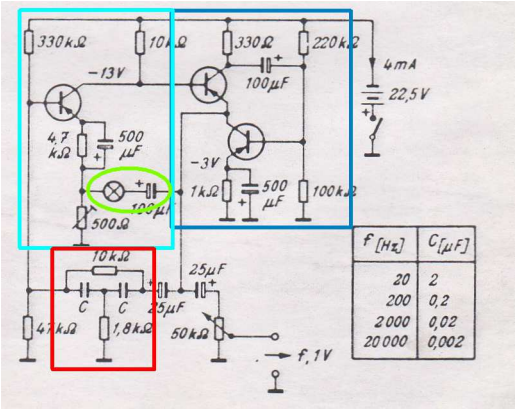
Der Sulzer Oszillator

Peter Gerber, HB9BNI



Ende der 1960er Jahre habe ich damit begonnen, eine Sammlung interessanter Schaltungen anzulegen. Das war nicht einfach. Die Dorfbibliothek hatte keine technischen Bücher, die „Zentralbibliothek" in der nächsten Kleinstadt nur wenige. Wann immer ich Zeitschriften oder Bücher ausleihen konnte, habe ich die mich interessierenden Seiten kopiert. Leider ohne jeweils die Quelle zu notieren. So kann ich nicht angeben, aus welcher Publikation die obige Schaltung stammt.

Leider ist die Kopie nicht mehr sehr kontrastreich, die Fotokopie wurde auf spezielles Papier gemacht. Damals hatte ich kaum eine Chance zu eruieren, wer dieser Sulzer war noch eine Chance für einen Nachbau: die verwendeten Transistoren waren vom Typ CK722[1], allerdings sollten erhältliche Transistoren wie AC 122 und AC 125 (PNP, Germanium) auch funktionieren. Zudem ist, wie fast immer, die verwendetete Glühlampe nicht näher spezifiziert.

Als ich, so um 2010, meine Unterlagen digitalisierte, konnte ich einen Blick auf jedes einzelne Blatt werden; der Scanner war ziemlich langsam. Ich begriff natürlich auch die Schaltung nicht, dachte aber, das sei wohl wie bei einem "Wien[2]"-Oszillator: ein Verstärker, der je nach der Phasenlage des RC-Phasenschiebers invertiert oder nicht (hellblau und dunkelblau), eine positive Rückkoppelung (regeneration) durch einen RC-Phasenschieber (rot) und die Amplitudenregelung, also negative Rückkoppelung (degeneration) durch die Glühlampe (grün). Ein Irrtum, wie sich später zeigte.

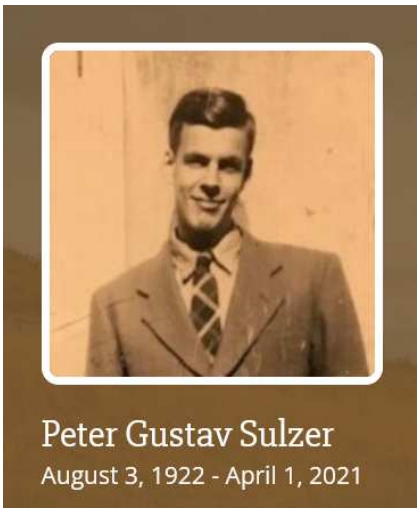
Peter G. Sulzer

Heute ist das alles viel einfacher, Internet sei Dank. Peter Sulzer wurde wohl 1922 geboren und ist 2021 gestorben. Zum Zeitpunkt, in dem diese Schaltung entstanden sein muss (der CK722 weisen auf Mitte der 1950er Jahre hin) war er wohl knapp 35

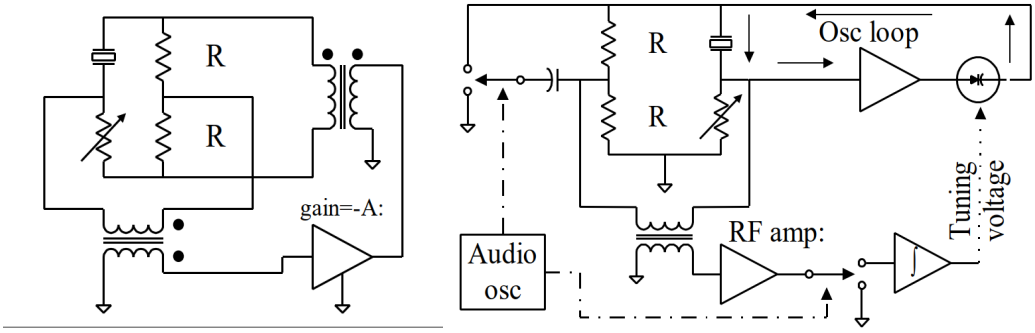
[1] Popular Mechanics hat Bauanleitungen für Rundfunkempfänger mit diesem Transistor publiziert: Oktober 1953, p 246ff. Der CK722 dürfte der einzige Transistor sein, der zeitweise in einer „Mogelverpackung“ verkauft wurde: Ein kleiner Transistor wurde in eine übergrosse Verpackung eingelötet, allerdings weil die Käufer das so wollten.

[2] Eine klassische Fehlbezeichnung. Ich nenne diesen Oszillatortyp nach seinem Erfinder "Hewlett - Oszillator".

jährig. Er hatte wohl seit etwa 1950 im US Bureau of Standards[3] gearbeitet und dort hochpräzise Quarzoszillatoren für Zeitnormale entwickelt. Pech für ihn, dass man die „Atomuhr“ erfunden hat, die schon ganz am Anfang um 4 Grössenordnungen genauer war. Später machte er sich selbständig und vertrieb seine Oszillatoren[4] kommerziell. Die Geräte werden bis heute gehandelt.



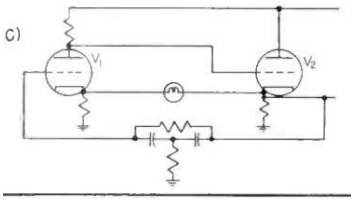
Sulzers Quarzoszillatoren waren Abkömmlinge von Meacham’s Brückenoszillator (1938 publiziert); beide Oszillatortypen hielten den Quarz mit einer Brückenkonstruktion im immer gleichen Resonanzpunkt.



