

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: 73 (1982)

Heft: 17

Artikel: Neue Wege in der Entwicklung von Hochleistungs-Rundfunksendern

Autor: Sempert, M.

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-905002>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

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. [Voir Informations légales.](#)

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. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 14.05.2025

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

Neue Wege in der Entwicklung von Hochleistungs-Rundfunksendern

M. Sempert

621.396.61;

Senkung der Betriebskosten ist heute das wichtigste Ziel der Entwicklung von leistungsstarken Kurz-, Mittel- und Langwellensendern. Die raschen Fortschritte, die auf den Gebieten der Verstärkerröhren und der Halbleitertechnik in den letzten Jahren erzielt wurden, haben neue Möglichkeiten eröffnet, Schaltungskonzepte mit hohem Wirkungsgrad und entsprechend geringen Verlusten zu verwirklichen. Der Aufbau eines modernen Senders und Neuerungen in den Hochfrequenz- und Niederfrequenz-Leistungsverstärkern werden am Beispiel eines 250-kW-Kurzwellen- und eines 300-kW-Mittelwellensenders erläutert.

La réduction des frais d'exploitation est actuellement l'objectif primordial du développement des émetteurs de grande puissance, que ce soit à ondes courtes, moyennes ou longues. Les rapides progrès réalisés dans la technique des tubes amplificateurs et des semiconducteurs offrent de nouvelles possibilités de réalisation pour des circuits à haut rendement, qui présenteront donc des pertes plus faibles. La construction d'un émetteur moderne et les innovations dans les amplificateurs de puissance en haute ou basse fréquence sont décrits en prenant comme exemple un émetteur d'ondes courtes de 250 kW et un émetteur d'ondes moyennes de 300 kW.

1. Einleitung

Die Entwicklung von Amplituden-modulierten Hochleistungs-Rundfunksendern hatte noch vor wenigen Jahren den Charakter einer wohl ständigen, aber eher langsam und in kleinen Schritten ablaufenden Weiterentwicklung bestehender Produkte. Das hat sich heute grundlegend geändert. Wir stehen mitten in einem Innovationsschub, wie er vor kurzem auf diesem Gebiet kaum für möglich gehalten wurde und wie er sich in den vergangenen Jahrzehnten in diesem Ausmass kaum ereignet haben dürfte. Der wichtigste Grund, der zu dieser Situation geführt hat, ist im weltweit wachsenden Energiebewusstsein seit der Ölkrise zu sehen. Steigende Energiekosten verlangen nach wirtschaftlicheren Produkten; die Rundfunksender-Entwickler müssen nach technischen Lösungen suchen, die dieser Marktforderung gerecht werden.

Das heute verfügbare Sortiment an Hochleistungs-Rundfunksendern umfasst Einheiten, deren Trägerleistung¹⁾ den Bereich von etwa 100 bis 1000 kW umfasst. Bei 100prozentiger Sinus-Modulation erhöhen sich die ausgestrahlten Leistungen um den Faktor 1,5; bei Modulation mit üblichen Rundfunkprogrammen im Mittel um einige Prozent.

2. Sender-Betriebskosten

Es müssen also erhebliche Leistungen aufgebracht werden. Den Hauptanteil des Betriebsaufwandes machen daher die Stromkosten aus. Senken der Stromkosten bedeutet Verminderung der im Sender anfallenden Verluste, da eine Reduktion der emittierten Senderleistung nicht zur Diskussion steht. Am Beispiel eines vor 10 Jahren entwickelten 250-kW-Kurzwellensenders sei zunächst dargelegt, in welchen Anlageteilen Verluste entstehen und wie gross sie im Programmbetrieb sind. Figur 1 zeigt das Prinzipschaltbild, im oberen Teil die Hochfrequenz-Verstärkerkette (HF), im unteren den Niederfrequenz-(NF-)Verstärker.

Der überwiegende Teil der Verluste (83%) entsteht in den Verstärkerröhren der Hochfrequenz-(HF-) und Niederfrequenz-(NF-)Stufen. Die restlichen 17% entfallen im wesentlichen auf die Hochfrequenzkreise und die Stromversorgung. Die Gesamtverluste liegen bei 195 kW, der entsprechende Gesamtwirkungsgrad, d. h. das Verhältnis von abge-

strahlter Leistung zur Netz-Eingangsleistung, beträgt 57%.

