

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke
Band: 60 (1969)
Heft: 25

Artikel: Beitrag zur Schätzung der Schaltspannungsfestigkeit von Luftstrecken
Autor: Sie, T.H.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-916204>

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: 04.04.2026

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

Beitrag zur Schätzung der Schaltspannungsfestigkeit von Luftstrecken

Von T. H. Sie, Zürich
276-286

621.319.51

Die Durchschlagwahrscheinlichkeit einer Luftstrecke bei einer gewissen Spannungshöhe wird normalerweise durch Zählung einer Anzahl von Durchschlägen bei wiederholter Beanspruchung ermittelt. Bei Schaltspannungen positiver Polarität treten Durchschläge vorwiegend in der Front auf. Einige Autoren schlagen daher vor, die Momentanwerte beim Durchschlag in der Front und nicht wie üblich die entsprechenden Scheitelwerte zur Ermittlung der Durchschlagfestigkeit auszuwerten. Bei grundsätzlichen Anordnungen Stab-Platte und Stab-Stab wurden die auf zwei Arten ausgewerteten Versuchsergebnisse mit der tatsächlich gemessenen Durchschlagfestigkeit, d. h. Spannung mit z. B. 1...5 % Durchschlagwahrscheinlichkeit, verglichen. Es zeigte sich, dass die Schätzung der Schaltspannungsfestigkeit von Luftstrecken anhand von den Scheitelwerten, die vorhanden wären, wenn kein Durchschlag in der Front stattgefunden hätte, zweckmäßiger ist als die mittels der Momentanwerte beim Durchschlag. Es wird versucht, eine Erklärung für die unterschiedlichen Streuungen der Durchschlagsspannung zu geben.

La probabilité d'un claquage d'une distance dans l'air à un certain niveau de tension est normalement déterminé en comptant le nombre de claquages lors de sollicitations répétées. Lors de tensions de rupture de polarité positive, les claquages se produisent de préférence de front. Quelques auteurs proposent de ce fait d'évaluer les valeurs instantanées au front, et non pas comme de coutume les valeurs de crête correspondantes, servant à la détermination de la rigidité diélectrique. Lors de la disposition de principe barre-plaque et barre-barre, les résultats d'essais évalués de deux manières furent comparés à la résistance effectivement mesurée, c'est-à-dire à la tension présentant une probabilité de claquage de 1...5 % p. ex. On constata alors, que l'évaluation de la tension de rupture de distances dans l'air à l'aide de valeurs de la rigidité de crête, qui se seraient produites si aucun claquage au front n'aurait eu lieu, est mieux appropriée que l'évaluation au moyen de valeurs instantanées lors du claquage. On tente de fournir une explication au sujet des dispersions différenciées de la tension de claquage.

Verwendete Buchstabensymbole

p	Durchschlagwahrscheinlichkeit
u	Momentanwert der Spannung
u_1	Momentanwert der Spannung beim Durchschlag
u_2	fiktiver Scheitelwert der Schaltspannung beim Durchschlag in der Front
t	Zeit
Y	Regressionswert
a, b	Konstanten
x	unabhängige Variable
y	abhängige Variable, gemessene Durchschlagwahrscheinlichkeit
N	Anzahl Messwerte
$\varphi(r)$	Wahrscheinlichkeit für das Eintreten eines Durchschlages, Parameter der binomischen Verteilung
n	Anzahl Stösse pro Spannungsstufe
r	Anzahl Durchschläge pro Spannungsstufe
s_r	Standardabweichung oder Streuung von r
s	Standardabweichung oder Streuung von x

1. Einleitung

Bei Hochspannungsübertragungssystemen mit stark reduziertem Isolationsniveau und bei Höchstspannungssystemen sind die Überspannungen als Folge von Schalthandlungen für die Isolationsbemessung von wesentlicher Bedeutung. Dies gilt insbesondere für Luftstrecken, deren Isoliervermögen bei Schaltspannungen positiver Polarität auf sehr tiefe Werte sinken kann. Die umfangreichen Untersuchungen der letzten 10 Jahre haben gezeigt, dass bei einem Spannungsanstieg, entsprechend einer Frontzeit zwischen ca. 100 und 200 μ s eines unipolaren Stosses, das spezifische Isoliervermögen einen Minimalwert aufweist. Versuche mit nachgebildeten Schaltspannungen von relativ langsamem Anstieg (einige 100 μ s) und Halbwertzeiten von einigen ms ergaben eine sehr grosse Streuung der Durchschlagsspannungen der geprüften

Luftstrecken. Ausserdem können Durchschläge bereits in der Front auftreten. Zur Ermöglichung einer vernünftigen Schätzung der Schaltspannungsfestigkeit aus einer Messreihe von Durchschlagsspannungswerten muss u. a. aus den gemessenen Durchschlagsspannungen die statistische Verteilung der Messwerte und deren Vertrauensgrenzen ermittelt werden. Da bei Schaltspannungen mit Frontzeiten von ca. 100 μ s und mehr Durchschläge in der Front auftreten können, erhebt sich die Frage, ob die gesuchte statistische Verteilung der Durchschlagsspannungen aus den Momentanwerten der Spannung beim Durchschlag u_1 oder aus den «fiktiven» Scheitelwerten u_2 (Erklärung siehe Fig. 1) ermittelt werden soll.

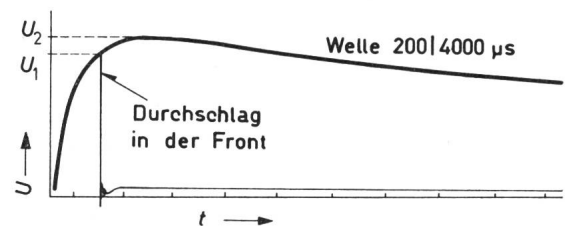


Fig. 1
Definition der Spannungen beim Durchschlag in der Front
Zeiteichnung 250 μ s
Die Benennung der Symbole siehe am Anfang des Artikels

In der Praxis interessiert insbesondere der Haltewert, d. h. die Spannung, bei der die Durchschlagwahrscheinlichkeit p klein ist, z. B. $p = 1\%$ oder 5% ¹⁾. Im folgenden wird gezeigt, dass der Haltewert ermittelt aus der statistischen Verteilung der Momentanwerte beim Durchschlag in der Front, bei grundsätzlichen Anordnungen Stab-Platte und Stab-Stab, wesentlich von der tatsächlich gemessenen Haltespannung abweicht. Die Auswertung der fiktiven Scheitelwerte ergab bessere Schätzungen.

