

MagnetkühlungAllgemeines

Im Ringtunnel werden 48 Magnetsektoren aufgestellt; davon 24 mit hohem und 24 mit niedrigem Luftspalt. Die Spulenverluste (Ohmsche- und Streuflußverluste) betragen im ersten Fall 12,2 kW im zweiten Fall 7,2 kW, die Eisenverluste 8-10 kW je Sektor. Diese Wärmung muß durch eine eigene Kühlung abgeführt werden. Dabei soll die Temperatur der Magnete nicht wesentlich über die Raumtemperatur steigen, um Dehnungen der Wicklungskörper und Aufheizung des Tunnels zu vermeiden, der auf 20° C klimatisiert wird.

Kühlmittel

Die Wärmeabfuhr kann letzten Endes nur durch Wasser oder Luft erfolgen. Luftkühlung bedeutet jahreszeitlich stark schwankende Temperaturen. Das gleiche gilt für Wasser mit Kühlturmrückkühlung, da hierbei die Kaltwassertemperatur nur wenige Grade unter der Außenlufttemperatur liegt. Fast konstante Temperaturen liefert eine Brunnenwasserkühlung (Brunnentemperatur 10-13° C).

Es empfiehlt sich nicht, die Magnetspulen direkt mit Brunnenwasser zu kühlen, da es sorgfältig aufbereitet werden müßte und durch Strahlung beeinflußt werden kann. Um diesen Schwierigkeiten zu entgehen, kann man einen geschlossenen Sekundärkreislauf mit

einem anderen Kühlmittel einschalten (Gase, Öl, destilliertes Wasser). Verwendet man Gase (Luft, CO₂ oder H₂) im Sekundärkreis, so werden Rohrleitungen und Wärmeaustauscher sehr groß und teuer. Außerdem werden hohe Ventilatorleistungen benötigt und starke Strömungsgeräusche erzeugt.

Bei Verwendung von Isolierflüssigkeit (Öl, Clophen) könnte man den gesamten Magneten wie einen Trafo mit minimaler Spulenisolation in einen Ölbehälter stellen. Eine besondere Führung der Kühlflüssigkeit würde sich erübrigen. Allerdings wäre dann der Magnet schlecht zugänglich.

1*)

Deshalb ist eine geführte Flüssigkeitskühlung geplant. Alle 4 Magnetspulen werden mit Kühlröhrchen und angelöteten Kühlfahnen versehen. Die Isolation gegenüber der Spule ist aus Gründen der Wärmeleitung so knapp bemessen, daß die Kühlrohre an Potential gelegt werden müssen. Es handelt sich um 7,5 kV Wechselspannung gegen Erde und um eine Gleichspannung, die zwar je Magnet nur wenige Volt beträgt, aber durch Reihenschaltung bei einzelnen Magneten Werte zwischen 500 und 1000 Volt gegen Erde annehmen kann.

Das Kühlmittel darf also nur geringste elektrische Leitfähigkeit haben, damit keine höheren Ströme in den Kühlmittleitungen fließen (Elektrolyse).

Außer destilliertem Wasser (Deionat) kommen Silikonöle, Mineralöle, Tripfen sowie Clophen T 64 in Frage (siehe auch Aktennotiz B. 1.49). Die Silikonöle besitzen einen höheren Flamm- und Brennpunkt als Mineralöle, sind aber nicht unbrennbar. Clophen ist bis zum Siedepunkt unbrennbar aber noch viskoser als die Öle, die bereits 5-fache Zähigkeit gegenüber Wasser aufweisen. Die Viskosität bedingt vor allem einen größeren Wärmeaustauscher.

1*) eine andere Lösung wird z. Zt. diskutiert

Zur Verminderung der Brandgefahr kann der Kühlmitteldruck *) unter 1 ata gehalten werden, damit kein Öl an undichten Stellen austritt. Bei Rohrbruch ist das allerdings kein Schutz; hier muß die Maschine abgeschaltet werden. Die Gefahr der Sauerstoffaufnahme läßt aber das Verfahren nicht ratsam erscheinen.

