

Die interessante Schaltung:

Schwere fahrbare Motorfunkenstation Telegrafie-Sender mit 2 x RS 19 Nach Hptm. Juppe, 1925

Jean Ritzenthaler, Genf, GFGF; Hermann Freudenberg, Netphen, GFGF; 1997

Von Hermann Freudenberg im Januar 2002 bearbeitet für <http://www.radiomuseum.org/>

Das Schaltbild Bild 1 [1] zeigt einen selbsterregten Telegrafie-Sender mit zwei parallel geschalteten Telefunken-Sendetrioden RS 19. Die Tastung erfolgt auf der Primärseite des Anodenspannungstransformators; die Doppelweggleichrichtung geschieht mit der Gleichrichterröhre RG 64. Die Senderöhren werden in Schalterstellung „Mit Ton“ durch die ungesiebte Anodenspannung mit der Frequenz der Wechselstromquelle moduliert; „Ohne Ton“ wird die Anodenspannung über eine Siebkette mit zwei Kapazitäten und einer Drossel geglättet.

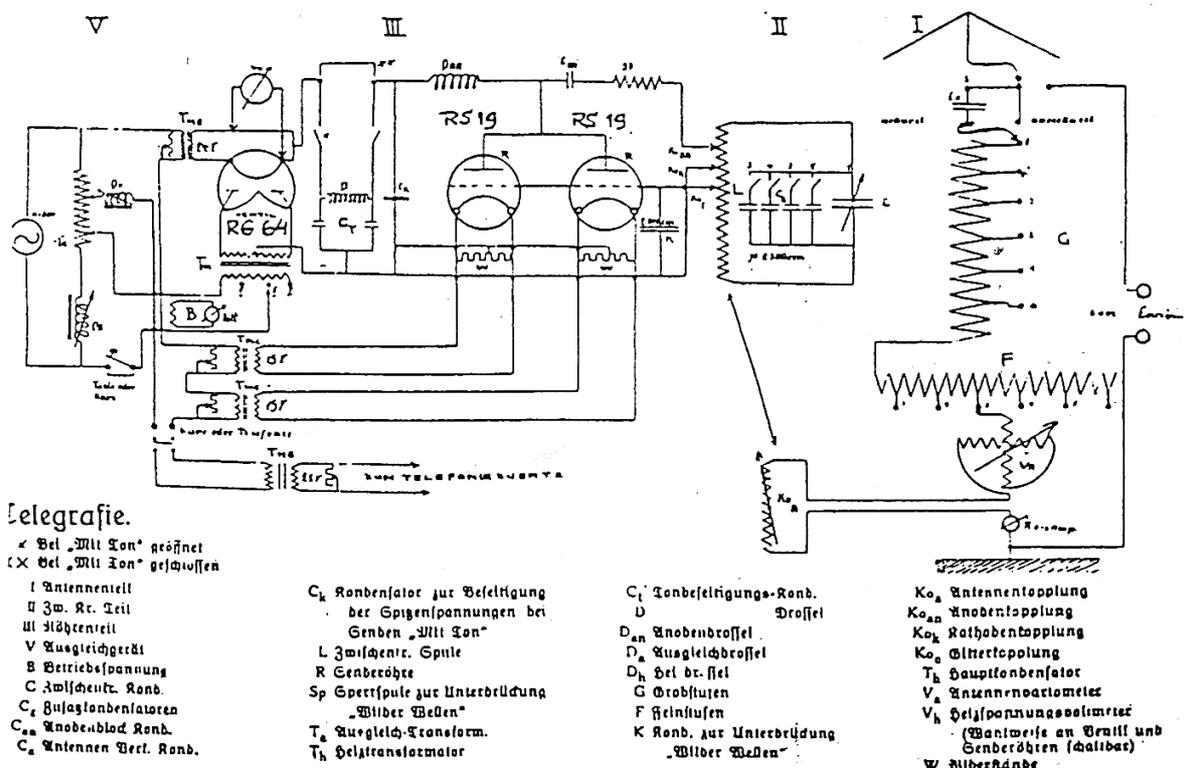


Bild 1: Fahrbare schwere Funkenstation von 1925; Schaltbild

Die Anodenspannung wird den Senderöhren über eine HF-Drossel zugeführt, der Zwischenkreis ist durch einen Kondensator an die Anoden angekoppelt. Die Anpassung der Röhrenimpedanzen an den Zwischenkreis erfolgt über Anzapfungen der Spule. Das Gitter ist direkt an eine Spulenzapfung angeschlossen und liegt damit gleichspannungsmäßig fest auf Katodenpotential. Die Abstimmung erfolgt durch zuschaltbare Festkapazitäten bzw. durch einen einstellbaren Kondensator.

