

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke
Band: 33 (1942)
Heft: 16

Artikel: Elektrische Welle in Reihenschaltung
Autor: Kovács, Karl Paul
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1061670>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. 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. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

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. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

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. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 17.01.2026

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

Wenn keine lange Trockenzeit möglich ist, ist Mennige nicht zu empfehlen. — Betreffend die Vorbereitung des Untergrundes für den Anstrich und den Anstrich selbst, ist auf das bei Aussenanstrichen Gesagte zu verweisen.

Es sind uns keine praktischen Erfahrungen bekannt geworden über die Metallisierung von Druckleitungen zum äussern oder innern Rostschutz und über Druckleitungsrohre aus Spezialmaterial von grösserer Rostbeständigkeit. — In den letzten Jahren wurde an bedeutenden andern Objekten die Spritzverzinkung für den Freiluft- und für den Unterwasser-Rostschutz angewendet. Es wäre zu prüfen, ob die Spritzverzinkung trotz des hohen Preises und der langen Arbeitsdauer auch bei Druckleitungen wirtschaftlich sein könnte, zum mindesten in gewissen Fällen, wo ohnehin gesandstrahlt werden muss. — Nach den Versuchen verschiedener Experimentatoren zeigten Armco-Eisen und gekupferter Stahl bei Lagerung im Wasser im allgemeinen keine kleineren Gewichtsverluste durch Abrostung als gewöhnlicher Stahl; auch die Art der Verrostung schien nicht günstiger zu sein. Der gekupfererte Stahl hat die für den Druckleitungsbau unerwünschte Eigenschaft, weniger gut schweißbar zu sein. Das Armco-Eisen hat den Nachteil, weniger fest zu sein. Beide Materialien sind zudem teurer als gewöhnlicher Stahl. Nichtrostender Stahl wird wegen des hohen Preises nur in ganz seltenen Ausnahmefällen in Betracht kommen. Es ist daher zu erwarten, dass der bisher für Druckleitungen verwendete Flussstahl nicht so bald durch ein anderes Material verdrängt wird, und dass der Rostschutz auch bei den zukünftigen Druckleitungen von Bedeutung sein wird.

Zum Schluss möchten wir allen Gesellschaften danken, deren Erfahrungen wir in den vorliegenden Bericht aufnehmen durften.

Verzeichnis der Kraftwerke und Firmen:

- 1 Massaboden.
- 2 Ritom.
- 3 Amsteg.
- 4 Barberine.
- 5 Vernayaz.
- 6 Trient.
- 1...6 Schweizerische Bundesbahnen, Bern.
- 7 Etzel, Etzelwerk A.-G., Pfäffikon.
- 8 Montcherand, Compagnie Vaudoise des Forces Motrices des Lacs de Joux et de l'Orbe.
- 9 Schlappin.
- 10 Klosters.
- 11 Küblis.
- 9...11 A.-G. Bündner Kraftwerke, Klosters.
- 12 Pontebrolla, Società Elettrica Sopracenerina, Locarno.
- 13 Gordola Verzasca, Officina Elettrica Comunale, Lugano.
- 14 Kaiserstuhl.
- 15 Unteraa.
- 14 und 15 Centralschweizerische Kraftwerke, Luzern.
- 16 Engelberg, Elektrizitätswerk Luzern-Engelberg A.-G., Luzern.
- 18 Chanet, Ville de Neuchâtel.
- 19 Siebnen.
- 20 Rempen.
- 19 und 20 A.-G. Kraftwerke Wäggital, Siebnen.
- 21 Sernf.
- 22 Niederenbach.
- 21 und 22 Kraftwerke Sernf-Niederenbach A.-G., St. Gallen.
- 23 Kubel, St.-Gallisch-Appenzellische Kraftwerke A.-G., St. Gallen.
- 24 La Coule, Société des Forces Electriques de la Coule, St-Imier.
- 25 Waldhalde, Elektrizitätswerke des Kantons Zürich.
- 26 Albula, Elektrizitätswerk der Stadt Zürich.
- 28 Spiez.
- 29 Kallnach.
- 30 Kandergrund.
- 28...30 Bernische Kraftwerke A.-G., Bern.
- 31 Handeck, Kraftwerke Oberhasli A.-G., Innertkirchen.
- 32 —
- 33 Lötsch, Nordostschweizerische Kraftwerke A.-G., Baden.
- 34 Dixence.
- 35 Champsec.
- 36 Fully.
- 37 Martigny.
- 34...37 S. A. l'Energie de l'Ouest-Suisse, Lausanne.
- 40 Thusis, Rhätische Werke für Elektrizität, Thusis.

Elektrische Welle in Reihenschaltung

Von Karl Paul Kovács, Budapest

621.316.718.5

Die elektrische Welle wird angewendet, wenn zwei oder mehrere Maschinenglieder oder Triebwerke mit gleicher Drehzahl oder gleichbleibendem Drehzahlverhältnis, d. h. im Gleichlauf, zusammenarbeiten müssen und die räumliche Trennung der Triebwerke oder ein zwischen ihnen liegendes Hindernis die Anordnung einer mechanischen Verbindungs-welle unwirtschaftlich macht oder verbietet. Als Uebertragungsglieder der elektrischen Welle dienen Drehstrom-Asynchronmotoren mit Schleifringläufer.

Entsprechend der Anwendung unterscheidet man die «Ausgleichswelle» und die «Arbeitswelle». Die Ausgleichswelle dient zur Aufrechterhaltung des Gleichlaufes zweier Triebwerke; sie hat lediglich Leistung zu übertragen, wenn der Gleichlauf der beiden Triebwerke infolge ungleicher Belastung gestört wird. Wie bei der mechanischen Ausgleichswelle wird jedes einzelne Triebwerk durch je einen Motor angetrieben, der die gesamte Belastung dieses Triebwerks übernimmt. Jeder Triebwerksmotor ist außerdem mit einer Drehstrom-Asynchronmaschine mit Schleifringläufer mechanisch starr gekuppelt; diese Maschinen heißen Wellen- oder Gleichlaufmaschinen. Die Statoren aller Wellenmaschinen (und meist auch der Antriebsmotoren) sind an ein gemeinsames Netz angeschlossen (Parallelschaltung); ihre Läufer

La transmission électrique est utilisée lorsque deux ou plusieurs éléments de machines ou dispositifs d'entraînement doivent fonctionner ensemble et à la même vitesse ou au même rapport des vitesses, et que la distance ou un obstacle qui les séparent rendraient peu économique ou interdiraient l'emploi d'une transmission mécanique. Les organes de la transmission électrique sont des moteurs triphasés asynchrones à bagues.

