Zeitschrift: Pionier : Zeitschrift für die Übermittlungstruppen

Herausgeber: Eidg. Verband der Übermittlungstruppen; Vereinigung Schweiz. Feld-Telegraphen-Offiziere und -Unteroffiziere

Band: 44 (1971)

Heft: 5

Artikel: Die Siedekühlung von Nachrichtensendern

Autor: Hübner, Roland

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-560879

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: 21.07.2025

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

Die Siedekühlung von Nachrichtensendern

Allgemeines

Um in Nachrichtensendern und grösseren Industrie-Hochfrequenzgeneratoren die notwendigen hohen Leistungen aufzubringen, sind Senderöhren besonders hoher Leistungsfähigkeit erforderlich. Die Spitzenleistungen von Sendern liegen heute bei 1000 kW, diejenigen von Generatoren bei einigen 100 kW.

Eine Senderöhre ist im Grunde ein Umformer. Man führt ihr Gleichstromleistung zu und entnimmt ihr hochfrequente Wechselstromleistung. Da die Röhre aber kein Perpetuum mobile ist, entstehen, wie bei allen Umwandlungsprozessen in der Technik und in der Natur, Verluste in Form von Wärme.

Mathematisch lässt sich diese Beziehung zwischen Eingangsleistung (P_{ia}) und Ausgangsleistung (P_o) sehr einfach beweisen:

$$P_0 = \eta \cdot P_{ia}, \quad P_{ia} = P_0 + P_a$$

Dabei ist η der Wirkungsgrad, der je nach Stromflusswinkel zwischen 70 und etwa 83 % liegt. P_a stellt den an der Anode umgesetzten Teil der Leistung dar, der in Form von Wärme anfällt und mit «Anodenverlustleistung» bezeichnet wird.

Aus obigen Beziehungen geht hervor, dass für einen mittleren Wirkungsgrad der Röhre von zum Beispiel $\eta = 0{,}75$:

$$P_a = \frac{P_0\,(1 - \eta)}{\eta} = {}^1/_3\, P_0$$

erreichen kann.

Diese Wärme ist eine unerwünschte Begleiterscheinung, die bei der Umwandlung von Gleich- in Wechselstrom eben in Kauf genommen werden muss. Sie würde die Anode der Röhre auf mehrere hundert Grad erhitzen und innert weniger Minuten zerstören, wenn man nicht für eine rasche Abfuhr dieser Wärme mit Hilfe von Kühlmitteln sorgen würde. Als Kühlmittel kommen bei grösseren Röhren, die durchwegs als «Aussenanodenröhren»[1] ausgeführt werden (siehe auch Fig. 4), Luft, Wasser oder neuerdings Dampf in Betracht.

Welche Kühlungsart am zweckmässigsten ist, hängt von den örtlichen Gegebenheiten, von der Leistung der Anlage und ihrem Verwendungszweck ab. Ein oft ins Gewicht fallender Nachteil der Luftkühlung ist die Notwendigkeit eines Gebläsemotors, der lärmerzeugend wirkt, und eines Luftfilters, das öfterer Reinigung bedarf.

Bei der Wasserkühlung sind es das energieverbrauchende und lärmerzeugende Pumpenaggregat mit den notwendigen Sicherheitselementen, welche darüber zu wachen haben, dass die Röhre keine Minute ohne die vorgeschriebene Kühlwassermenge bleibt. Oft fällt auch die relativ grosse

[1] Normalerweise werden Röhren bis zu 2 kW P_a mit Innenanode und Glaskolben ausgeführt. Erst Röhren über etwa P_a = 2 kW sind Aussenanodenröhren.

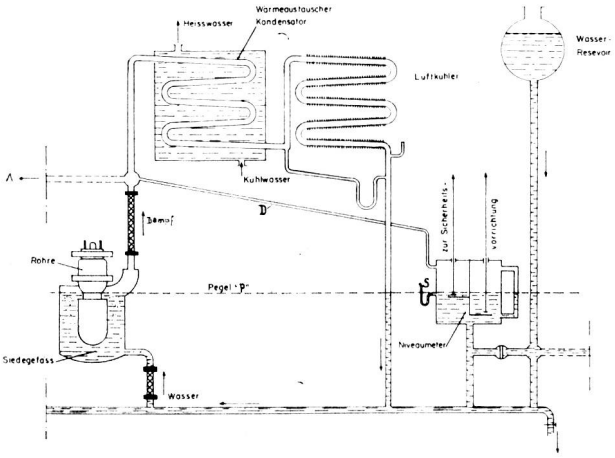

Fig. 1 Prinzipschema einer konventionellen Siedekühlanlage (hier nur für eine Röhre ausgeführt, es können aber ohne weiteres mehrere Röhren an «A» angeschlossen werden).

