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: 69 (1978)

Heft: 8

Artikel: Beitrag zur Problematik der mechanischen Festigkeit und des Schutzes von supraleitenden Magneten

Autor: Ašner, A.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-914869

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

Beitrag zur Problematik der mechanischen Festigkeit und des Schutzes von supraleitenden Magneten

Von A. Ašner

537.316.62:621.318.38;

Die Auslegung supraleitender Magnete für die Hochenergie-Teilchenphysik ist vorwiegend durch mechanische, thermodynamische und schutztechnische Anforderungen gegeben. Die Grundlagen für die mechanische Berechnung von Magneten konzentrischer Bauart mit Eisenabschirmung auf Tief- und Raumtemperatur werden gegeben. Abschliessend wird über neue Erkenntnisse von Schutzanordnungen im Falle von Quenchvorgängen berichtet.

La conception des aimants supraconducteurs pour la physique de particules à hautes énergies est subordonnée aux exigences mécaniques, thermodynamiques ainsi que de protection. Les bases du calcul mécanique pour des aimants avec configuration concentrique et blindage magnétique à basse température ou à température ambiante sont développées. Pour conclure, quelques progrès dans le domaine de la protection de tels aimants au cas du quench sont discutés.

1. Einleitung

Die in den vergangenen 10 Jahren erfolgte Entwicklung von supraleitenden Magneten für die Hochenergie-Teilchenphysik hat einen technischen Stand erreicht, der die Herstellung von Magneten hoher Feldgenauigkeit und Betriebssicherheit für Strahltransport, Teilchenbeschleuniger und Speicherringe ermöglicht. Ein 1000-GeV-Beschleuniger und 200-GeV-Speicherringe [1; 2][1]) mit supraleitenden Magneten werden zurzeit in den USA gebaut, wobei zu den erwarteten hohen Magnetfeldern von 4...5 T auch eine Senkung des Verbrauches von elektrischer Energie und der Betriebskosten erwartet wird im Vergleich zu Magneten mit normal leitenden Wicklungen.

Während man zu Beginn der Entwicklung von supraleitenden Magneten bestrebt war, eine Vielfalt von Wicklungsanordnungen zur Erzeugung der erwünschten Feldkonfiguration in einem bestimmten Querschnitt oder Volumen zu realisieren, wurde bald eingesehen, dass eine sorgfältige mechanische Konstruktion, die Kühlanordnung und das Schutzsystem im Falle eines Quenches entscheidend für den erfolgreichen Betrieb des Magneten sind. Es wird heute allgemein anerkannt, dass die Formgebung der Wicklung der Forderung nach einer einwandfreien mechanischen Konstruktion untergeordnet sein muss.

In diesem Aufsatz soll über einige Grundlagen für die Berechnung und Auslegung der mechanischen Konstruktion und über Fortschritte auf dem Gebiete des Schutzes von supraleitenden Magneten im Falle eines Quenches berichtet werden. Obwohl sich die erörterten Probleme auf ruhende, statische Gebilde beziehen, wird erhofft, dass sie auch für den Konstrukteur von elektrischen Maschinen mit supraleitenden Wicklungen von Interesse sein werden.

2. Wicklungsanordnung, mechanischer Aufbau und Kühlung

Damit die durch elektromagnetische und thermische Kontraktion hervorgerufenen mechanischen Beanspruchungen der Wicklung und des Aktivteils supraleitender Magnete mit Sicherheit beherrscht werden können, ist ein zylindrischer, konzentrischer Aufbau von Tragrohr, Erregerwicklung, Eisenabschirmung und Befestigungsringen sowie des Kryostaten am besten geeignet [3].

Um die gewünschten Dipol- und Quadrupolfelder in einer zylindrischen Bohrung zu erhalten, wählt man allgemein Sektor- oder Schalenwicklungsanordnungen mit konstanter Stromdichte nach Fig. 1. Als Variante der Sektorwicklung kann die nach dem $\cos\Theta$-Gesetz angenäherte Stromdichtenverteilung in der Wicklung angesehen werden [2]. Sämtliche Wicklungen sind auf einem oder mehreren Sektoren der zylindrischen Oberfläche des Tragrohres angebracht, wobei die Wicklungsenden derart geformt werden, dass sie, wie auch die geraden Teile, innerhalb einer zum Tragrohr konzentrischen, zylindrischen Oberfläche bleiben.

Der Kryostat besteht zumeist aus drei Teilen, dem inneren Heliumgefäss, dem mit gasförmigen Helium oder flüssigem Stickstoff gekühlten Strahlungsschild und dem äusseren Vakuumgefäss, die voneinander durch hohes Vakuum und aluminisierte Mylarfolien thermisch sehr gut isoliert sind. Fig. 2 zeigt die beiden Varianten mit sog. «kalter» bzw. «warmer» Eisenabschirmung. Im ersten Fall ist die Eisenabschirmung unmittelbar um die Wicklung gelegt und kann zum Auffangen von mechanischen Kräften herbeigezogen werden. Wicklung und Eisenabschirmung befinden sich im Heliumtank, daher

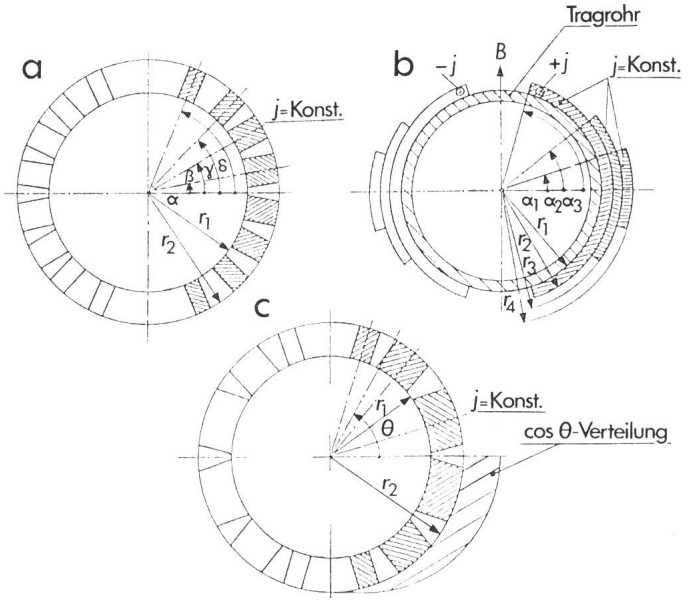

Fig. 1 **Sektor- und Schalenwicklung konstanter Stromdichte**

a	Sektorwicklung
$\alpha, \beta, \gamma, \delta$	Symmetriewinkel der Sektoren
j	Stromdichte in der Wicklung
r_1, r_2	Innen- und Aussenradius
b	Schalenwicklung
$r_1, r_2 \ldots$	Radien der einzelnen Schalen
$\alpha_1, \alpha_2 \ldots$	Schalenwinkel
B	Magnetfeld
c	$\cos\Theta$-Wicklung durch Blöcke konstanter Stromdichte j approximiert

