

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke
Band: 59 (1968)
Heft: 15

Artikel: Messung von Hochspannungsimpulsen mittels Kerrzellen
Autor: Schmied, H.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-916065>

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>

Um einen Vergleich über den relativen Aufwand zu ziehen, sei der von Thailand für das Hochspannungslaboratorium aufgebrachte Betrag mit der Summe verglichen, welche vom Bundesrat für den Neubau des Hochspannungslaboratoriums an der ETH beantragt wurde [10] ⁸⁾. Bezieht man beide Beträge auf das reale Bruttosozialprodukt pro Kopf der ganzen Bevölkerung des betreffenden Landes ⁹⁾, so stellt man fest, dass Thailand für sein neues Hochspannungslaboratorium dasselbe Vielfache des Bruttosozialproduktes pro Einwohner ausgab, wie die Schweiz für das neue Laboratorium an der ETH auszugeben bereit ist.

4. Ausblick

Nach der Schaffung und Einführung der Experimentalvorlesung in den Lehrplan der Ingenieurabteilung wird als nächste, vordringlichste Aufgabe ein Praktikum zusammengestellt, in welchem die Studenten ihre in der Vorlesung erworbenen Kenntnisse durch gezielte praktische und theoretische Betätigung vertiefen und erweitern können. Parallel zur Vorbereitung des Praktikums ist vorgesehen, die Laboreinrichtung durch einen Ölprüfraum zu ergänzen. Erst nach Abschluss dieser Arbeiten kann daran gedacht werden, in grösserem Maßstab Aufträge von Personen, welche ausserhalb der Universität stehen, anzunehmen. Es muss dabei berücksichtigt werden, dass die Halle während mindestens zwei Tagen pro Woche durch die Experimentalvorlesung belegt sein wird.

Das Laboratorium wird bereits jetzt von seiten der Elektrizitäts- und Kraftwerkgesellschaften in regelmässigem Abstand für Prüfungen angefragt. Prüfungen, die in der kurzen Zeit ausgeführt wurden seit das Laboratorium dem Betrieb übergeben wurde, betrafen hauptsächlich Kappen-Bolzen-Isolatoren und Stützisolatoren. Gelegentlich werden die Dienste des Laboratoriums bei der Abklärung von Betriebsstörungen wie Kurz- und Erdschlüssen oder auch für die Durchführung ergänzender Prüfungen bei Neuanschaffungen beigezogen.

Es darf mit Befriedigung festgestellt werden, dass das Laboratorium einem wirklichen Bedürfnis entspricht. Erfreulich sind auch die Studentenzahlen. Ungefähr die Hälfte aller Studierenden der Richtung Starkstromtechnik besuchen den als Freifachvorlesung angezeigten Kurs über Hochspannungstechnik.

⁸⁾ Ca. 8 Millionen sFr.

⁹⁾ Thailand: 570 sFr./Einwohner, Schweiz: 8000 sFr./Einwohner.

Um im Sinne des Mekong-Projektes nicht nur Ingenieuren aus Thailand als Ausbildungsstätte zu dienen, ist geplant, auch Studenten aus den drei anderen Mekong-Staaten, Laos, Kambodscha und (Süd)-Vietnam als Freifachhörer am Hochspannungslaboratorium aufzunehmen. Einer solchen Lösung stehen jedoch vorläufig noch Probleme sprachlicher Art entgegen, indem in Thailand Englisch, in den drei anderen Staaten jedoch Französisch als erste Fremdsprache gesprochen wird.

5. Dank

Der Schreibende möchte an dieser Stelle den schweizerischen Firmen und Kraftwerkgesellschaften danken, welche dem Laboratorium Demonstrationsmaterial in Form von Porzellanisolatoren und Leistungsarmaturen, Kabel- und Isolierstoffmustern, Schnittmodellen und Lichtbildern, welche die Funktionsweise ihrer Produkte erläutern, sowie Vorschriften zur Verfügung stellten.

Besonderer Dank gebührt auch der Forschungskommission des SEV und VSE für Hochspannungsfragen (FKH), aus deren reichhaltigem Material über das Phänomen des Blitzes eine gut dokumentierte Vorlesung über Blitz und Blitzschutz zusammengestellt werden durfte.

Letztlich, aber gerade deshalb besonders herzlich, sei Prof. Dr. K. Berger gedankt, dem wir dieses Jahr zu seinem 70. Geburtstag gratulieren dürfen. Trotz seiner grossen Arbeitslast an ETH, FKH, SEV und in internationalen Gremien hat er immer wieder Zeit gefunden, um uns bei der Lösung von Problemen zu helfen.

