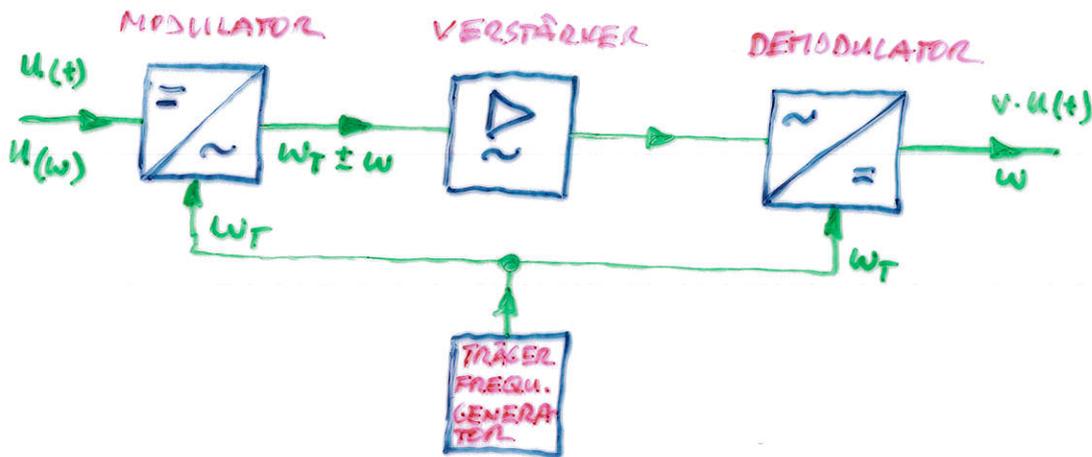
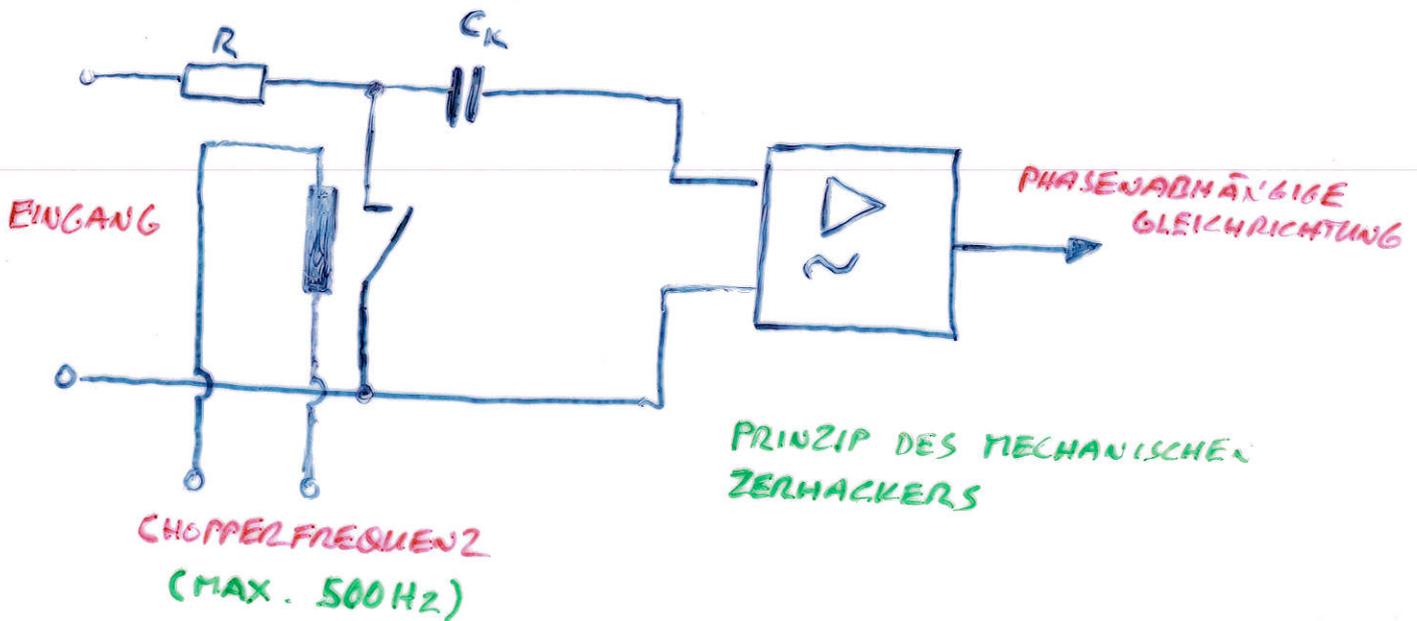


# MODULATIONSPRINZIP:



## MODULATOR (CHOPPER)

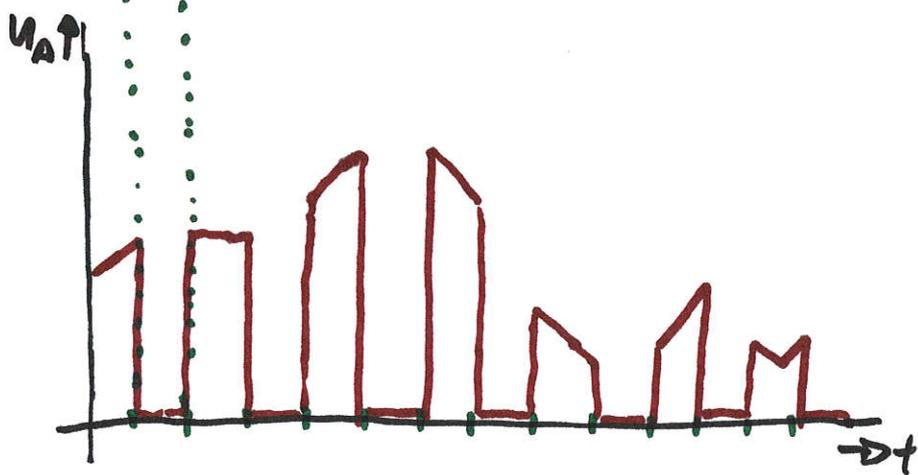
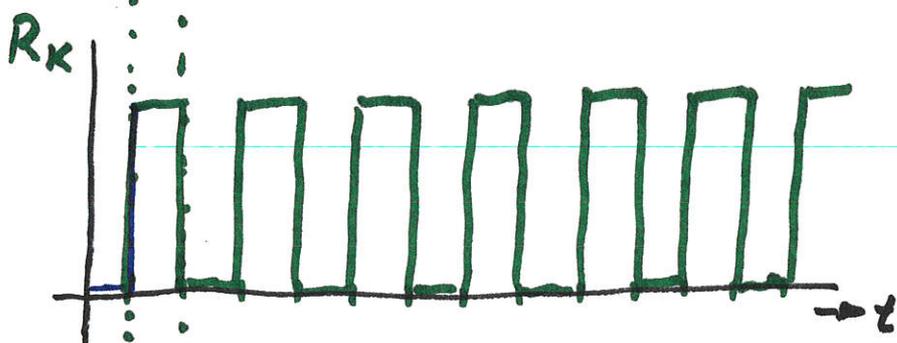
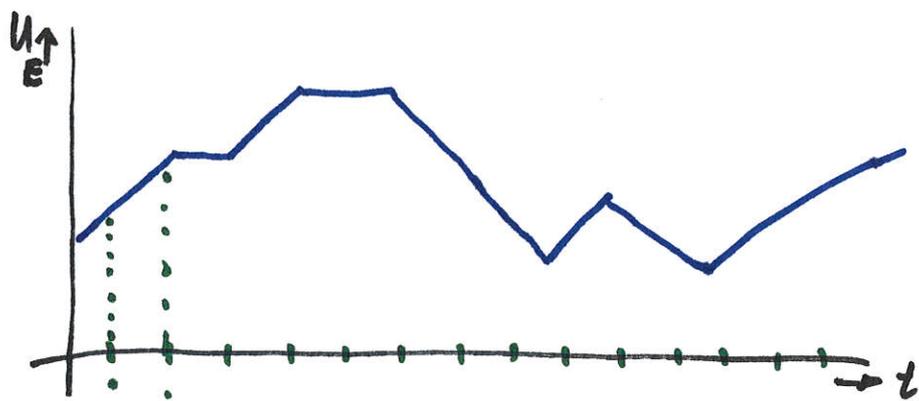
BEI RECHTECKFÖRMIGER MODULATION, DIE MAN Z.B. DURCH EINEN RELAISKONTAKT ERREICHEN KANN, DESSEN WIDERSTAND ZWISCHEN NULL UND UNENDLICH VERÄNDERT WIRD, BEZEICHNET MAN DEN MODULATOR ALS ZERHACKER ODER CHOPPER.



