

Damit wird

$$\Delta U_1 = R_{w1} I_{1\sim} = 12 \Omega \cdot 0,52 \text{ A} = 6,2 \text{ V} \cong 2,8\%$$

$$\Delta U_{2-} = R_{w2-} I_{2\sim} = 22,4 \Omega \cdot 0,38 \text{ A} = 8,5 \text{ V} \cong 3,8\%$$

$$\Delta U_{H1} = R_{wH1} I_{H1} = 1,3 \Omega \cdot 0,6 \text{ A} = 0,78 \text{ V} \cong 3,1\%$$

$$\Delta U_{H2} = R_{wH2} I_{H2} = 0,74 \Omega \cdot 0,3 \text{ A} = 0,22 \text{ V} \cong 3,5\%$$

Die prozentualen Spannungsverluste liegen alle in der gleichen Größenordnung. Dies hängt damit zusammen, daß man den Wickelraum prozentual nach der zu übertragenden Leistung auf die einzelnen Wicklungen aufgeteilt hat. Sie sind im übrigen so klein, daß man bei einer zweiten Durchrechnung des Netzgerätes die Zuschlagsfaktoren K_u etwas verkleinern und die Übersetzungsverhältnisse korrigieren kann.

Stromdichte. Zur Kontrolle der Erwärmung sollen die Stromdichten in den einzelnen Wicklungen ermittelt werden. Nach *Tabelle 14* darf S nicht größer als 3 A/mm^2 sein. Im Nennbetrieb ergibt sich

$$S_1 = \frac{I_{1\sim}}{q_1} = \frac{0,52 \text{ A}}{0,196 \text{ mm}^2} \approx 2,7 \text{ A/mm}^2$$

$$S_{2-} = \frac{I_{2\sim}}{q_2} = \frac{0,38 \text{ A}}{0,126 \text{ mm}^2} \approx 3,0 \text{ A/mm}^2$$

$$S_{H1} = \frac{I_{H1}}{q_{H1}} = \frac{0,6 \text{ A}}{0,283 \text{ mm}^2} \approx 2,1 \text{ A/mm}^2$$

$$S_{H2} = \frac{I_{H2}}{q_{H2}} = \frac{0,3 \text{ A}}{0,126 \text{ mm}^2} \approx 2,4 \text{ A/mm}^2$$

Im Nennbetrieb liegen alle Stromdichten bei oder unter dem zulässigen Wert. Erhöht sich die Netzspannung, so wird die Temperatur der Gleichrichterwicklung den zulässigen Wert etwas überschreiten. Zweckmäßigerweise wird man daher bei der zweiten Durchrechnung versuchen, den Drahtquerschnitt dieser Wicklung zu erhöhen. Bei der genauen Festlegung des Wickelaufbaus und der Isolationszwischenlagen wird sich zeigen, ob man die Querschnittsvergrößerung auf Kosten der anderen Drahtstärken vornehmen muß oder ob genügend Reserven im Wickelraum vorhanden sind.

Der vorliegende Entwurf basiert auf der Annahme eines Stromflußwinkels von 60° . Beim Hauptentwurf ist als erstes diese Annahme zu überprüfen; die Überprüfung geht von den Innenwiderständen der Transformatorwicklungen und Gleichrichter aus. Aus ihrem Verhältnis zum Gleichstromwiderstand des Verbrauchers lassen sich dann nach den Formeln aus der Spezialliteratur der genaue Stromflußwinkel errechnen und damit die einzelnen Daten des Netzgerätes korrigieren.

4. Stabilisierung von Anodenspannungen

Stromversorgungsanlagen sollen unabhängig von Schwankungen in der Netzspannung oder der Belastung möglichst konstante Ausgangsspannungen liefern. Die bekanntesten Mittel, dieses Ziel zu erreichen, sind Glimmlampenstabilisatoren, Eisenwasserstoffwiderstände, Kaltleiter, Elektronenröhren, Transistoren, Kohledruckregler, Relaischnellregler und magnetische Gleichhalter. Hiervon werden die Eisenwasserstoffwiderstände hauptsächlich zur Konstanthaltung der Ströme benutzt,

beispielsweise der Heizströme von Röhrenschaltungen. Während Kohledruckregler, Kaltleiter, Relaischnellregler und magnetische Spannungskonstanthalter auf der Wechselstromnetzseite eingesetzt werden, arbeiten die Stabilisatoren und Elektronenröhren- oder Transistorregelschaltungen grundsätzlich auf der Gleichspannungsseite des Netzgerätes. Von den verschiedenen Möglichkeiten der Regelung wird hier die Stabilisierung durch Elektronenröhren und Transistoren ausführlicher besprochen.

