

Moderne Technologien bei Schwingquarzen und Quarzoszillatoren

Dipl. Phys. Dipl.-Ing. Bernd Neubig

Bernd Neubig
NACHRICHTENTECHNIK Ingenieurbüro
Buchfinkenweg 8 74931 Lobbach
BNeubig@t-online.de www.BNeubig.de



Inhalt

1. Einige Eigenschaften von Schwingquarze
2. Hochfrequente Grundwellenresonatoren mit Mesastruktur
3. Miniatur-Gehäusetecnologien für Schwingquarze
4. Präzissionsquarze mit kleinster Alterung
5. Übersicht über Quarzoszillatoren
6. Quarzoszillatoren im GHz-Bereich
7. Moderne Technologien für hochstabile Oszillatoren (OCXO)

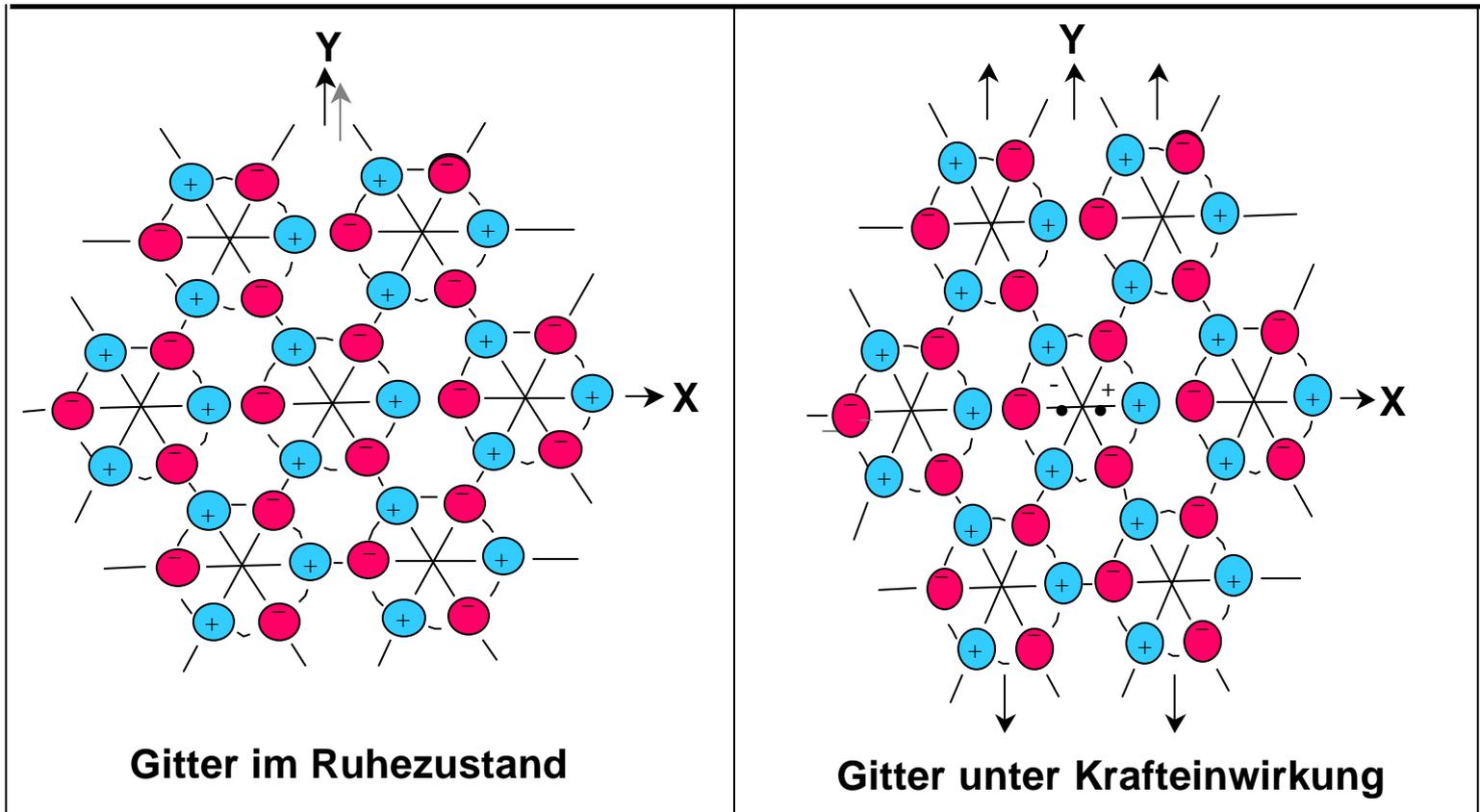
Historischer Abriss

- 1880 Entdeckung des Piezoelektrischen Effekts durch Jacques und Pierre Curie
- 1918 Erste Anwendung von Schwingquarzen in einem Oszillator
- 1926 Erste Anwendung von Schwingquarzen in Rundfunksendern
- 1927 Erste Quarzuhr
- 1934 Entwicklung des AT-Schnitts
- 1956 Erste kommerzielle synthetische Züchtung von Quarzkristallen
- 1972 Miniatur-Stimmgabelquarz für moderne Quarzuhren entwickelt
- 1974-76 Entwicklung des SC-Schnitts
-
- 2000 Markt für “Frequency Control Products” ca. 2.3 Mrd US-\$, davon 1.1 Mrd \$ in Telekommunikation (500 Mrd\$ Wert)

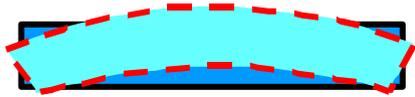
Warum sind Quarze immer noch aktuell ?

- Schwinggüte von $n \cdot 100.000$ bis 3 Millionen
Spulen: $n \cdot 10 \dots 100$, Keramik: $n \cdot 100 \dots 1000$
- Frequenzstabilität von x ppm (10^{-6}), unter kontrollierten Bedingungen bis $n \cdot 0,1$ ppb (10^{-9})
 10^{-10} entspricht $\frac{1}{4}$ sec eines Menschenlebens
- Rauschen im Bereich von -170 dBc
 -170 dB = 10^{-17} entspricht $0,5$ nm / Erdumfang
- Materialkosten vernachlässigbar (SiO_2 gibt's wie Sand am Meer ...)
- Industrielle Technik auf hohem Niveau (Otto-Motor-Effekt)
- Quarze sind dadurch unschlagbar kostengünstig
Preise ab $0,10$ US-\$

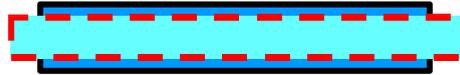
Der Piezoelektrische Effekt



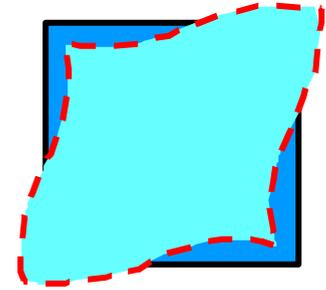
Schwingungsformen



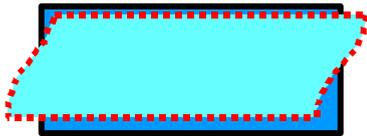
Biegeschwingung



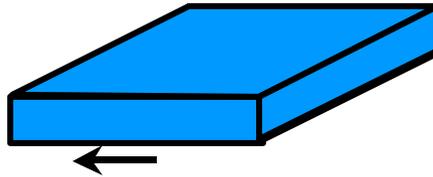
Längsdehnung



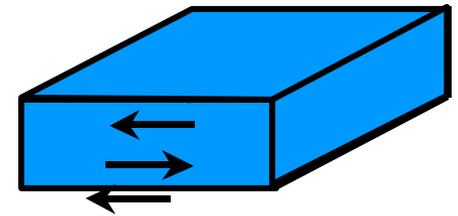
Flächenscherung



Dickenscher-
schwingung

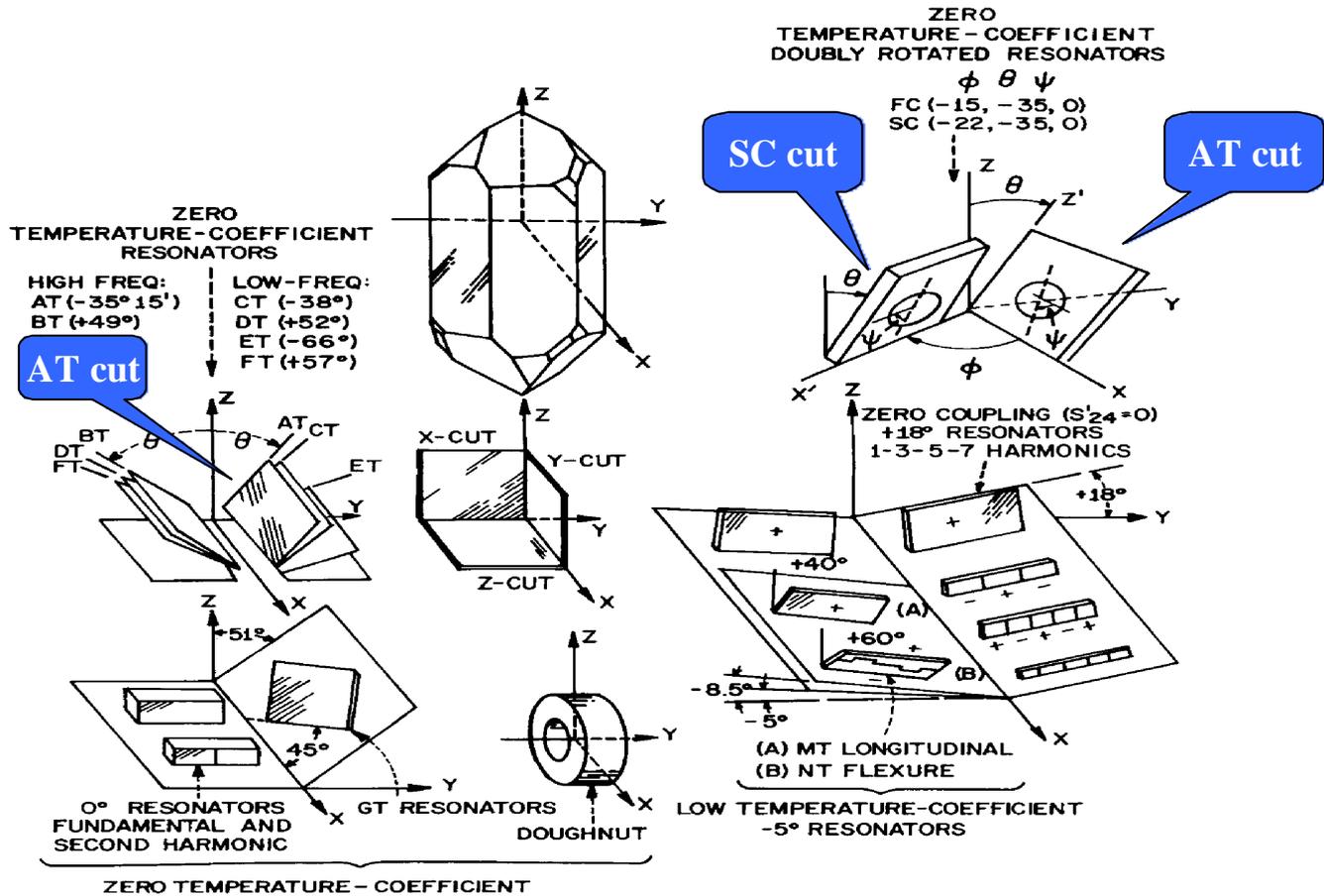


DS Grundwelle



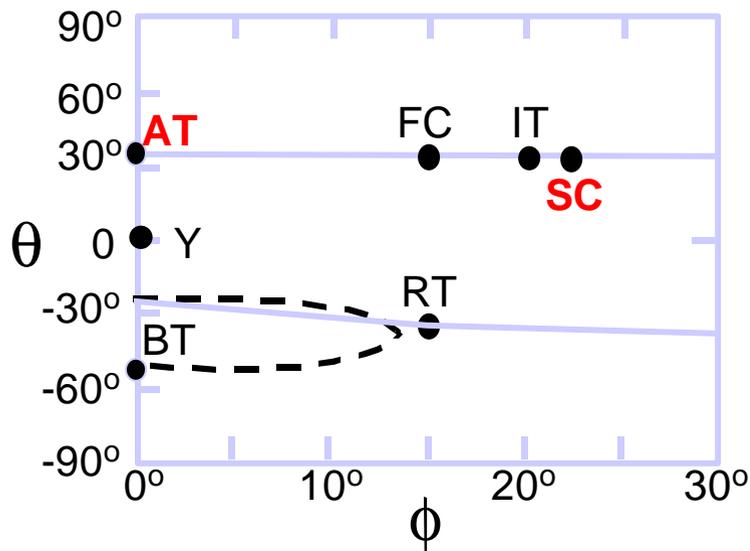
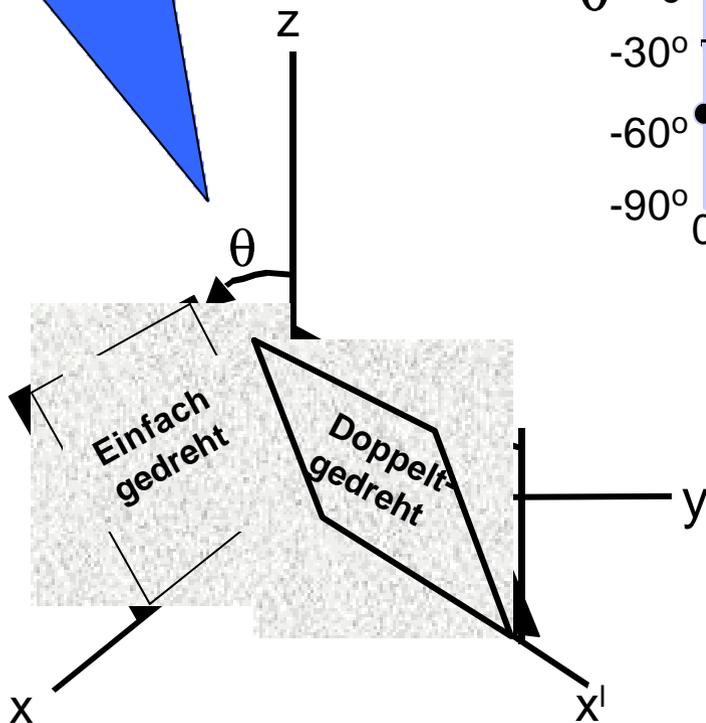
DS 3. Oberton

Quarzschnitte



Quarzschnitte mit TK = Null (Dickenscherung)

Erforderliche
Schnittgenauigkeit: **DQ=15''**
DF=10'

