

Das Rubidium-Normal
ein sehr genauer Signalgenerator
auch für den Funkamateurl

Inhaltsverzeichnis

Vorwort.....	3
Die Grenzen des Quarzoszillators.....	3
Externe Frequenznormale.....	4
Die Atomuhr.....	4
Rubidium.....	4
Versuche mit Natrium.....	5
Vom Natrium zum Rubidium.....	8
Die Realisierung des Rubidium-Normals.....	9
Der mechanische Aufbau.....	10
Die Genauigkeit.....	10
Der Betrieb.....	10
Warum werden solche Oszillatoren angeboten?.....	11
Der Testaufbau.....	12

Vorwort

Für die meisten im Amateurfunk eingesetzten Übertragungsverfahren und Funkbänder reichen mit Quarzoszillatoren erreichbare Genauigkeiten vollkommen aus. Auf der anderen Seite gibt es nun aber Übertragungsverfahren die eine sehr hohe Frequenzgenauigkeit erfordern wie z.B. kohärent – CW wo sogar die Phasenlage zwischen Sender und Empfänger fest sein muss. Auch gängige Modulationsverfahren wie SSB erfordern bei sehr hohen Bändern sehr genaue und stabile Oszillatoren.

In den folgenden Kapiteln soll nach einem kurzen Durchgang durch gängigere Oszillatoren das Rubidium-Normal vorgestellt werden. Dabei soll auch das Wirkungsprinzip genauer beschrieben und anhand eines optischen Gegenstücks demonstriert werden .

Die Grenzen des Quarzoszillators

Das bisher noch häufigste Verfahren genaue Frequenzen zu erzeugen ist das des Quarzoszillators. Nimmt man einen billigen „Quarz von der Stange“, so wird man damit eine Genauigkeit von etwa $10E-5$ erreichen (was einer Abweichung von 1 Hz bei 100 kHz entspricht).

Ein solcher Quarz bringt nämlich einige „Probleme“ mit sich. Da er ja innerhalb einer Schaltung arbeitet, wird er durch diese mit beeinflusst.. Um diesen Einfluss kompensieren zu können, werden Quarze so produziert, dass sie nur dann mit der „aufgedruckten“ Frequenz schwingen wenn parallel zu ihnen eine bestimmte Kapazität liegt. (z.B. 12 pF). Nachdem man die Kapazität meist nicht kennt, die alleine durch die Schaltung zum Quarz parallel liegt behilft man sich mit einem Trimmer der dann so einzustellen ist, dass der Quarz genau da schwingt wo er soll. Hier schließt sich der Kreis allerdings wieder, weil man nun doch irgend eine Quelle braucht die die gewünschte Frequenz mit der gewünschten Genauigkeit liefert.

Ein weiteres Problem ist die Abhängigkeit von der Temperatur. Quarze lassen sich so schleifen, dass die bei einer bestimmten Temperatur eine minimale Temperaturempfindlichkeit besitzen (AT-Schliff). Dieser Punkt wird beim normalen Quarz in der Gegend der Raumtemperatur liegen. Sind die Umgebungstemperaturen aber höher (z.B. im Sommer) steigt auch der Frequenzfehler mit der Temperatur.

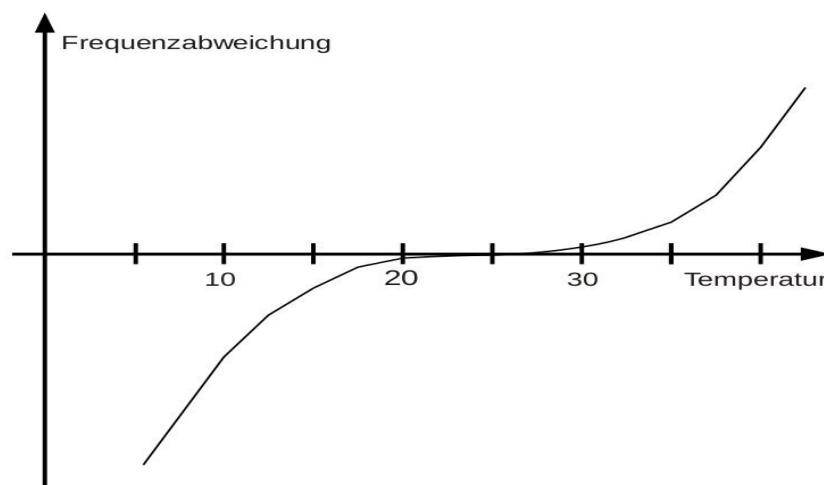


Bild 1: Typischer Frequenzgang eines Quarzes mit AT-Schliff

Vortrag: Das Rubidium-Normal, ein sehr genauer Signalgenerator auch für den Funkamateure

Gegen diesen Effekt gibt es eine Abhilfe: Den Quarzofen.

