

# Die Tonübertragung mit Infrarotlicht für Hörbehinderte

Hans Joachim Griese

*Zusammenfassung Das Übertragungsmedium Licht – vielleicht das älteste Kommunikationsmittel der Menschheit überhaupt – wird in Zukunft eine große Bedeutung in der Nachrichtentechnik erlangen. Dünne Glasfaserstränge treten an die Stelle schwerer Kupferkabel. Über Laserstrahlen wird man Richtfunkverbindungen betreiben und anderes mehr. Während sich diese Anwendungen heute alle noch in der Erprobung befinden, gibt es bereits praktische Anwendungen der Lichtübertragung in der Hörgeräte-Akustik. Es sind dies hier insbesondere Anlagen für Schulen hörgeschädigter Kinder, aber auch solche für die häusliche Sphäre, zum Empfang des Fernsehtones oder allgemein zur Erleichterung der Kommunikation. Hier wird weitgehend mit freier Strahlung gearbeitet, wobei man danach strebt, den Schul- oder Wohnraum mit moduliertem Licht so weitgehend auszuleuchten, daß überall ein ausreichender Empfang möglich ist.*

*Der folgende Beitrag befaßt sich mit tragbaren Sendern und ist als Ergänzung zu den Arbeiten des gleichen Autors gedacht, die in Heft 4 bzw. 5 der »Zeitschrift für Hörgeräte-Akustik« 1978 erschienen sind.*

## Impulstechnik

Die bereits beschriebene kontinuierliche Frequenzmodulation ist nicht mehr optimal, wenn tragbare Sender zum Einsatz kommen sollen und es auf das Batterievolumen ankommt.

Der Wirkungsgrad der Luminiszenzdioden ist nicht wesentlich kleiner als der Antennenwirkungsgrad eines drahtlosen Mikrofons, das mit ultrakurzen Wellen arbeitet. Die Übertragungsdämpfung ist jedoch deshalb sehr groß, weil die Empfangsflächen so klein sind. Die üblicherweise verwendeten PIN-Silizium-Photodioden haben eine Fläche von etwa 8 mm<sup>2</sup>. Das ist zu vergleichen mit der Empfangsfläche einer UKW-Antenne, die in der Größenordnung von einem Quadratmeter liegt. Man kann natürlich mehrere Empfangsdioden vorsehen oder solche größerer Fläche. Beides wird dann aber recht teuer. Auf die Vergrößerung der Empfangsfläche durch die Kugellinse wurde bereits hingewiesen. Wirkungsvollere Optiken stehen zur Zeit noch nicht zur Verfügung.

Ein anderer für die Lichtübertragung ungünstiger Umstand ist das durch Umgebungslicht hervorgerufene verhältnismäßig hohe Schrotrauschen der Empfangsdiode. In Abbildung 1 ist eine einfache Empfangsschaltung dargestellt.

Am Arbeitswiderstand R tritt ein Wärmerauschen auf, das sich bekanntlich nach der Formel

$$\bar{U}_w = \sqrt{k \cdot T \cdot R \cdot \Delta f}$$

berechnet.

Darin ist k die Boltzmannsche Konstante, T die absolute Temperatur und  $\Delta f$  die Bandbreite des angeschlossenen Verstärkers.

## Pulse technique

Continuous frequency modulation previously described is no longer optimum when portable transmitters are to be used and the battery size is critical.

The efficiency of luminescence diodes is not significantly smaller than the antenna efficiency of a wireless microphone which works with ultrashort waves. Transmission is, however, attenuated to a very large extent because the receiving surfaces are so small. The PIN-silicon photodiodes normally used have an area of approx. 8 mm<sup>2</sup>. This should be compared with the receiving area of an UHF antenna which is in the order of magnitude of a square meter. It is possible naturally to provide several receiving diodes or diodes with larger areas. Both of these solutions would be extremely expensive. Enlarging the receiving surface by using a spherical lens has already been referred to. More effective optical systems are not yet available at present.

Another unfavourable condition for light transmission is the relatively high receiving diode shot noise caused by the ambient light. A simple receiving circuit is illustrated in Fig. 1.

Thermal noise occurs in the working resistance R, which can be calculated according to the well-known formula

$$\bar{U}_w = \sqrt{k \cdot T \cdot R \cdot \Delta f}$$

where k is the Boltzmann constant, T the absolute temperature and  $\Delta f$  the bandwidth of the connected amplifier.

