

**Heinrich-Hertz-Institut
für Nachrichtentechnik
Berlin GmbH**

Technischer Bericht Nr. 212

**Wellenausbreitung im optischen Linien-
netz mit passiven Abzweigen**

von

Dr.-Ing. B. Strebel

HEINRICH-HERTZ-INSTITUT FÜR NACHRICHTENTECHNIK BERLIN GMBH

Technischer Bericht Nr. 212

Wellenausbreitung im optischen Linien-
netz mit passiven Abzweigen

von

Dr.-Ing. B. Strebel

Wellenausbreitung im optischen Liniennetz
mit passiven Abzweigen

Zusammenfassung:

Es wird ein Modell für ein Liniennetz mit passiven Abzweigen beschrieben, das die Berechnung der ortabhängigen Modespektren und Impulsformen gestattet. Das Modell enthält Abzweige mit modeabhängiger Übertragungsfunktion sowie Verbindungsfasern, auf denen die Moden unterschiedliche Dämpfungen und Laufzeiten haben und in definierter Weise verkoppelt sind. Am Beispiel einer Kette von Richtkopplern und Gradientenfasern wird die Längenabhängigkeit der Impulsformen simuliert und aus den Modespektren erklärt.

Der Bearbeiter

B. Strebel

(Dr.-Ing. B. Strebel)

Der Abteilungsleiter

G. Boerger

(Prof. Dr.-Ing. G. Boerger)

Der Geschäftsführer

H. Ohnsorge

(Dr.-Ing. H. Ohnsorge)

Berlin, den 9.7.1979

ISSN 0342 - 6815

Inhalt:

1. Einleitung
2. Rechenmodell der Strecke mit Verzweigungen
3. Modespektren
4. Impulsformen
5. Impulsbreitenwachstum
6. Literatur
7. Liste der Symbole

1. Einleitung

Das optische Liniennetz mit passiven Abzweigen gestattet die Kommunikation vieler Teilnehmer über eine einzelne Faser. Bei höherer Datenrate und weitauseinanderliegenden Verzweigungsstellen empfiehlt sich eine Zusammenschaltung von Multimoderichtkopplern mit Gradientenfäsern.

Während niederratige Bussysteme dämpfungsdimensioniert werden, muß bei Hochgeschwindigkeitsübertragung der Einfluß von Kopplerstruktur und Faserprofil auf die Impulsverbreiterung untersucht werden, weil dadurch der zu den Kopplerausgängen übertragbare Impulsabstand eingeschränkt wird.

Gegenstand dieses Berichtes ist ein Rechenmodell für die Ausbreitung von Impulsen in einem Glasfasernetzwerk mit Verzweigungen. Das Modell enthält Richtkoppler mit modenabhängiger Übertragungsfunktion und Verbindungsfasern, auf denen die Moden unterschiedliche Dämpfungen und Laufzeiten haben sowie in definierter Weise verkoppelt sind.

Da der ideale modenunabhängige Abzweig bisher nicht bekannt ist und nur durch starke Modemischung mit erhöhten Verlusten erkauft wird, ist es üblich, weniger verlustbehaftete Kopplerstrukturen zu verwenden, die auch im Kopplungsbereich annähernd Fasergeometrie aufweisen. Dies führt dann zu modenabhängigen Übertragungsfaktoren, insbesondere bei schwacher Anzapfung von Fasern. In diesem Fall ist von der Kopplerstruktur nur eine schwache Streuwirkung zu erwarten, sodaß das Verhalten eines Impulses hinter dem Abzweig weitgehend von den Eigenschaften der vorausgehenden Strecke geprägt werden kann.

Im Unterschied zur Nachrichtenverbindung zwischen zwei Punkten über eine homogene Faser kommt es durch die Einfügung von Abzweigelementen mit nachfolgenden Scramblern zu einer oftmaligen Umverteilung der Modespektren. Der Bericht beginnt deshalb mit der Berechnung dieser Modespektren und erklärt hieraus die mit der Methode der Diracsynthese gewonnenen Impulsformen.

Das Rechenmodell setzt voraus, daß entsprechend dem derzeitigen Stand der Technik die Material- und Wellenleiterdispersion gegenüber der Modendispersion zu vernachlässigen ist. Damit wird die Impulsformung allein durch die modenspezifischen Übertragungsfunktionen und Laufzeiten der Netzwerkkomponenten bestimmt. Im letzten Abschnitt wird das Impulsbreitenwachstum betrachtet und eine Grenze für die Vernachlässigung der Materialdispersion angegeben.

Mit Hilfe dieses Rechenmodells kann der Einfluß verschiedener Kopplerstrukturen auf ein Liniennetz mit Hochgeschwindigkeitsübertragung simuliert werden.

2. Rechenmodell der Strecke mit Verzweigungen

Bild 1 zeigt den Aufbau einer Glasfaserverbindung mit passiven Abzweigen. Es ist eine Kettenstruktur. Jedes Glieder besteht jeweils aus Richtkoppler, Scrambler und Verbindungsfaser zum nachfolgenden Koppler. Für den Richtkoppler wird ideale Richtwirkung bei modenspezifischen Übertragungsfaktoren und Reflexionsfreiheit angenommen.

Der Energieaustausch der Moden auf dem Weg zwischen zwei Kopplern kann durch lokale oder statistisch verteilte Geometriestörungen auf den Verbindungsfasern sowie durch Stecker, Schweißstellen oder bestimmte Modescrambler hervorgerufen werden. Auch in den Abzweigen sind Modekopplungen zu erwarten. All diese Erscheinungen sind wegen der kurzen Faserstücke zwischen den Abzweigen im Scramblersymbol zusammengefaßt.

Als Verbindungsleitungen zwischen den Kopplern sind Gradientenfasern mit Potenzprofil vorgesehen. Sie haben eine modenabhängige Laufzeit und Dämpfung.

Am Sendepunkt in der linken Einkoppelfaser des ersten Kopplers wird ein Diracimpuls mit gleichverteilter Modeleistung angesetzt, damit in den Netzwerkpunkten entsprechend einer modalen Vielwegeausbreitung die Umverteilung der Modeleistungen und die intermodalen Impulsverzerrungen berechnet werden können.

Weiterhin wird vorausgesetzt, daß das Netzwerk nur aus makroskopisch identischen Verbindungsfasern besteht. Damit sind überall gleich viele Kernwellen ausbreitungsfähig. Sie zeigen eine mit zunehmender Modenummer langsam variierende Dämpfung und Laufzeit. Es ist deshalb möglich, das gesamte Modespektrum in gleich breite Modestreifen zu schneiden und für jeden Streifen eine resultierende Schwerpunktlaufzeit und Dämpfung anzugeben. Zur Erfassung der großen Vielfalt von Moden in der Gradientenfaser werden nun die Moden in jedem Streifen kollektiv wie ein neuer Modus behandelt. Die Breite der Modestreifen ist dadurch begrenzt, daß die Modenlaufzeitdifferenz innerhalb eines Streifens klein gegenüber der Anstiegszeit des Empfangsimpulses bleibt.

Bild 2 stellt ein Signalflußdiagramm der Multimodeleitung mit Abzweigen und Modescrambling dar. Die Pfeile bedeuten die Beträge der Übertragungsfaktoren längs oder zwischen den Modestreifen. Die Angabe eines Phasenmaßes ist in diesem Fall nicht sinnvoll, da wegen der statistisch verteilten Phasen der Wellen in den Modestreifen nur ein Wirkleistungstransport beschreibbar ist (1).

In Bild 2 ist eine horizontale und eine vertikale Schichtung zu erkennen. Das Diagramm beschreibt den Transport der Wellen von links nach rechts in N verschiedenen Modestreifen. Den einzelnen horizontalen Schichten i sind die Modestreifen des Modespektrums zugeordnet. Die vertikale Schichtung ist durch die periodische Aneinanderreihung von Koppler, Scrambler und Faser gegeben.

Für die Abzweige wird angenommen, daß nur identische Modestreifen aus den Einkoppelfasern in Vorwärtsrichtung angeregt und in der durchgehenden Faser weitergeleitet werden. Jeder Energieaustausch zwischen den Modestreifen wird in der Scramblermatrix konzentriert. Hier ist jeder Modestreifen mit jedem anderen in Vorwärtsrichtung verkoppelt. k_{ij} Scramblingkopplungsfaktor zwischen den Modestreifen i und j entspricht im Transmissionspfad der Faktor:

$$\left\{ 1 - \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^N k_{ij}^2 \right\}^{1/2} \quad (1)$$

Da das Scrambling unmittelbar hinter der Verzweigung angesetzt wird, kann die Verbindungsfaser allein durch eine modestreifenspezifische Dämpfung und Laufzeit beschrieben werden. Die Rückrichtung des Signalflußdiagramms ist nicht eingezeichnet, weil die Nachrichten nur in einer Richtung transportiert werden und Reflexionsmitflüsse getrennt behandelt werden können (2).

Die Übertragungsfaktoren zwischen den einzelnen Punkten des Netzwerks können nun nach den Regeln des Signalflußdiagramms bestimmt werden. Da die Abzweignetzwerke als kreislose Graphen dargestellt werden können, sind auch die Einzelwege der Signale durch die Produkte ihrer Transmissionsfaktoren und die Summen der Einzellaufzeiten zu beschreiben.

Für Gradientenfasern, in denen genügend Moden ausbreitungsfähig sind, berechnen sich die Gruppenlaufzeiten nach der WKB-Theorie. In (3) wird hierzu für Fasern mit Potenzprofil

$$n^2(r) = n_1^2 \left[1 - 2\Delta \left(\frac{r}{r_0} \right)^\alpha \right] \quad (2)$$

die auf die Länge bezogene Gruppenlaufzeit für den Modus i hergeleitet:

$$\tau_i = \frac{N_1}{c} \left\{ 1 + \Delta \left(\frac{\alpha - 2 - \epsilon}{\alpha + 2} \right) \left[\frac{i}{N} \right]^{\frac{\alpha}{\alpha + 2}} + \frac{\Delta^2}{2} \left(\frac{3\alpha - 2 - 2\epsilon}{\alpha + 2} \right) \left[\frac{i}{N} \right]^{\frac{2\alpha}{\alpha + 2}} \right\} \quad (3)$$

Die verwendeten Symbole sind in Abschnitt 7 zusammengestellt. Die Gl. (3) ist auch anwendbar, wenn i die Modestreifennummer und N die Gesamtzahl aller Modestreifen bedeutet. Die Wellenlängenabhängigkeit ergibt sich durch den Materialgruppenindex:

$$N_1 = n_1 - \lambda \frac{\partial n_1}{\partial \lambda} \quad (4)$$

und durch

$$\epsilon = -2 \frac{n_1 \lambda}{N_1 \Delta} \cdot \frac{\partial \Delta}{\partial \lambda} \quad (5)$$

Für $\alpha = 2 + \epsilon$ verschwinden die Laufzeitdifferenzen der Modestreifen in erster Näherung. Mit größerem α steigen sie mit der Modenummer monoton an.