Links: Meacham, rechts: Sulzer's Quarzoszillator. Das variable Element in der Brücke wurde bei Meacham realisiert durch eine Glühlampe, wie Sulzer das realisiert hatte, weiss ich nicht.[5]

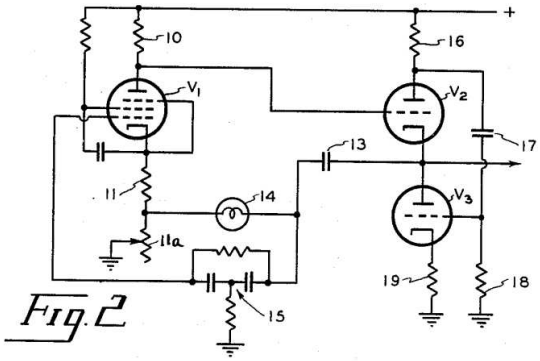
Publiziert[6] hat Sulzer den hier vorgestellten RC-Oszillator bereits 1950. Hier das Prinzip aus dieser Publikation, leider auch etwas kontrasschwach.

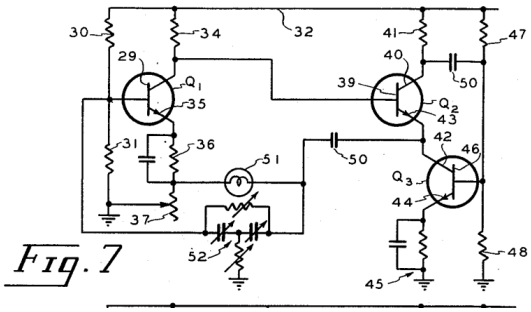
[3] Heute NIST. Das Bureau of Standards war damals, wie heute, eine hochmoderne Forschungsanstalt. Frau Professor Wu von der Columbia Universität fand nur dort rasch die notwendigen Geräte, um eine Idee (nämlich dass die Parität bei der schwachen Wechselwirkung nicht erhalten sei) ihrer beiden Kollegen Lee und Yang zu testen. Lee und Yang machten ein Jahr später einen Kurztrip nach Stockholm, Wu nicht. So war das damals eben.
[4] Es gibt noch mindestens einen weiteren RC-Phasenschieberoszillator von Sulzer.
[5] Richard Karlquist: A New Type of Balanced-Bridge Controlled Oscillator. HP, 1999
[6] Sulzer P.: Wide Range RC Oscillator. Electronics, September 1950 p 90 - 91



Die beschriebene Funktionsweise entspricht ganz und gar nicht dem, was ich mir beim Anblick der Lampe so vorgestellt hatte. Sulzer schreibt in der Publikation (und später auch in der Patentschrift): Die positive Rückkoppelung (regeneration) geht von der zweiten Röhre durch die Lampe an die Kathode der ersten Röhre, die Amplitudenregelung geschieht im gleichen Zweig durch die Widerstandszunahme der Glühlampe bei Erwärmung. Das überbrückte T-Glied von der Kathode der zweiten Röhre an das Gitter der ersten Röhre ist frequenzbestimmend, wirkt aber abschwächend (degeneration), weil dieser Rückkoppelungszweig die falsche Phasenlage hat. Das überbrückte T-Glied wirkt ja als Kerbfilter, bei der Frequenz der **tiefsten Kerbe** wird die erste Röhre am **wenigsten gebremst**, dort schwingt die Anordnung also. Die Schwingfrequenz wird also nicht durch die Phasenlage des RC-Netzwerkes bestimmt, sondern durch dessen Dämpfung! Obwohl dieses überbrückte Netzwerk auch ein Phasenschieber ist, wird nur dessen frequenzabhängige Dämpfung ausgenützt. Das tönt alles ziemlich veworren. Und ist auch ziemlich heikel, wie (unter anderen) auch Toshniwal[7] mit seinem Twin-T-Verstärker erleben musste.

Den RC-Oszillator meiner Kopie hat Sulzer 1956 auch patentierert. Sowohl mit Röhren als auch mit Transistoren als Verstärker[8].





Sulzer hatte schon 1950 einen (LC) Oszillator publiziert, dessen Verstärker mit gekoppelten Kathoden arbeitete[9].

[7] Sihe: Der TwinT-Oszillator. In Arbeit.
[8] US Patent 2764643, eingereicht 23. März 1954, erteilt 25. Sept 1956
[9] Peter G. Sulzer: Frequency and Amplitude Stability of the Cathode-Coupled Oscillator. Proc IRE May 1950, p540ff

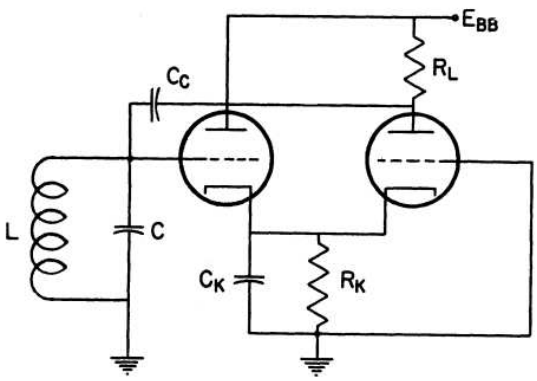


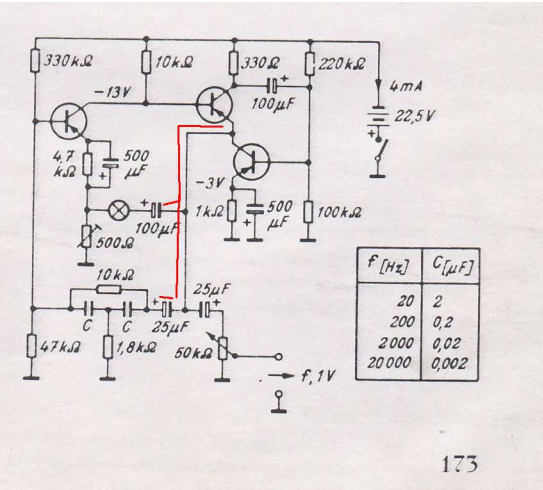
Fig. 1—The cathode-coupled oscillator.

Den ganzen Verstärker (also alles ausser dem LC-Parallelkreis) sieht er als „negativen Widerstand“, der natürlich bei Anschluss eines LC-Parallelkreis zu schwingen beginnt.

Für Sulzer hatte dieser Oszillatortyp offenbar einen unakzeptabel hohen Anteil an geradzahligen Harmonischen. Für den neuen Oszillator hat er deshalb die zweite Röhre des Verstärkers mit zwei Trioden in einer Art Serienschaltung ausgestattet. Mit der zusammen mit dem RC-Phasenschieber patentierten Anordnung erreicht er, dass die Ausgangsstufe (also die beiden Trioden in Serie) einen hohen Strom liefern oder nach Masse ableiten kann, ein Strom der ausreicht, die Glühlampe zu „bedienen“[10]. Röhren existieren eben nur als „NPN“ – Bauteile und Transistoren konnten um 1955 immer noch nur kleine Ströme liefern oder ableiten; deshalb diese ungewöhnliche Anordnung des dunkelblau umrandeten Teils des Verstärkers. Mit modernen Transistoren würde Sulzer wohl eine Endstufe mit komplementären Transistoren verwenden.

