

Interner Bericht
DESY K1-75/1
Januar 1975

DESY-Bibliothek
20. FEB.

Wassergekühlte Kabel für Doppelspeicherring bei DESY

von

Henner Neumann

Interner Bericht
DESY K1-75/1
Januar 1975

Wassergekühlte Kabel für Doppelspeicherring

bei DESY

von

Hennar Neumann

Vorwort

Auf Grund der besonderen Verhältnisse bei Forschungseinrichtungen für die moderne Hochenergiephysik können nicht immer Serienerzeugnisse der Industrie zum Einsatz kommen. Das trifft u. a. auch für die Magnetstromverkabelung des Doppelspeicherrings DORIS bei DESY zu. Wegen des nur sehr kleinen für die Kabelinstallation zur Verfügung stehenden Raumes einerseits und der verhältnismäßig großen Gleichströme (einige 100 A) für die Erregung der Magnete andererseits, war die Entwicklung eines speziell für diese Anlage zugeschnittenen wassergekühlten Kabel erforderlich. Mit 2 Querschnitten - 200 mm^2 , 760 mm^2 mit Kupfer als Leitermaterial - war es möglich, den gesamten Magnetstromstärkenbereich von über 300 A bis 1550 A zu beherrschen.

I n h a l t

1. Einleitung
2. Auslegung der wassergekühlten Kabel
 - 2.1 Bestimmung von Leiterquerschnitt und Leitermaterial
 - 2.2 Wahl des Isolations- und Mantelmaterials
 - 2.3 Grundsätzlicher Kabelaufbau
 - 2.4 Ermittlung der Kühlrohrinnendurchmesser
 - 2.5 Überschlägige Wärmebilanz für das Kabel
3. Kabelprüfungen
 - 3.1 Elektrische Prüfungen
 - 3.2 Hydraulische Prüfungen
4. Kabelverlegung

Anhang

Formelzeichen

Bild 1: $P_{ges} = f(G)$

Bild 3: $N = f(w, d), L = f(w, d)$

1. Einleitung

Zu Beginn der Projektierungen für dieses Kabel war bekannt, daß ca. 43 Magnetstromkreise mit Stromstärken von >300 A bis 1550 A für den Betrieb des Doppelspeicherringes (DORIS) erforderlich sind. Auf Grund der Tatsache, daß der Ringtunnel für DORIS eine große Vielzahl von Einzelkomponenten aufnehmen mußte, blieb für die Magnetstromkabel als Installationsraum nur ein Querschnitt von 730 mm in der Breite und 225 mm in der Höhe rings um den Ringtunnel übrig. Dieser Ringtunnelquerschnittsanteil ist jedoch für eine Verkabelung mit luftgekühlten Kabeln bei weitem zu klein. Deshalb war die Lösung, die Kabelverlustwärme über Wasserkühlung abzuführen, die einzig technisch realisierbare Möglichkeit. Gleichzeitig bot diese Lösung zudem noch den Vorteil, daß dieser für andere Komponenten kaum nutzbare Teil des Ringtunnelquerschnitts sinnvoll ausgefüllt werden konnte.

2. Auslegung der wassergekühlten Kabel

2.1 Bestimmung von Leiterquerschnitt und Leitermaterial

Auskunft über diese Frage erhält man am besten durch eine Gesamtkostenrechnung. Diese setzt sich aus einem Anteil P_1 für Stromverlustwärme und einem Anteil P_2 für Leiter-, Isolations- und Mantelmaterial sowie Kabelherstellung und Verlegung nebst Zubehör (z.B. Endverschlüsse usw.) zusammen. Der Kostenanteil P_1 wurde für eine 10-jährige Betriebsdauer gerechnet und mit einem Faktor K multipliziert, der die tatsächlich bei DORIS herrschenden Betriebsverhältnisse wie jährliche Einschaltdauer, mittlere Leistung/Maximalleistung aller Magnetstromkreise, hauptsächlich gefahrene Teilchenenergie/maximaler Teilchenenergie berücksichtigt.

Beim Kostenanteil P_2 wurden die Anteile für Isolations-, Mantelmaterial, Kabelherstellung und-verlegung einschließlich Zubehör mit dem

2-fachen Wert des Leitermaterialpreises in Ansatz gebracht.

Somit lautet die Gleichung für die Gesamtkosten:

$$P_{\text{ges}} = P_1 + P_2 = \frac{K \cdot I^2 \cdot \rho \cdot l \cdot K_E \cdot t}{A} + A \cdot l \cdot \delta \cdot \gamma \cdot K_M \quad [\text{DM}] \quad (1)$$

Mit $G = \frac{I}{A}$ wird:

$$P_{\text{ges}} = I \left(K \cdot G \cdot \rho \cdot l \cdot K_E \cdot t + \frac{l \cdot \delta \cdot \gamma \cdot K_M}{G} \right) = f(G) \quad (2)$$

Zur Ermittlung des Preisminimums wird die 1. Ableitung von Gleichung (2) nach der Variable G gebildet und gleich Null gesetzt. Es ist dann:

$$\frac{dP_{\text{ges}}}{dG} = K \cdot \rho \cdot l \cdot K_E \cdot t - \frac{l \cdot \delta \cdot \gamma \cdot K_M}{G^2} = 0 \quad (3)$$

Hieraus folgt:

$$G = \pm \sqrt{\frac{\delta \cdot \gamma \cdot K_M}{K \cdot \rho \cdot l \cdot K_E}} \quad \left[\frac{\text{A}}{\text{mm}^2} \right] \quad (4)$$

Mit der zum Berechnungszeitpunkt (1970/74) gültigen DEL-Notiz für Kupfer, dem zu diesem Zeitpunkt für DESY gültigen Energiepreis sowie den allgemein bekannten Werten für ρ und δ bei Kupfer wurde die wirtschaftliche Stromdichte nach (4) zu $3,04 \text{ A/mm}^2$ errechnet. Der Kurvenverlauf $P_{\text{ges}} = f(G)$ wurde zur besseren Anschaulichkeit in Bild 1 dargestellt.