Der Vorteil der organischen Kühlmittel liegt in ihrer Passivität gegenüber Metallen. Sie zersetzen sich selbst aber im Laufe der Zeit und müssen dann erneuert werden. Vor ihrer Verwendung muß auch festgestellt werden, ob die benutzten Dichtungsmaterialien und Röhre aus Gummi und Kunststoff ausreichend beständig sind.

Reines Wasser erscheint nach Prüfung aller Gesichtspunkte als bestes Kühlmittel, wenn es mit der nötigen Sorgfalt eingesetzt wird. Deshalb sollen im folgenden ausschließlich die mit seiner Verwendung zusammenhängenden Probleme behandelt werden.

Rohrwerkstoffe

Die Werkstoffwahl muß bei Deionat unter dem Gesichtspunkt der Elektrolyse und der Korrosion getroffen werden.

Der Elektrolyse kann am besten durch höchste Wasserreinheit und lange Isolierrohrstrecken zwischen spannungsführenden und geerdeten Teilen des Kreislaufs begegnet werden.

Die Korrosion ist wegen der vielen Einflußgrößen nur sehr unvollkommen durch die Theorie zu erfassen. Man muß weitgehend auf praktische Erfahrungen zurückgreifen. Es liegt nahe, die Erfahrungen beim Betrieb der Kondensatoren von Dampfturbinen zugrunde zu legen, da hier auf einer Seite Dampf und Destillat bei 20° bis

*) nach Vorschlag von Herrn Dr. Hardt

40° C, auf der anderen Fluß- oder Grundwasser angreifen, d.h. gleiche Bedingungen wie bei dem Wärmeaustauscher des Magnetspülkreislaufer. Die Spulentröhrchen müssen aber aus dem gleichen Material wie die Kondensatorrohre sein, da sonst gelöste Partikel des edleren Materials auf dem unedleren Lokalelemente bilden. Zusätzliche Forderungen sind: kein ferromagnetisches Material, geringe elektrische Leitfähigkeit bei ausreichender Wärmeleitfähigkeit, genügende mechanische Festigkeit beim Pressen der Spulen.

Die Werkstofftabelle zeigt alle interessierenden Werte für die gängigen Kondensatorrohrwerkstoffe. Es handelt sich um sechs Gruppen. Die Messingsorten sind außer SoMs76 leicht lötbar, noch besser lassen sich die CuNi-Legierungen, Neusilber und Monel löten, schlechter V2A und AlMg-Legierungen. Bei letzteren nehmen die Schwierigkeiten mit Mg-Gehalt zu. Im gleichen Sinn steigen Härte und Bearbeitungsschwierigkeiten. Die elektrische Leitfähigkeit ist selbst bei AlMg7 noch relativ hoch. Der Vorzug der Al-Legierungen ist ihre Unempfindlichkeit gegenüber dem gelösten O₂ im Wasser und ihr niedriger Preis. Der Preisvorteil wird im allgemeinen durch die erforderliche, unerhörte Sorgfalt bei der Bearbeitung wieder eingebüßt (es dürfen keinerlei Schwermetallspäne mit der Werkstoffoberfläche in Berührung bleiben). Sehr nachteilig ist die Empfindlichkeit des Aluminiums gegen aggressive CO₂ und Schwermetalle im Primärwasser. Die natürliche Oxydhaut hat eine Stärke von 0,1 µ. Durch mehrstündiges Kochen in Wasser oder Dampf kann man eine "Böhmit"*)-Schicht aufbringen. Sie hat eine ähnliche Zusammensetzung wie die natürliche Oxydhaut aber eine Stärke von 0,7 bis 2 µ; verbesserte Schutzwirkung.