On distingue la transmission de compensation de la transmission de travail. La première sert à maintenir le synchronisme des deux dispositifs d'entraînement; elle doit uniquement transmettre la puissance lorsque le synchronisme est troublé par suite d'un déséquilibre de la charge. Comme dans le cas d'une transmission mécanique, chaque dispositif est entraîné par un moteur qui en supporte toute la charge. D'autre part, chacun de ces moteurs est relié rigide à un moteur triphasé asynchrone à bagues. Les stators de tous ces moteurs asynchrones sont branchés en parallèle sur un réseau commun (de même que, généralement, les moteurs de commande), et leurs induits sont connectés en concordeance de phase. Lorsque les dispositifs d'entraînement sont en synchronisme, les moteurs asynchrones ne consomment

sind phasengleich miteinander elektrisch verbunden. Im Gleichlauf der Triebwerke entnehmen die Wellenmaschinen dem Netz nur ihren Magnetisierungsstrom und die Rotorverbindungsleitungen sind stromlos. Bei ungleicher Belastung der Triebwerke überträgt die elektrische Welle die Ausgleichsdrehmomente von der einen zur andern Seite.

In gewissen Fällen kann ein einfacherer Aufbau der elektrischen Welle erreicht werden, indem die Wellenmaschinen direkt als Antriebsmotor benutzt werden.

Bei der mechanischen Arbeitswelle werden alle Triebwerke von einem gemeinsamen Motor angetrieben. Als Uebertragungsglieder der elektrischen Arbeitswelle dienen wiederum Drehstrom-Asynchronmotoren mit Schleifringläufer. Jedes Triebwerk ist eine solche Wellenmaschine zugeordnet; ihre Läufer sind in Parallelschaltung elektrisch verbunden mit dem Läufer einer Wellenleitmaschine, die von einem sämtlichen Triebwerken gemeinsamen Motor mechanisch angetrieben wird. Auch die Statorwicklungen aller Wellenmaschinen und der Wellenleitmaschine werden in Parallelschaltung von demselben Drehstromnetz gespeist¹⁾.

Im folgenden wird eine neue Anordnung der elektrischen Welle beschrieben, bei welcher die beiden Wellenmotoren nicht parallel, sondern in Reihe an das Netz angeschlossen sind. Es werden die statischen Eigenschaften der Welle in Reihenschaltung abgeleitet und die Pendeleigenschaften kurz geschildert. Es erweist sich, dass die Welle in Reihenschaltung in gewissen Hinsichten der Welle in Parallelschaltung überlegen ist.

I. Einleitung

Nach der gut bekannten Schaltung der elektrischen Welle werden zwei gleiche Drehstrom-Asynchronmaschinen am Ständer bzw. Läufer parallel geschaltet und die Ständerwicklungen werden gemeinsam an das Netz gelegt (Fig. 1). Die Maschinen eines solchen Systems trachten untereinander synchron zu bleiben, das heisst, wenn die eine Maschine mechanisch angetrieben wird, läuft die

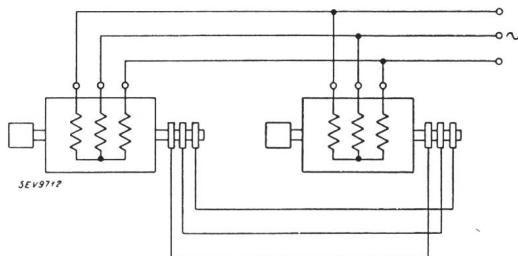


Fig. 1.

Prinzipschema der elektrischen Welle in Parallelschaltung

andere Maschine genau mit derselben Umlaufzahl, und dabei besteht die Möglichkeit, eine mechanische Leistung durch die Wellen zu übertragen. Theorie und Beschreibung eines solchen Systems sind in der Literatur ausführlich zu finden^{2, 3, 4)}.

Ein grosser Nachteil der elektrischen Welle ist ihre Pendelneigung. Es ist bekannt, dass dieses System manchmal, ohne sichtbaren Grund, auf

¹⁾ Eine kurze, gut orientierende Beschreibung des Prinzips und der Anwendungen der elektrischen Welle gibt W. Stoll in AEG-Mitt. 1941, Heft 7/8, S. 197...201.

²⁾ W. Nürnberg: Die Prüfung elektrischer Maschinen. Berlin, 1940. Julius Springer. S. 125...134.

³⁾ H. Jordan: Selbsterregte Pendelungen einer elektrischen Welle. Diss. Braunschweig, 1940.

⁴⁾ H. Jordan und W. Schmitt: Ueber die Unterdrückung der Pendelneigung elektrischer Wellen durch induktive und ohmsche Widerstände im Läuferkreis. AEG-Mitt. 1941. H. 3/4, S. 102...106.

que le courant magnétisant, tandis que les connexions de l'induit ne sont pas parcourues par du courant.

Dans certains cas, cette transmission électrique peut être simplifiée en se servant directement du moteur asynchrone pour l'entrainement.

Dans le cas de la transmission mécanique, tous les dispositifs d'entrainement sont actionnés par un moteur commun, tandis que dans celui de la transmission électrique de travail, chaque dispositif d'entrainement est équipé d'un moteur triphasé asynchrone à bagues. Les induits de ces moteurs sont connectés en parallèle avec l'induit d'une machine-pilote entraînée mécaniquement par un moteur commun à tous les dispositifs d'entrainement. Les enroulements statoriques de tous ces moteurs asynchrones et de la machine-pilote sont alimentés en parallèle par le même réseau¹⁾.

L'auteur décrit une nouvelle disposition de transmission électrique, dans laquelle les deux moteurs asynchrones sont branchés au réseau en série, et non pas en parallèle. Il étudie les propriétés statiques de cette disposition, ainsi que les cas où des battements peuvent se produire. Il prouve qu'à certains égards la disposition en série est supérieure à celle en parallèle.

einmal zu pendeln anfängt und in ungünstigem Falle nach einer Anfachung der Pendelamplitude aus dem Tritt fällt, was unter anderem eine unangenehme Kurzschlusserscheinung mit sich bringt. Die Pendelneigung wird nach AEG z. B. dadurch vermieden, dass in den gemeinsamen Läuferkreis eine geeignete Impedanz, bestehend aus einer Kombination von ohmschen und induktiven Widerständen, geschaltet wird. Diese Massnahme hat sich vollständig bewährt; jedoch werden dadurch die übertragbaren Leistungen stets vermindert^{3, 4)}.