PRINZIP DES MECHANISCHEN ZERHACKERS

NACHTEIL : ◦ NIEDRIGE MODULATIONSFREQ.

VORTEIL : ◦ GERINGE SPANNUNGSORIFT  
◦ TEMPERATURSTABIL



### Mechanischer Chopper

Die einfachste Möglichkeit eine Gleichspannung in eine Wechselspannung umzuformen besteht darin, sie periodisch mit einer bestimmten Chopperfrequenz ein- und auszuschalten, sie also zu zerhacken. Bild 197 zeigt das Prinzip des mechanischen Choppers, bei dem ein, von der Zerhackfrequenz gesteuerter Relaiskontakt die Meßspannung in eine rechteckförmige Wechselspannung umformt.

Der Widerstand  $R$  begrenzt die Belastung der Quelle bei geschlossenem Zerhackerkontakt, über den Koppelkondensator  $C_k$  wird das zerhackte Signal einem Wechselspannungsverstärker zugeführt.

Obwohl die Lebensdauer des mechanischen Choppers durch die Kontaktabnutzung begrenzt und die höchste Frequenz des Meßsignals durch die relativ niedrige Modulationsfrequenz (max. 500 Hz) beschränkt ist, werden mechanische Zerhacker auch heute noch vielfach angewendet. Sie sind allen anderen Modulatoren in bezug auf Spannungsdrift, auch bei großen Temperaturänderungen überlegen.

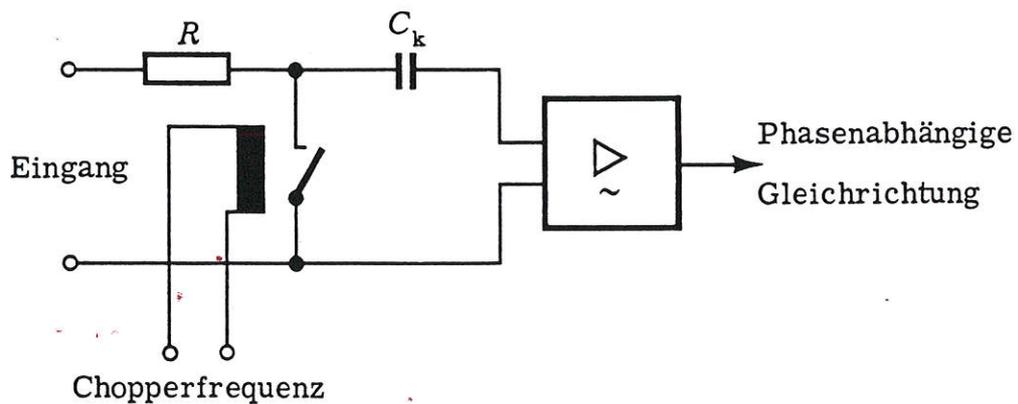
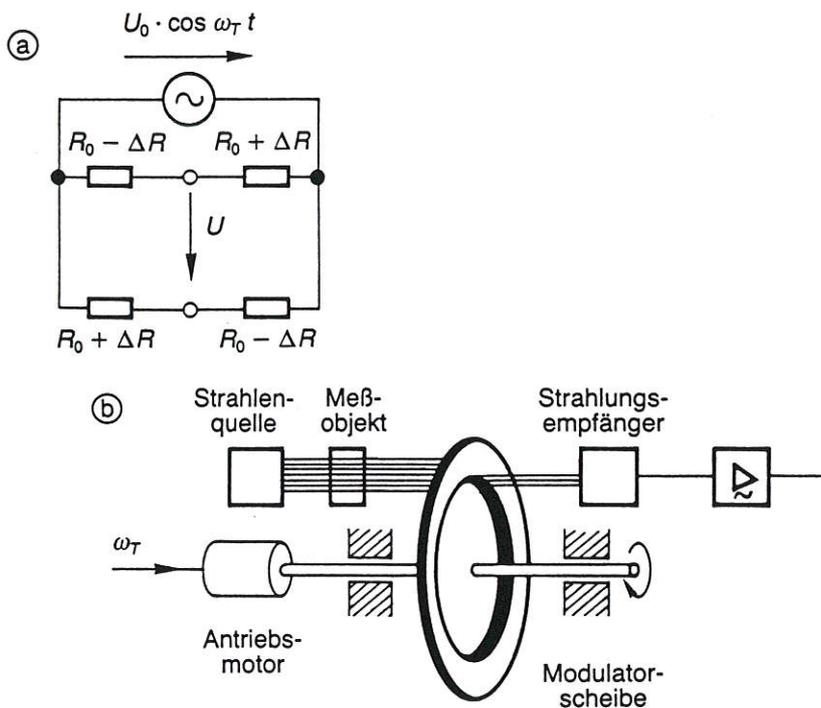


Bild 197 Prinzip des mechanischen Zerhackers

*Modulatoren zur Messung nichtelektrischer Größen*

Die bisher behandelten Modulatoren bezogen sich auf die Verstärkung kleiner Meßspannungen oder -ströme. Stellt sich jedoch die Aufgabe der Umformung kleiner nichtelektrischer Meßsignale, so kann die notwendige Modulation der Meßsignale auch auf anderen Wegen erfolgen.

Besonders bekannt geworden sind *trägerfrequenzgespeiste Meßbrücken* nach Bild 15.9 a, bei denen eine nullpunktsichere Umformung von Widerstands-, Kapazitäts-



(SIEHE AUCH SEITE 349ff)

**Bild 15.9.** Modulatoren zur Messung nichtelektrischer Größen.  
a Trägerfrequenz-Meßbrücke,  
b Rotierende Modulatorscheibe im Wechsellichtphotometer.

oder Induktivitätsänderungen in entsprechende amplitudenmodulierte Wechselspannungen erfolgt.

Bei einer mit vier Widerstands-Aufnehmern ausgestatteten Vollbrücke, die mit der Trägerfrequenz-Spannung  $U_0 \cdot \cos \omega_T t$  gespeist wird, berechnet sich die normierte Ausgangsspannung  $U/U_0$  zu

$$\begin{aligned}\frac{U}{U_0} &= \left( \frac{R_0 + \Delta R}{2R_0} - \frac{R_0 - \Delta R}{2R_0} \right) \cos \omega_T t = \\ &= \frac{\Delta R}{R_0} \cos \omega_T t.\end{aligned}$$

Diese Brücken-Ausgangsspannung kann nun mit einem nullpunktsicheren Wechselspannungsverstärker verstärkt und anschließend phasenabhängig gleichgerichtet werden. Der Synchrongleichrichter wird wieder von der Trägerfrequenz gesteuert, die auch die Meßbrücke speist. Für die Messung optischer und daraus abgeleiteter Größen kann mit einer *rotierenden Modulatorscheibe* ein Lichtstrom periodisch moduliert werden (Bild 15.9b). Dieses Verfahren ist dann von Vorteil, wenn die Intensität eines Lichtstroms nullpunktsicher ausgewertet werden soll. Beispiele dafür sind das Wechsellichtphotometer, bei dem die Transparenz (Durchlässigkeit) einer Probe bestimmt werden soll, oder Gasanalysegeräte, bei denen aus der Infrarot-Absorption auf die Gaskonzentration geschlossen werden soll. Die Drehzahl des Antriebsmotors für die Modulatorscheibe ist für die Trägerfrequenz maßgebend. Die Modulatorscheibe moduliert die von der Strahlungsquelle auf den Strahlungsempfänger auftreffende Intensität. Die Modulation kann dabei entweder rechteckförmig sein (Zerhacker) oder aber auch sinusähnlich. Das vom Strahlungsempfänger abgegebene Signal wird wieder mit einem Wechselspannungsverstärker verstärkt und dann gleichgerichtet.