Literatur

- [1] *Etude du Marché de l'Energie pour les Usages Domestiques*: Commerciaux et Industriels dans le Bassin Inférieur du Mékong, 6 bols. Sofrelec, Paris, 1965.
- [2] *Committee for the Coordination of Investigations of the lower Mekong Basin*: Annual Report 1966, United Nations.
- [3] *Thailand Electric Power Study*: U. S. Agency for International Development, United States Operations Mission 1967.
- [4] Annual Reports of Yanhee Electricity Authority (YEA); Metropolitan Electricity Authority (MEA); Lignite Authority (LA); Provincial Electricity Authority (PEA); Northeast Electricity Authority (NEEA).
- [5] *Eidg. Amt für Energiewirtschaft*: Gesamte Erzeugung und Verwendung elektrischer Energie in der Schweiz, Bull. SEV 58(1967)20.
- [6] Mean annual and monthly temperatures over Thailand, Meteorological Department, Office of the Prime Minister, Bangkok 1966.
- [7] *M. Schüepp*: Die Temperaturverhältnisse der Schweiz, Bull. SEV 54(1963)13.
- [8] Einweihungsschrift: High Voltage Laboratory, Chulalongkorn University 1967.
- [9] *H. Prinz*: Feuer, Blitz und Funke, Zur Eröffnung des Institutes für Hochspannungs- und Anlagentechnik der TH München, F. Brückmann KG, München 1965.
- [10] Botschaft des Bundesrates an die eidgenössischen Räte vom 5. Juni 1967.

Adresse des Autors:

B. Staub, High-Voltage Laboratory, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, Bangkok, Thailand.

Messung von Hochspannungsimpulsen mittels Kerrzellen

Von H. Schmied, Hamburg

621.317.326.027.3:621.383.6

Nach einer Diskussion der Schwierigkeiten bei der Messung von Hochspannungsimpulsen mit Spannungsteilern wird die Verwendung von Kerrzellen zur Spannungsmessung vorgeschlagen. Der elektrooptische Kerreffekt ist bis etwa 500 MHz frequenzlinear, Kerrzellen sind bis in die Gegend von mehreren 100 kV ausgezeichnet spannungsfest herzustellen, und die erreichbare Messgenauigkeit ist wesentlich besser als 1 %. Das Meßsignal wird mit Hilfe von Licht übertragen. Die Kerrzelle gibt daher die Möglichkeit, Hochspannungsimpulse mit wenigen Nanosekunden Anstiegszeit sehr genau, ohne Störungen und vor allem erdfrei zu messen. Einer kurzen Übersicht über die theoretischen Grundlagen des Kerreffektes folgt eine Beschreibung der Eichung des Meßsystems und ein Messbeispiel.

Après une discussion sur les difficultés soulevées par les mesures des impulsions de haute tension à l'aide de potentiomètres, on propose pour la mesure de la tension l'application de cellules de Kerr. L'effet électrooptique de Kerr demeure linéaire à la fréquence jusqu'à 500 MHz environ. On peut exécuter des cellules de Kerr d'excellentes rigidités diélectriques jusqu'à des tensions de plusieurs centaines de kV et la précision de mesure dépasse sensiblement 1 %. Le signal de mesure est transmis par lumière. La cellule de Kerr fournit de ce fait la possibilité de mesurer avec une grande précision, sans perturbations et surtout sans mise à la terre, des impulsions de haute tension d'un temps de montée de quelques nanosecondes seulement. Un aperçu sommaire des principes théoriques de l'effet de Kerr est suivi d'une description de l'étalonnage du système de mesure et d'un exemple de mesure.

1. Einleitung

Wenn die Aufgabe gestellt wird, den Verlauf und die Amplitude eines Hochspannungsimpulses von mehreren 10 kV zu untersuchen, so wird dazu üblicherweise ein Spannungsteiler in Verbindung mit einem Oszillographen verwendet. Diese Methode weist jedoch 3 Nachteile auf, die die geforderte Untersuchung unter Umständen unmöglich machen.

a) Das erhaltene Messergebnis ist mit einem Mindestfehler von 3% behaftet, da dies die Genauigkeitsgrenze der Oszillographen darstellt.

b) Soll der Spannungsverlauf an einem Verbraucher oder einem anderen Element des Kreises gemessen werden, welches nicht auf Erdpotential ist, so ist diese Messung unmöglich. Selbst wenn man den gesamten Messkreis galvanisch erdfrei aufbaut (dies erfordert z. B. einen batteriebetriebenen Oszillographen), sind Streukapazitäten zur Erde unvermeidbar. Diese verfälschen aber das Messergebnis.

c) Tritt der unter b) dargestellte Fall nicht auf — kann also der Spannungsteiler geerdet werden — so gestaltet sich die Messung trotzdem schwierig, da die Messapparatur gegen die von einem Impulsgenerator abgestrahlte Hochfrequenz zu schützen ist, und die bei einer solchen Messung stets auftretenden Erdungsprobleme des Messkreises zu bewältigen sind.

All diese Hindernisse können aus dem Weg geräumt werden, wenn man sich zur Verfolgung des Spannungsverlaufes einer Kerrzelle bedient [1]¹⁾. Die Kerrzelle ermöglicht eine völlige galvanische Trennung von Mess- und Stosskreis, da die Information mittels Licht übertragen wird. Die eigenartige \sin^2 -Charakteristik des Kerreffektes gestattet es, die Amplitude des Impulses so genau zu messen, dass der Fehler kleiner als 1% wird.