a) Stabilisierung durch Elektronenröhren

Während sich mit Glimmstabilisatoren nur wenige diskrete Gleichspannungswerte konstanthalten lassen, gestatten die Elektronenröhrenschaltungen, die Gleichspan-

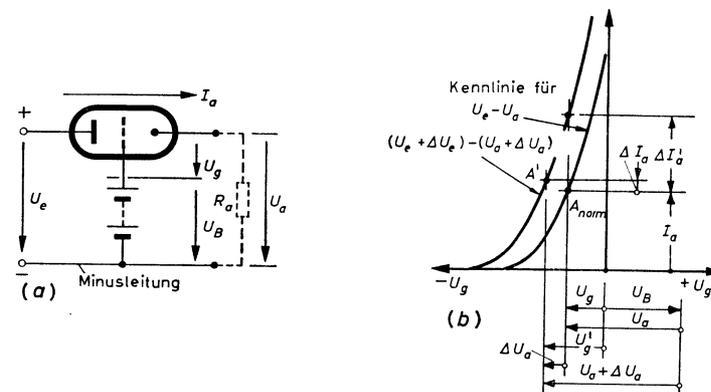


Bild 373. Prinzip der Stabilisierung einer Gleichspannung durch eine Elektronenröhre als regelbarer Längswiderstand. (a) Prinzipschaltung; (b) Darstellung der Wirkungsweise einer Regelröhre im I_a/U_g -Kennlinienfeld

nung ohne Erhöhung des Innenwiderstandes des geregelten Netzgerätes auf fast jeden beliebigen Wert zu stabilisieren. Der Aufbau einer „elektronisch geregelten“ Netzgleichrichterschaltung ist wesentlich komplizierter als der einer Glimmstabilisatorschaltung.

Den prinzipiellen Aufbau einer elektronischen Regeleinrichtung zeigt *Bild 373*. Die hier wiedergegebene Schaltung bildet die Ausgangsschaltung zur Entwicklung der modernen Regelvorrichtungen. In ihr ist der mit konstanter Gleichspannung zu versorgende Verbraucher durch seinen Ersatzwiderstand $R_a = U_a/I_a$ veranschaulicht. (Da in den folgenden Ausführungen keine Wechselspannungsgrößen, sondern nur ΔU -Spannungsänderungen vorkommen, wird von jetzt ab der Index $_$ für die Gleichspannungsgrößen weggelassen.) Die regelnde Elektronenröhre liegt im Stromweg vom „Netz“ mit der inkonstanten Eingangsgleichspannung U_e zum Verbrau-

cher R_a mit der konstantzuhaltenden Ausgangsgleichspannung U_a . Als Eingangsspannung U_e kann beispielsweise die Ausgangsgleichspannung $U_- = 233 \text{ V}$ des unregulierten Netzgleichrichtergerätes vom *Beispiel 45* und *Bild 372* dienen. Die Regelröhre wirkt in der vorliegenden Schaltung wie ein gesteuerter Längswiderstand. Die Steuerung ihres Durchlaßwiderstandes erfolgt am Gitter durch Verändern der Vorspannung. Die Schaltung arbeitet so, daß sie bei einer Zunahme der „Netz“- oder Eingangsspannung U_e den Widerstand der Röhre erhöht. Hierdurch tritt an der Röhre ein erhöhter Spannungsfall auf. Bei konstantem Stromdurchgang und richtiger Auslegung der ganzen Schaltung gleicht die Erhöhung der Spannung an der Regelröhre die Netzspannungszunahme so aus, daß die Spannung am Verbraucher praktisch konstantbleibt.

