

Inhalt.

III. Teil. Rückkopplung.

A. Selbsterregung. (Schwingungserzeugung.)

Seite

§ 1. Das Prinzip der Selbsterregung 2

Jeder Verstärker kann durch eine „Rückkopplung“ zur Selbsterregung gebracht werden. Selbsttätige Erzeugung von Schwingungen beliebiger Frequenz und großer Regelmäßigkeit. Übersicht über die Probleme.

§ 2. Die Selbsterregungsformel 4

Für stationäre selbsterregte Schwingungen muß stets gelten: Rückkopplungsfaktor $\mathfrak{R} = 1/\text{Verstärkungsfaktor } \mathfrak{B}$. Gleichheit nach Amplitude und Phase erforderlich. Bei der normalen Rückkopplung über eine Röhre wird daraus: $\mathfrak{R} = D + \frac{1}{S \mathfrak{R}_a}$. S und D sind Röhrengößen, phasenrein, frequenzunabhängig. $\mathfrak{R}$ und $\mathfrak{R}_a$ sind Schaltungsgrößen, nach Amplitude und Phase von Frequenz abhängig.

§ 3. Folgerungen aus der Selbsterregungsformel 8

a) Amplitudenbilanz 9

Größeres bzw. kleineres $\mathfrak{R}$ gibt anklingende bzw. abklingende Schwingungen. Größeres $\mathfrak{R}$ führt auch ohne äußeren Anstoß stets zur Selbsterregung. Die erforderliche Größe von $\mathfrak{R}$. Grenzen für Amplitude der selbsterregten Schwingungen.

b) Die Phasenbilanz 11

Phasenwinkel φ_k von $\mathfrak{R}$ im Vorzeichen entgegengesetzt, im Betrage kleiner als φ_a von $\mathfrak{R}_a$. Phasenreines $\mathfrak{R}_a$ nur bei phasenreinem $\mathfrak{R}$ möglich. Bedingung für die Frequenz der selbsterregten Schwingungen. Bei Rückkopplung durch Transformator muß die Polung richtig gewählt werden.

c) Berechnung eines Beispiels	Seite 14
Der Wert solcher Berechnungen. Die komplexe Selbst- erregungsformel zerfällt in zwei reelle Gleichungen, von denen die eine die Amplitude, die andere die Fre- quenz der stationären selbsterregten Schwingungen bestimmt. So einfach geht die Rechnung aber nicht immer auf. (Weitere Rechnungen in § 15—17.)	
§ 4. Transformator-Rückkopplungen	17
Erwünscht: Sinusform und bestimmte Frequenz. Er- reicht durch Parallelschwingungskreis als $\Re_a$. Günstigstes $\Re_a$ wie beim Verstärker. Rückkopplung durch Transformator, durch Spartransformator. Schwin- gungskreis auf der Anodenseite oder auf der Gitter- seite oder beiden Seiten gemeinsam bei fester Kopp- lung im Grunde gleichwertig. Zuführung der Gleich- spannungen. Reihen- oder Parallelschaltung von Gleich- und Wechselspannungen. Störende natürliche Kapazitäten. Schwinglöcher bei Drosselspulen. Er- zeugung einer negativen Gittervorspannung durch Spannungsabfall in einem Widerstande.	
§ 5. Spannungsteiler-Rückkopplungen. (Dreipunkt-Schal- tungen.)	21
a) Induktive und kapazitive Spannungsteiler- schaltung	21
Positive Rückkopplung verlangt entgegengesetzte Phasen zwischen den beiden Spannungsteiler-Wider- ständen $\Re_{ga}$ und $\Re_{gk}$ sowie $\Re_{ga} \cdot \Re_{gk}$. Phasenreines $\Re_a$ verlangt Zusatzwiderstand $\Re_{ak}$ gleichphasig mit $\Re_{gk}$. Zwei Möglichkeiten: $\Re_{gk}$ und $\Re_{ak}$ induktiv, $\Re_{ga}$ kapazitiv = induktive Spannungsteilerschaltung; oder $\Re_{gk}$ und $\Re_{ak}$ kapazitiv, $\Re_{ga}$ induktiv = kapazitive Spannungsteilerschaltung. In beiden Fällen erregt sich angenähert die Eigenfrequenz des aus $\Re_{ga} + \Re_{gk}$ + $\Re_{ak}$ bestehenden Schwingungskreises.	
b) Drei Schwingungskreise in Dreipunktschal- tung	24
Ein Parallelschwingungskreis ist ein Widerstand, der unter der Resonanz induktiv, über der Resonanz ka- pazitiv ist. Zwei Fälle von Selbsterregung möglich. Beziehung zwischen der sich erregenden Frequenz und den drei Eigenfrequenzen.	

