

DEUTSCHES ELEKTRONEN-SYNCHROTRON
(DESY)

Hamburg-Gr.Flottbek 1, Flottbeker Drift 56

DESY-Bibliothek

DESY A 2.21

Hamburg, 10.3.1958
Bo.

Magnetstromversorgung in der Schaltung nach White

Wird vorausgesetzt, daß zur Speisung des Magneten ein Strom von der zeitlichen Gestalt

$$i = \frac{1}{2} I_m (1 + \cos \omega t)$$

verlangt wird, so empfiehlt sich die von White* vorgeschlagene Schaltung (Abb. 1). Die Grundidee ist folgende: Der Synchrotronmagnet braucht eine bestimmte fest vorgegebene Durchflutung $\Theta = i w$. Der induktive Spannungsabfall $j\omega L I$ ist für die Isolation der Wicklung gegen Erde bestimmend und darf einen gegebenen Wert nicht überschreiten. Schaltet man alle Magnetsektoren in Reihe, so müßte aus diesen Isolationsrücksichten die Windungszahl w sehr klein sein, was zu hohen Strömen und entsprechend hohen Leiterquerschnitten führt. Man umgeht diese Schwierigkeit, indem man die gesamte Magnetwicklung in m gleiche Teile teilt, so daß in jedem die zulässige Spannung auftritt. Zu jedem Teil wird eine auf Resonanz abgestimmte Kapazität in Reihe geschaltet. Die Summenspannung einer solchen "Einheit" wird damit (ohne Berücksichtigung der Wirkleistung) zu Null gemacht. Durch alle Magnetabschnitte fließt der gleiche Strom, was bei einer Parallelschaltung nicht ohne weiteres zu erreichen ist. - Parallel zur Reihenkapazität liegt ein Sperrkreis, über dessen Drossel der Gleichstrom geleitet wird.

Mit dem Scheitelwert U_m der zulässigen Spannung gegen das Magneteisen ergibt sich für die Induktivitäten L

$$L = \frac{8m U_m^2}{\omega_n^2 W_n}$$

*) CERN-SYMPOSIUM 1956

Der Scheitelwert des Stromes durch die Magnetwicklung ist:

$$I_m = \frac{4 \cdot U_m}{\omega L}$$

und die Windungszahl:

$$w = \frac{\Theta}{I_m}$$

Die Kapazitäten C müssen so gewählt werden, daß $\omega_n^2 LC = 1$ des gleichen muß für die Sperrkreise sein: $\omega_n^2 L'C' = 1$

Die Wahl von L' und C' hängt von verschiedenen Faktoren ab und ist eine Optimalisierungsaufgabe. (Darüber wird später berichtet werden.)

Verhalten bei kleinen Frequenzabweichungen

A. Einzeldrosseln

Im folgenden soll untersucht werden, wie sich ein Netzwerk aus m-Einheiten und l i n e a r e n Schaltelementen bei kleinen Abweichungen der Frequenz von der Sollfrequenz und bei kleinen Abweichungen der einzelnen Schaltelemente von einem Sollwert verhält. Die Induktivitäten L' werden realisiert durch einzelne Luftspalt-Drosselspulen, die nicht durch magnetische Kopplungen miteinander verbunden sind.

Abb. 2 zeigt das Ersatzbild für die Parallelkreise. Darin bedeuten:

R_1	Ersatzwiderstand für die Kupferverluste
R_2	Ersatzwiderstand für die Eisenverluste
R_3	Ersatzwiderstand für die Kondensatorverluste.

Alle drei Widerstände sind frequenzabhängig, werden jedoch unter der Voraussetzung, daß nur kleine Frequenzänderungen vorkommen, als konstant angesehen. Ferner wird R_2 parallel zu R_3 gelegt, was nur einen sehr geringen Fehler verursacht, damit $\frac{R_1}{\omega L} \approx 1,5 \dots 2 \%$ zu rechnen ist. Der Leitwert des Sperrkreises wird dann:

$$G_p = \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_1} \frac{1}{1 + \left(\frac{\omega L}{R}\right)^2} + j \left[\omega L - \frac{1}{\omega L'} \frac{1}{1 + \left(\frac{R_1}{\omega L'}\right)^2} \right]$$

$\left(\frac{R}{\omega L}\right)^2 \leq 4 \cdot 10^{-6}$, so daß die Resonanzfrequenz des Parallelkreises mit sehr guter Genauigkeit beträgt:

$$\omega_{op} = \frac{1}{\sqrt{L'C'}}$$

Da nur kleine Abweichungen der Frequenz von der Resonanzfrequenz vorkommen sollen, wird für den Realteil des Leitwertes $\omega - \omega_0$ gesetzt, und man erhält:

$$G_P = \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{R_4}{Z_P^2} + j \left(\omega C' - \frac{1}{\omega L'} \right), \quad \omega_0 Z_P = \sqrt{\frac{L'}{C'}}; \quad Y_P = \frac{1}{Z_P}$$

Ferner kann man setzen:

$$\operatorname{Im}(G_P) = \omega C' \frac{\omega^2 - \omega_{0p}^2}{\omega^2} = 2\omega C' \frac{\omega - \omega_{0p}}{\omega}$$

Verlustwinkel des Sperrkreises: $\operatorname{tg} \delta_P \approx 5\%$

Der Scheinwiderstand einer Einheit mit einem Reihen- und einem Parallelresonanzkreis beträgt:

$$R_E = j\omega L + \omega L \operatorname{tg} \delta_L + \frac{1}{\omega C (\operatorname{tg} \delta_C + \frac{C'}{C} \operatorname{tg} \delta_P) + j\omega C \left(1 + 2 \frac{C'}{C} \frac{\omega - \omega_{0p}}{\omega} \right)}$$

Abb. 3 zeigt das Ersatzbild für eine Magneteinheit; R_4 ist der Ersatzwiderstand für die Kupferverluste, R_5 der Ersatzwiderstand für die Eisenverluste. Beide werden wieder für die Umgebung der Resonanzfrequenz als konstant angenommen. Der Scheinwiderstand der Magneteinheit R_L ist dann:

$$R_L = R_4 + \frac{R_5}{1 + \left(\frac{R_5}{\omega L}\right)^2} + j\omega L \frac{1}{1 + \left(\frac{\omega L}{R_5}\right)^2}$$

Die spezifischen Eisenverluste werden bei $f_n = 50 \text{ Hz}$ ca. $0,8 \text{ W/kg}$ betragen. Dann sind die Eisenverluste pro Sektor $V_{Fe} = 22 \text{ kW}$, und man erhält:

$$R_5 = \frac{4U^2}{V_{Fe}} = 11,5 \text{ k}\Omega; \quad \frac{\omega L}{R_5} = 3,7\%$$

R_L läßt sich dann in der Nähe der Resonanzfrequenz mit $\omega L \approx \omega_0 L = Z_R$ schreiben:

$$R_L = Z_R \operatorname{tg} \delta_L + j\omega L$$

$\operatorname{tg} \delta_L$ enthält alle Verluste der Magneteinheit.