Von den Ms-Legierungen haben sich vor allem die Sondermessinge allgemein bewährt. (Beim HEW arbeiten einige 1000 m² SoMs71

*) Firmen-Bezeichnung

seit 10 Jahren zwischen O_2 -freiem Destillat und Elbwasser einwandfrei). Noch besser ist das SoMs76, das auch die geringste elektrische Leitfähigkeit besitzt. Leider scheidet es durch schlechte Lötbarkeit praktisch aus.

Die CuNi-Legierungen - wegen ihres Nickelgehaltes teuer und erst in den letzten Jahren in Deutschland eingeführt - werden wegen ihrer hohen Korrosionsbeständigkeit vor allem in Schiffskondensatoren benutzt. Diese Legierungen sind beständiger als die Sondermessinge aber auch härter, ihre Leitfähigkeit beträgt nur ein Bruchteil von der des Messings.

Neusilber läßt sich leichter verarbeiten als die CuNiFe-Legierungen; gegen Verformung beim Spulenpressen ist es dementsprechend empfindlicher, in der Beständigkeit dürfte es dem Messing gleichen. Über die Verwendung von Neusilber für Kondensatoren liegen keine Erfahrungen vor.

Monel wird wegen seines hohen Nickelgehaltes in Deutschland kaum verwandt und ist nur schwer zu beschaffen; für den vorliegenden Zweck besitzt es sehr gute Eigenschaften.

Austenitischer Stahl (V2A) hat bei geringster elektrischer und Wärmeleitfähigkeit die höchste Festigkeit; er weist bei dem vorliegenden Problem mindestens die gleiche Korrosionsbeständigkeit wie die CuNi-Legierungen auf. Das Ziehen der dünnen Rohre wird jedoch Schwierigkeiten machen und weitere Aufschläge auf den schon sehr hohen Preis bringen. V2A ist gegen den gelösten Sauerstoff ebenso beständig wie Aluminium. Die Rohre müssen spannungsfrei gegläht werden, um Lötbrüchigkeit zu vermeiden.

Die Kupferlegierungen bilden die Korrosionsschutzschicht nicht so schnell wie Al und V2A. Deshalb wird in den ersten Wochen

etwas Metall in Lösung gehen. Dieser Angriff geht jedoch bald zurück auf ca. 0,34 bis 0,15 g/m²-Tag; das entspricht einer Eindringtiefe von 0,014 bis 0,006 mm je Jahr. Cu kann durch Eintauchen in Chromsäure K₂CrO₄ oder K₂Cr₂O₇ passiviert werden. Es wäre durch Versuche festzustellen, ob das auch bei den Cu-Legierungen möglich ist. Allgemein sollten die Vorschriften für Kondensatorrohre aus Cu-Legierungen DIN 1785 bei der Abnahme zugrunde gelegt werden.

Schutzschichten

Die Verwendung der angeführten Cu-Legierungen für Kühlröhrchen und Wärmeaustauscher müßte ausreichenden Korrosionsschutz bieten. Um eine doppelte Sicherheit zu erreichen, können die Rohre sowohl in den Magnetspulen als auch im Wärmeaustauscher mit einer Kunstharzeinbrennlackierung versehen werden.

Die Kunstharzschicht (Silikon) ist sehr hart, gut haftend und chemisch beständig; temperaturverträglich bis maximal 200° C. Die Herstellerfirma sichert die Ausführung der geringsten zulässigen Schichtstärke von 20 µ ± 20 % zu. Dabei vermindert sich die Wärmedurchgangszahl der Wärmeaustauschfläche um 10 - 15 %. Durch die Schutzschicht wird nicht nur ein vollständiger Schutz gegen Korrosion und Elektrolyse, sondern auch ein Schutz gegen Ankrustierungen gewonnen, da die Oberfläche sehr hart und glatt ist. Die Schicht wirkt elektrisch isolierend, ihre Durchschlagfestigkeit müßte erprobt werden. Zur Vermeidung von elektrischen Durchschlägen zwischen Rohrwand und Wasser, muß das Potential des Rohres an einer geeigneten Stelle dem Wasser zugeführt werden (Anfang und Ende des Rohres).

