

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

Technischer Bericht Nr. 214

**DER EINFLUSS VON ÜBERTRAGUNGSFEHLERN  
BEI DER DPCM-CODIERTEN ÜBERTRAGUNG  
VON FARBFERNSEHSIGNALEN**

von

**Thomas Kummerow**

Technischer Bericht Nr.214

DER EINFLUSS VON ÜBERTRAGUNGSFEHLERN BEI DER DPCM - CODIERTEN ÜBER-  
TRAGUNG VON FARBFERNSEHSIGNALEN

Zusammenfassung

Die digitale Übertragung von Farbfernsehsignalen mit 34 Mbit/s erfordert den Einsatz von Quellencodierverfahren, vorzugsweise der DPCM-Codierung. Ihre Anwendung hat eine erhebliche Verstärkung der Störwirkung von Übertragungsfehlern gegenüber einer PCM-Übertragung zur Folge. Die Untersuchung dieser Störwirkung mit Hilfe eines Hardware-Experimentalaufbaus war Ziel der dargestellten Arbeiten. Darüber hinaus wurden Verfahren bzw. Zusätze entwickelt und überprüft, die zu einer Reduktion der Fehlersichtbarkeit oder zu einer Verdeckung von Fehlern führen. Besonderes Gewicht hat in diesem Zusammenhang das Hybrid-DPCM-Verfahren, das in zwei unterschiedlichen Versionen analysiert wurde. Quantitative Aussagen zur Störwirkung von Übertragungsfehlern wurden mit Hilfe umfangreicher Meßreihen zur subjektiven Beurteilung der Bildqualität gewonnen.

Bearbeiter:

*Th. Kummerow*

(Dipl.Ing. Thomas Kummerow)

Geschäftsführer

*[Signature]*  
(Dr. W. Grunow)

Abteilungsleitung

*[Signature]*  
(Dr. G. Mahler)

Berlin - Charlottenburg, den 15.5.1981

ISSN 0172-8873

# Inhaltsverzeichnis

	<u>Seite</u>
<u>1. Einleitung</u>	1
<u>2. Codierung von Farbfernsehsignalen</u>	3
2.1 Digitalisierung der Signale	3
2.1.1 Komponentendarstellung	3
2.1.2 Abtastfrequenzen, Quantisierung	4
2.2 DPCM-Codierung	5
2.2.1 Eindimensionale und zweidimensionale Prädiktion	5
2.2.2 Die Quantisierung bei der DPCM-Codierung	8
2.3 DPCM-Codierung mit Quantisierersteuerung	8
2.4 Behandlung der Chrominanzkomponenten	11
<u>3. Der gestörte Übertragungskanal</u>	12
3.1 Symmetrischer Binär-Kanal mit statistisch unabhängigen Fehlern	12
3.2 Bündel-Fehler	12
3.3 Übertragung im Basisband	13
3.4 Differentielle Phasenmodulation	13
3.5 Mehrstufige Amplitudenmodulation	14
<u>4. Der Einfluß von Übertragungsfehlern auf das empfangene Bild</u>	15
4.1 Fehlerfortpflanzung bei DPCM-Codierung	15
4.1.1 Der Einfluß der Prädiktion auf die Fehlerfortpflanzung	15
4.1.2 Der Einfluß der Codewortzuordnung	20
4.1.3 Der Einfluß der Quantisierersteuerung	24
4.1.3.1 Quantisierersteuerung durch den Prädiktionswert	24
4.1.3.2 Quantisierersteuerung durch Bildpunktdifferenzen	24
4.1.3.3 Quantisierersteuerung durch Prädiktionsfehler	25
4.1.4 Dynamische Störwirkung	25
4.2 Der Einfluß von Rundungsfehlern auf den Fehlerabbau	26

	<u>Seite</u>
6.3 Auswertung der Ergebnisse	59
6.3.1 Darstellung der Meßergebnisse; Notenmittelwerte	59
6.3.2 Näherungsfunktion und charakteristische Werte	60
<u>7. Ergebnisse der subjektiven Untersuchungen zur Störwirkung von Übertragungsfehlern</u>	64
7.1 Fehlersichtbarkeit im Luminanzbild bei PCM und DPCM	65
7.2 Sichtbarkeit der Chrominanzfehler	68
7.3 Der Einfluß der Hybrid-DPCM	68
7.3.1 DPCM mit fester Quantisierung	68
7.3.2 DPCM mit Quantisierersteuerung	69
7.3.3 Quantisierer mit reduzierter Stufenzahl	71
7.4 Abhängigkeit der Störwirkung vom Kanalmodell	71
7.5 Störwirkung von Fehlerbursts	74
7.6 Zeilenersetzung	76
7.6.1 Zeilenersetzung bei eindimensionaler Prädiktion durch Wiederholung oder Mittelung	76
7.6.2 Zeilenersetzung bei zweidimensionaler Prädiktion	77
7.7 Abhängigkeit der Fehlersichtbarkeit von der maximalen Bildschirmleuchtdichte	80
7.8 Fehlersichtbarkeit bei der Videobandbreite 1 MHz	82
7.9 Abhängigkeit der Fehlersichtbarkeit vom Bildinhalt	84
<u>8. Bildschirmaufnahmen als Ergänzung zu den Meßergebnissen</u>	87
<u>9. Zusammenfassung und Schlußfolgerungen</u>	104
<u>10. Literaturangaben</u>	107

## 1. Einleitung

Die Überlegungen und Untersuchungen zur digitalen Übertragung von Farbfernsehsignalen haben in dem Maße konkretere Formen angenommen, in dem die Definition von PCM-Übertragungskanälen bzw. -Hierarchiestufen voranschritt und experimentelle digitale Übertragungsstrecken mit den gewünschten Übertragungsraten verfügbar wurden. Die Festlegung der Rate 34.368 Mbit/s für die Farb-TV-Übertragung und die Notwendigkeit der Kompatibilität mit unterschiedlichen Analog-Farbcodierungen (PAL, SECAM) haben Vorschläge zur digitalen Codierung der Farbfernsehsignale zur Folge gehabt, die auf der Komponentendarstellung und der Anwendung der differentiellen Pulscodemodulation (DPCM) beruhen.

Der Schwerpunkt der wissenschaftlichen Arbeiten, die zu diesen Vorschlägen geführt haben, lag auf der Verbesserung der erreichbaren Bildqualität durch Weiterentwicklung des ursprünglichen DPCM-Konzeptes, um bei der vorgegebenen, begrenzten Übertragungskapazität eine vom Analogbild nicht mehr unterscheidbare Wiedergabequalität zu erzielen. Dieses Ziel konnte durch weitgehende Nutzung der Eigenschaften der visuellen Wahrnehmung bei der Entwicklung adaptiver DPCM-Codierverfahren zumindest für natürliche Bildvorlagen praktisch erreicht werden.

Die auf der Empfangsseite einer digitalen Übertragungskette erzielbare Bildqualität hängt nun außer von der Güte des Codierverfahrens auch von der Fehlerrate des Übertragungskanals und von der Empfindlichkeit des Codierverfahrens gegenüber Übertragungsfehlern ab. Um über diese Fehlerempfindlichkeit die erforderlichen genauen Aussagen zu gewinnen, müssen getrennte Codier- und Decodiergeräte für das gewünschte Verfahren realisiert und Übertragungsversuche mit echten oder nachgebildeten Kanälen durchgeführt werden. Bei der Entwicklung und Optimierung von Codierverfahren werden so weitgehende Untersuchungen im allgemeinen nicht oder nur unvollständig mit Hilfe der Rechnersimulation von Einzelbildern vorgenommen. Eine Rechnersimulation der Codierung und Übertragung führt jedoch nur dann zu vergleichbaren und realistischen Ergebnissen, wenn eine ausreichend lange Folge von Einzelbildern verarbeitet und als Bewegtbildsequenz sichtbar gemacht wird. Hierfür stehen technische Möglichkeiten noch nicht in ausreichendem Umfang zur Verfügung.

Deshalb wurde in der vorliegenden Arbeit der Versuch unternommen, mit Hilfe eines Hardware-Versuchssystems möglichst umfassende Aussagen über die Störwirkung von Übertragungsfehlern bei wichtigen DPCM-Codierverfahren zu gewinnen. Da diese Verfahren für eine hochwertige Digitalübertragung von Farbfernsehsignalen bei einer Rate von 34 Mbit/s geeignet sein sollen, mußten auch besonders effektive und damit entsprechend komplexe adaptive Verfahren in die Untersuchungen eingeschlossen werden. Andererseits war eines der Hauptanliegen auch die Entwicklung und Überprüfung von Verfahren bzw. Zusätzen, die zu einer Reduktion der Fehlersichtbarkeit oder zu einer Verdeckung von Fehlern führen sollen. Die Hardware-Realisierung dieser Verfahren einschließlich einer flexiblen Kanalnachbildung erlaubt subjektive Meßreihen in dem notwendigen Umfang, um umfassende und repräsentative Ergebnisse zu erzielen.

Die Darstellung in den folgenden Kapiteln ist in folgender Weise gegliedert: Zunächst wird die Digitalisierung von Farbfernsehsignalen beschrieben und die Wirkungsweise und die Eigenschaften der DPCM-Codierung erläutert. Dabei wird auch auf die verschiedenen Möglichkeiten der Quantisierersteuerung zur Verbesserung der erreichbaren Bildqualität eingegangen (Kap. 2). Anschließend werden Übertragungsstörungen und Modelle für ihre Charakterisierung beschrieben. Einige für die Bildübertragung wichtige Sonderfälle von Kanalmodulationsverfahren und deren Auswirkungen auf die Fehlerstruktur sind dabei berücksichtigt (Kap.3).

Im Kapitel 4 folgt eine eingehende Beschreibung der Fehlerfortpflanzungseffekte, wie sie bei verschiedenen Varianten des DPCM-Codierprinzips auftreten. Es wird der Einfluß von Rundungsfehlern auf die Fehlerfortpflanzung analysiert und gezeigt, wie er verhindert werden kann. Ausführlich wird dann auf das Hybrid-DPCM-Verfahren eingegangen, das geeignet ist, die Fehlerfortpflanzung gegenüber der normalen DPCM erheblich zu reduzieren. Hierbei werden zwei Versionen unterschieden, die in ihrer Wirkung, aber auch in den Anwendungsmöglichkeiten deutlich differieren. Schließlich werden Zeileneretzungsverfahren erwähnt, die im Gegensatz zu anderen Methoden eine explizite Fehlererkennung erfordern.

Die Kapitel 5 und 6 gehen auf die Hardware für die Durchführung der Versuchsreihen ein und beschreiben den Ablauf der Meßreihen und die statistische Auswertung des gewonnenen Materials. Im Kapitel 7 werden die Ergebnisse anhand der gewonnenen Meßkurven diskutiert. Es wird zusätzlich versucht, mit Hilfe von Bildschirmfotos die Ergebnisse etwas zu verdeutlichen (Kap. 8).

## 2 Codierung von Farbfernsehsignalen

### 2.1 Digitalisierung der Signale

#### 2.1.1 Komponentendarstellung

In der analogen Farbfernsehtechnik werden die Signale der drei Farbauszüge  $E_R$ ,  $E_G$  und  $E_B$  des Bildes zunächst in das Leuchtdichtesignal  $E_Y = rE_R + gE_G + bE_B$  und die beiden Farbartsignale  $E_U = c_1 (E_R - E_Y)$  und  $E_V = c_2 (E_B - E_Y)$  umgesetzt. In vereinfachter Form spricht man vom Leuchtdichte- oder Luminanzsignal  $Y$  und den beiden Farbart-, Chrominanz- oder auch Farbdifferenzsignalen  $U$  und  $V$ . Für diese Signale wird eine Gradationsentzerrung vorausgesetzt. Die Bandbreite des Luminanzsignals entspricht mit 5 MHz der eines Schwarz-Weiß-Fernsehsignals, die Bandbreite der Farbdifferenzsignale ist ca. 1 ... 1.5 MHz. Die Übertragung dieser drei Komponenten erfolgt in Deutschland nach dem PAL-Verfahren, wobei die beiden Farbkomponenten durch Amplituden-Quadraturmodulation eines Farbhilfs-trägers von 4.43 MHz innerhalb des Leuchtdichte-Frequenzbandes von 5 MHz Gesamtbreite untergebracht werden.

Eine digitale Darstellung des Farbsignals läßt sich nun einerseits durch direkte Abtastung und Digitalisierung des PAL-Signals, andererseits aber durch Digitalisierung der drei Einzelkomponenten gewinnen. Die erste Möglichkeit ist besonders vorteilhaft, wenn sich an die Digitalisierung keine oder nur eine geringfügige Datenreduktion anschließen soll, da die den Einzelkomponenten innewohnende Redundanz bzw. Korrelation durch das PAL-Modulationsverfahren z.T. zerstört oder schwer nutzbar wird.

Die digitale Darstellung der getrennten Komponenten  $Y$ ,  $U$  und  $V$  erlaubt dagegen, auf deren unterschiedliche Signaleigenschaften einzugehen und so eine effektivere Datenreduktion zu erreichen. Auf diese Weise ist es möglich, durch Anwendung geeigneter Verfahren eine Übertragungsrate von 34 Mbit/s zu erzielen. Entsprechende Vorschläge zur geschlossenen Codierung des PAL-Signals wurden dagegen noch nicht bekannt. Allerdings muß für den Fall, daß von einem PAL-Signal ausgegangen und ein solches nach der Rückumsetzung wieder benötigt wird, bei der getrennten Codierung ein erhöhter Aufwand für die Komponentenzersetzung (PAL-Decodierung) und die Remodulation in Kauf genommen werden.

Der erste Schritt zur Reduktion der zu übertragenden Datenmenge bei Übertragung von Komponenten besteht üblicherweise in einer Beschneidung der übertragenen Farbinformation. Sehr gebräuchlich ist die Methode der sequentiellen Farbübertragung derart, daß für eine Fernsehzeile immer nur eine der beiden Komponenten  $U$

oder V berücksichtigt wird, die dann zeilenweise abwechseln. Durch empfangsseitiges Zwischenspeichern dieser Information für die Dauer einer Zeile und Wiederholung bzw. Mittelwertbildung läßt sich dann die jeweils fehlende Komponente ausreichend gut ersetzen. Das führt zwar zu einem Auflösungsverlust der Farbinformation in vertikaler Richtung, der jedoch bis zu einem gewissen Grade nicht wahrgenommen wird.

Werden in der Übertragungskette jedoch weitere Mittelwertbildungen vorgenommen, z.B. bei der PAL-Decodierung vor der digitalen Strecke und beim Heimempfänger, so kann sich der vertikale Auflösungsverlust störend bemerkbar machen. Nach Vorschlägen von Bosch /1.1/ und BBC /1.2/ wird hier eine Verbesserung erzielt durch zeilensequentiell alternierende Übertragung der Komponenten (U+V) und (U-V). Diese Komponenten treten als Zwischenstufe bei der PAL-Decodierung in Kammfilter-Decodern auf. Wird diese Zwischenstufe digital übertragen, so kann anschließend die Komponentenzersetzung vervollständigt werden, ohne daß der sonst bei zeilensequentieller U,V-Übertragung entstehende Auflösungsverlust eintritt. Die Bandbreite des (U±V) Signals ist nicht größer als die der Einzelkomponenten U und V.

### 2.1.2 Abtastfrequenzen, Quantisierung

Die nominelle Bandbreite von 5 MHz des Luminanzsignals erfordert eine Mindest-Abtastfrequenz von 10 MHz, die jedoch wegen der nicht idealen Eigenschaften der verwendeten Tiefpaßfilter eher 10.5 ... 11 MHz betragen sollte. Eine Reduktion der Abtastfrequenz bei Beibehaltung der Signalbandbreite erzeugt Aliasing-Fehler, die sich zum Teil durch Wahl einer Halbzeilen-Offsetlage der Abtastpunkte und eine Kammfilterung bei der Rekonstruktion wieder entfernen lassen. Dies wird z.Zt. gemacht bei Codier-Systemen, die mit einer Abtastfrequenz von 8.8 MHz (zweifache Farbhilfsträgerfrequenz  $2xfsc$ ) arbeiten und dadurch eine Reduktion der Datenrate und eine Kompatibilität mit dem PAL-System erreichen /1.1, 1.2, 1.3/. Sehr einleuchtend ist jedoch der Vorschlag, die Luminanzbandbreite vor der Digitalisierung bzw. auch schon vor der PAL-Codierung auf ca. 4 MHz zu begrenzen, so daß bei 8.8 MHz Abtastfrequenz eine nachträgliche Kammfilterung entfallen kann /1.4/.

Die Farbdifferenzsignale werden bei farbträgersynchroner Abtastung mit der Frequenz  $2.2 \text{ MHz} = fsc/2$  abgetastet. Dabei ist die Tatsache berücksichtigt, daß nach PAL-Codierung und -Decodierung auch mit hochwertigen Studiogeräten die Bandbreite der Farbkomponenten kaum über 1 MHz liegt. Dementsprechend wird auch bei Verwendung von 10 MHz Abtastfrequenz für die Luminanzkomponente für die Chrominanz 2 MHz oder 2.5 MHz gewählt.

Als notwendige Quantisierungsgenauigkeit ist weitgehend eine 8-bit-Auflösung akzeptiert entsprechend 256 Stufen. Diese Auflösung reicht aus, um bei Verarbeitung gradationsentzerrter Videosignale, wie sie in der Fernsehtechnik üblich sind, alle Qualitätsforderungen zu erfüllen. Bis zu dieser Auflösung stehen auch preiswerte Analog-Digital-Wandler zur Verfügung.

## 2.2 DPCM-Codierung

Obwohl eine Reihe unterschiedlicher Codierverfahren existiert, die für die Datenreduktion von Bildsignalen geeignet sind, ist die Differenz-Pulscodemodulation (DPCM) die bei weitem effektivste Möglichkeit, um mit wirtschaftlich tragbarem Aufwand eine Echtzeit-Codierung von breitbandigen Videosignalen durchzuführen und dabei einen Netto-Reduktionsfaktor von ca. 2 zu erzielen. Damit stellt die DPCM mit ihren Erweiterungen z.Zt. die einzige sinnvolle Alternative dar, die Übertragungsrate von 34 Mbit/s für Farb-TV-Signale bei den gegebenen Qualitätsforderungen zu erzielen.