$$\operatorname{tg} \delta_L \approx 5,3\%$$

Im Ausdruck für R_E ist:

$$\operatorname{tg} \delta_C + \frac{C'}{C} \operatorname{tg} \delta_P \approx 3 \cdot 10^{-3} + 0,5 \cdot 5 \cdot 10^{-3} = 5,5\%$$

$$\left(\operatorname{tg} \delta_C + \frac{C'}{C} \operatorname{tg} \delta_P \right)^2 \ll 1$$

Die lineare Näherung für R_E lautet dann:

$$R_E = \omega L \operatorname{tg} \delta_L + \frac{1}{(\omega C)^2} \left[\omega C \operatorname{tg} \delta_C + Y_P \operatorname{tg} \delta_P \right] \left[1 - 4 \frac{C'}{C} \frac{\omega - \omega_{0p}}{\omega} \right] + j \left[\omega L - \frac{1}{\omega C} \left(1 - 2 \frac{C'}{C} \frac{\omega - \omega_{0p}}{\omega} \right) \right]$$

Ohne Berücksichtigung des frequenzabhängigen Gliedes im

Realteil erhält man:

$$R_E = Z_R \left[\operatorname{tg} \delta_R + \frac{C'}{C} \operatorname{tg} \delta_P \right] + j Z_R 2 \left[\frac{\omega - \omega_{0R}}{\omega} + \frac{C'}{C} \frac{\omega - \omega_{0P}}{\omega} \right]$$

$$\text{mit } Z_R = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad ; \quad \omega_R = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad ; \quad \omega_P = \frac{1}{\sqrt{L'C'}}$$

$\operatorname{tg} \delta_R$ Verlustwinkel des reinen Resonanzkreises

$$\operatorname{tg} \delta_R \approx 8,3 \text{ ‰}$$

Mit den Bezeichnungen der Abb. 1 erhält man bei kurzgeschlossener Gleichspannungsquelle den Eingangsleitwert des ganzen Netzwerks zwischen den Punkten a und b, also für Paralleleinpeisung:

$$G = Y_{P1} \operatorname{tg} \delta_{P1} + \omega C_1 \operatorname{tg} \delta_{C1} + j \omega C_1 + j 2 \omega C_1' \frac{\omega - \omega_{0P1}}{\omega}$$

$$+ \frac{1}{Z_{R2} \left[\operatorname{tg} \delta_{R2} + \frac{C_2'}{C_2} \operatorname{tg} \delta_{P2} \right] + \dots \dots \dots Z_{Rm} \left[\operatorname{tg} \delta_{Rm} + \frac{C_m'}{C_m} \operatorname{tg} \delta_{Pm} \right] + \omega L_1 \operatorname{tg} \delta_{L1}}$$

$$+ j \omega L_1 + j 2 Z_{R2} 2 \left[\frac{\omega - \omega_{0R2}}{\omega} + \frac{C_2'}{C_2} \frac{\omega - \omega_{0P2}}{\omega} \right] + \dots \dots j 2 Z_{Rm} 2 \left[\frac{\omega - \omega_{0Rm}}{\omega} + \frac{C_m'}{C_m} \frac{\omega - \omega_{0Pm}}{\omega} \right]$$

Aus $\operatorname{Im}(G) = 0$ ergibt sich die Frequenz ω , für die der Eingangsleitwert reell wird:

$$0 = \omega C_1 + 2 \omega C_1' \frac{\omega - \omega_{0P1}}{\omega} - \frac{B}{A^2 + B^2}$$

$$A = \omega L_1 \operatorname{tg} \delta_{L1} + Z_{R2} \left[\operatorname{tg} \delta_{R2} + \frac{C_2'}{C_2} \operatorname{tg} \delta_{P2} \right] + \dots \dots Z_{Rm} \left[\operatorname{tg} \delta_{Rm} + \frac{C_m'}{C_m} \operatorname{tg} \delta_{Pm} \right]$$

$$B = \omega L_1 + Z_{R2} 2 \left[\frac{\omega - \omega_{0R2}}{\omega} + \frac{C_2'}{C_2} \frac{\omega - \omega_{0P2}}{\omega} \right] + \dots \dots$$

$$+ Z_{Rm} 2 \left[\frac{\omega - \omega_{0Rm}}{\omega} + \frac{C_m'}{C_m} \frac{\omega - \omega_{0Pm}}{\omega} \right]$$

Die Einspeisung könnte auch in Serie erfolgen. Dazu wäre ein Transformator nötig, der in Reihe zu einer Magnetwicklung liegt und auf seiner Sekundärseite den gesamten Magnetstrom führt. Der Eingangswiderstand der Schaltung wäre hier:

$$R = \sum_{v=1}^m Z_{Rv} \left(\operatorname{tg} \delta_{Rv} + \frac{C_v'}{C_v} \operatorname{tg} \delta_{Pv} \right) + j 2 \sum_{v=1}^m \left(\frac{\omega - \omega_{0Rv}}{\omega} + \frac{C_v'}{C_v} \frac{\omega - \omega_{0Pv}}{\omega} \right)$$

Auswirkung von Frequenzabweichungen

3 dB

Ein Maß für die Frequenzempfindlichkeit ist die 45°-Frequenz. Der Scheinwiderstand einer Einheit hat dann den $\sqrt{2}$ -fachen Betrag des Realteiles:

$$\left| R_E \right| = \sqrt{2} \cdot R_n (R_E)$$

Wenn $\omega_{oR} = \omega_{oP} = \omega_n$

läßt sich der Einfluß von Schwankungen der Frequenz angeben:

$$\operatorname{tg} \delta_R + \frac{C'}{C} \operatorname{tg} \delta_P = 2 \left(\frac{\omega_{45} - \omega_n}{\omega_{45}} + \frac{C'}{C} \frac{\omega_{45} - \omega_n}{\omega_{45}} \right)$$
$$\frac{\omega_{45} - \omega_n}{\omega_{45}} \approx 3,7 \cdot 10^{-3}$$

B. Summendrossel

Die m Wicklungen der Sperrdrosseln lassen sich auf einem gemeinsamen Eisenkern (mit Luftspalten) unterbringen. Man erreicht dadurch, daß die Spannungen der einzelnen Einheiten weniger voneinander abweichen (im Idealfall der vollständigen Kopplungen sind immer alle Spannungen gleich) und daß das aktive Gewicht der Summendrossel kleiner ist als die Summe der aktiven Gewichte der m einzelnen Spulen. Bei gleicher Ausnutzung (magnetische Induktion und Stromdichte) und bei geometrisch ähnlichen Bauformen gilt für die aktiven Gewichte G_1 und G_2 zweier Transformatoren der Scheinleistungen N_1 und N_2

$$\frac{G_1}{G_2} = \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^{0,75}$$

An die Stelle der Scheinleistungen tritt hier die gespeicherte magnetische Energie W der Drosseln. - Bei gleicher Beanspruchung sind die Verluste proportional den Gewichten. Es ist also sowohl hinsichtlich der Anschaffungs- als auch der Betriebskosten wirtschaftlicher, die m einzelnen Drosseln zu einer einzigen zusammenzufassen. Das Gewicht der Summendrossel beträgt das $g = \frac{m \cdot 0,75}{m}$ -fache des Gewichts der m Einzeldrosseln. $m = 49$ ergibt $g = 0,48$. Praktisch dürfte dieses Verhältnis nicht erreicht werden, da bei großen Einheiten das Verhältnis Oberfläche : Volumen der aktiven Teile geringer ist als bei kleinen und die Beanspruchungen geringer gewählt werden

es sei denn, daß eine wirksamere Kühlung, z.B. Öl-Umlaufkühlung, angewandt wird.