Wenn die Verluste gesenkt werden sollen, dann gibt es nur einen wirksamen Weg: Es müssen die Verluste, die in den Verstärkerröhren auftreten, vermindert werden. Röhrenverluste sind einmal die Leistungen, die zur Kathodenheizung aufgebracht werden müssen. Zum anderen handelt es sich um die Anodenverluste und die Verluste in den Steuer- und Schirmgittern. Die Anodenverluste, welche den grössten Anteil ausmachen, sind das gemittelte Produkt aus dem in der Röhre fliessenden Anodenstrom und der Anodenspannung.

3. Wirkungsgraderhöhung

3.1 Hochfrequenz-Stufen

Die Reduktion der Kathoden-Heizleistung ist nur beschränkt möglich. Hingegen kann die Anoden-Verlustleistung der HF-Verstärkerröhren durch geeignete Wahl der Röhren, der Röhren-Arbeitspunkte und der Senderkonzepte beträchtlich gesenkt werden.

Figur 2a stellt das vereinfachte Ersatzschaltbild einer Röhren-Verstärkerstufe dar; Figur 2b zeigt den zeitlichen Verlauf des Anodenstromes als Funktion der Steuergitter-

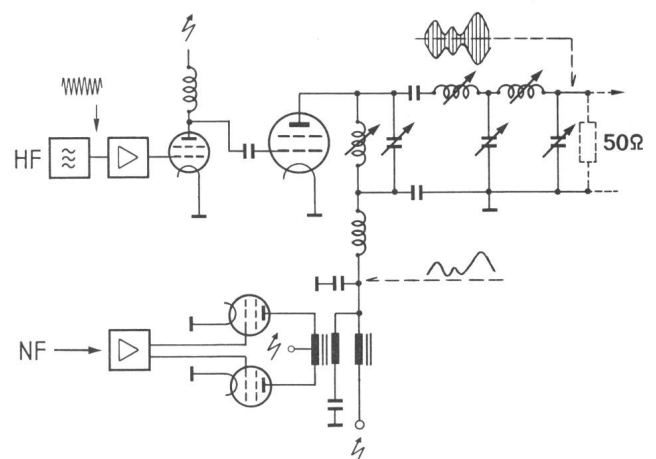


Fig. 1 250-kW-Kurzwellensender (1972); Prinzipschaltung

Verluste:			
- Anodenverluste	(HF)	104 kW	53%
- und Röhrenheizung	(NF)	58 kW	30%
- HF-Kreisverluste		13 kW	7%
- Stromversorgung, Verschiedenes		20 kW	10%
		195 kW	100%

¹⁾ Trägerleistung: unmodulierte Hochfrequenzleistung

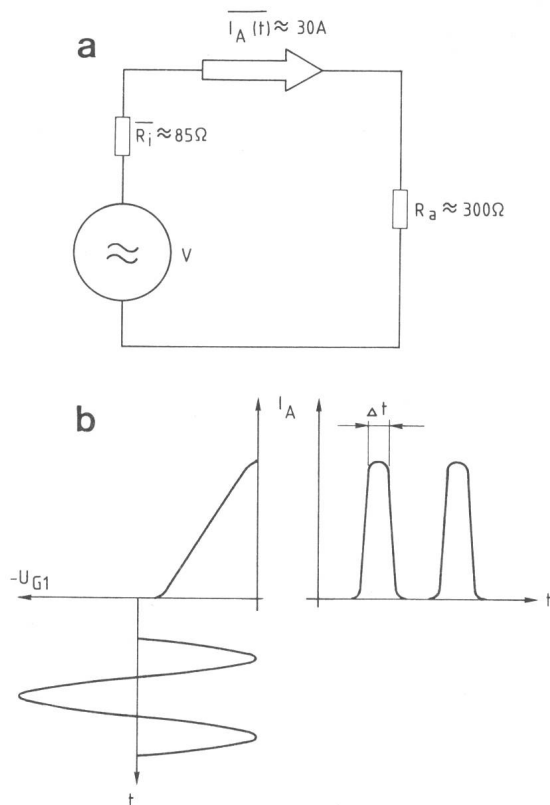


Fig. 2 Ersatzschaltbild Röhrenverstärker (a) und Anodenstrom (b) in Abhängigkeit der Steuergitterspannung