Das Grundprinzip der DPCM beruht auf einer Dekorrelation des Signals durch lineare Prädiktion und einer ungleichförmigen Quantisierung der Prädiktionsfehler, die in codierter Form übertragen werden. Während das Prinzip der optimalen Linearprädiktion, wie in /1.5/ von O'Neal angegeben, weitgehend unverändert angewendet wird, hat man hinsichtlich der Quantisierung zwischenzeitlich Verbesserungen erzielt, indem man die Optimierung der Quantisierungskennlinie nach subjektiven Gesichtspunkten und nicht mehr nach dem Kriterium des minimalen mittleren quadratischen Fehlers vornimmt.

Ein weiterer Schritt zur Steigerung der Effektivität war die Einführung der Quantisierersteuerung.

### 2.2.1 Eindimensionale und zweidimensionale Prädiktion

Nach O'Neal /1.5/ ist die lineare Prädiktion bei der DPCM-Codierung dann optimal, wenn die Varianz des Prädiktionsfehlers zum Minimum wird. Auf diese Weise wird die maximale Dekorrelation des Signals erzielt. Andere Vorschläge benutzen Momente höherer, gerader Ordnung des Prädiktionsfehlers zur Optimierung, um dadurch die subjektive Bewertung stärker zu berücksichtigen /1.8/. Dies erschwert allerdings beträchtlich die Gewinnung der optimalen Prädiktionskoeffizienten und liefert kaum andere Werte für diese, so daß man sich in vielen praktischen Fällen auf die Betrachtung des mittleren Fehlerquadrats beschränken kann.

Da für die Prädiktion örtlich benachbarte, zeitlich in der Vergangenheit liegende Bildpunkte zu benutzen sind, kommen insbesondere die skizzierten Punkte A, B, C und D für die Vorhersage des Punktes X in Frage.

	B	C	D	
	A	X		

Dabei ist A der in der aktuellen Zeile vorangegangene Bildpunkt, während B, C und D in der zeitlich unmittelbar zurückliegenden Zeile liegen, die allerdings bei Fernsehsignalen räumlich von der aktuellen Zeile durch eine dazwischenliegende Zeile des jeweils anderen Halbbilds getrennt ist. Mit zunehmender Anzahl der verwendeten Punkte steigt die Effektivität, aber auch der Aufwand der Prädiktion. Im einfachsten Fall kann man sich auf den Wert A als Prädiktionwert beschränken. Man spricht dann von eindimensionaler (horizontaler) Prädiktion, da die Vorhersage nur in Zeilenrichtung erfolgt. Dementsprechend bedeutet die Hinzunahme mindestens eines Punktes aus der Nachbarzeile den Übergang zur zweidimensionalen Prädiktion.

Für die wichtigsten Kombinationen von Vorhersagepunkten wurden in /1.5/ und /1.9/ die optimalen Prädiktionskoeffizienten entsprechend der Prädiktionsformel

$$X = aA + bB + cC + dD$$

ermittelt. Als Ausgangsmaterial wurden digitalisierte Einzelbilder verwendet. Die Videobandbreite betrug ca. 1 MHz. Die Ergebnisse sind in der Tabelle 2.1 zusammengestellt.

Bei der Real-Time-Codierung von Videosignalen ist aus technischen Gründen die Realisierung der optimalen Koeffizienten nicht möglich, da die notwendigen Multiplikationen nicht schnell genug durchgeführt werden können. Man wählt deshalb einfache Näherungswerte, wie sie in der Tabelle ebenfalls angegeben sind. Dies ist auch ohne weiteres zulässig, da das jeweilige Optimum nicht scharf ausgeprägt und außerdem vom ausgewerteten Bildmaterial abhängig ist. Die aufgeführten Prädiktionsalgorithmen unter Verwendung von 1, 2 oder 3 Punkten haben in vielen Veröffentlichungen Erwähnung gefunden oder sind experimentell erprobt worden. Ein Prädiktionsalgorithmus, der alle 4 Punkte A ...D ausnutzt, ist nicht sinnvoll, da in diesem Fall der Koeffizient d des optimalen Prädiktors nahe bei Null liegt und damit keinen signifikanten Beitrag zur Vorhersage liefert.

Korrelationsmessung/ Koeffizientenberechnung:	Prädiktionskoeffizient:			
	a	b	c	d
A	0.965	-	-	-
B	0.934	-	-	-
Näherung	1.0	-	-	-
A	0.379	-	0.617	-
B	0.333	-	0.654	-
Näherung	0.5	-	0.5	-
A	0.59	-	-	0.53
B	0.55	-	-	0.46
Näherung	0.5	-	-	0.50
A	0.746	-0.594	0.826	-
B	0.606	-0.417	0.793	-
Näherung I	1.0	-0.5	0.5	-
Näherung II	0.75	-0.5	0.75	-

Quelle: Habibi, A. /1.9/ (A)  
 O'Neal, J.B. /1.5/ Szene C (B)

Tabelle 2.1.: Optimale Prädiktionskoeffizienten für die DPCM-Codierung mit Näherungswerten zur Vereinfachung der Hardware-Realisierung

Neue Untersuchungen von Pirsch /1.30/ haben demgegenüber gezeigt, daß unter Umständen durch Verzicht auf die Forderung nach minimaler Varianz des Prädiktionsfehlers Verbesserungen erzielt werden können, z.B. hinsichtlich verringerter Quantisiererstufenzahl bei gleichbleibender Bildqualität. Dies erfordert nach Pirsch insbesondere den Verzicht auf negative Prädiktorkoeffizienten und die Verwendung von mehr als zwei Bildpunkten. Auf diese Weise lassen sich die maximal möglichen Prädiktionsfehler reduzieren und die Stabilität des Systems verbessern. Als Beispiele für derartige Prädiktoren seien genannt:

- 1)  $a = 0.5$  ,  $b = 0.125$  ,  $c = 0.25$  ,  $d = 0.125$
- 2)  $a = 0.5$  ,  $b = 0.25$  ,  $c = 0.25$

## 2.2.2 Die Quantisierung bei der DPCM-Codierung

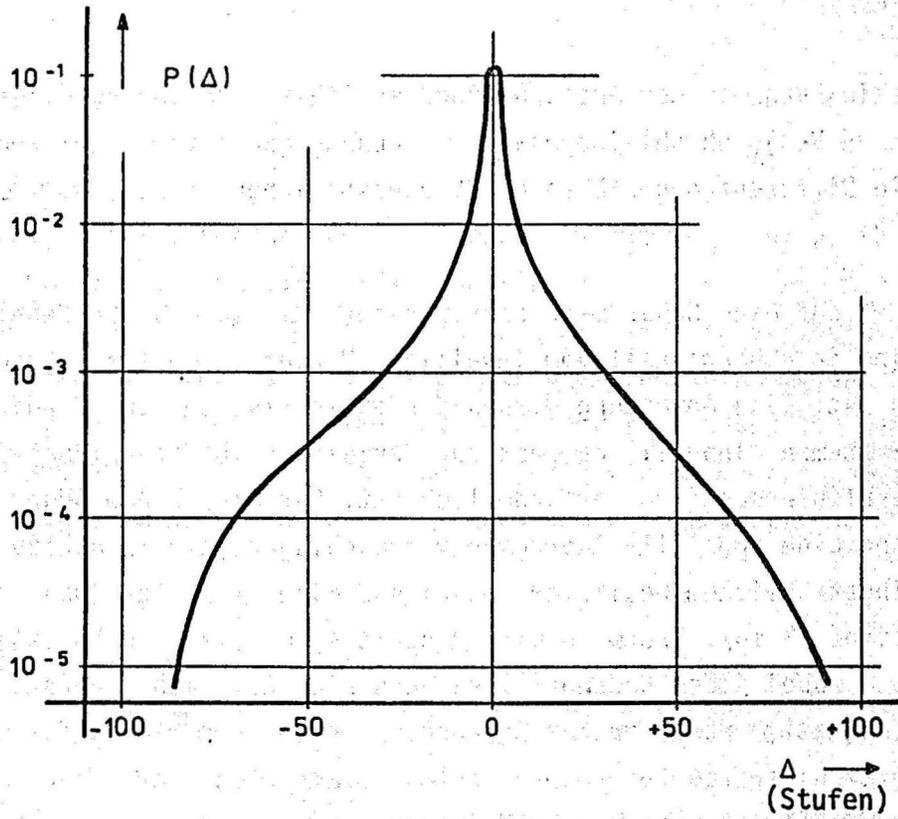
Die in der DPCM-Schleife gebildeten Prädiktionsfehler besitzen eine angenähert nullsymmetrische und zu höheren Werten stark abfallende Amplitudenverteilung (Bild 2.2). Eine nach dem minimalen mittleren quadratischen Quantisierungsfehler (MMSE = minimum mean square error) optimierte Quantisierungskennlinie weist dementsprechend für kleine Eingangswerte feine Stufen auf, die für größere Amplituden immer breiter werden (Bild 2.3). Die Berechnung einer solchen Quantisierungskennlinie wurde von Max /1.10/ beschrieben.

Die subjektive Auswertung experimenteller Untersuchungen zeigte, daß eine derartige Quantisierung nicht zu einer optimalen Bildqualität führt und daß andere Stufungen der Kennlinie bei gleicher Stufenzahl eine Verringerung der visuell wahrzunehmenden Quantisierungsverzerrungen ergeben können. Eine Optimierung, angepaßt an die visuelle Wahrnehmung, kann erfolgen durch systematisches Probieren (trial & error), durch Messung von Wahrnehmbarkeitsschwellen (visibility function) /1.6, 1.7/ mit anschließender graphischer oder rechnerischer Auswertung, oder durch Verwendung eines geeigneteren objektiven Fehlerkriteriums, z.B. eines Moments höherer Ordnung als 2 /1.8/. Diese Arbeiten führten zu ähnlichen Ergebnissen, die sich auch von früher gefundenen intuitiven Lösungen nur wenig unterscheiden. Als gesichert kann jedoch die Tatsache angesehen werden, daß für die Einhaltung des Kriteriums "nicht erkennbare Quantisierungsfehler" selbst bei einer optimal ausgelegten zweidimensionalen Vorhersage eine 16-stufige Quantisierungskennlinie für das Luminanzsignal nicht ausreicht, sondern daß 21-24 Stufen nötig sind, die sich mit 4 bit Codeworten nicht übertragen lassen. Dennoch läßt sich mit 16-stufigen Kompromißkennlinien noch eine sehr hohe Verarbeitungsqualität erzielen, die nur bei besonders kritischen Bildvorlagen durch geringfügige Kantenunruhe (edge noise) und Übersteuerungs-Unschärfe (overload) beeinträchtigt wird.

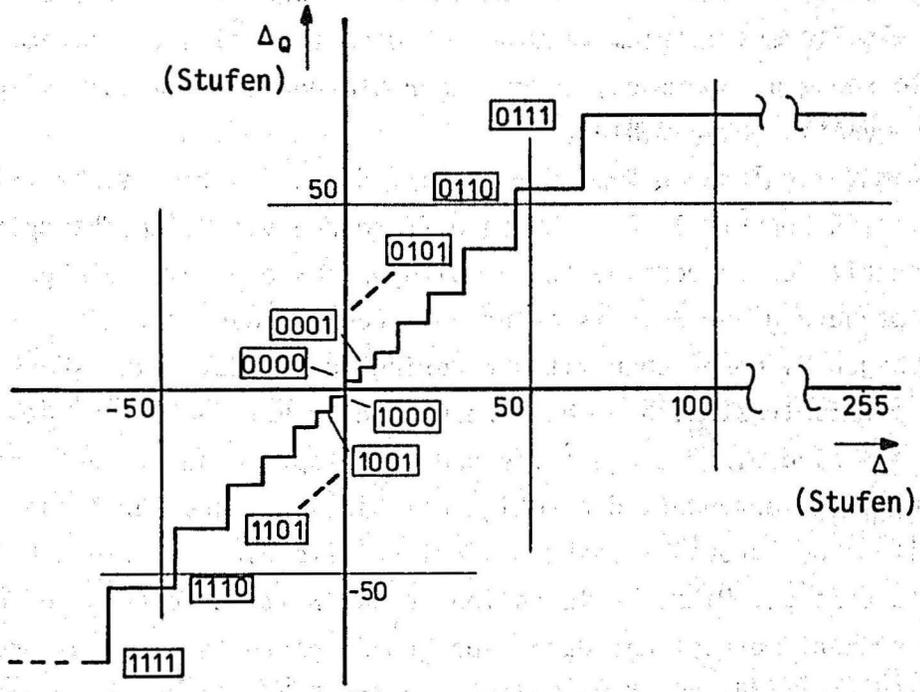
Dagegen ist bei der DPCM-Codierung der Farbdifferenz-Signale U und V eine Stufenzahl von 16 ausreichend und kann sogar noch unterschritten werden /1.8/. Dies gilt insbesondere für Bildsignale von natürlichen Objekten, während für bestimmte elektronisch erzeugte Testsignale Übersteuerungen auftreten können.

## 2.3 DPCM-Codierung mit Quantisierersteuerung

Das Prinzip der Quantisierersteuerung durch bildpunktweise Auswahl der günstigsten von mehreren vorhandenen Quantisierungskennlinien wurde von Musmann angegeben /1.13/. Er berücksichtigte dabei im wesentlichen die Tatsache, daß für jeden einzelnen zu codierenden Bildpunkt der Wertebereich für den Differenzwert  $\Delta$  nicht



**Bild 2.2:** Typische Amplitudenverteilung des Prädiktionsfehlers  $\Delta$  in einem DPCM-System (bezogen auf 8 bit PCM-Werte)



**Bild 2.3:** Typische Quantisierungskennlinie eines DPCM-Coders (4 bit), bezogen auf 8 bit PCM-Werte

größer sein kann als der Aussteuerungsbereich  $V$  des Eingangssignals ( $-\hat{X} \leq \Delta \leq V - \hat{X}$ ), obwohl insgesamt, in Abhängigkeit vom jeweiligen Vorhersagewert, die Differenzen den Bereich  $2V$  überstreichen können ( $-V \leq \Delta \leq +V$  für  $0 \leq \hat{X} \leq V$ ).

Dies führt auf eine Schar mehr oder weniger unsymmetrischer Kennlinien, von denen eine in Abhängigkeit vom jeweiligen Vorhersagewert als Steuerkriterium auszuwählen ist. Eine Anwendung dieses Verfahrens ist nur bei eindimensional arbeitenden Systemen sinnvoll, da dort zur Vermeidung von "overload"-Effekten eine weite Kennlinienspreizung erforderlich ist. Für diesen Anwendungsfall wurde von Bostelmann eine spezielle Anordnung vorgeschlagen, die in nahezu optimaler Weise bei geringstmöglichem Realisierungsaufwand eine derartige Quantisierersteuerung verwirklicht /1.14/. Es wird eine doppelt symmetrische Quantisierungskennlinie verwendet, wobei jedem Codewort zwei verschiedene, sich gegenseitig ausschließende Repräsentativwerte zugeordnet werden. Dabei wird immer der volle Aussteuerungsbereich verarbeitet, ein "overload" kann nicht auftreten.

Diese Anordnung ist zwar bei DPCM-Systemen mit zweidimensionaler Vorhersage ebenfalls anwendbar, ist jedoch dann insbesondere bei Codewortlängen von 4 bit und darunter nicht mehr optimal. Wegen der geringen Varianz der Prädiktionsfehler bei zweidimensionaler Vorhersage hat die Unsymmetrie der Verteilung, abhängig vom Vorhersagewert, nur eine geringe Bedeutung, so daß seine Verwendung als Steuerkriterium kaum noch Gewinn verspricht. Außerdem bedingt die spezielle Kennlinienform bei zu geringer Stufenzahl eine ungünstige Verteilung der Quantisierungsfehler.

Nach einem Vorschlag von Kummerow /1.15/, der auf umfangreichen Messungen der Bildstatistik beruht /1.16/, können Differenzen von Bildpunktamplituden in der Nachbarschaft des zu verarbeitenden Bildpunktes bzw. die Beträge der Differenzen für die Steuerung der Quantisierung verwendet werden. Auf diese Weise kann zwischen ruhigen Bildbereichen mit nur geringfügigen Helligkeitsänderungen und Bereichen mit kontrastreichen, hochfrequenten Details unterschieden werden. Im ersten Fall wird eine feingestufte und dementsprechend eng begrenzte Quantisierungskennlinie verwendet, die ruhige Bildbereiche ohne merkliches Grundgeräusch verarbeitet, bei großen Prädiktionsfehlern allerdings overload-Fehler und damit Unschärfe erzeugt. Diese Fälle sollen jedoch weitgehend aufgrund des Steuerkriteriums erkannt werden, das dann eine gröber gestufte, weit gespreizte Kennlinie einschaltet. Die für die Verarbeitung großer Prädiktionsfehler notwendigen Quantisierungsstufen werden durch Fortlassen bzw. Vergrößern der feinen Stufen gewonnen, wobei die resultierenden Quantisierungsfehler durch den hohen lokalen Kontrast überdeckt werden sollen.

Die empirische Optimierung derartiger Codierverfahren aufgrund der Bildstatistik und subjektiver Kriterien für 8- und 16-stufige Quantisierer ergab eine deutliche Qualitätsverbesserung im Vergleich zu nicht adaptiven Systemen mit gleicher Reduktion /1.17/. Weitere Verbesserungen wurden erzielt von Musmann und Erdmann /1.11/ durch die Verwendung von Prädiktionsfehlern an Stelle von Amplitudenwerten als Steuerkriterium und eine systematische Optimierung der Quantisierungskennlinien und der Entscheidungsschwellen für die Kennlinienumschaltung nach rein subjektiven Gesichtspunkten in Anlehnung an eine Untersuchung von Candy /1.6/. Es hat den Anschein, daß der so entstandene Codiervorschlag z.Zt. unter den DPCM-Verfahren, die mit konstanter Rate arbeiten, die bestmögliche Bildqualität erreicht.