Für die Wahl von Einzeldrosseln oder einer Summendrossel dürften folgende Gesichtspunkte maßgebend sein:

Einzeldrosseln: Aufstellung in der Nähe des Magneten, daher kurze Verbindungsleitungen. Es könnten gebräuchliche Einheiten (Petersen-Spulen) mit für unsere Zwecke spezieller Auslegung (Gleichstromvormagnetisierung!) verwendet werden. Solche Drosseln lassen sich auch als "Tauchkern"-Spulen ausführen (AEG) und sind dann stetig einstellbar. Im Schadensfalle läßt sich eine Einheit schnell gegen eine Reserveeinheit austauschen.

Höhere Anschaffungs- und Betriebskosten pro Einheit gespeicherter Energie. Wegen der höheren Verluste muß die Spannungsquelle eine höhere Leistung haben.

Summendrossel: Aufstellung in der Mitte des Ringes und daher lange Verbindungswege. (Die Kabelkosten sind jedoch gering, verglichen mit den Anschaffungskosten für die Drossel.) Abstimmung schwierig. Bei einem Schaden fällt die ganze Maschine aus.

Niedrigere Anschaffungs- und Betriebskosten pro Einheit gespeicherter Energie.

Verhalten bei kleinen Frequenzabweichungen

Abb. 5 zeigt die Schaltung. Es ist nun wichtig, wo die Wechselspannungsquelle angeschlossen wird. Dafür gibt es folgende Möglichkeiten:

- a) galvanisch entweder in Serie oder parallel
- b) transformatorisch mit m Primärwicklungen in Reihe
- c) transformatorisch mit m Primärwicklungen parallel

Die Drossel soll als Ringdrossel nach den amerikanischen Vorschlägen (White, CEA) ausgeführt werden. Im allgemeinen Fall werden die Resonanzfrequenzen der einzelnen Kreise etwas voneinander abweichen, und es werden sich Ströme in den einzelnen Drosselwicklungen einstellen, die nach dem Betrag und Phase voneinander verschieden sind. Beispielsweise könnte sich in einem beliebigen Zeitpunkt eine Stromverteilung nach Abb. 4a einstellen. Der gezeichnete Strombelag läßt sich aufteilen in

einen - für alle Teilwicklungen im betrachteten Zeitpunkt - gleichen Strombelag, der proportional dem arithmetischen Mittelwert aller Ströme $\frac{1}{m} \sum_{v=1}^m \mathfrak{I}_v$ im betreffenden Zeitpunkt ist und den in jeder Wicklung verschiedenen Strombelägen, die proportional $(\frac{1}{m} \sum_{v=1}^m \mathfrak{I}_v - \mathfrak{I}_v)$ sind.

a) Der räumlich konstante Strombelag ruft nur einen magnetischen Fluß in Richtung der Längsachse hervor, der mit allen Teilwicklungen verkettet ist für den Fall, daß der Ringkern gleichmäßig bewickelt ist. Da sich zwischen den einzelnen Teilwicklungen jedoch große Abstände befinden, gibt es magnetische Teilflüsse, die nicht mit allen Wicklungen verkettet sind. Wenn der Toroid winkelsymmetrisch aufgebaut ist, bleiben nur Streuflüsse übrig, die jeweils von einer Teilwicklung erregt werden und eine Streuspannung induzieren, die nur vom Strom in der betreffenden Wicklung hervorgerufen wird. Die Streuinduktivitäten L_s sind bei symmetrischem Aufbau untereinander gleich.

b) Die "Differenz"-Strombeläge haben über den Umfang addiert die Summe Null und rufen magnetische Querflüsse hervor, deren Verkettung mit den einzelnen Teilwicklungen sich aus der jeweils im betrachteten Zeitpunkt gültigen Strombelagsverteilung ergibt. Abb. 4b zeigt die Felderregerkurve für die Strombelagsverteilung nach 4a. Durch die Querflüsse werden in den verschiedenen Teilwicklungen verschiedene Spannungen induziert, und es kommen, hervorgerufen durch zufällige Stromverteilungen, zufällige Kopplungen zwischen verschiedenen Teilwicklungen zustande, die außerdem zeitlich dauernd variieren. Es kann schon von vornherein gesagt werden, daß sich dies auf die Wirksamkeit der Schaltung ungünstig auswirken wird.

In Bezug auf die magnetischen Querflüsse verhalten sich die Schaltungen, bei denen die Spannungsquelle nach a) oder b) (s.S.6) angeschlossen wird, gleich; bei beiden können sich die Querflüsse ausbilden. Anders dagegen die Schaltung nach c) (s.S.6) mit parallelen Primärwicklungen: Der Querfluß eines Sektors ist sowohl mit dessen Primär- als auch Sekundärwicklung verkettet, und es bildet sich in der Primärwicklung die gleiche Quer-Durchflutung aus wie in der dazu gehörigen Sekundärwicklung. Die Summe dieser Querdurchflutungen aller m pri-

mären Teilwicklungen ist Null, und es erscheint kein entsprechender Strom in der Zuleitung zum Generator. Die Querflüsse werden bei Parallelschaltung der Primärwicklungen unterdrückt und damit die Kopplungen zwischen verschiedenen Teilwicklungen. Die parallel geschalteten Primärwicklungen wirken wie Ausgleichswicklungen; es sind noch einmal m Stromkreise nötig, um die Auswirkungen der ungleichen Stromverteilung zu unterdrücken.

Von Interesse ist vor allem der Eingangsleitwert des Netzwerks. Da nur kleine Abweichungen vom völlig abgeglichenen Zustand betrachtet werden sollen und es sich um eine "symmetrische" Einspeisung handelt, ist zu erwarten, daß im Ausdruck für den Eingangsleitwert ein frequenzunabhängiger Realteil erscheint ähnlich wie bei der Reiheneinspeisung unter A, d.h. sämtliche Wirkwiderstände denkt man sich unmittelbar parallel zur Spannungsquelle, und es werden nur die Blindwiderstände betrachtet. Abb. 5 zeigt das Ersatzbild der Schaltung mit parallelen Primärwicklungen. Die Ströme sind als Kreisströme eingetragen, und das Netzwerk besteht aus $2m + 1$ Maschen. Es werden folgende Bezeichnungen eingeführt:

$w_{s1} = w_{s2} = \dots w_{sm} = w_s$: sekundäre Windungszahl

$w_{p1} = w_{p2} = \dots w_{pm} = w_p$: primäre Windungszahl

$\dot{u} = \frac{w_p}{w_s}$: Übersetzungsverhältnis

$M = w_s^2 \Lambda_m$: Gegeninduktivität zwischen zwei sekundären Teilwicklungen

Λ_m : magnetischer Leitwert für den Hauptfluß der Ringdrossel

$L_{s1} = L_{s2} = \dots L_{sm} = L_s$: sekundäre Streuinduktivität

Die primären Streuinduktivitäten werden vernachlässigt, was mit Rücksicht darauf, daß sich die Primärwicklung am Eisenkern befindet und nur einen Bruchteil des Querschnittes der Sekundärwicklung hat, sicher zulässig ist.