Im folgenden wird eine neue Schaltung der elektrischen Welle beschrieben, bei welcher die Unterdrückung der Pendelneigung ohne Verminderung der Leistungen vorgenommen werden kann. Bei dieser neuen Schaltung gibt es keine Resonanzgefahr; selbsterregte Pendelungen sind zwar nicht ausgeschlossen, sie können aber hauptsächlich nur im Bereich des Kippunktes auftreten. Die Ständerwicklungen der beiden Wellenmotoren sind nicht nebeneinander, sondern in Reihe an das Netz geschaltet (Fig. 2). Dieses System arbeitet hinsicht-

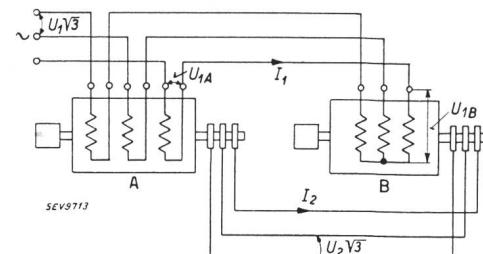


Fig. 2.
Prinzipschema der elektrischen Welle in Reihenschaltung

lich der Möglichkeit der Uebertragung von Leistungen ganz ähnlich wie die elektrische Welle in Parallelschaltung, d. h. wenn die eine der in Reihenschaltung verbundenen Maschinen der Welle

mechanisch angetrieben wird, kann eine mechanische Leistung über das Wellenende des anderen Wellenmotors erhalten werden. Indessen treten verschiedene, durch die Grösse der übertragenen Leistungen bedingte Winkelverdrehungen zwischen den beiden Läufern auf. Es ist jedoch zu bemerken, dass die Kupplung zwischen beiden Maschinen bei kleinen Belastungen viel lockerer ist als beim Parallelsystem, wogegen das übertragbare Höchstmoment bei Reihenschaltung wesentlich höher liegt. Bis zum Kippmoment gehören, in pendelfreiem Betrieb, zu bestimmten Leistungen ganz bestimmte Winkelverdrehungen.

Im folgenden werden auf Grund einer Ersatzschaltung die Gleichungen der elektrischen Welle in Reihenschaltung für zwei gleichgrosse Maschinen abgeleitet.

II. Die Ersatzschaltung und Gleichungen der elektrischen Welle in Reihenschaltung⁵⁾

Die Ersatzschaltung (Fig. 3) bezieht sich auf eine Phase der in Fig. 2 gezeichneten Anordnung.

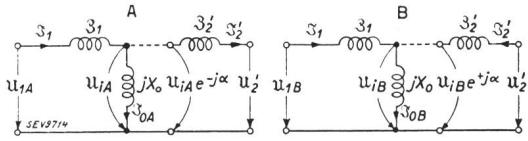


Fig. 3.
Ersatzschema der elektrischen Welle in Reihenschaltung

Darin bedeuten:

β_1 die gemeinsame Stromstärke der Ständerwicklungen.

β'_2 die gemeinsame Stromstärke der Läuferwicklungen, bezogen auf die Ständerwindungszahl.

β_{0A} bzw. β_{0B} : die Leerlaufstromstärke der Maschinen A bzw. B.

u_{1A} bzw. u_{1B} : die Klemmenspannung der Maschinen A bzw. B. Die Vektorsumme von u_{1A} und u_{1B} ist gleich der gesamten Klemmenspannung u_1 ; $u_{1A} + u_{1B} = u_1$.

u_{iA} bzw. u_{iB} die inneren Spannungen der Maschinen A bzw. B.

u'_1 die gemeinsame Klemmenspannung der beiden Läufer, bezogen auf die Ständerwindungszahl.

β_1 die Streuungsimpedanz der Ständerwicklung der Maschine A bzw. B. ($\beta_1 = R_1 + jX_1$).

β'_2 Streuungsimpedanz der Läuferwicklung der Maschine A bzw. B, bezogen auf die Windungszahl der Ständerwicklung.

$$\beta'_2 = \frac{R'_2}{s} + jX'_2, \text{ wo } s \text{ den jeweiligen Schlupf}$$

bedeutet.

jX_0 die Feldreaktanz der Maschine A bzw. B.

α den Winkel (in elektrischen Graden), mit welchem der Läufer der Maschine A beim Ueber-

⁵⁾ Vereinfachende Annahmen: 1. Eisenverlustlose Maschinen. 2. Die Ströme und Spannungen verlaufen zeitlich nach einem Sinusgesetz. 3. Die Permeabilität im Eisen bleibe konstant. 4. Es wird mit der Grundwelle der Felderregerkurve gerechnet.

tragen von Leistungen in Drehrichtung nach vorne aus der Leerlauf-Mittellage verdreht ist. Mit demselben Winkel ist der Läufer der Maschine B aus der Leerlauf-Mittellage gegen die Drehrichtung nach rückwärts gedreht. Die beiden Läufer schliessen miteinander den Winkel 2α ein.

Auf Grund der Ersatzschaltung und nach obigen Bemerkungen ergeben sich folgende Gleichungen:

$$u_{1A} + u_{1B} = u_1 \quad (1)$$

$$\begin{cases} (u_{1A} - \beta_1 \beta_1) \cdot e^{-j\alpha} = \beta'_2 \beta'_2 + u'_1 \\ (u_{1B} - \beta_1 \beta_1) \cdot e^{+j\alpha} = -\beta'_2 \beta'_2 + u'_1 \end{cases} \quad (2)$$

$$\left. \begin{cases} \frac{u_{1A} - \beta_1 \beta_1}{jX_0} = \beta_{0A} \\ \frac{u_{1B} - \beta_1 \beta_1}{jX_0} = \beta_{0B} \end{cases} \right\} \quad (3)$$

$$\begin{cases} (\beta_1 - \beta_{0A}) \cdot e^{-j\alpha} = \beta'_2 \\ (\beta_1 - \beta_{0B}) \cdot e^{+j\alpha} = -\beta'_2 \end{cases} \quad (4)$$

Aus (2), (3) und (4) folgt das Gleichungssystem:

$$\begin{cases} e^{-j\alpha} \cdot u_{1A} - e^{+j\alpha} \cdot u_{1B} - 2 \beta_2 \beta'_2 = \\ = \beta_1 \cdot (e^{-j\alpha} - e^{+j\alpha}) \cdot \beta'_1 \\ u_{1A} + 0 + e^{+j\alpha} \cdot jX_0 \cdot \beta'_2 = (\beta_1 + jX_0) \cdot \beta'_1 \\ 0 + u_{1B} - e^{-j\alpha} \cdot jX_0 \cdot \beta'_2 = (\beta_1 + jX_0) \cdot \beta'_1 \end{cases} \quad (5)$$