Die Regelröhre muß so ausgesucht werden, daß sie den verlangten Verbraucherstrom I_a ohne Überlastung ihrer Katode durchläßt. Die Gittervorspannung U_g ist als Spannung U_{gk} zwischen Gitter und Katode gleich dem Potentialunterschied von Gitter und Katode. Bezeichnet man das Potential des Gitters mit φ_g und das der Katode mit φ_k , so ist

$$U_g = U_{gk} = \varphi_g - \varphi_k$$

Bezieht man die Potentialangaben auf das zu Null angenommene Potential der Minusleitung, so kann man $\varphi_g = +U_B$ und $\varphi_k = +U_a$ setzen. Hieraus folgt

$$U_g = U_B - U_a$$

U_B ist hierin die Spannung der Vorspannbatterie. Sie muß etwas kleiner als das unter Umständen recht große U_a sein, damit die Röhre eine negative Vorspannung erhält und auf dem im *Bild 373 (b)* eingezeichneten normalen Arbeitspunkt A_{norm} arbeitet.

Schwankt die Eingangsspannung, steigt sie beispielsweise um $+\Delta U_e$ an, so wächst die Verbraucherspannung um ΔU_a . Die Änderung ΔU_a ist geringer als ΔU_e , weil sich gleichzeitig mit dem Anwachsen von U_a die negative Vorspannung der Regelröhre vom Wert $U_g = U_B - U_a$ auf den Wert $U'_g = U_B - (U_a + \Delta U_a)$ erhöht. Das Negativerwerden von U_g hat zur Folge, daß der Strom durch die Röhre nicht so stark steigt, wie er es ohne Regelung getan hätte; er steigt nach *Bild 373 (b)* nur um ΔI_a statt $\Delta I'_a$. Damit bleibt auch der Spannungsanstieg ΔU_a am Verbraucher, der gleich $R_a \Delta I_a$ ist, geringer als der Wert ΔU_e , um den U_a zunehmen würde, wenn keine Regeleinrichtung vorhanden wäre. Eine geringe Stromänderung ΔI_a und Spannungsänderung ΔU_a am Verbraucher müssen in Kauf genommen werden; denn wenn kein ΔU_a vorhanden ist, kann auch keine Regelwirkung am Steuergitter einsetzen.

Die Regeleigenschaften werden vollkommener, wenn man die kleine Änderung ΔU_a zum Gitter der Regelröhre hin verstärkt. Die Schwankungen am Ausgang werden dann um etwa den Verstärkungsfaktor geringer als in der einfachen Regelschaltung. Eine Verstärkung ist möglich, wenn man nach *Bild 374* in den Querweg eine hochverstärkende Röhre schaltet. Am Gitter dieser Röhre läßt man das kleine ΔU_a

wirksam werden. Auf ihrer Anodenseite nimmt man die negative Vorspannung U_{gR} und die verstärkte Änderung ΔU_{gR} für die Regelröhre ab. Bei der Beschreibung der Arbeitsweise dieser Schaltung geht man am besten von der Verbraucherseite aus. Von der Spannung U_a wird über die Spannungsteilerschaltung ein Bruchteil $p U_a$

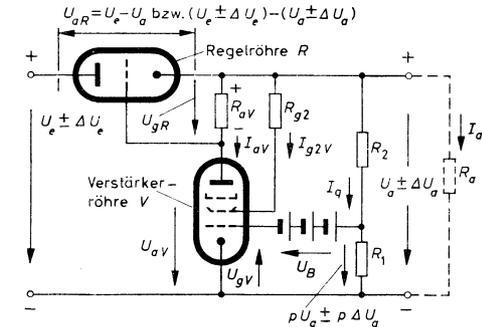


Bild 374. Verbesserung der Regelwirkung der Regelröhre R durch Verstärkung der Schwankungsgröße ΔU_a in einer Verstärkerpentode V

auf das Gitter der Verstärkerpentode gegeben. Zusammen mit der Batteriespannung $-U_B$ bestimmt $p U_a$ die Gittervorspannung U_{gV} der Pentode. Es gilt

$$U_{gV} = -U_B + p U_a$$

Entsprechend dieser Gittervorspannung und der über den Vorwiderstand R_{g2} eingestellten Schirmgitterspannung U_{g2V} fließt in der Verstärkerpentode ein bestimmter Anodenstrom I_{aV} . Er ruft, über den Anodenwiderstand R_{aV} fließend, an ihm einen Spannungsfall $I_{aV} R_{aV}$ hervor, der als negative Vorspannung für die Regelröhre wirkt.