#### 2.4 Behandlung der Chrominanzkomponenten

Die in den vorausgegangenen Abschnitten beschriebenen DPCM-Codierverfahren wurden hauptsächlich im Hinblick auf monochrome Videosignale bzw. Luminanzsignale entwickelt; die Entwurfsverfahren lassen sich jedoch weitgehend auch auf die Codierung der Chrominanzsignale anwenden. Eine Optimierung von Prädiktion und Quantisierung kann jedoch zu anderen Ergebnissen für Prädiktorkoeffizienten und Quantisierungskennlinie führen, die die unterschiedlichen statistischen Eigenschaften hinsichtlich flächenmäßiger Korrelation und Amplitudenverteilung der Farbkomponenten berücksichtigen /1.8/. Dabei wird ausgenutzt, daß die Farbkomponenten, insbesondere bei zeilenweiser paralleler Darstellung, in vertikaler Richtung eine höhere Korrelation aufweisen als in horizontaler Richtung, und daß ihre Amplitudenverteilung nullsymmetrisch und für natürliche Bildvorlagen wesentlich schmaler ist als z.B. die Luminanzverteilung.

Darüber hinaus gibt es Ansätze, vor der Durchführung der DPCM-Codierung bzw. anderen Reduktionsverfahren bereits eine PCM-Codierung mit subjektiv optimaler Amplitudenquantisierung zu verwenden. Dies kann erfolgen für die Einzelkomponenten U und V oder für den durch die Komponenten U und V in der Farbebene vorgegebenen Farbtort /1.18, 1.19/. Neueste Untersuchungen haben gezeigt, daß zwar bezüglich der Quantisierung die Farbkomponenten U und V unabhängig voneinander behandelt werden können, daß jedoch beide wiederum vom jeweiligen Luminanzwert wesentlich beeinflußt werden. Allerdings ist der Gewinn, der durch die Adaption der Chrominanzquantisierung an den jeweiligen Luminanzwert zu erzielen ist, relativ gering und schwer zu nutzen. Verzichtet man aber auf die Adaption, so beträgt die Ersparnis gegenüber der gleichförmigen Quantisierung beider Komponenten mit je 8 bit nur ca. 1 bit für die V-Komponente /1.20/. Somit dürfte in den meisten Fällen, insbesondere aber für Anwendungen mit konstanter Codewortlänge, eine gleichförmig quantisierte 8 bit PCM angemessen sein.

### 3 Der gestörte Übertragungskanal

Bei vielen realen Übertragungssystemen für Digitalsignale muß davon ausgegangen werden, daß die Fehlerrate, d.h. der relative Anteil verfälschter Binärzeichen am Kanalausgang, zumindest zeitweise nicht vernachlässigbar gering ist. Dies ist darauf zurückzuführen, daß man einerseits versucht, die von einem Übertragungskanal gebotene Kanalkapazität möglichst weitgehend auszunutzen, daß aber andererseits die Eigenschaften der Übertragungsstrecke bzw. die darauf einwirkenden Störeinflüsse, wie auch die technischen Eigenschaften der eingesetzten Geräte unvermeidlichen Schwankungen oder Streuungen unterliegen.

Das Fehlerverhalten eines Übertragungssystems ist nun in den meisten Fällen durch die Angabe der Fehlerrate allein nicht genau genug zu beschreiben, da unterschiedliche Systeme mit unterschiedlichen Typen von Übertragungsstrecken, Modulationsverfahren und Übertragungs-codes sehr verschiedenartige charakteristische Fehlerstrukturen erzeugen können, die beträchtlichen Einfluß auf die Art der Störung der Nutzinformation haben.

Im folgenden wird nach Erläuterung eines allgemeinen Kanalmodells auf einige spezielle Modelle im Zusammenhang mit der digitalen Bildübertragung und deren Störstrukturen eingegangen.

#### 3.1 Symmetrischer Binär-Kanal mit statistisch unabhängigen Fehlern

Die einfachste Möglichkeit für die näherungsweise Charakterisierung vieler im Basisband oder trägerfrequent arbeitender Übertragungskanäle bietet das Modell des Symmetrischen Binär-Kanals (BSC = Binary Symmetric Channel). Hierbei wird vorausgesetzt, daß eine binäre, d.h. zweistufige Übertragung der beiden Symbole 0 und 1 erfolgt, und daß die Störung symmetrisch eingreift, d.h. daß die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten einer Verfälschung unabhängig von der Art des gesendeten Symbols ist.

Ist diese Wahrscheinlichkeit für jedes Zeichen der übertragenen Zeichenfolge gleich, so spricht man von statistisch unabhängigen Einzelfehlern, die durch die Fehlerrate  $p_E$  charakterisiert werden. Die Anzahl der Fehler in einem bestimmten Zeitabschnitt gehorcht dabei der Binomial-Verteilung.

#### 3.2 Bündel-Fehler

Häufig treten auf realen Übertragungskanälen Fehlerbündel bzw. Fehler-Bursts auf, wobei Zeitabschnitte mit höheren Fehlerraten abwechseln mit solchen, die wenige

oder keine Fehler enthalten. Diese Fehlerart läßt sich charakterisieren durch Angabe der Burst-Rate  $p_B$  (Wahrscheinlichkeit, daß ein Zeichen der Beginn eines Burst ist), der Burst-Dichte  $p_H$  (Fehlerwahrscheinlichkeit innerhalb eines Bündels), der mittleren Burstlänge  $L$  und evtl. zusätzlich der Verteilung der Burstlängen.

### 3.3 Übertragung im Basisband

Die Übertragung digitaler Signale über Leitungen erfolgt meist unmoduliert im Basisband. Es werden jedoch im allgemeinen Umcodierungen vorgenommen, um Gleichstromfreiheit und Taktrückgewinnung bei möglichst guter Nutzung der verfügbaren Bandbreite sicherzustellen. Solche Leitungscodes können eine Fehlerfortpflanzung im Decoder zur Folge haben, so daß die statistische Unabhängigkeit der Bitfehler nicht gewährleistet ist.

Zwei wichtige Leitungscodes sind z.B. der HDB3-Code und die 4B3T-Codes, die mit dreipegeligen Signalen arbeiten. Beim HDB3-Code treten Doppel- und Dreifachfehler auf, die mittlere Fehlermultiplikation liegt bei 1.3. Bei den 4B3T-Codes können 2...4-fach-Fehler auftreten, die mittlere Fehlermultiplikation liegt zwischen 1.3 und 2.

### 3.4 Differentielle Phasenmodulation

Für viele Funkkanäle wird die differentielle Phasenmodulation (DPSK) verwendet, wobei eine Trägerfrequenz in ihrer Phasenlage zwischen  $2^n$  Positionen ( $n = 1, 2, 3, \dots$ ) umgetastet wird. Innerhalb einer  $n$ -bit-Gruppe, die durch jeweils eine Phase innerhalb eines Taktschrittes übertragen wird, entstehen bei geeigneter Codierung (Gray-Code) normalerweise nur Einzelfehler. Es tritt wegen der differentiellen Darstellung jedoch eine Fortpflanzung in die nächste  $n$ -bit-Gruppe auf, wo ein weiterer Einzelfehler entsteht. Dies gilt streng für kohärente Demodulationsverfahren, so daß hier eine Fehlermultiplikation von 2 zu berücksichtigen ist. Bei inkohärenter Demodulation kann dieser Wert niedriger sein und zwischen 1 und 2 liegen.

Bei der 4-Phasen DPSK, die heute sehr gebräuchlich ist, treten infolge der genannten Fehlerfortpflanzung zwei Einzelfehler in zwei aufeinanderfolgenden 2-bit-Gruppen ("Dibits") auf, die dort aber an beliebiger Stelle liegen können.

### 3.5 Mehrstufige Amplitudenmodulation

Die Anwendung mehrstufiger Amplitudenmodulationsverfahren ist auf besonders rauscharme und lineare Übertragungskanäle beschränkt. Eine spezielle Anwendungsmöglichkeit für die digitale Bildübertragung bieten in diesem Zusammenhang die Videokanäle trägerfrequenter Richtfunkstrecken. Hier scheint eine kanalweise Ausnutzung dieser hochwertigen Analog-Kanäle mit ca. 7 MHz Bandbreite durch eine 16-stufige Amplitudenmodulation möglich zu sein, um auf eine Übertragungsrate von 34 Mbit/s zu kommen.

Grundsätzlich kann bei der Mehrstufenmodulation durch Verwendung des Gray-Codes eine Fehlermultiplikation vermieden werden; auch eine Fortpflanzung entfällt wegen der nicht-differentiellen Darstellung.

Eine spezielle Bedeutung hat hier die 16-Stufen-Modulation, die ja mit 4-bit-Gruppen arbeitet, wenn DPCM-Codeworte von ebenfalls 4 bit Länge zu übertragen sind. Auf diesen Punkt wird weiter unten noch näher eingegangen.

#### 4. Der Einfluß von Übertragungsfehlern auf das empfangene Bild

##### 4.1 Fehlerfortpflanzung bei DPCM-Codierung

Bei DPCM-codierten Signalen sind die Auswirkungen von Übertragungsfehlern nicht wie bei der PCM-Übertragung auf einzelne Bildpunkte begrenzt, sondern pflanzen sich über unterschiedlich große Bildbereiche fort. Dies ist deswegen unvermeidlich, weil für die empfängerseitige Rekonstruktion der Bildpunktamplituden Prädiktionswerte verwendet wurden, die wiederum aus zurückliegenden Rekonstruktionswerten berechnet werden. Ein an einer bestimmten Stelle Y im Bild aufgetretener Fehler trägt dementsprechend in dem Maße zu dem Amplitudenfehler eines anderen Bildpunktes X bei, in dem die Amplitude von Y in die Vorhersage des Bildpunktes X eingeht. Daraus wird deutlich, daß der Prädiktionsalgorithmus einen sehr wesentlichen Einfluß auf das Erscheinungsbild des Übertragungsfehlers im rekonstruierten Bild und damit auch auf den subjektiven Fehlereindruck hat. Zusätzliche Einflüsse durch die ungleichförmige Quantisierung, die ja signalabhängig ist, können für konventionelle DPCM-Systeme vernachlässigt werden. Die Zuordnung der übertragenen Codeworte zu den quantisierten Differenzen kann zwar merkliche Einflüsse auf die Verteilung der Fehleramplituden und damit auf die empfundene Störintensität haben, ändert jedoch nichts an der typischen Form der Fehlerfortpflanzung.

Die adaptive Quantisierersteuerung dagegen kann zusätzliche Störeffekte in erheblichem Umfang zur Folge haben, die stark signalabhängig sind und einer analytischen Behandlung schwer zugänglich sind.

##### 4.1.1. Der Einfluß der Prädiktion auf die Fehlerfortpflanzung

Die unterschiedlichen im Versuchssystem realisierten Prädiktionsalgorithmen zeigen jeweils typische Fehlermuster, deren Form hier als bekannt vorausgesetzt werden soll. Diese Muster sind weitgehend aus Simulationsuntersuchungen und Hardware-Experimenten bekannt; eine analytische Ableitung wurde von Lippmann /1.21/ angegeben. Bild 4.1 zeigt einige wichtige Fehlermuster bei ein- und zweidimensionaler Prädiktion.

Die rekonstruierten Bilder zeigen für zweidimensionale Vorhersagen ein flächenhaftes Abklingen der Fehleramplituden, für die eindimensionale Vorhersage  $\hat{X} = A$  eine konstante Fehleramplitude. Dies ist nur für nicht divergierende Prädiktionen der Fall. Nach /1.21/ ist für die hier angeführten Prädiktoren z.T. gerade der

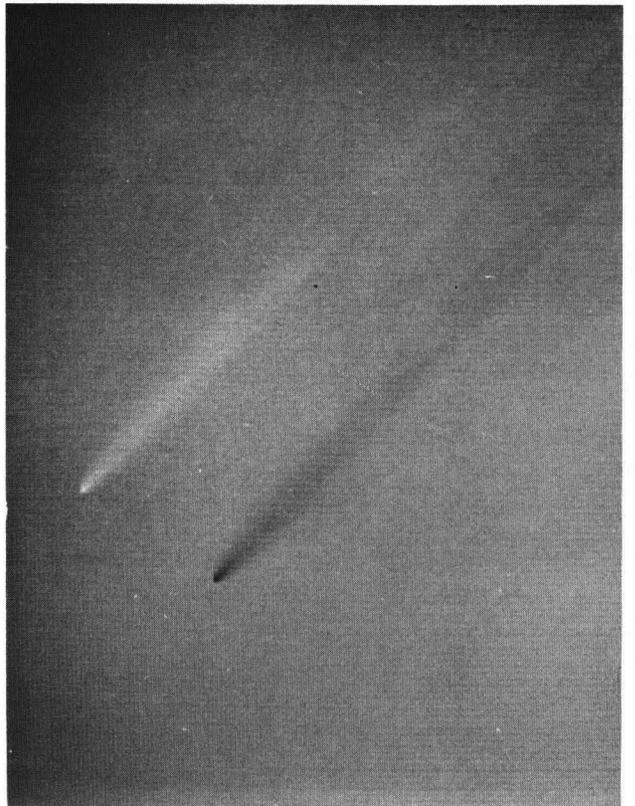
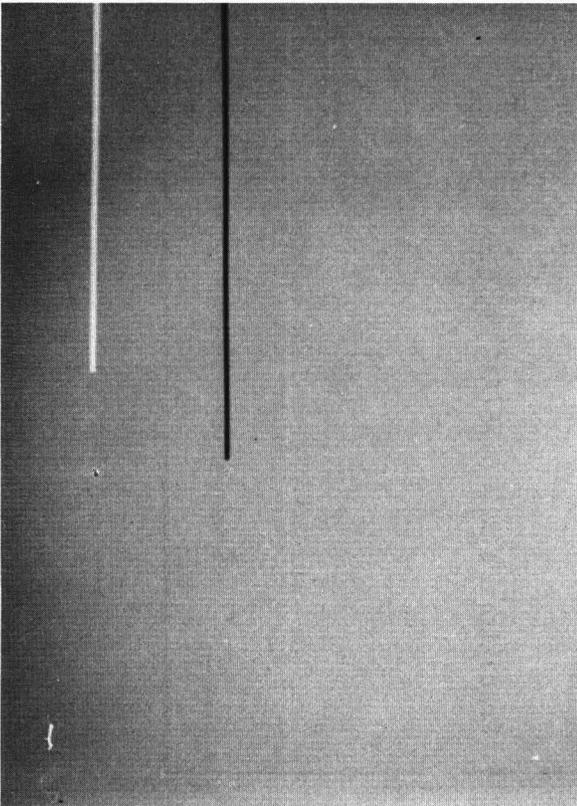
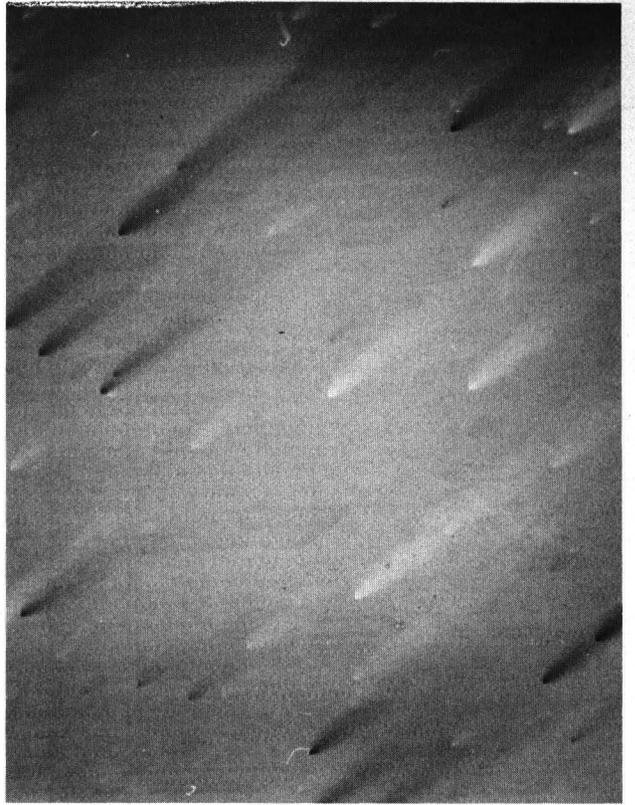
Prädiktor :  $\hat{X} = A$

Prädiktor :  $\hat{X} = 0.5(A+C)$

Prädiktor :  $\hat{X} = 0.5 A + 0.25(B+C)$

Prädiktor :  $\hat{X} = 0.5(A+C)$  s.o.  
(ein vollständiges Einzelbild)

Bild 4.1 a : Darstellung der Fehlerfortpflanzung bei unterschiedlichen DPCM-Prädiktoren  
(identische Fehler in beiden Halbbildern, vergrößerte Bildausschnitte)



