

Zeitschrift: Bulletin de l'Association suisse des électriciens
Herausgeber: Association suisse des électriciens
Band: 28 (1937)
Heft: 24

Artikel: Temperaturaufschaukelung bei elektrischen Heisswasserspeichern
Autor: Egli, Max
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1058778>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 25.12.2024

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Bei Niederwasser, wo nicht mehr für alle Maschinen genügend Wasser vorhanden ist, also vom Moment weg, wo das Wehr ganz geschlossen ist, muss überdies das Wasser genau hälftig geteilt werden, d. h. es müssen beide Werke mit Berücksichtigung der verschiedenen Wirkungsgrade von Turbinen und Generatoren mit genau gleicher Last fahren. Zu diesem Zwecke sind in beiden Werken besondere Geberapparate eingebaut. Es darf an dieser Stelle anerkennend erwähnt werden, dass in all den Jahren zwischen Leitung und Personal der beiden Grenzwerke oft unter erschwerenden Umständen das beste Einvernehmen bestand und noch besteht.

Ueber das Kraftwerk Augst wird besondere Rechnung geführt, und es ist dank der vorsichtigen Selbstkostenberechnung und einer gesunden Abschreibungspolitik die auf über 12 Millionen Fr. sich belaufende Bausumme auf Ende 1936 bereits auf den Betrag von 1 920 000 Fr. abgeschrieben. Daneben bestehen noch Fonds für Erneuerung, Reserve und Preisausgleich im Totalbetrag von etwas über 3 170 000 Fr., so dass auch in finanzieller Hinsicht das Kraftwerk Augst auf überaus solidem Boden steht. Möge dasselbe der Stadt Basel weiterhin seine unentbehrlichen guten Dienste leisten!

Temperaturaufschaukelung bei elektrischen Heisswasserspeichern.

Von Max Egli, Zürich.

621.364.5 : 644.62

Es wird das Phänomen der «Temperaturaufschaukelung» bei Heisswasserspeichern rechnerisch untersucht. Werden kleine Mengen Heisswasser entnommen, so strömt kaltes nach, das sich am Boden des Speichers sammelt. Es kann dann vorkommen, dass der Thermostat so stark abgekühlt wird, dass er einschaltet. Das Heizelement ragt aber oft in das Heisswasser hinauf, so dass dieses weiter erhitzt wird. Die Rechnung ergibt, dass dabei Temperaturen über 100° entstehen können (120...130° C), was zu Unzukömmlichkeiten führen kann. Die Abhilfe besteht darin, dass der Thermostat möglichst lang, das Heizelement möglichst kurz gemacht wird, ein Prinzip, das übrigens bekannt ist.

L'auteur étudie par le calcul le phénomène de l'augmentation intempesive de la température à l'intérieur des chauffe-eau à accumulation. Lorsqu'on prélève de faibles quantités d'eau chaude, le chauffe-eau se remplit au fur et à mesure d'eau froide qui reste dans le bas du réservoir. Le limiteur de température peut alors se refroidir de façon à enclencher. Or il peut arriver souvent que la partie supérieure du corps de chauffe plonge dans l'eau encore chaude qui continue à s'échauffer. D'après le calcul, la température peut monter au-dessus de 100° (120 à 130° C), ce qui peut avoir des suites désagréables. Le remède consiste à faire le limiteur de température aussi long et le corps de chauffe aussi court que possible, solution pratique d'ailleurs déjà connue.

Die Erfahrung zeigte hin und wieder, dass bei elektrischen Heisswasserspeichern unvermutet Betriebsvorgänge auftreten können, die Anlass zu Reklamationen bei Elektrizitätswerken und Speicherfabrikanten geben, ohne dass nachträglich irgendein Fabrikations- oder Konstruktionsfehler festgestellt werden kann. Eine solche Quelle von Unannehmlichkeiten bildet die Aufschaukelung der Heisswassertemperatur über die festgesetzte Grenztemperatur, ein Vorgang, der sich sehr häufig am Morgen abspielt, wenn dem Speicher für Toiletten- und Kochzwecke mehrmals hintereinander geringe Mengen Heisswasser entzogen werden. Es darf nicht ausser Acht gelassen werden, dass besonders bei Druckspeichern für den Erhalt des warmen Wassers, das ja tatsächlich in diesem Falle in äusserst bescheidenen Mengen benötigt wird, doch eben die Zuführungsleitung zum Hahn von erkaltetem Wasser entleert werden muss und dass selbstverständlich beim Schliessen des Hahnes dieselbe Wassermenge wieder erkaltet. Die Metalleitung mit ihrer hohen Wärmeleitfähigkeit führt diesen Verlustprozess in kürzester Zeit durch.