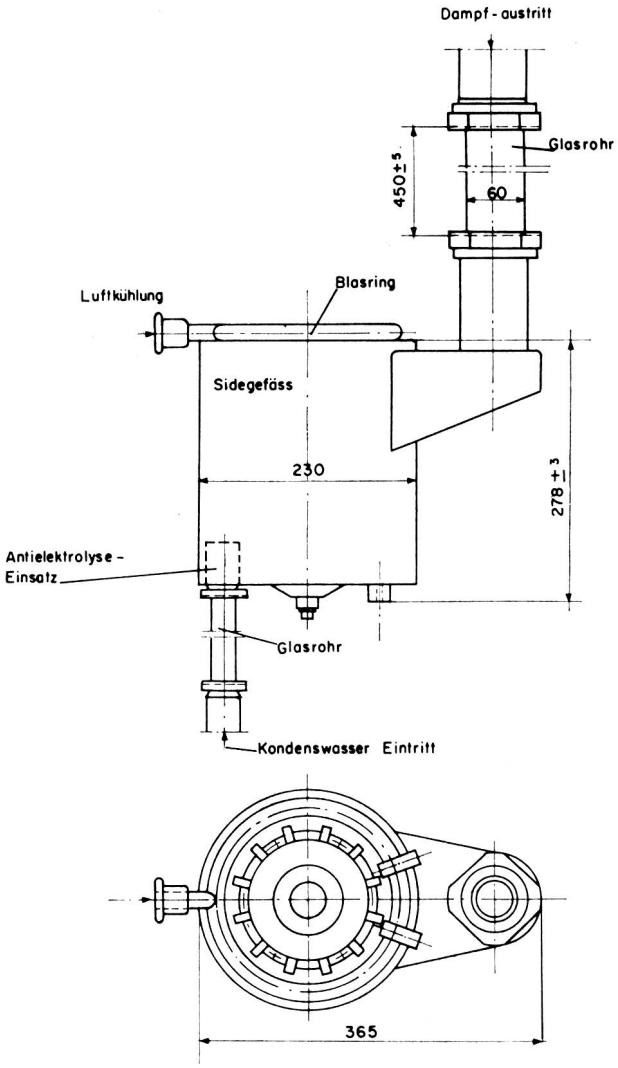

Fig. 2 Siedegefäss, wie es beispielsweise zur Aufnahme einer siedegekühlten Röhre von 10 kW Verlustleistung dient.

