

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke
Band: 56 (1965)
Heft: 21

Artikel: Gleichstrommessungen zur Bestimmung der charakteristischen Grössen von Synchronmaschinen
Autor: Canay, M.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-916414>

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: 21.02.2026

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

Des weiteren wurden irgendwelche Strahlungsgürtel nicht gefunden, was sich auch aus dem Fehlen des Magnetfeldes erklärt. Kosmische Strahlung, Partikelstrahlung von der Sonne und UV-Strahlung treffen daher kaum abgeschwächt die Marsoberfläche.

Es wird wohl noch Monate dauern, bis alle physikalischen Messungen so ausgewertet sind, dass die Astrophysiker genauere Aussagen über den roten Planeten machen können.

5.2 Photographien

Von den 21 Photoaufnahmen der Marsoberfläche sind bisher erst wenige Bilder freigegeben worden. Diese zeigen

noch nicht die erhofften Details, da sie erstens Gebiete betreffen, welche zur Zeit der Aufnahme sehr hohen Sonnenstand, also kaum Schatten- und Konturenbildung hatten. Zweitens soll ja jedes Bild möglichst dreimal von der Erde aus abgefragt werden und aus diesen drei Bildern bildet dann erst der Computer ein genügend aufschlussreiches Bild. Auch diese Arbeit wird aber erst in einigen Wochen abgeschlossen sein. So kann heute in Fig. 8 nur ein erster Eindruck von dem gegeben werden, was Mariner IV auf dem Mars sah.

Adresse des Autors:

Dr. H. Paul, AG Brown, Boveri & Cie., 5400 Baden.

Gleichstrommessungen zur Bestimmung der charakteristischen Grössen von Synchronmaschinen

Von M. Canay, Birr

621.313.32 : 621.317.34

1. Einleitung

Die charakteristischen Grössen der Längsachse von Synchronmaschinen können in bekannter Weise durch einen Stosskurzschluss-Versuch zweckmässig ermittelt werden. Dagegen lassen sich die Querachsen-Grössen nur mit verhältnismässig komplizierten Versuchen bestimmen. Es ist jedoch möglich, die ungesättigten subtransienten Reaktanzen der beiden Achsen durch einen einfachen Versuch im Stillstand zu ermitteln. Diese Stillstandsmessungen wecken in jedem Versuchlokal-Ingenieur den Wunsch und die Hoffnung, auch die übrigen charakteristischen Grössen mit einer einheitlichen Methode für die Längs- und Querachse an der stillstehenden Maschine zu bestimmen. So kommt es in den letzten Jahren zur Entwicklung der Gleichstrommessungen. In den Arbeiten, in welchen diese Gleichstrommessungen im Stillstand vorgeschlagen oder behandelt wurden, spricht man von einer grossen Genauigkeit [1]¹⁾, ohne nähere Angaben über die Auswertung der Versuche und über die Ausführung der gemessenen Maschine zu machen.

Der Zweck der vorliegenden Arbeit besteht darin, die Gleichstrommessungen und ihre Anwendbarkeit zu überprüfen und die Bedingungen für eine saubere Messung anzugeben. Ferner werden die Unterschiede zwischen den einzelnen Methoden hervorgehoben und ihre Folgen besprochen.

2. Schaltungen für Gleichstrommessungen

Mit Gleichstrommessungen im Stillstand können die charakteristischen Grössen der Längs- bzw. Querachse ermittelt werden. Es ist theoretisch auch möglich, den Frequenzgang der Längs- bzw. Querachse einer ideellen Synchronmaschine mit mehreren Dämpferkreisen zu bestimmen. Den Messungen wird die Schaltung in Fig. 1 zugrunde gelegt.

Der mit einem Gleichstrom I gespeiste Stator wird über den Schalter S plötzlich kurzgeschlossen. Als Antwort dieser plötzlichen Spannungsänderung (Gleichspannungsschoss) klingt der Gleichstrom im Stator von seinem Anfangswert I_0 auf Null ab. Dabei werden ausser I , zur Kontrolle auch I_f bzw. U_f oszillographiert. Vor dem Kurzschliessen werden I und U mit Präzisionsinstrumenten genau gemessen. Obwohl die beschriebenen Versuche zur Bestimmung der charakteristischen Grössen hinreichend sind, können ähnliche Versuche selbstverständlich zur direkten Ermittlung einiger Grössen, z. B.

T_{d0}' , T_{d0}'' mit offenem Stator und Einspeisung an der Rotorseite wiederholt werden [1].

Der Bürstenspannungsabfall bewirkt eine Erhöhung des Polradwiderstandes. Da diese Erhöhung bei kleinem Polradstrom verhältnismässig grösser ist, empfiehlt es sich, den Polradkreis direkt (ohne Bürsten) kurzzuschliessen oder mit einem grösseren Gleichstrom als $0,25 I_n$ zu arbeiten [3]. Auf den Einfluss des Bürstenspannungsabfalles auf die ganze Auswertung wird im Abschnitt 9 nochmals zurückgekommen. Der Kurzschlußschalter S soll möglichst nahe bei den Klemmen angebracht werden, so dass keine zusätzliche Impedanz mitgemessen werden kann. Geschieht das nicht, müssen die ermittelten Zeitkonstanten, insbesondere die transienten Zeitkonstanten, nochmals umgerechnet werden, was unerwünscht ist.

Anstatt mit einem Gleichspannungsschoss kann man auch mit einem Gleichstromschoss I arbeiten und als Antwortfunktion (Response) die Spannungsänderung $X_d(p) \cdot I$ bzw. $X_q(p) \cdot I$ messen [4]. Da ein Stromschoss viel schwieriger zu verwirklichen ist als der Spannungsschoss, scheint diese Schaltung nicht vorteilhaft zu sein.