**9.5. Grundbegriffe der Modulation durch Tastung**

**Gleich- und Wechselstromtastung**

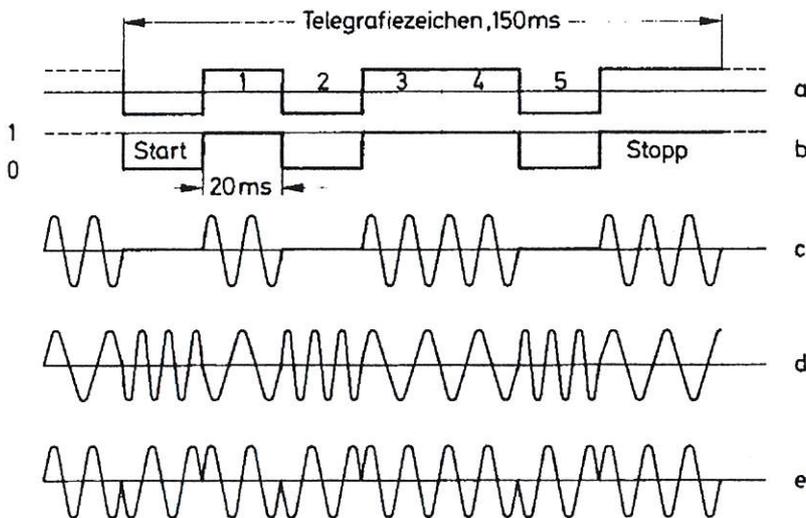
Tastung ist eine sehr einfache Art der Modulation. Bekanntlich läßt sich allein durch Ein- und Ausschalten eines Lichtstrahls eine Nachricht übertragen. Bei den elektrischen Modulationsverfahren dieser Art spricht man von Tastung.

Hierbei kann ein getasteter Gleichstrom über eine Leitung übertragen werden, um am anderen Ende z.B. ein Relais zu betätigen. Man spricht dann von Gleichstromtastung.

Man hat in der Telegrafie den Einfachstrombetrieb, wenn der Gleichstrom lediglich aus- bzw. eingeschaltet wird, den Doppelstrombetrieb, wenn zur Übertragung der beiden Zustände der Strom umgepolt wird.

Wird eine Wechselspannung als Träger der Information verwendet, dem durch Aus- und Einschalten die Nachricht aufmoduliert wird, hat man Wechselstromtastung.

Die Trägerfrequenz kann sowohl im Ton- als auch im Hochfrequenzbereich liegen. je nachdem, ob bei der Wechselstromtastung der Signalparameter „Amplitude“, „Frequenz“ oder „Phase“ getastet wird, spricht man von Amplituden-, Frequenz- oder Phasenumtastung (Bild 8.1).



*Bild 8.1 Telegrafiezeichen „F“  
a) Doppel-,  
b) Einfachstrom-,  
c) Amplituden-,  
d) Frequenz-,  
e) Phasentastung*

Es versteht sich, daß nur digital vorliegende Nachrichten, also z.B. Morsezeichen oder binär-kodierte Fernschreibzeichen oder Daten aufmoduliert werden können.

Bei Umtastung spricht man zuweilen auch von „Shiftung“ (angelsächsische Literatur, to shift = wechseln, umspringen).

Man unterscheidet:

**ASK =** Amplitude Shift Keying  
**Amplitudentastung**

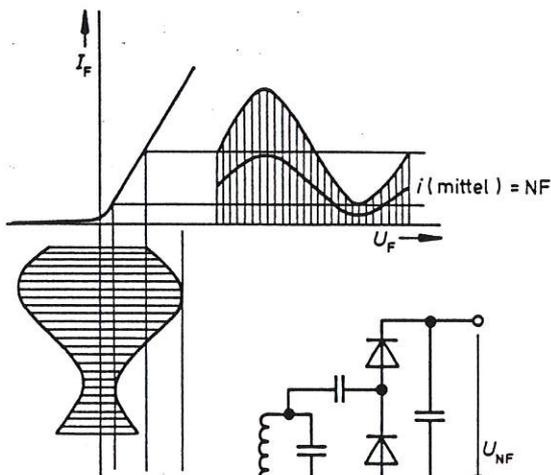
**FSK =** Frequency Shift Keying  
**Frequenztastung**

**PSK =** Phase Shift Keying  
**Phasentastung**

Demodulation

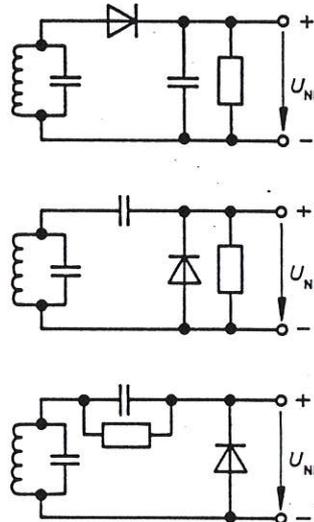
HF 6

1. AM - Demodulation



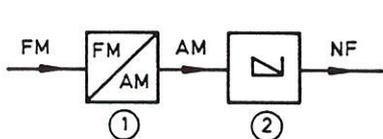
AM - Demodulator mit  
Spannungsverdopplung

Schaltungsmöglichkeiten

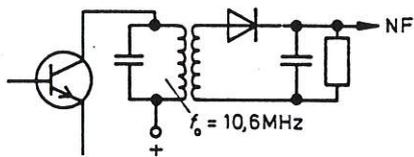


2. FM - Demodulation

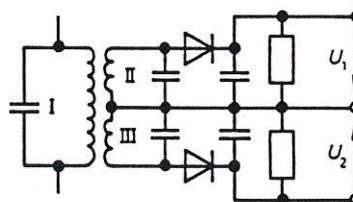
Prinzip :



- ① Umwandlung der FM in AM
- ② AM-Demodulation

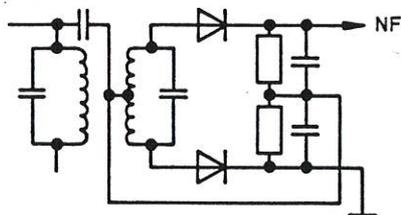


Flankendiskriminator

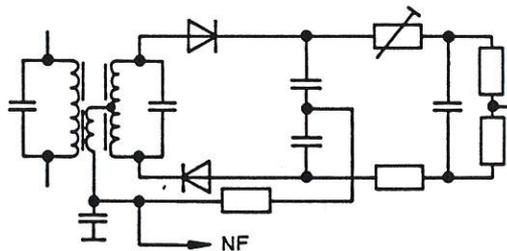


Kreis I: Mittenfrequenz  
Kreis II: oberhalb der  
Mittenfrequenz  
Kreis III: unterhalb der  
Mittenfrequenz

Differenzdiskriminator



Phasendiskriminator



Verhältnisdiskriminator (Ratiodetektor)

# STÖRUNGEN, RAUSCHEN, VERZERRUNGEN

DIE ÜBERTRAGUNG EINER NACHRICHT WIRD DURCH VIELELLEI EINFLÜSSE BEEINTRÄCHTIGT, DIE MAN UNTER DEM NAMEN "STÖRUNGEN" ZUSAMMENFASSEN KANN.