2. Zur Theorie des Kerreffektes

Die Moleküle einer Flüssigkeit, die von Natur aus elektrische Dipole sind (wie z. B. jene des Nitrobenzols, Schwefelkohlenstoffes oder Wassers) nehmen ohne äussere Einwirkung statistisch alle möglichen Richtungen im Raum ein, so dass sich die Flüssigkeit isotrop verhält. Bei Anlegen eines elektrischen Feldes werden die Moleküle ausgerichtet; die Flüssigkeit wird optisch aktiv und nimmt die Eigenschaft eines einachsigen Kristalles an, dessen optische Achse in Richtung des elektrischen Feldes liegt. Dieser Effekt wurde von J. Kerr 1875 entdeckt und später nach ihm benannt.

Trifft linear polarisiertes Licht, dessen elektrischer Vektor mit dem elektrischen Feld einen Winkel von 45° einschliesst, die elektrisch-doppelbrechende Flüssigkeit, so pflanzen sich die beiden Komponenten des Lichtvektors parallel und senkrecht zum elektrischen Feld mit verschiedener Geschwindigkeit fort. Das Licht verlässt daher die Flüssigkeit im allgemeinen elliptisch polarisiert [3...5].

Um diesen Vorgang zur Lichtmodulation zu verwenden, benutzt man eine Kerrzelle. Diese besteht aus einem Platten-

1945-50

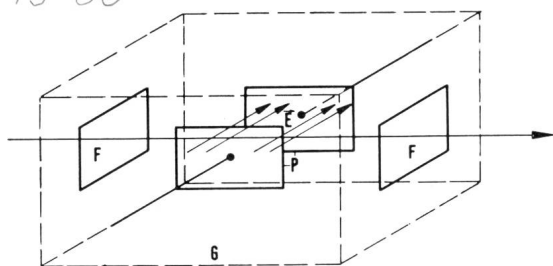


Fig. 1
Skizze einer Kerrzelle

F Kerrzellenfenster; P Kondensatorplatten; \vec{E} elektrischer Feldstärkevektor; G Gehäuse

¹⁾ Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

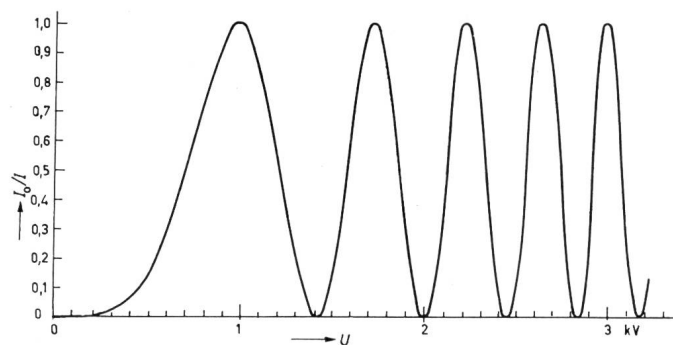


Fig. 2
Relative Lichtintensität I_0/I als Funktion der Spannung U an der Kerrzelle normiert auf die erste Hellspannung

kondensator, der sich in einem geschlossenen, mit Fenstern versehenen Gehäuse befindet, und dessen Dielektrikum aus einer Kerrflüssigkeit besteht (Fig. 1). In der meist verwendeten Anordnung wird die Zelle zwischen zwei gekreuzten Polarisatoren so angebracht, dass deren Polarisations Ebenen mit dem elektrischen Feldstärkevektor einen Winkel von 45° einschliessen. Im Ruhezustand tritt also kein Licht durch diese Anordnung. Legt man jedoch eine Spannung an die Kerrzelle, so wird elliptisch polarisiertes Licht auf den Analysator treffen. Dieser lässt hiervon die in seiner Polarisations Ebene liegende Komponente passieren — man beobachtet eine Aufhellung des Systems. Die Intensität I des Lichtstrahles, der die Anordnung verlässt, ergibt sich dann unter Vernachlässigung der Reflexions- und Absorptionsverluste zu:

$$I = \frac{1}{2} I_0 \sin^2 \left(\frac{1}{2} \Phi \right) \quad (1)$$

mit I_0 Intensität des unpolarisierten Lichtstrahles, der den Polarisator trifft; Φ Phasendifferenz zwischen den beiden Vektorkomponenten des Lichtes parallel und senkrecht zum elektrischen Feld.

$$\Phi = 2 \pi k l \vec{E}^2 \quad (2)$$

Darin bedeuten:

k Kerrkonstante; l Länge des Lichtweges in der Kerrzelle; \vec{E} elektrischer Feldstärkevektor.

Die Lichtintensität ergibt sich dann aus Gl. (1) und (2):

$$I = \frac{1}{2} I_0 \sin^2 (\pi k l \vec{E}^2) \quad (3)$$

Fig. 2 zeigt diesen Verlauf der Lichtintensität als Funktion der an die Kerrzelle angelegten Spannung. Die Abszisse ist auf die erste Hellspannung normiert.