c)	Selbsterregung infolge der natürlichen Gitteranodenkapazität C_{ga}	26
	Unbeabsichtigte und beabsichtigte Selbsterregung. Huth-Kühn-Schaltung. Vergleich mit der Darstellung in Bd. II § 15. Eigenfrequenz des Anodenschwingkreises muß höher als die des (erweiterten) Gitterschwingkreises sein. Großes R_{gk} und R_{ak} (d. h. geringe Dämpfung bei Schwingkreisen) für Selbsterregung günstig.	
d)	Frequenzhaltung durch mechanische Schwingungen (Piezoquarz)	29
	Mechanisch schwingender Kristall wirkt wie elektrischer Schwingungskreis. Ersatzschaltungen. Äußerst schwache Dämpfung. $q \approx 100\,000$. Daher Selbsterregung nur in unmittelbarer Resonanznähe. Abstimmung des Anodenkreises wirkt fast nur auf die Intensität, kaum auf die Frequenz der Schwingungen ein. Auch andere mechanische Schwingungskörper wirken bei genügend starker Rückwirkung wie elektrische Schwingungskreise und können diese in beliebigen Schaltungen ersetzen.	
§ 6.	Die Amplitude selbsterregter Schwingungen und ihre Stabilität	31
a)	Weiches und hartes Einsetzen der Schwingungen.	31
	Instabilität, falls $R \cdot B$ mit wachsender Amplitude größer wird. Experimentelle Ergebnisse. Abhängigkeit vom Ruhepunkt auf der Kennlinie. „Mittlere Steilheit“ S_m ist amplitudenabhängig. Hartes Einsetzen, Springen der Amplitude, falls S_m mit wachsender Amplitude größer wird.	
b)	Reißdiagramme	36
	Schwingungsamplitude abhängig von Rückkopplung und Ruhepunkt auf der Kennlinie. Stabile, halb stabile und labile Gebiete. Zusammenhang mit Modulationskennlinien.	
c)	Strombegrenzung (Mittlere Steilheit) . . .	39
	Amplitudenbegrenzung erfordert irgendeine Nichtlinearität. Diese kann auch in Veränderungen der Konstanten L , C , R oder im Gitterstrom liegen. Zu-	

nächst nur Krümmung der Anodenstrom-Kennlinie untersuchen. Diese bewirkt 1. Gleichrichtung; 2. Verzerrung (letztere hier klein vorausgesetzt; sonst Kippschwingungen); 3. Änderung von Anfangssteilheit S in mittlere Steilheit S_m . Entwicklung in Taylorsche Reihe. Es kommt auf den 3. Differentialquotienten W der Kennlinie, also den 2. Differentialquotienten (die Krümmung) der Steilheitskurve an. Ist er positiv, so setzen die Schwingungen hart ein. Im Raumladungsgebiet ist W negativ, aber nur solange der Nullpunkt nicht wesentlich überschritten wird. Bei sehr großen Amplituden nimmt S_m dauernd zu. Reine Strombegrenzung läßt sich bei Röhren ohne Sättigung kaum herstellen.