Anhand des Stromstärkespektrums für die eingangs erwähnten Magnetstromkreise erwies es sich als sinnvoll, 2 Stromstärkebereiche zu definieren, und zwar: Bereich I >300 bis 660 A, Bereich II >660 bis 1150 A jeweils für einen Leiter. Da der Kurvenverlauf für $P_{ges} = f(G)$ nach Bild 1 im näheren Bereich des Gesamtkostenminimums nur eine schwache Steigung aufweist, wurde zu einer Stromdichte von $3,2 \text{ A/mm}^2$ übergegangen. Somit ergab sich der Querschnitt für Kabeltyp I zu 200 mm^2 für Strombereich I und der für Kabeltyp II zu 360 mm^2 für Strombereich II.

Daß bei der Wahl des Leitermaterials zu diesem Zeitpunkt Kupfer der Vorzug gegenüber dem Aluminium gegeben wurde, hatte verschiedene Gründe:

- es stand eine genügend große Kühlkapazität für deionisiertes Wasser auf der Basis von Kupfer oder Edelstahl als benetztes Material zur Verfügung,
- es war, wie auf der 3. Internationalen Konferenz über Magnet-Technologie 1970 in Hamburg berichtet wurde [1], beim Protonen speicherring (ISR) von CERN bereits mit gutem Erfolg ein wassergekühltes Kabel mit Leitermaterial Kupfer in ausgereifter Technologie für das Kabel und die zugehörigen Endverschlüsse eingeführt worden,
- die Technologie des Aluminiums war im Gegensatz dazu noch zu riskant und unerprobt,
- eine überschlägige Gesamtkostenrechnung ergab für Aluminium wesentlich größere Querschnitte was sich mit den Forderungen nach einem maximalen Biegeradius von 500 mm und dem hier zur Verfügung stehenden o.g. Installationsraum nicht in Einklang bringen ließ.

2.2 Wahl des Isolations- und Mantelmaterials

Hierzu ist die Bestimmung der Maximalwerte von Betriebsspannung U_B und Spannung gegen Erde U_o aus den Magnetstromkreisdaten erforderlich. Für Kabeltyp I ergab sich: $U_B = U_o = 1 \text{ kV}_=$, da alle mit diesem Kabeltyp ausgerüsteten Magnetstromkreise an einem Pol des zugehörigen Gleichrichtergerätes geerdet werden. Die Spannungswerte für Kabeltyp II werden jedoch durch Magnetstromkreis Nr. 1 bestimmt, der aus 81 in Serie geschalteten Magneten besteht und mit einer Betriebsspannung $U_B = 3,2 \text{ kV}_=$ betrieben wird. In Bild 2 ist das vereinfachte elektrische Schaltbild dargestellt. Durch Aufteilung der Gleichstromquelle in 2 Geräte sowie durch deren Anordnung in diesem Kreis zum festinstallierten Erdpunkt wird eine Spannung U_o von $800 \text{ V}_=$ in Normalbetrieb erreicht.

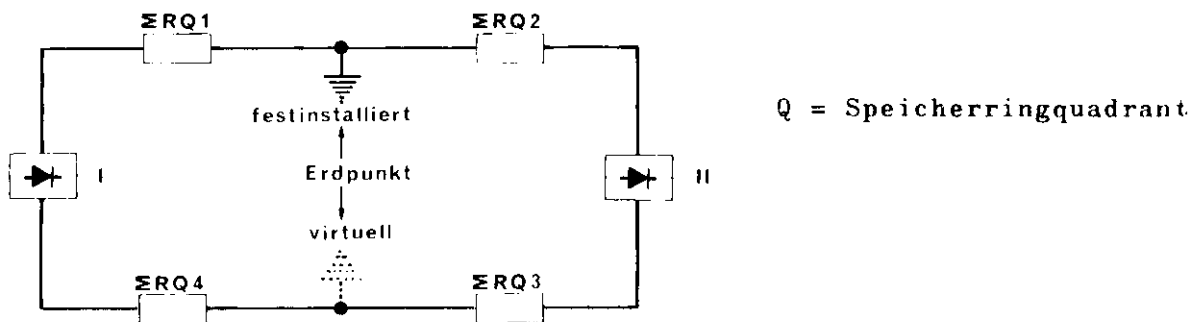


Bild 2

Mit Hilfe von Erdschlußbetrachtungen, wobei einfacher, doppelter und dreifacher Erdschluß angenommen wurde, ergab sich der Maximalwert für U_o zu $1,6 \text{ kV}_=$. Es wurde ein U_o von $1,7 \text{ kV}_=$ gewählt.