Die Antenne ist transformatorisch an den Zwischenkreis angekoppelt; die Kopplung ist variabel. Die Abstimmung erfolgt über Verkürzungskondensator, Spulenzapfungen und Variometer.

Die Datenblätter der RS 19 (Bild 2, Bild 3) nennen eine maximale Anodenbetriebsspannung von 3000 V und eine maximale Anodenverlustleistung von 150 W. Daraus ergibt sich ein maximaler Anodengleichstrom von 50 mA.

Maße in mm
Sockel von unten in Richtung
gegen die Röhre gesehen

TELEFUNKEN

RS 19

175 Watt - Senderöhre

Allgemeine Daten

Kathode	Material Wolfram, direkt geheizt		
	Heizspannung $U_h =$	14 V*)	
	Max. Heizstrom $I_h =$	4,8 A	
Emission	bei $U_a = U_g = 200$ V	I_e	etwa 0,3 A
Durchgriff	gemessen bei $I_a = 55$ mA,		
Verstärkungs-	$U_a = 2000 - 3000$ V	D	etwa 1,4 %
faktor	$\mu = 1/D$	etwa 72
Steilheit	gemessen bei $U_a = 3000$ V,		
	$I_a = 35 - 55$ mA	S	etwa 1,5 mA/V
Kapazitäten	Gitter/Anode	C_{ga}	etwa 6 pF
	Eingang	C_e	etwa 9 pF
	Ausgang	C_a	etwa 1 pF
Maximale Anodenbetriebsspannung		$U_a =$	3000 V
Maximale Anodenverlustleistung		$Q_a =$	150 W

*) Dieser Wert ist im Betrieb einzustellen und auf $\pm 3\%$ konstant zu halten.

Max. Gewicht : 300 g
Codewort : vcibd
Fassung : Lg.-Nr. 1667

Bild 2: Telefunken-Senderöhre RS 19. Allgemeine Daten.