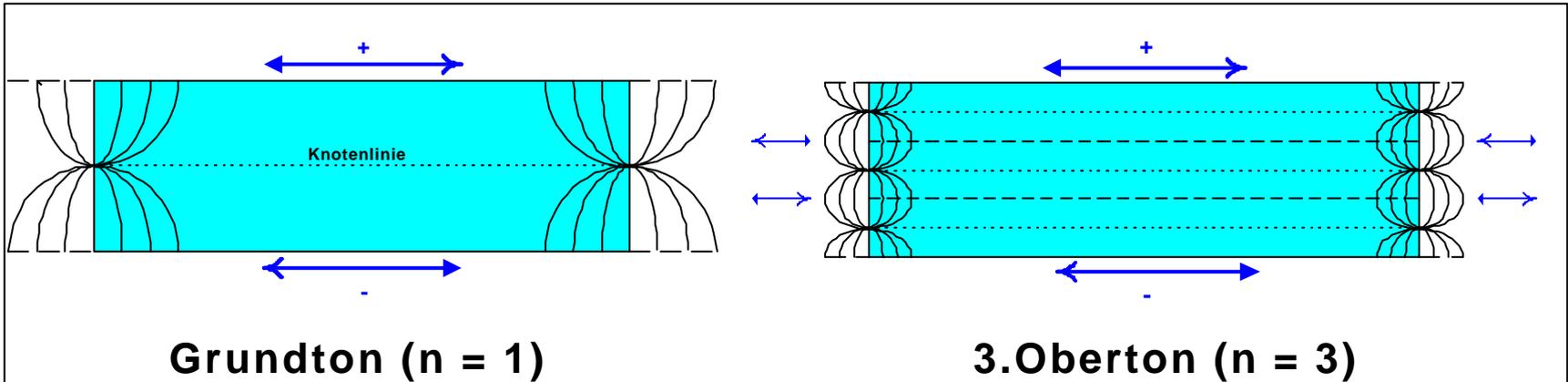


$\theta \approx 35^\circ$: AT-Schnitt: 0 ppm/K bei $\approx 25^\circ\text{C}$

SC-Schnitt: 0 ppm/K bei $\approx 95^\circ\text{C}$

$\theta = 0^\circ$: Y-Schnitt $\approx +90$ ppm/K

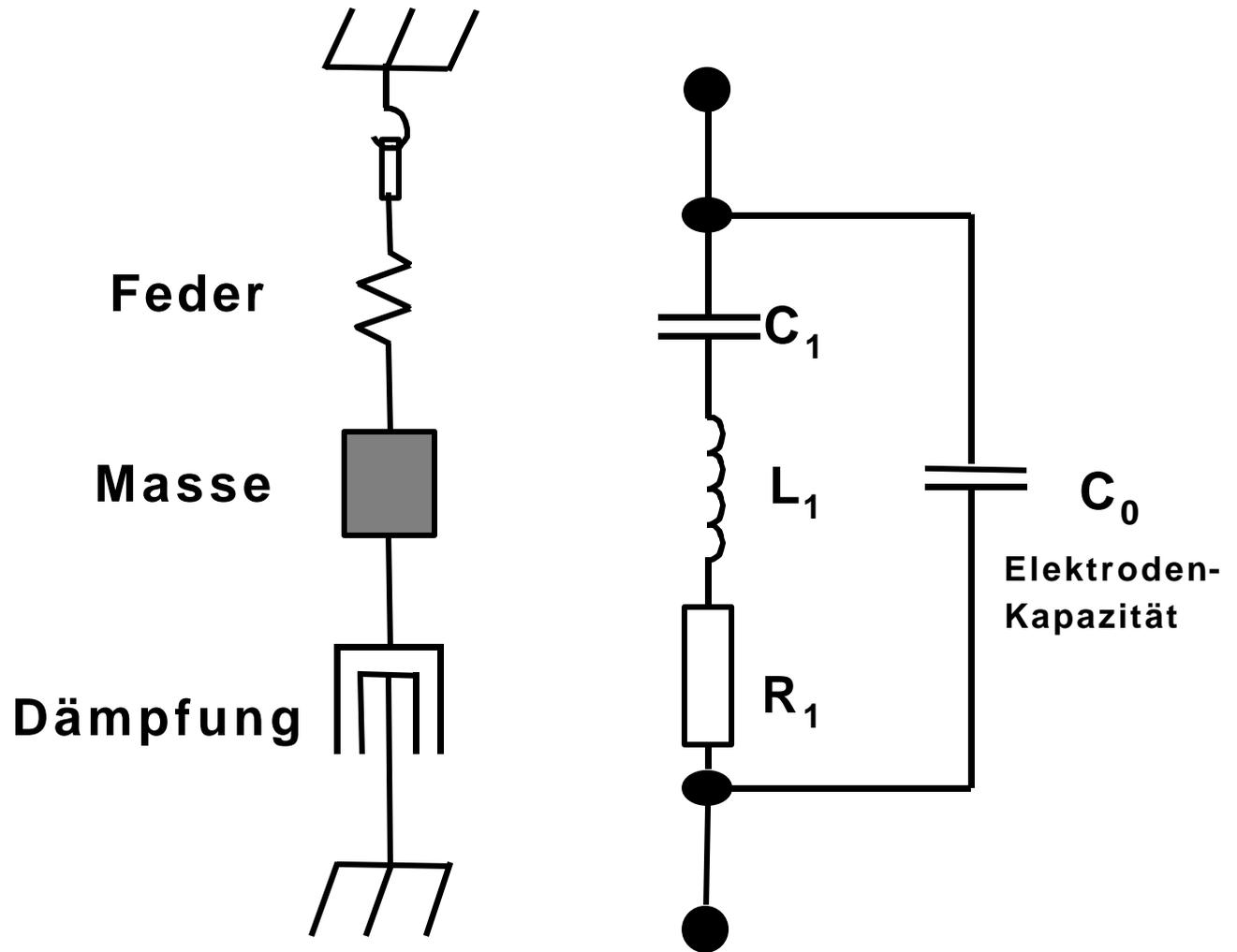
Dickenscherungsschwingung



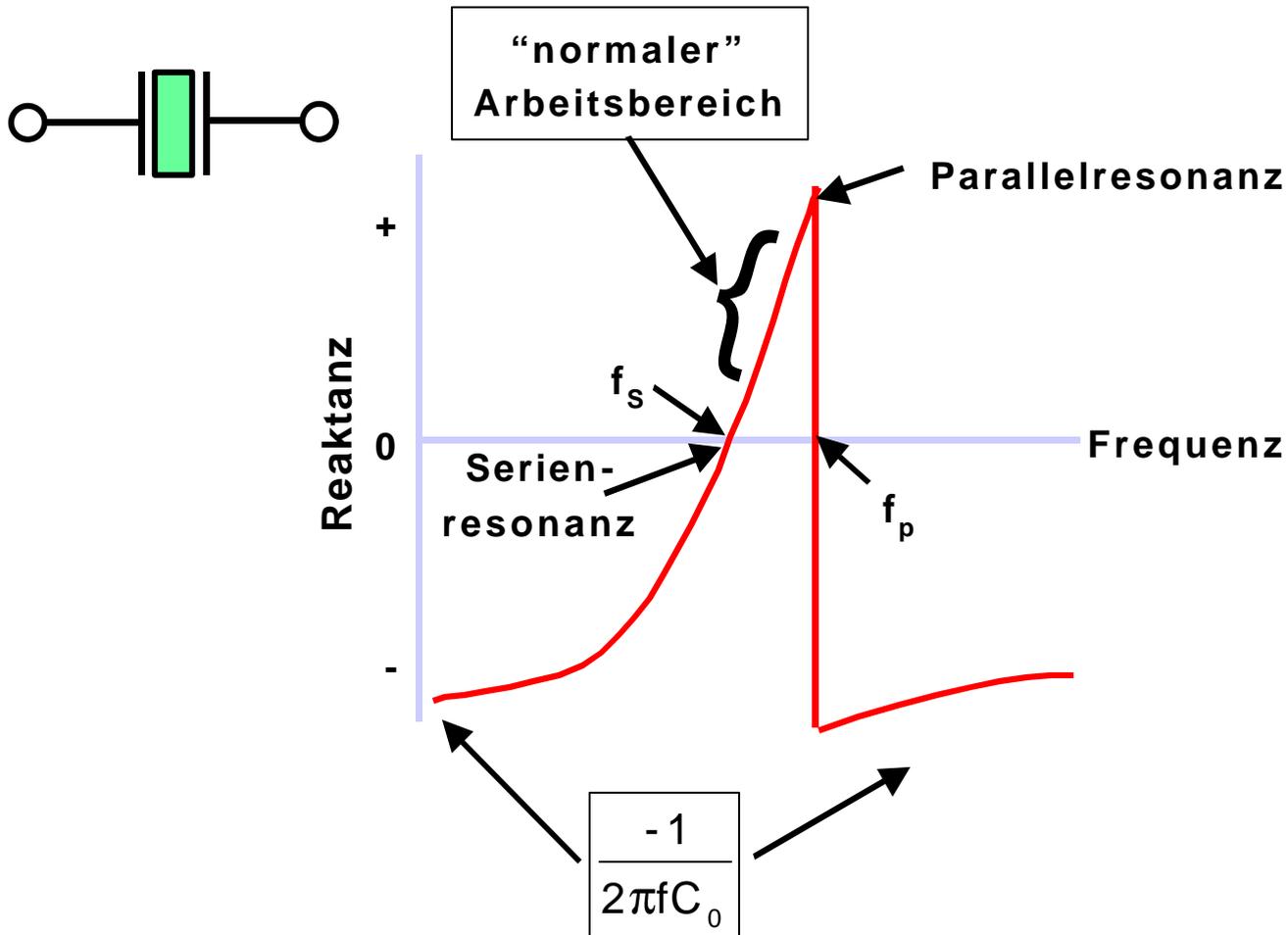
$$f_n = \frac{n}{2h} \sqrt{\frac{c_{ij}}{\tilde{n}}}, \quad n = 1, 3, 5 \dots$$

mit f_n = Resonanzfrequenz des n-ten Obertons
 h = Scheibendicke
 ρ = Dichte
 c_{ij} = E-Modul der elastischen Welle

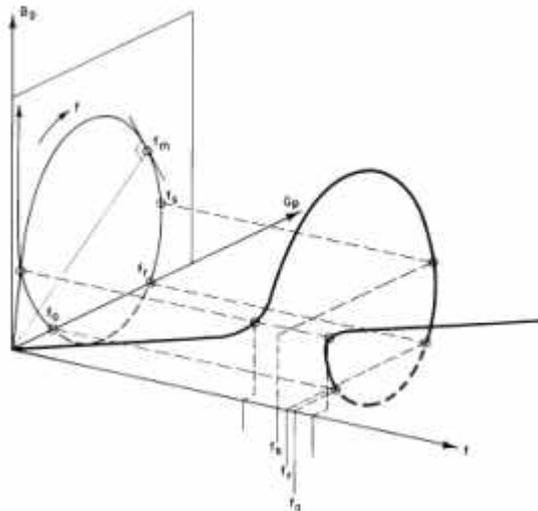
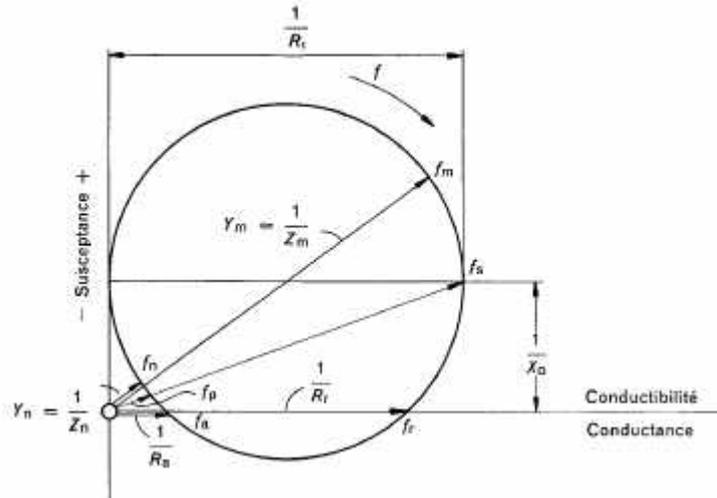
Ersatzschaltbild



Blindwiderstand bei Resonanz



Ortskurve des Scheinleitwerts



Charakteristische Frequenzen :

- ◆ Serienresonanzfrequenz f_s
- ◆ Resonanzfrequenz f_r
- ◆ Minimalimpedanz-/
Maximaladmittanzfrequenz f_m
- ◆ Parallelresonanzfrequenz f_p
- ◆ Antiresonanzfrequenz f_a
- ◆ Maximalimpedanz-/
Minimaladmittanzfrequenz f_n

Temperaturgang der Dickenschwingschwingung

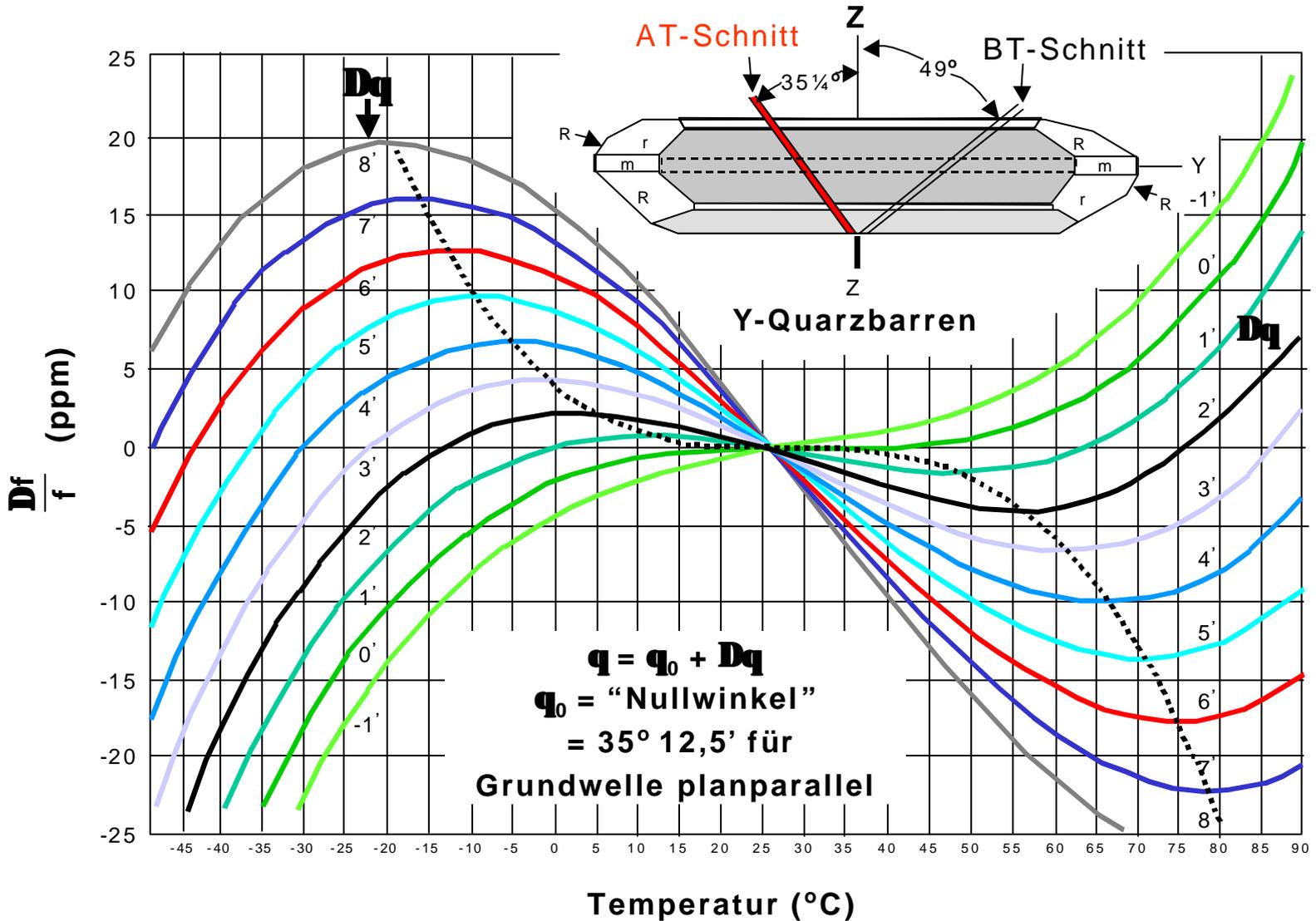
$$TK_f = \frac{d(\log f_n)}{dT} = \frac{1}{f_n} \frac{df_n}{dT} = \frac{-1}{h} \frac{dh}{dT} - \frac{1}{2\rho} \frac{d\rho}{dT} + \frac{1}{2c_{ij}} \frac{dc_{ij}}{dT}$$