Aus diesen Gleichungen sind die wichtigsten Zusammenhänge der Welle in Reihenschaltung abzuleiten. Wir setzen

$$\beta_1 \cdot jX_0 + (\beta_1 + jX_0) (2 \beta'_2 + jX_0) = \beta''$$

dann folgt

$$\left. \begin{cases} u_{1A} = \frac{1}{2} \cdot \beta_1 \cdot \frac{\beta'' - X_0^2 e^{+j2\alpha}}{\beta'_2 + jX_0} \\ u_{1B} = \frac{1}{2} \cdot \beta_1 \cdot \frac{\beta'' - X_0^2 e^{-j2\alpha}}{\beta'_2 + jX_0} \end{cases} \right\} \quad (6)$$

Aus (1) und (6):

$$\beta_1 = u_1 \cdot \frac{\beta'_2 + jX_0}{\beta'' - X_0^2 \cdot \cos(2\alpha)} \quad (7)$$

und zuletzt:

$$\beta'_2 = u_1 \cdot \frac{X_0 \cdot \sin \alpha}{\beta'' - X_0^2 \cdot \cos(2\alpha)} = \beta_1 \cdot \frac{X_0}{\beta'_2 + jX_0} \cdot \sin \alpha \quad (8)$$

Wir führen in den Gleichungen (6) und (7) folgende neue Bezeichnungen ein:

$$\begin{aligned} \beta_s &= \beta_1 + \frac{\beta'_2 jX_0}{\beta'_2 + jX_0} \\ \beta_l &= \beta_1 + jX_0 \end{aligned}$$

wo β_s die Impedanz der Maschinen A bzw. B bedeutet in der Schaltung als normaler Asynchronmotor beim Schlupf s ; β_l ist dieselbe Impedanz bei $s = 0$.

Mit den neuen Bezeichnungen erhalten wir, nachdem

$$\mathfrak{Z}_s + \mathfrak{Z}_l = \frac{\mathfrak{Z}''}{\mathfrak{Z}'_0 + jX_0} \text{ und } \mathfrak{Z}_s - \mathfrak{Z}_l = \frac{X_0^2}{\mathfrak{Z}'_0 + jX_0}$$

gesetzt werden kann, folgende Gleichungen:

$$\left. \begin{aligned} U_{1A} &= \frac{1}{2} \cdot \Im_1 [(\mathcal{Z}_s + \mathcal{Z}_l) - (\mathcal{Z}_s - \mathcal{Z}_l) e^{+j2\alpha}] \\ U_{1B} &= \frac{1}{2} \cdot \Im_1 [(\mathcal{Z}_s + \mathcal{Z}_l) - (\mathcal{Z}_s - \mathcal{Z}_l) e^{-j2\alpha}] \end{aligned} \right\} \quad (6a)$$

$$\mathfrak{J}_1 = \mathfrak{U}_1 \cdot \frac{1}{(\mathfrak{Z}_s + \mathfrak{Z}_l) - (\mathfrak{Z}_s - \mathfrak{Z}_l) \cdot \cos(2\alpha)} \quad (7a)$$

und

$$\left. \begin{aligned} \mathfrak{U}_{1A} &= \frac{\mathfrak{U}_1}{2} \cdot \frac{(\mathfrak{Z}_s + \mathfrak{Z}_l) - (\mathfrak{Z}_s - \mathfrak{Z}_l) e^{+j2\alpha}}{(\mathfrak{Z}_s + \mathfrak{Z}_l) - (\mathfrak{Z}_s - \mathfrak{Z}_l) \cdot \cos(2\alpha)} \\ \mathfrak{U}_{1B} &= \frac{\mathfrak{U}_1}{2} \cdot \frac{(\mathfrak{Z}_s + \mathfrak{Z}_l) - (\mathfrak{Z}_s - \mathfrak{Z}_l) e^{-j2\alpha}}{(\mathfrak{Z}_s + \mathfrak{Z}_l) - (\mathfrak{Z}_s - \mathfrak{Z}_l) \cdot \cos(2\alpha)} \end{aligned} \right\} (6b)$$

Auf Grund der Gleichungen (6a) und (7a) wird das Stromvektordiagramm der elektrischen Welle in Reihenschaltung konstruiert; wir bestimmen die Vektoren der Spannungen U_{1A} und U_{1B} und ermitteln sodann die Drehmomente.

III. Stromvektordiagramm der elektrischen Welle in Reihenschaltung

Die Gleichung (7a) zeigt die aus der Theorie der Stromvektordiagramme⁶⁾ bekannte Form:

$$\mathfrak{J}_1 = \mathfrak{U}_1 \cdot \frac{1}{\mathfrak{a} + \mathfrak{b} \cdot p}$$

wo α und b komplexe Zahlen sind und p einen reellen Parameter bedeutet. Der Endpunkt des Stromvektors bewegt sich danach auf einem Kreis durch den Koordinatenanfangspunkt, dessen Punkte durch die Parameterwerte $p = \cos(2\alpha)$ bestimmt sind. Nachdem dieser Parameter für reelle Werte von α nur zwischen $+1$ und -1 variieren kann, bildet nur der Teil zwischen den durch die Parameterwerte $\cos(2\alpha) = 1$, ($\alpha=0^\circ$) und $\cos(2\alpha) = -1$, ($\alpha=90^\circ$) bestimmten Kreispunkten des genannten Kreises das Kreisdiagramm der elektrischen Welle in Reihenschaltung. Der Kreis für \Im_1 ist durch drei einfach bestimmte Punkte gegeben, und zwar:

1. Koordinatenanfangspunkt.

2. $\alpha = 0^\circ, p = \cos 0^\circ = 1, \mathfrak{J}_{1l} = \frac{\mathfrak{U}_1}{2} \cdot \frac{1}{\mathfrak{Z}_l}$; Leerlaufpunkt der Wellenmotoren bei der Klemmenspannung $\frac{\mathfrak{U}_1}{2} \cdot$ Punkt P_o auf dem \Im -Kreis (Fig. 4).

3. $\alpha = 90^\circ, p = \cos 180^\circ = -1, \mathfrak{J}_{1s} = \frac{\mathfrak{U}_1}{2} \cdot \frac{1}{\mathfrak{Z}_s}$; Kreisdiagrammpunkt der Wellenmotoren als normale Asynchronmaschinen bei Schlupf s und Klemmenspannung $\frac{\mathfrak{U}_1}{2} \cdot (P_s$ auf dem \Im -Kreis, siehe

⁶⁾ Siehe z. B. O. Bloch: Die Ortskurven der graphischen Wechselstromtechnik. Rascher & Co., Zürich, 1917.

Fig. 4). Bei stehenden Maschinen geht P_s in den Kurzschlusspunkt über ($s=1$).