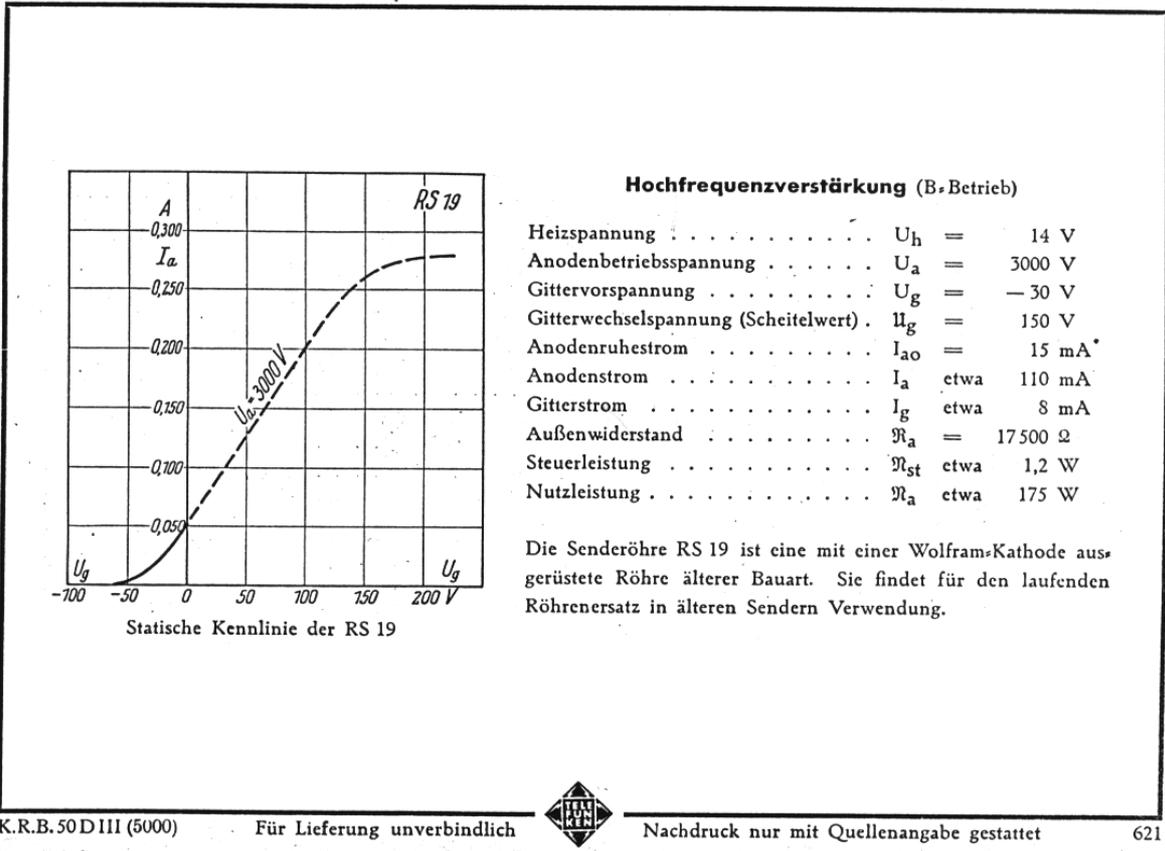


Bild 2: Telefunken-Senderöhre RS 19. Hochfrequenzverstärkung.

Die statische Kennlinie in Bild 2 lässt erkennen, dass bei einer Anodenspannung von 3000 V der maximale Anodengleichstrom von 50 mA bei der Gitterspannung 0 V fließt. Die zulässige Anodenverlustleistung der Senderöhren wird also gleichstrommäßig (statisch; beim Tasten, bevor die Schwingungen einsetzen) nicht überschritten sondern gerade erreicht, sollte der Sender tatsächlich mit der maximal zulässigen Anodenspannung von 3000 V gefahren worden sein.

Als Senderverstärker oder selbsterregter Sender wird die Röhre RS 19 mit positiver Gitterspannung und mit Gitterstrom betrieben; die zulässige Gitterverlust- oder Steuerleistung ist dabei 1,2 W (Bild 2). Ein Senderverstärker wird auf maximalen Wirkungsgrad, nicht auf minimale Verzerrungen ausgelegt ([4] 3. Senderverstärker); deshalb erfolgt bei Senderöhren die Aussteuerung weit in den Bereich negativer Gitterspannung, bei der die Röhre gesperrt ist (B- und C-Betrieb).

Eine experimentelle Überprüfung der Schaltung scheidet aus bekannten Gründen aus. Die moderne Simulationstechnik mit Hilfe des Computers bzw. PC gibt uns jedoch die

Möglichkeit, verschiedene Betriebszustände des Senders - natürlich mit einigen vereinfachenden Annahmen - zu untersuchen. Im vorliegenden Fall wurde die Schaltung mit dem Programm ELECTINA [2] simuliert. Bild 4 und Bild 5 zeigen die für die Simulation verwendete Ersatzschaltung des Senders, editiert mit dem Entwurfseditor von ELECTINA. Das Programm ELECTINA und nicht PSpice wurde im vorliegenden Fall gewählt, weil es anschaulicher ist und erlaubt, in das Schaltbild „Messgeräte“ einzufügen; nach der Analyse werden die Messergebnisse im Ersatzschaltbild des Entwurfseditors (Bild 5) angezeigt. Dabei wird zunächst in der DC-Analyse der Arbeitspunkt ermittelt und in diesem Arbeitspunkt die AC-Analyse unter der Annahme linearer Kennlinien durchgeführt; die Ergebnisse sind unter diesen vereinfachenden Annahmen u.U. nicht sehr genau, geben jedoch einen anschaulichen Überblick über das Verhalten der Schaltung. Die angezeigten Wechselströme und -spannungen sind Spitzenwerte.

Die Ersatzschaltung (Bild 4 und Bild 5) zeigt nicht eine selbsterregte Oszillatorschaltung, sondern die „Röhren“ werden von einem Sinusgenerator angesteuert; die Gitterwechsel-