LTSpice Simulationen

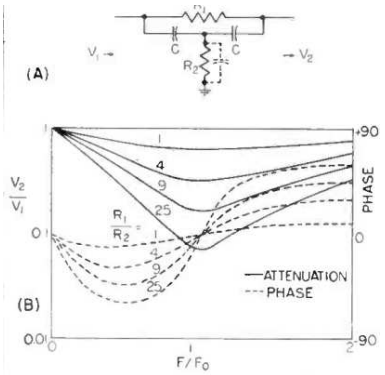
In meiner Kopie ist klar, dass das Signal am Eingang der Lampe und am Eingang des überbrückten T-Gliedes die gleiche Phasenlage haben müssen; sie stammen ja aus der gleichen Quelle.



[10] Das war für Bill Hewlett sicher auch ein Riesenproblem bei seinem RC-Oszillator und dürfte meines Erachtens die Röhrenwahl beeinflusst bzw erzwungen haben.

Klar ist auch, dass der Lampenstrom am Emitter des erstenTransistors die umgekehrte Wirkung hat wie die Spannung nach dem T-Glied an die Basis des Transistors, sofern das T-Glied keine Phasendrehung bewirkt.

Tatsächlich hat das überbrückte T-Glied dort, wo die Kerbe am tiefsten ist, die Phasenlage 0, überall sonst aber nicht.



Bei dieser Frequenz würde die Rückkoppelung also bremsend wirken, aber es kommt eben nur eine kleine Amplitude. Bei jeder anderen Frequenz ist die Amplitude grösser und wird so, laut Sulzer, die Oszillation bei jeder anderen Frequenz verhindern.

Dass dieser Oszillatortyp tatsächlich gebraucht wurde, zwigt der folgende Ausschnitt aus einem Buch zur Ausbildung von Elektroingenieuren der US Luftwaffe[11]:

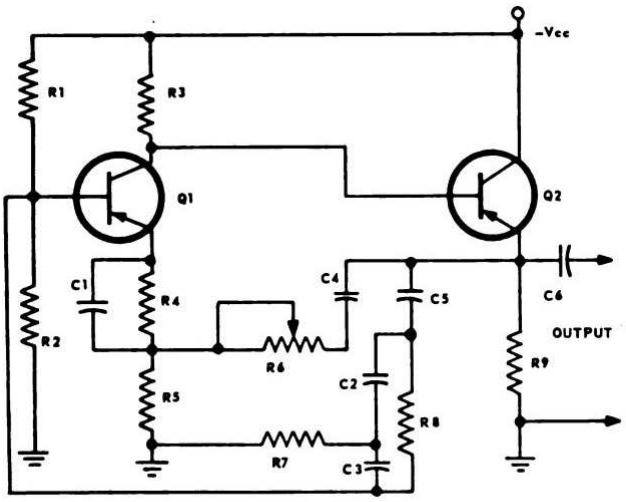
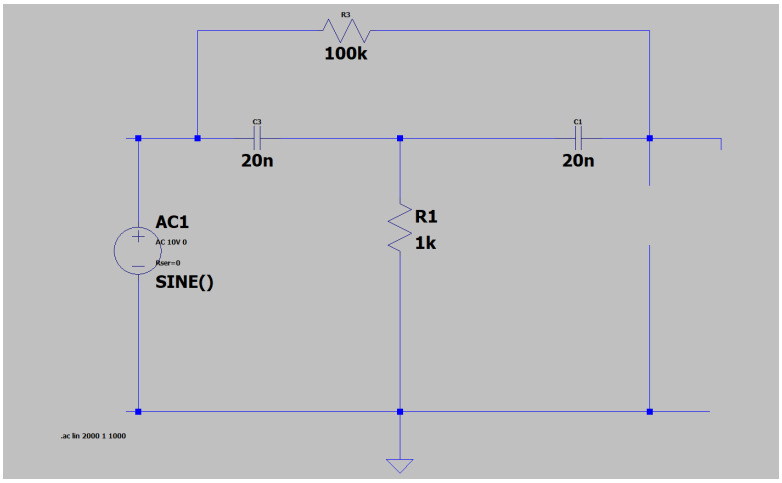


Figure 8–69. Transistor Bridged-T Oscillator

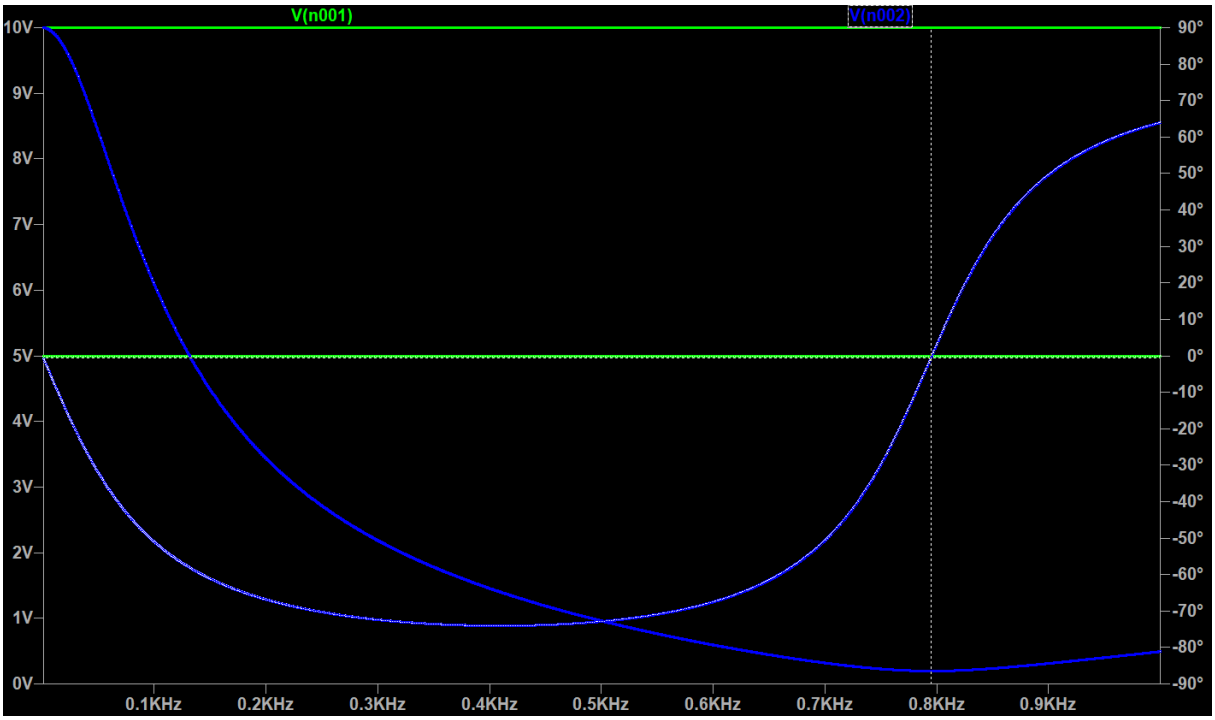
In diesem Prinzipschaltbild ist die Glühlampe weggelassen beziehungsweise durch den Trimmer R4 angedeutet. Das briged-T-Netzwerk ist um 90 Grad gedreht unten in der Mitte gezeichnet. Mit dem Trimmer an Stelle der Lampe schwingt die Anordnung natürlich auch, dürfte aber erheblich Oberwellen erzeugen. Diese frühen Transistoren hatten aber derart gekrümmte Kennlinien, dass auch durch diese Krümmung eine Amplitudenbegrenzung erfolgt.