Wenn wir also das Kreisdiagramm der Wellenmotoren A und B für die Schaltung als normaler Asynchronmotor bei Klemmenspannung $U_1/2$ kennen, wird das Kreisdiagramm der elektrischen Welle

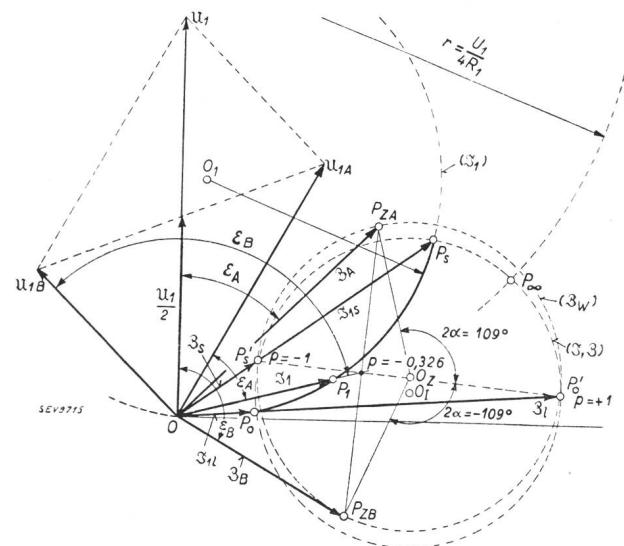


Fig. 4.

Strom- und Impedanz-Diagramm der elektrischen Welle

in Reihenschaltung der zwischen dem Leerlaufpunkt (P_o) und dem zum Schlupf s gehörenden Punkt (P_s) verlaufende Teil des Kreises über die Punkte O , P_o und P_s sein. Als Parametergerade wählen wir die Gerade durch die Punkte P'_s und $P'_{o'}$, welche Gerade zu der durch den Nenner der Gl. (7a) bestimmten Geraden parallel verläuft. Ueber den Halbierungspunkt O_Z der Strecke $P'_o P'_s$ legen wir den Hilfskreis (β_W) mit dem Radius $O_Z P'_o$, wodurch man die zu den Winkeln 2α gehörigen Parameterwerte auf der Parametergeraden leicht bestimmen kann. Demgemäß sind die Parameterwerte z. B. im Punkte P'_o ($\alpha = 0^\circ$) $p = \cos(2\alpha) = 1$; im Punkte O_Z ($\alpha = 45^\circ$) $p = \cos(2\alpha) = 0$ und in P'_s ($\alpha = 90^\circ$) $p = \cos(2\alpha) = -1$.

In Fig. 4 ist die zum Parameter $p = -0,326$ gehörende Stromstärke \mathfrak{J}_1 eingezzeichnet. Somit sind die Werte von \mathfrak{J}_1 für jeden 2α -Wert leicht zu bestimmen. Im folgenden sollen die Vektoren U_{1A} bzw. U_{1B} bestimmt werden.

IV. Bestimmung von U_{1A} bzw. U_{1B}

Die zum Verdrehungswinkel 2α gehörige Stromstärke sei \Im_1 , die Impedanz als Wellenmotor sei β_A bzw. β_B . Dann wird $U_{1A} = \Im_1 \cdot \beta_A$ und $U_{1B} = \Im_1 \cdot \beta_B$ sein. Nachdem die Werte von \Im_1 der Richtung und Grösse nach im früheren Abschnitt schon bestimmt worden sind, müssen die zu demselben Betriebspunkt gehörigen Impedanzwerte und ihre Richtung bestimmt werden.

Nach der Gleichung (6a) ist

$$\beta_A = \frac{\beta_s + \beta_l}{2} - \frac{\beta_s - \beta_l}{2} \cdot e^{+j2\alpha}$$

$$\text{und } \beta_B = \frac{\beta_s + \beta_l}{2} - \frac{\beta_s - \beta_l}{2} \cdot e^{+j2\alpha}$$

Wie hieraus zu ersehen ist, beschreibt der Endpunkt des Impedanzvektors einen Kreis, dessen Mittelpunkt durch den Endpunkt des Vektors $m_z = \frac{\beta_s + \beta_l}{2}$ und dessen Halbmesser durch $r_z = \frac{\beta_s - \beta_l}{2}$ gegeben ist. Um diesen Kreis zu zeichnen,

oder besser gesagt, um die Impedanzvektoren β_s und β_l bestimmen zu können, muss zuerst der Kreis β für die Schaltung als normaler Asynchronmotor bei wechselndem Schlupf bestimmt werden. Dieser Kreis kann als Inversion des \Im -Kreises angesehen werden. Der Einfachheit halber wird der \Im -Kreis in sich inversiert, wobei die Inversionspotenz mit Bezeichnungen nach Fig. 4 gleich (G^2) = $\overline{OP_s} \cdot \overline{OP'_s} = \overline{OP_o} \cdot \overline{OP'_o}$ usw. wird. Die zur Schläpfung s gehörigen Impedanzwerte werden daher die Schnittpunkte der zu s gehörenden \Im -Vektoren mit dem \Im - bzw. β -Kreis sein. In dieser Weise sind die Endpunkte der Vektoren $\beta_s = OP'_s$ und $\beta_l = OP'_o$ bestimmt worden. Demnach ist es leicht einzusehen, dass der oben gegebene Kreis für β_A bzw. β_B mit dem früher gezeichneten Hilfskreis (β_W) identisch ist. Zum bestimmten 2α -Winkel werden die Impedanzvektoren einfach durch Einzeichnung des Winkels 2α bestimmt, wobei zum Winkel $2\alpha = 0^\circ$, der einzige Vektor OP'_o (Leerlaufzustand), zum Winkel $2\alpha = 180^\circ$ der einzige Vektor OP'_s (Kurzschluss) und z. B. zum Winkel $2\alpha = 109^\circ$ die beiden Vektoren OP_{ZA} bzw. OP_{ZB} gehören (Fig. 4). Die Vektoren von \mathfrak{U}_{1A} bzw. \mathfrak{U}_{1B} werden so ermittelt, dass man den früher bestimmten, zum Winkel 2α gehörenden Wert von \Im_1 mit dem soeben bestimmten und zu demselben Verdrehungswinkel gehörenden Werte von β_A bzw. β_B nach Regeln der Vektormultiplikation multipliziert. Die derart bestimmten Vektoren für \mathfrak{U}_{1A} und \mathfrak{U}_{1B} sind in Fig. 4 eingezzeichnet worden, wobei zu beachten war, dass der Impedanzkreis als Selbstinversion des \Im -Kreises gezeichnet wurde. Die Summe von \mathfrak{U}_{1A} und \mathfrak{U}_{1B} ist in jedem Betriebszustand gleich \mathfrak{U}_1 . Nachdem die zusammengehörigen Werte von \Im_1 und β_A bzw. β_B bestimmt worden sind, können die Drehmomente leicht zeichnerisch bestimmt werden. Bevor wir dies tun, sollen die Momente rechnerisch erfasst werden.

