# Die Berücksichtigung des Entwicklungssinnes in der theoretischen Elektrotechnik

Autor(en): **Bloch, Otto**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizerische Bauzeitung**

Band (Jahr): **67/68 (1916)**

Heft 11

PDF erstellt am: **27.04.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-33067

**Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

**Haftungsausschluss**

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

**http://www.e-periodica.ch**

INHALT: Die Berücksichtigung des Wicklungssinnes in der theoretischen Elektrotechnik. — Umbau des „Schlössli" in Zollikon. — Die Hafenanlagen an der See. — Die Werkstätten-Organisation der Ford'schen Automobilfabrik. — Miscellanea: XXXIV. Generalversammlung der Gesellschaft ehemaliger Studierender der Eidg. Technischen Hochschule. Versuchgeleise auf Eisenbetonfüssen der Niederländischen Staatseisenbahn. Reformierte Kirche Zürich-Fluntern. Ausbildungsfragen an der Eidg. Technischen Hochschule. Transafrikanischer Ost-West-Verkehrsweg. Eine Schwebebahn als Ersatz für eine Brücke. Deutsche Bibliothek in Leipzig. Die Abteilung für Wasserwirtschaft. Internationale Rheinregulierung. Bernische Kraftwerke. — Literatur: Reims, la Cathédrale. Belgien. Kunstverwaltung in Frankreich und Deutschland. Kriegstagung für Denkmalpflege. Jahrbuch 1915 des Deutschen Werkbundes. — Vereinsnachrichten: Gesellschaft ehemaliger Studierender: Stellenvermittlung.

Tafeln 20 und 21: Umbau des „Schlössli" in Zollikon.

Band 68. Nachdruck von Text oder Abbildungen ist nur mit Zustimmung der Redaktion und nur mit genauer Quellenangabe gestattet. Nr. 11.

# Die Berücksichtigung des Wicklungssinnes in der theoretischen Elektrotechnik.

Von Dr. Ing. *Otto Bloch*, Bern.

Es ist im allgemeinen nicht üblich, bei der theoretischen Behandlung elektrischer Maschinen und Apparate den Wicklungssinn zu unterscheiden. Wo es sich um die schematische Darstellung von Bewicklungen handelt, begnügt man sich meist mit inbezug auf den Wicklungssinn indifferenten Zickzacklinien oder noch primitiveren Darstellungsweisen. Im praktischen Dynamobau verlässt man sich darauf, dass der richtige Wicklungssinn auf dem Prüffeld durch Versuche ohne grosse Mühe ermittelt werden könne. Eine vieljährige Praxis hat diesem Verfahren Gewohnheitsrecht gegeben, und dies wird ihm auch unbestritten bleiben, wo es sich um den Bau *bekannter Maschinentypen* handelt. Da aber, wo man sich von den Eigenschaften *neuer Maschinen* auf theoretischem Wege Rechenschaft zu geben hat *bevor Versuchsmaschinen hergestellt worden sind*, da wird man ohne genaue Berücksichtigung des Wicklungssinnes nicht zum Ziele gelangen können. Trotzdem findet man auch in Lehrbüchern der Elektrotechnik, die den Ingenieur zu dieser Stufe der Kenntnisse führen sollten, den Wicklungssinn nicht systematisch berücksichtigt. Eine einwandfreie Darlegung der Eigenschaften elektrischer Maschinen ist mit diesen Mitteln aber in vielen Fällen überhaupt nicht möglich.[1])

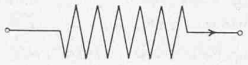


Abb. 1

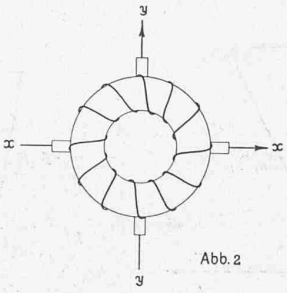



Abb. 2

Als Beispiel soll im Folgenden ein solcher Fall aus der schweizerischen Patentliteratur besprochen werden. Gleichzeitig möchten wir damit zeigen, wie sich in der theoretischen Behandlung auch verwickelter elektrotechnischer Probleme der Wicklungssinn einwandfrei berücksichtigen lässt. Zugleich wird man darin einen Beleg dafür finden, dass auch der Praktiker oft an Zeit und Geld dadurch sparen könnte, dass er bei der Beurteilung und Ausarbeitung seiner Erfindungen etwas weniger ausschliesslich auf den Versuch am Prüffeld abstellte.

*Die mathematische Erfassung des Wicklungssinnes.*

Wird eine einfache zylindrische Spule von einem Strom durchflossen, so entsteht ein magnetisches Feld, dessen Richtung wir mit Hilfe der Maxwell'schen Korkzieherregel (oder gleichwertiger Hilfsmittel) zu bestimmen gewohnt sind. Dabei können zweierlei Fälle vorliegen. Erstens der, dass die Windungen des Stromleiters in Wirklichkeit die Form einer *rechtsgängigen* Schraube haben, wie die Gänge des gedachten Korkziehers, oder der zweite Fall, in dem die Spule *linksgängig* gewickelt ist. *Im ersten Fall fliesst der Strom von dem einen Ende der Spule zum andern in der Richtung des von ihm erzeugten magnetischen Feldes; im zweiten Fall sind diese beiden Richtungen einander entgegengesetzt.*

Wählen wir nun in der Axrichtung einer solchen Spule von $N$ Windungen (vergl. Abbildung 1) einen Pfeil willkürlich in der einen oder andern Richtung, aber mit der Bestimmung, dass er uns gleichzeitig für den elektrischen Strom $i$ und den magnetischen Fluss $f$[1]) die Richtung angeben soll, in der die beiden *positiv zu zählen* sind, so ist die Gleichung

$$f = p \cdot N \cdot i, \quad \ldots \ldots \quad 1)$$

worin $p$ einen Proportionalitätsfaktor bedeutet, unter allen Umständen gültig, sobald wir noch festsetzen, *dass rechtsgängig gewickelte Windungen positiv zu zählen sind, linksgängige dagegen negativ.*

Für eine positive Spule oder Wicklung hat dann $f$ gleiches Vorzeichen mit $i$; sie haben also auch gleiche Richtung. Für negative Spulen oder Wicklungen bekommen Strom und Fluss entgegengesetzte Vorzeichen; ihre Richtung ist also entgegengesetzt. Um aber trotzdem nicht gezwungen zu sein, den Wicklungssinn zeichnerisch zu unterscheiden, setzen wir fest, *dass bei einer Wicklung jeweilen durch Beischrift von $+N$ oder $-N$ angegeben werde, ob an eine positive oder eine negative Wicklung zu denken sei.*

Die soeben getroffenen Festsetzungen geben auch dem zweiten hier in Frage kommenden Naturgesetz, dem Induktionsgesetz, in seiner üblichen Formulierung einen eindeutigen Sinn. Es wird im allgemeinen in folgender Form geschrieben:

$$e = -N \frac{df}{dt} \quad \ldots \ldots \quad 2)$$

Für die von uns getroffenen Bestimmungen ist diese Schreibweise korrekt, wenn wir fernerhin festsetzen, dass auch die elektromotorische Kraft (EMK) $e$ in derselben Richtung positiv zu zählen sei, wie der Strom und der Fluss. Das Vorzeichen der rechten Seite ändert sich, je nachdem es sich um positive oder negative Windungen $N$ handelt. In der Tat ist ja auch je nachdem die Richtung der induzierten EMK verschieden. Werden von demselben Strom bezw. von demselben Fluss in Reihe geschaltete positive und negative Windungen durchflossen, so addieren sich die Windungszahlen algebraisch. Sind die positiven und negativen einander gleich, so heben sie sich auf (Bifilare Wicklung). Sowohl in Gl. 1) als in Gl. 2) wird dann die rechte Seite gleich Null, Fluss und EMK verschwinden.

