

**Zeitschrift:** Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

**Herausgeber:** Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

**Band:** 68 (1977)

**Heft:** 12

**Artikel:** Optimale Dimensionierung von Toruselektroden

**Autor:** Bachmann, B.

**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-915040>

### **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:** 14.01.2026

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

# Optimale Dimensionierung von Toruselektroden

Von B. Bachmann

621.039.626

Um höchste Spannungen zu beherrschen, muss die grundlegende Forderung, Potential und Feld längs isolierender Strecken möglichst gleichmässig zu verteilen, genauestens beachtet werden. Toroidsysteme mit variabler Geometrie stellen eine gute Möglichkeit dar, durch Einbringen in den Feldraum entscheidenden Einfluss auf die zu optimierenden Parameter zu nehmen. Auslegungskriterien dazu sowie der Einsatzbereich von Toroidsystemen werden vorgestellt. Eine empirisch entwickelte Beziehung zur einfachen und schnellen Berechnung der Einsatzspannung speziell von Einfachtoroiden wird aufgezeigt und diskutiert.

Pour contrôler les tensions très élevées, il importe de satisfaire à l'exigence fondamentale de répartir le potentiel et le champ régulièrement le long de la distance isolante. L'introduction de systèmes toroïdes de géométrie variable dans le champ électrique permet d'exercer une influence décisive sur les paramètres à optimiser. Des critères de dimensionnement et les domaines d'application sont présentés. Une formule empirique est avancée et discutée permettant de calculer rapidement la tension initiale, en particulier pour toroïdes simples.

## 1. Einführung

Zur Auslegung von Hochspannungselektroden für rotationssymmetrische Systeme können nicht mehr allein empirische Werte und Erfahrungen herangezogen werden. Der Übergang zu höchsten Spannungen zwingt den Konstrukteur, sich exakter Rechenwerte zu bedienen – will er auch in Zukunft wirtschaftlich bauen.

Toroide, die wegen ihrer einfachen geometrischen Form und wegen ihrer guten universellen Anwendbarkeit in einem breiten Spektrum viele Möglichkeiten der Einflussnahme auf die Feld- und Potentialverteilung zeigen [1]<sup>1)</sup>, werden nun ebenfalls zunehmend beachtet und exakten Berechnungen unterzogen. So erhält man Angaben über die Verteilung der Oberflächenfeldstärke, über die maximal zulässige Spannung, die Anfangsspannung oder über Einflüsse verschiedener Parameter, etwa einer geerdeten Platte [2; 3]. Alle diese Bemühungen beziehen sich auf reine Toroidanordnungen in Luft und beschränken sich ausserdem auf Einfach- und Doppeltoroide mit gemeinsamem bekanntem Hochspannungspotential.

Darüber hinaus soll nun der Frage nachgegangen werden, inwieweit Toroide neben ihrer Schirmwirkung in der Lage sind, auch Isolierstrecken – also reine Isolationssysteme – spannungsmässig zu beeinflussen und zu steuern. Schliesslich soll eine empirisch entwickelte Formel zur schnellen und über-

schlagsmässigen Berechnung der Einsatzspannung von Einfachtoroiden angeboten werden. Bei den notwendigen umfangreichen Berechnungen wurde als numerisches Näherungsverfahren das Ladungsverfahren [4; 5; 6] – auch bekannt als «charge method» – verwendet.

## 2. Elektrische und geometrische Parameter

Bei der Beurteilung möglicher Toroidsysteme ist zunächst abzugrenzen, welche elektrischen Parameter zur Entscheidung herangezogen werden müssen. Hier sollte eine sinnvolle und begrenzte Auswahl getroffen werden, da der Rechenaufwand nicht beliebig hoch getrieben werden kann. Folgende charakteristischen elektrischen Parameter wurden ausgewählt:

- die Grösse und der Ort der maximalen Oberflächenfeldstärke  $E_{n \max}$  auf den Toroiden
- die Potentialverteilung  $\Phi$  längs des zylindrischen, zwischen den Toroiden eingebrachten Dielektrikums
- die Feldverteilung längs der Grenzschicht, aufgegliedert in die Normalkomponente  $E_n$ , die Tangentialkomponente  $E_t$  und den Betrag  $|E|$ ;
- die Einsatzspannung  $U_e$  und
- die Anfangsfeldstärke  $E_a$

Als nächstes Problem stellt sich die Vielzahl der geometrischen Parameter, die ein System definieren. In Fig. 1 ist ein Doppeltoroidsystem mit zylindrischem Dielektrikum bemast. Neben der Anzahl  $\mu$  der Toroide sind es vier Hauptparameter, die die Geometrie der Elektroden bestimmen: die Durchmesser  $D$  und  $d$  der Toroide sowie die Abstände  $s$  zwischen den Toroiden und  $h$  zur geerdeten Platte. Unter dem Begriff «Platte» sei eine auch den Rechnungen zugrunde gelegte unendlich ausgedehnte Ebene verstanden. Das Medium – falls vorhanden – wird durch den Durchmesser  $D_m$  und die Höhe  $l_m$  fixiert. Bedenkt man nun, dass die aufgeführten Variablen, allein die Toroide betreffend, jeweils  $\mu$ -mal auftreten können, so kann man daraus leicht erkennen, welche Vielzahl von Variationsmöglichkeiten sich ergeben. Es ist daher für die Untersuchungen wichtig, eine feldtheoretisch sinnvolle Auswahl der Varianten untereinander zu treffen. Mit den optimierten Grössen kann dann gestreut und gezielt das gesamte Geometriespektrum durchfahren und die Allgemeingültigkeit der gemachten Aussagen untermauert werden.

## 3. Einfachtoroidsysteme

An einem Einfachtoroidsystem sollen einige im folgenden interessierende elektrische Grössen dargestellt werden. Aus Fig. 2 ist der qualitative, sinusähnliche Verlauf der Oberflächenfeldstärke über den Torus ablesbar, wobei der Ort des Maximums der Feldstärke bei  $\alpha \approx 170^\circ$  liegt.

