

Bedeutung der Frequenz – und Zeitmessung in der Schweizer Luftwaffe.

Ein Beitrag von Hans H. Jucker, E-mail: hjucker@ggaweb.ch

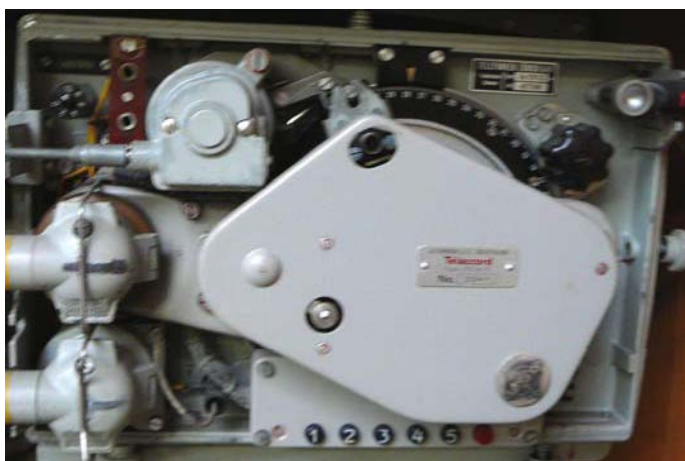
Die SE 010 (FG X) Bordfunk - Ausrüstungen welche sich bis in die erste Hälfte der fünfziger Jahre in den propellergetriebenen Jagdflugzeugen Morane D 3801 und D 3802 sowie in den Kampfflugzeugen C 3603 und C 3604 im militärischen Einsatz befanden, arbeiteten noch im Kurzwellenbereich von 6 – 12 MHz. Insgesamt 210 SE 010 Ausrüstungen wurden in den Jahren 1942/43 durch die Telefunken Zürich AG für den damals neu eingeführten Sprechfunkverkehr an die Schweizer Flugwaffe geliefert. Die SE 010 arbeiteten in der Betriebsart Telephonie mit Amplitudenmodulation. Bei den SE 010 handelte es sich um eine von der Telefunken Zürich AG weiterentwickelte Version der vom Technischen Bureau Zürich der deutschen Telefunken Gesellschaft in den 30er Jahren entwickelten Flugzeugfunkstation 1005bF.

Anmerkung zur Telefunken Zürich AG

Nach dem Ersten Weltkrieg gründete die deutsche Telefunken Gesellschaft im Jahre 1924, im Rahmen der damals in der Weimarer Republik im Ausland betriebenen verdeckten Rüstung, das Technische Bureau Zürich. Die Absicht bestand Militärfunkgeräte künftig in der neutralen Schweiz zu entwickeln. Aus dem Technischen Bureau ging die Telefunken Zürich AG hervor, welche von Dr. A. Hänni von 1935 – 1955 geleitet wurde. Neben der Entwicklung von Militärfunkgeräten vertrat die Telefunken Zürich AG die Interessen der deutschen Telefunken Gesellschaft in der Schweiz, sie verfügte über einen Stab von Entwicklungs-Ingenieuren, besass jedoch keine eigene Fabrikationsabteilung. Die Seriefertigung der Geräte erfolgte beim Albiswerk in Zürich und der Autophon in Solothurn welche mit der Telefunken Zürich AG eng zusammenarbeiteten. Als in den 30er Jahren Importe vom Stammwerk in Deutschland aus politischen und später kriegsbedingten Gründen immer schwieriger wurden, wurde die Telefunken Zürich AG auch mit der Entwicklung von Funkgeräten für die Schweizer Armee und Flugwaffe beauftragt. Dr. A. Hänni galt als anerkannter Experte auf dem Funkgebiet und wurde verschiedentlich von der ETH Zürich als wissenschaftlicher Berater zugezogen, so u.a. auch von Professor C.F. Baeschlin für die Entwicklung von Verfahren für die Zeitsynchronisierung mit Funksignalen bei den geodätischen Vermessungen für die Schweizerische Landestopographie.



Das nebenstehende Foto zeigt den zweistufigen Sender mit integriertem Modulator für den Telephoniebetrieb der SE 010 Bordfunkausrüstung. Die Senderendstufe arbeitete mit zwei parallelen RL12P35 Röhren und lieferte in der Betriebsart Telephonie ca. 25 Watt Ausgangsleistung an die Flugzeugantenne.

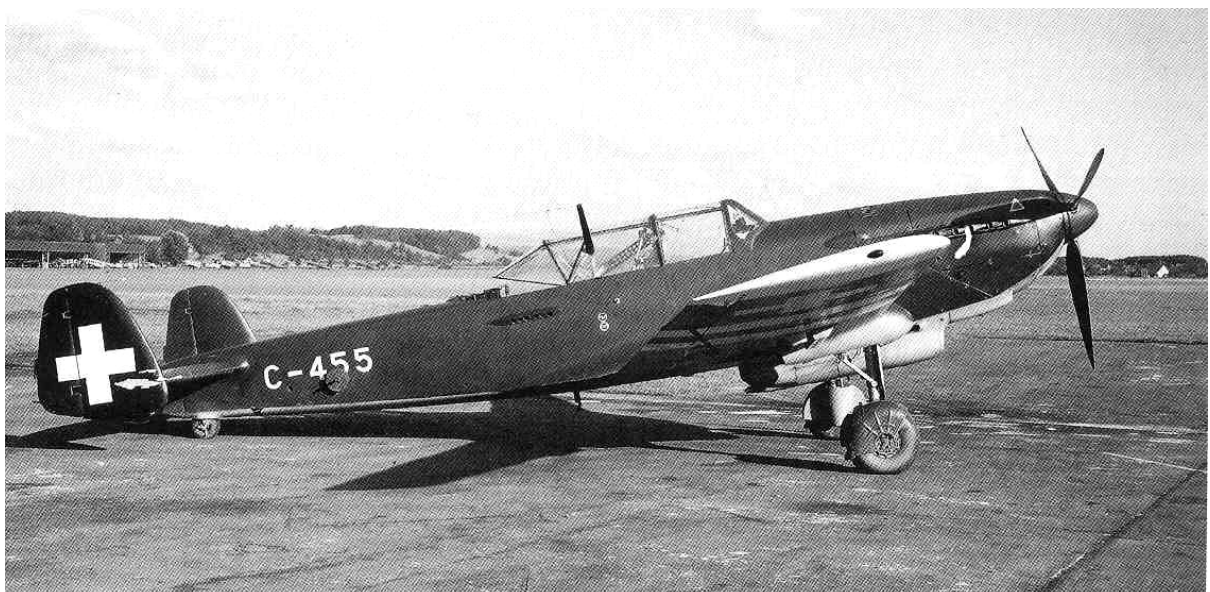


Das nebenstehende Foto zeigt den Empfänger der SE 010 Bordfunkausrüstung. Es handelte sich hierbei um einen Superheterodyn - Empfänger der mit 7 gleichartigen NF2 Röhren bestückt war.

**Jagdflugzeug Morane D-3801 mit Kurzwellenfunkanlage FG X
Die Antenne der Kurzwellen Funkanlage verläuft vom Mast
vor dem Cockpit zum Seitenleitwerk.**



**Kampfflugzeug C-3603 mit Kurzwellenfunkanlage FG X
Die Antenne der Kurzwellen Funkanlage verläuft vom
Mast beim Beobachtersitz zum rechten Seitenleitwerk**



Bei der Nachentwicklung konnten einige Anpassungen an die speziellen Bedürfnisse des Einsatzes bei der schweizerischen Flugwaffe verwirklicht werden. So konnte der Pilot vom Cockpit aus durch den elektromechanischen Telaccord – Zusatz während des Fluges fünf voreingestellte Rast - Frequenzen auswählen. Sowohl beim Sender und Empfänger wie auch beim Anpassungsgerät für die Flugzeugantenne, welches für den Einsatz im gesamten Frequenzband von 6 – 12 MHz notwendig wurde, erfolgte die Frequenzabstimmung durch hochwertige keramische Variometer mit eingebrannten Silberwicklungen.



Die Frequenzstabilisierung erfolgte durch eine statische Temperaturkompensation bei welcher der positive Temperaturkoeffizient der Variometer durch das Parallelschalten von Keramikkondensatoren mit negativen Temperaturkoeffizienten kompensiert wurde. Die relative Langzeit - Frequenzkonstanz der im gesamten Frequenzbereich abstimmbaren Sender und Empfänger lag infolge des rauen Bord-einsatzes jedoch kaum über 5×10^{-4} zudem hatte die Telaccord - Abstimmvorrichtung beim Einlaufen auf die Rastfrequenz nur eine begrenzte Treffsicherheit.

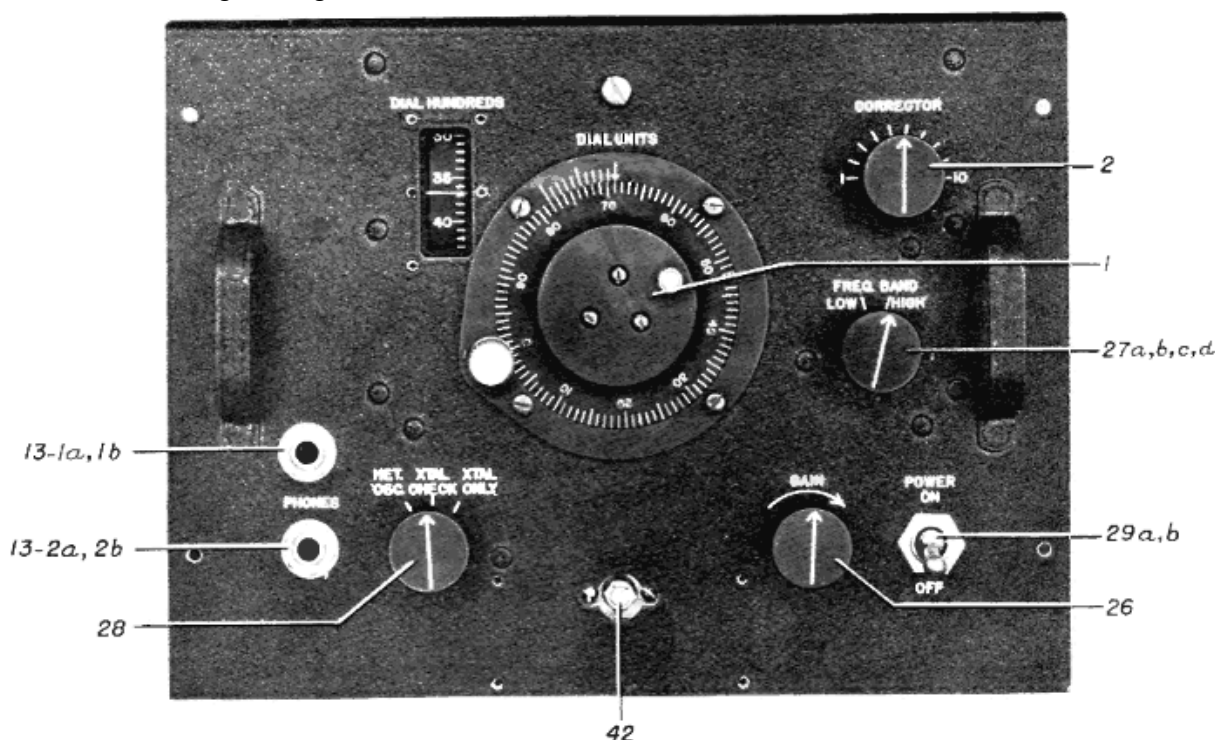


Auf der nebenstehenden Teilansicht des SE 010 Empfängers ist die schwarze Skala der Frequenzabstimmung etwas deutlicher zu erkennen. Der Antrieb der Frequenzabstimmung erfolgt über ein Zahnrad - Vorgelege durch den kleinen Elektromotors des Telaccord Zusatzes. Auf der linken Seite befindet sich das Umlenkgetriebe für die vom Piloten vom Cockpit aus bedienbare manuelle Frequenzfeinabstimmung des Empfängers.

Mit der SE010 Funkausrüstung konnte auf Grund der kompakten Bauweise gegenüber früheren Geräten eine wesentliche Platz- und Gewichtseinsparungen erzielt werden, die Ausrüstung kam in ihrer konstruktiven Ausführung der im Zweiten Weltkrieg berühmten deutschen FuG10 Bordfunkgeräte - Familie schon recht nahe. Im Einsatz für den Flugbetrieb waren die SE010 Funkausrüstungen jedoch sehr unterhaltsintensiv, häufige auftretende Komponenten- und Röhrenausfälle bedingten tägliche Kontrollen und öfters Unterhaltsarbeiten vor den Flugeinsätzen.

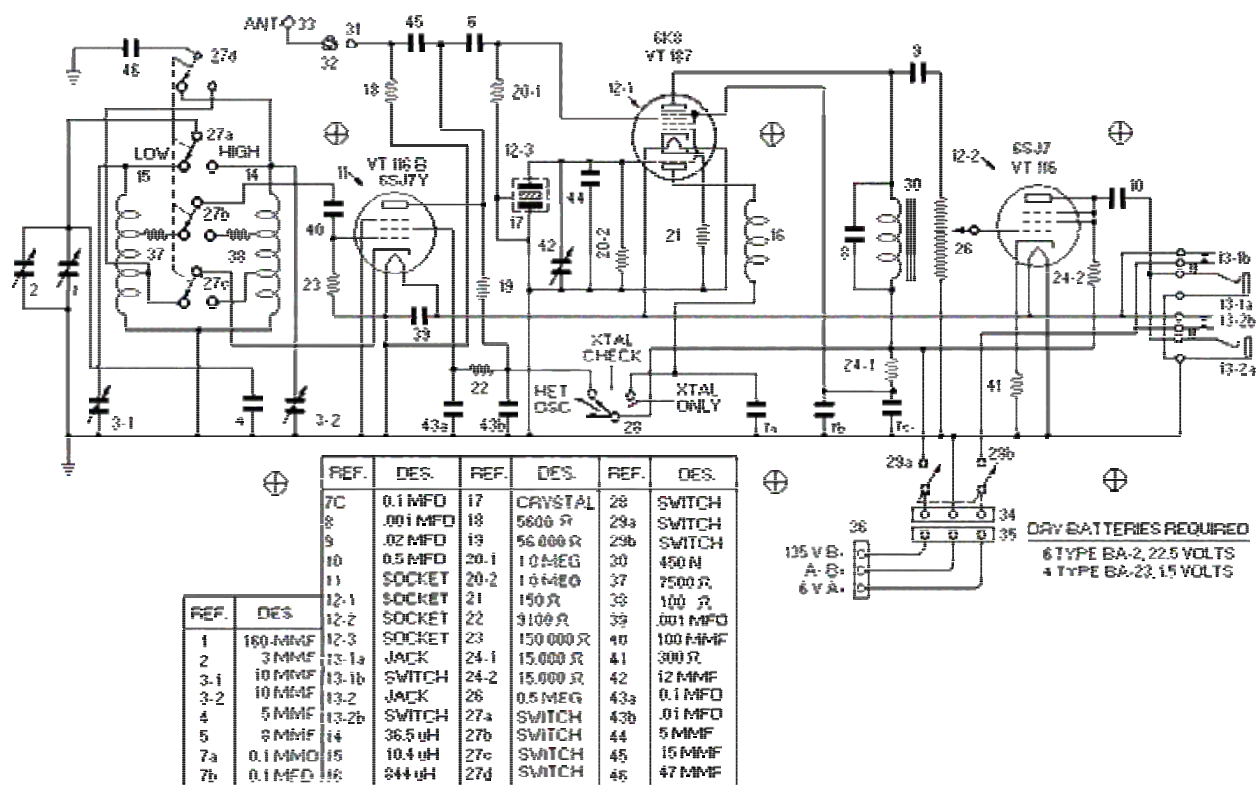
Als Frequenznormal wurden für die Abstimmarbeiten die aus Beständen der US - Army stammenden Frequenzmesser BC-221 (siehe die Frontplatte in der Figur auf der folgenden Seite) verwendet. Der Frequenzmesser BC-221 war ein in der damaligen Zeit sehr begehrtes Präzisionsinstrument, das nach dem Zweiten Weltkrieg in vielen Ländern beim Militär aber auch in Industrielaboratorien grosse Verbreitung fand. Es konnten damit Frequenzen im Bereich von 125 kHz bis 20 MHz mittels der Schwebungsmethode auf einfache Art mit relativ guter Genauigkeit gemessen werden.

Das Gerät arbeitete nach dem Ueberlagerungs – Prinzip und verfügte über einen internen frequenzvariablen Oszillator mit dem die Frequenz von Empfängern oder Sendern durch Vergleich gemessen werden konnte.



Für die interne Eichung des frequenzvariablen Oszillators war im Gerät ein 1000 kHz Quarzoszillator vorhanden. Das Gerät arbeitete in den Bereichen 125 bis 250 kHz und 2 MHz bis 4 MHz. Bei Benützung der 2. 4. und 8. Oberwelle des unteren Bereiches konnte jede Frequenz zwischen 250 kHz und 2 MHz gemessen werden oder bei Benützung der 2. 4. und 5. Oberwelle des oberen Bereiches jede Frequenz zwischen 4 und 20 MHz. Die nachstehende Figur zeigt Schema und Stückliste des BC-221 Frequenzmessers.

(Die Referenz Nummern korrespondieren mit denjenigen auf der Frontplatten - Figur)



Jedes Gerät verfügte über ein individuelles Tabellenwerk (siehe nachstehende Figur) aus dem die Frequenzen in Funktion der Skaleneinstellung herausgelesen werden konnte.