¹⁾ Die benützten Symbole siehe am Anfang des Aufsatzes.

Es wird versucht, eine Erklärung für die unterschiedlichen Streuungen der Durchschlagspannungen zu geben. Dafür wird auch das annähernd homogene Feld zwischen zwei Kugeln von 2 m Durchmesser herangezogen.

2. Versuchseinrichtung

Die Versuche wurden mit einem 160-kWs-Stossgenerator (Vervielfachungsschaltung nach Marx) und Summen-Ladespannung von 3,2 MV durchgeführt. Der verwendete unipolare Stoss zur Nachbildung der Schaltspannung wird durch die folgenden Zeiten charakterisiert:

- | | |
|---|-----------------------|
| a) Zeit von 0...90 % des Scheitelwertes | = 200 μ s |
| b) Zeit von 0 bis zum Scheitel | \approx 350 μ s |
| c) Halbwertzeit | = 4000 μ s |

Im folgenden wird die verwendete Stoßspannung als Welle 200/4000 μ s bezeichnet.

Für die Ableitung der Ladung beim Überschlag wurde unter der Spannungselektrode (Stab) eine 5×5 -m²-Metallplatte auf den Boden des Laboratoriums (Abmessungen 30×16 m²) auf Erdpotential gelegt. Länge der Stabelektroden 2,5 m, Querschnitt 10×10 mm². Der Mindestabstand der spannungführenden Stabelektrode bis zur Wand (Erdpotential) war ca. 8 m. Zur Eichung diente eine Kugelfunkenstrecke von 2 m Kugeldurchmesser.

3. Darstellung der Messergebnisse

3.1 Regressionsgerade

Die Resultate der Durchschlagversuche wurden im Wahrscheinlichkeitsnetz der Gaußschen Verteilung eingetragen. Im Fall, dass die statistische Verteilung der Durchschlagspannungen normal ist, wurde die Beziehung zwischen Durchschlagwahrscheinlichkeit und angelegter Spannung (unabhängige Variable x) im Wahrscheinlichkeitsnetz durch eine Gerade wiedergegeben [1]²⁾. Nach Einführung der Probiteinheit (linearer Maßstab Y auf der Summenhäufigkeitsachse im Wahrscheinlichkeitsnetz) kann die sog. Regressionsgerade durch die folgende Gleichung dargestellt werden [2]:

$$Y = a + bx \quad (1)$$

Die Konstanten a und b sind so zu bestimmen, dass die Messpunkte möglichst wenig um die Regressionsgerade streuen, d. h. Unterschiede zwischen gemessenen Durchschlagwahrscheinlichkeiten y_i der i -ten Spannungsstufe x_i und berechneten Y_i möglichst klein sind:

$$\sum (y_i - Y_i)^2 = \sum (y_i - a - bx_i)^2 = \text{Minimum} \quad (2)$$

Somit gelten:

$$\frac{\partial}{\partial a} \left[\sum (y_i - a - bx_i)^2 \right] = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial b} \left[\sum (y_i - a - bx_i)^2 \right] = 0 \quad (4)$$

Daraus ergibt sich für die Gleichung der Regressionsgeraden:

$$Y = \bar{y} + \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} (x - \bar{x}) \quad (5)$$

²⁾ Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

wobei

$$\bar{y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i \quad (6)$$

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (7)$$

3.2 Vertrauensbereich

Der Vertrauensbereich der Messwerte gibt entweder den Spannungsbereich an mit z. B. 1-%-Durchschlagwahrscheinlichkeit oder bei einer gewissen Spannungshöhe die möglichen Durchschlagwahrscheinlichkeiten bei Wiederholung der Prüfung. Bei der Anordnung Stab – geerdete Platte mit 2 m Schlagweite zum Beispiel wurde bei 698 kV pos. Welle 200/4000 μ s eine Durchschlagwahrscheinlichkeit von $p = 2\%$ gemessen. Gesucht wird die Wahrscheinlichkeit $\varphi(r)$ dafür, dass bei den nächsten n Stößen genau r Durchschläge auftreten. Sie wird mittels der sog. binomischen oder Bernoullischen Verteilung errechnet:

$$\varphi(r) = \frac{n!}{r!(n-r)!} p^r (1-p)^{n-r} \quad (8)$$

Die Wahrscheinlichkeit $\varphi(r)$ ist nur für ganzzahlige Werte von r zwischen 0 und n festgelegt. Mittelwert \bar{r} und Streuung s_r sind:

$$\bar{r} = pn \quad (9)$$

$$s_r = \sqrt{np(1-p)} \quad (10)$$

Im Durchschnitt ist die Anzahl Durchschläge bei einem Versuch gleich der der wiederholten konstanten Prüfspannung entsprechenden Durchschlagwahrscheinlichkeit p , multipliziert mit der Anzahl der wiederholten Stöße n . Die Streuung s_r ist ein Maß für die Abweichung vom Mittelwert und wird bezogen auf \bar{r} bei grösser werdender Stosszahl n kleiner.

Die Vertrauensgrenzen lassen sich durch Gl. (8) berechnen. Es zeigte sich, dass bei der 50-%-Durchschlagspannung z. B. von 100 wiederholten Stößen 42...58 Stöße und von 10 Wiederholungen 3...7 Stöße zum Durchschlag führen. Bei der Haltespannung mit 1-%-Durchschlagwahrscheinlichkeit werden mindestens 98 von den 100 wiederholten Stößen gehalten, und bei Verabreichung von nur 10 Stößen sollen diese alle gehalten werden. Das Risiko, dass vorliegende Aussagen nicht zutreffen, ist 10 % (Irrtumswahrscheinlichkeit der Schätzung).

Es lässt sich zeigen, dass bei einer grossen Stosszahl, z. B. $n = 100$ und Durchschlagwahrscheinlichkeiten zwischen ca. 16 und 84 %, aus der binomischen annähernd eine Gaußsche Verteilung entsteht. Die Vertrauensgrenzen können dann in diesem Fall einfach aus der Beziehung $\bar{r} \pm 1,65 s_r$ ermittelt werden, wiederum mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit der Schätzung von 10 %.

