

Über den Stand der Nachrichten-Meßgerätetechnik

VON FELIX BÖTTCHER UND ALBERT HAAG

In einer nunmehr hundertjährigen Entwicklungsspanne hat sich die Nachrichten-Meßgerätetechnik stets dem jeweiligen Stand der Nachrichten-Übertragungstechnik anzupassen vermocht. Sie gab dabei der Übertragungstechnik durch neue, wegweisende Meßverfahren wertvolle Anregungen und sicherte deren Leistungsfähigkeit auch im Betrieb.

Die beharrliche Anwendung des Satzes »Messen ist Wissen« brachte dem Begründer des Hauses Siemens bereits beim Bau der ersten Weitverkehrslinien wesentliche Erfolge: Nicht nur, daß das Messen die Lösung schwieriger technischer Aufgaben ermöglichte, in einer Vielzahl von Fällen konnten damit auch wirtschaftliche Fehlschläge vermieden werden. Der Entwurf der ersten Meßschaltungen und Meßeinrichtungen für die Übertragungstechnik durch WERNER SIEMENS, die wesentliche Verbesserung der damaligen Galvanometer durch JOHANN HALSKE, die elektrische Betriebsüberwachung der Weitverkehrslinien an Stelle ständigen Streifenganges der Betriebsleute, die Frankesche Maschine, die Einführung der Verstärkerröhre, des Gleichrichters und der Braunschen Röhre in die Nachrichten-Meßtechnik sind Meilensteine dieses Entwicklungsweges. Der heutige Stand einer im ständigen Wechselspiel mit der Übertragungstechnik sinnvoll gewachsenen Nachrichten-Meßgerätetechnik soll im folgenden umrissen werden.¹⁾

Einen Überblick über Aufgaben und Lösungen gibt die Bildtafel auf S. 568. Sie läßt z. B. erkennen, daß heute die Nachrichten-Meßgeräte ein Frequenzband von wenigen Hertz bis zu 12 GHz* ($1 : 10^{10}$) und mehr umspannen müssen, weil wegen des ständig steil anwachsenden Bedarfes an Übertragungskanälen für Fernsprechen und Fernschreiben, für Rundfunk und Fernsehen die volle Belegung dieses Bandes für die Übertragungstechnik bereits ein Nahziel ist. Der Um-

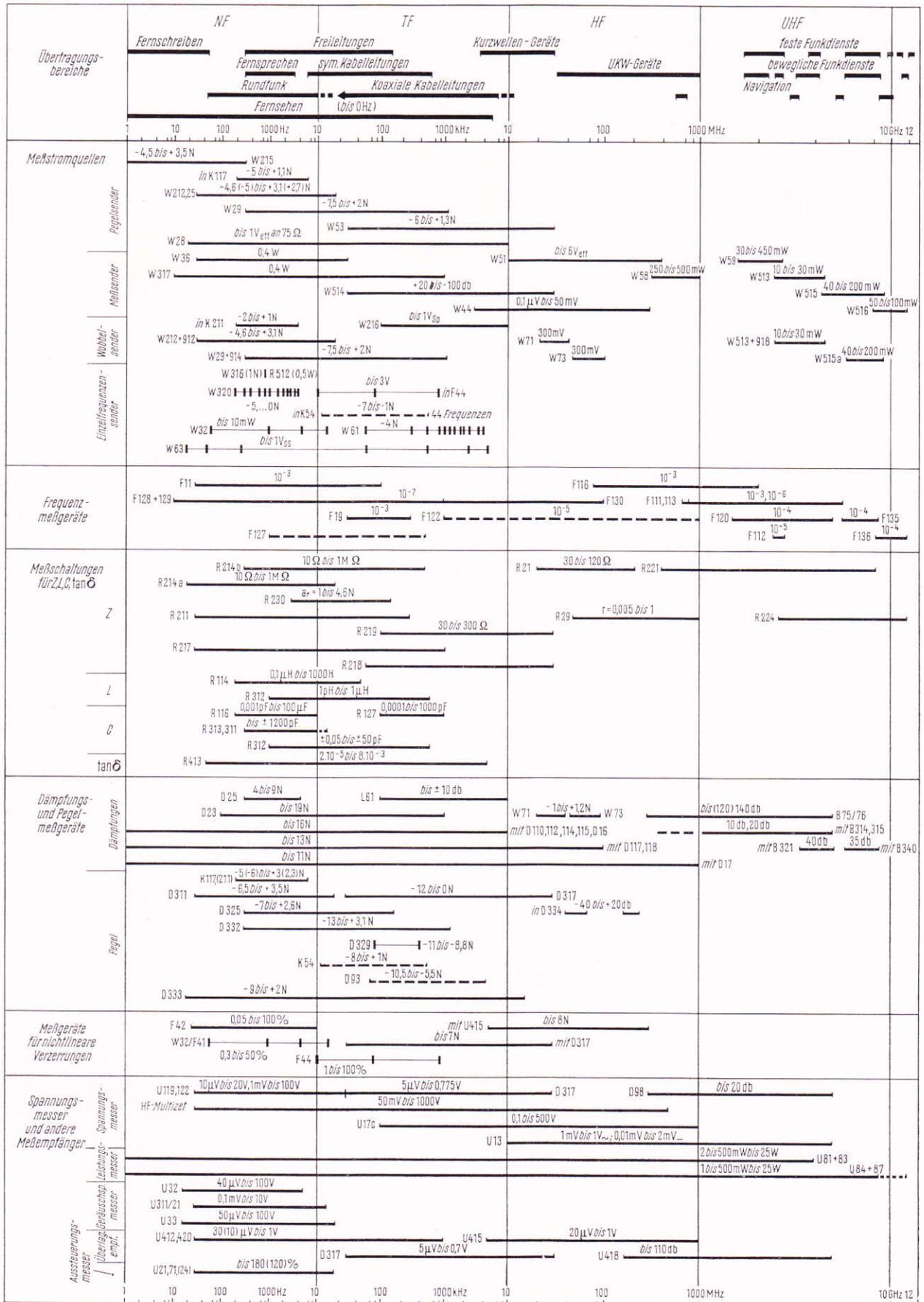
fang dieses Frequenzbereiches wird deutlich, wenn auf einem linearen Maßstab 1 Hz gleich 1 mm gewählt würde: Ein solcher Maßstab hätte bei 10 GHz die Länge von 10 000 km = ein viertel Erdumfang. Für den möglichst günstigen Einsatz der Meßgeräte und für ihre Zusammenfassung zu Meßplätzen ist zu fordern, daß ihre Frequenzbereiche den Bändern der einzelnen Übertragungstechniken entsprechen, z. B. denen der Übertragungssysteme für symmetrische oder koaxiale Leitungen, denen der Kurzwellenverbindungen und denen der Richtfunkssysteme im Meterwellen-, Dezimeterwellen- oder Zentimeterwellen-Bereich. Manches Gerät umfaßt sogar mehrere dieser Bänder.