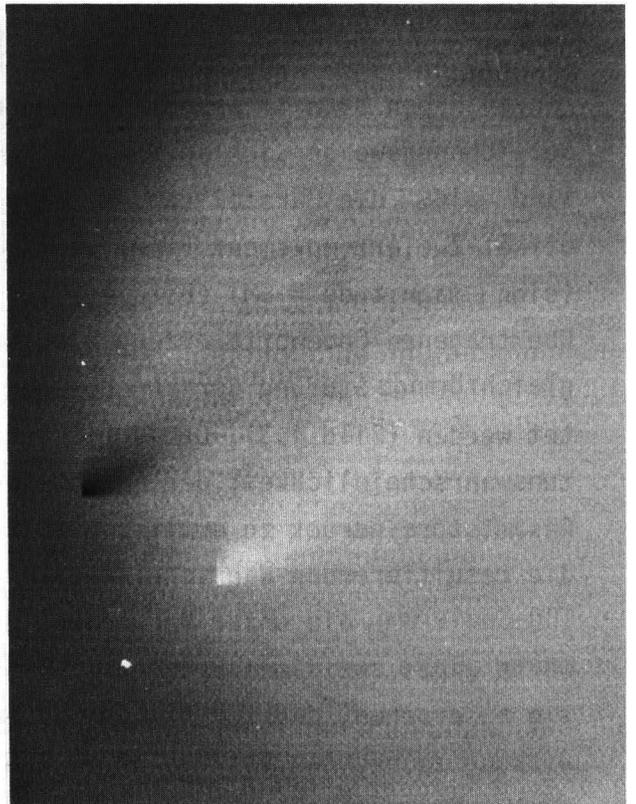
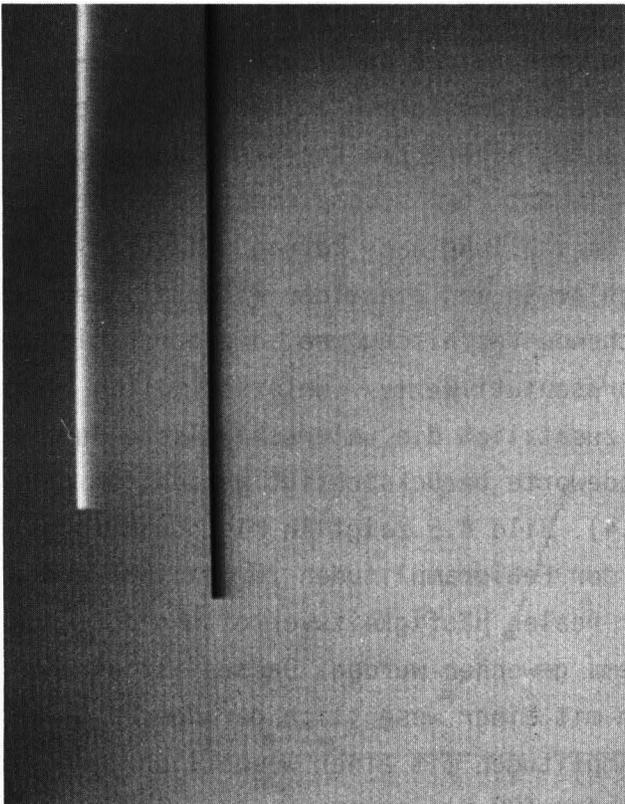
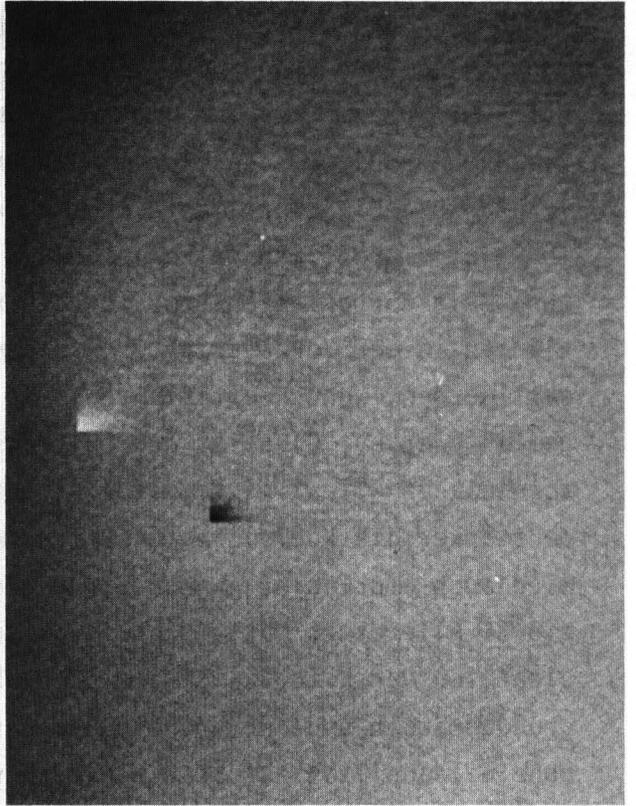
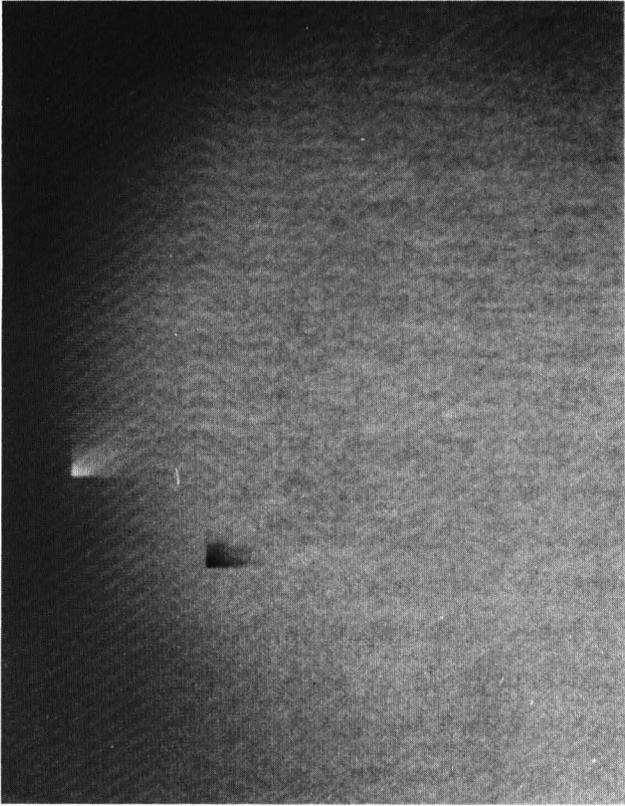
$$\text{Prädiktor} : \hat{X} = A + 0.5(C-B)$$

$$\text{Prädiktor} : \hat{X} = 0.75(A+C) - 0.516 B$$

$$\text{Prädiktor} : \hat{X} = 0.75(A+C) - 0.5 B$$

$$\text{Prädiktor} : \hat{X} = 0.75(A+C) - 0.531 B$$

Bild 4.1 b : Darstellung der Fehlerfortpflanzung bei unterschiedlichen DPCM- Prädiktoren  
(identische Fehler in beiden Halbbildern, vergrößerte Bildausschnitte)



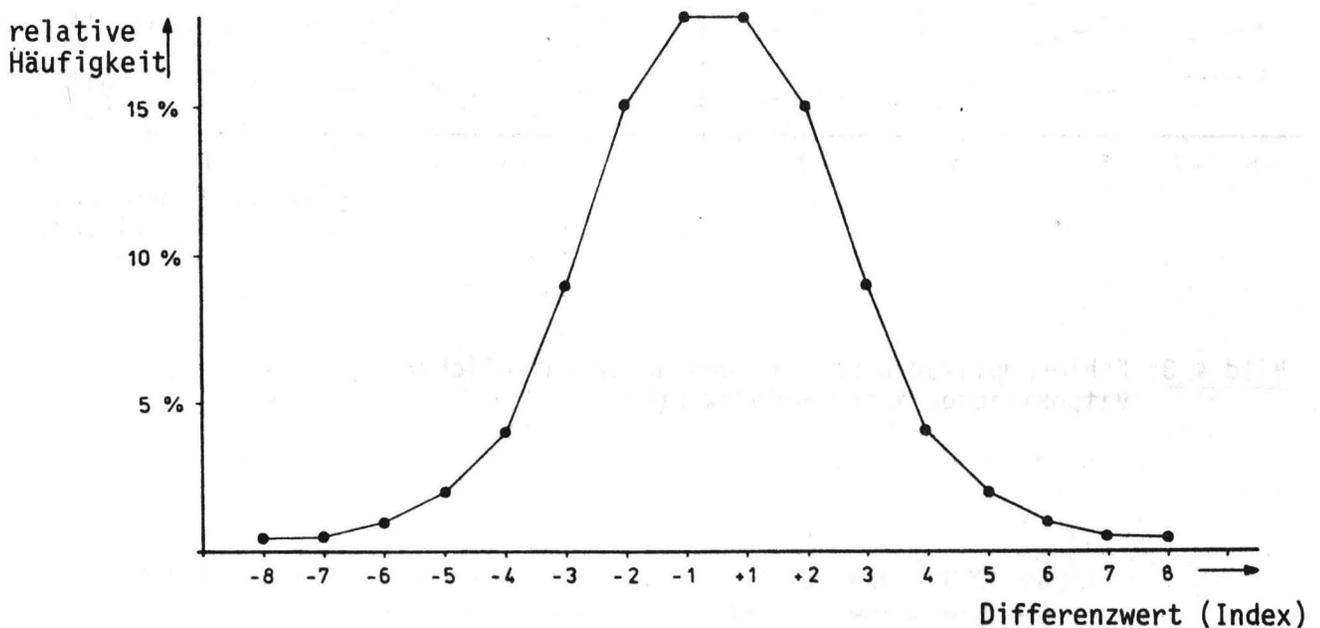
Grenzwert der Konvergenz erreicht, da die Summe der Prädiktionskoeffizienten genau 1 ist und keiner der Einzelkoeffizienten größer als 1 ist. Ist die Summe oder ein Einzelkoeffizient größer als 1, divergiert das Verfahren und liefert Fehlermuster, die sich mit zunehmendem Abstand vom Fehlerort immer mehr verstärken. Die Experimente bestätigen, daß bei Erreichen der Konvergenzgrenze relativ großflächige Fehlermuster entstehen, die sich in einer Vorzugsrichtung weit fortpflanzen bzw. für den Fall eines Einzelkoeffizienten = 1 kein Abklingen in der Vorzugsrichtung zeigen. Demgegenüber kann die Konvergenz verbessert werden, wenn Koeffizientensumme und alle Einzelkoeffizienten kleiner als 1 gemacht werden. Dies ist der Fall des Prädiktors mit Leak (eigentlich Integrator-Leak von "leaky integrator" = Integrator mit endlicher Zeitkonstante). Je stärker die Koeffizientensumme vom Wert 1 abweicht, desto schneller wird auch ein Fehler abgebaut, das Fehlermuster wird also in der Fläche reduziert. Allerdings hat ein zu stark ausgeprägtes Leak negative Auswirkungen hinsichtlich der Bildqualität bei der DPCM-Codierung, da es verstärktes Hintergrundgeräusch und Konturenbildung verursachen kann. Als optimaler Wert für hohe Bildqualität hat sich ein Leak von ca. 1.5% erwiesen /1.22/, bei 3% ist nach den Erfahrungen mit dem Versuchssystem das Hintergrundgeräusch gerade wahrnehmbar.

#### 4.1.2. Der Einfluß der Codewortzuordnung

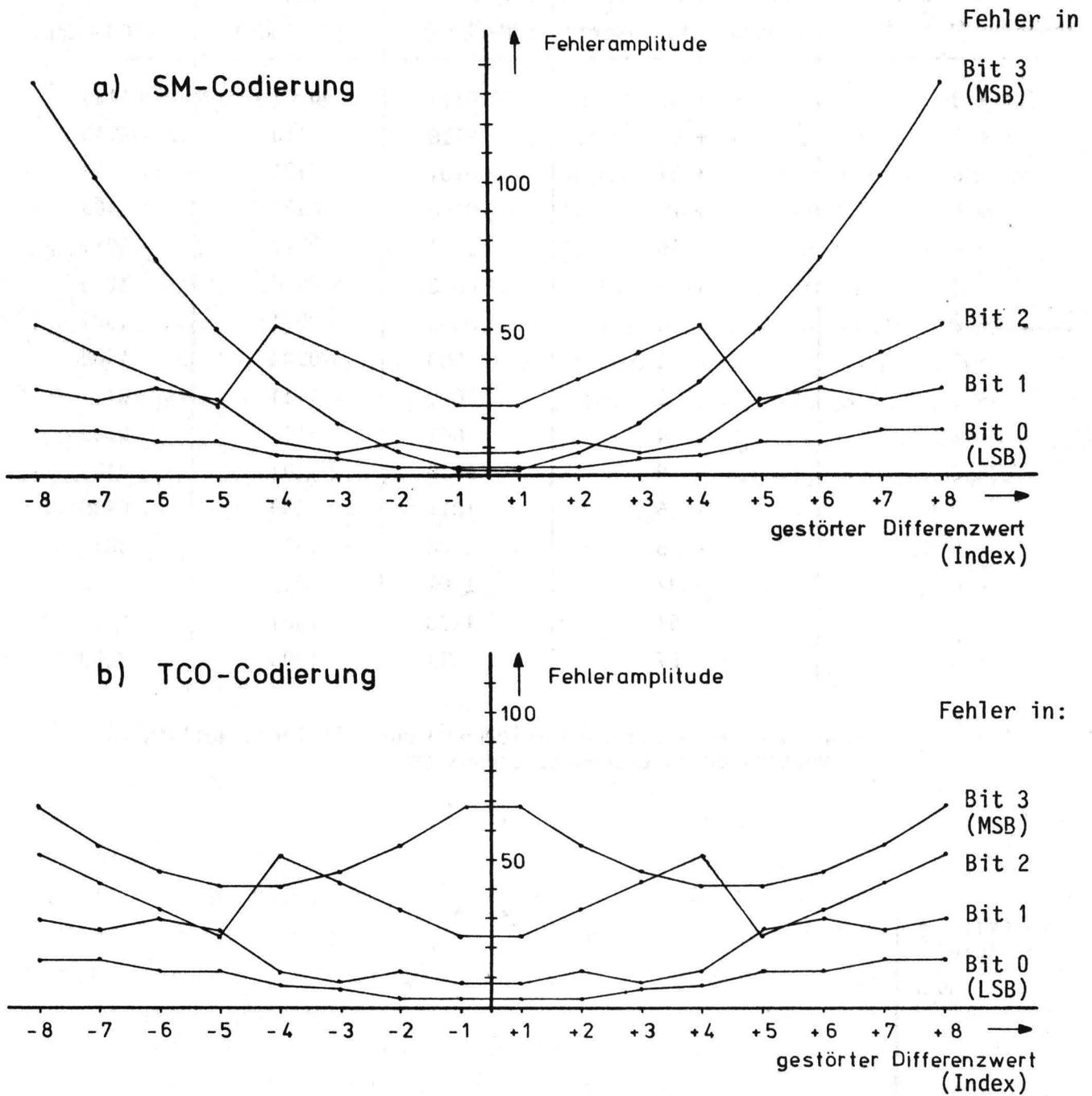
Für die systematische Zuordnung von Codeworten zu den quantisierten Differenzen haben sich im wesentlichen drei Darstellungsformen entwickelt, deren Bezeichnungsweise sich an ähnlich aufgebaute, binäre Zahlensysteme anlehnt. Es sind dies die Darstellung im Zweierkomplement (two's-complement = TC) bzw. Offset-Zweierkomplement (TCO) sowie die Darstellung nach Betrag und Vorzeichen (sign+magnitude = SM) (Bild 4.2). Bitfehler in den einzelnen Bitpositionen der übertragenen Codeworte erzeugen entsprechende Verfälschungen, die durch die ungleichförmige Stufung der zugehörigen Repräsentativwerte unterschiedlich bewertet werden (Bild 4.3). Dabei muß jedoch zusätzlich die unterschiedliche Auftretenswahrscheinlichkeit der gesendeten Codeworte berücksichtigt werden, um den Gesamtstöreindruck zu ermitteln (Bild 4.4). Bild 4.5 zeigt in Histogrammform die resultierenden Wahrscheinlichkeiten der Fehleramplituden für die SM- und die TCO-Codierung, die unter Verwendung einer realen Häufigkeitsverteilung der Codeworte eines zweidimensionalen DPCM-Systems gewonnen wurden. Daraus ist eindeutig zu ersehen, daß für die SM-Codierung mit einer wesentlich geringeren Störwirkung zu rechnen ist, da große Fehleramplituden mit einer wesentlich geringeren Wahrscheinlichkeit auftreten als bei der TCO-Codierung.