V	Verstärkerröhre
R_i	Röhren-Innenwiderstand
$I_A(t)$	Anodenstrom
R_a	Lastwiderstand
$-U_{G1}$	Steuergitterspannung
Δt	Zeitintervall der Anodenverluste im durchgeschalteten Zustand

spannung einer Kurzwellen-Endverstärkerstufe im sog. C-Betrieb. Der Hauptanteil der Anodenverluste entsteht während des Zeitintervalls (Δt), in dem der Anodenstrom etwa 50% seines Maximalwertes überschreitet. Ausserhalb Δt sind die Verluste wesentlich geringer. Es erzeugt also diejenige Röhre die geringsten Anodenverluste, die in diesem Zeitintervall den geringsten Innenwiderstand (R_i), mit anderen Worten die kleinste Restspannung aufweist.

Verluste entstehen nicht nur in der HF-Endverstärkerstufe, sondern auch in den vorgeschalteten Verstärkerstufen. Wenn es gelingt, für Sender hoher Leistung Röhren zu bauen, die mit geringer Treiberleistung voll angesteuert werden können, dann ist ein weiterer Schritt der Wirkungsgraderhöhung getan.

Die Entwicklung neuer Leistungstetroden hat in den letzten Jahren bemerkenswerte Fortschritte gebracht. Dem Senderbauer stehen heute Röhren zur Verfügung, die sowohl dem Wunsch nach tiefer Restspannung wie auch nach minimaler Treiberleistung weit besser gerecht werden als früher. Figur 3 zeigt die wassergekühlte Sende-Tetrode des Typs CQK 350-1, wie sie in den neuen Brown Boveri 250- und 300-kW-Sendern eingesetzt ist. Ihre maximal zulässige Anodenverlustleistung liegt bei 400 kW; sie erbringt die geforderten Spitzenstromwerte selbst bei den höchsten Kurzwellenfrequenzen (26 MHz) praktisch ohne Treiberleistung.

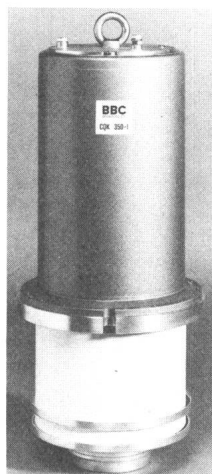


Fig. 3 Die Leistungstetrode CQK 350-1, eine siedewassergekühlte HF-Endverstärkerröhre für Kurz-, Mittel- und Langwellensender

3.2 Niederfrequenz-Verstärker

Für die NF-Endverstärkung werden heute noch meist zwei im Gegentakt geschaltete Leistungstetroden, die im B-Betrieb arbeiten, verwendet (Anoden-B-Modulation). Eine Wirkungsgraderhöhung liesse sich wie bei den HF-Stufen durch geeignete Wahl der Röhren erzielen; es gibt aber einen andern Weg, der weit mehr einbringt.

Der Anoden-B-Modulator ist ein Analogverstärker mit dem Vorteil des einfachen und übersichtlichen Prinzips und Aufbaus, aber mit dem grundsätzlichen Nachteil verhältnismässig hoher Verluste. Figur 4 zeigt einige Momentanwerte für Anodenstrom, Anodenspannung und Anodenverlustleistung, wenn beispielsweise eine Sinushalbwelle mittels einer Tetrode des Typs CQ 50-1 verstärkt wird. Die geringsten Verluste entstehen im Strommaximum und -minimum, die höchsten Werte werden in den dazwischen liegenden Zeitabschnitten durchlaufen.