[1]) Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

die Bezeichnung «kaltes» Eisen. Als Vorteil dieser Bauart ist die Konzentrizität zwischen Wicklung und Abschirmung und der sehr kompakte Aufbau des Aktivteiles anzusehen; nachteilig sind die durch hohe Sättigung des Eisens auftretende Feldverzerrung sowie die grosse Masse des auf He-Temperatur abzukühlenden Aktivteils.

Im zweiten Fall befindet sich die Eisenabschirmung ausserhalb des Kryostaten auf Raumtemperatur. Durch den Abstand von der Erregerwicklung ist die Abschirmung nur schwach gesättigt. Als Vorteil dieser Konstruktion ist die geringe Masse der zu kühlenden Erregerwicklung mit ihrer mechanischen Befestigung anzusehen, als Nachteil die erforderliche komplexe mechanische Anordnung zum Aufrechterhalten der Konzentrizität zwischen Wicklung und Abschirmung unter sämtlichen Betriebsbedingungen.

Die Magnetkonstruktion wird ferner wesentlich durch die Art der Kühlung beeinflusst. Fig. 3 zeigt das Prinzip der heute angewandten Kühlsysteme. Bei der Badkühlung befindet sich der Aktivteil des Magneten in einem relativ grossen Behälter mit flüssigem Helium. Durch die abgeführten Verluste wird auf der Oberfläche Helium verdampft und zur Kühlung der Stromzuführungen und gelegentlich auch des Strahlungsschildes verwendet. Badkühlung wird vorwiegend für Einzelmagnete vorgesehen. Vorteilhaft ist der relativ einfache Aufbau: der Magnet wird an den Helium-Verflüssiger oder Dewar angeschlossen; das Nachfüllen erfolgt durch einfache Regelung des Heliumspiegels im Kryostaten. Als Nachteil sind die erforderliche Masse des Heliums und die relativ grossen Abmessungen von Kryostat und Magneten anzusehen, ferner das nicht optimal ausgenützte Kühlvermögen des Heliums. Im Falle eines Quenches der Magnetwicklung wird es erforderlich sein, durch Schnellventile eine unzulässige Druckerhöhung im Kryostaten zu verhindern und die ausströmende Menge des Heliumgases womöglich aufzufangen.

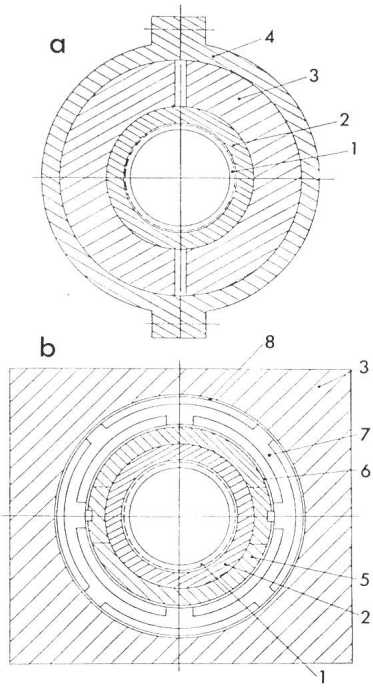

Fig. 2 Supraleitender Magnet mit kalter (a) resp. warmer (b) Abschirmung

1 Tragrohr	5 Wicklungsbefestigung
2 Wicklung	6 He-Tank
3 Eisenabschirmung	7 Zwischenring
4 Spannring	8 Vakuum-Tank

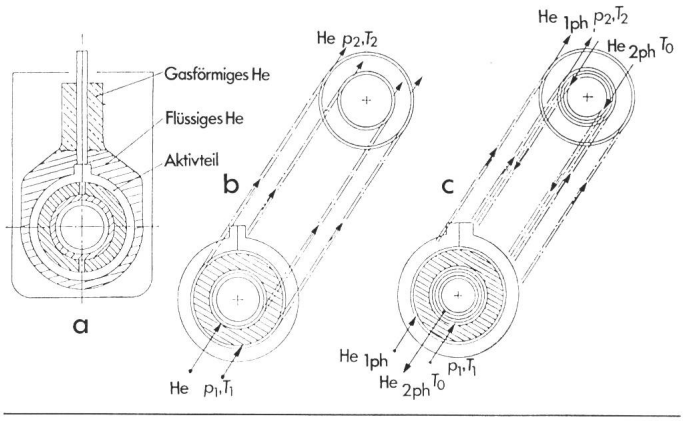

Fig. 3 Kühlung von supraleitenden Magneten

a	Badkühlung
b	Kühlung mit Einphasenhelium unter Hochdruck
c	Kühlung in Gegenströmung mit Ein- und Zweiphasenhelium
p_1, p_2	Ein- und Ausgangsdruck
T_1, T_2	Ein- und Ausgangstemperatur
He_{1ph}, He_{2ph}	ein- und zweiphasiges Helium
T_0	Temperatur von He_{2ph}

Bei Reihenschaltung von mehreren, zumeist gleichartigen Magneten für Teilchenbeschleuniger und Speicherringe kann keine Badkühlung vorgesehen werden. Man muss dann eines der beiden in Fig. 3 dargestellten Systeme mit erzwungener Kühlung vorsehen, die der jeweiligen Magnetkonstruktion angepasst werden können, eine optimale Ausnützung der Kühlkapazität des Heliums ermöglichen und wegen des geringen Heliumvolumens zu kompakten und wirtschaftlicheren Lösungen führen.