Index $i$ für Differenz- wert u. Codewort	Quantisierter Differenzwert $\Delta_{Q_i}$ (Repräsentativwert)	Codewort $D_i$ (SM-Code)	Codewort $D'_i$ (TC-Code)	Codewort $D''_i$ (TCO-Code)
+ 8	+ 67	0111	0111	1111
+ 7	+ 51	0110	0110	1110
+ 6	+ 37	0101	0101	1101
+ 5	+ 25	0100	0100	1100
+ 4	+ 16	0011	0011	1011
+ 3	+ 9	0010	0010	1010
+ 2	+ 4	0001	0001	1001
+ 1	+ 1	0000	0000	1000
- 1	- 1	1000	1111	0111
- 2	- 4	1001	1110	0110
- 3	- 9	1010	1101	0101
- 4	- 16	1011	1100	0100
- 5	- 25	1100	1011	0011
- 6	- 37	1101	1010	0010
- 7	- 51	1110	1001	0001
- 8	- 67	1111	1000	0000

**Bild 4.2:** Beispiel einer 4 bit Quantisierungskennlinie (ohne Nullstufe) mit verschiedenen Codewortzuordnungen



**Bild 4.4:** Typische Verteilung von DPCM-Differenzwerten bei zweidim. Prädiktion



**Bild 4.3:** Fehleramplituden bei Störung unterschiedlicher Bitpositionen in DPCM-Codeworten

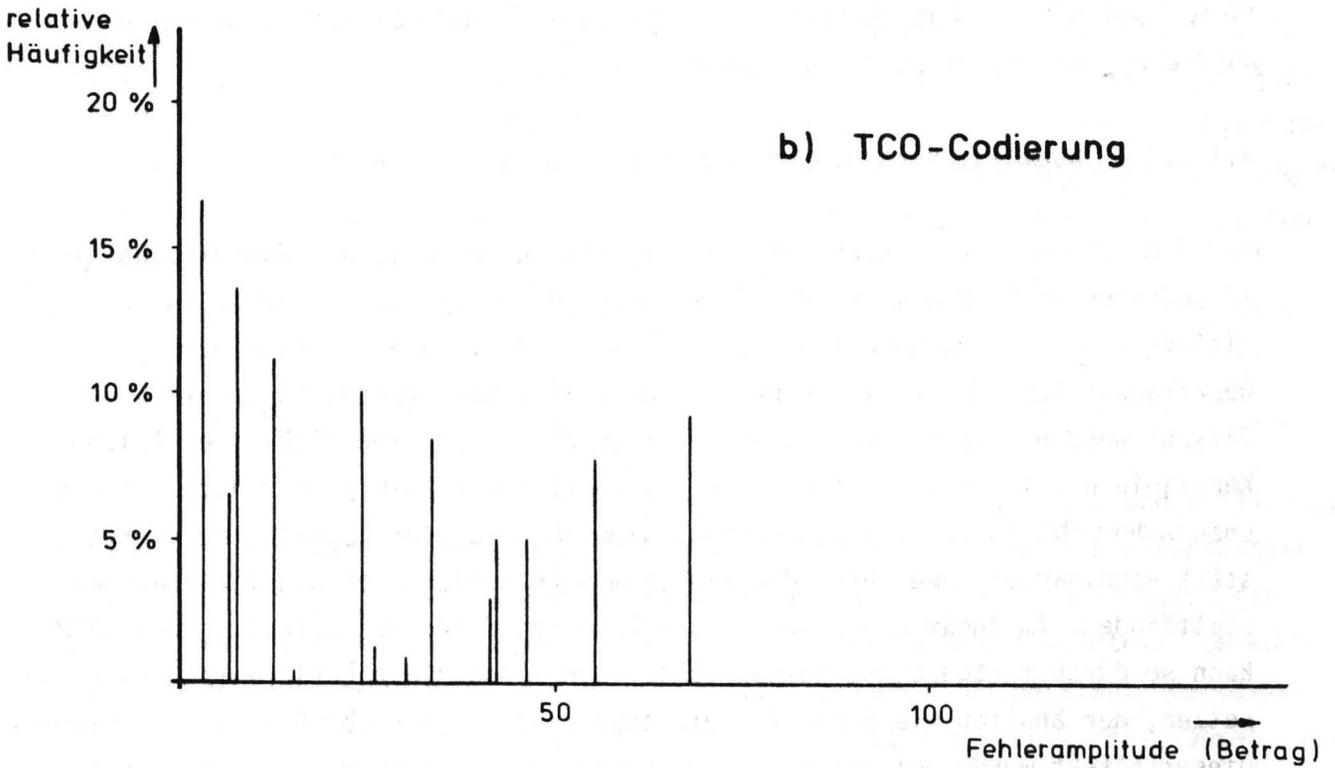
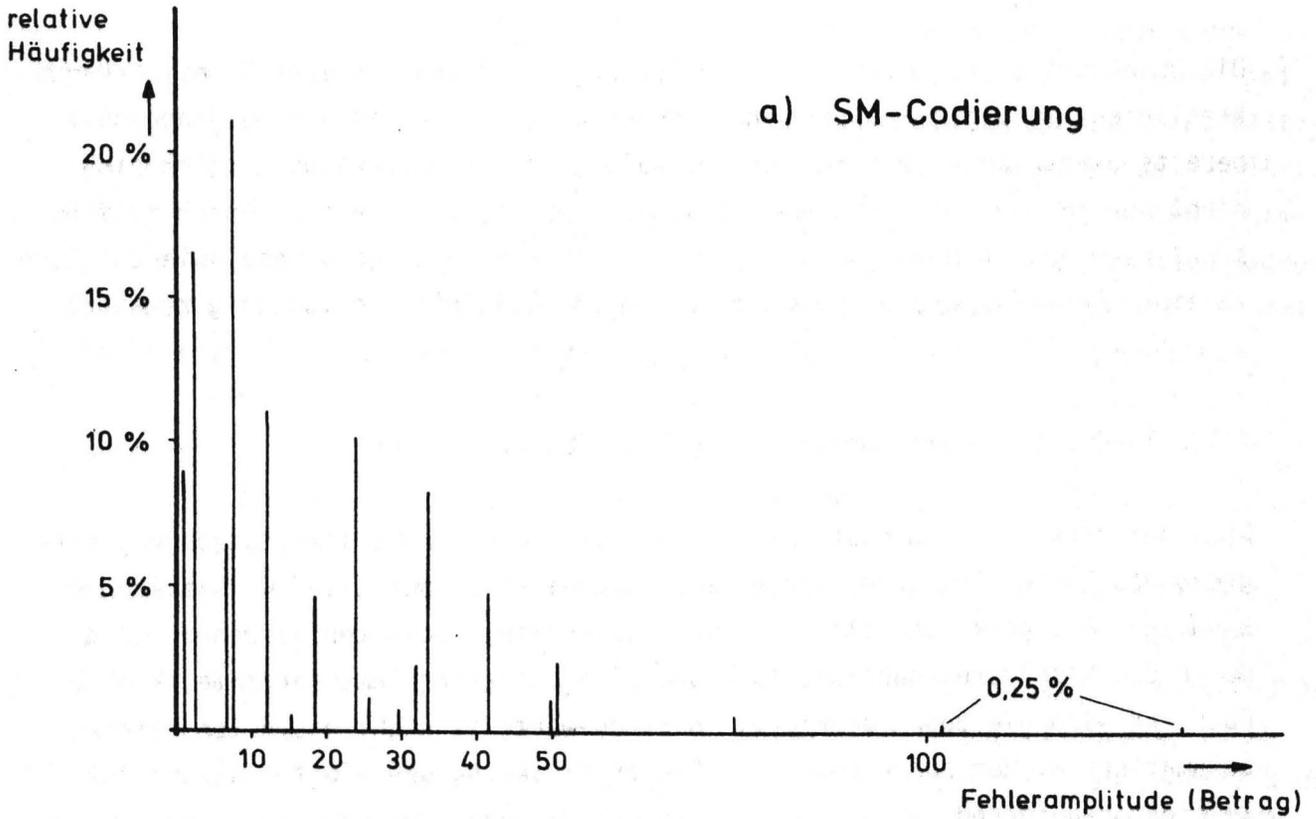


Bild 4.5: Verteilung der Fehleramplituden bei einer DPCM-Übertragung in Abhängigkeit von der Codewortzuordnung

#### 4.1.3. Quantisierersteuerung

Die Quantisierersteuerung (adaptive Auswahl einer von mehreren Quantisierungskennlinien) erfolgt bei Coder und Decoder aufgrund von in der Vergangenheit bereits übertragener Information. Deshalb kann ein Übertragungsfehler sich nicht nur in Form von falschen Prädiktionswerten, sondern auch durch falsche Kennlinienauswahl fortpflanzen. Dies kann bei ungünstiger Dimensionierung auch zu einer Fehlerverstärkung führen, die große Bildteile vollständig zerstört.

##### 4.1.3.1. Quantisierersteuerung durch den Prädiktionswert

Nach dem Vorschlag von Bostelmann /1.14/ wird eine Quantisierersteuerung aufgrund des Vorhersagewertes vorgenommen, wobei eine spezielle Quantisierungskennlinie mit genau doppelt so vielen Stufen wie Codeworten verwendet wird. Durch die besondere Kennlinienform und eine Zweierkomplementarithmetik ohne Übertrag wird die Doppeldeutigkeit der Codeworte im nicht gestörten Betrieb automatisch wieder aufgehoben. Die Fehlerentstehung und -fortpflanzung ist allerdings aufgrund der weiten Kennlinienspreizung, der Codewortzuordnung im Zweierkomplement und der Effekte, die bei Bereichsüberschreitung im Fehlerfall auftreten, besonders stark ausgeprägt.

##### 4.1.3.2. Quantisierersteuerung durch Bildpunktdifferenzen

Auch Differenzen von rekonstruierten Amplitudenwerten in der Nachbarschaft eines zu codierenden Bildpunktes oder deren Beträge können als Kriterium für die Quantisierersteuerung verwendet werden /1.15, 1.23/. Zunächst kann durch einen Übertragungsfehler ein Bildpunkt und damit zwei Differenzwerte so stark verfälscht werden, daß bei der Decodierung an diesen Stellen nicht die gleiche Kennlinie wie im Coder ausgewählt wird. Weiterhin können jedoch auch die gleichen Codeworten in verschiedenen Kennlinien zugeordneten Repräsentativwerte so stark voneinander abweichen, daß wiederum eine fehlerhafte Kennlinienauswahl stattfindet. Im Zusammenwirken mit der normalen Fehlerfortpflanzung der DPCM kann so durch fortgesetzte Auswahlfehler ein Vorgang der Fehlerverstärkung einsetzen, der ähnlich wie eine divergierende Prädiktion große Bildteile zerstört. Dieser Effekt wurde bei dem in /1.23/ beschriebenen System der Firma Bosch beobachtet.

Eine gemeinsame Optimierung von Quantisierungskennlinien und Umschalt-schwellen unter Berücksichtigung häufig auftretender Fehleramplituden kann die Fehlerfortpflanzung u.U. günstig beeinflussen. So lassen sich insbes. bei zweidimensionaler Vorhersage die unmittelbaren Auswahlfehler deutlich reduzieren und ihre weitere Fortpflanzung auf die seltenen Fälle beschränken, wo in detailreichen Bildteilen Fehler mit großen übertragenen Differenzwerten zusammentreffen und weitere große Differenzen in der Nachbarschaft auftreten. Dagegen ist in dem System /1.. 23/ mit doppelter Quantisierersteuerung durch Bildpunktdifferenzen und Vorhersagewert eine ähnliche Verbesserung nicht erreichbar.

#### 4.1.3.3. Quantisierersteuerung durch Prädiktionsfehler

Werden die Prädiktionsfehler eines DPCM-Systems für die Kennlinienauswahl benutzt, so steht die im Decoder dafür benötigte Information bereits nach der Codewort-Decodierung und vor der Integration in der DPCM-Schleife zur Verfügung. Die für den jeweiligen Prädiktor typische normale Fehlerfortpflanzung (s. Abschnitt 4.1.1.) ist somit ohne Einfluß auf die zusätzlichen Auswahlfehler. Dies reduziert beträchtlich die Fortpflanzungsmöglichkeiten für Auswahlfehler und erleichtert die Analyse und Optimierung des Fehlerverhaltens. Während z.B. im System /1.11/ die unmittelbar durch einen Übertragungsfehler verursachten Auswahlfehler in bis zu 4 Bildpunkten auftreten können, ist die weitere Fortpflanzung auf Fälle beschränkt, wo ganz bestimmte Prädiktionsfehler in direkt benachbarten Bildpunkten fortgesetzt übertragen werden, wie z.B. an geradlinigen Konturen mit konstantem Kontrast.

#### 4.1.4. Dynamische Störwirkung

Fehler und Fortpflanzungsmuster sind bei Fernsehsignalen zeitlich und örtlich jeweils auf ein Halbbild begrenzt. Der Betrachter nimmt die dadurch verursachten Bildverfälschungen im wesentlichen aufgrund der zeitlichen Dynamik wahr, die durch die kurzzeitige Helligkeits- bzw. Farbabweichung eines Bildteils gegenüber einem nicht oder nur langsam veränderten Grundzustand entsteht. Demgegenüber würden gleichartige Fehlermuster, wenn sie zeitlich stabil sind, wesentlich geringere Sichtbarkeit bzw. Störwirkung verursachen. Die im Rahmen dieser Arbeit wiedergegebenen Fehlerbilder sind deshalb für die Beurteilung der absoluten Störwirkung in Abhängigkeit von der Fehlerrate nicht geeignet.

Dies ist neben der fehlenden Dynamik auch darauf zurückzuführen, daß die

fotografische und drucktechnische Wiedergabe einen erheblichen Verlust an Bildschärfe und Kontrastumfang zur Folge hat.

#### 4.2. Der Einfluß von Rundungsfehlern auf den Fehlerabbau.

Rundungsfehler bei der Berechnung des Vorhersagewertes in einem DPCM-System treten auf, wenn nicht ganzzahlige Prädiktorkoeffizienten verwendet werden. Wie bereits erwähnt, werden bei der DPCM-Codierung von Bildsignalen wegen der hohen Arbeitsgeschwindigkeit Prädiktionskoeffizienten verwendet, die sich auf einfache Weise durch Stellenverschiebung und eventuelle Additions- bzw. Subtraktionsoperationen gewinnen lassen (z.B.  $1/2$ ,  $3/4$ ,  $15/16$  usw.). Die dabei hinter dem Komma auftretenden Stellen werden gerundet, um einen ganzzahligen Vorhersagewert zu erhalten. Für den häufigen Fall, daß hinter dem Komma der Wert 0.5 erscheint, wird allgemein ständig in der gleichen Richtung, z.B. nach oben, gerundet, wodurch ein systematischer Rundungsfehler entsteht. Während bei Gleichlauf von DPCM-Coder und -Decoder dies ohne Bedeutung ist, wird beim Auftreten von Übertragungsfehlern die Fehlerfortpflanzung im Decoder beeinflusst, so daß sie den theoretischen Berechnungen nicht mehr entspricht. Der ungünstigste mögliche Fall für dies Verhalten ist in Bild 4.6 dargestellt. Dabei wird von der idealisierten Voraussetzung ausgegangen, daß der Coder ein konstantes Eingangssignal (z.B. 0) verarbeitet. Die Prädiktion ist  $(A+C)/2$  mit einer Aufrundung bei nicht ganzzahligem Ergebnis. Die Quantisierung erfolgt ohne Fehler und ein einzelner Übertragungsfehler der Größe 16 tritt auf. In diesem Fall baut sich ein Restfehler der Größe 5 auf, der die Bildfläche rechts und unterhalb des Fehlerortes überdeckt. Für einen "negativen" Übertragungsfehler ergibt sich dagegen ein besonders rascher und vollständiger Fehlerabbau. Der Grund für dies Verhalten liegt darin, daß hier auf der Coderseite keine Rundung stattfindet, auf der Decoderseite dagegen eine Rundung notwendig ist, die nur in einer festen Richtung erfolgt. So läßt sich im ersten Fall ein Restfehler von 1 gegenüber der Vorzeile nicht weiter abbauen. Dies Verhalten tritt in gleicher Weise auch bei der Verwendung realer Quantisierungskennlinien auf. Werden reale, rauschbehaftete Bildsignale verarbeitet, so finden im Coder und Decoder in statistischer Folge Rundungsvorgänge statt, so daß ein Stehenbleiben von Restfehlern nicht möglich ist. Allerdings bleibt die Tendenz bestehen, daß sich "positive" und "negative" Fehler unterschiedlich weit fortpflanzen, was die mittlere Störwirkung von Einzelfehlern verstärkt und bei hohen Fehlerraten und entsprechender Überlagerung von Fehlerschleppen eine Verschiebung der Bildhelligkeit bewirkt.



Eine Abhilfe gegen die Fortpflanzung der Rundungsfehler bietet die Akkumulation der Rundungsreste und ihre Einbeziehung in die folgenden Prädiktionsvorgänge. Auf diese Weise wird die einseitige Rundung und damit auch jeglicher Einfluß der Rundung auf die Fehlerfortpflanzung verhindert.

Im Falle der Berechnung des Prädiktionswertes  $(A+C)/2$  ist die technische Realisierung besonders einfach und erfordert nur ein Speicher-Flipflop, das den abgetrennten Divisionsrest aufnimmt und beim nächsten Prädiktionsschritt über den Eingangsübertrag des Addierers wieder in die Rechnung einbringt (Bild 4.7). Für andere Prädiktionsalgorithmen kann ähnlich verfahren werden, sofern sie aus Einzelschritten bestehen, die nur die Division durch 2 beinhalten. Im allgemeinen Fall wird ein echter Akkumulator benötigt mit so vielen Binärstellen, wie der Rundungsrest umfaßt.