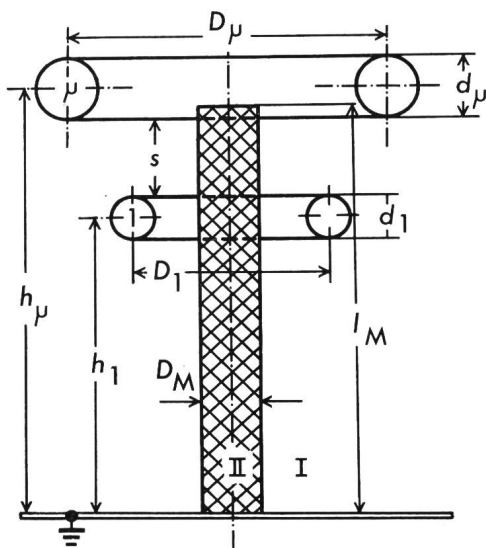


Fig. 1 Bemessung eines allgemeinen Toroidsystems mit  $\mu$  Toroiden und Dielektrikum

I Medium I (in der Regel Luft)  
II Medium II (fester Isolierstoff)

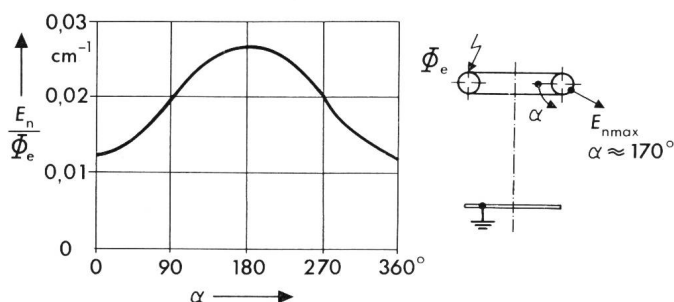


Fig. 2 Qualitativer Verlauf der Oberflächenfeldstärke  $E_n$  in Abhängigkeit des Umfangwinkels  $\alpha$  an einem Einfachtoroidsystem  $\Phi_e$  Potential gegen Erde

Um das wohl entscheidende Verhältnis von  $D/d$  zu erhalten, wurde die maximale Oberflächenfeldstärke  $E_{n\max}$  über den Durchmesser  $D$  eines Toroids in Luft mit dem Parameter  $d$  aufgetragen. Fig. 3 zeigt diesen Zusammenhang und die Bemessung der gewählten Anordnung. Aus der Kurvenschar lässt sich ablesen, dass bei kleinen Durchmessern  $D$  und  $d$  eine relativ hohe Feldstärke auftritt. In diesem Bereich dürfte eine gewünschte minimierte Oberflächenfeldstärke hauptsächlich vom Rohrdurchmesser  $d$  bestimmt werden. Bei Vergrößerung von  $D$  sinkt die Oberflächenfeldstärke rasch ab und strebt einem Grenzwert zu; ebenso zeigt sich deutlich, dass bei einer Vergrößerung von  $d$  die Feldverminderung immer geringer wird, die Kurven also näher zusammenrücken. So ergibt sich ein Optimum für das Verhältnis  $D/d$ , ab dem eine weitere Vergrößerung der beiden Variablen keine deutlichen Absenkungen der Oberflächenfeldstärke mehr erbringt. Dieses Optimum liegt – auch unter dem Aspekt der Wirtschaftlichkeit – für die gezeigte Anordnung bei

$D \approx 100...150$  cm mit  $d/2 \approx 15...20$  cm.

Daraus lässt sich allgemein ein Verhältnis von  $D/d \approx 5$

ableiten; dieser Wert deckt sich gut mit praktischen Fällen und mit der Empirik.

Die Allgemeingültigkeit der hier gemachten Aussagen konnte gut untermauert werden, indem alle Varianten über ein breites Geometrieband hinweg gerechnet wurden. Tendenzmässig ergaben sich für «kleine» (cm-Bereich), «mittlere» (m-Bereich) und «grosse» (einige-m-Bereich) Geometrieverhältnisse gleiche Kriterien. Deswegen sei hier jeweils nur eine Geometrie (in der Regel «mittlere» Geometrie) vorgestellt und damit die Grundrichtung aufgezeigt, um dann Allgemein-Aussagen zu treffen.

#### 4. Doppeltoroidsysteme

Für das einfachste Multitoroidsystem – ein Doppeltoroidsystem – sind in Fig. 4 analog dem Einfachtoroid nach Fig. 2 der Verlauf der Oberflächenfeldstärke an beiden Toroiden und die Orte der Maxima qualitativ aufgetragen. Hier wird zwischen bekannten Potentialen (also dem klassischen «Doppeltoroid») und freien Potentialen [7] unterschieden. Fig. 4a zeigt eine Anordnung, wo beide Toroide verbunden und mit Hoch-

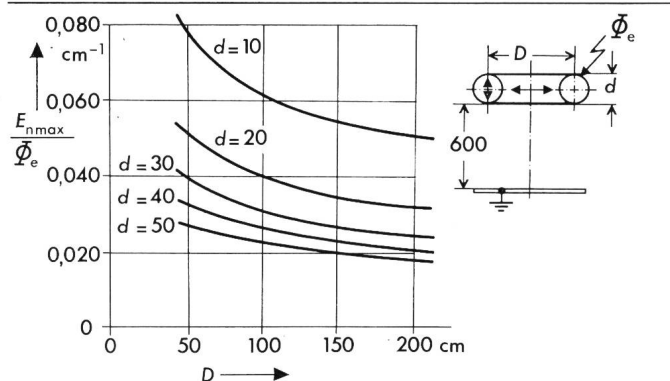


Fig. 3 Variation von Durchmesser  $D$  und Rohrdurchmesser  $d$  eines Toroids unter Berücksichtigung der maximalen Oberflächenfeldstärke  $E_{n\max}$

Parameter: Rohrdurchmesser  $d$ ; Masse in cm

spannungspotential beaufschlagt sind. Die Orte der maximalen Oberflächenfeldstärke liegen bei  $\alpha \approx 150^\circ$  an Torus 1 und  $\alpha \approx 210^\circ$  an Torus 2. Diese Werte erscheinen vernünftig, da sich beide Toroide auf Grund gleichen Potentials feldtheoretisch «abstossen», während sich die Toroide nach Fig. 4b, in der Torus 1 auf freiem Potential liegt, gegenseitig feldtheoretisch «anziehen». Somit sind dort auch die Orte der Maxima bei  $\alpha \approx 270^\circ$  (Torus 1) und  $\alpha \approx 180^\circ$  (Torus 2) zu finden.