Ändert sich wegen einer Netzspannungsschwankung die Verbraucherspannung U_a um ΔU_a , so entsteht am Gitter der Pentode infolge der Spannungsteilung über $R_1 R_2$ eine Spannungsänderung $p \Delta U_a$. Entsprechend dem Verstärkungsgrad v der Verstärkerpentode ruft sie an R_{aV} eine verstärkte Gitterspannungsänderung

$$\Delta U_{gR} = v p \Delta U_a \quad (300)$$

hervor. Bei geschickter Bemessung der ganzen Schaltung läßt es sich erreichen, daß die Vorspannungsänderung so groß wird, daß sich trotz erhöhter Netzspannung der Strom I_a durch die Regelröhre (einschließlich I_{g2V} und I_g) kaum ändert und damit auch die Ausgangsspannung $U_a = R_a I_a$ konstantbleibt.

Die Gitterbatterie U_B vor der Verstärkerpentode kann, wie die *Bilder 375 (a) und (b)* zeigen, durch eine in die Katodenleitung eingeschleifte Glimmröhre ersetzt werden. Eine Glimmröhre, die über einen Vorwiderstand R_v an der Spannung $U_a \pm \Delta U_a$ liegt, hat eine von den Schwankungen ΔU_a ihrer Speiseseite praktisch unabhängige, konstante Brennspannung U_{G1} von zum Beispiel etwa 70 oder 85 V; sie liefert die

konstante Vergleichs- oder Normalspannung, der gegenüber das Gitterpotential schwankt. In der Schaltung nach *Bild 375 (a)* hat das Gitter der Verstärkerpentode, bezogen auf die Minusleitung, das Potential

$$\varphi_{gV} = +p(U_a \pm \Delta U_a) = \frac{R_1}{R_1 + R_2}(U_a \pm \Delta U_a)$$

und die Katode das konstante Potential

$$\varphi_{kV} = +U_{Gl} = 70 \dots 85 \text{ V}$$

Hiermit ergibt sich für die Gittervorspannung

$$\begin{aligned} U_{gV} = U_{gk} = \varphi_{gV} - \varphi_{kV} &= p(U_a \pm \Delta U_a) - U_{Gl} = pU_a - U_{Gl} \pm p\Delta U_a \\ &= \text{konstanter Wert} \pm p\Delta U_a \end{aligned}$$

Die Schaltung nach *Bild 375 (a)*, die im übrigen wie die vom *Bild 374* arbeitet, stellt eine Schaltung mit sogenannter Rückwärtsregelung dar. Die Regelung findet hier von der Ausgangsseite, also von der stabilisierten Seite, aus rückwärts statt.

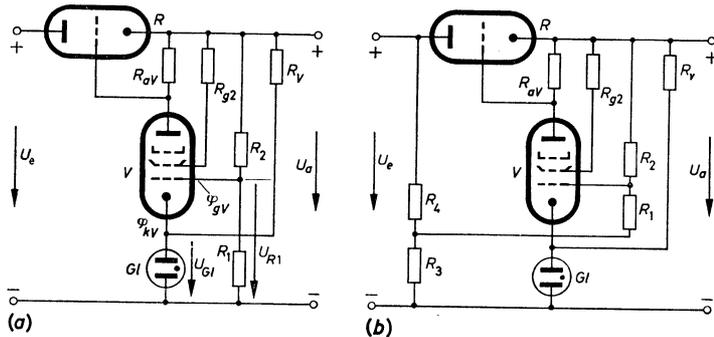


Bild 375. Ersatz der Vergleichsbatterie U_B vom *Bild 374* durch einen Glimmstabilisator. (a) Schaltung bei reiner Rückwärtsregelung; (b) Schaltung bei gemischter Rückwärts- und Vorwärtsregelung

Den Regelantrieb liefern die kleinen verbleibenden Schwankungen ΔU_a . Eine Rückwärtsregelung kann nie zu einer vollständigen Kompensation der Netzspannungsschwankungen führen, da winzige Abweichungen vom Sollwert bleiben müssen, um über die hohe Verstärkung der Verstärkerröhre eine Regelwirkung zustande kommen zu lassen. Der Restfehler kann in der besprochenen Schaltung auf etwa 0,1...0,5% der Netzspannungsschwankungen heruntergedrückt werden.