STÖRUNGEN { NEBENSPRECHEN  
STÖRSPANNUNGEN (GEWITTER, SCHALTER, ANTENNEN USW.)

MASSNAHMEN { ABSCHIRMUNG  
ENTSTÖREN

WEITERE STÖRUNGEN { RAUSCHEN  
VERZERRUNGEN  
KREUZMODULATION  
INTERMODULATION

RAUSCHEN (INNERES): SPANNUNGSSCHWANKUNGEN DIE DURCH DIE UNREGELMÄSSIGE WÄRMEBEWEGUNG DER ELEMENTARTEILCHEN VERURSACHT WERDEN. TRETEN IN JEDEM WIRKWIDERSTAND, ELEKTROENRÖHREN ODER TRANSISTOREN AUF.

## RAUSCHQUELLEN

### ÄUSSERE RAUSCHQUELLEN

- o ATMOSPÄRISCHES RAUSCHEN (BLITZENTLADUNGEN)
- o KOSMISCHES RAUSCHEN (RADIOSTRAHLUNG ENTFERNTER STERNE)
- o INDUSTRIELLE STÖRSTRAHLUNGEN

### INNERE RAUSCHQUELLEN

- o SCHROTRRAUSCHEN
  - o FUNKELRAUSCHEN
  - o STRUMVERTEILUNGSRAUSCHEN
  - o IONENRAUSCHEN
- EFFEKTE BEI RÖHREN

## VERZERRUNGEN

- o OBERLIELEN (LINIENFAKTOR)
- o INTERMODULATION
- o KREUZMODULATION

## NYQUISTFORMEL:

$$U_{eff} = \sqrt{4 \cdot k \cdot T \cdot \Delta f \cdot R}$$

k = BOLZMANN KONSTANTE  $1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Wg/K}$

$\Delta f$  = BANDBREITE

T = ABSOLUTE TEMPERATUR

DIE VON EINEM WIDERSTAND GELIEFERTE RAUSCHSPANNUNG IST DER TEMPERATUR DIREKT PROPORTIONAL, WIE SICH AUS DER NYQUIST-FORMEL ABLEITEN LÄSST.

## 9.4 Störungen, Rauschen, Verzerrungen

Die Übertragung einer Nachricht wird durch vielerlei Einflüsse beeinträchtigt, die man unter dem Namen „Störungen“ zusammenfassen kann. Die entscheidendste Störung ist der völlige Ausfall eines Gliedes der Übertragungskette, es trifft dabei am Ende der Strecke überhaupt kein Signal mehr ein. Ein Mittel, dieser Störung zu begegnen, ist die mehrfache Anordnung jedes Gliedes der Übertragungskette. Man sieht also z.B. zwei Sender, zwei Empfänger usw. vor und nennt das Vorhandensein der Ausweichmöglichkeit **Redundanz**.

Der völlige Ausfall eines Gerätes tritt nur selten ein, im ständigen Kampf steht der Nachrichtentechniker jedoch mit den übrigen Störungen, von denen eine z.B. das **Nebensprechen**, also das unerwünschte Hineinsprechen aus einem Kanal in einen anderen darstellt. Auch **Störspannungen**, die von äußeren Quellen, z.B. Gewitter, Kommutatormotoren, Schaltern usw. über Leitungen, Antennen u.ä. aufgenommen werden, haben oft eine so hohe Energie, daß sie die Signalspannung verfälschen oder unkenntlich machen. Diesen Störungen begegnet man mit geeigneter

**Abschirmung** empfindlicher Teile und durch **Entstören** der funkenerzeugenden Geräte. Gegen atmosphärische Störungen, die über die Antenne einwirken, hilft die Wahl eines weniger gestörten Frequenzbereiches oder einer entsprechenden Modulationsart (z.B. Frequenzmodulation, bei der amplitudenmodulierende Störungen leicht zu unterdrücken sind).

Weitere Ursachen für die Beeinträchtigung einer Übertragung treten in den nachrichtentechnischen Geräten selbst auf. Dazu gehören: Rauschen, Verzerrungen, Kreuzmodulation und Intermodulation. Während man unter **Kreuzmodulation** den Vorgang der Modulation des gerade empfangenen Kanals durch das Signal eines benachbarten Kanals an der gekrümmten Kennlinie der Hf-Vorverstärkerröhre oder des -transistors versteht — Abhilfe schaffen hier eine hohe Selektivität der Eingangskreise und lineare Kennlinien —, ist die **Intermodulation** eine Verzerrung in Nf-Verstärkern, die durch Bildung von Mischprodukten zweier Signalspannungen entsteht, die eine gekrümmte Kennlinie gleichzeitig aussteuern.

### Rauschen

In jedem Wirkwiderstand, in Elektronenröhren und Transistoren treten u.a. durch die unregelmäßige Wärmebewegung der Elementarteilchen Schwankungen auf, die einer bestimmten statistischen Gesetzmäßigkeit unterliegen und an den Klemmen als Spannungsschwankungen meßbar sind. Am Ausgang eines Empfängers treten diese Schwankungen verstärkt auf und werden in einem Lautsprecher als Rauschen hörbar. Ist die Stärke des Rauschens über den betrachteten Frequenzbereich  $\Delta f$  von der Frequenz unabhängig, so wird es als **weißes Rauschen** bezeichnet.

#### Rauschabstand und Rauschzahl

Maßgebend für die Erkennbarkeit eines Signals ist die Höhe, mit der es sich von dem in einem

Übertragungssystem herrschenden Rauschpegel abhebt, also das Verhältnis der Signalspannung  $U_S$  zur Rauschspannung  $U_R$ . Da das Rauschen z.B. eines Widerstandes nur eine sehr geringe Spannung verursacht, wird der **Rauschabstand**  $U_S/U_R$  nur bei sehr geringem Signalpegel, wie er z.B. am Eingang von Empfängern herrscht, zu einem Problem, nämlich dann, wenn das Eigenrauschen der Eingangsstufe des Empfängers nur wenig schwächer ist als das empfangene Signal.

Die an einem Widerstand auftretende **Rauschspannung** ist nach Nyquist:

$$U_{\text{eff}} = \sqrt{4 k T \Delta f R}$$

Sie ist also von der absoluten Temperatur  $T$ (K), von der Bandbreite  $\Delta f$  und vom Widerstandswert

$R$  abhängig; als Faktor kommt die Boltzmannsche Konstante

$$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Ws/K}$$

hinzu. Entsprechend wird die verfügbare **Rauschleistung**:

$$P_R = k T \Delta f.$$

Sie ist unabhängig vom Widerstandswert und beträgt bei 1 Hz Bandbreite und  $T = 290 \text{ K}$  ( $17 \text{ }^\circ\text{C}$ )  $P_R = 4 \cdot 10^{-21} \text{ W}$ .

Oft wird auch die **Rauschtemperatur**  $T_R$  angegeben. Sie ist bei bekannter Rauschleistung  $P_R$ :

$$T_R = \frac{P_R}{k \Delta f}.$$

Um Vergleiche zwischen verschiedenen Verstärkern oder Empfängern anstellen zu können, definiert man als **Rauschzahl**  $F$  das Verhältnis der Rauschleistung am Ausgang des Verstärkers zu der dort vorhandenen Rauschleistung, wenn der Verstärker selbst nicht rauschen würde.  $F$  ist dimensionslos und wird meist in dB angegeben:

$$F = \frac{P_{Ra}}{P_{Re} \cdot V},$$

hierin ist  $P_{Ra}$  die am Ausgang gemessene Rauschleistung,  $P_{Re}$  die von einer fremden Rauschquelle, z.B. Antenne, in den Verstärkereingang eingespeiste Rauschleistung und  $V$  die Leistungsverstärkung. Eine andere, ebenfalls häufig benutzte Definition für die Rauschzahl ist die auf den Eingang bezogene Rauschenergie je Hz Bandbreite, geteilt durch  $k T_0$ :

$$F = \frac{P_{Ra}}{V k T_0 \Delta f}.$$

In den Eingang des Verstärkers darf hierbei keine fremde Rauschquelle einspeisen.