Dazu verwendet man Quarze deren minimale Temperaturempfindlichkeit deutlich über der Raumtemperatur liegt (ca. 60C). Diese Quarze baut man in eine kleine wärmeisolierte Kammer ein die elektrisch aufgeheizt auf temperaturstabil auf 60C gehalten wird. Mit solchen Oszillatoren erreicht man Genauigkeiten von $5 \cdot 10^{-8}$ (entspricht 1 Hz bei 20 MHz).

Das Problem dass man zum einstellen auf die exakte Quarzfrequenz eine noch genauere Referenz braucht hat man auch bei dieser Lösung.

Inzwischen gibt es eine weitere Lösung: Komplette Oszillatoren (Quarz und Schaltung in einem Gehäuse) bei denen die Quarztemperatur gemessen wird und die durch die aktuelle Temperatur resultierende Frequenzabweichung kompensiert wird. Damit sind die beiden hier beschriebenen Probleme zwar gelöst, das der begrenzten Genauigkeit (etwa $5 \cdot 10^{-8}$) bleibt.

Externe Frequenznormale

Die in der Vergangenheit einzige Lösung des Genauigkeitsproblems war die auf Funksignale zurückzugreifen deren Genauigkeit bekannt ist. Für Geräte die sich auf solche Signale synchronisieren und damit sehr genaue langzeitstabile Frequenzen liefern gibt es Beschreibungen in großer Anzahl. Leider haben solche funkgestützten Verfahren einen Schwachpunkt – die Funkübertragung selbst. Auf der Übertragungstrecke treten Phasenschwankungen auf die durch Reflexionen und Beugungseffekte verursacht werden. Die Phasenschwankungen erzeugen im Zielsignal eine leichte FM, das Signal schwankt etwas um den Sollwert.

Ein weiteres „Problem“ externer Frequenznormale ist das, dass man auf deren Funktion angewiesen ist. So gab es z.B. ein Verfahren aus dem terrestrischen Videosignal des ZDF ein Signal mit sehr hoher Frequenzgenauigkeit zu generieren. Dieses Videosignal ist aber seit einigen Jahren nicht mehr verfügbar.

Die Atomuhr

Schon seit längerer Zeit werden die Uhren weltweit mit Cäsium-Normalen gesteuert. Diese „Atomuhren“ erreichen eine Genauigkeit von 10^{-13} (1 Hz bei 10 THz). Solche Cäsium-Normale sind allerdings keine kleinen Geräte die man einfach so transportieren und Einschalten kann – für den Betrieb braucht es ein komplettes physikalisches Labor. Schon aus dem Grund – und nicht nur wegen der immensen Kosten ist diese Lösung für den Funkamateure absolut außer Reichweite.

Rubidium

Rubidium ist ein Alkalimetall wie Cäsium, Kalium oder Natrium und hat damit ähnliche Eigenschaften wie diese anderen Metalle. Es kann deshalb – ähnlich wie Cäsium für Atomuhren eingesetzt werden. Der Name Rubidium kommt daher, dass Rubidiums Salze eine rote Flamme erzeugen wenn man sie in eine Gasflamme hält. Rubidium gibt es in zwei Isotopen – das sehr stabile Rb 85 und ein etwas instabileres Isotop Rb 87. Um das Wirkungsprinzip des Rubidium-Normals zu verstehen sollen die Wirkungsmechanismen anhand von einigen Versuchen mit Natrium gezeigt werden.