Diese Heisswasserentnahme hat ein Nachströmen von kaltem Wasser zur Folge, das infolge seines höheren spezifischen Gewichtes am unteren Ende des Speichers liegen bleibt. Es werden zwar oft Strahlzerstörer an der Mündung des Einlaßstutzens angebaut; diese erzeugen aber doch eher eine Strahlablenkung oder -spaltung. Eine einwandfreie Mischung wäre wohl nur durch den Einbau einer rich-

tigen Zerstäuberdüse erreichbar; doch bildet diese wiederum eine Gefahr für Verstopfung durch Unreinigkeiten. Der vollständige Temperatureausgleich muss demnach auch heute noch als nicht vollkommen erreicht betrachtet werden, wobei hier dahingestellt bleiben möge, ob er überhaupt erwünscht ist.

Geht man also von der Voraussetzung aus, dass sich keine mechanische Mischung einstelle, so bildet sich unmittelbar über dem Flansch eine Kaltwasserschicht, die den Tauchteil des vertikalen Thermostaten auf der Schalterseite abkühlt. In gleichem Masse wie der Kaltwasserspiegel steigt nun auch die abgekühlte Tauchrohrlänge des Thermostaten. Im Thermostatenbau wird aber eine bestimmte Temperaturdifferenz zwischen Einschalten und Ausschalten während des Kalibrierens zwangsmässig festgelegt, bedingt durch die vorhandenen Kräfte für den Schaltvorgang und die nötigen Wege und Geschwindigkeiten zur Unterbrechung der Schaltlast. Der Schaltweg wiederum ist bedingt durch den nötigen Kontaktabstand und den unvermeidlichen Leerlauf für Umkehr der Schaltrichtung. Diese beiden Faktoren nennt der Praktiker Spiel oder Empfindlichkeit, werden aber wohl am zweckmässigsten entsprechend den Ausdrücken aus der Regulatorentechnik als Unempfindlichkeit bezeichnet, und hier in ° C gemessen. Ein Tauchthermostat für elektrische Heisswasserspeicher, mit einer Tauchrohrlänge von 400 mm, erreicht für eine Schaltleistung von 3 kVA ohne

weiteres eine Unempfindlichkeit von 3° C. Somit wird die Kaltwasserschicht einmal die Höhe erreichen, die den Thermostaten stark genug abkühlt, um ihn wieder einzuschalten, obwohl die Temperatur des bereits erwärmten Wassers in keiner Weise gesunken ist, was ohne weiteres am Thermometer ablesbar ist. Rechnerisch lässt sich nun diese Kaltwasserschichthöhe a entsprechend Fig. 1 ohne Schwierigkeiten ermitteln.

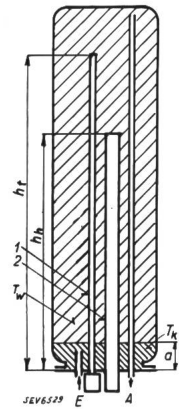


Fig. 1.

Speicher mit erster Kaltwasserschicht.
E Einlauf. A Auslauf. 1 Thermostat. 2 Heizelement.

Da die relative Ausdehnung der zwei verschiedenen Metalle des Tauchteils des Thermostaten in den Grenzen der Verwendung für Heisswasserspeicher proportional der Temperatur ist, kann an Stelle der absoluten Ausdehnungsmasse direkt die Temperatur eingesetzt werden. Wird die Unempfindlichkeit des Thermostaten mit ΔT_t , die Tauchrohrlänge mit h_t , die Kaltwasserschichthöhe mit a , die Kaltwassertemperatur mit T_k und die Grenztemperatur für das aufgewärmte Wasser mit T_w bezeichnet, so kann folgende Gleichung für Wiedereinschalten angesetzt werden:

$$T_w(h_t - a) + T_k a = T_w h_t - \Delta T_t h_t$$

Durch Auflösen nach a entsteht:

$$a = h_t \frac{\Delta T_t}{T_w - T_k} \quad (1)$$

Selbst wenn die Voraussetzung einer Mischzone zwischen Kalt- und Warmwasserspiegel einbezogen werden müsste, würde sich nur in diesem Sinne eine Aenderung der Werte aus Gl. (1) ergeben, als a dann nur als theoretische Schichthöhe für das entsprechende Kaltwassergewicht angesehen werden könnte. Die kalorische Aequivalenz wäre aber dadurch nicht angetastet, und das ist es, worauf es hier ankommt.