3. Modespektren

Durch die modenabhängige Übertragungsfunktion der Richtkoppler in den Abzweigketten variieren die Modespektren längs der Strecke, selbst wenn die modenabhängige Faserdämpfung unberücksichtigt bleibt. Deshalb hängt auch die Impulsverbreiterung ebenso wie das Modespektrum von der Kopplernummer ab.

Mit Modespektrum ist eine Darstellung gemeint, bei der die Modeleistung über der Modestreifennummer i aufge-

tragen ist. Das Signalflußdiagramm zeigt den Leistungs-transport auf einer großen Vielfalt von Pfaden. Insbesondere trägt jeder Modestreifen am Sendepunkt zu jedem Modus am Empfangspunkt bei.

Zur Reduktion dieser Vielfalt wird vorausgesetzt, daß die Scramblingkopplungsfaktoren nicht zu groß werden. Dann kann man sich auf Transmission, die direkte Konversion, die Rekonversion und die Konversion mit Modestreifenkreuzung beschränken.

Transmission ist der Leistungstransport auf den horizontalen Linien des Signalflußdiagramms, also der Teil der Leistung, der bis zum Empfangspunkt im jeweiligen Sendemodestreifen verbleibt. Werden im Sendepunkt alle Modestreifen mit der Leistung P_0 eingespeist, so gelangt durch Transmission längs des identischen Modestreifens i die Leistung

$$P_i = P_0 \Gamma_{oi}^2 \Gamma_{ii}^{2(m-1)} \left[1 - (N-i)\Gamma_{ii}^2 \right]^m \quad (6)$$

zum Eingang des Kopplers $p = m + 1$. Sendepunkt ist die linke Einkoppelfaser des Kopplers $p = 1$. In Gl. (6) ist die modenspezifische Dämpfung auf der Faser vernachlässigt. Gl. (6) setzt weiterhin voraus, daß in jedem Scrambler alle übrigen $N-1$ Modestreifen dem Modestreifen i mit h^2 Leistung entziehen. Es liegt also ein weißes Scrambling vor.

Die direkte Konversion beschreibt alle Leistungsanteile,

die an irgend einem Scrambler einen einmaligen Übergang zwischen zwei Modestreifen erfahren. Für die Konversion vom Modestreifen j zum Modestreifen i ergibt sich bei weißem Scrambling nach Bild 2:

$$P_{ij} = P_0 \Gamma_{oj}^2 \Gamma_{jj}^{2\nu} \Gamma_{ii}^{2(m-\nu-1)} k^2 [1 - (N-1)k^2]^{(m-1)} \quad (7)$$

ν gibt die Lage der Koppelstelle in Ausbreitungsrichtung an (vgl. Indexschema in der Liste der Symbole).

ν nimmt alle Werte zwischen 0 und $m-1$ an.

Die nächst höhere Wegform enthält alle Leistungsanteile mit zweimaligem Modestreifenwechsel. Sie umfaßt die Rekonversion, also den Teil der konvertierten Leistung, der zum Ursprungsmodestreifen zurückkehrt, und die Konversion mit Modestreifenkreuzung, die den Leistungsübergang von einem Modestreifen zu einem anderen auf dem Umweg über einen dritten angibt. Die einzelnen Leistungsanteile errechnen sich zu:

$$P_{ijk} = P_0 \Gamma_{oj}^2 \Gamma_{ji}^{2\nu} \Gamma_{ii}^{2\mu} \Gamma_{kk}^{2(m-1-\nu-\mu)} k^4 [1 - (N-1)k^2]^{(m-2)} \quad (8)$$

Die Indizes ν und μ geben die Lage der ersten und zweiten Koppelstelle an:

$$\nu = 0, 1, \dots, m-2; \quad \mu = 0, 1, \dots, m-2-\nu$$

In Gl. (8) bedeuten außerdem:

- j = Sendemodestreifen
- i = Empfangsmodestreifen
- h = gekreuzter Modestreifen.

Wegformen höherer Ordnung, bei denen eine mehrmalige Modestreifenkreuzung auftritt, werden in der weiteren Rechnung vernachlässigt, da sie Kopplungsfaktoren mit höheren Potenzen proportional sind. Diese Vernachlässigung ist nur für schwache Scramblingkopplung zulässig, weil bei Unterteilung in viele Modestreifen die große Menge der Einzelwege die kleineren Leistungsanteile der höheren Wegformen aufwiegt. Die weitere Berechnung der Modespektren zeigt aber, daß die modenabhängige Auskopplung der Abzweige in Verbindung mit der Dämpfung von Moden hoher Ordnung den Signaltransport mit wachsender Kettenlänge auf ein schmales Modespektrum einengt. Dadurch bleibt die Zahl der am Transport beteiligten höheren Weganteile klein.

Zur Ermittlung der Modespektren an den Netzwerkpunkten wird eine gleichmäßige Verteilung der Sendeleistung auf die Modestreifen angesetzt. Dann kann durch Überlagerung der Leistungen der verschiedenen Weganteile die Gesamtleistung eines Modestreifens im Empfangspunkt berechnet werden. Deshalb werden die Parameter μ , ν , i , j und h in Gl (6) bis (8) systematisch variiert und die Leistungsanteile nach den Empfangsmodestreifen sortiert. Da das Signalflußdiagramm jedem Modestreifen einen mittleren Übertragungsfaktor zuweist, erzeugt die Rechnung am Empfangsort ein Balkendiagramm, das durch eine Verbindungslinie ersetzt wird.

In (1) wurde die Änderung des Modespektrums längs einer Kette von Richtkopplern mit parallel geführten Stufenfasern (Bild 3) berechnet. Hierbei konnte das Übertragungsverhalten des Ein-

zelkopplers nach einer Theorie von Ogawa (4) bestimmt werden. Diese Theorie gibt die Auskoppelfaktoren der verschiedenen Wellentypen als kontinuierliche Funktion der Modenummer an. Die Bilder 4 und 5 zeigen die Modespektren einer Reihenschaltung identischer Koppler mit direkt aufeinander liegenden Faserkernen, wenn in der Einkoppelfaser des ersten Abzweigs mit einem konstanten Modespektrum gesendet wird. Die Dämpfungen zwischen den Abzweigen sind vernachlässigt.

Nach der Einkopplung in den Hauptstrang ergibt sich das Modespektrum für $p=2$ in Bild 5. Auf Grund der kurzen Kopplungslänge z der parallelen Kerne werden die Moden hoher Ordnung bevorzugt übergekoppelt. Für kleine Modenummern entsteht eine Auskoppellücke. Die Verteilung der Modeausgangsleistungen sind in Bild 4 für den Fall eines fehlenden Scramblings aufgezeichnet. Der Parameter p bezeichnet die Reihenfolge der Abzweige in der Kette. An die Ausgänge der auf den Sendekoppler folgenden Abzweige werden die Moden hoher Ordnung besonders gut übertragen. Mit wachsender Zahl von Auskoppellelementen zwischen Eingangs- und Ausgangskoppler verarmen diese Moden jedoch sehr schnell, sodaß der Signaltransport von Moden niedriger Ordnung übernommen wird.

Den Einfluß der Modemischung erkennt man aus Bild 5, wo die allmähliche Verformung der Modespektren längs des Hauptstrangs dargestellt ist. Die durchgezogenen Kurven sind für den Fall fehlenden Scramblings die Modespektren am Eingang des Abzweigs p . Die Rechenmethode erzeugt am Empfangspunkt bei Modestreifenmischung ein Balkendiagramm, das durch eine Ausgleichslinie ersetzt wurde.

Ein weißes Modescrambling führt auf die gestrichelten Kurvenverläufe. Die Kette ist damit eine durch Richtkoppler belastete Multimodeleitung mit Scramblingkopplung. Durch das Scrambling werden allmählich im untersten Modenbereich Felder aufgebaut, die mit den Auskoppelzweigen in keinem Energieaustausch stehen. Hier ergibt sich eine niedrig gedämpfte Signalleitung.

Oberhalb von etwa $p=20$ stellt sich eine Form des Modespektrums ein, die annähernd invers zum Modespektrum hinter dem ersten Koppler ist. In Bild 5 ist dies die Kurve für $p=2$. Die auf P_0 bezogene Modeeingangsleistung des Kopplers $p=30$ ist in Bild 6 mit und ohne Scrambling ($k^2=0$) aufgezeichnet. Die Gesamtkurve ist aufgeschlüsselt nach Transmission, Konversion, Rekonversion und Konversion mit Modestreifenkreuzung. Die Transmission entspricht der durch Scrambling belasteten Kurve für $k^2=0$. Direkte und kreuzende Konversion sind dagegen verantwortlich für den Feldaufbau im unteren Bereich.

Das Abklingen der Kurven nach rechts erklärt sich aus der starken Auskoppeldämpfung für Moden höherer Ordnung. Während des Voranschreitens des Wellengemischs besteht ein Leistungsübergang von Moden niedriger Ordnung zu Moden hoher Ordnung. Die Rekonversion bleibt klein und ist annähernd ein gedämpftes Abbild der Kurve für $k^2=0$.

Entscheidenden Einfluß auf die Form der Modespektren hat die Größe des Scrambling. Je nach Kopplungsfaktor bauen sich im unteren Bereich Felder mit höherem oder niedrigerem Niveau auf. Dabei gibt es ein Minimum für die Gesamtdämpfung auf der Kette. Die von der Kette zum Eingang

des Kopplers $p = 30$ transportierte Gesamtleistung als Funktion des Scramblingkopplungsfaktors zeigt Bild 7. Durch die verschiedenen Konversionsformen wird ein Maximum der Leistungsübertragung hervorgerufen. An dieser Stelle liegt der günstigste Kompromiß zwischen schnellem Feldaufbau des unteren Modebereichs am Kettenanfang und der späteren Leistungsabgabe von Moden mit höherer Einfügungsdämpfung vor. Durch Einbau eines definierten weissen Scrambling, etwa durch Microbending eines Faserstücks definierte Länge, kann demnach die Gesamtdämpfung der Kette reduziert werden.

4. Impulsformen

Die Berechnung der Impulsformen beruht auf der Annahme, daß bei den heute verwendeten Ge- und B-dotierten Fasern in Verbindung mit schmalbandigen Lasern eine Materialdispersion gegenüber der Modendispersion vernachlässigbar ist. Die Rechenmethode besteht in der Synthese der über die verschiedenen Wegformen übertragenen Signalanteile. Die Leistungszeitverläufe an den einzelnen Netzwerkpunkten entstehen durch Weiterleitung der Diracimpulse der Sendestelle über Transmission, Konversion und Konversion mit Modestreifenkreuzung einschließlich Rekonversion. Da jedem Modestreifen eine mittlere Laufzeit zugeordnet wird, erzeugt die Rechenmethode am Empfangspunkt einen linienhaften Leistungszeitverlauf. Durch Vorgabe einer äquidistanten Unterteilung der Zeitachse werden die Energieanteile in den jeweiligen Intervallen zu ei-

nem Histogramm aufsummiert. Die Impulsformen entstehen bei Verbindung der Werte des Histogramms.