TK_f = linearer Temperaturkoeffizient der Resonanzfrequenz.
Der thermische Ausdehnungskoeffizient ist +7.8 ppm/K in Z-Richtung
und +14.3 ppm/K rechtwinklig zur z-Achse.
Der TK der Dichte ρ ist daher -36.4 ppm/K.

Der TK von c_{ij} ist bei den meisten Materialien negativ ("Federn werden bei steigender Temperatur weicher"), bei Quarz variiert er je nach Richtung: $-3300 \text{ ppm/K} < TK_{c_{ij}} < +164 \text{ ppm/K}$.

Für die "temperaturkompensierten" Schnitte werden die TK-Koeffizienten der ersten zwei Terme durch den dritten Term von TK_f ausgeglichen (kompensiert).

Frequenz-Temperatur-Kurven AT-Schnitt



Temperaturgang der Frequenz

Kurvenschar wird beschrieben durch:

$$\frac{\Delta f}{f} = a_0 + a_1 \cdot (T - T_{\text{inv}}) + a_2 \cdot (T - T_{\text{inv}})^2 + a_3 \cdot (T - T_{\text{inv}})^3$$

mit: T_{inv} = Inversionstemperatur (Wendepunkt)

= 25°C ... 35°C (AT-Schnitt)

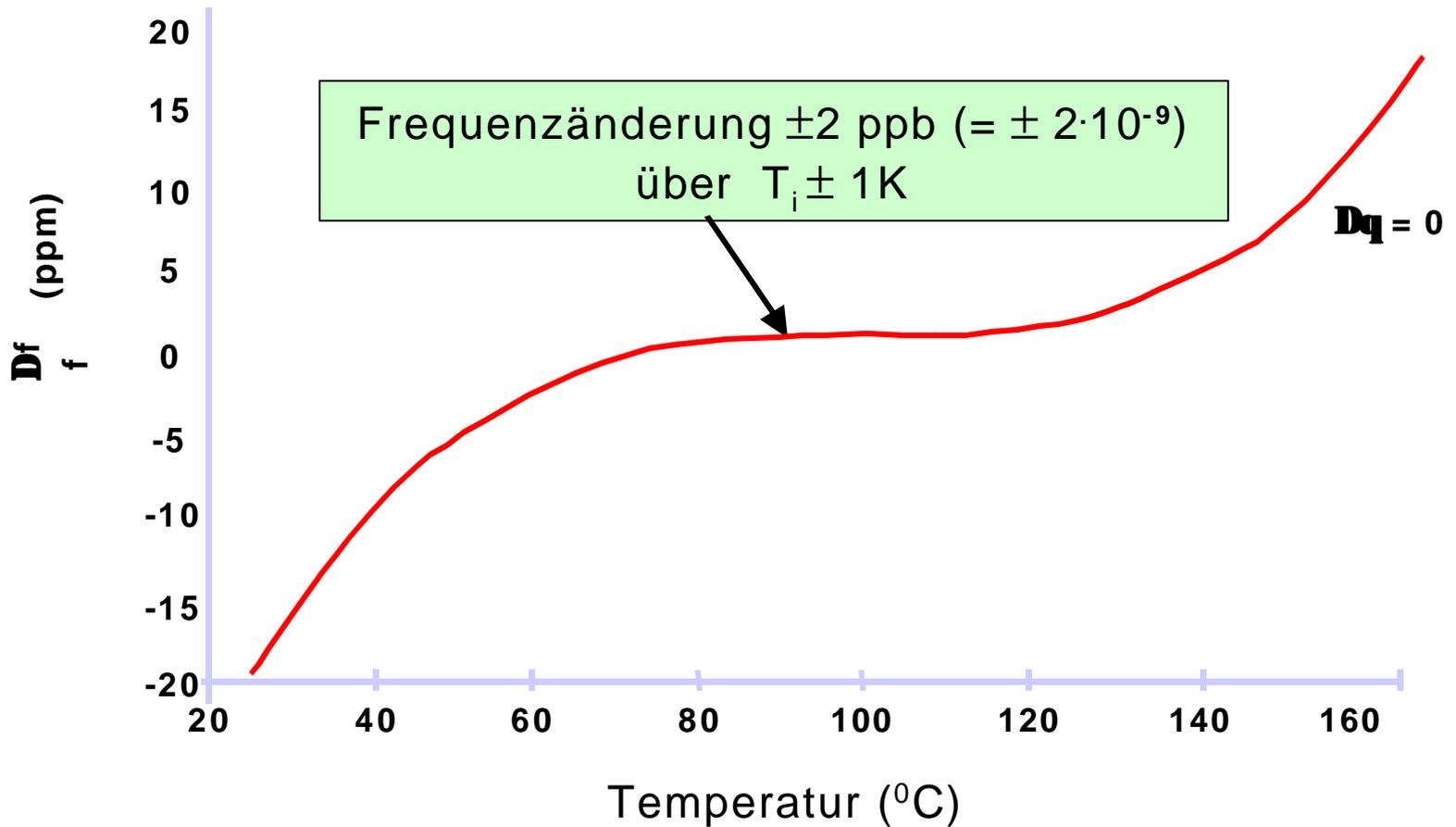
95°C (SC – Schnitt)

$$a_1 = a_1^0 + a_1^1 \cdot \ddot{\theta}$$

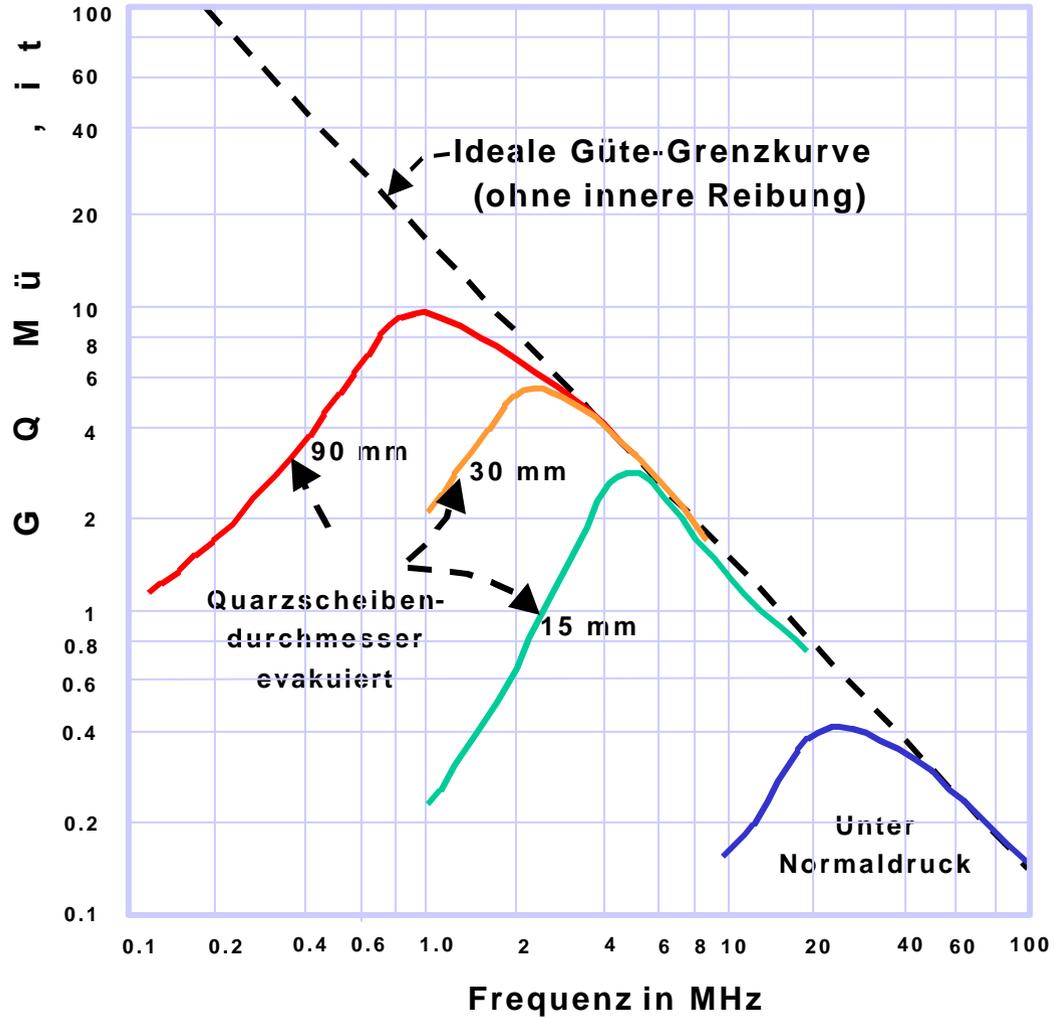
$\ddot{\theta} = \theta - \theta_0$ Schnittwinkeldifferenz zum „Nullwinkel“ θ_0

a_2, a_3 const. (für geg. Schnittgruppe)

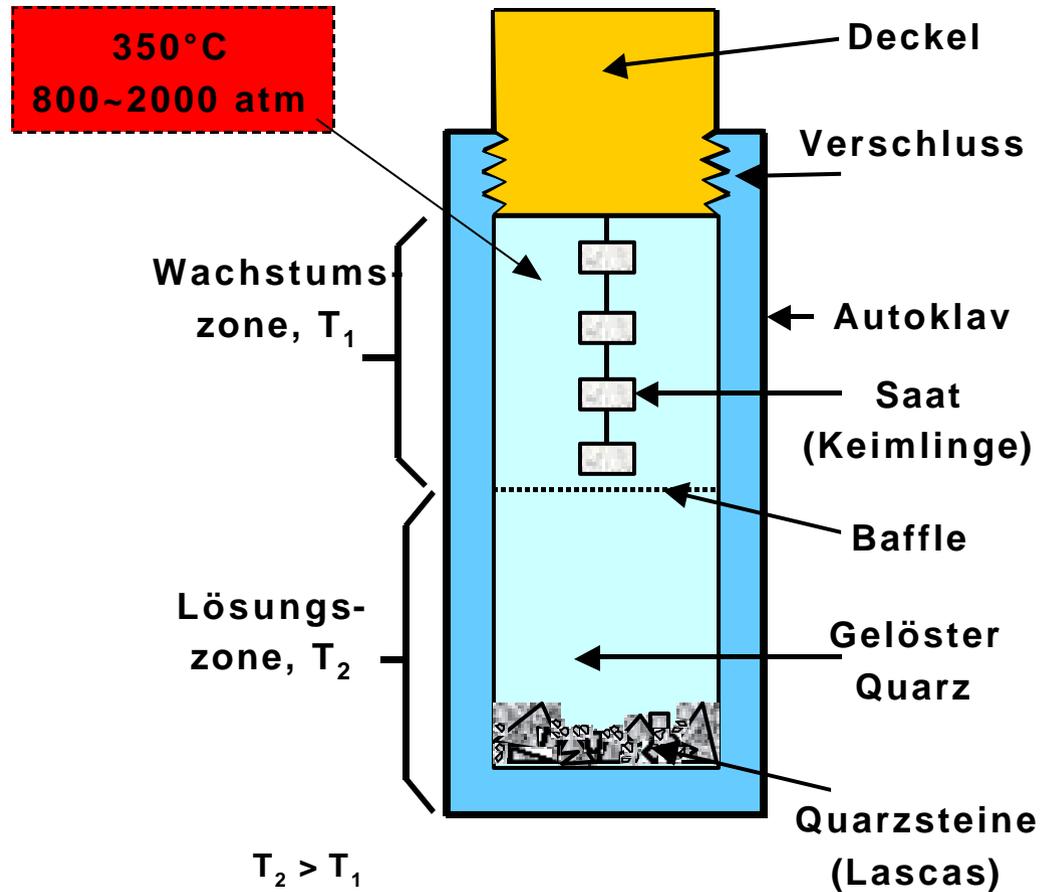
Frequenz-Temperatur-Kurve SC-Schnitt



Grenzen der Quarzgüte



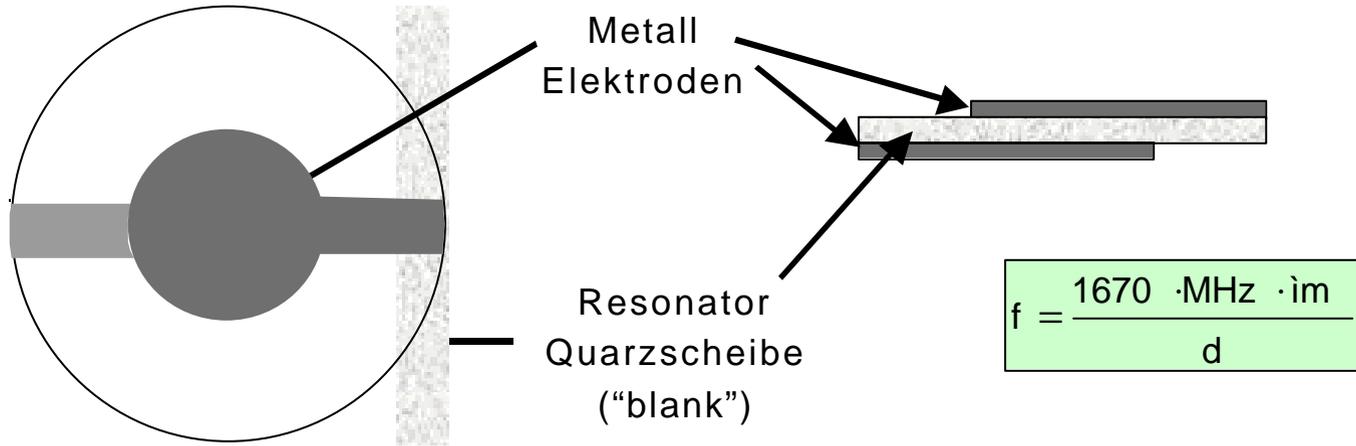
Hydrothermale Quarzzucht



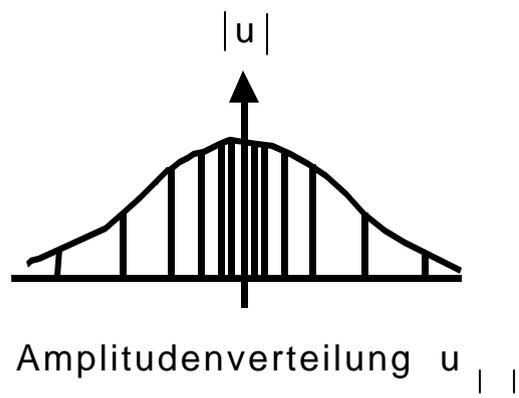
Inhalt

1. Einige Eigenschaften von Schwingquarze
2. Hochfrequente Grundwellenresonatoren mit Mesastruktur
3. Miniatur-Gehäusetechnologien für Schwingquarze
4. Präzissionsquarze mit kleinster Alterung
5. Übersicht über Quarzoszillatoren
6. Quarzoszillatoren im GHz-Bereich
7. Moderne Technologien für hochstabile Oszillatoren (OCXO)