Nach Erreichen der Höhe a der Kaltwasserschicht schaltet der Thermostat wieder ein und erwärmt nun durch das Heizelement das Wasser erneut. Dabei soll die Voraussetzung gemacht werden, dass eine innere Zirkulation des Wassers unterbleibe und dass die Wärmeleitung sich nur horizontal vollziehe. Beide Voraussetzungen sind nicht ganz richtig, vereinfachen aber die Rechnung ganz wesentlich und ermöglichen immerhin dem Praktiker die erste Ueberschlagsrechnung. Die Zirkulation hält sicher so lange an, bis der Thermostat das Heizelement wieder abgeschaltet hat; nachher bildet sich aber die Schichtung aus Gründen der verschiedenen spezifischen Gewichte wieder zurück. Was aber hier von Interesse ist, das ist nur der ausgeglichene Endzustand nach Stromunterbruch. Dasselbe gilt auch für die räumliche Wärmeleitung, die sich ebenfalls in der Horizontalebene ausgleicht, sobald die gerichtete Wärmezufuhr ausbleibt. Dar-

aus ergibt sich für eine hier nur angedeuteten beabsichtigte Ueberschlagsrechnung, dass nach Erreichen der um die Unempfindlichkeit ΔT_t höheren Temperaturen T_k und T_w der Thermostat wieder ausschaltet.

Bei Erreichen dieser Temperaturen $T_k + \Delta T_t$ und $T_w + \Delta T_t$ wird dem Speicher wieder Wasser entnommen, das durch Kaltwasser erneut ersetzt wird, bis die mittlere Temperatur des Thermostaten wieder um ΔT_t gesunken ist. Dadurch entsteht eine zweite Kaltwasserschicht wiederum von der Schichthöhe a . Dieses Spiel setzt sich nun wechselweise fort; es ist interessant, zu überlegen, welche Temperatur T_w überhaupt erreicht werden kann, wenn die Kaltwasserschicht bis Heizelementhöhe steigt. Bis zu dieser Höhe sind nämlich die gemachten Einschränkungen noch etwa verantwortbar. Die entsprechende Gleichung heisst dann:

$$T_w(\max h_h) = T_w + \Delta T_t \frac{h_h}{a}$$

Durch Einsetzen von Gl. (1) in dieser Gleichung erhält man

$$T_w(\max h_h) = T_w + \Delta T_t \frac{h_h}{h_t \frac{\Delta T_t}{T_w - T_k}}$$

$$T_w(\max h_h) = T_w + \frac{h_h}{h_t} (T_w - T_k) \quad (2)$$

Man gelangt also zu dem interessanten Resultat, dass die maximale Aufschaukelungstemperatur bis zur Schichthöhe entsprechend der Heizelementlänge von der Unempfindlichkeit des Thermostaten unabhängig ist, dass dagegen die maximale Temperatur um so niedriger gehalten werden kann, je länger der Thermostat und je kürzer das Heizelement ist. Es ist demzufolge nicht möglich, durch Vorschrift einer bestimmten Unempfindlichkeit eine niedrige Aufschaukelungstemperatur zu erreichen. In der Verwendung eines Thermostaten mit einer Tauchrohrlänge gleich der lichten Höhe des Speichers liegt nun keine Schwierigkeit; dagegen ist selbstverständlich für die minimale Länge des Heizelementes auf Grund einer annehmbaren spezifischen Wärmebelastung pro Flächeneinheit praktisch eine Grenze gesetzt.