Die Bildtafel zeigt auch die Vielfalt der Meßgeräte, gruppiert nach ihren Aufgaben. Die wichtigsten von ihnen sind: Meßstromquellen; Frequenzmeßgeräte; Meßschaltungen für Scheinwiderstand (Z), Induktivität (L), Kapazität (C) und Verlustfaktor ($\tan \delta$); Dämpfungs- und Pegelmeßgeräte; Meßgeräte für nichtlineare Verzerrungen; Spannungsmesser und andere Meßempfänger. Die Rangordnung der an sie gestellten Forderungen ist zuweilen recht unterschiedlich; so erwarten Laboratorien in erster Linie hohe Meßgenauigkeiten und zeitliche Konstanz, die Prüffelder kurze Meßzeiten bei einfachen Meßverfahren, der Betrieb möglichst für viele Meßaufgaben einsetzbare und robuste Meßgeräte.

Meßstromquellen sind für alle Meßplätze erforderlich. Zur systematischen Untersuchung der Übertragungs-Wege, -Geräte und -Bauteile muß die Frequenz ihrer Ausgangsspannung stetig veränderbar und doch möglichst genau einstellbar sein; für viele Meßaufgaben soll sich auch ihre Amplitude nicht nur verändern, sondern auf definierte Werte einstellen lassen (Pegelsender). Die wichtigste Baugruppe ist hier der Oszillator, von dem Bild 1 Beispiele bringt. Zu diesen unterschiedlichen Bauweisen zwingt der große zu überstreichende Frequenzbereich. Wenn

¹⁾ Vgl. auch »Meßgeräte für die Nachrichtentechnik«, 11. Auflage, September 1956, 582 Seiten, Siemens & Halske AG, Wernerwerk für Weitverkehrs- und Kabeltechnik