Konventionelle Quarzscheibe



$$f = \frac{1670 \cdot \text{MHz} \cdot \text{im}}{d}$$

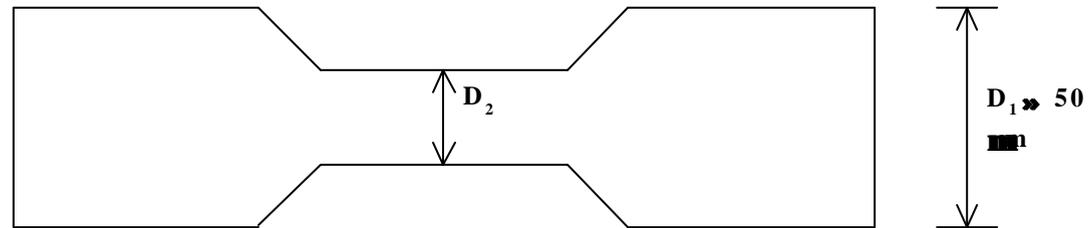


Hochfrequente Resonatoren (HFF) mit Inverted-Mesa-Struktur

Technologische Dickengrenze für mechanische Bearbeitung:

$$d = 30 \text{ mm} \quad \text{höchste Grundfrequenz } f = 55.7 \text{ MHz}$$

Tiefes Strukturätzen mit Inverted-Mesa-Technik:



Beispiel: 155.52 MHz (Optische Übertragungstechnik)

Endgenauigkeit der Resonatordicke:

$$\Delta D_1 = \pm 0,8 \text{ } \mu\text{m}$$

Endgenauigkeit der Frequenz :

$$\Delta f = \pm 10 \text{ ppm } (= 10^{-5})$$

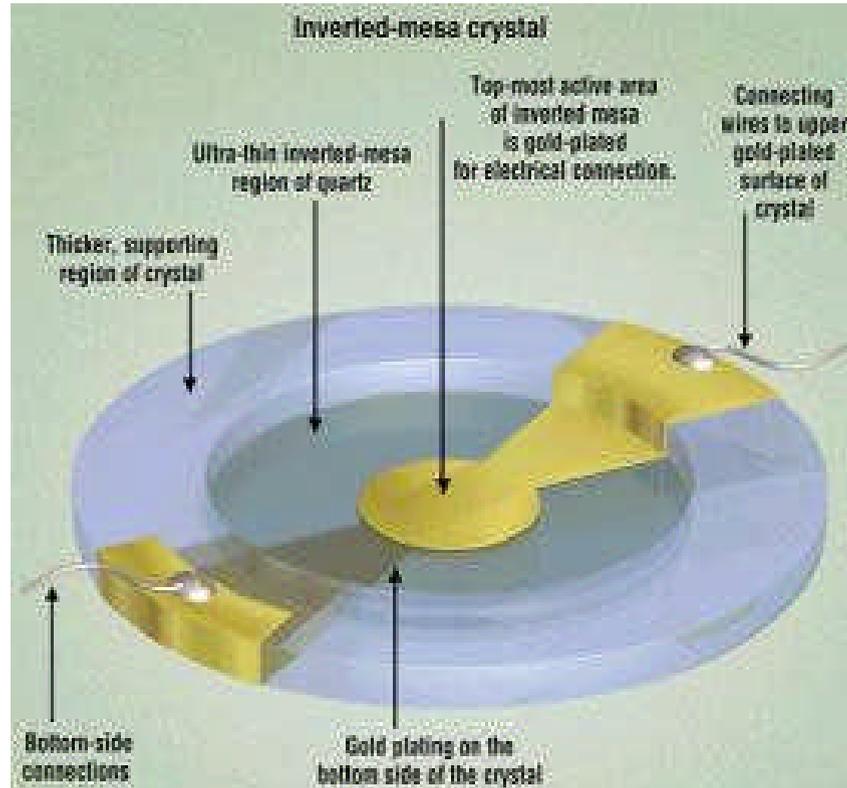
Toleranz der Elektrodendicke:

$$\Delta D_{E1} = \pm 0,05 \text{ nm}$$

Planparallelität der Resonatorfläche:

$$< 50 \text{ nm}$$

Resonator mit Inverted-Mesastruktur



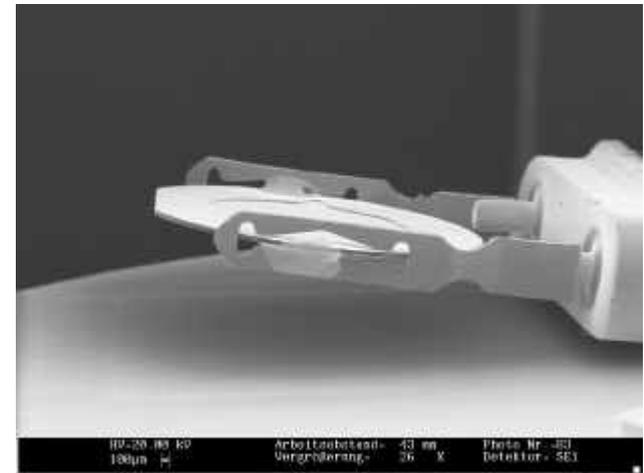
Fertigung von MESAstrukturen

- Quarzscheiben vollflächig Läppen und Ätzen bis auf ca. 50 µm Dicke
- Vakuum-Bedampfen einer Ringstruktur aus Chrom/Gold
- Tiefätzen der Inverted-Mesa- Fläche bis zu einer kontrollierten Restdicke

Mögliche Verfahren:

- konzentrierte Flusssäure (HF)
- kochende konzentrierte NaOH (180°C)
- spezielle „Lattice-etch“-Chemikalien
- Ionen- / Plasmaätzen (sehr langsam)

- Selektivätzen mit NH_4HF_2
- Strippen der Ätzmaske und Reinigung
- Vakuum-Bedampfen der Elektroden (Ag, Au oder Al)
- Montage auf Halter, Befestigung mit Silber-Leitkleber
- Feinabgleich durch Nachbedampfen (Ag, Au oder Dielektrika)
- Hermetischer Verschluss (Stromverschweißen)

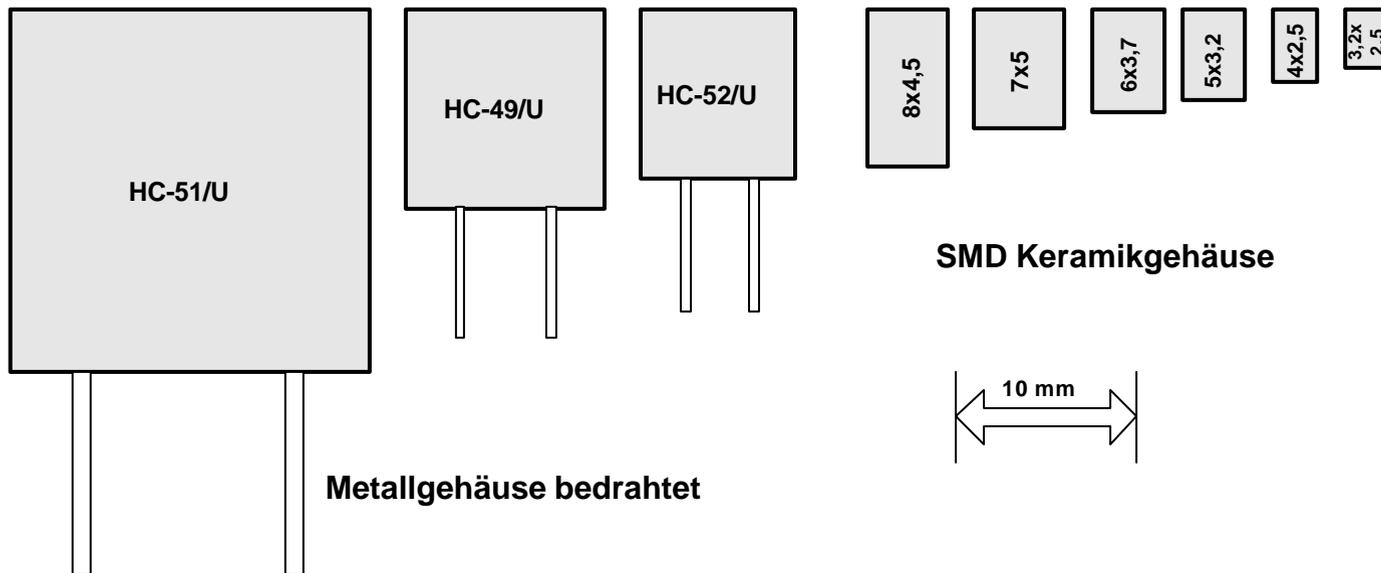


Inhalt

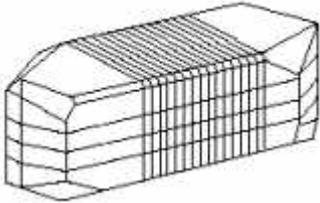
1. Einige Eigenschaften von Schwingquarze
2. Hochfrequente Grundwellenresonatoren mit Mesastruktur
3. **Miniatur-Gehäusetechnologien für Schwingquarze**
4. Präzissionsquarze mit kleinster Alterung
5. Übersicht über Quarzoszillatoren
6. Quarzoszillatoren im GHz-Bereich
7. Moderne Technologien für hochstabile Oszillatoren (OCXO)

Miniaturisierung

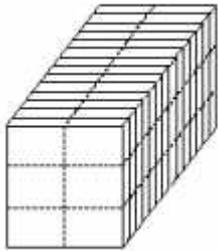
- Bedrahtete (THD) → SMD – Gehäuse
- Metallgehäuse mit runden Quarzscheiben ersetzt durch Keramikgehäuse mit Streifenresonatoren
- Nächste Generation: Chip-Size Packages (CSP)



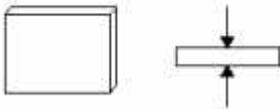
Fertigungszyklus I



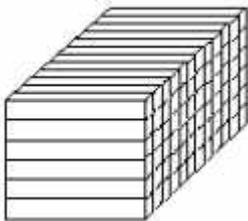
- Schneiden von Scheiben aus Quarzbarren mit Gattersäge oder Drahtsäge



- Schneiden und Lappen eines Waferblocks

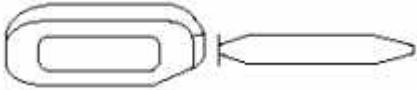


- Vor-und Feinlappen der Blanks auf definierte Dicke (Frequenz)

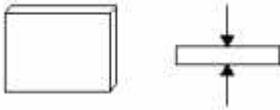


- Zusammenkitten der Blanks zu einem Block und Lappen der Außenmaße auf Nenngröße

Fertigungszyklus II



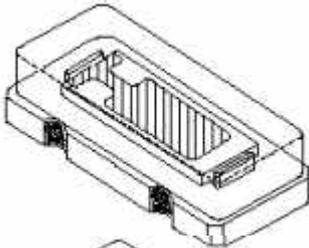
- Kanten facettieren (Frequenzen < 10 MHz)



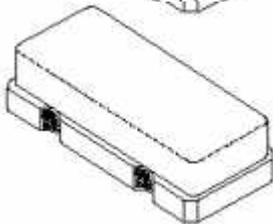
- Ätzen auf Blank-Endfrequenz zur Verbesserung der Oberflächenqualität