Im Gegensatz zum *Bild 375 (a)* gibt *Bild 375 (b)* eine kombinierte, aus einer Vorwärts- und Rückwärtsregelung bestehende Schaltung wieder. Die Steuerspannung für die Ausregelung der Netzschwankungen wird hier auf der Netzseite vor der Regelröhre abgegriffen, und zwar mit Hilfe des $R_4 R_3$ -Spannungsteilers; sie wirkt über den Widerstand R_1 auf das Gitter der Verstärkerröhre ein. Da über R_3 aber auch der Strom aus der hinter der Regelröhre auf der stabilisierten Seite liegenden Kette $R_2 R_1 R_3$ fließt, steckt in der resultierenden Spannung an den Widerständen

$R_3 + R_1$ sowohl die eingangsseitige als auch die ausgangsseitige Schwankung. Durch geschickte Bemessung der Widerstände kann eine fast vollständige Ausregelung von Netzspannungsänderungen erreicht werden.

Sollen zusätzlich zu den Spannungsschwankungen des Netzes auch Belastungsschwankungen ausgeregelt werden, muß man versuchen, eine der Änderung des Laststromes I_a proportionale Spannung zu schaffen und sie in den Regelweg einzuschleusen; dies kann beispielsweise nach *Bild 376* geschehen. An R_5 tritt eine der Schwankung des Laststromes proportionale Spannung auf. Sie wirkt ebenfalls über

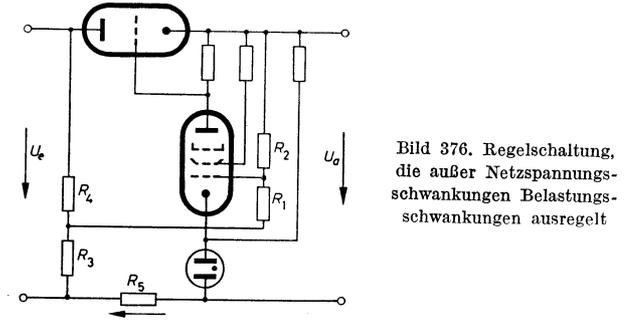


Bild 376. Regelschaltung, die außer Netzspannungsschwankungen Belastungsschwankungen ausregelt

R_3 und R_1 auf das Gitter der Verstärkerpentode ein und nimmt so an der Regelwirkung teil. Die optimale Regelung hängt hier stark von der richtigen Bemessung der Widerstände ab.

Auf Schaltungen, in denen eine konstante, aber zugleich stetig einstellbare Gleichspannung hergestellt wird, soll hier nur hingewiesen werden.

b) Regelschaltungen mit Transistoren

Die in den Schaltungen der *Bilder 375* und *376* als Spannungsnormal wirkenden Glimmröhren haben den Nachteil, daß ihre kleinste stabilisierte Spannung in der Größenordnung von etwa 70...85 V liegt. Dadurch wird von der sonst für die Verstärkerröhre und ihren Anodenwiderstand zur Verfügung stehenden Spannung U_a ein wesentlicher Betrag für den Betrieb der Glimmröhre verbraucht. Die Speisepannung der Röhre und ihres Anodenwiderstandes ist jetzt nur $U_a - U_{Gl}$. Darunter leidet der Verstärkungsgrad der Pentode. Dies ist besonders störend, wenn man Gleichspannungen um 100...140 V stabilisieren will und auf diese Weise dann für den Betrieb der Verstärkerpentode nur etwa 25...65 V übrigbleiben.

Die Schaltungen mit Glimmröhren versagen vollständig, wenn man Ausgangsspannungen unter 70 V, also beispielsweise die für den Betrieb von Transistor-schaltungen benötigten Kollektor- und Basisspannungen zwischen 0,1 und 30 V, zu stabilisieren hat. In diesen Fällen verwendet man als Konstanthalter und Spannungsnormal Zener-Dioden, oder man geht wieder zu kleinen Spezialbatterien zurück, den sogenannten Stabilisationszellen von wenigen Volt Spannung. Die Zener-