In addition, shot noise also occurs in the working resistance R caused by the statistically irregularly impinging light quanta and which can be calculated in the

# Sound Transmission with Infrared Light for the Hearing Impaired

**Summary** *The transmission medium light – perhaps the oldest means of communication ever used by man – will achieve great significance in the future in communications technology. Thin glassfiber rods take the place of heavy copper cables. Using laser beams, one will operate microwave links and the like. Whilst these applications are today still at the proving stage, practical applications in hearing-aid acoustics are already available. In particular installations for schools for children with defective hearing are referred to but also those for domestic use, for reception of television sound or generally for enhancing communication. Here free radiation is generally used although endeavours are made to illuminate the school or living room with modulated light so extensively that adequate reception is possible everywhere.*

*The following contribution is concerned with portable transmitters and is conceived as a supplement to the studies of the same author which appeared in issues 4 and 5 of "Journal of Audiological Technique" in 1978.*

Zusätzlich tritt am Arbeitswiderstand  $R$  aber noch das Schrotrauschen auf, das durch die statistisch unregelmäßig einfallenden Lichtquanten verursacht wird und wie das Rauschen einer Hochvakuumdiode im Sättigungsbereich berechnet werden kann:

$$\bar{U}_s = R \cdot \sqrt{q_0 \cdot I_0 \cdot \Delta f}$$

Darin ist  $I_0$  der durch die Diode fließende Gleichstrom, der im wesentlichen vom Umgebungslicht abhängig ist, und  $q_0$  die Elementarladung.

Bei der praktischen Dimensionierung der Eingangsschaltung des Empfängers ist es nun so, daß im allgemeinen mehr Schrotrauschen als Wärmerauschen auf-

same way as the noise of a high-vacuum diode in its saturation region from:

$$\bar{U}_s = R \cdot \sqrt{q_0 \cdot I_0 \cdot \Delta f}$$

where  $I_0$  is the direct current flowing through the diode, which is essentially dependent upon the ambient light, and  $q_0$  is the elemental charge.

By virtue of the practical dimensions of the input circuit of the receiver, it is generally the case that more shot noise occurs than thermal noise and the thermal noise can usually be neglected.

The receiver photodiode can be regarded as a sort of relay in which a corresponding current is excited

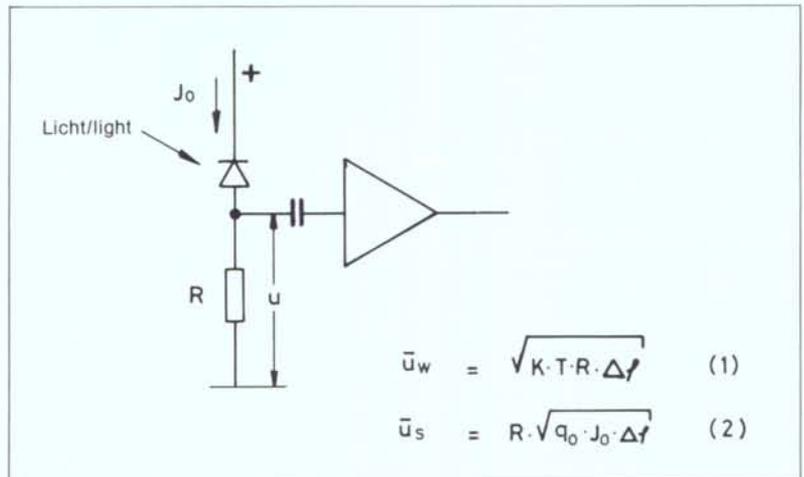


Abb. 1 Wärmerauschen und Schrotrauschen eines Empfängers für Übertragungen mit Licht

Fig. 1 Thermal noise and shot noise of a receiver for light transmissions

tritt und meist das Wärmerauschen vernachlässigt werden kann.

Die Photodiode des Empfängers kann als eine Art Relais angesehen werden, in dem durch die einfallenden Lichtquanten ein entsprechender Strom gesteuert wird. Das gilt für das Störlicht und das Nutzlicht.