Die zu der in einen Verstärker eingespeisten Rauschleistung vom Verstärker zusätzlich erzeugte Rauschleistung wird auch als **zusätzliche Rauschzahl**

$$F_z = F - 1$$

dargestellt.

Schaltet man mehrere Rauschquellen (Röhren, Verstärker usw.) in Reihe, so wird die gesamte Rauschzahl

$$F = F_1 + \frac{F_2 - 1}{V_1} + \frac{F_3 - 1}{V_1 V_2} + \dots,$$

woraus sich leicht erkennen läßt, daß bei aktiven Vierpolen hauptsächlich die Rauschzahl  $F_1$  des ersten Vierpols die Größe der Gesamt rauschzahl  $F$  bestimmt.

Die Größe  $1 k T_0 = 4 \cdot 10^{-21} \text{ Ws}$  ( $T_0 = 290 \text{ K}$ ) wird als Einheit der Rauschenergie ebenfalls häufig zu Vergleichen benutzt.

### 7.1.1. Rauschquellen

Je nach der Herkunft der Rauschspannungen unterscheidet man äußere und innere Rauschquellen. **Äußere Rauschquellen** sind z.B. das atmosphärische Rauschen, industrielle Störungen und kosmisches Rauschen. **Innere Rauschquellen** sind das thermische Rauschen der Schaltelemente und das Röhren- oder Transistorrauschen. Bis zu etwa 100 MHz überwiegt das äußere Rauschen gegenüber dem inneren, das Empfängerrauschen ist so schwach, daß es gegenüber dem äußeren Rauschen kaum ins Gewicht fällt. Anders ist es bei Frequenzen über 100 MHz, hier überwiegt mit zunehmender Frequenz das Empfängerrauschen. Für diese Frequenzbereiche ist man bestrebt, extrem rauscharme Empfänger zu bauen. So kühlt man die Eingangsstufe mit den zugehörigen Elementen auf Temperaturen nahe 0 K und verwendet spezielle Empfangsprinzipien (parametrische Verstärker, Maser, Laser [48, 49, 58]). Bild 7.1 gibt eine grobe Übersicht über die frequenz- und leistungsmäßige Verteilung der Rauschquellen.

#### Äußere Quellen

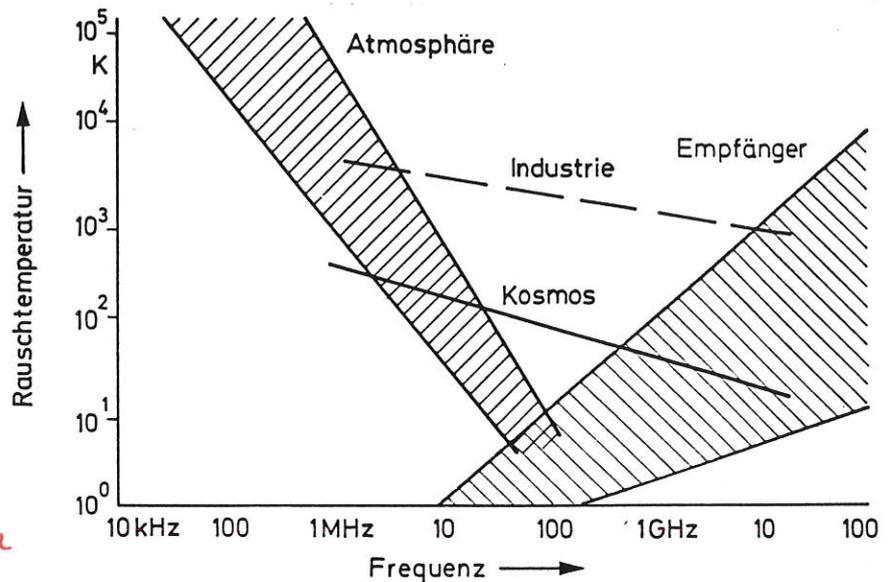
Das **atmosphärische Rauschen** hat seine hauptsächliche Ursache in über die ganze Erde verteilten **Blitzentladungen von Gewittern**. Nach höheren Frequenzen zu nimmt die Energie des Rauschspektrums rasch ab. Die örtliche Intensität hängt von den jeweiligen Ausbreitungsbedingungen und von der Tages- und Jahreszeit ab.

Das **kosmische Rauschen** stammt aus der **Radiostrahlung entfernter Sterne** (hauptsächlich Milchstraße). Es wird erst ab etwa 40 MHz störend, wo das atmosphärische Rauschen bereits stark abgefallen ist und tritt in bestimmten Frequenzbereichen stärker auf.

Vor allem tagsüber treten die **industriellen Störstrahlungen** auf, die durch **Funkenbildung an Motoren, Schaltern usw.** entstehen.

Alle diese äußeren Rauschquellen werden über die Antenne aufgenommen und addieren sich als äquivalente Rauschtemperatur zum Eigenrau-

Bild 7.1 Frequenzbereich und Rauschtemperatur einiger Rauschquellen



DIE VON EINEM WIDERSTAND GELIEFERTE RAUSCHSPANNUNG IST DER TEMPERATUR DIREKT PROPORTIONAL, WIE SICH AUS DER NYQUISTFORMEL ABLEITEN LÄSST.

$$U_{eff} = \sqrt{4 \cdot k \cdot T \cdot \Delta f \cdot R}$$

T = ABSOLUTE TEMPERATUR  
Δf = BANDBREITE

k = BOLZMANNISCHE KONSTANTE (1,38 · 10<sup>-23</sup> Ws/K)

schen der Antenne, das ein thermisches Rauschen darstellt, hinzu.

schen einer der Frequenz umgekehrt proportionalen Funktion. Ab etwa 10 kHz beginnt das Funkelrauschen das Schrotrauschen zu übersteigen und nimmt mit niedriger werdender Frequenz stark zu.

Innere Quellen

In allen verlustbehafteten Bauelementen sind entsprechend der Größe der Wirkwiderstände Schwankungsvorgänge bemerkbar, die ihren Ursprung in der ungleichmäßigen statistischen Wärmebewegung der Elementarteilchen haben und als Widerstandsrauschen oder thermisches Rauschen bezeichnet werden. Ihre Größe hängt direkt von der Temperatur ab.

Das **Stromverteilungsrauschen** tritt bei Röhren mit mehr als einer positiven Elektrode (Mehrgitterröhren) auf, weil die Verteilung des Elektronenstromes auf die einzelnen Gitter Schwankungen unterliegt.

Das **Ionenrauschen** beruht auf der Stoßionisation durch Zusammenprallen von Elektronen mit Gasmolekülen in zeitlich unregelmäßiger Folge. Die dadurch entstandenen neuen Ladungsträger verursachen Schwankungen des Elektronenstromes.

Auch bei **Transistoren** treten ähnliche Erscheinungen auf. So hat das Diffundieren der Ladungsträger durch die Sperrschichten einen schrotähnlichen Effekt zur Folge. Die hohe Feldstärke zwischen den Raumladungen einer pn-Sperrschicht verursacht eine Stoßionisation in statistisch unregelmäßiger Folge; die neu entstandenen Ladungsträger bringen Schwankungen im Stromtransport mit sich. Einem Stromverteilungsrauschen entsprechen unregelmäßige Rekombinationseffekte an der Basiszone und der Kristalloberfläche, die in ihrer frequenzmäßigen Verteilung dem Funkelrauschen folgen. Im Gegensatz zur Röhre überwiegt das Funkelrauschen beim Transistor zu tieferen Frequenzen hin erst ab etwa 2 kHz.

Neben dem thermischen Rauschen treten als innere Rauschquellen noch Schwankungseffekte in Röhren, Transistoren und Dioden auf. Bei den Röhren unterscheidet man Schrotrauschen, Funkelrauschen, Stromverteilungsrauschen und Ionenrauschen.