170-175		175-180	
FREQUENCY	DIAL	FREQUENCY	DIAL
170.0	170.0	175.0	175.0
170.1	170.1	175.1	175.1
170.2	170.2	175.2	175.2
170.3	170.3	175.3	175.3
170.4	170.4	175.4	175.4
170.5	170.5	175.5	175.5
170.6	170.6	175.6	175.6
170.7	170.7	175.7	175.7
170.8	170.8	175.8	175.8
170.9	170.9	175.9	175.9
171.0	171.0	176.0	176.0
171.1	171.1	176.1	176.1
171.2	171.2	176.2	176.2
171.3	171.3	176.3	176.3
171.4	171.4	176.4	176.4
171.5	171.5	176.5	176.5
171.6	171.6	176.6	176.6
171.7	171.7	176.7	176.7
171.8	171.8	176.8	176.8
171.9	171.9	176.9	176.9
172.0	172.0	177.0	177.0
172.1	172.1	177.1	177.1
172.2	172.2	177.2	177.2
172.3	172.3	177.3	177.3
172.4	172.4	177.4	177.4
172.5	172.5	177.5	177.5
172.6	172.6	177.6	177.6
172.7	172.7	177.7	177.7
172.8	172.8	177.8	177.8
172.9	172.9	177.9	177.9
173.0	173.0	178.0	178.0
173.1	173.1	178.1	178.1
173.2	173.2	178.2	178.2
173.3	173.3	178.3	178.3
173.4	173.4	178.4	178.4
173.5	173.5	178.5	178.5
173.6	173.6	178.6	178.6
173.7	173.7	178.7	178.7
173.8	173.8	178.8	178.8
173.9	173.9	178.9	178.9
174.0	174.0	179.0	179.0
174.1	174.1	179.1	179.1
174.2	174.2	179.2	179.2
174.3	174.3	179.3	179.3
174.4	174.4	179.4	179.4
174.5	174.5	179.5	179.5
174.6	174.6	179.6	179.6
174.7	174.7	179.7	179.7
174.8	174.8	179.8	179.8
174.9	174.9	179.9	179.9
175.0	175.0	180.0	180.0

CRYSTAL CHECK POINT: 170.0 175.0 180.0

Unter Berücksichtigung sämtlicher Fehler welche durch Temperatureinflüsse, Variationen in der Stromversorgung, mech. Vibrationen etc. entstehen konnten, wies das Gerät bei 4 MHz eine Frequenzgenauigkeit von 0.034 % auf. **Das entspricht einer relativen Genauigkeit von 3.4×10^{-4} oder einer Frequenzabweichung von bis zu 1360 Hz.**

Kurzwellen-Flugfunk in der Zeit nach dem Zweiten Weltkrieg

Der Kanalmangel im Kurzwellengebiet hat nach dem Zweiten Weltkrieg dazu geführt, dass der Funksprechverkehr über kurze Distanzen in dicht beflogenen Ländern auf Ultrakurzwellen umgestellt wurde. Zudem schränkte die Internationale Rundfunkkonferenz von Atlantic City im Jahre 1947 die zulässige Frequenztoleranz für ortsveränderliche Funkstellen auf 2×10^{-4} ein, bezogen auf die höchste Frequenz der SE010 Ausrüstung ist dies 2.4 kHz. Obwohl die Funktion der in den frühen vierziger Jahren entwickelten SE010 Ausrüstungen, dank der 40 kHz ZF - Bandbreite und der manuellen Frequenznachstimmung des Empfängers, die vom Cockpit aus bedienbar war, knapp erfüllt wurde, zeichnete sich doch in der zweiten Hälfte der vierziger Jahre auch in der Schweiz das Ende der Kurzwellen - Epoche für den Flugfunk ab.

Die Kurzwellenverbindungen genügten den zunehmenden operativen Ansprüchen nicht mehr. Eine Alternative wäre zweifellos der Uebergang auf Einseitenband-Technik gewesen. Dies hätte eine Reduktion der Kanalabstände ermöglicht. Um jedoch eine gute Sprachverständlichkeit im Einseitenbandbetrieb zu gewährleisten darf die zwischen Sender und Empfänger zulässige Frequenzabweichung nicht mehr als 50 Hz betragen. Dies hätte bei der Frequenzerzeugung eine hohe Langzeitstabilität im Bereich von 10^{-6} bis 10^{-7} erfordert. Für Geräte welche im Bordbetrieb verwendet wurden, waren derart hohe Frequenzstabilitäten jedoch erst mit der Technik der sechziger Jahre zu realisieren.

VHF - Flugfunk in der Schweizer Luftwaffe

Im Jahre 1948 wurden zur Ergänzung der Propellerkampfflugzeuge aus der Zeit des Zweiten Weltkrieges 130 Flugzeuge P-51 «Mustang» aus Ueberschuss - Beständen der US - Airforce in Europa beschafft. Diese standen als Jäger, Jagdbomber und Aufklärer bis 1957 im Einsatz.



Flugzeug P51 Mustang mit VHF Funkanlage SE 013



Flugzeug DH100 Vampire mit VHF Funkanlage SE 012

Die von Flugplätzen der US - Airforce im besetzten Deutschland nach Dübendorf überflogenen P-51 «Mustang» waren mit der **bereits im VHF Gebiet** arbeitenden Funkanlage SCR-522 (in der Schweiz später als SE013 bezeichnet) ausgerüstet.

In der schwarzen Box unten rechts befindet sich das aus der Empfängereinheit BC-624 und dem Senderteil BC-625 bestehende Funkgerät SCR-522. Die Stromversorgung des Funkgerätes erfolgt aus dem separaten Dynamotor PE-94-A der sich links in der kleineren Box befindetet. Beim Dynamotor PE-94-A handelt es sich um einen Einankerumformer der die Anodenspannungen für das Funkgerät aus dem 28 Volt Bordnetz des P-51 «Mustang» erzeugt.

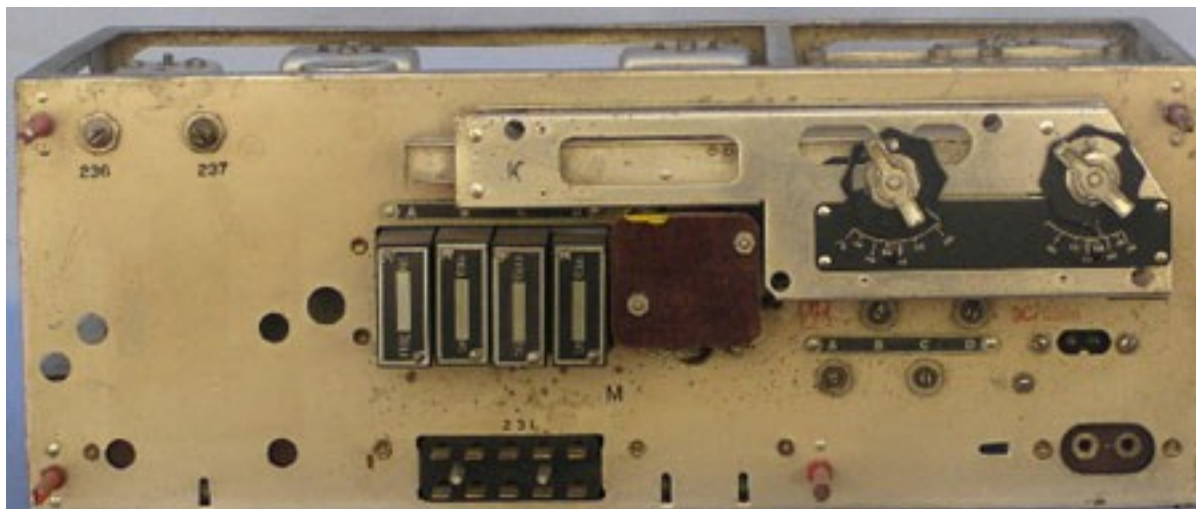


Die SCR-522 Funkausrüstungen wurden von der Bendix Radio Corporation in Baltimore Anfangs der vierziger Jahre aus einem Prototyp des englischen TR 5043 Funkgerätes für den Einsatz in Flugzeugen der US Airforce abgeleitet. Die SCR-522 Ausrüstung kam während des Zweiten Weltkrieges praktisch in sämtlichen Flugzeugen der US Airforce zum Einsatz, wurde aber auch in erheblicher Anzahl als TR 5043 in den Flugzeugen der Royal Airforce verwendet. Beim SCR-522 handelte es sich um einen der ersten UKW - Senderempfänger (sog. Transceiver) für den Sprechfunkverkehr, der sich Dank seinem robusten Aufbau im Bordbetrieb ausgezeichnet bewährte. Das SCR-522 Funkgerät arbeitete mit Amplitudenmodulation im UKW Frequenzgebiet von 100 – 156 MHz.

Der Sender und der Empfänger waren für den Sprechfunkverkehr mit Boden- oder Flugzeugstationen auf vier quarzgesteuerten Kanälen ausgelegt worden.

Wegen der günstigeren Unterbringung in Flugzeugen konnten die Frequenzkanäle über ein Fernbedienungsgerät angewählt werden. Die Frequenzerzeugung im Sender und im Empfänger erfolgte durch Vervielfachen der Quarzfrequenz. Die Frequenzen der in den SCR-522 verwendeten CR-1A Quarze lagen im Bereich von 8 - 9 MHz.

Die Foto zeigt die Frontseite der BC-624 Empfängereinheit der SCR-522 Ausrüstung, auf dem Bild sichtbar sind die vier CR-1A Quarze und der Kanalwahl-Mechanismus. Die Frontseite der BC-625 Sendereinheit hat ein praktisch identisches Aussehen.



Für eine gewünschte Empfangsfrequenz konnte zB mit der nachstehenden Gleichung die hierzu erforderliche Quarzfrequenz errechnet werden:

$$F = fr - 12 (IF) \times 1000, \text{ geteilt durch } H$$

wobei:

F = Quarzfrequenz in kHz

fr = die gewünschte Empfangsfrequenz in MHz

H = die Harmonische der Quarzfrequenz

Die Zahl 12 entspricht der Zwischenfrequenz des Empfängers in MHz. Die Harmonische H der Quarzfrequenz kann aus der nachstehenden Tabelle entnommen werden:

11	100 - 108 MHz,	12	108 - 116 MHz,	13	116 - 124 MHz,	14	124 - 132 MHz
15	132 - 140 MHz,	16	140 - 148 MHz,	17	148 - 156 MHz		

Bei den in den SCR-522 Ausrüstungen verwendeten Quarzen handelte es sich um druckmontierte Dickenschwinger die in HC-11/U Halter montiert waren.

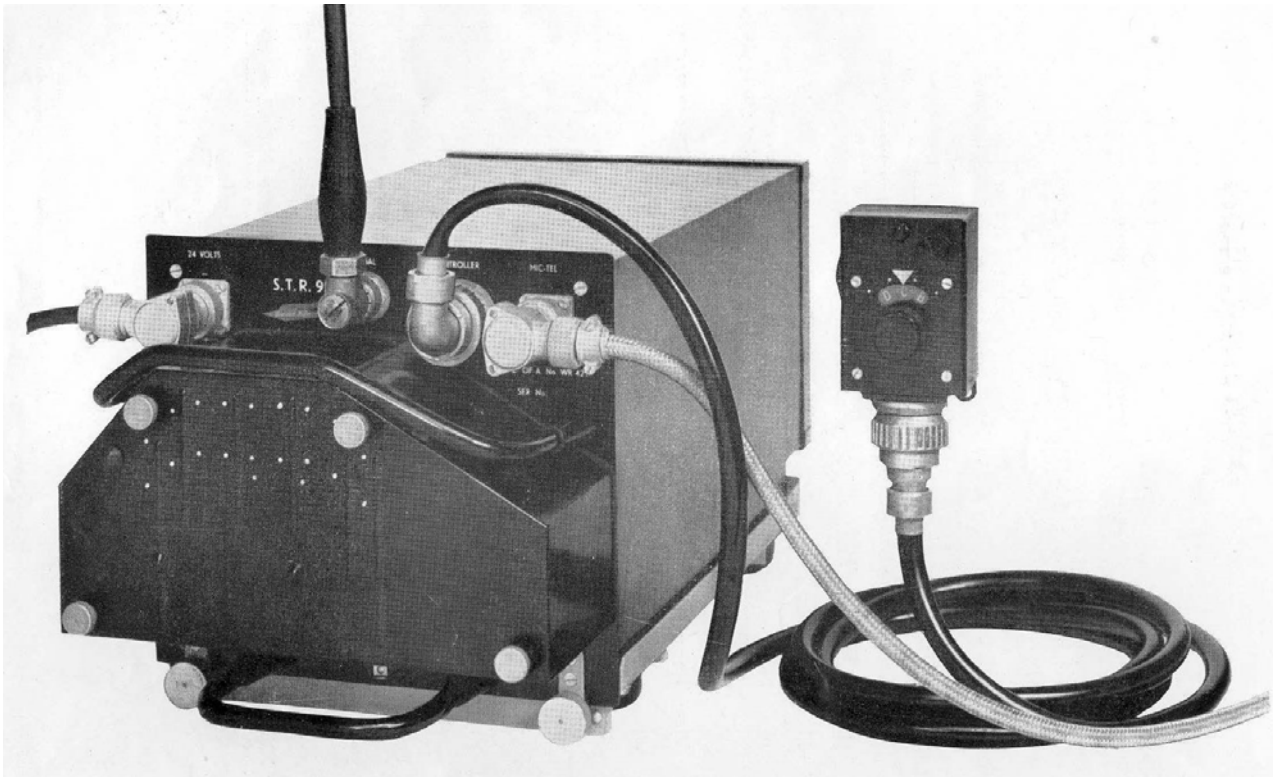


Die unter der Bezeichnung CR-1A normierten Quarze wurden von verschiedenen Firmen für den Frequenzbereich von 3.6 – 10 MHz hergestellt. Die CR-1A Quarze waren für den Betrieb in Parallelresonanz ausgelegt und arbeiten auf ihrer Grundfrequenz. Die Frequenztoleranz betrug $\pm 0.02\%$ ($\pm 2 \times 10^{-4}$) für den Temperaturbereich von -55 bis +90° C.

Auf Grund der zulässigen Toleranz der CR-1A Quarze mussten sowohl beim Sender wie beim Empfänger bei 150 MHz im Extremfall Frequenzabweichungen von ± 30 kHz in Kauf genommen werden. Die Bandbreite des Empfänger ZF-Verstärkers von 120 kHz trug dieser Tatsache allerdings Rechnung. Die praktischen Erfahrungen mit den SCR-522 zeigten, dass Probleme infolge Frequenzabweichungen nur beim Funkverkehr mit anderen Gerätetypen auftraten.

Ebenfalls 1948 wurde in England eine erste Serie von 75 Jet-Kampfflugzeugen vom Typ De Havilland DH-100 Mk 6 «Vampire» bestellt. Dieser Serie folgte eine Lizenzfabrikation von 103 Flugzeugen in der Schweiz. Die Weiterentwicklung des Flugzeuges DH-100 führte zum Flugzeug DH-112 «Venom». Von diesem Modell wurden total 250 Flugzeuge einschliesslich der Triebwerke in der Schweiz in Lizenz gebaut.

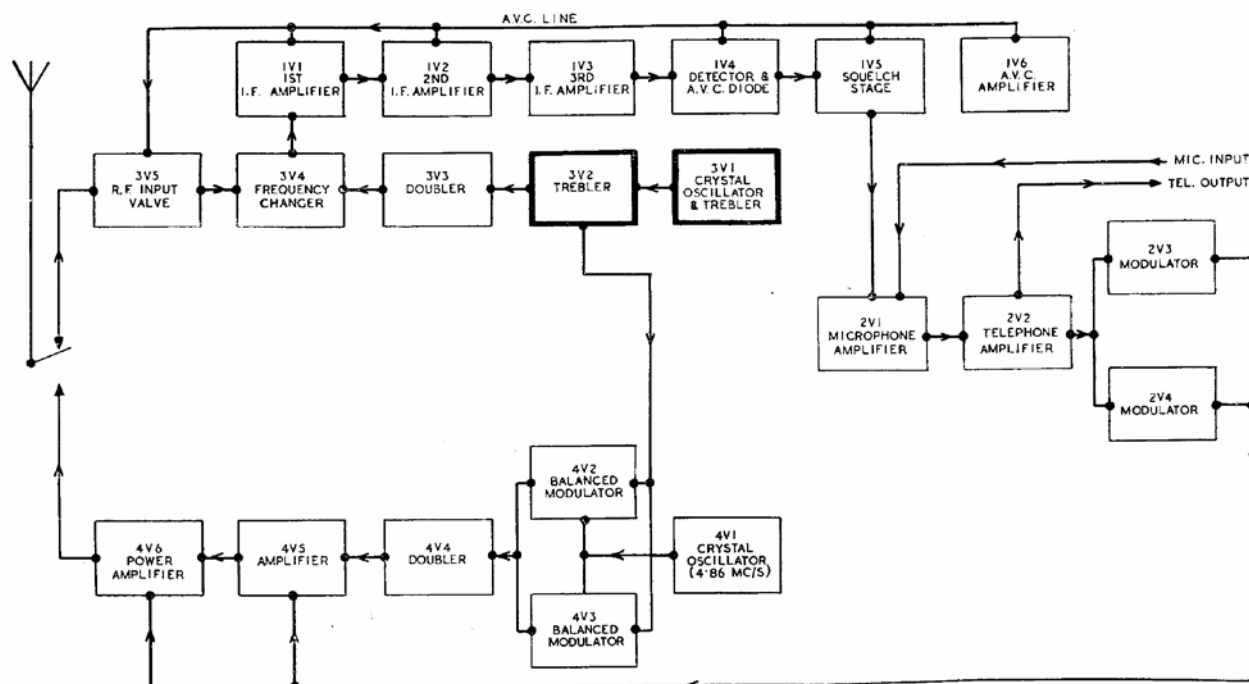
Die DH-100 Vampire waren ebenfalls bereits mit einem im VHF-Gebiet arbeitenden Funkgerät ausgerüstet. Es handelte sich dabei um eine Nachkriegsentwicklung der Standard Radio mit der Bezeichnung STR9. Das bereits sehr kompakt gebaute Sendeempfangsgerät verfügte über 4 quarzgesteuerte Kanäle. Das nebenstehende Foto zeigt ein für die Venom DH -112 Flugzeuge geliefertes, bereits auf 10 Kanäle weiterentwickeltes Gerät STR9X.



