

Zeitschrift: Pionier : Zeitschrift für die Übermittlungstruppen
Herausgeber: Eidg. Verband der Übermittlungstruppen; Vereinigung Schweiz. Feld-Telegraphen-Offiziere und -Unteroffiziere
Band: 35 (1962)
Heft: 6

Rubrik: Funk + Draht

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: 15.03.2025

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

Rauscharme Verstärker für schwache Radiosignale

Die Entwicklung in der drahtlosen Technik ist gekennzeichnet durch die Erschliessung immer höherer Frequenzbereiche und eine Verbesserung und Verfeinerung der Elektronik. Eine wichtige aktuelle Aufgabe stellt zum Beispiel der Bau besonders rauscharmer Empfänger für Höchstfrequenzen (Zentimeter- und Millimeterwellen) dar. Der Grund hierfür ist folgender: Die maximal mögliche Reichweite einer Funkverbindung ist eine Funktion des Verhältnisses von abgestrahlter Sendeleistung und der kleinsten, zur Feststellung des Signals erforderlichen Empfangsleistung. Der Frage nach der kleinsten nachweisbaren Empfangsleistung, der sogenannten Empfängerempfindlichkeit, kommt deshalb die gleiche Bedeutung zu wie der Frage nach maximal möglicher Sendeleistung.

Bei den bisher üblichen Röhrenverstärkern kommt die Verstärkung elektromagnetischer Signale dadurch zustande, dass durch einen Steuerungsmechanismus die elektrokinetische Energie einer Elektronenströmung in elektromagnetische Energie der Signalfrequenz umgewandelt wird. Nun ist jedoch jede Elektronenströmung infolge der atomistischen Struktur der Elektrizität mit einer — im allgemeinen sogar mit mehreren — Schwingungskomponenten behaftet, wodurch der zu verstärkenden Signalleistung unvermeidbar auch eine Störleistung zugesetzt wird. Diese stellt eine untere Schwelle für die Empfängerempfindlichkeit dar.

Die Elektronenröhren und die Schaltelemente der Empfangsanlage sind durchaus nicht die einzigen Rauschquellen. Auch aus dem Kosmos wird der Empfangsantenne ständig eine Rauschstrahlung zugeführt, die innerhalb eines kontinuierlichen Frequenzbereiches wirksam ist und von diskreten Quellen (Radiosternen) und von Strömen elektrisch geladener Partikel emittiert wird. Die kosmische Radiofrequenzstrahlung ist im Gebiet der Ultrakurzwellen (Meterwellen) sehr intensiv und nimmt nach höheren Frequenzen hin ab, um bei Frequenzen zwischen etwa 1000 MHz (30 cm Wellenlänge) und 30000 MHz (1 cm Wellenlänge) ein Minimum zu werden. Auch die Atmosphäre liefert eine Rauschstrahlung infolge der Absorption der elektromagnetischen Wellen durch atmosphärische Gase und Dämpfe. Die Intensität des atmosphärischen Rauschens ist sowohl von der Frequenz als auch von der Richtung der Empfangsantenne abhängig. Am kleinsten ist sie bei Frequenzen von etwa 1000 MHz bis 10000 MHz und senkrechter Elevation der Antenne. Bei niedrigen Elevationswinkeln wird sie grösser. Man kennzeichnet die Rauschleistung zweckmässig durch Angabe einer Rauschtemperatur. Jeder reelle Widerstand ist eine Rauschquelle, der eine Rauschleistung hervorbringt. Sie ist proportional seiner absoluten Temperatur T und der Bandbreite Δf . Während bei Meterwellen die erwähnten Störstrahlungen so intensiv sind, dass eine Steigerung der Empfängerempfindlichkeit keine Empfangsverbesserung bringt, liegen die Verhältnisse bei Dezimeterwellen

und insbesondere im Gebiet der Zentimeterwellen grundsätzlich anders. In diesem Bereich weisen selbst die besten Elektronenröhren, wie Trioden und rauscharme Wanderfeldröhren, Rauschtemperaturen auf, die beträchtlich grösser sind als die der einfallenden Störstrahlung aus dem Weltraum. Es gibt andererseits Anwendungen, wo man ein Strahlungsfeld im Raum mit der grössten möglichen Empfindlichkeit abtasten muss. Solche Anwendungen liegen in der Radioastronomie sowie bei der Herstellung weltweiter Funkverbindungen über Satelliten vor. Es ist daher verständlich, dass in jüngster Zeit grosse Anstrengungen gemacht werden, die Empfängerempfindlichkeit im Bereich der kürzesten Radiowellen zu verbessern. Die entscheidenden Fortschritte wurden durch den parametrischen Verstärker einerseits und den Molekularverstärker andererseits erzielt.