Das **Schrotrauschen** entsteht durch die endliche Ladung der Elementarteilchen, die die Katode in unregelmäßiger Folge verlassen. Die statistischen Schwankungen des Elektronenstromes wirken sich als ein dem Gleichstrom überlagerter Schwankungsstrom aus.

Das **Funkelrauschen** hat seine Ursache in der zeitlich unregelmäßigen Verteilung der Stellen niedriger Austrittsarbeit auf der Katode. Die Oberfläche der Katode emittiert nicht überall gleich viele Elektronen. Es gibt Stellen mit höherer und niedrigerer Emission, die ständig auf der Katodenoberfläche hin- und herwandern. Während das Schrotrauschen von niedrigsten Frequenzen an als weißes Rauschen betrachtet werden kann, folgt die Intensität des Funkelrau-

Das Rauschen des Transistors ist sehr stark vom Arbeitspunkt abhängig und hat ein ausgeprägtes Minimum. Auch die Größe des Innenwiderstan-

RÖHRE

RÖHRE

RÖHRE

RÖHRE

des der den Transistor speisenden Stromquelle hat Einfluß auf das Rauschen, so daß man ebenso wie bei Röhren oft auf den mit Leistungsanpassung erreichbaren hohen Wirkungsgrad verzich-

tet, um durch Anpassung der Widerstände auf geringstes Rauschen einen rauscharmen Verstärker zu erzielen (Rauschanpassung). Schrifttum über Rauschen siehe [54, 55].

## Verzerrungen

### Lineare Verzerrungen

Befinden sich im Zuge einer Übertragung dämpfende Glieder, die für  $U$  und  $I$  linear sind, so nennt man die dadurch entstehenden Verzerrungen linear. Sie können auf einfache Weise z.B. durch Verstärkung wieder ausgeglichen werden. Im allgemeinen versteht man unter linearen Verzerrungen eine unerwünschte Beeinflussung des Frequenzganges über die Bandbreite einer Übertragungsanordnung, die durch frequenzabhängige Glieder entsteht und durch sogenannte Entzerrerschaltungen ausgeglichen werden kann.

### Nichtlineare Verzerrungen

Steuert man eine gekrümmte Kennlinie aus, so ist der Zusammenhang zwischen  $U$  und  $I$  nicht mehr linear. Bei Aussteuerung mit Wechselspannung bedeutet dies das Vorhandensein von Oberwellen, deren Amplituden von der Krümmung der Kennlinie und der Größe der Aussteuerung abhängen.

Als Maß für die Verzerrung wird der **Klirrfaktor**  $k$  definiert zu

$$k = \sqrt{\frac{u_2^2 + u_3^2 + \dots}{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + \dots}}$$

Darin sind  $u_1$  die Amplitude der Grundwelle ( $f$ ) und  $u_2, u_3, \dots$  die der ersten, zweiten usw. Oberwelle ( $2f, 3f, \dots$ ).

Betrachtet man nur die Verzerrung durch die erste Oberwelle, so spricht man vom quadratischen Klirrfaktor

$$k_2 = \sqrt{\frac{u_2^2}{u_1^2 + u_2^2}}$$

und entsprechend vom kubischen Klirrfaktor

$$k_3 = \sqrt{\frac{u_3^2}{u_1^2 + u_3^2}}$$

Den Gesamtklirrfaktor erhält man dann aus

$$k = \sqrt{k_2^2 + k_3^2 + \dots}$$

Die Amplituden der Oberwellen nehmen nach höheren Ordnungszahlen bei üblichen Röhren- oder Transistorkennlinien rasch ab, so daß im allgemeinen nur  $k_2$  und  $k_3$  in Betracht gezogen werden.

Der natürliche Logarithmus des Kehrwertes von  $k$  wird als **Klirrdämpfung**

$$a_k = \ln \frac{1}{k}$$

bezeichnet.

### Verzerrungen durch Modulation

In einem Frequenzgemisch wirken sich die durch **Intermodulation** entstandenen Verzerrungen physiologisch oft weit unangenehmer aus als der Klirrfaktor. Wird eine gekrümmte Kennlinie von zwei sinusförmigen Spannungen angesteuert, so entstehen Differenz- und Summenfrequenzen sowie sämtliche Oberwellen. Diesen Vorgang nennt man Intermodulation. Der sogenannte **Intermodulationsfaktor**  $m_i$  wird als Maß der Verzerrungen mit zwei Frequenzen  $f_1$  und  $f_2$  gemessen. Nach DIN 45300 geht man zu seiner Bestimmung von der oberen Frequenz  $f_2$  aus, die als mit  $f_1$  moduliert betrachtet werden kann. Es entstehen als Intermodulationsprodukte  $f_2 \pm f_1$ ,  $f_2 \pm 2f_1$ ,  $f_2 \pm 3f_1$  usw. Der Intermodulationsfaktor ist dann

$$m_i = \frac{\sqrt{(u_{f_2-f_1} + u_{f_2+f_1})^2 + (u_{f_2-2f_1} + u_{f_2+2f_1})^2 + \dots}}{u_{f_2}}$$

hierin ist z.B.  $u_{f_2-f_1}$  die Spannung der Differenzfrequenz  $f_2 - f_1$ .

In einer zweiten Definition wird das Verhältnis von  $u_{f_2-f_1}$  zu  $u_{f_2}$  oder  $u_{f_1}$  als ein Maß für die Intermodulationsverzerrungen betrachtet.

Ähnlich ist der **quadratische Differenztonfaktor** als der Quotient von

$$u_{f_2-f_1} / u_{f_1 + f_2}$$

definiert und der **kubische Differenztonfaktor** zu

$$u_{212-f1}/(u_{11} + u_{12}).$$

Während man den Begriff der Intermodulation in der Nf-Technik anwendet, hat man es in der Hf-Technik mit der **Kreuzmodulation** zweier Sender zu tun. Beim Aussteuern eines Verstärkers mit zwei benachbarten modulierten Signalen entsteht durch die nichtlineare Kennlinie ein Übersprechen der Modulation des einen Trägers auf den anderen und umgekehrt. Daher die Bezeichnung Kreuzmodulation. Der Grad der gegenseitigen Modulation hängt von der Krümmung der Kennlinie und vom Amplitudenverhältnis der modulierten Trägerspannungen ab. Als **Kreuzmodulationsfaktor**  $K$  bezeichnet man

$$K = \frac{\text{Nf-Spannung des Störsenders}}{\text{Nf-Spannung des gewünschten Senders}}$$

#### *Verzerrungen durch Magnetisierungskennlinie*

Bei der Aussteuerung eines Übertragers mit einem sinusförmigen Strom treten durch die nichtlineare Magnetisierungskennlinie Oberschwingungen auf, die entsprechend den Verzerrungen an nichtlinearen Kennlinien einen Klirrfaktor  $k$  der Spannung zur Folge haben. Im Gegensatz zu Röhren und Transistoren sind hier jedoch bei symmetrischer Kennlinie  $k_2, k_4, \dots$  verschwindend klein, es treten nur die **ungeradzahligen Oberschwingungen** mit  $k_3, k_5, k_7$  usw. auf, von denen meist nur  $k_3$  berücksichtigt zu werden braucht.

