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: 14

Artikel: Die Bedeutung von Verlustfaktormessungen bei der Wartung der Hochspannungswicklung von Turbogeneratoren

Autor: Teichmann, H.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-915054

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: 09.12.2025

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

Die Bedeutung von Verlustfaktormessungen bei der Wartung der Hochspannungswicklung von Turbogeneratoren

Von H. Teichmann

621.313.322-81:621.3.045:621.317.384

Die Ergebnisse von Verlustfaktormessungen bei der Revision der Statorwicklung grosser Turbogeneratoren werden diskutiert. Es zeigt sich, dass dieser Versuch für Kunstharzisolation von untergeordneter Bedeutung und zur Beurteilung der Alterung von Asphaltmicaisolation nicht geeignet ist.

L'auteur discute des résultats de mesures du facteur de pertes lors de la révision de l'enroulement statorique des grands turbo-alternateurs. Il constate que cet essai n'a guère de signification pour des isolations à base de résine synthétique et qu'il ne convient pas pour juger du degré de vieillissement d'isolations en mica à l'asphalte.

1. Einleitung

Die Wartung der Statorwicklung ist für die Betriebssicherheit von Hochspannungsmaschinen von besonderer Bedeutung. Daher werden die Wicklungen von Turbogeneratoren bei der Revision einer sorgfältigen visuellen Kontrolle und verschiedenen Isolationsprüfungen unterzogen. Die Messung des Verlustfaktors tgδ ist ein häufig durchgeführter Versuch. Da Asphaltmicaisolation durch Glimmentladungen gefährdet ist, wird deren Verlustfaktor grössere Bedeutung beigemessen als demjenigen von Kunstharzisolation.

Das Messverfahren selbst und dessen Anwendung zur Qualitätssicherung sind aus der Literatur bekannt [1; 2][1]). Über die Ergebnisse von Versuchen an in Betrieb stehenden Generatoren hingegen wird wenig berichtet. Von Interesse sind in diesem Zusammenhang die Grössenordnung der Messwerte, die Ursachen ihrer Streuung und insbesondere die Beziehung zwischen der Alterung der Isolation und dem Verlustfaktor. Der vorliegende Beitrag stellt einen Versuch dar, die Aussagefähigkeit der zu Revisionszwecken durchgeführten tgδ-Messungen zu beurteilen.

2. Die Messung des Verlustfaktors tgδ

In einem Dielektrikum treten unter dem Einfluss eines wechselnden elektrischen Feldes dielektrische Verluste auf, deren Höhe sich durch den Tangens des Verlustwinkels δ ausdrücken lässt. Die Verluste werden durch Feuchtigkeit, Verunreinigungen und die Temperatur beeinflusst. Sind in einem Dielektrikum Hohlräume vorhanden, so treten darin beim Überschreiten einer kritischen Feldstärke Glimmentladungen auf. Da diese Entladungen die dielektrischen Verluste erhöhen, beurteilt man den Gehalt an Hohlräumen nach dem Verlauf des tgδ in Abhängigkeit von der elektrischen Feldstärke. Bei Erhöhung der Prüfspannung steigt der tgδ entsprechend der wachsenden Intensität der Glimmentladungen an. Zur Beschreibung der Verlustfaktorkurve in Funktion der Prüfspannung kann der Anstieg Δtgδ z. B. zwischen 0,4 U_n und 1,2 U_n benutzt werden (Fig. 1). Die Messungen werden mit der bekannten Scheringbrücke durchgeführt.

Bei der als Fabrikationskontrolle allgemein üblichen Messung werden die Wicklungsstäbe einzeln geprüft. Bei der Revisionsmessung sind jedoch nur die Wicklungsstränge zugänglich. Auch ist es meist nicht möglich, die ausserhalb des Statorblechpaketes auftretenden Glimmentladungen von denjenigen innerhalb der Nuten zu trennen. Örtliche Schwachstellen können nicht erkannt werden, da ein Mittelwert für alle Stäbe im Wicklungsstrang gemessen wird. Dennoch wird die Revisionsmessung von einigen Autoren als nützlich erachtet. *Wichmann* [3] berichtet, dass das Anwachsen der Glimmspannung im Verlauf des Betriebsalters ein Anzeichen für steigenden Luftgehalt in der Isolation sowie für deren Alterung durch thermische, mechanische und elektrische Einflüsse darstelle. *Tsusuki* [4] stellt fest, dass die Werte von tgδ und Δtgδ bei modernen, duroplastischen Kunstharzisolationen mit der Betriebszeit ansteigen. Dagegen bezeichnet *Mulhall* [5] die Verlustfaktormessung als für Wartungszwecke ungeeignet.