Geht man zu einer Impulstechnik über, so kann bei gleichem mittleren Stromverbrauch der Spitzenstrom der Sendedioden proportional zum Tastverhältnis gesteigert werden. Die Spannung an den Sendedioden bleibt nahezu konstant. Proportional zum Spitzenstrom der Sendedioden ist auch der Spitzenstrom der Empfangsdioden. Nun muß man natürlich mit dem Tastverhältnis auch die Bandbreite des Verstärkers vergrößern, so daß man durch die Impulstechnik nur eine Verbesserung erhält, die etwa proportional zur Wurzel aus dem Tastverhältnis ist. Geht man davon aus, daß mit den heutigen Lumineszenzdioden guten Wirkungsgrades minimale Impulsbreiten von  $1 \mu\text{s}$  noch gut zu erreichen sind und eine Impulsfrequenz von 20 kHz ausreichend ist, so erhält man ein Tastverhältnis von 1:50 und eine Überlegenheit der Impulstechnik hinsichtlich des notwendigen Batterievolumens des Senders von rund 7. Dies ist natürlich nur eine ganz grobe Abschätzung, auf Einzelheiten soll hier jedoch nicht näher eingegangen werden.

Von den Impulsmodulationen kommen eigentlich nur die Zeitmodulationen in Frage. Die Pulsamplitudenmodulation hat keine ausreichenden störbefreienden Eigenschaften. Die mit Quantisierungen arbeitenden Modulationen erfordern stets zahlreiche Impulse je Abtastwert und geben so keine Ersparnis an Batteriestrom.

Die einfachste Modulationsart ist die Impulsfrequenzmodulation, die außerdem einen besonders hohen Störabstand liefert. Der Störabstand ist natürlich um so größer, je größer der Frequenzhub gewählt wird. Um im unmodulierten Zustand nur eine möglichst tiefe Im-

through the impinging light quanta. This is true both for the interference light and the useful light.

If impulse technique is adopted, then with the same mean current consumption the peak current of the transmitter diodes can be increased in proportion to the pulse-time ratio. The transmitter-diode voltage remains in this case practically constant. The peak current of the receiver diode is also proportional to the peak current of the transmitter diode. Naturally one has to increase the bandwidth of the amplifier along with the pulse-time ratio so that the improvement obtained through pulse technique is only proportional to the root of the pulse-time ratio. If it is assumed that with present-day luminescent diodes of good efficiency a minimum pulse width of  $1 \mu\text{s}$  can be obtained without difficulty and a pulse frequency of 20 kHz is adequate, then a pulsetime ratio of 1:50 is obtained and pulse technique is superior with reference to the necessary battery size of the transmitter by a factor of approx. 7. This is naturally only a very rough approximation and it is not possible to go into greater detail here.

In fact only time modulation can be considered from amongst the various types of pulse modulation. Pulse-amplitude modulation does not possess adequate interference elimination properties. Modulating methods working with quantization always require numerous pulses per modulation value and therefore offer no saving in battery current.

The most simple type of modulation is pulse-frequency modulation which, in addition, provides a specially high noise-to-signal ratio. The signal-to-noise ratio is naturally all the higher, the higher the frequency shift is chosen. In order to necessitate transmitting only the lowest possible pulse frequency in the unmodulated condition and nevertheless to make possible large frequency shift, the type of modulation illustrated in Fig. 2 was chosen for a practical installation. In this case not

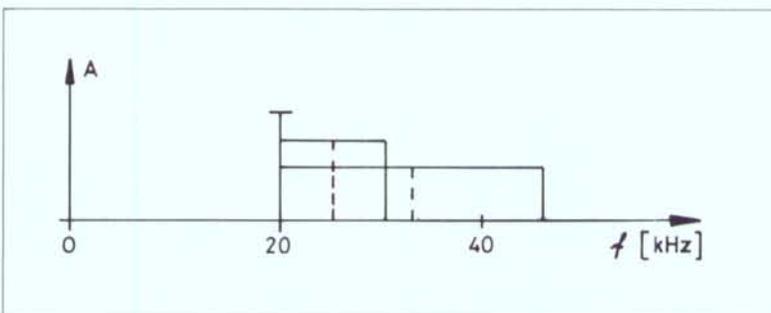


Abb. 2 Schema der Frequenzmodulation, bei der nicht die Mittenfrequenz, sondern die minimale Frequenz konstant gehalten wird

Fig. 2 Diagram of frequency modulation by which not the mean frequency but the minimum frequency is kept constant