V. Die Berechnung der Drehmomente

Die Luftspaltleistung pro Phase der Maschine A ist gleich

$$P_{LA} = I_1 U_{1A} \cos \varphi_{1A} - I_1^2 R_1$$

oder nach Schreibweise der Vektorrechnung:

$$P_{LA} = \Im_1 \cdot \frac{\mathfrak{U}_{1A} + \mathfrak{U}_{1Ak}}{2} - I_1^2 R_1$$

wo \mathfrak{U}_{1Ak} der konjugiert komplexe Wert von \mathfrak{U}_{1A} ist. Den Wert von \mathfrak{U}_{1A} aus Gl. (6a) eingesetzt, wird:

$$P_{LA} = \frac{I_1^2}{2} \cdot [(\beta_s + \beta_l) - (\beta_s - \beta_l) e^{+j2\alpha} + (\beta_s + \beta_l)_k - (\beta_s - \beta_l)_k e^{-j2\alpha} - 2R_1]$$

sein, wo $(\beta_s + \beta_l)_k$ bzw. $(\beta_s - \beta_l)_k$ den konjugiert komplexen Wert von $(\beta_s + \beta_l)$ bzw. $(\beta_s - \beta_l)$ bedeutet. Wenn der Wert von P_{LA} ausgerechnet wird, erhält man:

$$P_{LA} = \frac{X_0^2}{\left(\frac{R'_2}{s}\right)^2 + (X'_2 + X_0)^2} \cdot \left[\frac{R'_2}{s} \cdot \frac{1 - \cos(2\alpha)}{2} - (X'_2 + X_0) \cdot \frac{\sin(2\alpha)}{2} \right] I_1^2 \quad (9)$$

Den Wert der Luftspaltleistung der Maschine B erhält man aus Gl. (9), indem anstatt 2α der Wert (-2α) gesetzt wird. Danach heisst es:

$$P_{LB} = \frac{X_0^2}{\left(\frac{R'_2}{s}\right)^2 + (X'_2 + X_0)^2} \cdot \left[\frac{R'_2}{s} \cdot \frac{1 - \cos(2\alpha)}{2} + (X'_2 + X_0) \cdot \frac{\sin(2\alpha)}{2} \right] I_1^2 \quad (10)$$

Bei Kenntnis der Luftspaltleistungen sind die Drehmomente wie folgt zu berechnen.

Für die Maschine A:

$$M_A = P_{LA} \cdot \frac{0,973}{n_0}$$

und für die Maschine B:

$$M_B = P_{LB} \cdot \frac{0,973}{n_0}$$

wobei die Leistungen P_{LA} und P_{LB} in Watt einzusetzen sind, und n_0 die synchrone Drehzahl bedeutet.

Es ist zu ersehen, dass — ähnlich wie bei der elektrischen Welle in Parallelschaltung — die Luftspaltleistungen oder die mit den Luftspaltleistungen proportionalen Drehmomente der Wellenmotoren aus zwei Teilen zusammengesetzt sind⁷⁾. Der erste Teil ist bei beiden Wellenmotoren A bzw. B gleich gross und ist dem asynchronen Antriebsdrehmomentanteil proportional; der zweite Teil ist bei beiden Maschinen entgegengesetzt gleich gross und dem synchronisierenden Anteil des Drehmomentes proportional. Danach ist das asynchrone Antriebsdrehmoment einer Maschine:

$$M_{As} = \frac{M_A + M_B}{2} = I_1^2 \cdot \frac{R'_2}{s} \cdot \frac{1 - \cos(2\alpha)}{2} \cdot \frac{X_0^2}{\left(\frac{R'_2}{s}\right)^2 + (X'_2 + X_0)^2} \cdot \frac{0,973}{n_0} \quad (11)$$

Der synchronisierende Anteil ist:

⁷⁾ Siehe Fussnote 2.

$$M_S = \frac{M_A - M_B}{2} = I_1^2 \cdot (X'_2 + X_0) \cdot \frac{\sin(2\alpha)}{2} \cdot \frac{X_0^2}{\left(\frac{R'_2}{s}\right)^2 + (X'_2 + X_0)^2} \cdot \frac{0,973}{n_0} \quad (12)$$

In den Fällen, wo X'_2 und R'_2/s viel kleiner als X_0 sind, was bei grösseren Maschinen und bei Schlüpfungen $s \geq 1$ bzw. $s \leq -1$ anzunehmen ist, wird der synchronisierende Drehmomentanteil angenähert:

$$M_S \cong \frac{1}{2} \cdot I_1^2 \cdot (X_0 - X'_2) \sin(2\alpha) \cdot \frac{0,973}{n_0} \quad (13)$$

betrugen. Bei der praktischen Berechnung der Drehmomente ist am einfachsten wie folgt vorzugehen:

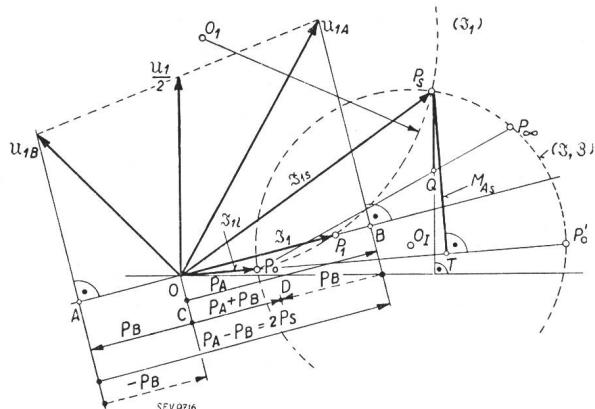
Die Werte von I_1 sind für verschiedene Verdrehungswinkel 2α dem Stromvektordiagramm zu entnehmen (Fig. 4), und die so erhaltenen Werte von I_1 sollen in Gl. (11), (12), oder (13) eingesetzt werden.

Die Werte von I_1 können auch auf Grund der Gl. (7a) berechnet werden, aber dieses Vorgehen bedingt eine mühsame Berechnungsarbeit.

Wie früher schon angedeutet wurde, können die Drehmomente, bzw. Luftspaltleistungen auch graphisch bestimmt werden.