Die Aussagefähigkeit der tgδ-Messung ist also umstritten. Daher soll sie im folgenden anhand von Versuchsergebnissen überprüft werden.

3. Messresultate

Aus einer grossen Zahl von über eine längere Zeit verteilten Verlustfaktormessungen wurden 94 Messreihen von Generatoren ähnlicher Konstruktion ausgewählt. Die verwendeten Messungen beziehen sich auf rund 80 verschiedene Maschinen im Leistungsbereich von ca. 60...600 MVA, für Nennspannungen von 13,8...23 kV. Die Generatoren sind alle gleicher Herkunft (General Electric, Schenectady) und weisen die gleichen Merkmale auf: Stabwicklung, Wasserstoffkühlung, Asphaltmica- bzw. Kunstharzisolation (42 bzw. 52 Messreihen), Statorwicklung ohne Neuverkeilung oder erneuerte Stäbe.

Die Messungen erfolgten an allen Wicklungssträngen, im Bereich der 0,4-...1,2fachen Phasenspannung, mit 60 Hz und bei bekannter Wicklungstemperatur. Über die Feuchtigkeit der Isolation bestehen keine Angaben, doch wurden die meisten Messungen gleich nach dem Abfahren der Turbogruppe durchgeführt.

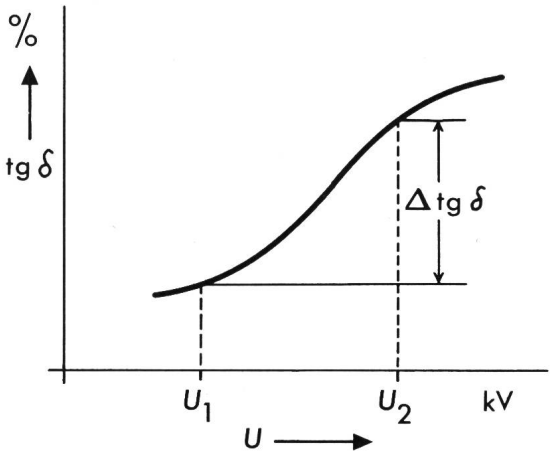

Fig. 1 Allgemeiner Verlauf des tgδ in Funktion der Prüfspannung U

[1]) Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

Die Messungen wurden wie folgt durchgeführt:

– Mittelwerte des Verlustfaktors der einzelnen Stränge einer Maschine, jeweils bei 0,4- und 1,2facher Phasenspannung (geringe Streuung),

– Korrekturfaktor zur Berücksichtigung der Wicklungstemperatur, auf 25 °C umgerechnete Mittelwerte,

– $\Delta \mathrm{tg}\,\delta$, d.h. der Anstieg des Verlustfaktors zwischen 0,4- und 1,2facher Phasenspannung.

$\Delta \mathrm{tg}\,\delta$ ist als Streudiagramm in Fig. 2 über dem Betriebsalter aufgetragen; darunter ist die Zahl der Monate von der Inbetriebnahme bis zur Messung zu verstehen. Das Betriebsalter liegt für die Generatoren mit Asphaltmicaisolation zwischen 51 und 265 Monaten und für diejenigen mit Kunstharzisolation zwischen 10 und 135 Monaten.

4. Auswertung

Die Interpretation der Resultate und Diagramme ist wegen der starken Streuung nicht ohne weiteres möglich. Daher ist zunächst zu untersuchen, welche Parameter die Streuung hauptsächlich verursachen.

4.1 Isolationssystem

Gemäss Fig. 2 liegt $\Delta \mathrm{tg}\,\delta$ für kunstharzisolierte Maschinen im Mittel unter den Werten von Asphaltmica. Der Grund liegt im kompakteren Aufbau des modernen Systems und in den unterschiedlichen Materialien.