Aus der Erkenntnis dieses grundsätzlichen Nachteils sind Schaltungen entwickelt worden, die nicht analog, sondern digital verstärken. Das Analogsignal wird digital derart aufbereitet, dass mit Hilfe von Schaltstufen die in einem

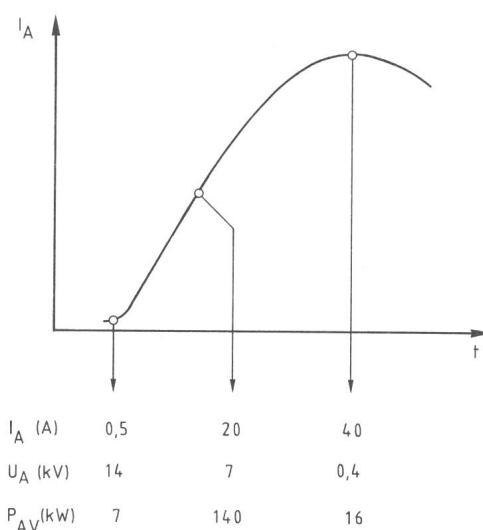


Fig. 4 Anodenstrom (I_A), Anodenspannung (U_A) und Anodenverlustleistung (P_{AV}) der Tetrode CQ 50-1

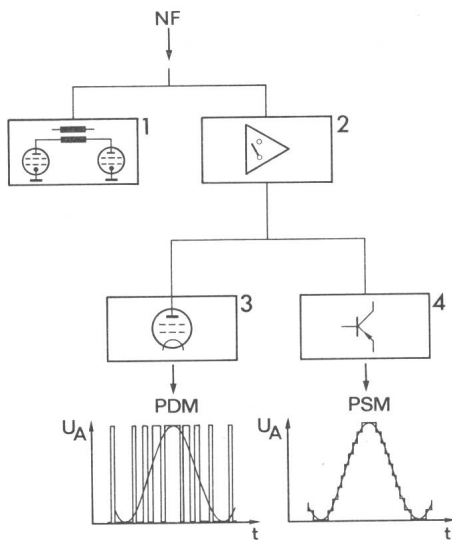


Fig. 5 Anodenmodulationsverstärker

- 1 Anoden-B-Modulator
- 2 Schaltverstärker
- 3 Pulsdauer-Modulator (PDM) mit Schalttröhre
- 4 Pulsstufen-Modulator (PSM)
- U_A Anodenspannung

bestimmten Zeitmoment erforderliche Leistung aufgebracht wird. Diese Schaltstufen arbeiten fast ausschliesslich im Sperr- oder im Durchlassbereich. Es entstehen hier die geringsten Verluste, und nur während sehr kurzer Zeit, beim Übergang vom einen zum anderen Zustand, treten die sog. Schaltverluste auf. Während ein Anoden-B-Modulator einen Wirkungsgrad von höchstens 70% erreicht, sind mit geeigneten Schaltverstärkern auch für hohe Leistungen 95% durchaus möglich.

Schaltverstärker können nach verschiedenen Prinzipien gebaut werden. Hier sei auf zwei Verfahren eingegangen, die sich für die NF-Verstärkung in Rundfunksendern besonders eignen. In Figur 5 wird zunächst der Anoden-B-Modulator (1) dem Schaltverstärker (2) gegenübergestellt, als Schaltverstärker dann der Pulsdauer-(PDM-) dem Pulsstufen-Modulator (PSM).

Der Pulsdauer-Modulator (3) erzeugt Impulse konstanter Amplitude und variabler Dauer, wobei die Pulsdauer der Amplitude des jeweiligen Analogwertes proportional ist. Als Schaltelement wird vorzugsweise eine Schalttetrode eingesetzt, die die volle, den Modulationsspitzen entsprechende Anodenspannung von nahezu 30 kV ein- und ausschaltet, mit einer Frequenz (der sog. Taktfrequenz), die meist um 50–60 kHz liegt.