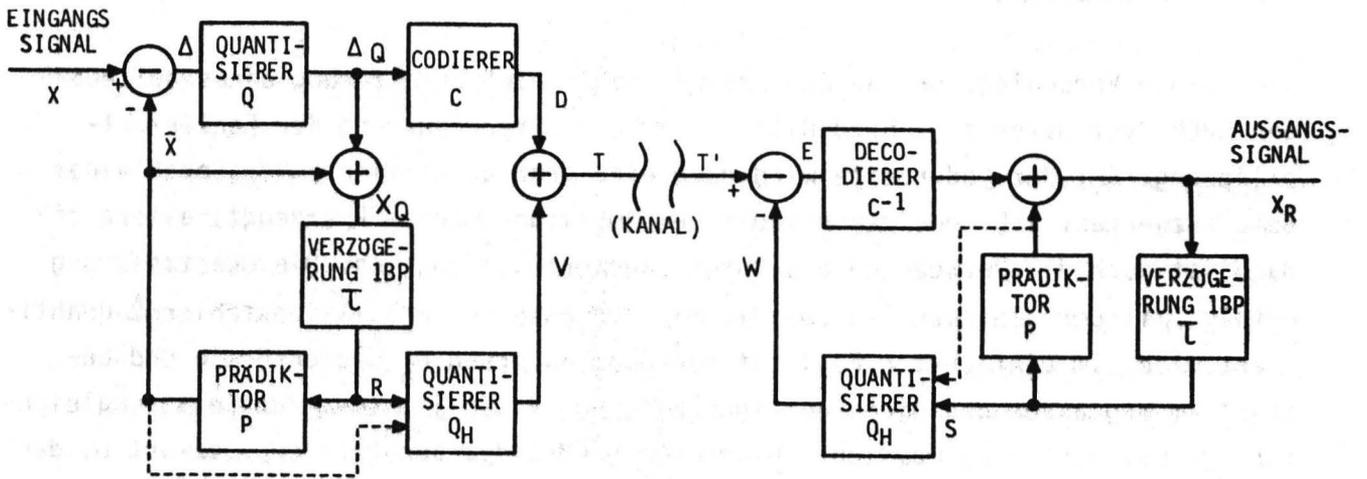
### 4.3 Reduktion der Fehlerfortpflanzung durch Hybrid-DPCM

#### 4.3.1. Beschreibung der Hybrid-DPCM und ihrer Wirkungsweise

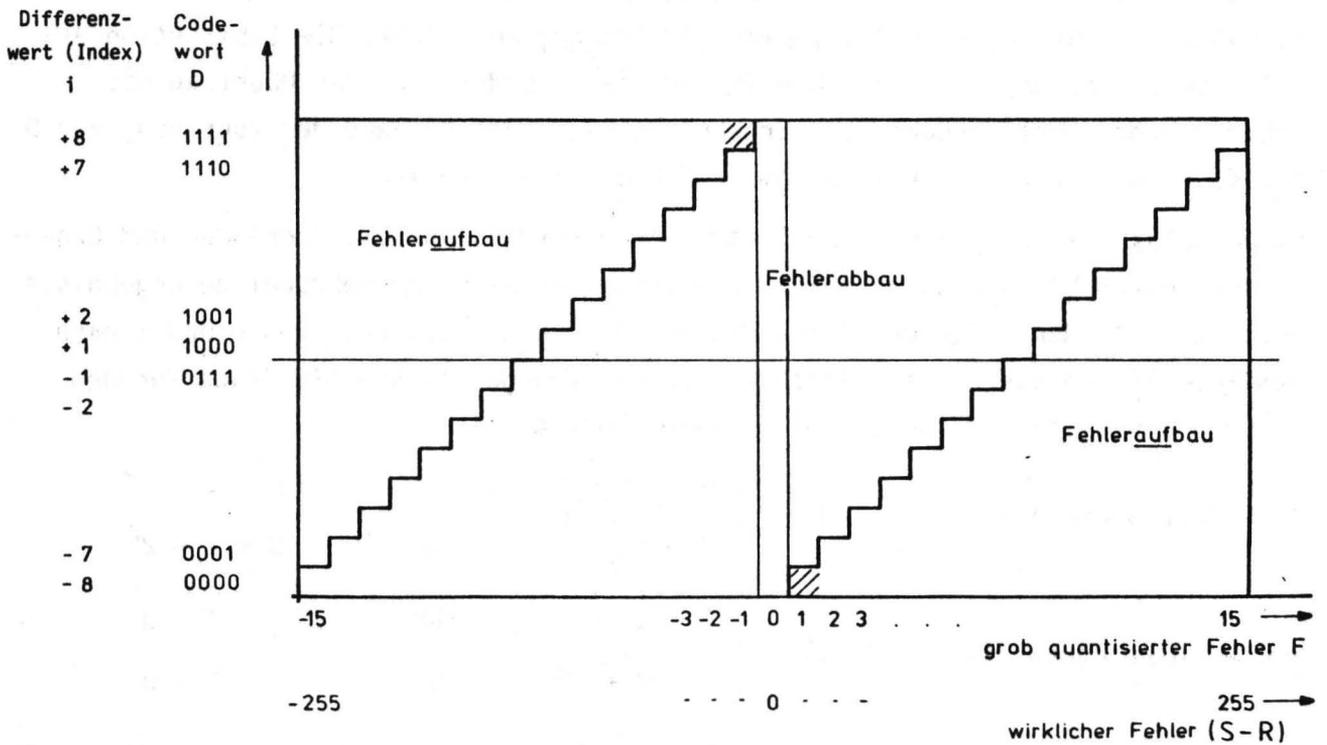
Nach einem Vorschlag von van Buul /1.24/ führt eine Erweiterung eines beliebigen DPCM-Systems entsprechend Bild 4.8 zu einer Verringerung der Fehlerfortpflanzung. Auf der Coderseite wird dazu eine grob quantisierte Version  $V$  eines Referenzwertes, z.B. des rekonstruierten Amplitudenwertes  $R$  erzeugt; alternativ dazu ist auch die Verwendung des Vorhersagewertes  $\hat{X}$  möglich. Die Quantisierung erfolgt mit der gleichen Stufenzahl, mit der auch der Prädiktionsfehler  $\Delta$  quantisiert wird. Im einfachsten Fall ist die Quantisierung  $Q_H$  gleichförmig und besteht im Weglassen der niederwertigen Bits von  $R$ , es ist aber auch eine ungleichförmige Quantisierung möglich. Zu dem vom DPCM-Coder abgegebenen Codewort  $D$ , das in Zweierkomplementdarstellung, d.h. z.B. entsprechend der Tabelle 4.2 (TCO-Code) den quantisierten Differenzwerten zugeordnet sein muß, wird der Wert  $V$  (s.o.) zuaddiert.  $D$  und  $V$  sind dabei vorzeichenlose (nicht-negative) Dualzahlen mit  $n$  Stellen, die binär addiert werden. Die  $n+1$ -te Stelle des Ergebnisses (der Ausgangsübertrag des  $n$ -bit-Addierers) wird vernachlässigt, so daß der so entstehende zu übertragende Wert  $T$  ebenfalls nur  $n$  Stellen umfaßt und damit die Datenrate unverändert bleibt. Auf der Empfangsseite (Decoder) wird entsprechend dem Wert  $V$  der Wert  $W$  berechnet und vom empfangenen Wert  $T$  subtrahiert.  $T$  und  $W$  werden wieder als nicht-negative Dualzahlen ( $n$  Stellen) aufgefaßt. Die Subtraktion erfolgt in Zweierkomplement-Arithmetik und wie im Coder wird der Übertrag des Subtrahierers unterdrückt. Das Ergebnis  $E$  wird entsprechend der Zuordnung von  $D$  decodiert und in üblicher Weise im DPCM-Decoder verarbeitet.

Eine Analyse der Additions- und Subtraktionsoperationen mit Operanden und Ergebnissen, die  $n$  bit umfassen, zeigt, daß bei jeder Rechnung mehrdeutige Ergebnisse auftreten. In den folgenden Betrachtungen wird eine Codierung von  $D$  und  $E$  nach dem TCO-Code vorausgesetzt. Gleichartige Überlegungen lassen sich auch für den TC-Code anstellen und führen auf dasselbe Endergebnis.

$$\begin{aligned} \text{Am Coderausgang ist:} \quad T &= \begin{cases} D + V & \text{für } D + V < 2^n \\ D + V - 2^n & \text{für } D + V \geq 2^n \end{cases} \\ \text{Am Decodereingang ist:} \quad E &= \begin{cases} T - W & \text{für } T \geq W \\ T - W + 2^n & \text{für } T < W \end{cases} \\ \text{Mit } W - V = F \text{ wird:} \quad E &= \begin{cases} D - F & \text{für } 0 \leq D - F < 2^n & (4.1) \\ D - F + 2^n & \text{für } D - F < 0 & (4.2) \\ D - F - 2^n & \text{für } D - F \geq 2^n & (4.3) \end{cases} \end{aligned}$$



**Bild 4.8** Blockschaltbild eines DPCM-Coders und -Decoders mit Erweiterungen für die Durchführung der Hybrid-DPCM-Codierung  
 Alternativmöglichkeit für Referenzwerte R,S gestrichelt eingezeichnet



**Bild 4.9:** Bereiche für Fehlerabbau und Fehleraufbau bei der Hybrid-DPCM in Abhängigkeit vom gesendeten Codewort und vom Empfängerfehler

Für den Fall der fehlerfreien Übertragung sind die Werte R und S im Coder bzw. Decoder stets gleich. Damit ist  $W = V$  und  $F = 0$ . Nach (4.1) ist dann  $E = D$  und die Zusatzschaltung arbeitet vollständig transparent und ohne Einfluß auf die normale DPCM-Decodierung.

Ein fehlerhaft übertragener Wert T erzeugt eine Verfälschung von E, die wiederum zur Rekonstruktion eines falschen Wertes S im Decoder führt. Weicht S vom richtigen Wert R so stark ab, daß unter Berücksichtigung der größeren Quantisierung auch  $W \neq V$  wird, so kann man  $F = W - V$  als eine grob und ungenau quantisierte Version des wirklichen Restfehlers (S-R) betrachten, der sich im Decoder befindet und sich auch weiter fortpflanzt. Der Wert F tritt an keiner Stelle im System real auf, sondern ist eine fiktive Größe, die vorzeichenbehaftet ist und  $(n + 1)$  Bit umfaßt. Der Wert der Differenz (D-F) erlaubt mit Hilfe der Gleichungen (4.1) ... (4.3) eine Aussage über die fehlermindernde Wirkung des Verfahrens.

Fall 1 Gleichung (4.1) erfüllt:

Ein von Null verschiedener Wert F erzeugt am Eingang des Decoders einen Wert  $E = D - F$ , der sich von dem Wert D am Coder-Ausgang unterscheidet. Da die Codeworte D bzw. E bestimmten Differenzwerten (Repräsentativwerte der Prädiktionsfehler) zugeordnet sind, wird ein anderer Differenzwert für die Rekonstruktion im Decoder verwendet als im Coder berechnet wurde. Der hierbei gemachte Fehler ist dem im Wert S enthaltenen Fehler stets entgegengerichtet (negatives Vorzeichen von F), so daß dieser teilweise oder vollständig korrigiert, in seltenen Fällen auch überkorrigiert wird. Voraussetzung dafür ist, wie bereits oben angegeben, die Codewortzuordnung entsprechend der Zweierkomplementdarstellung, da diese eine monoton zunehmende Abhängigkeit zwischen Codeworten und Differenzwerten bedingt. Dieser Fehlerabbau kann immer stattfinden, solange Restfehler im Decoder vorhanden sind, die einen Wert  $F \neq 0$  erzeugen, jedoch nur dann, wenn die Bedingung  $0 \leq D - F < 2^n$  der Gleichung (4.1) erfüllt ist.

Fall 2 Gleichung (4.1) nicht erfüllt:

Für alle anderen Werte von (D-F) findet kein Fehlerabbau statt, sondern die Fehler werden verstärkt bzw. weiter aufgebaut, da der "Korrekturwert" in die gleiche Richtung zeigt, wie der vorhandene Restfehler, wie sich aus Gleichung 4.2 und 4.3 leicht erkennen läßt.

Die Wertebereiche der Fehler, für die abhängig vom ausgesandten Codewort D Fehlerab- bzw. aufbau stattfinden, sind in Bild 4.9 am Beispiel einer 4 bit-Codierung grafisch dargestellt. Man erkennt, daß für Codeworte von kleinen Differenzen ein großer Bereich des Fehlerabbaus gegeben ist, der Fehler bis zur

Größe des halben Aussteuerungsbereiches einschließt. Solche Fehleramplituden können durch einzelne Bitfehler nur bei der Übertragung sehr großer Differenzen entstehen; deshalb tritt in ruhigen Bildteilen normalerweise auch kein störender Fehleraufbau auf. Diese Aussage muß allerdings unter Umständen eingeschränkt werden (s.4.3.2.1.).

Bei großen Prädiktionsfehlern im Coder bzw. den zugeordneten Codeworten wird der Fehlerabbaubereich unsymmetrisch, und es kann im Extremfall bei der größtmöglichen Differenz ein minimaler Restfehler zum Fehleraufbau führen, sofern er ein zum Differenzwert entgegengesetztes Vorzeichen hat. Dies ist der Grund für das Auftreten von störenden Fehleraufbaueffekten in Bildteilen mit kontrastreichen Details bzw. Konturen.

Das Verhalten der beschriebenen Hybrid-DPCM-Anordnung, die als Version I bezeichnet werden soll, ist durch drei wesentliche Eigenschaften bestimmt:

- a) Das Verfahren arbeitet vollständig transparent, d.h. in Abwesenheit von Übertragungsfehlern ist keinerlei Einfluß des Hybrid-Verfahrens auf das im Decoder rekonstruierte Signal festzustellen, und es können beliebige DPCM-Verfahren unverändert eingesetzt werden.
- b) Die Hardware-Realisierung erfordert nur geringen Aufwand und ist ohne zusätzliche Probleme hinsichtlich der Verarbeitungsgeschwindigkeit zu lösen.
- c) Die störbefreiende Wirkung kann durch bildabhängige Fehleraufbaueffekte reduziert werden.

Vermutlich wegen des unter c) genannten Nachteils der Anordnung wurde in /1.25/ ein abgeändertes Verfahren angegeben, das den Fehleraufbau vermeidet, dafür jedoch Einbußen in der Verarbeitungsqualität und beträchtlichen Realisierungsaufwand in Kauf nimmt (s. Abschnitt 4.3.3). Da bei der Übertragung von TV-Signalen mit 34 Mbit/s die geforderte Übertragungsqualität nur durch konsequente Optimierung der DPCM-Codierung gerade erreichbar ist, kann ein Qualitätsverlust auf keinen Fall toleriert werden. Aus diesem Grunde konnte zunächst die weitere Untersuchung und experimentelle Überprüfung der Hybrid-DPCM auf die erste transparente Version I beschränkt werden. Die Ergebnisse sind im folgenden Abschnitt 4.3.2 dargestellt. Abschnitt 4.3.3 enthält eine Beschreibung der Version II nach /1.25/ und eine Analyse des Verhaltens einiger möglicher Anordnungen.

#### 4.3.2. Experimentelle Ergebnisse und Optimierung der Hybrid-DPCM, Version I

##### 4.3.2.1. Wirkung des Begrenzers in der DPCM-Schleife

In den Veröffentlichungen /1.24, 1.25/ wird das Hybrid-DPCM-Verfahren für die Anwendung bei einem eindimensionalen Prädiktor ( $\hat{X} = A$ ) vorgeschlagen. Es wird auf die besondere Wirksamkeit in Zusammenarbeit mit Quantisierern vom "Bostelmann"-Typ hingewiesen. Die experimentelle Überprüfung mit Hilfe des Versuchssystems konnte diese Aussage voll bestätigen. Bei Anwendung des Verfahrens auf DPCM-Codierungen mit normaler, symmetrischer Kennlinie und Begrenzer, und insbesondere bei zweidimensionalen Prädiktoren traten jedoch sehr störende Fehleraufbaueffekte auf. Die genauere Analyse dieser Effekte ergab als Ursache dafür die Begrenzungsfunktion, die in einer DPCM-Schleife normalerweise im Anschluß an den Integrator-Addierer vorhanden sein muß. Führt ein Übertragungsfehler in Verbindung mit einem oder mehreren großen Differenzwerten zum Fehleraufbau, so kann dadurch ein Restfehler entstehen, der auch bei nachfolgenden kleinen Differenzwerten außerhalb des Fehlerabbaubereiches (Bild 4.9) liegt. Damit wächst der Restfehler an, bis der rekonstruierte Wert die Aussteuerungsgrenze erreicht und wegen der Begrenzung diesen Wert weiter beibehält. Der Fehlerabbau wird z.B. erst dann wieder möglich, wenn Differenzen maximaler Amplitude mit dem entgegengesetzten Vorzeichen übertragen werden, wie ebenfalls aus Bild 4.9 ersichtlich ist.

Es lag nahe, zur Reduktion dieser Effekte ähnlich wie beim Bostelmann-Coder auf den Begrenzer in der Schleife zu verzichten, wobei dann vor dem Eingangssubtrahierer eine Begrenzung des Aussteuerbereiches vorgenommen werden muß, um durch Quantisierungsfehler verursachte Bereichsüberschreitungen auszuschließen. Dadurch wird erreicht, daß im Falle des Fehleraufbaus der rekonstruierte Wert über die Aussteuerungsgrenze hinaus wachsen kann. Da dies jedoch unter Vernachlässigung des Übertragsbits geschieht, erfolgt gleichzeitig mit dem Überschreiten der Aussteuerungsgrenze ein Versatz um den gesamten Aussteuerbereich, der im Normalfall stets sofort zum Erreichen des Fehlerabbaubereichs führt. Dies gilt nur dann nicht, wenn aufgrund sehr detailreicher Bildvorlagen ständig große Differenzen mit wechselndem Vorzeichen übertragen werden. Bild 4.10 gibt qualitativ das beschriebene Fehlerverhalten unter verschiedenen Randbedingungen wieder.

Durch das Fortfallen der Begrenzung werden allerdings auch dann Fälle von Fehleraufbau möglich, wenn keine großen Differenzen im DPCM-Coder auftreten. Übertragungsfehler können zum Überlauf des Integrators im Decoder führen, wenn der jeweilige Inhalt des Integrators in der Nähe der Aussteuerungsgrenze liegt. Dadurch wird aus einem Fehler  $Z$ , der durch Code und Kennlinie vorgegeben ist, ein Fehler  $Z \pm 256$ , der sehr viel größer ist als  $Z$ . Durch einen derart großen Fehler gerät das System dann ebenfalls in den Bereich des Fehleraufbaus.

#### 4.3.2.2. Auswahl des Referenzwertes

Wie bereits in Abschnitt 4.3.1. erwähnt, kann als Referenzwert für das Hybrid-Verfahren (der Wert, der grob quantisiert zum Codewort addiert wird) der rekonstruierte Amplitudenwert  $R = A$  aus dem vorausgegangenen Zyklus oder aber der aktuelle Vorhersagewert  $\hat{X}$  verwendet werden. Aus den Originalarbeiten von van Buul ist hierzu keine Aussage zu entnehmen, da bei der dort ausschließlich verwendeten Vorhersage  $\hat{X} = A$  diese Alternativen identisch sind. Deshalb wurden die beiden Möglichkeiten unter Verwendung zweidimensionaler Prädiktoren mit Hilfe des Versuchssystems experimentell verglichen. Die Unterschiede im subjektiven Störeindruck bei gleichen Fehlerraten waren meist deutlich sichtbar, jedoch nie gravierend. Es waren jedoch eindeutige Vorteile bei der Verwendung des rekonstruierten Wertes zu erkennen, so daß diese Version bei allen folgenden Untersuchungen beibehalten wurde. Eine genaue Analyse dieses Verhaltens ist ohne hinreichende Simulationsuntersuchungen kaum möglich. Eine plausible Erklärung besteht jedoch darin, daß die in einem Verarbeitungsschritt erzielbare Korrektur in nichtlinearer und näherungsweise exponentieller Form von der Größe des im Referenzwert enthaltenen Restfehlers abhängt. In den Rekonstruktionswert geht ein Übertragungsfehler in voller Höhe ein, in den Vorhersagewert jedoch nur bewertet mit dem jeweiligen Prädiktionskoeffizienten, so daß zumindest für Prädiktionen, die nur Koeffizienten  $< 1$  verwenden, ein geringerer Fehlerabbau auftreten dürfte. Es ist jedoch nicht zu überblicken, inwieweit dieser Vorteil durch verstärktes Auftreten von Fehleraufbaueffekten kompensiert wird.