4.2 Baujahr der Generatoren

Obwohl den zugänglichen Konstruktionsunterlagen über den betrachteten Zeitraum keine wesentlichen Änderungen entnommen werden können, ist anzunehmen, dass im Laufe der Jahre konstruktive und fabrikatorische Änderungen durchgeführt wurden, die zum Teil vom $\Delta \mathrm{tg}\,\delta$ reflektiert werden.

Asphaltmicaisolation: In Fig. 2a ist deshalb jede Maschine entsprechend dem Jahr ihrer Inbetriebnahme einer Gruppe zugeordnet. Während die beiden älteren Gruppen im Mittel ähnliche Werte aufweisen, liegen die Werte der Gruppe III im Durchschnitt etwas höher. Dies bestätigen auch die Messungen an 12 13,8-kV-Maschinen (Fig. 3a). Interessant ist die an verschiedenen Maschinen festgestellte Abnahme von $\Delta \mathrm{tg}\,\delta$ mit dem Betriebsalter.

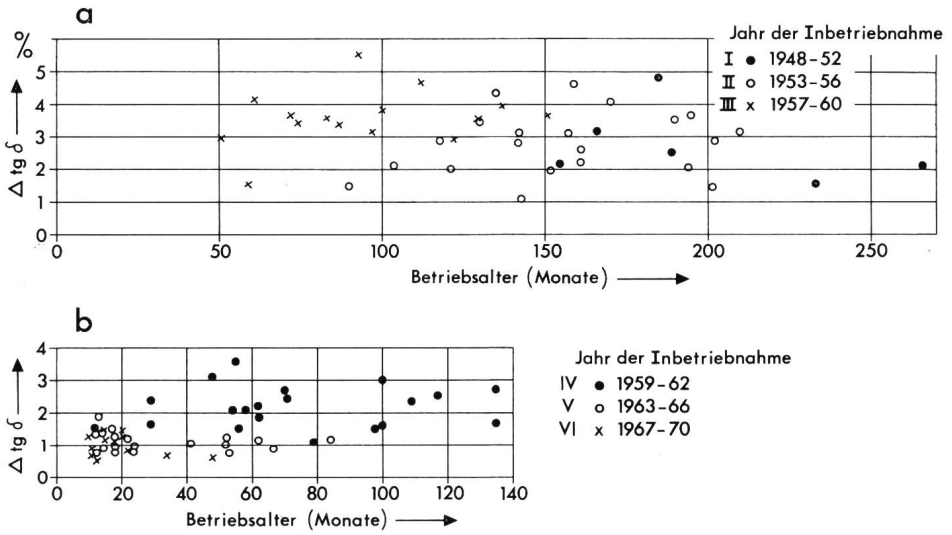

Fig. 2
$\Delta \mathrm{tg}\,\delta$ in Funktion des Betriebsalters, alle Maschinen
a Asphaltmicaisolation
b Kunstharzisolation