Nach Ermittlung dieser Daten galt es den Werkstoff für Isolation und Mantel festzulegen. Auf Grund seiner sehr guten Isolationseigenschaften - hieraus folgt eine kleine Isolationstiefe und somit die wünschenswerte Verkleinerung des Kabeldurchmessers - seiner hohen Resistenz gegen Wasseraufnahme, aggressive Reagenzien sowie radioaktive Strahlung, wurde Polyäthylen (PE) als Isolations- und Mantelmaterial gewählt.

PE weist außerdem die sehr positiv zu bewertende Eigenschaft auf, daß es zu chemisch neutralen Stoffen verbrennt. Damit sind die oft beträchtlich ins Gewicht fallenden Sekundärschäden an Mauerwerk und Anlagen in unmittelbarer Brandumgebung ausgeschlossen. Der Nachteil von PE als Mantelwerkstoff, nämlich seine geringe Abriebfestigkeit, wurde durch Verlegung auf einem glatten kunststoffbeschichteten Ringtunnelboden wieder ausgeglichen.

2.3 Grundsätzlicher Kabelaufbau

Im Zentrum des Kabels befindet sich ein Kupferkühlrohr mit einer Wanddicke von 1 mm. Die Ermittlung des Durchmessers wird im folgenden Abschnitt behandelt. Darauf soll ein mehrdrätiger Leiter mit möglichst guter Berührung mit dem Kühlrohr aufgebracht werden, um einen guten Wärmeübergang vom Leiter an das Kühlmedium zu erhalten. Außerdem soll das Kühlrohr am Stromtransport mitbeteiligt sein. Daran schließen sich die Leiterisolation, ein konzentrischer Schirm als Berührungs-Schutzmaßnahme wegen der hohen Betriebsspannung und der Mantel des Kabels an.

2.4 Ermittlung der Kühlrohrinnendurchmesser

Je nach Größe von Leiterquerschnitt, Leiterlänge und Maximalstrom entstehen in den einzelnen Magnetstromkreiskabeln entsprechend hohe Stromwärmeverluste N , die über das im Kabel zentrisch angeordnete Kühlrohr abgeführt werden müssen. Um das Kühlvermögen des Kühlrohres zu ermitteln, muß man die Rohrgeometrie (Durchmesser d , Länge L) sowie die zur Verfügung stehende Druckdifferenz Δp kennen. Damit erhält man die das Rohr durchströmende Kühlmittelmenge pro Zeiteinheit, die in Verbindung mit der zulässigen Temperaturdifferenz $\Delta \vartheta$ zwischen Kühlkreisvor- und -rücklauf die abführbare Wärmemenge Q (kcal/h) bzw. N (kW) ergibt.

Die allgemeine Gleichung für den Druckabfall in einer geraden Rohrleitung nach der Länge L entwickelt lautet:

$$L = \frac{\Delta p \cdot d \cdot 2g}{\lambda \cdot \gamma \cdot w^2} = f(w, d) \quad [\text{m}] \quad . \quad (5)$$

Die Gleichung für die abführbare Verlustleistung N lautet:

$$N = \frac{\pi \cdot d^2 \cdot w \cdot \Delta \gamma}{4 \cdot 860} = f(w, d) \quad [\text{kW}] \quad . \quad (6)$$

Die Form beider Gleichungen zeigt bereits das Lösungsverfahren auf. Man setze in allen nun folgenden Rechnungen für $\Delta p = \text{const} = 12 \text{ atü}$ und $\Delta \gamma = \text{const} = 30 \text{ }^\circ\text{C}$ als zum Projektierungszeitpunkt festgelegte Konstanten ein. Sodann variiere man in Schritten von 1 mm den Innenrohrdurchmesser d in den Grenzen $10 \text{ mm} \leq d \leq 16 \text{ mm}$ und berechne zu jedem Wert von d die Kurve $L = f(w)$ nach (5) sowie $N = f(w)$ nach (6), indem man die Strömungsgeschwindigkeit in Schritten von 1 m/s in den Grenzen $1 \text{ m/s} \leq w \leq 3 \text{ m/s}$ variiert. Die so gewonnenen Kurvenscharen mit d als Parameter sind in Bild 3 dargestellt. Der Widerstandsbeiwert λ wurde nach dem Potenzgesetz von Blasius

$$\lambda = \frac{0,316}{\sqrt[4]{\text{Re}}} \quad (7)$$

errechnet, da die Voraussetzungen - kaltgezogenes Rohr = glattes Rohr, Re für die berechnete Kurvenschar $L = f(w) < 10^5$ - dafür erfüllt waren.

Mit den für jeden Magnetstromkreis bekannten Daten L und N wurde sodann aus Bild 3 entsprechend dem darin angegebenen Beispiel ($L = 300 \text{ m}$, $N = 25 \text{ kW}$; hieraus folgt $d = 12 \text{ mm}$) der erforderliche Rohrrinnendurchmesser d ermittelt und gleichzeitig mit dem zuge-

hörigen Wert für die abführbare Leistung N (im Beispiel 28,4 kW) in eine Tabelle eingetragen. Als Entscheidungskriterium für die Typisierung des Innenrohrdurchmessers wurde die Kühlreserve verwendet, d.h. das Verhältnis von abführbarer Leistung zu tatsächlicher Leistung. Mit der Wahl von 12 mm Durchmesser für Kabeltyp I und 15 mm Durchmesser für Kabeltyp II ergab sich an Hand dieser Tabelle eine minimale Kühlreserve von 40 % bei Kabeltyp I und eine von 23 % bei Kabeltyp II, was als ausreichend angesehen werden konnte.

