

19



Europäisches Patentamt
European Patent Office
Office européen des brevets



11 Veröffentlichungsnummer: **0 641 143 A2**

12

EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG

21 Anmeldenummer: **94112549.4**

51 Int. Cl.⁶: **H04R 5/033**

22 Anmeldetag: **11.08.94**

30 Priorität: **26.08.93 DE 4328620**

71 Anmelder: **AKG Akustische u. Kino-Geräte Gesellschaft m.b.H.**
Lemböckgasse 21-25
A-1230 Wien (AT)

43 Veröffentlichungstag der Anmeldung:
01.03.95 Patentblatt 95/09

72 Erfinder: **Opitz, Martin Dipl.-Ing.Dr.Techn.**
Hackenberggasse 29/12/3
A-1190 Wien (AT)

84 Benannte Vertragsstaaten:
AT DE DK FR GB NL SE

74 Vertreter: **Rüger, Rudolf, Dr.-Ing. et al**
Rüger & Barthelt,
Postfach 348,
Webergasse 3
D-73704 Esslingen (DE)

54 **Verfahren zur Simulation eines Raum- und/oder Klangeindrucks.**

57 Bei einem Verfahren zur Simulation des Klang- und/oder Höreindrucks an einem repräsentativen Hörplatz wird, getrennt für das linke und das rechte Ohr, die Raumimpulsantwort $h(n)$ ermittelt. Dabei ist es gleichgültig, ob der Raum ein tatsächlich existierender realer Raum oder ein virtueller Raum ist.

Von der ermittelten Raumimpulsantwort $h(n)$ werden sodann nur jene Anteile verwertet, die für

den Klangeindruck maßgeblich sind, d.h. Anteile der Raumimpulsantwort $h(n)$, die kleiner als eine vorgegebene Schwelle sind, werden ignoriert. Hierdurch vereinfacht sich wesentlich der schaltungstechnische Aufwand, um das wiederzugebende elektroakustische Signal mit der betreffenden Raumimpulsantwort zu falten.

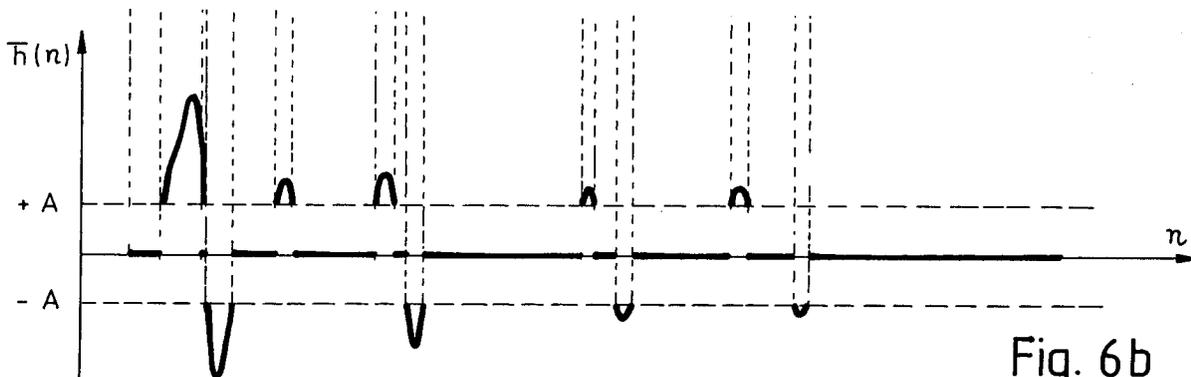


Fig. 6b

EP 0 641 143 A2

Die Erfindung betrifft ein Verfahren mit dazu erforderlicher elektroakustischer Einrichtung zur Erzeugung eines Raum- und/oder Klangeindrucks von einem tatsächlich vorhandenen oder auch berechneten Raum, wobei als Hörprogramm ein beliebig monophones, stereophones oder vielkanaliges Audioprogramm verwendbar ist. Die Wiedergabe erfolgt vorzugsweise binaural über Kopfhörer, kann aber auch über Lautsprecher durchgeführt werden.

Jedes produzierte Audioprogramm enthält im allgemeinen die bei der Aufnahme vorhandene Raumakustik, die allerdings bei den bisher bekannten stereophonen Wiedergabeverfahren in ihrer Feinstruktur nie vollständig erkennbar wiedergegeben werden konnte. Mehr als daß die Aufnahme in einem Raum mit bestimmtem Nachhall entstanden ist, ließ sich bei der Wiedergabe vom Zuhörer nicht feststellen. Erst zusätzliche Maßnahmen mit dazu entsprechenden elektroakustischen Einrichtungen könnten bessere Hörbedingungen schaffen, die den Zuhörer dann auch den Raum der Programmaufnahme wiedererkennen lassen.

Eine originalgetreue Simulation raumakustischer Geschehnisse ist beispielsweise durch die Faltung eines beliebigen Audioprogrammes mit der binauralen Raumimpulsantwort gemessen an einem bestimmten Empfangsplatz in einem Raum, durchführbar. Unter binauraler Raumimpulsantwort werden zwei Impulsantworten verstanden, wobei die eine Impulsantwort dem einen Ohr und die andere Impulsantwort dem anderen Ohr zugeordnet ist. Gemäß den Erkenntnissen aus der Systemtheorie bildet der Raum zusammen mit den Empfangscharakteristika des menschlichen Ohres ein lineares kausales Übertragungssystem, das im Zeitbereich durch die Raumimpulsantworten beschrieben ist. Die jeweilige Raumimpulsantwort ist näherungsweise die Systemantwort auf einen Schallimpuls, dessen Zeitdauer eine Periode der doppelten oberen Grenzfrequenz des Audiosignals ist. Die Faltung eines beliebigen Audioprogramms mit der binauralen Raumimpulsantwort ergibt das zur elektroakustischen Wiedergabe geeignete Signal, das solchermaßen ausgeprägt ist, daß bei richtiger Schallwiedergabe an den beiden Ohren einer Hörperson bei dieser ein solches Hörerlebnis hervorgerufen wird, wie es am Originalhörort, an dem das tatsächliche raumakustische Geschehen stattfindet, von derselben Hörperson erlebt worden wäre. Der Hörperson wird es dadurch unmöglich zu unterscheiden, ob das von ihr wahrgenommene Hörereignis am Ort des tatsächlichen Schallgeschehens erfolgt, oder ob es durch das Simulationsverfahren entsteht. Werden zur Wiedergabe nicht Kopfhörer sondern Lautsprecher verwendet, müssen in grundsätzlich gleicher Weise die Übertragungswege zwischen den Lautsprechern und den Ohren der Hörperson nachgebildet werden.

Ein solches Simulationsverfahren, das der Hörperson die am Originalhörort tatsächlich vorhandenen zeitlichen, spektralen, räumlichen und dynamischen Schallfeldstrukturen unverkennbar präzise vortäuscht, ist äußerst aufwendig, vor allem was die zur Simulation erforderlichen technischen Einrichtungen anbelangt. Im allgemeinen wird die Faltung in der Weise durchgeführt, daß das Audiosignal und die Raumimpulsantworten digitalisiert werden, in einem Rechner das gefaltete Signal berechnet und in das analoge Signal zurückgewandelt wird. Die Anzahl der Rechenschritte ist von der Länge der Impulsantworten abhängig. Zum Beispiel sei hier angeführt, daß bei einer Audiosignalfrequenz von 20 kHz etwa eine Abtastrate von 50 kHz und damit ein Abtastintervall von 20 μ sec notwendig ist und daher für eine typische Raumimpulsantwortlänge von 2 sec 10^5 Abtastwerte benötigt werden und weiters bei der Faltung eines Audiosignals mit dieser Raumimpulsantwort $5 \times 10^4 \times 10^5 = 5 \times 10^9$ Multiplikationen und Additionen pro Sekunde durchgeführt werden müssen. Das bedeutet, daß der apparative Aufwand zur Faltung mit einem Audiosignal enorm groß sein muß, vor allem dann, wenn der gesamte Ablauf des Verfahrens in Echtzeit erfolgen soll. Daher ist die außerhalb des Forschungsbereiches liegende Anwendung eines solchen Simulationsverfahrens aus wirtschaftlichen und preislichen Gründen nicht denkbar.

Eine elektroakustische Anordnung zur nahezu originalgetreuen Simulation einer an einem bestimmten Hörplatz vorhandenen Hörsituation ist für die Wiedergabe von stereophonen binauralen Audioprogrammen mittels Kopfhörer in der AT PS 394 650 beschrieben. Das Einhalten der auditiven Originaltreue und auch die richtige Lokalisierung ganz bestimmter im Raum verteilter Schallquellen ist dadurch außer Frage gestellt, indem eine für die stereophone Lautsprecherwiedergabe vorhandene Tonaufnahme dann zur nahezu originalgetreuen Kopfhörerwiedergabe richtig dargeboten ist, wenn neben den direkt ankommenden Audiosignalen der beiden Kanäle links und rechts auch die Raumreflexionen des Hörraumes, jedoch bewertet mit den richtungsabhängigen Außenohrübertragungsfunktionen, nachgebildet sind. Die Integration der Außenohrübertragungsfunktion über alle Raumrichtungen ergibt einen angenähert ebenen Amplitudenfrequenzverlauf am Ohr. Da eine solche komplexe Nachbildung praktisch unmöglich ist, muß auf eine vereinfachte Konfiguration zurückgegriffen werden. Bei dieser stark vereinfachten Konfiguration brauchen jedem Ohr nur drei verschiedene Audiosignale dargeboten werden, um ein naturgetreues Hörereignis zu garantieren.