Nach Gl. (6) wird durch Transmission längs eines identischen Modestreifens i die Leistung P_i zum Eingang des Kopplers $p = m + 1$ transportiert. Die Laufzeit der Transmissionsanteile ist durch τ_i nach Gl (3) gegeben.

Die Konversion P_{ij} vom Modestreifen j zum Modestreifen i läßt sich nach Gl. (7) berechnen. Die normierte Laufzeit der Konversion τ_{ij} liegt zwischen τ_i und τ_j , weil der Konversionsanteil einen einmaligen Modestreifenwechsel beschreibt.

$$\tau_{ij} = \frac{1}{m} \left\{ \nu \tau_i + (m - \nu) \tau_j \right\} \quad (9)$$

Wie in Gl. (7) gibt auch hier der Index ν die Lage der Koppelstelle in Ausbreitungsrichtung an, denn der Produktbildung bei der Leistungsberechnung entspricht hier die Summation der Laufzeiten auf den Teilstrecken.

Die Leistungsanteile der Konversion mit Modestreifenkreuzung einschließlich Rekonversion erhält man aus Gl. (8). Die zugehörige normierte Laufzeit beträgt:

$$\tau_{ijR} = \frac{1}{m} \left\{ \nu \tau_j + (\mu + 1) \tau_i + (m - 1 - \nu - \mu) \tau_m \right\} \quad (10)$$

Bei Anregung eines jeden Modestreifens mit einem Diracimpuls beträgt die Energie in jedem Sendemodestreifen:

$$E_0 = P_0 \int_{-\infty}^{+\infty} \delta(t) dt \quad (11)$$

Zur Berechnung der durch unterschiedliche Laufzeiten der Moden bedingten Impulsform auf der Abzweigkette müssen alle Einzelwege mit den zugehörigen Laufzeiten berechnet werden. Die Energieinhalte der einzelnen Signale werden entsprechend ihrer Laufzeit in vorgegebene Zeitintervalle einsortiert. Ist t_q die mittlere Laufzeit zu einem Zeitintervall q der Breite Δt , so summiert sich dort die Energie:

$$E_q = \int_{t_q - \frac{\Delta t}{2}}^{t_q + \frac{\Delta t}{2}} \left\{ \begin{aligned} &\sum_{i=1}^N P_i \delta(t - l\tau_i) \\ &+ \sum_{\substack{i,j=1 \\ i+j}}^N P_{ij} \delta(t - l\tau_{ij}) \\ &\sum_{\substack{i,j,h=1 \\ i,j \neq h}}^N P_{ijh} \delta(t - l\tau_{ijh}) \end{aligned} \right\} dt \quad (12)$$

Darin bedeutet l die vom Impuls zurückgelegte Wegstrecke. Die drei Summen geben die Leistungsanteile von Transmission, Konversion und Konversion mit Wellentypkreuzung an, die als Diracimpulse übertragen werden.

Die Transmission beschreibt eine Abbildung der Sendemodestreifen auf die identischen Intervalle der Zeitachse. Durch die Konversion zwischen den Moden i und j wird das Intervall $|\tau_i - \tau_j|$ gemäß Gl(9) an den äquidistanten Stellen τ_{ij} mit Linien gefüllt, deren Energieinhalt entsprechend dem Unterschied von P_{ii} und P_{jj} in Gl. (7) schräg verteilt ist. Für die durch Konversion mit Modestreifenkreuzung erzeugten Linien ergibt dagegen Gl. (10) eine ungleichmäßige Dichte längs der Zeitachse. Eine derartige Verteilung ist in Bild 8 für eine Abzweigkette dargestellt, deren Einzelglieder aus einem Abzweig mit parallel geführten Stufenfasern, einem Scrambler und einer Faser mit Potenzprofil bestehen. Das Rechenmodell setzt eine Querschnittsanpassung zwischen Gradienten- und Stufenfaser des Kopplungsbereichs voraus, sodaß in beiden Bereichen eine gleiche Anzahl von Moden ausbreitungsfähig ist. Für den Abzweig gilt wieder der modenabhängige Überkopplungsfaktor gemäß Bild 5 mit $p = 2$, im Scrambler sind alle Moden untereinander gleich stark verkoppelt und der Exponent des Profils in Gl. (2) ist zu $\alpha = 2,7$ angenommen. Bild 8 zeigt die Leistungsverteilung der Konversion von Modestreifen $0,3$ am Sendepunkt zu einem Modestreifen $0,8$ in der Auskoppelfaser des Kopplers 17 bei Kreuzung von $0,4$. Horizontale Achse ist die Laufzeit bezogen auf die vom Impuls durchlaufene Wegstrecke abzüglich der Anfangsverzögerung.

Die Verteilung nach Bild 8, bei der die modeabhängige Dämpfung der Faser unberücksichtigt geblieben ist, hat ein

Maximum bei der Laufzeit des gekreuzten Modus und fällt zu den Laufzeiten von Sende- und Empfangsmodus ab. Die Lage des Kreuzkonversionsschwerpunktes richtet sich nach der Laufzeitdifferenz der beteiligten Wellentypen und nach deren unterschiedlichen Dämpfungen durch die Koppler.

Da zur Errechnung des Energieinhaltes eines einzelnen Zeitintervalls nach Gl. (12) eine große Zahl von Signalwegen zu bestimmen ist, muß auf eine kontinuierlich verschobene Fensterfunktion mit variablem t_q verzichtet werden. Die Methode beschränkt sich deshalb auf zeitlich aneinander gereihte Rechteckfensterfunktionen. Hierdurch entsteht ein Histogramm in der Art von Bild 9. Dargestellt ist das Histogramm eines Impulses am Eingang des 10. Abzweigs einer Kette von Kopplern mit parallel geführten Stufenfasern. Hierzu wurden in einer Rechnung mit 40 Modestreifen bei einem weißen Scrambling mit $h^2 = 0,0025$ zwischen Sende- und Empfangspunkt durch systematische Variation der Parameter μ und ν in Gl. (6) bis (10) alle Signalwege berücksichtigt.

Neben den modespezifischen Übertragungsfaktoren der Koppler gemäß Bild 5 für $p = 2$ ist wieder in die Rechnung eine Faser mit Potenzprofil und $\alpha = 2,7$ eingeführt, für die zusätzlich eine mit wachsender Modenummer steigende Dämpfung angenommen wurde. Als modeabhängiger Dämpfungsverlauf wurde eine in (5) gemessene Kurve berücksichtigt.

Das resultierende Histogramm ist aufgeschlüsselt nach Transmission, Konversion und Konversion mit Modestreifenkreuzung, von denen jede annähernd Glockenform aufweist. Die Form des Transmissionsanteils ist auf der Vorderflanke durch die modenspezifische Oberkopplung des Sendekopplers bestimmt. Der Abfall des Transmissionsanteils ergibt sich durch die mit wachsender Modenummer zunehmende Bedämpfung durch Koppler und Gradientenfaser. Die Glockenform der beiden Konversionsanteile wird hauptsächlich durch den intermodalen Laufzeitausgleich bewirkt. Dieser entsteht beim Überwechseln der Energie zwischen Modestreifen mit verschiedener Gruppengeschwindigkeit. Speziell die Signalanteile mit Modestreifenkreuzung konzentrieren sich auf die Impulsmitte.

Die eigentlichen Impulsformen entstehen bei Verbindung der Werte des Histogramms zu einer durchgezogenen Kurve. Diese Abrundung bedeutet eine Tiefpaßbildung für die Impulsform, deren Grenzfrequenz durch die Breite des Zeitfensters gegeben ist.

Die aus den Histogrammen hergeleiteten Impulsformen längs der Abzweigkette können Bild 10 entnommen werden. Für die Eingangsimpulsformen jedes 5. Kopplers sind die Anteile von Transmission, Konversion und Konversion mit Wellentypkreuzung übereinandergeschichtet.

Zum besseren Vergleich der Impulsformen ist die auf die maximale Pulsleistung normierte Momentanleistung aufgetragen. Abszisse ist die Zeit, bezogen auf die vom Impuls durchlaufene Gesamtstrecke.

Die Impulsformen nach Bild 10 zeigen mit wachsender Kopplernummer eine Verschiebung des Maximums nach kleinen τ -Werten, ein Anwachsen der Konversionen gegen die Transmission, eine zunehmende Glättung und eine unterproportionale Zunahme der Impulsbreite.

Die Verschiebung des Impulsmaximums zu kurzen Laufzeiten erklärt sich aus der Übernahme des Signaltransports durch Moden niedriger Ordnung. Dies kann für den Transmissionsanteil aus Bild 4 bzw. Bild 6 entnommen werden und gilt für Potenzprofile mit $\alpha > 2,3$. Auch die Konversionsanteile tragen zur Maximumverschiebung bei, weil in der Auskoppellücke des niedrigen Modebereichs Felder mit geringer Dämpfung entstehen. Diese führen im Kettenanfang zu einer Stufe auf der Impuls-vorderflanke, die erst allmählich durch Laufzeitausgleich abgebaut wird. Die weitere Zunahme der Konversionsanteile führt zu einer geglätteten Impulsform mit steilem Impulsanstieg und langsamerem Ausklingen der Pulsrückflanke.

Zur Abschätzung des Einflusses der modenabhängigen Dämpfung wurden die intermodalen Impulsverzerrungen für den Fall vernachlässigbarer Faserdämpfung berechnet. Bild 11 ergibt für sonst gleiche Bedingungen, daß der Transmissionsanteil der Moden hoher Ordnung im Anfangsbereich höher ausfällt. Dies führt zu einer stärkeren Verzerrung.

Der Einfluß von α beschränkt sich hauptsächlich auf eine zeitliche Dehnung oder Kompression des Impulses unter Beibehaltung seiner Form. Unterhalb von etwa 2,3 erscheint die spie-

gelbildliche Impulsform. Die grundsätzliche Impulsform ist somit gegeben durch den modenabhängigen Übertragungsfaktor der Abzweige, den Scramblingkopplungsfaktor und die Modeabhängigkeit der Dämpfung.

5. Impulsbreitenwachstum

Die gesamte Impulsbreite berechnet sich nach (3) aus dem intermodalen und dem intramodalen Anteil:

$$\sigma = \left(\sigma_{\text{intermodal}}^2 + \sigma_{\text{intramodal}}^2 \right)^{1/2} \quad (13)$$

Die intermodale Impulsverbreiterung

$$\sigma_{\text{intermodal}} = \sigma \ell \quad (14)$$

kann aus Bild 10 und 11 unmittelbar gewonnen werden. Sie enthält vorwiegend die geometriebedingten Netzwerkeigenschaften, wie Abzweigtyp, Faserdurchmesser und Gradientenprofil. Ihre getrennte Berechnung gestattet die Abstraktion von den Dotierungsmaterialien. Die Bilder 12 und 13 zeigen die intermodale Impulsverbreiterung längs der Abzweigkette für den Fall modenabhängiger Faserdämpfung und vernachlässigter Faserdämpfung. In beiden Fällen führt die Zunahme der Konversionsanteile zu einem unterproportionalen Impulsbreitenwachstum. Wegen eines anderen Abbaus der Transmissionsanteile ist bei vernachlässigter Faserdämpfung die Kurve in Bild 13 stärker gekrümmt.