* 1 GHz = 1 000 000 000 Hz



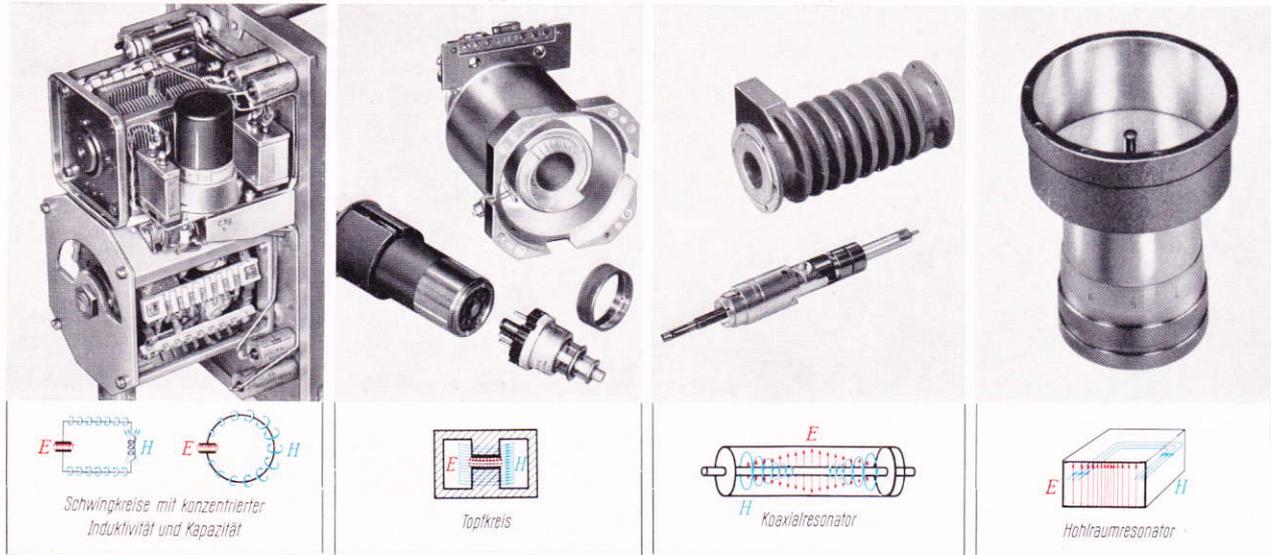


Bild 1 Beispiele für Schwingkreise in Meßgeräten

schon Baßgeige und Geige mit ihren verhältnismäßig kleinen Frequenzunterschieden erhebliche Größenunterschiede in ihren Resonanzräumen zeigen, um wieviel mehr müssen sich dann Schwingkreise in ihrem Aufbau unterscheiden, mit denen ein Frequenzgebiet von $1 : 10^{10}$ erfaßt werden soll. Konzentriertes L und C sind in den Meßstromquellen im Frequenzbereich bis zu einigen hundert Megahertz üblich, wobei die Windungen der Spule im oberen Grenzbereich bereits zu einem Drahtbügel zusammenschumpfen. Topfkreise – viele parallelgeschaltete Drahtbügel bilden einen einzigen (Rotations-) Körper – sind im Bereich einiger hundert Megahertz besonders dann zweckmäßig, wenn sehr hohe Frequenzkonstanz bei verhältnismäßig schmalen Frequenzbereich erzielt werden soll. Zum Überstreichen breiterer Frequenzbänder eignen sich besser Resonanzkreise in Form koaxialer Leitungen, die mit Hilfe verschiebbarer Kolben auf die jeweils gewünschte Frequenz eingestellt werden; sie erfordern eine besonders hochwertige mechanische Feinarbeit. Verkleinert man das C des Topfkreises durch Vergrößerung des Abstandes der Kondensatorflächen, so ergibt sich schließlich der Hohlraumresonator, der von einigen Gigahertz ab angewendet wird. Diese Abwandlung der Bauelemente gilt im wesentlichen auch für die Schwingkreis-Konstruktionen der anderen Meßgeräte.

Die Frequenzunsicherheit der Meßstromquellen ist mit etwa 10^{-2} im allgemeinen ausreichend, so daß Frequenzmesser nur beim Messen stark frequenzabhängiger Meßgrößen benötigt werden, z. B. bei Dämpfungsmessungen an Filtern mit starker Flankensteilheit. Dafür gibt es Frequenzmesser, die absolut auf 10^{-3} bis 10^{-7} genau messen. Bild 2 zeigt rechts unten einen Frequenzmesser 10^{-6} für den Frequenzbereich 0,7 bis 5,5 GHz. Absolut genau mes-

sende Frequenzmeßgeräte werden in der Übertragungstechnik außerdem zum Einstellen der Trägergeneratoren und der Sender von Funksystemen benötigt. Zum gelegentlichen Abstimmen der Träger- und Pilotgeneratoren eines Trägerfrequenz-Fernsprechnetzes – von diesen Generatoren kann heute erwartet werden, daß ihre Inkonstanz 10^{-7} je Monat nicht übersteigt – dienen Frequenz-Vergleichsgeräte, mit denen auf die Frequenz des Grundgenerators im Hauptamt des Netzes abgestimmt wird.

Auf dem Wege Entwicklung – Fertigung – Betrieb von Übertragungseinrichtungen begegnet man den ersten Meßgeräten bereits bei der Werkstoffprüfung und Bauteilfertigung, da beide für Güte und Preis neuzeitlicher Nachrichtengeräte von ausschlaggebender Bedeutung sind. Diese Meßgeräte zählen in erster Linie zur Gruppe der Meßschaltungen für Z , R , L , C und $\tan \delta$. Die Bilder 3, 4, 5 und 6 zeigen Geräte dieser Gruppe. Zur Forderung nach möglichst großen und den praktischen Gegebenheiten angepaßten Frequenzbereichen ergibt sich hier zusätzlich die Forderung nach sehr großen Meßbereichen bei hohen Genauigkeiten. Als Beispiel sei der Summen-Meßbereich $1 \text{ pH bis } 1000 \text{ H} \triangleq 1 : 10^{15}$ der Meßbrücke für komplexe Kopplungen und der Induktivitäts-Meßbrücke erwähnt. Zwei entsprechende Längenmeßgeräte müßten z. B. die Länge 1 mm und die 2500fache Entfernung Erde – Mond mit annähernd gleicher Genauigkeit messen können.