Setzt man Zahlenwerte in die Formeln ein, und zwar beispielsweise $T_k = 10^{\circ}$ C, $T_w = 80^{\circ}$ C, $h_h = 300$ mm, $h_t = 400$ mm, $T_t = 3^{\circ}$ C, so erhält man:

$$a = \frac{3}{80 - 10} 400 = 17,1 \text{ mm}$$

$$T_w(\max h_h) = 80 + \frac{300}{400} (80 - 10) = 132,5^{\circ} \text{C.}$$

Die weitere wesentliche Voraussetzung, die bei der wiedergegebenen Ueberschlagsrechnung gemacht wurde, ist die stillschweigende Annahme gleichwertiger Aufwärmung sämtlicher Schichten. Diese Hypothese verfälscht die tatsächlichen Vorgänge unwesentlich für die ersten Spiele, bedeutend einschneidender jedoch bei nur noch geringen Abstän-

den der Kaltwasserschichten von dem Heizelemente. Zur Abklärung dieser Betriebsphasen muss die Zeitgleichung mit in die Untersuchung einbezogen werden, wodurch die bis jetzt angenommene Proportionalität der Temperatur mit der Höhe des Speichers verlorenght. Die Untersuchung wird dadurch ziemlich kompliziert und für den Praktiker unhandlich; für ihn ist in erster Linie der geradlinige Temperaturverlauf anschaulich, verständlich und deshalb verwendbar.

Der Vollständigkeit halber sei jedoch die etwas schwerfällige Rechnung durchgeführt, hauptsächlich, weil der wirkliche Wert für $T_w \max$ voraussichtlich zwischen diesen beiden theoretischen Resultaten liegen wird.

Die Erwärmung des Tauchteiles des Thermostaten setzt sich dadurch aus der Temperaturerhöhung $\Delta T'_1$ in der kalten Schicht und derjenigen ΔT_1 in der warmen Zone zusammen, die beide unbekannt sind. Bekannt ist nur die Unempfindlichkeit des Thermostaten. Es besteht somit die Gleichung:

$$a_1 \Delta T'_1 + (h_t - a_1) \Delta T_1 = h_t \Delta T_t \quad (3)$$

Es gilt nun weiter, dass die vom Heizelement abgegebene Wärme vom Wasser aufgenommen werden muss:

$$\pi d \kappa t_1 a_1 = \frac{D^2 \pi}{4} a_1 \Delta T'_1$$

$$\pi d (h_h - a_1) \kappa t_2 = \frac{D^2 \pi}{4} (h_h - a_1) \Delta T_1$$

Dabei ist d der Heizelementdurchmesser, D der Speicherdurchmesser, κ die Wärmeübergangszahl. Durch Auflösen beider Gleichungen nach der Zeit t_1 und t_2 erhält man

$$t_1 = \frac{D^2}{4 d \kappa} \Delta T'_1$$

$$t_2 = \frac{D^2 (h_h - a_1)}{4 d \kappa (h_h - a_1)} \Delta T_1$$

Da die Wärmelieferung für beide Wasserarten gleichzeitig eingeschaltet und unterbrochen wird, ist t_1 gleich t_2 ; durch Gleichsetzen entsteht somit:

$$\Delta T'_1 = \frac{(h_t - a_1)}{(h_h - a_1)} \Delta T_1$$

Durch Einsetzen dieser Gleichung in den Ansatz (3) errechnet sich ΔT_1

$$a \frac{(h_t - a_1)}{(h_h - a_1)} \Delta T_1 + (h_t - a_1) \Delta T_1 = h_t \Delta T_t$$

$$\Delta T_1 = \Delta T_t \frac{h_t}{h_t + a_1 \left(\frac{h_t - a_1}{h_h - a_1} - 1 \right)} \quad (4)$$

Führt man nun folgende Substitution durch:

$$c_1 = \frac{h_t}{h_t + a_1 \left(\frac{h_t - a_1}{h_h - a_1} - 1 \right)}$$

so vereinfacht sich die Schreibweise in:

$$\Delta T_1 = \Delta T_t \cdot c_1$$

Dadurch, dass sich die einzelnen Temperaturanstiege des Heisswassers als nicht mehr konstant erweisen, wird auch die Konstanz der Schichthöhen hinfällig. Diese müssen deshalb gesondert auf Grund der früher erwähnten Ansätze errechnet werden. Es gilt auch hier wieder, dass die Tauchlänge des Thermostaten in der Heisswasserzone $h_t - a_1 - a_2$ multipliziert mit ihrer Temperatur

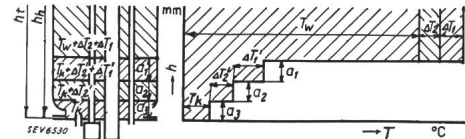


Fig. 2.