Die intramodale Impulsverbreiterung ist vorwiegend durch die

Materialdispersion gegeben. Sie errechnet sich zu (3):

$$\sigma_{\text{intramodal}} \approx \sigma_{\text{Material}} \quad (15)$$

$$= \frac{1}{3} \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} l \left(\lambda_0^2 \frac{d^2 n_1}{d\lambda^2} \right)$$

$$l[\text{km}], \lambda_0[\mu], \Delta\lambda[\text{\AA}], \sigma_{\text{Mat.}}[\text{ns}]$$

Sie ist somit direkt proportional der Länge der vom Impuls durchlaufenen Wegstrecke und der spektralen Bandbreite der verwendeten Signalquelle. Gl. (13) und (15) gestatten somit eine Abschätzung des Einflusses der Materialdispersion. Die in Bild 10 und 11 gerechneten Impulsformen entsprechen einer Dominanz intermodaler Impulsverbreiterung gegenüber der Materialdispersion, wie sie bei Verwendung schmalbandiger Laser auftritt. Der Einfluß auf die Impulsform ist zu berücksichtigen, sobald $\sigma_{\text{intramodal}}$ die bei der Berechnung verwendete Fensterbreite Δt überschreitet.

Bei den im Experiment zu erwartenden Impulsformen kann aber im Wellenlängenbereich 800 - 900 nm eine intermodale Dispersion von 0,5 - 1,0 ns/km, eine Materialdispersion von 80 - 100 ps/nm.km und Laser mit spektralen Bandbreiten zwischen 0,1 und 2 nm angesetzt werden. Damit wird die zur Berechnung der Empfangsfunktion verwendete Fensterbreite im allgemeinen nicht erreicht.

6. Literatur

- (1) B. Strebel: "Ketten optischer Multimodever-
zweigungen mit Wellentypkopplung
auf den Verbindungsfasern"
Techn. Bericht Nr. 199 des HHI 1977
- (2) J. Meißner: "Reflexionen in Ketten optischer
Multimodeverzweigungen"
Studienarbeit Nr. 624 am Institut
für Hochfrequenztechnik der TU-Berlin
- (3) R. Ohshansky:
D. B. Keck "Pulse broadening in Graded-Index
optical fibers"
Appl. Optics 1979, Vol 15, No 2,
p. 483
- (4) K. Ogawa: "Simplified Theory of the Multimode
Fiber Coupler"
BSTJ 1977, p. 729
- (5) R. Ohshansky: "Differential Mode Attenuation in
Graded-Index Optical Waveguides"
IOOC '77, C4-1, p. 423

7. Liste der Symbole

A	Index für die durchgehende Faser
a	Index für Kopplerausgangsebenen
B	Index für angekoppelte Fasern
b	Impulsbreite
c	Lichtgeschwindigkeit
$ \bar{c}_i $	Kopplungskoeffizient für Modus i nach (4)
d	Abstand der Fasermitten
E_0	Energie eines Sendemodestreifens
E_q	Empfangsenergie im Zeitintervall q
e	Index für Kopplereingangsebenen
h	Index für gekreuzten Modestreifen
i	Index für Empfangsmodestreifen
j	Index für Sendemodestreifen
K	Konversion
K_r	Konversion mit Wellentypkreuzung

k_{ij}	Scramblingkopplungsfaktor zwischen den Modestreifen i und j
k	Scramblingsfaktor bei gleich großer Kopplung zwischen allen Modestreifen.
l	vom Impuls zurückgelegte Wegstrecke
l_1	Kopplerabstand
m	Anzahl der Verbindungsfasern zum Koppler p
N	Gesamtzahl der Modestreifen
N_1	Materialgruppenindex
$n(r)$	Berechnungsindex
n_1	Berechnungsindex in der Fasermitte
n_2	Berechnungsindex im Fasermantel
P	Leistung
P_0	Leistung eines Sendemodestreifens
P_i	transmittierte Leistung des Modestreifens i
P_{ij}	Einzelkonversion vom Modestreifen j zum Modestreifen i
P_{ijh}	Einzelkonversion vom Modestreifen j zum Modestreifen i bei Kreuzung des Modestreifens h

P_{Aepi}

Leistung des Modestreifens i in Faser A
am Eingang e des Kopplers p

P_{Bapi}

Leistung des Modestreifens i in Faser B
am Ausgang des Kopplers p

$\left(\frac{P_{Aep}}{P_{Be1}}\right)_{ges}$

Verhältnis von Gesamtleistung am Eingang
des Kopplers p zur Gesamtsendeleistung

P_{max}

Maximale Pulsleistung

p

Kopplernummer, Kettengliednummer

q

Index eines Zeitintervalls

R

Rekonversion

r

Abstand von der Faserachse

r_0

Radius der Kern-Mantelgrenze

T

Transmission

t

Zeit

t_0

Anfangslaufzeit des Impulses

t_q

mittlere Laufzeit zu einem Empfangs-
zeitintervall q

z

Kopplungslänge

α

Exponent des Berechnungsindexprofils

β_0

Wellenzahl

Γ_{oi}	Einkoppelfaktor des Abzweigs für den Modestreifen i
Γ_{ii}	Transmissionsfaktor des Abzweigs für den Modestreifen i
Δ	relative Berechnungsindexdifferenz
$\Delta\lambda$	spektrale Bandbreite der Signalquelle
Δt	Breite des Empfangszeitintervalls
$\delta(t)$	Dirac-Funktion
ε	Parameter
μ	Nummer des Scramblers des zweiten Modewechsels zwischen h und i von Koppler p aus gezählt
ν	Nummer des Scramblers des ersten Modewechsels zwischen j und i vom Sendekoppler aus gezählt
λ	Wellenlänge
λ_0	Sendewellenlänge
σ	Impulsbreite
$\sigma_{intermodal}$	Impulsbreite zufolge intermodaler Dispersion
$\sigma_{intramodal}$	Impulsbreite zufolge intramodaler Dispersion

$\epsilon_{\text{Material}}$

Impulsbreite zufolge Materialdispersion

τ

Laufzeit pro Längeneinheit

τ_0

Laufzeit des Impulsanfangs pro Längeneinheit

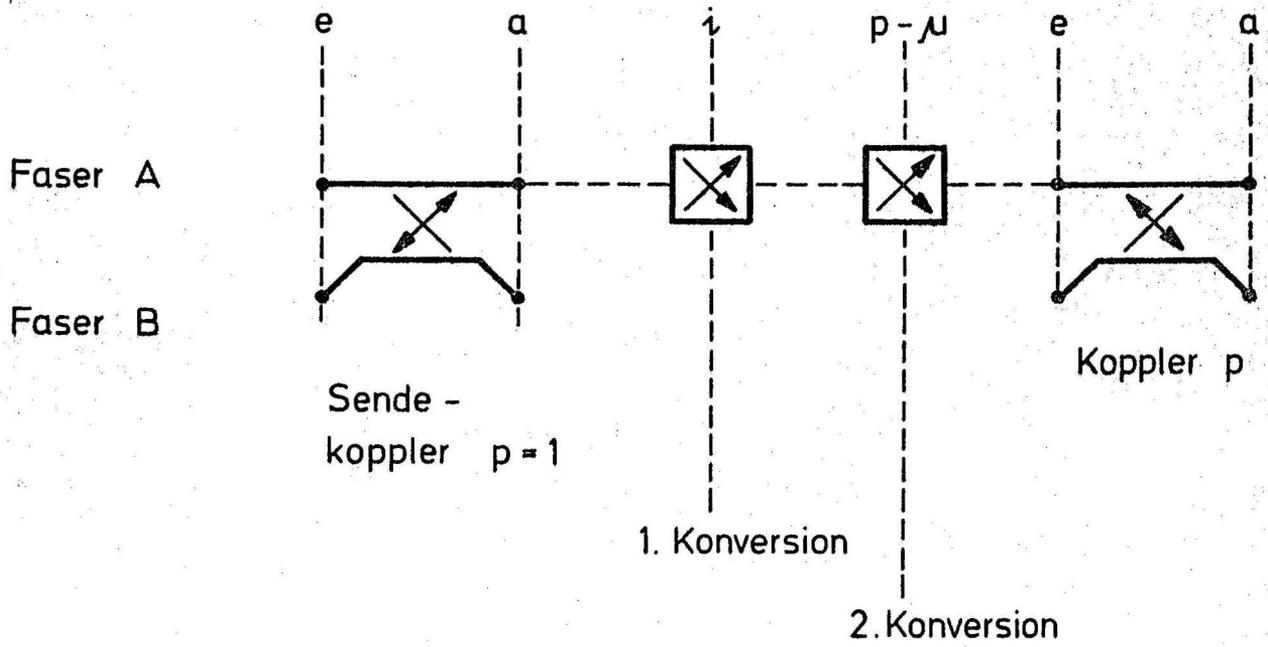
τ_{ij}

Laufzeit der Einzelkonversion von Modestreifen j zu i pro Längeneinheit

τ_{ijk}

Laufzeit der Einzelkonversion von Modestreifen j über k zu i pro Längeneinheit

Indexschema



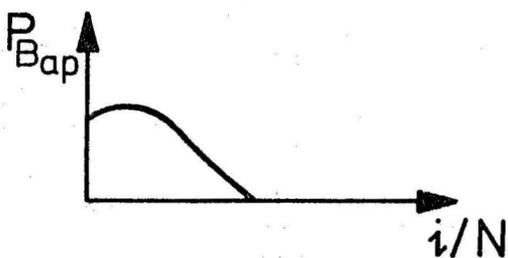
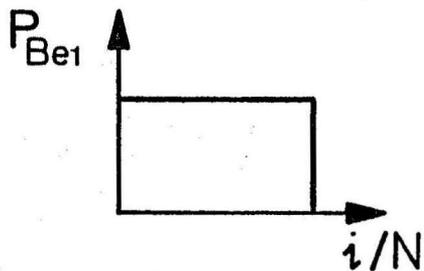
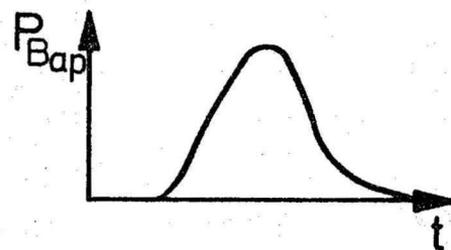
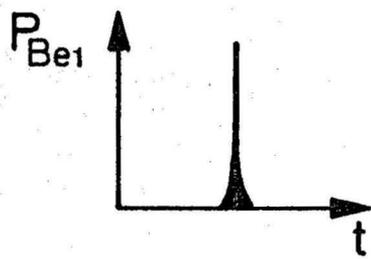
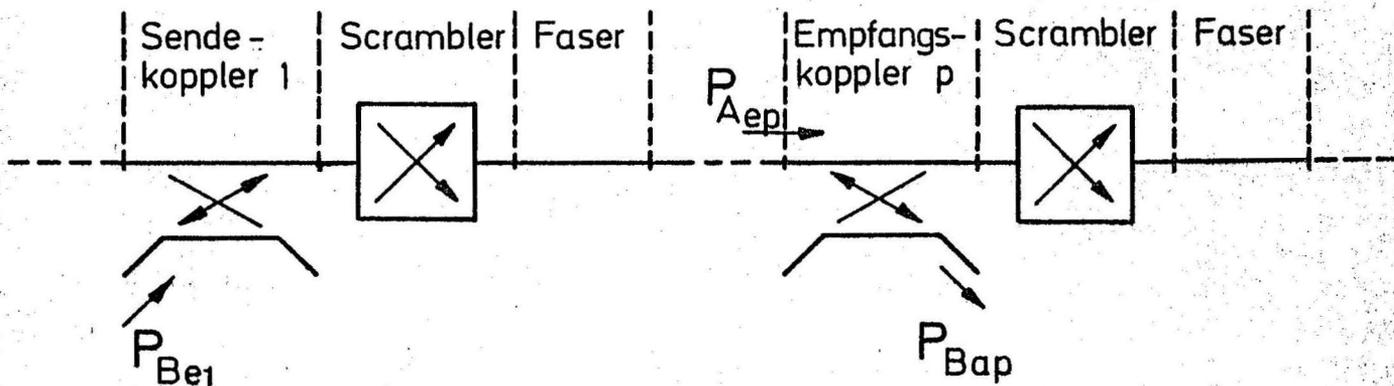