Elektroden von Elektrofiltern werden mit einer durch Einbau von Gasrußpartikeln leitend gemachten Schicht geschützt. Es bleibt zu prüfen, ob sich diese Maßnahme ohne Verminderung des Korro-

sionsschutzes und ohne Verstärkung der Schicht durchführen läßt. Vor allem für die Einführung des Spulenpotentials ins Wasser dürfte diese Schicht vorteilhaft zu verwenden sein.

Kunststoffrohre

Die metallischen Teile des Magnetkühlkreislaufes sollen - wie bereits erwähnt - durch möglichst lange Isolierrohrstrecken voneinander getrennt werden, um einem elektrolytischen Angriff in den Spulenröhrchen zu begegnen. Hierfür sind Rohre aus folgenden Materialien sehr gut geeignet:

PVC sprödebrüchig unter -4°C

Hart-Polyäthylen sprödebrüchig unter -30°C

Weich-Polyäthylen sprödebrüchig unter -30°C

PVC wird vor allem für drucklose Leitungen verwandt. Polyäthylen ist teurer, aber für den vorliegenden Zweck besser geeignet. Weich-Polyäthylen erfordert geringere Rohrschellenabstände als Hart Poly.

Für die Kühlwassersammelleitungen eignet sich vor allem Hart-Poly. Rohrverbindungen durch Heizspiegelschweißung. Größere Längen können durch Spezialmuffen verbunden werden, die keine Bearbeitung der Rohrenden erfordern. Abzweigungen werden mit geklebten Fittings oder durch Schweißung hergestellt.

Für die Anschlüsse an die Kühlröhrchen der Magnetspulen eignet sich besonders Weich-Poly. Verarbeitung wie oben. Die geringe Wärmeleitfähigkeit der Kunststoffe (ca. $0,3\text{ kcal/mhgrd}$) erspart in den meisten Fällen eine besondere Isolation. Bei der Verlegung ist die große Wärmedehnung von $0,15\text{ mm je Meter und Grad}$ zu beachten. Die Teile des Rohrsystems, in denen das Wasser keine

Spannung führen soll, müssen mit geerdeten Elektroden abgegrenzt werden.

Die Kühlung des Magnetkörpers erfolgt am einfachsten durch flache Kunststofftaschen, die mit Holz- oder Blechplatten an die Oberfläche des Magneten angedrückt werden.

Wasserreinigung

Wasser, das als Kühlmittel für die Magnetspulen verwandt werden soll, muß geringste Leitfähigkeit haben. Entionisiertes Wasser läßt sich im Ionenaustauscher billiger und besser herstellen als durch Destillation. Eine komplette Austauschanlage arbeitet folgendermaßen: Im Kationen-Austauscher tauscht das Permutit sein Kation gegen die Metallionen des Wassers. Das abfließende Wasser enthält Säuren. Im schwachbasigen Anionen-Austauscher werden die starken Säuren entfernt. Im Rieseler geht CO_2 durch Belüftung bis auf einen Rest von 4 - 5 mg/l heraus. Rest- CO_2 und Kieselsäure werden im starkbasigen Anionen-Austauscher entfernt. Ein Mischbettfilter, das Kationen- und Anionenaustauschersubstanzen gemischt enthält, dient als "Polizeifilter". Das Mischbettfilter hat bei dieser Schaltung eine Betriebszeit von mehreren Wochen zwischen zwei Regenerationen und liefert Wasser mit weniger als 0,1 μS .

Das Wasser ist allerdings O_2 gesättigt. Dieser Sauerstoff ist bei einwandfreier Betriebsführung der einzige Stoff im Wasser, der korrosiv wirken kann, er läßt sich durch Entgasung entfernen. Die Entgasung erfolgt am einfachsten durch Rieselung bei Siedetemperatur oder durch Vakuumentgasung bei Temperaturen bis herab zu 30°C . Der dann verbleibende Rest von 20-30 $\mu\text{g/l}$ ist unschädlich.

