Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 63 (1972)

Heft: 11

Artikel: Feldstärkeverlauf auf Abschirmelektroden für ultrahohe Wechselspannungen

Autor: Moeller, J. / Steinbigler, H. / Weiss, P.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-915697

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: 15.07.2025

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

Feldstärkeverlauf auf Abschirmelektroden für ultrahohe Wechselspannungen [1])

Von *J. Moeller*, Bamberg, *H. Steinbigler* und *P. Weiss*, München

621.316.1.027.7:621.3.027.025:621.319.74

1. Einführung

Eine wesentliche Voraussetzung für die Erforschung der elektrischen Energieübertragung mit Spannungen über die derzeit höchste Übertragungsspannung von 750 kV hinaus ist die Entwicklung und der Bau von Wechselspannungsprüfanlagen für ultrahohe Spannungen bis in den Bereich von 2 MV. Für die Dimensionierung von Abschirmelektroden in diesem Spannungsbereich liegen bisher kaum Erfahrungen vor. Ein wertvolles Hilfsmittel für die Auslegung solcher Elektroden ist die Berechnung der elektrostatischen Feldstärken, die auf den Elektrodenoberflächen auftreten. Die Kenntnis dieser Randfeldstärken ist eine Voraussetzung dafür, verschiedene Ausführungsmöglichkeiten zu beurteilen und miteinander zu vergleichen. Vor allem lassen sich mit Hilfe der Feldberechnung aus den gemessenen Anfangsspannungen ausgeführter Anlagen Anfangsfeldstärken ableiten, die dann als Dimensionierungsgrundlage für andere Abschirmelektroden zugrunde gelegt werden können.

Die Berechnung des elektrostatischen Feldes eines so komplexen Objektes, wie es ein Prüftransformator darstellt, erfordert die Anwendung eines Näherungsverfahrens, dessen Auswertung mit Hilfe einer elektronischen Datenverarbeitungsanlage erfolgen muss. Um die hierzu erforderliche Rechenzeit in wirtschaftlich vertretbaren Grenzen zu halten, ist das Problem in einer geeigneten Weise zu vereinfachen. Das zu berechnende Objekt ist durch eine Ersatzanordnung nachzubilden, die einen Kompromiss zwischen Wirklichkeitstreue und Rechenaufwand darstellt. In der vorliegenden Arbeit wird anhand der Feldberechnung für die Kopfelektrode eines Prüftransformators für ultrahohe Spannung dieses Problem diskutiert. Weiterhin werden verschieden geformte Kopfelektroden bezüglich ihres Feldstärkeverlaufes auf der Oberfläche miteinander verglichen.

2. Ersatzanordnung

Die in dieser Arbeit durchgeführten Feldberechnungen gehen von der in Fig. 1 dargestellten Ersatzanordnung aus, durch die ein Prüftransformator in Kaskadenschaltung nachgebildet wird. Die 4 übereinandergestellten Einheiten in Isoliermantelbauweise sind identisch ausgeführt und an den Verbindungsflanschen durch zylindrische Zwischenelektroden abgeschirmt. Die Ersatzanordnung berücksichtigt neben der Kopfelektrode diese Zwischenelektroden sowie einige unter Öl angeordnete Schirmringe. Die Isolierteile jeder Stufe werden einheitlich durch ein zylindrisch begrenztes Medium mit der relativen Dielektrizitätskonstante $\varepsilon_r = 2{,}2$ erfasst. Nur für die oberste Stufe werden die Aktivteile durch zwei zylindrische, halbkugelförmig abgerundete Ersatzelektroden simuliert. Die durch diese vereinfachte Nachbildung erreichte Rotationssymmetrie der gesamten Ersatzanordnung hat eine erhebliche Reduktion des Rechenaufwandes zur Folge. Eine Rechtfertigung für diese Simulation ist dann gegeben, wenn der Nachweis geführt werden kann, dass der Einfluss der Ersatzelektroden für den Aktivteil auf den Feldstärkeverlauf auf der Kopfelektrode unerheblich ist. Es sei an dieser Stelle noch besonders darauf hingewiesen, dass die in Fig. 1 gezeigte Ersatzanordnung natürlich nur zur Feldberechnung der Kopfelektrode herangezogen werden kann. Für Feldberechnungen in anderen Bereichen des Prüftransformators, so beispielsweise für die Berechnung der Feldstärken auf den Zwischenelektroden, müsste die Ersatzanordnung entsprechend modifiziert berücksichtigt werden.