Abb. 3 Schaltungsanordnung zur Erzielung der besonderen Frequenzmodulation nach Abb. 2

Fig. 3 Circuit arrangement to achieve the special frequency modulation according to Fig. 2

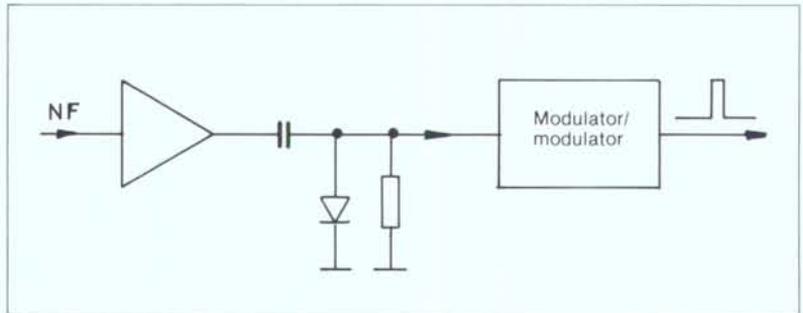
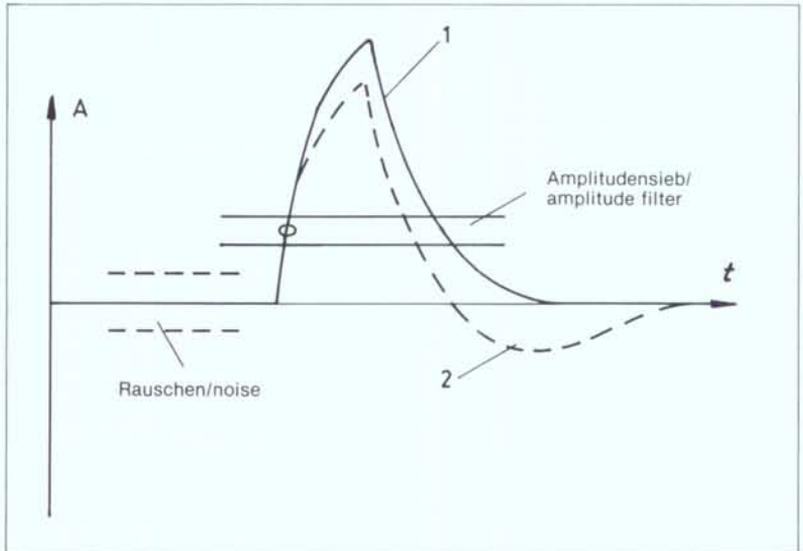


Abb. 4 Auswertung des steilen Teils der Vorderflanken der Impulse durch ein Amplitudensieb und Impulsverformung durch einen nach tiefen Frequenzen abfallenden Frequenzgang des Verstärkers

Fig. 4 Utilization of the steep part of the leading edge of the pulse through an amplitude filter and pulse distortion through an amplifier frequency response falling with low frequencies



pulsfrequenz ausstrahlen zu müssen und trotzdem große Frequenzhübe zu ermöglichen, wird bei einer ausgeführten Anlage die in Abbildung 2 dargestellt Modulationsart gewählt. Hierbei wird nicht die Mittenfrequenz konstant gehalten, sondern die minimale Frequenz. Schaltungstechnisch ist das sehr einfach zu bewerkstelligen, indem man dem Modulator eine Kombination einer Diode mit einem Kondensator und einem Widerstand vorschaltet (Abbildung 3). Bei niederfrequenter Ansteuerung verändert sich die Ladung des Kondensators, und es verschiebt sich die mittlere Impulsfrequenz nach höheren Werten. Der Vorgang bleibt bei geeigneter Dimensionierung der Schaltelemente unhörbar. Auf der Empfangsseite wird ein Zähldiskriminator verwendet, der eine Spannung abgibt, die der Zahl der Impulse pro Zeiteinheit proportional ist. Die übertragene niederfrequente Bandbreite beträgt ca. 8 kHz.

the mean frequency was kept constant but the minimum frequency. This is very easy to accomplish with regard to circuit design by interposing a diode with a capacitor and a resistance before the modulator (Fig. 3). With low-frequency excitation, the capacitor charge changes and the mean pulse frequency is shifted to higher values. This process remains inaudible when the circuit elements are suitable dimensioned. A count discriminator is used at the receiving side which generates a voltage proportional to the number of pulses per unit time. The low-frequency bandwidth transmitted amounts to approx. 8 kHz.