2.5 Überschlägige Wärmebilanz für das Kabel

Die im Leiter erzeugte Wärmemenge Q_{LE} findet bei diesem Kabeltyp zu den beiden Kühlmedien (Wasser im Innenrohr und ruhende Luft als Kabelmantelumgebung) ein positives Temperaturgefälle - $\bar{\vartheta}_{LE} > \bar{\vartheta}_W$ bzw. $\bar{\vartheta}_{LE} > \bar{\vartheta}_L$ - vor. Um die Aufteilung dieser Wärmemenge auf beide Kühlmedien überschlägig ermitteln zu können, benutzt man den in Bild 4 vereinfacht dargestellten Kabelaufbau als wärmetechnisches Berechnungsmodell.

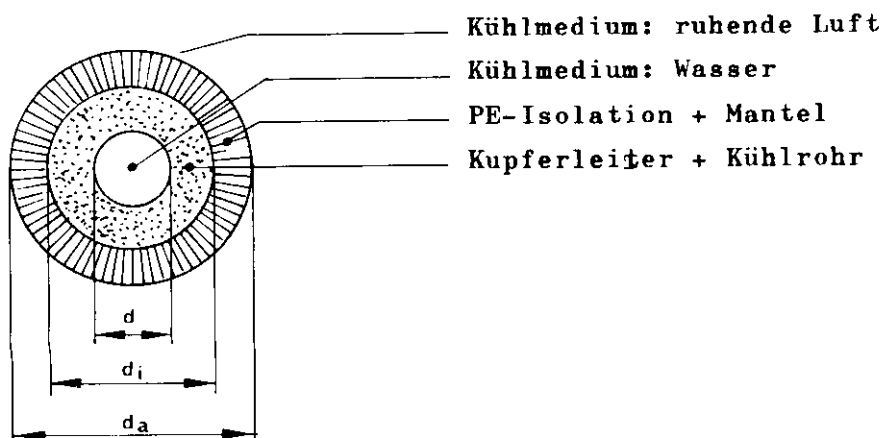


Bild 4

Das zugehörige Ersatzschaltbild für den Wärmefluß zeigt Bild 5.

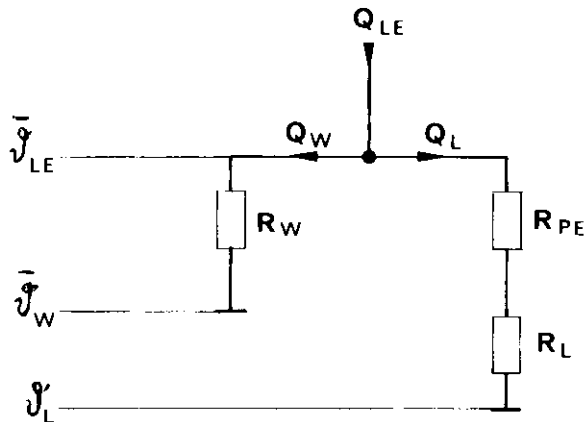


Bild 5

Dabei sind R_W und R_L die der Konvektion des Wärmestromes zu den Kühlmedien Wasser und Luft entsprechenden Wärmewiderstände und R_{PE} der Wärmewiderstand von PE-Isolation und- Mantel.

Die Gleichungen für die einzelnen Widerstände lauten:

$$R_W = \frac{1}{\alpha_W \cdot F_W} = \frac{1}{\alpha_W \cdot \pi \cdot d \cdot L} \quad [\text{h grd/kcal}] \quad (8)$$

$$R_{PE} = \frac{\ln(d_a/d_i)}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_{PE} \cdot L} \quad [\text{h grd/kcal}] \quad (9)$$

$$R_L = \frac{1}{\alpha_L \cdot \pi \cdot d_a \cdot L} \quad [\text{h grd/kcal}] \quad (10)$$

Mit den Werten:

$$L = 1 \text{ m}, \alpha_W \approx 2900 \text{ kcal/m}^2 \text{ h grd bei } w = 1 \text{ m/s [2] ,}$$

$$\alpha_L = 5 \text{ kcal/m}^2 \text{ h grd bei } w = 0 \text{ m/s [3] ,}$$

$$\lambda_{PE} = 0,34 \dots 0,48 \text{ W/m grd} = 0,293 \dots 0,412 \text{ kcal/h m grd}$$

$$\text{hieraus folgt } \lambda_{\text{Mittel}} = 0,3525 \text{ kcal/h m grd [4] ,}$$

$d = 12 \text{ mm}$, $d_a = 33 \text{ mm}$, $d_i = 21 \text{ mm}$ für Kabeltyp I sowie $d = 15 \text{ mm}$, $d_a = 42 \text{ mm}$, $d_i = 27 \text{ mm}$ für Kabeltyp II wurden die Wärmewiderstände in h grad/kcal nach den Gleichungen (8), (9) und (10) berechnet und in untenstehender Tabelle zusammengestellt.