4. Versuchsergebnisse

4.1 Kugelfunkenstrecke mit Kugeldurchmessern von 2000 mm und 300 mm Schlagweite

In der Schlagweite herrscht ein annähernd homogenes Feld. Teilentladungen vor dem Durchschlag sind nicht zu erwarten. Fig. 2 gibt die Messergebnisse bei positiver Polarität der Welle wieder, eingetragen im Wahrscheinlichkeitsnetz. Die Zahlen

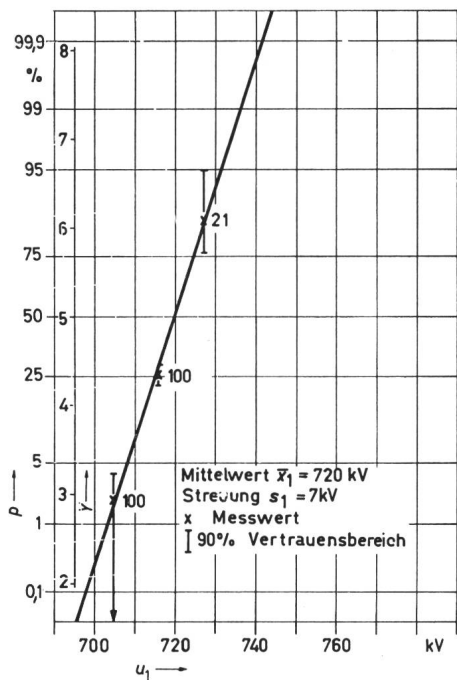


Fig. 2

Durchschlagswahrscheinlichkeit p in Funktion der Spannung u_2 bei einem Kugeldurchmesser von 2000 mm

Eine Kugel ungeerdet, Schlagweite 300 mm
 Welle 200|4000 μ s pos. Polarität, relative Feuchtigkeit 40 %, Raumtemperatur 22 °C, Barometerstand 730 mm Hg
 Y Regressionswert

neben den Messpunkten bedeuten die Anzahl verabreichter Stöße. Die senkrechten Geraden durch die Messpunkte stellen den 90-%-Vertrauensbereich, mit 10 % Irrtumswahrscheinlichkeit der Schätzung, der Durchschlagswahrscheinlichkeiten dar. Eine Gaußsche Verteilung entspricht im Wahrscheinlichkeitsnetz einer Geraden. Die Neigung ist ein Mass für die Standardabweichung (Streuung).

Durch die in Fig. 2 eingetragenen Messpunkte kann recht gut eine Gerade gezogen werden. Die Berechnung der Regressionsgeraden ergab $Y = 4,45 + 0,143(x - 716)$. Sie liegt innerhalb der Vertrauensgrenzen der jeweiligen Messwerte. Die statistische Verteilung der Durchschlagsspannungen ist daher eine Gaußsche mit Mittelwert $\bar{x}_1 = 720$ kV und Standardabweichung $s_1 = 7$ kV (1 % von \bar{x}_1). Die verhältnismässig kleine Standardabweichung, auch bei einer weit geringeren Anzahl Stöße, gestattet, ähnlich wie beim Normalstoss und betriebsfrequenter Wechselspannung, eine genaue Schätzung der 50-%-Durchschlagsspannung bei Schaltspannungen mit einer Kugelfunkenstrecke. Die kleine Streuung der Messwerte ist auf das Fehlen jeglicher Vorentladungen in der Luftstrecke vor dem Durchschlag zurückzuführen (visuelle Beobachtung im dunklen Raum). Dies ist auch aus Fig. 3 ersichtlich, wo 3 von den 10 verabreichten Stößen zu Durchschlägen führten. Auch der glatte Frontverlauf ist ein Hinweis für das Fehlen von Vorentladungen. Die Durchschläge traten bei Spannungen bis knapp unterhalb des Wertes mit 100 % Durchschlagswahrscheinlichkeit hauptsächlich im Scheitel der Schaltspannung auf. Bei einigen Stößen spricht die Kugelfunkenstrecke bereits in der Front an, aber auch dann erst nach Erreichen des 90-%-Wertes des Scheitels.

Luftstrecken zwischen Elektrodenanordnungen, die die Bildung von kräftigen Vorentladungen während des Spannungsanstiegs, d. h. in der Front der Schaltspannung, gestat-

ten, z. B. bei Stab-Platte, Stab-Stab usw., verhalten sich grundsätzlich anders.

4.2 Stab-Platte

Da die Durchschläge vorwiegend in der Front der Schaltspannung auftreten, d. h. vor dem Erreichen des Scheitelwertes, stellt sich die Frage, ob der Scheitel der jeweiligen Vollwelle oder die Spannung im Moment des Durchschlages als Messwert der Spannungshöhe betrachtet werden muss. Einige Autoren befürworten, den Momentanwert beim Durchschlag für die Auswertung der Messresultate zu nehmen, und gehen sogar einen Schritt weiter mit dem Vorschlag, inskünftig Durchschlagversuche mit Schaltspannungen bei einer Prüfspannung von 100 % Durchschlagswahrscheinlichkeit durchzuführen. Die gemessenen Momentanwerte beim Durchschlag geben dann die statistische Verteilung der Durchschlagsspannungen [3; 4].

Durchschläge in der Front sind insbesondere ausgeprägt bei Prüfungen mit Schaltspannungen positiver Polarität. Zum Vergleich der unterschiedlichen Auswertungsmethoden wurde daher im folgenden nur die positive Polarität herangezogen.

Methode A wertet die Scheitelwerte der Vollwelle (beim Durchschlag in der Front extrapoliert) beim Eintreten des Durchschlages aus. Sie entspricht der üblichen Auswertungsmethode für Durchschlagversuche mit Normalstoss.

Methode B berücksichtigt bei der Auswertung die Momentanwerte beim Durchschlag [3; 4].