Bei Verwendung von HC6/U Quarzkristallen liegt die Langzeitfrequenzstabilität des STR9X Senders für Einsatzhöhen bis 12'000 m/M bei ca. $\pm 0.001\%$, die -6 dB Bandbreite des STR9X Empfangsteiles beträgt 40 kHz.



Die STR9 und STR9X Geräte benötigten pro Frequenzkanal nur noch einen Quarz für Sendung und Empfang. Wie aus dem nachstehenden Bockschema des STR9X Gerätes ersichtlich, wird die Sendefrequenz durch Addition einer Hilfsfrequenz ($^{ZF}/_2$) aus der Stufe 4V1 zusammen mit der Ueberlagerungsfrequenz des Empfängers erzeugt.



Die erforderliche Quarzfrequenz F_x für die 10 Frequenzkanäle ergibt sich aus der Beziehung:

$$F_x = \frac{F_c - 9.72 (ZF)}{18}$$

wobei:

F_x = Quarzfrequenz in MHz

F_c = Trägerfrequenz des gewählten Kanales in MHz

9.72 = Zwischenfrequenz des Empfängers in MHz

Für die Kanalfrequenzen zwischen 115 – 145 MHz lagen die eigentlichen Quarzfrequenzen zwischen 5.682 – 8.148 MHz.

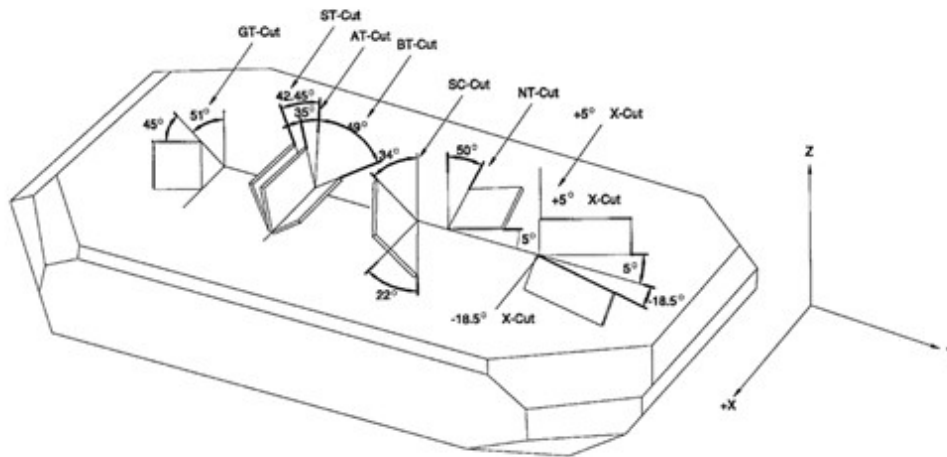
Um bestimmte gewünschte Eigenschaften bei Schwingquarzen zu erhalten, z.B. kleine Temperaturkoeffizienten der Frequenz, muss die Quarzscheibe in bestimmter Weise gegen die optische Kristallachse orientiert sein. Als günstig erwies sich der so genannte AT-Schnitt, bei dem in einem Winkel von 31.15° zur optischen Achse geschnitten wird. Die so gewonnenen Quarzscheiben schwingen im Dickenschermmodus und besitzen dabei eine relativ geringe Temperaturempfindlichkeit.

Zur Anregung der Quarzscheibe im Dickenschwingermodus muss sich auf der Ober- und Unterseite der Quarzscheibe je eine Elektrode befinden, die mit einem äusseren Wechselfeld angeregt wird. Häufig werden im Vakuum aufgedampfte Goldelektroden verwendet wie dies beim HC6/U Quarz der Fall war.

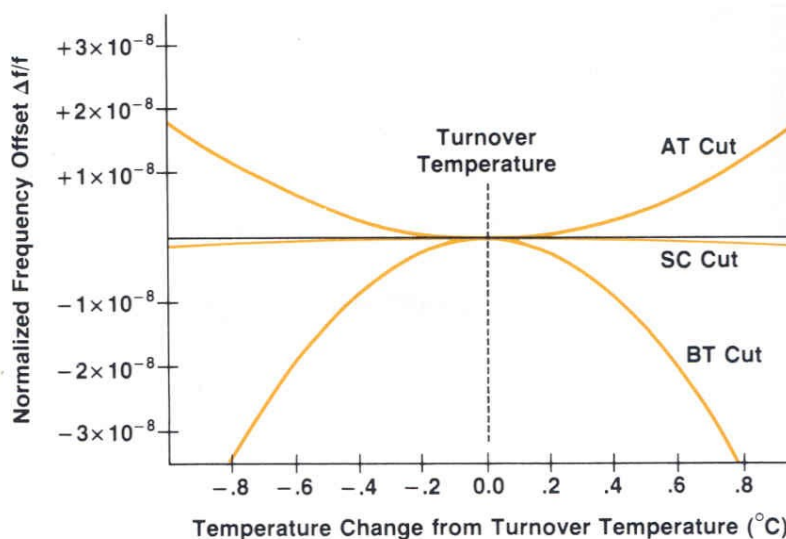


Das STR9X Funkgerät wurde für den Quarztyp HC6/U (siehe nebenstehende Foto eines geöffneten Exemplares) ausgelegt. Der Resonator ist im Gegensatz zu den in den SE013 verwendeten CR-1A Quarzen nicht mehr druckmontiert sondern wird mit zwei feinen Drähten gehalten welche an die auf die Quarzscheibe aufgedampften Goldelektroden angelötet sind. Das Resonatorsystem befindet sich in einem druckdichten mit Stickstoff gefüllten, verlöteten Gehäuse.

Die Technology der Schwingquarze hatte in den U.S.A. während des Zweiten Weltkrieges unter anderem durch die Einführung der Röntgen - Diffraktion zur Bestimmung der optischen Quarzkristallachse und zur präzisen Messung der Schnittwinkel eine wesentliche Entwicklung durchlaufen. Ab ca. 1943 wurde daher generell bei der Schwingquarz-Fertigung die Schnittkontrolle mit einem Röntgen - Goniometer durchgeführt. Es werden damit Schnittgenauigkeiten von ca. $1/50^\circ$ erreicht. Die Figur zeigt die Lage der üblichen Quarzschnitte im Achsensystem des Kristalls



Die konventionellen AT- und BT- Quarzschnitte sind Schnitte deren Achse gegenüber dem Kristallachsensystem nur in einer Ebene gedreht wird. Auf Grund weiterer Forschung wurde dann 1965 der SC- Quarzschnitt entdeckt welcher eine bedeutend geringere Frequenzabhängigkeit vom Temperaturgradienten aufweist als die AT- und BT- Schnitte.



Beim SC- Schnitt handelt es sich um einen sog. Stress - kompensierten Schnitt dessen Achsen gegenüber den Kristallachsen in zwei Ebenen gedreht sind.

Auf Grund der geringen Frequenzabhängigkeit in Funktion der Temperatur weist der der SC- Quarzschnitt den Vorteil auf, dass die damit ausgerüsteten Oszillatoren über eine wesentlich verkürzte Aufwärmzeit verfügen. Durch den Stress - kompensierten Schnitt wird zudem auch die Langzeit-Alterung des Schwingquarzes reduziert und die Kurzzeitstabilität erhöht. Die erhöhte Kurzzeitstabilität führt zu einem geringeren Phasenrauschen was sich speziell bei Frequenzvervielfachung als Vorteil erweist, da sich das Phasenrauschen bei der Vervielfachung um 20 dB pro Dekade erhöht.

Bei den HC6/U Quarzen handelt es sich um eine, gegenüber den in der SCR-522 Funkausrüstung verwendeten CR-1A Quarzen, weiterentwickelte Nachkriegsausführung. Die Frequenztoleranz beträgt $\pm 0.005\%$ ($\pm 5 \times 10^{-5}$) für den Temperaturbereich von -55 bis $+ 105^\circ \text{C}$.

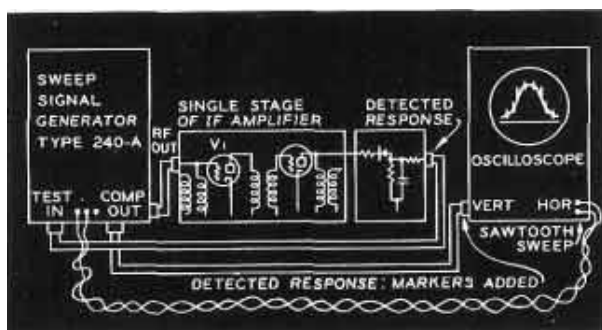
Auf Grund der zulässigen Toleranz der HC6/U Quarze musste bei der VHF Funkausrüstung STR9X bei 150 MHz beim Empfänger im Extremfall mit einer Frequenzabweichung von $\pm 7.5 \text{ kHz}$ und beim Sender wegen des zusätzlichen $^{ZF}/_2$ Quarzoszillators mit ca. $\pm 9 \text{ kHz}$ gerechnet werden. Die Bandbreite des STR9X ZF-Verstärkers von 40 kHz trug dieser Tatsache allerdings Rechnung.

Die neu beschafften Flugzeugtypen erforderten Ende der vierziger Jahre eine rasche Verlagerung des Kurzwellen-Flugfunks in den Ultrakurzwellen-Bereich. Dies warf bei den für den Einsatz und Unterhalt verantwortlichen Stellen der Schweizer Luftwaffe eine Reihe von neuen Problemen auf. Die Flugplätze mussten mit neuen Funkanlagen ausgerüstet werden um auch eine Funkverbindung zwischen den Flugzeugen und den Bodenstellen zu ermöglichen. Dabei waren auch die besonderen Ausbreitungsbedingungen der Ultrakurzwellen zu berücksichtigen, in ausgedehnten Versuchsreihen mussten diese zuerst ermittelt werden.

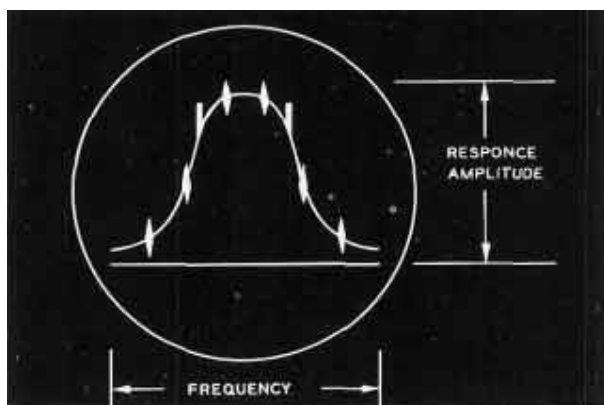
Um die erforderliche Funküberdeckung sicherzustellen mussten zudem wegen den speziellen topographischen Verhältnisse in der Schweiz Relaisfunkstellen im Gebirge errichtet werden. Für die neuen Bodenfunkstellen der Flugplätze wurde in der gleichen Zeitperiode von der Radio Corporation of America (RCA) moderne leistungsstarke UKW-Sender die ebenfalls quarzgesteuert waren beschafft und installiert.

Die praktische Erfahrung nach der Einführung der verschiedenen VHF - Funkgerätetypen zeigte allerdings, dass zeitweise zwischen den verschiedenen Gerätetypen Probleme mit den Funkverbindungen auftraten. Verschiedene Symptome wiesen daraufhin, dass die Vorfälle eher durch Frequenzabweichungen als durch die speziellen Ausbreitungs- und Ueberdeckungs - Phänomene der Ultrakurzwellen verursacht wurden.

Zur genaueren Abklärung der Ursache wurde in der Folge bei einem STR9X Empfänger zusätzlich zum Empfangssignal das FM Signal eines Modell 240-A Sweep Generators der Boonton Radio Corporation in den ZF-Verstärker eingekoppelt.



Die nebenstehende Figur zeigt die dabei verwendete Versuchsanordnung. Aus dem Sweep Signal Generator wird ein FM Signal von $9.72 \text{ MHz} \pm 50 \text{ kHz}$ zusätzlich zum Empfangssignal in den ZF-Verstärker eingespeist. Das demodulierte ZF-Signal gelangte via Signal Generator auf den Vertikalkanal eines Oszilloskopes. Die Zeitbasis des Oszilloskopes wird mit dem Sweep Signal des Generators synchronisiert.



Die nebenstehende Figur zeigt auf dem Bildschirm des Oszilloskopes das aus der oben beschriebenen Versuchsanordnung resultierende Signal. Die Glockenfigur entspricht der Selektionskurve des STR9X Empfänger - ZF-Verstärkers. Die auf der Selektionskurve erscheinenden vertikalen Striche werden durch mit unterschiedlicher Frequenz in den ZF-Verstärker einfallenden Empfangssignale verursacht. Daraus konnte die frequenzmässige Versetzung der auf dem gleichen Kanal arbeitenden Sender direkt ersehen werden.

Die eigentliche Ursache für die zeitweiligen Verbindungsprobleme der auf gleichen Kanälen arbeitenden Funkausrüstung lag somit in der Frequenzerzeugung aus den Schwingquarzen.

Auf Grund dieser Erkenntnis musste bei der Beschaffung der sehr hohen Anzahl von Schwingquarzen, welche für die Bestückung der neuen VHF Bordfunkgeräte SCR-522, STR9, STR9X und den zahlreichen Bodenfunkstationen erforderlich waren, ein besonderes Augenmerk auf die Frequenzgenauigkeit in Abhängigkeit der Temperatur gelegt werden.

Die Beschaffung der Schwingquarze erfolgte durch die Kriegstechnische Abteilung (KTA) anfänglich aus Ueberschussbeständen der amerikanischen Streitkräfte aus dem Zweiten Weltkrieg. Grundsätzlich war man jedoch bestrebt Quarze aus Neufertigungen, welche auf Grund der inzwischen erzielten Fortschritte engere Toleranzen aufwiesen, zu beschaffen. Die KTA begann Ende der vierziger Jahre mit einer eigenen Quarzfertigung in der Waffenfabrik Bern. Für die Bordfunkgeräte SCR522, STR9 und STR9X erfolgten auch umfangreiche Beschaffungen bei der Quarzkeramik in Stockdorf bei München - einer Tochterfirma von Rohde & Schwarz.

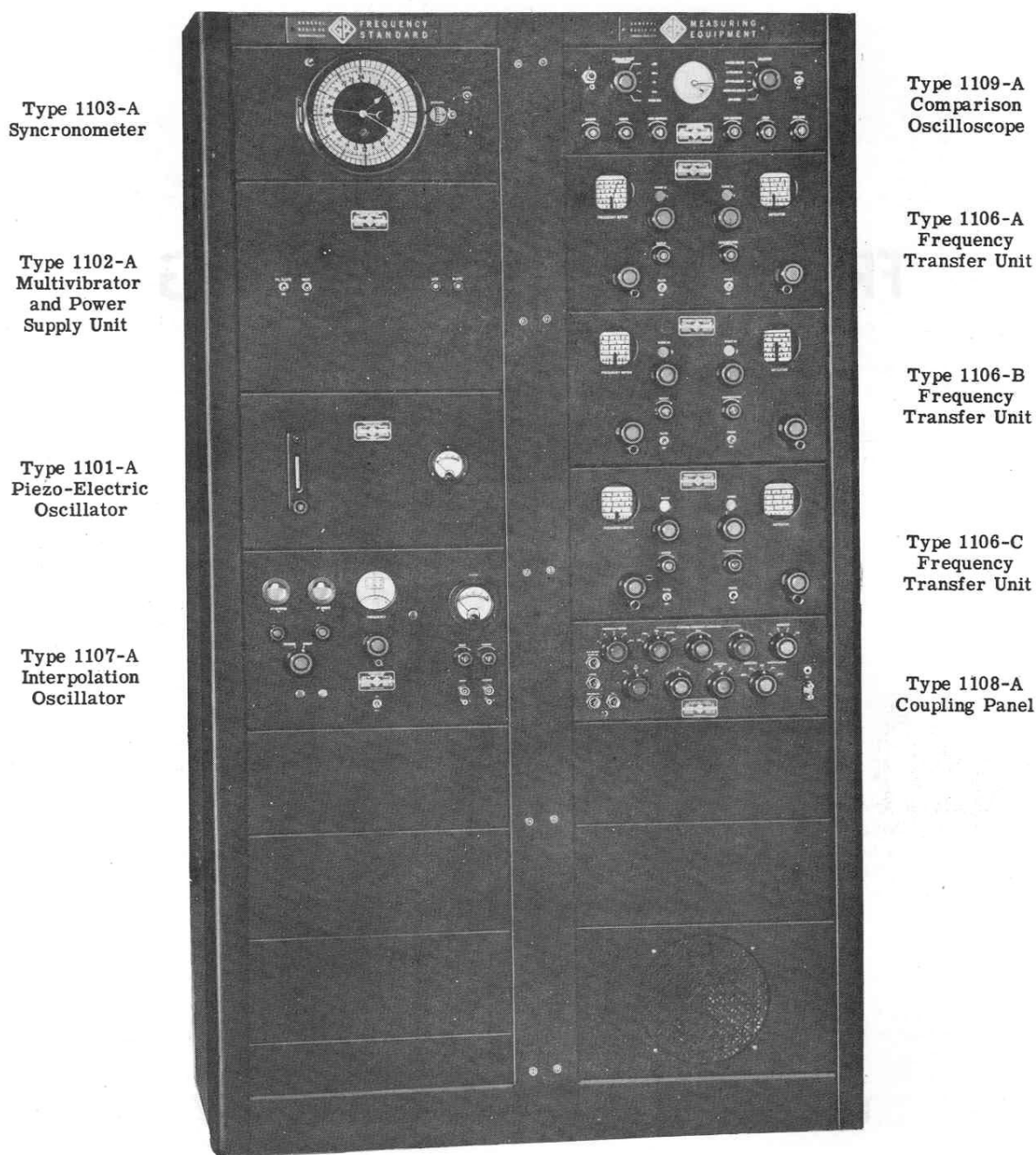
Für die Kontrolle der Quarz Parameter waren eine Reihe von Messungen notwendig welche neue Ausrüstungen, wie zum Beispiel Wärme- und Kälteschränke für das Messen des thermischen Verhaltens erforderten. Zudem mussten Versuchsschaltungen gebaut werden, welche die Nachbildung der in den verschiedenen Funkgerätetyphen vorliegenden elektrischen Parameter ermöglichten.