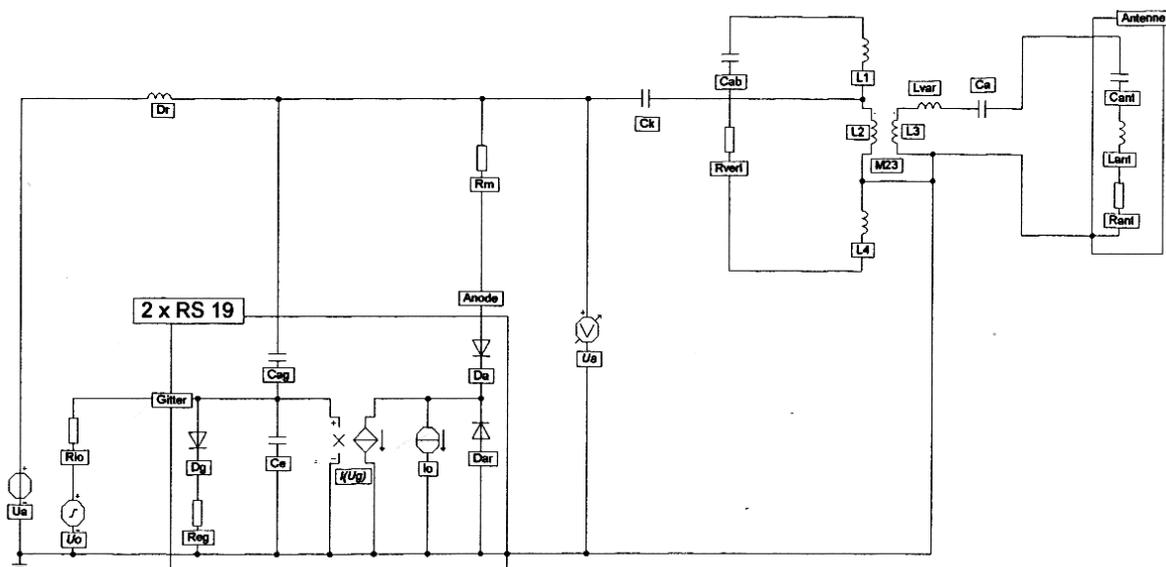


Bild 4: Ersatzschaltbild der Schaltung nach Bild 1 für die Simulation mit ELECTINA.

spannung wird ermittelt, bei der die maximal zulässige Leistung der Röhren erreicht wird; die Anzapfungen der Spule des Zwischenkreises werden gesucht, bei der dann die Wechselfspannung an der Rückkopplungsspule in Amplitude und Phase der Wechselspannung am „Gitter“ entspricht. Außerdem werden mit den Optimierungsmöglichkeiten des ELECTINA-Programmes das Übersetzungsverhältnis zum Antennenkreis, die Abstimmittel des Antennenkreises und die Kopplung zwischen Antennen- und Zwischenkreis ermittelt. - Die Ersatzschaltung der Antenne entspricht dabei den Angaben in ([3] § 165). - Der Innenwiderstand der RS 19 wird nicht berücksichtigt, weil die I_a/U_a -Kennlinien bei positiver Gitterspannung sehr flach, ähnlich einer Pentode verlaufen, der Innenwiderstand also so hoch ist, dass er in der Ersatzschaltung vernachlässigt werden kann ([4] § 19).

Die Bauelemente der Ersatzschaltung (Bild 4 und Bild 5) haben folgende Werte:

Röhren 2 x RS 19: $C_e = 2 \times 9 \text{ pF} = 18 \text{ pF}$
 $C_{ag} = 2 \times 6 \text{ pF} = 12 \text{ pF}$
 $R_{eg} = 1 \text{ k}\Omega$ (geschätzt)
 $I(U_g)$: $S = 2 \times 1,5 \text{ mA/V} = 3 \text{ mA/V}$ (spannungsgesteuerte Stromquelle)
 $I_o = 2 \times 50 \text{ mA} = 100 \text{ mA}$ (Konstantstromquelle)
 Dioden: D_g, D_a, D_r
 Sperrspannung = 10 kV
 Durchlasswiderstand = 100 m Ω
 Durchlassspannung = 0,75 V

I_o simuliert den Anodenruhestrom bei der Gitterspannung $U_g = 0 \text{ V}$.
 $I(U_g)$ simuliert die Verstärkereigenschaften mit der Steilheit S .
 R_{eg} mit D_g simuliert den Gitterstrom bei positiver Gitterspannung.
 Die Dioden D_a und D_r verhindern negativen „Anoden“-Strom in der Simulation, wenn $U_g \times S < 0$ wird; damit wird die Gleichrichtereigenschaft der Röhren simuliert.