3. Mechanische Beanspruchungen infolge elektromagnetischer Kräfte und Wärmespannungen im Aktivteil

3.1 Elektromagnetische Kräfte

Nach Festlegung des Bohrungsdurchmessers und Optimierung der Parameter der Sektor- oder Schalenwicklung eines supraleitenden Dipol- oder Quadrupolmagneten mittels entsprechender Computerprogramme zur Berechnung des Magnetfeldes, ist es zumeist möglich, auch die auf die einzelnen Wicklungselemente einwirkenden elektromagnetischen Kräfte nach Betrag und Richtung zu bestimmen. Ferner können die mechanischen, thermischen und elektrischen Eigenschaften der verschiedenen Materialien bei Raum- und Tieftemperatur als bekannt vorausgesetzt werden (Tab. I und II).

Fig. 4 zeigt eine Dipol- bzw. Quadrupolwicklung mit den als bekannt angenommenen elektromagnetischen Kräften pro Längeneinheit F_{xn}, F_{yn} bzw. F_{rn} und F_{tn}. Die Reaktionskräfte R_1 und R_2, Biegemomente M, M_1, M_2, Tangential- und Normalkräfte T und N und Beanspruchungen τ, σ sowie die Deformationen Δ_r, Δ_x, Δ_y können aus den bekannten Bedingungen des Kräfte- und Momentengleichgewichtes, der Bedingung für den Biegewinkel $\varphi = 0$ in den Symmetriepunkten der Wicklung (Index B), sowie mit Hilfe des Theorems von Castigliano ermittelt werden.

Liegen die Wicklungsbeanspruchungen σ und τ wesentlich unter den zulässigen Werten und ist die Wicklungsdeformation gering, so dass keine unzulässige Feldverzerrung auftritt, so ist die Wicklung bezüglich der elektromagnetischen Beanspruchungen selbsttragend. Infolge der auftretenden hohen Strom-

dichten j und Magnetfelder B_w in der Wicklung wird dies jedoch kaum der Fall sein. Eine zusätzliche äussere ringartige Befestigung aus nicht magnetischem Edelstahl (Inox) ist dann erforderlich.

Für eine Dipolwicklung mit n Sektoren ergibt sich nach Fig. 4a:

$$R_1 = -\sum_1^n F_{yn} \tag{1}$$

$$R_2 = -\sum_1^n F_{xn} \tag{2}$$

$$M_1 + R_1 r - \sum_1^n F_n d_n - M_2 = 0 \tag{3}$$

M_2 wird aus der Gleichung

$$\varphi_B = \int_0^{r \cdot \pi/2} (M/E \cdot I)\, ds = 0 \tag{4}$$

bestimmt, mit E dem Elastizitätsmodul und I dem Trägheitsmoment des jeweiligen Abschnittes.

Das Moment M in einem bestimmten Punkt P entlang des Bogenelements $ds = r\, d\Theta$ wird wie folgt berechnet: bezeichnet man mit α, β, γ die Winkel der Kräfte F_1, F_2 ... so ist für

$$0 \leqq \Theta \leqq \alpha \quad M = M_1 + R_1 r\,(1 - \cos\Theta) \tag{5a}$$

$$\alpha \leqq \Theta \leqq \beta \quad M = M_1 + R_1 r\,(1 - \cos\Theta) + F_{r1} r \sin(\Theta - \alpha) - F_{t1} r\,[1 - \cos(\Theta - \alpha)] \tag{5b}$$

Gl. (4) kann schrittweise integriert werden, wobei für den Integrationsweg entlang eines Abschnittes $\Theta_n \leqq \Theta \leqq \Theta_{n+1}$ die entsprechenden E und I-Werte einzusetzen sind, d.h. es muss das Material jedes Sektors und sein etwa modifiziertes Trägheitsmoment (Querschnitt) berücksichtigt werden.

Um die mechanischen Beanspruchungen σ und τ in jedem Punkte der Wicklung zu ermitteln, müssen noch die Normal- und Tangentialkräfte N und T ermittelt werden. Man erhält für

$$0 < \Theta < \alpha \quad N = -R_1 \cos\Theta \tag{6a}$$

$$\alpha < \Theta < \beta \quad N = -R_1 \cos\Theta + F_{t1} \cos(\Theta - \alpha) + F_{r1} \sin(\Theta - \alpha) \ldots \tag{6b}$$

Tabelle I

Material	Elastizitätsmodul E kg/mm²		Thermische Kontraktion $\varepsilon = (l_{300} - l_{4.2})/l_{300}$
	bei 300 K	bei 4.2 K	
Cu-stabilisierter Nb-Ti Supraleiter	11 000	15 000	$2.8 \cdot 10^{-3}$
Isolation	500	1 500	$6.0 \cdot 10^{-3}$
Kupfer	12 000	15 000	$3.2 \cdot 10^{-3}$
Inox	19 000	20 500	$3.0 \cdot 10^{-3}$
Magnetischer Stahl	20 000	21 000	$2.0 \cdot 10^{-3}$
Vetronit	600	1 000	$4.6 \cdot 10^{-3}$
Imprägnierte Wicklung	4 600	9 300	$3.2 \cdot 10^{-3}$
Anticorodal	10 000	11 000	$4.0 \cdot 10^{-3}$

$$0 < \Theta < \alpha \quad T = R_1 \sin\Theta \tag{7a}$$

$$\alpha < \Theta < \beta \quad T = R_1 \sin\Theta - F_{t1} \sin(\Theta - \alpha) + F_{r1} \cos(\Theta - \alpha) \ldots \tag{7b}$$

Bezeichnet man mit A den betrachteten Querschnitt und mit h den Abstand von der neutralen Achse des Trägheitsmoments, so erhält man:

$$\sigma = \sigma_N + \sigma_M = N/A \pm M \cdot h/I \tag{8}$$

$$\tau_{max} \approx 1.5\, \tau/A \tag{9}$$

Um die Verformung in einem beliebigen Punkt $P_0\,(r, \Theta)$ zu bestimmen, kann nach Fig. 4b nach dem Theorem von Castigliano:

$$\Delta_{x\Theta} = \int_0^{\Theta} \frac{1}{E \cdot I} \cdot M \cdot M_{1x}\, ds \tag{10a}$$

$$\Delta_{y\Theta} = \int_0^{\Theta} \frac{1}{E \cdot I} \cdot M \cdot M_{1y}\, ds \tag{10b}$$

gesetzt werden. M ist das im Punkte P_0 einwirkende Moment (Gl. 5) und M_{1x}, M_{1y} sind die Momente der in x- und y-Richtung wirkenden Einheitskräfte 1_x und 1_y. Damit erhält man Δ_x und Δ_y in guter Annäherung, indem nur die Energie des Biegemoments berücksichtigt ist und die wesentlich geringere Energie der Normal- und Tangentialkräfte vernachlässigt werden.