Die Simulation raumakustischer Geschehnisse ist ganz allgemein mittels eines Verfahrens durchführbar, das beispielsweise aus der EP-A-0 505

949 bekannt ist. In diesem Verfahren wird mittels eines Übertragungsfunktions-Simulators eine Übertragungsfunktion nachgebildet. Dieser Übertragungsfunktions-Simulator ist mit in einem akustischen System angeordneten Schallquellen, Schall-empfangseinrichtungen und Einrichtungen zum Messen der akustischen Übertragungsfunktion ausgestattet. Zum Messen der akustischen Übertragungsfunktion kann die Vielzahl möglicher unterschiedlicher Positionen zwischen zwei beliebigen Punkten im akustischen System Berücksichtigung finden. Der Simulator selbst ist darin gekennzeichnet, daß Mittel zum Abschätzen der in der vorhandenen Übertragungsfunktion vorhandenen Pole vorgesehen sind, wobei die AR-Eigenkoeffizienten, die mit physikalischen Polen des akustischen Systems korrespondieren, aus der Vielzahl an gemessenen Übertragungsfunktionen abgeschätzt werden, und ARMA-Filter, die aus AR-Filtern und MA-Filter zusammengesetzt sind, das nachbilden, was aus der Vielzahl an gemessenen akustischen Übertragungsfunktionen mit dem akustischen System übereinstimmt. Dieses äußerst komplizierte Verfahren dient dazu, eine solche akustische Übertragungsfunktion nachzubilden, die für Echosperreinrichtungen, Antihalleinrichtungen, zur aktiven Störschallkompensation und auch zur Klangbildlokalisierung erforderlich ist. Die Simulation der Übertragungscharakteristika nimmt ein Signalprozessor vor. Im Simulationsverfahren selbst wird die Übertragungsfunktion mit geringem Rechenaufwand in konsequent kürzest möglicher Rechenzeit nachbildet.

Dieses eben genannte Simulationsverfahren ließe sich grundsätzlich auch zur Verwirklichung für die naturgetreue Wiedergabe raumakustischer Geschehnisse nach einer dazu vorgenommenen Modifizierung einsetzen. Es wäre aber dann in technischer Hinsicht äußerst aufwendig und zu spezifisch, als daß zur sinnvollen und wirtschaftlichen Anwendung dieses Verfahrens für den gesamten Zweck ein besonderes Interesse bestünde.

Auch die bekannte schnelle Faltung mittels diskreter Fouriertransformation bietet keinen geeigneten Weg zu einer ökonomischen Einrichtung für die Simulation raumakustischer Geschehnisse, wegen der dieser Methode inhärenten Zeitverzögerung zwischen Quellsignal und gefaltetem Signal.

Die Aufgabe für die vorliegende Erfindung besteht nun darin, ein Simulationsverfahren mit dazu erforderlicher elektroakustischer Einrichtung zu schaffen, das vereinfacht ist, wodurch seine Realisierung technisch und wirtschaftlich vertretbar wird.

Die Aufgabe wird erfindungsgemäß durch das Verfahren mit den Merkmalen des Anspruchs 1 gelöst.

Wegen der Auswahl bestimmter Teile aus den Raumimpulsantworten vermindert sich entsprechend der Rechenaufwand, weil für die weggelas-

senen Teile der Raumimpulsantworten keine Rechnungen durchgeführt werden müssen.

Das neue Simulationsverfahren hat den Vorteil, daß bei stark reduziertem Aufwand für das Verfahren keine Verschlechterung Simulationsqualität auftritt. Außerdem können zur Faltung vereinfachte FIR-Filterstrukturen eingesetzt werden. Der Faltungsprozeß selbst läuft ohne merkliche Zeitverzögerung in Echtzeit ab.

Demnach liegt der Kern der Erfindung darin, daß eine mit Erfolg verbundene naturgetreue Simulation mit ganz bestimmten Teilen der Raumimpulsantworten aus dem akustischen Geschehen durchführbar ist. Es bedarf lediglich der Kenntnis über jene Teile der Raumimpulsantworten, die nach einer kritischen Auswahl wesentlich für den Höreindruck sind. Der Weg zur Kenntnis über die jeweiligen Raumimpulsantworten führt über reale oder virtuelle raumakustische Messungen. Die Entscheidung, welche Teile aus den Raumimpulsantworten weggelassen werden erfolgt nach hörpsychologischen Grundsätzen.

Eine wesentliche Ausführung des Verfahrens liegt nun darin, daß die Werte der Raumimpulsantwort mit einem zeitabhängigen Schwellwert verglichen werden und nur jene Werte der Raumimpulsantworten verwendet werden, die den Schwellwert übersteigen. Der Schwellwert ist bezogen auf die Raumimpulsantwort zeitabhängig, insofern als er seinen größten Betrag im Bereich des Anfangs der Raumimpulsantwort hat und gegen Ende der Raumimpulsantwort abklingt. Dadurch werden weite Bereiche der Raumimpulsantworten zu null.

Der Vorteil in einer solchen Aufteilung liegt im stark reduzierten Rechenaufwand für den Simulationsprozessor. Der den Direktschall erfassende Bereich der Raumimpulsantwort muß mit dem den Nachhall enthaltenden Bereich dermaßen zusammengesetzt sein, daß die Originalqualität in der Simulation erhalten bleibt.

Auf diese Weise werden nur jene Teile für den Faltungsprozeß verwendet, die einen wesentlichen Beitrag zur naturgetreuen Simulation leisten. Alle übrigen Teile der Raumimpulsantwort scheinen durch "Null-Setzen" nicht mehr auf, und es wird für diese kein Rechenaufwand erforderlich. Das zur Faltung verwendete FIR-Filter benötigt dann keine aufwendige Struktur, und die Rechenleistung des Signalprozessors braucht nur dann eingesetzt werden, wenn entsprechende von Null verschiedene Koeffizienten auftreten. Diese Vorgangsweise reduziert den Rechenaufwand gegenüber der konventionellen Faltung erheblich, und es lassen sich damit Reduktionsfaktoren zwischen 10 und 100 erzielen. Trotzdem bleibt die Nachhallzeit für solcherart simulierte raumakustische Geschehnisse erhalten, und bei einer Gesamtzeilänge der reduzierten Impulsantwort von nur 10 Millisekunden werden

Nachhallzeiten, die zwischen 100 bis zu 1000 Millisekunden liegen, einwandfrei simuliert. Die räumliche Simulation unterliegt hierbei keinem Zufall.

Das genannte Verfahren mit dazu erforderlicher elektroakustischer Einrichtung kann auch dermaßen ausgestaltet sein, daß die kritische Auswahl wesentlicher Teile zum Erhalten der naturgetreuen Simulation durch Berücksichtigen der psychoakustischen Vor- und Nachverdeckungsphänomene in der Raumimpulsantwort erfolgt.

Die in der Hörakustik bekannten Verdeckungsphänomene bewirken, daß beim Vorhandensein von Schall ein weiterer, zweiter Schall nur dann hörbar ist, wenn seine Erregung im menschlichen Ohr die des ersten übersteigt. Dadurch entsteht eine Verschiebung der Hörbarkeitsschwelle, die durch den oben erwähnten zeitabhängigen Schwellwert nachgebildet wird, wodurch Schall unterhalb dieser Schwelle nicht wahrgenommen wird.

Die Kombination der beiden bereits zuvor genannten und erläuterten Verfahrensabläufe ist die optimale Ausgestaltung des Verfahrens überhaupt. Die Ausbeute im Verhältnis zum Rechenaufwand und zum Einsatz an technischen Einrichtungen ist größtmöglich, und das damit erzielte Ergebnis am wirtschaftlichsten.

Die Anwendung des erfindungsgemäßen Simulationsverfahrens wird im besonderen im HiFi- und Tonstudiobereich liegen, weil dort die Vorteile des binauralen Körens sowohl für die Kopfhörerwiedergabe als auch für die Lautsprecherwiedergabe liegen. Die erfindungsgemäße Einrichtung schafft jenes Maß an guter und originalgetreuer Raumakustik, das die bekannten Nachteile eines Hörens im schalltoten Raum aufhebt, dabei aber nicht störend die von der Aufnahme gegebene Akustik überlagert. Die Simulation einer beispielsweise bestimmten Lautsprecheranordnung in einem bestimmten Raum mittels Kopfhörerwiedergabe ist eine wesentliche Anwendung des Simulationsverfahrens einschließlich der dazu erforderlichen elektroakustischen Einrichtung.