- d) Spannungsbegrenzung (Gitterstrom) 44
 Zwei verschiedene Wirkungen des Gitterstromes:
 α) Einfluß auf die Anodenstromkennlinie der Röhre (Indirekte Strombegrenzung). Bei großen Amplituden begrenzt überspannter Zustand die Verstärkung und damit das Anwachsen der Selbsterregung. Bei kleinen Amplituden übertragen sich die Unregelmäßigkeiten im 3. Differentialquotienten der Gitterstromkennlinie mit umgekehrtem Vorzeichen auf die Anodenstromkennlinie. β) Dämpfender Einfluß auf die äußeren Schaltungselemente. Dämpfung schwankt unregelmäßig mit Amplitude. Dadurch auch Unregelmäßigkeit im Schwingungseinsatz möglich. Diese verschwinden bei kleinem Widerstand R_g des äußeren Gitterstromkreises. Gitterstrom bedingt auch Frequenzänderungen.
- e) Künstliche Amplitudenbegrenzung 47
 Durch kleinen Sättigungsstrom; dann Amplitude stark vom Heizstrom abhängig. Spannungsbegrenzung normal durch überspannten Zustand; starker Gitterstrom stört. Großer Widerstand R_g in Gitterzuleitung verhindert Anwachsen über $U_g = (-U_g)$. Verzerrungen werden vermieden bei der Audionschaltung. Gleichrichterwirkung verschiebt Gittervorspannung ins Negative. Entspricht Schwundregelung. Intermittierende Selbsterregung. Frequenz Übergang zu Kippschwingungen.

§ 7. Die Frequenz selbsterregter Schwingungen und ihre Stabilität	52
a) Die Konstanz der Frequenz	52
Frequenzbereich von 0,1 Hertz bis 10^7 Hertz leicht zu erzeugen. Konstanz der Frequenz bis auf 10^{-8} herstellbar, bis auf 10^{-4} ohne Schwierigkeiten. Einfluß der Temperatur und der Betriebsgrößen. Die Gleichspannungen beeinflussen unmittelbar nur die Amplitude, die Frequenz nur mittelbar durch die nichtlineare Amplitudenbegrenzung. Bei Strombegrenzung und Spannungsbegrenzung α fast kein Einfluß, bei Spannungsbegrenzung β , d. h. Einwirkung des Gitterstromes auf die Schaltelemente, meist starker Einfluß auf die Frequenz. Zweckmäßige Maßnahmen dagegen. Leistungsabgabe nur über eine Verstärkerröhre.	
b) Zwei nicht gekoppelte Schwingungskreise jeder für sich rückgekoppelt	56
α) Die beiden Eigenfrequenzen sind von derselben Größenordnung. Eine Frequenz macht die andere tot. Das schnellere Anwachsen entscheidet. Eine schon vorhandene Schwingung ist schwerer zu unterdrücken.	
β) Die beiden Eigenfrequenzen sind von verschiedener Größenordnung. Die Hochfrequenz hat die Oberhand. Für die Niederfrequenz ist Pseudokennlinie maßgebend, die flacher verläuft. Die Niederfrequenz moduliert die Hochfrequenz. Bei Durchmodulation bis zum Aussetzen sind die hochfrequenten Wellenzüge nicht mehr kohärent. — Verwickeltere Schaltungen sind schwer zu übersehen. Es entstehen leicht „wilde Schwingungen“.	
c) Zwei gekoppelte Schwingungskreise mit einer gemeinsamen Rückkopplung	60
α) Primäre Rückkopplung. Es erregt sich die eine oder die andere der beiden Koppelfrequenzen und zwar jeweils die f_1 benachbarte. Beim Durchschreiten der Resonanz plötzliches Umspringen auf die andere Koppelfrequenz. „Zieherscheinungen“.	
β) Sekundäre Rückkopplung. Bei normaler Polung erregt sich nur die tiefere, bei entgegengesetzter Polung nur die höhere der beiden Koppelfrequenzen. Keine Zieherscheinungen.	