[11] Air Force Manual der US Armee, 1962

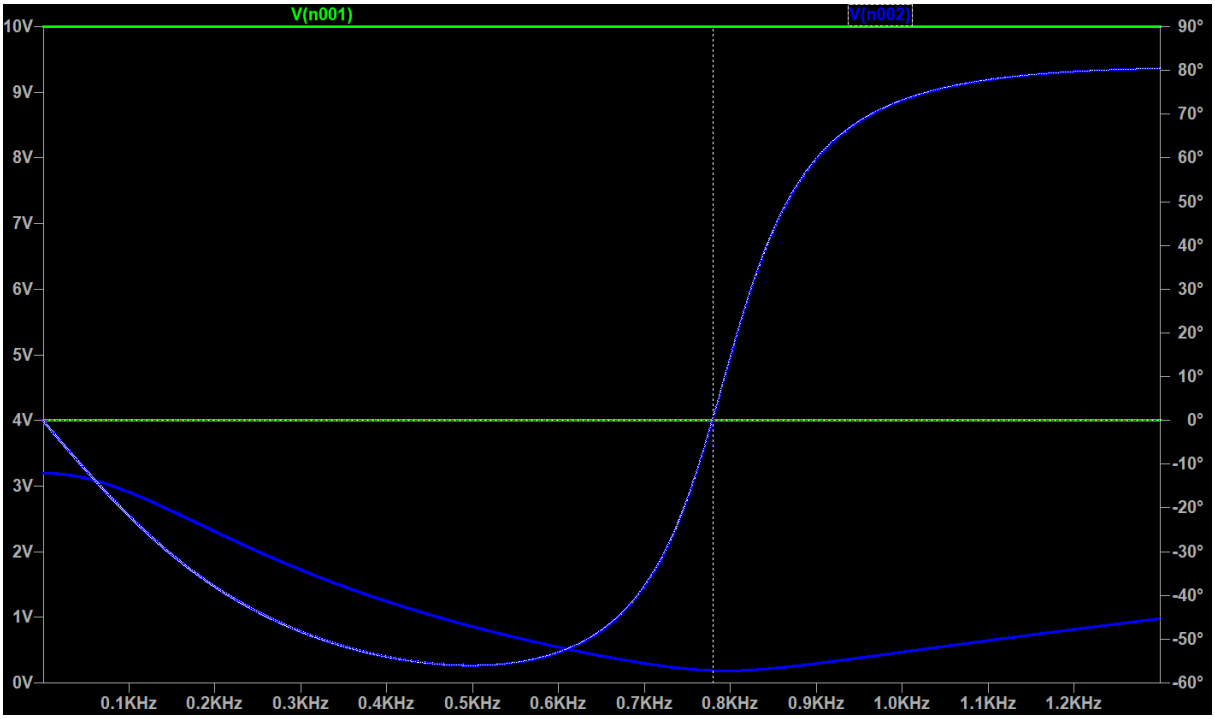
Ich habe ein briged T-Netzwerk mit den folgenden Komponenten in LTSpice simuliert. Rechts ist der Anschluss für einen Belastungswiderstand.



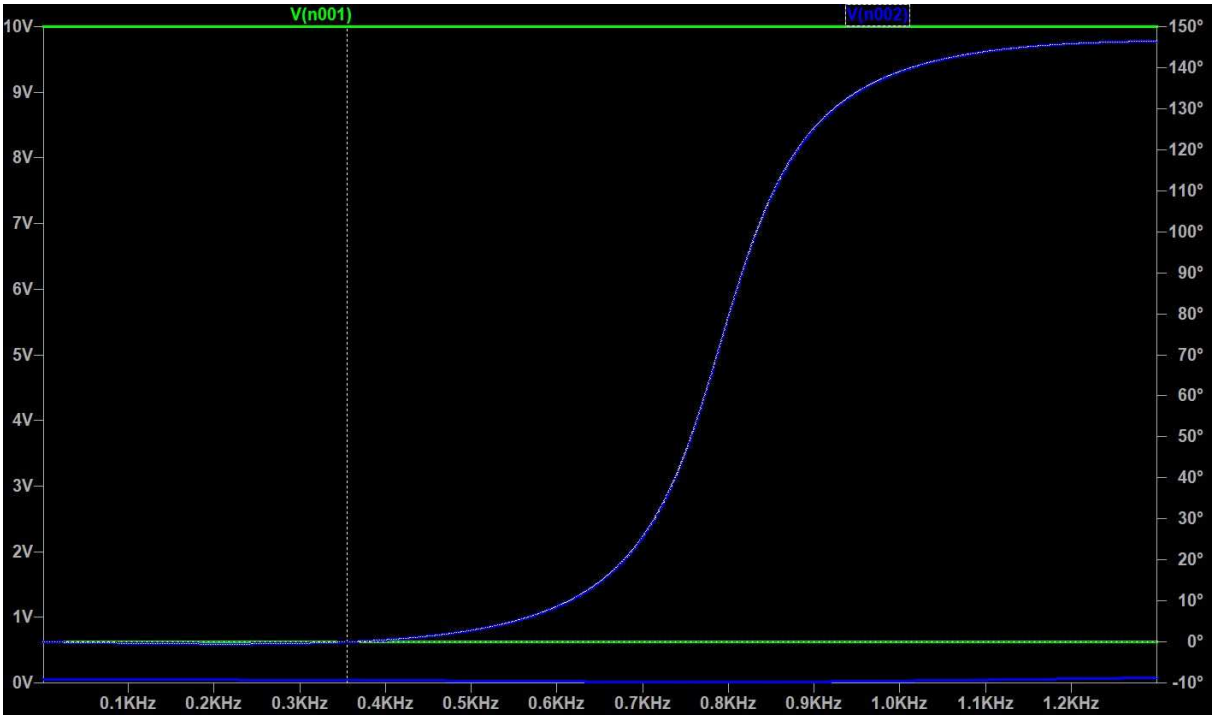
Tatsächlich fallen beim **unbelasteten** briged-T-Glied 0 Grad Phasenverschiebung und Amplitudenminimum genau zusammen, hier bei der Frequenz von zirka 800 Hz.



