

1. Allgemeiner historischer Überblick

In Indien und Ceylon war seit urdenklichen Zeiten das mysteriöse Verhalten des Turmalins bekannt. Das Abendland erfuhr um 1703 durch holländische Seefahrer, die Turmalin-Kristalle mitbrachten, von diesem Verhalten: Die Turmaline in heiße Asche gelegt, zogen an einer Seite Aschepartikel an und stießen sie an der gegenüberliegenden Seite ab. Nach einiger Zeit kehrte sich dieser Effekt des Anziehens und Abstoßens um. Seefahrer nannten diese Turmalinkristalle Ceylonmagnete. 1747 gibt Linneaeus den Turmalinkristallen den wissenschaftlichen Namen *lapis electricus*. 1756 beschreibt Aepinus die entgegengesetzte elektrische Polarität erhitzter Turmalinkristalle. Er nennt diese Wirkung *Pyroelektrizität*. Becquerel beobachtete an bestimmten Kristallen einen elektrischen Effekt. 1877 begründet Lord Kelvin den Zusammenhang zwischen Pyroelektrizität und Piezoelektrizität. Es stellt sich heraus, daß der weitaus größte Teil der pyroelektrischen Aufladung des Turmalins auf die Bildung von piezoelektrischen Oberflächenladungen durch die elastischen Beanspruchungen des Kristalls bei Temperaturänderungen hervorgerufen wird. Auf den Aussagen Lord Kelvins fußend, fanden die Gebrüder Curie 1880 bei der Untersuchung von kristallinen Materialien, daß eine mechanische Deformation eine proportionale elektrische Ladung erzeugt. Dieses Phänomen wurde als Piezoeffekt bezeichnet. "Piezo" stammt aus dem Griechischen und heißt übersetzt "ich drücke". 1881 wurde dann auch nach einer Folgerung Lippmanns von den Gebrüder Curie der umgekehrte piezoelektrische Effekt gefunden. Über 30 Jahre zählte der piezoelektrische Effekt eher zu den Kuriositäten der Wissenschaft. 1910 veröffentlicht W.Voigt das grundlegende Werk, das Buch "Lehrbuch der Kristallphysik". 1913 gelingt es Meißner mit der

gerade entwickelten “Dreielektroden-Vakuum-Verstärkerröhre” die Erzeugung elektrischer Schwingungen. Die Rückkopplung war erfunden. 1917 gelang es Langewin (Frankreich) in Wasser Ultraschallwellen für Ortungszwecke zu erzeugen. Er benutzte eine Anordnung mehrerer parallelgeschalteter gleicher X-Schnitt Quarzelemente, die mit einem Gleichstromimpuls beaufschlagt wurden. Die Frequenz der erzeugten Schallwelle war durch die Eigenresonanz der Quarzelemente gegeben. Aus der Laufzeit der ebenfalls mit einem Quarzschwinger empfangenen reflektierten Welle konnte die Entfernung des reflektierenden Gegenstandes errechnet werden. Langewin beschreibt in diesem Zusammenhang das erste Mal das Phänomen der Resonanz. 1919 verwendet Cady einen Quarzschwinger zur Stabilisierung der Frequenz eines Oszillators. Er nutzt hier die von Meißner beschriebene klassische Rückkopplung mit einem phasendrehenden Übertrager, der hier durch den mit zwei Elektroden versehenen Quarzstab ersetzt wurde: Über das eine Elektrodenpaar wurde der Quarzschwinger aus dem Anodenkreis in seiner Eigenresonanz angeregt, aus dem anderen Elektrodenpaar wurde die durch den indirekten Piezoeffekt erzeugte Ladung phasengedreht dem Gitter der Verstärkerröhre wieder zugeführt.

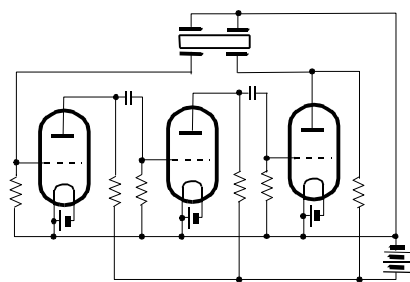


Bild 1.1 Cady's erster Oszillator

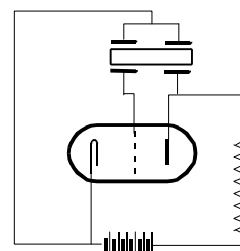


Bild 1.2 Cady's Einröhren-Oszillator

1923, Prof.G.W.Pierce (Harward Universität) veröffentlicht eine

Oszillatorschaltung mit einem Quarz mit nur einem Elektrodenpaar.