Der parametrische Verstärker

Die Bezeichnung «parametrischer Verstärker» rührt daher, dass hierbei Schwingkreisparameter, also Induktivitäten und Kapazitäten, variiert werden. Im Prinzip ist das parametrische Verstärkungsprinzip recht alt, denn bereits im vergangenen

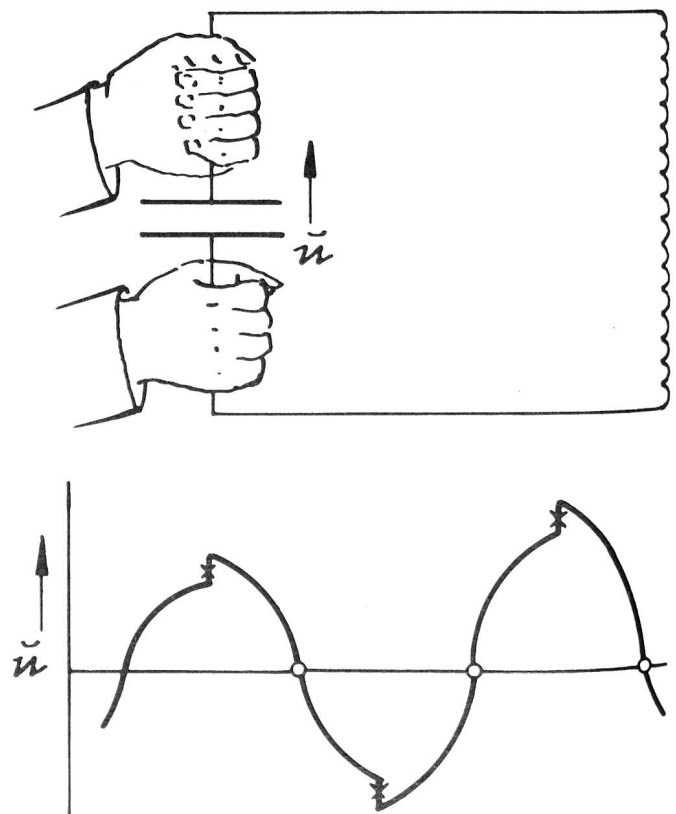


Fig. 1: Das Prinzip der parametrischen Verstärkung. Oben: Arbeitsprinzip. Unten: Der Verlauf der Ladung und damit der Spannung am Kondensator.

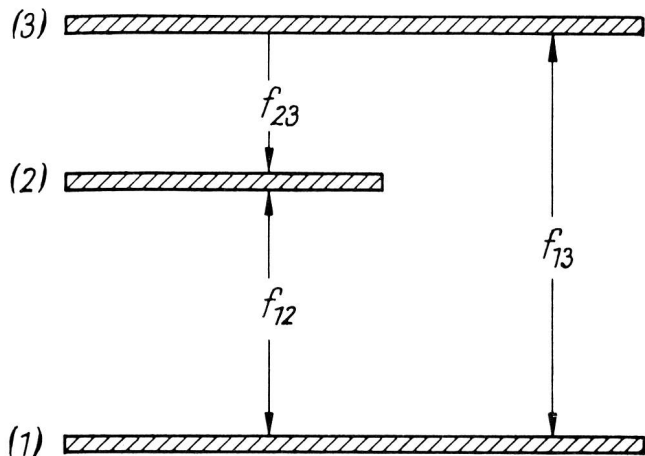


Fig. 2: Energieniveaus und Quantenübergänge bei einem 3-Niveau-Molekularverstärker.

Jahrhundert war es bekannt. Erst in letzter Zeit hat es wieder Interesse erlangt, und zwar im Zusammenhang mit der rauscharmen Verstärkung schwacher Radiosignale.