	Seite
§ 8. Rückkopplungssender für kurze Wellen	64
Schwingungskreise nur aus den natürlichen Kapazitäten der Röhre und den natürlichen Induktivitäten der Zuleitungen gebildet. Diese lassen sich nicht beliebig klein machen. Schwierigkeiten unter $\lambda = 3$ m. Starke Schwingkreisströme auch in der Röhre. Besondere Durchführungen erforderlich. Einfluß der verschiedenen Teilkapazitäten der Röhre. Vermeidung von Hochfrequenzdrosseln durch abgeglichenen Aufbau. Gegentaktschaltung, Wellenlängen äußerstenfalls bis 30 cm herstellbar, aber nur mit kleiner Leistung. Einfluß der Elektronenlaufzeit. Kleine Röhren und hohe Betriebsspannungen günstig. Pseudokennlinien. Entstehen „wilder Schwingungen“ und ihre Beseitigung.	
§ 9. Fallende Kennlinien	71
a) Wahre Kennlinien	71
Definition. Zwei Arten von Instabilitäten: Sprünge im Gleichstrom oder Selbsterregung von Schwingungen. Negativer Widerstand. Labilitätskriterium. — $R_1 < R_a$ umgekehrt dem beim Lichtbogen. Beispiel: Dynatron. Graphische Lösung durch Schnittpunkt der Widerstandsgeraden mit der Kennlinie. Schwingungserzeugung. Wirkungsgrad gering. — Gitterdynatron. Fallende Kennlinien bei schlechtem Vakuum; bei Raumladegitterröhren; unter Zuhilfenahme eines Magnetfeldes. Habann-Röhre.	
b) Pseudokennlinien	78
Jede „fallende Kennlinie“ kann als „innere Rückkopplung“, jede äußere Rückkopplung auch als „fallende Kennlinie“ aufgefaßt werden. Letzteres im allgemeinen unzweckmäßig. — Pseudokennlinien durch Schwingungen ähnlich Richtkennlinien. Können auch unbeabsichtigt durch wilde Schwingungen entstehen.	
c) Widerstands- (Gleichstrom-) Rückkopplungen	80
Vorzeichenumkehr durch Raumladegitterröhre oder Rückkopplung über zwei Röhren. Bei Raumladegitterröhre innere Rückkopplung durch Durchgriff (Negadyn), äußere Rückkopplung durch direkte Ver-	

bindung zwischen G_1 und G_2 . Gleichstromsprünge, Schwingungserzeugung, Kippschwingungen. Bei Rückkopplung über zwei Röhren alles entsprechend. Selbsterregung von Reihenschwingungskreisen auch möglich.

§ 10. Selbsterregung ohne Schwingungskreis. Kippschwingungen 87

Auch Systeme, die nur L und R oder nur C und R enthalten, können bei sehr schwacher Rückkopplung sinusförmige Schwingungen erregen. Transformator-Beispiel. Bei starker Rückkopplung Kippschwingungen. Dabei oft hohe Überspannung; Frequenz leicht, Amplitude wenig veränderlich. Kippschwingungen beim Dynatron, beim Widerstandsverstärker. „Multivibrator“. Anwendung zu Frequenzmessungen und Frequenzvervielfachung, zur Zeitablenkung. Leichtes Synchronisieren. Frequenzerniedrigung.

§ 11. Elektronentanz-Schwingungen 98

a) Elektrischer Elektronentanz (Barkhausen-Kurz-Schwingungen) 98

α) Die Frequenz. Elektrische Bremsfeldschaltung, d. h. Gitter stark positiv, Anode negativ. Größenordnung durch Laufzeit der Elektronen bestimmt. Näherungsformel: $\lambda = \frac{1000 \cdot d_a}{\sqrt{U_g}}$ (d_a = Anodendurchmesser). Äußere Schwingungskreise haben nicht nur Einfluß auf Amplitude, sondern bei starker Rückwirkung auch auf Frequenz. Zieherscheinungen.

β) Der Mechanismus der Selbsterregung. Notwendigkeit einer Ordnung zum Tanz. Ausortierung der in falscher Phase schwingenden Elektronen. Anoden-, Kathoden- und Phasenausortierung. Selbsterregung von Oberschwingungen. Schwingungen viel leichter zu erzeugen als zu erklären.