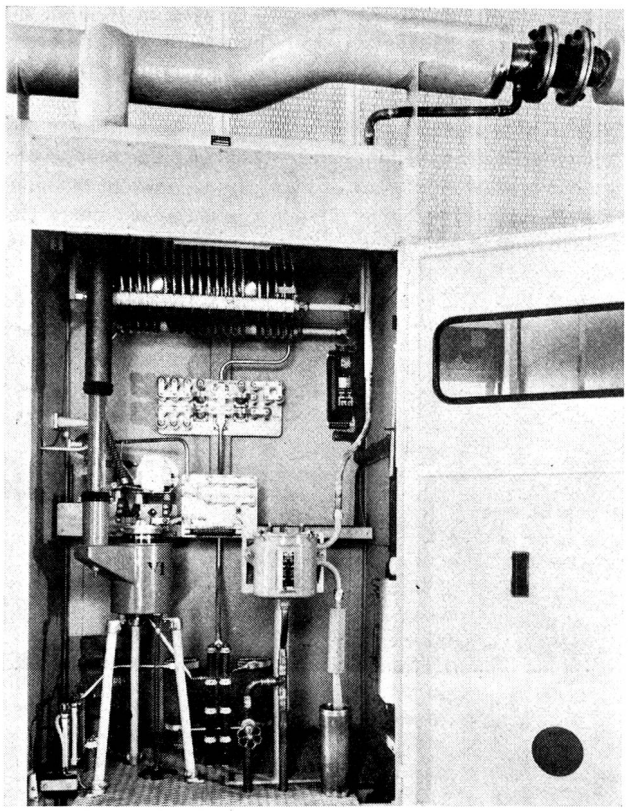

Fig. 3 Siedegekühlte Röhre (BTS 6-3) in ihr Siedegefäss eingesetzt, Dampfabzug nach oben, unmittelbar daneben das Pegelkontrollgefäss mit Überlaufschutz und Leitungen zur Signalalarmanlage. Es handelt sich um die Vorstufe im Hochfrequenzteil eines Brown-Boveri-120-kW-Mittelwellensenders.

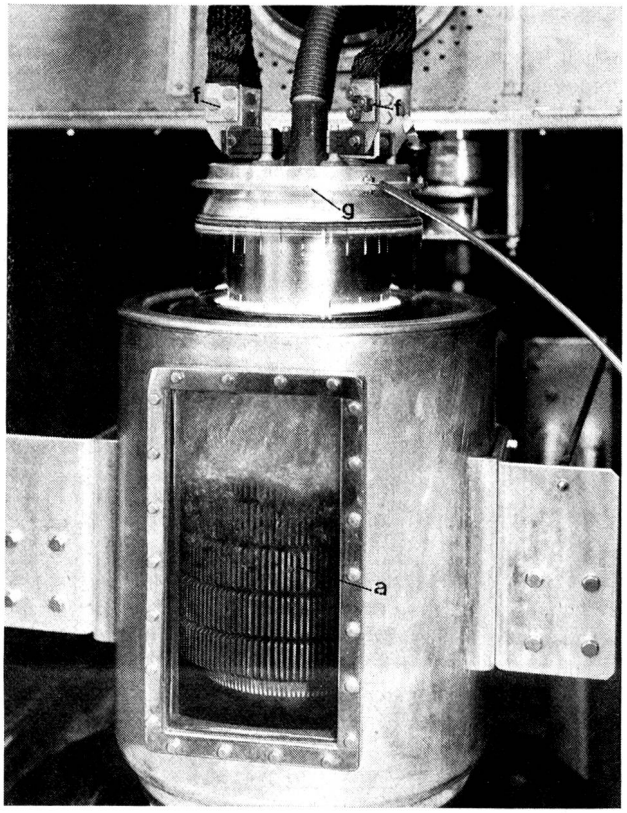

Fig. 4 Siedegekühlte Großsendetriode BTS 150-2 (Brown Boveri) für max. 220 kW Anodenverlustleistung, 18 kV Anodenspannung und max. 614 kW Ausgangsleistung (Kl. C unmod.). Im Prüffeld ist ein mit Schauglas zur Beobachtung dienendes Siedegefäss eingesetzt. Deutlich sind die «Anodenrippen (a)» und die intensive Dampfblasenbildung im oberen Teil zu erkennen. g = Gitter, f = Heizanschlüsse (Photo Brown Boveri).

notwendige Kühlmittelmenge in Betracht (siehe auch Fig. 9). Eine Kühlungsart, welche diese Nachteile vermeidet, ist die Siedekühlung.

Das Prinzip der Siedekühlung

Die Siedekühlung stellt gegenwärtig das modernste Kühlsystem dar. Unter «Siedekühlung» (auch Verdampfungskühlung oder Vapotronkühlung genannt) versteht man eine Kühlungsmethode, bei der als Kühlmittel Wasser verwendet wird, das durch die heisse Röhrenanode selbst zum Verdampfen gebracht wird. Es erscheint dem Laien paradox, dass man mit Dampf «kühlen» kann. Betrachtet man aber die physikalischen Beziehungen, so findet man leicht die Erklärung dieses Verhaltens. Der Siedekühlung liegt die Tatsache zugrunde, dass zur Umwandlung von 1 Liter Wasser von 100 °C in Dampf gleicher Temperatur der Röhren-Kupferanode eine Wärmemenge von 539 000 Kalorien entzogen werden. Pro kWh elektrischer Energie werden demnach 1,6 Liter Wasser verdampft. 37,5 kW elektrischer Leistung sind aufzuwenden, um 1 kg Wasser von 100 °C pro Minute in Dampf umzuwandeln.