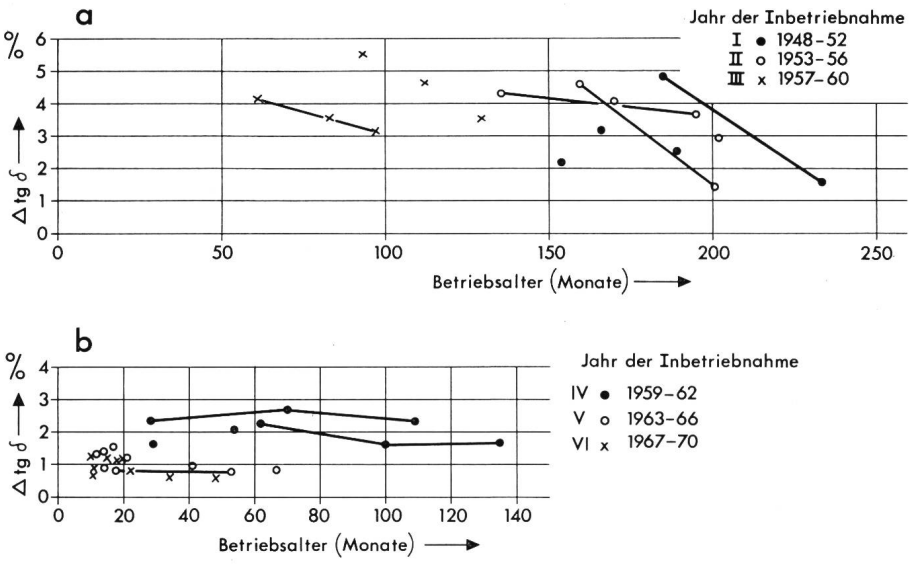

Fig. 3
$\Delta \mathrm{tg}\,\delta$ in Funktion des Betriebsalters
a Asphaltmicaisolation 13,8 kV
b Kunstharzisolation 22 kV
Verbundene Punkte betreffen dieselbe Maschine

Kunstharzisolation: Für die untersuchten Maschinen wurden ebenfalls Jahresgruppen gebildet. Während vor Ablauf von zwei Betriebsjahren die $\Delta tg\,\delta$-Werte der einzelnen Jahresgruppen im Mittel etwa gleich sind, liegen sie für Maschinen der Gruppe IV bei grösserem Betriebsalter höher. Die Messungen an den 22-kV-Maschinen allein (Fig. 3b) zeigen dasselbe Verhalten. Da eine Verstärkung des Isolationsauftrages (und dadurch Herabsetzung der Feldstärke) im fraglichen Zeitraum nicht vorgenommen wurde, ist das schwächere Glimmen bei neueren Generatoren auf Verbesserungen des Materials bzw. Fabrikationsprozesses zurückzuführen.

4.3 Maschinenspannung

Asphaltmicaisolation: Fig. 4a zeigt den $\Delta tg\,\delta$ für Generatoren mit den Nennspannungen 13,8 kV, 16 kV und 18 kV. Dabei wurden die jüngeren Maschinen (Jahresgruppe 1957 bis 1960) besonders gekennzeichnet. Die Messpunkte vermitteln den Eindruck, dass Maschinen mit niedrigerer Spannung zu etwas höheren Werten tendieren.

Kunstharzisolation: Entsprechend 4.2 dürfen nur Maschinen aus der gleichen Herstellungsperiode miteinander verglichen werden. In Fig. 4b ist dies berücksichtigt. Die wenigen Messpunkte lassen keinen eindeutigen Einfluss der Nennspannung auf $\Delta tg\,\delta$ beobachten.

Zusammenfassend folgt also, dass die Messwerte nicht für alle Maschinen gemeinsam mit dem Computer ausgewertet werden können. Es ist vielmehr notwendig, den zeitlichen Verlauf von $\Delta tg\,\delta$ nach Baujahr und Spannung getrennt zu bestimmen.

4.4 Betriebsalter

Asphaltmicaisolation: In Fig. 4a ist $\Delta tg\,\delta$ für Maschinen verschiedener Nennspannung dargestellt. Zur gleichen Maschine gehörige Messpunkte sind in Fig. 3a und 4a miteinander verbunden. Die Werte haben die Tendenz, mit dem Betriebsalter zu sinken, und zwar für jede Spannungsklasse. Da der in [3] erwähnte Anstieg in dem besonders interessierenden Bereich des hohen Betriebsalters nicht festgestellt werden konnte, kann die Verlustfaktormessung auch nicht zur Beurteilung der Alterung von Asphaltmicaisolationen herangezogen werden. Diese wichtige Tatsache wird durch Messungen an der Spulenwicklung eines Wasserkraftgenerators bestätigt [6]. Dort ist eine Abschwächung des Glimmens in Asphaltmica als Folge hoher dielektrischer Beanspruchung festgestellt worden. Messungen an der alten, aufgeschnittenen Wicklung ergaben, dass die Glimmentladungen in Spulen, welche sich in der Nähe der Phasenausgänge befanden, schwächer waren als in Spulen auf niedrigerem Potential. Daraus wurde gefolgert, dass die Entladungen in den bestehenden Hohlräumen zurückgehen müssen, während sich im Rahmen des normalen Alterungsprozesses neue Hohlräume bilden.