3. Mathematische Grundlagen für Gleichstrommessungen

Es soll hier gezeigt und angegeben werden, wie die aufgenommenen Oszillogramme auszuwerten und mit welchen

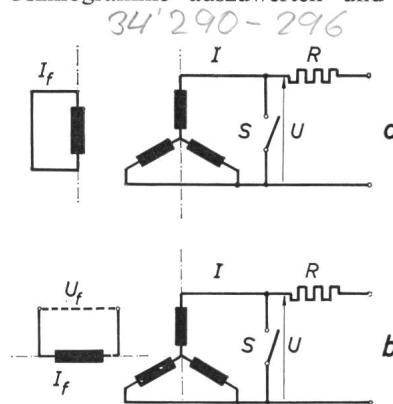


Fig. 1

Grundschemen der Gleichstrommessungen

a Rotor in d-(Längs-)Stellung, Feldkreis kurzgeschlossen; b Rotor in q-(Quer-)Stellung, Feldkreis kurzgeschlossen oder offen
 U , I Statorspannung bzw. Statorstrom; U_f , I_f Polradspannung bzw. Polradstrom; R Schutzwiderstand für die Speisequelle;
 S Kurzschlußschalter

¹⁾ Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

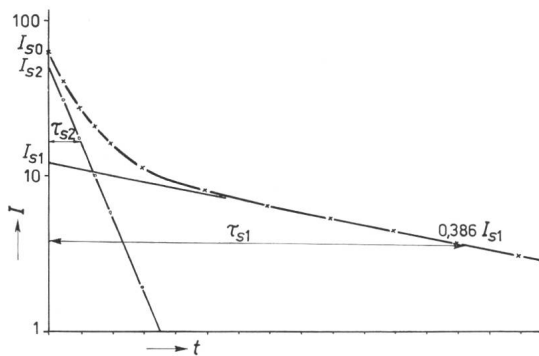


Fig. 2

Das Abklingen des Gleichstromes nach dem Kurzschluss
Index s bedeutet d -(Längs-) bzw. q -(Quer)-Achse
 I Statorstrom; t Zeit

Gleichungen die charakteristischen Größen zu berechnen sind.

Der Gleichstrom klingt beim Versuch nach Fig. 1 in der Längs- bzw. Querachse normalerweise mit drei bzw. zwei Zeitkonstanten ab. Das Abklingen des Gleichstromes wird in einem halblogarithmischen Koordinatensystem (Ordinate: logarithmisch, Abszisse: linear) in Funktion der Zeit aufgetragen (Fig. 2). In diesem Koordinatensystem ergibt eine Exponentialfunktion eine Gerade. Erfolgt das Abklingen mit mehreren Zeitkonstanten, so wird die aufgetragene Kurve von der Geraden abweichen. Trägt man die Differenzen (Fig. 2) nochmals auf, so entsteht noch eine Gerade. Abgesehen vom Ablesefehler können theoretisch für ein Abklingen mit n Zeitkonstanten n Geraden gefunden werden. Somit kann man die prozentualen Anteile $i_{s1} = I_{s1} / I_{s0}$, $i_{s2} = I_{s2} / I_{s0}$ usw. und die Zeitkonstanten τ_{s1} , τ_{s2} usw. bestimmen, in denen die Anteile auf ihren 0,368fachen Wert ($0,368 = 1/e$) abklingen.

Zur Ermittlung der charakteristischen Größen aus den gemessenen i_{sc} - und τ_{sc} -Werten stehen die folgenden Gleichungen zur Verfügung:

Für die Kurzschlusszeitkonstanten die Wurzeln von:

$$\sum_{c=1}^m \frac{i_{sc} \tau_{sc}}{T - \tau_{sc}} = 0 \quad (1)$$

Für die Leerlaufzeitkonstanten die Wurzeln von:

$$\sum_{c=1}^m \frac{i_{sc}}{T_0 - \tau_{sc}} = 0 \quad (2)$$

Für die Synchronreaktanzen:

$$X_s = 2\pi f R_a \sum_{c=1}^m i_{sc} \tau_{sc} \quad (\tau_{sc} \text{ in s}) \quad (3)$$

und für die subtransiente Reaktanz:

$$X_s'' = \frac{2\pi f R_a}{\sum_{c=1}^m \frac{i_{sc}}{\tau_{sc}}} \quad (\tau_{sc} \text{ in s}) \quad (4)$$

Für die allgemeine Ableitung der hier angegebenen Gleichungen sei auf den Anhang verwiesen. Diese Gleichungen

gelten sowohl für die Längsachse, als auch für die Querachse.

Die ursprünglich nur für die Längsachse definierte transiente Reaktanz X_d' ermittelt man aus folgender Gleichung, die man nach der Definition von X_d' ableiten kann (siehe Anhang):

$$\frac{1}{X_d'} = \frac{1}{X_d} + \frac{1}{X_d} \cdot \frac{(T_{d0}' - T_d')(T_d' - T_{d0}'')}{T_d'(T_d' - T_{d0}'')} \approx \frac{T_{d0}'}{T_d'} \cdot \frac{1}{X_d} \quad (5)$$

4. Resultate der verschiedenen Messungen

Wie in den vorangegangenen Abschnitten (und auch im Anhang) gezeigt wurde, ist es theoretisch möglich, die charakteristischen Größen von Synchronmaschinen und die Frequenzgangskurven der beiden Achsen mittels Gleichstrommessungen zu ermitteln. Die Frage, ob sich diese theoretische Möglichkeit auch in der Praxis gut bewährt [1...4], oder ob die Anwendbarkeit der Gleichstrommessungen durch verschiedene unvermeidbare Mess- und Auswertungsfehler begrenzt ist, sei in diesem Abschnitt an Hand von Messungen diskutiert.

4.1 Querachse

Fig. 3 zeigt das Abklingen des Gleichstromes in der Querachse bei einem Schenkelpolgenerator mit lamellierten Polschuhen und starker vollständiger Dämpferwicklung. Da die Einstellung der Querachse richtig ist, sieht man im kurzgeschlossenen Polradkreis keinen induzierten Strom (siehe untere Schleife). Die zugehörige Auswertung ergibt, dass das Abklingen praktisch nur mit zwei Zeitkonstanten erfolgt $i_{q1} = 83,2\%$ klingt mit $\tau_{q1} = 0,725$ s und der Rest $i_{q2} = 16,8\%$ mit $\tau_{q2} = 0,024$ s ab.