Im folgenden wird das erfindungsgemäße Simulationsverfahren mit dazu erforderlicher elektroakustischer Einrichtung an Hand von Zeichnungen dargestellt, und es zeigt:

- Fig. 1a die Anordnung bei der Messung der Raumimpulsantwort,
 Fig. 1b das Schema der elektroakustischen Einrichtung zur Erzeugung und Faltung der reduzierten Raumimpulsantwort,
 Fig. 2 das Schema zur Auswahl der wesentlichen Anteile aus der ermittelten Raumimpulsantwort,
 Fig. 3 das Schema zur Auswahl der wesentlichen Anteile aus der ermittelten Raumimpulsantwort, unter Verwen-

- Fig. 4a dung eines veränderlichen Schwellwertes,
 eine einfache ermittelte Raumimpulsantwort,
 Fig. 4b den Anteil des Direktschalls der ermittelten Raumimpulsantwort nach Fig. 4a,
 Fig. 4c die reflektierten Schallanteile aus der ermittelten Raumimpulsantwort nach Fig. 4a,
 Fig. 5a eine vereinfachte ermittelte Raumimpulsantwort,
 Fig. 5b den Bereich des Direktschalls der ermittelten Raumimpulsantwort nach Fig. 5a,
 Fig. 5c den wesentlichen Teil des reflektierten Anteils der ermittelten Raumimpulsantwort nach Fig. 5a,
 Fig. 5d den wesentlichen Teil einer zweiten Reflexion aus der ermittelten Raumimpulsantwort nach Fig. 5a,
 Fig. 5e den wesentlichen Teil einer noch später liegenden Reflexion aus der ermittelten Raumimpulsantwort nach Fig. 5a,
 Fig. 6a die ermittelte Raumimpulsantwort mit darübergerlegten Schwellwerten,
 Fig. 6b die reduzierte Raumimpulsantwort aus der ermittelten Raumimpulsantwort nach Fig. 6a,
 Fig. 7a eine ermittelte Raumimpulsantwort mit darübergerlegten Schwellwerten unter Berücksichtigung des Verdeckungsphänomens,
 Fig. 7b die reduzierte Raumimpulsantwort aus der ermittelten Raumimpulsantwort nach Fig. 7a,
 Fig. 8a eine ermittelte Raumimpulsantwort mit darübergerlegten Schwellwerten, die stufenförmig abnehmen,
 Fig. 8b die reduzierte Raumimpulsantwort aus der Raumimpulsantwort nach Fig. 8a,
 Fig. 9 ein Schema für ein übliches Transversal oder FIR - Filter und
 Fig. 10 eine aus der Erfindung sich ergebende Struktur eines FIR-Filters für den Faltungsprozess mit der erfindungsgemäß reduzierten Raumimpulsantwort.

In Fig. 1a wird eine mögliche Methode zur Ermittlung der Raumimpulsantwort dargestellt. Am Ort der Schallquelle wird ein Meßsignal abgestrahlt, das am Hörplatz mit einem Meßmikrofon aufgenommen wird. Aus dem empfangenen Signal wird die Raumimpulsantwort gewonnen. Wenn als Meßsignal ein Impuls verwendet wird, dessen Dauer gleich einer Periode der doppelten Frequenz der

oberen Frequenzgrenze des Audiosignalebereiches ist, ist das empfangene Signal gleich der Raumimpulsantwort $h(t)$. Da bei dieser Methode der Störabstand gering ist, wird in der Praxis ein längeres Meßsignal bevorzugt und die Raumimpulsantwort rechnerisch ermittelt.

Die binaurale Raumimpulsantwort, die für die Wiedergabe über Kopfhörer benötigt wird, wird dadurch gewonnen, daß sich die Meßmikrofone in den Ohrkanälen einer Testperson befinden, für die die Raumimpulsantwort ermittelt werden soll. Sodann wird die Impulsantwort für die Strecke Lautsprecher-Raum-Ohr und anschließend die Impulsantwort für das System Kopfhörer-Ohr gemessen. Die gewonnenen Impulsantworten werden in den Frequenzbereich transformiert, die transformierten Funktionen dividiert und der Quotient in den Zeitbereich rücktransformiert. Wenn dieser Vorgang für beide Ohren durchgeführt wird, wird eine binaurale Raumimpulsantwort erhalten, die sich aus einer rechten und einer linken Raumimpulsantwort zusammensetzt.

Die Fig. 1b zeigt das Schema für den Verfahrensablauf bei einer der beiden wie oben ermittelten Raumimpulsantworten. Die Raumimpulsantwort $h(t)$ wird dem Aufteiler 1 zugeleitet, um die Aufteilung in den Direktschallanteil $d(t)$ und den Nachhallanteil $r(t)$ vorzunehmen. Im Nachhallanteil $r(t)$ sind auch sämtliche von den Raumwänden herrührenden Einzelreflexionen des Meßsignals enthalten.

Die Raumimpulsantwort ist ihrer Natur nach ein kontinuierliches Zeitsignal und wird zur Verarbeitung digitalisiert, womit aus $h(t)$, $d(t)$ bzw. $r(t)$ $h(n)$, $d(n)$ bzw. $r(n)$ wird. Da für die hier verwendete digitale Verarbeitung in digitalen Filtern eine zeitdiskrete Repräsentation benötigt wird, wird in den Figuren ausschließlich die zeitdiskrete Darstellung $h(n)$ verwendet, wobei n der Laufindex für die Abtastwerte ist, der mit der Zeit durch $t = n\tau$ verknüpft ist und τ die Periodendauer der Abtastfrequenz ist. Die Darstellung in den Figuren erfolgt jedoch lediglich aus Gründen der Übersichtlichkeit als kontinuierliche Funktion.

Für die Raumimpulsantwort $h(n)$ und deren Aufteilung in Direktschallanteil $d(n)$ und Nachhallanteil $r(n)$ sind die entsprechenden zeitabhängigen Amplitudenverläufe in Fig. 4a bis 4c schematisch dargestellt. Nach Verstreichen der Zeit $T = N\tau$ ist am Hörplatz der Direktschall eingetroffen, wonach nur mehr solche Anteile zu erwarten sind, die von Reflexionen, bzw. vom Nachhall herrühren. Zur Erläuterung sei noch angeführt, daß in einem frequenzlinearen Übertragungssystem die Impulsantwort lediglich aus einem ersten Wert bestehen würde; die hier skizzierte Raumimpulsantwort wird auch im Bereich des direkten Schalls durch die Übertragungsfunktion von der Schallquelle bis zum Ohrkanaleingang bestimmt und wird z.B. wegen

der Reflexionen an Kopf und Körper auf einige Millisekunden verlängert.

Die in die beiden Schallanteile $d(n)$ und $r(n)$ aufgeteilte ermittelte Raumimpulsantwort wird nun jener elektronischen Einrichtung 2 zugeführt, die aus der ermittelten Raumimpulsantwort die Anteile extrahiert, die jene Kennwerte der Hörraumakustik, des im Hörraum vorhandenen Schallfeldes und die der Hörperson zuordbaren linken und rechten Außenohrübertragungsfunktion enthalten, die nach dem Faltungsprozeß mit einem beliebigen Audioprogramm die naturgetreue Simulation des gesamten raumakustischen Geschehens garantieren. Die Extraktion erfolgt nach Kriterien, die weiter unten beschrieben sind. Die extrahierte bzw. reduzierte Raumimpulsantwort $h'(n)$ wird in einem Prozessor 3 mit dem Signal $s(n)$ eines beliebig gewählten Audioprogrammes gefaltet, wodurch das Signal gebildet wird. Bei richtiger Schallwiedergabe an den beiden Ohren der Hörperson wird das erfindungsgemäß gewünschte Hörresultat erreicht, nämlich die naturgetreue Simulation eines Hörplatzes in einem bestimmten Hörraum.

Die Extraktorschaltung 2 zur Auswahl der wesentlichen Anteile aus der ermittelten Raumimpulsantwort wird durch das Schema der Fig. 2 näher erläutert.

Wegen der beschränkten Rechenleistung des Prozessors 3 ist es zweckmäßig nur einen vorderen Teil der jeweiligen ermittelten Raumimpulsantwort zu verwenden. Hierzu wird die an einem Eingang E vorhandene und in die Anteile Direktschall und Nachhall aufgeteilte Raumimpulsantwort in einem Funktionsblock 4 in einzelne Abschnitte oder Portionen mit der Länge T_i aufgeteilt.

Die Figuren 5a bis 5e zeigen wie die ermittelte Raumimpulsantwort mittels des Funktionsblocks 4 in einzelne Blöcke oder Portionen T_i mit den Schallanteilen $d(n)$, $r_2(n)$, $r_3(n)$... $r_i(n)$ aufgeteilt wird.

Die Aufteilung in Direktschall- und Nachhallanteil wird vorgenommen, weil der Direktanteil der ermittelten Raumimpulsantwort zumindest bei Studio-Anwendung unverändert bleiben sollte und nur der Nachhallanteil wie beschrieben reduziert wird. Es sind jedoch auch Anwendungen denkbar, bei denen beide Anteile der ermittelten Raumimpulsantwort reduziert werden.