Der Pulsstufen-Modulator (4) schaltet nicht die volle Anodenspannung, sondern einzelne Schaltstufen wesentlich tieferer Spannungsamplitude. Es werden so viele Stufen geschaltet und ihre Leistungen addiert, wie es entsprechend der jeweiligen NF-Amplitude erforderlich ist. Die Schaltverluste sind, da nicht die volle Spannung geschaltet werden muss, geringer als bei der PDM-Version. Als Schaltelemente eignen sich vorzugsweise Leistungs-Schalttransistoren. Das führt zu einer Modulatorlösung, die ausschliesslich mit Halbleitern arbeitet, also überhaupt keine Röhren mehr benötigt.

Das Prinzip des Brown Boveri Pulsstufen-Modulators ist in Figur 6 dargestellt. Er besteht im wesentlichen aus fünf Grundelementen: der Gleichstromquelle (1), der Schaltverstärker-Kette (2), der zugehörigen Ansteuer-Elektronik (5), dem Addierwerk (3) und dem Tiefpassfilter (4). Abhängig von der jeweiligen Modulationsspannung wird die erforderliche Zahl von insgesamt 48 Leistungsschaltstufen angesteuert. Bei einem Modulationsgrad von 100% beispielsweise sind im Modulationspeak alle Stufen eingeschaltet und im Modulationstal alle gesperrt. Das Addierwerk besteht aus Trenntransformatoren und Gleichrichterdioden. Da Transformatoren keine Gleichspannungen übertragen können, sind die Verstärker als Gegentaktstufen ausgebildet. Das Tiefpassfilter hat die Aufgabe, die vor dem Filter im NF-Signal enthaltenen Frequenzen oberhalb 7,5 kHz auszufiltern. Am Filterausgang erscheint somit das (verstärkte) Signal, wie es ins Rechenwerk der Ansteuer-Elektronik eingegeben wird.

Die beiden Varianten von Schaltverstärkern sind für die Anwendung auf kleinem Leistungsniveau seit längerer Zeit bekannt. Der Einsatz in Hochleistungs-Rundfunksendern ist erst jetzt möglich geworden, weil einerseits geeignete Schalttetroden noch nicht lange verfügbar sind und andererseits die Schaltungstechnik von Leistungstransistoren erst in den letzten Jahren den hohen Stand erreicht hat, der für diese Anwendung nötig ist.

Brown Boveri hat sich für das PSM-Verfahren entschieden, und zwar aus den folgenden beiden Gründen: Die PSM-Stufe arbeitet ohne Röhren, d. h. ohne periodisch zu ersetzende teure Komponenten. Sie ermöglicht ausserdem höhere Senderwirkungsgrade, da sowohl die Leistung für die Heizung der Pulserröhre wie auch deren Steuer- und Schirmgitterverluste entfallen.

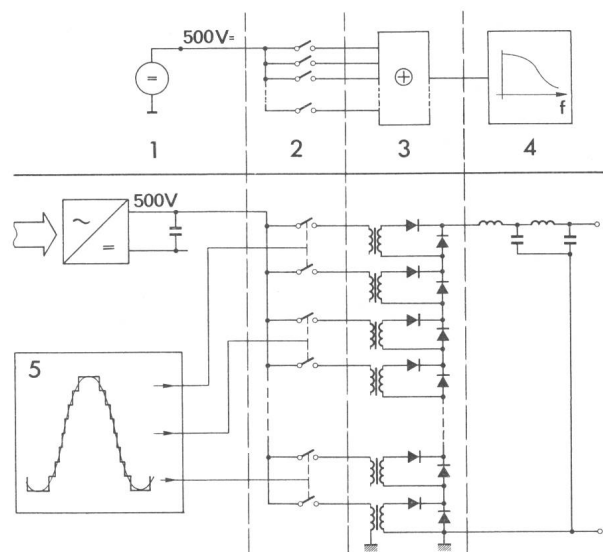


Fig. 6 Pulsstufenmodulator

- 1 Gleichstromquelle
- 2 Schaltverstärkerkette
- 3 Addierwerk
- 4 Tiefpassfilter
- 5 Ansteuer-Elektronik