Antenne: $C_{ant} = 200 \text{ pF}$)
 $L_{ant} = 20 \text{ }\mu\text{H}$) für die Länge $< \lambda/4$ entsprechend ([3] § 165)
 $R_{ant} = 30 \text{ }\Omega$)

Schwingkreise: $C_a = 500 \text{ pF}$ (angenommen)
 $L_1 = 148,55 \text{ }\mu\text{H}^*$ $R_{verl} = 1 \text{ }\Omega$
 $L_2 = 60 \text{ }\mu\text{H}^*$ $C_{ab} = 481,48 \text{ pF}^*$
 $L_3 = 60 \text{ }\mu\text{H}^*$ $M_{23} = 2,17 \text{ }\mu\text{H}^*$
 $L_4 = 1,43 \text{ }\mu\text{H}^*$ $L_{var} = 629,33 \text{ }\mu\text{H}^*$

Sonstige: $U_a = 3000 \text{ V}$ $f(U_o) = 500 \text{ kHz}$ (angenommen)
 $R_{io} = 10 \Omega$ $C_k = 0,1 \mu\text{F}$
 $R_m = 1 \Omega$ $D_r = 1 \text{ H}$

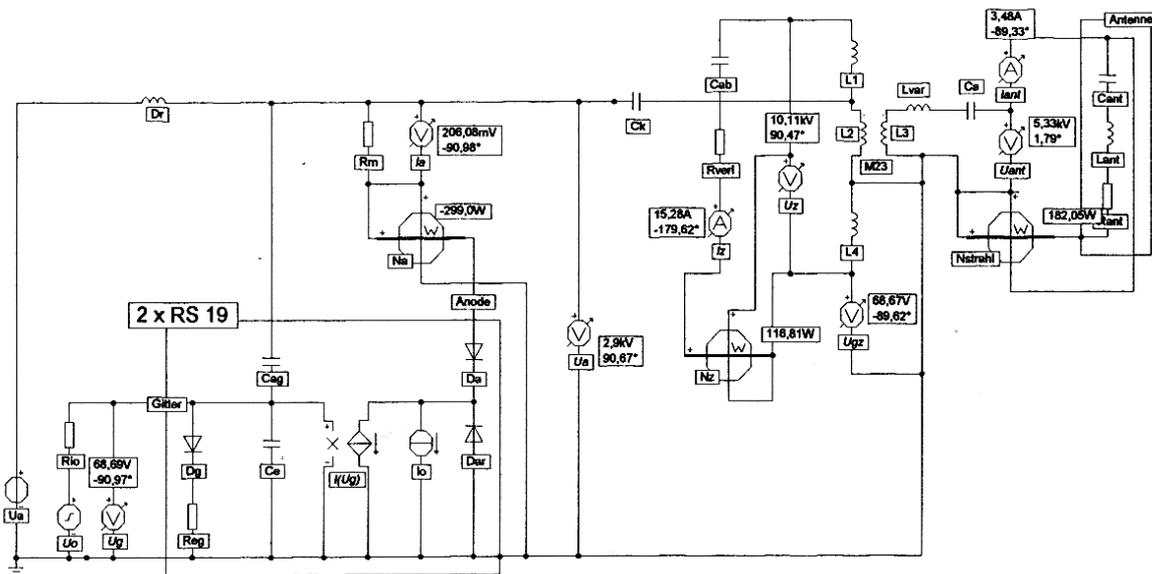


Bild 5: Ersatzschaltung wie Bild 4, jedoch ergänzt durch Spannungs-, Strom- und Leistungsmesser.

Die mit * bezeichneten Bauelemente wurden durch zyklische Optimierung mit den Menüs Analyse/Optimierungsziel/Kontrollobjekt/AC-Analyse von ELECTINA entsprechend den im folgenden beschriebenen Kriterien ermittelt. Die Verluste des Anodenschwingkreises wurden mit $R_{verl} = 1 \Omega$ angenommen; das entspricht einer Kreisgüte von etwa $Q = 600$.

Der Sender bietet eine Vielzahl von Einstellmöglichkeiten am Anodenschwingkreis und an den Abstimmmitteln der Antenne. Neben der Frequenz sollen hier möglichst optimale Bedingungen für die Röhren und für die angeschlossene Antenne eingestellt werden.