In dieser Weise lässt sich ohne rechnerische Komplikationen der Wicklungssinn überall mathematisch einwandfrei berücksichtigen. *Die Festsetzung positiver Zählrichtungen im Schema der Wicklungen ist die unerlässliche Grundlage dazu.* Die Pfeile, die uns diese Richtungen festlegen, bezeichnen wir als *„Zählpfeile"*, um schon durch die Benennung vor der irrtümlichen Auffassung zu bewahren, es handle sich dabei etwa um Strömungsrichtungen. Die Pfeile setzen nichts über die *physikalische* Richtung von Strom, EMK oder Fluss voraus.[2]) Sie geben lediglich ein

[1]) Diese übliche Unbestimmtheit inbezug auf den Wicklungssinn findet sich natürlich auch in der *Patentliteratur*. Hier muss sie sich besonders für den fühlbar machen, der gezwungen ist, sich über die Eigenschaften neuer Maschinen auf theoretischem Wege klar zu werden. Gerade aus solchen Fragen des Wicklungssinnes ergeben sich daher dem schweiz. Patentamt immer wieder Unannehmlichkeiten im Verkehr mit den Erfindern. Meist halten diese die Angabe des Wicklungssinnes oder sogar eine falsche Angabe desselben für belanglos. Ja, es kommt vor, dass sie den Einfluss des Wicklungssinnes direkt bestreiten, nur weil sie in der Praxis gewohnt sind, dem Prüffeldarbeiter die Sorge darum zu überlassen.

[1]) Wir sehen uns unter anderen auch durch *drucktechnische* Gründe veranlasst, in die Bezeichnung des magnetischen Flusses von den internationalen Konventionen hier abzuweichen.

[2]) *Kirchhoff* hat die Zählpfeile, ohne sie so zu benennen, bewusst angewendet. Sie bilden die unerlässliche Grundlage der bekannten beiden *Kirchhoff'schen Regeln*. Weil diese ursprünglich für Gleichstrom angewendet wurden, ist dann später vielfach eine Verwechslung mit Strömungspfeilen eingetreten, so dass man von ihrer Anwendung auf Wechselstromprobleme zurückscheute. Heute hat sich dadurch eine gewisse mangelhafte Darstellungsweise fast in die gesamte Literatur über Wechselstromtheorie eingeschlichen. Vergl. auch *O. Bloch*, Sitzungsberichte der Schweiz. Physikalischen Gesellschaft, Februar 1914.

*eindeutiges Bezugsystem* für die mathematischen Ausdrücke; sie sind eine *rein mathematische Massnahme.* Ihre Anwendung hat daher gleichen Sinn und Bedeutung, ob es sich um Gleichstrom- oder Wechselstromprobleme handle. Ja, gerade bei Wechselstrom gewinnen sie, wegen der Unmöglichkeit eine bestimmte Strömungsrichtung anzugeben, sogar erhöhten Wert.

Ein Wicklungsschema, das mit solchen Zählpfeilen versehen ist und den Wicklungssinn angibt, nennen wir in der Folge ein *„Raumdiagramm"*. Es ist das Koordinatensystem für die mathematische Formulierung der in dem untersuchten Objekt wirksamen Naturgesetze. Die Wahl desselben ist, wie die jedes Koordinatensystems, willkürlich und ohne Einfluss auf das Ergebnis. Wir haben uns dabei lediglich durch Zweckmässigkeitsrücksichten leiten zu lassen und es so einzurichten, dass sowohl die vorzunehmenden Gedankenoperationen als auch die mathematischen Entwicklungen möglichst einfach werden.

Natürlich ist das Raumdiagramm für die richtige Deutung der Resultate nicht minder unerlässlich. Ohne Raumdiagramm entbehren die Ergebnisse jedes eindeutigen, klaren Sinnes. Da uns im Hinblick auf das zu behandelnde Beispiel die Frage nach dem Sinn des bei elektrischen Maschinen auftretenden Drehmoments besonders interessiert, so soll hier gezeigt werden, wie diese Frage im Zusammenhang mit dem Raumdiagramm zu beantworten ist.

Setzen wir als Beispiel einen positiv gewickelten Kollektor-Ringläufer voraus (Abb. 2, S. 115). Es seien auf dem Kollektor zwei Paare sich diametral gegenüberliegender Bürsten aufgelegt, wobei die beiden Paare gegeneinander um 90° verdreht sind. Bei den Bürsten teilt sich die Läuferwicklung in zwei parallel geschaltete positive Spulen, sowohl für die Bürsten $x$-$x$ als für die Bürsten $y$-$y$. Wir zeichnen für jedes Bürstenpaar einen nach unserer Willkür gerichteten Zählpfeil ein, der gleichzeitig für die beiden zugehörigen Ringhälften gilt.

Ein Drehmoment liefert nun sowohl der Strom $i_y$ der $y$-Bürsten mit dem Fluss $f_x$ in der Axe der $x$-Bürsten als auch der Strom $i_x$ mit dem Fluss $f_y$. Aus der Rechnung, oder, wenn wir bei Wechselstrom das graphische Verfahren angewendet haben, aus dem Vektordiagramm, habe sich Vorzeichen und Grösse, bezw. relative Phase und Grösse aller Ströme und Flüsse ergeben. Auch die relative Phase und Grösse der hier paarweise ein Drehmoment erzeugenden Ströme und Flüsse seien also bekannt.

Die Grösse des Drehmomentes ist bekanntlich bei Gleichstrom proportional dem Produkt aus Strom und Feld, bei Wechselstrom aber proportional dem Skalarprodukt aus den beiden Strom und Feld darstellenden Zeitvektoren.