4.2.1 Polarität positiv, Schlagweite 2 m. Die gemessenen Momentanwerte beim Durchschlag werden in Klassen eingeteilt (Abstufung = Spannungsschritt), wie aus Tabelle I ersichtlich ist. Bei der 4. Spannungsstufe (771 kV) z. B. traten in der Front zwischen 625 und 661 kV vier, zwischen 662 und 698 kV wieder vier, zwischen 699 und 735 kV zwanzig und zwischen 736 und 771 kV 17 Durchschläge auf. Nach einem einfachen Satz aus der Wahrscheinlichkeitsrechnung ist die Durchschlagswahrscheinlichkeit bei 771 kV der Vollwelle 45 %, denn von den 100 Stößen wurden 55 gehalten. Bei der Berech-

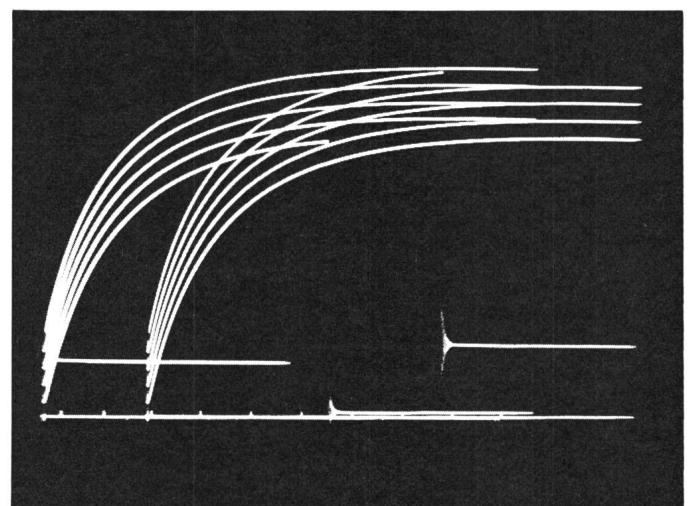


Fig. 3

Reihenaufzeichnung des Spannungsverlaufes bei der Eichung mit einer Kugelfunkenstrecke (Kugeldurchmesser 2000 mm) von der Schlagweite von 300 mm

Welle 200|4000 μ s pos. Polarität, Zeiteichung 50 μ s. Nach jedem Stoss wurde der KO-Strahl in vertikaler Richtung verschoben, bis 5 Stöße registriert waren, anschliessend wurde der Anfang der Stossaufzeichnung verschoben

Ermittlung der Durchschlagwahrscheinlichkeit aus den Momentanwerten beim Durchschlag bei Stab-Platte bei 2 m Schlagweite und positiver Polarität der Schaltspannung

Tabelle I

Spannungsstufe i	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	Anzahl Durchschläge Anzahl Stöße	Durchschlagwahrscheinlichkeit %
Scheitelwert kV	661	698	735	771	807	844	880		
Anzahl Spannungsstöße	50	100	100	100	100	100	100		
Momentanwert beim Durchschlag kV	Anzahl Durchschläge								
625...661	0	0	0	4	8	24	0	36/560	6,4
662...698		2	8	4	23	27	3	103/510	20,2
699...735			9	20	25	20	2	177/410	43,2
736...771				17	20	14	2	213/310	68,7
772...807					6	11	2	187/210	89,0
808...844						3	1	109/110	99,0
845...880							0	10/ 10	100

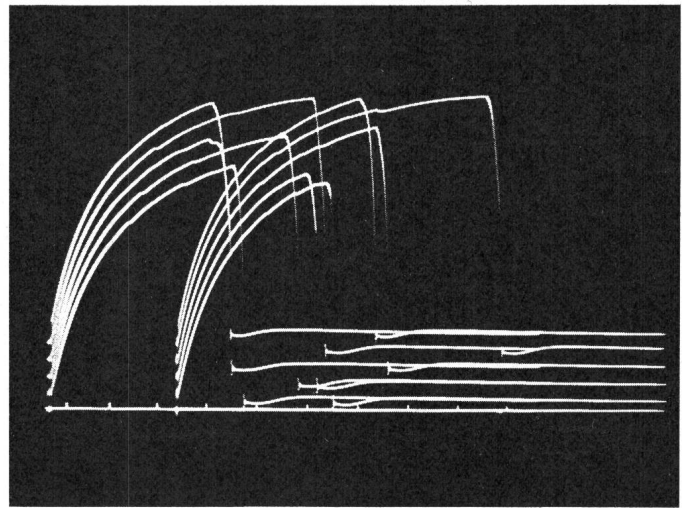


Fig. 5

Reihenzeichnung des Spannungsverlaufs bei der Prüfung der Anordnung Stab-Platte bei 2 m Schlagweite

Welle 200 | 4000 μ s pos. Polarität, Zeiteichnung 50 μ s

nung der Durchschlagwahrscheinlichkeit aus den Momentanwerten beim Durchschlag (Methode B) müssen auch alle Durchschläge in der Front bei Spannungen bis 771 kV der höheren Spannungsstufen (5., 6. und 7. Stufe in Tabelle I) berücksichtigt werden. Die niedrigen Spannungsstufen 1., 2. und 3. bleiben ausser Betracht, denn Durchschläge im Spannungsbereich 736...771 kV sind ja bei den Stufen niedrigerer Spannung nicht möglich. Aus Tabelle I folgt für Durchschlagsspannungen bis zur Spannungsklasse 736...771 kV total 213 Durchschläge von 310 verabreichten Stößen. Die entsprechende Durchschlagwahrscheinlichkeit ist somit 213/310

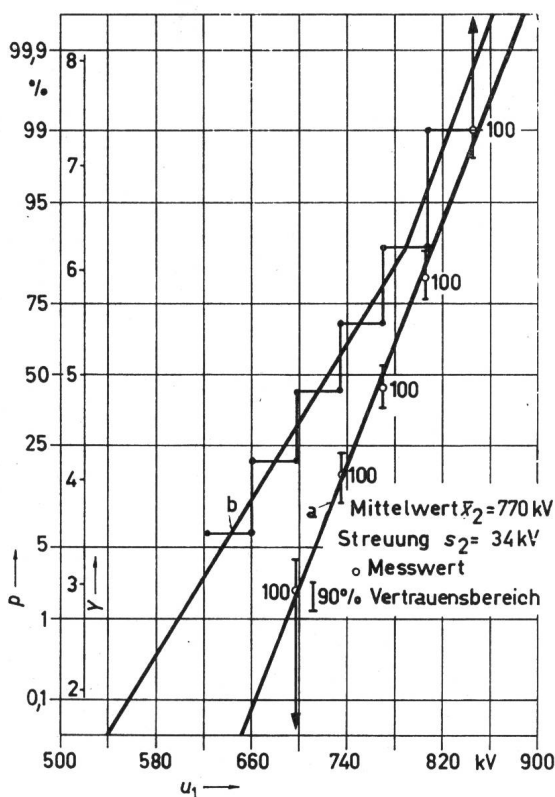


Fig. 4

Durchschlagwahrscheinlichkeit in Funktion der Spannung bei Stab-geerdete Platte bei 2 m Schlagweite

a aus fiktiven Scheitelwerten; b aus Momentanwerten beim Durchschlag; Welle 200 | 4000 μ s pos. Polarität, relative Feuchtigkeit 40 %, Raumtemperatur 23 $^{\circ}$ C, Barometerstand 730 mm Hg