Um die Einflüsse der verschiedenen Elemente der Ersatzanordnung quantitativ zu erfassen, wurde die vollständige Ersatzanordnung *a* nach Fig. 1 systematisch vereinfacht, wie dies in Fig. 2 gezeigt ist. So kann der Einfluss des Isoliermediums durch einen Vergleich der vollständigen Anordnung *a* mit der Anordnung *b* erfasst werden, die nur Luft als Dielektrikum enthält. Aufschluss über die schrittweise Feldveränderung im

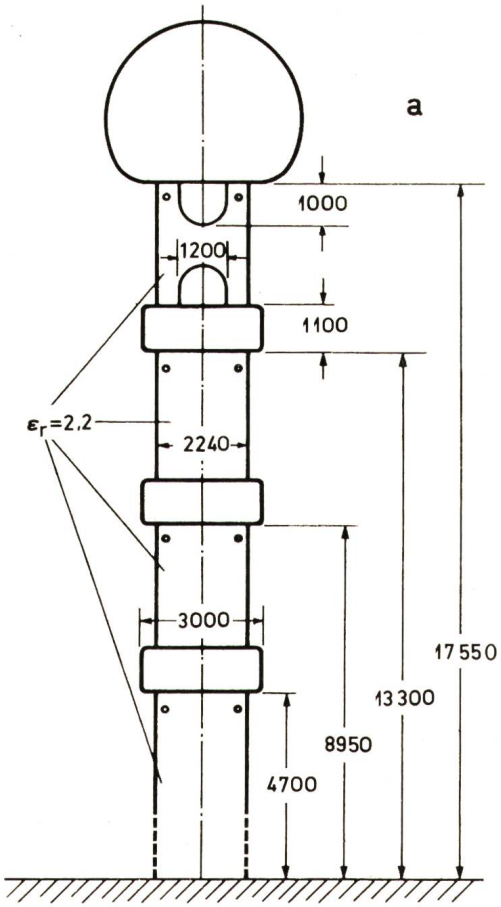

Fig. 1
Vollständige Ersatzanordnung für eine 4stufige Prüfkaskade
(Anordnung *a*)
Masse in mm

[1]) Wissenschaftlicher Beitrag zum Internationalen Symposium Hochspannungstechnik des VDE und der IEEE Power Engineering Society.

Bereich der Kopfelektrode durch den Aktivteil der obersten Stufe, durch die Zwischenelektroden und durch den Schirmring der obersten Stufe gibt der Übergang zu den Anordnungen *c* bis *g*.

Bei allen Anordnungen wurde die Aufstellung des Prüftransformators in einer Halle durch eine geerdete Bodenebene und einen geerdeten, oben geschlossenen Hüllzylinder mit den Abmessungen nach Fig. 3 berücksichtigt. Weiterhin wurde den Berechnungen die Annahme zugrunde gelegt, dass die Spannungsverteilung längs des Prüftransformators linear ist, dass die Zwischenelektroden also 75 % bzw. 50 % bzw. 25 % des Potentials der Kopfelektrode annehmen. Prinzipiell ist die Berechnung auch mit den Zwischenpotentialen bei je nach Belastung unterschiedlicher nichtlinearer Spannungsverteilung möglich.

Die Berechnungen wurden für 3 verschiedene Formen von Kopfelektroden durchgeführt, deren Abmessungen Fig. 4 zeigt. Alle 3 Elektroden haben einen grössten horizontalen Durchmesser von 5 m. Die Elektrode *A* ist eine Kugelelektrode, deren Krümmungsradius zur Anpassung an die Transformatorsäule im unteren Elektrodenteil etwas verkleinert ist. Die Elektrode *B* ist eine flachgedrückte Kugel. Die Kontur der Elektrode *C* wird durch die Beziehung

$$\left(\frac{r}{a}\right)^n + \left(\frac{z}{b}\right)^n = 1$$

beschrieben, mit den Werten $a = 2{,}5$ m, $b = 1{,}6$ m und mit dem Exponenten $n = 2{,}6$. Diese als Superellipsoid bezeichnete Elektrodenform geht auf einen Vorschlag von *Hyltén-Cavallius* und *Menemenlis* zurück.