Versuche mit Natrium

Jeder kennt das stechend gelbe Licht an Straßenkreuzungen oder an Kanalschleußen. Dieses Licht wird nicht durch gelb angestrichene Glühbirnen erzeugt sondern durch Lampen bei denen Natriumdampf zum Leuchten gebracht wird. Die gelbe Farbe kommt daher dass dieser Natriumdampf mit einer bestimmten Frequenz (genauer mit zwei dicht beieinanderliegenden Frequenzen) strahlt. Diese Frequenzen sind durch quantenphysikalische Parameter bestimmt und lassen sich durch äußere Einflüsse wie Druck oder Temperatur nicht beeinflussen. Das Leuchten in einer Gasentladungsröhre entsteht dadurch, dass das einzelne Elektron in der äußersten Schale des Natriumatoms auf ein höheres Energieniveau gehoben wird von dem es nach kurzer Zeit wieder in das Grundenergieniveau „abstürzt“. Das Atom gibt die dabei frei werdende Energie in Form eines Lichtblitzes (Photons) ab. Die Frequenz des Lichtblitzes hängt direkt von der Differenz der übersprungenen Energieniveaus ab: $f = E/h$ wobei f die Frequenz des Lichtblitzes ist, E die Energiedifferenz und h das Planck'sche Wirkungsquantum (eine Naturkonstante) ist. Da die „erlaubten“ Energieniveaus fest sind, sind es damit auch die Frequenzen mit denen das Natrium strahlen kann.

Neben dem Beschuss mit Elektronen – wie es in einem Gasentladungrohr passiert kann ein Natriumatom auch auf andere Weise Energie aufnehmen – durch Licht. Wenn das Licht (also die Photonen) genau die Frequenz hat die der Differenz zweier Energieniveaus entspricht „verschluckt“ das Natriumatom dieses Photon und hebt das Elektron in das höhere Energieniveau. Fällt das Elektron wieder in den ursprünglichen Zustand zurück, gibt das Atom den Lichtblitz (also das Photon) wieder ab. Die Richtung in der das Photon wieder abgegeben wird ist dabei rein zufällig.

Bestrahlt man eine Röhre die Natriumdampf enthält mit Licht einer Natriumdampf Lampe wird der Natriumdampf in der bestrahlten Röhre deshalb zum leuchten angeregt. Nachdem das Licht der Lampe aus einer Richtung kommt, das in der angeregten Röhre aber in jede Richtung strahlt – also gestreut wird, kommt hinter der Röhre mit Blickrichtung zur Lampe weniger Licht an. Die Röhre dämpft das Natriumlicht also.

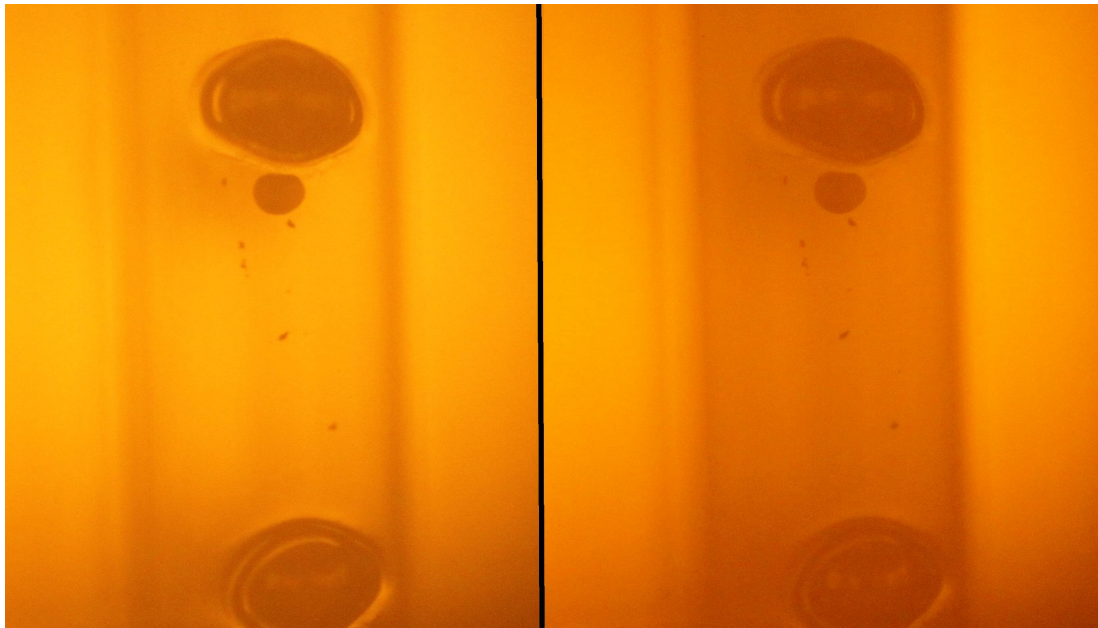


Bild 2: Ein mit Licht einer Natriumdampf Lampe durchstrahltes Glasrohr links ohne Natriumdampf, recht mit Natriumdampf. Im rechten Teil ist deutlich die Dämpfung zu erkennen. Die dunklen Punkte sind Natriumtröpfchen.