	Kabeltyp I	Kabeltyp II
R_W	$9,1 \cdot 10^{-3}$	$7,3 \cdot 10^{-3}$
R_{PE}	$2,04 \cdot 10^{-1}$	$2,0 \cdot 10^{-1}$
R_L	1,93	1,51

Um die Aufteilung der Wärmemenge Q_{LE} in die einzelnen Komponenten Q_W und Q_L errechnen zu können, muß die mittlere Leitertemperatur $\bar{\mathcal{J}}_{LE}$ bei Nennstrom ermittelt werden.

$$\text{Es ist } \bar{\mathcal{J}}_{LE} = \bar{\mathcal{J}}_W + \Delta \mathcal{J}_{LE} \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (11).$$

Da der Kühlwasserdurchsatz für die einzelnen Magnetkabelstromkreise bei Nennstrom für ein $\Delta \mathcal{J}$ von $30 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ausgelegt wurde, ergibt sich bei einer Kühlwasser-Vorlauftemperatur von ca. $30 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ein $\bar{\mathcal{J}}_W = 30 \text{ }^{\circ}\text{C} + \frac{\Delta \mathcal{J}}{2} = 45 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Jetzt bleibt als vorletzter Rechenschritt die Feststellung der Größenordnung von $\Delta \mathcal{J}_{LE}$ übrig. Hierzu berechnet man die Wärmemenge Q_{LE} für 1 m Kabel bei Nennstrom je Kabeltyp und ermittelt $\Delta \mathcal{J}_{LE}$ aus der Gleichung

$$\Delta \mathcal{J}_{LE} = Q_{LE} \cdot R_W \quad (12)$$

unter der Voraussetzung, daß zunächst die gesamte Wärmemenge Q_{LE} an das Kühlmedium Wasser abgegeben wird, da aus obiger Tabelle

$$\frac{R_W}{R_{PE}+R_L} = \frac{9,1 \cdot 10^{-3}}{2,134} \text{ bzw. } \frac{7,3 \cdot 10^{-3}}{1,71} \approx \frac{1}{234} \text{ gilt.}$$

Mit den Werten für Kabeltyp I: $R = 0,1035 \text{ mOhm/m}$, $I_N = 660 \text{ A}$, $R_W = 9,1 \cdot 10^{-3} \text{ h grad/kcal}$, Kabeltyp II: $R = 0,0576 \text{ mOhm/m}$, $I_N = 1150 \text{ A}$, $R_W = 7,3 \cdot 10^{-3} \text{ h grad/kcal}$ errechnet sich $\bar{\mathcal{J}}_{LE}$ für Kabeltyp I zu $0,351 \text{ }^\circ\text{C}$ und für Kabeltyp II zu $0,478 \text{ }^\circ\text{C}$. Hieraus folgt aus (11) $\bar{\mathcal{J}}_{LE} = 45,351 \text{ }^\circ\text{C}$ für Kabeltyp I und $45,478 \text{ }^\circ\text{C}$ für Kabeltyp II. Der letzte Rechenschritt ist die Berechnung von Q_W und Q_L mit diesen obigen Daten.

Es gilt:

$$Q_W = \frac{\Delta \mathcal{J}_W}{R_W} = \frac{\bar{\mathcal{J}}_{LE} - \bar{\mathcal{J}}_W}{R_W} \quad (13)$$

$$Q_L = \frac{\Delta \mathcal{J}_L}{R_{PE}+R_L} = \frac{\bar{\mathcal{J}}_{LE} - \bar{\mathcal{J}}_L}{R_{PE}+R_L} \quad (14)$$

Die mit den bisher errechneten Werten sowie der Variation von $\bar{\mathcal{J}}_L$ in Schritten zu $2 \text{ }^\circ\text{C}$ in den Grenzen $18 \text{ }^\circ\text{C} \leq \bar{\mathcal{J}}_L \leq 22 \text{ }^\circ\text{C}$ nach (13) und (14) ermittelten Werte für Q_W und Q_L sind in untenstehender Tabelle eingetragen.

TEIL 1

	Q_W [kcal/h]	Q_L [kcal/h] bei $\bar{\mathcal{J}}_L =$		
		$18 \text{ }^\circ\text{C}$	$20 \text{ }^\circ\text{C}$	$22 \text{ }^\circ\text{C}$
Kabeltyp I	386	12,8	11,9	11
Kabeltyp II	655	16,1	14,9	13,7

TEIL 2

	$\frac{Q_W}{Q_{L18^\circ}}$	$\frac{Q_{L18^\circ}}{Q}$ [%]	$\frac{Q_W}{Q_{L20^\circ}}$	$\frac{Q_{L20^\circ}}{Q}$ [%]	$\frac{Q_W}{Q_{L22^\circ}}$	$\frac{Q_{L22^\circ}}{Q}$ [%]
Kabeltyp I	30,2	3,2	32,5	2,98	35,1	2,77
Kabeltyp II	40,7	2,4	43	2,27	47,2	2,07

Aus dieser Tabelle folgt, daß bei Nennstrom und $\vartheta_L = 20^\circ\text{C}$ zwischen 2 und 3 % der im Leiter entstehenden Verlustwärme an die Luft abgegeben werden. Wichtig ist ferner die Erkenntnis, daß bei Erniedrigung der Leiterverluste sich der an die Luft abgegebene Wärmeanteil erhöht. Verringert man den Strom z.B. auf $0,7 \cdot I_{\text{Nenn}}$, so erhöht sich der an die Luft abgegebene Wärmeanteil auf etwas über 4 %.