Zur weiteren Einengung der geometrischen Parameter wurde untersucht, inwieweit der Einfluss des Bodens berücksichtigt werden muss. So ist in Fig. 5a für ein Doppeltoroidsystem in Luft (beide Toroide haben Hochspannungspotential) das Verhältnis der maximalen Feldstärken  $E_n' = (E_{n1}/E_{n2})_{\max}$  beider Toroide als Funktion des Abstandes  $h$  zum Boden aufgetragen. Angestrebt wird gleiche Belastung auf beiden Toroiden ( $E_n' = 1$ ), was bedeutet, dass der Einfluss des Bodens ausgeschaltet ist. Trägt man die Punkte der Höhen  $h$ , wo diese

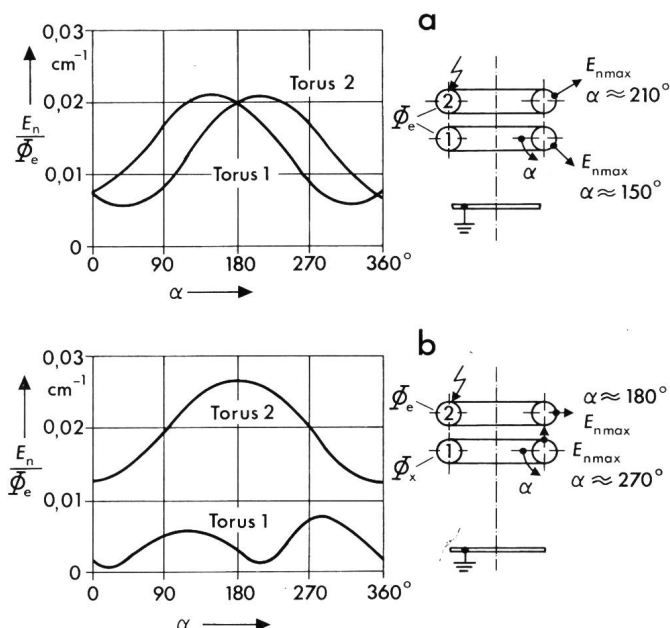


Fig. 4 Qualitativer Verlauf der Oberflächenfeldstärken  $E_n$  in Abhängigkeit des Umfangwinkels  $\alpha$  an einem Doppeltoroidsystem  
a Torus 1 und Torus 2 mit Hochspannungspotential  $\Phi_e$  belegt  
b Torus 1 mit freiem Potential  $\Phi_x$ , Torus 2 mit Hochspannungspotential  $\Phi_e$  belegt

Bedingung erfüllt ist, zu einer Summenkurve für verschiedene Durchmesser  $D$  auf, so bekommt man Fig. 5b. Dass der Einfluss des Bodens auf Grund entsprechender Abstände der Toroide vernachlässigt werden kann, ist bei den sich ergebenden  $h/D$ -Verhältnissen in der Praxis wohl erwünscht, jedoch oftmals nicht gegeben. In diesen Fällen muss man dann, um die Feldstärke am Torus 1 herabzudrücken und derjenigen am Torus 2 anzugleichen, verschiedene Durchmesser wählen. Man wird den Kopftorus (Torus 2) etwas grösser als Torus 1 gestalten [vgl. 3]. Fig. 6 zeigt die maximale Oberflächenfeldstärke verschiedener Toroiddurchmesser der Kopfelektrode. Da der Einfluss des Bodens durch entsprechende Wahl der Höhe  $h$  ausgeschaltet ist, erhält man für  $D_1 = D_2$  gleichgrosse Feldstärken auf beiden Toroiden; vergrössert man dagegen z.B. Torus 2, so übernimmt dieser die grössere Feldkomponente. Würde man die beiden Toroide mit verschiedenen Durchmessern in den Einflussbereich des Bodens bringen, also der Erde annähern, so würde auf dem unteren Torus die Feldstärke schneller als auf dem oberen ansteigen; d.h., man würde auch so bei einem bestimmten Bodenabstand gleiche Feldstärken erhalten.

Als letzte interessierende Grösse zur geometrischen Auslegung von Toroiden erscheint der Abstand von Toroiden zueinander. Gewünscht ist auch hier minimale Oberflächenfeldstärke. Fig. 7 zeigt diesen Zusammenhang und darüber hinaus,

dass der Einfluss gegenseitig doch relativ gering ist. Dennoch kann man ein Verhältnis von

$$s/d \approx 2$$

als günstig erachten; dies heisst, der Abstand  $s$  zweier Toroide mit gleichem Potential zueinander sollte etwa dem 2fachen Rohrdurchmesser  $d$  nahekommen.

## 5. Passivsystem

Bei den zunächst untersuchten echten Multitoroidsystemen ist davon ausgegangen worden, dass nach Fig. 8 alle Toroide *nichtleitend* mit dem Dielektrikum verbunden, also isoliert aufgehängt sind. Ausserdem berührt kein Toroid das zylindrische Dielektrikum, so dass am Dielektrikum selbst nie Toroidpotential anstehen kann.

Für die Bemessung eines solchen Passivsystems sind notwendig: der Öffnungswinkel  $\alpha$ , ein Mass dafür, wie stark sich die Toroide nach unten verjüngen (Fig. 9); die Abstandsverhältnisse der Toroide untereinander und damit die notwendigen Höhen zum Boden bei konstantem  $\alpha$  sowie die Durchmesser der Toroide bezogen auf den Dielektrikumdurchmesser bei festgelegtem Öffnungswinkel  $\alpha$  und fixierten Höhen der Toroide.