Sehr hohe Anforderungen stellt heute die Leitungstechnik an die Leitungsfehler-Ortungsgenauigkeiten. So ermöglicht es z. B. der Echograph – er arbeitet nach dem Impulsecho-Verfahren –, Fehler an Fernsprechfreileitungen bis zu 200 km auf einige Mastabstände genau festzustellen. Der Meßplatz zur Fehlerortung an Koaxialleitungen ortet noch in Entfernungen von 5 km Wellenwiderstandssprünge von $0,5 \text{ ‰}$ und

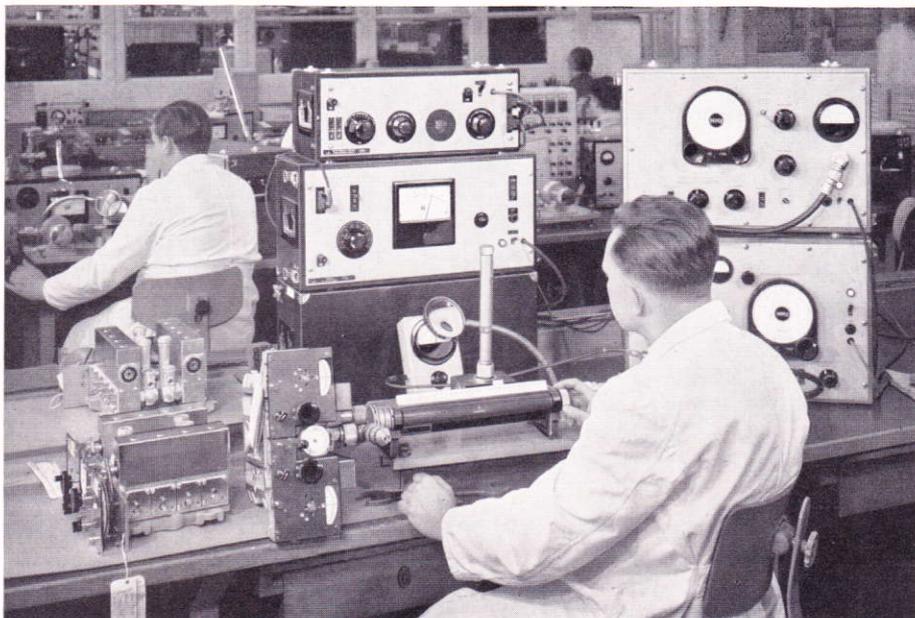


Bild 2
Meßplatz zum Prüfen durchstimmbarer Richtfunk-Antennenweichen für das 2-GHz-Band, bestehend aus Meßsender (1,6 bis 2,7 GHz), Frequenzmesser 10^{-6} (0,7 bis 5,5 GHz) – beide rechts –, koaxialer Meßleitung (0,4 bis 8,5 GHz) – im Vordergrund – und Meßempfänger – dahinter.

Kapazitätsdifferenzen von 1,5 pF auf wenige Promille dieser Entfernung.

Ähnliche Bedingungen müssen an die Dämpfungs- und Pegelmeßgeräte gestellt werden. Oftmals sind in durchaus üblichen Meßfällen Pegel von $-13,5$ N bis $+2,5$ N (-120 db bis $+20$ db) zu messen. Die Werte entsprechen einer kleinsten zu messenden Spannung von etwa $1\mu\text{V}$ und einer größten von etwa 10 V, also einem Umfang von $1 : 10^7$. Bei Nebensprechmessungen möchte man zuweilen noch Dämpfungen von etwa 21 N (180 db) messen; sie entsprechen einem Spannungsverhältnis von $10^9 : 1$ und einem Leistungsverhältnis von $10^{18} : 1$.

Spannungsmesser und Überlagerungsempfänger, Aussteuerungsmesser sowie Fremd- und Geräuschspannungsmesser unterliegen ähnlichen Forderungen. Sie sind in der Bildtafel auf S. 568 unter der Gruppe Spannungsmesser und andere Meßempfänger zusammengefaßt.

Filter, Eichleitungen, Dämpfungsglieder, Spannungsteiler und Meßzubehör, wie Meßübertrager, Stufenwiderstände, -kondensatoren und -leitwerte, Abschlußwiderstände usw. – in der Bildtafel auf S. 568 aus Gründen der Übersichtlichkeit nur zum Teil aufgeführt –, vervollständigen die Reihe des benötigten Meßzeugs. Hinsichtlich der mit steigender Frequenz abzuwandelnden Schaltelemente – z. B. der Schalter – gilt sinngemäß das über die Oszillatorbauteile Gesagte.

Es ist leicht einzusehen, daß man Fernsprech-Viel-fachsysteme bei vorsorglichen Betriebsmessungen nicht außer Betrieb setzen will. Zur Prüfung ihrer Übertragungseigenschaften während des Betriebes wird daher mit Lückenpiloten in den Frequenzbandlücken zwischen den Fernsprechkanälen gemessen. Hierbei sind hohe Forderungen an die Frequenzgenauigkeit der Lückenpilotsender einerseits und an die Selektivität, Empfindlichkeit und Klirrfreiheit