Nach der Abtrennung des Direktschalls werden mittels eines Komparators 5 die verbliebenen Anteile der Raumimpulsantwort Null gesetzt, die nach einem der weiter unten beschriebenen Kriterien unterhalb eines festgelegten Schwellwertes liegen. Die Anzahl der Abtastwerte in den verbliebenen Signalanteilen der reduzierten Raumimpulsantwort werden in einem Koeffizientenzähler 6 gezählt. Der erhaltene Zählerwert wird in einem Sollwertkomparator 7, mit einem Grenzwert verglichen, der durch den zulässigen Rechenaufwand festgelegt ist. Falls

die Grenze noch nicht überschritten ist werden gemäß den Fig. 5a - 5e weitere Blöcke der ermittelten Raumimpulsantwort nachgefordert. Auf diese Weise wird bei einer späteren Faltung mit der reduzierten Raumimpulsantwort die Rechenkapazität voll ausgeschöpft. Ist das vorgegebene Soll erreicht, so wird die jetzt vorhandene reduzierte Raumimpulsantwort an einen Ausgang A gegeben.

Für den Fall, daß die kritische Signalbewertung der ermittelten Raumimpulsantwort gemäß einem Verdeckungsphänomen vorgenommen wird, ist dazu die in Fig. 3 dargestellte Anordnung erforderlich. Gegenüber dem in Fig. 2 angegebenen Schema kommt noch eine dynamische Schwellwertanpassung hinzu, die aus einem Komparator 9 und einem Schwellwertgeber 10 besteht. In dem Komparator 9 wird der Momentanwert der ermittelten Raumimpulsantwort mit dem momentanen Schwellwert verglichen, wobei die Größe des Schwellwertes von den vorausgehenden Werten der ermittelten Raumimpulsantwort gemäß dem Verdeckungsphänomen abhängig ist. Durch die Rückführung über den Schwellwertgeber 10 zu dem Komparator 5 ist die dynamische Anpassung an die vorgegebenen psychoakustischen Kriterien gemäß dem Verdeckungsphänomen beispielsweise nach Zwicker realisiert.

Wie die Fig. 6a und 6b zeigen, kann die kritische Auswahl der für die Simulation wesentlichen Signalanteile der ermittelten Raumimpulsantwort dadurch erfolgen, daß alle Anteile der ermittelten Raumimpulsantwort, die unterhalb eines festgelegten festen Schwellwertes A liegen, Null gesetzt sind, damit diese für den späteren Faltungsprozeß unberücksichtigt bleiben, während die den Schwellwert übersteigenden Signalanteile bzw die zugehörigen Abtastwerte mit unveränderter Amplitude in die reduzierte Raumimpulsantwort übernommen werden. Da zwischen der Stärke der Schallreflexionen und den diesen Reflexionen zuordenbaren Werten der ermittelten Raumimpulsantwort ein unmittelbarer Zusammenhang besteht, bietet das Schwellwertkriterium eine bedeutende Hilfe zum Extrahieren der zur Simulation wesentlichen Werte der ermittelten Raumimpulsantwort. Bei der Faltung werden nur mehr die durch das Auswahlkriterium gegebenen wesentlichen Merkmale aus der ermittelten Raumimpulsantwort berücksichtigt, wodurch der erforderliche Rechenaufwand einer erheblichen Reduktion unterliegt. Können in einem FIR - Filter pro Sekunde 25×10^6 Multiplikationen und Additionen vom Signalprozessor durchgeführt werden, was bei einer Abtastperiode von 20 μ sec 500 Filterkoeffizienten und 10 Millisekunden Impulsantwortlänge entspricht, so können unter Verwendung der reduzierten Raumimpulsantwort von Prozessor 3 Räume simuliert werden, deren Nachhallzeiten bei bis zu 1 sek liegen.

Schließlich ist, wie Fig. 7a und 7b zeigen, die kritische Auswahl auch nach Kriterien gemäß den Verdeckungsphänomenen möglich. Demnach brauchen solche Anteile aus der ermittelten Raumimpulsantwort nicht berücksichtigt werden, die beim Hören ohnedies nicht wahrnehmbar sind. Entsprechend der vorliegenden Information sind die verdeckten Anteile von der später erfolgenden Faltung auszunehmen. In diesem Falle braucht auch nicht mehr zwischen Direktschall und Nachhallanteil unterschieden zu werden, sondern es kann die gesamte ermittelte Raumimpulsantwort vom Anfang an wie beschrieben reduziert werden.

T_V bezeichnet hier die Bereiche der Vorverdeckung und T_N die der Nachverdeckung. Das sind die Zeiträume in denen Signale unter einer Pegelgrenze, wie sie in Fig. 7a skizziert sind, gegenüber einem Hauptsignal nicht mehr wahrnehmbar sind. Diese Verdeckungseffekte sind, wie sich der Standardliteratur zu diesem Thema entnehmen läßt, abhängig vom Zeitabstand, vom Pegelverhältnis und vom Frequenzabstand von maskiertem und maskierendem Signal. Folglich läßt sich dies zeichnerisch nicht vollständig darstellen. Mit der Raumimpulsantwort werden vor allem die Zeit- und Pegelverhältnisse beeinflußt. Es müssen also in jedem Fall etwas breitere Wertebereiche der ermittelten Raumimpulsantwort verwendet werden, als sich unmittelbar aus dem Grenzlínienkriterium ergeben würde. Weiters müssen die Wertebereiche in den eigentlich maskierten Bereich hinein extrapoliert werden, um nicht unerwünschte Filtereffekte im Frequenzbereich zu erhalten.

In Fig. 8a und 8b ist dargestellt, wie der Schwellwert sich treppenförmig verkleinert und entsprechend die Signalanteile für die Simulation entnommen werden.

Fig. 9 stellt dar, auf welche Art beispielsweise die Architektur eines üblichen FIR-Filters ausgeführt sein kann. In der Kette von Zwischenspeichern z^{-1} , von denen jeder einen Signalwert eine Abtastperiode lang speichert, wird in jeder Abtastperiode an jeder Verbindung ein Signalwert entnommen und mit dem dieser Stelle zugeordneten Filterkoeffizienten multipliziert; das Ergebnis wird in einem Addierer mit allen anderen Ergebnissen addiert und dem Ausgang zugeführt und stellt damit die direkte Implementierung der Faltung auf einem Prozessor dar. Abhängig von den technologischen Gegebenheiten des Prozessors 3 kann diese Faltung natürlich auch in anderen konjugierten Strukturen durchgeführt werden, wodurch sich Rechenleistung einsparen läßt. Dabei geht es aber im Prinzip immer um eine zeitlich optimale Abfolge der Additionen und Multiplikationen, so daß damit bestenfalls ein Faktor zwei bis drei an Rechenleistung gewonnen werden kann.

Fig. 10 veranschaulicht auf welche Art die Architektur des FIR-Filters abgewandelt wird, wenn die Faltung mit der extrahierten Raumimpulsantwort durchgeführt wird.

Hierbei bilden die aufeinanderfolgenden Abtastwerte der verbliebenen Signalanteile der Raumimpulsantwort die Filterkoeffizienten d_j , r_{1k} , r_{2l} , r_{3m} , r_{in} . Das sind jene, die entsprechend den Bezeichnungen aus dem Beispiel von Fig. 5 zur naturgetreuen Simulation von wesentlicher Bedeutung sind. Die Anzahl aller Filterkoeffizienten ist dabei um ein bis zwei Größenordnungen geringer als die Anzahl der Zwischenspeicher. Da die Filterkoeffizienten nun nicht mehr zeitlich äquidistant auftreten, wird dem Filterprozessor mit einem Filterkoeffizienten auch gleichzeitig die Verzögerungszeit, bzw. die Abtastwertnummer, mitgeteilt.

Es werden im Vergleich zum in Fig. 9 dargestellten Filter bei gleicher Filterlänge um ein bis zwei Größenordnungen weniger Rechenoperationen für das in der Wahrnehmung des Zuhörers als gleich bewertete Ergebnis benötigt.

Patentansprüche

1. Verfahren zur Simulation eines an einem repräsentativen Hörplatz in einem Raum auftretenden Raum- und/oder Klangeindrucks bei monofoner, stereofoner oder mehrkanaliger Wiedergabe, bei dem ein Raum ausgewählt wird, dessen Raumklang simuliert werden soll, innerhalb des Raumes die Lage des repräsentativen Hörplatzes festgelegt wird, an dem repräsentativen Hörplatz zumindest für einen Kanal die zugehörige Raumimpulsantwort ermittelt wird, für die ermittelte Raumimpulsantwort ein sich über zumindest einen Abschnitt der Länge der ermittelten Raumimpulsantwort erstreckender Schwellwert festgelegt wird, durch Vergleich der ermittelten Raumimpulsantwort mit dem Schwellwert eine reduzierte Raumimpulsantwort erzeugt wird, die innerhalb des Abschnitts der Länge der ermittelten Raumimpulsantwort nur diejenigen Teile der ermittelten Raumimpulsantwort aufweist, bei denen die momentane Amplitude über dem Schwellwert liegt, während für diejenigen Teile der ermittelten Raumimpulsantwort, deren momentane Amplitude unter dem Schwellwert liegt, die reduzierte Raumimpulsantwort auf den Wert null gesetzt wird, und die außerhalb des Abschnitts der Länge der ermittelten Raumimpulsantwort die ermittelte Raumimpulsantwort in unveränderter Form enthält.
2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß mit Ausnahme des dem Direkt-schall entsprechenden Bereiches der ermittelten Raumimpulsantwort der Abschnitt die gesamte übrige zeitliche Dauer der ermittelten Raumimpulsantwort beinhaltet.
3. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß der Abschnitt die gesamte zeitliche Dauer der ermittelten Raumimpulsantwort beinhaltet.
4. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß der Schwellwert ein dynamisch veränderlicher Schwellwert ist, der einen fest vorgegebenen Mindestwert aufweist, und daß der Schwellwert durch eine den jeweils gültigen Schwellwert oder den Mindestgrenzwert übersteigende Halbschwingung der ermittelten Raumimpulsantwort in Richtung auf größere Werte angehoben wird und nach dem Anheben allmählich auf seinen Mindestwert abklingt.
5. Verfahren nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, daß der Schwellwert nach einer Exponentialfunktion abklingt.
6. Verfahren nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, daß der Schwellwert entsprechend einem psychoakustischen Verdeckungseffekt festgelegt wird.
7. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß der Schwellwert fest ist.
8. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß sich der Schwellwert treppenförmig verändert.
9. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß der ausgewählte Raum ein theoretischer oder virtueller Raum ist und daß die jeweilige ermittelte Raumimpulsantwort eine auf Grund der Annahmen über die Gestalt des Raumes, den Ort, der Schallquelle den Hörplatz, die Richtung der Schallquelle und/oder die Ausrichtung des Kopfes berechnete Raumimpulsantwort ist.
10. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß der ausgewählte Raum ein real existierender Raum ist und daß die jeweilige ermittelte Raumimpulsantwort in dem realen Raum gemessen wurde.
11. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß es für wenigstens zwei unterschiedliche Hörkanäle durchgeführt wird.

12. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß ein Audiosignal mit der reduzierten Raumimpulsantwort gefaltet wird.
13. Vorrichtung, dadurch gekennzeichnet, daß sie eine elektronische Schaltung enthält, in der die reduzierte Raumimpulsantwort gemäß dem Verfahren nach einem oder mehreren der vorstehenden Ansprüche programmiert ist, daß die Schaltung einen oder mehrere Eingänge zum Einspeisen eines monofonen, stereofonen oder vielkanaligen Audioprogramms, wenigstens einen Kanal sowie wenigstens je Kanal einen Audioausgang aufweist, an dem ein bearbeitetes Audioprogramm ausgegeben wird, das durch Faltung des eingespeisten Audioprogramms mit der/den dem jeweiligen Kanal zugeordneten reduzierten Raumimpulsantwort/-en erhalten wird.
14. Vorrichtung nach Anspruch 13, dadurch gekennzeichnet, daß sie je Kanal wenigstens ein FIR-Filter enthält, dessen Filterkoeffizienten den Amplitudenwerten der mit einer vorgegebenen Samplingfrequenz digitalisierten reduzierten Raumimpulsantwort entsprechen.

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

8

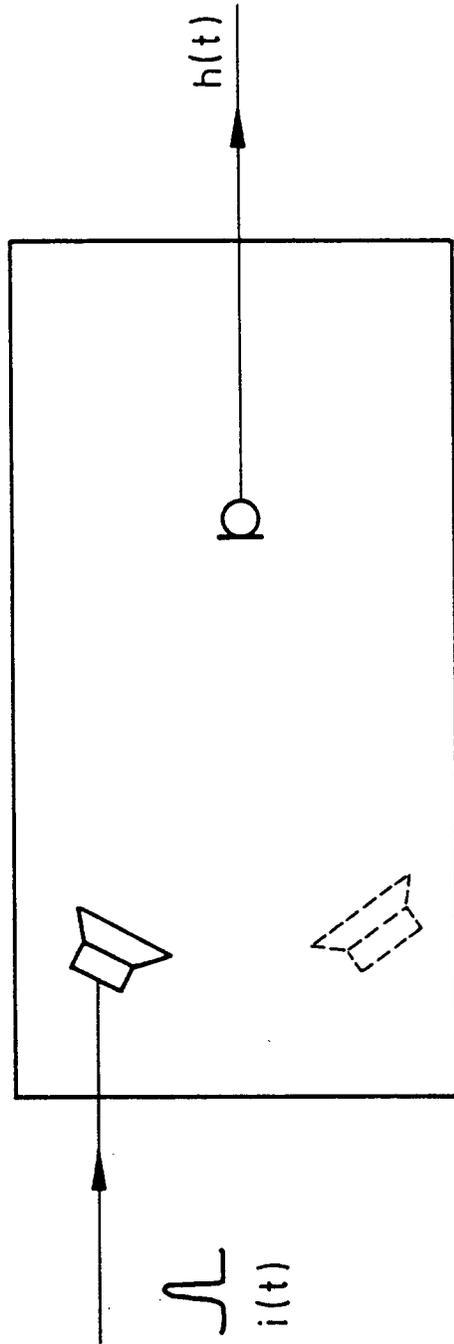


Fig. 1a

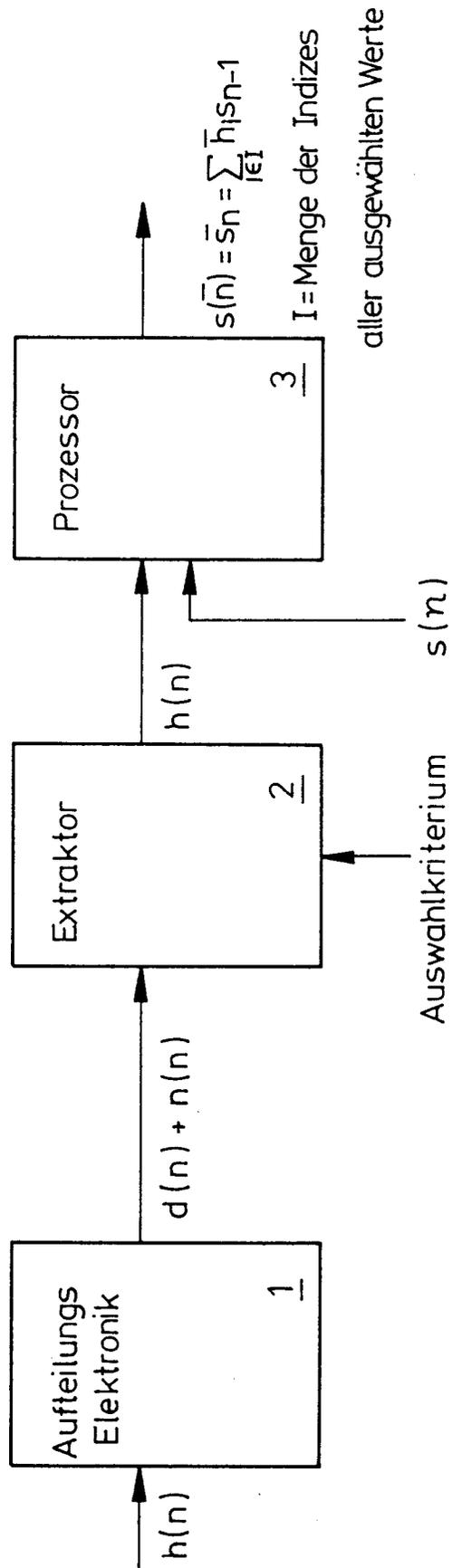


Fig. 1b