Bei zunehmendem  $\alpha$  (Fig. 9) rücken die Kurven immer enger zusammen, woraus man ein Optimum ableiten kann, ab wel-

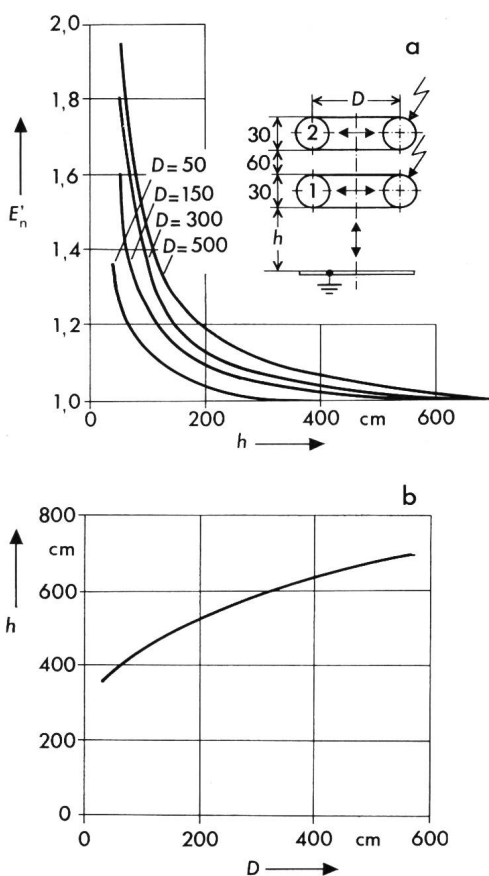


Fig. 5 Einfluss des Bodens auf die maximale Oberflächenfeldstärke  $E_n'$ , mit  $D$  als Parameter

- a Einfluss der Höhe  $h$  über dem Boden auf die bezogene Oberflächenfeldstärke  $E_n'$   
b Abhängigkeit des Durchmessers  $D$  von der Höhe  $h$ , ab der der Einfluss des Bodens vernachlässigt werden kann  
 $E_n' = (E_{n1}/E_{n2})_{\max}$ ;  $D = D_1 = D_2$ ; Masse in cm

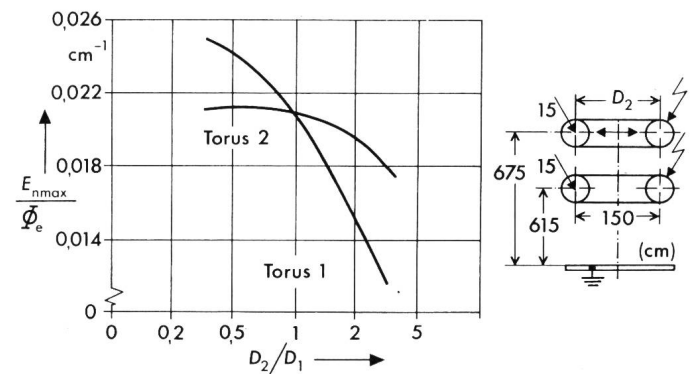


Fig. 6 Einfluss des Durchmessers  $D$  auf die maximale Oberflächenfeldstärke  $E_{n,\max}$  bei Doppeltoroidsystemen

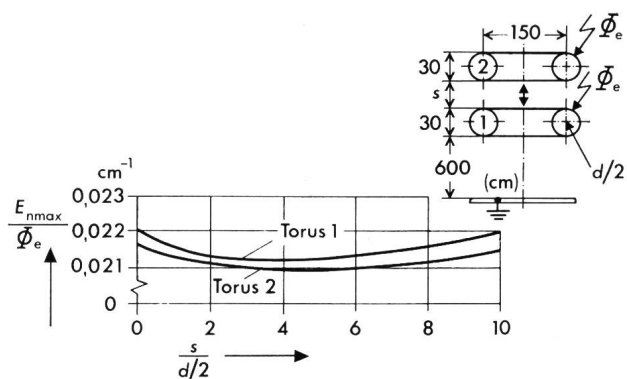


Fig. 7 Einfluss des Abstandes  $s$  zweier Toroide zueinander auf die maximale Oberflächenfeldstärke  $E_{n,\max}$



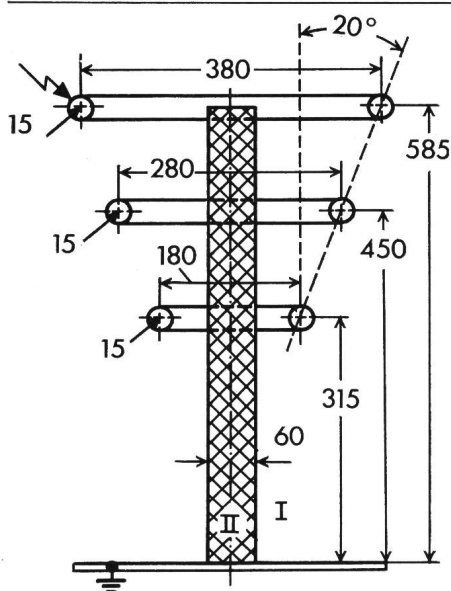


Fig. 8 Optimiertes Passivsystem  
Masse in cm

chem eine weitere Vergrößerung des Winkels keine wesentlichen Vorteile mehr erbringt, wohl aber unproportional steigende Kosten, da die Durchmesser der Toroide immer grösser würden (Kopftorus). Als günstigen Öffnungswinkel kann man den Bereich um  $20^\circ$  angeben, also

$$\alpha \approx 20^\circ,$$

ein Bereich, der Toroiddurchmesser erfordert, die auch aus wirtschaftlicher Sicht noch realisiert werden können.

Fixiert man die Lage der Toroide in  $z$ -Richtung nach der Beziehung  $v_h = h_1/h_3$ , so zeigt sich, dass ein «Auseinander-

ziehen» (kleine  $v_h$ ) der Toroide beim Verlauf des Potentials praktisch keinen nennenswerten Einfluss hat, wohl aber bei den Feldkurven entlang der Grenzschicht. Bei Berücksichtigung aller Parameter, die teils einander entgegenlaufen, kann ein  $v_h \approx 0,5$  als günstig betrachtet werden. Diese Festsetzung beinhaltet, dass ein Passivsystem entlang der oberen Hälfte eines Dielektrikums angebracht sein sollte. Damit bleibt auch die Möglichkeit offen, ein System doppelt (von der Mitte des Dielektrikums nach beiden Seiten hin) anzubringen, wenn beide Enden des Dielektrikums mit Potential belastet sind.

Der Zusammenhang von Torusdurchmesser  $D_1$  zu Dielektrikumdurchmesser  $D_M$  schliesslich zeigt auf Grund umfangreicher Berechnungen, dass durch ein «Wegziehen» des Potentials vom Dielektrikum entscheidend auf die zu optimierenden elektrischen Parameter eingegriffen werden kann. Beliebig weites Wegziehen, also beliebig grosse Durchmesser der Toroide, verbietet sich aus Gründen der Wirtschaftlichkeit. Ein Verhältnis von

$$D_1/D_M > 2$$

je nach Möglichkeit, sollte als optimal betrachtet werden.