3. Rechenverfahren

Für die Feldberechnung der rotationssymmetrischen Ersatzanordnung wurde ein Näherungsverfahren verwendet, das im Prinzip darauf beruht, dass die Flächenladungen auf den Elektrodenoberflächen durch ein System von ringförmigen Linienladungen im Elektrodeninneren ersetzt werden. Die Einzelheiten des Verfahrens sind bekannt [1; 2][2]), so dass hier nur eine kurze Übersicht über den Rechenweg angegeben wird. Auf den Konturen der Elektroden wird eine der Anzahl der ringförmigen Linienladungen im Elektrodeninneren gleiche Anzahl von Punkten vorgegeben und gefordert, dass das resultierende Potential der Ladungen in diesen Konturpunkten gleich dem Elektrodenpotential ist. Diese Forderung führt auf ein lineares Gleichungssystem, dessen Auflösung die Grösse der Ladungen ergibt. Das Elektrodensystem ist durch die diskreten Ladungen im Elektrodeninneren dann mit einer ausreichenden Genauigkeit nachgebildet, wenn die aus der Überlagerung der Linienladungsfelder resultierenden, dem Elektrodenpotential entsprechenden Äquipotentialflächen mit den Elektrodenoberflächen genügend genau übereinstimmen. Diese Übereinstimmung ist in den Konturpunkten selbst gegeben, zwischen den Konturpunkten treten jedoch Differenzen auf. Ein Mass für die Übereinstimmung ist die Abweichung des aus der Überlagerung resultierenden Potentials vom Elektrodenpotential. Der Fehler im Bereich der Kopfelektrode liegt in der Regel bei $< 10^{-6}$, maximal in der Grössenordnung 10^{-5}. Die Feldstärke längs der Elektrodenoberfläche oder gegebenenfalls auch im Feldraum ausserhalb der Elektroden ergibt sich aus der geometrischen Addition der Feldkomponenten der einzelnen Linienladungen.

Bei der Berücksichtigung der dielektrischen Grenzschicht wird davon ausgegangen, dass eine Grenzschicht bezüglich ihrer Wirkung auf das elektrostatische Feld einer Flächenladung entspricht [3; 4]. Die Flächenladungsschicht wird ebenfalls durch diskrete ringförmige Linienladungen ersetzt, wobei sich die Notwendigkeit ergibt, diese Ladungen zu beiden Seiten der Grenzschicht anzuordnen. In den Konturpunkten auf der Grenzschicht sind als Bedingungen einzuhalten, dass das Potential beim Durchgang durch die Grenzschicht stetig ist

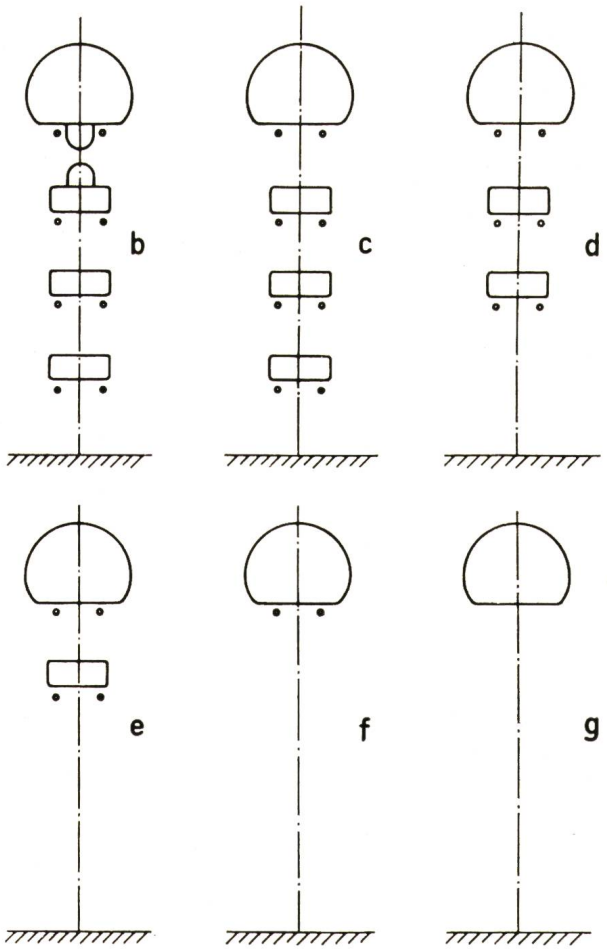

Fig. 2
Vereinfachte Ersatzanordnungen
(Anordnung *b*...*g*)