Vortrag: Das Rubidium-Normal, ein sehr genauer Signalgenerator auch für den Funkamateuer

Sieht man seitlich auf das bestrahlte Rohr, gewinnt man den Eindruck als sei das Rohr mit einem gelben Nebel gefüllt. Dieser Eindruck entsteht – wie bei normalem Nebel auch - durch die Streuung des Lichtes.



Bild 3: Ein mit Licht einer Natriumdampfampe bestrahltes Glasrohr links ohne Natriumdampf, recht mit Natriumdampf. Im rechten Teil ist deutlich der durch die Lichtstreuung hervorgerufene Nebelfeffekt zu sehen.

Das Glasrohr wirkt in der Durchsicht wie ein Notch-Filter für gelbes Licht mit genau der Frequenz des Natriumlichts. Bestrahlt man ein mit Natriumdampf gefülltes Rohr jedoch mit normalem Tageslicht, ist weder der Nebeneffekt noch eine dämpfende Wirkung in der Durchsicht zu erkennen.

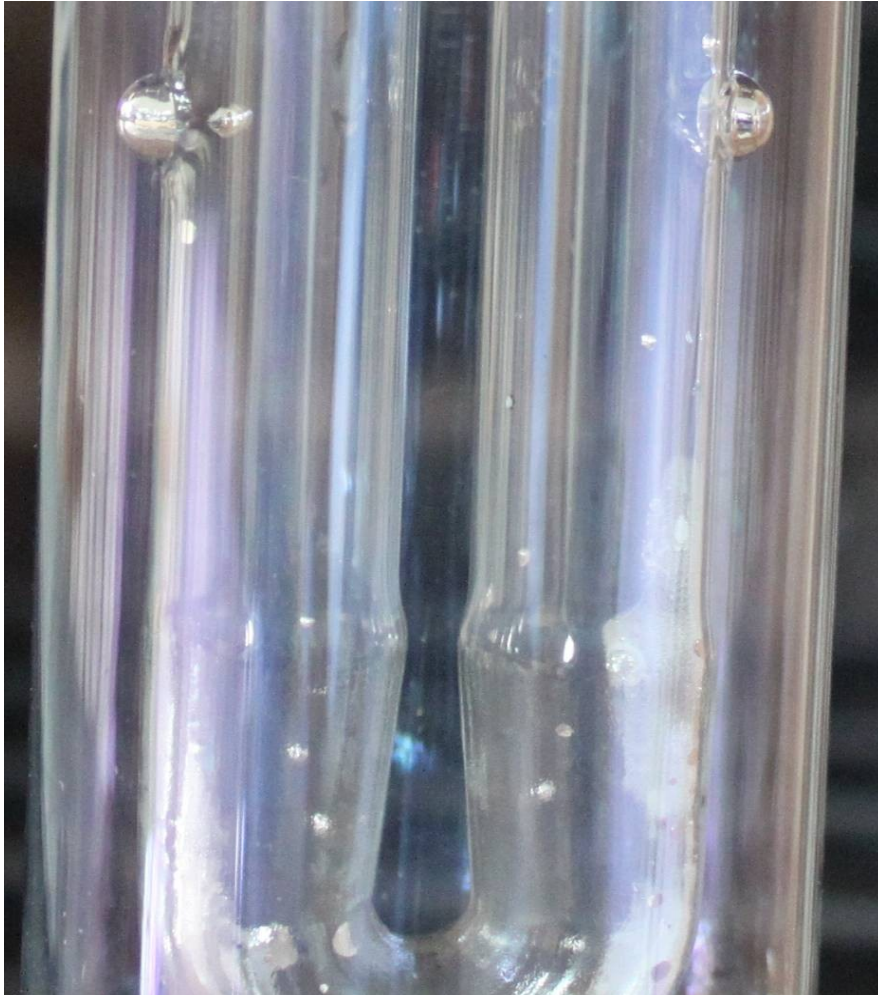


Bild 4: Mit Natriumdampf gefülltes Rohr im Tageslicht. Es ist kein Nebeneffekt zu erkennen.