Als Beispiel einer Bemassung sei nochmals auf Fig. 8 hingewiesen. Das vorgestellte und optimale Passivsystem stellt in seiner Grundkonzeption eine Neuheit dar. Praktische Anwendungsbereiche dürften weit gestreut liegen und zahlreich zu finden sein. Allein der Gedanke, ein solches System als Isolierstützer in Schaltanlagen, bei Kondensatorbänken, bei mehrstufigen Kaskaden oder als Hängeisolator für Freileitungen einzusetzen, deutet ein breites Anwendungsfeld an. Der Vorteil einer solchen Lösung liegt darin, dass das Potential von der Isolierstrecke weggezogen wird, den Isolator im Hochspannungsbereich entlastet und ihn insgesamt gleichmässig belastet, was zu günstigen Abmessungen führt; dies sind wesentliche Forderungen bei UHV-Systemen.

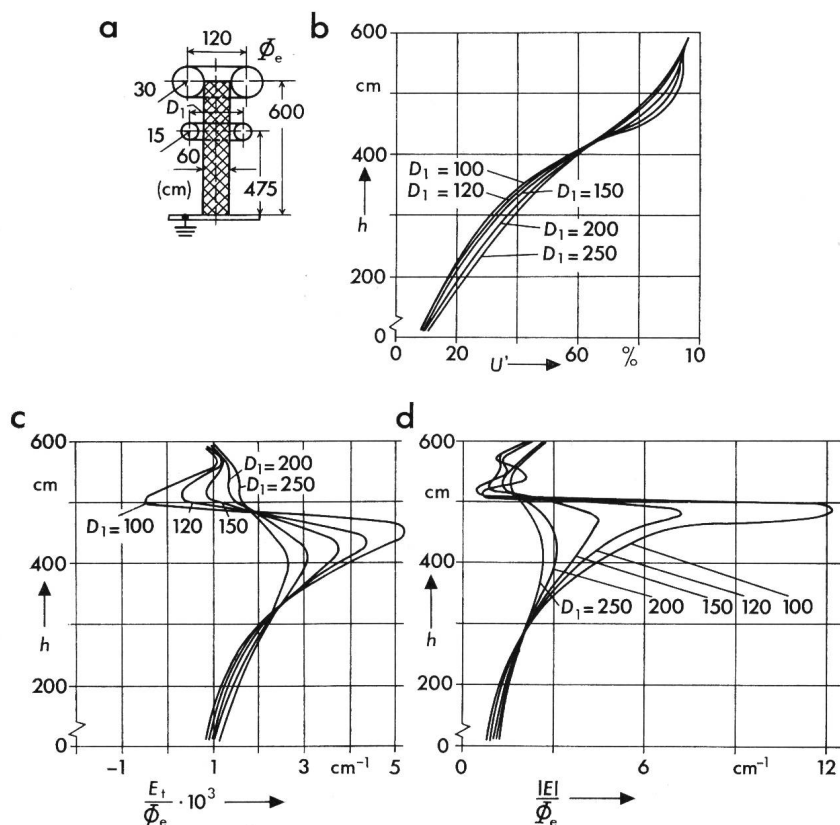


Fig. 9

Einfluss des Öffnungswinkels  $\alpha$

- a Anordnung
- b Potentialverteilung  $U'$  längs der Grenzschicht
- c, d Feldverlauf längs der Grenzschicht  $E_t$  resp.  $|E|$

## 6. Aktivsystem

Nach wie vor wird selbstverständlich die bisher übliche Lösung, nämlich *zentrale* Zuführung des Potentials auf das Dielektrikum und damit Abbau der gesamten anliegenden Spannung längs der Grenzschicht, aktuell bleiben. Ein solches System soll als Aktivsystem bezeichnet werden. Die Forderung nach zentraler Zuführung des Potentials zum Dielektrikum besagt zwingend, dass der Kopftorus jeweils *leitend* mit dem Dielektrikum verbunden sein muss (Fig. 10).

Es galt nun herauszufinden, mit welchen Massnahmen ein Aktivsystem so ausgelegt werden kann, dass längs der Grenzschicht der normalerweise vorzufindende kapazitive Abbau des Potentials in einen möglichst linearen Verlauf umgesetzt werden kann. Dies konnte durch zweierlei Massnahmen erreicht werden: Wegziehen der unterhalb der Kopfelektrode angebrachten Toroide vom Dielektrikum sowie Verknüpfen aller Toroide untereinander; letzteres besagt, dass beim aktiven System alle Toroide mit gleichem Potential (Hochspannungspotential) beaufschlagt sind. In der Regel genügen 2 Toroide den Ansprüchen.

Bei einem aktiven Doppeltoroidsystem sind folgende geometrische Variablen zur Auslegung interessant: der Durchmesser  $D_1$  des unterhalb des Kopftorus angebrachten Torus und der Abstand  $h_1$  des gleichen Torus zum Boden.

In Fig. 11 wird der entscheidende Einfluss bei der Wahl des Durchmessers  $D_1$  gezeigt. Der Verlauf der Tangentialfeldstärke und des Feldstärkebetrages verdeutlichen klar, welch wesentliche Beachtung dieser geometrischen Grösse zukommen muss. Durch geeignete Auslegung von  $D_1$  kann der Potentialverlauf nahezu linear und der Feldverlauf fast konstant gemacht werden. Physikalisch gesehen geschieht folgendes: Normalerweise baut sich das Potential längs der Grenzschicht rein kapazitiv ab, d. h., längs der oberen 30 % der Isolierstrecke fallen schon etwa 50 % der anliegenden Spannung ab [8]. Somit stellt sich die Aufgabe, am oberen Teil des Dielektrikums das Potential so anzuheben, dass ein linearer Abbau und somit gleiche Belastung längs der Grenzschicht erhalten wird. Dies kann durch eine entsprechende Dimensionierung von Torus 1 erreicht werden, wenn man diesen Torus mit Hochspannungspotential versieht und denselben *isoliert* zum Dielektrikum hin aufhängt. Damit ist eine zweite Bedingung gefunden, die ein Aktivsystem charakterisiert.

Als quantitative Aussage darf nach Fig. 11 festgehalten werden, dass allgemein ein Verhältnis von

$$D_1/D_M \approx 3 \dots 4$$

angegeben werden kann, wenn man  $D_1$  auf den Durchmesser des Dielektrikums  $D_M$  bezieht.