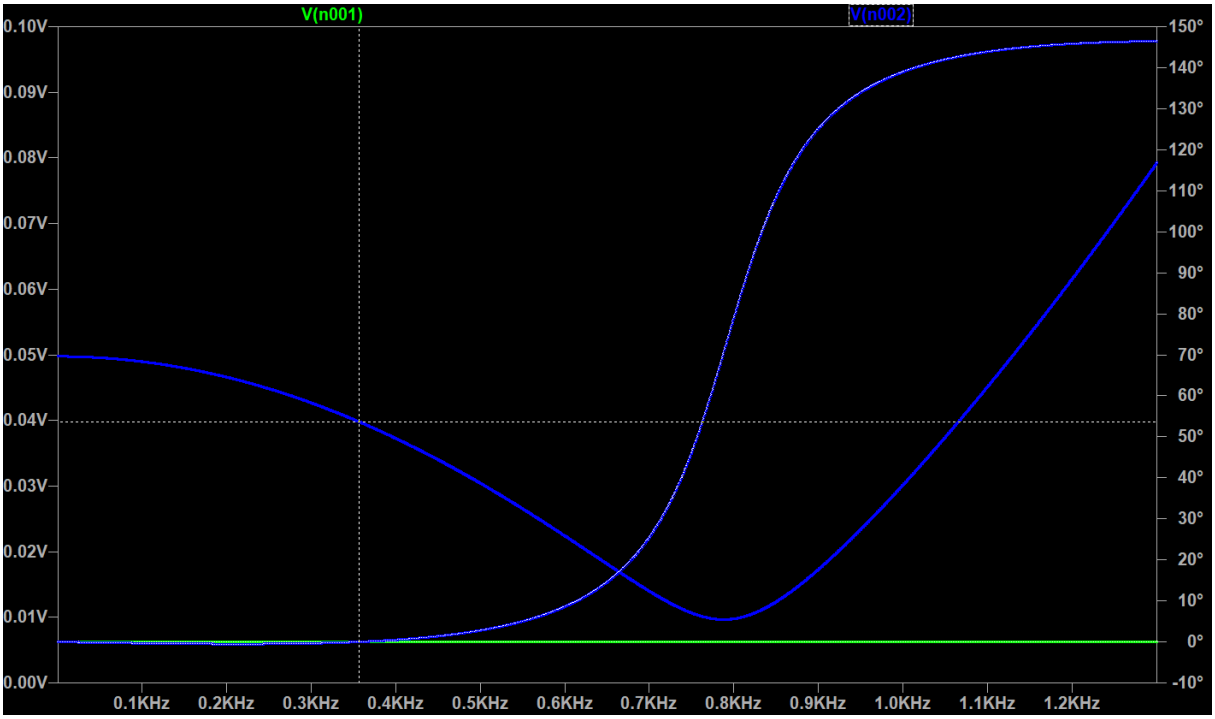
Belastet man das briged T-Glied mit 47kOhm, also mit dem Widerstand des unteren Teils des Basisspannungsteilers im Schema von Sulzer, so fallen die beiden Frequenzen (also diejenige mit 0 Grad Phasenverschiebung und diejenige mit minimaler Amplitude) nicht mehr genau auf die gleiche Frequenz, aber das Prinzip funktioniert offenbar dennoch. Die gepunktete grüne Linie ist die Phase des Wobbeloszillators, also immer 0 Grad. Die gepunktete blaue (hellere) Linie ist die Phase am Ausgang. Die Amplituden sind durchgehend gezeichnet.



Belastet man das Netzwerk stärker, hier mit 500 Ohm, so wandert die Frequenz mit 0 Grad Phasenverschiebung zu deutlich kleineren Frequenzen.



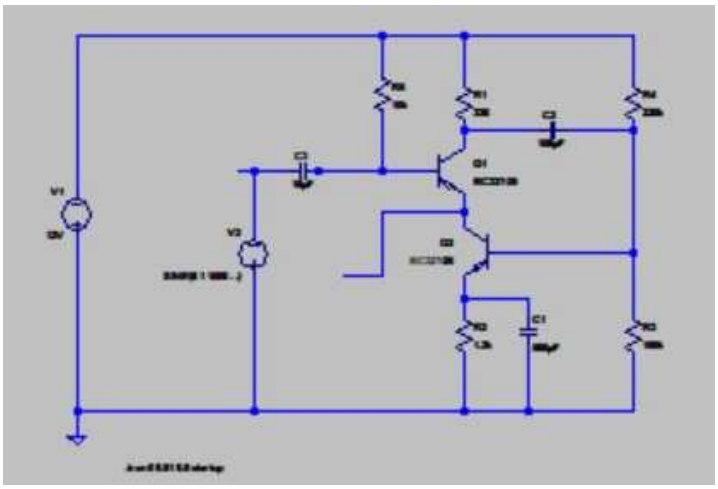
Allerdings wird die Amplitude dann sehr klein, hier das gleiche Bild aber mit geänderter Skala der Ausgangsamplitude (die Linie der Amplitude liegt jetzt oberhalb der Linie der Phase). Die Amplitude beträgt nur noch 40 mV bei 10 V Eingangsamplitude. Die Frequenz bei 0 Grad Phasenverschiebung liegt nun bei 357 Hz.

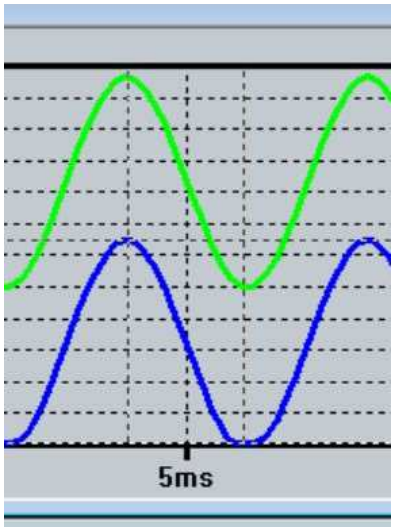


Zusammenfassung: Man könnte mit einem bridged T-Netzwerk auch einen konventionellen Phasenschieberoszillator bauen, also einen Oszillator mit positiver Rückkoppelung durch das Netzwerk. Dazu braucht man einen Verstärker mit 0 Grad Phasenverschiebung. Der Verstärker braucht eine Spannungsverstärkung von 50 bis weit über 2000, je nach der Lastimpedanz des briged-T-Netzerks. Das ist aber dann **nicht** Sulzers Oszillator. Sulzers Oszillator hat einen Verstärker, der invertiert. Die positive Rückkoppelung (regeneration) wird der ersten Röhre an der Kathode zugeführt, damit invertiert die erste Röhre für diese Zufuhr nicht. Die Wahl der Schwingungsfrequenz geschieht durch die frequenzabhänge Amplitude nach dem Netzwerk. Dieses Signal wird so zugeführt, dass der Verstärker umso stärker gebremst wird, je höher die am Gitter der ersten Röhre zugeführte Amplitude ist.