Before the pulses can be counted, they must be freed from noise as far as possible. An amplitude filter in the receiver serves this purpose. Since the noise possesses a statistical amplitude distribution, it is necessary to set the lower threshold of the amplitude filter sufficiently

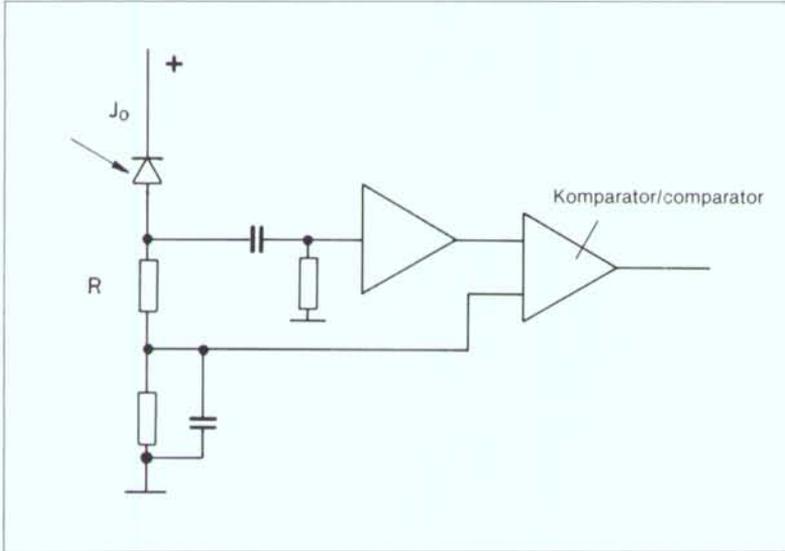


Abb. 5 Steuerung der Komparatorschwellen durch das Umgebungslicht

Fig. 5 Controlling the comparator thresholds by means of the ambient light

Bevor eine Impulszählung durchgeführt werden kann, müssen die Impulse vom Rauschen so weit wie möglich befreit werden. Hierzu dient ein Amplitudensieb im Empfänger. Da das Rauschen eine statistische Amplitudenverteilung aufweist, ist es nötig, die untere Schwelle des Amplitudensiebes genügend hoch zu legen. Andernfalls werden Rauschspitzen mitgezählt, was zu einem unangenehmen niederfrequenten Geräusch führt. Man legt die Schwelle beispielsweise auf etwa den fünffachen Wert des Effektivwertes des Rauschens. Abbildung 4 zeigt die empfangenen Impulse und die Schwellen des Amplitudensiebes, die durch einen Komparator realisiert werden. Die Impulsform 1 wird durch die Eigenschaften der Luminiszenzdiode selbst hervorgerufen. Die Impulsform 2 entsteht durch die Absenkung der tiefen Frequenzen, auf die noch eingegangen wird. Für die Impulszählung wird der steile Teil der Vorderflanke ausgewertet.

Es wurde darauf hingewiesen, daß das Rauschen fast ausschließlich vom Störlicht abhängig ist und damit eine sehr unterschiedliche Amplitude haben kann. Vom Störlicht ist nun wiederum der durch die Photodiode fließende Gleichstrom abhängig. Es ist deshalb zweckmäßig, die Schwellen des Amplitudensiebes vom mittleren Strom durch die Diode abhängig zu machen. Das kann im einfachsten Falle auf die in Abbildung 5 dargestellte Weise erfolgen. Der Gleichstrom der Diode durchfließt ein RC-Glied. Die daran anfallende Spannung steuert die Schwellen des Komparators.

Die hier angewandte Technik weicht von der sonst in

high. Otherwise, noise peaks are counted which leads to unpleasant low-frequency noise. The threshold is for example set at about five times the effective value of the noise. Fig. 4 illustrates the received pulse and the amplitude-filter thresholds which are achieved by a comparator. The pulse shape 1 is caused by the properties of the luminescence diode itself. Pulse form 2 arises through sinking the low frequencies; this will be dealt with later on. The steep part of the leading edge is utilized for pulse counting.