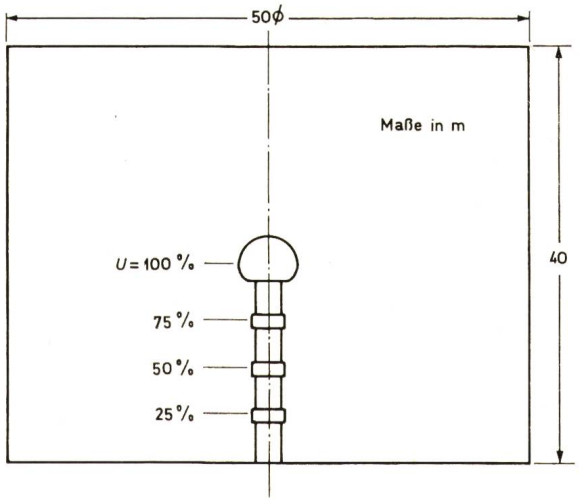

Fig. 3
Anordnung mit geerdetem Hüllzylinder und Decke

[2]) Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

und dass sich die Normalkomponenten der Feldstärken umgekehrt wie die relativen Dielektrizitätskonstanten verhalten. Einzelheiten über die mathematische Formulierung dieser Bedingungen für den Aufbau des Gleichungssystems sind an anderer Stelle näher beschrieben [5; 6].

4. Rechenergebnisse

4.1 Einfluss der Vereinfachungen

Der Verlauf der Randfeldstärke auf den Elektrodenoberflächen ist in Fig. 5 für die verschiedenen Elektrodenformen A, B und C wiedergegeben. Die Abszisse ist die Abwicklung der Elektrodenkontur. Die Ordinate ist die bezogene Randfeldstärke E', die sich einstellt, wenn zwischen der Kopfelektrode und der geerdeten Bodenebene die Bezugsspannung 1 MV anliegt. Aus der bezogenen Randfeldstärke E' ergeben sich die Feldstärkewerte für andere Spannungen zwischen Kopfelektrode und Erde durch Multiplikation mit dem Zahlenwert der in MV gemessenen Spannung. Neben den Feldstärken ist zum Vergleich noch der Kehrwert der mittleren Krümmung angegeben, der als Ersatzradius ϱ_E bezeichnet wird. Für diesen Ersatzradius gilt die Beziehung

$$\varrho_E = \frac{2\,\varrho_I\,\varrho_{II}}{\varrho_I + \varrho_{II}}$$

mit den beiden Hauptkrümmungsradien ϱ_I und ϱ_{II} [2; 7]. Für eine Kugel beispielsweise ist ϱ_E gleich dem Kugelradius.

Die Vereinfachung der Ersatzanordnung sei anhand des Feldstärkeverlaufes auf der Kugelelektrode diskutiert. Deutlich erkennbar ist eine durch die Umgebungseinflüsse bedingte Auffächerung der Kurven für den Feldstärkeverlauf im Endbereich der Abwicklung, d. h. in den unteren Teilen der Elektrode. Diese Auffächerung wird für die Kurven *a...e* in Fig. 5b in einem vergrösserten Maßstab dargestellt. Ausgehend von Kurve *a* ist ersichtlich, dass die fortschreitende Vernachlässigung von Teilen der Ersatzanordnung zunächst einen vergleichsweise geringen Einfluss hat. Erst bei einem Übergang von der Anordnung *a* zu den Anordnungen *f* und *g*, d. h. bei Vernachlässigung der obersten Zwischenelektrode bzw. des obersten Schirmringes, treten grössere Unterschiede auf. Insbesondere zeigt die Berücksichtigung des Isolierzylinders mit einer, üblichem Isolieröl entsprechenden, relativen Dielektrizitätskonstanten von 2,2 einen deutlichen Einfluss nur im unteren Teil der Abwicklung der Elektrode. Der mögliche Einfluss von höheren Dielektrizitätskonstanten ist durch die in die Fig. 5b strichpunktiert eingetragene Kurve $\varepsilon_r \to \infty$ abgegrenzt. Der Fig. 5b ist weiterhin durch Vergleich der Kurven *b* und *c* zu entnehmen, dass der Aktivteil der obersten Stufe den Feldstärkeverlauf auf der Kopfelektrode nur geringfügig beeinflusst.