3. Kabelprüfungen

3.1 Elektrische Prüfungen

Zu prüfen waren der Leiterquerschnitt und die Spannungsfestigkeit des Kabels. Der Leiterquerschnitt wurde über eine Widerstandsmessung ermittelt. Diese Meßwerte ergaben einen geringfügig größeren Querschnitt als gefordert. Die Höhe der Prüfwechselfspannung zum Nachweis der Spannungsfestigkeit wurde nach VDE 0271 § 11 (Prüfung an Fertigungslängen) zu $2,5 U_0 + 2,5 \text{ kV}$ festgelegt. Dabei wurde die Tatsache, daß das Kabel nur mit Gleichspannung betrieben wird, außer Acht gelassen. Es ergaben sich im Vergleich zu VDE 0250 Tafel 901,1 höhere Prüfspannungswerte und somit härtere Prüfbedingungen. Die Werksspannungsprüfung wurde für Kabeltyp I mit

5 kV_~ und für Kabeltyp II mit 7 kV_~ durchgeführt. Die Prüfdauer je Fertigungslänge betrug 15 Minuten.

Die Baustellenprüfung an den verlegten und mit Endverschlüssen versehenen Kabeln erfolgte mit Gleichspannung und zwar nach § 19 mit dem 0,7-fachen Wert der Werksprüfung. Das ergibt Prüfungswerte für Kabeltyp I von 11,3 kV₌ und für Kabeltyp II von 14,7 kV₌.

3.2 Hydraulische Prüfungen

A) Nachweis der Kühleigenschaften am verlegten Kabel.

1. Methode: Bei jeder Einzellänge wird eine kalibrierte Stahlkugel durch das Kühlrohr mit Preßluft getrieben, um unzulängliche Querschnittsverengungen festzustellen. Der Durchmesser dieser Prüfkugeln wird jeweils um 2 mm kleiner als der Kühlrohrinnendurchmesser gewählt. Errechnet man nun mit dieser Angabe den hydraulischen Durchmesser d_h (dieser ergibt sich, wenn man aus einem Kreis mit dem Durchmesser d eine Ellipse mit der kleinen Achse $2b = d - 2$ mm bildet), setzt diesen in die nach w aufgelöste Gleichung für den Druckabfall in einer geraden Rohrleitung mit den Daten für die in Abschnitt 2.4 bereits genannten Magnetstromkreise mit der jeweils kleinsten Kühlreserve je Kabeltyp bei $\Delta p = \text{const} = 12$ atü ein und berechnet anschließend mit den so gewonnenen Werten für w die abführbare Kühlleistung nach der Gleichung

$$N = \frac{F_{\text{Ellipse}} \cdot w \cdot \Delta \mathcal{V}}{860} \quad [\text{kW}] \quad (14)$$

mit $\Delta \mathcal{J} = \text{const} = 30 \text{ }^\circ\text{C}$, so beträgt die neue Kühlreserve für Kabeltyp I noch 32 % und für Kabeltyp II noch 19 %. Diese Methode ist vor der nachstehend beschriebenen anzuwenden.

2. Methode: Man führt mit einer Prüfflüssigkeit eine Messung von Durchsatz W und Druckdifferenz Δp an der zu prüfenden Einzellänge durch. Löst man wiederum die Gleichung für den Druckabfall in einer geraden Rohrleitung nach d auf und verwendet Brunnenwasser von $12 \text{ }^\circ\text{C}$ als Prüfflüssigkeit, dann ergibt sich d zu :

$$d = 10 \sqrt[19]{\frac{L^4 \text{ [m]} \cdot W^7 \text{ [l/s]}}{\Delta p^4 \text{ [kp/cm}^2\text{]}}} \cdot 4,57 \text{ [mm]} \quad (15)$$

Läßt man für o.g. Magnetstromkreise mit den kleinsten Kühlreserven je Kabeltyp eine um 10 % verminderte Kühlreserve zu (das sind für Kabeltyp I noch 26 % und für Kabeltyp II noch 11 % Kühlreserve), so kann man die zulässige Abweichung des nach (15) ermittelten Wertes für d von d_{Nenn} errechnen. Dazu werden je Kabeltyp bei Nennstrom und gleicher Länge die Werte für Δp und W errechnet. Da $N \sim W$ ist, wird der Durchmesser d nach Gleichung (15) mit Δp jedoch $0,9 \cdot W$ errechnet. Die so errechneten Werte d sind bei beiden Kabeltypen um ca. 4 % kleiner als d_{Nenn} .

B) Nachweis der Kühlrohrdichtigkeit am verlegten Kabel.

Um das nahtlos kaltgezogene Kühlrohr auf Dichtigkeit zu überprüfen, wurde eine Wasserdruckprobe von 20 atü über 15 min an jeder Einzellänge vorgenommen. Da die Wassermenge für eine Einzellänge sehr klein ist, führt bereits der Austritt von wenigen Tropfen zum eindeutig meßbaren Druckverlust. Damit spürt man bereits schon kleinste Leckagen auf.

4. Kabelverlegung

Die Kabel sind in dem eingangs erwähnten Installationsraum zu einem Kabelpaket zusammengefügt. Das Paket besteht aus 2 Kabeln, die jeweils mit Styropor zur Wärmedämmung und einer unmittelbar darüber angeordneten Internitschicht zum mechanischen Schutz abgedeckt sind. Die Styroporabdeckung erfüllt außerdem den Zweck, daß ein Zwischenraum gebildet wird, der für die Herausführung der einzelnen Kabelenden zu den Magneten hin erforderlich ist.