Der Gleichstromwiderstand einer Phase beträgt 0,00377 p.u. Mit diesen Werten erhält man:

T_q'' aus Gl. (1):

$$\frac{0,832 \cdot 0,725}{T - 0,725} + \frac{0,168 \cdot 0,024}{T - 0,024} = 0 \rightarrow T = T_q'' = 0,0286 \text{ s}$$

T_{q0}'' aus Gl. (2):

$$\frac{0,832}{T_0 - 0,725} + \frac{0,168}{T_0 - 0,024} = 0 \rightarrow T_0 = T_{q0}'' = 0,142 \text{ s}$$

X_q aus Gl. (3):

$$X_q = 314 \cdot 0,00377 [0,832 \cdot 0,725 + 0,168 \cdot 0,024] = 0,72 \text{ p.u.}$$

X_q'' aus Gl. (4):

$$X_q'' = \frac{314 \cdot 0,00377}{\frac{0,832}{0,725} + \frac{0,168}{0,024}} = 0,145 \text{ p.u.}$$

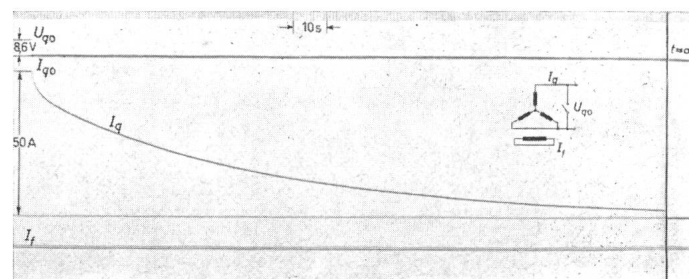


Fig. 3

Abklingen des Gleichstromes in der Querachse

Objekt: 6250 kVA, 13,8 kV, 750 U./min, mit lamellierten Polschuhen und vollständiger Dämpferwicklung

U_q , I_q Statorspannung bzw. Statorstrom in der Querachse;
 I_f Polradstrom

Der Index «0» bedeutet den Anfangswert

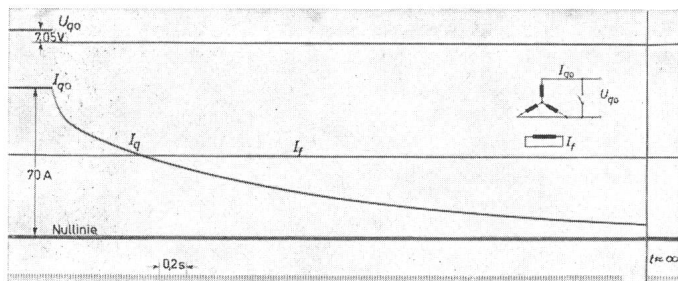


Fig. 4

Wie Fig. 3, aber bei 7500 kVA, 15,5 kV, 1500 U./min

Derselbe Verlauf kann auch mit anderen zwei Geraden im halblogarithmischen Koordinatensystem nachgebildet werden:

$$\begin{aligned} i_{q1} &= 0,842 \\ \tau_{q1} &= 0,72 \text{ s} \\ i_q &= 0,158 \\ \tau_{q2} &= 0,021 \text{ s} \end{aligned}$$

Daraus ergibt sich ein anderes Resultat. Diese Werte wurden in Tabelle I zusammengestellt und mit dem Resultat der direkten Messungen verglichen.

Obwohl die Abweichungen in diesem Beispiel durchaus annehmbar sind, ist ersichtlich, dass eine fast unmerkliche Abweichung von ca. 1 % für i_{q1} durch ein geringfügig anderes Anlegen der ersten Geraden eine Abweichung von ca. 7 % bei der subtransienten Reaktanz zur Folge hat. Die Ursache dieser Vergrößerung der Abweichung im Verhältnis von 1:7 wird im Abschnitt 5 besprochen.

Resultat der Gleichstrommessungen in der q-Achse (Fig. 3)

Generator: 6250 kVA, 13,8 kV, 750 U./min mit lamellierten Polschuhen und Dämpferwicklung
Gleichstrom $I_{q0} = 5,0 \text{ A}$

Tabelle I

	X_q p. u.	X_q'' p. u.	T_q'' s	$T_{q0}'' = T_q$ s	Bemerkungen
Auswertung I	0,72	0,145	0,0286	0,142	Auswertung bis 3 s
Auswertung II	0,72	0,136	0,025	0,13	
Messung	0,76	0,138	0,022	—	gemäss [6]

Für den Vergleich seien die Reaktanzen herangezogen, da die Zeitkonstanten verhältnismässig schwerer zu bestimmen sind.

Ein anderes Beispiel sieht man in Fig. 4, welches bei einer lamellierten Schenkelpolmaschine aufgenommen wurde. Das Resultat der Auswertungen bis 3 bzw. 1,4 s ist in Tabelle II

Resultat der Gleichstrommessungen in der q-Achse (Fig. 4)

Generator: 7500 kVA, 15,5 kV, 1500 U./min mit lamellierten Polen und Dämpferwicklung
Gleichstrom $I_{q0} = 70 \text{ A}$

Tabelle II

	X_q p. u.	X_q'' p. u.	T_q'' s	T_{q0}'' s	Bemerkungen
Auswertung I	1,0	0,17	0,09	0,52	Auswertung bis 3 s
Auswertung II	0,985	0,16	0,07	0,43	
Messung	1,1	0,145	—	0,5	gemäss [6]
Messung	—	0,15	—	—	im Stillstand mit Wechselstrom, $I = 36...220 \text{ A}$

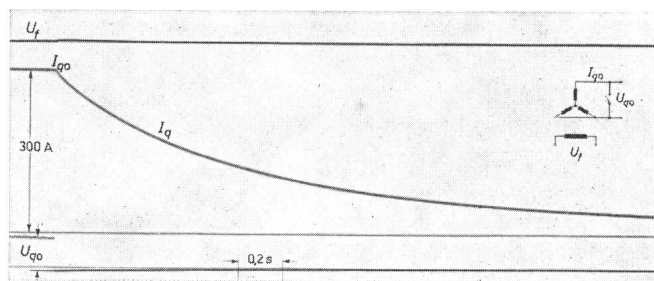


Fig. 5

Wie Fig. 3, aber mit massiven Polen ohne Dämpferwicklung und Ring

zu sehen. Bei der ersten Auswertung scheint noch eine weitere Zeitkonstante vorhanden zu sein, da der Verlauf von I_{q2} keine ausgesprochene Gerade ist. Aber die grösste Abweichung von ca. 1 mm im Bereich 0,15...0,4 s ist neben dem gesamten Betrag von 40 mm sehr gering (ca. 3 %). Wenn man aber die Auswertung bis 1,4 s macht, merkt man von der Existenz der dritten Zeitkonstante überhaupt nichts mehr.

Wenn man die Auswertung bis 5 s ausdehnt und mit drei Zeitkonstanten arbeitet, erhält man $X_q = 1,05 \text{ p.u.}$ und $X_q'' = 0,15 \text{ p.u.}$ Dieses Resultat stimmt mit demjenigen der Messungen gut überein. Trotzdem darf aber nicht verallgemeinert werden, dass die bis 5 s ausgedehnte Auswertung immer ein besseres Resultat ergibt (siehe Tabelle IV).