Grundsätzlich gleiche Verhältnisse im unteren Elektrodenbereich ergeben sich bei den Elektrodenformen B und C. Abweichend davon zeigt sich für die übrigen Teile der Elektrodenabwicklung ein erheblicher Unterschied der Feldstärkeverläufe. In Fig. 5a, c und d wurde ferner für die Anordnung a der Feldstärkeverlauf bei Vernachlässigung des Hüllzylinders jedoch mit Berücksichtigung der Bodenebene eingetragen. Diese Kurven lassen erkennen, dass über den gesamten Bereich aller Elektroden ein weitgehend gleichmässiger, felderhöhender Einfluss des Hüllzylinders vorhanden ist.

In der Tabelle I sind die vorstehend diskutierten Ergebnisse für die maximal auftretenden Randfeldstärken im Vergleich zur vollständigen Ersatzanordnung *a* nach Fig. 1 zusammen-

Prozentuale Unterschiede der maximalen Randfeldstärken für die Ersatzanordnungen a...g

Tabelle I

Elektrode	Anordnung nach Fig. 1 bis 3							
	ohne Hüllzylinder	mit Hüllzylinder						
	a	*a*	*b*	*c*	*d*	*e*	*f*	*g*
A	—3,6	0	+1,1	+1,6	+1,8	+3,6	+15,0	+19,3
B	—4,1	0	+0,4	+0,5	+0,6	+1,7	+ 6,5	+ 7,1
C	—4,3	0	+0,3	+0,4	+0,5	+1,4	+ 4,8	+ 5,3

Vergleichswerte für verschiedene Elektrodenformen

Tabelle II

Elektrodenform	Horiz. Durchmesser m	Oberfläche m²	$\frac{E_{max}}{E_{max}\ \text{Kugel}}$ %	ϱ_E für E_{max} m	Bauhöhe H m
A Kugel	5	68	100	1,73	21,6
B flachgedrückte Kugel	5	58	112	1,88	20,55
C Super-Ellipsoid	5	58	116	1,57	20,67
	5,4	70	109	1,70	20,92

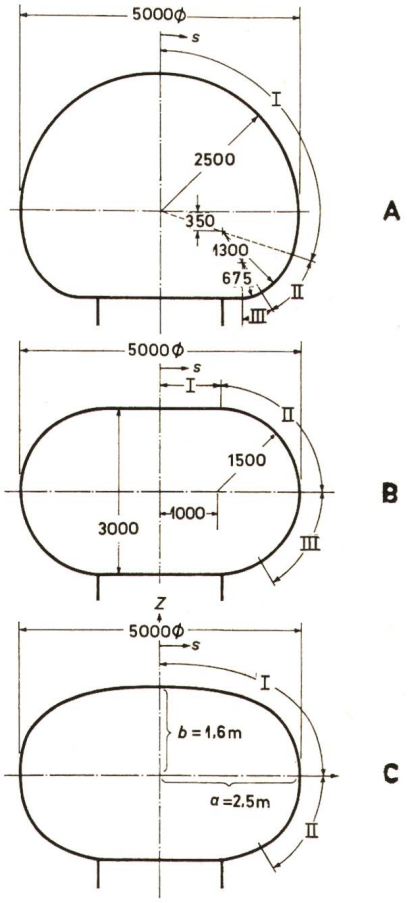

Fig. 4
Kopfelektroden
A Kugel
B flachgedrückte Kugel
C Superellipsoid
Z Höhenkoordinate
r radiale Koordinate für horizontale Ausladung
s Abwicklung der Elektrodenkontur
Weitere Bezeichnungen siehe im Text

gefasst. Auch hier wird deutlich, dass erst die Vernachlässigung der obersten Zwischenelektrode (Übergang von Anordnung *e* nach *f*) zu einer merkbaren Verfälschung der Ergebnisse führt.