Es bleibt uns noch die Richtung des Antriebes zu bestimmen. Nehmen wir z. B. an, $i_y$ und $f_x$ hätten bei Gleichstrom gleiches Vorzeichen oder seien bei Wechselstrom doch wesentlich in Phase miteinander, d. h. die zwischen ihnen herrschende zeitliche Phasenverschiebung sei kleiner als $\pm\frac{\pi}{2}$ In diesem Falle läuft, wenn der Fluss $f_x$ sein positives Maximum erreicht hat, bei dem gewählten Zählpfeil also nach rechts gerichtet ist, auch der Strom $i_y$ in positiver Richtung. In den aktiven Drähten der rechten Ringhälfte fliesst er also bei dem vorausgesetzten Wicklungssinn und der gegebenen Zählrichtung nach hinten. Er wird also gemäss der bekannten Richtungsregel nach unten abgelenkt. Es ergibt sich ein Drehmoment im Uhrzeigersinn.

Nehmen wir die gleiche relative Phase für $f_y$ und $i_x$ an. Im Augenblick, wo $f_y$ seinen positiven Maximalwert hat, fliesst dann $i_x$ bei den gemachten Voraussetzungen über Wicklungssinn und Zählrichtung in den aktiven Drähten der obern Ringhälfte nach vorn. Das ergibt ein Drehmoment im Gegenuhrzeigersinn.

*Es ist nun klar, dass der Sinn der beiden Drehmomente der entgegengesetzte wäre, wenn wir bei gleicher relativer Phase der zusammenwirkenden Ströme und Flüsse statt eines positiv gewickelten Läufers eine negative Läuferwicklung vorausgesetzt, oder wenn wir die Richtung eines der Zählpfeile umgekehrt hätten.*

Um eine möglichst einfache Darstellung des zu behandelnden Wechselstromproblems zu erreichen, wollen wir noch folgende Vereinbarungen treffen.

Wir schreiben die zwischen den als reine Sinusschwingungen vorausgesetzten Wechselgrössen geltenden Beziehungen vektoriell und bezeichnen Vektorgrössen durch Fettdruck (z. B. $\boldsymbol{F}$).

Wenn $f = F \sin \omega t$ und

$$e = -N\frac{df}{dt}$$
$$= -\omega N F \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right)$$
$$= E \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right)$$

so schreiben wir die zweite Gleichung nur

$$\boldsymbol{E} = -\omega^{\bullet} N \boldsymbol{F}.$$

Durch den Punkt bei $\omega^{\bullet}$ deuten wir an, dass der Vektor $\boldsymbol{E}$ um $\frac{\pi}{2}$ gegenüber dem Vektor $\boldsymbol{F}$ vorauseilt. Das Minuszeichen kehrt dieses Voreilen in Nacheilen um.

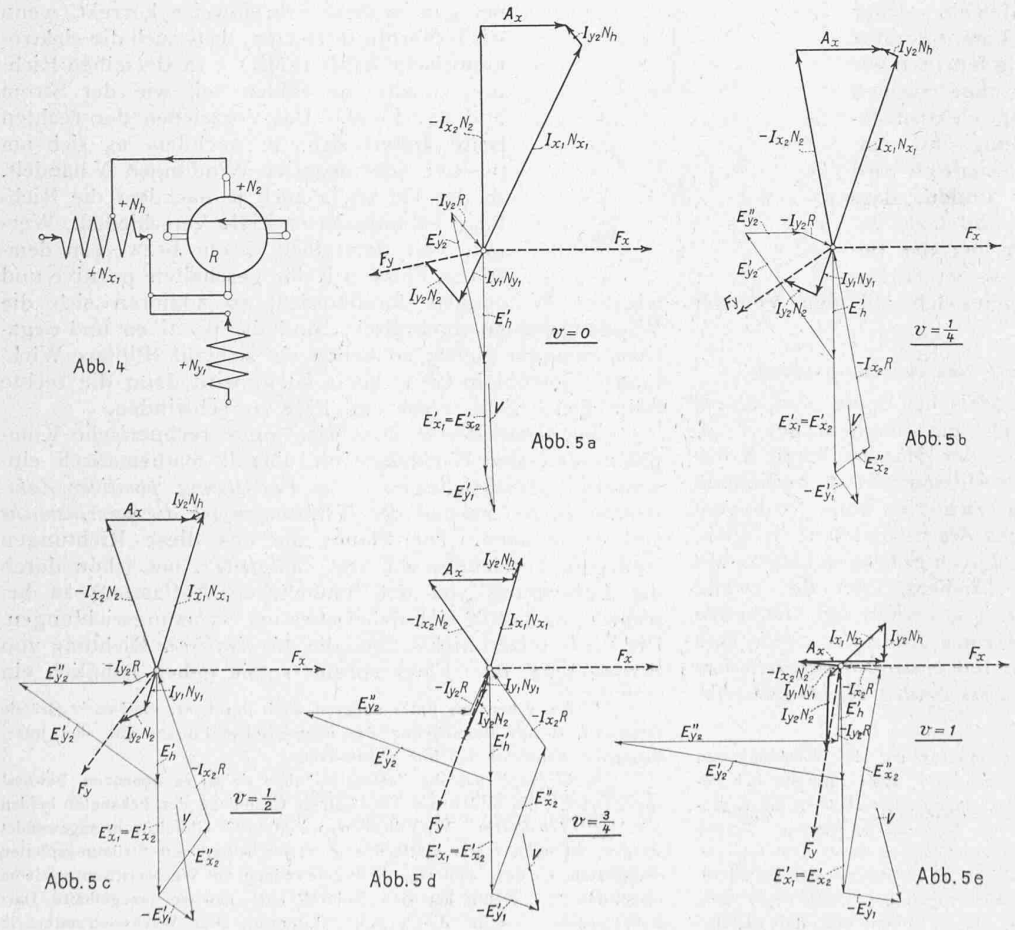


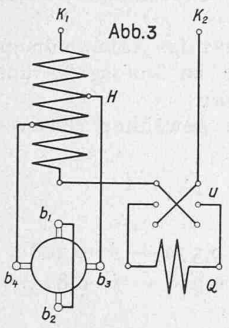

Abb. 4 und Abb. 5 (a bis e). Die Berücksichtigung des Wicklungssinnes in der theoretischen Elektrotechnik.

Weiter vereinbaren wir, dass in den Vektordiagrammen Voreilwinkel als positive Winkel im Gegenuhrzeigersinn aufzutragen sind, wie es in der Mathematik üblich ist. Beim Rechnen mit komplexen Zahlen legen wir ebenfalls die in der Mathematik gebräuchliche Gauss'sche Ebene zu Grunde. Die positive reelle Halbaxe erstreckt sich horizontal nach rechts, die positive imaginäre vertikal nach oben. Da wir die Winkelgeschwindigkeit $\Omega$ eines Läufers durch die Beziehung $\Omega = v \cdot \omega$ mit der elektrischen Winkelgeschwindigkeit (Kreisfrequenz) $\omega$ verknüpfen werden, so ist auch räumlich der positive Drehsinn gegen den Uhrzeigersinn gerichtet. Wir können also auch zwischen *positiven und negativen Drehmomenten* unterscheiden.