Attention is drawn to the fact that the noise depends almost exclusively upon the interference light and can therefore have a widely varying amplitude. The direct current flowing through the photodiode is in turn dependent upon the interference light. It is therefore appropriate to make the amplitude-filter thresholds dependent upon the mean current through the diode. This can be brought about in the simplest case in the way illustrated in Fig. 5. The diode direct current flows through an RC link. The voltage arising there controls the comparator thresholds.

The technique applied here deviates from that usually found in pulse circuits. In general, a control circuit is used with which the pulse peaks are first of all brought to a constant amplitude and the comparator thresholds are set to the half height. The new technique was developed with special reference to the transponder, a light-pulse amplifier, which will be discussed later on.

Interference caused by the ambient light occur in the form of strong pulses under certain circumstances.

der Impulstechnik üblichen ab. Im allgemeinen wird eine Regelschaltung verwendet, mit der zunächst die Impulsspitzen auf konstante Amplituden gebracht werden, und die Komparatorschwellen werden auf die halbe Impulshöhe eingestellt. Die neue Technik wurde insbesondere in Hinsicht auf den noch zu behandelnden Transponder, einen Lichtimpulsverstärker, entwickelt.

Die Störungen durch das Umgebungslicht sind unter Umständen stark impulsartig. Dies trifft insbesondere für Leuchtstoffröhren zu, die scharfe 100-Hz-Lichtimpulse erzeugen. Um Störungen durch die Impulse zu vermeiden, ist es zweckmäßig, den Frequenzgang des Impulsverstärkers nach tiefen Frequenzen zu begrenzen. Das führt natürlich auch zu Verformungen der Nutzpulse, die durch verschiedene Maßnahmen, auf die hier nicht näher eingegangen werden soll, hinreichend klein gehalten werden müssen. Die ungefähre Form ist in Abbildung 4 bereits dargestellt.

Die Impuls-Frequenzmodulation ermöglicht es, in einem normalen Klassenraum eine Übertragung vom Lehrer zu den Schülern auch dann vorzunehmen, wenn ungünstige Verhältnisse vorliegen, der Lehrer sich beispielsweise der schwarzen Wandtafel zuwendet und der Schüler durch seinen Vordermann abgeschattet ist. Der Lehrersender ist nicht groß (Abbildung 6) und die Betriebszeit für eine Akkuladung beträgt ca. 6 Stunden.

Für große Räume, beispielsweise Hörsäle, muß jedoch noch eine Lichtverstärkung durch einen sogenannten Transponder vorgenommen werden. Transponder bestehen gewöhnlich aus einem Empfangs- und einem Sendeteil, wobei für Empfang und Sendung unterschiedliche Frequenzen verwendet werden, also ein Frequenzversatz vorgenommen wird (Umsetzer). Bei der Tonübertragung mit Lichtimpulsen kann man nun ohne Frequenzversatz arbeiten. Sieht der Transponder einen Lichtimpuls des Lehrersenders (Primärimpuls), so zündet er einen eigenen wesentlich stärkeren Sekun-

This occurs especially with luminescent tube lamps which generate sharp 100-Hz light pulses. In order to avoid interference through these pulses, it is advisable to limit the frequency response of the pulse amplifier at low frequencies. This naturally leads also to distortions of the effective pulses, which have to be kept sufficiently small through various means which cannot be described here in detail. The approximate shape is illustrated in Fig. 4.

Pulse-frequency modulation makes it possible for transmissions between teacher and pupils to be made in a normal classroom even when unfavourable conditions prevail, for example, the teacher turns towards the blackboard and the pupil is masked by the one in front. The teacher's transmitter does not have to be large (Fig. 6) and the time for recharging the battery amounts to approx. 6 hours.

For large rooms, however, for example lecture theatres, the light must be amplified by means of a so-called transponder. Transponders normally consist of a receiver and a transmitter whereby differing frequencies are used for reception and transmission so that a frequency shift takes place (frequency changer). It is possible with sound transmission using light pulses to work without frequency shifting. If the transponder detects a light pulse from the teacher's transmitter



Abb. 6 Ansicht des Lehrersenders. Außer dem Elektret-Mikrofon ist eine Klinkerbuchse vorgesehen, um auch elektrische Signale beispielsweise von einem Tonbandgerät einspeisen zu können.