Bezeichnungen siehe Fig. 2

= 68,7 % (Methode B). Die nach Methode B ausgewerteten Durchschlagwahrscheinlichkeiten sind in der letzten Kolonne rechts in der Tabelle I und in Fig. 4 (Kurve b) eingetragen. Bis zu einer Summenhäufigkeit von 90 % kann die statistische Verteilung der Durchschlagsspannungen durch eine Gaußsche dargestellt werden. Kurve b wurde durch die Mitte der Treppenfunktion (infolge Klasseneinteilung entstanden) gezogen.

Die Auswertung nach Methode A ergab Kurve a in Fig. 4 mit der Gleichung $Y = 5,015 + 0,0293(x - 771)$. Die statistische Verteilung der Durchschlagsspannungen kann durch eine Gaußsche dargestellt werden, denn trotz des schmalen 90 %-Vertrauensbereiches liegt die berechnete Regressionsgerade innerhalb der Vertrauensgrenzen. Die Zahlen neben den Messpunkten bedeuten die Anzahl verabreichter Stöße. Mittelwert und Streuung ermitteln sich zu $\bar{x}_2 = 770$ kV bzw. $s_2 = 34$ kV (4,4 % von \bar{x}_2).

Bei der Elektrodenanordnung Stab-Platte können weit vor dem Erreichen der Durchschlagsspannung sehr kräftige Vorentladungen während des Spannungsanstiegs auftreten. Die Durchschläge fanden deshalb vorwiegend in der Front statt (Fig. 5). Die kleinste Einsatzspannung der ersten sichtbaren Entladungen im Dunkeln war nur 150 kV, d. h. 20 % der entsprechenden mittleren Durchschlagsspannung. Die verhältnismässig grosse Streuung ist auf die Bildung der kräftigen Vorentladungen zurückzuführen (Vergleiche Kugel-Kugel und die entsprechenden Oszillogramme).

Insbesondere bei kleinen Durchschlagwahrscheinlichkeiten, z. B. $p = 1$ %, die gerade für die Beurteilung der elektrischen Festigkeit ausschlaggebend sind, ergab Methode B wesentlich niedrigere Spannungen, als bei einem normalen Vorgehen bei der Stossprüfung erwartet werden kann. Die dielektrische Prüfung hat gezeigt, dass bei 661 kV alle verabfolgten 50 Stöße gehalten wurden. Aus Kurve b in Fig. 4 folgt aber dafür eine Durchschlagwahrscheinlichkeit von 11 %, d. h. nach Methode B würden von den 50 verabreichten Stößen 5 Durchschläge erwartet, was nicht zutrifft. Die Durchschläge traten zwar vorwiegend in der Front auf, die maximale Durchschlagshäufigkeit aber verschiebt sich bei kleiner werdender Durchschlagwahrscheinlichkeit gegen den Scheitelwert der Schaltspannung (beachte die Anzahl Durchschläge

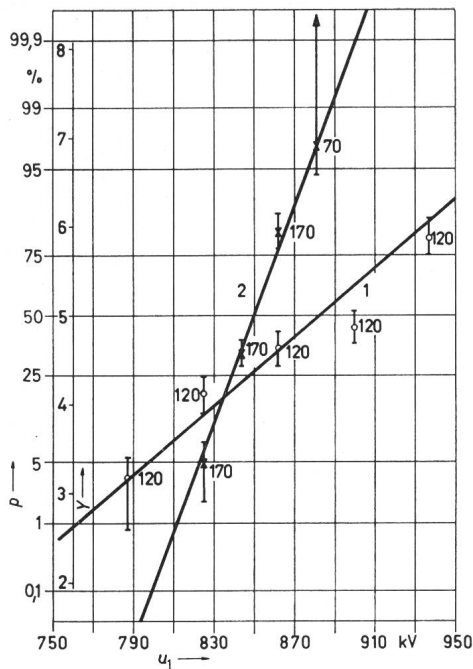


Fig. 6

Durchschlagwahrscheinlichkeit in Funktion der Spannung bei Welle 200|4000 μ s neg. Polarität

relative Feuchtigkeit 58 %, Raumtemperatur 19 °C, Barometerstand 730 mm Hg

1 Stab—geerdete Platte bei 0,8 m Schlagweite; 2 Stab—geerdeter Stab bei 1,2 m Schlagweite

Bezeichnungen siehe Fig. 2

bei den verschiedenen Spannungsstufen in Tabelle I). Dies trifft auch zu bei technischen Isolieranordnungen, z. B. Stützersäulen [5]. Bei 698-kV Prüfspannung mit 2 % Durchschlagwahrscheinlichkeit z. B. traten die Durchschläge erst nach Erreichen des 97,5-%-Wertes des Scheitels, d. h. praktisch im Scheitel der Schaltspannung, auf. Die übliche Methode A zur Ermittlung der Haltespannung und ihrer Vertrauensgrenzen von Isolierstrecken aus Durchschlagversuchen mit stufenweiser Spannungssteigerung, bis z. B. alle 10 Stöße der gleichen Spannungsstufe zum Durchschlag führen, ergab hingegen realistische Schätzungen. Selbstverständlich sollte eine weitreichende Extrapolation auf kleine Durchschlagwahrscheinlichkeiten bis z. B. 5 oder 1 % vermieden werden, d. h. die niedrigste Spannungsstufe muss genügend tief gewählt werden, so dass z. B. bei den 10 verabreichten Stößen kein einziger Durchschlag auftritt.