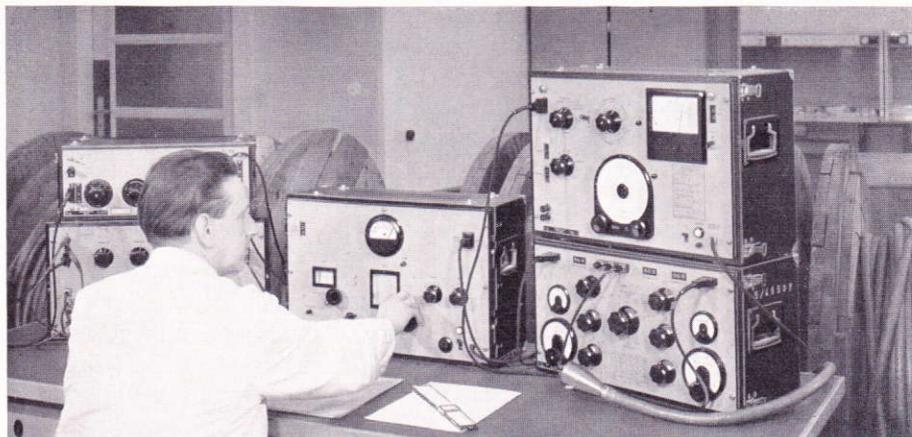
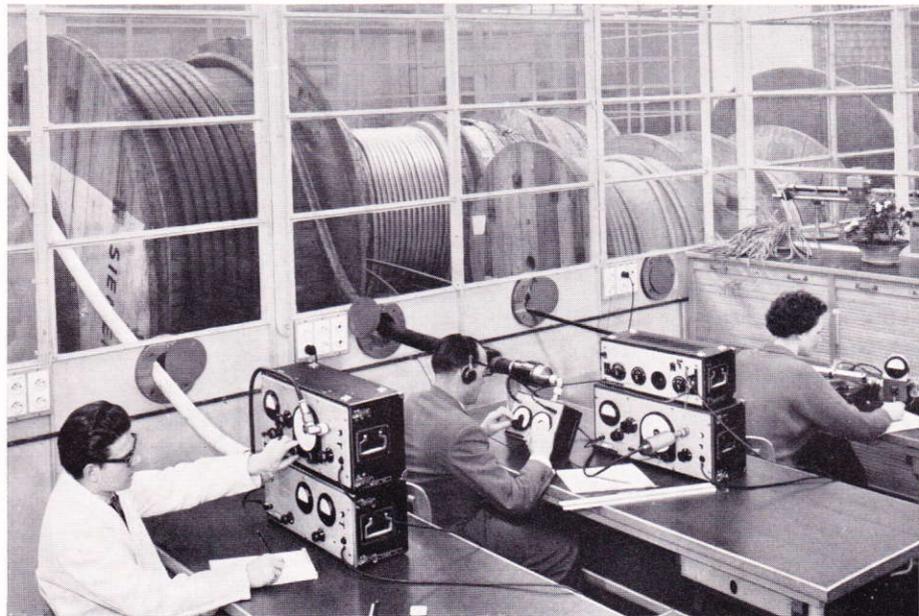


Bild 3
Kapazitäts-Meßplatz $0,001$ pF bis $100\ \mu\text{F}$ (200 bis 10000 Hz), links, und Scheinwiderstands-Meßplatz (30 Hz bis 1 MHz), rechts, eingesetzt in einem Laboratorium für symmetrische Fernsprech-Weitverkehrskabelleitungen

Bild 4
Scheinwiderstands- und
Anpassungs-Meßgeräte
eingesetzt in einem
Laboratorium für
UHF-Antennen-Leistungskabel



der Lückenpilotempfänger andererseits zu stellen, weil die Pilote nach beiden Seiten genauen Frequenzabstand von den Übertragungsfrequenzen halten sollen und ihre Pegel unter den Betriebspegeln liegen müssen.

Die Forderung nach möglichst wirtschaftlicher Fertigung der Nachrichten-Übertragungsgeräte führte zur Entwicklung von »Zeitsparenden Meßgeräten«, den Sichtgeräten. Das sind Meßgeräte, bei denen die Ausgangsspannung der Stromquelle den jeweiligen Frequenzbereich ständig durchläuft und der frequenzabhängige Meßwert als Kurve über der Frequenz auf dem Schirm einer Braunschen Röhre erscheint. Von Steuersignalen oder gar von Steuerleitungen zur Synchronisation von Sender und Empfänger bei Messungen an Übertragungsstrecken kann man sich dadurch unabhängig machen, daß am Empfangsort die Spannung in getrennten Meßkreisen nach Amplitude und Frequenz bewertet wird. Solche Sichtgeräte sind z. B. die Pegelbildgeräte, die Pegelbildempfänger und Wobbelmeßplätze; das Meßergebnis erhält man zumeist innerhalb weniger Sekunden. Sie erweisen sich vor allem bei Reihemessungen und dort als zweckmäßig, wo an stetig veränderbaren Elementen des Meßobjekts, z. B. Entzerrern und Nachbildungen, das gewünschte Ergebnis eingestellt werden kann. Die ständig wachsende Anzahl der in großen Ämtern durchzumessenden Nachrichtenkanäle – schon heute gibt

es Ämter mit mehreren tausend Fernsprech-Weitverkehrskreisen – erfordert ihren Einsatz auch als Betriebsgeräte geradezu gebieterisch.