Um den Einfluss der Subjektivität der Methode besser beurteilen zu können, wurde eine andere Person gebeten, das aufgenommene Oszillogramm unabhängig vom Verfasser auszuwerten. Sie kannte das Resultat der Messungen nicht. Die Auswertung ergab $X_q'' = 0,20 \text{ p.u.}$

Ist der richtige Wert $X_q'' = 0,15 \text{ p.u.}$ aus den direkten Messungen nicht bekannt, kann man als subtransiente Reaktanz ohne weiteres 0,16, 0,17 oder sogar 0,20 p.u. angeben.

Der gleiche Versuch wurde bei einer Schenkelpolmaschine mit massiven Polen ohne Dämpferwicklung und ohne Ring wiederholt (Fig. 5). Das Resultat der Auswertungen wurde in Tabelle III zusammen mit demjenigen der direkten Messungen eingetragen. Ein Vergleich macht deutlich, dass das Resultat der Gleichstrommessungen bei einer Maschine mit massiven Polen und ohne Dämpferwicklung von der Wirklichkeit weit entfernt sein kann. Weder die Auswertung mit drei Zeitkonstanten, noch die Auswertung mit zwei Zeitkonstanten

Resultat der Gleichstrommessungen in der q-Achse (Auswertung von Fig. 5)

Generator: 7500 kVA, 5,5 kV, 1500 U./min mit massiven Polen ohne Dämpferwicklung und ohne Ring
Gleichstrom $I_{q0} = 300 \text{ A}$

Tabelle III

	X_q p. u.	X_{q1}'' p. u.	X_{q2}'' p. u.	T_{q1}'' s	T_{q2}'' s	T_{q0}'' s	T_{q0}'' s	Bemerkungen
Auswertung I	1,26	0,715	0,497	2,43	0,0665	4,48	0,094	1)
Auswertung II	1,02	—	0,63	—	0,89	—	1,44	2)
Auswertung III	0,805	—	0,44	—	0,11	—	0,2	3)
Messung	0,805	—	0,20 ⁶⁾	—	—	—	0,2	4)
Messung	—	—	0,153 ⁶⁾	—	—	—	—	5)

1) Bis 5 s mit 3 Zeitkonstanten

2) Bis 3 s mit 2 Zeitkonstanten

3) Bis 1 s mit 2 Zeitkonstanten

4) Bei 40 % U_n , Anfangsstrom ca. 1000 A

5) Im Stillstand mit Wechselstrom $I = 210 \text{ A}$

6) Der Unterschied ist auf die Sättigung zurückzuführen.

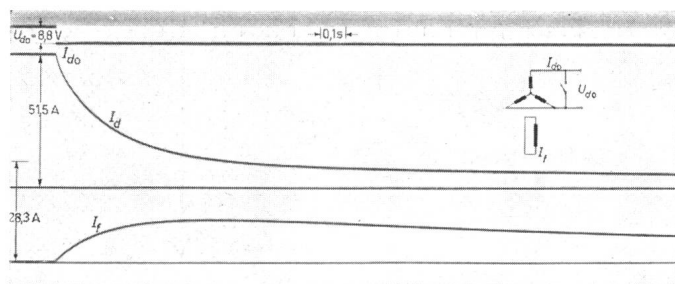


Fig. 6

Abklingen des Gleichstromes in der Längsachse

Objekt: 6250 kVA, 13,8 kV, 750 U./min, mit lamellierten Polschuhen und vollständiger Dämpferwicklung

U_d , I_d Statorspannung bzw. Statorstrom in der Längsachse;

I_f Polradstrom

Der Index «0» bedeutet den Anfangswert

Resultat der Gleichstrommessungen in der d-Achse (Auswertung von Fig. 6)

Generator wie bei Tabelle I
Gleichstrom $I_{d0} = 50$ A

Tabelle IV

	X_d p. u.	X_d' p. u.	X_d'' p. u.	T_d' s	T_d'' s	T_{d0}' s	T_{d0}'' s	Bemerkungen
Auswertung I	1,16	0,3	0,16	0,925	0,0341	3,65	0,0633	bis 3 s
Auswertung II	1,02	0,286	0,136	0,749	0,0173	2,72	0,0357	bis 2 s
Messung	1,05	0,28	0,147	1,25	0,02	—	—	Aus 3-Phasen-Stosskurzschluss bei 10% U_n

liefern die richtigen Werte für X_q und X_q'' . Die grosse Abweichung weist darauf hin, dass es sich hier ausser Auswertungsfehlern auch um einen grundsätzlichen Fehler handeln muss. Die Ursachen der Fehler werden im nächsten Abschnitt 5 besprochen.

4.2 Längsachse

Die Auswertungen für die d-Achse sind wegen der Feldwicklung noch komplizierter. In Fig. 6 sieht man das Abklingen des Gleichstromes bei einer Schenkelpolmaschine mit lamellierten Polschuhen und Dämpferwicklung. Der ganze Verlauf bis 2 bzw. 3 s kann mit drei Exponentialfunktionen dargestellt werden. Die Abweichung von der tatsächlichen Kurve ist kleiner als die Genauigkeit bei der Ablesung. Das Resultat dieser zwei Auswertungen ist in Tabelle IV zu sehen. Die Abweichung bei X_d'' beträgt ca. 18%, was noch als annehmbar bezeichnet werden kann.

Es ist bemerkenswert, dass die Auswertung in Tabelle IV bis zu 2 s ein besseres Resultat ergibt als die Auswertung bis zu 3 s.

Der Versuch wurde an der Maschine mit massiven Polen ohne Dämpferwicklung wiederholt (Fig. 7). Um den stören-

den Einfluss der Bürsten ausschalten zu können, wurde der Polradkreis direkt (ohne Bürsten) kurzgeschlossen. Die Auswertung bis zu 5 s zeigt, dass das Abklingen des Gleichstromes innerhalb der Ablesegenauigkeit mit 3 Exponentialfunktionen dargestellt werden kann. Trotz dieser genauen Nachbildung während 5 s weicht das Resultat von demjenigen der direkten Messungen sehr stark ab (siehe Tabelle V).