Schliesslich gilt es noch abzuklären, in welcher Höhe Torus 1 fixiert werden soll. Dabei muss man zwei Gegebenheiten berücksichtigen. Zum einen soll Torus 1 so hoch wie möglich angebracht sein, um entsprechend maximale Isolierabstände zum Boden zu gewährleisten, und zum anderen muss noch eine entsprechend positive Beeinflussbarkeit des Potentials an der Grenzschicht gesichert sein. So sind Werte anzustreben, die das Torussystem an den oberen 20 % des Dielektrikums anbinden. Die umhüllende Strecke zu vergrössern, um damit weitere Verbesserungen hinsichtlich des Feldverhaltens zu erreichen, hat wenig Sinn, da dann die Isolierabstände zum Boden hin kritisch werden; so darf der oben angegebene Wert als vernünftiger Kompromiss betrachtet und behandelt werden.

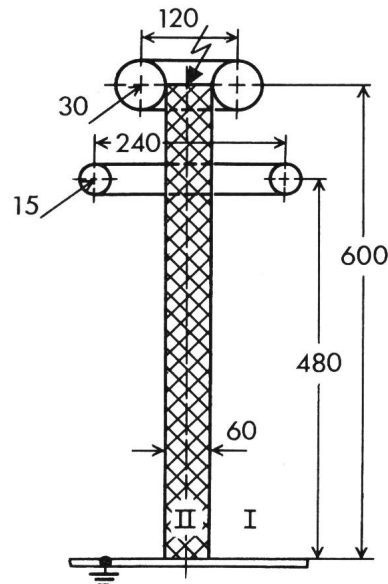


Fig. 10 Optimiertes Aktivsystem (Masse in cm)

## 7. Einsatzspannung

Mit einem nach dem *Schumann-Integral* [9] orientierten Rechenprogramm kann für jedes gewünschte Elektroden-system die Einsatzspannung und Anfangsfeldstärke gerechnet werden. Dieses Verfahren ist jedoch äusserst rechenaufwendig, vor allem wenn mehrere Elektroden ein System bilden und der Ort des Einsatzes nicht von vornherein feststeht, sondern erst gesucht werden muss. Oftmals genügt zunächst jedoch zum Eingrenzen ein Abschätzen der Einsatzwerte. Anschliessend

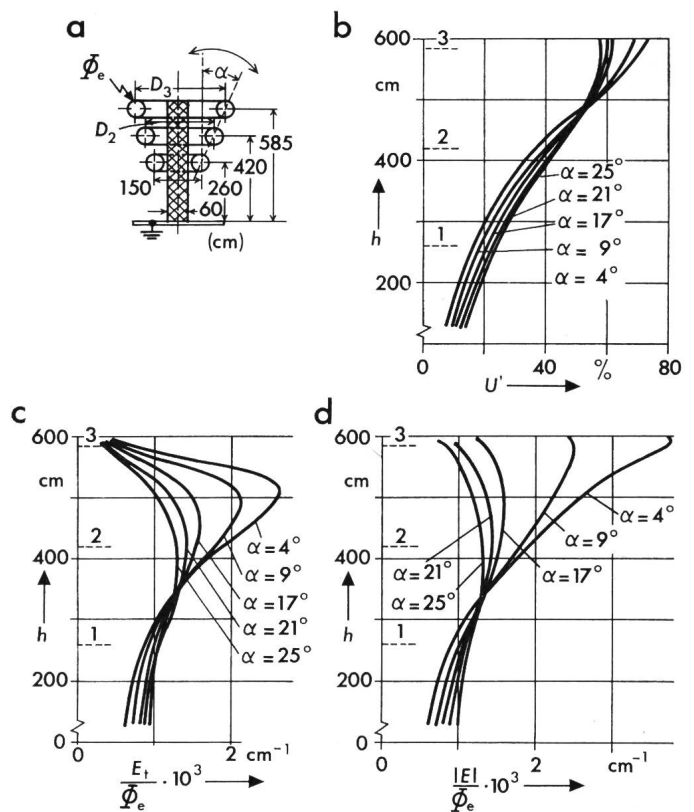


Fig. 11 Einfluss des Torus-Durchmessers  $D_1$

a Anordnung

b, c, d Potentialverteilung  $U'$  resp. Feldverlauf längs der Grenzschicht  $E_t$  bzw.  $|E|$

Tabelle I

Höhe (cm)	U in kV gemessen	U in kV gerechnet	Fehler %
Torus D = 20/d = 6 cm, Volumen 1777 cm <sup>3</sup>			
50	251	251	0
100	283	288	-1,8
200	324	331	-2,2
300	350	359	-2,6
Torus D = 30/d = 8 cm, Volumen 4737 cm <sup>3</sup>			
50	320	316	1,2
100	366	360	-1,6
200	413	415	-0,5
300	445	448	-0,8
Torus D = 40/d = 10 cm, Volumen 9870 cm <sup>3</sup>			
50	373	372	0,3
100	434	427	1,6
200	485	491	-1,2
300	520	532	-2,3

kann und soll exakt mit entsprechendem Aufwand gerechnet werden. Diese Überlegung führte zum Versuch, speziell für Toroide eine empirische Faustformel zu entwickeln, mit deren Hilfe die Einsatzspannung schnell und einfach überschlagen werden kann.

Ausgehend von den bekannten Entladungstheorien und ausgehend von einer Vielzahl von Messungen konnte folgende empirisch fundierte Formel abhängig vom Toroidvolumen entwickelt werden:

$$U_e = k_1 \cdot V^{k_2} \cdot k_3 \cdot V^{k_4}$$

Die Konstanten  $k_1...k_4$  wurden aus Messreihen gewonnen, und zwar aus der Abhängigkeit der Einsatzspannung vom Toroidvolumen und aus der Abhängigkeit der Einsatzspannung von der Höhe über dem Boden bei verschiedenen Rohrdurchmessern. Nach Einsetzen der Zahlenwerte für  $k_1...k_4$  und durch Umformung der Beziehung ergibt sich

$$U_e = 25,23 \cdot (D \cdot d^2)^{0,23} \cdot h^{0,2}$$

mit  $U_e$  Einsatzspannung in kV

$D$  Ringdurchmesser Torus in cm

$d$  Rohrdurchmesser Torus in cm

$h$  Höhe Torus über dem Boden in cm

Diese Beziehung stimmt erstaunlich genau über eine relativ grosse Bandbreite. Sie gilt mit einer Genauigkeit von minimal etwa 3% für Toroidvolumina bis etwa 10000 cm<sup>3</sup>. Dies bedingt ein Geometriespektrum von Torusdurchmesser bis einige 10 cm, Rohrdurchmesser des Torus bis etwa 10 cm und Höhe über dem Boden bis etwa 3 m. Damit wird ein Spannungsbereich bis etwa 500 kV abgedeckt.