Bei der Ausweitung des Frequenzbereiches versuchte man zunächst, die bekannten und bewährten Meßgeräte und Meßverfahren dem neuen Frequenzgebiet anzupassen. Auf diese Weise ist es z. B. gelungen, die Prinzipien und Konstruktionselemente der NF-Meßtechnik weitgehend in der TF-Meßtechnik anzuwenden. Das führte auch von dieser Seite her zu verkleinerten Bauelementen und zu einer sehr gedrängten Bauweise mit kurzer, wohlgedachter Leitungsführung (vgl. Bild 6), weil mit wachsender

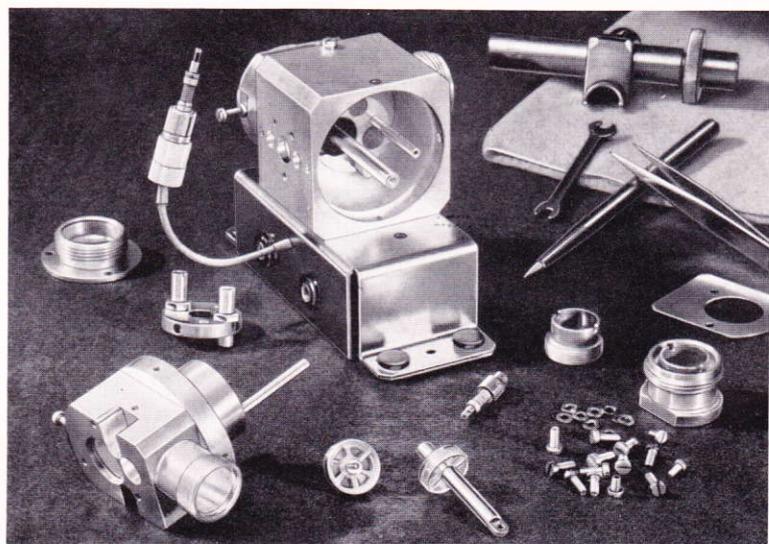


Bild 5 3-GHz-Topfkreis hoher Symmetrie als Beispiel für die bei Dezimeterwellen-Meßgeräten erforderliche feinmechanische Arbeit.

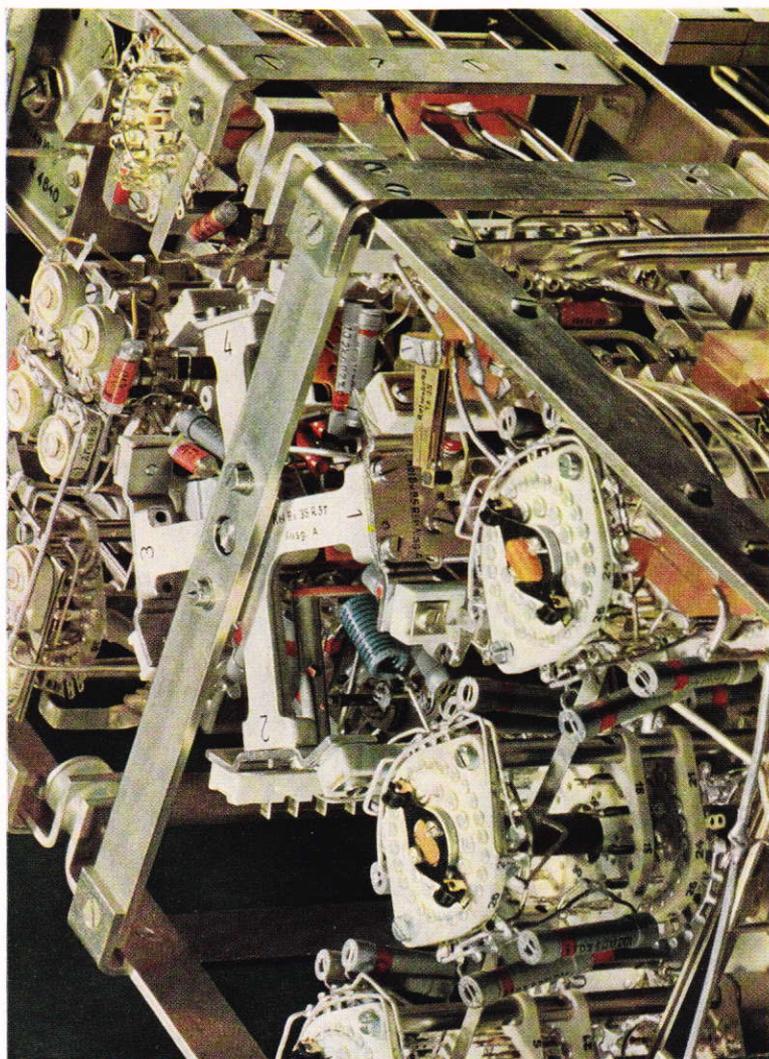


Bild 6 Durch geeignete Bauteile, gedrängte Bauweise und kurze, zweckmäßige Leitungsführung konnte die bei den NF-Meßgeräten angewandte Technik für den Bau von TF-Meßgeräten abgewandelt werden.

Frequenz die äußere Form des Bauteils mehr und mehr sein elektrisches Verhalten bestimmt. Irgendwo ist aber auch dieser Weg zu Ende, und neuartige Lösungen mußten gefunden werden, wie sich schon bei den Schwingkreisen zeigte. Eine ähnliche und entscheidende Aufgabe war bei der Röhre – auch hier wieder im Wechselspiel mit der Übertragungstechnik – zu lösen. Mit steigender Frequenz kommt die Laufzeit der Elektronen innerhalb der Röhre in die Größenordnung der Zeitdauer einer Schwingung. Die Triode mit üblichen Abständen der Elektroden und Zuleitungen zum Sockel kann deshalb nur bis zu einigen hundert Megahertz eingesetzt werden. Im Bereich bis zu wenigen Gigahertz tritt die Scheibentriode an ihre Stelle und im Bereich darüber das Klystron. Neuerdings beginnt auch in den Meßgeräten der Transistor einen Teil der Röhren abzulösen, weil er weniger dem Verschleiß unterliegt, einen kleineren Raumbedarf hat und

durch den Wegfall der Heizleistung und der Anodenverlustleistung die Geräte von äußeren Stromquellen unabhängig macht.