γ) Experimentelle Ergebnisse. Zylindrische Anordnung günstig, besonders mit geradliniger Leitungsdurchführung. 4 Watt Hochfrequenzleistung bei 80 Watt Verlusten.

b) Magnetischer Elektronentanz (Magnetron-Schwingungen) 109

α) Die Frequenz. Diode mit magnetischem Bremsfeld. Kreisförmig tanzende Elektronen $\lambda = \frac{13\,000}{\mathfrak{B}}$ ($\mathfrak{B}$ = magnetische Feldstärke in Gauß). Unabhängig von Röhrengroße. Erforderliche Betriebsspannung $U_a = \left(1930 \frac{r_a}{\lambda}\right)^2$. Praktisch erreicht $\lambda = 3,15$ cm.

β) Der Mechanismus der Selbsterregung. Anodenaussortierung. Hochfrequente Rückwirkung magnetischer oder elektrischer Art. Raumladungen stören. Schräges Magnetfeld günstiger. — Alle Elektronentanz-Schwingungen oft nicht nur nicht sinusförmig, sondern auch nicht periodisch, entsprechend Geräusch. Bei gashaltigen Röhren treten auch Ionentanzschwingungen auf.

§ 12. Zusammenfassung von Teil III A 114

B. Entdämpfung.

§ 13. Das Problem 120

Verstärker mit Fremderregung und gleichzeitiger Rückkopplung. Letztere so schwach, daß keine Selbsterregung. Wirkung wie zusätzliche Spannung, so daß geringere Fremderregung erforderlich ist, um bestimmte Ausgangsleistung zu erreichen. Erhöhung der Verstärkung $\frac{1}{1 - \mathfrak{R} \mathfrak{B}}$ fach. Frequenzgang ungleichmäßiger. Rückkopplung daher im allgemeinen für Hochfrequenzverstärker günstig, für Niederfrequenzverstärker ungünstig. Schwankungen des Verstärkungsgrades, nichtlineare Verzerrungen und Störungen werden durch positive Rückkopplung vergrößert, durch negative verkleinert. Durchgriff D wirkt wie negative Rückkopplung.

§ 14. Ersatzschaltungen 123

Rückgekoppelte Röhre wirkt wie zur Anodenspannung parallel geschalteter synchroner Generator. Für $\mathfrak{R} > D$ überwiegt innerer Generator, so daß Leistungsabgabe von der Röhre nach außen. Andere Auffassung: Röhre besitzt inneren Widerstand $\mathfrak{R}_1 = \frac{1}{S(D - \mathfrak{R})}$, der für $\mathfrak{R} > D$ negativ wird. Für $\mathfrak{R}_1 + \mathfrak{R}_a = 0$ tritt Selbsterregung ein.

	Seite
§ 15. Entdämpfung eines Schwingungskreises	128
a) Fremderregung U_f im Anodenschwingungs- kreis	128
Pseudodämpfung durch Röhre positiv oder negativ, je nachdem ob R kleiner oder größer als D ist. Für $R = D$ ist die Röhre völlig wirkungslos. Negative Dämpfung erhöht die Resonanzschärfe ϱ des Schwingungskreises. Grenzurückkopplung R_{gr} und Grenzsteilheit S_{gr} . Entdämpfungsmaß ϱ/ϱ_0 um so größer, je mehr sich S an S_{gr} oder R an R_{gr} nähert. Nicht phasenreines R ändert Resonanzfrequenz. Praktisch nur etwa 20fache Entdämpfung ($\varrho = 20 \varrho_0$) betriebssicher herstellbar. Bei größeren Amplituden ändert sich S_m und damit die Form der Resonanzkurve etwas. Bei hartem Schwingungseinsatz lassen sich kleine Amplituden nicht stark entdämpfen. Stark entdämpfte Schwingungskreise schaukeln sich langsam auf und klingen langsam ab, auch bei einmaligem Anstoß.	
b) Fremderregung U_f auf der Gitterseite . . .	133
Entdämpfende Wirkung ebenso. Unterschied in der Rückwirkung auf U_f . Eigentümliche Leistungsverhältnisse. Beispiel: Empfangsantenne. Bei starker Entdämpfung wird mehr Leistung ausgestrahlt als aufgenommen. Relaiswirkung.	
c) Gitterschwingungskreis	136
Ersatzschaltung. Transformator kopplung hat zwei Wirkungen, eine dämpfende und eine entdämpfende. Optimale Kopplung.	
§ 16. Weitere Schaltungen	138
a) Dreipunktschaltung	138
Leerlauf- und Kurzschluß-Ersatzschaltung. Vergleich mit früheren Sonderfällen; Rückkopplung durch C_{ga} .	
b) Verwickeltere Schaltungen	141
Allgemeiner Zusammenhang zwischen Selbsterregung und Entdämpfung. Auch Leiter mit fallender Kennlinie kann entdämpfen. Übertragung der in § 7 b und c abgeleiteten Regeln über gekoppelte Kreise bei primärer und sekundärer Rückkopplung. Rückkopplung durch C_{ga} . Vergrößerung einer Drosselwirkung durch Entdämpfung.	