Bei kleiner Aussteuerung (weit unterhalb der Sättigung) kann die Magnetisierungsschleife als aus zwei Parabelbögen zusammengesetzt betrachtet werden; für  $k_3$  gilt dann:

$$k_3 = 0,26 \frac{H/H_D}{1 + H/H_D}.$$

Darin ist  $H$  die jeweilige Feldstärke und  $H_D$  die sogenannte Verdoppelungs-Feldstärke, bei der die Permeabilität  $\mu$  gleich der doppelten Anfangspermeabilität  $\mu_A$  wird ( $\mu = 2\mu_A$ ). Die weiteren Klirrfaktoren sind dann:

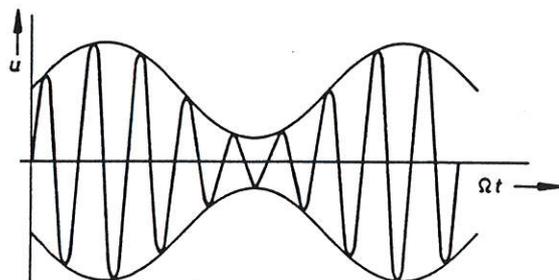
$$k_5 = \frac{k_3}{4}, \quad k_7 = \frac{k_3}{9}.$$

Wird eine Magnetisierungskennlinie mit Hysterese gleichzeitig von **zwei relativ weit voneinander entfernten Frequenzen** angesteuert, so tritt eine gegenseitige Beeinflussung auf, die unterschiedlich ist, je nachdem, welche der beiden Frequenzen die größere Amplitude hat. Hat die niederfrequente Schwingung die größere Amplitude, so wird die hochfrequente Schwingung von ihr an der Hystereseschleife verzerrt. Ist die hochfrequente Amplitude größer, so wird die Aussteuerkennlinie für die niederfrequente Schwingung linearisiert. Während die niederfrequente Schwingung die Induktivität einmal aussteuert, durchfährt die hochfrequente Schwingung die gleiche Kennlinie mehrmals, so daß sich für die Niederfrequenz eine mittlere Kennlinie ergibt, die nahezu gradlinig ist. Dieser Effekt wird z.B. bei Tonbandgeräten mit der Hf-Vormagnetisierung ausgenutzt.

### Modulation

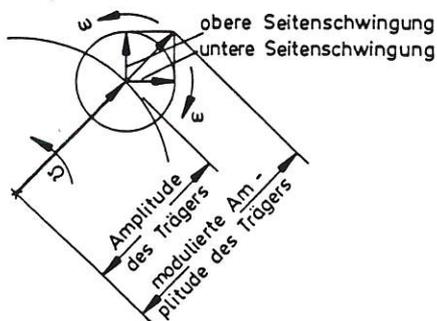
HF 3

#### 1. Amplitudenmodulation



amplitudenmodulierte Schwingung

Zeigerbild zur AM



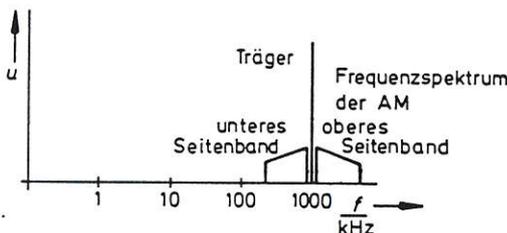
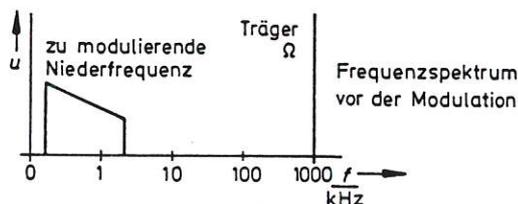
Zeitfunktion der AM :

$$u_{tr} = \hat{u}_T (1 + m \sin \omega t) \sin \Omega t \quad \text{mit} \quad m = \frac{\hat{u}_i}{\hat{u}_T}$$

Frequenzspektrum der AM :

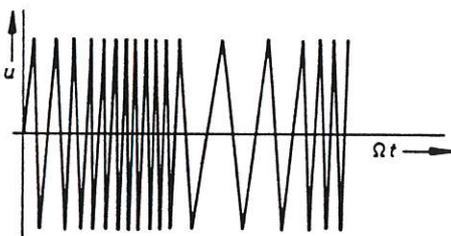
$$u_{tr} = \hat{u}_i \sin \Omega t + \frac{\hat{u}_i}{2} \cos(\Omega - \omega) t - \frac{\hat{u}_i}{2} (\cos \Omega + \omega) t$$

- $u_{tr}$  Spannung der modulierten Schwingung
- $\hat{u}_T$  Spannung der unmodul. Trägerschwingung
- $\hat{u}_i$  Spannung der Informationsspannung (NF)
- $m$  Modulationsgrad
- $\Omega$  Frequenz der Trägerschwingung
- $\omega$  Frequenz der Informationsspannung (NF)



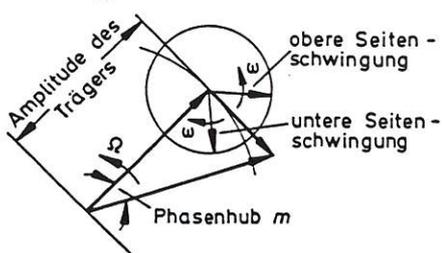
Schaltungen zur Modulation siehe bei Mischung

#### 2. Frequenzmodulation



frequenzmodulierte Schwingung

Zeigerbild zur FM



Zeitfunktion der FM:

$$u_{tr} = \hat{u}_T \sin \left( \Omega t + \frac{\Delta \Omega}{\omega} \sin \omega t \right) \quad m = \frac{\Delta \Omega}{\omega}$$

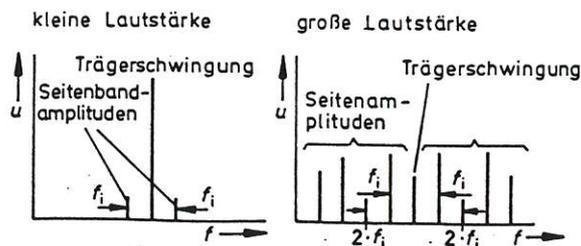
Frequenzspektrum :

$$u_{tr} = u \cdot \sum_{n=-\infty}^{+\infty} u_n(m) \sin(\Omega + n\omega) t$$

Bandbreite :  $b \approx 2(\Delta f + f_i)$

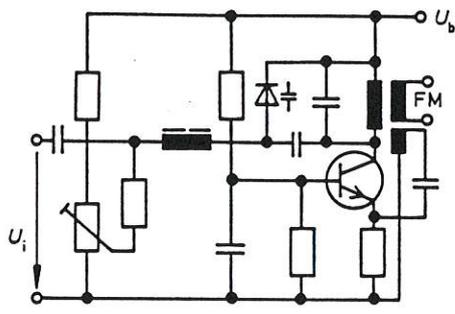
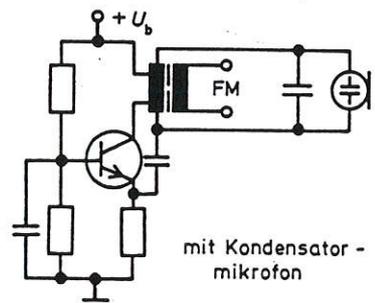
- $u_{tr}$  frequenzmodulierte Spannung
- $\hat{u}_T$  Amplitude der Trägerschwingung
- $\Omega$  Frequenz der Trägerschwingung
- $(\Delta \Omega), \Delta f$  (Kreis)-Frequenzhub
- $(\omega) f_i$  (Kreis)-Frequenz der Informationsspannung
- $m$  Modulationsindex

Frequenzspektrien der FM

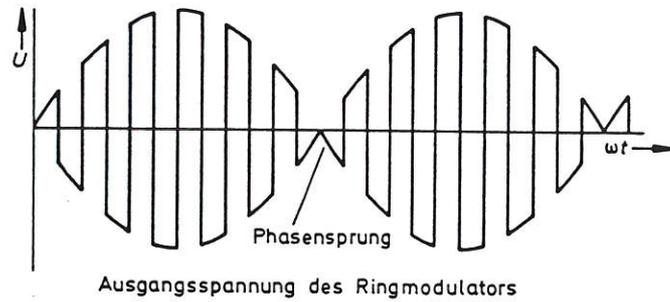


<b>Modulation</b>	<b>HF 4</b>
-------------------	-------------

**Frequenzmodulationsschaltungen**

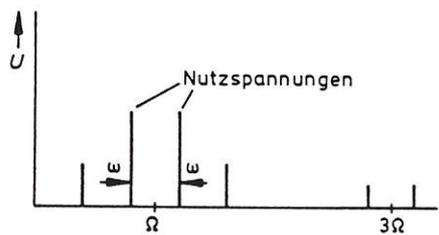


**3. Ringmodulator**

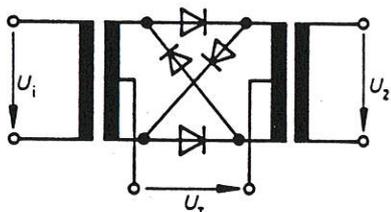


**Frequenzspektrum des Ringmodulators**

1.  $\Omega + \omega$
2.  $\Omega - \omega$
3.  $\Omega \pm 3\omega$
4.  $3\Omega \pm \omega$