Die Gleichungen schreiben wir, um lästige Zahlenfaktoren zu vermeiden, für das absolute und nicht für das technische Massystem. Wir sprechen deshalb auch statt von Ampèrewindungen von Stromwindungen.

### Anwendung auf einen bestimmten Fall.

Aus einer schweizerischen Patentschrift entnehmen wir das in Abbildung 3 wiedergegebene Schema eines Einphasen-Repulsionsmotors. Eine Theorie der Wirkungsweise des Motors wird dazu nicht gegeben, dagegen vernimmt man aus dem Patentanspruch die Absicht des Konstrukteurs. Dieser Patentanspruch lautet:




„Repulsionsmotor mit einer Haupt- oder Arbeitswicklung und einer für den Drehrichtungswechsel umschaltbaren Querwicklung, dadurch gekennzeichnet, dass senkrecht zu den in der Axe der Hauptwicklung liegenden kurzgeschlossenen Arbeitsbürsten Hilfsbürsten angebracht sind, die mindestens über Teile der Statorwicklung miteinander verbunden sind, zum Zweck, bei dem Motor eine Nebenschlusscharakteristik zu erreichen, derart, dass dessen Umdrehungszahl unabhängig von Pol- und Periodenzahl gewählt werden kann."

Wir stellen uns hier die Aufgabe, zu untersuchen, ob der Erfinder seine Zwecke, soweit sie mit dem Wicklungssinn im Zusammenhang stehen, wirklich erreicht; vor allem also, ob der Motor wirklich umschaltbar ist.

Sobald man den Wicklungssinn berücksichtigt, stellt sich aber ausser der Frage nach dem Einfluss der Umschaltung der Querwicklung $Q$ auch die Frage ein, von welchem Einfluss es für den Motor sei, wenn man, statt wie im Schema Abbildung 3 die Bürste $b_3$ näher an die Klemme $K_1$ zu schalten, die Bürste $b_4$ zwischen $K_1$ und $b_3$ an die Ständerwicklung anschliesst. Kurz die Frage nach dem Einfluss des Wicklungssinnes der „Hilfswicklung", wie wir die von dem Strom der Hilfsbürsten durchflossenen Ständerwindungen nennen wollen.

### *Die Ermittlung der Diagramme.*

Um für unsere Frage belanglose Komplikationen zu vermeiden, nehmen wir an, die Widerstände der Ständerwicklungen seien zu vernachlässigen gegenüber dem Widerstand der Läuferwicklung und der Bürsten. Diesen selbst wählen wir gleich für beide Bürstenpaare. Von der Berücksichtigung der Streuung, Sättigung und Hysteresis sehen wir ebenfalls ab. Ferner nehmen wir an, der magnetische Widerstand sei für alle Flüsse derselbe.

Wir zeichnen zuerst in geeigneter Weise das Raumdiagramm (Abbildung 4).[1] Hierauf sind wir in der Lage, auf Grund der Kirchhoff'schen Regeln und der Grundgesetze des Elektromagnetismus und der Induktion sämtliche Gleichungen aufzustellen, die das Problem bestimmen. Es sind die folgenden 13 Beziehungen:

[1]) Wir schliessen uns bezügl. der zeichnerischen Mittel sowohl für Raum- als Zeitdiagramm der vorbildlichen von *Görges* vertretenen Art möglichst eng an.

$$1.\quad I_{x_1} = -I_{y_1}$$

$$2.\quad U + E'_{x_1} - E'_{y_1} = 0$$

$$3.\quad E'_{x_2} + E''_{x_2} - I_{x_2} R = 0$$

$$4.\quad E'_{y_2} + E''_{y_2} + E'_h - I_{y_2} R = 0$$

$$5.\quad E'_{x_1} = -\omega \cdot N_{x_1} F_x \qquad 8.\quad E''_{x_2} = -\Omega N_2 F_y$$

$$6.\quad E'_h = -\omega \cdot N_h F_x \qquad 9.\quad E'_{y_1} = -\omega \cdot N_{y_1} F_y$$

$$7.\quad E'_{x_2} = -\omega \cdot N_2 F_x \qquad 10.\quad E'_{y_2} = -\omega \cdot N_2 F_y$$

$$11.\quad E''_{y_2} = +\Omega N_2 F_x$$

$$12.\quad F_x = \frac{4\pi}{\varrho} (I_{x_1} N_{x_1} + I_{y_2} N_h + I_{x_2} N_2) \equiv n A_x$$

$$13.\quad F_y = \frac{4\pi}{\varrho} (I_{y_1} N_{y_1} + I_{y_2} N_2) \equiv n A_y$$

Dabei beziehen sich die Indizes „$x$" und „$y$" auf die Wicklungen und Wicklungsteile in der $x$- bezw. $y$-Axe unseres Raumdiagramms, die Indizes „1" auf Grössen im Ständer, die Indizes „2" auf solche im Läufer. Der Index „$h$" bezieht sich auf den Hilfskreis. Elektromotorische Kräfte der Transformation sind mit $E'$ bezeichnet, solche der Rotation mit $E''$; $\omega$ ist die elektrische Winkelgeschwindigkeit (Kreisfrequenz), $\Omega$ die Winkelgeschwindigkeit des Läufers, und $U$ die Spannungsabnahme längs des Leiters.

Da wir uns für die folgenden Darlegungen der graphischen Methode bedienen wollen, so müssen wir über die einzelnen Grössen quantitative Voraussetzungen treffen. Wir setzen:

$$N_{x_1} = N = \frac{1}{a} N_{y_1} = \frac{1}{b} N_h = \frac{1}{c} N_2; \quad \text{und} \quad \Omega = v\,\omega.$$

$v = 0$ bedeutet also Stillstand, $v = 1$ synchronen Lauf. Ferner setzen wir willkürlich:

$$a = 1/4;\ b = 1/2;\ c = 1.$$

Ausserdem müssen wir den Masstab für die verschiedenen Arten von Vektoren wählen. Es ist $E' = -\omega \cdot N F$. Wir setzen als Verhältnis der Masstäbe

$$\omega N = 4/3.$$

Weiter sei das Verhältnis zwischen den erzeugenden Stromwindungen $A$ und dem erzeugten magnetischen Fluss $F$:

$$\frac{4\pi}{\varrho} = n = 2;$$

und schliesslich setzen wir die Zahlenwerte:

$$R = N,$$

um die Verhältnisse der Diagramme für die Zeichnung günstig zu gestalten.

Wir gehen nun daran, das zeitliche Vektordiagramm für unsern Motor aufzuzeichnen, das gleichzeitig allen 13 Bedingungsgleichungen genügt. Das einfachste Diagramm ist jedenfalls das für *Stillstand*, wo $\Omega = 0$, sodass die $E''$ wegfallen. Wir beginnen damit. (Vergl. Abbildung 5 a.)