5. Ursachen der Abweichungen

In Abschnitt 4 wurde gezeigt, dass der Fehler besonders bei den Maschinen mit massiven Polen und ohne Dämpferwicklung bis zu 100% betragen kann. Diese Feststellung widerspricht der Behauptung, dass der Fehler bei den Gleichstrommessungen zur Bestimmung der charakteristischen Grössen von Synchronmaschinen ca. 2...3% beträgt [1].

Die Ursachen für diese Abweichungen können in drei Gruppen unterteilt werden:

1. Störgrössen;
2. Auswertungsfehler;
3. Physikalische Fehler.

Als Störgrösse kommt in erster Linie der variable Bürstenübergangswiderstand im Polradkreis in Frage. Die Wirkung dieses Effektes kann verkleinert werden, indem man entweder mit einem grösseren Gleichstrom als 25% I_n arbeitet, oder indem man den Polradkreis direkt (ohne Bürsten) über einen kleinen konstanten Widerstand schliesst, welcher den im normalen Betrieb vorhandenen Zusatzwiderstand — herrührend von Zuleitungen, Erregermaschine usw. — ersetzt. Der Einfluss des Bürstenspannungsabfalls ist besonders bei den Zeitkonstanten sehr gross.

Bei den Gleichstrommessungen werden die charakteristischen Grössen nicht direkt gemessen, sondern aus den gemessenen Zwischengrössen berechnet. Bereits ein kleiner Fehler bei den Zwischengrössen i_{sc} und τ_{sc} kann das Resultat verhältnismässig stark beeinflussen. Dies soll hier an einem Beispiel gezeigt werden.

Resultat der Gleichstrommessungen in der d-Achse (Auswertung von Fig. 7)

Generator wie in Tabelle III
Gleichstrom 202 A

Tabelle V

	X_d p. u.	X_d' p. u.	X_d'' p. u.	T_d' s	T_d'' s	T_{d0}' s	T_{d0}'' s	Bemerkungen
Auswertung	2,21	0,225	0,182	0,928	0,109	9,35	0,131	bis 5 s
Messung	1,38	0,222	0,121	0,77	0,026	—	—	Aus Stosskurzschluss bei 22% U Auswertung bis 0,6 s
Messung	—	—	—	—	—	5,2	—	Aus Abschaltversuch
Messung	—	—	0,136	—	—	—	—	Aus Stillstandmessung mit $I = 400$ A

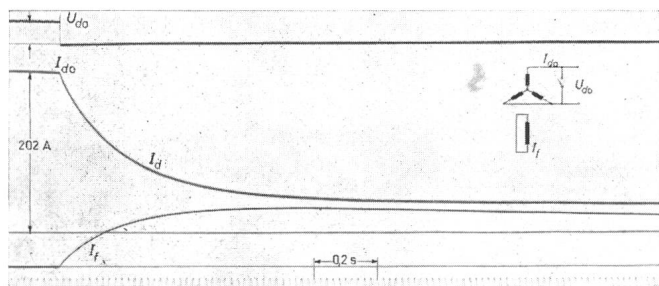


Fig. 7

Wie Fig. 6, aber bei 7500 kVA, 5,5 kV, 1500 U./min, mit massiven Polen ohne Dämpferwicklung und Ring

Bei der ersten Auswertung zu Fig. 3 war $X_q'' = 0,145$ p.u. Die Zwischengrößen waren:

$$\begin{aligned} i_{q1} &= 0,832 & \tau_{q1} &= 0,725 \text{ s} & i_{q1}/\tau_{q1} &= 1,15 \\ i_{q2} &= 0,168 & \tau_{q2} &= 0,024 \text{ s} & i_{q2}/\tau_{q2} &= 7,0 \end{aligned}$$

Wenn die erste Gerade um ca. 1% steiler angelegt wird, kann man aus der Figur als neue Zwischengröße folgende Werte ablesen:

$$\begin{aligned} i_{q1} &= 0,842 & \tau_{q1} &= 0,72 \text{ s} \\ i_{q2} &= 0,158 & \tau_{q2} &= 0,021 \text{ s} \end{aligned}$$

Nach Gl. (4) ergibt sich daraus:

$$X_q'' = \frac{0,00377 \cdot 314}{\frac{0,842}{0,72} + \frac{0,158}{0,021}} = 0,136 \text{ p.u.}$$

Dieser Wert weicht vom ersten um ca. 7% ab. Hätte man die erste Gerade bei der Auswertung eines Stossschlusschlusses um ca. 1% steiler angelegt, wäre die Abweichung bei X_d' und X_q'' vom ersten Resultat wiederum ca. 1%. Nach Gl. (3) und (4) ist aber X_s bzw. X_s'' hauptsächlich von der grössten bzw. kleinsten Zeitkonstante abhängig. Der Fehler bei der Bestimmung der Zeitkonstanten beeinflusst hier direkt die Reaktanzen. Dadurch wird der Auswertungsfehler bei den Gleichstrommessungen verhältnismässig grösser.

Aus diesem Grunde müssen die Auswertungen viel sorgfältiger gemacht werden als bei den normalen Stossschlusschlüssen. Obwohl diese Tatsache bei den hier angegebenen Beispielen leicht einzusehen ist, soll dieser Sachverhalt an Hand eines Beispiels aus der Literatur bekräftigt werden.

Die subtransiente Reaktanz X_d'' eines Turbogenerators wurde aus den Gleichstrommessungen zu 0,6 p.u. ermittelt [3]. Das Abklingen des Gleichstromes wurde nach einer Auswertung mit vier Exponentialfunktionen nachgebildet. Die Amplituden und Zeitkonstanten sind:

$$\begin{aligned} i_{d1} &= 4,6 \text{ mm} \triangleq 0,1004 \text{ p.u.} & \tau_{d1} &= 11,6 \text{ s} \\ i_{d2} &= 7,6 \text{ mm} \triangleq 0,1660 \text{ p.u.} & \tau_{d2} &= 5,28 \text{ s} \\ i_{d3} &= 33,0 \text{ mm} \triangleq 0,7203 \text{ p.u.} & \tau_{d3} &= 0,206 \text{ s} \\ i_{d4} &= 0,61 \text{ mm} \triangleq 0,0133 \text{ p.u.} & \tau_{d4} &= 0,007 \text{ s} \end{aligned}$$

und

$$R_a = 0,00275 \text{ p.u.}$$

Mit diesen Werten ergibt sich nach Gl. (4):

$$X_d'' = \frac{0,00275 \cdot 314}{0,009 + 0,031 + 3,5 + 1,9} \approx 0,16 \text{ p.u.}$$

Das Resultat stimmt mit demjenigen der direkten Messungen (0,158 und 0,152) sehr gut überein. Man muss aber bedenken, dass dieses Ergebnis auf der Existenz einer Exponential-

funktion mit der Amplitude von 0,61 mm und der Zeitkonstanten 0,007 s beruht, die durch Differenzenbildung der abgelesenen Längen in der Grössenordnung von 45 mm festgestellt worden ist. Daher ist es zweifelhaft, ob jede auswertende Person das ähnliche Resultat finden wird, ohne das Ergebnis von vornherein zu kennen. Die vierte Exponentialfunktion kann mit Leichtigkeit im Bereich der Ablesegenauigkeit verschwinden, und somit wird das Resultat von 0,16 p.u. auf ca. 0,24 p.u. springen, womit der Fehler 50% beträgt.