Tabelle II

Parameter / Material	Al	Nb-Ti	Nb_3-Sn	Cu	Bronze	Inox	Tantal	Vetronit	flüss. He, 4.2 K
Spez. Wärme $c_p \left[\frac{Ws}{m^3 \cdot K}\right]$	3000	1000	1200	890	900		3000	1200	$2 \cdot 10^{-5}$
Spezifischer Widerstand ϱ [Ωm] bei 0 T bei 4 T bei 8 T	2.5... $3 \cdot 10^{-10}$	$2.4 \cdot 10^{-7}$	$2.6 \cdot 10^{-7}$	$1.8 \cdot 10^{-10}$ $3.4 \cdot 10^{-10}$ $4.3 \cdot 10^{-10}$	$2.8 \cdot 10^{-8}$	$5 \cdot 10^{-7}$			
Thermische Leitfähigkeit $k \left[\frac{W}{m \cdot K}\right]$ bei 0 T bei 4 T bei 8 T	3000	0.12	0.04	500 250 200	0.9	0.3	15	$5 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-2}$

Flüssiges He bei 4.2 K: Koeffizient der Wärmeübertragung $R = 4\ W/m^2 \cdot K$
Verdampfungswärme $L = 20$ kWs/kg
Viskosität: $\eta = 6 \cdot 10^{-5}$ g/cm · s

Für eine Quadrupolwicklung (Fig. 4c) lauten Gl. (1) und (2):

$$R_2 = -\sum F_x \cdot \sqrt{2} \tag{11}$$

$$R_1 = \sum F_y + R_2/\sqrt{2} \tag{12}$$

und die Integration erstreckt sich von $0 \leqq \Theta \leqq \pi/4$ [4].

3.2 Beanspruchungen im Aktivteil infolge Wärmespannungen

Um die in den verschiedenen Materialien auftretenden mechanischen Beanspruchungen infolge des ungleichen Verhaltens zwischen 300 K und 4.2 K aufzunehmen, ist die richtige Bemessung des Aktivteils für die Betriebssicherheit und das Erreichen der Nennwerte des Magneten von entscheidender Bedeutung. Ein kompakter Aufbau, der insbesondere die Erregerwicklungen unter Druck hält, soll im ganzen Temperaturbereich gewährleistet sein, ohne dass dabei an irgendeiner Stelle der Wicklung oder anderswo unzulässige mechanische Beanspruchungen auftreten. Dabei wird, wie erwähnt, der grundlegende mechanische Aufbau von der Wahl einer Anordnung mit «kalter» oder «warmer» Eisenabschirmung wesentlich beeinflusst.

Für jede Konstruktion gilt das Prinzip, dass eine genaue Anpassung sämtlicher Abmessungen des Aktivteils und der umgebenden Struktur nur bei einer Temperatur, zumeist bei 300 K oder 4.2 K, möglich ist. Neben den klassischen Verfahren der mechanischen Verspannung durch Anwendung von Bolzen oder Keilen und durch Verkleben und Verschweissen können auch Schrumpfverfahren angewandt werden, indem entweder die auf die Temperatur des flüssigen Stickstoffes (70 K) abgekühlte Wicklung in ihre Befestigung (auf Raumtemperatur) eingezogen wird, oder diese erwärmt und auf die Wicklung aufgeschrumpft wird.

Aus den in Tab. I und II angegebenen Werten für E und $\varepsilon = \Delta l/l$ zwischen 300 K und 4.2 K geht hervor, dass sich die ε-Werte von imprägnierten supraleitenden Wicklungen und von unmagnetischem Stahl (Inox) nur wenig unterscheiden, während magnetisches Eisen eine um $\Delta\varepsilon \approx 10^{-3}$ geringere Kontraktion aufweist. Ferner ist ersichtlich, dass glasfaserverstärktes Epoxydharz, das am häufigsten verwendete Material für Kühlkanäle und Trennlagen, einen bedeutend tieferen Elastizitätsmodul aufweist, und sich folglich derartige Trennlagen den jeweiligen Verformungen der Wicklung, Eisenabschirmung und Befestigungsanordnung anpassen werden.

Fig. 5 zeigt den prinzipiellen Aufbau einer Anordnung mit innerem Tragrohr aus Inox, einer Anzahl von konzentrischen Wicklungen mit Zwischenlagen, Ringen usw. und äusserem Befestigungsring (kalte Abschirmung). Es erscheint zweckmässig, die Abschirmung gespalten auszuführen, wobei die azimutale Lage des Spaltes durch die Magnetfeldanordnung gegeben ist. Geht man von einer Konstruktion aus, bei welcher sämtliche geometrischen Abmessungen bei Raumtemperatur angepasst sind, so ergibt sich der Vorteil, dass während des Abkühlens auf 4.2 K die Erregerwicklungen der erwünschten Druckspannung ausgesetzt sind, indem sich der äussere Spannring (aus Inox) stärker zusammenzieht als die gespaltene Eisenabschirmung, welche dieser Konstruktion durch Verringerung des Luftspaltes folgen kann und somit als Überträger der Druckbeanspruchung auf Wicklungen und Tragrohr wirkt.

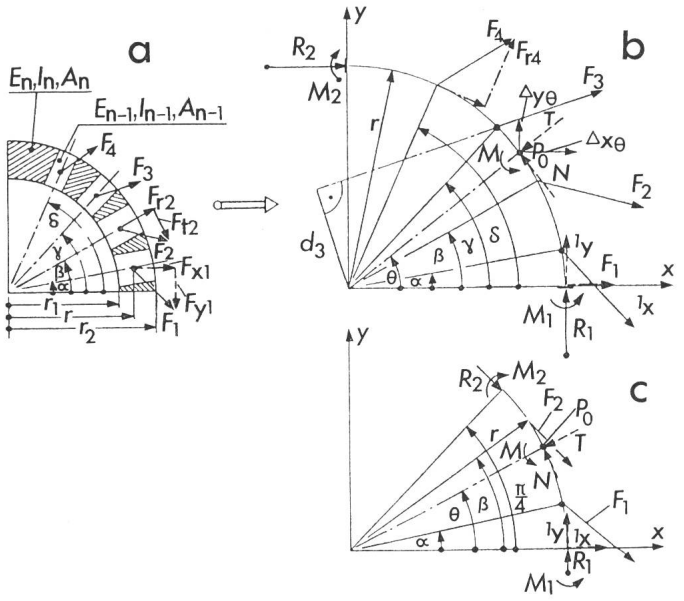

Fig. 4 Zur Berechnung der mechanischen Beanspruchungen infolge elektromagnetischer Kräfte in den Wicklungen