	Seite
§ 17. Rückgekoppelte Verstärker mit breitem Frequenzbereich	145
a) Ein scheinbarer Widerspruch	145
Rückkopplung erhöht Verstärkung aber verkleinert Frequenzbereich. Im Grunde gleicher Vorgang wie bei Resonanz.	
b) Verstärker mit Transformatorkopplung	147
Kleine Unterschiede in der Verstärkung treten bei Rückkopplung stark hervor. Mathematische Berechnung. Dieselbe Formel wie bei Entdämpfung eines Schwingungskreises. Nur sehr kleines ϱ . Für negatives $\varrho < \frac{1}{2}$ aperiodisches Anwachsen, Kippschwingungen.	
c) Verstärker mit Widerstandskopplung	152
20fache Vergrößerung der Verstärkung durch eine Rückkopplung möglich. Selbsterregung sinusförmiger Schwingungen praktisch nur möglich, wenn Frequenzbereich künstlich stark verkleinert wird. Sonst Kippschwingungen. Zusammenhang mit § 10.	
d) Zweidrانت-Fernsprechverstärker	153
Rückkopplung durch falschen Abgleich der Nachbildungsleitungen. Phase ändert sich stark mit Frequenz. Daher Verstärkung durch Rückkopplung in gewissen Frequenzbereichen vergrößert, in anderen verkleinert, kein konstanter Frequenzgang mehr. — Negative Rückkopplung. Bei geringerer Verstärkung größere Stabilität.	
§ 18. Selbstüberlagerung	156
Rückkopplung bis zur Selbsterregung bei gleichzeitiger Fremderregung. Schwebungen, „Überlagerungspfeifen“. Im „Mitnahmebereich“ keine Schwebungen. Normale Resonanzkurven. Bei festerer Rückkopplung Resonanz weniger ausgeprägt, Mitnahmebereich schmaler. Statt „Mitnahme“ besser „Unterdrückung der Selbsterregung“ durch die bei Resonanz stärker einwirkende Fremderregung.	
§ 19. Pendelrückkopplung	163
a) Der Anfang einer anklingenden und das Ende einer abklingenden Schwingung	163
Stets gewisse, durch Störungen bestimmte Anfangsamplitude vorhanden. Diese durch Anklingzeit meß-	

bar. Im Grenzfall Schroteffekt Störungsquelle. Ab-
klingender Vorgang ist beendet, sobald seine Amplitude
kleiner als der Störpegel. Falls nicht abgeklungen,
„Kohärenz“ der Wellenzüge bei Pendelrückkopplung.
Erzeugung der Pendelungen.

b) Überlagerung einer Fremderregung. 168

Größtmögliche Verstärkung mit einer einzigen
Röhre herstellbar. Kleinstmögliche (über dem Stör-
pegel liegende) Anfangsamplitude kann bis zur größt-
möglichen (die Röhre voll aussteuernden) Endampli-
tude verstärkt werden! Freilich moduliert durch
Pendelfrequenz. Resonanzschärfe sowohl von der
Stärke der Dämpfung wie der Entdämpfung abhängig.

§ 20. Zusammenfassung von Teil III B 171

Sachverzeichnis 175