Als Hellspannung der Kerrzelle sei nun jene Spannung definiert, die an die Zelle gelegt werden muss, um $I = I_0/2$ zu bekommen, bzw. maximale Helligkeit des austretenden Lichtstrahles zu erreichen. Dies ist dann der Fall, wenn:

$$\sin^2 (\pi k l \vec{E}^2) = 1 \quad (4)$$

oder

$$\pi k l \vec{E}^2 = \frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{2}, \frac{5\pi}{2} \dots \quad (5)$$

ist.

Die Gesamtdrehung der Polarisations Ebene nach Austritt aus der Flüssigkeit muss also in dieser Anordnung (d. h. gekreuzte Polarisatoren) 90° , 270° , 450° usw. betragen.

Die erste Hellspannung errechnet sich bei gegebenem Lichtweg l und Plattenabstand d :

$$\vec{E}^2 = \frac{1}{2k l} \quad (6)$$

bzw.

$$u = \frac{d}{\sqrt{2k l}} \quad (7)$$

3. Die Kerrflüssigkeit

Die Tabelle I beinhaltet eine Aufstellung der für uns wesentlichen Eigenschaften einiger Kerrflüssigkeiten:

Eigenschaften einiger Kerr-Flüssigkeiten

Tabelle I

Flüssigkeit	Kerrkonstante k bei $\lambda = 538 \text{ nm}$ V cm^{-2}	Dielektrizitätskonstante ϵ	Kurzwellige Absorptionskonstante nm
Nitrobenzol $\text{C}_6\text{H}_5\text{NO}_2$	$4,3 \cdot 10^{-10}$ (546 nm)	36	440
Benzonitril $\text{C}_6\text{H}_5\text{CN}$	$1,3 \cdot 10^{-10}$	26,3	330
Wasser H_2O	$4,4 \cdot 10^{-12}$	80	180
Schwefelkohlenstoff CS_2	$3,7 \cdot 10^{-12}$	5,1	—
Chloroform CHCl_3	$3,2 \cdot 10^{-12}$	2,6	—

Wegen seiner hohen Kerrkonstante wird hauptsächlich Nitrobenzol als Kerrflüssigkeit eingesetzt. Fig. 3 zeigt in einem Diagramm die Hell- und Dunkelspannungen einer Nitrobenzol-Kerrzelle als Funktion der Lichtwellenlänge λ . Mit wachsender Temperatur nimmt die Kerrkonstante aller Flüssigkeiten ab, für Nitrobenzol um etwa 1,2 %/°C bei den Wellenlängen zwischen 440 und 546 nm. Der Gefrierpunkt von Nitrobenzol mit einem spezifischen Widerstand von $10^8 \Omega\text{cm}$ liegt bei + 4 °C.

Der Kerreffekt ist eng mit der Dielektrizitätskonstante verknüpft. Aus der Messung der Frequenzabhängigkeit von ϵ lässt sich daher direkt auf den nutzbaren Frequenzbereich der Kerrflüssigkeit schliessen. Clark [2] hat einen völlig flachen Frequenzverlauf des Nitrobenzols bis etwa 500 MHz bei 25 °C gemessen. Dies bedeutet, dass man mit einer Kerrzelle noch Spannungsimpulse mit einer Anstiegszeit von 0,7 ns verfolgen kann, wenn die verhältnismässig hohe Kapazität der Zelle den zu messenden Impuls nicht verfälscht. Die Ohmsche Belastung des Impulsgenerators durch die Messzelle dürfte dagegen stets zu vernachlässigen sein, da der spezifische Widerstand bestgereinigten Nitrobenzols bis zu $10^{10} \Omega\text{cm}$ beträgt, wobei die Durchschlagfestigkeit 150 kV/cm erreichen kann [7].

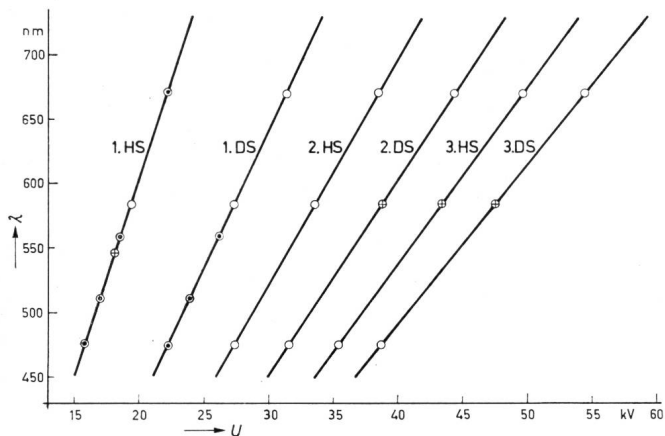


Fig. 3

Hell- (HS) und Dunkelspannung (DS) U der Kerrzelle als Funktion der Lichtwellenlänge λ