r_1, r_2, r	Wicklungsradien
$\alpha, \beta, \gamma, \delta$	Angriffswinkel der Kräfte $F_1 \ldots F_n$ mit den Komponenten $F_{xn}, F_{yn}, F_{rn}, F_{tn}$
M, M_1, M_2	Biegemomente
R_1, R_2	Reaktionskräfte
$1_x, 1_y$	Einheitskraft in x- und y-Richtung
N, T	Normal- und Tangentialkraft
$\Delta x_\Theta, \Delta y_\Theta$	Deformation in $P_0(r, \Theta)$ in x- und y-Richtung
E_n, I_n, A_n	E-modul, Trägheitsmoment und Querschnittt eines Sektors
d_n	Hebelarm der Kraft F_n

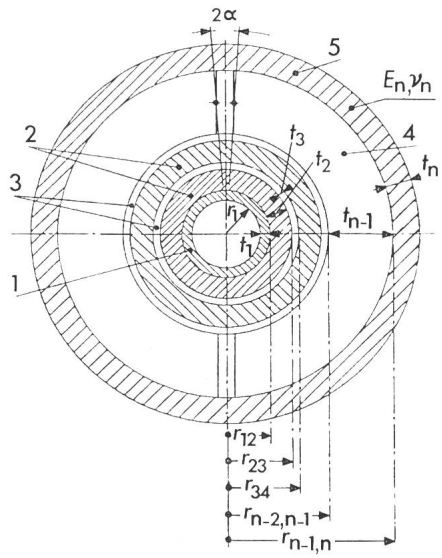

Fig. 5 Zur Berechnung der mechanischen Beanspruchung infolge thermischer Spannungen einer Anordnung mit kalter Eisenabschirmung

r_1, r_n	Innen- bzw. Aussenradius
$r_{1,2} \ldots r_{n-1,n}$	Radien der Trennflächen
$t_1 \ldots t_n$	Dicke der einzelnen Elemente
$E_1 \ldots E_n$	Elastizitätsmodule
ν_n	Poissonscher Koeffizient
2α	Spaltwinkel der Eisenabschirmung

1 Tragrohr
2 Wicklungen
3 Zwischenlagen
4 Gespaltene Eisenabschirmung
5 Spannring

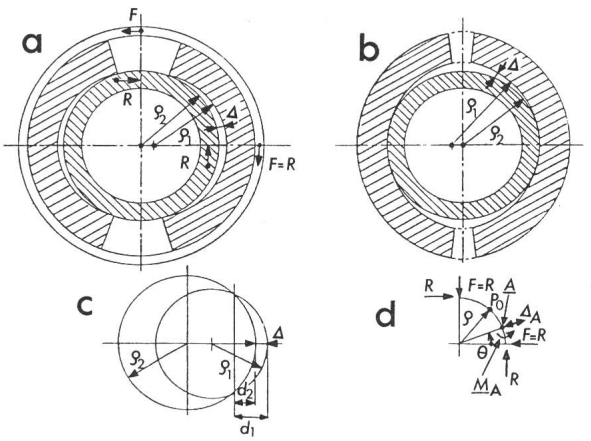

Fig. 6 Zur Berechnung der mechanischen Beanspruchung infolge thermischer Spannungen einer Anordnung mit kalter Eisenabschirmung

a Gegenseitige Lage von Wicklung und Eisenabschirmung bei 300 K für geometrische Anpassung bei 4,2 K

b Gegenseitige Lage von Wicklung und Eisenabschirmung bei 4,2 K für geometrische Anpassung bei 300 K

Δ Deformation
ϱ_2, ϱ_1 Aussenradius der Wicklung und Innenradius der Eisenabschirmung
R Reaktionskraft
Δ_A Deformation im Punkte A

Die im Betriebszustand bei 4.2 K auftretenden Beanspruchungen können wie folgt ermittelt werden: Bezeichnet man mit p_n den Druck im $n$ten Ringelement, wobei das Vorzeichen + für Zug und − für Druck einzusetzen ist, mit ν_n den Poissonschen Koeffizienten ($\nu_n = 0.3$) und mit t_n die Dicke des $n$ten Ringes, so erhält man ein System linearer Gleichungen für die Ringe von der Art:

$$2\pi r_{n-1,\,n-2}\left[1-\left(\frac{\Delta l}{l}\right)_{n-2}\right]+\frac{p_{n-2}\,r^2_{n-1,\,n-2}}{E_{n-2}\,t_{n-2}}\left(1-\frac{\nu_{n-2}}{2}\right)\cdot$$
$$\cdot\,2\pi-\frac{2\pi\,p_{n-1}\,r^2_{n-1,\,n-2}}{E_{n-2,}\,t_{n-2}}\left(1-\frac{\nu_{n-2}}{2}\right)+$$
$$+\,2\pi(t_{n-1}-\Delta t_{n-1})=4\,\alpha\,r_{n-1,\,n}\cdot\left[1-\left(\frac{\Delta l}{l}\right)_n\right]+ \qquad (13)$$
$$+\,(2\pi-4\alpha)\,r_{n-1,\,n}\left[1-\left(\frac{\Delta l}{l}\right)_{n-1}\right]+$$
$$+\frac{p_n\cdot r_{n-1,\,n}\left(1-\frac{\nu_n}{2}\right)}{E_n\,t_n}\cdot 2\pi$$

wobei $r_{n-1,\,n} = r_{n-2,\,n-1} + t_{n-1}$ (14)

Damit können die radialen bzw. tangentialen Belastungen $p_1 \ldots p_n$ bestimmt werden. Mit Hilfe von Gl. 15 für dickwandige Zylinder lässt sich dann mit

$$p=\frac{\sigma r^2(b^2-a^2)}{b^2(a^2+r^2)} \qquad (15)$$

die Zug- oder Druckbeanspruchung σ in jedem Ring ermitteln.