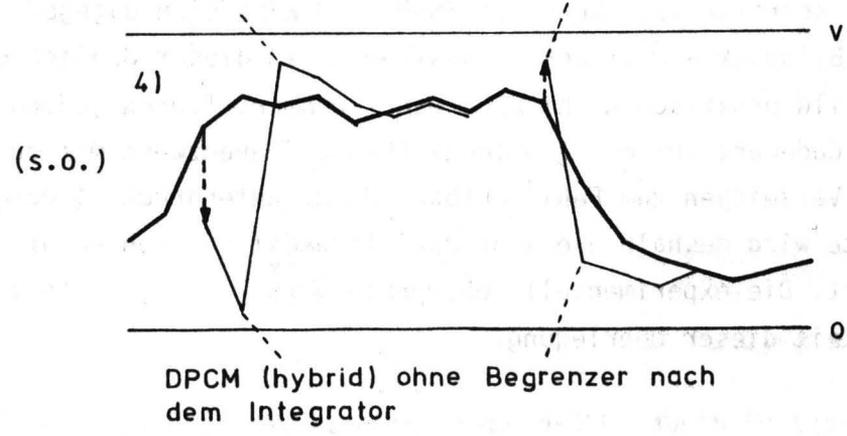
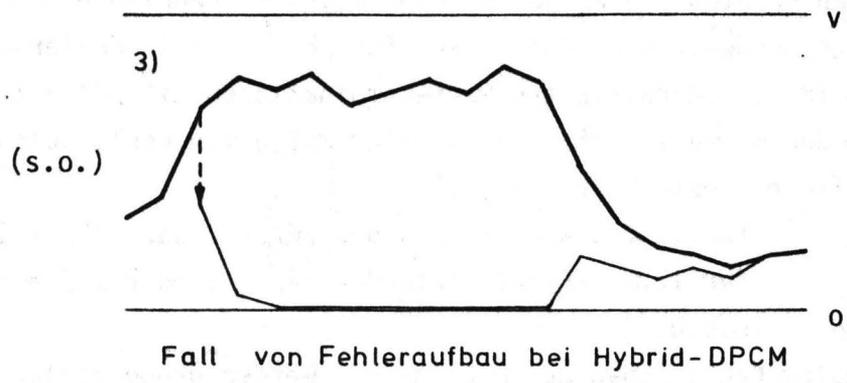
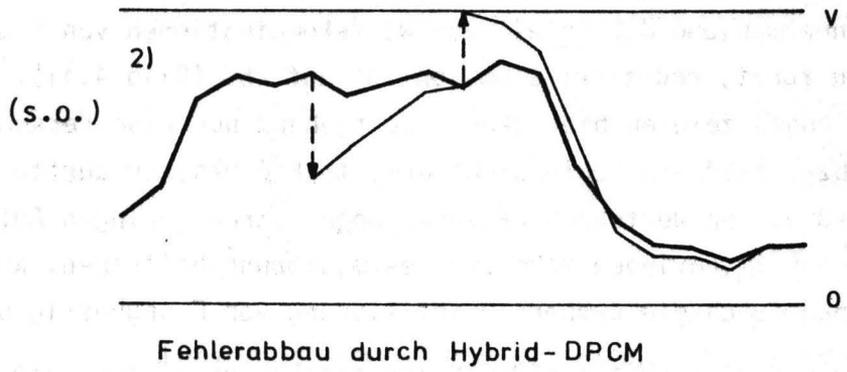
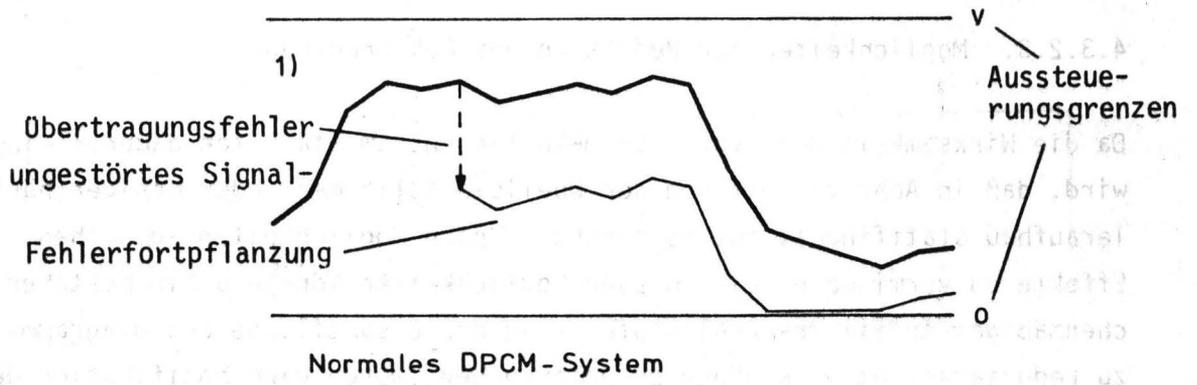


Bild 4.10: Fehlerverhalten von DPCM-Systemen

#### 4.3.2.3. Möglichkeiten zur Reduktion des Fehleraufbaus

Da die Wirksamkeit des Hybrid-DPCM-Verfahrens am stärksten dadurch eingeschränkt wird, daß in Abhängigkeit von der Quellstatistik mehr oder weniger häufig Fehleraufbau stattfindet, ist es sinnvoll, nach Möglichkeiten zu suchen, um diese Effekte zu vermindern. Eine dieser Möglichkeiten könnte darin bestehen, den flächenmäßigen Anteil des Fehleraufbaus an der Gesamtfläche des Diagramms Bild 4.9 zu reduzieren. Um dies näher zu untersuchen, wurde eine Modifikation des Systems vorgenommen, so daß der Referenzwert nur mit der halben Stufenzahl quantisiert wurde. Auf diese Weise kann der Wert  $F$  nur einen auf die Hälfte reduzierten Bereich einnehmen, und der Anteil der Wertekombinationen von  $F$  und  $D$ , der zum Fehleraufbau führt, reduziert sich von 50% auf 25% (Bild 4.11). Die experimentellen Untersuchungen zeigten hier jedoch weitgehend nur eine Verschlechterung des Verhaltens bzw. stärkere Fehlersichtbarkeit. Die Ursache dürfte darin liegen, daß die unterdrückten Wertekombinationen wegen ihrer geringen Auftretenswahrscheinlichkeit nur im geringen Maße zur Gesamtstörung beitragen, andererseits aber der Fehlerabbau durch die gröbere Quantisierung von  $F$  ungünstig beeinflusst wird.

Eine andere Möglichkeit zur Reduktion des Fehleraufbaus, die allerdings zu Lasten der erreichbaren Codiergenauigkeit des DPCM-Systems geht, besteht im Fortlassen der beiden größten Stufen der DPCM-Quantisiererkennlinie bzw. dem Fortfall der zugehörigen Codeworte  $D$ . Damit kann für  $/F/ = 1$  kein Fehleraufbau stattfinden. Die in Bild 4.9 schraffierten Wertekombinationen mit  $/F/ = 1$  verursachen normalerweise den weitaus größten Teil aller Fälle von Fehleraufbau. In Abhängigkeit vom wirklichen Restfehler ( $S-R$ ) ist

für  $1 \leq S-R \leq 15$  entweder  $/F/ = 0$  oder  $/F/ = 1$

für  $17 \leq S-R \leq 31$  entweder  $/F/ = 1$  oder  $/F/ = 2$

u.s.w.

Bei normalem Fehlerabbau der Hybrid-DPCM werden große Fehleramplituden meist in wenigen Schritten (3...5 Bildpunkte) auf Restfehlerwerte  $/S-R/ < 16$  reduziert. Der weitere, schrittweise Abbau auf  $/S-R/ = 0$  kann sich dagegen leicht auf mehrere hundert Bildpunkte erstrecken. Restfehler in dieser Größenordnung sind im rekonstruierten Bild praktisch nicht mehr wahrzunehmen, führen jedoch bei Zusammentreffen mit dem Codewort für den größtmöglichen Differenzwert mit zu  $(S-R)$  entgegengesetzten Vorzeichen zum Fehleraufbau. Durch Unterdrückung der beiden Maximal-Codeworte wird deshalb die Wahrscheinlichkeit von Fehleraufbaueffekten sehr stark reduziert. Die experimentelle Überprüfung (s.7.3.3.) liefert den Nachweis für die Richtigkeit dieser Überlegung.

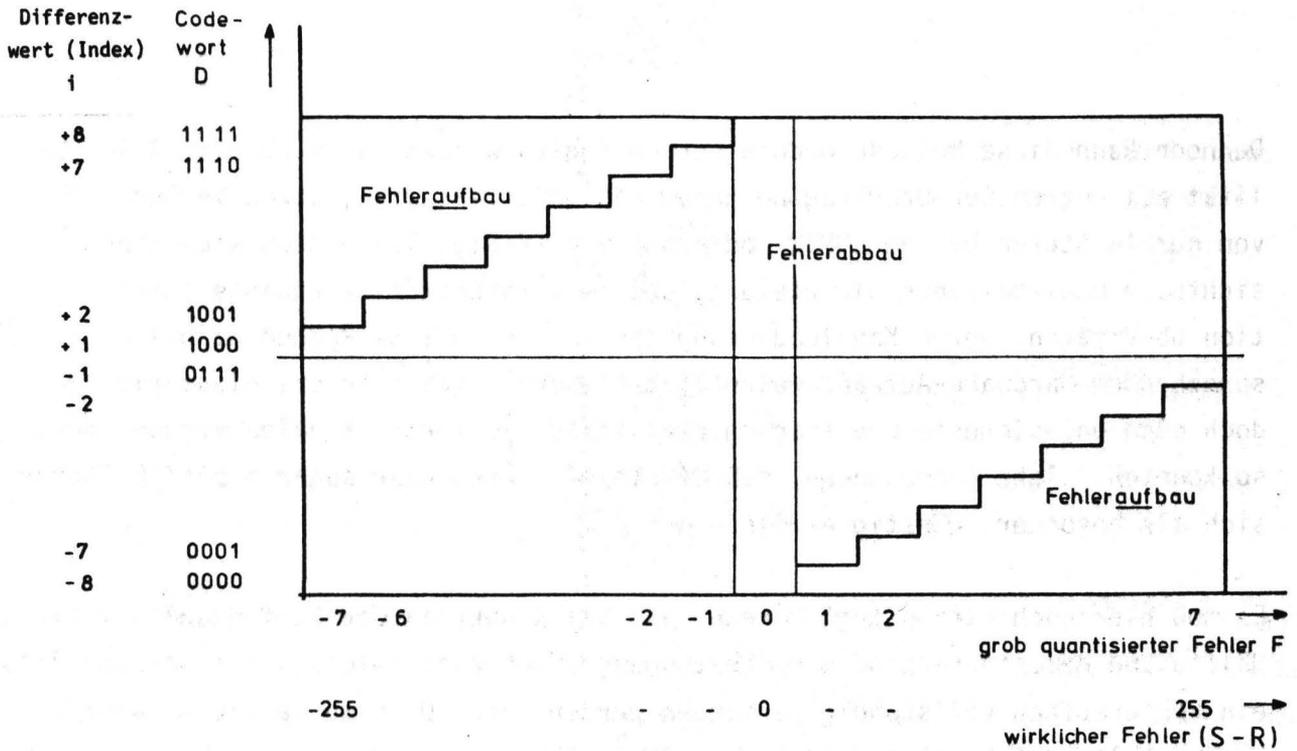


Bild 4.11: Reduktion des Fehleraufbaubereiches bei Hybrid-DPCM durch gröbere Quantisierung des Referenzwertes

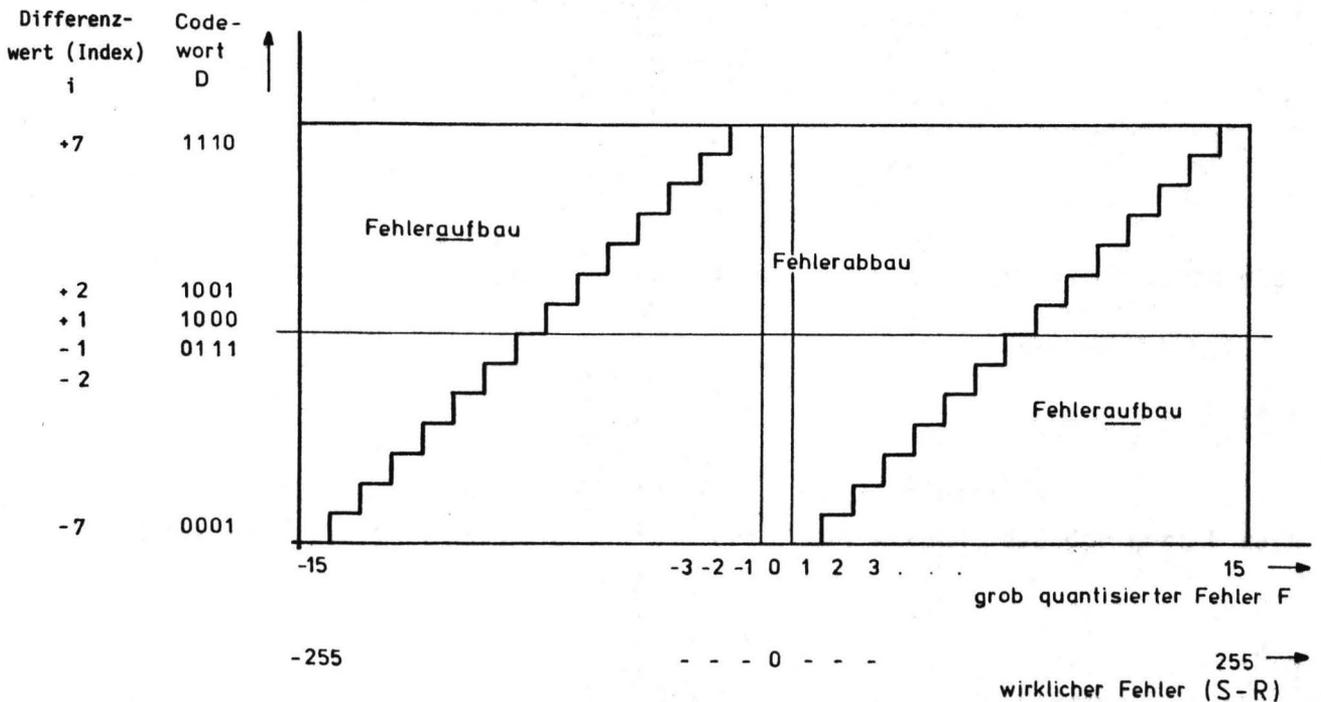


Bild 4.12: Reduktion des Fehleraufbaus bei Hybrid-DPCM durch Fortlassen der äußeren Quantisiererstufen

Dennoch kann diese Methode dann nicht empfohlen werden, wenn höchste Bildqualität bei begrenzter Übertragungskapazität gefordert wird. Durch Verwendung von nur 14 Stufen bei der DPCM-Codierung von TV-Signalen ergibt sich eine sichtbare Qualitätsverschlechterung, und es wird ca. 5% redundante Information übertragen. Durch Kanalcodierung lassen sich mit 5% Redundanz bei entsprechendem Hardware-Aufwand wesentlich bessere Ergebnisse erzielen. Wird jedoch eine ungesicherte Übertragung bei stärker gestörten Kanälen vorgenommen, so könnten solche Anordnungen, z.B. 4 bit/14 Stufen oder sogar 4 bit/12 Stufen sich als besonders günstig erweisen.

Es muß hier noch hinzugefügt werden, daß bei Reduktion der Stufenzahl auf die Hälfte und dementsprechend der Übertragung eines zusätzlichen, redundanten Bits ein Fehleraufbau vollständig vermieden werden kann. Dies würde die Mitübertragung des lt. Abschnitt 4.3.1. vernachlässigten Ausgangsübertrages bedeuten, wodurch Modulo-Rechnung und Mehrdeutigkeiten entfallen. Mit Hinblick auf eine effektive Codierung hat eine derartige Anordnung jedoch wegen des hohen Redundanzanteils keine praktische Bedeutung.

#### 4.3.3. Hybrid-DPCM ohne Fehleraufbau

Im Abschnitt 4.3.2.3 wurden Möglichkeiten untersucht, wie der Fehleraufbau, der bei der transparenten Version I der Hybrid-DPCM nachteilig in Erscheinung tritt, reduziert werden kann, ohne daß grundsätzlich Transparenz und einfache Realisierung verloren gehen.

Demgegenüber ist das in /1.25/ vorgeschlagene, abgeänderte Hybrid-DPCM-Verfahren (Version II) frei von Fehleraufbaueffekten, erreicht dies jedoch nur durch eine aufwendige Quantisierer-Steuerung oder zusätzliche Quantisierer und unter Verzicht auf die bestmögliche erzielbare Bildqualität.

Die grundsätzliche Anordnung entspricht der Version I in Bild 4.8. Es ist allerdings in den meisten Fällen sinnvoller, davon auszugehen, daß nicht der Rekonstruktionswert  $R$ , sondern der Prädiktionswert  $\hat{X}$  in grob quantisierter Form als Referenzwert  $V$  auf das DPCM-Codewort  $D$  aufaddiert wird. Abweichend von der Version I werden hier jedoch zusätzliche Maßnahmen ergriffen, so daß bei dieser Addition kein Übertrag entstehen kann. Für die angenommenen Wertebereiche

$$0 \leq V < 2^n \text{ und } -2^{n-1} \leq D < 2^{n-1}$$

die aus Gründen einer einfacheren Darstellung verschieden von denen des Abschnitts 4.3.1 gewählt wurden, ergibt sich bei Addition ein Bereich für  $(D+V)$

$$-2^{n-1} \leq D+V = T < 3 \cdot 2^{n-1} - 1$$

der nicht mit  $n$  bit eindeutig darstellbar ist.