Zur Erläuterung der parametrischen Verstärkung soll ein gewöhnlicher Schwingkreis mit einer Spule und einem Kondensator betrachtet werden (Fig. 1). Wenn in diesem Kreis eine schwache elektrische Schwingung vorhanden ist, dann laden sich die Kondensatorplatten abwechselnd positiv und negativ auf. Nun werden die beiden Platten plötzlich auseinandergezogen, und zwar zu einem Zeitpunkt, da die Spannung und damit auch die Ladung des Kondensators ihr Maximum erreichen (Scheitelwerte der Wechselspannung). Die Platten sollen erst in dem Augenblick in die Ausgangsstellung zurückgehen, da die Spannung durch Null hindurch geht, der Kondensator in diesem Augenblick also nicht geladen ist. Das Auseinanderziehen der Platten erfordert einen Arbeitsaufwand, denn die durch das elektrische Feld zwischen den Platten verursachte Anziehung muss überwunden werden. Dagegen wird bei der Rückführung der Kondensatorplatten in die Ausgangsstellung keine Arbeit geleistet. Im Mittel wird bei diesem periodischen Pumpen also elektromagnetische Energie dem Schwingkreis zugeführt und die darin vorhandene elektromagnetische Schwingung verstärkt. Auch wenn keine Schwingungen im Kreis vorhanden wären, könnten sich Schwingungen erregen, da stets eine geringfügige Störung in Form einer geringen Aufladung der Platten vorhanden ist, die das Anfachen von Eigenschwingungen des Kreises auslöst. Die Frequenz, mit der man die Kapazität variiert, heisst «Pumpfrequenz». Am günstigsten ist es, wenn sie das Zweifache der Resonanzfrequenz des Schwingkreises beträgt. Ein mechanisches Analogon ist die Kinderschaukel, die durch «Pumpen» in der doppelten Frequenz zum Schwingen gebracht wird.

Bei den hohen Frequenzen der sehr kurzen Radiowellen kann man nun nicht mehr mechanisch pumpen. Statt dessen benutzt man hier spannungsabhängige Schaltelemente in Form von Halbleiterdioden, deren innere Kapazität durch eine äussere Spannung nahezu trägheitslos gesteuert werden kann. Wird eine solche Halbleiterdiode als Kapazität eines Schwingkreises verwendet, so lässt sich damit die Abstimmung dieses Schwingkreises durch eine äussere Wechselspannung modulieren. Wenn die Modulationsfrequenz gerade doppelt so gross ist wie die unmodulierte Resonanzfrequenz des Kreises, kommt eine Entdämpfung des Kreises zustande, die bis zur Selbsterregung führt und für Verstärkungszwecke nutzbar gemacht werden kann. Es erfolgt hierbei also eine Umwandlung der Leistung dieser Modulationsfrequenz, die der Pumpfrequenz entspricht, in Leistung der unmodulierten Resonanzfrequenz des Kreises,

die der Signalfrequenz entspricht. Da im Gegensatz zu einem Röhrenverstärker in der Halbleiterdiode kein Stromtransport im üblichen Sinne vorhanden ist, die Ladungsträger unter dem Einfluss der modulierenden Wechselspannung vielmehr nur ganz wenig hin und her wackeln, liegt die innere Störleistung wesentlich niedriger als bei der Elektronenröhre. Es ist mit Hilfe dieses parametrischen Verstärkungsprinzips gelungen, im Frequenzbereich zwischen 100 MHz und 10000 MHz sehr rauscharme Verstärker zu bauen.

Der Molekularverstärker

Auf einem gänzlich anderen Prinzip beruht der Molekularverstärker oder Maser (Maser=Molecular amplification by stimulated emission of radiation). Beim Molekularverstärker kommt die Verstärkung durch den Energieaustausch zwischen der inneren Energie von Materie und dem elektromagnetischen Feld der Radiowelle zustande. Die innere Energie von Materie (Atom, Molekül, Ion) tritt nur in ganz bestimmten diskreten Energieniveaus zutage, deren Abständen $\Delta E = h \times f$ durch die Plancksche Konstante h eine spezifische Frequenz f zugeordnet ist. Setzt man ein solches molekulares oder atomares System der Einwirkung einer elektromagnetischen Strahlung aus, deren Frequenz der oben angegebenen Beziehung $\Delta E = h \times f$ genügt, so kommt eine Wechselwirkung zwischen dem Strahlungsfeld und dem betreffenden molekularen System zustande, indem Quantenübergänge zwischen benachbarten Energietermen auftreten. Finden Übergänge von einem niedrigeren Energieniveau zu einem höheren Energieniveau statt, so wird dem elektromagnetischen Feld Energie entzogen, während der umgekehrte Vorgang zu einer Energieabgabe an das elektromagnetische Feld führt. Damit Verstärkungseffekte möglich sind, müssen im Mittel also mehr Quantenübergänge vom höheren Energieniveau zum niedrigeren Niveau auftreten. Nun hat die Materie bei thermischem Gleichgewicht vorzugsweise eine grössere Besetzungsdichte im niedrigeren Niveau. Weil dadurch im Mittel mehr Übergänge vom niedrigeren zum höheren Niveau stattfinden, wird der elektromagnetischen Strahlung Energie entzogen. Es ist aber unter Zuhilfenahme eines elektromagnetischen Pumpfeldes möglich, in einem höheren Energieniveau Überschussenergie gegenüber dem normalen thermischen Gleichgewichtszustand zu speichern. Lässt man gleichzeitig auf das molekulare System noch eine Signalleistung mit richtiger Frequenz wirken, so können durch induzierte oder stimulierte Emission Strahlungsquanten aus dem höheren Energieniveau abgerufen werden und das elektromagnetische Feld der Signalfrequenz verstärken.