Eine andere Methode sei anhand von Fig. 6 erläutert. Fig. 6a und 6b zeigen die Verhältnisse von Wicklung, gespaltener Eisenabschirmung und Befestigungsring bei 300 K und 4.2 K unter der Annahme, dass die geometrischen Abmessungen umgekehrt bei 4.2 K bzw. bei 300 K angepasst worden sind. In beiden Fällen erfolgt durch Abkühlung eine Deformation Δ der Wicklung, die sich nach Fig. 6c zu

$$\Delta = d_1 - d_2 = \varrho_1\left(1-\frac{\sqrt{2}}{2}\right)-\varrho_2+\sqrt{\varrho_2^2-\varrho_1^2/2} \qquad (16)$$

ergibt. Unter Annahme, dass die Wicklung gestützt ist, kann dann die Kraft R berechnet werden, die eine Verformung nach Gl. 16 von Δ hervorrufen würde. Mit

$$M_A = R\,(1-\cos\Theta-\sin\Theta) \qquad (17)$$

$$M_{r1} = -\frac{\varrho}{\sqrt{2}}\sin\Theta \qquad (18)$$

$$N_{r1} = \frac{1}{\sqrt{2}}\sin\Theta \qquad (19)$$

können nach Gl. 10 die Kraft R sowie das Moment M und die Komponente N ermittelt werden und folglich auch die Beanspruchungen σ und τ in jedem Punkt der Wicklung.

Der äussere Befestigungsring ist für die *resultierende Beanspruchung*, die durch die Summe der thermischen und elektromagnetischen Beanspruchungen auftritt, zu bemessen. Bei Magneten mit warmer, ausserhalb des Kryostaten angebrachter Eisenabschirmung ist es erforderlich, eine geeignete Konstruktion zu finden, die einerseits die in der Wicklung auftretenden elektromagnetischen und thermischen Beanspruchungen ohne unzulässige Verformung aufnimmt und anderseits das Einhalten der engen Konzentrizitätstoleranz im ganzen Temperaturbereich gewährleistet. Eine mögliche Lösung ist in Fig. 7 skizziert: die auf einem Tragrohr aus Inox angebrachte Wicklung wird durch einen Spannring oder durch ineinandergreifende Kämme aus Inox festgehalten. Zum Erhalten der Konzentrizität zwischen der warmen Eisenabschirmung und dem kalten Aktivteil kann eine Anordnung mit Ringen oder Keilen aus Vetronit vorgesehen werden. Fig. 7 zeigt die Verhältnisse bei Raumtemperatur und nach Abkühlung auf 4.2 K: vier genau bearbeitete Vetronitkeile werden durch die umgebende Eisenabschirmung eingespannt. Das Druck-Längenverhältnis $h_k = h_k(p)$ der Keile sei als bekannt angenommen. Diese sind derart bemessen, dass das untere Keilpaar der Höhe $h_1 > h_2$ die Kraft $Q_1 = P_g/\sqrt{2} + P_k + \Delta P$ das obere der Höhe h_2 $Q_2 = P_k + \Delta P$ aufbringen. Nach Abkühlung des Aktivteils sind sämtliche Keile mit $\Delta P \pm \varepsilon\Delta P$ vorgespannt, so dass die

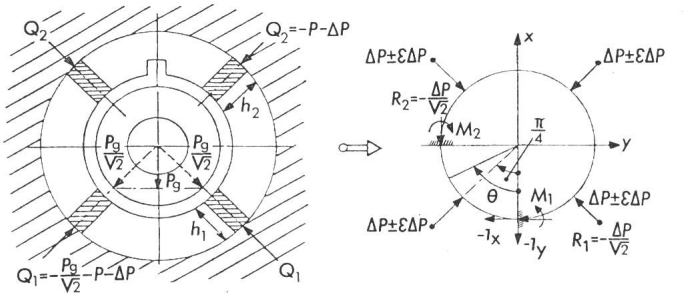

Fig. 7 Zur Berechnung der mechanischen Beanspruchungen infolge thermischer Spannungen einer Anordnung mit warmer Eisenabschirmung

P_g Eigengewicht des Aktivteils
P die zur Kompensierung der thermischen Kontraktion Δ_a des Aktivteils erforderliche Kraft, bzw. Vorspannung des Vetronitkeils
ΔP zusätzliche Vorspannung des Vetronitkeils
R_1, R_2 Reaktionskraft
M_1, M_2 Biegemomente
1_x, 1_y Einheitskräfte
h_1, h_2 Höhe des unteren und oberen Keilpaares

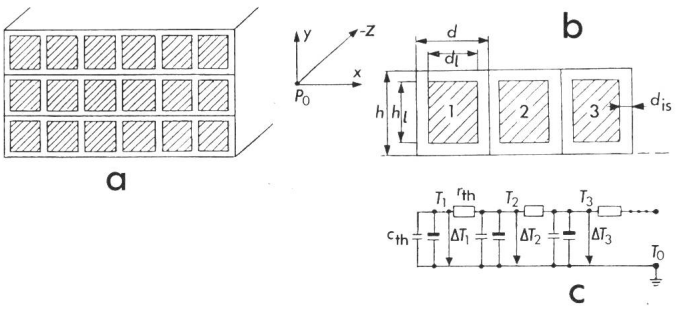

Fig. 8 Zur Berechnung der Ausbreitungsgeschwindigkeit der Normalzone in der Querrichtung

h, h_l Leiterhöhe mit und ohne Isolation
d, d_l Leiterbreite mit und ohne Isolation
d_{is} Isolationsdicke
T_1, T_2 Leitertemperaturen
T_0 Temperatur des Kühlmittels
c_{th} thermische Kapazität des Leiters
r_{th} thermischer Widerstand der Isolation

konzentrische Lage nur durch die Toleranzen und Bearbeitungsfehler der Keile $\varepsilon\Delta P$ beeinflusst wird. Die resultierende, sehr geringe Zentrumsverschiebung kann nach Gl. (10) ermittelt werden.

4. Schutzanordnungen für supraleitende Magnete im Falle eines Quenches

Infolge der zunehmenden gespeicherten Energien von supraleitenden Magneten, die bereits in Einheiten von 6 m Länge hergestellt werden und die elektrisch und kühlungsmässig in Reihe geschaltet werden können, kommt einer sorgfältigen Auslegung von entsprechenden Schutzanordnungen besondere Bedeutung zu, um so mehr als von zukünftigen, mit Hochfeldsupraleitern (Nb_3-Sn) gewickelten Magneten noch höhere Energien erwartet werden. Es geht dabei um die Beherrschung der beim Übergang einer Wicklung in den Normalzustand entstehenden Temperatur- und Druckerhöhungen im Heliumtank und der thermischen Beanspruchung in der Wicklung.