Tab. I zeigt einen Vergleich gemessener Einsatzspannungen mit nach der Faustformel berechneten Werten und gibt darüber hinaus auch allgemein Auskunft über Einsatzspannungen verschiedener Toroidformen.

Geht man über in den Volumenbereich von einigen 10000 cm<sup>3</sup> bis hin zu einigen 100000 cm<sup>3</sup>, dann gleitet die Faustformel in einen höheren Fehlerbereich ab. Mit einem Korrekturfaktor von 0,865 der sich aus einer grossen Anzahl von Messreihen herleiten lässt, kann man allerdings wieder sehr gute Ergebnisse erzielen. Ab einigen 10000 cm<sup>3</sup> errechnet sich dann die Einsatzspannung zu

$$U_e = 21,82 \cdot (D \cdot d^2)^{0,23} \cdot h^{0,2}$$

Tab. II zeigt, dass auch in Spannungsbereichen um 1 MV die modifizierte Beziehung zur schnellen Errechnung der Einsatzwerte einwandfrei und recht genau arbeitet. Somit kann für eine Vielzahl von Fällen bei der Auslegung von Toroidelektroden der Einsatzbereich über die angebotene Faustformel schnell erfasst werden, und anschliessend kann gezielt und beschränkt auf ein Minimum mit den numerischen Näherungsverfahren gerechnet werden. Einschränkend ist jedoch zu berücksichtigen, dass die angegebene Beziehung zunächst nur für Einfachtoroide Gültigkeit hat.

## 8. Schlussbemerkung

Toroide stellen ein vielseitiges und sehr variables Element in der Hochspannungstechnik dar. Elektroden dieser Art erfüllen im wesentlichen zwei Aufgaben, nämlich Schirmung und Steuerung hochspannungstechnischer Bauteile.

Vielfältige Untersuchungen haben gezeigt, dass es möglich ist, einen einzelnen, geometrisch gross bemessenen Torus durch zwei kleinere, knapper bemessene Toroide, die miteinander verbunden sind, zu ersetzen. Bei solch einem Vorgehen kann man vor allem am Rohrdurchmesser sparen; man kann den Rohrdurchmesser insgesamt – rechnet man beide Toroide zusammen – auf etwa  $1/4$  reduzieren. Diese Tatsache erscheint vor allem auch deswegen bemerkenswert, weil sich damit ein mögliches Baukastenprinzip aufzeigt, mittels dem mit wenigen Toroidformen eine breite Spannungsebene überstrichen werden kann. Nach Berücksichtigung aller Aspekte – also der technischen, praktischen und wirtschaftlichen – sollte folgende Einteilung getroffen sein:

*Mit Einfachtoroiden ist der untere und mittlere Spannungsbereich bis etwa 500 kV abzudecken; dieselben Toroide können, verknüpft zu Doppeltoroidsystemen, die Spannungsebenen ab 500 kV überstreichen.*

Diese Aussage spricht letztendlich die überzeugende Vielseitigkeit von Toroidsystemen an: Durch die Möglichkeit der Verknüpfung ist man in der Lage, nahezu jede gesuchte Kopfelektrodenkontur mittels einiger weniger Toroide nachzubilden. Somit dürfte sich abzeichnen,

Torusgeometrie D/d	Volumen cm <sup>3</sup>	Höhe über Boden cm	Exakt gerechnete Einsatzspannung (kV)	Mittels Faustformel	Fehler %
96/12	34 109	400	652	647	0,6
160/20	157 914	500	985	963	2,2
125/25	192 765	500	1029	1008	2,0
155/45	774 455	800	1550	1526	1,5



- dass über ein grosses Spektrum hinweg Toruselektroden Vollelektroden ersetzen werden;
- es kann erwartet werden, dass mittels optimierter Toroidsysteme Kopfelektroden von etwa 1 bis 5 m Durchmesser nachgebildet werden können.
- Der Bereich  $< 1$  m wird nach wie vor der Vollelektrode vorbehalten sein, und
- im Bereich  $> 5$  m dürfte sich die Polygonelektrode bereits durchgesetzt haben.

#### Adresse des Autors

Dr.-Ing. B. Bachmann, wissenschaftlicher Assistent am Lehrstuhl und Laboratorium für Hochspannungs- und Anlagentechnik der TU München, Arcisstrasse 21, D-8000 München 2.

#### Literatur

- [1] B. Bachmann: Optimierung von Isolieranordnungen durch Multitoroidsysteme. Internationales Symposium Hochspannungstechnik, Zürich 1975. Artikel No. 1.3-01., Bd. 1, S. 100...104.
- [2] R. Brambilla and A. Pigini: Electric field strength in typical high voltage insulation. International Symposium Hochspannungstechnik, Zürich 1975. Band 2, Anhang, S. 1...6.
- [3] K. Feser: Bemessung von Elektroden im UHV-Bereich, gezeigt am Beispiel von Toroidalelektroden für Spannungsteiler. ETZ-A 96(1975)4, S. 206...210.
- [4] H. Steinbigler: Digitale Berechnung elektrischer Felder. ETZ-A 90(1969)25, S. 663...666.
- [5] P. Weiss: Berechnung von Zweistoffdielektrika. ETZ-A 90(1969)25, S. 693...694.
- [6] B. Bachmann: Multitoroide zur Steuerung von Isolierstrecken. Dissertation der Technischen Universität München, 1975.
- [7] B. Bachmann: Freies Potential beim Ladungsverfahren. ETZ-A 94(1973)12, S. 741...742.
- [8] H. Steinbigler: Anfangsfeldstärken und Ausnutzungsfaktoren rotationssymmetrischer Elektrodenanordnungen in Luft. Dissertation der Technischen Hochschule München, 1969.
- [9] W.O. Schumann: Elektrische Durchbruchfeldstärke von Gasen. Berlin, Springer-Verlag, 1923.