Algebraische Bestimmung von Schichthöhe und Temperaturanstieg.

h Höhe über Flansch. T Wassertemperatur.

$T_w + \Delta T_1$ zusammen mit der Tauchrohrlänge der ersten Kaltwasserschicht a_1 , multipliziert mit ihrer Temperatur $T_k + \Delta T'_1$ und der Tauchrohrlänge der zweiten Kaltwasserschicht a_2 multipliziert mit der Kaltwassertemperatur T_k nun im Momente des Wiedereinschaltens gleich ist der gesamten Tauchrohrlänge h_t multipliziert mit der Warmwassertemperatur T_w weniger dieselbe Länge h_t um die Unempfindlichkeit ΔT_t vervielfacht (Fig. 2):

$$(T_w + \Delta T_1) (h_t - a_1 - a_2) + (T_k + \Delta T'_1) a_2 + T_k a_2 = T_w h_t - \Delta T_t h_t$$

Durch Ausmultiplizieren und Einsetzen der früher gefundenen Relation zwischen ΔT_1 und $\Delta T'_1$ erhält man für die zweite Schichthöhe a_2 :

$$a_2 = \Delta T_t \frac{h_t}{T_w - T_k + \Delta T_1} \frac{h_t}{h_t + a_1 \left(\frac{h_t - a_1}{h_h - a_1} - 1 \right)} = \Delta T_t \frac{h_t}{T_w - T_k + \Delta T_1 c_1} \quad (5)$$

Mit diesem gefundenen Werte für a_2 kann nun wiederum ΔT_2 wie oben berechnet werden und ergibt die Gleichung:

$$\Delta T_2 = \Delta T_t \frac{h_t}{h_t + (a_1 + a_2) \left(\frac{h_t - a_1 - a_2}{h_h - a_1 - a_2} - 1 \right)} = \Delta T_t c_2$$

Damit errechnet sich erneut die dritte Schichthöhe a_3 :

$$a_3 = \Delta T_t \frac{h_t}{T_w - T_k + \Delta T_t (c_1 + c_2)}$$

und die allgemeinen Glieder:

$$a_i = \Delta T_t \frac{h_t}{T_w - T_k + \Delta T_t \sum_0^{i-1} c_i}$$

Tabelle I.

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	
a _h mm	17,1		15,9		14,7		13,8		13,6		12,4		11,8		11,3		11,0		10,7		10,4		10,3	Σ a _n = 297,5 mm
ΔT _n °C	2,96		1,86		2,75		2,62		2,48		2,33		2,15		1,92		1,66		1,32		0,76		0,10	ΔT _{max} = 123,42 °C
		2,90		2,80		2,69		2,56		2,40		2,22		2,04		1,80		1,52		1,12		0,42		

$$\Delta T_i = \Delta T_t \frac{h_i}{h_i + \sum_1^n a_i \left(\frac{h_i - \sum_1^n a_i}{h_h - \sum_1^n a_i} - 1 \right)} \quad (6)$$

Die tatsächliche Durchführung der Rechnung lässt sich nur numerisch mit einigem Erfolg bewerkstelligen. Tabelle I zeigt die Werte, die aus

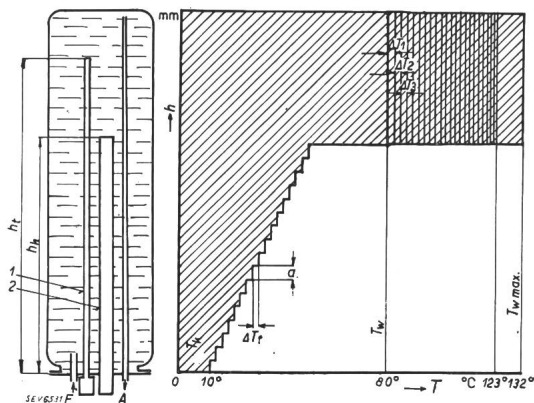


Fig. 3.

Temperaturverlauf bei Annäherungsrechnung und Temperatur-schichtung in der Heisswasserzone bei algebraischer Bestimmung.