Es wird angestrebt, die ganze Wicklung in möglichst kurzer Zeit am Quenchvorgang teilnehmen zu lassen, damit die Temperaturerhöhung infolge der grösstmöglichen Masse des Aktivteils gering bleibt. Bei langen Magneten mit hoher Windungszahl kann sich die Gesamtenergie jedoch nur in einem Teil der Wicklung entladen, falls keine Abhilfe geschaffen wird. Eine derartige Situation wird auch durch neuere Untersuchungen über die Quenchausbreitung in Magnetwicklungen bestätigt, wonach die Ausbreitungsgeschwindigkeit in der Querrichtung (von Leiter zu Leiter) wesentlich geringer ist, als bisher angenommen wurde.

Es ist ferner zu bemerken, dass bei einer elektrischen Reihenschaltung von supraleitenden Magneten eine Energieextraktion durch einen Aussenwiderstand kaum möglich sein dürfte, da dann sämtliche Magnete ihre Energie in diesen Widerstand und in die normalleitende Wicklung entladen würden.

Es sollen nun folgende Aspekte von Schutzanordnungen besprochen werden: die korrekte Bestimmung der Ausbreitungsgeschwindigkeit der Normalzone in der Querrichtung, Schaltungen zum Einleiten von erzwungenen Quenchvorgängen in der ganzen Wicklung sowie Schutzanordnungen für in Reihe geschaltete Magnete.

Wird im Punkte P_0 (0, 0, 0) einer supraleitenden Wicklung (Fig. 8) ein Quench ausgelöst, so ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit v_z in der Längs- oder Leiterrichtung durch

$$v_z = \frac{j}{c_p}\sqrt{\varrho k_z/\Delta T_{kr}} \tag{20}$$

gegeben, mit c_p der resultierenden spezifischen Wärme der Wicklung, k_z der resultierenden Wärmeleitfähigkeit, ϱ dem spezifischen Widerstand (des stabilisierenden Kupfers) und ΔT_{kr} der Temperaturdifferenz bezüglich der kritischen Temperatur des Supraleiters.

Die Ausbreitungsgeschwindigkeiten in den Querrichtungen x und y wurden bisher zu

$$v_x/v_z = \sqrt{k_x/k_z}\ ;\ v_y/v_z = \sqrt{k_y/k_z} \tag{21}$$

angenommen. Ein genaueres Ersatzschaltbild gemäss Fig. 8c zeigt, dass die Reihenschaltung Leiter-Isolation als ein Kettenleiter aufzufassen ist, mit $c_{th} = c_p \cdot d_l h_l$ der Wärmekapazität des Leiters und $r_{th} = 2d_{is}/k_{is}h$ dem thermischen Widerstand der Isolation.

Die Temperaturerhöhung ΔT_2 des Leiters 2 bezüglich T_0 ist

$$\Delta T_2 = T_2 - T_0 = \frac{1}{r\,c} \cdot e^{-\frac{2t}{\tau}} \int T_1(t)\, e^{\frac{2t}{\tau}}\, dt \tag{22}$$

mit $\tau = r_{th} \cdot c_{th}$. Die Temperatur T_1 kann aus der adiabatischen Erwärmung des Leiters 1 zu

$$\int_0^t j^2 \varrho_{Cu} \cdot \frac{1}{\lambda_{Cu}}\, dt = \int_{T_0}^{T_1} c_p\, dT \approx \int_0^{T_1} c_p\, dT \tag{23}$$

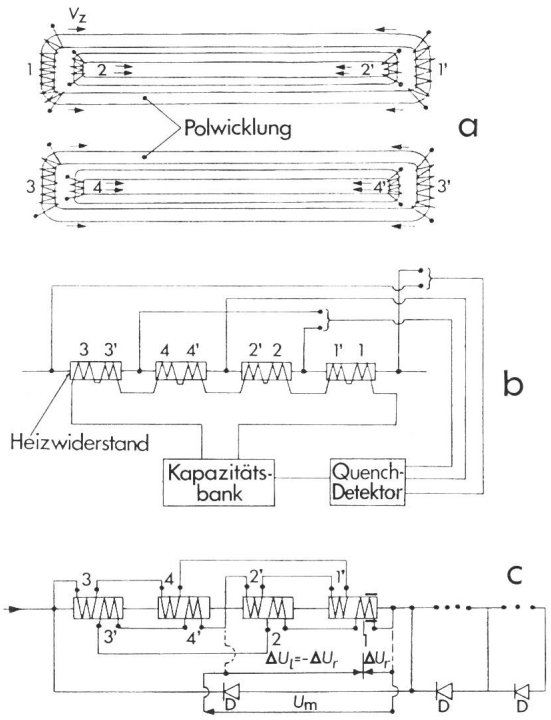

Fig. 9 Schaltungen zur künstlichen Quencheinleitung in Wicklungen von supraleitenden Magneten

a Anordnung der Heizelemente
b Schema einer aktiven Quenchauslösung mit Kapazitätsentladung
c Schema einer passiven Quenchauslösung

ΔU_r induktiver Spannungsabfall
U_n Gesamtspannung eines Sektors
D Schutzdiode

ermittelt werden. Berücksichtigt man die Temperaturabhängigkeit von c_p im Bereiche tiefer Temperaturen

$$c_p \approx k_0 T^3 \tag{24}$$

so wird $$T_1(t) \approx k_1 t^{1/4} \tag{25}$$

mit $$k_1 = \left(\frac{4 j^2 \varrho_{Cu}}{k_0 \lambda_{Cu}}\right)^{1/4} \tag{26}$$

und $$\Delta T_2 \approx \frac{4 k_1}{5 r_{th} c_{th}} \cdot t^{5/4} \tag{27}$$

Daraus ergibt sich das Verhältnis für die Ausbreitungsgeschwindigkeit der normalleitenden Zone zu

$$\frac{v_y}{v_z} \approx \frac{4}{10^{4/5}} \cdot \left(\frac{k_{is}}{d_{is}}\right)^{4/5} \cdot \left(\frac{1}{j}\right)^{3/5} \cdot \left(\frac{1}{k_z}\right)^{1/2} \tag{28}$$

Nach Einsetzen von numerischen Werten erhält man für v_y (und v_x) bis zu 50% tiefere Werte als nach Gl. 21.