- Vakuum-Grundbedampfung der Ag-Elektroden

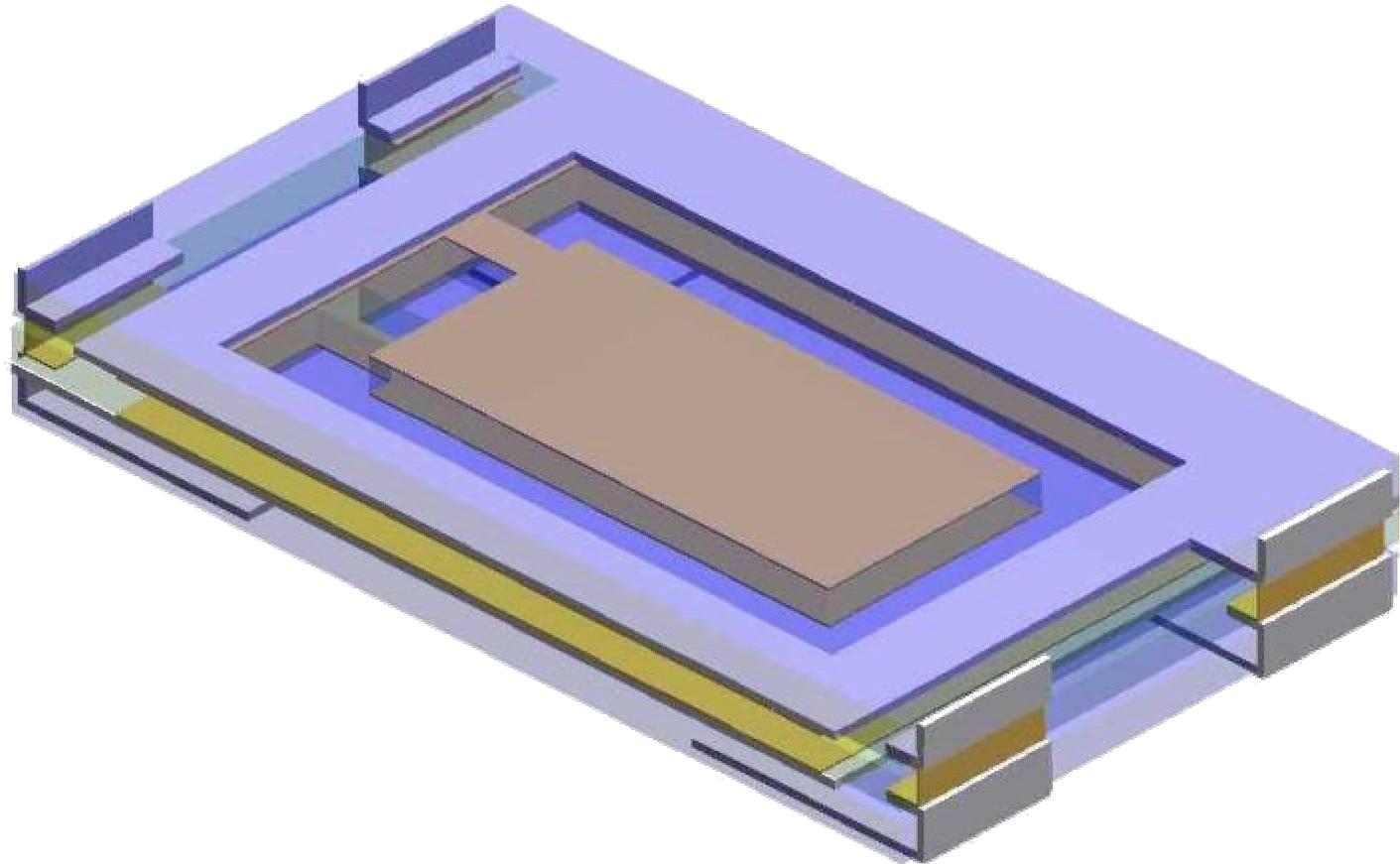


- Montage im Keramikgehäuse, Kitten und Feinabgleich (Nachbedampfen)

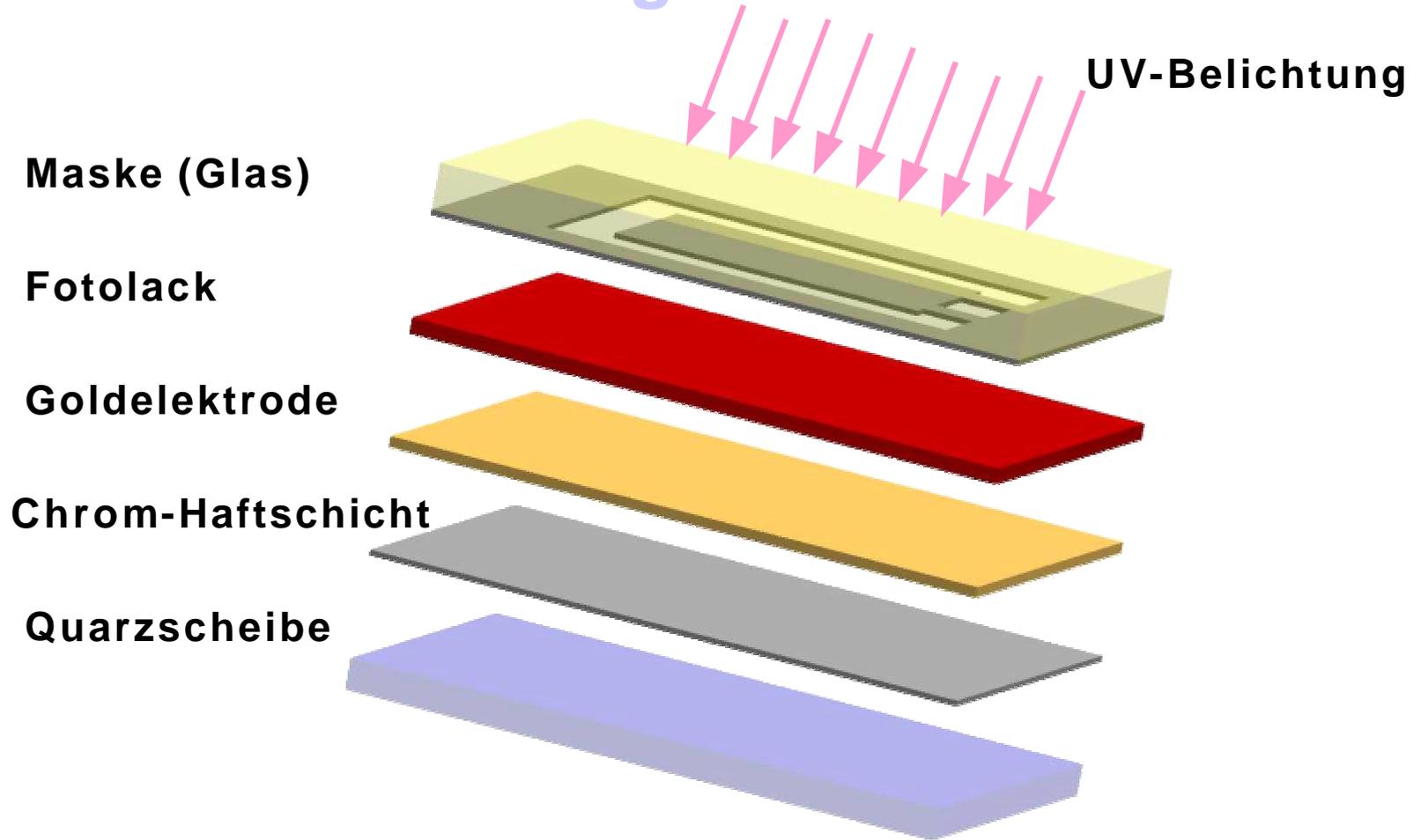


- Verschluss (Rollnahtschweißen), Endprüfung, Laserbeschriftung

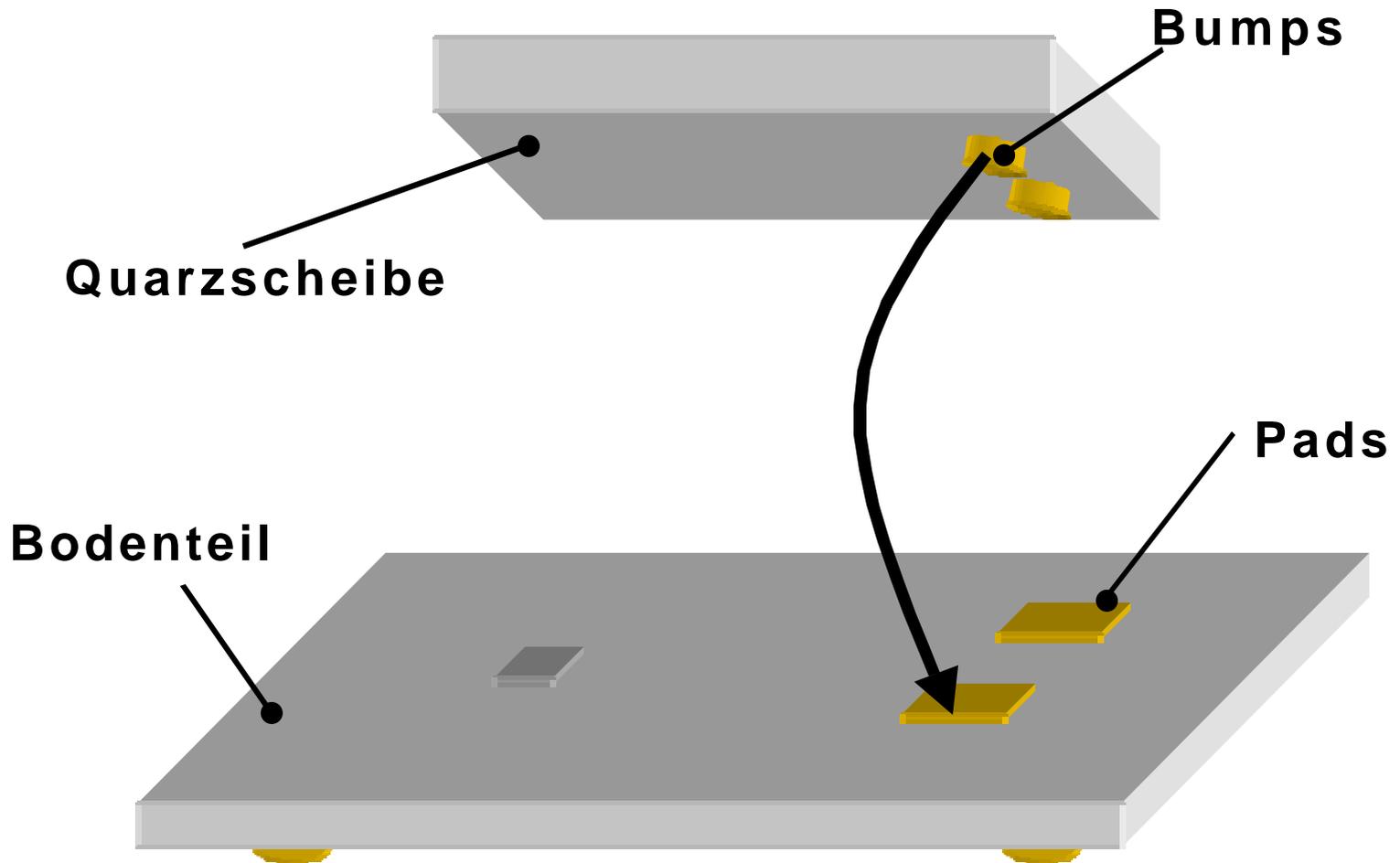
Glass-Packaged Xtal (Konzept)



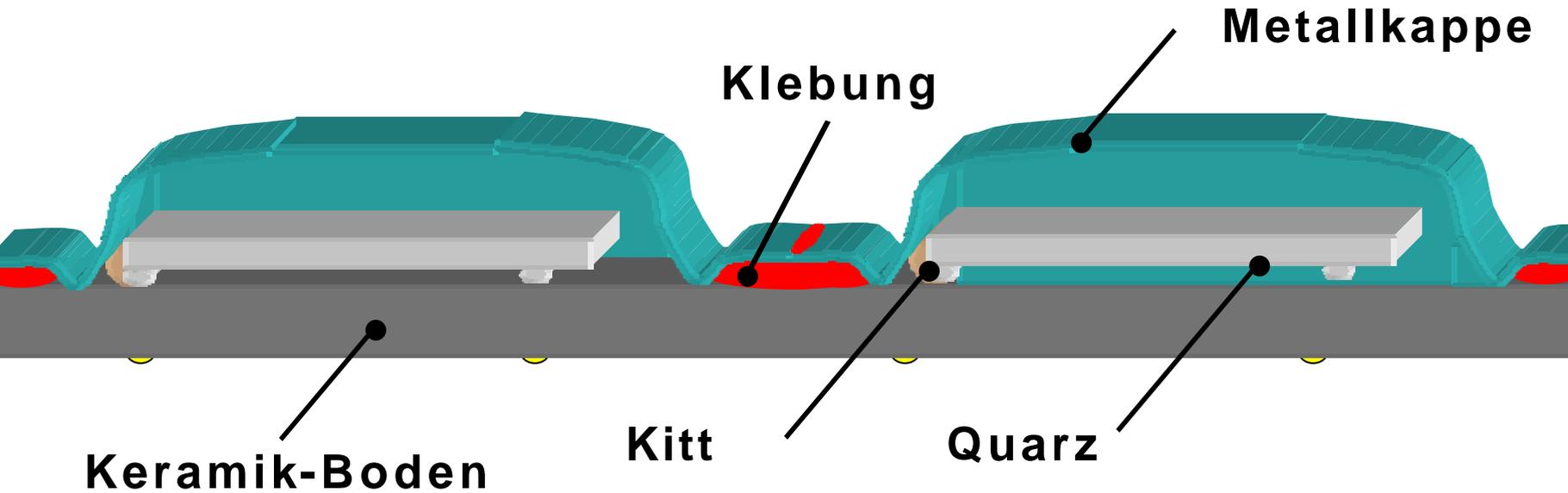
Glass-Packaged Xtal Prozess



Chip-Size Package (CSP) Konzept



Chip-Size Package (CSP)



Inhalt

1. Einige Eigenschaften von Schwingquarze
2. Hochfrequente Grundwellenresonatoren mit Mesastruktur
3. Miniatur-Gehäusetechnologien für Schwingquarze
4. **Präzissionsquarze mit kleinster Alterung**
5. Übersicht über Quarzoszillatoren
6. Quarzoszillatoren im GHz-Bereich
7. Moderne Technologien für hochstabile Oszillatoren (OCXO)

Präzisionsquarze mit kleinster Alterung

1. Basisstation der GSM-Netze erfordert:

Alterung < 50 ppb pro Jahr (1ppb = 10^{-9})

Basisstation der CDMA-Netze und bei 3G erfordert:

Alterung < 10 ppb pro Jahr

1 ppb entspricht einer Schichtdickenänderung von 0,0008 nm (Ag, 10 MHz)

2. Anforderungen an Reinheit entsprechen der Halbleitertechnik

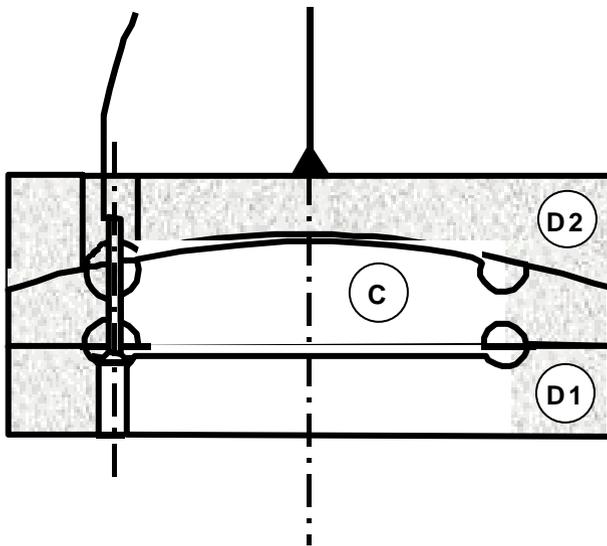
3. Wasser und Sauerstoff < 50 ppm innerhalb des Quarzgehäuse