- berechneter Wert; ● statisch ermittelter Messpunkt;
- dynamisch ermittelter Messpunkt

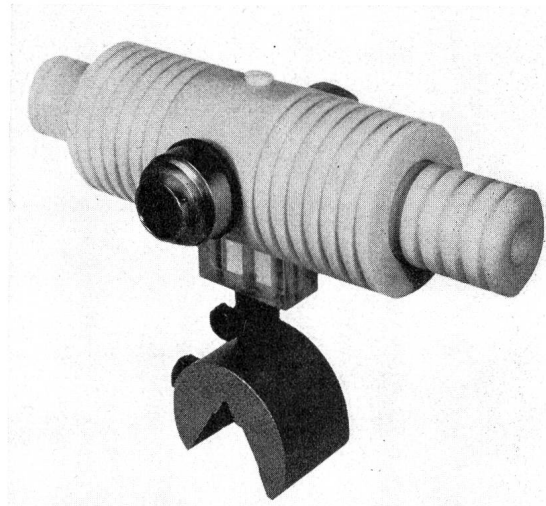


Fig. 4

Bild der Kerrzelle mit angeschraubten Glan-Thomson-Prismen

4. Die Kerrzelle

Die für die vorliegende Arbeit verwendete Kerrzelle besitzt einen Zellenkörper, der aus Nitrobenzol chemisch widerstehendem Kunststoff gefertigt ist. Wie man auf Fig. 4 erkennt, ist er mit einer Anzahl von Rillen versehen, um den Gleitfunkenweg zwischen den beiden Elektrodenanschlüssen zu verlängern und so die Spannungsfestigkeit zu erhöhen. Die Kondensatorplatten haben einen runden Querschnitt, sind auswechselbar und gestatten die Einstellung eines Abstandes zwischen 0,6 und 14 cm. Der Messbereich dieser Zelle erstreckt sich somit von 10...500 kV.

Hilke [5] untersuchte, welches Elektrodenmaterial der Zersetzung durch das Nitrobenzol am besten widersteht. Er kam zu dem Ergebnis, dass Nickel neben Messing, Silber und Gold das günstigste Material darstellt. Aus diesem Grund wurden die Elektroden der Kerrzelle vernickelt.

Um eine genaue Berechnung des Lichtweges zu ermöglichen, wurde in der Mitte der Kerrzellenfenster eine Blende von 5 mm Durchmesser angebracht. So wird jenes Licht ausgeblendet, welches den oberen und unteren Plattenrand und das dort verzerrte elektrische Feld passieren würde.

Die Kerrzelle hatte für das hier angeführte Messbeispiel einen Elektrodenabstand von 1 cm. Die erste Hellspannung kann somit nach Gl. (7) berechnet werden, wenn man die Länge des Lichtweges korrigiert [8], d. h. es müssen die Randinhomogenitäten berücksichtigt werden. Diese liefern über die Kondensatorplattenlänge hinaus einen Beitrag zum Lichtweg:

$$l = L + \frac{d}{\pi} \left[1 + \frac{D}{d} \ln \left(1 + \frac{d}{D} \right) \right] \quad (8)$$

worin l korrigierter Lichtweg; L Länge der Kondensatorplatten; d Elektrodenabstand; D Dicke der Kondensatorplatten.

l ergibt sich zu 3,425 cm und U nach Gl. (7) zu 18,3 kV. λ ist hierbei 546 nm und die dazugehörige Kerrkonstante $4,30 \cdot 10^{-10} (\text{cm V}^{-2})$ bei 20 °C. Dieser Wert (18,3 kV Hellspannung bei 546 nm) wurde in die äusserste linke Gerade von Fig. 3 eingetragen und fügt sich dort ausgezeichnet ein. Die übrigen Messpunkte von Fig. 3 wurden mit Hilfe einer statischen und dynamischen Eichung der Kerrzelle ermittelt.

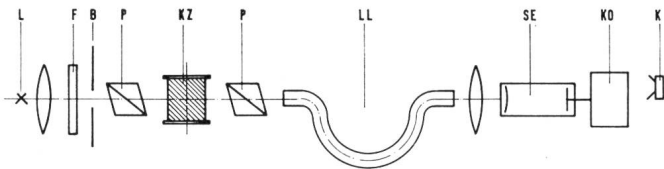


Fig. 5

Schematische Darstellung einer Messanordnung zur Spannungsmessung mit Hilfe einer Kerrzelle

L Lichtquelle; F monochromatisches Filter; B Blende; P Polarisator; KZ Kerrzelle; LL Lichtleiter; SE Photosensor; KO Oszillograph; K Oszillographenkamera

Die Kapazität dieser Kerrzelle wurde gemessen und ergab sich zu 42 pF.