Im einzelnen können entsprechend Bild 1 verändert werden:

- Spulenzapfungen für Anode, Katode und Gitter
- frequenzbestimmende Kondensatoren des Zwischenkreises
- Kopplung zwischen Zwischenkreis und Antennenkreis

- Variometer und Spulen mit Anzapfungen für die Abstimmung des Antennenkreises
- ein Verkürzungskondensator kann in den Antennenkreis eingeschaltet werden

Die Vielzahl dieser Einstellmöglichkeiten erforderte ausreichende Kenntnisse und erhebliches Geschick bei der Bedienung, um maximale Antennenleistung zu erzielen. Die Simulation mit ELECTINA gibt hier nicht nur einen guten Einblick in die Wirkungsweise des Senders sondern auch davon, wie sich die vielen Einstellmöglichkeiten gegenseitig und wie sie Sendeleistung und Arbeitspunkt der Röhren beeinflussen und wie schwierig die richtige Abstimmung ist.

Die Einstellkriterien sind im wesentlichen:

- Anodenverlustleistung: sie darf 150 W je Röhre nicht überschreiten.
- Frequenz: diese wird nicht nur durch die Abstimmkapazität des Zwischenkreises, sondern auch durch die Anzapfungen der Zwischenkreisspule und durch die Einstellungen des Antennenkreises beeinflusst.
- Anodenkopplung K_{oan} : bei zu großer Kopplung besteht die Gefahr des „überspannten Zustandes“ ([5] S. 116), bei zu kleiner Kopplung wird die Einschwingzeit sehr groß (ungünstig bei Telegrafie) und die Spannungen am Zwischenkreis werden sehr groß.
- Gitterkopplung K_{og} : bei zu kleiner Kopplung schwingt der Sender nicht sicher an, bei zu großer Rückkopplung wird die Amplitude der selbsterregten Schwingung wieder kleiner ([5] § 6b).
- Antennenkopplung K_{oa} : bei zu starker Kopplung der auf die gleiche Frequenz abgestimmten Zwischenkreis- und Antennenkreise bilden sich Höcker („Bandfilter“); die Amplitude der Mittenfrequenz nimmt dadurch mit wachsender Kopplung ab, bei zu kleiner Kopplung nimmt die Amplitude im Antennenkreis ebenfalls ab; Zieherscheinungen ([5] § 7c α).
- Um den überspannten Zustand in der Simulation zu vermeiden, darf der Spitzenwert der Anodenwechselspannung nicht größer werden als die Anodenruhespannung; im Beispiel wurde der Spitzenwert auf 2,9 kV begrenzt.

Unter diesen Bedingungen liefert die Simulation folgende Ergebnisse (Bild 5):

- Die Strahlungsleistung der Antenne beträgt $N_{strahl} = 182 \text{ W}$ bei $2 \times 150 \text{ W} = 300 \text{ W}$ Verlustleistung der Röhren.
- Die Spitzenspannung an der Antenne beträgt $U_{ant} = 5,3 \text{ kV}$.
- Es fließt ein Antennenspitzenstrom von $I_{ant} = 3,5 \text{ A}$.
- Die Spitzenspannung am Zwischenkreiskondensator beträgt $U_z = 10 \text{ kV}$.

- Die Verlustleistung im Schwingkreis beträgt $N_z = 110 \text{ W}$.
- Die Spitzenspannung an den Anoden ist $U_o + U_a = 6,9 \text{ kV}$.
- Die minimale Spannung an den Anoden ist $U_o - U_a = 100 \text{ V}$.
- Der Spitzenwert der Gitterwechselspannung beträgt $U_g = 68,7 \text{ V}$; bei der Gitterruhespannung von 0 V ergibt sich mit der I_a/U_g -Kennlinie nach Bild 3, dass die Röhren im A/B-Betrieb arbeiten. Den Anodenstromverlauf $i_a = f(t)$ zeigt zusammen mit der Gitterwechselspannung u_g Bild 6 (aufgenommen mit ELECTINA-„Oszilloskop“).
- Bei den eingestellten Anzapfungen des Zwischenkreises ist die Rückkopplungsspannung U_{gk} nach Betrag und Phase praktisch gleich der Steuerspannung U_g am „Gitter“.