$U_{q1}, U_{q2} \dots U_{qv} \dots U_{qm}$: in den Maschen 1 ... m durch die Querflüsse induzierten Spannungen.

$\dot{u}q_1, \dot{u}q_2, \dots, \dot{u}q_v, \dots, \dot{u}q_m$ In den Maschen 1a ... ma durch die Querflüsse induzierte Spannungen.

Es gelten dann folgende Gleichungen:

In der Masche I

$$j\mathcal{F} \left(\omega \sum_1^m L_v - \sum_1^m \frac{1}{\omega(C_v + C_v')} \right) + j\mathcal{F}_1 \frac{1}{\omega(C_1 + C_1')} + j\mathcal{F}_2 \frac{1}{\omega(C_2 + C_2')} + \dots + j\mathcal{F}_m \frac{1}{\omega(C_m + C_m')} = 0$$

In der Masche 1

$$j\omega M \sum_1^m \mathcal{F}_v + j\ddot{u} \omega M \sum_1^m \mathcal{F}'_v + j\omega L_s \mathcal{F}_1 - j \frac{\mathcal{F}_1}{\omega(C_1 + C_1')} + uq_1 + j \frac{\mathcal{F}}{\omega(C + C')} = 0$$

In der Masche v

$$j\omega M \sum_1^m \mathcal{F}_v + j\ddot{u} \omega M \sum_1^m \mathcal{F}'_v + j\omega L_s \mathcal{F}_v - j \frac{\mathcal{F}_v}{\omega(C_v + C_v')} + uq_v + j \frac{\mathcal{F}}{\omega(C + C')} = 0$$

In der Masche 1a

$$j\omega M \sum_1^m \mathcal{F}_v + j\ddot{u} \omega M \sum_1^m \mathcal{F}'_v + uq_1 = \frac{u}{\dot{u}}$$

In der Masche va

$$j\omega M \sum_1^m \mathcal{F}_v + j\ddot{u} \omega M \sum_1^m \mathcal{F}'_v + uq_v = \frac{u}{\dot{u}}$$

Mit $\sum_1^m uq_v = 0$ und mit $\sum_1^m \mathcal{F}'_v = \mathcal{F}'$ erhält man dann das folgende Gleichungssystem aus $m + 2$ Gleichungen:

\mathcal{F}	\mathcal{F}_1	$\mathcal{F}_2 \dots \dots \dots \mathcal{F}_m$	\mathcal{F}'
$\omega \sum_1^m L_V - \sum_1^m \frac{1}{\omega(C_V + C_i)}$	$\frac{1}{\omega(C_1 + C_i)}$	$\frac{1}{\omega(C_2 + C_2')} \dots \dots \dots \frac{1}{\omega(C_m + C_m')}$	0
$\frac{1}{\omega(C_1 + C_1')}$	$\omega L_S - \frac{1}{\omega(C_1 + C_1')}$	0	$+j \frac{dL}{d\omega}$
$\frac{1}{\omega(C_2 + C_2')}$	0	$\omega L_S - \frac{1}{\omega(C_2 + C_2')} \dots \dots \dots 0$	$+j \frac{dL}{d\omega}$
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
$\frac{1}{\omega(C_m + C_m')}$	0	$0 \dots \dots \dots \omega L_S - \frac{1}{\omega(C_m + C_m')}$	$+j \frac{dL}{d\omega}$
0	ωM	ωM	$-j \frac{dL}{d\omega}$

Es werden jetzt Sollwerte und Abweichungen davon eingeführt, und das Gleichungssystem durch Weglassen aller Glieder höherer Ordnung linearisiert.

$$(1) \omega = \omega_n + \Delta\omega$$

$$(2) C_v = C + \Delta C_v \quad C'_v = C' + \Delta C'_v$$

$$L_v = L + \Delta L_v \quad L'_v = L' + \Delta L'_v$$

Die Resonanzbedingungen lauten:

$$(3) a) \omega_n^2 LC - 1 = 0 \quad b) \omega_n^2 (mM + L')C' - 1 = 0$$

$$(4) \frac{1}{\omega(C_v + C'_v)} = \frac{1}{(\omega_n + \Delta\omega)(C + C') + (\omega_n + \Delta\omega)(\Delta C_v + \Delta C'_v)}$$

$$= \frac{1}{\omega_n(C + C')} - \frac{\Delta\omega}{\omega_n^2(C + C')} - \frac{\Delta C_v + \Delta C'_v}{\omega_n(C + C')^2}$$

Abkürzungen:

$$\frac{1}{\omega_n(C + C')} = \beta \quad - \frac{\Delta C_v + \Delta C'_v}{\omega_n(C + C')^2} = \delta\beta_v; \quad \frac{-\Delta\omega}{\omega_n^2(C + C')} = \Delta\beta$$

$$(5) \sum_1^m \left(\omega L_v - \frac{1}{\omega(C_v + C'_v)} \right) = m \left(\omega_n L - \frac{1}{\omega_n(C + C')} \right) +$$

$$+ m \left(\Delta\omega L + \frac{\Delta\omega}{\omega_n^2} \frac{1}{C + C'} \right) + \omega_n \sum_1^m \Delta L_v + \frac{1}{\omega_n(C + C')^2} \sum_1^m (\Delta C_v + \Delta C'_v)$$

Abkürzungen:

$$m \left(\omega_n L - \frac{1}{\omega_n(C + C')} \right) = a = m(a' - b); \quad a' = \omega_n L$$

$$\frac{\Delta\omega}{\omega_n} m \left(\omega_n L + \frac{1}{\omega_n(C + C')} \right) = \Delta a = m \frac{\Delta\omega}{\omega_n} (a' + b)$$

$$\omega_n \sum_1^m \Delta L_v + \frac{1}{\omega_n(C + C')^2} \sum_1^m (\Delta C_v + \Delta C'_v) = \delta a = \delta a' - \sum_1^m \delta b_v$$

$$(6) \omega_n L_s \frac{1}{\omega_n(C+C')} - \omega_n L_s + \Delta\omega L_s - \frac{1}{\omega_n(C+C')} + \frac{\Delta\omega}{\omega_n^2(C+C')} + \frac{\Delta C_V + \Delta C_V'}{\omega_n(C+C')^2}$$