VI. Graphische Bestimmung der Drehmomente

Auf Grund der Fig. 5 können die in die Wellenmotoren eingeführten Leistungen bestimmt werden, indem die Projektion der beiden Vektoren U_{1A}



Reihenschaltung der beiden Maschinen (Index R) dargestellt, mit den Daten der Maschinen, für welche die Vektordiagramme der Fig. 4 und 5 gezeichnet worden waren. Aus Fig. 7 ist der Verlauf der Momente $(M_A)_R$ und $(M_B)_R$ zu ersehen. In denselben Abbildungen wurden die Momente für

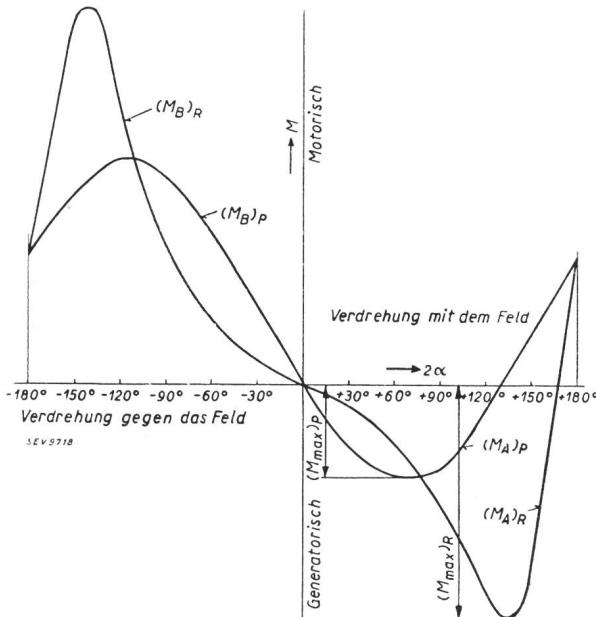


Fig. 7.
Prinzipieller Verlauf der Drehmomente der beiden Wellenmaschinen bei Reihen- und Parallelschaltung
 2α elektrischer Verdrehungswinkel der beiden Rotoren.
 M Drehmoment.

das Parallelsystem (Index P) auch eingezeichnet, und zwar in Fig. 6 die synchronen und asynchronen Anteile (Kurven $(M_S)_P$ und $(M_{As})_P$) und in Fig. 7 die Momente $(M_A)_P$ und $(M_B)_P$. Da die Daten der Maschinen, für welche die Fig. 4 und 5 gezeichnet waren, für praktisch ausgeführte Ma-

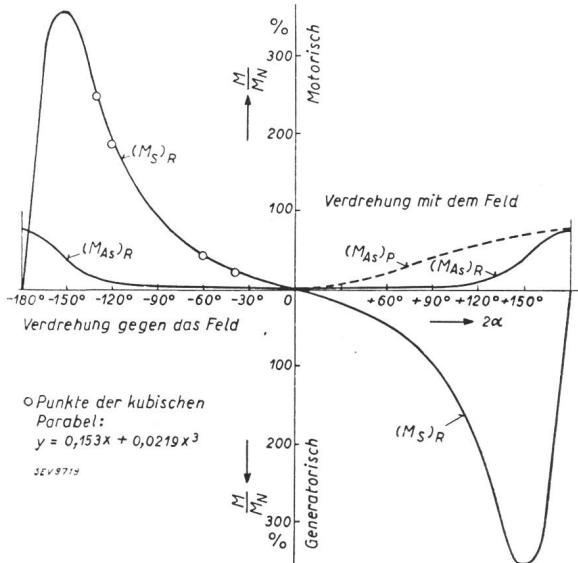


Fig. 8.
Verlauf der Drehmomentanteile ausgeführter Maschinen
($s = 1$)
 2α elektrischer Verdrehungswinkel der beiden Rotoren.
 M Drehmoment. M_N Nenndrehmoment der normalen Asynchronmaschine.

schen ungewöhnliche Werte sind (zwecks leichterer Ausführbarkeit der Konstruktion wurden hohe Leerlaufstromstärken und hohe Kupferverluste angenommen), sind in Fig. 8 und 9 die Drehmomente für praktisch ausgeführte Maschinen wiedergegeben. Die Momente sind in diesem Falle in Prozenten des Nenndrehmomentes aufgezeichnet, für den Schlupf $s = 1$.

In Fig. 9 ist zum Vergleich der Drehmomentverlauf derselben Maschinen in Parallelschaltung bei Klemmspannung $U_1/2$ auch aufgezeichnet worden. Es ist zu ersehen, dass das Drehmoment der elektrischen Welle in Reihenschaltung wesentlich anders verläuft als bei der Welle in Parallelschaltung. Das Drehmoment der elektrischen Welle in Reihenschaltung steigt erst langsam und wird dann mit wachsendem Verdrehungswinkel immer steiler und erreicht bei einem ziemlich hohen Wert des

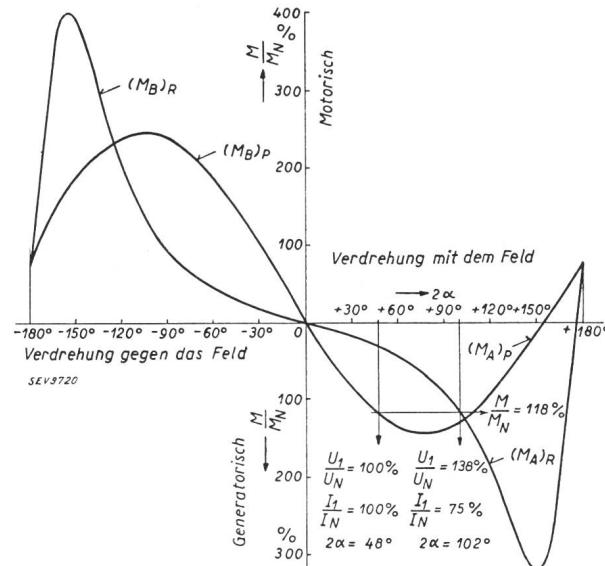


Fig. 9.
Verlauf der Drehmomente ausgeführter Maschinen
($s = 1$)
 2α elektrischer Verdrehungswinkel der beiden Rotoren.
 M Drehmoment. M_N Nenndrehmoment der normalen Asynchronmaschine.