Die dritte Fehlerquelle, physikalischen Ursprungs, ist der Einfluss der massiven Eisenteile. Dieser wirkt sich sehr stark — besonders bei Maschinen mit massiven Polen und ohne Dämpferwicklung (siehe Tabelle III und VI) aus. Die massiven Teile weisen eine Transferfunktion auf, welche im Originalbereich der Laplace-Transformation keiner Exponentialfunktion entspricht [7]:

$$\frac{Q(p)}{P(p)} = k \frac{\sqrt{p} \alpha}{1 + \sqrt{p} \alpha} \approx \sum_i k_i \frac{p T_i}{1 + p T_i} \rightarrow \sum_i k_i e^{-\frac{t}{T_i}}$$

Da $Q(p)$ und $P(p)$ hier irrational sind, kann das Abklingen des Gleichfeldes in einem Eisenstück theoretisch nicht mehr als Summe von Exponentialfunktionen gebildet werden. Demzufolge ist die Anwendbarkeit der abgeleiteten Gleichungen zur Gleichstrommessung je nach der Ausführung der Maschine mehr oder weniger begrenzt. Die Gleichungen sind für eine Maschine mit massiven Polen und ohne Dämpferwicklung, wo die massiven Teile den ganzen Vorgang sehr stark beeinflussen, nicht mehr richtig.

Man wird hier beanstanden, dass man in der Praxis mit Erfolg auch bei solchen Maschinen das Abklingen des Stator-Kurzschlussstromes während 0,5 s angenähert durch zwei Exponentialfunktionen beschreiben kann. Daraus würde man auf den ersten Blick erwarten, dass die gleiche Annäherung auch beim Abklingen des Gleichstromes gelten soll. Diese Überlegung ist aber nicht berechtigt. Erstens darf man hier die Auswertung nicht mehr auf 25 Perioden beschränken, und zweitens ist die Gesetzmässigkeit beim Abklingen des Stator-Kurzschlussstromes eine ganz andere, als die beim Abklingen des Gleichstromes. Im ersten Fall wird der Ausgleichsvorgang bedingt durch die Rotations-EMK und im zweiten durch die Transformations-EMK. Während die Rotations-EMK sich proportional mit dem Abklingen des Flusses ändert ($\omega\Phi$), ändert sich die Transformations-EMK proportional zur ersten Ableitung des Flusses, nämlich gemäss $d\Phi/dt$. Deswegen darf man hier nicht die gleiche Annäherung erwarten.

Aus diesen Gründen sollen Gleichstrommessungen mit grosser Sorgfalt und nur bei solchen Maschinen angewandt werden, die entweder lamelliert sind, oder eine starke Dämpferwicklung besitzen, die den Einfluss der Wirbelströme wesentlich herabsetzt.

6. Zusammenfassung

Da Gleichstrommessungen zur Bestimmung der charakteristischen Grössen von Synchronmaschinen leicht durchzuführen sind, wurde diese Methode im Dokument 26(Secrétaire)11 der Commission Electrotechnique Internationale (CEI) zur Ermittlung von Frequenzgängen empfohlen. Es wird aber an Hand von Messungen gezeigt, dass die Anwendbarkeit der Methode durch verschiedene unvermeidbare Mess- und Auswertungsfehler stark begrenzt ist

Es wurde auch gezeigt, dass diese Methode überhaupt nur bei solchen Maschinen angewandt werden darf, die entweder lamelliert sind oder die eine starke Dämpferwicklung besitzen, welche den Einfluss der Wirbelströme wesentlich herabsetzt. Auch sind die Auswertungen sehr subjektiv. Ein kleiner Ablesfehler kann unter Umständen z.B. in der d-Achse eine Abweichung von 50% zur Folge haben. Die Fehlermöglichkeiten ist in der q-Achse verhältnismässig kleiner.

Im weiteren ist es empfehlenswert, mit grösseren Gleichströmen als 25% I_n zu arbeiten, um den störenden Einfluss des variablen Bürsten-Übergangswiderstandes klein zu halten. Di3 oszillographischen Aufnahmen sollen mit grosser Papiergeschwindigkeit gemacht werden; sie müssen auch viel sorgfältiger ausgewertet werden, als die der gewöhnlichen Stosskurzschluss-Oszillogramme.

Anhang

Ableitung der allgemeinen mathematischen Grundlagen

Der üblichen Theorie der Synchronmaschine liegt die Annahme zu Grunde, dass der Dämpferkreis mit je einer Ersatzdämpferwicklung in Längs- und Querachse nachgebildet werden kann. Trifft diese Annahme nicht zu, dann ist es notwendig, ausser transienten und subtransienten Reaktanzen und Zeitkonstanten andere Zwischengrössen zu definieren. Die kleinste Reaktanz der Längs- bzw. Querachse wurde von manchen Autoren auch bei Maschinen mit mehreren Ersatzdämpferwicklungen als «subtransiente Reaktanz» bezeichnet [3], obwohl die ursprüngliche Definition der subtransienten Reaktanz mit einer Ersatzdämpferwicklung gemacht wurde. Diesem Beispiel folgend, sind die neu auftretenden Grössen in Tabelle VI zusammengestellt. In dieser Art der Bezeichnung haben die alten Definitionen ihre Bedeutung beibehalten.