Wie oben schon beschrieben hat Natrium nicht nur eine gelbe „Linie“ sondern zwei die nahe beieinanderliegen. Das mit Natriumdampf gefüllte Rohr hat damit nicht nur eine Frequenz sondern drei für die es als Filter wirkt:

- Die erste gelbe Linie,
- die zweite gelbe Linie,
- die Differenz der Frequenzen der beiden gelben Linien wenn der Dampf auf der langwelligeren der beiden Linien bereits angeregt ist

Vom Natrium zum Rubidium

Rubidium hat zwei Linien im infraroten Bereich. Diese beiden Linien liegen 6,8346875GHz auseinander. Ein Behälter mit Rubidiumdampf wirkt damit für die beiden Frequenzen im infraroten Bereich und deren Differenz als Notch-Filter vorausgesetzt das Rubidium ist auf der langwelligeren der beiden Linien bereits angeregt.

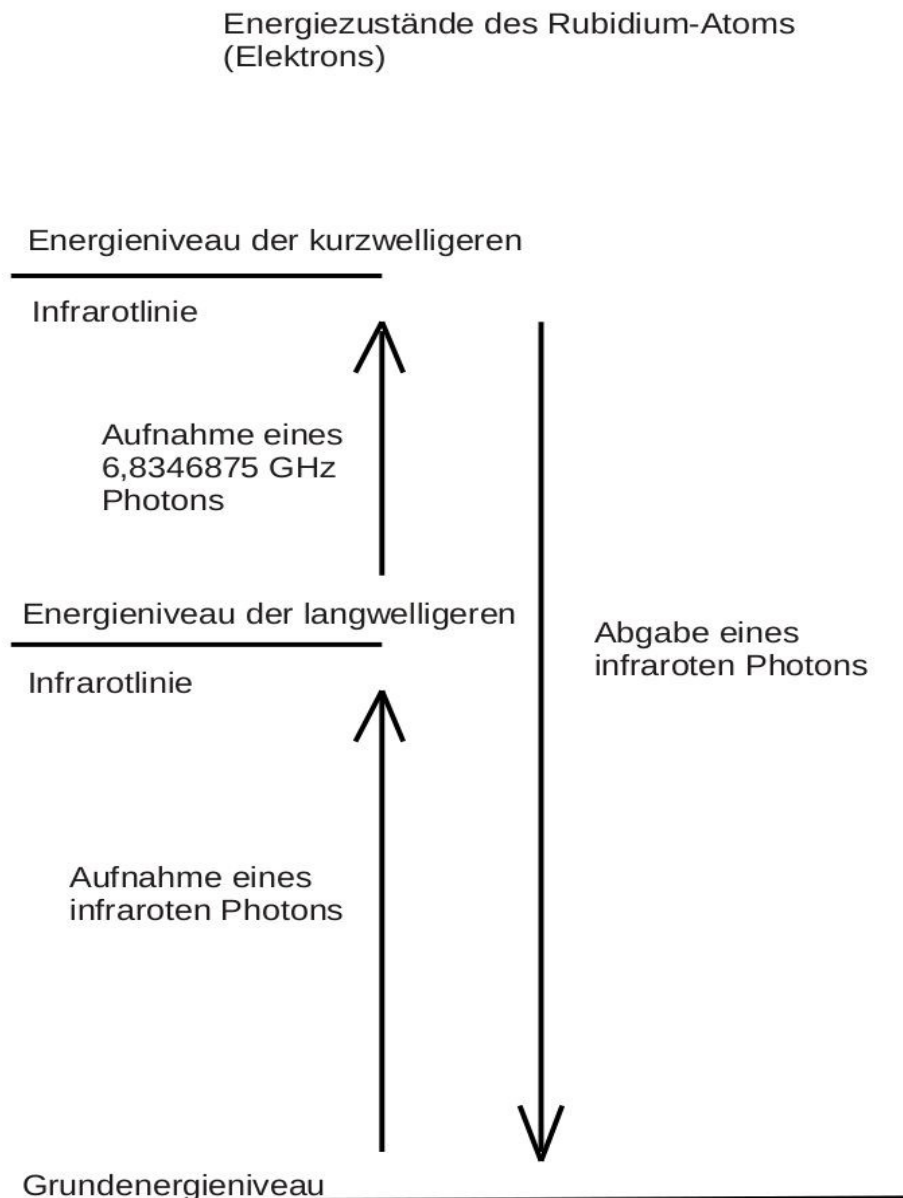


Bild 5: Die Wirkung des Rb 87 als Bandsperre für 6,8346875 GHz

Die Realisierung des Rubidium-Normals

Ein Rubidium-Normal besteht aus einem kleinen Tönnchen in dem sich Rubidium Rb 87 befindet. Dieses Rubidium wird durch keine kleine Heizung zum verdunsten gebracht. Damit es für die 6,8346875 GHz Frequenz als Filter wirkt muss es auf der unteren Linie „angeregt“ werden. Dafür wird es mit einer Infrarotlampe (einer Rb 85 – Lampe) bestrahlt. Dieser Aufbau wird nun mit einem 6,83... GHz Signal durchleuchtet und die Frequenz dieses Signals solange nachgestellt bis das Dämpfungsmaximum gefunden ist.