Für Frequenzmessungen im Megaherzbereich, mit einer relativen Genauigkeiten von mindesten $\pm 10^{-6}$ bis $\pm 10^{-7}$, wie dies für die Ueberprüfung der HC6/U Schwingquarze und auch im Hinblick auf die weitere Funkgeräte - Entwicklung erforderlich war, existierten Ende der vierziger Jahre nur wenige Ausrüstungen auf dem Markt. Da auch die Mittel für eine Eichung derartiger Messeinrichtung durch einen direkten Frequenz- oder Phasenvergleich damals noch nicht existierten, kamen hierfür eigentlich nur Quarzuhren in Frage wie sie seit Mitte der 30er Jahre in Observatorien und staatlichen Eichlaboratorien Eingang gefunden hatten.

Da die Zeit- und die Frequenzeinheit in einem direkten reziproken Verhältnis zueinander stehen, lassen sich Frequenzmessungen auch durch die Messung von Zeitintervallen durchführen. Die Genauigkeit der Quarzuhren konnte somit durch den Zeitvergleich über eine längere Periode, mit einer über Radio ausgestrahlten Normalzeit Emission bestimmt werden.

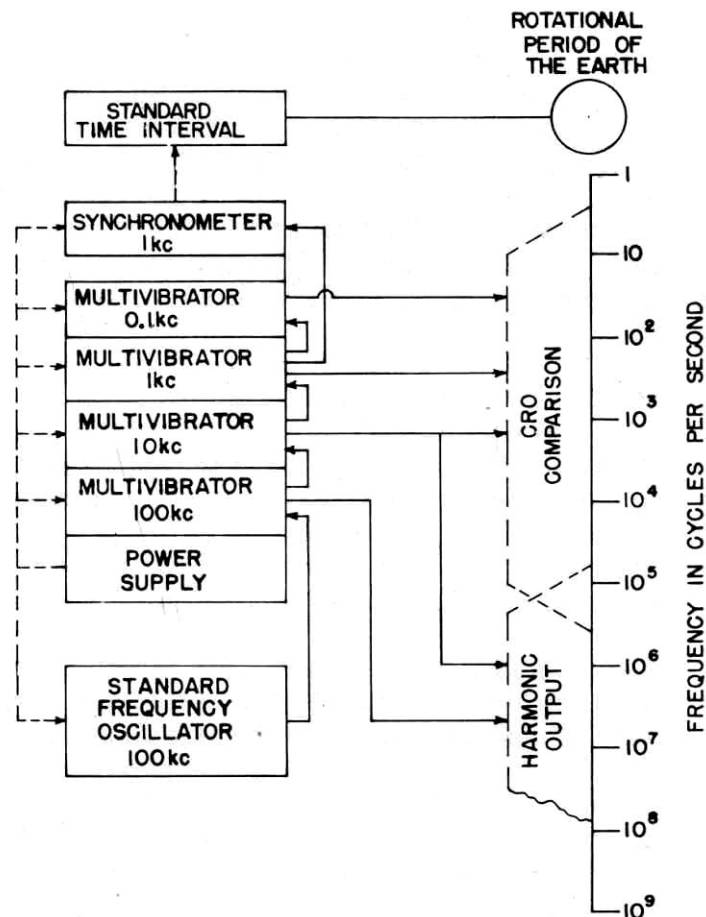
Die deutsche Firma Rohde & Schwarz in München und die amerikanische General Radio Company in Cambridge MD hatten sich bereits vor dem Zweiten Weltkrieg mit der Weiterentwicklung der Quarzuhr befasst. Im Jahre 1948 brachte General Radio ein nach dem Zweiten Weltkrieg neu entwickeltes Frequency Standard 1100-A samt den erforderlichen Zusatzausrüstungen in kommerzieller Ausführung auf den Markt.

Anfangs 1950 wurden in der Folge von der General Radio Company für die Kriegstechnische Abteilung (KTA) in Bern und die Direktion der Militärflugplätze in Dübendorf, je eine 1100-A Frequency Standard Ausrüstung sowie dem zugehörigen 1105-A Frequency Measuring Equipment (siehe nachstehende Abbildung) beschafft.



Das General Radio 1100-A Frequency Standard (siehe nachstehendes Blockschema) basierte auf einem für die damalige Zeit hochstabilen 100 kHz Quarzoszillator der in einer temperaturkontrollierten Umgebung betrieben wurde.

Zur Erzeugung von Oberwellen wurde das sinusförmige 100 kHz Signal des Quarzoszillators durch Multivibratoren in Rechtecksignale von 100 kHz, 10 kHz, 1 kHz und 100 Hz umgewandelt. Mit dem 1 kHz Signal wurde eine elektromechanische Synchronuhr mit 24 Stunden Anzeige betrieben, welche zudem über einen 1 Sekunden Kontakt verfügte mit dessen Hilfe Zeitvergleiche mit einem externen Zeitsignal durchgeführt werden konnten. Die Phase des Öffnungs - Zeitpunktes des 1 Sekunden Kontaktes konnte zu diesem Zweck über eine in 10 Millisekunden - Intervallen geeichte Mikroskala im Bereich einer Sekunde verstellt werden.



Gemäss Spezifikation soll der täglichen Frequenzdrift der General Radio 1100-A Ausrüstung nach einem Monat Betrieb $< 5 \times 10^{-8}$ und nach einem Jahr $< 0.5 \times 10^{-8}$ betragen. Der Kurzzeitstabilität der 100 kHz Schwingung soll $< 1 \times 10^{-9}$ und die Temperaturabhängigkeit der Frequenz $< 1 \times 10^{-7}$ pro 1°C betragen.

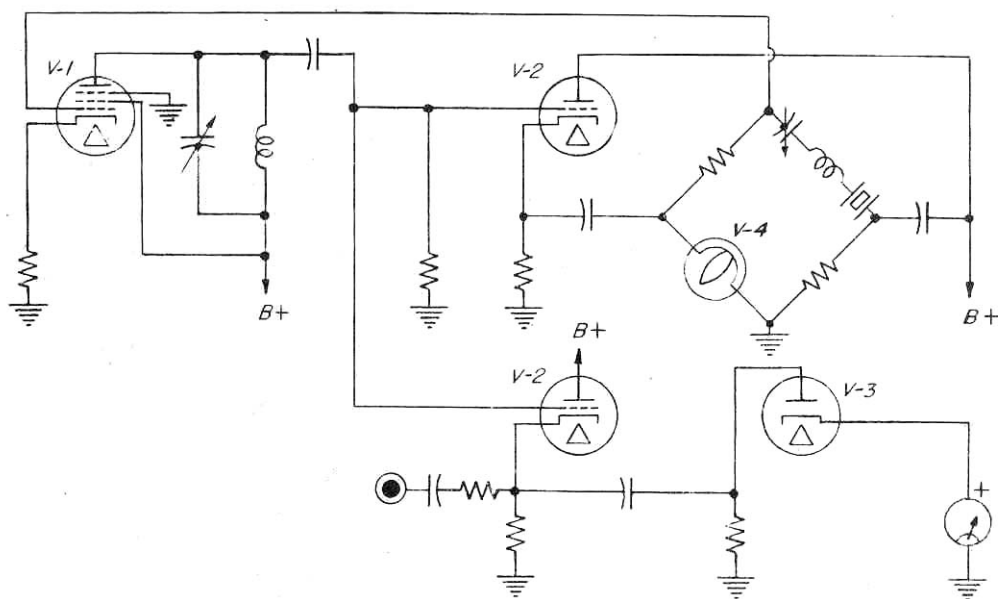


Das Foto zeigt den Schwingquarz des Oszillators. Es handelt sich um einen Längsschwinger der auf der 2. Harmonischen schwingt. Zu beachten ist die spannungsfreie Aufhängung des Quarzes in den Schwingknoten. Die Anregung des Quarzes erfolgt über die Goldelektroden. Die Frequenz des Oszillators wurde im Werk auf $100 \text{ kHz} \pm 0.5 \times 10^{-7}$ einjustiert. Die Temperatur des Schwingquarzes wird im Betrieb durch ein geregeltes Heizsystem innerhalb $\pm 0.01^\circ \text{C}$ konstant gehalten. Durch verändern der nominalen Betriebstemperatur von 60°C um $\pm 1^\circ \text{C}$ konnte nach einem Transport die Sollfrequenz wieder einjustiert werden.

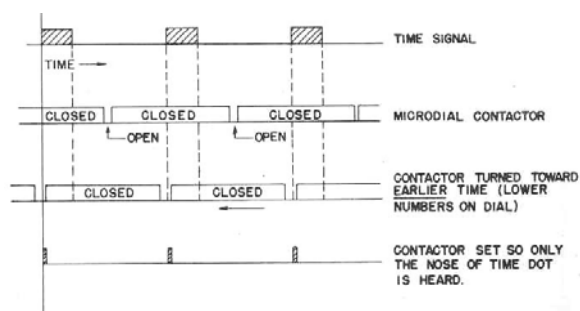
Prinzipielle Wirkungsweise des General Radio 1100-A Standard Oszillators

Der Oszillator besteht aus einer abgestimmten Verstärkerstufe V1 und einer Phasenkehrstufe V2 welche die Brückenschaltung mit dem in Serieresonanz betriebenen Schwingquarz treibt. Die Funktion des Oszillators wird durch das vom Ausgang der Brücke phasenrichtig in die Verstärkerstufe V1 zurück gekoppelte Signal unterhalten.

Beim Start des Oszillators ist der Heissleiter V4 noch kalt und besitzt einen geringen Widerstand. Wenn der Widerstand im Betrieb zunimmt, regelt sich die Brückenschaltung gegen das Gleichgewicht. Die Ausgangsspannung der Brücke reduziert sich dadurch, das Gleichgewicht wird erreicht wenn der Verlust zwischen Eingang und Ausgang der Brücke der Rückkopplungsverstärkung der Schaltung entspricht.



Das Foto zeigt die elektromechanischen Syn-
synchronuhr welche mit dem 1 kHz Signal des
1100-A Frequency Standard betrieben wird.
Auf der rechten Seite ist die Mikroskala des 1
Sekunden Kontaktes zu erkennen. Die Einstel-
lung des Schaltpunktes des Kontakts erfolgt
durch die links oben auf der Foto sichtbare
Öffnung.



Externes Zeitsignal

Schaltunkte des 1 Sekunden Kontaktes

Schaltpunkt in Koinzidenz mit externem Signal

Resultierendes Koinzidenzsignal

Wie bereits vorgängig erwähnt existierten zu Beginn der 50er Jahre noch keine Mittel um Frequenzgenauigkeiten in einer Größenordnung von 10^{-8} durch einen direkten Frequenz- oder Phasenvergleich zu bestimmen. Die Genauigkeit von Quarzuhren musste daher durch Zeitvergleich über eine längere Periode, gegenüber einem über Radio ausgestrahlten Normalzeitsignal bestimmt werden.

Die Differenz der die Uhr antreibende Frequenz lässt sich dabei in folgender Weise aus dem gemessenen Zeitunterschied bestimmen:

$$\frac{f_x - f_n}{f} = \frac{\Delta f}{f}$$

Wenn G der tägliche mittlere Gang in Millisekunden ist, so gilt

$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{-G}{0.864 \times 10^8} \quad \text{(Die Zahl im Nenner entspricht der Zahl der Millisekunden innerhalb eines Tages)}$$

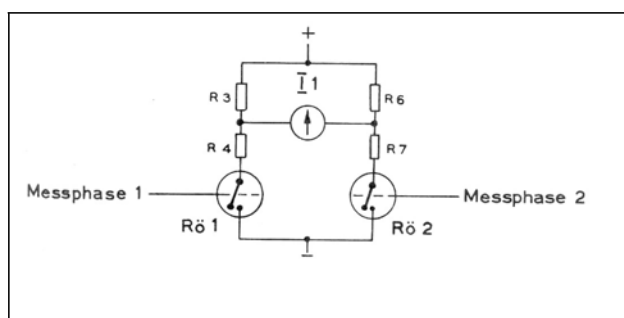
Als Gang wird die Änderung des Standes innerhalb 24 Stunden bezeichnet. Er ist für die X-Uhr positiv, wenn der X-Kontakt später kommt bzw. negativ wenn das Zeitzeichen früher kommt.

Aus der Gleichung geht hervor, dass 1 ms/pro Tag angenähert einer Frequenzdifferenz von 1×10^{-8} entspricht.

Für die Bestimmung der Frequenzdifferenz der General Radio Frequency Standard bei der Kriegstechnische Abteilung (KTA) in Bern sowie bei der Direktion der Militärflugplätze in Dübendorf wurde das täglich um 12 Uhr 30 über den Schweizerischen Mittelwellensender Beromünster ausgestrahlte Zeitzeichen des Observatorium Neuenburg benützt.

Grundsätzlich hätte hierbei für den Vergleich die oben erwähnte Mikroskala der elektromechanischen Synchronuhr verwendet werden können. Da die Mikroskala jedoch in 10 Millisekunden Intervallen unterteilt war, genügte die damit erreichbare Ablesegenauigkeit nicht ganz den Erfordernissen.

Für die Bestimmung der täglichen Zeitdifferenz wurde deshalb ein elektronische Zeitdifferenz Messgerät vom Typ CKB der Firma Rohde & Schwarz verwendet, das eine direkte Ablesung der Zeitdifferenz an einem Zeigerinstrument ermöglichte.

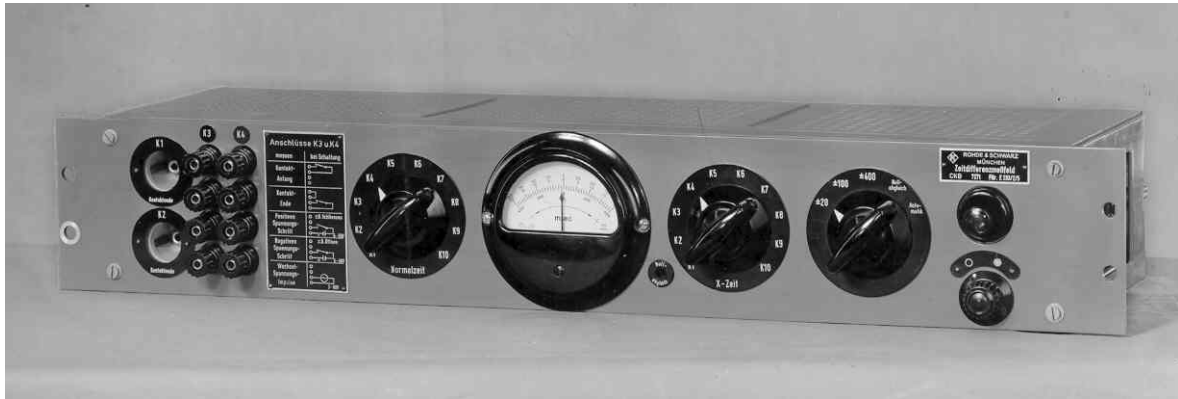


Das CKB Messgerät verfügte über eine aus Widerständen gebildete Brücke, die in der Diagonale das ballistische Messinstrument und in den beiden Brückenzweigen gittergesteuerte Stromtore enthält, die als Schalter wirken.

Die Stromtore werden durch die Messphasen gezündet. Das Instrument ist stromlos solange beide Stromtore gesperrt sind, und ebenso nach Zündung beider Stromtore. Während des zu messenden Zeitraumes ist nur eine Röhre leitend, das verstimmt die Brücke und bewirkt einen Strom in der Diagonalen. Dieser ruft einen der Messgrösse proportionalen ballistischen Zeigerausschlag des Instrumentes hervor.