Abkürzungen:

$$\omega_n L_s - \frac{1}{\omega_n(C+C')} = d = d' - \beta; \quad d' = \omega_n L_s$$

$$\Delta\omega L_s + \frac{\Delta\omega}{\omega_n^2} \frac{1}{C+C'} = \Delta d = \frac{\Delta\omega}{\omega_n} (d' + \beta)$$

$$\frac{\Delta C_V + \Delta C_V'}{\omega_n(C+C')^2} = -\delta b_V$$

(7) Abkürzungen:

$$\omega_n M = C; \quad \Delta\omega M = \Delta C; \quad -j \frac{1}{\omega_n} = e$$

Mit (1) - (7) erhält man dann das folgende Gleichungssystem:

f	f_1	f_2	f_m	f'	=
$a + \delta a + \Delta a$	$b + \delta b_1 + \Delta b$	$b + \delta b_2 + \Delta b \dots b + \delta b_m + \Delta b$		0	0
$b + \delta b_1 + \Delta b$	$d - \delta b_1 + \Delta d$	0	0	0	-e
$b + \delta b_2 + \Delta b$	0	$d - \delta b_2 + \Delta d$	0	0	-e
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
$b + \delta b_m + \Delta b$	0	0	$d - \delta b_m + \Delta d$	0	-e
0	$c + \Delta c$	$c + \Delta c \dots c + \Delta c$		$\dot{u}(c + \Delta c)$	+ e

Die Auflösung nach I' ergibt:

$$f' = \frac{D_z}{D_n} =$$

	$a + \delta a + \Delta a$	$b + \delta b_1 + \Delta b$	$b + \delta b_2 + \Delta b$	.....	$b + \delta b_m + \Delta b$	0
	$b + \delta b_1 + \Delta b$	$d - \delta b_1 + \Delta d$	0	.....	0	1
	$b + \delta b_2 + \Delta b$	0	$d - \delta b_2 + \Delta d$	.....	0	1
	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
	$b + \delta b_m + \Delta b$	0	0	.....	$d - \delta b_m + \Delta b$	1
-e.	0	$c + \Delta c$	$c + \Delta c$	.....	$c + \Delta c$	-1

	$a + \delta a + \Delta a$	$b + \delta b_1 + \Delta b$	$b + \delta b_2 + \Delta b$	.....	$b + \delta b_m + \Delta b$	0
	$b + \delta b_1 + \Delta b$	$d - \delta b_1 + \Delta d$	0	.....	0	0
	$b + \delta b_2 + \Delta b$	0	$d - \delta b_2 + \Delta d$	.....	0	0
	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
	$b + \delta b_m + \Delta b$	0	0	.....	$d - \delta b_m + \Delta b$	0
	0	$c + \Delta c$	$c + \Delta c$	.....	$c + \Delta c$	$n(c + \Delta c)$

Die Auflösung dieser Gleichung wurde von Herrn Maunz angegeben:

Es seien D'_z und D'_n die Determinanten ohne δ - und Δ -Glieder, δD_z , ΔD_z , δD_n und ΔD_n die Summen aller Glieder, die die Δ - und δ -Glieder 1. Ordnung besitzen, dann ist:

$$f' = \frac{D'_z + \delta D_z + \Delta D_z}{D'_n + \delta D_n + \Delta D_n} = \frac{1}{D'_n} (\delta D_z + \Delta D_z) + \frac{D'_z}{D'_n} \left(1 - \frac{\delta D_n + \Delta D_n}{D'_n} \right)$$

$$D_2' = -e \cdot \left| \begin{array}{cccccc} a & b & b & \dots & b & 0 \\ b & d & 0 & \dots & 0 & 1 \\ b & 0 & d & \dots & 0 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ b & 0 & 0 & \dots & d & 1 \\ 0 & c & c & \dots & c & -1 \end{array} \right| = ed^{m-1} [m(ac-b^2) + ad]$$

= 0
mit (3) a) ü · b)

Man erhält dann:

$$J' = \frac{dD_2 + \Delta D_2}{D_n'}$$

$$D_n' = \left| \begin{array}{cccccc} a & b & b & \dots & b & 0 \\ b & d & 0 & \dots & 0 & 0 \\ b & 0 & d & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ b & 0 & 0 & \dots & d & 0 \\ 0 & c & c & \dots & c & \dot{u}c \end{array} \right| = \dot{u}cd^{m-1} (ad - mb^2)$$

$$\frac{-dD_2}{c \cdot e} = \left| \begin{array}{cccccc} \delta a & b & b & \dots & b & 0 \\ \delta b_1 & d & 0 & \dots & 0 & 1 \\ \delta b_2 & 0 & d & \dots & 0 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ \delta b_m & 0 & 0 & \dots & d & 1 \\ 0 & 1 & 1 & \dots & 1 & -\frac{1}{c} \end{array} \right| + \left| \begin{array}{cccccc} a & \delta b_1 & b & b & 0 \\ b & -\delta b_1 & 0 & 0 & 1 \\ b & 0 & d & 0 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ b & 0 & 0 & d & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & -\frac{1}{c} \end{array} \right|$$

$$+ \dots + \begin{vmatrix} a & b & b & \dots & db_m & 0 \\ b & d & 0 & \dots & 0 & 1 \\ b & 0 & d & \dots & 0 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ b & 0 & 0 & \dots & -db_m & 1 \\ 0 & 1 & 1 & \dots & 0 & -\frac{1}{c} \end{vmatrix}$$

$$\frac{-\Delta D_2}{e} = \begin{vmatrix} \Delta a & b & b & \dots & b & 0 \\ \Delta b & d & 0 & \dots & 0 & 1 \\ \Delta b & 0 & d & \dots & 0 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ \Delta b & 0 & 0 & \dots & d & 1 \\ 0 & c & c & \dots & c & -1 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} a & \Delta b & b & \dots & b & 0 \\ b & \Delta d & 0 & \dots & 0 & 1 \\ b & 0 & d & \dots & 0 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ b & 0 & 0 & \dots & d & 1 \\ 0 & \Delta c & c & \dots & c & -1 \end{vmatrix}$$

$$+ \dots + \begin{vmatrix} a & b & b & \dots & \Delta b & 0 \\ b & d & 0 & \dots & 0 & 1 \\ b & 0 & d & \dots & 0 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ b & 0 & 0 & \dots & \Delta d & 1 \\ 0 & c & c & \dots & \Delta c & -1 \end{vmatrix}$$

$$\frac{\delta D_2 + \Delta D_2}{e \cdot d^{m-1}} = \delta a (d + mc) - \sum_{v=1}^m \delta b_v \cdot \left[2b - \frac{ac - b^2}{d} \right] + \Delta a (d + mc) - m \delta b \cdot 2b - m \delta d \frac{ac - b^2}{d} + m \Delta c \left[\frac{(m-1)b^2}{d} + a \right]$$

Für den stationären Zustand mit $\Delta\omega = 0$ erhält man für den Eingangsleitwert $G_{st} = \frac{I^2}{U^2}$

$$j G_{st} = \frac{\delta a (d + mc) - \sum \delta b_v \left[2b - \frac{ac - b^2}{d} \right]}{c (ad - mb^2)} = \frac{Z}{N}$$