Durch den Entzug dieser Wärmemenge erfährt die Anode der Röhre eine sehr wirksame und sichere Kühlung, da ja die mit siedendem Wasser bedeckte Anode nie über 100 °C erwärmt werden kann[1].

Die der Anode entzogene Wärme wird mit dem entstehenden Dampf fortgeleitet und kann in Wärmeaustauschern zum Grossteil wieder zurückgewonnen werden. Da als Kühlmittel destilliertes Wasser verwendet wird, lässt sich ein geschlossener Kreislauf bilden.

Die Vorteile der Siedekühlung

1. Höhere zulässige Anodenverlustleistung (P_a) als bei anderen Kühlungsarten, wie aus der als Beispiel angeführten Brown-Boveri-Hochleistungsröhre sehr deutlich hervorgeht:

[1] Am kritischsten sind die Temperaturen der Glas-Metall-Verschmelzungen, welche ihren zulässigen Maximalwert von beispielsweise 150 °C keinesfalls überschreiten dürfen. Sie werden daher meist mit einem «Kühlluftstrom» angeblasen.

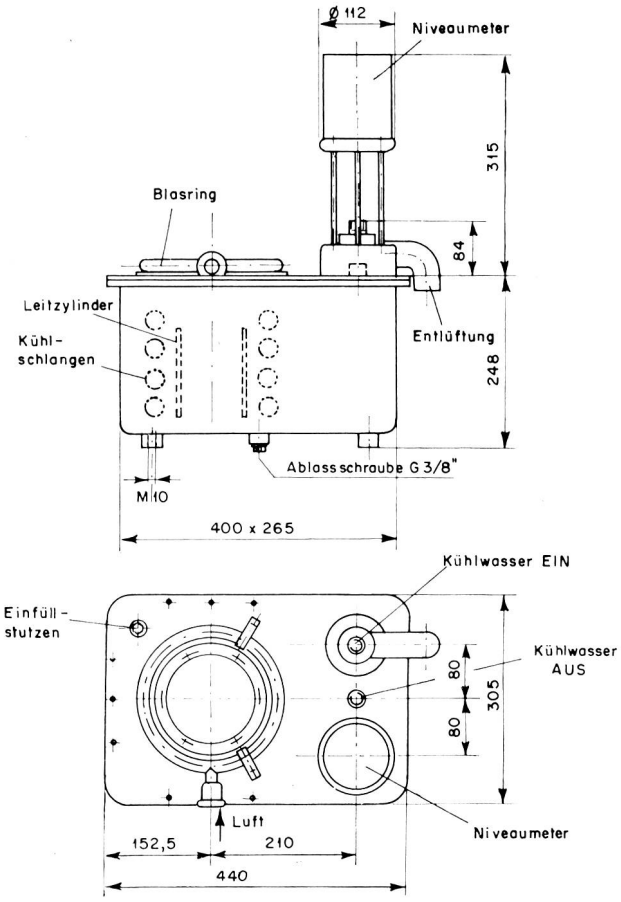

Fig. 5 Vereinfachtes Siedekühlsystem.

BTL 50-3	für Luftkühlung	$P_a = 45$ kW
BTW 50-3	für Wasserkühlung	$P_a = 65$ kW
BTS 50-3	für Siedekühlung	$P_a = 80$ kW

2. Der Gesamtvorrat an destilliertem Wasser ist bei der Siedekühlung relativ klein. Die Verluste an Wasser sind praktisch belanglos. Sie betragen meist weniger als 1 Liter pro Woche.

3. Nutzbringende Verwendung der von der Röhre abgeführten Wärmeenergie. Die bei der Kondensation des Dampfes anfallende Wärme kann, wegen der hohen Temperaturdifferenz, mit verhältnismässig gutem Wirkungsgrad, zum Beispiel für Gebäudeheizung, rückgewonnen werden. Bei einer abzuführenden Verlustleistung von beispielsweise 70 kW können, bei entsprechender Installation, stündlich etwa 1000 Liter Wasser mit einer Temperaturerhöhung von 60 °C anfallen.