Sulzers „Gegentaktverstärker“

Dass die erste Stufe (im ersten Bild des Textes hellblau umrandet) von Sulzers Verstärker invertiert, ist klar. Was macht die zweite Stufe mit den Röhren/Transistoren 2 und 3? Natürlich habe ich auch diese Stufe des Verstärkes (im ersten Bild ganz oben dunkelblau umrandet) in LTSpice nachgebaut, allerdings mit PNP - Siliziumtransistoren, BC237. Funktioniert ausgezeichnet.

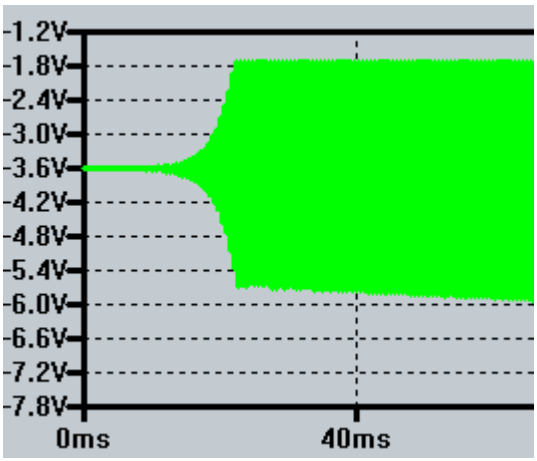


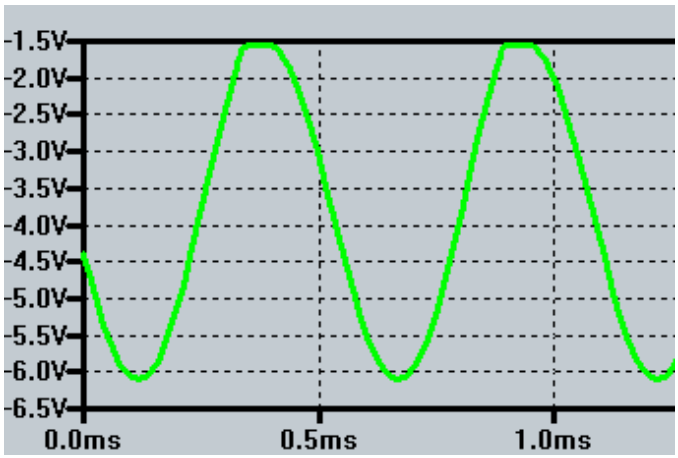


Man sieht auch, dass das Eingangssignal an die Basis des oberen Transistors (grüne Kurve) in Phase ist mit dem Ausgang an der Verbindung Emitter oben- Kollektor unten (blau). Die Spannung ist praktisch genau gleich.

Der hellblau umrandete Teil von Sulzers Verstärker ist eine gewöhnliche Verstärkerstufe mit dem Eingang an der Basis und dem Ausgang am Kollektor. Diese Stufe invertiert also das Signal. Zusammen mit der Stufe aus zwei Transistoren invertiert also auch der ganze Verstärker. Die Serienanordnung der Elemente 2 und 3 dient nur dazu, dem Verstärker eine genügend kleine Ausgangsimpedanz zu geben. Das Netzwerk braucht allerdings nicht sehr viel Strom, mit 47 kOhm belastet muss die Quelle (AC1 im Schema) maximal 1.5 mA liefern. Aber der Strom durch die Lampe an den Emitter des ersten Transistors ist vermutlich deutlich höher.

Natürlich habe ich auch den Oszillator simuliert. Leider hatte[12] ich keine geeignete Glühlampe in LTSpice, aber mit einem Festwiderstand von 1.15 kOhm läuft der Oszi an, lansam zwar, die Aufzeichnung beginnt 0.95 Sekunden nach Spannungszufuhr, es dauert also fast eine Sekunde, bis der Oszillator schwingt.

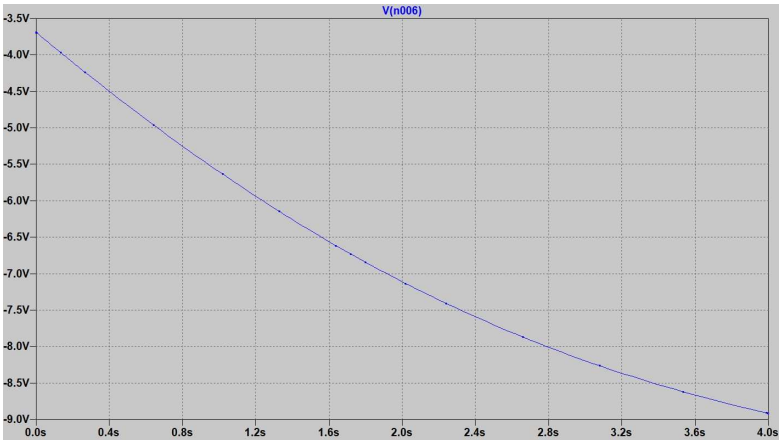




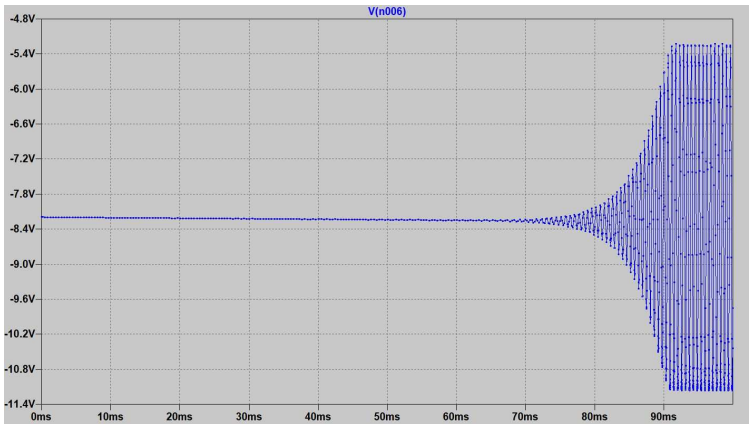
[12] In LTSpice hat keines meiner Lampenmodelle funktioniert. Im Labor bräuchte man für die transistorisierte Version wahrscheinlich eine Lampe mit 500V (oder mehr) und 1 W. Die würede im Bereich, in dem sie auch regeln kann etwas mehr als 1 kOhm Widerstand haben. Dürfte schwierig zu finden sein.