Mit den unter (5) und (6) eingeführten Abkürzungen erhält man für den Zähler:

$$\begin{aligned} Z &= (\delta a' - \sum \delta b_v) (d' - b + mc) - \sum \delta b_v \left[2b - \frac{ma'c - mcb - b^2}{d' - b} \right] \\ &= \delta a' (mc + d' - b) - \sum \delta b_v \left[mc + b + \frac{ma'c - mcb - b^2}{b(1 - \frac{d'}{b})} \right] \end{aligned}$$

Da $\frac{d'}{b} < 1$, läßt sich schreiben

$$Z = (mc + d' - b) \delta a' - \frac{ma'c}{b} \sum \delta b_v - d' \frac{mc}{b} \left(\frac{d'}{b} - 1 \right) \sum \delta b_v$$

$Z = 0$ ergibt daraus die Bestimmungsgleichung für die Frequenz ω_n , bei der der Imaginärteil des Eingangsleitwertes verschwindet. Mit $x = \frac{c'}{c}$ und mit (3) - (7) erhält man für ω_n :

$$\omega_n = \sqrt{\frac{|\sum \Delta L_v|}{|\sum (\Delta C_v + \Delta C'_v)|}} \quad \sqrt{\frac{1}{mMx(L + xL_s)}}$$

Es ist also möglich, die Frequenz ω_n so einzustellen, daß der Imaginärteil des Eingangsleitwertes verschwindet.

Die vollständige Lösung mit Berücksichtigung der Wirkwiderstände kann nun auch leicht angegeben werden. Dazu wird das Gleichungssystem ohne die Abweichungen der Blindwiderstände, also ohne die δ - und Δ -Glieder aufgestellt und weiter vorausgesetzt, daß die entsprechenden Wirkwiderstände der einzelnen Einheiten untereinander gleich sind. Die Verluste denkt man sich konzentriert in den drei Ersatzwiderständen: r_1 (Magnetverluste/Einheit) und r_2 (Verluste in den Kondensatoren/Einheit) und r_3 (Verluste in der Drossel/Einheit).

Mit den Abkürzungen

$$f = -jm(v_1 + v_2) \quad ; \quad g = -j(v_2 + v_3)$$

erhält man dann das folgende Gleichungssystem

\mathcal{F}	\mathcal{F}_1	$\mathcal{F}_2 \dots \dots \dots \mathcal{F}_m$	\mathcal{F}'	=
$a+f$	b	$b \dots \dots \dots b$	0	0
b	$d+g$	$0 \dots \dots \dots 0$	0	$-e$
b	0	$d+g \dots \dots \dots 0$	0	$-e$
\vdots	\vdots	$\vdots \dots \dots \vdots$	\vdots	\vdots
b	0	$0 \dots \dots \dots d+g$	0	$-e$
0	c	$c \dots \dots \dots c$	$\dot{u}c$	$+e$

mit der Lösung für:

$$c \frac{\mathcal{F}'}{\dot{u}e} = \frac{m [(a+f)c - b^2] + (a+f)(d+g)}{(a+f)(d+g) - mb^2}$$

Mit $m(ac - b^2) + ad = 0$ erhält man

$$c \frac{\mathcal{F}'}{\dot{u}e} = \frac{mfc + fd + ag + fg}{ad - mb^2 + fd + ag + fg} =$$

$$= -j \frac{(v_1 + v_2) [\omega_n^2 (mM + L_s)(C + C') - 1] + (v_2 + v_3) [\omega_n^2 (C + C') - 1] - j(v_1 + v_2)(v_2 + v_3)(C + C')}{\omega_n L_s [\omega_n^2 L(C + C') - 1] - \omega_n L - j(v_2 + v_3) [\omega_n^2 L(C + C') - 1] - j(v_1 + v_2) [\omega_n^2 L_s(C + C') - 1]}$$

Im Zähler ist $j(v_1 + v_2)(v_2 + v_3)\omega_n(C + C')$ sehr klein gegen die beiden anderen Glieder. Es ergibt sich dann mit $x = \frac{C'}{C}$ und $\beta = \frac{L_s}{L}$:

$$\omega_n M \frac{\mathcal{F}'}{\dot{u}e} = \frac{\frac{1}{x}(v_1 + v_2) + x(v_2 + v_3)}{\omega_n L(1 - x\beta) + j[(v_2 + v_3)x - (v_1 + v_2)(1 - \beta(1 + x))]}$$

Es ist zu erwarten, daß $\beta < 0,2$. Dann ist im Nenner der Betrag des Imaginärteils wesentlich kleiner als der des Realteils, und

es tritt in erster Näherung am Eingang der Schaltung ein reiner Wirkleitwert auf:

$$G_{\omega} = \frac{\frac{1}{x} \cdot (r_1 + r_2) + x \cdot (r_2 + r_3)}{\omega_n^2 M L (1 - \beta x)}$$

Damit ist also die oben gemachte Annahme bewiesen, und das Netzwerk der White-Schaltung mit Summendrossel wurde mit den beiden Gleichungen für den Wirk- und Blindleitwert für den stationären Zustand in erster Näherung beschrieben. Es ist also möglich, die Schaltung so abzustimmen, daß der Eingangsleitwert reell wird. Voraussetzung dafür ist allerdings

- a) die Primärwicklungen müssen parallel geschaltet sein
- b) die Drossel muß symmetrisch aufgebaut sein.



Bei Frequenzänderungen wird am Eingang der Schaltung ein Blindleitwert $jG_{\dot{u}} = \frac{\dot{I}}{\dot{u}^2 u}$ gemessen. Mit

$$\beta = \frac{L_s}{L} \quad ; \quad \varepsilon = \frac{mM}{mM + L_s} \quad ; \quad x = \frac{C'}{C}$$

erhält man

$$jG_{\dot{u}} = \frac{\Delta \omega}{\omega_n} \frac{1}{\omega_n M} \left[\frac{\varepsilon (1+x) - 2 \left(1 + \frac{1}{x}\right)}{(1+x)(1-\beta x)} + \frac{2\beta \varepsilon (1+x) - \beta}{1-\beta x} + \frac{M}{L} \left\{ (m-1)(1+\beta + \beta x) - mx \right\} \right]$$