4. Ausführungsbeispiele

4.1 250-kW-Kurzwellensender

Die dargelegten Möglichkeiten der Wirkungsgraderhöhung in den HF- und NF-Stufen waren wegleitend für die Entwicklung eines neuen 250-kW-Kurzwellensenders. In enger Zusammenarbeit mit den Röhren-Spezialisten und den Fachleuten der Leistungselektronik wurde ein Produkt geschaffen, das im Vergleich mit früher gebauten Sendern markante Vorzüge aufweist. Hauptmerkmale sind der auf >72% erhöhte Gesamtwirkungsgrad und die ausschliesslich mit Halbleitern bestückte Modulatorstufe. Der Sender enthält an Stelle von früher vier lediglich die beiden in Figur 7 sichtbaren HF-Verstärkerröhren. Die Verlustleistungen und der Wirkungsgrad des neuen 250-kW-Senders sind in Tabelle I den entsprechenden Werten des gut 10 Jahre früher entwickelten Modells gegenübergestellt.

4.2 300-kW-Mittelwellensender

Das 300-kW-Mittelwellenmodell (MW) wurde nach den gleichen Grundsätzen wie der 250-kW-Kurzwellensender entwickelt. Die PSM-Verstärker beider Sender sind identisch; die HF-Kette zeichnet sich gegenüber früheren MW-Modellen durch die beiden folgenden Neuerungen aus: Anstelle der röhrenbestückten Treiberstufe wird ein transistorsierter Breitbandverstärker eingesetzt. Der Sender arbeitet also mit einer einzigen Verstärkerröhre. Die (modulierte) HF-Leistung wird über ein Bandfilter ausgekoppelt. Diese früher gern angewandte Technik ist somit «zu neuen Ehren» gekommen; sie hat wesentlich dazu beigetragen, die Sender-Ausgangskreise elegant und kostengünstig gestalten zu können (Fig. 8).

5. Ausblick

5.1 Sender höherer Leistungsklassen

500-kW-Kurz- und Mittelwellensender, die mit einem Röhren-bestückten Pulsdauer-Modulator ausgerüstet sind, existieren bereits. Röhrenlose PSM-Versionen sind in Entwicklung, und es ist damit zu rechnen, dass die für 250/300-

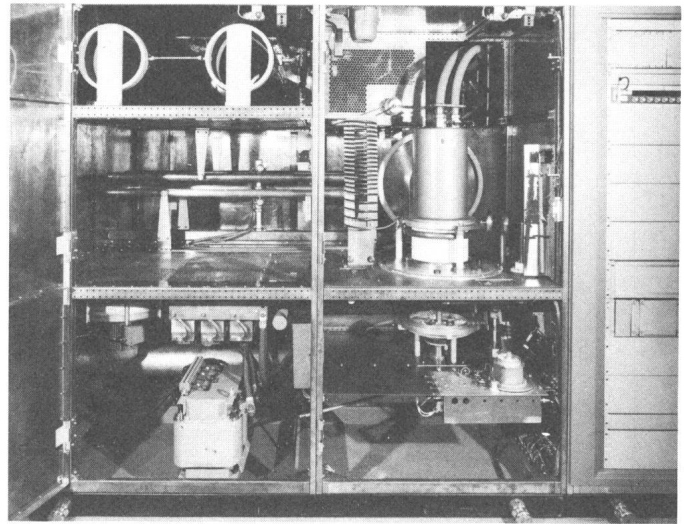


Fig. 7 HF-Verstärkerteil und Ausgangskreise des BBC-250-kW-Kurzwellensenders

kW-Sender erkannten Vorzüge in absehbarer Zeit voll in der nächsthöheren Leistungsklasse wirksam werden.

Ob und wann die heute leistungsstärksten Sende-Einheiten, 1000-kW-Mittel- und Langwellensender, ohne Modulatorröhren auskommen werden, ist zurzeit schwierig zu beurteilen. Es ist durchaus möglich, dass für diese höchste Leistungsklasse der röhrenbestückte Anoden-B-Modulator oder vielleicht der noch zu entwickelnde PDM-Verstärker über längere Jahre ihren Platz behalten werden.

5.2 Einseitenband-Modulation (ESB) und NF-Amplituden-gesteuerte Trägerleistung

Eine wesentliche Senkung der Sender-Stromkosten könnte erzielt werden, wenn an Stelle der heute meist praktizierten Zweiseitenband-Modulation auf ESB-Betrieb umgestellt würde. Die beiden vorgestellten Modelle der neuen Sendergeneration können ohne Schwierigkeiten für Betrieb mit Zwei- oder Einseitenband-Modulation (mit unterdrücktem Träger) entwickelt werden.