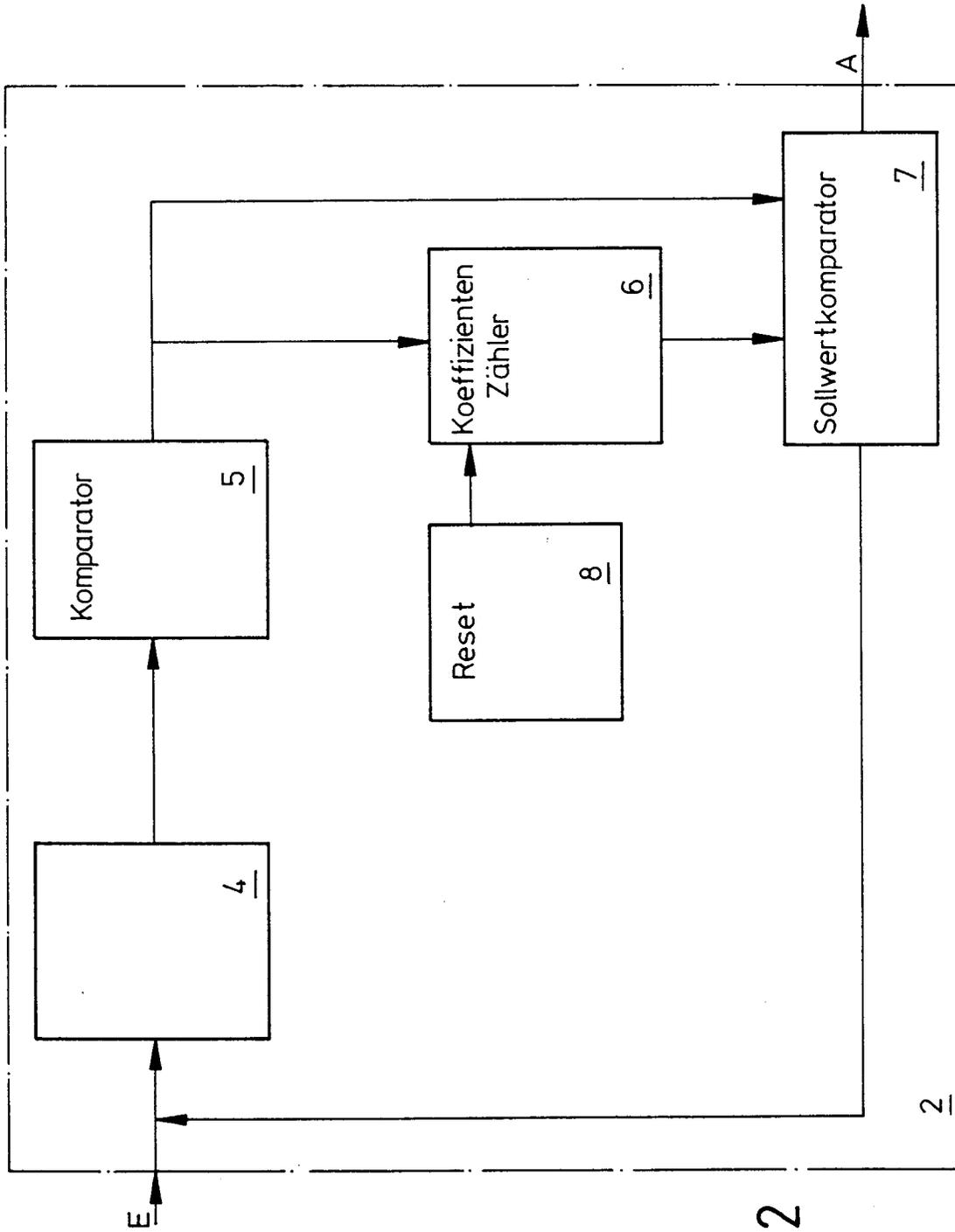


Fig. 2

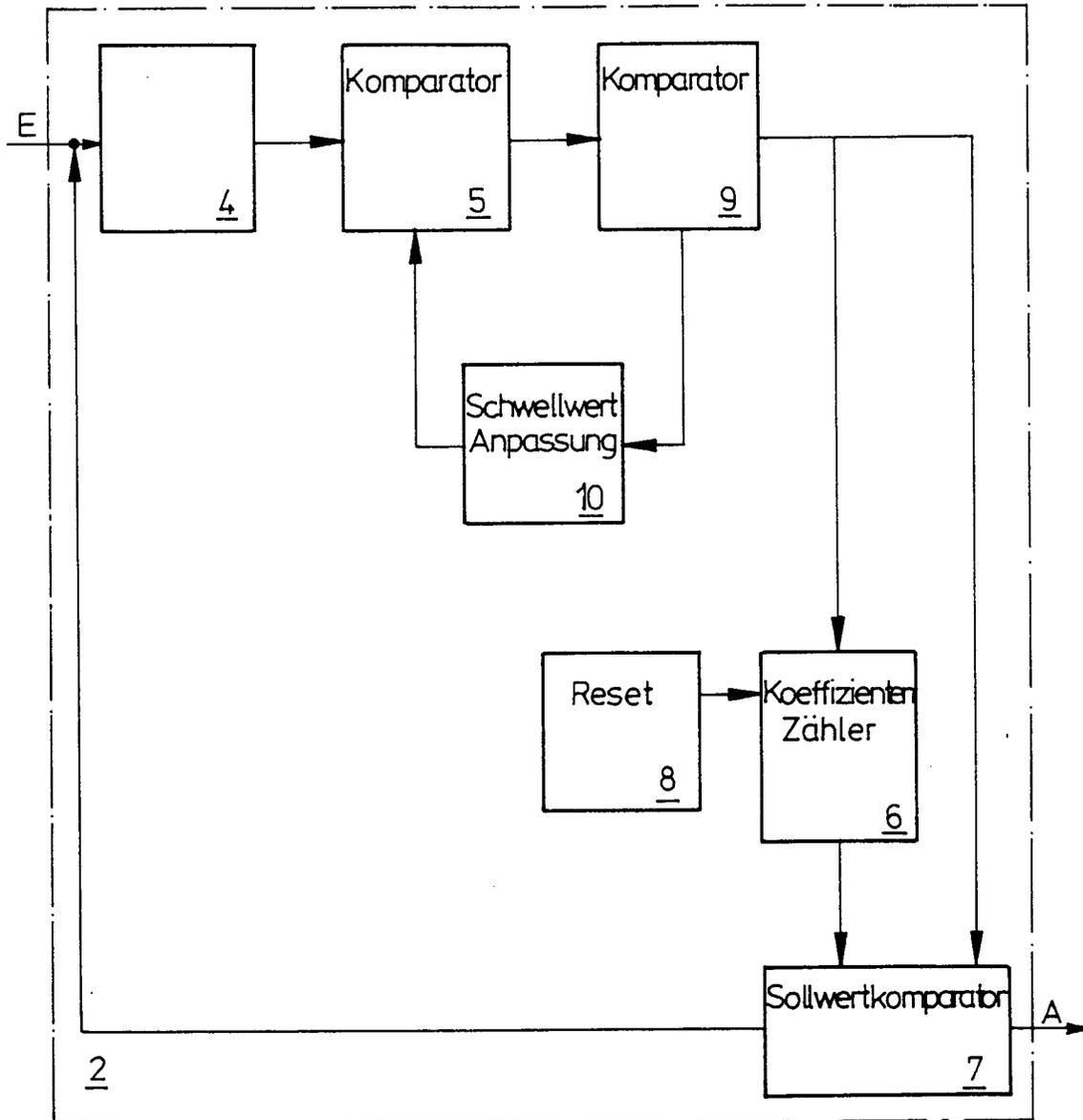


Fig. 3

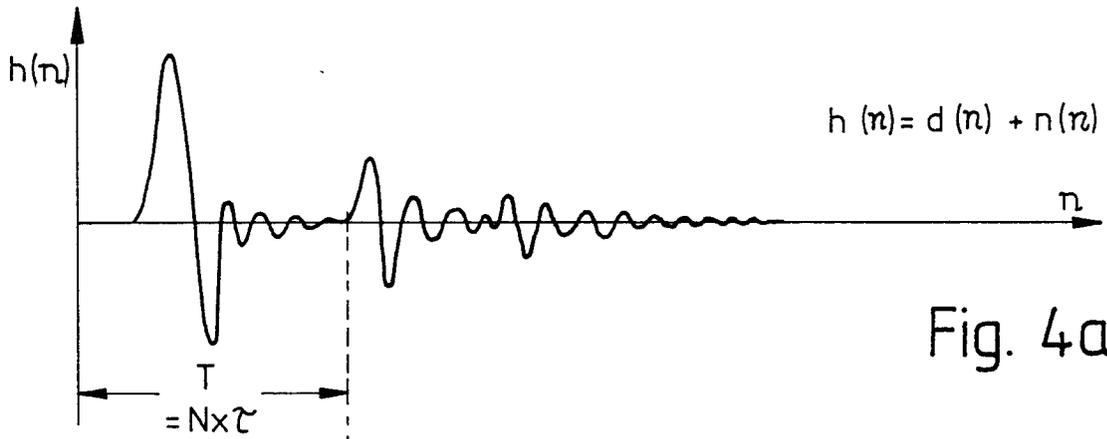


Fig. 4a

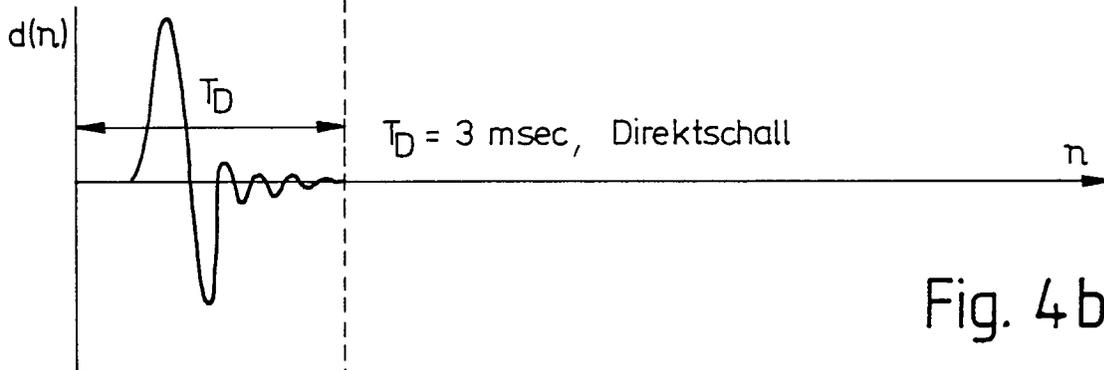


Fig. 4b

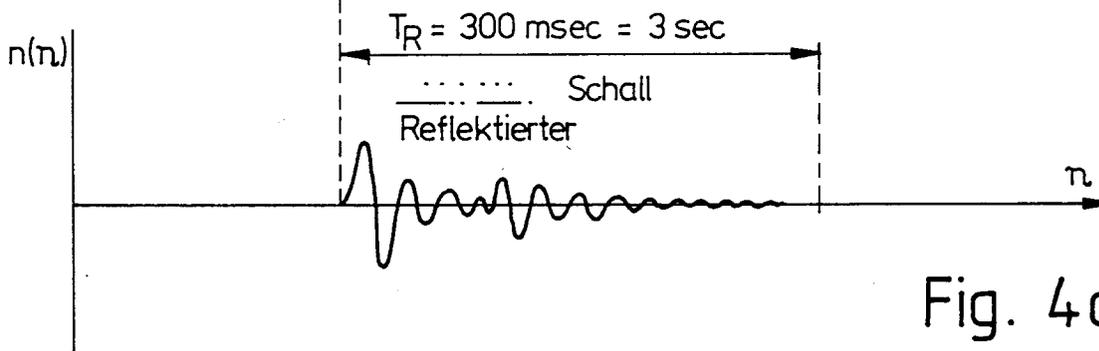


Fig. 4c

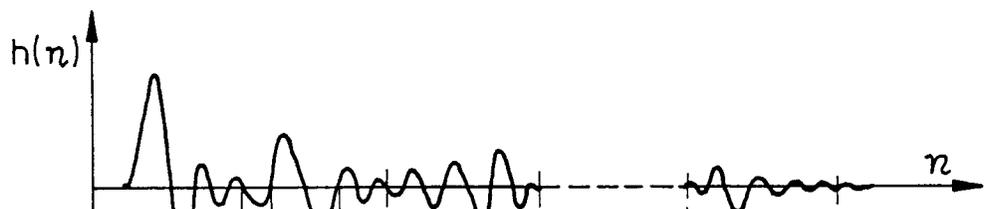


Fig. 5a

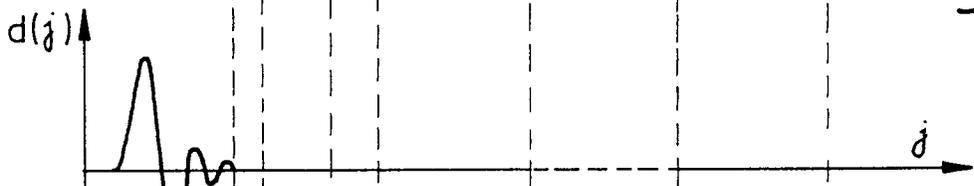


Fig. 5b

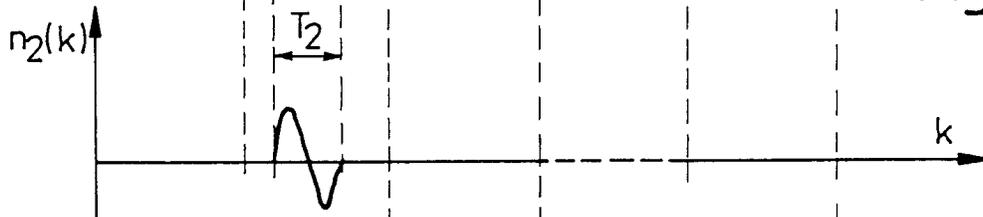


Fig. 5c

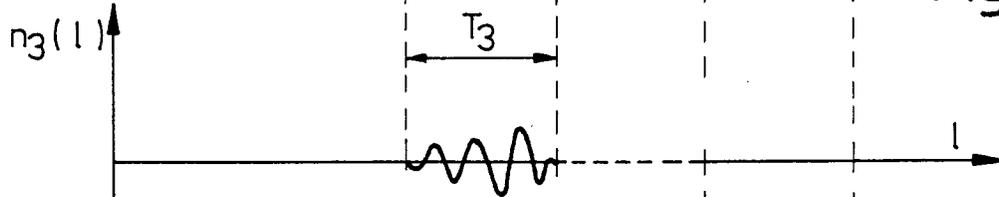


Fig. 5d

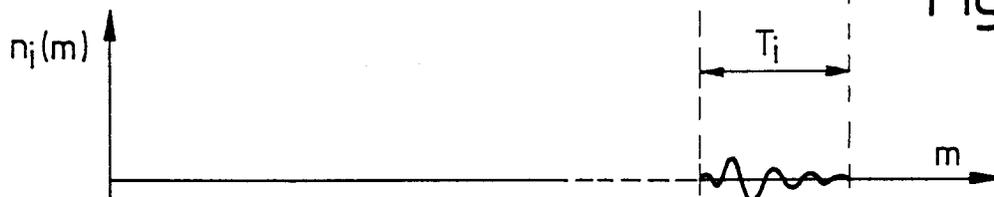


Fig. 5e

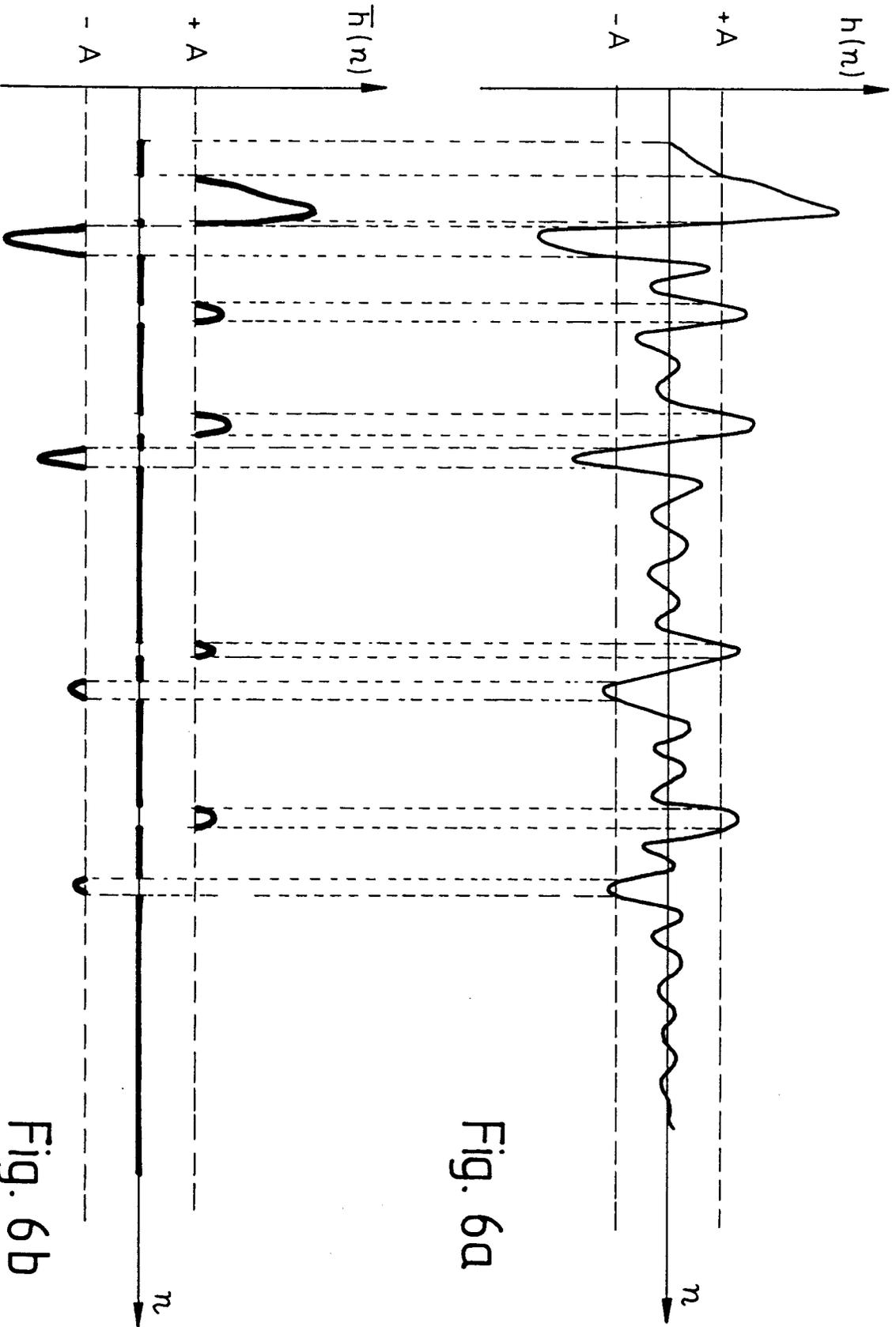
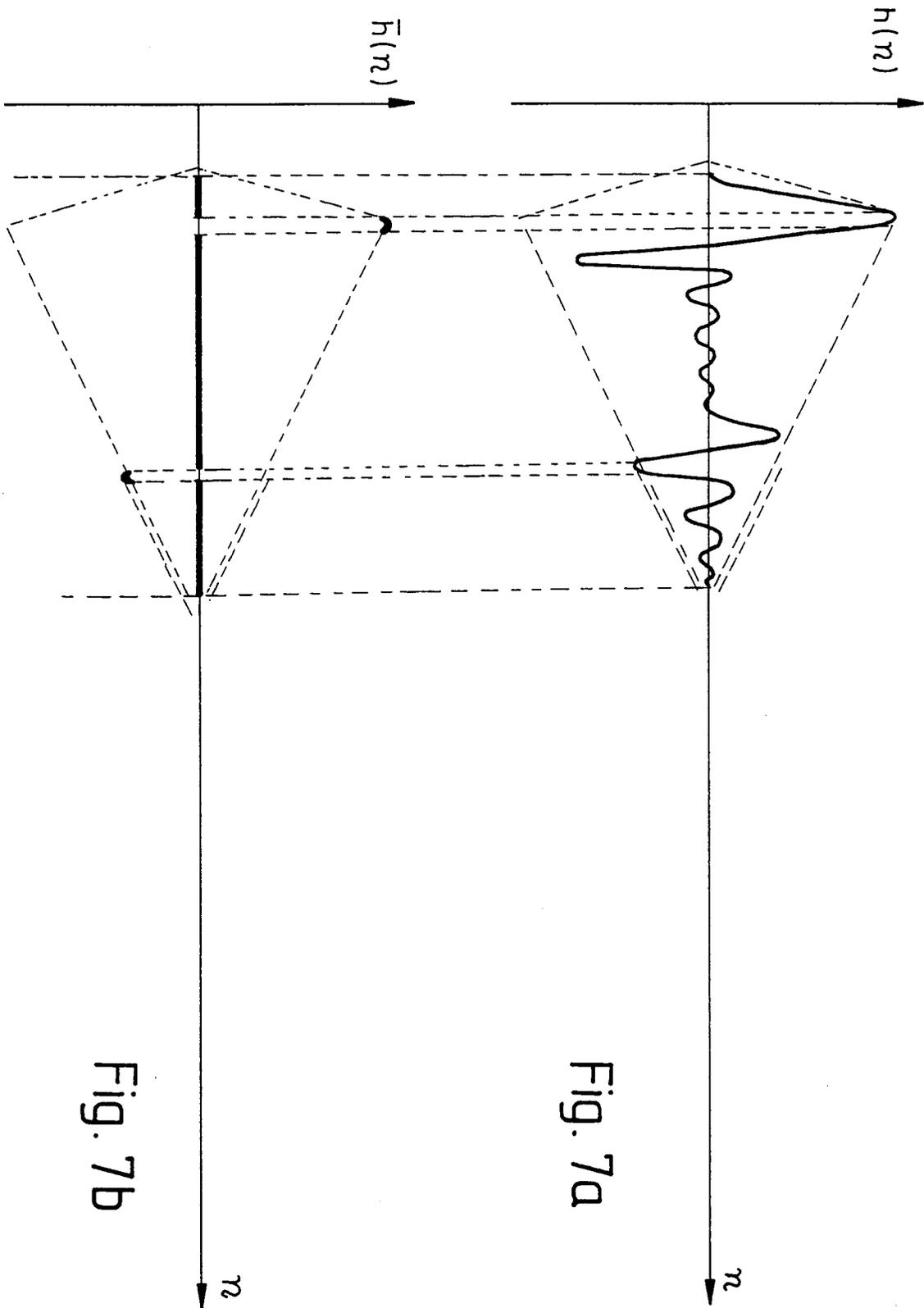


