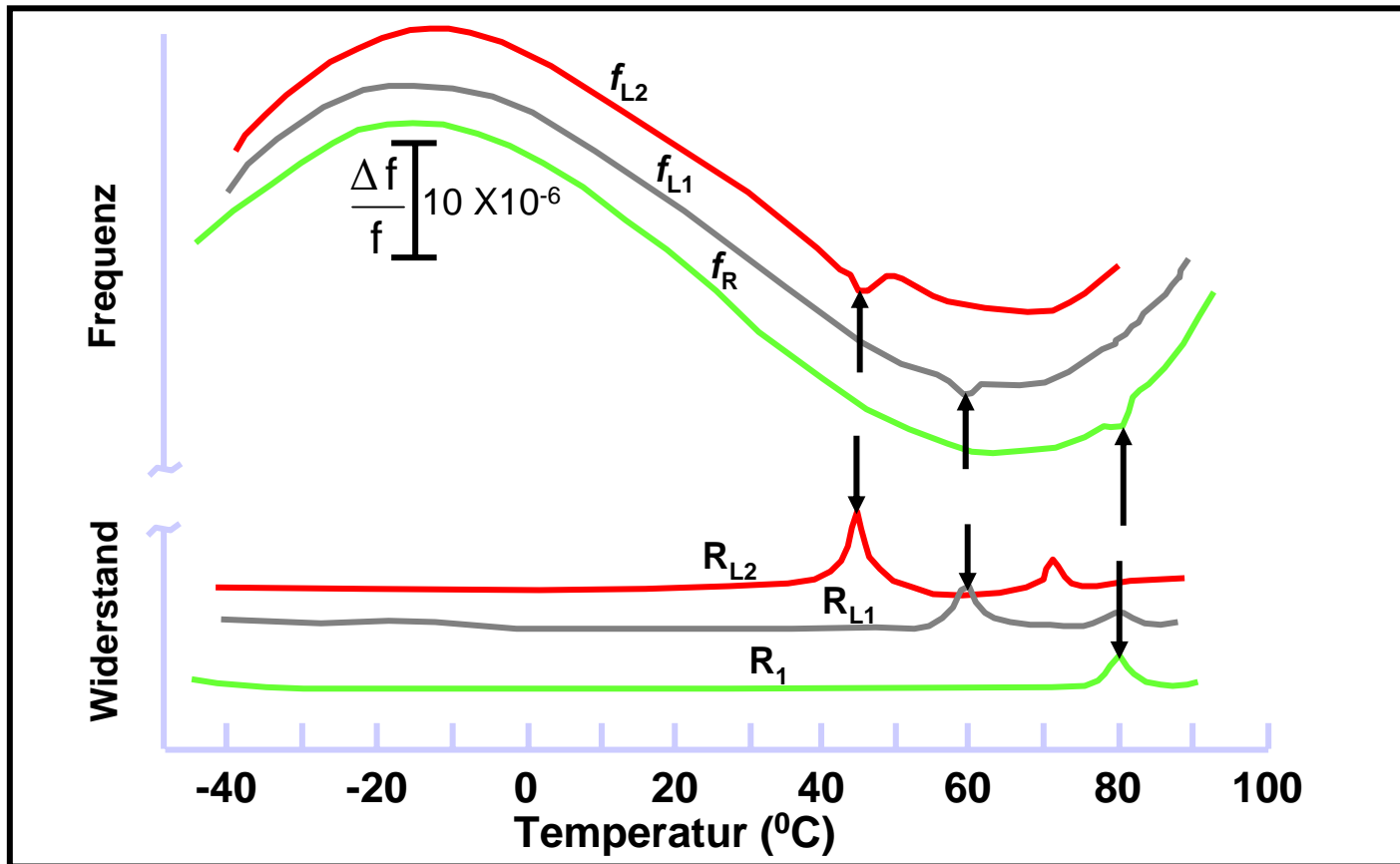
- Kopplung mit Störresonanzen, d.h. Obertöne anderer Schwingungsformen \*

■ Miniatur- (SMD-) Quarze sind anfälliger gegen Dips als konventionelle „große“ Quarze

---

\* Temperaturlage hängt von der Lastkapazität ab. Effekt kann durch Absenken des Quarzstroms reduziert werden

# TK-Dips



# Frequenzhysterese

✘ Differenz im Temperaturgang der Frequenz beim Aufheizen und Abkühlen.