Kunstharzisolation: Fig. 3b und 4b ergeben, dass $\Delta tg\,\delta$ nach Ablauf von etwa zwei Jahren im wesentlichen konstant bleibt. In diesem Zusammenhang mag das Streudiagramm Fig. 2b ein falsches Bild geben. Es ist jedoch zu beachten, dass die im Bereich von mehr als 100 Monaten vorhandenen hohen Werte sämtlich von Messungen an älteren Maschinen stammen, die nach dem Vorerwähnten zu dieser Tendenz neigen. Die jetzige statistische Verteilung wird sich in Zukunft in dem Masse ändern, als Maschinen jüngeren Baujahres in diesen Bereich vorrücken.

5. Folgerungen

1. Die Messwerte des Verlustfaktors $tg\,\delta$ und der daraus abgeleitete Anstieg $\Delta tg\,\delta$ variieren stark. Auf Grund umfangreicher Messungen konnte der Einfluss folgender Parameter festgestellt werden: Isolationssystem, Baujahr (bei Maschinen mit Kunstharzisolation), Nennspannung (bei Maschinen mit Asphaltmicaisolation) sowie Betriebsalter.

2. Die Verlustfaktormessung ist nicht zur Beurteilung der Alterung von *Asphaltmicaisolation* geeignet, da $\Delta tg\,\delta$ offenbar nicht im direkten Zusammenhang mit dem Gehalt an Hohlräumen steht.

3. $\Delta tg\,\delta$ bleibt für die durch Glimmen ohnehin nicht gefährdete *Kunstharzisolation* nach einer Anfangsphase (sog. Nachhärten) im wesentlichen konstant. Zukünftige Messungen müssen zeigen, ob sich diese Tendenz bei sehr hohem Betriebsalter ändert.

4. Aus den vorgenannten Gründen ist die Verlustfaktormessung nicht als Routineversuch zur Überwachung der Hochspannungswicklung von Turbogeneratoren geeignet.

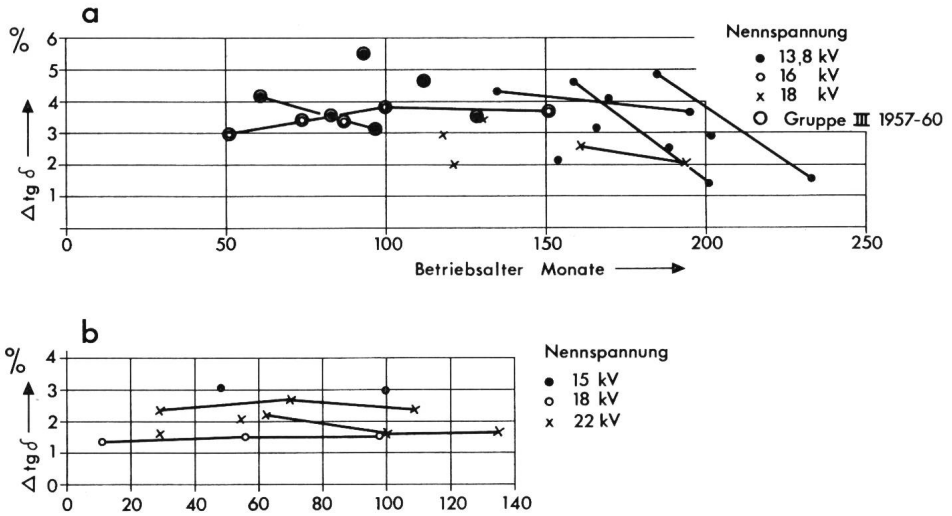

Fig. 4
$\Delta tg\,\delta$ in Funktion des Betriebsalters mit der Nennspannung als Parameter
a Asphaltmicaisolation
b Kunstharzisolation (Gruppe IV)
Verbundene Punkte betreffen dieselbe Maschine