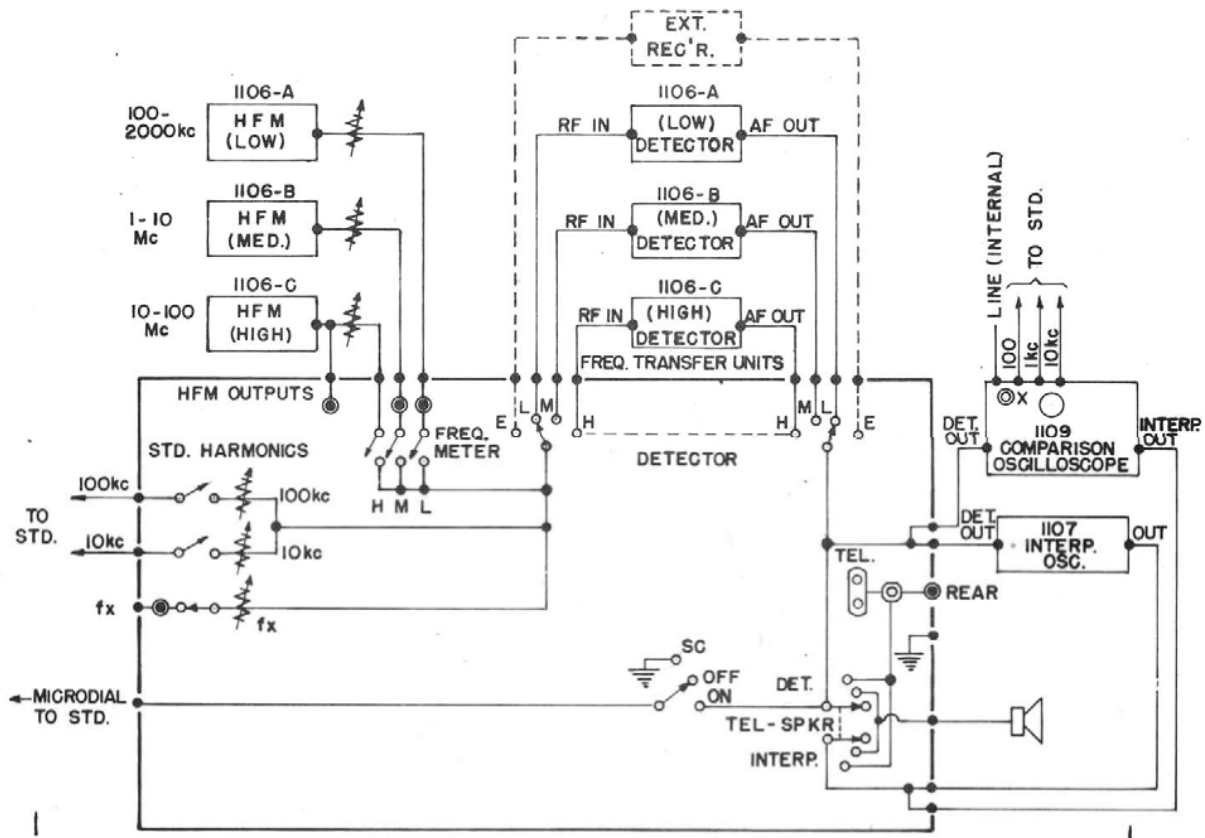
Die Richtung des Zeigerausschlages ist durch die zeitliche Aufeinanderfolge der Messphasen bestimmt. Das ballistische Instrument ermöglicht eine direkte Ablesung der Zeitdifferenz in Millisekunden.

Rohde & Schwarz Zeitdifferenz Messgerät CKB

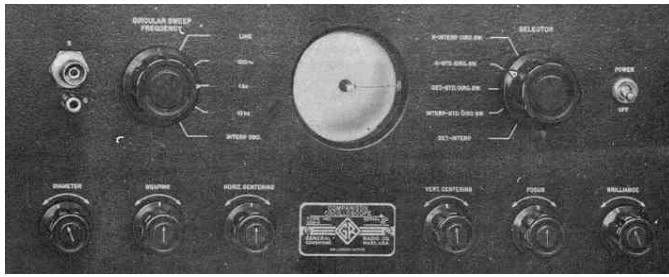


Frequenzmessungen mit dem 1100-A Frequency Standard

Grundsätzlich enthält das 100 kHz Rechtecksignal des 1100-A Frequency Standards Oberwellen welche bis 75 MHz und höher liegen. Die Stärke der Oberwelle nimmt allerdings mit zunehmender Ordnungszahl ab, so dass ein direkter Vergleich der zu messenden Frequenz mit Oberwellen höherer Ordnung zunehmend schwieriger wird. Die im rechten Rack (siehe Figur auf Seite 9) neben dem 1100-A Frequency Standard untergebrachte Frequency Measuring Ausrüstung (siehe nachstehendes Blocksche-ma) dient daher zusammen mit dem unter dem Quarzoszillator untergebrachten In-terpolations-Oszillator der eigentlichen Frequenzmessung.



Die Frequenzmessung erfolgte nach dem Ueberlagerungsverfahren, wobei die Differenzfrequenz mit Lissajous Figuren auf dem Oszilloscop dargestellt oder akustisch mit einem Lautsprechersystem hörbar gemacht wurde.

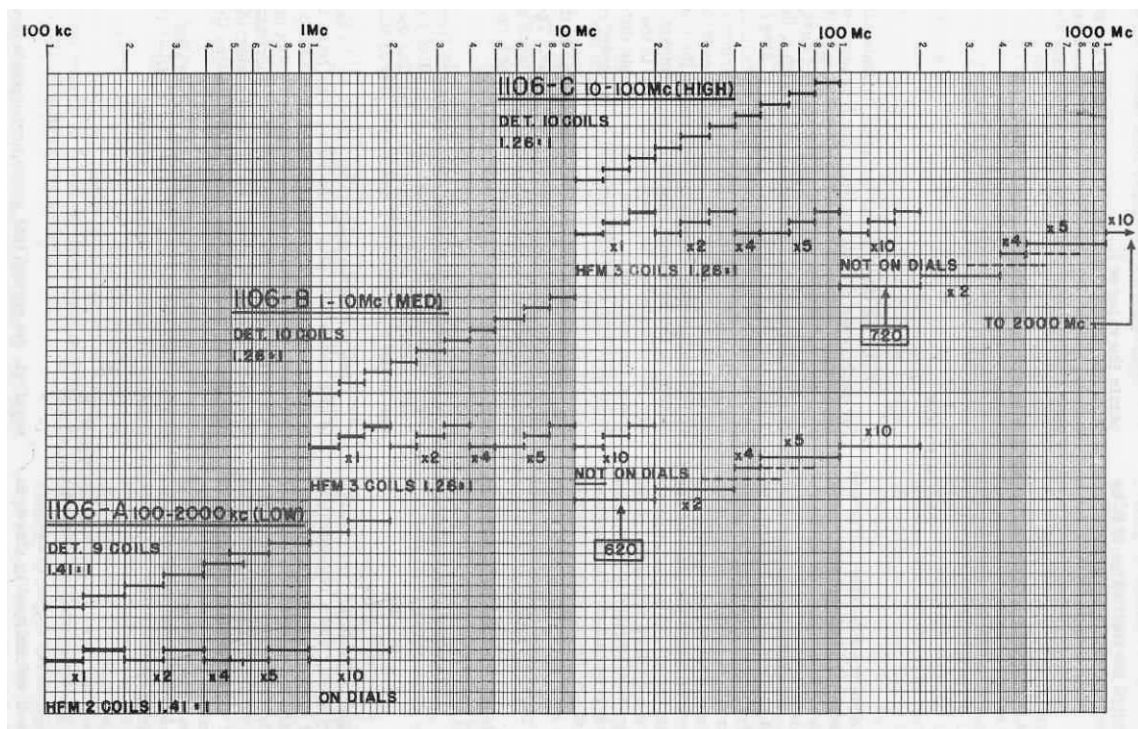


Oscilloscop für Polarkoordinaten Darstellung der Schwebungsfrequenz mit Lissajou Figuren.



Lissajou Figuren für ein 1 : 1 Frequenzverhältnis bei verschiedenen Phasenlagen der zu vergleichenden Frequenzen.

- Frequenzen im Bereich von 0 – 100 kHz können durch Vergleich mit dem Interpolations - Oszillator bzw. dessen Oberwellen auf dem Oszilloscop mit einer Genauigkeit von ± 0.1 Hz gemessen werden.
- Frequenzen von 100 kHz – 2 MHz können unter Verwendung der Frequenz-Transfer Unit 1106-A mit einer Genauigkeit ± 0.1 Hz gemessen werden.
- Frequenzen von 1 MHz – 10 MHz können unter Verwendung der Frequenz-Transfer Unit 1106-B mit einer Genauigkeit ± 0.1 Hz gemessen werden.
- Frequenzen im Bereich von 10 MHz – 100 MHz können unter Verwendung der Frequenz-Transfer Unit 1106-C gemessen werden.

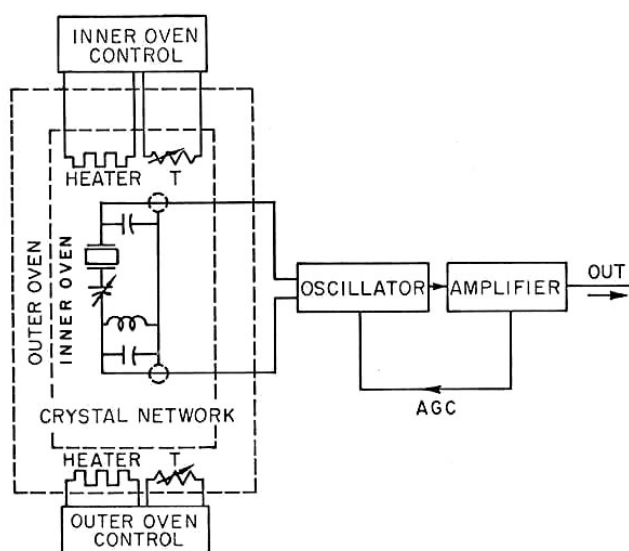


Das General Radio 1100-A Frequency Standard und die zugehörige 1105-A Frequency Measuring Ausrüstung wurde bei der Kriegstechnische Abteilung (KTA) in Bern

und der Direktion der Militärflugplätze in Dübendorf bis in die frühen 60er Jahre für die Eingangs- und Nachkontrollen an tausenden von Schwingquarzen verwendet. Die Statistik der Beobachtungen des Frequenzganges bestätigte, dass die täglichen Frequenzabweichungen im Dauerbetrieb bei ca. 2×10^{-8} lagen. Auf Grund der hohen Kurzzeitstabilität von $< 10^{-9}$ zeichneten sich die 1100-A Frequency Standard auch durch ein sehr niedriges Phasenrauschen aus, das von den ersten auf dem Markt erschienenen 5 MHz Frequency Standards nicht erreicht wurde.

Mit der Ablösung der Elektronenröhre durch die Halbleitertechnik zu Beginn der 60er Jahre konnten komplexere und stabilere elektronische Schaltungen realisiert werden. Nach der Entwicklung von zuverlässigen logischen Schaltkreisen führte dies für viele Anwendungen innert kurzer Zeit zu einem Uebergang von der analogen zur digitalen Schaltungstechnik.

Mit der Halbleitertechnik konnten auch stabilere Oszillatorschaltungen realisiert werden, zudem gelang es mit der Einführung von hochpräzisen proportionalen Temperaturregelungen für die Schwingquarze, den bisher die Frequenzkonstanz am meisten einschränkenden Faktor, zu eliminieren.

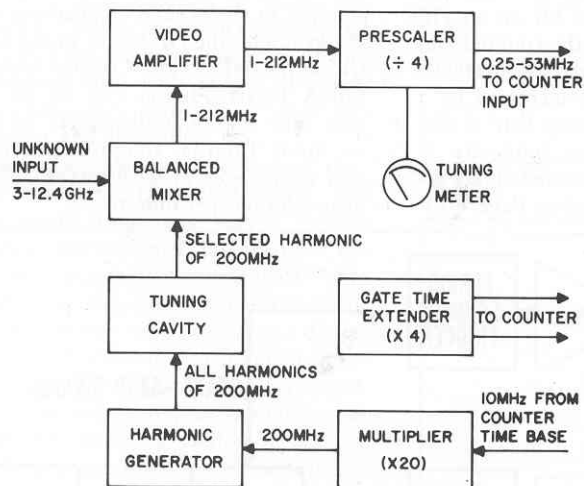


Die nebenstehende Figur zeigt das Prinzipschema eines Präzisions – Quarzoszillators wie sie nach Einführung der Halbleitertechnik ab Mitte der 60er Jahre realisiert werden konnten. Für die Oszillatoren wurden ab dieser Zeit fast ausschliesslich Schwingquarze mit AT - Schnitt verwendet deren Temperatur, wie im nebenstehenden Beispiel aufgezeigt, in doppelten proportional geregelten Ofensystemen konstant gehalten werden. Eine weitere Verbesserung der Frequenzstabilität wurde zudem durch AGC- Kreise im Feedback-Loop erreicht welche bewirken, dass die Schwingamplitude des Quarzes konstant gehalten wird. Derartige Oszillatoren ermöglichten die Konstruktion der hochpräzisen Frequenzzähler die ab Mitte der 60er Jahre auf dem Markt erschienen.

Für den Unterhalt des neuen Luftverteidigungssystems FLORIDA wurden im Jahre 1966 von der amerikanischen Firma Hewlett Packard eine Anzahl Frequency Counter des Typs HP 5245 samt Frequency Converter HP 5255 beschafft.



Im Basisbereich konnten mit dem HP 5245 Frequency - Counter Frequenzmessungen von 0 – 50 MHz, mit einer Genauigkeit von ± 1 Hz durchgeführt werden. Die interne Zeitbasis verfügte über einem Quarzoszillator mit proportionaler Temperaturregelung. Die Langzeitstabilität der Zeitbasis betrug 3×10^{-9} in 24 Stunden.



Mit dem HP 5255 Heterodyne Frequency Converter (siehe nebenstehendes Blockschema) konnte der Frequenzmessbereich des HP 5245 Frequency Counters bis ins X-Band auf 12.4 GHz ausgedehnt werden. Mit der Tuning Cavity (abstimmbarer Hohlraumresonator) kann eine 200 MHz Oberwelle ausgewählt werden, welche aus der vervielfachten 10 MHz Zeitbasisfrequenz des HP 5245 Frequency Counters abgeleitet ist. Die 200 MHz Oberwelle ergibt im Balance Mixer zusammen mit der unbekannten zu messenden Frequenz ein Mischprodukt das nach der Frequenzteilung im Prescaler in den 50 MHz Zählbereich des HP 5245 Frequency Counters fällt.

Mit der bis Mitte der 60er Jahre erzielten Verbesserung der Schwingquarz- und Oszillator-Technologie wurde das Genauigkeits- und Stabilitätsverhalten von präzisen Frequenzgeneratoren weitgehend voraussagbar. Nachdem durch die Wahl geeigneter Quarzschnitte, hochpräziser Temperaturstabilisierungen, AGC - Kreise zur Stabilisierung der Schwingamplitude und konstanten Versorgungsspannungen die äusseren Störfaktoren eliminiert werden konnten, wurde die Langzeitstabilität der Frequenz nun vor allem durch die Alterung des Quarzschwingers begrenzt. Ungefähr ab diesem Zeitpunkt wurde die Langzeitstabilität durch den Begriff „aging“ abgelöst und die Kurzzeitstabilität mit der spektralen Leistungsdichte des Phasenrauschens spezifiziert. Das Altern im Betrieb der Schwingquarze hat verschiedene Ursachen, einen gewissen Einfluss haben dabei:

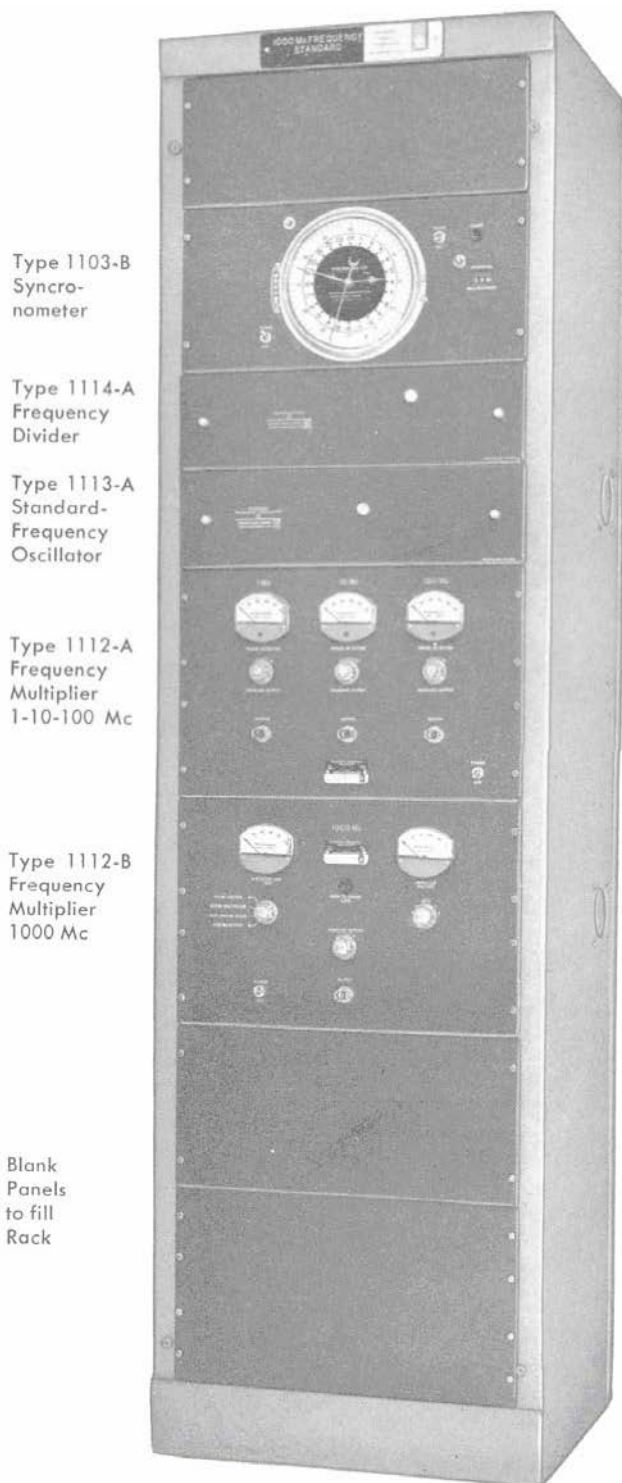
- durch die Montage oder die Belege verursachte Stressmomente im Resonator
- das Wandern von Ionen im Kristall
- die Ablösung feinsten Kristallteilchen vom schwingenden Resonator

Der Gradient der Frequenzänderung kann infolge des Alterns sowohl positiv wie auch negativ verlaufen. Um vor allem die Alterung durch Einflüsse der Halterung zu eliminieren wurde in den 70er Jahren ein nahezu elektrodenfreier Quarzresonator entwickelt.