250-kW-Kurzwellen-(KW-)Sender (1972/1982):
Verlustleistung, Wirkungsgrad und Stromkosten
für Programmbetrieb

Tabelle I

		250-kW-KW (1972)	250-kW-KW-PSM (1982)
Anoden-Verlustleistung	HF	104 kW	55 kW
(inkl. Röhrenheizung)	NF	58	20
HF-Kreis-Verluste		13	11
Stromversorgung, Verschiedenes		20	10
Total		195 kW	96 kW
$\eta_{\text{total}}(\text{rf} = 25\%)$		57%	>72%
Stromkosten pro Jahr (7200 h/a; 0,10 Fr./kWh)		sFr. 325 000.-	sFr. 255 000.-

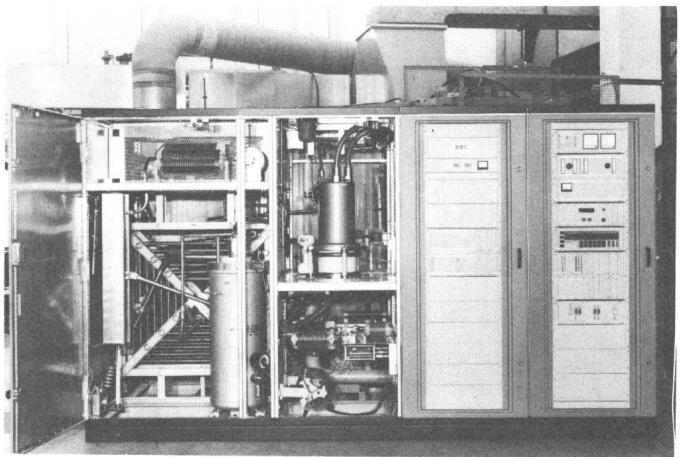


Fig. 8 300-kW-Mittelwellensender

Links die HF-Stufen und die quadratischen Spulen des Bandfilters, rechts die Sendersteuerung

Die neuen Sender sind ausserdem dafür eingerichtet, die Trägerleistung entsprechend der sog. Hüllkurve des jeweiligen NF-Signals zu steuern. Bei diesem Verfahren wird nur dann mit voller Trägerleistung gesendet, wenn zu 100% moduliert wird, bei tieferen Modulationsgraden wird das Trägersignal abgesenkt. Versuche mit einem 250-kW-Sender haben gezeigt, dass eine maximale Trägersabsenkung um 3 dB vom Hörer kaum wahrgenommen wird, die entsprechende Einsparung an Stromkosten aber 40% erreicht.

6. Schlussbemerkung

Die Technik der Hochleistungs-Rundfunksender ist in rascher Entwicklung begriffen. Typen der achtziger Jahre unterscheiden sich von Einheiten, die nur zehn Jahre früher geliefert wurden, erheblich. Sie unterscheiden sich hinsichtlich der verwendeten Schlüsselkomponenten, der Schaltungskonzepte und natürlich der Gesamtwirkungsgrade.

In einer Hinsicht besteht kein Unterschied. Jede Sendergeneration hat die strengen Vorschriften der internationalen Normung (UIT) zu erfüllen, auch die neue Familie der BBC-Sender. Das betrifft im wesentlichen die Anforderungen betreffend NF-Qualität und Oberwellengehalt des ausgestrahlten Signals.

Der Markt verlangt nach wie vor Amplituden-modulierte Kurz-, Mittel- und Langwellensender aller Leistungsklassen. Mit der in Gang gekommenen Innovationsrunde ist Gewähr geboten, dass in modernen Sendezentren Einheiten installiert werden können, die ihre Vorgänger an Wirtschaftlichkeit weit übertreffen.

Adresse des Autors

Dr. sc. nat. *M. Sempert*, BBC Aktiengesellschaft Brown Boveri & Cie, TB-EK, 5401 Baden.