5. Die Messanordnung

Am besten wird die Anordnung der Kerrzelle und der anderen zur Hochspannungsmessung notwendigen Einrichtungen an Hand von Fig. 5 erklärt: Die Lichtquelle L muss während der Messdauer eine konstante Lichtintensität abgeben und bedarf daher einer gut gesieberten Gleichspannungsspeisung. Da die Kerrkonstante eine Funktion der Lichtwellenlänge ist, muss das verwendete Licht monochromatisch sein. Um den Messbereich des Systems variieren zu können, wird man sich eines Lichtbogens und verschiedener monochromatischer Filter bedienen. Ist das Messproblem aber von vornherein abgegrenzt, genügt auch eine Quecksilber- oder Kadmiumlampe, deren gewünschte Spektral-Linie ebenfalls mit einem Filter ausgewählt wird. Allerdings ist zu beachten, dass Nitrobenzol bei 440 nm eine ausgeprägte Absorptionskante besitzt, so dass die UV-Linien einer Quecksilberlampe nicht verwendet werden können [3].

Bei der hier verwendeten Kerrzelle waren, wie man auch auf Fig. 4 erkennen kann, die Polarisatoren direkt an die Kerrzelle angeschraubt. An dem Analysator konnte ausserdem ein Lichtleiteranschluss angebracht werden. Oszillograph KO und Photosensor SE befinden sich zur Abschirmung von elektromagnetischen Störungen und der damit verbundenen Verfälschung der Messergebnisse meist in einer Messkabine. In diesem Fall ist es oft unmöglich, die Lichtquelle direkt auf dem Photosensor abzubilden; man benutzt daher einen Lichtleiter LL. Der Photosensor ist entsprechend der aufzulösenden Anstiegszeit und der zur Verfügung stehenden Lichtintensität beispielsweise eine Photodiode, eine Photozelle, ein Multiplier oder eine Biplanarzelle.

6. Eichung der Messanordnung

Die Eichung der Kerrzelle besteht in der Bestimmung der Hell- und Dunkelspannungen. Entsprechend den verfügbaren apparativen Einrichtungen und der geforderten Messgenauigkeit wird man eine der folgenden Eichmethoden verwenden:

a) Der Photosensor besitze keinen gleichspannungsgekoppelten Ausgang oder darf nicht mit Gleichlicht belastet werden:

Man benutzt eine Impulslichtquelle und beobachtet die Lichtamplitude des Systemausganges mit Photosensor und Oszillograph, während man die Spannung an der Kerrzelle variiert und misst. Solcher Art sucht man die Intensitätsmaxima und -minima auf.

Eine andere Möglichkeit besteht darin, eine Gleichlichtquelle zu verwenden und die Zelle mit Spannungsimpulsen zu eichen, deren Verlauf man entweder mit demselben Zweistrahloszillographen verfolgt, oder dessen Amplitude man mit einem Spitzenspannungsinstrument oder einer Kugelfunkenstrecke misst.

Lässt es die Bandbreite des Photosensors zu, kann man die Kerrzelle auch mit technischen Wechselspannungen kalibrieren. Wenn

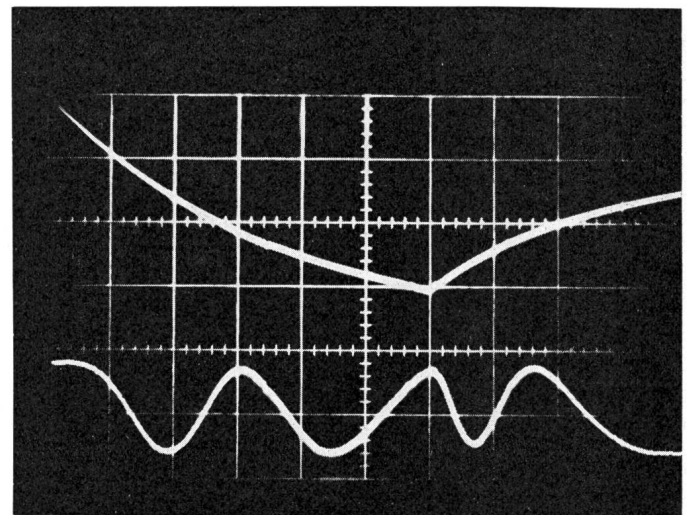
eine höhere Frequenz als 50 Hz zur Verfügung steht, kann die Kerrzelle mit Spannungen belastet werden, die die Höhe der Durchbruchfeldstärke erreichen, da das Nitrobenzol bis zum Durchschlag etwa 10 ms benötigt [7].

b) Der Ausgang des Photosensors sei gleichspannungsgekoppelt: In diesem Fall kann die Messanordnung mit einer Gleichlichtquelle und Gleichspannung ausgemessen werden.