Prinzipieller Aufbau eines Rubidium-Normals

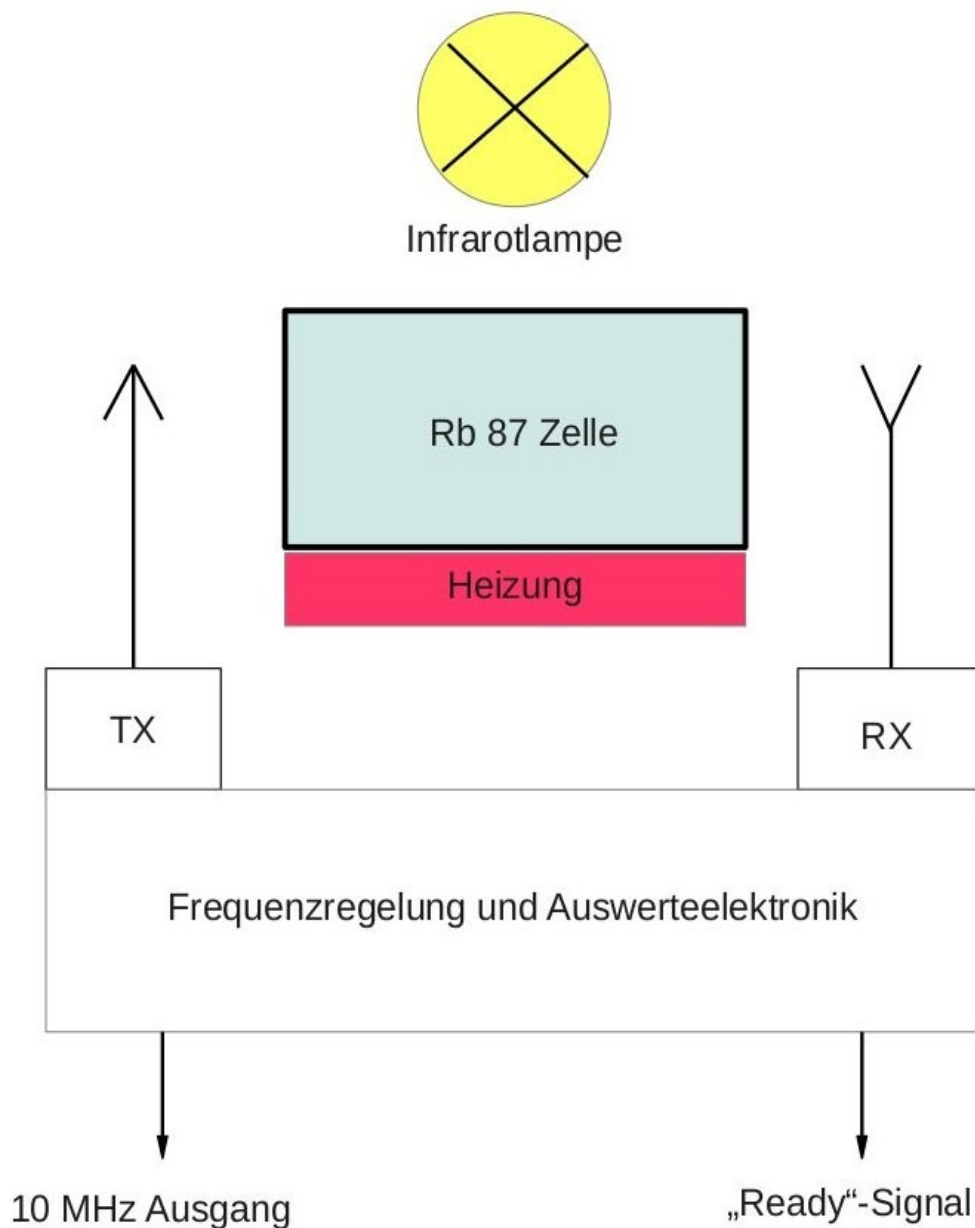


Bild 6: Der prinzipielle Aufbau eines Rubidium-Normals

Vortrag: Das Rubidium-Normal, ein sehr genauer Signalgenerator auch für den Funkamateur

Der mechanische Aufbau

Alle Komponenten sind in einem kleinen Gehäuse (135mm x 90mm x 35mm) untergebracht. Die herausgeführten Anschlüsse sind für Stromversorgung, das „Ready“ Signal und den 10 MHz Ausgang. Auf der Unterseite des Gehäuses ist ein Blatt Wärmeleitgummi aufgeklebt über das die vorwiegend in der Rubidiumheizung entstehende Wärme abgeführt werden kann.



Bild 7: Der mechanische Aufbau eines Rubidium-Normals

Die Genauigkeit

Das Dämpfungsmaximum ist (wie schon im optischen Versuch mit dem Natrium zu erkennen) nicht ganz so tief wie es vielleicht wünschenswert wäre. Deshalb kann es bei der Ermittlung des exakten Maximums zu einigen mHz Abweichung kommen was dann letztendlich zu einer erreichbaren Genauigkeit von etwa $5 * 10E-11$ führt. (entspricht 1 Hz bei 20GHz).

Der Betrieb

Der Rubidium-Oszillator wird mit 24V (genaue Spannung unkritisch) betrieben. Beim Start zieht das Gerät etwa 1,7A. Nach wenigen Minuten – wenn die Rubidiumzelle aufgeheizt ist geht der Strom auf etwa 0,5A zurück. Das TTL-Signal des „Ready“-Ausgangs zeigt an wann der PLL im Gerät eingerastet ist, die Genauigkeit ist dann besser als $5 * 10E-8$. Nach etwa einer halben Stunde Betrieb ist die Betriebsgenauigkeit von etwa $5 * 10E-11$ erreicht. Das Ausgangssignal erzeugt an einer 50 Ohm Last einen Spannung von 0,5Veff.