Die in [3] vorgeschlagene Prüf- und Auswertungsmethode B, bei der die Momentanwerte beim Durchschlag in der Front der Schaltspannung und nicht wie üblich die Scheitelwerte der Vollwelle berücksichtigt werden, ergab zu niedrige Haltespannungen (im vorliegenden Beispiel 600 statt 690 kV bei 1 % Durchschlagwahrscheinlichkeit), die nicht realistisch sind. Die gemessene Durchschlagwahrscheinlichkeit bei einer bestimmten Spannungshöhe der Vollwelle ist deshalb nach wie vor entscheidend für die statistische Verteilung der Durchschlagspannungen einer Isolieranordnung. Diese Auffassung entspricht auch der Mehrheit der Experten im Comité d'Etudes 42 der CEI (Hochspannungsmesstechnik), obwohl bisher, soweit dem Autor bekannt ist, nirgends in der Literatur ein sauberer Nachweis dieser Auffassung erbracht wurde.

4.2.2 Polarität negativ, Schlagweite 0,8 m. In rund 50 % aller Fälle wurden Durchschläge in der Front festgestellt, sonst

aber im Rücken, ja sogar erst nachdem die Spannung bis auf ca. 50 % des Scheitelwertes abgesunken ist. Die Resultate, ausgewertet nach Methode A (Scheitelwerte), sind aus Fig. 6 (Kurve 1) ersichtlich. Mit Ausnahme des Messwertes bei 900 kV liegt die berechnete Gerade $Y = 4,975 + 0,01945(x - 881)$ innerhalb der Vertrauensgrenzen der gemessenen Durchschlagwahrscheinlichkeiten. Die statistische Verteilung der Messwerte kann als eine Gaußsche betrachtet werden. Mittelwert und Streuung ermitteln sich zu 882 bzw. 52 kV (5,9 % vom Mittelwert). Im Gegensatz zur positiven Polarität traten bei negativer Polarität visuell feststellbare Vorentladungen erst im Streubereich der Durchschlagspannungen auf. Die verhältnismässig grosse Streuung ist vermutlich auf die Bildung von Vorentladungen zurückzuführen. Das Auftreten von Vorentladungen ist aus Fig. 7a ersichtlich. Fig. 7b mit 4 ms Ablenkzeit zeigt Durchschlagverzugszeiten bis zu 3,5 ms. Solche Durchschläge, die erst auftreten, nachdem die Spannung auf fast 50 % des Scheitelwertes abgesunken ist, sind keine Ausnahmen.

Die rund 2mal höhere Festigkeit von Luftstrecken zwischen Stab und Platte (trocken) bei negativer Polarität als bei positiver ist wahrscheinlich auf die verhältnismässig viel höhere Einsatzspannung der Vorentladungen zurückzuführen.

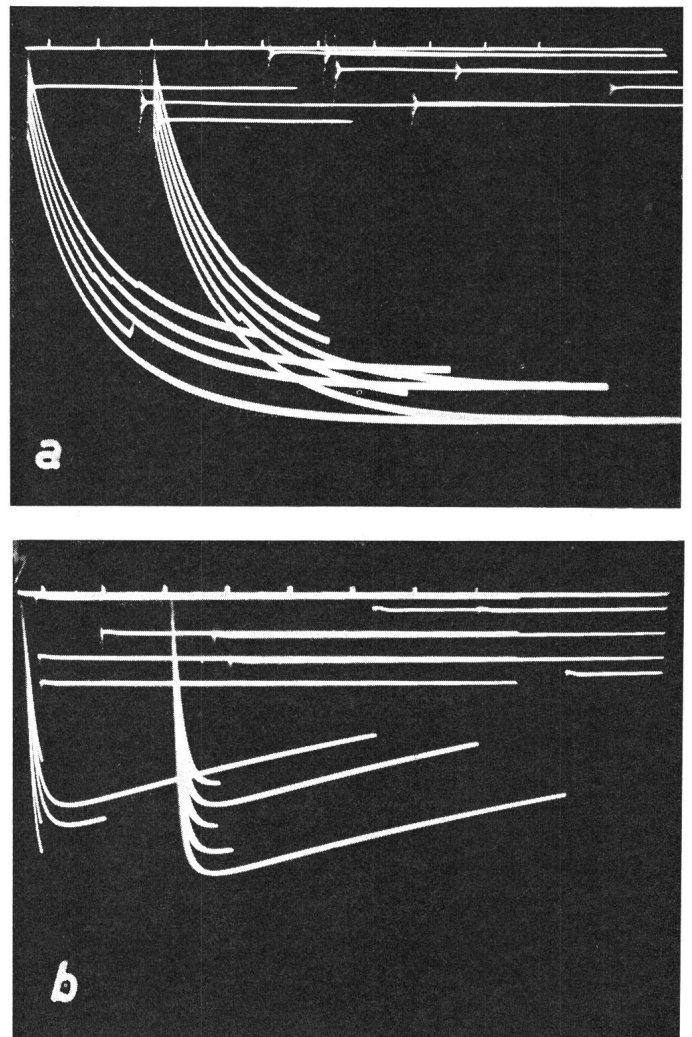


Fig. 7

Reihenaufzeichnung des Spannungsverlaufes zwischen Stab—Platte bei 0,8 m Schlagweite und Welle 200|4000 μ s neg. Polarität
a Zeiteichung 50 μ s, nur 5. Stoss gehalten; b Zeiteichung 500 μ s, alle 10 Durchschläge

Tabelle II

Spannungsstufe i	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	Anzahl Durchschläge Anzahl Stöße	Durchschlagwahrscheinlichkeit %
Scheitelwert kV	735	771	807	844	880	917	954	990		
Anzahl Spannungsstöße	50	70	70	70	70	70	70	50		
Momentanwert beim Durchschlag kV	Anzahl Durchschläge									
699...735	0	2	0	1	0	2	7	5	17/520	3,3
736...771		1	3	5	5	5	7	6	49/470	10,4
772...807			2	7	4	9	14	4	86/400	21,5
808...844				3	11	10	12	11	128/330	38,8
845...880					6	14	9	10	151/260	58,1
881...917						6	7	5	143/190	75,3
918...954							4	6	107/120	89,1
955...990								1	48/ 50	96,0

4.3 Stab—Stab

4.3.1 Polarität positiv, Schlagweite 1,75 m. Die Auswertungsmethode B (Tabelle II und Fig. 8, Kurve b) ergab wiederum zu niedrige Haltespannungen, die nicht der Wirklichkeit entsprechen. Die dielektrische Prüfung hat gezeigt, dass bei 735 kV alle angelegten 50 Stöße gehalten wurden. Aus Kurve b (Fig. 8) folgt aber dafür eine Durchschlagwahrscheinlichkeit von 6 %, d. h. es würden von den 50 verabreichten Stößen 3 Durchschläge erwartet, was nicht zutrifft. Nachfolgend wird die Richtigkeit der Auswertungsmethode A noch einmal hervorgehoben.