Bild 1
Kettenschaltungen von Multimodeverzweigungen

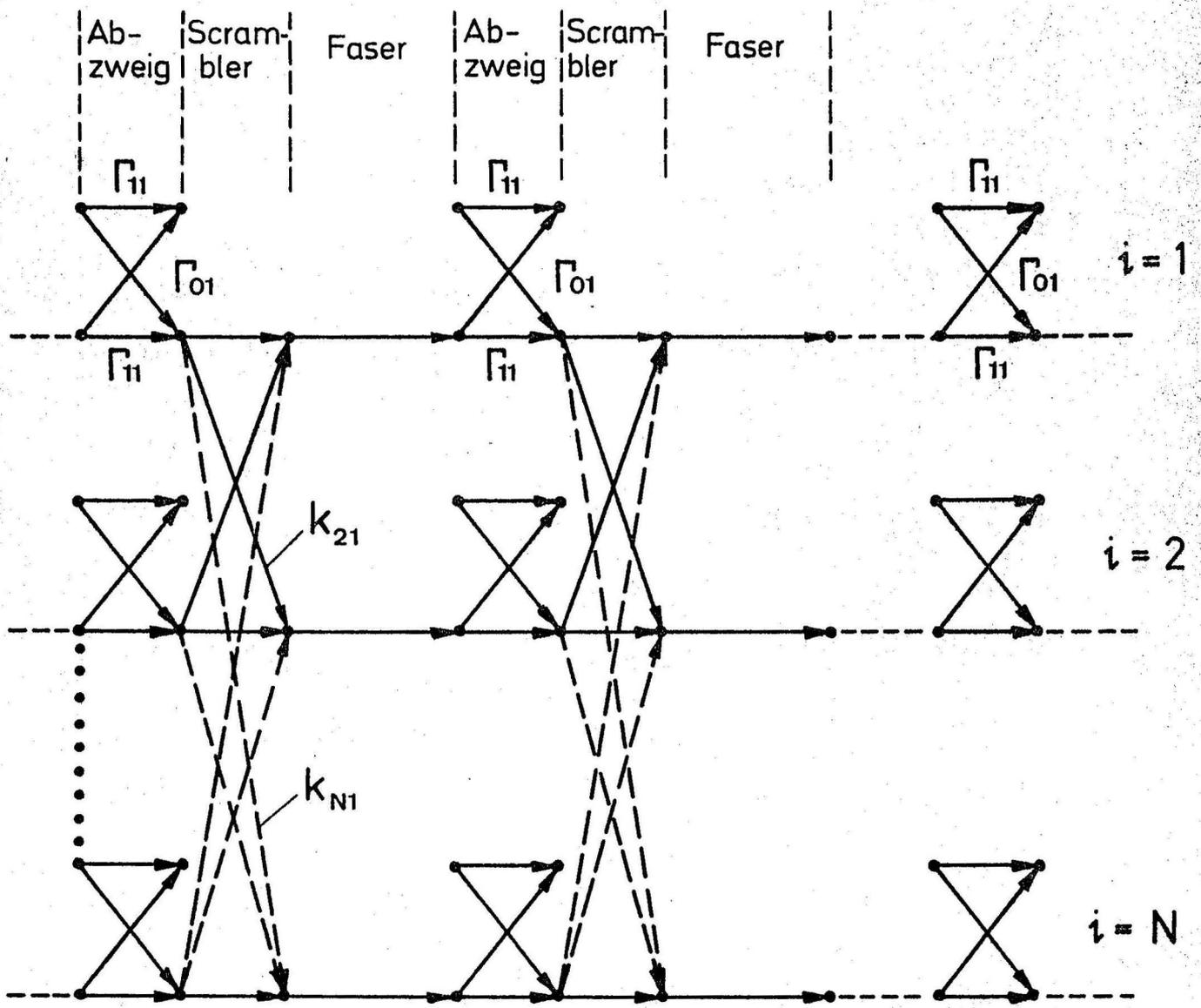


Bild 2

Signalflußdiagramm der Multimodeleitung
mit Verzweigungen

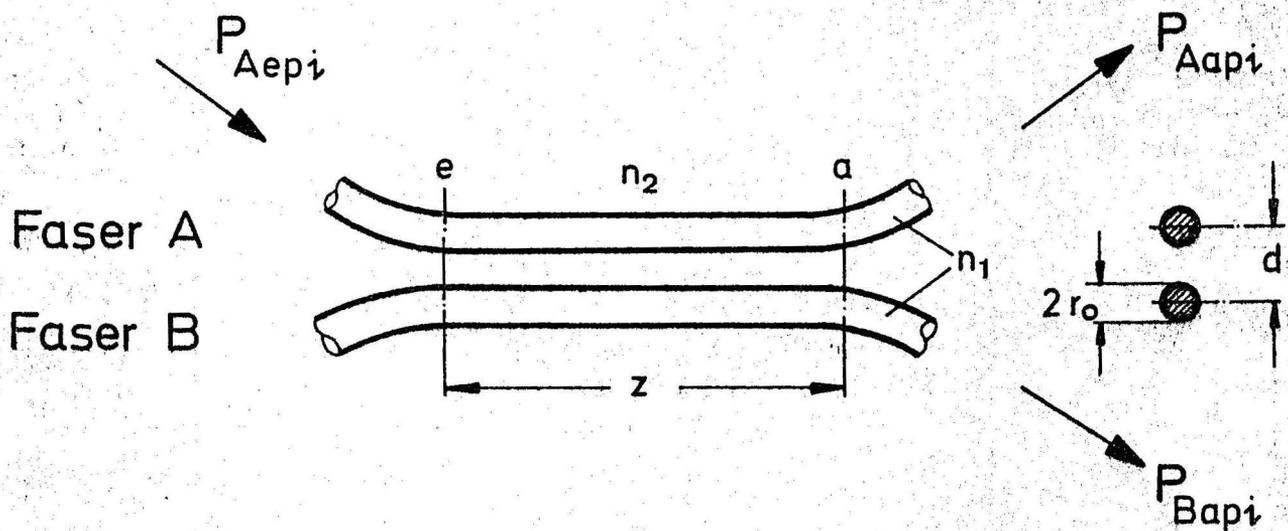


Bild 3

Multimoderichtkoppler mit parallel geführten Stufenfasern [4]

$$\frac{P_{Bapi}}{P_{Aepi}} = \sin^2 |\bar{c}_i| z = \Gamma_{0i}^2$$

$$|\bar{c}_i| = \frac{2^{1/4} \Delta^{1/4}}{\sqrt{\pi \beta_0 n_1} r_0^{3/2}} \left(\frac{i}{N} \right) \left(1 - \frac{i}{N} \right)^{1/4} \quad \text{für } d = 2r_0$$

$$\Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_1} ; \quad \beta_0 = \frac{2\pi}{\lambda}$$