4.2 Vergleich der Elektrodenformen

In Tabelle II sind zum Vergleich die wichtigsten Eigenschaften der verschiedenen Elektroden eingetragen. Die maximal auftretende Oberflächenfeldstärke ist für die Elektroden B und C merklich höher als für die Kugelelektrode A. Um einen wirtschaftlich vernünftigen Vergleich durchführen zu können, wurde zusätzlich zu den Elektroden mit einheitlich 5 m horizontalem Durchmesser ein Superellipsoid mit 5,4 m Durchmesser bei gleichem Halbachsenverhältnis und gleichem Exponenten aufgenommen, das etwa die gleiche Oberfläche wie die Kugel aufweist. Auch hierfür ist die maximale Feldstärke für das Superellipsoid höher als für die 5-m-Kugel bei etwa gleichem Ersatzradius für den Ort der maximalen Feldstärke. Allerdings benötigt die Anordnung mit der Kugelelektrode eine um 0,7 m grössere Bauhöhe. Ferner ist für das Superellipsoid zu vermerken, dass im Bereich der grössten radialen Erstreckung aufgrund der dort geringeren Krümmung eine Feldstärkeentlastung auftritt (siehe auch Fig. 5d), die der Anbringung von Trennfugen bei der technischen Ausführung entgegenkommt.