4. Mechanischer Streß der Halterung des Quarzblanks sowie
Elektrode-Quarz-Grenzschicht

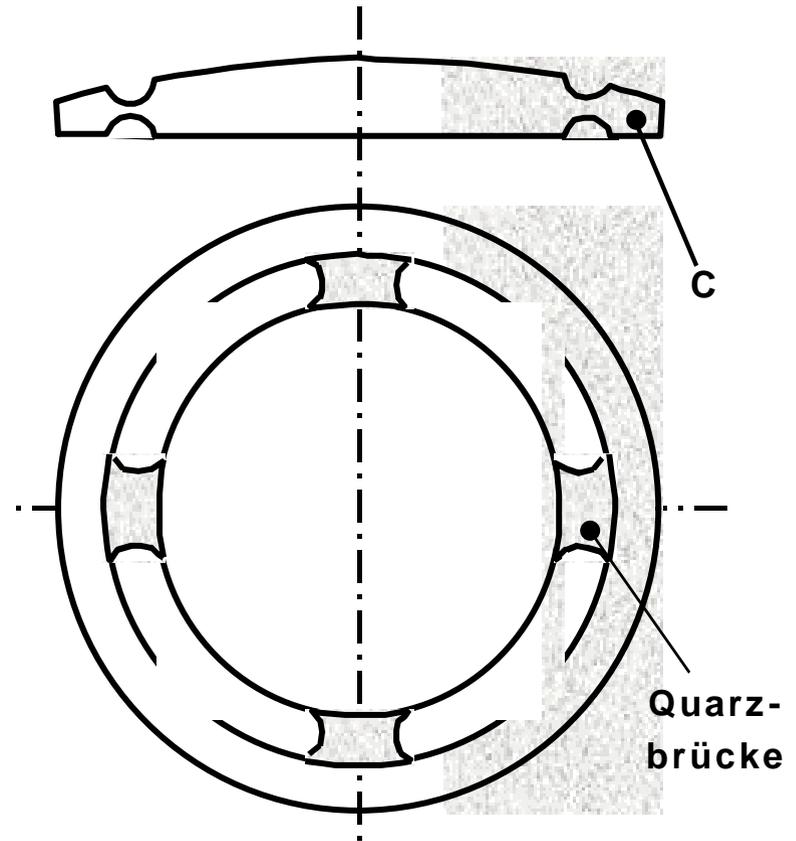
5. Leckraten von < 10^{-11} mbar l / s erforderlich,

Meßgrenze von He-Massenspektrometern: ca. 10^{-9} mbar l / s.

Elektrodenloser (BVA) Resonator



Seitenansicht eines
BVA₂ Resonators



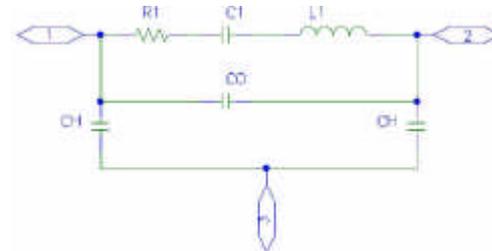
Mittelscheibe C
Ansicht von der Seite und von oben

SPICE Simulation

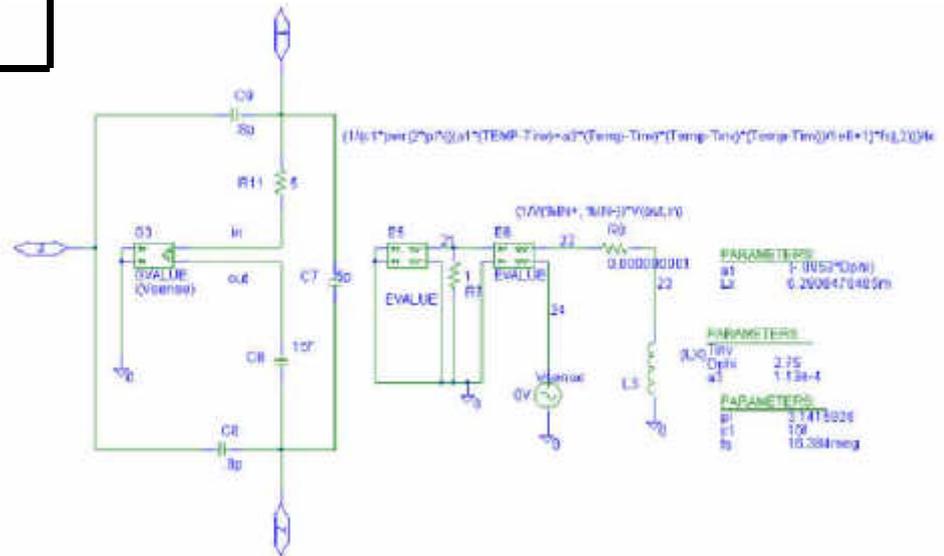
```

*****
* Circuit date: Thu Jun 25 12:30:48 1998.
* Frequency (nominal) fN: 16,384 MHz
* Load resonance = 30.00 pF
.subckt TQQuarz1 1 2 3
* TQQuarz1 : Specification
* 1 2 : Connection Leads
* 3 : Case
*****
R1 1 10 5.00000000000000e+000
C1 11 2 2.00000000000000e+001pF
C0 1 2 4.60000000000000e+000pF
L1 10 11 LTOL 4.7208625264698e-003H
CH1 1 3 8.00000000000000e-001pF
CH2 3 2 8.00000000000000e-001pF
RH1 1 3 1.00000000000000e+011
RH2 3 2 1.00000000000000e+011
.model LTOL ind(L=1 dev=0.0020000000004%)
.ends TQQuarz1
    
```

PSPICE-Library Modul TQSLIB



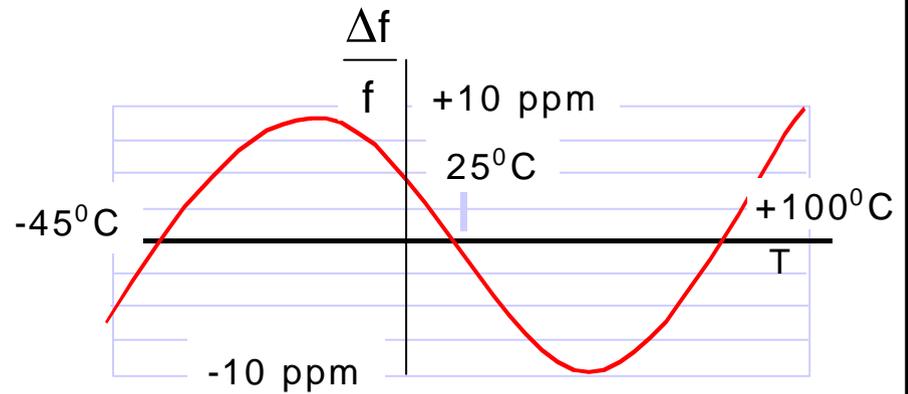
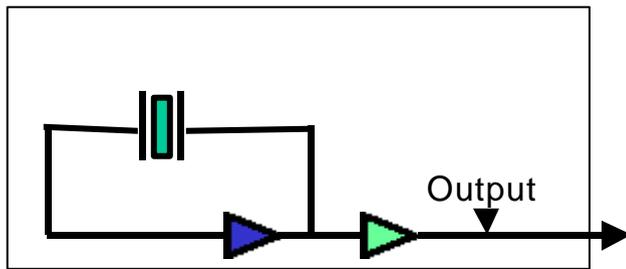
Erweitertes PSPICE- Temperaturmodell TQSLIB V.3



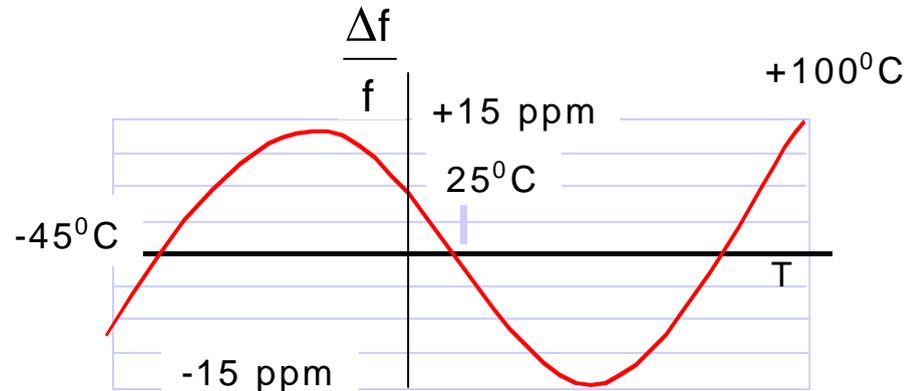
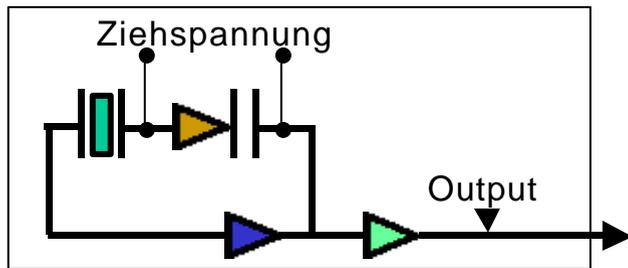
Inhalt

1. Einige Eigenschaften von Schwingquarze
2. Hochfrequente Grundwellenresonatoren mit MESAstruktur
3. Miniatur-Gehäusetechnologien für Schwingquarze
4. Präzisionsquarze mit kleinster Alterung
- 5. Übersicht über Quarzoszillatoren**
6. Quarzoszillatoren im GHz-Bereich
7. Moderne Technologien für hochstabile Oszillatoren (OCXO)

Quarzoszillatoren - Grundtypen

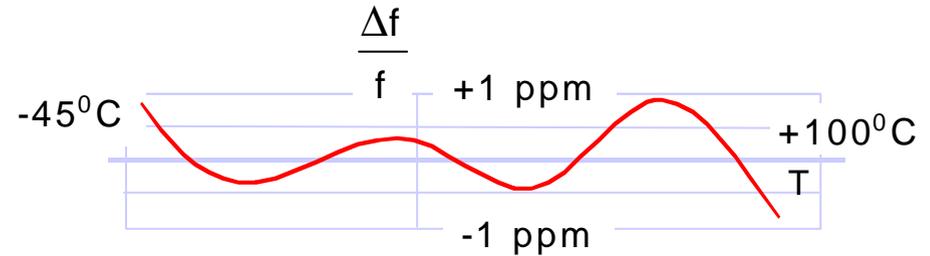
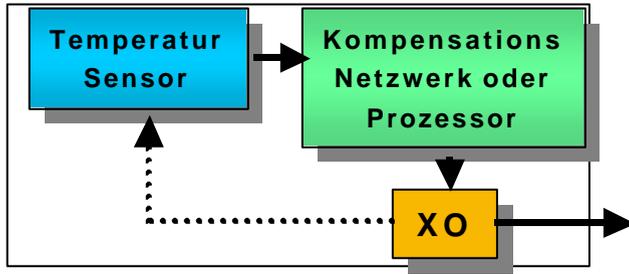


- Einfacher Quarzoszillator PXO (Packaged Xtal Oscillator)

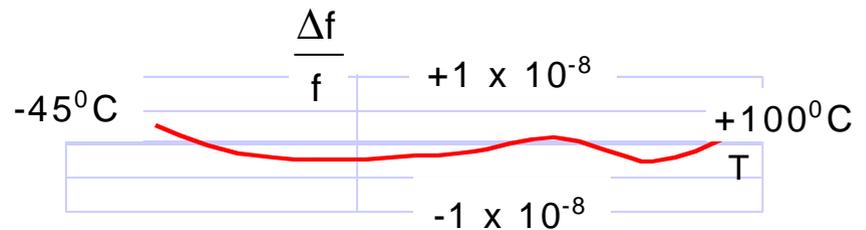
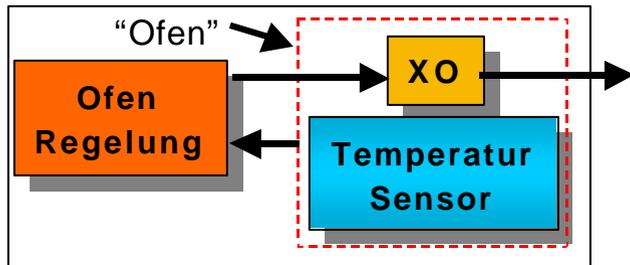


- Spannungsgesteuerter Quarzoszillator VCXO
(Voltage Controlled Xtal Oscillator)

Quarzoszillatoren – Grundtypen II

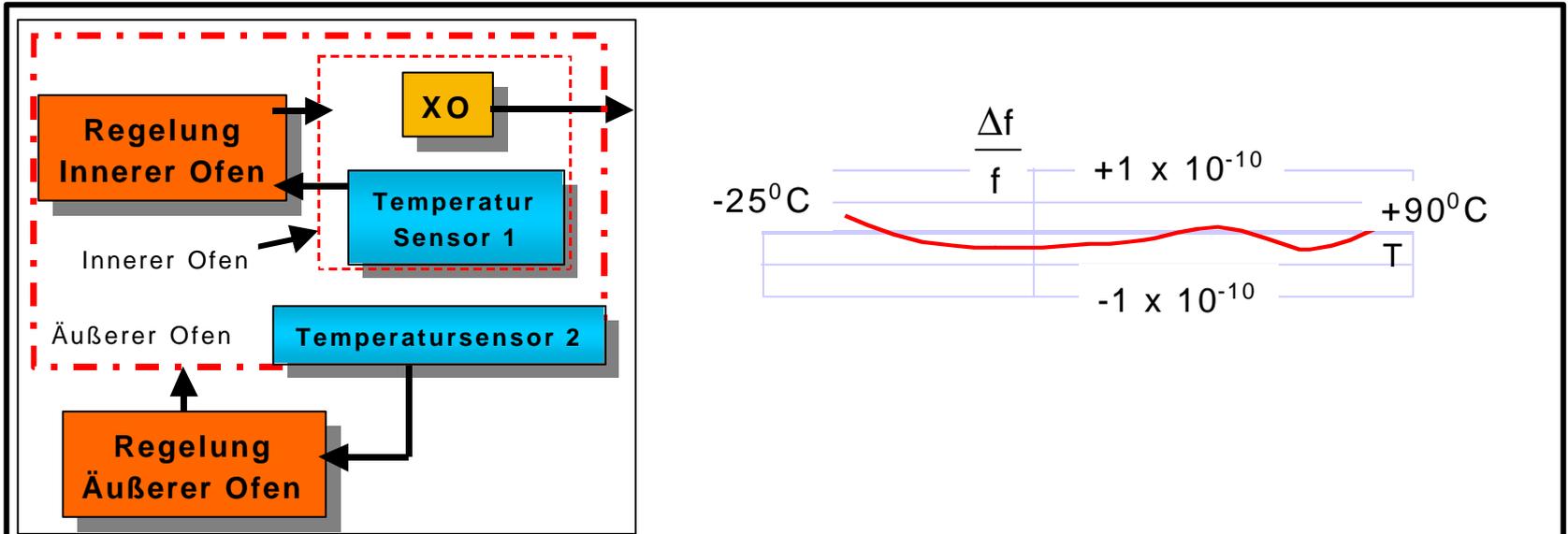


- Temperaturkompensierter Quarzoszillator TCXO
(Temperature Compensated Xtal Oscillator)