$$\frac{P_{Aapi}}{P_{Aepi}} = \Gamma_{ii}^2 = 1 - \Gamma_{0i}^2$$

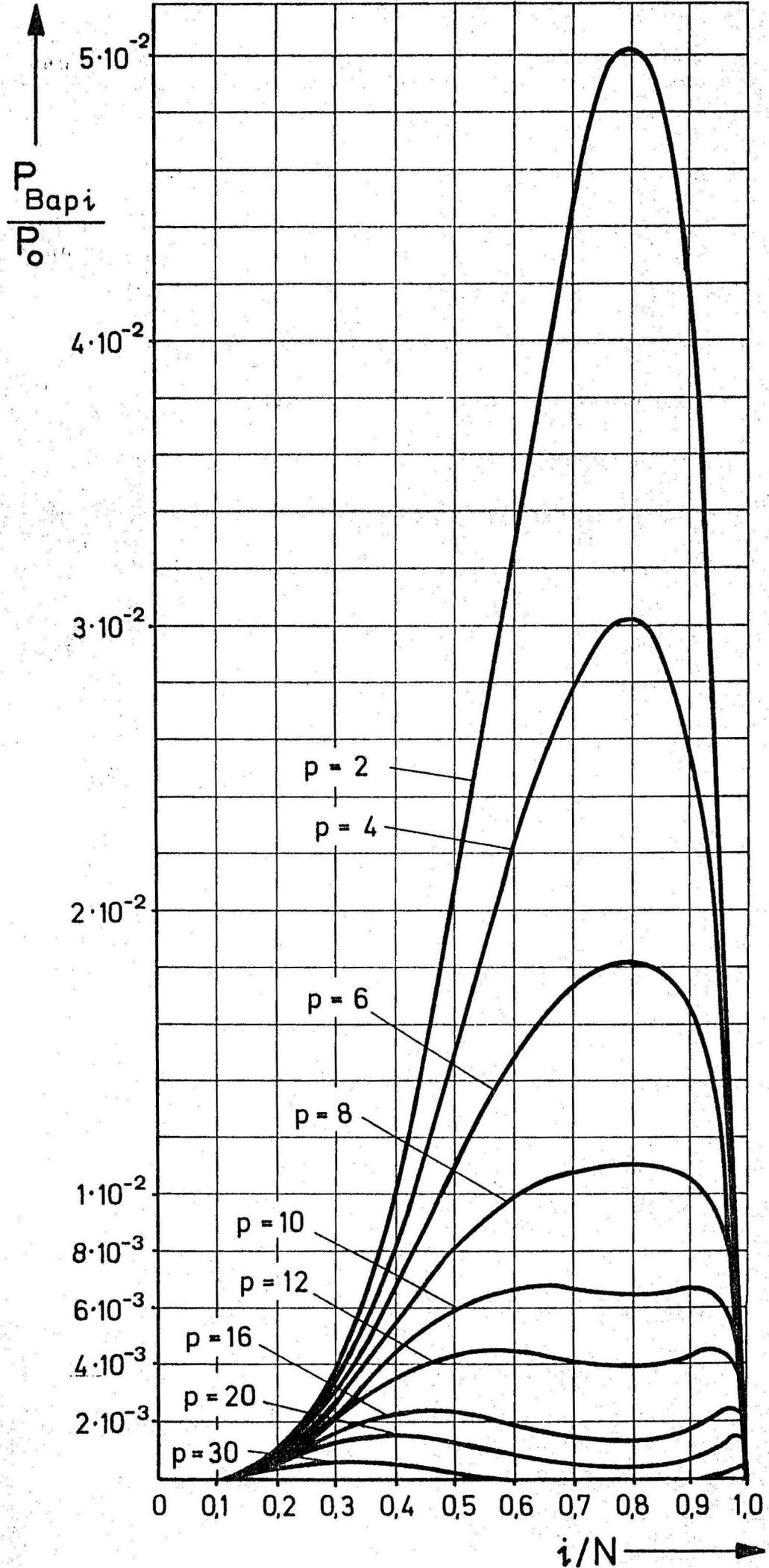


Bild 4
Modespektrum
am Ausgang
des Kopplers p
 $k^2 = 0$

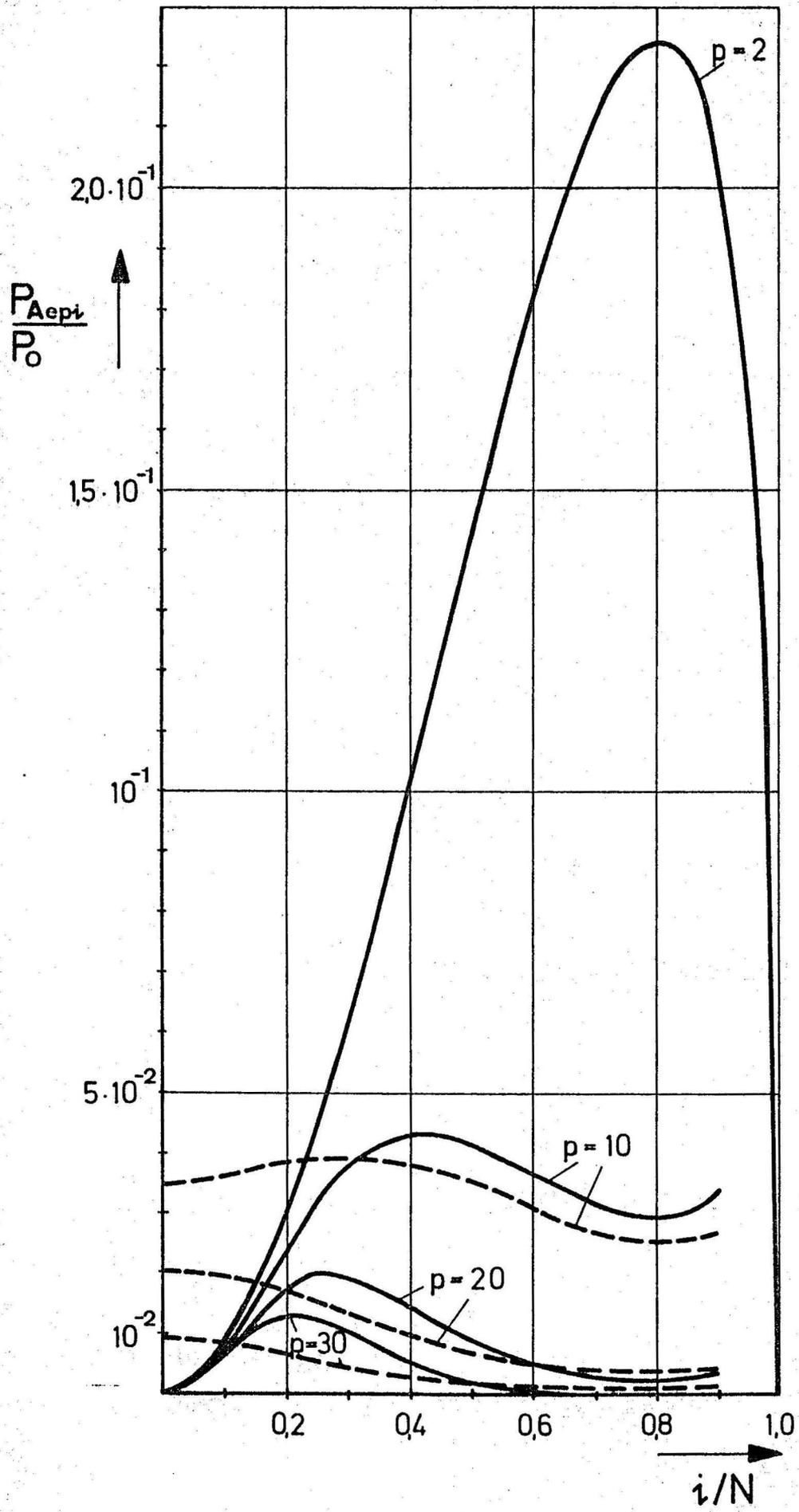


Bild 5
Modespektrum
am Eingang
des Kopplers p
 ——— $k^2 = 0$
 - - - $k^2 = 0,01$

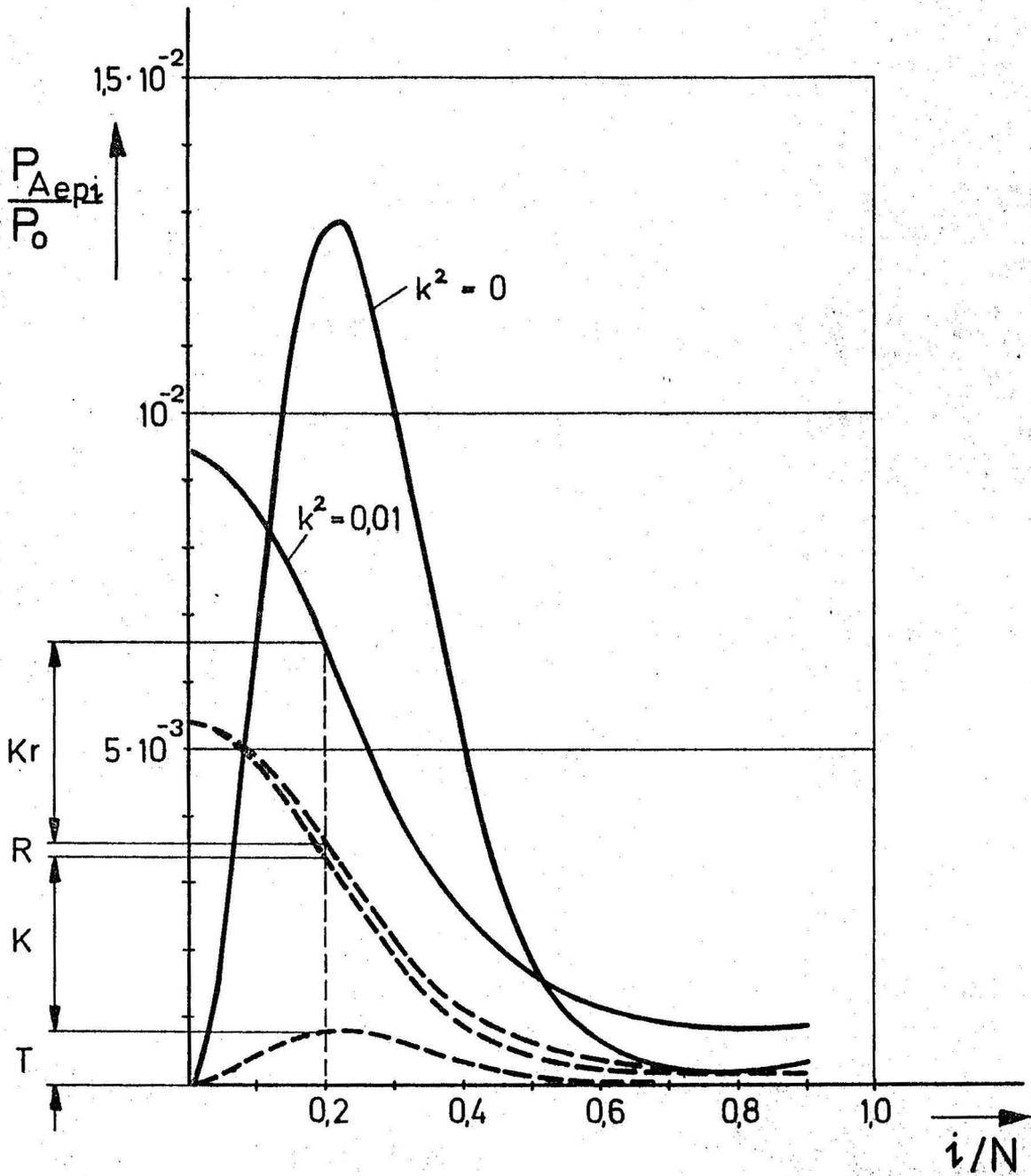


Bild 6

Modespektrum am Eingang des Kopplers $p = 30$

T = Transmission

K = Konversion

R = Rekonversion

Kr = Konversion mit Modestreifenkreuzung

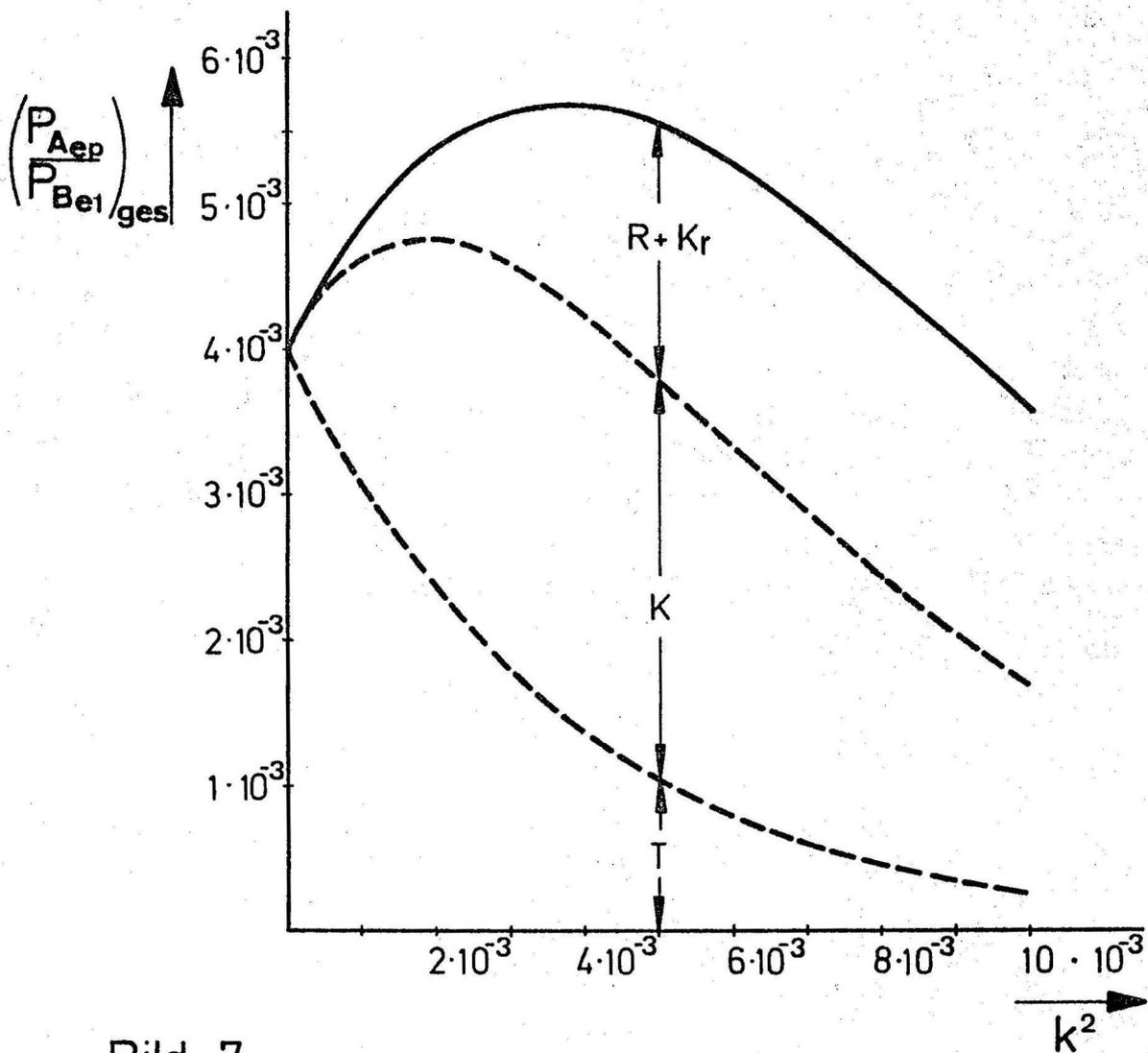


Bild 7

Gesamtleistung des Kopplers $p = 30$ als Funktion der Modenkopplung

T = Transmission

K = Konversion

R = Rekonversion

K_r = Konversion mit Modestreifenkreuzung