Bezeichnungen für Reaktanzen und Zeitkonstanten bei einer Maschine mit n -Ersatzdämpferwicklungen

Tabelle VI

Name (Ursache)		Syn- chrone Reak- tanz (Stator)	Transiente Reaktanz bzw. Zeitkonstante (Feldwicklung)	Zwischen- Reaktanzen und Zeitkonstanten (Massive Eisenteile)	Subtransiente Reaktanz bzw. Zeitkonstante (Dämpfer- wicklung)
d-Achse	Reaktanzen	X_d	X_d'	$X_{d1}'', X_{d2}'' \dots$	$X_{dn}'' \equiv X_d''$
	Zeit- konstante ¹⁾	—	T_d'	$T_{d1}'', T_{d2}'' \dots$	$T_{dn}'' \equiv T_d''$
q-Achse	Reaktanzen	X_q	—	$X_{q1}'', X_{q2}'' \dots$	$X_{qn}'' \equiv X_q''$
	Zeit- konstante ¹⁾	—	—	$T_{q1}'', T_{q2}'' \dots$	$T_{qn}'' \equiv T_q''$

¹⁾ gilt in ähnlicher Weise auch für Leerlaufzeitkonstanten mit Index 0.

Mit den Bezeichnungen in Tabelle VI können die Reaktanzoperatoren $X_d(p)$ und $X_q(p)$ im allgemeinen wie folgt geschrieben werden:

$$\frac{1}{X_s(p)} = \frac{1}{X_s} \frac{(1 + p T_{s0}') (1 + p T_{s01}'') \dots (1 + p T_{s0n}'')}{(1 + p T_{s1}') (1 + p T_{s11}'') \dots (1 + p T_{s1n}'')} = \frac{Q(p)}{P(p)} \quad (\text{A1})$$

oder in Partialbrüche zerlegt:

$$\frac{1}{X_s(p)} = \frac{1}{X_s} + \left(\frac{1}{X_{s1}'} - \frac{1}{X_s} \right) \frac{p T_{s1}'}{1 + p T_{s1}'} + \left(\frac{1}{X_{s1}''} - \frac{1}{X_{s1}'} \right) \frac{p T_{s1}''}{1 + p T_{s1}''} + \sum_{i=2}^n \left(\frac{1}{X_{si}''} - \frac{1}{X_{s(i-1)}''} \right) \frac{p T_{si}''}{1 + p T_{si}''} \quad (\text{A1a})$$

wobei

$$\frac{1}{X_{si}''} - \frac{1}{X_{s(i-1)}''} = \lim_{p \rightarrow -\frac{1}{T_{si}''}} \frac{Q(p)}{P(p)} \cdot \frac{1 + p T_{si}''}{p} \quad (\text{A2})$$

Der Index s charakterisiert hier sowohl die d-Achse als auch die q-Achse. Da die q-Achse keine Feldwicklung aufweist, muss für die transiente Zeitkonstante bzw. Reaktanz der Querachse Null bzw. die synchrone Reaktanz eingesetzt werden ($X'q = Xq$, $T'q = 0$).

Wenn die Kurzschlusszeitkonstante T_s' , $T_s'' \dots T_{sn}''$ und die Leerlaufzeitkonstanten T_{s0}' , $T_{s0}'', \dots T_{s0n}''$ bekannt sind, kann man die nach der zweiten Schreibweise gemäss Gl. (A 1a) definierten Reaktanzen X_s' , X_s'' , X_{si}'' [$i = 1 \dots (n-1)$] bestimmen.

Schliesst man den mit Gleichstrom zweipolig gespeisten Stator kurz, wobei sich der Rotor entweder in der d- oder q-Stellung befindet, so klingt der Gleichstrom mit $m = n + 2$ oder $n + 1$ Zeitkonstanten auf Null ab [Gl. (A1)]:

$$\frac{I(t)}{I_0} = \sum_{c=1}^m i_{sc} e^{-\frac{t}{\tau_{sc}}} \quad (\text{A3})$$

Im Bildbereich der Laplace-Transformation entspricht diesem Verlauf die Gleichung:

$$\frac{I(p)}{I_0} = \sum_{c=1}^m i_{sc} \frac{p \tau_{sc}}{1 + p \tau_{sc}} \quad (\text{A4a})$$

oder

$$\frac{I(p)}{I_0} = 1 - \sum_{c=1}^m \frac{i_{sc}}{1 + p \tau_{sc}} \quad (\text{A4b})$$

Nach der Auswertung der aufgenommenen Oszillogramme sind die Anteile i_{sc} in % und die Zeitkonstanten τ_{sc} in s bekannt. Andererseits erhält man für das Abklingen des Gleichstromes unter Verwendung des 2. Kirchhoffschen Satzes die folgende Beziehung:

$$I(p) - I_0 = - \frac{I_0 R_a}{R_a + p \cdot X_s(p)}$$

Daraus folgt:

$$\frac{I(p)}{I_0} = \frac{p \cdot P(p)}{p \cdot P(p) + R_a \cdot Q(p)} \quad (\text{A5a})$$

oder in einer anderen Form

$$\frac{I(p)}{I_0} = 1 - \frac{R_a \cdot Q(p)}{p \cdot P(p) + R_a \cdot Q(p)} \quad (\text{A5b})$$

Vergleicht man die Gleichungen (A4a) und (A5a) miteinander, so sieht man sofort, dass die Wurzel aus $P(p)$, nämlich für die Längsachse:

$$-\frac{1}{T_d'}, -\frac{1}{T_{d1}''}, \dots, -\frac{1}{T_{dn}''}$$

und für die Querachse,

$$-\frac{1}{T_{q1}''}, \dots, -\frac{1}{T_{qn}''}$$

gleich den Wurzeln der Gleichung:

$$\frac{P(p)}{p \cdot P(p) + R_a \cdot Q(p)} = \sum_{c=1}^m i_{sc} \frac{\tau_{sc}}{1 + p \tau_{sc}} = 0 \quad (\text{A6})$$

sind [5]. Ersetzt man p durch $-1/T$, so wird Gl. (A6) zu:

$$\sum_{c=1}^m \frac{i_{sc} \tau_{sc}}{T - \tau_{sc}} = 0 \quad (\text{A6a})$$

Die Wurzeln dieser Gleichung sind die Kurzschlusszeitkonstanten.

In gleicher Weise können die Leerlaufzeitkonstanten aus den Wurzeln der Gleichung:

$$\frac{R_a \cdot Q(p)}{p \cdot P(p) + R_a \cdot Q(p)} = \sum_{c=1}^m \frac{i_{sc}}{1 + p \tau_{sc}} = 0 \quad (\text{A7})$$

berechnet werden. Gl. (A7) ergibt sich aus dem Vergleich zwischen Gl. (A4b) und (A5b). Mit $p = -1/T_0$ wird diese zu:

$$\sum_{c=1}^m \frac{i_{sc}}{T_0 - \tau_{sc}} = 0 \quad (\text{A7a})$$

Die Wurzel dieser Gleichung sind die Leerlaufzeitkonstanten.