Nun geht es Schlag auf Schlag:

1923, Bell Telephon Laboratories gründen Quarzlabor, 1924, Löwe Opta in Berlin fertigt Leuchtquarze als Abstimm-Indikator, sie sind in einem gasgefüllten Gehäuse montiert, bei Abstimmung des Senders auf die Quarzfrequenz leuchtet die Gasentladung infolge der Spannungsüberhöhung (Q-mal) bei Resonanz.

Funkamateure waren die ersten Anwender von quarzstabilisierten Sendern. Der Tankkreis der damals gebräuchlichen selbstschwingenden Senderstufe war gleichzeitig die Auskoppelung der Antenne. Durch Schwankungen der Antenne im Wind veränderte sich die Kapazität und damit die Sendefrequenz. Abhilfe war die Quarzstabilisierung. Es war die Zeit, als Funkamateure die Radiotechnik, die Elektronik überhaupt vorantrieben. Kaum ein Ingenieur in der damaligen Funkgeräteentwicklung, der nicht auch Radioamateur war. Die erste Veröffentlichung über den praktischen Aufbau von Quarzoszillatoren erschien 1924 in der Funkamateur Zeitung QST. Es folgten in kurzer Folge eine Fülle von Veröffentlichungen in dieser Zeitschrift, auch über die Herstellung der Schwingquarze, die von engagierten Amateuren selbst hergestellt wurden.

1925 zeichnet Prof. van Dyke das Ersatzschaltbild für den Zweielektrodenquarz, bestehend aus einem dynamischen Serienkreis und einer parallelgeschalteten statischen Kapazität.

1926 wird in den USA als erste kommerzielle Radiostation WEAf in



Bild 1.3 erster Quarzhalter für Großsender mit Frequenzkorrektur und Präzisionsquarz für Gleichwellensender

New York mit einem quarzstabilisierten Sender betrieben. 1927, bisher waren alle Quarzpiezoide Y-Schnitte. D.Tillyear von der American Optimal Co gibt diese Schnittrichtung als Schnitt mit kleinerem Temperaturkoeffizienten an. 1928 werden an vielen Orten der Welt Laboratorien und bescheidene Fertigungsstätten für Quarze eingerichtet. 1929 erhält die C.Lorenz AG in Berlin das Patent für einen Thermostat zur Temperierung von Schwingquarzen. Der Thermostat ist bereits mit einem Y-Schnitt-Quarz bestückt. Es wird eine Genauigkeit von $0,1 \cdot 10^{-6}$ erreicht. Eine Voraussetzung für den Betrieb der Gleichwellensender Stettin, Magdeburg Berlin auf gleicher Frequenz. Meißner und Bechmann erforschen bei Telefunken die Mehrwelligkeit rechteckiger Quarzresonatoren um Frequenzsprünge über den Temperaturbereich zu vermeiden. 1933, erste Untersuchungen über Quarzschnitte geringen Temperaturganges, Bechmann und Straubel benennen den entsprechenden Y-Schnitt mit $T_k=0$ den $Y\vartheta$ -Schnitt. 1934, Unabhängig voneinander werden von Koga in Japan, Bechman und Straubel in Deutschland und F.R.Lack, G.W.Willard und I.E.Fair der Bell Lab. in den USA, Quarzschnitte mit 0-Temperaturkoeffizient bei 25°C angegeben. Diese Schnitte werden AT- und BT-Schnitt genannt. Die Orientierung der Schnitte erfolgte nach den gewachsenen Flächen. Später konnten die Schnittwinkel mit polarisiertem Licht auf $1/6^\circ$ genau realisiert werden. 1938, die Fa. PR-Hofman Co stellt Spezialmaschinen für die nun beginnende industrielle Herstellung von Schwingquarzen her. Durch die Kriegereignisse steigt der Quarzbedarf in den USA rasant. Bald gibt es Beschaffungsprobleme durch das knapp werdende natürliche Rohmaterial. Außerdem gibt es Probleme durch die ungenügende Langzeitkonstanz, hervorgerufen durch die ungenügende Oberflächengüte der Resonatoren. Die zu dieser Zeit übliche Montage in Kunststoffgehäusen stellte einen weiteren Beitrag zur