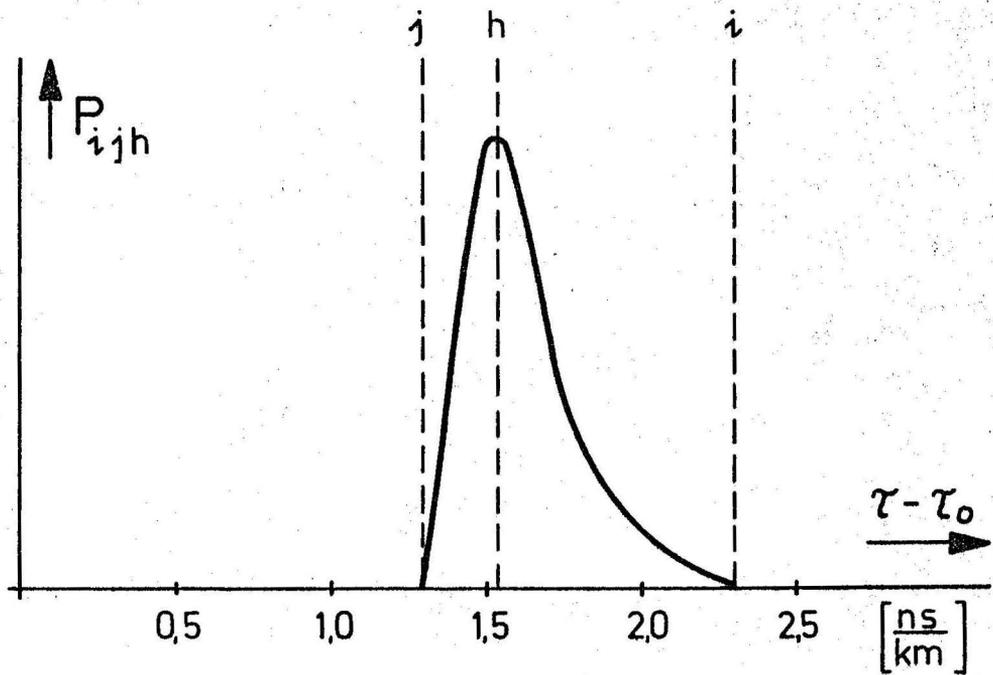


Bild 8

Verteilung der Konversion mit
Modestreifenkreuzung.

- j = Sendemodestreifen
- i = Empfangsmodestreifen
- h = gekreuzter Modestreifen

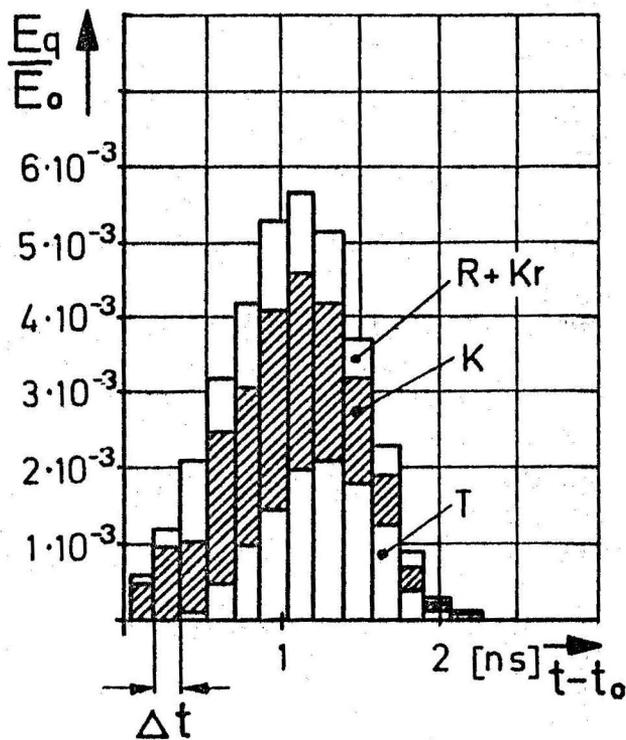


Bild 9

Histogramm eines Impulses
auf der Hauptleitung

$p = 10; \quad k^2 = 0,0025; \quad N = 40$

Distanz zwischen den Abzweigen $l_1 = 100 \text{ m}$

T = Transmission

K = Konversion

R = Rekonversion

Kr = Konversion mit Modestreifenkreuzung

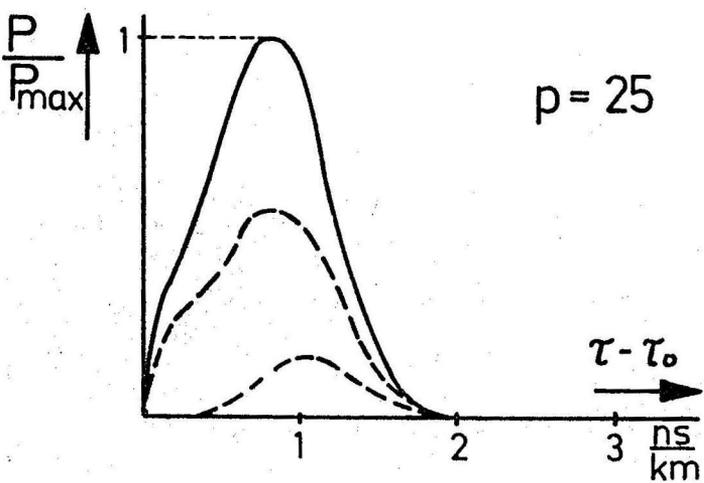
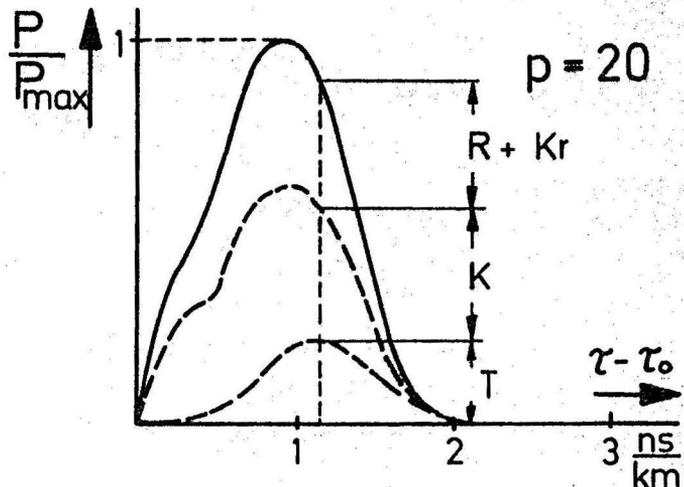
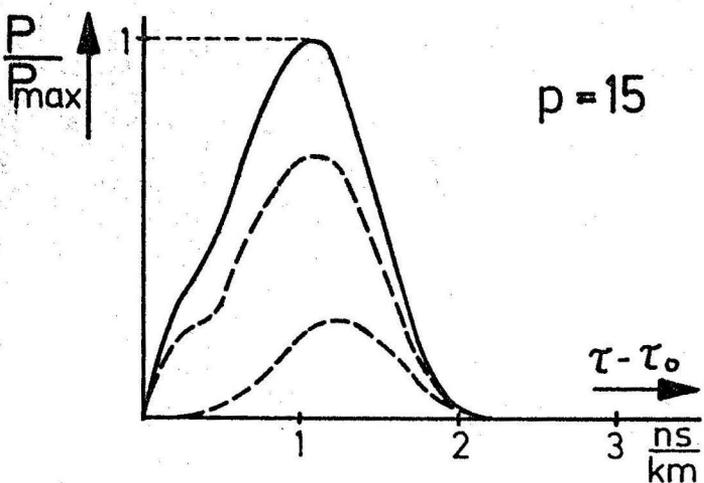
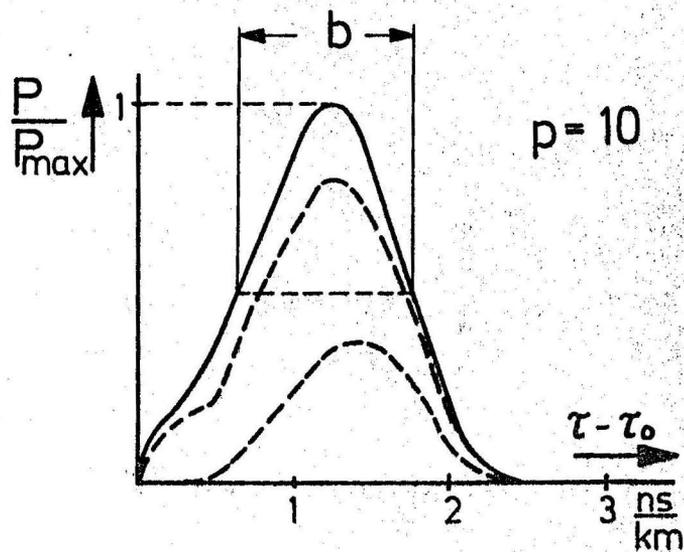
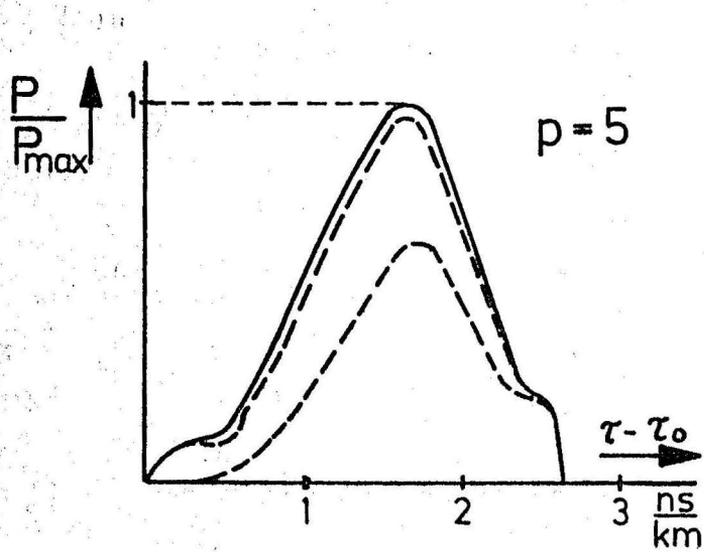