Wählen wir den Vektor $F_x$ willkürlich in der positiven $x$-Axe, so ergeben die Gleichungen 5, 6 und 7 ohne weiteres $E'_{x_1}$, $E'_h$ und $E'_{x_2}$ nach Grösse und Phase. Sie eilen um $\frac{\pi}{2}$ nach. Aus Gleichung 3 ergibt sich, weil $E''_{x_2} = 0$, auch $I_{x_2} R$ und daraus sofort $I_{x_2} N_2$. Der Vektor der resultierenden Stromwindungen $A_x$ ist auch noch nach Grösse und Phase bekannt, weil $F_x$ gegeben ist. $F_x = n \cdot A_x$. Nun wäre mittelst der Gleichung 12 das Polygon der $x$-Stromwindungen zu ergänzen. Dabei treten aber gleichzeitig zwei Vektoren von noch unbekannter Grösse und Richtung auf, nämlich $I_{x_1}$ und $I_{y_2}$. Wir sind ausser Stande, sie unmittelbar so einzuzeichnen, dass sie allen noch übrigen Gleichungen genügen. Hätten wir sie aber gefunden, so wäre das Diagramm ohne weitere Schwierigkeiten folgendermassen zu vervollständigen.

Wir zeichneten nach Gleichung 1 $I_{y_1} N_{y_1}$ in Gegenphase zu $I_{x_1} N_{x_1}$ und $I_{y_2} N_2$ in Phase mit $I_{y_2} N_h$. Ihre Summe $A_y$ (Gleichung 13) ergäbe uns somit auch $F_y$. Aus Gleichung 10 entnähmen wir ferner $E'_{y_2}$ und alle Vektoren von Gleichung 4 wären somit nach Grösse und Phase bestimmt. Ebenso gäbe endlich Gleichung 9 nach Grösse und Richtung den Vektor $E'_{y_1}$, sodass auch Gleichung 2 erfüllt

werden könnte. Damit wäre allen Bedingungen Genüge getan und das Diagramm für Stillstand vollendet.

Aus der Grösse und Richtung der Vektoren $F_x$ und $I_{y_2}$, bezw. $F_y$ und $I_{x_2}$ lassen sich anhand des Raumdiagramms Grösse und Richtung der beiden Drehmomente der $x$- und $y$-Axe nach den besprochenen Richtungsregeln bestimmen. Aus ihnen bildet man das resultierende *Anlaufmoment*. Je nachdem es im positiven oder negativen Sinne dreht, sind dann für den Motorgang die Werte von $v$ positiv oder negativ zu wählen.

Aber so weit sind wir noch nicht. Alle Vektoren, die wir in Gedanken nach $A_x$ gesetzt haben sind vorläufig noch unbestimmt. Wäre einer von ihnen genau bekannt, so wären, wie wir gesehen haben, alle bestimmt. Wir gehen daher daran, einen davon zu berechnen, z. B. $F_y$. Solche Rechnungen gestalten sich bekanntlich am einfachsten nach der Methode der komplexen Zahlen. Wir betrachten demnach jeden Vektor als komplexe Zahl und ersetzen in allen Gleichungen das Zeichen $\omega$ durch $+ j\omega$, worin $j$ die imaginäre Einheit bedeutet.

Mit den gemachten Voraussetzungen ergeben die Gleichungen 1, 12 und 13:

$$\frac{1}{n N}(a F_x + F_y) = (a b + c) I_{y_2} + a c I_{x_2} \quad . \quad (a)$$

Ferner ergeben die Gleichungen 3 und 4 unter Berücksichtigung der Gleichungen 7, 8, 10, 11 und 6 die Ausdrücke:

$$I_{x_2} = \frac{\omega N}{j \cdot R}(c F_x - j v c F_y) \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (b)$$

$$I_{y_2} = \frac{\omega N}{j \cdot R}(c F_y + b F_x + j v c F_x) \quad . \quad . \quad . \quad (c)$$

Daraus ergibt sich

$$\frac{1}{n N}(a F_x + F_y) =$$

$$= \frac{\omega N}{j \cdot R}\Big[(a b + c)(c F_y + b F_x + j v c F_x) + a c (c F_x - j v c F_y)\Big]$$

Setzen wir in dieser Gleichung

$$\frac{1}{n N} : \frac{\omega N}{R} \equiv e \qquad \text{und} \qquad (a b + c) \equiv d$$

und ordnen die Glieder nach den Flüssen $F_x$ und $F_y$, so erhalten wir:

$$(e a + j b d - v c d + j a c^2) F_x = -(e + j d c + a c^2 v) F_y$$

oder

$$\frac{F_y}{F_x} = \frac{(e a - v c d) + j(b d + a c^2)}{-(e + v a c^2) - j d c} \quad . \quad . \quad . \quad (d)$$

Werden in diese Gleichung die bereits gewählten Zahlenwerte eingesetzt, so wird:

$$\frac{F_y}{F_x} = \frac{26 - j(3 - 36 v)}{-36 + j(12 + 8 v)} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (D)$$

Für $v = 0$ ergibt sich $F_y = (-0{,}675 - j \cdot 0{,}142) F_x$. Diesen Wert können wir ohne weiteres einzeichnen und das Vektordiagramm vervollständigen, indem wir den der Gleichung 4 entsprechenden Polygonzug zunächst zeichnen. $E'_{y_2}$ eilt dem Fluss $F_y$ um $\frac{\pi}{2}$ in der Phase nach. Die Schlusslinie des Polygons $(-I_{y_2} R)$ ergibt die Richtung von $I_{y_2} N_h$, sodass nun in der Tat das Stromwindungspolygon von Gleichung 12 ohne jede Unbestimmtheit Zug für Zug gezeichnet werden kann.

Die Richtungsregeln ergeben, dass das Anlaufmoment im vorliegenden Fall *positiv* ist. Die im Motorgang auftretenden Werte von $v$ sind also *positiv*.

Wir erhalten für die willkürlich gewählten relativen Geschwindigkeitswerte:

$$v = 0; \; = 1/4; \; = 1/2; \; = 3/4; \; = 1$$

die Zahlenwerte:

$$\frac{F_y}{F_x} = (-0{,}675 - j \cdot 0{,}142); \; (-0{,}570 - j \cdot 0{,}388); \; (-0{,}449 - j \cdot 0{,}615); \; (-0{,}311 - j \cdot 0{,}823); \; (-0{,}168 - j \cdot 1{,}008).$$

Die vollständige Rechnung[1]) für fünf verschiedene Betriebszustände ist damit erledigt, und wir sind in der Lage, mühelos die entsprechenden fünf Diagramme genau aufzuzeichnen.[2]) Dies ist in den Abbildungen 5a bis 5e geschehen. Darin ist die Klemmenspannung als $V = -U$ eingetragen; $V$ ist also die der Klemmenspannung entgegenwirkende EMK. In Wirklichkeit ist es nun diese Grösse, die konstant bleibt, und nicht, wie in den Diagrammen angenommen, der Fluss $F_x$. Durch proportionale Grössenänderung sind somit alle Diagramme auf konstantes $V$ zu reduzieren.