4. Der Wasserkreislauf ist automatisch, es werden keine dem Verschleiss unterliegenden Umlaufpumpen benötigt. Die Anlage arbeitet weitgehend geräuschlos. Durch den Wegfall von Pumpenantriebsaggregaten spart man ausserdem an Antriebsleistung und verbessert damit den Gesamtwirkungsgrad der Anlage.

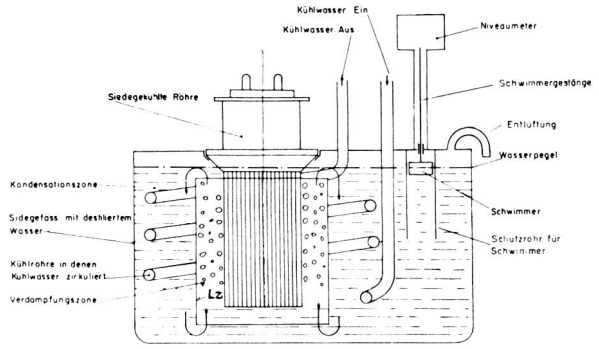

Fig. 6 Prinzipdarstellung des vereinfachten Siedekühlsystems.

5. Während bei Luft- und Wasserkühlung die Kühlmittelmenge stets auf den maximal möglichen Anodenbelastungsfall ausgelegt sein muss, passt sich bei Siedekühlung die Verdampfung und damit die Wärmeabfuhr selbsttätig und elastisch der jeweiligen Anodenverlustleistung an.

6. Da als primäres Kühlmittel destilliertes Wasser verwendet wird, werden die Ablagerungen und chemischen Einflüsse in der Anlage auf ein Minimum beschränkt.

7. Das System arbeitet unter Atmosphärendruck; die Kühlwirkung ist von Luftdruck und Umgebungstemperatur unabhängig.

8. Die Röhren können ohne Unterbrechung des Kühlsystems ausgewechselt werden.

Aufbau und Funktion einer Siedekühlanlage

Der prinzipielle Aufbau geht aus Figur 1 hervor. Die Röhre befindet sich, mit der Anode nach unten, in einem mit Wasser gefüllten Gefäss (siehe auch Fig. 2); sie wird lediglich durch ihr Eigengewicht gehalten. An das Siedegefäss ist in der Regel der Anodenschwingkreis angeschlossen, daher muss es mittels Stützisolatoren von Erde isoliert werden (siehe Fig. 3). Das durch die Anodenverlustleistungswärme erzeugte Wasser-Dampf-Gemisch wird zunächst in einem im Siedegefäss vorgesehenen Abscheider getrennt; das Wasser kehrt ins Gefäss zurück, während der Dampf über die Dampfleitung (ein isolierendes Hartglasrohr) abgeführt wird. Dampf selbst stellt ja auch einen guten Isolator dar. Der Dampf zieht nach oben ab und gelangt in den Wärmeaustauscher. In diesem wird dem Dampf die Wärmeenergie durch den Sekundär-Kühlwasserkreislauf entzogen, der Dampf kondensiert, und das Leitungskühlwasser wird (je nach Menge) auf ca. 80–90 °C erwärmt. Diese hohe Wassertemperatur ermöglicht eine ökonomische Ausnutzung des Heisswassers, zum Besipiel zur Heizung des Sendergebäudes, naheliegender Wohnblöcke usw.

Schon eine Verlustleistung von 70 kW liefert pro Stunde 1000 Liter Wasser, mit einer Temperaturerhöhung des Kühlwassers um etwa 60 °C. Wenn man bedenkt, dass ein moderner