Die Auswertung nach Methode A ergab Kurve a in Fig. 8. Die berechnete Regressionsgerade $Y = 4,857 + 0,01625 (x - 880)$ liegt innerhalb der eng festgelegten Vertrauensgrenzen

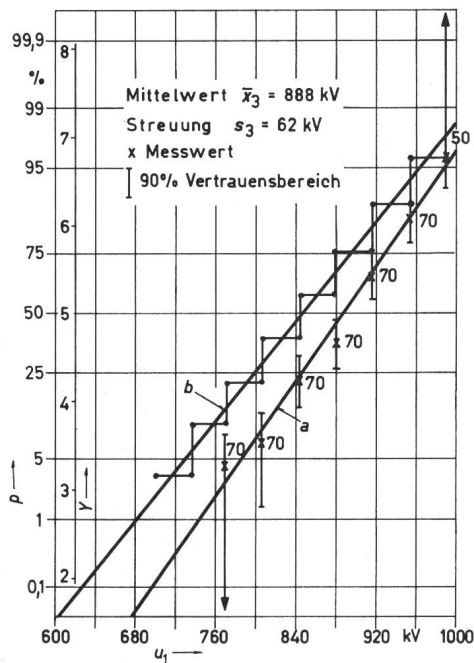


Fig. 8

Durchschlagwahrscheinlichkeit in Funktion der Spannung bei Stab—geerdeter Stab bei 1,75 m Schlagweite

a aus fiktiven Scheitelwerten; b aus Momentanwerten beim Durchschlag

Welle 200|4000 μ s pos. Polarität, relative Feuchtigkeit 55 %, Raumtemperatur 23 °C, Barometerstand 729 mm Hg

Bezeichnungen siehe Fig. 2

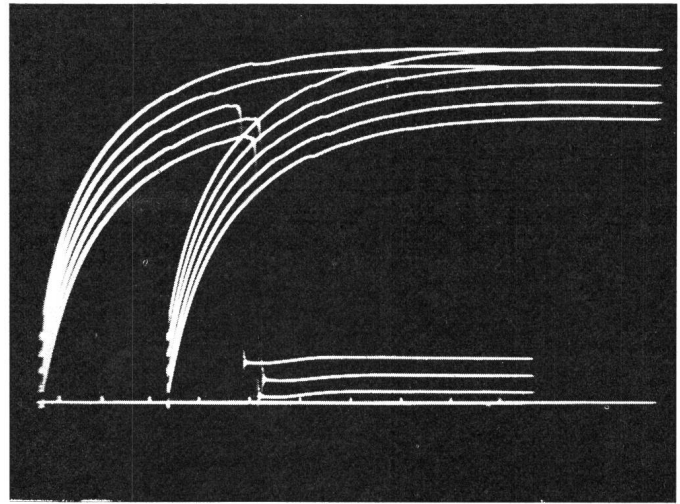


Fig. 9

Reihenfolgezeichnung des Spannungsverlaufes zwischen Stab—Stab bei 1,75 m Schlagweite und Welle 200|4000 μ s pos. Polarität
Zeiteichnung 50 μ s

der einzelnen Messwerte. Die statistische Verteilung der Durchschlagspannungen ist demnach Gaußsch, d. h. normal. Mittelwert und Streuung sind $\bar{x}_3 = 888$ kV bzw. $s_3 = 62$ kV (7 % von \bar{x}_3). Auch hier ist die beachtliche Streuung auf kräftige Vorentladungen in der Front der Schaltspannung zurückzuführen (Fig. 9). Die Durchschläge traten deshalb vorwiegend in der Front auf. Die maximale Durchschlaghäufigkeit verschiebt sich, wie bei Stab—Platte, bei kleiner werdender Durchschlagwahrscheinlichkeit gegen den Scheitelwert der Schaltspannung. Die kleinste Einsatzspannung der ersten sichtbaren Entladungen im Dunkeln war sehr tief, und zwar 260 kV, d. h. nur 30 % der mittleren Durchschlagspannung.

4.3.2 Polarität negativ, Schlagweite 1,2 m. Von den insgesamt 275 Durchschlägen traten nur 7, d. h. nur 2,5 % aller Fälle, in der Front auf, sonst aber im Rücken innerhalb 1000 μ s nach Erreichen des Scheitelwertes. Die Messergebnisse sind aus Fig. 6 (Kurve 2) ersichtlich. Die berechnete Regressionsgerade $[Y = 5,19 + 0,0623 (x - 853)]$ liegt also innerhalb der Vertrauensgrenzen der einzelnen Messwerte. Die statistische Verteilung der Durchschlagspannungen ist deshalb normal. Daraus lassen sich Mittelwert und Streuung ermitteln, $\bar{x} = 850$ kV bzw. $s = 16$ kV (nur 1,9 % von \bar{x}). Die verhältnismässig kleine Streuung (Größenordnung wie beim Normalstoss) ist auf das Fehlen von Vorentladungen bis zum Streubereich der Durchschlagspannungen zurückzuführen. Dies ist aus Fig. 10 mit den glatt verlaufenden Spannungszilogrammen (nur bei 2 Kurven konnte ein unbedeutend kleiner Zacken festgestellt werden) ersichtlich. Auch im Dunkeln konnten fast keine Vorentladungen beobachtet werden.