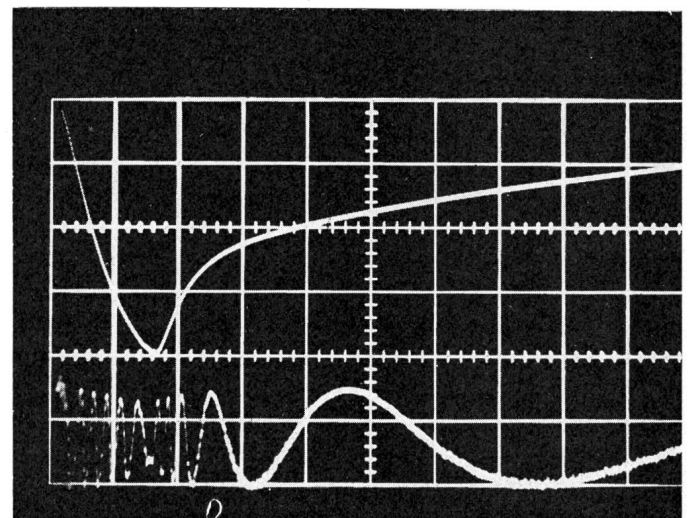
c) Es wird eine beliebige Gleichspannung an die Kerrzelle gelegt, und die Drehung der Polarisationsenebene mit dem Polarimeter ermittelt. Diese Eichanordnung besteht aus einer Lichtquelle, monochromatischen Filtern, der Kerrzelle und einem Polarimeter. Mit Hilfe des gemessenen Drehungswinkels werden die Hell- und Dunkelspannungen errechnet und ein Diagramm nach Fig. 2 erstellt.

7. Ein Messbeispiel

Die vorhandene Kerrzelle sei mit Gleichspannung und Gleichlicht geeicht. Als Photosensoren dienen Photozellen, deren Kathodenstrom mit einem Galvanometer gemessen wurde. Fig. 2 und 3 zeigen die Messergebnisse. Während Fig. 3 nur die Hell- und Dunkel-Spannungen als Funktion der Lichtwellenlänge darstellt, kann man Fig. 2 den Inten-



a



b

Fig. 6

Oszillogramme eines Spannungsimpulses

a Abszisse: 1 μ s/E; oberer Strahl: Stoßspannungsteilersignal
Ordinate 10 kV/E; unterer Strahl: Spannungsverlauf mittels Kerrzelle mit 475 nm Lichtwellenlänge;

b Abszisse 5 μ s/E; oberer Strahl: Stoßspannungsteilersignal
Ordinate 13 kV/E; unterer Strahl: Spannungsverlauf mittels Kerrzelle mit 475 nm Lichtwellenlänge.

sitätsverlauf des Lichtes als Funktion der Kerrzellenspannung entnehmen. λ ist dabei mit 475 nm konstant gehalten.

Zur dynamischen Überprüfung der Eichergebnisse wurden Hochspannungsimpulse an die Kerrzelle gelegt. Der Verlauf dieser Impulse wurde mit einem Ohmisch-kapazitiven Spannungsteiler registriert. Das Spannungsteilersignal und der Intensitätsverlauf des Lichtes wurden gleichzeitig mit einem Zweistrahloszillographen beobachtet. Fig. 6 zeigt zwei typische Beispiele solcher Oszillogramme.

Der obere Strahl stellt den Spannungsverlauf dar, der mit dem Teiler gemessen wurde. Der Spannungsimpuls hat negative Polarität. Ebenso ist das Multipliersignal (unterer Strahl) negativ. Man erkennt den charakteristischen $\sin^2 \vec{E}^2$ -Verlauf, der allerdings etwas verzerrt dargestellt ist, da der Spannungsimpuls in etwa einer e-Funktion folgt. Gleichzeitig können aber auch zwei Tatsachen festgestellt werden: Erstens muss man ein Kerrzellenoszillogramm auswerten, um den Spannungsverlauf zu erhalten. Entweder wird eine Tabelle der Hell- und Dunkelspannungen erstellt, oder ein Nomogramm gezeichnet. Zweitens kann die Impulshöhe und der Verlauf mit grösserer Sicherheit bestimmt werden als es die Messgenauigkeit des Oszillographen bei Messung mit einem Tastkopf zuliesse. Im Bereich der fünften Hellspannung des Oszillogramms macht eine Spannungsänderung von 1,5 % bereits eine Lichtintensitätsänderung von 25 % aus. 5 % Amplitudenänderung eines dementsprechend hoch gezeichneten Lichtoszillogramms sind noch einwandfrei erkennbar. Man kann in diesem Bereich also noch 0,3 % Spannungsänderung registrieren. Die Empfindlichkeit steigt aber noch mit der Anzahl der erhaltenen Intensitätsmaxima und -minima. Die absolute Messgenauigkeit wird also nur durch den Eichfehler bei der Bestimmung der Hellspannung begrenzt. Allerdings muss für eine Präzisionsmessung die Temperatur der Kerrflüssigkeit mitgemessen und das Messergebnis bei Temperaturänderung entsprechend korrigiert werden.