Beim Übergang von der Koaxial- zur Hohlleiter-Technik verlieren manche Meßgrößen, wie z. B. Spannung, Strom und Widerstand, hinsichtlich ihres Absolutwertes ihren Sinn, da sie nicht ohne weiteres unmittelbar gemessen werden können oder ihre Kenntnis nicht besonders interessiert. Man bezieht sich dann auf relative Einheiten, wie die Welligkeit der Spannung längs einer Meßleitung oder das Verhältnis der vor- und rücklaufenden Leistung. Die durch den Querschnitt fließende Leistung ist eine auch bei stärkeren Reflexionen ausreichend meßbare Größe. Sie läßt sich mit Durchgangsleistungsmessern nach dem Richtungskoppler-Prinzip sowohl hinsichtlich des voral- als auch des rücklaufenden Anteils getrennt erfassen; zur Messung werden meist Richtleiterschaltungen benutzt. Thermische Leistungsmesser gewährleisten auch bei sehr hohen Frequenzen (Wellenlänge einige Zentimeter) Meßunsicherheiten von nur wenigen Prozent. Widerstände und Reflexionsfaktoren werden mit der Meßleitung gemessen; Dämpfungsmeßverfahren entsprechen der sonst üblichen Technik.

Auch auf die Fernseh-Meßtechnik ist hier besonders hinzuweisen. Dämpfungsverzerrungen und vor allem die Laufzeitverzerrungen müssen in einem breiten Frequenzband (0 bis 5 MHz) sehr klein gehalten werden. Das Auge empfindet bereits Zeitunterschiede von etwa $100 \text{ ns} = 100 \cdot 10^{-9} \text{ s}$ als störend. Ferner werden bei der Wiedergabe von kontrastreichen Bildern durch die scharfen Übergänge von Schwarz nach Weiß besonders hohe Anforderungen gestellt; solche Schwarz-Weiß-Sprünge sind durch Rechteckwellen nachbildbar. Die zur naturgetreuen Wiedergabe der Helligkeitswerte (Gradation) des Bildes erforderliche Linearität des Übertragungssystems kann durch Meßspannungen mit einer sägezahnförmigen oder nach einer Treppenkurve verlaufenden Signalspannung geprüft werden. Das Maß der Übertragungsgüte läßt sich dann auf dem Schirm der Braunschen Röhre eines Fernseh-Kontrolloszillographen aus der Verformung der Prüfsignale ab-

lesen. Zur Erfassung auch sehr kleiner Nichtlinearitäten wird dem sägezahnförmigen Signal eine HF-Spannung der Frequenz 1 bis 4 MHz überlagert und nach Durchlaufen des Übertragungssystems oder Senders dem Signal wieder abgenommen; ihr Verlauf gibt ein Maß für die Verzerrung (Bild 7 zeigt einen solchen Meßplatz). Die Meßstromquelle muß ferner für Messungen an Fernseh-Übertragungswegen Austast- und Synchronimpulse abgeben.

Nach ihren Konstruktionsformen gibt es die Nachrichten-Meßgeräte als Einschübe für Gestelleinbau, wie er z. B. in den großen Ämtern der Nachrichtennetze und bei Sendeanlagen zweckmäßig ist, und als Einzelgeräte für beweglichen Einsatz. Durch Normung ihrer Größen, ihrer Anschlußstellen (Eingänge und Ausgänge), ihrer Kasten-Ausführungen usw. sind die Meßgeräte, die, soweit dies notwendig ist, mit Dezibel- oder mit Nepereichung gefertigt werden, jeweils leicht und mit geringem Gesamtaufwand zu Meßplätzen unterschiedlicher Meßaufgaben zusammenfaßbar. Soweit Betriebsspannungen erforderlich sind, haben die Geräte Wechselstrom-Netzanschluß, wobei dafür Sorge getragen wurde, daß Netzspannungsschwankungen und Netzfrequenzabweichungen das Meßergebnis nicht oder nur unwesentlich beeinträchtigen. Mit Transistoren ausgerüstete Geräte arbeiten mit eingebauten Trockenbatterien.