Die technisch wichtigste Form des Molekular-Verstärkers ist der 3-Niveau-Maser, bei dem die Energieniveaus des paramagnetischen Chrom-Ions für den Verstärkungsvorgang ausgenutzt werden. Durch das elektromagnetische Wechselfeld einer «Pumpfrequenz» von z. B. 9400 MHz, die der Differenz $\Delta E_{13} = h \times f_{13}$ zwischen den Niveaus 1 und 3 entspricht (Fig. 2), wird im Niveau 3 eine Übersetzung gegenüber dem normalen thermischen Gleichgewichtszustand geschaffen. Die Energiedifferenz $\Delta E_{23} = h \times f_{23}$ zwischen dem mittleren und dem oberen Niveau entspricht der Signalfrequenz $f_{23} = 2800$ MHz. Durch ein induzierendes Wechselfeld dieser Frequenz f_{23} werden aus dem Niveau 3 Strahlungsquanten $h \times f_{23}$ abgerufen, die das elektromagnetische Feld der Signalfrequenz verstärken.

Mit derartigen Molekularverstärkern lassen sich extrem niedrige Rauschtemperaturen erzielen, die bis an die Grenze des physikalisch Möglichen gehen. Bei praktischen Anwendungen ist das Eigengeräusch, welches durch die Verluste

der äusseren Schaltung verursacht wird, wesentlich grösser. Man muss daher, will man das niedrige Eigenrauschen von Molekularverstärkern sinnvoll ausnutzen, möglichst verlustlose Schaltelemente benutzen. Insbesondere hat man die Antennenzuführung so kurz wie möglich zu machen. In der Praxis werden solche Molekularverstärker daher unmittelbar in den Brennpunkt des Empfangsspiegels (Parabolantenne) gestellt. Mit derartigen Empfangsanlagen lassen sich Rauschtemperaturen von etwa 50°K bis 80°K erzielen, wobei die Rauschtemperatur des eigentlichen Maser nur wenige °K beträgt.

Mit Molekularverstärkern aufgebaute Zentimeterwellen-Empfänger sind so empfindlich, dass sich damit die sehr schwache thermische Radiostrahlung entfernter Planeten messen lässt. So gelang es, Reflexionssignale vom Planeten Venus festzustellen, deren Leistung nur 10^{-20} W betrug. Bisher sind Molekularverstärker hauptsächlich für Aufgaben der Radioastronomie verwendet worden. Ein anderes

Anwendungsgebiet ist ihre Verwendung in Zentimeterwellen-Funkverbindungen über passive Satelliten. Solche Versuche sind in den USA mit Erfolg durchgeführt worden. Die Inbetriebnahme weltweiter Funkübertragungssysteme nach diesem Prinzip steht bevor. Auf der anderen Seite ist es nicht sinnvoll, wollte man die extrem hohe Empfindlichkeit des Molekularverstärkers für Funkverbindungen auf der Erde verwenden. Wegen des niedrigen Elevationswinkels, den die Empfangsspiegel bei irdischen Funkübertragungen haben, wird von der Atmosphäre eine viel zu hohe Rauschtemperatur (etwa 300°K) der Antenne zugestrahlt, wodurch der Einsatz von Molekularverstärkern illusorisch wird. Für Richtfunkverbindungen auf der Erde sind dagegen parametrische Verstärker wesentlich wirtschaftlicher als Maser, die also nur eingesetzt werden sollten, wo ein Empfang sehr schwacher Radiosignale bei möglichst senkrechter Elevation der Antenne in den Raum gefordert wird.