Warum werden solche Oszillatoren angeboten?

Rubidium-Normale werden in den Basisstationen der Mobilfunknetze eingesetzt. Die in den Geräten eingesetzten Rubidium-Lampen haben „nur“ eine Lebensdauer von 4000h bis 8000h. Um zu vermeiden, dass Basisstationen wegen des Ausfalles einer solchen Lampe unerwartet ausfallen werden die Rubidium-Normale großzügig – weit vor dem zu befürchtenden Ausfall - getauscht. Findige Händler haben einen Markt entdeckt auf dem sich diese Oszillatoren verkaufen lassen anstatt sie einfach zu verschrotten. Rubidium-Normale werden deshalb ab ca. 70 EUR (direkt aus der Basisstation, nicht geprüft) bis zu knapp 300 EUR (geprüft, ggf. sogar mit einer neuen Lampe versehen) verkauft.

Der Testaufbau

Mit dem Testaufbau sollte gezeigt werden, wie Natriumdampf auf die Bestrahlung mit Na-Licht reagiert (siehe Bilder 2, 3, und 4). Dazu wurden zwei Na-Dampflampen mit 25cm Abstand montiert und eine mit einem Reflektor versehen, der das Licht auf die Rohre der anderen Lampe bündelt. Bleibt die Testlampe aus und wird nur die zur Beleuchtung vorgesehene Lampe eingeschaltet lässt sich das Verhalten der Testlampe ohne Natriumdampf beobachten. Schaltet man die Testlampe einige Minuten ein, so verdampft Natrium in der Testlampe. Schaltet man sie aus, bleibt der Na-Dampf noch einige Minuten erhalten bis er wieder kondensiert. Während dieser Zeit lässt sich das Verhalten von Na-Dampf bei Beleuchtung mit Na-Licht in der Durchsicht (durch die Abbildungsoptik) oder direkt in der Draufsicht beobachten.