Vorläufige Parameter für die Magnetstromversorgung

N = 28 Perioden, $\rho_s = 30$ m

Gespeicherte Spitzenenergie pro Sektor	$W_s = 25$ kWs
Anzahl der Sektoren	$2N + 1 = 57$
Gesamte Spitzenenergie	$W = 1,42 \cdot 10^6$ Ws
Scheitelfluß pro Sektor	$\Phi_{ms} = 1$ Vs
Zulässige Spannung gegen Erde, Effektivwert	$U = 7,5$ kV + 10%
Nennfrequenz	$f_n = 50$ Hz
Windungszahl pro Sektor	$w = 48$
Anzahl der Stromversorgungseinheiten	$m = 19$?
Magnetische Spannung	$\theta = 50$ kA
Magnetinduktivität pro Sektor $L_s = \frac{w^2 \cdot \Phi_{ms}}{\theta}$	$L_s = 0,046$ H
Magnetinduktivität pro Einheit $L = 3 L_s$	$L = 0,138$ H
Induktiver Blindwiderstand des Magneten pro Einheit	$\omega L = 43$ Ω
Scheitelwert des Magnetstroms $I_m = \frac{\theta}{w}$	$I_m = 1040$ A
Effektivwert des Magnetstroms $I = \sqrt{\frac{3}{8}} I_m$	$I = 638$ A
Effektivwert der größten Spannung gegen Erde	
$U = \frac{1}{2} \cdot \frac{I_m}{2} \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot 2\pi f_n \cdot L$	$U = 7,95$ kV
Stromdichte in der Magnetwicklung	$G = 1,6$ A/mm ²
Kupfergewicht pro Sektor	$G_{Cus} = 1,5$ to
Kupferverluste pro Einheit (ohne Wirbelstromverluste)	$V_{Cu} = 26$ kW
Spezifische Eisenverluste bei einer mittleren Induktion von 14,5 kG im Eisen und vollständiger Gleichstromvormagnetisierung	$v_{fe} = 0,8$ kW/to
Eisengewicht pro Sektor	$G_{Fes} = 9$ to
Eisenverluste pro Einheit (ohne zusätzliche Verluste in den Enden der Sektoren)	$V_{Fe} = 22$ kW

Magnetspulen-Verlustwinkel

$$\operatorname{tg} \delta_l = 5,3 \text{ ‰}$$

Verlustwinkel der Kapazitäten
(Clophen-Kondensatoren)