Literatur

[1] *R. Schuler:* Die Beurteilung des Isolationszustandes von Statorwicklungen. Bull. SEV 60(1969)17, S. 777...785.
[2] *A. Wichmann:* Reliability and testing of high-voltage stator insulation for large rotating machines. IEEE Trans. PAS 91(1972)5, p. 2230...2236.
[3] *A. Wichmann:* A-c and d-c methods for the evaluation and maintenance testing of high-voltage insulation in electric machines. IEEE Trans. PAS 82(1963)66, p. 273...282.
[4] *T. Tsusuki, K. Kaneko* and *S. Isobe:* Aging properties of mica insution systems impregnated with solventless resin for generator stator coils. IEEE Trans. EI 8(1973)2, p. 50...55.
[5] *V. R. Mulhall* and *P. Lonseth:* Resin rich tape system properties to match increasing requirements of HV stator insulation. IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, Vancouver/Can., July 15...20, 1973; Paper C 73 312-6.
[6] *R. T. Harrold, E. M. Fort* and *T. A. Goodwin:* The interpretation of corona and dielectric measurements on the mica-asphalt insulation of a 30-year-old waterwheel generator at Grand Coulee Dam. IEEE Trans. PAS 92(1973)6, p. 1935...1944.

Adresse des Autors

Hans Teichmann, M. Sc. (Engineering), Centrale Thermique de Vouvry S. A., 1896 Vouvry.

Literatur – Bibliographie

DK 92 : 62 : 330(494) : 621.3 SEV-Nr. S. 5/30

Zwei Pioniere der Elektrotechnik. Max Schiesser 1880...1975. Emil Haefely 1866...1939. Von *Hans Rudolf Schmid.* Schweizer Pioniere der Wirtschaft und der Technik, Band 30. Zürich, Verein für wirtschaftshistorische Studien, 1977; 8°, 98 S., Fig. Preis: kart. Fr. 14.–.

In Band 30 der Schriftenreihe zeichnet H. R. Schmid auf knapp 100 Seiten wiederum das Lebensbild von zwei Pionieren der Elektrotechnik. Auf Grund vertiefter Archivstudien und mündlicher Auskünfte von Freunden und Mitarbeitern sind Herkunft, Werdegang und erfolgreiche Tätigkeit packend dargestellt. Die beiden Ingenieure haben vieles gemeinsam: einfache Herkunft, leichten Schulsack, Fleiss, Wille zum Erfolg und eine aussergewöhnliche technische Begabung. Sie sind beide Beispiele dafür, dass sich jeder, in dem etwas steckt, in eine hohe Stelle emporarbeiten kann. Beiden ist der Dr. h. c. verliehen worden, Emil Haefely 1922 von der TH Darmstadt, Max Schiesser 1937 von der ETHZ. In ihrem Wirken sind die beiden jedoch grundverschieden.

Haefely war ein ausgesprochener Autodidakt, der mit Intuition und auf Grund praktischer Versuche seine Erfindungen (Isolationen aus Micanit und Hartpapier) und die für die Fabrikation nötigen Maschinen ständig verbesserte (Wickelmaschinen für Generator- und Motorspulen mit Tränkung nach der Isolation, zur Vermeidung von Lufteinschlüssen). Bevor er seine eigene Firma in Basel gründete, hatte er bei BBC (später Micafil) und Oerlikon Isolierabteilungen eingerichtet. Die Isolationstechnik war denn auch der Ausgangspunkt für alle Erweiterungen des Fabrikationsprogrammes seiner Unternehmung: Messwandler, Leistungs- und Prüftransformatoren, Kondensatoren, Stossanlagen und Hochspannungsgleichrichter.

Anders arbeitete Max Schiesser. Auch er hatte das «Gspüri» für zukunftsträchtige technische Entwicklungen, doch wurde daneben der Theorie und ihrer Erprobung im Versuchslokal (VL) grösste Bedeutung beigemessen, ist doch Schiesser vom VL-Monteur bis zum Chef aller elektrischen VL- und Konstruktionsabteilungen aufgestiegen, bevor er Direktor und Delegierter des Verwaltungsrates geworden ist. Man müsste die Geschichte von BBC schreiben, um alle von ihm mit Erfolg behandelten Sparten, zu denen auch noch die bauliche Entwicklung (Birrfeld) gehört, aufzuzählen. Obwohl Schiesser keine Politik betrieb, war er an wichtigen Entscheiden der Stadt Baden, an der er sehr hing und deren Ehrenbürger er war, massgebend beteiligt, so an der optimalen Lösung der Verkehrsprobleme, der Kantonsschule, dem Jugendhaus u. a. m.