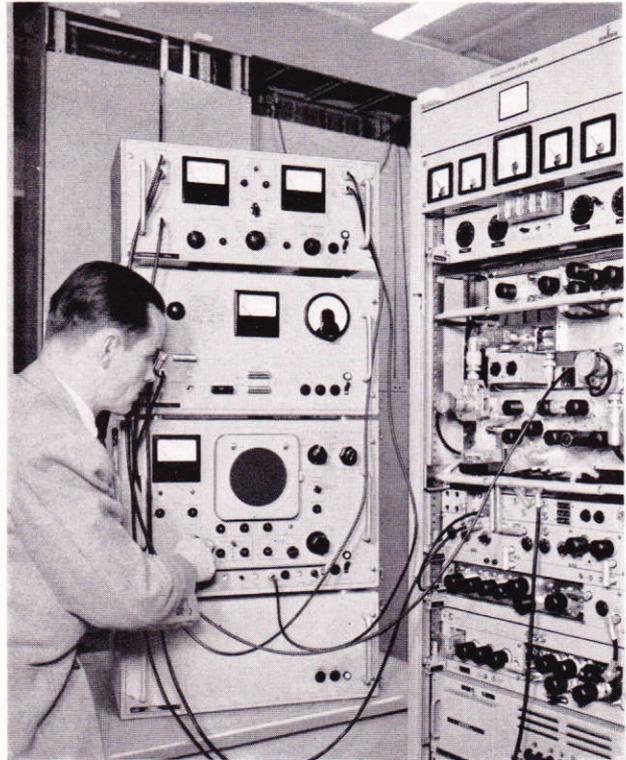
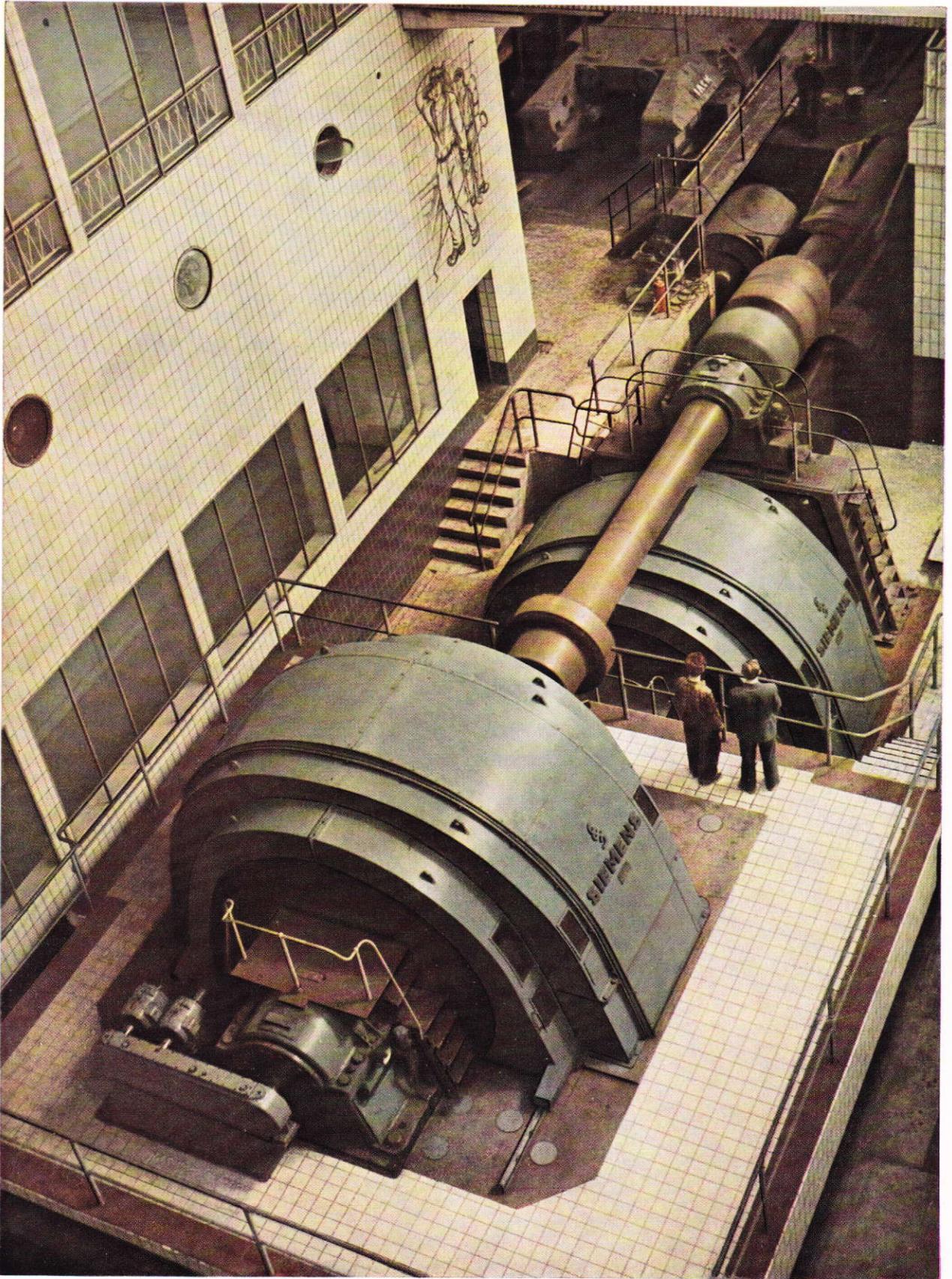


Bild 7 Meßplatz zum Einstellen der Modulator- und Demodulator-Kennlinie in Breitband-Richtfunksystemen mit Hochfrequenzkanälen im 4-GHz-Band.



Zwillings-Umkehrwalzmotoren der 400-mt-Grobblechstraße Henrichshütte, Hattingen
Jeder Motor wird über Einanoden-Stromrichter in Gegenparallelschaltung gespeist