Links das Startverhalten, 0.95 Sekunde verzögert registriert, rechts die Spannungskurve am Ausgang. Kein Spitzensinus, aber mit einer geeigneten Lampe wäre das Signal wohl schöner.

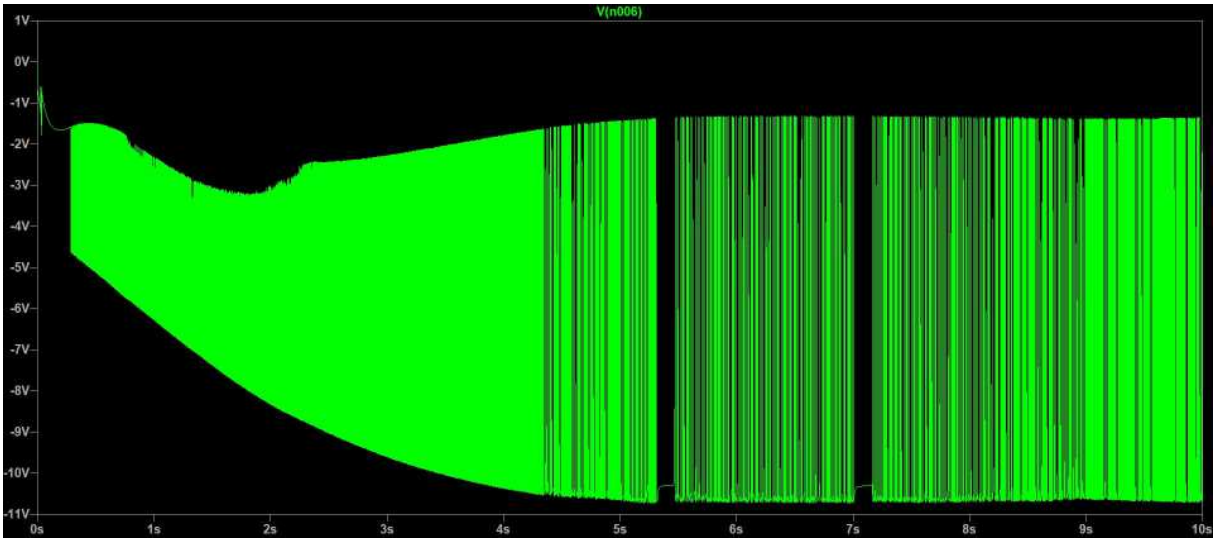
Allerdings ist das nur am Anfang der Simulation so. Nach kurzer Zeit läuft die Simulation Amok.



Wenn ich mir die Simulation von Sekunde 1-4 nach dem Start anzeigen lasse, sind keine Oszillationen mehr sichtbar. Man sieht allerdings auch nur sehr spärliche Datenpunkte.



Zu welchem Zeitpunkt auch immer nach dem Start (hier nach 4 Sekunden) ich mir eine kurze Zeitspanne anzeigen lasse, beginnt der Oszillator von Neuem. Das ist aber eher ein Problem der Simulation in LTSpice als das reale Verhalten des Oszillators. Spice simuliert in immer grösser werdenden Zeitabständen, wenn die Veränderungen des Signals kleiner werden (oder die Veränderungen kleiner zu werden scheinen, weil immer mehr oder weniger der gleiche Punkt eines oszillierenden Signals simuliert wird. Eine Art Stroboskopeffekt.



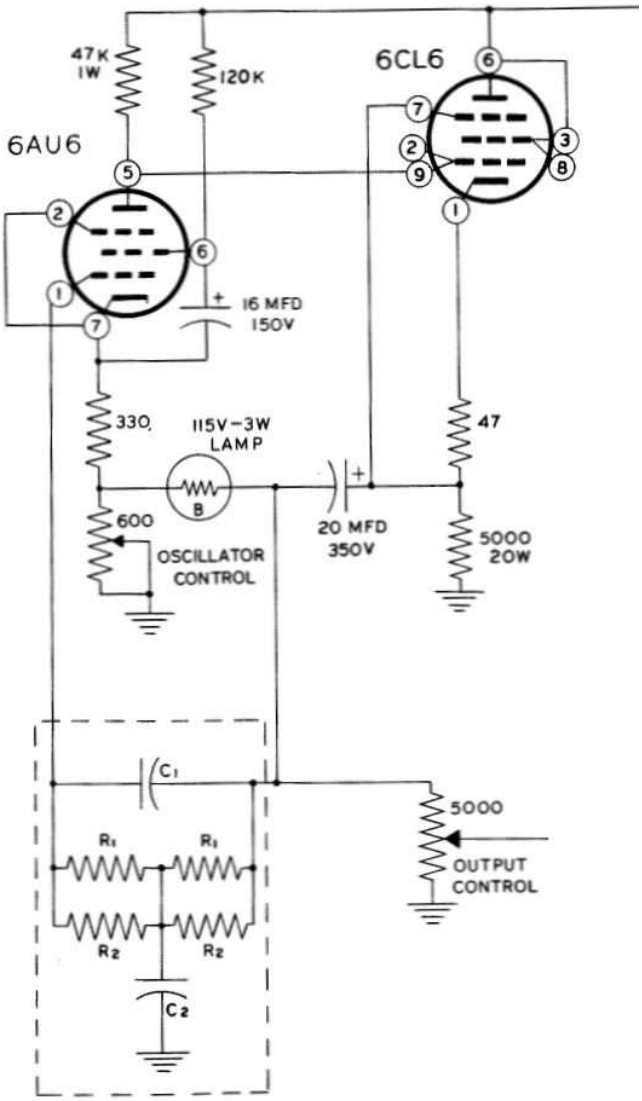
Wenn ich die einzige bei mir einigermassen funktionierende LTSpice-Glühlampe (Autor: Krucker) einbaue, wird die Simulation chaotisch!

Heathkit

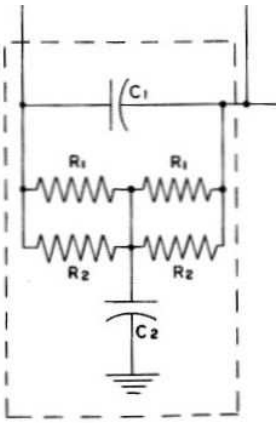
Dass das Prinzip von Sulzer funktioniert, sieht man daran, dass Heathkit einen solchen Oszillator nachgebaut und als Bausatz vertrieben hat: den AG9A. Allerdings mit einigen Abweichungen.