Für die Überprüfung der Schwingquarze wurden bereits in der ersten Hälfte der 60er Jahre Frequency Counter verwendet. Die General Radio Frequency Standard hatten damit ausgedient.

Mit der starken Zunahme des zivilen Luftverkehrs in den 60er Jahren und der damit verbundenen Steigerung des zivilen Flugfunkverkehrs auf VHF Frequenzen verlagerten viele Luftwaffen auf Empfehlungen der ICAO den militärischen Flugfunkverkehr auf UHF Frequenzen. Mit der Einführung der Mirage 3S/RS Flugzeuge Mitte der 60er Jahre begann auch in der Schweiz die Verlagerung des militärischen Flugfunks vom VHF- in den UHF- Bereich auf Frequenzen zwischen 225 und 400 MHz. Gleichzeitig wurde der Kanalabstand von 50 kHz auf 25 kHz reduziert. Damit stiegen auch die Anforderungen an Genauigkeit und Langzeitstabilität bei der Frequenzerzeugung für die verschiedenen UHF-Funkgeräte (Bordfunkgerät Socrat SE-051 und Bodenstation Plessey 351) nochmals beträchtlich an.

Auf Grund der neu entstandenen Bedürfnisse für genauere Frequenzmessungen in einem stark nach oben erhöhten Frequenzbereich, hatte die General Radio Corporation in Zusammenarbeit mit den Bell Laboratories einen neuen Typ Frequency Standard entwickelt. Im Jahre 1961 erschien als Ablösung für den inzwischen technisch überholten Typ 1100-A Frequency Standard der Typ 1120-AH auf dem Markt. Anstelle des 100 kHz Oszillators war die neue Ausrüstung mit einem hochstabilen 5 MHz Quarzoszillator ausgerüstet. Dem damaligen Entwicklungsstand der Quarztechnologie entsprechend wies der Schwingquarz noch einen AT-Schnitt auf und arbeitete auf der 5. Harmonischen. Der Quarzoszillator war in einem doppelten Ofensystem untergebracht dessen Temperatur innerhalb 0.001°C konstant gehalten wurde.



Da zu Beginn der 60er Jahre in den Observatorien die Zeitskalen noch aus dem Vergleich mit der astronomischen Zeit abgeleitet wurden, war das von General Radio weiterentwickelte Frequenzstandard 1120-AH eigentlich primär für derartige Anwendungen konzipiert worden. Im Hinblick auf die Verwendung als Zeitnormal verfügte die Ausrüstung wiederum über eine elektromechanische Synchronuhr für Zeitvergleiche.

Die tägliche Stabilität (aging rate) des 5 MHz Quarzoszillators betrug $< 5 \times 10^{-10}$ wobei sie sich nach 1 Jahr Betriebsdauer auf $< 2 \times 10^{-10}$ verbesserte. Die Kurzzeitstabilität lag bei $< 1 \times 10^{-10}$ innerhalb 1 Minute.

Ein Frequenzteiler erzeugte aus den 5 MHz, 1 MHz, 100 KHz, 10 kHz, 1 kHz und 100 Hz Ausgangssignale.

Wie schon beim GR 1100-A Frequency Standard wurde mit dem 1 kHz Signal die elektromechanische Synchronuhr betrieben, welche mit einem inzwischen verbesserten 1 Sekunden Kontakt mit Mikroskala einen direkten Gangvergleich mit Normalzeitsendungen ermöglichte.

Um neue Entwicklungen handelte es sich bei den „Frequency-Multipliers“ 1112-A und 1112-B. Diese ermöglichten eine Frequenzvervielfachung auf 1, 10, 100, und 1000 MHz. Die Ausgangssignale waren sinusförmig wobei die unerwünschten Harmonischen um min. 100 dB unterdrückt wurden. Das sinusförmige 1000 MHz Signal lieferte noch 50 mW an eine Last von 50 Ohm. Durch eine von General Radio neu entwickelte Frequency Lock Schaltung wurde die sonst bei Frequenzvervielfachungen auftretende typische Erhöhung des Phasenrauschens von 20 dB pro Dekade stark reduziert.

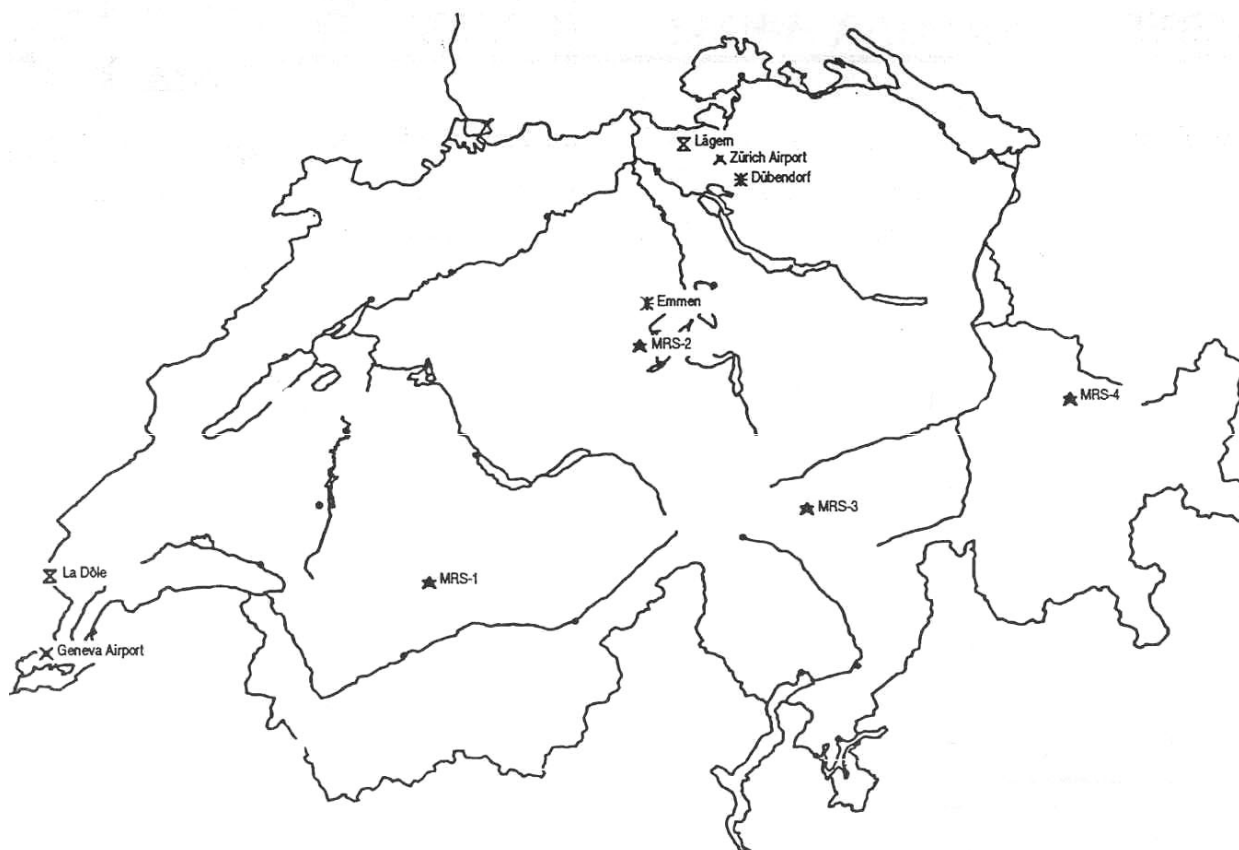
Durch die im Jahre 1967 neu definierte internationale Atomzeitskala welche aus dem Gang von Atomuhren (Cäsium- und Rubidium-Standards) abgeleitet wird, verloren die Quarz Frequenznormale dann allerdings rasch ihre Bedeutung.

Zeitnormalausrüstung für das Luftverteidigungssystem FLORIDA

Mit der Integration der taktischen Radarsysteme TAFLIR in das Luftverteidigungssystem FLORIDA Mitte der 80er Jahre sollten die Lücken der Radarüberwachung im unteren Luftraum geschlossen werden. Gleichzeitig wurden auch die Voraussetzungen für den Austausch der Luftlageinformationen mit den zivilen Flugsicherungszentren Zürich und Genf sowie dem Vermessungsradar ADOUR in Emmen geschaffen.

Die Integration der verschiedenen Sensoren und Rechnersysteme erforderte die Einführung einer einheitlichen Systemszeit. Damit wurden bei der schweizerischen Luftwaffe auch Fragen betreffend der Erzeugung, Verteilung von genauen Zeitskalen aktuell. Der nachfolgende Abschnitt beschreibt den Lösungsweg der bei der Realisierung beschrittenen wurde.

Die Aufbereitung einer bereinigten Gesamtluftlage Schweiz erfolgt aus Radarinformationen von Sensoren welche sich an verschiedenen geographischen Standorten (siehe nachfolgende Karte) befinden.



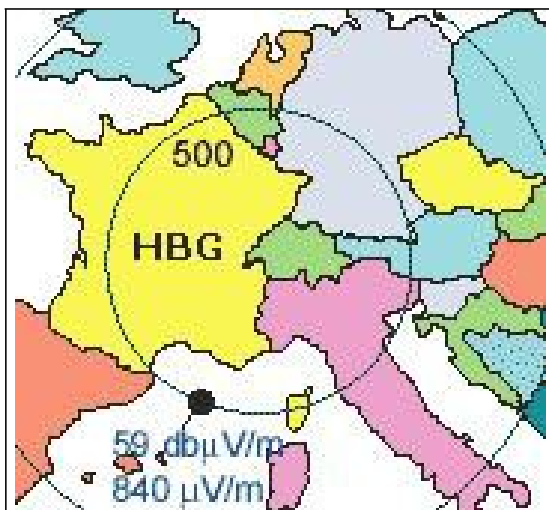
Es liegen folgende Gründe für eine einheitliche Systemszeit vor:

- Nebst Koordinaten und Geschwindigkeitsvektoren ist die genaue Vermessungszeit sehr wesentlich für die Flugwegverarbeitung aus den Radardaten. Die Radardaten der verschiedenen Sensoren werden für die Korrelation auf die gleiche Zeit extrapoliert. Unterschiedliche Systemszeiten führen daher zu zusätzlichen Fehlern. Ein Zeitfehler von z.B. 100 Millisekunden für ein Flugzeug mit 1000 km/h Geschwindigkeit ergibt einen systematischen Positionsfehler von 28 Meter. Die Algorithmen der Verarbeitung entdecken keine systematischen Fehler, sie werden deshalb zu Null angenommen. Die systematischen Fehler (Zeit- und Nordabweichung) müssen deshalb um eine Grössenordnung besser sein als die Streuungen in der Distanz-, Azimut- und Höhenmessung.

- Für den Austausch von Radarinformationen zwischen den Rechnersystemen FLORIDA, FLORIN und TAFLIR ist auf Grund der zulässigen Positionsfehler bei der Flugwegbildung eine relative zeitliche Abweichung von max. 100 Millisekunden zulässig. Um diese Forderung auch im Hinblick auf die beim Datenaustausch entstehenden zeitlichen Uebertragungsfehler zu erfüllen, darf die Abweichung im Gang der internen Uhren der beteiligten Rechnersysteme nicht mehr als 10 Millisekunden betragen.
- Für die Uebernahme der Radarinformationen von den zivilen Flugsicherungszentren Zürich und Genf sowie für Vergleichsmessungen mit dem Flugwegvermessungsradar ADOUR in Emmen ist eine Uebereinstimmung der Systemszeit mit der amtlichen Normalzeit auf ± 50 Millisekunden erforderlich. Um diese Forderung in sämtlichen Fällen zu erfüllen, muss eine Synchronisation der Systemszeit mit der amtlichen Normalzeit mit einer Genauigkeit von ± 10 Millisekunden erfolgen.

Aufbereitung der Systemszeit aus Normalzeit-Emissionen

Für die Versorgung der in einem Gebiet von 350 x 250 km verteilten Rechnerstandorte bot sich, **mit gewissen Einschränkungen**, die Möglichkeit eine einheitliche Systemszeit aus einem übergeordneten Normalzeitsystem aufzubereiten. Solche Systeme standen in Europa in den 80er Jahren in Form der über Langwellen ausgestrahlten Zeitsignal- und Normalfrequenz-Emissionen HBG und DCF77 zur Verfügung.



Der auf 75 kHz arbeitende Sender HBG befindet sich in Prangins (VD) am Genfersee auf den Koordinaten 46° 24' N, 6° 15' E. Das im BCD-Code ausgestrahlte Zeitsignal enthält die komplette Zeit- und Datumsinformation und entspricht der gesetzlichen Zeit in der Schweiz: UTC + 1h (mitteleuropäische Zeit, MEZ) oder UTC + 2h (mitteleuropäische Sommerzeit, MESZ).

Die Emission wird über eine Rundstrahlantenne ausgestrahlt die zu erwartende Feldstärke ist ca. 1mV/m bei einer Distanz von 500 km. Bis 500 km ist die Bodenwelle dominant. Die Trägerfrequenz wird aus einem Cäsium - Frequenznormal abgeleitet und wird innerhalb 2×10^{-12} auf 75 kHz gehalten.

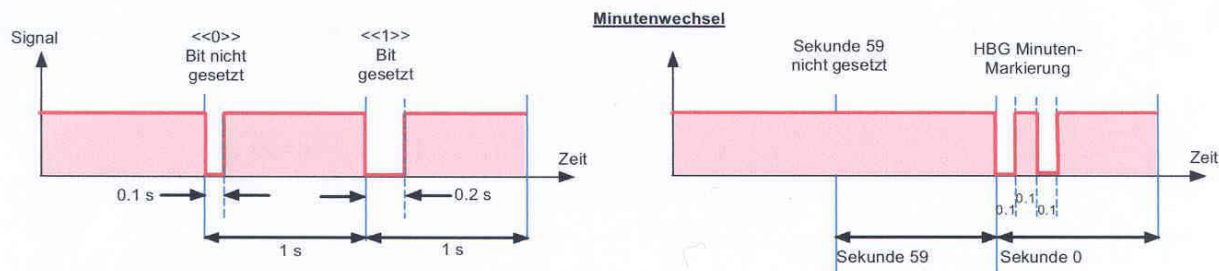


Der auf 77.5 kHz arbeitende Sender DCF77 befindet sich in Mainflingen, etwa 25 km südöstlich Frankfurt auf den Koordinaten 50° 01' N, 09° 00' E. Das im BCD-Code ausgestrahlte Zeitsignal enthält die komplette Zeit- und Datumsinformation und entspricht ebenfalls der gesetzlichen Zeit in der Schweiz: UTC + 1h (mitteleuropäische Zeit, MEZ) oder UTC + 2h (mitteleuropäische Sommerzeit, MESZ).

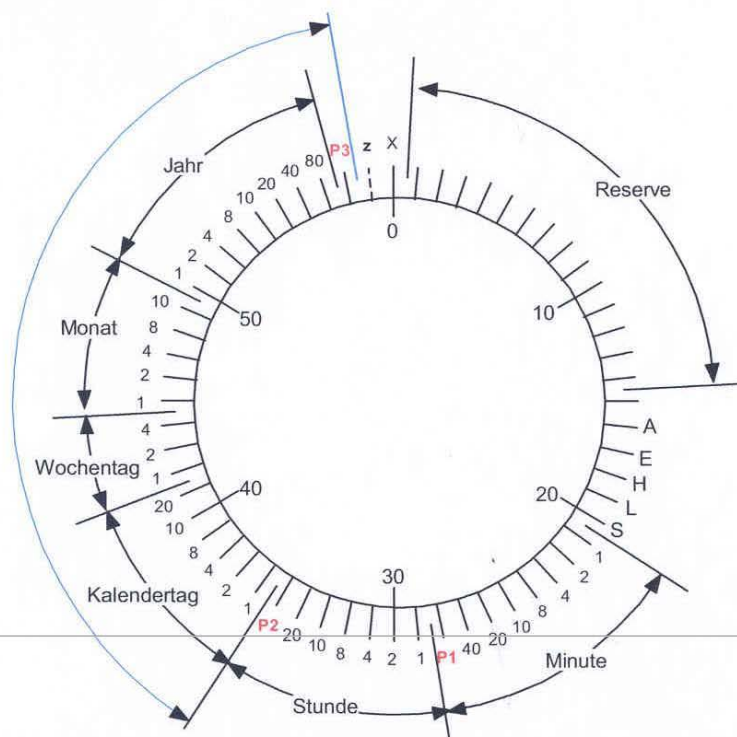
Die Emission wird ebenfalls über eine Rundstrahlantenne ausgestrahlt. Unter 500 km Entfernung vom Sender kann man mit Feldstärken der Bodenwelle von über 2 mV/m gerechnet werden. Bis 500 km ist die Bodenwelle dominant. Die Trägerfrequenz wird von Atomuhren abgeleitet und weicht am Sendeort im Mittel weniger als 1×10^{-12} von 77.5 kHz ab.