Bild 10

Impulsverläufe längs
der Abzweigkette

$N = 40$; $k^2 = 0,0025$; $l_1 = 100 \text{ m}$

T = Transmission

K = Konversion

R = Rekonversion

Kr = Konversion mit
Modestreifenkreuzung

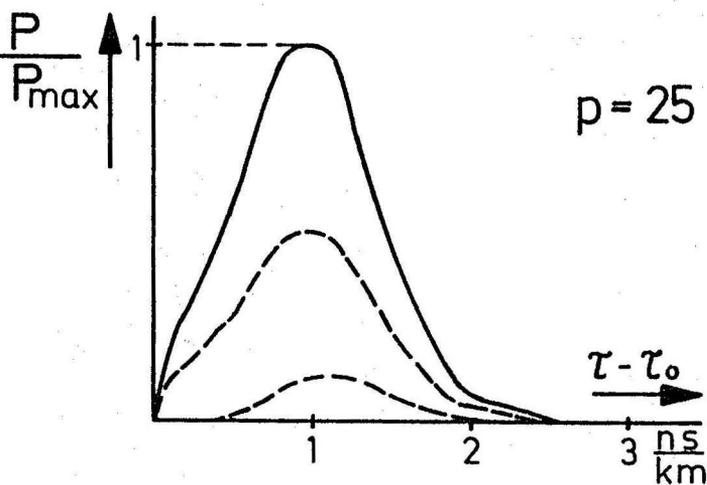
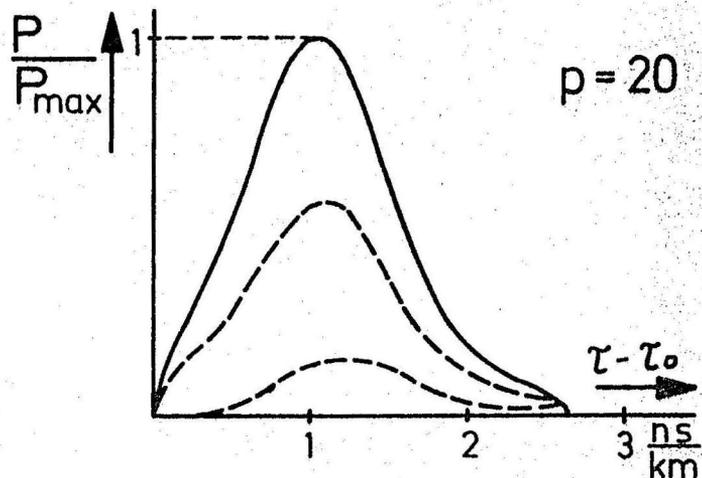
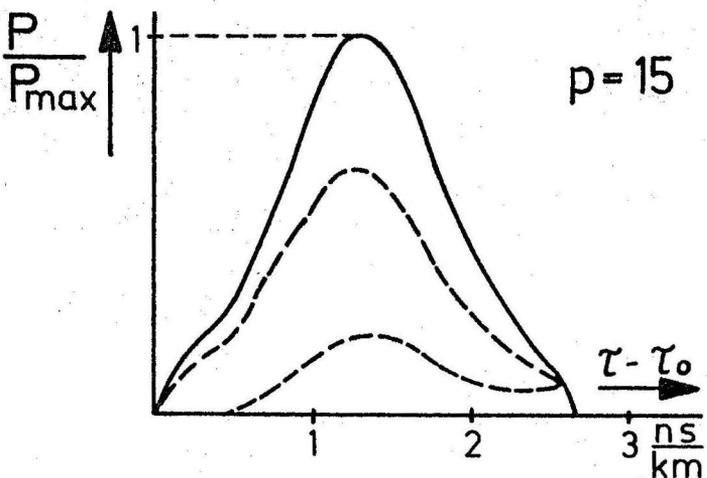
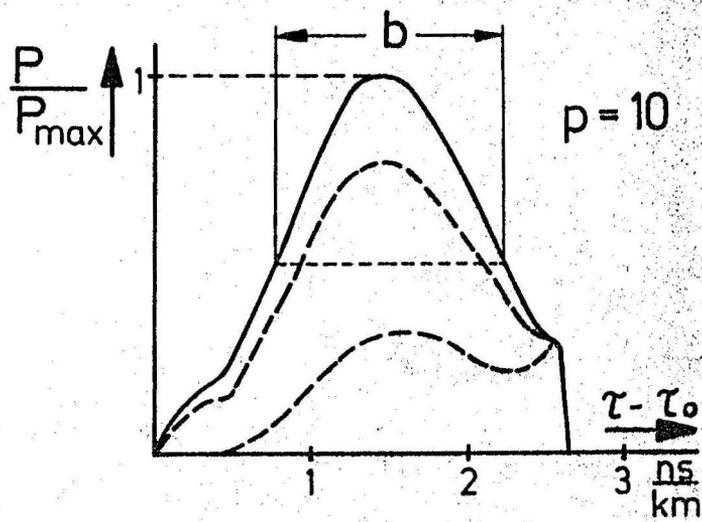
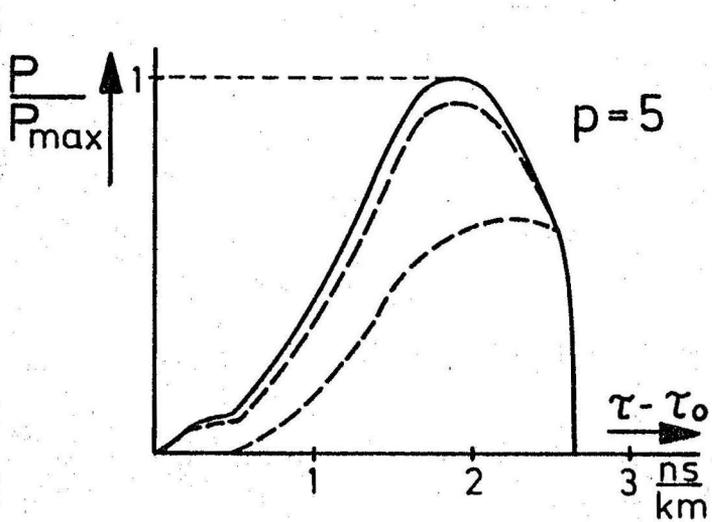


Bild 11

Impulsverläufe längs
der Abzweigkette

$N = 40; k^2 = 0,0025$

Faserdämpfung vernachlässigt

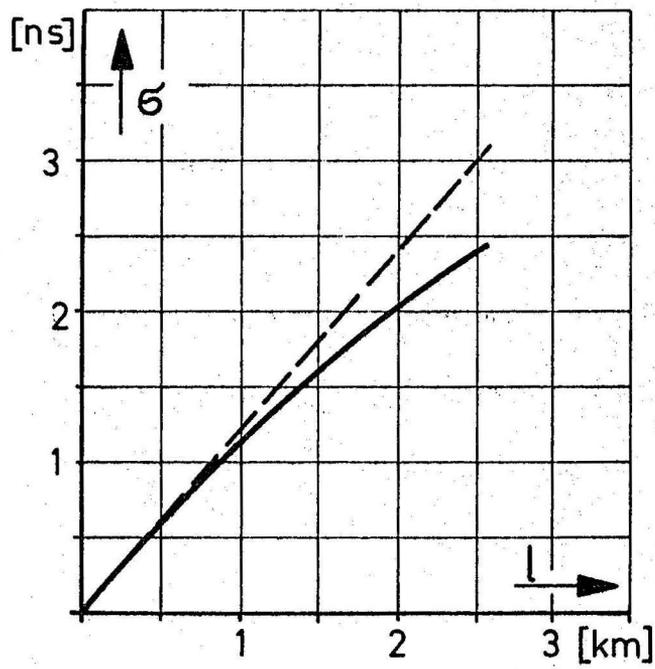


Bild 12

Impulsbreitenwachstum längs der

Abzweigkette

$N = 40; k^2 = 0,0025$

$l_1 = 100 \text{ m}$

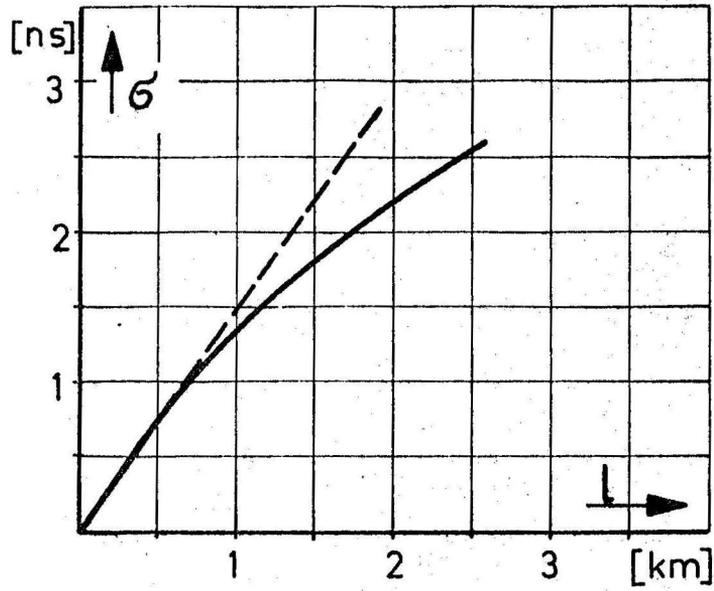


Bild 13

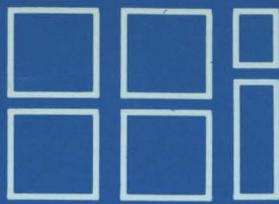
Impulsbreitenwachstum längs der

Abzweiggkette

$$N = 40 ; k^2 = 0,0025$$

$$l_1 = 100 \text{ m}$$

Faserdämpfung vernachlässigt



**Heinrich-Hertz-Institut
für Nachrichtentechnik
Berlin GmbH**