Wir haben in dieser Weise den Diagrammen die Kurven der Abb. 6 entnommen und zusammengestellt. Die Ordinaten der Kurven haben natürlich nur relativen Wert, sodass keine Masstäbe dazu geschrieben werden konnten. Sie zeigen aber, dass uns die Diagramme über alle betriebstechnischen Eigenschaften der untersuchten Maschinen orientieren

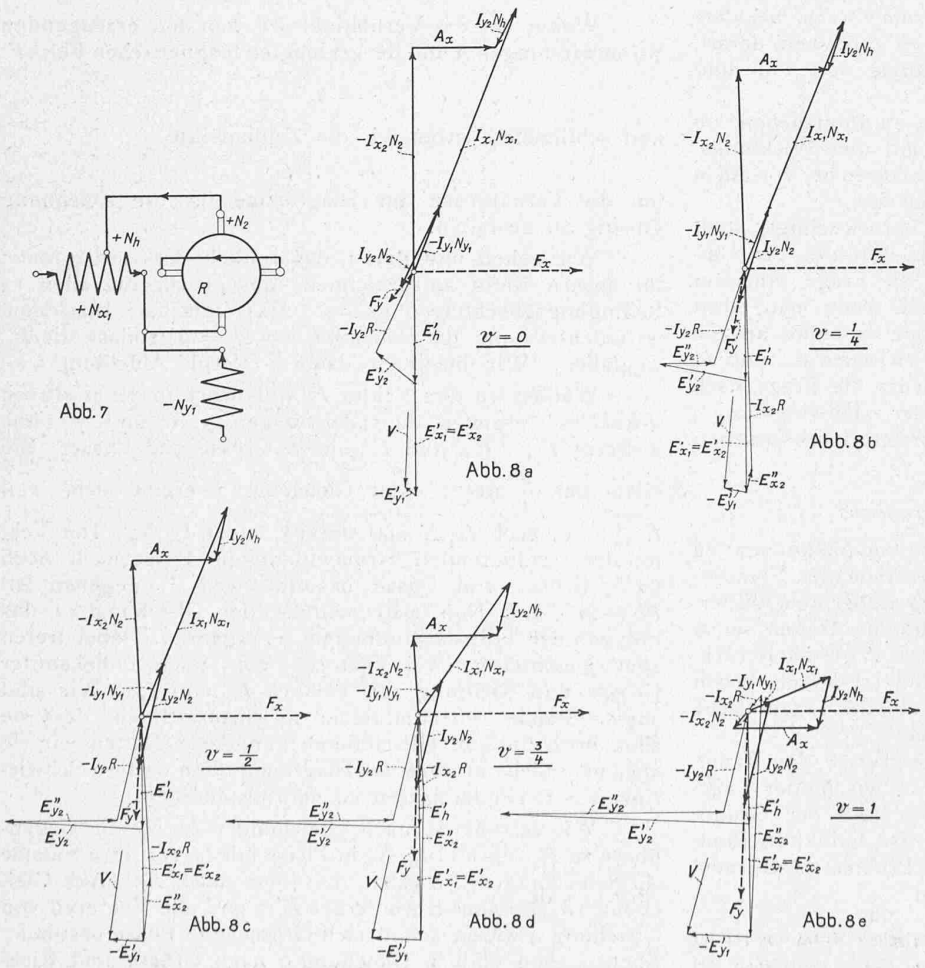



Abb. 7 u. 8 (a bis e). Die Berücksichtigung des Wicklungssinnes in der theoret. Elektrotechnik.

[1]) Man kann diese Werte aus Gleichung $D$ entweder direkt ausrechnen, oder aber, was viel einfacher ist, geometrisch ermitteln. Da Ausdrücke von der Form der Gleichung $D$ immer *Kreise* darstellen, so lässt sich das Kreisdiagramm für $F_y$ zeichnen. Die Wiedergabe der dazu führenden Konstruktion würde jedoch aus dem Rahmen dieser Darstellung fallen.

[2]) Es ergibt sich dabei jedesmal eine Probe darin, dass der Vektor $I_{y_2} N_2$, den wir parallel zu $I_{y_2}$ zeichnen, genau doppelt so gross wird wie $I_{y_2} N_h$, und dass dabei $I_{y_1} N_{y_1}$ genau ein Viertel von $I_{x_1} N_{x_1}$ wird.

*Einfluss des Wicklungssinnes der Reihenschluss-Erregung.*

Wir gehen nun dazu über, den Einfluss der Umschaltung der Wicklung $N_{y_1}$ zu untersuchen. Diese Umschaltung hat die gleiche Wirkung, wie wenn wir den Wicklungssinn von $N_{y_1}$ umkehren. Wir ersetzen also im Raumdiagramm Abbildung 7 das Zeichen $+ N_{y_1}$ durch $- N_{y_1}$; alles übrige lassen wir unverändert. In Gleichung $d$ ist also als Wert $\frac{N_{y_1}}{N_{x_1}} = a$ statt $^1/_4$ der Wert $- ^1/_4$ einzusetzen. Man erhält, indem man beachtet, dass auch $d = (a\,b + c)$ seinen Wert ändert, die Gleichung:

$$\frac{F_y}{F_x} = \frac{6 + j\,(3 + 28\,v)}{-28 + j\,(12 - 8\,v)} \quad . \quad . \quad . \quad (D')$$

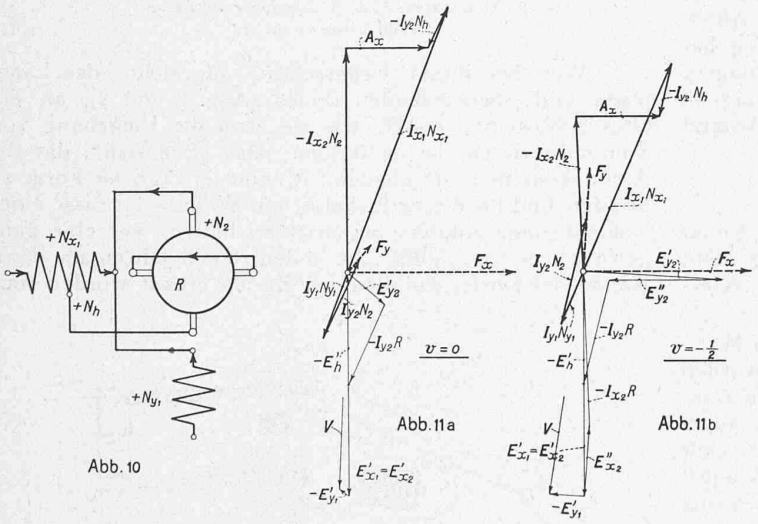
Wieder berechnen wir zuerst diesen Quotienten für Stillstand ($v = 0$) und ermitteln aus den Vektoren des Stillstanddiagramms (Abbildung 8a) den Sinn des Anlaufmomentes. Wir erkennen, *der Motor läuft wieder mit positivem Drehsinn an. Das Ziel, das sich der Erfinder gesetzt hatte, ist also nicht erreicht.*