Setzt man in Gl. (A6) $p = 0$ ein, so erhält man $P(0)/R_a Q(0)$, was X_s/R_a ist. Somit kann die synchrone Reaktanz der Längs- bzw. Querachse aus der Gleichung:

$$X_s = R_a \sum_{c=1}^m i_{sc} \tau_{sc} \quad (\text{A8})$$

ermittelt werden. In ähnlicher Weise erhält man eine Gleichung für die subtransiente Zeitkonstante, wenn man die Gl. (A7) mit p multipliziert und dann $p = \infty$ setzt.

$$\begin{aligned} \lim_{p \rightarrow \infty} \sum_{c=1}^m \frac{p i_{sc}}{1 + p \tau_{sc}} &= \sum_{c=1}^m \frac{i_{sc}}{\tau_{sc}} = \\ &= \lim_{p \rightarrow \infty} \frac{p \cdot R_a Q(p)}{p \cdot P(p) + R_a \cdot Q(p)} = \frac{R_a}{X_s''} \end{aligned}$$

Daraus folgt:

$$X_{sn}'' = X_s'' = \frac{R_a}{\sum_{c=1}^m \frac{i_{sc}}{\tau_{sc}}} \quad (\text{A9})$$

Es soll hier nachdrücklich betont werden, dass die kleinste Reaktanz X_{sn}'' auch bei einer Nachbildung mit mehreren Ersatzdämpferwicklungen als subtransiente Reaktanz X_s'' bezeichnet wurde [3], obwohl die subtransiente Reaktanz ursprünglich in der Theorie für Maschinen mit nur einer Ersatzdämpferwicklung definiert worden ist.

Nachdem die Kurzschluss- und Leerlaufzeitkonstanten als Wurzeln der Gl. (A6) und (A7) und die synchrone und subtransiente Reaktanzen nach den Gl. (A8) und (A9) ermittelt worden sind, können die anderen Reaktanzen mit Hilfe von Gl. (A2) berechnet werden. Für die transiente Reaktanz der Längsachse folgt daraus:

$$\frac{1}{X_d'} = \frac{1}{X_d} + \lim_{p \rightarrow -\frac{1}{T_d'}} \frac{Q(p)}{P(p)} \cdot \frac{1 + p T_d'}{p} \approx \frac{T_{d0}'}{T_d'} \cdot \frac{1}{X_d} \quad (\text{A10})$$

Literatur

- [1] K. Pawluk: Méthode statique de mesure des constantes de temps et des réactances d'une machine synchrone. Rev. gén. Electr. 71(1962)6, S. 303...312.
- [2] E. Kazovski: Übergangsvorgänge und Frequenzgänge von Wechselstrommaschinen. Acta techn. (Czechoslovakia) 5(1960)2, S. 69...110.
- [3] E. Kazovski and G. Rogozin: Experimental Determination of the Frequency-Response Characteristics of Turbo-Generators. Elektritschestvo -(1963)10, S. 14...22.
- [4] K. Fork: Ermittlung des Reaktanzoperators elektrischer Maschinen mit Gleichstrom. ETZ-A 85(1964)14, S. 426...430.
- [5] P. Bharali and B. Adkins: Operational Impedances of Turbogenerators with solid Rotors. Proc. IEE 110(1963)12, S. 2185...2200.

Adresse des Autors:

M. Canay, dipl. Ingenieur, AG Brown, Boveri & Cie., Abt. MFVL, 5242 Birm.

Beiträge zum Problem der kritischen elektrischen Feldstärke in Hochspannungsgeräten

Von G. Cremosnik, Zürich

621.3.095.3

Ein wichtiges Problem in der Praxis der Hochspannungstechnik ist der Einfluss von vorstehenden Rändern in Bezug auf die auftretende maximale elektrische Feldstärke. Diese Feldstärke ist nur für einfache Fälle theoretisch bestimmbar, wie z. B. im Falle einer halbkreisförmigen Form des vorstehenden Randes. Mit Hilfe des Spiegelungsverfahrens wurde die Berechnung auf den Fall eines elliptischen Zylinders erweitert. Näherungsweise kann diese Berechnung auch für abgerundete Plattformen angewendet werden.

1. Einleitung

Im allgemeinen stehen zwei Mittel zur Verfügung, die maximale elektrische Feldstärke zu beeinflussen. Das erste ist die Anwendung von Isolierstoffen mit der relativen Dielektrizitätskonstante grösser als Eins ($\epsilon_r > 1$). Die Durchschlagfeldstärke liegt bei diesen Isolierstoffen viel höher, womit auch die kritische Feldstärke beeinflusst wird.

Dieses Mittel kann jedoch nicht immer angewendet werden. Denke man nur an Ausführungen, wo einzig Luft als Isolation in Betracht kommt. Dazu gehören auch Probleme bei Strahlerzeugungssystemen im Hochvakuum, wo mit $\epsilon_r = 1$ gerechnet werden muss. In diesen Fällen ist die kri-

Un important problème pratique en technique de la haute tension est l'influence de rebords sur l'intensité maximale du champ électrique. Cette intensité ne peut être déterminée théoriquement que dans des cas simples, par exemple quand il s'agit d'un rebord semi-cylindrique. A l'aide du procédé de symétrie inverse, le calcul est étendu à un cylindre elliptique. D'une façon approchée, ce calcul peut également être appliqué à des formes planes arrondies.

tische, elektrische Feldstärke nur von der geometrischen Konfiguration abhängig. Es liegt am Konstrukteur, die geometrische Ausführung möglichst günstig zu gestalten, so dass die auftretende maximale elektrische Feldstärke den kritischen Wert nicht überschreitet.

Leider ist die maximale elektrische Feldstärke nur bei wenigen einfachen geometrischen Formen theoretisch exakt bestimmbar. In den meisten praktischen Fällen begnügt man sich, die gestellte Aufgabe nur näherungsweise zu lösen, indem man vereinfachte Konfigurationen annimmt. Im folgenden wird ein praktisch oft auftretender zweidimensionaler Fall theoretisch betrachtet. Das bekannte Spiegelungsverfah-