Schliesslich ist auch Schiessers Wirken im SEV zu nennen, dem er 58 Jahre angehörte und der ihn 1941 zum Ehrenmitglied ernannte. Schon früh machte er sich durch die Bearbeitung der neuen Bundesvorschriften für Starkstromanlagen, z. B. die Erdungsfragen, verdient. Im CES, das er auch präsidierte, sowie im Vorstand des SEV, dessen Präsident er von 1934 bis 1941 war, leistete er wertvollste Mitarbeit. Die Krönung seiner diesbezüglichen Tätigkeit war aber das Präsidium der Commission Electrotechnique Internationale (CEI), der höchsten Behörde in unserm Fachgebiet.

Die Biographien der beiden «Männer eigener Kraft» lesen sich spannend und sind jedermann, nicht nur Elektrikern, bestens zu empfehlen. *E. Binkert*

DK 621.376 SEV-Nr. A 473/II

Pulstechnik. Band II: Anwendungen und Systeme. Von *E. Hölzler* und *H. Holzwarth.* Berlin/Heidelberg/New York, Springer-Verlag, 1976; 8°, XVI/463 S., 289 Fig. Preis: DM 138.–

Das vorliegende Buch ist der zweite Band einer Neubearbeitung des 1957 erschienenen Werkes «Theorie und Technik der Pulsmodulation». Der erste Band (Grundlagen) beinhaltet das mathematische Rüstzeug, die Analog-Digital-Umsetzung, digitale Filter, Codierverfahren sowie die Pulscode- und Deltamodulation, um nur das Wesentlichste zu nennen.

Die ursprüngliche Absicht der Autoren war es, Wissenslücken auf dem Gebiet der Impulsverarbeitung und Pulsmodulation durch eine einheitliche und umfassende Darstellung von Rechenmethoden und Schaltungstechnik zu schliessen. Inzwischen haben sich die Verhältnisse durch die universelle Verbreitung integrierter Schaltungen grundlegend geändert. Diesem Umstand tragen die Autoren (bei der Neubearbeitung unterstützt durch ein Team von Spezialisten der Siemens AG) Rechnung durch Einführung eines getrennten Bandes für die Realisierung und Anwendung digitaler Systeme.

Im vorliegenden Band werden nach der Einleitung zuerst Impulsformung und -erzeugung behandelt. Der dritte Abschnitt befasst sich mit rein digitalen Schaltungen, wobei der Einführung in die Schaltungsalgebra besonderer Raum gewidmet ist. Die Zusammenfassung digitaler Schaltungen zu Schalteinrichtungen wird im vierten Abschnitt beschrieben. Anschliessend folgt ein Überblick über die wichtigsten in der Pulstechnik verwendeten Bauelemente, während im sechsten Abschnitt Speicher und Speichersysteme vorgestellt werden. Die Abschnitte sieben bis neun sind nachrichtentechnischen Systemanwendungen der Pulstechnik gewidmet: den allgemeinen Einrichtungen der Vermittlung, der digitalen Übertragung, der digitalen Vermittlung und den Problemen, die in «integrierten Netzwerken» auftreten. Den Schluss bilden die modernen Entwicklungen in der Radartechnik.

Entsprechend dem weiten Gebiet, das dieser Band abdeckt, sind die einzelnen Themenkreise knapp, aber nichtsdestoweniger präzise behandelt. Das Buch richtet sich nicht an Neulinge in der Nachrichtentechnik, sondern vielmehr an den mit dem Entwurf und der Realisation von digitalen Systemen, insbesondere von Vermittlungssystemen, betrauten Ingenieur. Dem an einem umfassenden Überblick über die heute aktuellen Systeme der Nachrichtentechnik Interessierten kann das Werk aber ebensosehr empfohlen werden wie demjenigen, der sich in seiner praktischen Tätigkeit mit der modernen Pulstechnik auseinandersetzen muss. Die gute Lesbarkeit und die vorbildliche Aufmachung des Buches erleichtern den Zugang zur behandelten vielfältigen und zum Teil sehr komplexen Materie wesentlich. *P. Kleiner*