Der Ionenaustauscher hat zwei Aufgaben. Er soll das Deionat zur Füllung des Kreislaufs und zur Deckung der Undichtigkeitsverluste liefern, und er soll Verunreinigungen und Korrosionsprodukte, die während des Betriebs im Rohrsystem entstanden sind, entfernen. Die erste Aufgabe erfordert eine komplette Anlage, wie sie oben beschrieben wurde, die allerdings nur 5 - 10 % der Umlaufwassermenge liefern muß. Für die Dauerreinigung des Umlaufwassers genügt ein Mischbettfilter und ggf. Entgaser für 20 % der Umlaufmenge, die als Bypass zum Kühlkreislauf betrieben werden.

Die Speisung des Kreislaufs kann auch mit Deionat erfolgen, das bei den Hamburgischen Elektrizitätswerken für wenig Geld gekauft werden kann. In diesem Fall genügt ein Vorratsbehälter und ein Mischbettfilter mit Entgaser.

Bei Entgasung des Wassers muß die Sauerstoffentfernung durch ein O₂-Meßgerät kontrolliert werden. Das Rohrsystem darf dann an keiner Stelle weniger als Atmosphärendruck haben, damit nicht durch Undichtigkeiten Luft angesaugt wird. Ein Hochbehälter auf der Pumpensaugseite sorgt dafür. Die freie Wasserfläche ist durch eine Stickstoffatmosphäre zu schützen. Eine Pumpe geringerer Leistung muß in Betriebspausen das Wasser umwälzen, damit keine Korrosion durch Konzentrationsunterschiede erfolgt.

Vorschlag für die Ausführung der Magnetkühlung

- I. a) Spulenkühlröhrchen aus SoMs71, CuNi10Fe, CuNi20Fe oder Neusilber
- b) Wärmeaustauscherrohre aus dem gleichen Werkstoff, rohwasserseitig mit Kunstharzschuttschicht oder aus beliebigem Werkstoff (Ms, St) beidseitig Kunstharz.

- c) Leitungen aus Polyäthylen
- d) Entgasung des Wassers, Sauerstoffmessung

II. Spulenröhrchen und Wärmeaustauschrohre aus SoMs71, alle wasserberührten Oberflächen mit Kunstharzschuttschicht. Leitungen aus Polyäthylen. Keine Entgasung des Wassers.

Magnetmodell

Das Magnetmodell sollte zur Erprobung dieser Möglichkeiten eingerichtet sein (Korrosionsversuche). Zu diesem Zweck muß die Modellkühlung folgende Teile umfassen: Vorratsbehälter für Deionat, Mischbettfilter, Leitfähigkeitsmesser, Temperaturmeßstellen zwischen den Spulen und auf ihrer Oberfläche.

Zur Erprobung ungeschützter Rohre mit O_2 -freiem Wasser müssen Entgaser und O_2 -Meßgerät vorgesehen werden.

Preisvergleich für Kondensatorrohrwerkstoffe

Beispiel: Rohr mit 10 mm Außendurchmesser, 1 mm Wandstärke

Werkstoff	Preis f. 100 kg DM	Gewicht je lfd. m kg/m	Preis je lfd. m DM
AlMg3	916,--	0,076	0,696
SoMs71	476,--	0,246	1,17
SoMs76	489,--	0,238	1,16
Neusilber 13Ni63Cu	1091,--	0,248	2,71
CuNi20Fe	896,--	0,255	2,28
CuNi30Fe	968,--	0,254	2,46
V2A	2340,--	0,224	5,24