Zeitcodierung der HBG und DCF77 Emissionen

Binäre Codierung



Details zum Zeitcode



- | | | | |
|----|----------------------------------|--------|---------------------------|
| X: | doppelter Puls bei Sekunde 0 | L: | Ankündigung Schaltsekunde |
| z: | Puls bei Sekunde 59 weggelassen | S: | Startbit Zeitcode = <<1>> |
| A: | Ankündigung Start oder Ende MESZ | P1..3: | Paritätsbits |
| E: | <<1>> = MESZ, <<0>> = MEZ | | |
| H: | <<1>> = MEZ; <<0>> = MESZ | | |

Das Bit 16 für die Sommer- bzw. Winterzeitankündigung wird 12 h vor dem Wechsel gesetzt.

Das Bit 19 für die Ankündigung einer Einschaltsekunde wird ebenfalls 12 h vor dem Ereignis gesetzt. Wenn eine Schaltsekunde eingeführt wird, hat die dazugehörige Minute eine Länge von 61 s. Der 59. Sekundenpuls vor dem Zeitpunkt 01.00.00 h MEZ bzw. 02.00.00 MESZ wird mit einem Trägerunterbruch von 0.1 s markiert. Für die eingefügte 60. Sekunde wird der Träger nicht unterbrochen.

Feldstärken und Genauigkeit der Normalzeit-Emissionen

Die in der Folge mit einem Rohde & Schwarz ESH3 Messempfänger in Kombination mit einer kalibrierten Rahmenantenne HFH2-Z2 durchgeführten Messungen ergaben, dass die Feldstärken der Normalzeitsender HBG und DCF77 auf sämtlichen Anlagen über 500 $\mu\text{V/m}$ bei einem typischen Umgebungsrauschen von 20 $\mu\text{V/m}$ lagen.

Beobachtungen zeigten, dass bedingt durch die physikalisch gegebenen Ausbreitungsbedingungen, beim Empfang der Bodenwelle auf den Standorten mit typischen zeitlichen Fehlern der Sekundenimpulse von ± 1 ms und $\pm 0.05 \mu$ bei der Trägerwelle gerechnet werden muss.

Verfügbarkeit der Systemszeit

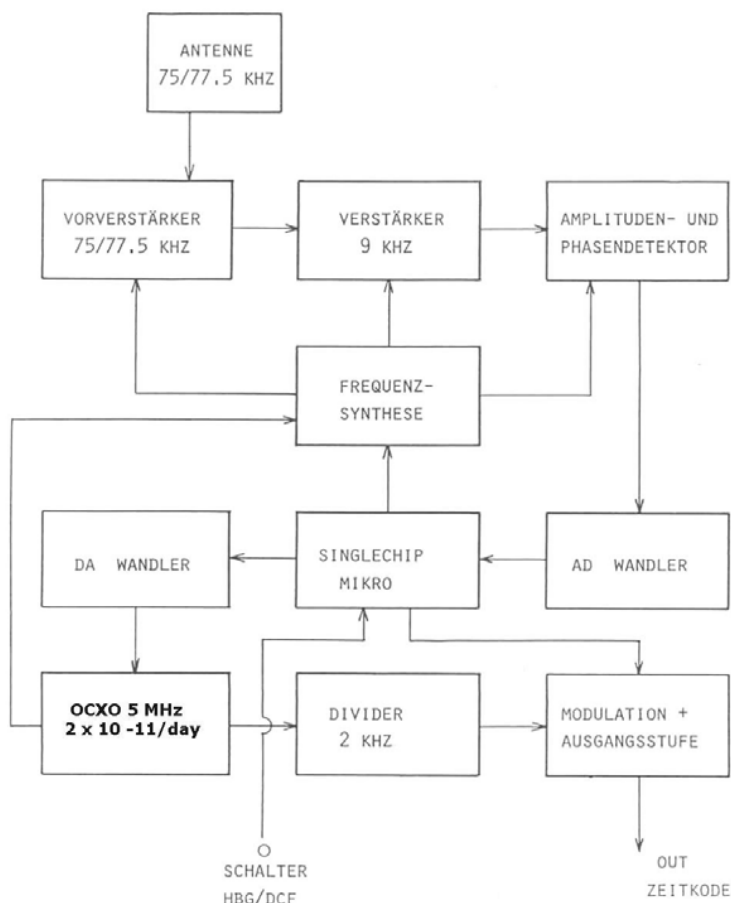
In Anlehnung an das Einsatzkonzept des Luftverteidigungssystems FLORIDA musste auch die für die Integration der Teilsysteme erforderliche Systemszeit **dauernd** zur Verfügung stehen.

Mit den Zeitsignal- und Normalfrequenz-Emissionen HBG und DCF77 war dies in den 80er Jahren nicht gewährleistet. Während Gewitter musste mit Abschaltungen gerechnet werden, zudem wurden über den HBG Sender zeitweise Emissionen für das Pager-System VIPLINE ausgestrahlt, was zu einer Unterbrechung der Zeitemission führte.

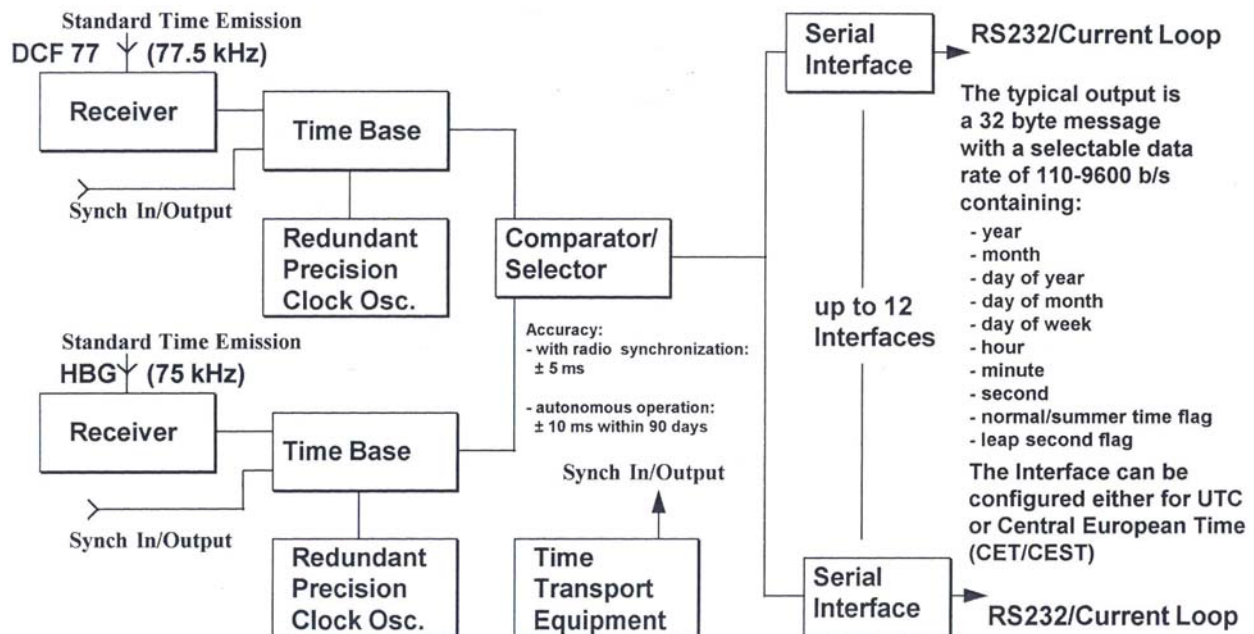
Um eine Redundanz zu schaffen wurden deshalb auf den Standorten gleichzeitig die HBG und die DCF77 Zeitinformation für die Aufbereitung der Systemszeit verwendet.

Synchronisierungskonzept für die Systemszeit aus Normalzeit-Emissionen

Die beiden Empfänger (siehe nachstehendes Blockschema) werten nicht nur die Amplitudenmodulation des Zeitzeichens aus, sondern auch die Phase der Trägerfrequenz. Mit einem digitalen „Phaselockloop“ wird damit die Frequenz des 5 MHz Oszillators der Zeitbasis nachgeregelt. Um den besonderen Empfangsverhältnissen der einzelnen Standorte Rechnung zu tragen kann die Zeitkonstante des digitalen „Phaselockloop“ durch eine Änderung im Programm des Mikroprozessors an die individuellen Erfordernisse angepasst werden.



Die nachfolgende Figur zeigt das generelle Blockscheema der Zeitnormalausrüstung für die Standorte:



Aufbereitung der Systemszeit im autonomen Betrieb

Gemäss den damaligen Vorgaben des Einsatzkonzeptes musste die einheitliche Systemszeit auch im autonomen Betrieb, bei einem dauernden Ausfall der über Radio ausgestrahlten Normalzeitsendungen, sichergestellt werden.

Auf Grund der betrieblichen Vorgaben mussten die internen Zeitbasen jeder Zeitnormalausrüstung in der Lage sein den Betrieb über eine Dauer von 90 Tagen mit der geforderten Genauigkeit sicherzustellen.

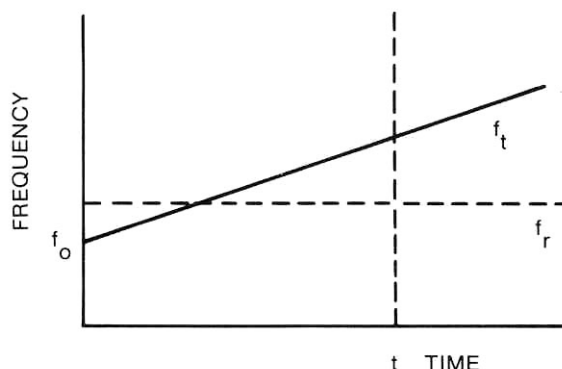
Nach Ablauf dieser Frist sollte die Synchronisierung durch einen Zeittransport zwischen einer als „übergeordnet“ bestimmten Hauptzentrale und den Ausrüstungen der Standorte erfolgen. Für den Zeittransport wurde ein transportables Zeitnormal, eine sog. „Flying Clock“ vorgesehen.

Der über die Dauer von 90 Tagen zulässige akkumulierte Zeitfehler von 10 Millisekunden war bestimmend für die Wahl der Oszillatoren für die Zeitbasis. Bei den in Betracht fallenden Oszillatoren konnte von folgenden Voraussetzungen ausgegangen werden:

- dass der Temperatureinfluss auf die Frequenz durch präzise arbeitende Ofen minimalisiert ist
- dass keine zufälligen sprunghaften Frequenzänderungen im Betrieb auftreten
- dass die Möglichkeit zum Justieren des Frequenz-Offset in Schritten von 10^{-11} vorhanden ist
- dass das „aging“ einen konstanten linearen Drift in der Frequenz verursacht

Unter den vorgängig aufgeführten Bedingungen kann davon ausgegangen werden, dass die Frequenz f_t des betrachteten Oszillators wie folgt ausgedrückt werden kann:

$$f_t = f_0 + a \cdot t$$



wobei:

f_t = Frequenz zur Zeit t

f_0 = Frequenz zur Zeit $t = 0$

f_r = Referenzfrequenz

a = „aging rate“ Drift/ s^{-1}

$$zB \ a = \frac{2 \times 10^{-11}}{86400}$$

Vorausgesetzt, dass zu Beginn kein Frequenz - Offset besteht errechnet sich der **akkumulierte Zeitfehler Δt** über die Zeit t (s) aus der „aging rate“/Tag a wie folgt:

$$\Delta t = \frac{a}{2} \times t^2 \text{ (s)}$$

oder die erforderliche „aging rate“/Tag für einen akkumulierten Zeitfehler Δt über die Zeit t Sekunden wie folgt:

$$a = \frac{\Delta t}{t^2} \times 2 \times 86400$$

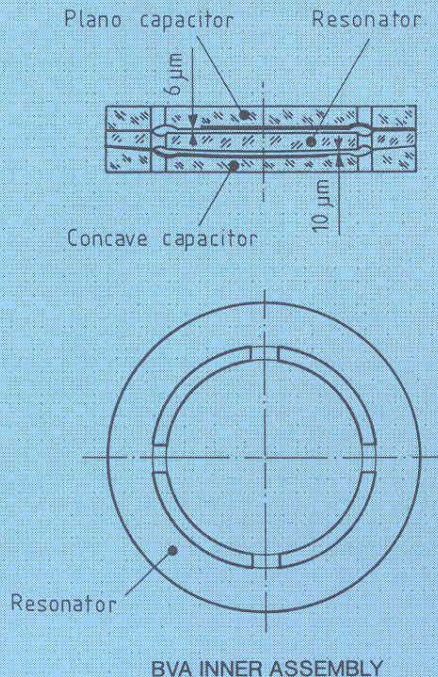
Die für das Beispiel der Zeitbasis des FLORIDA Zeitnormales erforderliche „aging rate“/Tag errechnet sich wie folgt:

$$a = \frac{10 \text{ ms}}{(90 \times 86400)^2} \times 2 \times 86400 = 2.85 \times 10^{-11}$$

Als Oszillator für die Zeitbasis wurde der Typ 8600 der Firma Oscilloquartz S.A. gewählt welcher über eine typische Langzeitkonstanz von **2×10^{-11} /Tag** verfügt. Beim Typ 8600 handelt es sich um einen Quarzoszillator der in den frühen 80er Jahren unter der Bezeichnung „Boitier à vieillissement améliorée“ (BVA) auf dem Markt erschienen ist. Um vor allem die Alterung durch Einflüsse der Halterung zu eliminieren, wurde an der Ecole Nationale Supérieure de Mécanique et des Microtechniques in Besençon (F) in Zusammenarbeit mit der Oscilloquartz S.A. in Neuchâtel (CH) ein beinahe elektrodenfreier Quarzresonator entwickelt. Die Kopplung zwischen den Anschlüssen und dem Resonator erfolgt kapazitiv.

Aus der nachfolgenden Beschreibung der Oscilloquartz S.A. geht der Aufbau des BVA- Resonators und das Blockschema des Typ 8600 Oszillators hervor.

BVA RESONATOR



The BVA unit consists of an electrodeless resonator at 5 MHz, 5th overtone, AT-cut, which is decoupled from its mounting structure by 4 bridges.

These bridges are precisely made and located. They serve the purpose of keeping the mounting stress away from the active center part (resonator) as much as possible.

The electrodes are evaporated on two counterpieces, like condensers, also made of AT quartz blanks with the same cut-angle as the resonator blank.

The 3 parts are rigidly held together with stainless steel clips, and the whole sandwich is spring-mounted into a rigid cage.

The BVA assembly is mounted inside a cage consisting of a base plate and a cover plate fixed to four columns within a cold welded enclosure. In order to provide a clean environment for the resonator, the cage is baked-out at 250 degrees C while it is pumped to 10^{-8} mbar through the chimney with a cryo pumping system. The chimney is then sealed by a pinch-off process.

The structure offers the following substantial, novel features:

- electrodeless resonator eliminates most of the problems linked to surface perturbations and ion migrations
- the use of a crystal resonator rigid mounting made out of quartz material does away with the problems linked to discontinuities, relaxation and stress in the mounting points.
- the reduction of space around the active part eliminates problems associated with contamination

Some typical characteristics and operation conditions of the BVA 5 MHz AT-cut, 5th overtone resonator used in the 8600 / 8601 series :

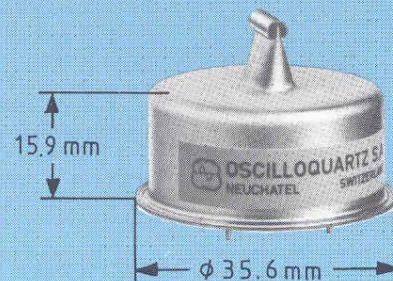
$$Q = 2.3 \times 10^6$$

$$R_1 \leq 80 \Omega$$

$$C_L = 100 \text{ pF} \pm 10 \%$$

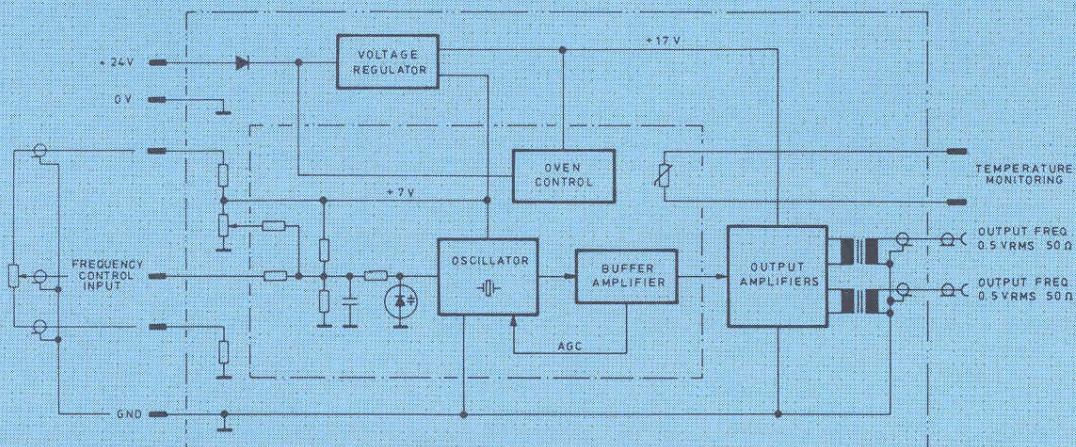
$$P = 85 \mu\text{W} \text{ (drive level)}$$

$$P_s = 85^\circ \text{C} \pm 5^\circ \text{C} \text{ (} -30^\circ \text{C} \div +90^\circ \text{C storage)}$$



BVA RESONATOR

OSCILLATOR BLOCK DIAGRAM



Als Halterungen des Resonators dienen schmale Brücken die ebenfalls aus Quarz bestehen und daher keine störende Langzeitbeeinflussung des Schwingungsverhaltens bewirken können. Der Resonator ist AT - geschnitten und schwingt auf dem 5. Ober-ton. Da der Schwingpegel von 90 μW sehr viel höher liegt als bei herkömmlichen Präzisionsoszillatoren weist der BVA Oszillator auch sehr günstige Rauscheigenschaften auf.