Langzeitunstabilität der Frequenz, insbesondere durch eindringende Feuchte. In Deutschland wurde in der Wehrtechnik immer noch auf durchstimmbare Funkgeräte gesetzt, was sehr robust aufgebaute Geräte voraussetzte. Dafür gab es keinen "Quarzengpaß". Nur die ZF-Oszillatoren und Quarzfilter enthielten präzise Quarze.

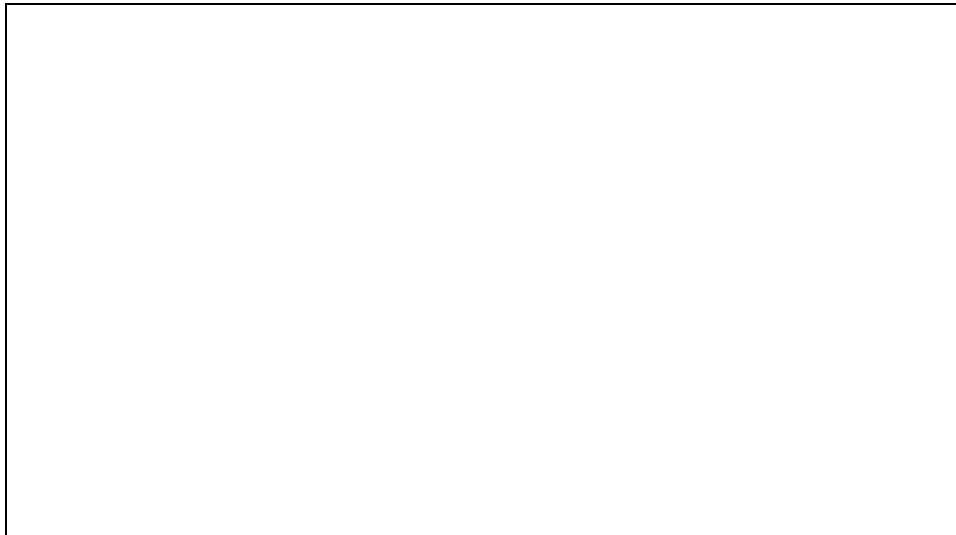


Bild 1.2 Quarze im Luftspalhalter

1940 wurden in Deutschland nun auch bei hochfrequenten Quarzen (AT-Schnitt) metallplattierte Anregungselektroden eingeführt (Lorenz und Telefunken). Diese Quarze wurde immer noch in einer aufwendigen Dreipunkthalterung am Umfang der Quarzscheibe gehalten, die elektrische Verbindung durch Anlöten dünner Drähte hergestellt. Trotz der Kriegereignisse laufen die Fortschritte in der Entwicklung und Technologie der Schwingquarze in beiden Lagern fast gleichzeitig ab. 1942 (Lorenz) wird die präzise Messung der Schnittwinkel mit Röntgenstrahlen eingeführt. Es wurden hiermit Schnittgenauigkeiten von etwa $1/50^\circ$ erreicht. Seit 1943 wird die Schnittkontrolle mit Röntgengoniometern im großen Stil in der USA durchgeführt. Die erforderlichen Röntgengoniometer wurden mit Förderung der Regierung

in größeren Stückzahlen für die Quarzindustrie hergestellt. 1941-1945 wurden in den USA 30 Millionen Schwingquarze hergestellt. Während in den USA lange Zeit Quarze höherer Frequenz im Luftspalhalter FT 243 produziert wurden, ging man in Europa und in Japan schon etwa 1942 zu metallplattierten Quarzresonatoren über, die allerdings immer noch wie in den USA in Kunststoffgehäusen oder nicht hermetisch verschlossenen Keramikgehäusen mit all den Nachteilen montiert wurden. Die bekannten Halter FT241 und FT 243 wurden erst durch Metallgehäuse abgelöst, nachdem die Klebetechnik mit elektrisch leitenden Epoxy-Kleber zur Kontaktierung zur Verfügung standen.