Eine Messung niederer Spannungen im Bereich zwischen 0 und der ersten Hellspannung stösst jedoch auf einige Schwie-

rigkeiten. (Dies gilt in unserem Fall für Spannungen zwischen 0 und 15,8 kV bei 475 nm, siehe Fig. 2.) Zu diesem Zwecke wäre nämlich eine Normallichtquelle notwendig, da eine Ungleichmässigkeit der Lichtintensität das Messergebnis verfälscht. Bei jeder Änderung des Aufbaues, die das I_0 beeinflusst (z. B. Wechsel des Lichtleiters LL in Fig. 5), müsste das ganze System neu geeicht werden. Man wird also bestrebt sein, die Hellspannung der Kerrzelle so zu wählen, dass das Messoszillogramm mindestens ein Lichtintensitätsmaximum aufweist. Auf dieses kann man dann die gesamte Messung normieren. Das heisst also, die zu messende Spannung soll höher als die Hellspannung der Kerrzelle sein. Dann ist I_0 jeder einzelnen Messung zu entnehmen, und die Lichtquelle hat nurmehr während der Messdauer hinreichend konstant zu bleiben.

Literatur

- [1] F. B. A. Früngel: High speed pulse technology. New York/London, Academic Press, 1965, Vol. 2, S. 331.
- [2] G. L. Clark: Dielectric properties of nitrobenzene in the region of anomalous dispersion. Journal of chemical physics 25(1956), S. 125...129.
- [3] E. F. Kingsbury: The Kerr electrostatic effect. Rev. scient. instrum. 1(1930), S. 22...32.
- [4] F. G. Dunnington: The electrooptical shutter; its theory and technique. Physical rev. 38(1931), S. 1506...1534.
- [5] O. Hilke: Untersuchungen über den Einfluss verschiedener Substituenten und ihrer Stellung auf den Kerreffekt. Zeitschrift für Physik 103(1936), S. 350...394.
- [6] F. Kohlrausch: Praktische Physik. 21. Auflage. Stuttgart, Teubner, 1960, Bd. 1, S. 642.
- [7] E. J. White: The technique of Kerr cells. Rev. scient. instrum. 6(1935), S. 22...26.
- [8] L. Chaumont: Recherches expérimentales sur le phénomène électrooptique de Kerr et sur les méthodes servant à l'étude de la lumière polarisée elliptiquement. Annales de physique 9/5(1916), S. 17...78.

Adresse des Autors:

Dr. H. Schmied, Impulsphysik GmbH, 400, Sülldorfer Landstrasse, Postfach, D-2 Hamburg 56-Rissen.

Die Berechnung elektrischer Belastungen von Industriebetrieben mit Hilfe digitaler Rechenautomaten

Von H.-J. Weidner, Leipzig

621.316.176.016.3:681.322

Am Beispiel eines Strahlennetzes wird gezeigt, wie man für grosse in der Projektierung befindliche Industriebetriebe den Leistungs- und Energiebedarf sowie die Netzverluste mit Hilfe des Digitalrechners aus den Verbraucherdaten nach der Methode des geordneten Belastungsdiagramms berechnet. Das Rechenprogramm kann zunächst zur Auswahl der Kabel und Transformatoren nach der Erwärmung herangezogen werden. Sind die anderen technischen Forderungen erfüllt und damit die elektrischen Betriebsmittel endgültig dimensioniert, so bestimmt man die tatsächlichen Werte, auch die des Energiebedarfs und der Netzverluste. Durch eine Variantenrechnung können sowohl die jahreszeitlichen als auch die durch den Schichtbetrieb auftretenden Veränderungen erfasst werden. Das Programm ermöglicht die Berücksichtigung der verschiedenen Verbraucherarten sowie der Blindstrom-Kompensationseinrichtungen. Alle benötigten Verbraucher- und Netzdaten werden mittels einer Kartei erfasst.

1. Methoden der Ermittlung des elektrischen Leistungsbedarfes

Seit etwa 15 Jahren beschäftigt man sich eingehend mit Methoden zur Berechnung des elektrischen Leistungsbedarfes

A l'exemple d'un réseau en antenne on démontre pour les grandes entreprises industrielles projetées la manière de calculer sur la base du diagramme de charge ordonné et à l'aide d'une calculatrice numérique le besoin d'énergie et de puissance, ainsi que les pertes au réseau. Le programme de calcul peut servir en premier lieu à la sélection des câbles et des transformateurs choisis en fonction de l'échauffement. Lorsque les autres exigences techniques sont remplies et les moyens d'exploitation électriques définitivement dimensionnés, on détermine les valeurs effectives, à l'inclusion du besoin d'énergie et des pertes au réseau. Un calcul de variantes permet de préciser les modifications causées aussi bien par les saisons que par l'exploitation par équipes alternées. Le programme permet de considérer les cartes de consommation les plus diverses, ainsi que les installations de compensation du courant réactif. Toutes les données relatives aux consommateurs et au réseau sont enregistrées dans une cartothèque.

von Industriebetrieben. Diese Berechnungsverfahren unterscheiden sich meist von den bekannten Berechnungsverfahren der öffentlichen Energieversorgung. Es wurden in erster Linie Berechnungsverfahren für einen zeitlich unbekanntem Bela-