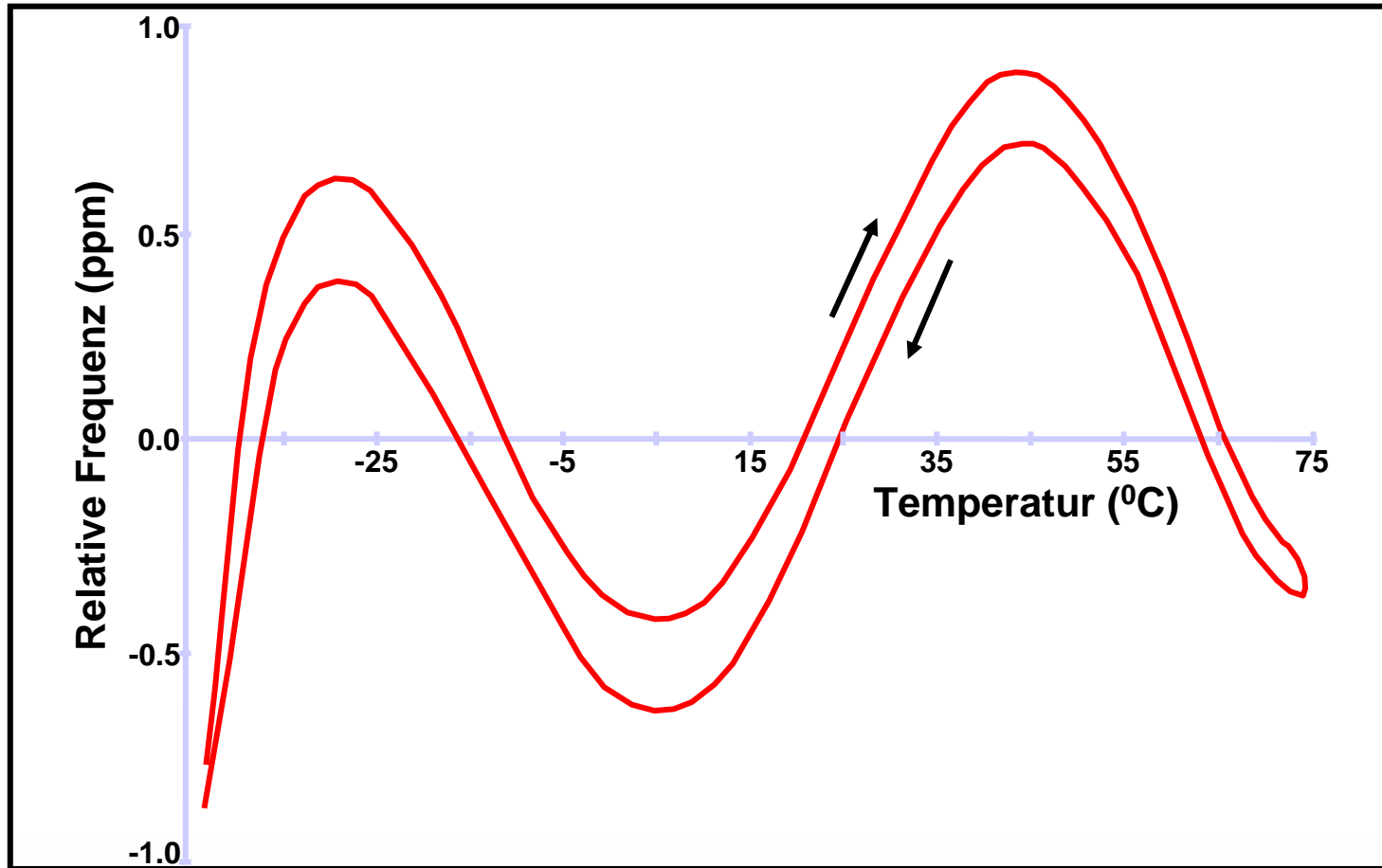
- Hysterese des Resonators

Ursachen: Mechanische Spannungen in der Resonatoraufhängung, den Klebestellen, den Elektroden.