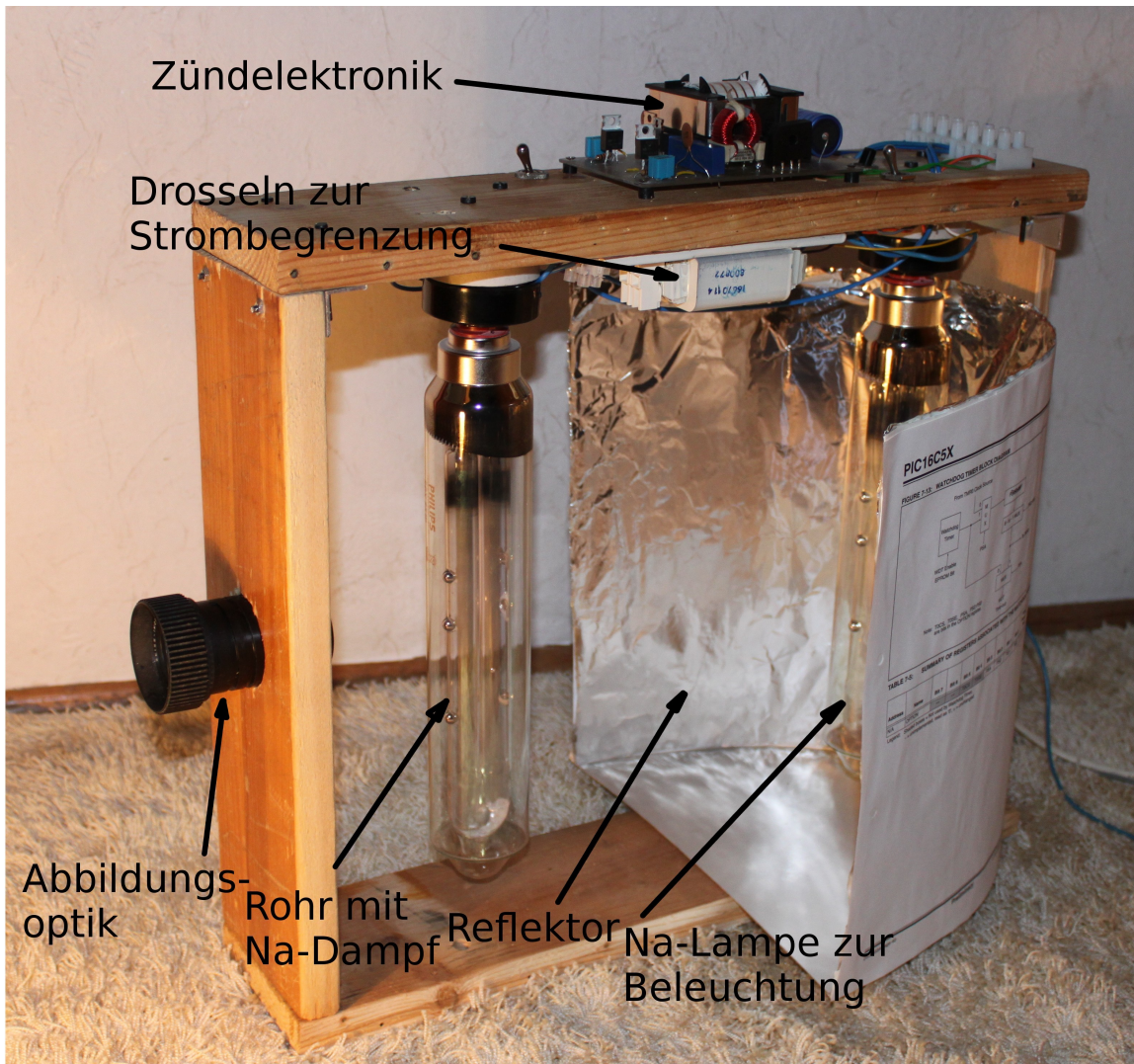


Bild 8: Testaufbau zur Demonstration des Verhaltens von Natriumdampf bei Bestrahlung mit Licht.