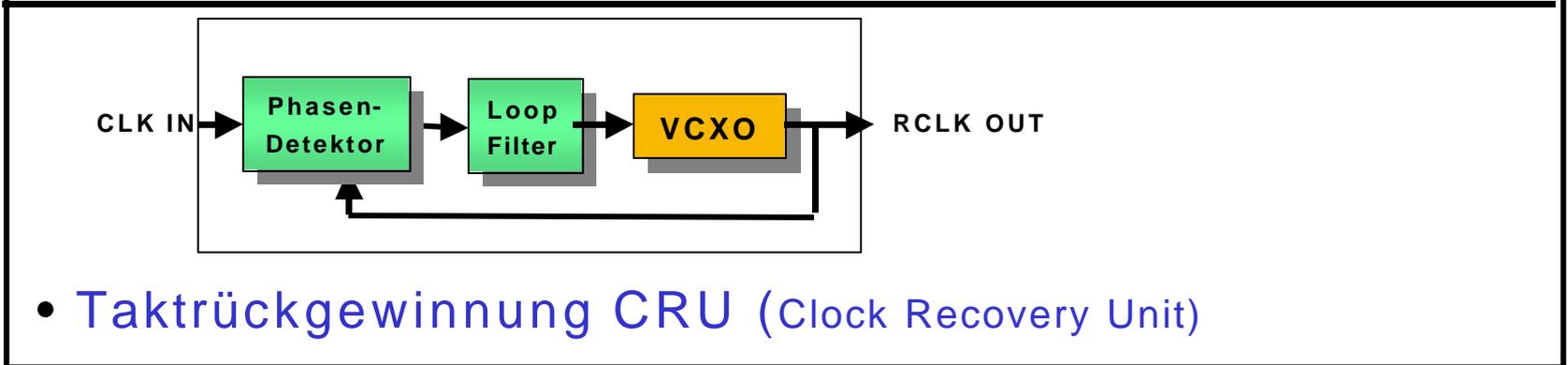


- Temperaturstabilisierter Quarzoszillator (OCXO)
Oven Controlled Xtal Oscillator

Quarzoszillatoren – Sondertypen

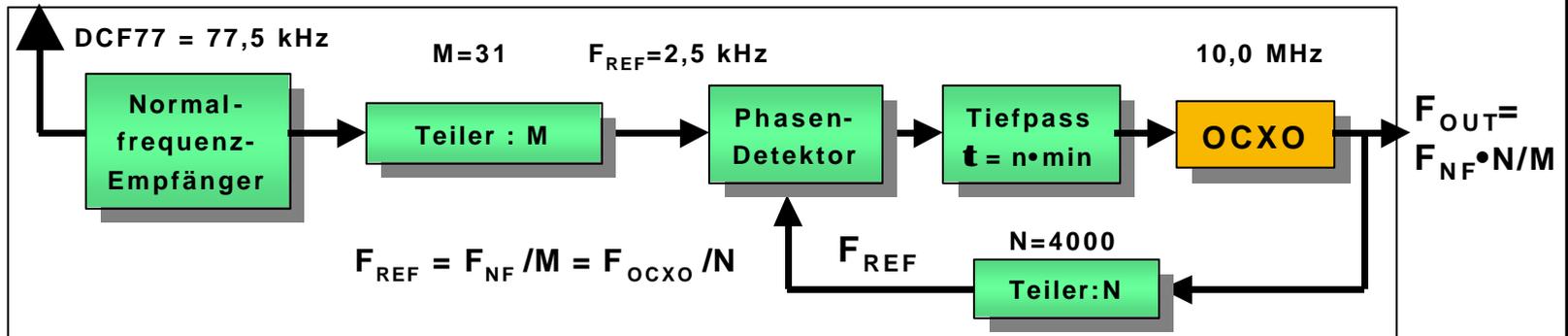


- Doppelofen-Oszillator DOCXO (Double Oven Xtal Oscillator)

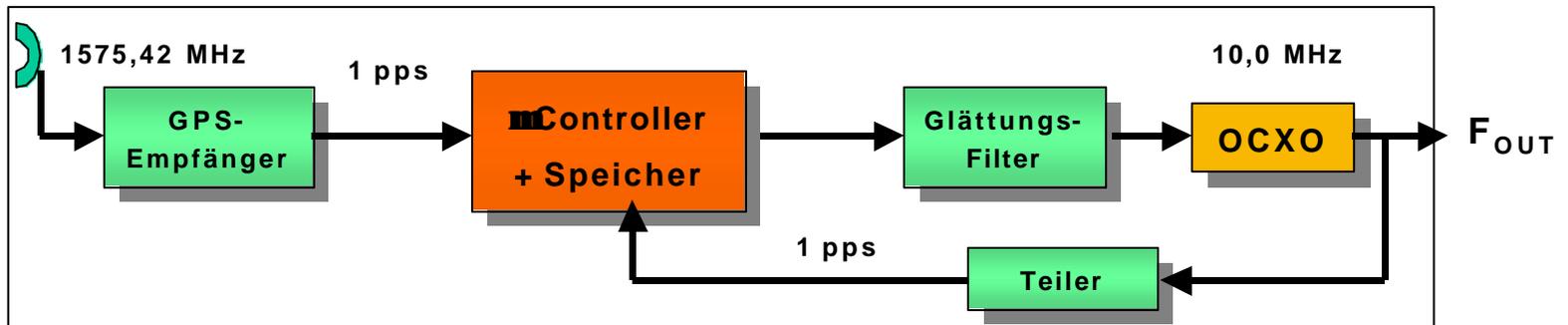


- Taktrückgewinnung CRU (Clock Recovery Unit)

Quarzoszillatoren – Sondertypen II

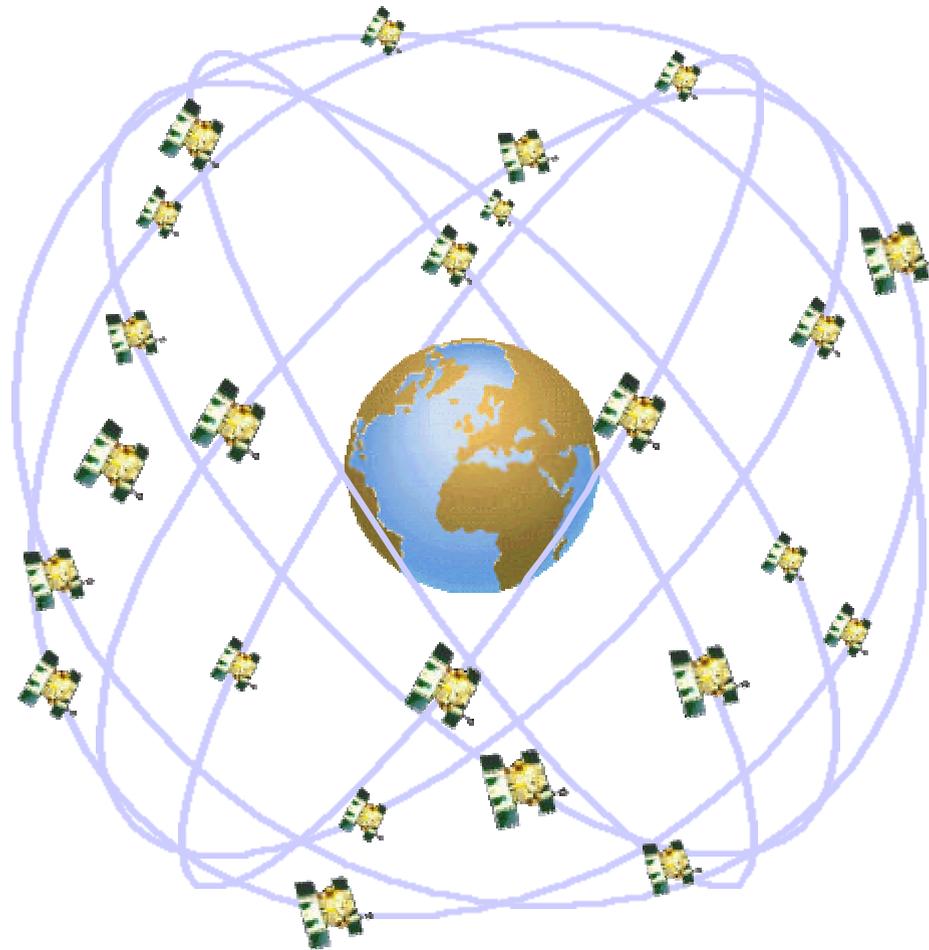


- Synchronisierter OCXO (Beispiel DCF77)



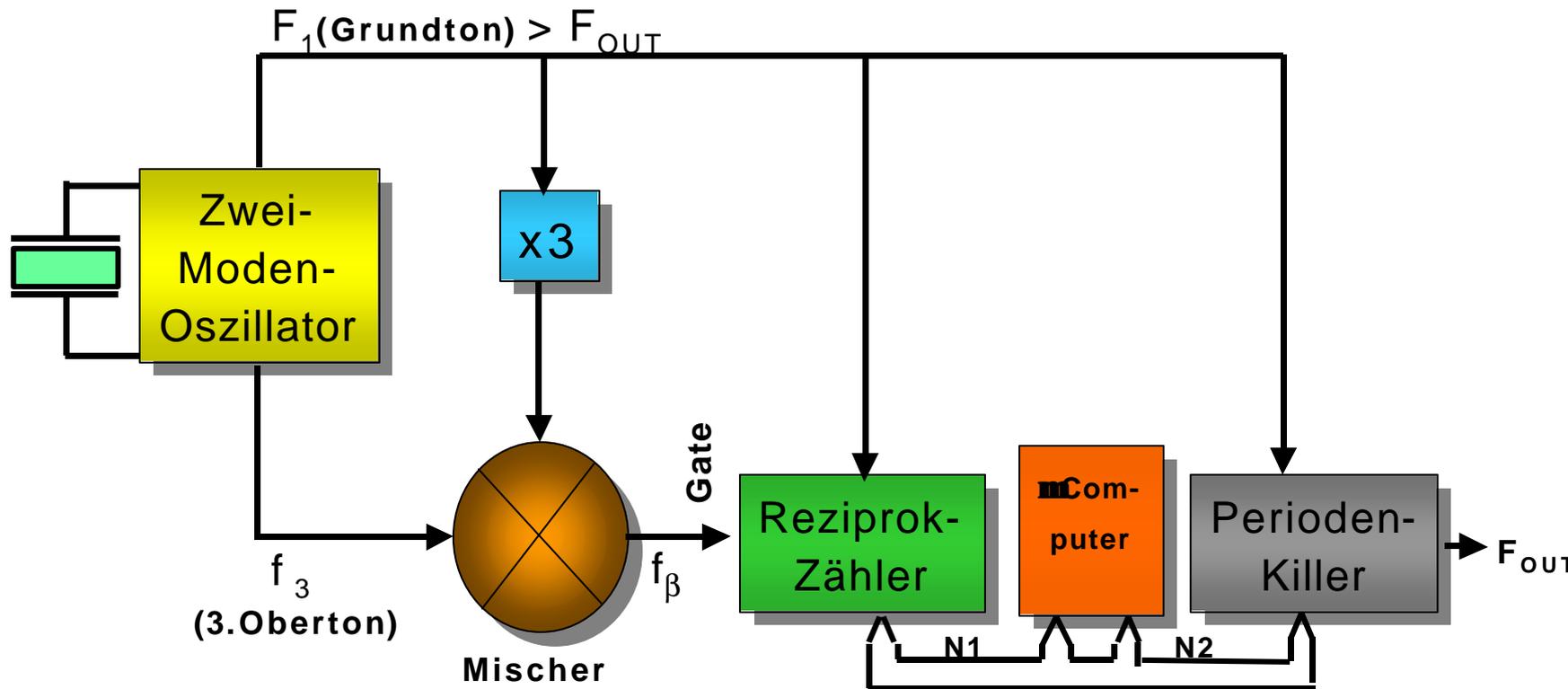
- Diszipliniertes OCXO (Beispiel GPS)

GPS-Satellitensystem



**24 Satelliten in 6 Orbital-Ebenen in 20,200 km Höhe, unter 55° Inklination
Zu jeder Zeit ca. 6 –10 Satelliten in Sicht
Je 2 Cs-Normale an Bord, überwacht von NIST in Boulder / Colorado**