Bild 1.3 Glas und Metallgehäuse.

1944 erfolgen in Deutschland die ersten Versuche, das Rohmaterial Quarz (Bergkristall) industriell zu Synthetisieren. 1948 beginnen bei Brush (USA), Sawyer (USA) und Nihon Dempa Kogyo (NDK) in Japan Entwicklungen zur Herstellung von synthetischem Quarzmaterial im technischem Maßstab. 1948 wird der Transistor erfunden, 1953 kommen die ersten Transistor-Quarz-Oszillatoren zum Einsatz, 1954 durch eine Steuerspannung in der Frequenz modulierbare Transistor-

Quarzoszillatoren VCXO.

1952 gibt Warner (Bell Telephon Lab.) die Dimensionierung und Herstelltdetails für Schwingquarze hoher Schwingungsgüte und geringer Alterung für Primärfrequenzstandards an. Aus diesen Angaben gehen die bekannten Quarze 2,5 und 5 MHz im 5.Oberton mit einer Langzeitkonstanz von $\leq 1 \cdot 10^{-8}/\text{Mon.}$ hervor. Hochstabile Quarze werden in evakuierten Allglasgehäusen realisiert. 1960, synthetisches Rohmaterial steht jetzt in ausreichenden Mengen zur Verfügung, natürliches Quarzmaterial wird kaum noch verwendet. 1962 die Anforderungen an die Langzeitstabilität der Quarze steigen erheblich, insbesondere bei Anwendungen in der Trägerfrequenztechnik. Schwingquarze mit erhöhten Anforderungen werden hierfür in Allglasgehäusen realisiert. 1968, J. Staudte stellt Miniatur-Quarz-Stimmgabelschwinger vor, die in der aus der Halbleitertechnologie bekannten Wafer-Foto-Ätztechnik hergestellt wurden. 1970 - 1973 Beginn von Großserienproduktionen von Schwingquarzen im AT-Schnitt für einige Standardfrequenzen. zunächst für die Farbhilfsträgergenerierung im Farbfernsehen und für die Anwendung in Uhren mit den Frequenzen 4,4 MHz, 4,194 MHz und 3,9 MHz. 1976 Ausweitung des Frequenzbereiches der Großserienquarze auf 3,2 MHz bis 20 MHz: Standardgehäuse für diese Quarze ist jetzt HC-18/U in widerstandsgeschweißter Ausführung. 1985 Großserienquarze jetzt auch im Gehäuse HC-18/U mit niedriger Bauhöhe.

Das Anwendungsspektrum der Schwingquarze kann in 4 Gruppen mit eignen Produktionsmerkmalen eingeteilt werden:

1- Einzelanfertigung von Präzisionsquarzen

- 2- Kleinserien für spezielle Anwendungen mit speziellen Anforderungen
- 3- Großstückzahlen für spezielle Anforderungen z.B. Automobiltechnik mit hohen Schockansprüchen oder Anwendungen mit kleineren Toleranzen
- 4- Großserien mit geringen Ansprüchen, große Toleranzen, muß nur schwingen, aber bei niedrigem Preis, z.B. zur Taktversorgung von digitalen Systemen. Hierzu gehören auch preisgünstige komplette Quarzoszillatoren mit Standardfrequenzen. In zunehmendem Maße werden komplette Quarzoszillatoren zu Einsatz. Auch hier finden wir eine drastische Prägung der Konstruktion durch die Einsatzgebiete :
 - 1- Präzisions Oszillatoren mit höchsten Ansprüchen an die Langzeit und Kurzzeitstabilität.
 - 2- Kleinserien für bestimmte Anwendungsgebiete mit speziellen Anforderungen.
 - 3- Großserien standardisierter Frequenzen für den Einsatz in großen Stückzahlen. Relativ geringe Anforderungen an die Genauigkeit.

So oft auch dem Schwingquarz, diesem Oldtimer der Elektronik eine Ablösung durch andere Bauelement vorausgesagt wurde, die Antwort waren immer weitere Expansionen des Marktes durch neue Anwendungen. So bleibt die Quarztechnologie weiterhin eine Herausforderung zur Anpassung an neue Innovationen der Elektronik.