5. Schlussfolgerungen

Die Schätzung der Schaltspannungsfestigkeit von Luftstrecken, z. B. bei grundsätzlichen Anordnungen Stab—Platte und Stab—Stab, aus einer Messreihe von Durchschlagspannungen, d. h. aus den entsprechenden unbeeinflussten Schaltspannungsscheitelwerten, die vorhanden wären, wenn kein Durchschlag in der Front stattgefunden hätte, wird als zweckmässig nachgewiesen. Da bei Schaltspannungen, insbesondere bei positiver Polarität, die Durchschläge überwiegend in der Front auftreten, würde die Auswertung der

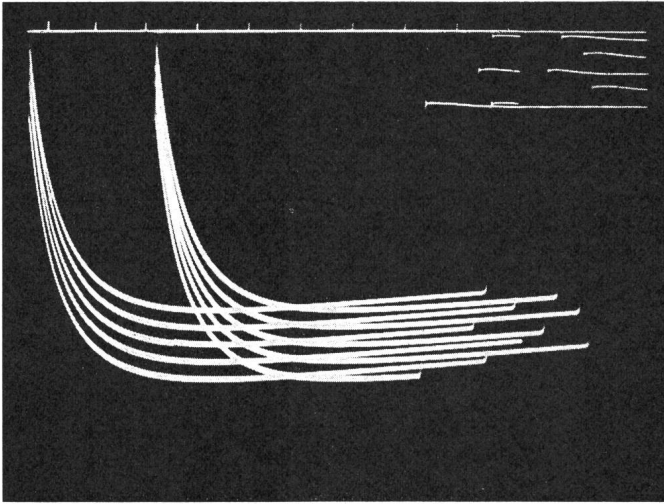


Fig. 10
Reihenaufzeichnung des Spannungsverlaufes zwischen Stab—Stab
bei 1,2 m Schlagweite und Welle 200|4000 μ s neg. Polarität
Zeiteichung 100 μ s

Momentanwerte beim Durchschlag eine wesentlich kleinere Festigkeit ergeben als die tatsächlich gemessene.

Die statistische Verteilung der Durchschlagspannungen darf als eine Gaußsche betrachtet werden. Die wesentlich grössere Streuung der Messwerte gegenüber Normalstossversuchsergebnissen ist auf die Bildung von kräftigen Vorent-

ladungen in der Front der Schaltspannung zurückzuführen. Sie können bereits bei 20 % der entsprechenden Durchschlagspannung auftreten. Sind solche Entladungen bis knapp unterhalb der Durchschlagspannung nicht vorhanden, so ist auch die Streuung der Messwerte wesentlich kleiner. Die rund 2mal höhere Festigkeit von Luftstrecken zwischen Stab und Platte (trocken) bei negativer Polarität als bei positiver ist wahrscheinlich auf die verhältnismässig viel höhere Einsatzspannung der negativen Vorentladungen zurückzuführen.

Der Verfasser dankt der Direktion der Maschinenfabrik Oerlikon für die Erlaubnis zur Veröffentlichung dieser Arbeit und O. Wohlfahrt, Chef des Versuchslabors für Transformatoren, für Anregungen und Hinweise.

Literatur

- [1] O. Wohlfahrt: Statistik als Instrument des Hochspannungs-Isolationstechnikers. E und M 74(1957)10, S. 223...228 + Nr. 12, S. 267...272.
- [2] A. Linder: Statistische Methoden für Naturwissenschaftler, Mediziner und Ingenieure. 2. Auflage. Basel, Birkhäuser, 1951.
- [3] M. Ouyang: New Method for the assessment of switching-impulse insulation strength. Proc. IEE 113(1966)11, p. 1835...1841.
- [4] G. Carrara et L. Marzio: Probabilité de décharge sous contrainte diélectrique. Rapport CIGRE 1968, N° 33-01 Annexe V.
- [5] B. Gänger: Elektrische Festigkeit von Luftisolationen bei hohen Schaltspannungen. ETZ-A 87(1966)21, S. 745...754.

Adresse des Autors:

T. H. Sie, Ingenieur der Maschinenfabrik Oerlikon, 8050 Zürich.

Literatur — Bibliographie

517.512.7 : 621.39

Transmission of information by orthogonal functions. By H. F. Harmuth. Berlin/Heidelberg/New York, Springer, 1969; 8°, XII, 322 p., 110 fig. Price: cloth Fr. 45.20.

Der Verfasser des vorliegenden Werkes ist weitherum als Kenner der Walsh-Funktionen bekannt geworden. Es sei deshalb vorweg gesagt, dass sich sein Buch zwar eingehend, aber nicht ausschliesslich mit den Walsh-Funktionen auseinandersetzt; vielmehr bietet es einen Querschnitt durch die gesamte Signaltheorie (communication theory) in konzentrierter Form. Dabei bilden die orthogonalen Funktionen, speziell die sinus-cosinus-Funktionen, die sinus-cosinus-Impulse und die Walsh-Funktionen, das Fundament, auf dem die Theorie mathematisch aufgebaut wird.

Nach einer mathematischen Einführung in die Orthogonalität (sogar eine «schnelle Walsh-Fourier-Transformation» ist hergeleitet) mit einem verallgemeinerten Frequenzbegriff wird gezeigt, dass Zeitmultiplex- und Frequenzmultiplex-Technik als Spezialfälle aus einer allgemeineren Orthogonalitäts-Multiplex-Technik hervorgehen mit wesentlichen Konsequenzen für Theorie und Applikation. Ein Kapitel ist der Trägertechnik gewidmet, wieder in

einem allgemeinen Sinn, indem auch die Möglichkeiten der Walsh-Träger eingehend untersucht werden. Die Resultate sind attraktiv für Informations-Übertragung und -Vermittlung und könnten noch zu mancher künftigen Entwicklung Anlass geben. Recht unorthodox sind die Ausführungen über nicht-sinusoidale elektromagnetische Wellen, die von Antennen in den Raum abgestrahlt werden können. Besonders sorgfältig sind sodann die Kapitel über regellose Vorgänge in der Nachrichtentechnik redigiert. Nach einer konzentrierten Einführung in die Theorie der statistischen Variablen wird gezeigt, wie regellose Vorgänge mit Hilfe orthogonaler Funktionen behandelt werden können. Der letzte Teil des Buches bietet eine Einführung in die Informationstheorie und einen Abriss über einige fehlergesicherte Codes, die ja teilweise ebenfalls von der Orthogonalität Gebrauch machen.

Das Werk ist hochaktuell. Denn, gerade die Gegenüberstellung der Walsh-Funktionen mit den sinus-cosinus-Funktionen zeigt, dass mit den modernen technologischen Mitteln der Digitaltechnik Lösungen für Probleme der Analogtechnik existieren, die durch ihre Eleganz und Originalität verblüffen und die nur gefunden werden können, wenn, wie es dieses Buch tut, die Signaltheorie von der Basis aus neu überdacht wird.

H. Mey