Fig. 6 View of the teacher's transmitter. Apart from the Electret microphone, a jack socket is provided in order to be able to feed in electrical signals, for example, from a tape recorder.

därimpuls. Bei der hohen Lichtgeschwindigkeit und der großen Bandbreite des Empfängerverstärkers des Transponders spielt sich das alles so schnell ab, daß Primärimpuls und Sekundärimpuls nahezu zeitgleich sind und miteinander verschmelzen.

Der Transponder wird lediglich an die Lichtleitung angeschlossen und liefert Lichtimpulse mit einer Energie, die ein Vielfaches der Energie des Lehrersenders sind. Hinzu kommt der Vorteil, daß man den Empfangsteil des Transponders besonders empfindlich machen kann und der Raum durch Lehrersender und Transponder, also von zwei Stellen, besser ausgeleuchtet wird, als dies von einer einzigen Stelle aus möglich wäre. Einen solchen Transponder zeigt Abbildung 8.

Statt eines Transponders können auch beliebig viele verwendet werden. Es ist gleichgültig, welcher Transponder den Primärimpuls zuerst erkennt. Wenn ein Transponder seinen Sekundärimpuls abgibt, zünden in Art einer Kettenreaktion alle übrigen. Es ist auch gleichgültig, welche Impulsmodulation verwendet wird, er liefert einfach zu jedem ankommenden Impuls einen zeitgleichen, aber wesentlich stärkeren.

Der Transponder soll natürlich nur dann Impulse abgeben, wenn er empfangswürdige Primärimpulse erhält. Das bedeutet, daß der Schülerempfänger zeitwei-

(primary pulse) then it triggers its own considerably stronger secondary pulse. Because of the high velocity of light and the large transponder receiver amplifier bandwidth, this takes place so quickly that the primary and secondary pulse are practically simultaneous and merge into one another.

The transponder is simply connected to the mains and delivers light pulses at an energy which is many times the energy of the teacher's transmitter. In addition, there is the advantage that the receiver part of the transponder can be made particularly sensitive and that the room is better illuminated by the teacher's transmitter and the transponder, that is from two positions, than would be possible from a single position. Such a transponder is illustrated in Fig. 8.

Any number of transponders can be used instead of a single one. It is immaterial which transponder reacts at first to the primary pulse. When one transponder delivers its secondary pulse, all others trigger in the form of a chain reaction. It is also immaterial which type of pulse modulation is used. The transponder simply delivers a simultaneous but markedly stronger pulse for each pulse received.

Of course the transponder should only produce pulses when it receives a primary pulse suitable for reception.



Abb. 7 Ansicht des Schülerempfängers. Auch der Empfänger ist mit einem Elektretmikrofon versehen und gleichzeitig ein akustisches Hörgerät. Durch den seitlichen Schalter kann man wählen, ob das Mikrofon dauernd zugeschaltet werden soll oder ob es automatisch nur dann eingeschaltet werden soll, wenn aus irgendwelchen Gründen die Lichtübertragung unterbrochen ist.

Fig. 7 View of the pupil's receiver. The receiver is also provided with an Elektret microphone and at the same time an acoustic hearing aid. One can choose, by means of the switch on the side, if the microphone should be permanently switched on or if it should only be switched on automatically when the light transmission is interrupted for any reason.

Abb. 8 Ansicht des Transponders. Die Empfangsdioden befinden sich unter den unteren Abdeckkappen und zünden bei jedem empfangenen Lichtimpuls einen wesentlich stärkeren Lichtimpuls der Sendedioden unter den oberen Abdeckkappen.

Fig. 8 View of the transponder. The receiving diodes are situated under the lower cap and at each light pulse received trigger a considerably stronger light pulse from the transmitting diodes under the upper cap.



se große Transponderimpulse oder plötzlich auch nur die schwachen Lehrerimpulse erhält. Hieraus wird deutlich, daß auf die Impulsspitzen nicht geregelt werden kann, sondern im wesentlichen nur auf das Umgebungslicht.

Abbildung 7 zeigt den Empfänger, der die gleiche Größe wie der Sender aufweist und durch ein eingebautes Mikrofon auch ein normales Hörgerät darstellt.

This means that the pupil's receiver at times picks up large transponder pulses or suddenly only the weak teacher's pulses. It is clear from this that noise cannot be controlled in relation to the pulse peaks but only essentially according to the ambient light.

Fig. 7 illustrates the receiver which has the same size as the transmitter and also constitutes a normal hearing aid by virtue of its built-in microphone.