Thermisches „Überschwingen“ bei schnellen Temperaturänderungen

- Hysterese und Dips begrenzen in der Praxis die mögliche Temperaturkompensation (TCXO)

# Hysteresis (TCXO)



# Alterung

## ✘ Einflussgrößen auf die Quarzalterung

### ■ Herstellungsprozess

- ◆ Viele Einflussparameter ...

### ■ Gehäusetechnologie

- ◆ Nach Alterung geordnet (von schlecht nach gut):  
Glasfritte, Lötverschluss, Epoxy-Kleverschluss, Stromverschweißen,  
Kaltverschweißen, Schmelzglasverschluss

### ■ Quarzbelastung

- ◆ Höhere Quarzbelastung erzeugt in der Regel eine höhere Alterungsrate.
- ◆ AT-Quarze benötigen eine niedrigere Belastung als SC-Quarze für gleiche Alterung

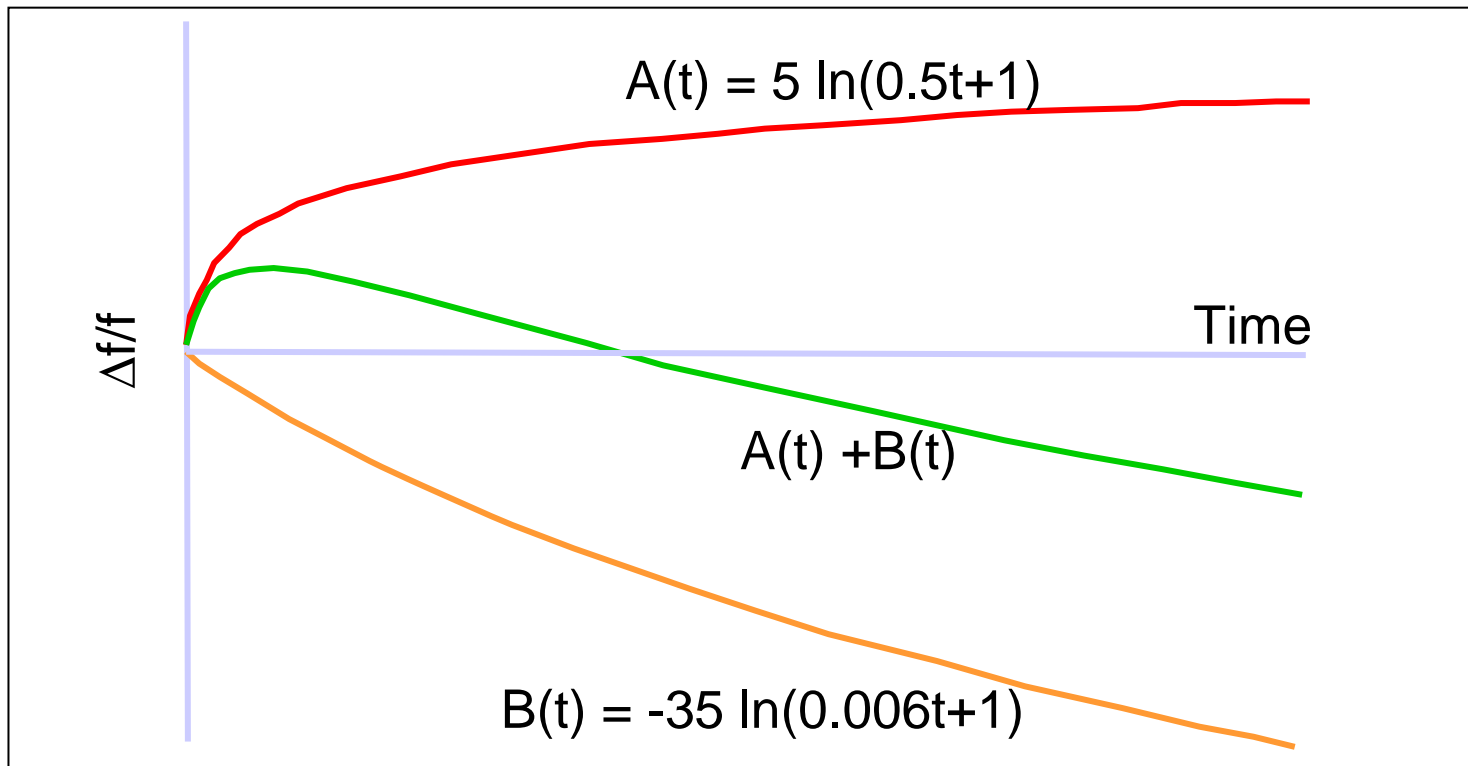
# Alterung

## ✘ Einflussgrößen auf die Quarzalterung

### ■ Umgebungsbedingungen

- ◆ Temperaturwechsel beschleunigen die Alterung stärker als stationäre Bedingungen
- ◆ Ein-/Ausschalten erzeugt Frequenzoffset (Re-trace)
- ◆ Mechanische Erschütterungen
- ◆ Einfluss von Oszillatorkomponenten
- ◆ Mit OCXO sind bessere Alterung als mit TCXO erzielbar
  - Konstantere Umgebungsbedingungen, keine Hysterese und Dips
  - Bei TCXO wird Ziehfähigkeit zur Temperaturkompensation benötigt, bei OCXO kann Quarz „steif“ (kleines  $C_1$ ) sein, damit weniger abhängig von Oszillatorkomponenten.
- ◆ Gute Quarze werden mit zunehmendem Alter besser!