Um eine möglichst rasche Quenchauslösung in der gesamten Wicklung eines supraleitenden Magneten zu erzielen, können die Schaltungen nach Fig. 9 angewandt werden. Fig. 9b zeigt das Schema einer aktiven Quenchauslösung mit Hilfe einer entsprechend geladenen Kapazität C, die nach erfolgtem Quench mit geringem Verzug durch den Quenchdetektor ausgelöst wird und sich in die Heizwiderstände entlädt. Die in Form von dünnen metallischen Bändern bifilar gewickelten Heizwiderstände werden symmetrisch in den Wicklungsstellen mit maximalen Magnetfeldern angebracht.

Fig. 9c zeigt ein mögliches Schema einer passiven Schutzanordnung: man geht dabei von der Spannungsverteilung in der Wicklung eines supraleitenden Magneten aus. Ist kein äusserer Entladewiderstand vorhanden, so ist die Gesamtspannung am Magneten und über jedem Sektor vor und nach dem Quench $U_m = 0$. Der ohmsche Spannungsabfall ΔU_r im normalleitenden Teil der Wicklung wird durch die induktive Spannung ΔU_1 über die restliche Wicklung kompensiert. Diese induzierte Spannung kann zum Speisen von entsprechend angebrachten Heizelementen zur Quenchauslösung in der ganzen Wicklung herbeigezogen werden. Man wird dabei bestrebt sein, mehrere passive Stromkreise nach Fig. 9c vorzusehen, damit bei Quencheinsatz die gesamte Wicklung normalleitend wird. Als Nachteil dieser Schaltung ist jedoch die erforderliche, sehr langsame Erregung des Magneten anzusehen. Bei elektrischer Reihenschaltung von gleichartigen Magneten kann jedem Element eine Entladungsdiode parallel geschaltet werden.

Literatur

[1] Fermilab TeV program: Superconducting magnet ring. Batavia/Illinois, Fermi National Accelerator Laboratory, 1977.

[2] Isabelle. A proposal for construction of a proton-proton storage accelerator facility. Report BNL No. 50519. Brookhaven/L.I. Miss., Brookhaven National Laboratory, 1976.

[3] *A. Ašner:* Die neue supraleitende Quadrupollinse für den Strahltransport hochenergetischer Teilchen von mehreren 100 GeV der CERN. Bull. SEV 64(1973)17, S. 1031...1039.

[4] *R. Perin:* Mechanical stability of superconducting coils. Proceedings of the fifth International Conference on Magnet Technology, Frascati, 1975.

Adresse des Autors

Dr. *A. Ašner*, Organisation Européenne pour la Recherche Nucléaire (CERN), 1211 Genève 23.

Literatur – Bibliographie

DK: 681.3.01(022) SEV-Nr. S 18A/6

Einführung in die Methoden der Digitaltechnik. Von *Wolfgang Weber.* 5. Auflage. AEG-Telefunken-Handbücher, Band 6. Berlin, Elitera-Verlag, 1977; 8°, 224 S., 181 Fig., 67 Tab. Preis: geb. DM 35.–.

Das sowohl für den Labor-Entwicklungs-Ingenieur zur Weiterbildung als auch für Elektronikfachschulen aus einer Vortragsreihe für Automation entstandene Buch über die Grundlagen der Digitaltechnik zeichnet sich durch kompakte, praktische und vor allem sehr verständliche Darstellung aus. Es enthält die wesentlichen rechnerischen Entwurfsmethoden in schaltalgebraischen Belangen sowie eine Übersicht und Zusammenfassung über die heute existierenden Speicherarten und Elemente.

Insbesondere wird die Vereinfachung Boolescher Funktionen zur Verminderung des Aufwandes bei der Realisierung von Schaltfunktionen geradezu schulmässig behandelt, wobei auch die Möglichkeiten mit den Karnaugh-Veitch-Diagrammen erkennbar werden. Nach den didaktisch guten Einführungen werden Methoden für die mathematische Formulierung von Systemen mit Speicherelementen sowie die Methodik der Schaltwerksynthese gezeigt.

Bauelemente, Peripheriegeräte, Prozessoren und EDV-Systeme wie auch Fragen der Geräteausführung werden absichtlich nur wo notwendig und der Abrundung der Lektüre wegen gestreift. Sie sind diskret in den Hintergrund gestellt, lassen aber erahnen, dass der Niederschrift des Werkes viele Erfahrungen mit Anlagerealisierungen vorausgegangen sind. *W. Linggi*

DK: 621.3.001.57 : 65.012.12 : 681.3 SEV-Nr. A 680

Grundlagen der elektrischen Modellierung und Simulationstechnik. Von *Hermann Uhlmann.* Leipzig, Akademische Verlagsgesellschaft Geest & Portig, 1977. – Wissenschaftliche Monographien der Elektrotechnik, Bd. 5–8°, 312 S., 206 Fig. Preis: Ostmark 69.–.

Das Buch vermittelt die Grundlagen der Modellierung und der Simulationstechnik für kontinuierliche Systeme.

Der erste Teil ist den Verfahren der Modellbildung gewidmet. Die Begriffe Analogie und Ähnlichkeit werden eingeführt und zur eigentlichen Grundlage der Modellbildung ausgebaut. Dabei werden Feldprobleme, Systeme mit verteilten Parametern und Systeme mit konzentrierten Parametern behandelt. Als Grundlage für den der Simulationstechnik gewidmeten zweiten Teil werden zunächst verschiedene Systemdarstellungen diskutiert. Anschliessend werden die bei der Simulation benützten Analog-, Digital- und Hybridrechner und die entsprechenden Simulationstechniken beschrieben. Zahlreiche Beispiele ergänzen die theoretischen Abhandlungen.

Der ausserordentlich grosse Stoffumfang zwingt den Autor zu einer sehr konzentrierten Darstellung. Dabei wird ein hohes technisches Niveau eingehalten. Damit dürfte sich das gut geschriebene Buch eher an den Spezialisten als an den Anfänger auf dem Gebiete der Modellbildung und der Simulationstechnik wenden.

W. Schaufelberger