Literatur

- [1] Proceedings The Third International Conference on Magnet Technologie Hamburg 1970, S. 1244-1257
- [2] Dubbels Taschenbuch für den Maschinenbau Band I, 11. Auflage, 1953, S. 437
- [3] ebenda S. 440
- [4] Handbuch der Elektrotechnik, SIEMENS AG, Ausgabe 1971, S. 169

Formelzeichen

A	=	Leiterquerschnitt	[mm ²]
G	=	Stromdichte	[A/mm ²]
γ	=	Spezifisches Gewicht	[kg/dm ³]
I	=	Stromstärke	[A]
K	=	Reduktionsfaktor für Energiekosten	
K _E	=	Energiekostenkonstante	[DM/kWh]
K _M	=	Materialkostenkonstante	[DM/kg]
l	=	Länge	[m]
P ₁	=	Energiekosten	[DM]
P ₂	=	Materialkosten	[DM]
P _{ges}	=	Gesamtkosten	[DM]
ρ	=	Spezifischer elektrischer Widerstand	[Ω mm ² /m]
t	=	Betriebsdauer	[h]
U _B	=	Betriebsspannung	[V]
U _o	=	Spannung gegen Erde	[V]
α	=	Wärmeübergangszahl	[kcal/h m ² grd]
d	=	Innenrohrdurchmesser	[mm]
d _a	=	Kabeldurchmesser	[mm]
d _i	=	Leiterdurchmesser	[mm]
d _h	=	hydraulischer Durchmesser	[mm]
F	=	Fläche	[m ²]
g	=	Erdbeschleunigung	

L	=	Rohrlänge	[m]
λ	=	Widerstandsbeiwert	
λ_{PE}	=	Wärmeleitzahl für PE	[kcal/h m grd]
N	=	Stromwärmeverluste	[kW]
Δp	=	Druckdifferenz	[kp/cm ²]
Q	=	Wärmemenge	[kcal/h]
R	=	Wärmewiderstand	[h grd/kcal]
Re	=	Reynoldssche Zahl	
ϑ	=	Temperatur	[°C]
$\bar{\vartheta}$	=	mittlere Temperatur	[°C]
w	=	Kühlmittelgeschwindigkeit	[m/s]
W	=	Durchsatz	[1/h]
$\Delta \vartheta$	=	Temperaturdifferenz	[°C]