Winkels 2α (ungefähr 150°) den Höchstwert. Dagegen verläuft das Moment der Welle in Parallelschaltung im wesentlichen nach einem Sinusgesetz. In Fig. 9 ist für das Parallelsystem das zur Nennspannung (100 %) und Nennstromstärke (100 %) gehörige Drehmoment (118 %) eingeführt (Verdrehungswinkel $2\alpha = 45^\circ$). Zu demselben Moment gehört bei Reihenschaltung eine Spannung von 138 % je Maschine und 75 % der Nennstromstärke (Verdrehungswinkel $2\alpha = 102^\circ$). Beim Parallelsystem ist das Verhältnis zwischen dem übertragbaren Höchstmoment und dem zur Nennstromstärke gehörenden Moment 1,2, wogegen bei Reihenschaltung das Verhältnis des Kippmomentes zu dem 118prozentigen Moment gleich 2,73 ist. Die elektrische Welle in Reihenschaltung hat danach wesentliche Vorteile hinsichtlich der Überlastbarkeit, wenn gleich grosse Maschinen mit gleicher Ausgangsspannung pro Wellenmotor angenommen werden. Dagegen ist — wie schon früher

angedeutet war — die Kupplung zwischen beiden Maschinen bei kleinen Belastungen looser als beim Parallelsystem. Naturgemäss taucht gleich die Frage der Bemessung von Wellenmotoren in Reihenschaltung auf. Namentlich können normalgesättigte Maschinen im allgemeinen nicht dauernd mit einer Spannung von 138 % gespeist werden. Deswegen sind bei der Reihenschaltung die Wellenmotoren bei gleichbleibender Nennleistung für ungefähr um 20 % höhere Nennspannung zu konstruieren. Dadurch wird erreicht, dass bei mittleren Belastungen die Maschinen bei der Nennspannung arbeiten und dass bei Vollast die Spannung ungefähr nur 120 % betragen wird, wobei die Stromstärke noch unter dem Nennwert bleibt (etwa 80...85 %). Das Kippmoment ist in diesem Falle noch immer viel höher als bei dem Parallelsystem (190...200 %). Besonders günstig gestalten sich die Verhältnisse, wenn die Welle in Reihenschaltung als Ausgleichswelle für ungefähr gleichbelastete Arbeitsmaschinen dient oder aber die Wellenmotoren im Stillstand nur zur Winkelfernübertragung bei hohem Moment dienen. Namentlich arbeiten in diesen Fällen die Wellenmaschinen während eines grossen Teiles der Betriebszeit im Leerlauf, womit bei den — nach dem obigen Prinzip ausgelegten — Wellenmotoren ein niedrigerer Eisenverlust und niedrigere Leerlaufstromstärken verknüpft sind.

Die elektrische Welle in Reihenschaltung kann als selbständige Gleichlaufanordnung für zwei Asynchronmaschinen nicht gebraucht werden. Nämlich wird die für die Welle in Reihenschaltung wichtige Ausgleicheigenschaft der parallel geschalteten Läuferwicklungen durch den zu beiden Läuferwicklungen parallel geschalteten gemeinsamen Anlasswiderstand — welcher hauptsächlich bei kleineren Schläpfungen und grossen Belastungen einen kleinen Wert hat — gänzlich aufgehoben.

Ausser den oben betrachteten günstigen Momentverhältnissen der Wellen in Reihenschaltung ist eine noch wichtigere Tatsache — wie schon früher erwähnt war —, dass die Pendelneigung ohne jede Hilfsmassnahme im wesentlichen unterdrückt ist. Im nächsten Abschnitt werden die Pendeleigenschaften kurz geschildert; ausführlicher sollen diese Fragen in einem selbständigen Artikel später erörtert werden.

VIII. Pendelungen

Wie bekannt, ist die Pendelneigung beim *Parallelsystem* durch zwei Ursachen bedingt:

- Das synchronisierende Moment wirkt bei nicht zu grossen Amplituden ähnlich wie wenn die beiden Wellenmotoren nicht elektrisch, sondern mechanisch, durch eine Torsionsfeder verbunden wären. Ein solches System ist harmonischer Schwingungen fähig, womit immerhin eine Resonanzgefahr verknüpft ist.

- Bei der Leistungsübertragung wird beim Parallelsystem ähnlich wie bei Reihenschaltung — wie wir gesehen haben — ein asynchrones Drehmoment entwickelt. Durch das asynchrone Moment wird bei der Welle eine negative Dämpfung ver-

ursacht⁸⁾. Diese negative Dämpfung kann im gegebenen Falle solche Werte erreichen, dass bei dem schwingungsfähigen System eine Anfachung der Pendelamplitude eintritt.

Bei der *Reihenschaltung* gestalten sich die Schwingungerscheinungen anders:

- Die synchronisierende Kraft ist nicht durch eine Torsionsfeder zu ersetzen, indem das Moment nicht linear mit der Winkelabweichung verläuft; die Zusammenhänge werden durch ein verwickelteres Gesetz veranschaulicht. Ein solches System ist auch schwingungsfähig, aber diese Schwingungen sind sogenannte aharmonische oder pseudoharmonische Schwingungen.

Bei solchen Schwingungen gibt es keine Resonanzgefahr, nicht einmal bei dämpfungslosem System, indem mit wachsender Amplitude auch die Eigenschwingungszahl des ganzen Systems verändert wird, welcher Umstand eine Verstimmung gegen die erregende Schwingung zur Folge hat. Die Eigenschwingungen werden bei diesem System ohne Dämpfung durch folgende Differentialgleichung beschrieben:

$$m \cdot \frac{d^2x}{dt^2} = -ax \pm bx^2 \pm cx^3 \pm \dots$$

Wenn die Drehmomente nach beiden Seiten hin symmetrisch verlaufen, was bei der Reihenschaltung bei nicht zu grossen Amplituden der Fall ist, fallen die Glieder mit geraden Exponenten weg, und wenn man sich mit einer kleineren Genauigkeit begnügt, gestaltet sich die Differentialgleichung wie folgt:

$$m \cdot \frac{d^2x}{dt^2} = -ax - cx^3$$

Die durch diese Gleichung gegebenen Schwingungen sind in der Literatur ausführlich behandelt.

- Der asynchrone Drehmomentanteil, durch welchen die negative Dämpfung verursacht wird, ist bei kleineren Winkelverdrehungen viel geringer und beim Nenndrehmomentwert erst etwa 25 % so hoch wie der asynchrone Drehmomentwert beim Parallelsystem (Fig. 6 und 8); vergleiche auch die beiden Kurven $(M_{AS})_P$ mit $(M_{AS})_R$.

Danach ist es leicht einzusehen, dass die elektrische Welle in Reihenschaltung zu selbsterregten Pendelungen viel weniger fähig ist als das Parallelsystem.

Diese Eigenschaften der Welle in Reihenschaltung wurden experimentell untersucht. Die Versuche haben die vollständige Pendelfreiheit der elektrischen Welle in Reihenschaltung in vielen Fällen bewiesen, wo eine Pendelanfachung der Welle im Parallelbetrieb unter denselben Betriebsbedingungen die Folge gewesen war.

Es waren aber auch solche Fälle zu verzeichnen, wo eine Pendelanfachung beobachtet wurde.

Die Versuche über das statische Verhalten der elektrischen Welle in Reihenschaltung haben die abgeleiteten Gleichungen und Diagramme voll bestätigt; diese Versuche sind so einfach vorzunehmen, dass deren Beschreibung nicht nötig ist.

⁸⁾ Siehe Fussnote 3.