Wir setzen neuerdings $v = 0;\ ^1/_4;\ ^1/_2;\ ^3/_4;\ 1$ und finden die Werte:

$$\frac{F_y}{F_x} = (-0{,}142 - j \cdot 0{,}168);\ (-0{,}077 - j \cdot 0{,}385);$$
$$(-0{,}038 - j \cdot 0{,}617);\ (-0{,}029 - j \cdot 0{,}865);$$
$$(-0{,}055 - j \cdot 1{,}11).$$

Diese Werte führen uns in bekannter Weise zu den Diagrammen Abbildungen 8a bis 8e, woraus sich die Kurven der Abbildung 9 ergeben. Wir haben die letztere neben Abbildung 6 gesetzt, um einen unmittelbaren Vergleich der Betriebseigenschaften bei beiden Arten der Schaltung zu gestatten.

Auf das Ergebnis dieser Gegenüberstellung brauchen wir hier nicht einzutreten. Wir gehen vielmehr sofort dazu über, den Einfluss zu untersuchen, den eine Umschaltung der Hilfswicklung bezw. der Hilfsbürsten auf die Eigenschaften der Maschine ausübt.




*Einfluss des Wicklungssinnes der Nebenschluss-Erregung.*

Die Abbildung 10 zeigt ein Raumdiagramm, das sich von dem der Abbildung 4 ausschliesslich dadurch unterscheidet, dass die Verbindungen der Hilfsbürsten mit der Hilfswicklung $N_h$ vertauscht sind. Dies erfordert eine Vorzeichenänderung für den Wert des Faktors $b$ in Gleichung $d$. Statt $b = ^1/_2$ setzen wir $b = - ^1/_2$ und erhalten, unter Berücksichtigung des neuen Wertes für $d = (a\,b + c)$, die Gleichung:

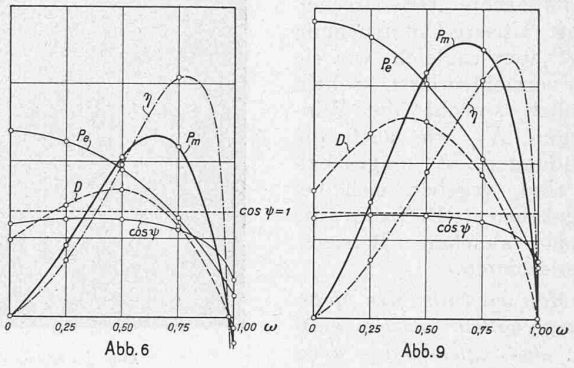
$$\frac{F_y}{F_x} = \frac{-6 + j\,(-3 + 28\,v)}{-28 + j\,(12 + 8\,v)} \quad . \quad . \quad . \quad (D'')$$

Wieder suchen wir zuerst das Anlaufmoment. Ein Vergleich der beiden Ausdrücke $(D')$ und $(D'')$ zeigt uns:

$$\left(\frac{F_y}{F_x}\right)'_{v=0} = -\left(\frac{F_y}{F_x}\right)''_{v=0}$$

Ausserdem zeigt uns das vollständige Stillstandsdiagramm Abbildung 11a auf den ersten Blick, dass der Drehsinn des Anlaufmomentes sich gegenüber dem der zweiten Schaltung umgekehrt hat, während seine Grösse unverändert blieb. *Der Motor läuft also mit negativem Drehsinn.*

Daraus geht hervor, dass für die Diagramme bei verschiedenen Drehgeschwindigkeiten *negative Werte von v* einzuführen sind. Wenn wir dies tun, sehen wir aber sofort, dass die rechte Seite der Gleichung $D''$ sich von derjenigen der Gleichung $D'$ nur durch den Faktor $(-1)$ unterscheidet. Man würde also für die Werte $v = 0;\ -^1/_4;\ -^1/_2;\ -^3/_4;\ -1$ genau die entsprechenden Diagramme wie für die zweite Schaltung erhalten. Die Drehmomente und Umlaufzahlen sind also genau die gleichen im entgegengesetzten Sinne und wir können uns Rechnung und Konstruktion sparen. Immerhin haben wir der Anschauung




halber in der Abbildung 11b auch noch das Diagramm für $v = -^1/_2$ wiedergegeben, damit der Leser vergleichsweise die Aenderung der verschiedenen Vektoren überblicken könne. Die Betriebskurven dieser Schaltung, die ganz jenen der zweiten Schaltung (Abb. 9) entsprechen, brauchen auch nicht neu gezeichnet zu werden.[1])

Es ist einleuchtend, dass durch erneute Umschaltung der Wicklung $N_{y_1}$, was einen Vorzeichenwechsel des Wertes $a$ bedingt, der Drehsinn ebenso wenig geändert würde, wie das erste Mal beim Uebergang von der ersten zur zweiten Schaltung. Wir würden dieselben Diagramme und Betriebskurven erhalten, wie für die erste Schaltung, nur für den entgegengesetzten Drehsinn.

*Kritik der Ergebnisse.*

Als erstes Ergebnis unserer Untersuchungen erkennen wir, dass eine Umschaltung der Wicklung $N_{y_1}$ in keinem Falle eine Umkehrung des Drehsinnes zu bewirken vermag, während die Umschaltung der Hilfswicklung stets einen Drehrichtungswechsel zur Folge hat. Vor allem müssen wir uns nun die Frage vorlegen, ob dieses Ergebnis nicht etwa bloss den besonderen Zahlenwerten zuzuschreiben ist, die wir willkürlich unseren Diagrammen zu Grunde gelegt haben.

Man sieht leicht ein, dass nur das Verhältnis zwischen den Windungszahlen $N_h$ und $N_{y_1}$ einen Einfluss haben könnte. Es liesse sich denken, und das war wohl auch der Gedanke des Erfinders, dass die Umschaltung der Reihenschlusserregung $N_{y_1}$ wohl eine Umkehrung (wie bei der gewöhnlichen Reihenschlussmaschine) bewirken würde, sodass in unserem Zahlenbeispiel dieser Einfluss nur durch eine zu starke Ausbildung der Hilfswicklung verdeckt und verunmöglicht wäre, bei schwächerer Ausbildung von $N_h$ aber in Erscheinung träte. Dem ist aber nicht so. Im Grenzfall $N_h = 0$ stellt nämlich unser Motor nichts anderes als den bekannten Atkinson-Einphasen-

[1]) Den gleichen Einfluss wie durch Umschalten der Hilfswicklung könnte man z. B. auch durch Umkehrung des Wicklungssinnes am Läufer erzielen.