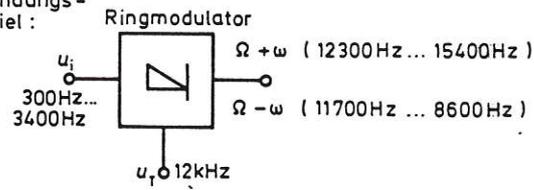


**Schaltung**

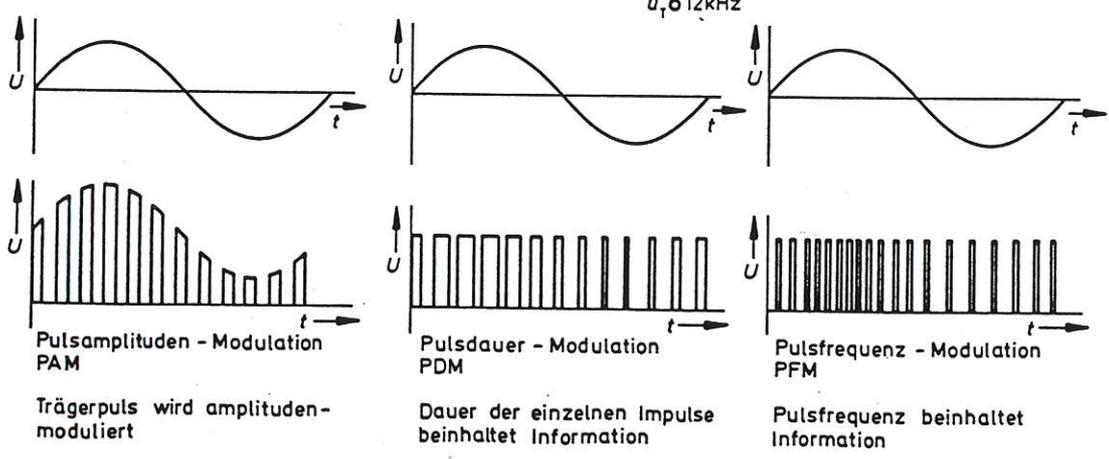


Signalspannung und Trägerspannung sind nicht mehr in der Ausgangsspannung des Ringmodulators enthalten

Anwendungs-  
beispiel:

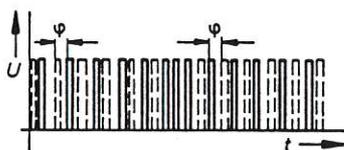
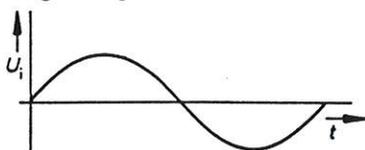


**4. Pulsmodulation**



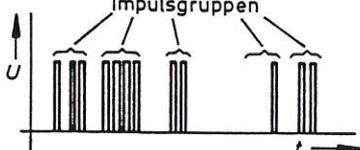
<b>Modulation</b>	<b>HF 5</b>
-------------------	-------------

**Ergänzung Pulsmodulation**



Pulsphasenmodulation PPM

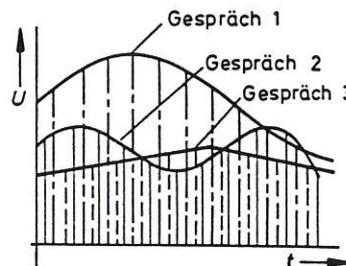
Veränderung der Phase der Grundschiwingung beinhaltet Information



Pulscode modulation PCM

Die codierten Impulsgruppen enthalten die Information

**Übertragung mehrerer Gespräche durch PAM**



**Im Funkdienst verwendete Sendarten:**

Die vollständige Bezeichnung umfaßt 4 Punkte:

- |               |                   |                    |                         |
|---------------|-------------------|--------------------|-------------------------|
| 1. Bandbreite | 2. Modulationsart | 3. Übertragungsart | 4. Zusätzliche Merkmale |
|---------------|-------------------|--------------------|-------------------------|

umfaßt das Frequenzband, das 99% der insgesamt ausgestrahlten Leistung umfaßt und die Frequenzen, deren Leistung mindestens 0,25% der ausgestrahlten Gesamtleistung betragen

Kennzeichen	Benennung
A	Amplitudenmodulation (AM)
F	Frequenz- (oder Phasen-)modulation (FM)
P	Pulsmodulation (PM)

Kennzeichen	Benennung
0	ohne Modulation
1	Telegrafie ohne Modulation
2	Telegraphie durch Tasten der Modulationsfrequenzen
3	Fernsprechen
4	Bildfunk
5	Fernsehen
6	Vierfrequenz-Duplex-Telegrafie
7	Tonfrequente Mehrfachtelegrafie
9	gemischte Übertragungen und andere Fälle

Kennzeichen	Benennung
ohne Kennzeichen	Zweiseitenband
A	Einseitenband mit vermindertem Träger
B	Zwei voneinander unabhängige Seitenbänder mit vermindertem Träger
C	Restseitenband
D	Pulsamplitudenmodulation (PAM)
E	Pulsdauermodulation (PDM)
F	Pulsphasenmodulation (PPM)
G	Pulscode modulation (PCM)
H	Einseitenband mit vollem Träger
I	Einseitenband mit unterdrücktem Träger

**Sendarten und Bandbreiten**

Kennzeichen	Sendart	Bandbreite
A 1	Telegrafie ohne Modulation	
	Verbindung ohne Fading	$f = 3 \cdot B$
	Verbindung mit Fading	$f = 5 \cdot B$
A 2	Telegrafie mit Tastung der Modulation	
	Verbindung ohne Fading	$f = 3 \cdot B + 2 M$
	Verbindung mit Fading	$f = 5 \cdot B + 2 M$
A 3	Telefonie, Rundfunk	
	Zweiseitenbandübertragung	$f = 2 M$
A 3A	Einseitenbandübertragung	$f = M$
A 4	Bildfunk	$f = 1,5 \cdot \frac{N}{T} + 2 M$
A 5	Fernsehen	$f = 1,5 \cdot \frac{N}{T}$
F 1	Telegrafie mit Frequenzumtastung	
	Verbindung ohne Fading	$f = 3 \cdot B + D$
	Verbindung mit Fading	$f = 5 \cdot B + D$
F 3	Telefonie, Tonrundfunk	$f = 2 M + (1 \dots 2) \cdot D$
F 4	Bildfunk	$f = 1,5 \cdot \frac{N}{T} + 2 M + D$
P 0	nicht modulierte Impulse	$f = \frac{(2 \dots 12)}{t}$

- B** Telegrafiergeschwindigkeit in Baud  
1 Baud = 1 je Sekunde gesendetes kürzestes Elementarzeichen
- M** Höchste Modulationsfrequenz in Hz
- t** Impulsdauer in Sekunden
- D** Frequenzhub: Differenz zwischen dem Höchst- und dem Mindestwert der Augenblicksfrequenz
- $\frac{N}{T}$  Höchstmögliche Anzahl schwarzer und weißer Bildelemente je Sekunde bei Bildfunk und Fernsehen