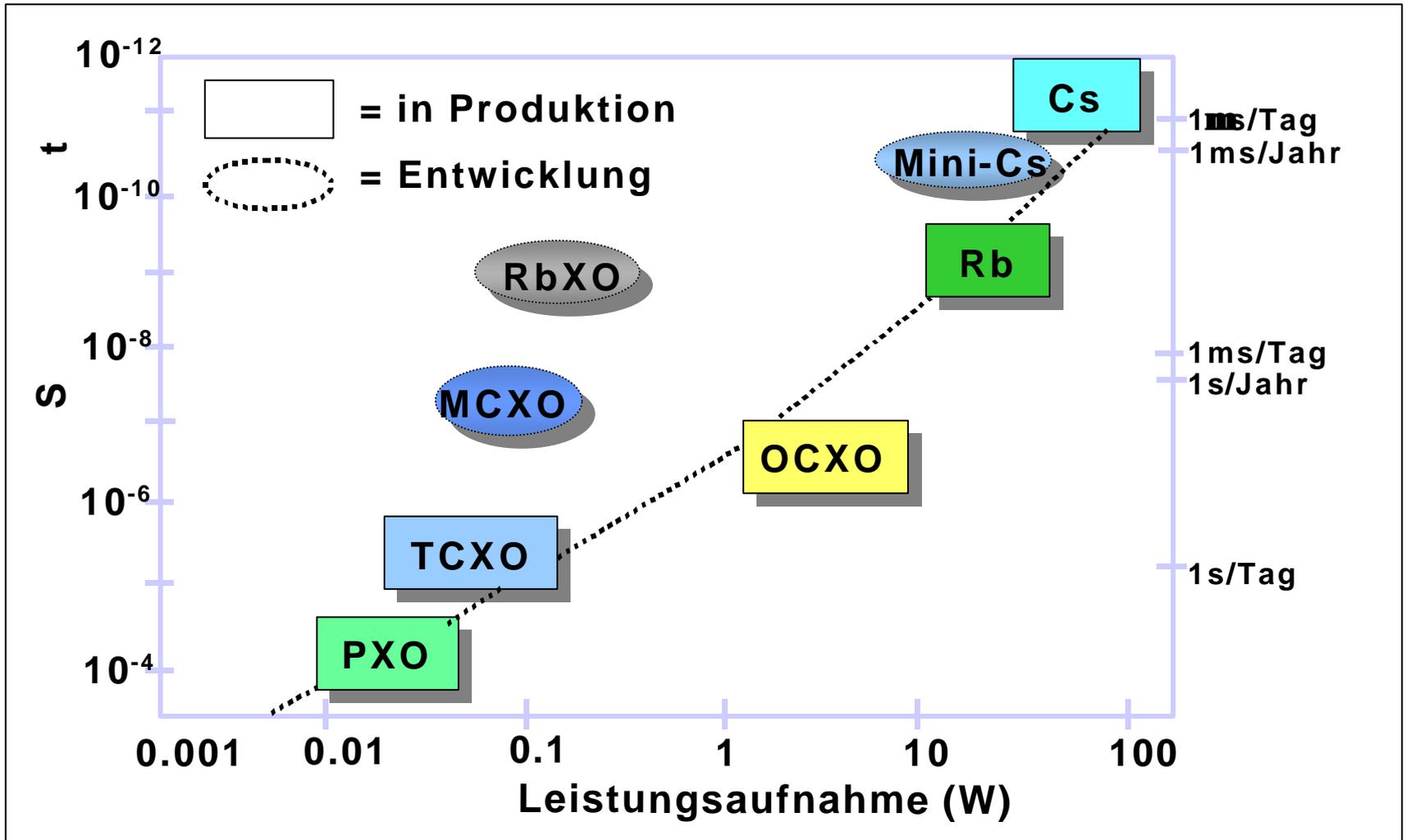
TCXO mit Mikrocomputer = MCXO



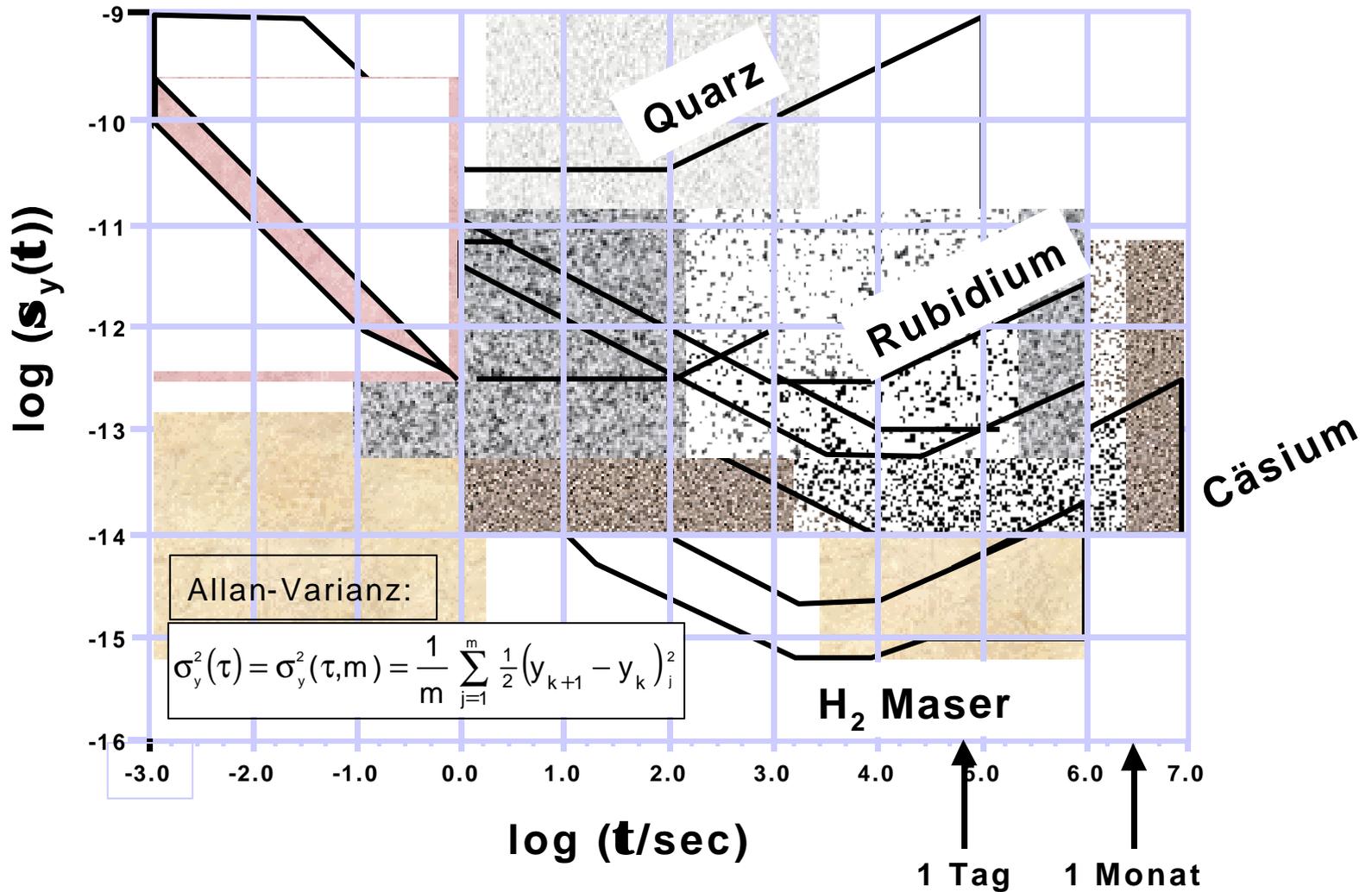
$$f_\beta = (3f_1 - f_3) \sim \text{Temperatur}$$

a

Frequenzstabilität



Kurzzeit-Frequenzstabilität



Inhalt

1. Einige Eigenschaften von Schwingquarze
2. Hochfrequente Grundwellenresonatoren mit Mesastruktur
3. Miniatur-Gehäusetechnologien für Schwingquarze
4. Präzissionsquarze mit kleinster Alterung
5. Übersicht über Quarzoszillatoren
6. **Quarzoszillatoren im GHz-Bereich**
7. Moderne Technologien für hochstabile Oszillatoren (OCXO)

Quarzoszillatoren im GHz-Bereich

Erzeugung höherer Frequenzen

- Quarze im Obertonbetrieb (OT) statt Grundwelle (GW)
- Hochfrequente Grundwellenquarze (HFF)
- Frequenzvervielfachung (MULT)
- Phase-Locked-Loop (PLL), analog oder digital

Frequenzbereich	PXO	VCXO	TCXO	OCXO
500 kHz ... 3 (8) MHz	DIV	DIV	DIV	FQ (GW, OT)
3 (8) Mhz ... 35 MHz	FQ (GW)	FQ (GW)	FQ (GW)	FQ (GW, OT)
30 MHz ... 200 MHz	FQ (OT), HFF	FQ (OT), HFF, MULT	FQ (OT), HFF, MULT	FQ (OT) oder MULT
150 MHz ... 300 MHz	FQ (OT), HFF	HFF oder PLL	HFF oder PLL	-
300 MHz ... 2.5 GHz	MULT oder PLL	PLL	PLL	-

FQ = Quarzfrequenz

DIV = Frequenzteiler

Quarzoszillatoren im GHz-Bereich

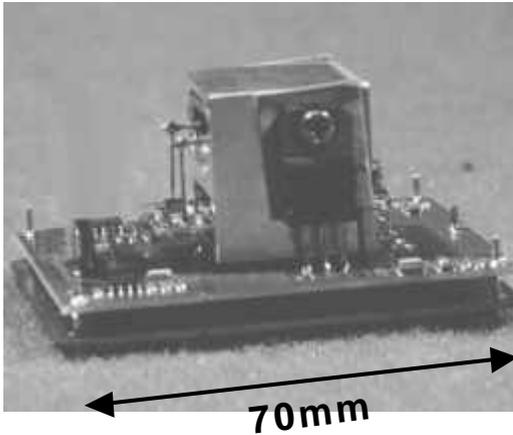
Vor- und Nachteile verschiedener Techniken

	Vorteile	Nachteile
Obertonbetrieb (OT)	Quarzgüte hoch, geringer zusätzlicher Schaltungsaufwand	Ziehfähigkeit $\sim 1/N^2$, daher nur begrenzt anwendbar für VCXO und TCXO
Hochfrequente Grundwelle (HFF)	Kein zusätzlicher Schaltungsaufwand	Quarztechnologie, Kosten, Verfügbarkeit, geringere Güte, höhere Alterung
Frequenzvervielfachung (MULT)	Quarze niedrigerer Frequenz verwendbar	Schaltungskomplexität, Abgleichaufwand, Erhöhtes Phasenrauschen und -Jitter $\sim M$
Phase-Locked Loop (PLL)	Schaltungskomplexität mäßig bei Verwendung von (AS)IC, hoch bei diskretem Aufbau. Geringer Abgleichaufwand.	Höheres Phasenrauschen (zwei Resonatoren) und Jitter, sehr schlecht bei digitaler PLL und bei vielen PLL-ICs

Inhalt

1. Einige Eigenschaften von Schwingquarze
2. Hochfrequente Grundwellenresonatoren mit Mesastruktur
3. Miniatur-Gehäusetechnologien für Schwingquarze
4. Präzissionsquarze mit kleinster Alterung
5. Übersicht über Quarzoszillatoren
6. Quarzoszillatoren im GHz-Bereich
7. **Moderne Technologien für hochstabile Oszillatoren (OCXO)**

Aufbau von OCXOs



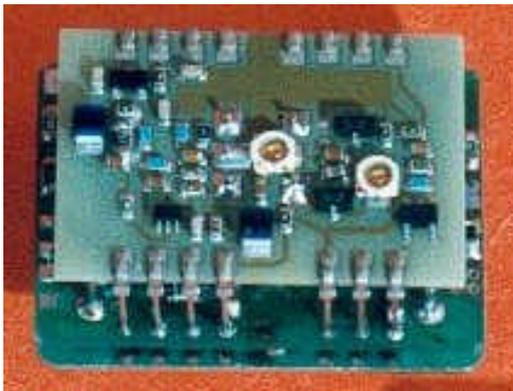
Klassischer OCXO mit Heizblock

Vorteile:

- geringe Strahlungsverluste
- rel. einfaches therm. Modell

Nachteile:

- Hoher mechanischer Aufwand
- großes Volumen
- große Leistungsaufnahme
- lange Aufheizzeit



OCXO mit geheizter Hybridschaltung

Vorteile:

- kompakt
- alles SMD-Technik
- kurze Aufheizzeit

Nachteile:

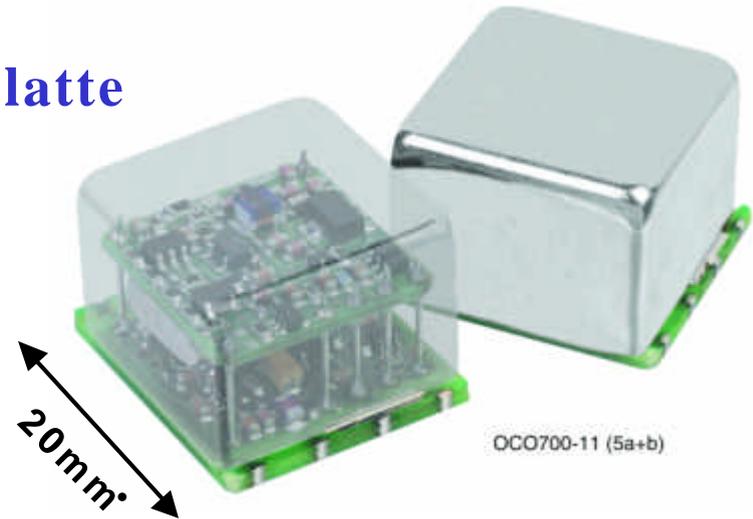
- teure Technologie
- größere Strahlungsverluste
- thermisches Modell komplexer

36 mm

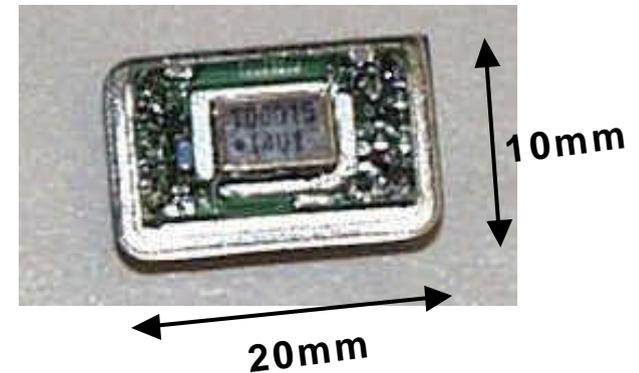
27.11.2001

Aufbau von OCXOs II

OCXO mit geheizter Leiterplatte



Miniatur-Version mit Niedrigerer Stromaufnahme und kurzer Aufheizzeit



Einige Literaturquellen

1. Gerber, E.A., Ballato, A.(Hrsg.): Precision Frequency Control; Academic Press London (1984), ISBN 0-12-280601-8 (Vol.1) und ...602-6 (Vol.2)
2. Frerking, M: Crystal Oscillator Design and Temperature Compensation; Van Nostrand Reinhold N.Y.(1978), ISBN 0-442-22459-1
3. Neubig, B., Briese,W.: Das große Quarzkochbuch; Franzis‘ Feldkirchen (1997), ISBN 3-7723-5853-5. Leider vergriffen.
Kostenloser Download aller Kapitel sowie weiterer Literatur unter:
www.BNeubig.de (oder direkt: www.qsl.net/dk1ag)
4. DIN und IEC-Normen:
(DIN)IEC 60122ff. Schwingquarze
(DIN)IEC 60679ff. Oszillatoren
(DIN)IEC 60368ff. Quarzfilter
(DIN)IEC 60862ff. & 61019ff. SAW-Filter & Resonatoren
(DIN)IEC 61337ff. Dielektrische Resonatoren
Detailübersicht siehe www.BNeubig.de
5. Vig, John: Quartz Crystal Resonators and Oscillators – A Tutorial
Download über http://www.ieee-uffc.org/freqcontrol/tutorials/Vig-tutorial852_files/v3_document.htm

Quarzhersteller in Deutschland

- Corning Frequency Control (TQ) www.corningfrequency.com
Landstrasse, 74924 Neckarbischofsheim, Tel. 07268 801-0
- FOQ Piezotechnik www.foq.de
Riemenstr. 33, 74903 Bad Rappenau, Tel. 07264 9145-0
- Quarz-Technik www.quarz-technik.de
Alte Darscheider Str.15, 54550 Daun, Tel. 06592 9207-0
- Vectron International (KVG) www.vectron.com
Waibstadter Str.2, 74924 Neckarbischofsheim, Tel. 07263
648-0