Dipl.-Ing. H. H. Klinger

612.34.481

Die Wirkungen starker Radarstrahlen

Die Ausstrahlung immer höherer Impulsleistungen bis zu mehreren Megawatt, wie sie beispielsweise im BMEWS (Ballistic Missile Early Warning System der US Air Force) bereits zur Anwendung kommen, lässt die Frage nach den möglichen biologischen Schädigungen starker Radarstrahlen berechtigt erscheinen. In verschiedenen amerikanischen Zeitschriften sind diesbezüglich auch schon Diskussionen entbrannt und Bedenken angemeldet worden. Inzwischen sind auch bedeutende Wissenschaftler und Experten in den USA diesen Problemen nachgegangen. Ihre Untersuchungsergebnisse, die nicht nur für die mit Radar beschäftigten Techniker, sondern auch für Mediziner und Wissenschaftler von Interesse sind, sollen kurz diskutiert werden.

Die beim Radar verwendeten Frequenzbänder und ihre Bezeichnungen gehen aus der folgenden Tabelle hervor:

Verteilung und Bezeichnung der Radarfrequenzbänder:

Band	Bereich		Wellenlänge
	Frequenz		
P	225 — 390	MHz	133,3 — 76,9 cm
L	390 — 1550	MHz	76,9 — 19,3 cm
S	1,55 — 5,2	GHz	19,3 — 5,77 cm
X	5,2 — 10,9	GHz	5,77 — 2,75 cm
K	10,9 — 36	GHz	2,75 — 0,834 cm
Q	36 — 46	GHz	8,34 — 6,52 mm
V	46 — 56	GHz	6,52 — 5,36 mm

Bei den über den gesamten Kontinent verbreiteten Mikrowellen-Relaisverbindungen ist die total abgestrahlte Energie so gering, dass sie gefahrlos ist. Diese Stationen brauchen daher nicht weiter in Betracht gezogen zu werden.

Anders verhält es sich schon bei den in den USA im Bau begriffenen sog. Troposphärischen Scatterantennen, die grosse Leistungen von weit über 10 kW (Dauerleistung) abstrahlen und für den über grosse Distanzen geplanten Nachrichtendienst eingesetzt werden sollen. Diese hohen Mikrowellenenergien machen die Errichtung eines Schutzzaunes

erforderlich, der die sog. «gefährliche Zone» abriegelt und unzugänglich macht.

Auch das Satellitenprogramm mit dem geplanten «Satellitennachrichtendienst» wird eine eingehende Prüfung und Sicherheitsmassnahmen erfordern.

Bei der amerikanischen Frühwarnkette, dem erwähnten BMEW-System, werden die derzeit grössten Impulsleistungen benutzt. Dieses System birgt daher auch die grössten Gefahren; weshalb es zur Grundlage der folgenden Betrachtungen genommen werden soll.

Um einen Begriff von der Grössenordnung solcher Anlagen zu vermitteln, sei die Radarstation Thule in Grönland erwähnt, mit einem Radarspiegel von 120 m Breite und 55 m Höhe, mit dem sich ein Gewinn bis zu 50 db (=100000) und eine mittlere Strahlbreite von 1° erzielen lässt. Mit der hierbei verwendeten Impulsleistung von $P_P=1000$ kW bei $\lambda=70$ cm lassen sich Reichweiten bis zu $r=4000$ km erzielen. Inzwischen sind aber Stationen noch grösserer Leistungen im Bau, mit gegen 100 MW Impulsleistung bei 250 MHz bzw.

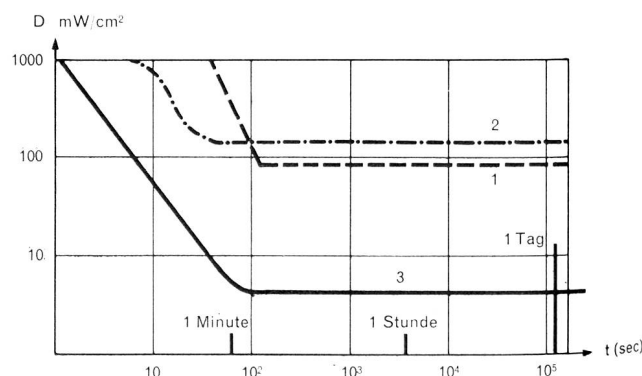


Fig. 1: Toleranzdosenkurven (nach Ely). Die Kurven zeigen gerade noch zulässige Energiedichten (D in mW/cm^2) in Funktion der Dauer der Bestrahlung (t), und zwar 1=für Ganzkörperbestrahlung, 2=für die Augen (beide in bezug auf den menschlichen Körper), 3=für tierische (Hunde-) Testiculars. Diese Dosen betragen vergleichsweise $100 mW/cm^2$ für (1); $150 mW/cm^2$ für (2) und $6 mW/cm^2$ für (3).