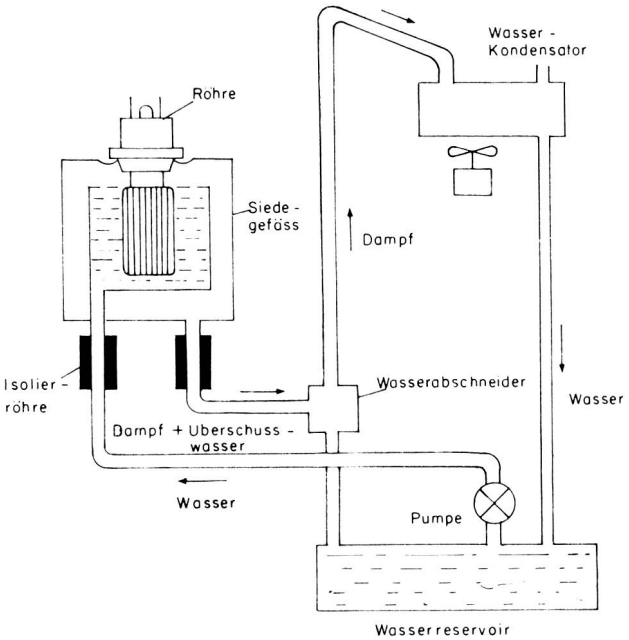

Fig. 7 Variante einer Siedekühlanlage, mit Wassereintritt und Dampfaustritt auf der unteren Seite des Gefässes (nach AEG-Telefunken).

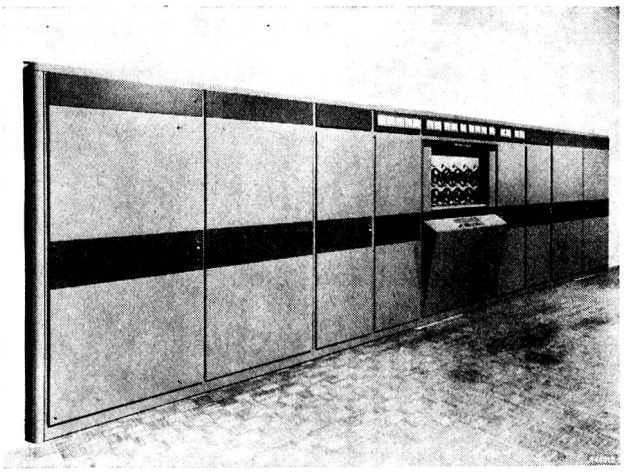

Fig. 8 Frontansicht eines Brown-Boveri-Mittelwellensenders für 1000 kW, bestückt mit siedegekühlten Hochleistungssenderöhren BTS 150-2.

Großsender von 1000 kW HF-Leistung etwa 300 kW Verlustleistung erzeugt, so kann man ermessen, welche Mengen Heisswasser hier verfügbar werden.
Der als Wasserkondensator (Wasserrückkühler) ausgeführte Wärmeaustauscher wird so bemessen, dass die bei der maximal auftretenden Anodenverlustleistung und Heizleistung aller Röhren einer Stufe erzeugte Dampfmenge zu 100 % kondensiert wird, wobei man aus Sicherheitsgründen um 50 % überdimensioniert.
Oft scheint es zweckmässig, dem Wasserkondensator noch einen Luftkondensator (Luftkühler) nachzuschalten. Hier wird die Wärme des Dampfes über Kühlrippen durch natürliche Konvektion an die Umgebungsluft abgegeben. Der Luftkondensator bietet die Möglichkeit, in Zeiten, in denen kein Heisswasser benötigt wird, die Rückkühlung des Dampfes zu übernehmen. Allerdings genügt dann meist die «natürliche» Kühlung nicht mehr, sondern die Konvektionskühlung muss durch einen Gebläsekühlluftstrom unterstützt werden.
In den Wärmeaustauschern wird der Dampf in Kondenswasser von etwa 80 °C umgewandelt. Dieses läuft in geschlossenem Kreislauf, ohne Pumpen zu benötigen, durch das blosse Gefälle in den Siedekühler zurück. Hier tritt es über ein längeres Glasrohr über einen Antielektrolyse-Einsatzstutzen ein. Dieser hat die Aufgabe, die chemische Zersetzung und damit Materialabtrag am Wassereingang des Gefässes zu verhindern. Es ist dabei empfehlenswert, nur destilliertes Wasser mit mindestens 50 kΩcm (bei 20 °C) zu verwenden, andernfalls öfters Systemreinigungen erforderlich werden.