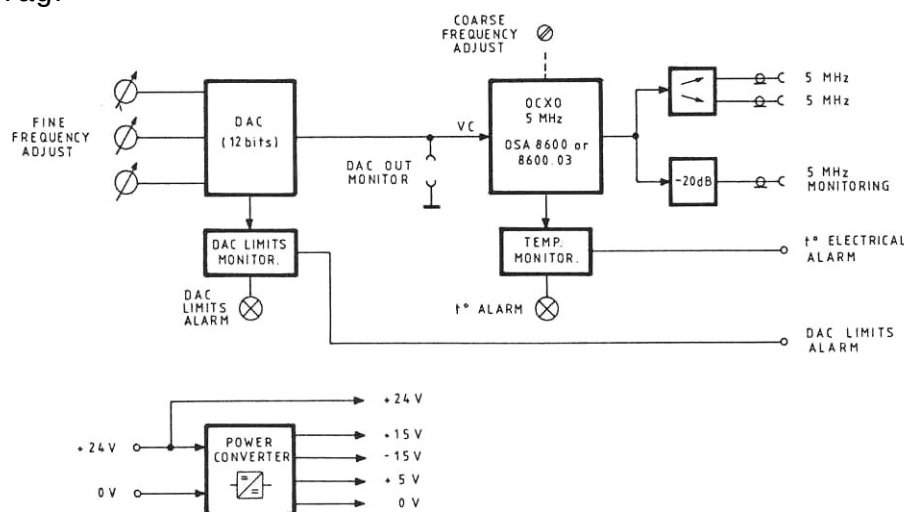
Kontrolle und Neukalibrierung der BVA Oszillatoren in den Zeitbasen

Messung der Zeitabweichung

Es handelt sich um die Messung der Zeitabweichung welche sich während einem längeren autonomen Betrieb der Zeitbasis ergeben hat. Um eine genügende Messgenauigkeit zu erhalten ist es notwendig, dass die Dauer des autonomen Betriebes mindestens 1 Monat beträgt, wobei die genaue Dauer bekannt sein muss. Die Messung erfolgt während einem 5 Minuten Intervall durch Zeitvergleich zwischen dem aus der internen Zeitbasis abgeleiteten Zeitcode und demjenigen der Normalzeit-Emission. Das Resultat wird mit Vorzeichen und in Zehntel-Millisekunden angezeigt. Daraus kann der tägliche Drift des Oszillators und durch Multiplikation mit der Anzahl Tage dessen Offset - Fehler errechnet werden.

Korrektur des Offset Fehlers

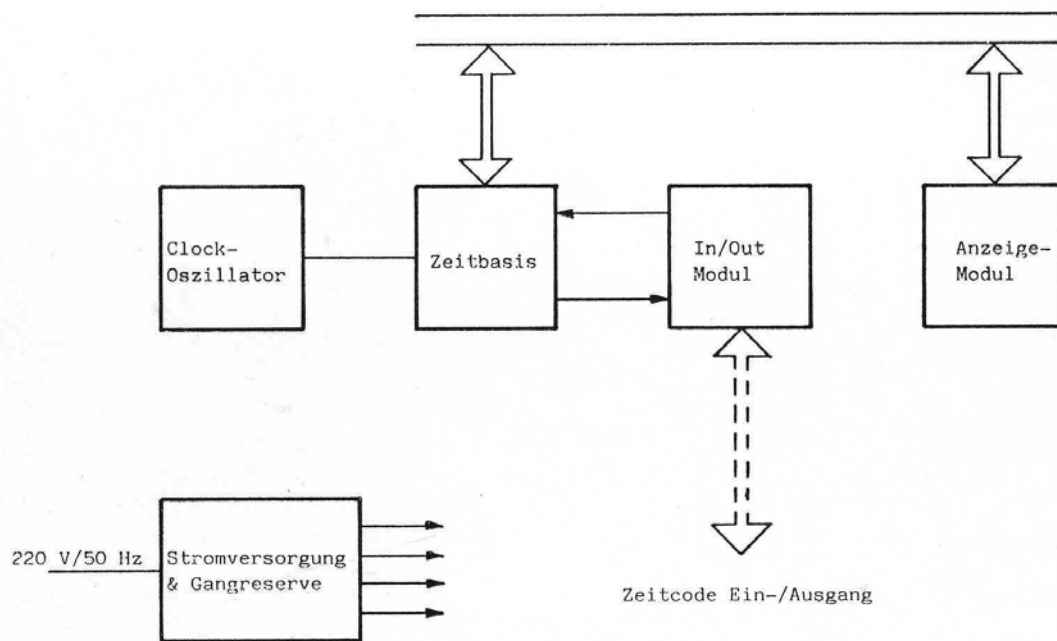
Die Offset - Korrektur erfolgt durch Eingabe über Digischalter in den DAC (A/D Wandler) des 8600 Oszillators (siehe nachfolgendes Blockschema). Jeder Schalter-schritt entspricht einer Frequenzkorrektur von 1×10^{-11} oder einer Gangabweichung von 0.432 $\mu\text{s}/\text{Tag}$.



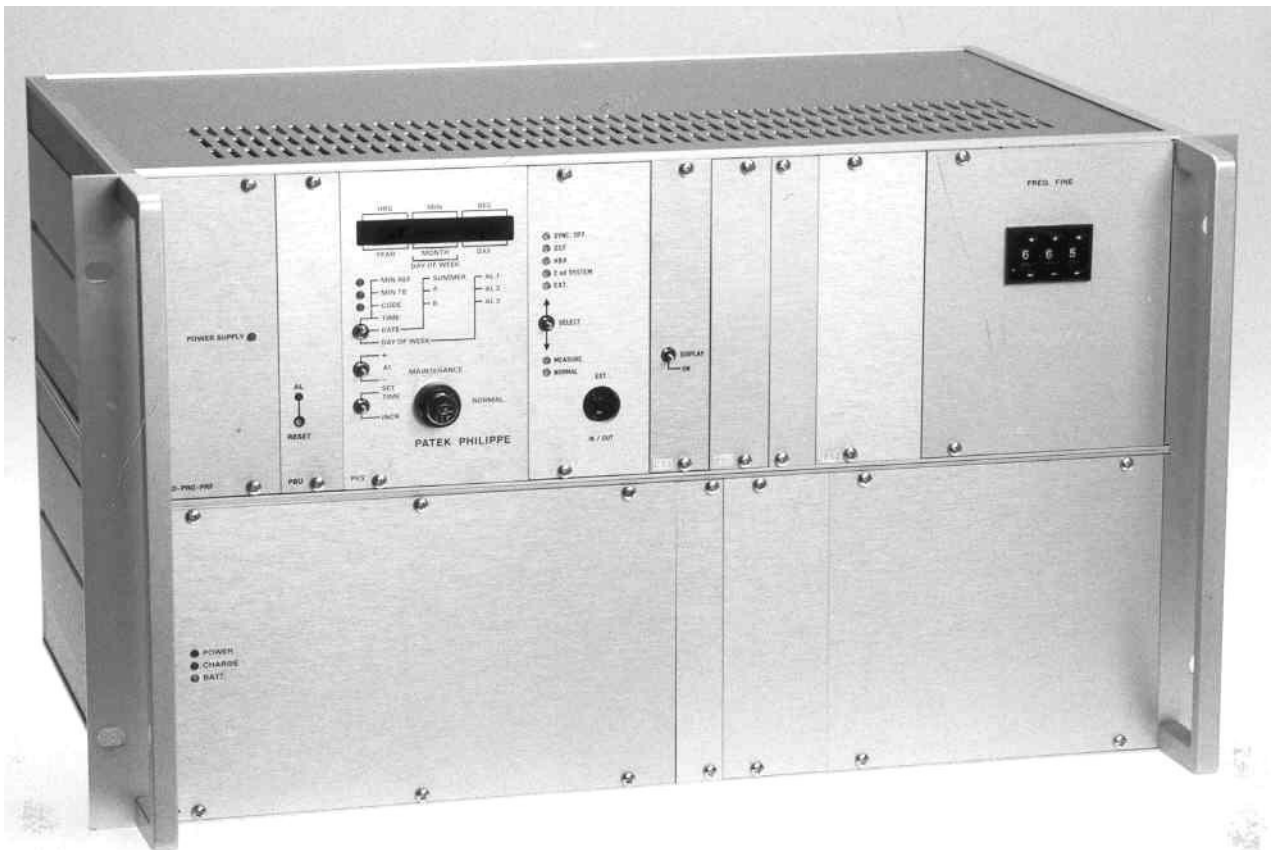
Transportables Zeitnormal (Flying Clock)

Das transportable Zeitnormal wird für den Zeittransport zwischen den verschiedenen Standorten benötigt. Beim autonomen Betrieb der Zeitnormale ohne Normalzeit-Emissionen ist ein periodischer Zeittransport zwischen einer als „übergeordnet“ bestimmten Zeitbasis und den „untergeordneten“ Zeitbasen der Standorte erforderlich. Das transportable Zeitnormal verfügt bei vollgeladener Batterie über eine Gangreserve von mindestens 30 Stunden. Die interne Zeitbasis weist innerhalb einer Transportzeit von 24 Stunden eine max. Gangabweichung von 2 Millisekunden auf. Die Ausrüstung ist sowohl für die Uebernahme wie auch für die Uebergabe der Zeit ausgelegt.

Die Figur zeigt das Blockschaema des transportablen Zeitnormales



Ansicht der transportablen Zeitnormal - Ausrüstung



Ansicht der Standorte Zeitnormal – Ausrüstung

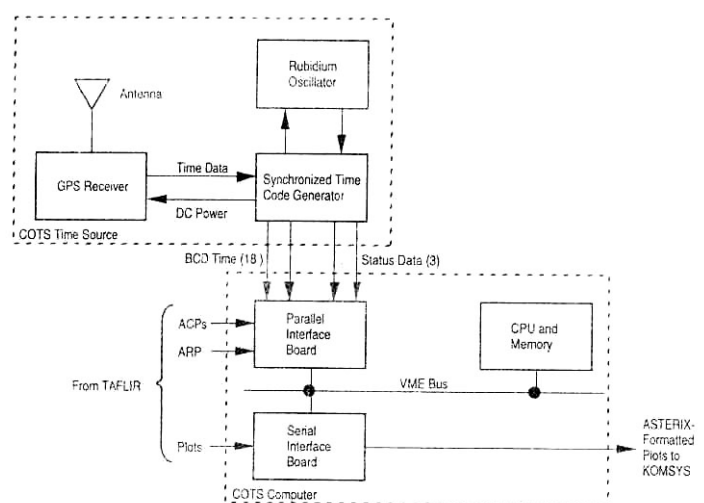


Ansicht der Spezialschnittstelle für die H - 3324 Computer

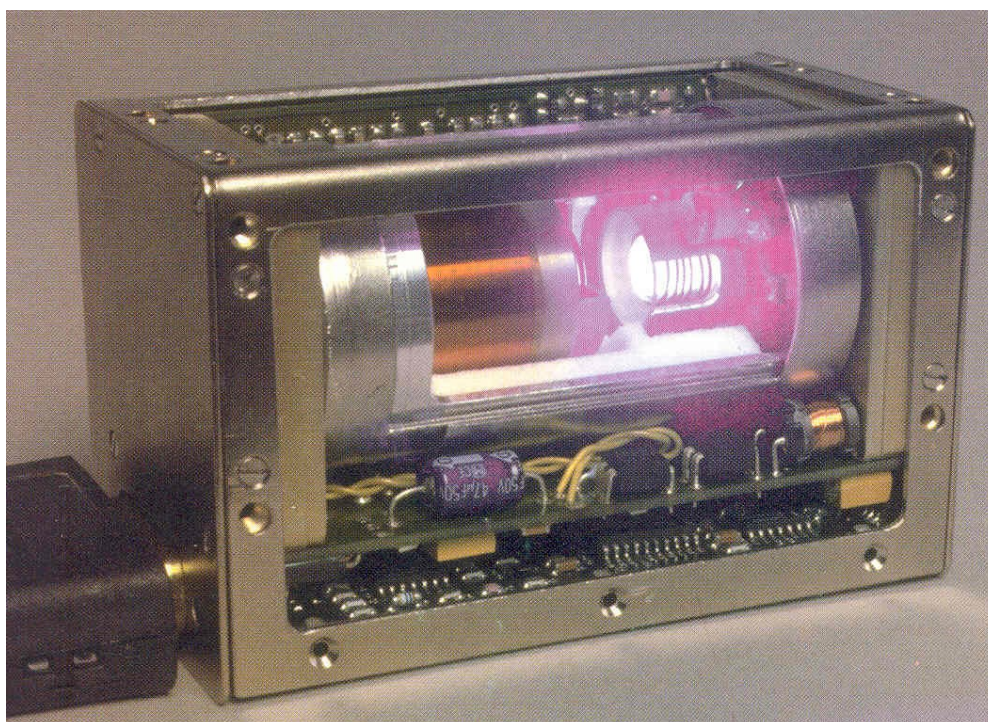


GPS und Rubidium Standard für die Zeitnormale des FLORAKO Systems

Mit der Ende der 90er Jahre erfolgten Integration der verschiedenen Radarsensoren (taktisches Radarsystem TAFLIR etc.) in das neue Luftverteidigungssystem FLORAKO, wird der Tracking - Prozess zentral vom RALUS - Multitracker des FLORAKO Systems übernommen. Die Radarsensoren müssen dadurch nur noch Radar - Plotdaten liefern. Für die Korrelation im Multitracker werden die Plotdaten vom Radar mit einer Zeitmeldung (time - tag) markiert, welche Auskunft über den genauen Zeitpunkt der Radarerfassung gibt. Bedingt durch die für den Multitracking - Prozess verlangten Präzision, musste die Erfassungszeit der Radar-Plots mit einer Genauigkeit von ± 25 Millisekunden zugeordnet werden. Die Radarsensoren wurden hierfür mit einem Zeitnormal für die Erzeugung des 18 Bit Zeitcodes ausgerüstet. Die genaue Zeit der Zeitbasis wird aus dem GPS Satelliten - Navigationssystem übernommen, als redundante Zeitinformation für die Fälle wo die GPS Information nicht verfügbar ist, wird die Zeitbasis (siehe nachfolgendes Blockschema) mit einem Rubidium - Primärstandard (Atomuhr) synchronisiert.



Rubidium – Standard Ausrüstung in geöffnetem Zustand





Das nebenstehende Foto zeigt den in der Zeitbasis der FLORIDA Zeitnormal-Ausrüstungen verwendeten 5 MHz BVA Oszillator des Typ 8600 der Firma Oscilloquartz S.A. in Neuchatel.

Auf der linken Seite ist die Schaltungskarte mit dem D/A Konverter für die elektronische Frequenzabstimmung mit dem digitalen „Phase Lock LOOP“ angeordnet. Die manuelle Offset -Korrektur der Frequenz erfolgt über die drei im unteren Bereich der Schaltungskarte sichtbaren Hexadezimal -Eingabeschalter. Ein Schaltschritt entspricht einer Frequenzkorrektur von 1×10^{-11} dies entspricht einer Gangabweichung der Zeitbasis von $0.432 \mu\text{s}$ pro Tag.

Im oberen Teil des Oszillatorgehäuses ist die Einstellung des 24-gängigen Potentiometers für die Grobkorrektur der Frequenz sichtbar. Der Einstellbereich beträgt 4×10^{-8} .

Specification of the 5 MHz BVA Oscillator 8600

OUTPUT FREQUENCY	: 5 MHZ
FREQUENCY STABILITY	
LONG TERM (AGEING)	: $2 \cdot 10^{-11}/\text{DAY}$ $5 \cdot 10^{-10}/\text{MONTH}$ $5 \cdot 10^{-9}/\text{YEAR}$ } AFTER 90 DAYS OF CONTINUOUS OPERATION
OVER TEMPERATURE RANGE	: $5 \cdot 10^{-10}$ (-30 TO $+60^\circ\text{C}$)
VERSUS SUPPLY VOLTAGE CHANGES	: $5 \cdot 10^{-11}$ ($+24 \text{ VDC} \pm 10\%$)
VERSUS LOAD CHANGES	: $2 \cdot 10^{-11}$ ($50 \Omega \pm 10\%$)
STATIC g-SENSITIVITY	: $< 1 \cdot 10^{-9} \cdot g^{-1}$
SHORT TERM $\sigma(\tau)$	: $5 \cdot 10^{-13}$ FOR $\tau = 1$ TO 100 s
PHASE NOISE SPECTRAL DENSITY	: SEE DRAWING BELOW