Indizes

L	=	Luft
LE	=	Kupferleiter
PE	=	Polyäthylen
W	=	Wasser

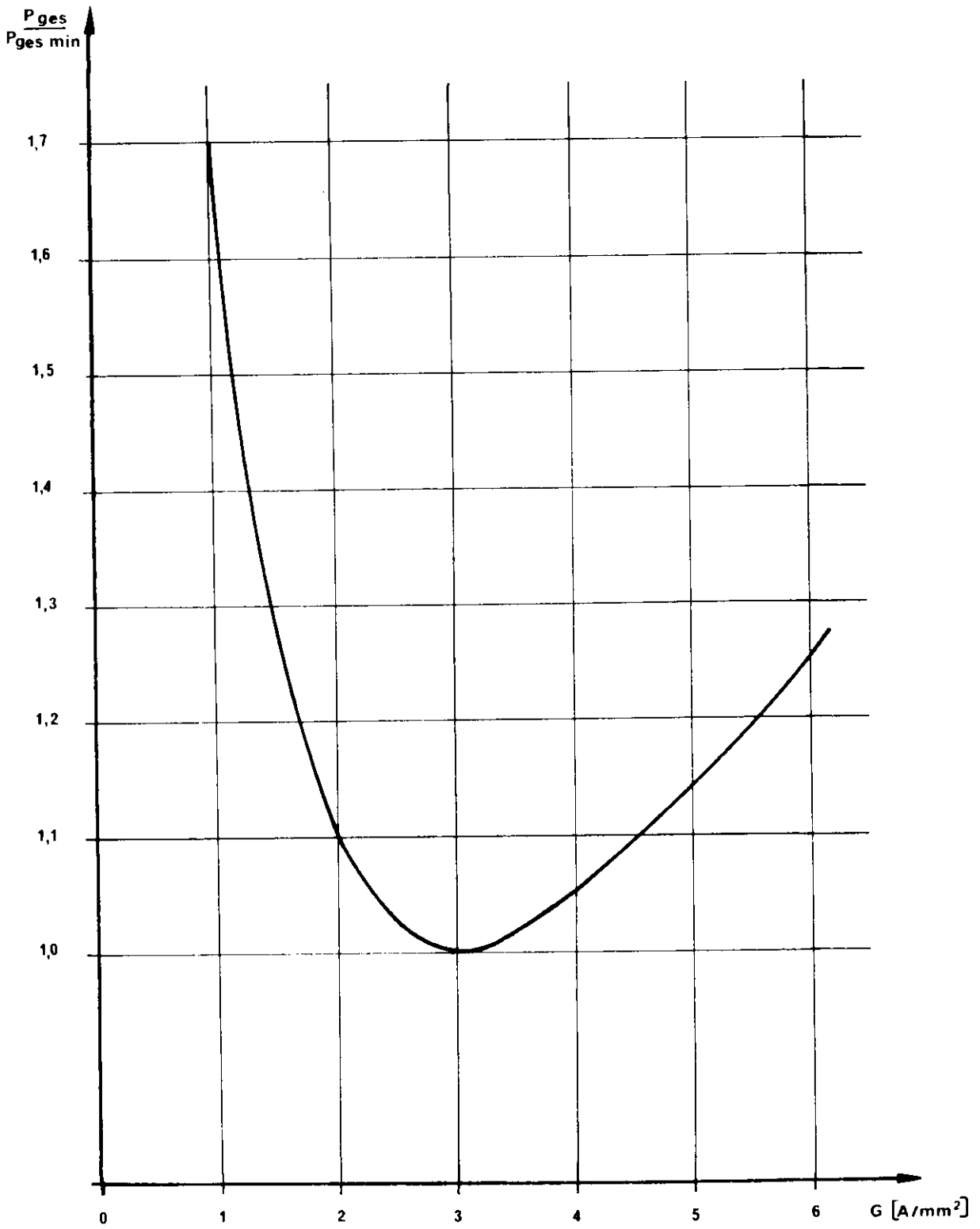


Bild 1 Gesamtkosten P_{ges} als Funktion der Stromdichte G

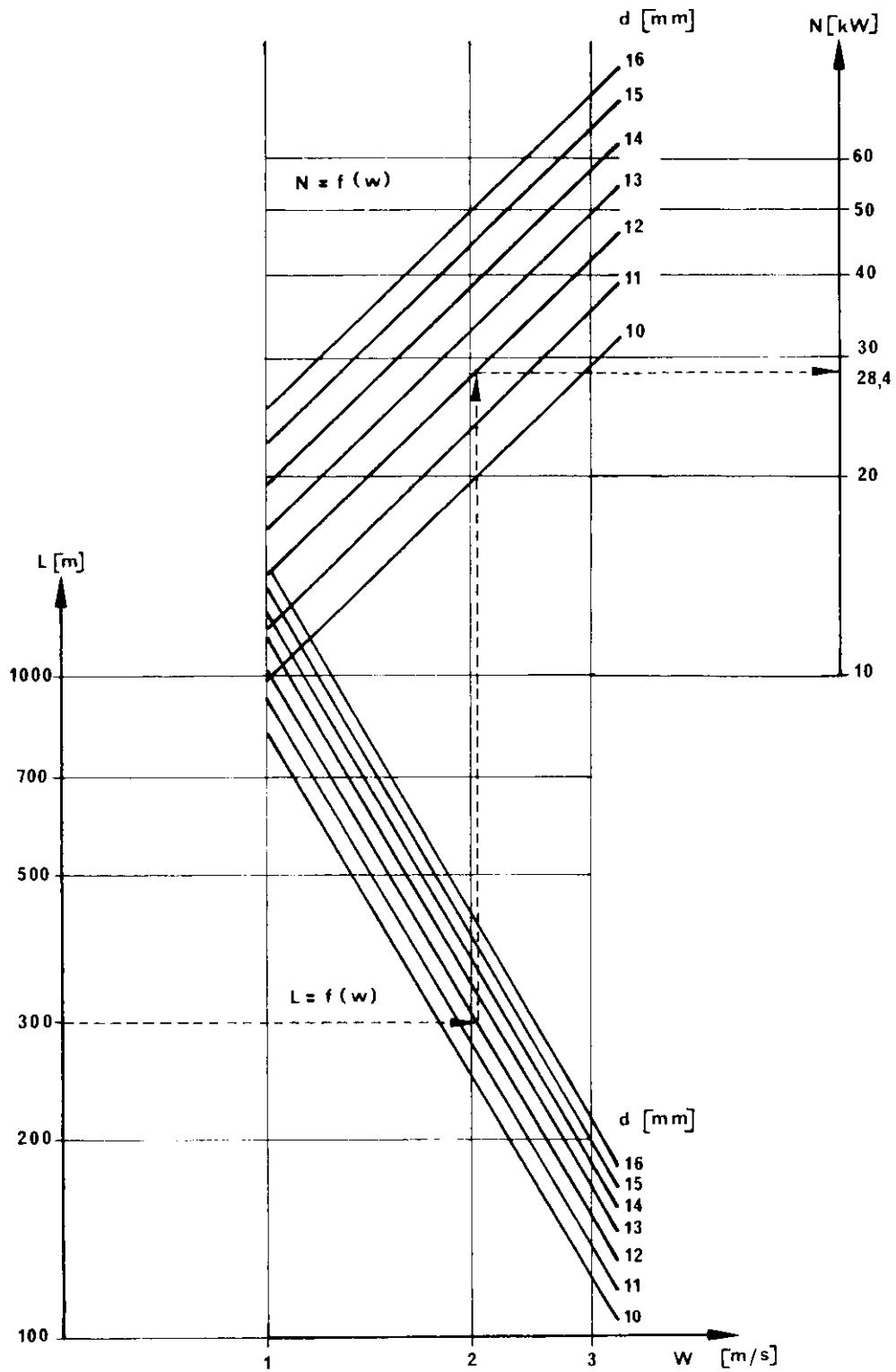


Bild 3 Ermittlung des Kühlrohrinnendurchmessers d aus Verlustleistung N u. Länge L für $\Delta p = \text{const} = 12 \text{ atü}$