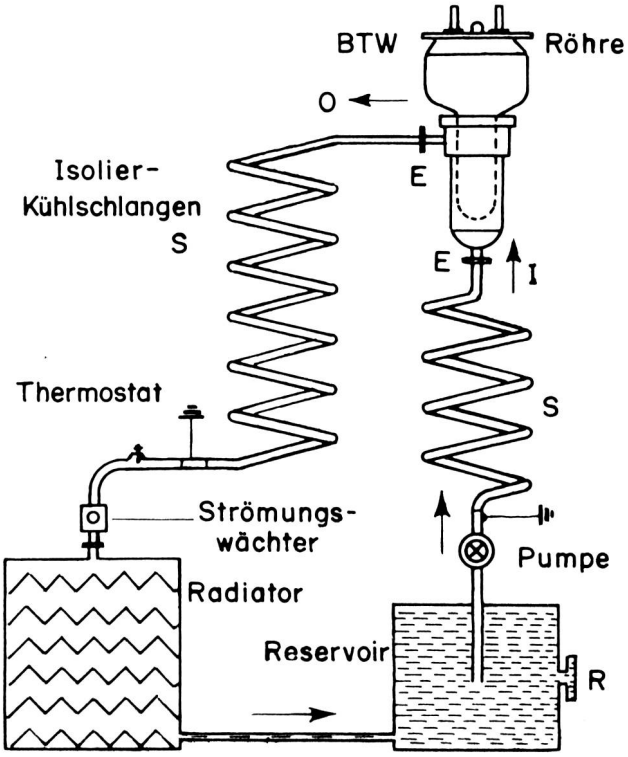

Fig. 9 Prinzipanordnung einer Wasserkühlung.
Es sind hierbei isolierte Kühlschlangen (S) für Wassereintritt (I) und Wasseraustritt (O) nötig wie auch eine Wasserumwälzpumpe, ein Luftkühler (Radiator) mit Thermostat und Strömungswächter (da die Röhre nie ohne oder mit zu wenig Wasser arbeiten darf) und ein Wasserreservoir. Auch hier empfiehlt es sich, destilliertes Wasser zu verwenden, andernfalls muss öfters gereinigt werden.

Wichtig ist die Konstanthaltung des Wasserpegels. Die Höhe des erforderlichen Wasserpegels (P) ist für jede Röhre individuell festgelegt; er darf nur innerhalb enger Grenzen schwanken. Zur Kontrolle dient das Pegelkontrollgefäss (Niveaumeter, siehe Fig. 1, 3). Das Niveaumeter ist mit Schwimmern ausgerüstet, welche mit einer Sicherheits- und Alarmvorrichtung in Verbindung stehen. Sinkt der Wasserpegel unter die erste Marke, so wird ein Alarmsignal ausgelöst, bei weiterem Sinken auf den äussersten Grenzwert wird die Anlage abgeschaltet, da sonst die Gefahr besteht, dass Teile der Röhre nicht mehr ausreichend gekühlt werden, was einen sofortigen Defekt der Röhre zur Folge haben kann.
Aber auch ein zu hoher Pegelstand ist unerwünscht, denn er kann insofern gefährlich werden, als das Abziehen des Dampfes und seine Trennung vom mitgerissenen Wasser im Siedegefäss erschwert wird. Sobald der Pegelstand den oberen Grenzwert erreicht, fliesst das überschüssige Wasser aus dem Niveaumeter durch ein Überlaufrohr mit Siphon (s) ab.
Das Pegelkontrollgefäss wird möglichst nahe beim Siedegefäss aufgestellt. Dadurch und durch eine «Druckausgleichsleitung» (D) wird ein ruhiger und elastischer Betrieb des gesamten Kühlsystems sichergestellt.

Der Aufbau siedegekühlter Röhren

Dem andersartigen Verhalten der Dampfkühlung entsprechend muss die Anode siedegekühlter Röhren eine von luft- und wassergekühlten Röhren abweichende Form erhalten. Die zylindrische Kupfermantelanode erhält einen grösseren Durchmesser und ist mit «Rippen» ausgestattet, die genügend hohe spezifische Belastungen erlauben, die Dampfblasenbildung fördern und einen guten Wärmeaustausch bewirken (Fig. 4). Gleichzeitig wird auch die Bildung einer zusammenhängenden wärmeisolierenden Dampfschicht[1] um die Anode verhindert. Durch die Auftriebswirkung der Dampfentwicklung zwischen den Rippen steigt das Wasser-Dampf-Gemisch nach oben und bewirkt eine gute Umwälzbewegung sowie eine wirkungsvolle Benetzung der gesamten Anode bis hinauf zum Flansch.