# Alterung



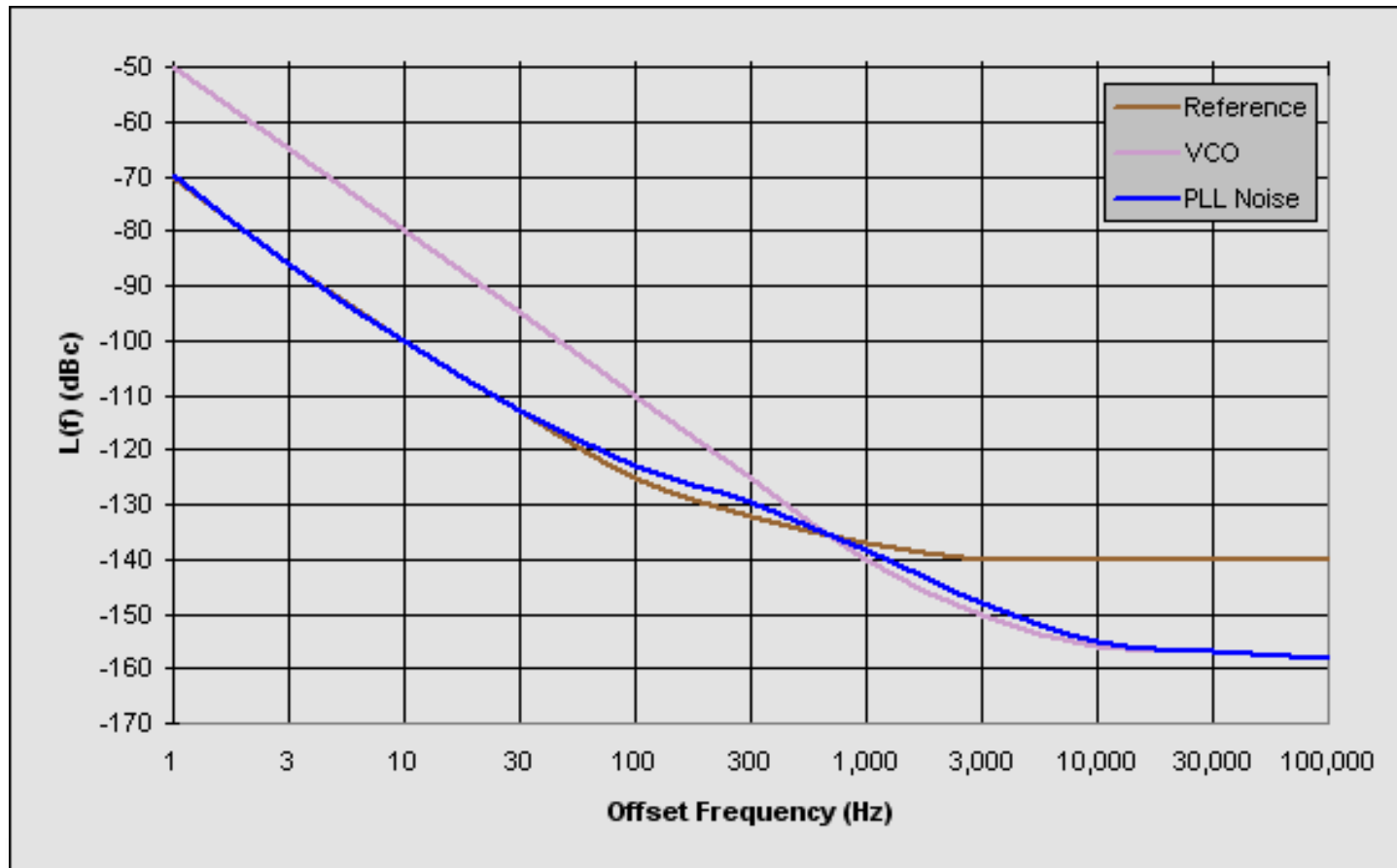
Die Alterungsmechanismen haben verschiedene Zeitkonstanten, Stärke und Vorzeichen. Überlagerung mehrerer Mechanismen kann zur Vorzeichenumkehr der Alterung führen

# Frequenzaufbereitung

## ✘ Mögliche Aufbereitung:

- Frequenzvervielfachung
- Injection Locking
- PLL-Anbindung OCXO oder TCXO an VCO
  - ◆ VCO mit Stripline,
  - ◆ Koax-Resonator,
  - ◆ Dielektr. Res,
  - ◆ SAWR

# Phasenrauschen einer PLL



# Aufbereitung: Vor- und Nachteile

Methoden	Vorteile	Nachteile
Frequenzvervielfachung	Quarzpreis, gutes träger-nahes Phasenrauschen	Schaltungskomplexität, Abgleichaufwand, schlechteres Weitabrauschen Stärkere Mikrofonie bei hohem Vervielfachungsfaktor
Injection Locking	Relativ einfache Schaltungsstruktur	Starke Subharmonics, schlechtes Phasenrauschen
Phase-Locked Loop (PLL)	Relativ einfache Realisierung, Standard-IC	Verschlechterung des Phasenrauschens („PLL-Knie“), starke Subharmonics relativ trägernah

# Zusammenfassung

- ✘ Höchste Frequenzstabilität wird durch OCXO mit SC-Quarzen erreicht, in den meisten Fällen ist eine Ausgangsfrequenz im Bereich um 100 MHz optimal
- ✘ Für geringstes Phasenrauschen ist eine Frequenzvervielfachung gegenüber einer PLL vorzuziehen. Durch optimales Design der PLL lassen sich jedoch bei geringerem Bauteil- und Abgleichaufwand auch gute Phasenrauschwerte erzielen.