Kommutator-Induktionsmotor[1]) dar, der, wie jeder Einphasen-Induktionsmotor, *kein Anlaufmoment* hat, sondern für beide Drehrichtungen gleichwertig ist. *Auch in diesem Grenzfall ändert also die Umschaltung der $N_{y_1}$-Wicklung am Drehsinn des Motors nichts.*

Als zweites Ergebnis hat unsere Untersuchung ferner gezeigt, dass die Umschaltung der Hilfswicklung allein stets nicht nur die Umkehrung des Drehsinnes, sondern gleichzeitig auch eine Veränderung der Betriebseigenschaften, wie Drehmoment, Leerlaufzahl, Wirkungsgrad, Stabilitätsgrenze usw. bewirkt. Das ist nun eine unerwünschte Nebenerscheinung. Unsere Untersuchung zeigt aber zugleich, wie sie sich vermeiden lässt. Sobald nämlich sowohl die Windungen $N_{y_1}$ wie auch die Windungen $N_h$ umgeschaltet sind, ergeben sich bei umgekehrtem Drehsinn die genau gleichen Betriebseigenschaften.

*Man wird also den Motor so umschaltbar machen müssen, dass gleichzeitig diese beiden Wicklungen relativ zur Ständerarbeitswicklung umgeschaltet werden.* Grundsätzlich kann dies auf zwei Arten geschehen. Entweder kann man sowohl die Anschlüsse der Wicklungen $N_h$ und $N_{y_1}$ vertauschen, wofür man einen doppelten Umschalter braucht; oder man schaltet einfach die Anschlüsse an die Wicklung $N_{x_1}$ um, ohne andere Verbindungen zu ändern. Auf diese Weise erspart man einen Umschalter. Abbildung 12 zeigt eine derartige Lösung. Denselben Weg hat übrigens nachträglich auch der Erfinder eingeschlagen. Zwei später in Deutschland erhobene Patentansprüche zeigen Lösungen dieser Art, die vermutlich am Prüfstand gefunden worden sind.

*Schlussbemerkung.*

Es sei gestattet, zum Schluss noch auf einen Punkt hinzuweisen, der in unmittelbarem Zusammenhang steht mit unserer Frage nach der Berücksichtigung des Wicklungssinnes.

Für die *Klassifikation* der Einphasen-Kollektor-Motoren, die schon von verschiedener Seite versucht worden ist, hat die bereits erwähnte systematische Arbeit von *Dyhr* wertvolle Richtlinien angegeben. Nachdem wir nun aber den Einfluss des Wicklungssinnes auf die Drehrichtung des Motors erkannt haben, muss es uns überraschen, dass *Dyhr* in seinem System zwei grosse Hauptarten von Motoren unterscheidet, die sich unter anderem durch das charakteristische Merkmal der positiven oder negativen Drehrichtung unterscheiden sollen. Dieser Gesichtspunkt der Drehrichtung spielt auch im ganzen Verlauf des systematischen Teils eine wesentliche Rolle.[2])

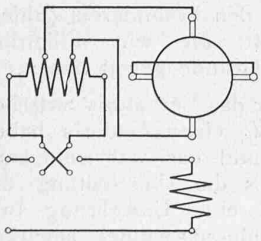


Abb. 12

[1]) Vergl. *Arnold*, Wechselstromtechnik, Band V, 2, Seite 489, und *Dyhr*, Die Einphasenmotoren, Seite 24, beide erschienen im Verlag von Jul. Springer, Berlin.

[2]) Vergl. *Dyhr*, a. a. O. Tabelle S. 8 und 57. Ferner verschiedene Textstellen, so z. B. S. 21 und 36.

*Im Besondern würde sich nach diesem System der hier untersuchte Motor stets im negativen Sinne drehen müssen.* Dass dem nicht so ist, davon haben wir uns soeben überzeugt. Dieses Klassifikations-Merkmal ist also irrtümlich. Doch nicht das ist das Wichtigste an dieser Bemerkung, sondern der Umstand, dass es, durch eine den Wicklungssinn nicht berücksichtigende Methode vorgetäuscht, überhaupt aufgestellt werden konnte, während uns gerade die Bestrebungen des Konstrukteurs des im Vorhergehenden betrachteten Motors zeigen, dass die Technik von der Umschaltbarkeit dieser Motoren stets überzeugt war.

Wir sehen hier an einem unzweideutigen Fehlresultat bestätigt, dass eine Methode, die den Wicklungssinn nicht systematisch in den Kreis der Betrachtungen einschliesst, im allgemeinen nicht im Stande sein kann, die tatsächlichen Verhältnisse darzustellen. Sie erschwert dem untersuchenden Ingenieur die Arbeit, weil sie sich nicht Schritt für Schritt der Anschauung anschliesst, und sie verweigert ihm Auskünfte, die er sich bei Berücksichtigung des Wicklungssinnes ohne irgendwelche Mehrarbeit verschaffen kann.

Abb. 2. Südwestansicht des umgebauten „Schlössli".

## Umbau des „Schlössli" in Zollikon.

Architekten *F. & E. Zuppinger* in Zürich.

(Mit Tafeln 20 und 21.)

Wer bei dieser Ueberschrift, angesichts des Lageplans und obenstehenden Bildes (Abb. 1 und 2), an ein altes Schlösschen denkt, wie sie etwa die Umgebung von Solothurn zieren, ist im Irrtum. Das „Schlössli", das die Architekten hier umzubauen, in eine erträgliche Form zu bringen und für die herrschaftlichen Wohnbedürfnisse eines wohlhabenden Käufers herzurichten hatten, war eine ganz gewöhnliche sog. „Villa", die in den 1890er Jahren am obern Rande des Dorfes Zollikon bei Zürich erbaut worden war.

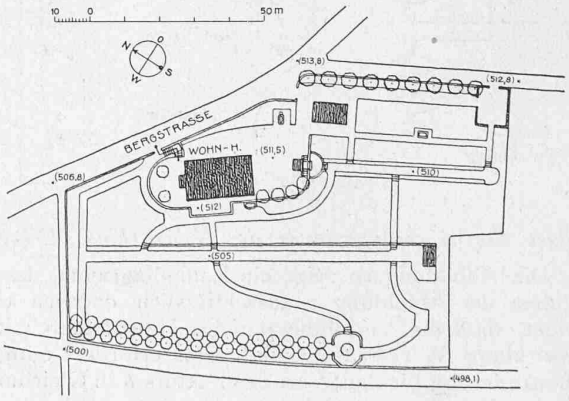



Abb. 1. Lageplan des umgebauten „Schlössli" in Zollikon. — 1 : 2000.

Ihre Bezeichnung als „Schlössli" war, wie Abbildung 3 auf Seite 121 unten zeigt, eine bittere Ironie. In den Grundrissen (Abb. 4 bis 7), namentlich in dem des Kellers, ist der ursprüngliche Umfang des nach vorn dreiaxigen alten Hauses noch erkennbar. Es mass ungefähr 13 × 12 *m* und ist nun durch Anbau gegen Südost um zwei Zimmer verlängert worden.