Varianten von Kühlsystemen

Ausser dem beschriebenen klassischen System werden im Sender- und Generatorbau in Sonderfällen auch noch abweichende Systeme verwendet, und zwar:

1. Das vereinfachte System (Fig. 5).
Es handelt sich hier um ein Siedegefäss, das den Wasserkondensator als Wärmeaustauscher bereits eingebaut hat. In einem Monobloc sind sämtliche für die Siedekühlung notwendigen Elemente vereinigt.
Sein Prinzip geht aus Figur 6 hervor:
Das Siedegefäss ist mit destilliertem Wasser gefüllt. Die Röhre ist mit einem Leitzylinder (Lz) umgeben, der die Verdampfungszone von der Kondensationszone trennt. Er wird von den mit Leitungswasser durchflossenen Kühlrohren umgeben, welche den Wasserkondensator darstellen. Das Niveaumeter ist, mit Schwimmer und Entlüfter ausgerüstet, bereits eingebaut. Die Röhrenanode wird also auch hier, wie beim klassischen System, durch das siedende Wasser innerhalb des Leitzylinders gekühlt.
Das System bietet Vor- und Nachteile. Es ist nur beschränkt verwendbar.

Vorteile:

Vereinfachte Installation; kleine Dimensionen; Wegfall von Dampfleitungen und separat aufzustellenden Wärmeaustauschern; geringer Kühlmittelbedarf (etwa 0,3 l/kW bei einer Kühlwassereintrittstemperatur von 15 °C).

Nachteile:

Jede Röhre benötigt ihr eigenes Niveaumeter, daher nur dort rentabel, wo nur eine einzige Röhre pro Stufe verwendet wird; Kühlschlangen liegen an Hochspannung, daher Isolationszwischenstück notwendig; hohe Verkalkungsgefahr.
Vor Verwendung dieses Systems ist es ratsam abzuklären, ob etwa das klassische Siedekühlsystem oder eine einfache Wasserkühlung die beste ökonomische Lösung bietet.

2. Siedegefäss mit Kondenswassereintritt und Dampfaustritt unten, Anode unten (Fig. 7).
Dampf und Überschusswasser ziehen hier nach unten ab.

Vorteile:

Vereinfachte Montage, da alle Leitungen nach unten führen; für Spezialfälle, wo es auf niedrige Höhe ankommt.

Nachteile:

Pumpe nötig.

3. Siedegefäss mit Kondenswassereintritt oben, Dampfaustritt unten, Anode unten. Gewisse Vorteile bei konzentrischer Bauart, aber auch hier Pumpe nötig. Wegen verschiedener Nachteile nur selten angewandt.

4. Siedegefäss mit Anode oben. Für Koaxialröhren versucht, aber noch nicht ausgeführt.

Vorteile:

Siedegefäss wird etwas kleiner, und Röhre verträgt grössere Niveauschwankungen.

Nachteile:

Schwieriger Röhrenwechsel, Anodenkreise im Sender können nicht fest mit dem Gefäss verbunden werden.

Zusammenfassung

Die Siedekühlung bietet unbestrittene Vorteile gegenüber anderen konventionellen Kühlmethoden (Wasser und Luft). Vor allem Anlagen grösserer Leistung werden heute in zunehmendem Masse mit Siedekühlung ausgeführt. Daneben hat natürlich auch die Luft- und die Wasserkühlung (Fig. 9) ihre Berechtigung und wird weiterhin, speziell in kleineren Anlagen und Generatoren kleiner und mittlerer Leistung, ausgeführt. Moderne Großsender, wie sie heute für 500 und 1000 kW gebaut werden, sind jedoch nur mit Siedkühlung ausgerüstet (Fig. 8).

Roland Hübner

[1] Es handelt sich hier um das sogenannte «Leydenfrost-Phänomen», wie wir es beispielsweise beobachten können, wenn wir einen kalten Wassertropfen auf eine heisse Herdplatte fallen lassen. Es bildet sich unter Zischen zwischen ihm und der Platte eine isolierende Luftschicht, auf der der Tropfen wie ein Gummiball hin und her hüpft. Er ist dabei kaum in der Lage, der Platte Wärme zu entziehen.