$$\operatorname{tg} \delta_c = 3 \text{ ‰}$$

$$x = \frac{L}{L'} = \frac{C'}{C}$$

$$x = 0,5$$

In den Kondensatoren gespeicherte
Spitzenenergie

$$W_c = \frac{1}{4} (1 + x) W$$

$$W_c = 0,53 \cdot 10^6 \text{ Ws}$$

In den Drosseln gespeicherte
Spitzenenergie

$$W' = \frac{1}{4} \frac{(1 + x)^2}{x} W$$

$$W = 1,6 \cdot 10^6 \text{ Ws}$$

Effektivwert des Drosselstromes

$$I_{Dr} = \sqrt{\frac{2 + x^2}{8}} I_m = 0,53 I_m$$

$$I_{Dr} = 570 \text{ A}$$

Sperrdrossel-Induktivität pro Einheit

$$L' = 0,276 \text{ H}$$

Sperrdrosselblindwiderstand pro Einheit

$$\omega L' = 86 \Omega$$

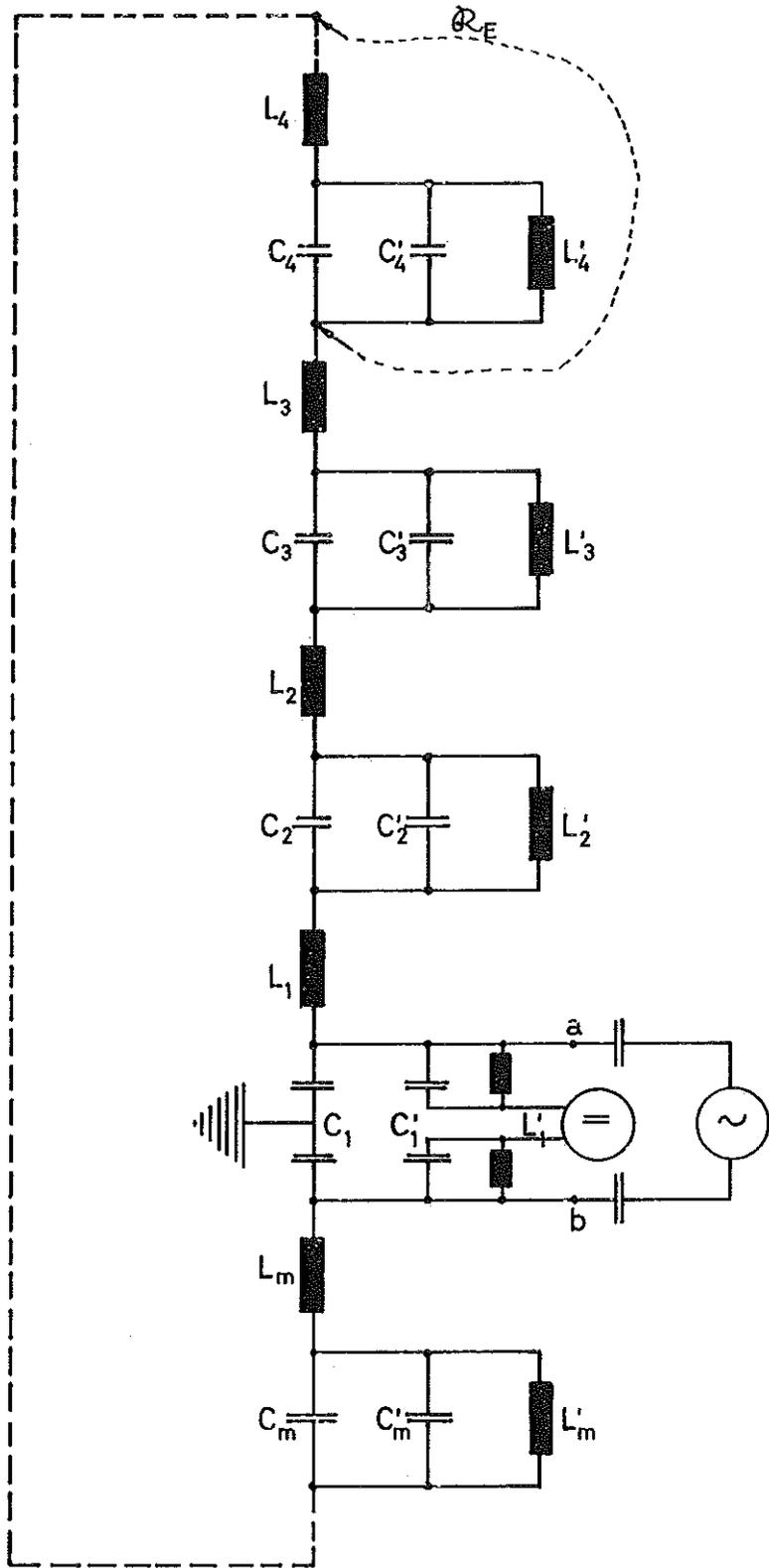


Abb. 1

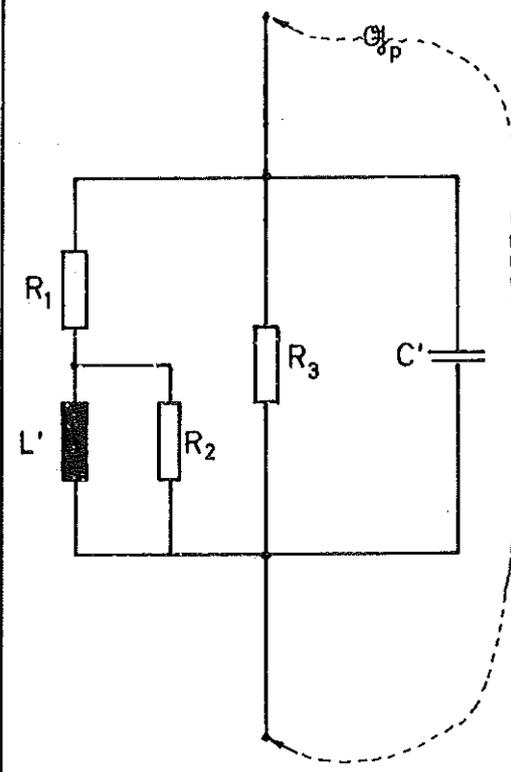


Abb. 2

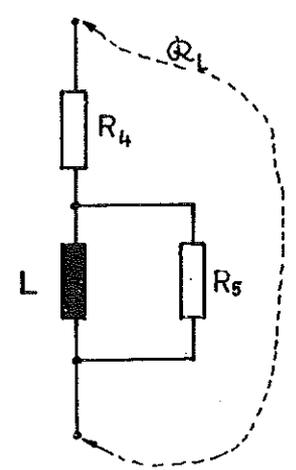
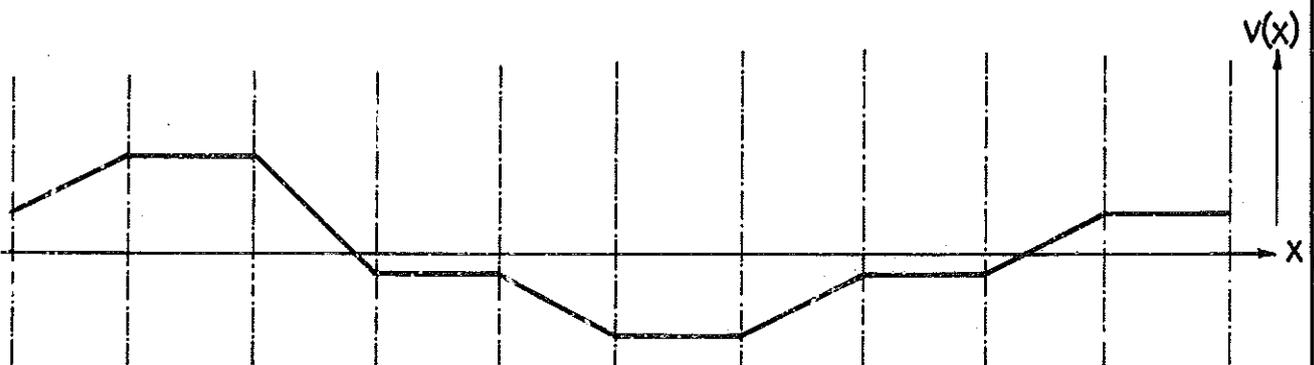
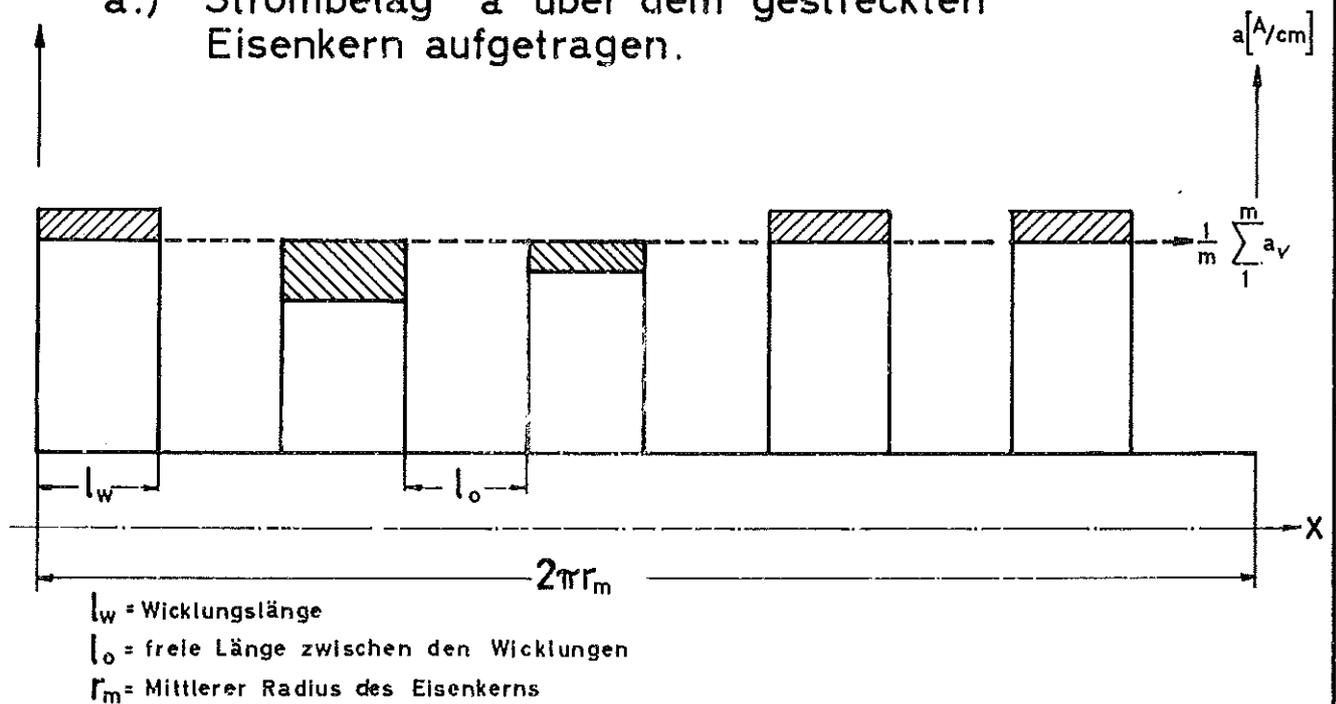


Abb. 3
695/2.4

DESY	gez.:	Datum	Name	Gruppe:	M 5
	gepr.:	1.58	KIT	Zchg. No.:	2
	gen.:			Blatt No.:	1
				Ersatz für:	
Maßstab:	Magnetstrom-Versorgung mit Einzeldrosseln (Schaltung nach WHITE)			Ersetzt durch:	
				x ausf.:	
				ausgef. von:	
				Auftrag No.:	

Abb. 4

a.) Strombelag a über dem gestreckten Eisenkern aufgetragen.



b.) Felderregerkurve der Querflüsse

$$v(x) = \int a(x) dx + C$$

695/7.4

DESY	gez.	3.58	Name kn	Gruppe:	M 5
	gepr.			Zchg. No.:	2
	gen.			Blatt No.:	4
	Maßstab:			Strombelag Felderregerkurve		Ersatz für:
				Ersetzt durch:	
				x ausf.:	
				ausgef. von:	
				Auftrag No.:	