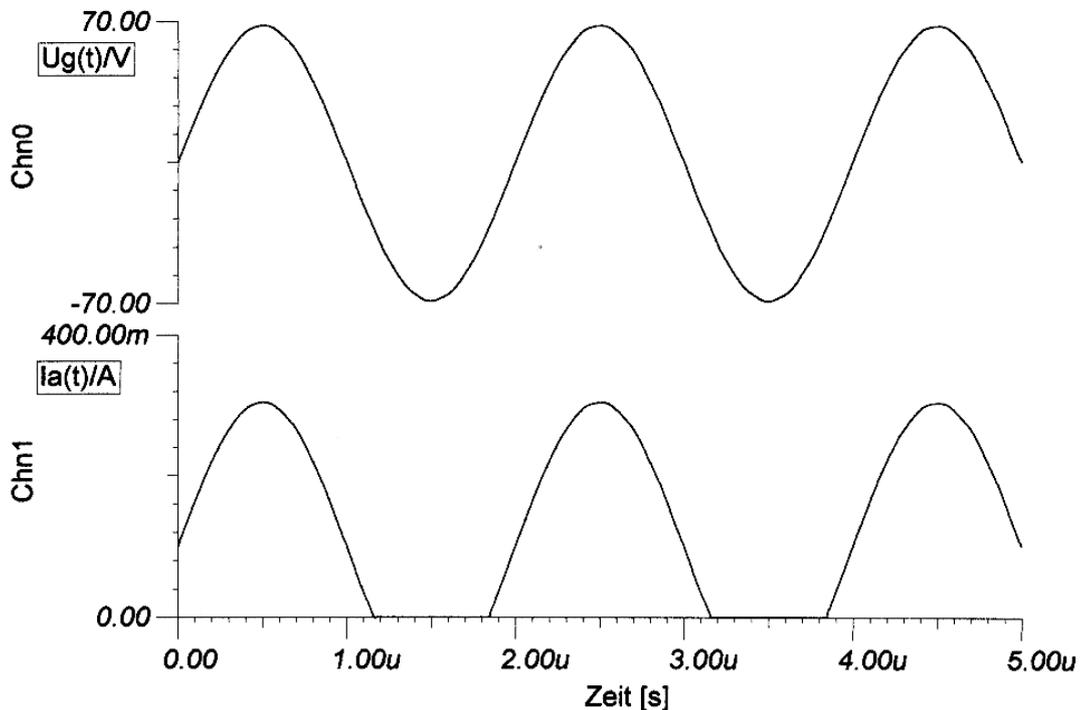


Bild 6: Gitterspannung $u_g(t)$ und Anodenstrom $i_a(t)$, mit ELECTINA berechnet und mit der Funktion „Oszilloskop“ dargestellt.

Es bleibt zu prüfen, ob auch unter ungünstigen Umständen, z.B. bei falsch angekoppelter oder falsch abgestimmter Antenne, die zulässige Anodenverlustleistung nicht überschritten wird. Bei diesen Fragen können Ersatzschaltung und Simulation mit ELECTINA nicht helfen, weil bei fehlender Energieübertragung zur Antenne berechnete Spannung und berechneter Strom im Zwischenkreis entsprechend ansteigen würden, weil das Programm von linearen Bauelementen ausgeht. Tatsächlich sind aber die Röhren mit erheblichen Nichtlinearitäten behaftet, die Strom und Spannung begrenzen: wachsender Gitterstrom, Sättigung des Katodenstromes, stark ansteigender Gitterstrom im überspannten Zustand, wenn der

Augenblickswert der Anodenspannung kleiner als der Augenblickswert der Gitterspannung ist. Diese Zusammenhänge und ihre stabilisierende Wirkung sind in ([5] § 6) eingehend beschrieben; eine Überlastung der Röhren bei falschen Einstellungen von Zwischen- und Antennenkreis ist danach nicht zu erwarten. Dafür spricht auch das Schaltbild Bild 1: es gibt Messinstrumente für Heizspannungen, Anodenwechselspannung und Antennenstrom, aber kein Instrument für den Anodenstrom!

Literatur

- [1] *Juppe*: Unterrichtsbuch für die Nachrichtentruppe. 1925
- [2] ELECTINA 4.0. Toolkit für interaktive Netzwerkanalyse.
Das komplette Elektroniklabor für Windows. Vollversion.
A & L Hard- und Software. Franzensbadstraße 5, 86199 Augsburg. 1997
- [3] *Pitsch, H.*: Lehrbuch der Funkempfangstechnik. Leipzig 1950
- [4] *Barkhausen, H.*: Lehrbuch der Elektronenröhren. Verstärker. Leipzig 1954
- [5] *Barkhausen, H.*: Lehrbuch der Elektronenröhren. Rückkopplung. Leipzig 1949