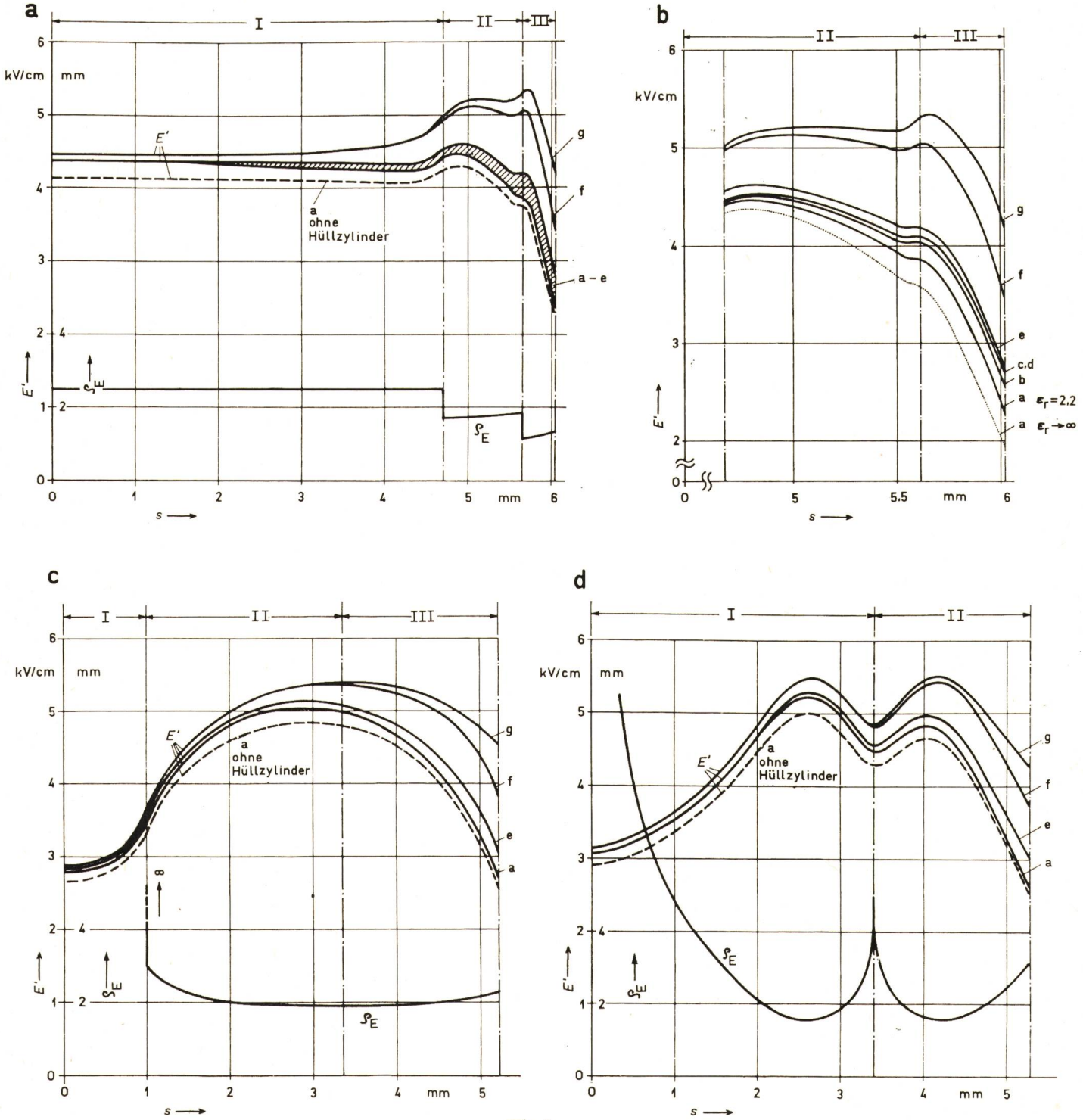

Fig. 5

Auf 1 MV bezogene Randfeldstärke E' und Ersatzradius ϱ_E über der Abwicklung s

a Elektrode *A* (Kugel)
b Elektrode *A* (Kugel), Teilausschnitt
c Elektrode *B* (flachgedrückte Kugel)
d Elektrode *C* (Superellipsoid)

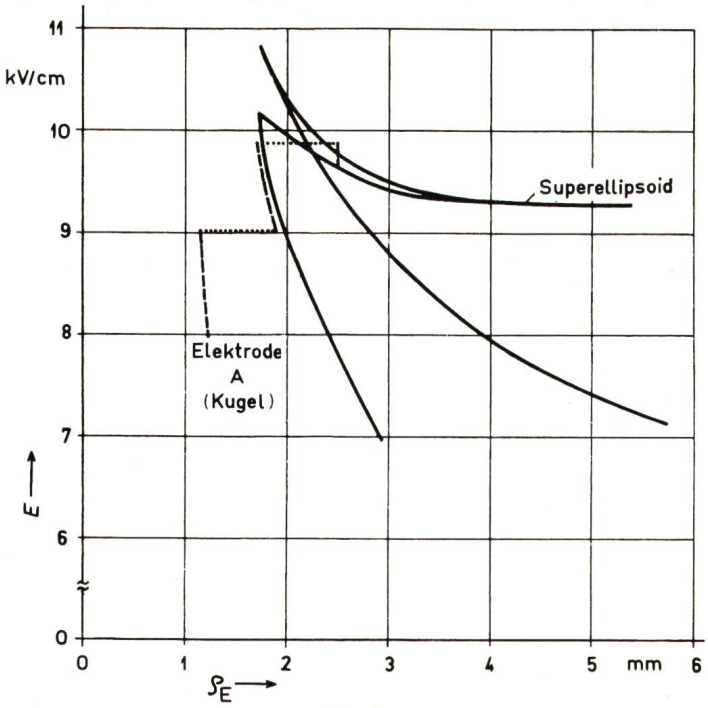

Fig. 6
Randfeldstärke E bei effektiv 2,2 MV als Funktion des Ersatzradius ϱ_E für die Elektrode A (Kugel) und ein oberflächengleiches Superellipsoid
(n = 2,6; a = 2,7 m; b = 1,728 m)

Um einen unmittelbaren Vergleich von Feldstärken unter Berücksichtigung der jeweiligen Ersatzradien zu ermöglichen, wurde darüberhinaus in Fig. 6 die effektive Randfeldstärke über ϱ_E für die 5-m-Kugelelektrode und das oberflächengleiche Superellipsoid mit 5,4 m Durchmesser bei einer angenommenen effektiven Einsatzspannung von 2,2 MV aufgetragen.

5. Schlussfolgerung und Zusammenfassung

Die rechnerisch erhaltenen Ergebnisse ermöglichen nun die Bestimmung der Einsatzfeldstärke E_e für Abschirmelektroden von Prüfanlagen für ultrahohe Spannungen. Diese Einsatzfeldstärke ergibt sich durch Multiplikation des Zahlenwertes der in MV gemessenen Einsatzspannung U_e und der bezogenen Feldstärke E', die rechnerisch für den optisch beobachteten Ort des Entladungseinsatzes bestimmt wurde. Für den näher diskutierten Fall von Wechselspannungsprüfkaskaden erhält man aus der effektiven Einsatzspannung in MV (Effektivwert) und dem auch dann gültigen bezogenen Wert E' die effektive Einsatzfeldstärke in kV/cm. Gleichzeitig kann E_e dem entsprechenden Ersatzradius des Entladungsortes zugeordnet werden. Da sich das aufgezeigte Rechenverfahren für beliebige, jedoch näherungsweise rotationssymmetrische Anordnungen anwenden lässt, sollten nunmehr Ergebnisse von verschiedenen Höchstspannungsanlagen zusammengetragen werden, um zu einer Abhängigkeit der technisch erreichbaren Einsatzfeldstärke als Funktion des Ersatzradius zu gelangen. Erst dann wird es möglich, ausreichende, aber wirtschaftlich vertretbare Abschirmungen für ultrahohe Spannungen zu bauen.