- Man hat auf den speziellen Sulzer Verstärker verzichtet und als zweite Stufe einen „normalen“ Röhrenverstärker eingebaut. Verwendet wurde eine als Triode geschaltete hochsteile Leistungspentode. Die 6CL6 hat eine Anodenverlustleistung von gut 8 W![13] Laut Datenblatt beträgt die NF-Ausgansleistung etwa 2.5 W.
- Der Oszillator von Heathkit hat nicht eine kontinuierliche Frequenzeinstellung sondern eine **dekadische** Einstellung der Frequenz mit 3 signifikanten Ziffern, von 10 Hz bis 100 kHz.
- Das briged T-Netzwerk wurde mit vertauschten Komponenten gebaut. Das Bodediagramm bleibt identisch, aber die Konstruktion ist erleichtert und wohl auch günstiger zu realisieren. Man braucht nur wenige Kondensatoren, aber viele Widerstände.

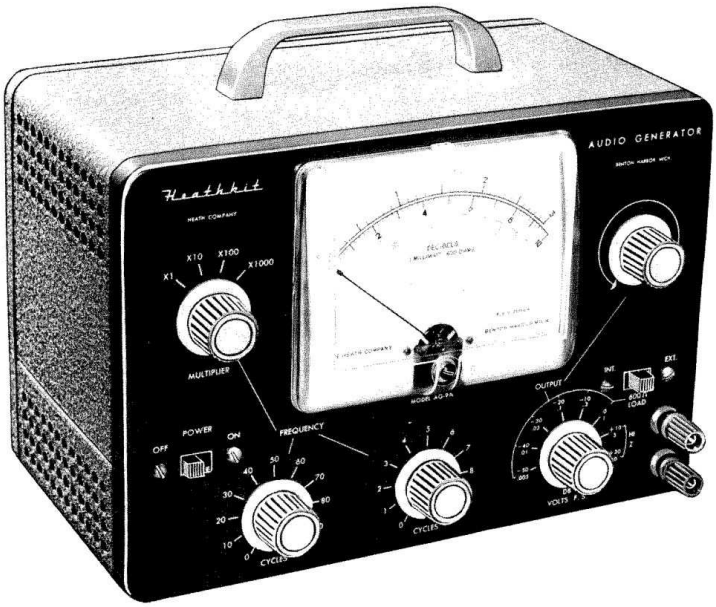
[13] Röhrendatenblätter bekommt man zuverlässig bei https://frank.pocnet.net/sheetsE1.html . Manchmal auch Fotos, auch welche von mir.



Schema des Oszillators, auch hier mit Amplitudenregelung und positive Rückkoppelung mit einer Glühlampe, 115 V, 3W. Der Heisswiderstand dieser Lampe beträgt also 4.4 kOhm, der Kaltwiderstand rund 1/15 davon. Solche Lampen werden üblicherweise mit 2 – 3 mal dem Kaltwiderstand betrieben, also mit 600 -900 Ohm.

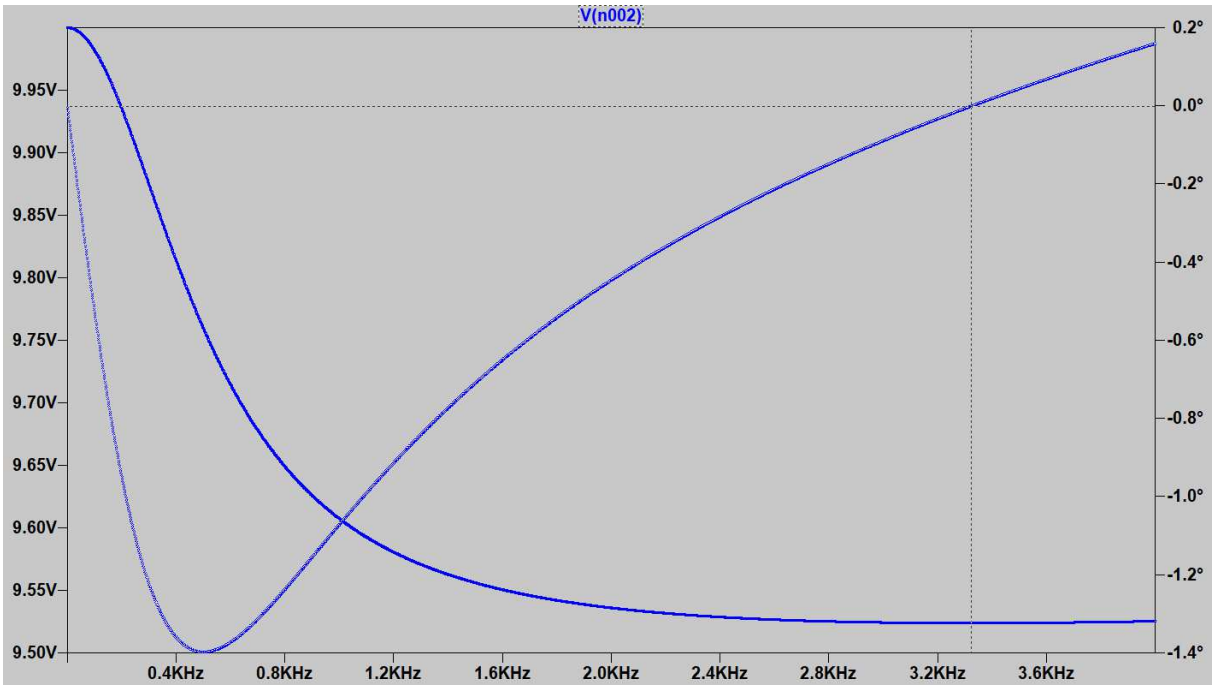


Das Netzwerk mit jeweils gleichen Widerständen links und rechts im horizontalen Teil des "T", die Parallelschaltung dient zur **dekadischen** Frequenzeinstellung. C_2 ist 10 mal so gross wie C_1 . und dient zur Einstellung der ersten signifikanten Ziffer der Frequenz.



Ein durchaus ansprechendes Gerät für den Bastler. Die Frequenz beträgt

$$f = 1/(2*\pi*R*\sqrt{C1*C2})$$



Das Bode Diagramm mit je 363.3 kOhm und 5 nF bzw 500pF Kondensatoren würde der Oszillator bei 3.33 kHz schwingen. Eingangsspannung ist 10 V, die Dämpfung also rund 5%. Das ist durchgehend so, die Lampe hat also kaum was zu regeln.

Weitere Geräte nach diesem Prinzip sind mir noch nicht begegnet. Ob man die Glühlampe hier überhaupt ersetzen kann, ist für mich nicht sicher. Die Lampe regelt ja nicht nur (das kann man mit einem FET oder anderen Komponenten problemlos hinbekommen, siehe Artikel „Das kleine Helferlein“), sie muss ja auch das Nutzsignal rückkoppeln. Ob man das zuverlässig mit einem FET hinbekommt, ist für mich fraglich.

CC BY-NC-ND