gez. Cornelius

Pos.	Werkstoff	Zusammensetzung	Höchstzuläss. Beimengungen	γ	κ	λ	λ'	c	Mindestwerte			DIN	Kennzeichn. Eigenschaften Übliche Verwendung
									σ_{02}	σ_B	δ_{10}		
				$\frac{g}{cm^3}$	$\frac{m}{mm^2}$	$\frac{cal}{cm s \text{ grad}}$	$\frac{kcal}{m h \text{ grad}}$	$\frac{kcal}{kg \text{ grad}}$	$\frac{kg}{mm^2}$	$\frac{kg}{mm^2}$	%	1785 allg. f. Kondensatorrohre	
1.	AlMg3F	2,0 ... 4,0 Mg 0 ... 0,4 Mn 0 ... 0,3 Cr (Rest Al)	0,05 Cu 0,5 Si 0,5 Fe + Ti 0,3 Zn	2,65	20	0,35-0,4	125-145		8 14 8-12 11-14	18 23 18-21 24-28	15 8 18-12 18-12		Gut beständig bis beständig gegen destill. und anderes Wasser bei Raum- bis Siedetemp. Kondensatorrohre für Seewasser und alkalische Lösungen
2.	AlMg5F	4,0 ... 5,5 Mg 0 ... 0,8 Mn 0 ... 0,3 Cr (Rest Al)		2,63	16-17	0,26-0,3	95-110		11 18 14	24 28 28	15 8 15		
3.	AlMg7F	5,5 ... 7,5 Mg 0 ... 0,8 Mn 0 ... 0,3 Cr (Rest Al)		2,61	15	0,25-0,35	90-125		20 14-18	34 28-32	6 18-12		
4.	Ms 72 K	70 ... 73 Cu 0,02... 0,06 P od. As Rest Zn		8,6	15	0,29		0,096	9-14 14-21	32 35	45 40	17 660 17 671	Für Dampfkondensatoren u. Kühler
5.	So Ms 71	70 ... 72,5 Cu 0,9 ... 1,3 Sn 0,02... 0,06 P od. As Rest Zn	0,5 Ni 0,1 Mn 0,07 Fe 0,07 Pb	8,5	13,5	0,26		0,094	10-15 15-22	33 36	50 43	17 661	Für Kondensatorrohre, Landanl.
6.	So Ms 76	76 ... 79 Cu 1,8 ... 2,3 Al 0,02... 0,06 P od. As Rest Zn	Ms 72 K außerdem 0,1 Sn 0,1 Al	8,33	12,5	0,24		0,095	11-16 16-24	34 38	50 40		Widerstandsfähig gegen stark aggressives Wasser (Seewasser), schlecht lötl., f. Spezialkondensatorrohre
7.	CuNi10Fe	9 ... 11 Ni 0,7 ... 1,4 Fe 0,3 ... 0,8 Mn (Rest Cu)		8,89	4,5	0,11	24						Für Kondensatoren bei sehr hohen Korrosionsbeanspruchungen, insbesondere bei hohen Temperaturen u. großen Kühlwassergeschwindigkeiten. Im Schiffsbau neben SoMs76 vorzugsweise verwendet.
8.	CuNi20Fe	20 ... 22 Ni 0,5 ... 1,5 Mn 0,4 ... 1 Fe (Rest Cu)	0,5 Zn 0,05 Sn + P 0,1 sonstige	8,96	3,8	0,08	15	0,11				17 664	
9.	CuNi30Fe	30 ... 32 Ni 0,5 ... 1,5 Mn (Rest Cu) 0,4 ... 1 Fe		8,93	2,7	0,07	10						
10.	Neusilber z.B. Ns6512	26 ... 8 Ni 50 ... 65 Cu Rest Zn	Pb Mn Fe	8,7	4,3	0,11		0,094		43	28	17 663	Geringe elektr.- u. Wärmeleitfähigkeit. Für Schantische, EE-bestecke, el. Widerst., Schalterfedern, Steckerstifte
11.	Monel	70 ... 63 Ni 30 ... 37 Cu Max. 2,5 Fe	Mn Al Si		1,6	0,06							Beständig gegen Seewasser, Salze, Säuren, Alkalien, Schiffbau, chem. Apparatebau
12.	V2A	18 Cr 8 Ni 0,1 C Rest Fe		7,88	1,2-1,4	0,045 0,035		0,145 0,114	80 25	120-145 60	40		