Fig. 6a

Fig. 6b



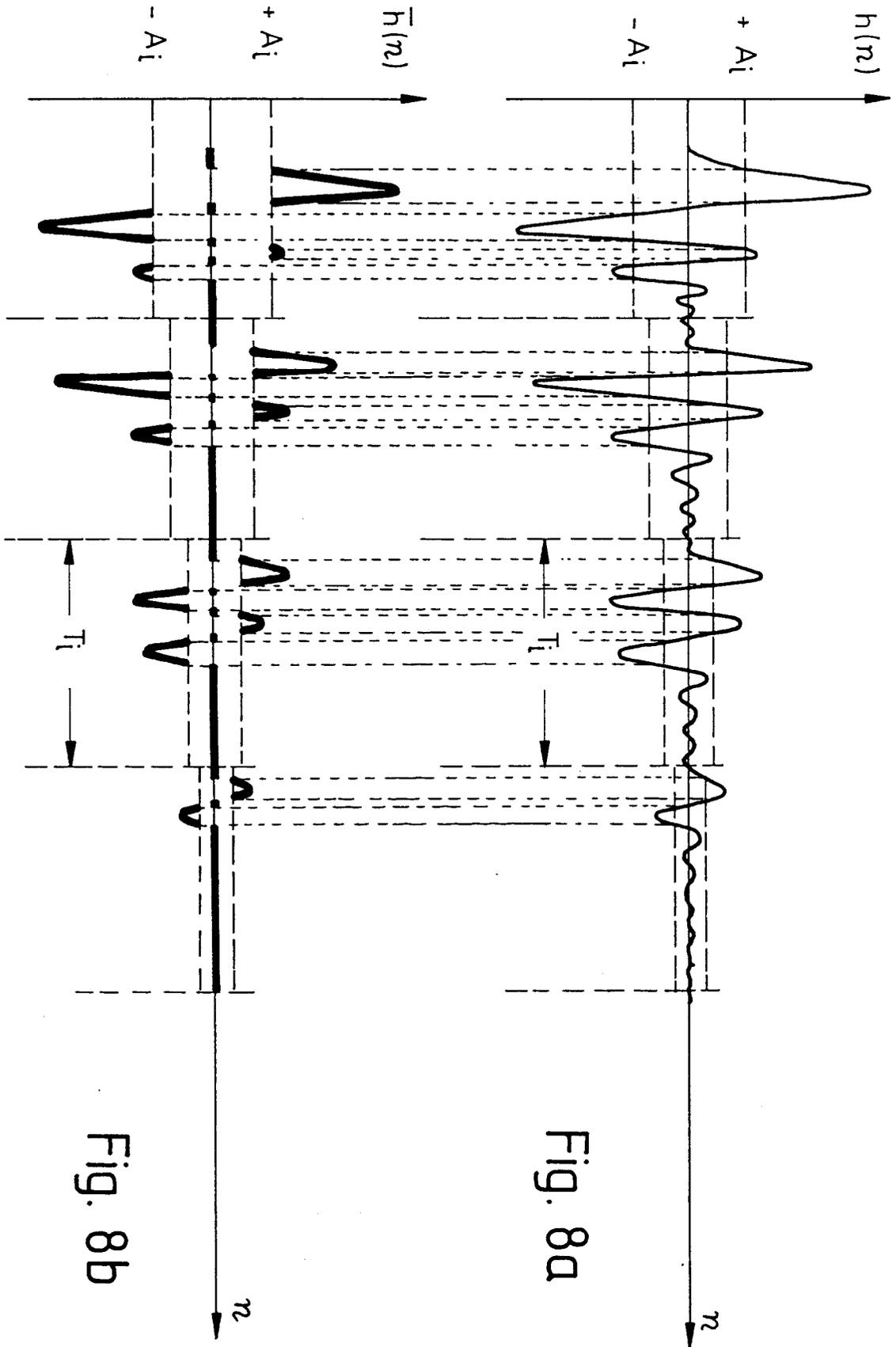


Fig. 8a

Fig. 8b

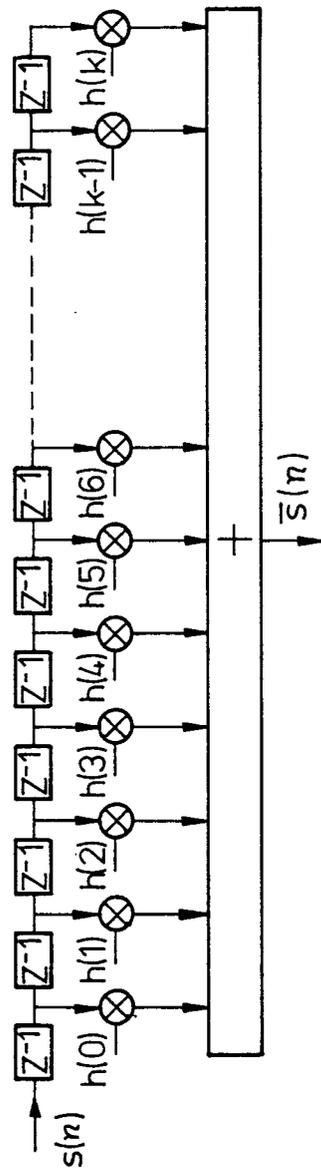


Fig. 9

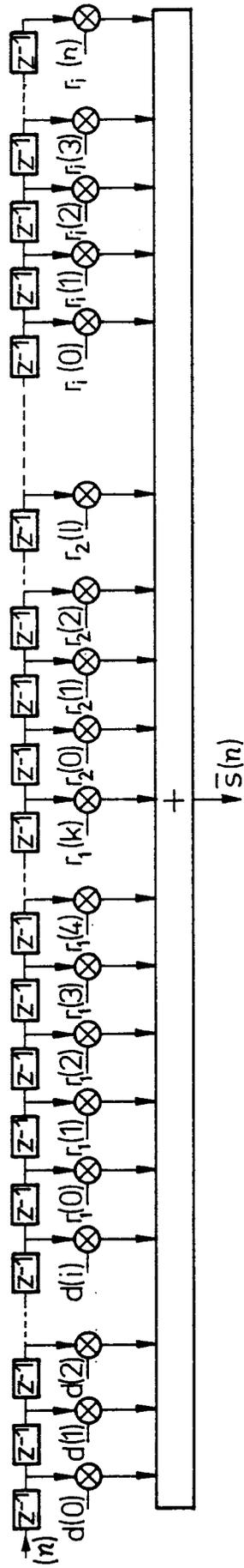


Fig. 10