## Literatur – Bibliographie

DK 030.8 : 621.3 : 802.0 : 803.0

SEV-Nr. A 520

**Technik Wörterbuch, Elektrotechnik, Elektronik, englisch/deutsch.** Von Peter-Klaus Budig. Berlin, VEB Verlag Technik, 1975; 8°, 724 S. Preis: geb. Ostmark 90.–

Das 1975 in erster Auflage erschienene Technik-Wörterbuch umfasst etwa 60 000 Fachbegriffe aus allen Gebieten der Elektrotechnik. Es enthält sowohl Ausdrücke der Energietechnik als auch der Informationstechnik und insbesondere auch viele Begriffe aus den jüngsten Gebieten wie Supraleitung, Optoelektronik oder Lasertechnik.

Das Wörterbuch ist durch sauberen Druck und übersichtliche Darstellung gekennzeichnet. Bei der Durchsicht stellt man mit Interesse fest, dass es für viele englische Begriffe, die sich im deutschen Sprachgebiet als Fremdwörter einnisten, durchaus verwendbare deutsche Ausdrücke gibt. Seltenheitswert haben dagegen Germanismen unter den englischen Wörtern, wie etwa «eigenvalue».

Wertvoll sind die zahlreichen, fast jedem englischen Ausdruck zugeordneten zusammengesetzten Begriffe, denen in der deutschen Sprache sehr häufig ein einziges, zusammengesetztes Wort entspricht. Dies lässt vermuten, dass das Wörterbuch eigentlich aus seinem deutsch/englischen Gegenstück entstanden ist, welches aber bisher nicht veröffentlicht wurde. Es ist zu hoffen, dass auch diese Version bald erscheint, da das Arbeiten mit einem Wörterbuch ohne die Möglichkeit des Gegenprüfens oft unbefriedigend ist.

K. Fischer

DK 007.5 : 512.831 : 518.4/6 : 62-501

SEV-Nr. A 645

**Lineare Systeme.** Grundlagen der Systemdynamik und Regelungstechnik. Von I. Hartmann. Berlin/Heidelberg/New York, Springer-Verlag, 1976; 8°, XI/347 S., 70 Fig. Preis: kart. DM 26.–

Dieses Buch ist eine wertvolle Ergänzung zum Fach Regelungstechnik. Das Schwergewicht liegt auf der mathematischen Behandlung der Grundlagen und Eigenschaften von linearen dynamischen Systemen mit konzentrierten Parametern. Die Systembeschreibung erfolgt im Zustandsraum und in der Darstellung Eingangs-/Ausgangssignal.

Das Buch wendet sich sowohl an die Studenten der höheren Semester der Ingenieur-Wissenschaften, der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fächer als auch an die bereits in der Praxis stehenden Ingenieure, die mit Aufgaben der Regelungstechnik, der Systemtechnik und der Automatisierung konfrontiert werden.

Der Inhalt des Buches besteht aus folgenden Kapiteln: Nach einer Einleitung folgt im zweiten Kapitel eine Einführung in die Gewinnung von mathematischen Modellen zur Beschreibung physikalischer Prozesse. Das dritte Kapitel vermittelt in knapper Form einige mathematische Grundlagen und Begriffe, die in den weiteren Kapiteln benötigt werden. Im vierten und fünften Kapi-

tel werden Steuerbarkeit, Beobachtbarkeit, Stabilität und Realisierung bei linearen kontinuierlichen und diskreten Systemen behandelt. Die beiden letzten Kapitel beschäftigen sich im wesentlichen mit dem Entwurf von Zustandsreglern und dynamischen Beobachtern, bei linearen kontinuierlichen Einfachregelkreisen. Hierbei werden das Führungs- und Störverhalten nach Vorgabe einer Stabilitätsgüte sowie die Optimierung nach dem quadratischen Gütekriterium untersucht.

Das Buch zeichnet sich durch seinen systematischen und übersichtlichen Aufbau aus, mit mathematischen Beweisen, Beispielen, erklärendem Text und Literaturhinweisen. Dadurch wird auch ein selbständiges Studium ermöglicht. Für den Leser, der auf den mathematischen Hintergrund einiger Fragestellungen aus dem Bereich der Regelungstechnik eingehen will, ein sehr interessantes und lehrreiches Buch.

G. Lekkas

DK 512.831 : 621.316.1

SEV-Nr. A 644

**Introduction to matrices and power systems.** By R. B. Shipley. New York a. o., John Wiley, 1976; 8°, XII/274 p., fig. Price: cloth \$ 24.–

Dem Inhalt entsprechend kann das Buch in zwei Abschnitte eingeteilt werden. Die erste Hälfte befasst sich im wesentlichen mit der Anwendung der Matrizenschreibweise zur Erfassung von Energiesystemen. Der Autor bespricht spezielle Matrizenoperationen, wie Teilinversion oder Matrizenerweiterung und deren Algorithmen. Er gibt Matrizendarstellungen für die verschiedenen Elemente oder Teilsysteme in Energiesystemen, wie Transformatoren, Leitungen und Schaltzustände des Netzes. Er zeigt dies an einfachen Beispielen und bemüht sich um die elektrische Bedeutung der einzelnen Matrizenelemente.

Der zweite Teil des Buches befasst sich mit fast allen Problemen, die in Energiesystemen auftreten. Es wird versucht, eine Übersicht über die Philosophie zu geben, wie man diese Probleme mit Grossrechnern lösen kann. Probleme wie eine wirtschaftlich optimale Netzbetriebsführung, Lastflussberechnungen und optimale Lastverteilung werden besprochen. Optimale Erzeugung von Wirk- und Blindleistung, statische und transiente Stabilität und deren Estimation sind die Titel weiterer Kapitel. Verschiedene Schutzmassnahmen und Ideen zur Verbesserung der Stabilität von Energiesystemen bilden die abschliessenden Kapitel.

Wer sich für Probleme der Netzführung und der Netzregelung interessiert, tut gut daran, dieses Buch zu studieren. Das Werk setzt Grundkenntnisse des Matrizen- und Determinantenkalküls voraus. Die Lösungswege sind meistens nur in Worten angegeben, währenddem das mathematische Rüstzeug, nach Ansicht des Rezensenten, im zweiten Teil des Buches leider ein bisschen vernachlässigt wurde. Die zahlreichen Literaturhinweise auf IEEE-Publikationen können möglicherweise sehr nützlich sein.

Ch. Brunner