1 Thermostat. 2 Heizelement. h Höhe über Flansch. T Wassertemperatur.

den früher angenommenen Zahlen sowohl für die einzelnen Schichthöhen, als auch für die dazu gehörenden Temperaturanstiege resultieren (Fig. 3). Es liessen sich auch analog die Temperaturanstiege in den Kaltwasserschichten errechnen; ihre Kenntnis trägt aber zur Ermittlung der maximalen Wassertemperatur nicht bei.

Daraus geht nun eindeutig hervor, dass bei der Annäherungsrechnung bei einer Wasserschichtung bis Heizelementende im ungünstigsten Falle eine Aufschaukelungstemperatur von 132,5° C und bei genauerer Bestimmung immerhin noch eine solche von 123,4° C auftreten kann. Dieses sind Werte, die am Ausfluss ohne Zweifel Dampfentwicklung verursachen und deshalb Klagen hervorrufen. Diesen Vorkommnissen Aufmerksamkeit zu schenken, dürfte sich im Interesse der Sache auf alle Fälle lohnen, besonders, da die sog. zweite Sicherung entsprechend den dafür ausgearbeiteten Vorschriften leider nicht in der Lage ist, dagegen die geringste Vorbeugung sicherzustellen, indem die Flanschttemperatur hier gerade abgekühlt statt überhitzt wird. Selbst wenn in der Praxis die Betriebsverhältnisse nicht so extrem ungünstig auftreten, wie sie hier der Rechnung zugrunde gelegt wurden, so lässt sich das Bestehen der Möglichkeit, wenn nicht einer Gefahr, so doch einer Unannehmlichkeit nicht bestreiten.

Das Kreisdiagramm des Widerstands-Verstärkers.

Von Karl E. Müller, Zürich.

621.396.645.211

Der Autor, Leiter der Fachschule für Radiotechnik in Zürich, untersucht das sogenannte «exakte» Ersatzschema des widerstandsgekoppelten Verstärkers (Fig. 2) bezüglich der Verstärkung $V = U_2/U_1$ und unter Berücksichtigung der Phasenlage der verstärkten Spannung U_2 . Es ergibt sich ein einfacher Zusammenhang zwischen Verstärkung V und Phasenverschiebung Θ , nämlich $V = V_{max} \cdot \cos \Theta$; daher kann das Verhalten des Verstärkers in einem Kreisdiagramm dargestellt werden. Insbesondere wird gezeigt, wie ein übersichtlicher Frequenzmaßstab gewonnen werden kann. Die zur Berechnung nötigen Formeln werden an einem Beispiel erläutert.

L'auteur examine le schéma équivalent «exact» de l'amplificateur à résistance (fig. 2), pour un rapport d'amplification $V = U_2/U_1$ et en tenant compte de la phase de la tension amplifiée U_2 . Il en déduit une relation simple entre l'amplification V et le déphasage Θ , $V = V_{max} \cdot \cos \Theta$; par conséquent, le fonctionnement de l'amplificateur peut être représenté par un diagramme circulaire. L'auteur montre, en particulier, comment on peut en déduire une échelle claire de la fréquence. Les formules nécessaires au calcul sont expliquées à l'aide d'un exemple particulier.

Bei mehrstufigen Verstärkern findet die Koppelung der Stufen durch Widerstand R_a und Kapazität C_k die am häufigsten anzutreffende Schaltung (Fig. 1). Das zugehörige Ersatzschema, Fig. 2, zeigt die erste Röhre als Wechselstromgenerator mit der elektromotorischen Kraft: $-g \cdot U_1$ in Reihe mit dem inneren Widerstand R_i der Röhre. Die Kapazität C_a umfasst die Anode-Kathode-Kapazität im Innern der Röhre sowie andere Streukapazitäten und eventuelle, absichtlich hinzugefügte Kondensa-

toren. Der Gitterableitwiderstand R_g der nächsten Röhre und deren Eingangsimpedanz Z_e sind im Ersatzschema durch R_g^* und C_g^* repräsentiert. Sind

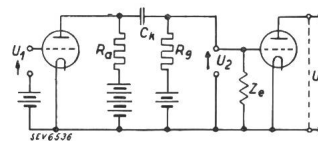


Fig. 1.

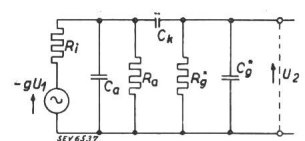


Fig. 2.

Der RC-gekoppelte Verstärker und sein Ersatzschema.