Abschätzende Auswertungen für Elektroden bekannter Prüfanlagen lassen erkennen, dass — abweichend von der theoretisch zu erwartenden Sättigung bei grösseren Krümmungsradien [8] — die technische Einsatzfeldstärke mit steigendem Krümmungsradius auch im Meterbereich noch weiter sinkt. In Fig. 6 wäre dann eine leicht fallende Kurve als zulässige obere Grenze einzutragen. Dabei scheinen jedoch die kurzzeitigen Beanspruchungen bei Schaltstoßspannung näher am theoretischen Sättigungswert von 24,5 kV/cm zu liegen, als bei Wechselspannungsbeanspruchung. Hierfür können Staub und der Oberflächenzustand der Elektroden die erreichten Werte ausgeprägter beeinflussen, was zu grösseren Streuungen für die zu ermittelnde Einsatzfeldstärke führen würde.

Für Elektroden im Spannungsbereich von mehr als effektiv 2 MV wird mit effektiven Einsatzfeldstärken bis 10 kV/cm und darunter zu rechnen sein.

Da sich immer mehr die fertigungstechnisch überlegene Ausführung von grossflächigen Elektroden mit unterbrochener Oberfläche, d. h. die sog. Teller- oder Poly-Elektrode durchsetzt, ist parallel zu den erwähnten Messungen die rechnerische und experimentell bestätigte Bestimmung eines Reduktionsfaktors der Einsatzfeldstärke für diese Elektroden gleicher Aussenkontur voranzutreiben [9].

Mit Wechselspannungsanlagen, die in den Abmessungen dem Rechenbeispiel nach Fig. 1 entsprechen, können Messungen der Einsatzfeldstärke in nächster Zukunft in den Höchstspannungslaboratorien der EdF in Les Renardières, Frankreich, und der Hydro-Quebéc, in Varennes, Kanada, durchgeführt werden.

Literatur

[1] *H. Steinbigler:* Digitale Berechnung elektrischer Felder. ETZ-A 90(1969)25, S. 663...666.
[2] *H. Steinbigler:* Anfangsfeldstärken und Ausnutzungsfaktoren rotationssymmetrischer Elektrodenanordnungen in Luft. Dissertation der Technischen Hochschule München, 1969.
[3] *A. Roth:* Hochspannungstechnik. 4. Auflage, Wien, Springer Verlag, 1959.
[4] *R. Becker* und *F. Sauter:* Theorie der Elektrizität. Bd. 1: Einführung in die Maxwellsche Theorie — Elektronentheorie — Relativitätstheorie. 19. Auflage. Stuttgart, Teubner Verlag, 1969.
[5] *P. Weiss:* Feldstärkeeffekte bei Zweistoffdielektrika. Bull. SEV 63(1972) 11, S. 584...588.
[6] *P. Weiss:* Berechnung von Zweistoffdielektrika. ETZ-A 90(1969)25, S. 693...694.
[7] *I. N. Bronstein* und *K. A. Semendjajew:* Taschenbuch der Mathematik für Ingenieure und Studenten der technischen Hochschulen. 7. Auflage. Frankfurt a/M., Verlag Harri Deutsch, 1967.
[8] *W. O. Schumann:* Elektrische Durchbruchfeldstärke von Gasen. Theoretische Grundlagen und Anwendung. Berlin, Julius Springer Verlag, 1923.
[9] *H. Singer:* Das elektrische Feld von Polycon-Elektroden. Bull. SEV 63(1972)11, S. 579...583.

Adressen der Autoren:
Dr.-Ing. *J. Moeller*, Messwandler-Bau GmbH., Nürnberger Strasse 199, D-86 Bamberg, *H. Steinbigler* und *P. Weiss*, Institut für Hochspannungs- und Anlagentechnik der TU München, Arcisstrasse 21, D-8 München 2.