Für eine eindeutige Übertragung von  $T$  mit  $n$  bit muß erreicht werden, daß die Bedingung

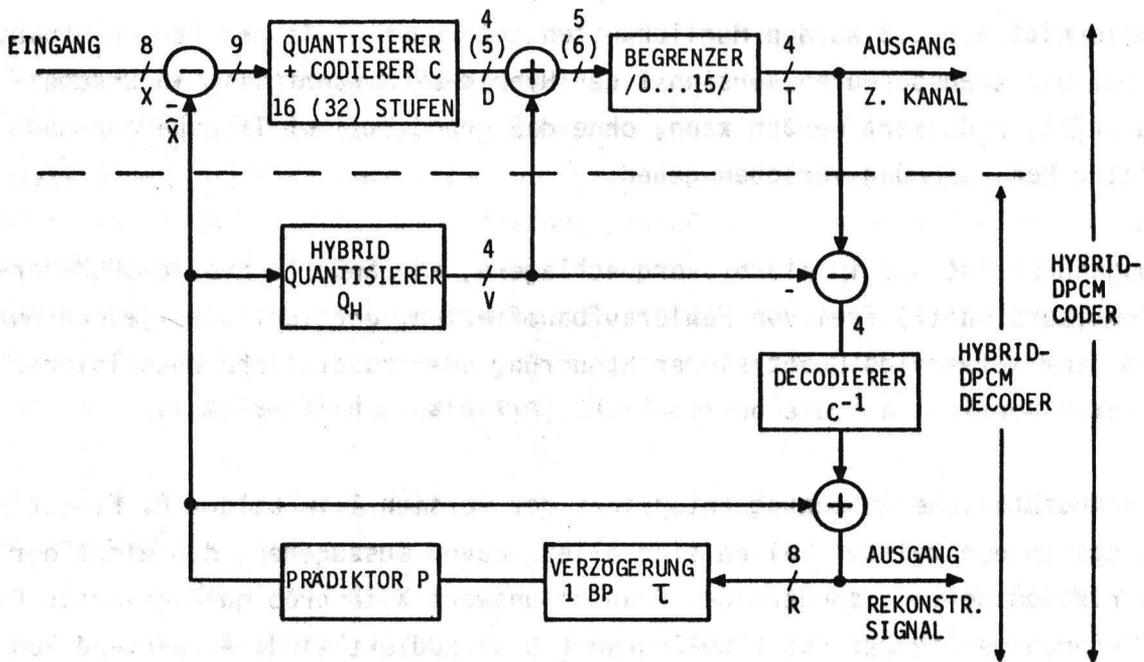
$$0 \leq D+V = T < 2^n \tag{4.4}$$

durch geeignete Maßnahmen auf der Coderseite immer erfüllt ist.

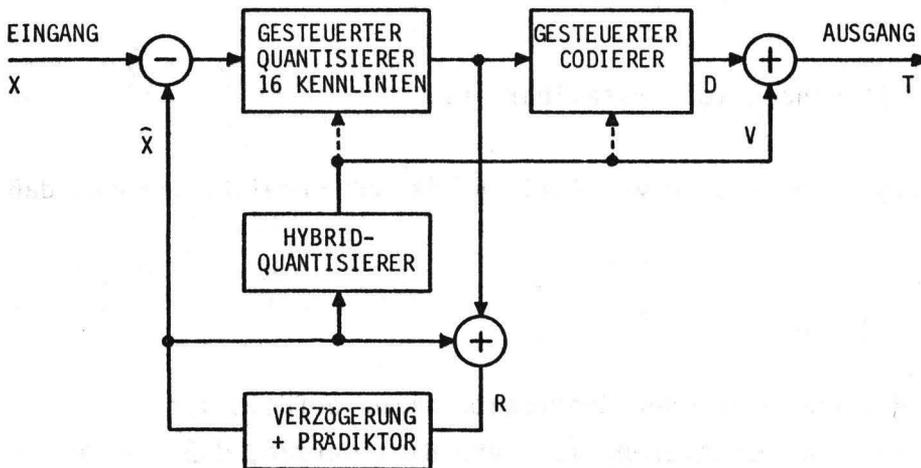
Für die empfangsseitige Decodierung muß gefordert werden, daß der Wert  $E$  nach

$$E = T - W \tag{4.5}$$

berechnet wird, wobei eine mögliche Bereichsüberschreitung u.U. durch Begrenzung auf den für  $D$  zulässigen Wertebereich verhindert werden muß.



**Bild 4.13** Blockschaltbild eines Hybrid-DPCM-Coders bzw. -Decoders mit Begrenzung des Ausgangswertes T zwecks Vermeidung des Fehleraufbaus  
 Werte in Klammern gelten für Ausnutzung der Quantisierersteuerung



**Bild 4.14** Blockschaltbild eines Hybrid-DPCM-Coders ohne Fehleraufbau, in dem die Begrenzung in die Quantisierersteuerung einbezogen ist

Damit ist für die Coder-Decoder-Kombination die Bedingung erfüllt, daß für  $F \neq 0$  Fehlerabbau stattfindet und für  $F = 0$  der Fehler gleichbleibt, ein Fehleraufbau jedoch ausgeschlossen ist.

Auf einfachste Weise ist die Bedingung (4.4) durch Einfügen eines Begrenzers nach dem Addierer (D+V) zu erfüllen (Bild 4.13). Für die sehr zeitkritische Verarbeitung breitbandiger Fernsehsignale ist diese Anordnung nicht geeignet, da in der DPCM-Schleife zu viele Verarbeitungsstufen zu durchlaufen sind. Hier kann jedoch mit Hilfe einer Quantisierersteuerung der gleiche Effekt erzielt werden (Bild 4.14).

Die oben genannte Beschränkung der Quantisierungskennlinie auf  $2^n$  Stufen bei einer Übertragung von n bit-Codeworten ist in dieser Form nicht notwendig. Sofern die Bedingung (4.4) eingehalten wird, können  $2^{n+1}$  Stufen zugelassen werden, wobei

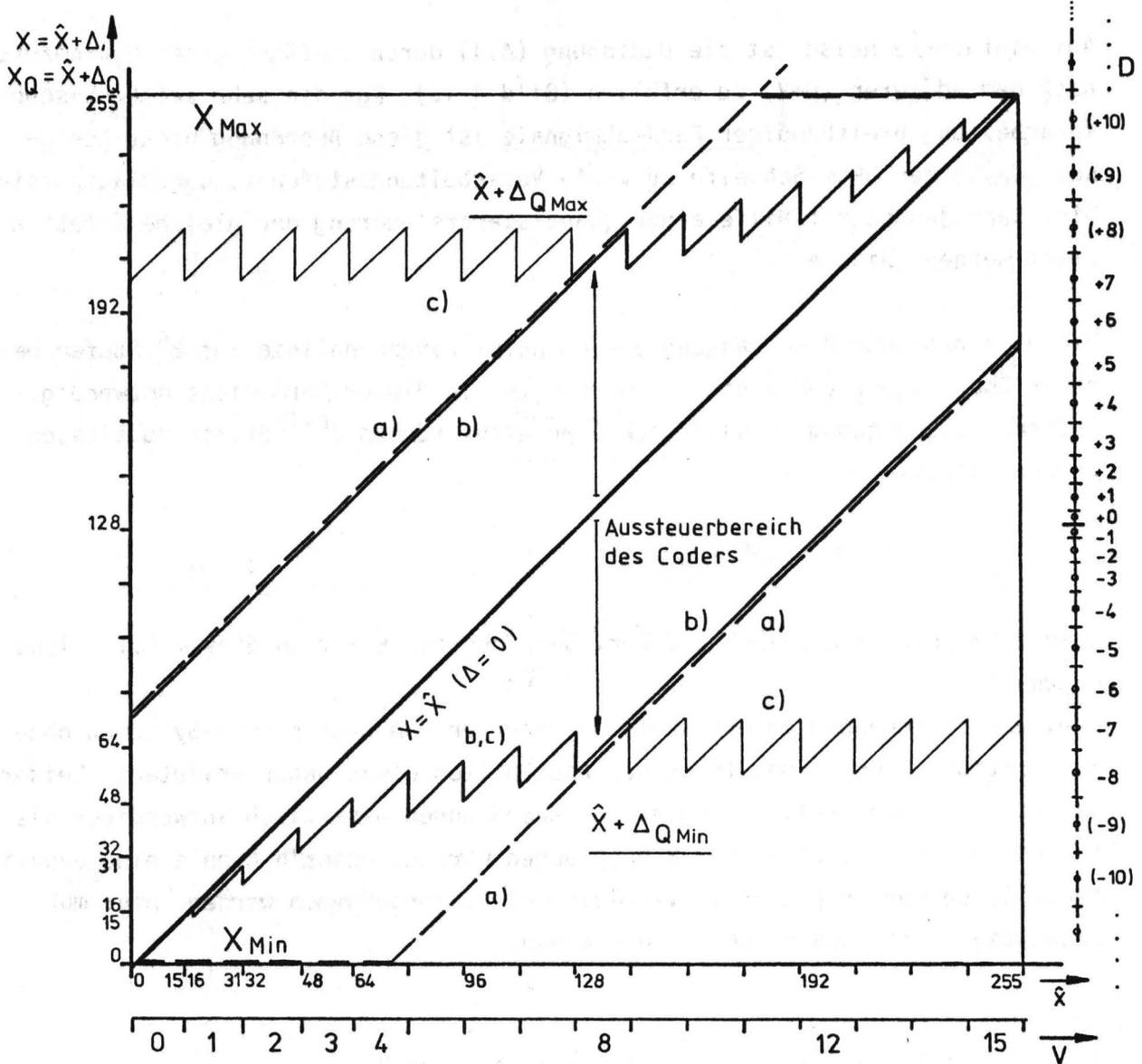
$$-2^n \leq D < 2^n$$

sein darf. Eine Begrenzung des Wertebereichs für E ist in diesem Fall nicht notwendig.

Drei wesentliche und interessante Anordnungen von Hybrid-DPCM-Systemen ohne Fehleraufbau sind in den folgenden Abschnitten etwas näher erläutert. Leider ist die Hardware-Realisierung dieser Anordnungen wesentlich aufwendiger als in den Fällen, die unter 4.3.2 besprochen wurden. Deshalb konnte eine experimentelle Überprüfung und ein Vergleich nicht vorgenommen werden. Dies muß zukünftigen Arbeiten vorbehalten bleiben.

#### 4.3.3.1 Gleichförmig quantisierter Referenzwert V

Wird der Referenzwert V im Quantisierer  $Q_H$  aus dem Vorhersagewert  $\hat{X}$  durch Weglassen der niedrigwertigen bits erzeugt, so daß V wie D n bit umfaßt, so bewirkt die Begrenzung nach Bild 4.13 ebenso wie die Quantisierersteuerung nach Bild 4.14, daß bestimmte Differenzcodeworte D und damit die zugehörigen Quantisierungsstufen nicht auftreten können bzw. dürfen. Die nicht erlaubten Codeworte hängen vom jeweiligen Wert V über die Beziehung (4.4) ab. Nur für



**Bild 4.15:** Aussteuerbereich der Hybrid-DPCM bei Kennlinienbegrenzung zur Vermeidung von Fehleraufbau, abhängig vom Vorhersagewert.

Gleichmäßige Quantisierung des Referenzwertes  $V$  in 16 Stufen. Quantisierung des Differenzwertes mit der dargestellten Kennlinie (16 bzw. 32 Stufen) und Codierung mit Codeworten  $D$ .

- a) Aussteuer Grenzen der Normal-DPCM (16 Stufen/4 bit) zum Vergleich
- b) Aussteuer Grenzen der Hybrid-DPCM bei 16-Stufen-Kennlinie mit Begrenzung
- c) Aussteuer Grenzen der Hybrid-DPCM bei 32-Stufen-Kennlinie mit Begrenzung

$V = 2^{n-1}$  sind alle Codewerte  $D$  zugelassen. Am Beispiel einer 4-bit DPCM-Codierung soll dies im folgenden noch etwas verdeutlicht werden:

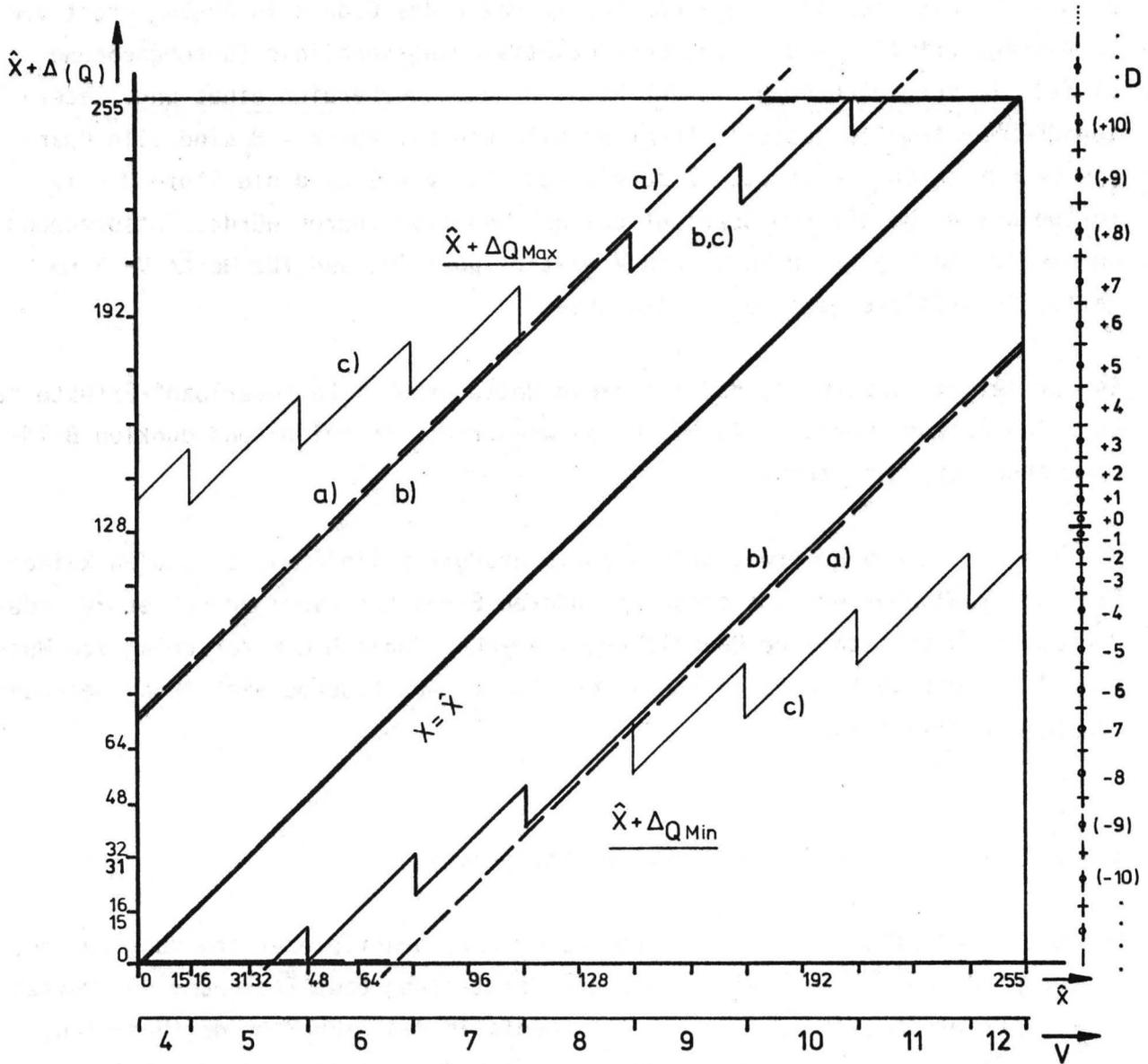
Bild 4.15 zeigt den maximalen Aussteuerbereich des Coders in Abhängigkeit vom Vorhersagewert für eine angenommene Quantisierungskennlinie (durchgezogene Linie). Im Vergleich dazu ist der normale Aussteuerbereich eines ungesteuerten DPCM-Systems dargestellt (gestrichelte Linie). Für  $V = 8$  sind alle Quantisierungsstufen  $D = -8 \dots +7$  zugelassen. Für  $V = 9$  wird die Stufe  $D = +7$  fortgelassen, da sie zum Überlauf bei der Addition führen würde. Entsprechend werden für noch größere Werte von  $V$  weitere positive und für Werte  $V < 8$  negative Quantisierungsstufen fortgelassen.

Es ist leicht einzusehen, daß auf diese Weise erhebliche "overload"-Effekte zusätzlich erzeugt werden, die die Detailwiedergabe in hellen und dunklen Bildbereichen verschlechtern.

Hierauf hat auch eine erweiterte Quantisierungskennlinie mit 32 Stufen keinen Einfluß, wohl aber erlaubt diese, in anderen Bereichen overload-Fehler zu reduzieren, da praktisch eine Quantisierersteuerung ähnlich dem Vorschlag von Musmann/1.13/ entsteht. Dies zeigt der erweiterte Aussteuerbereich (dünn gezogene Linien) in Bild 4.15.

#### 4.3.3.2 Referenzwert mit reduzierter Stufenzahl

Um "overload"-Effekte durch die Begrenzung bzw. Quantisierersteuerung zu reduzieren oder ganz zu vermeiden, muß die Darstellung bzw. Zuordnung des Wertes  $V$  geändert werden, da auf diese Weise ebenfalls das Einhalten der Bedingung (4.4) beeinflusst werden kann. In Bild 4.16 ist dargestellt, wie durch Reduktion der Stufenzahl von  $V$  auf die Hälfte eine beträchtliche Verbesserung erzielt werden kann. Es werden dabei die äußeren Werte von  $V$  nicht verwendet, da sie die Quantisierungskennlinie am stärksten einschränken. Außerdem ist durch einen Versatz um eine halbe Stufe ein symmetrisches Verhalten im oberen und unteren Teil des Signalbereiches erreicht worden. Die so verbesserte Aussteuerbarkeit des Quantisierers kann nur in wesentlich geringerem Maße als bei der Anordnung nach 4.3.3.1 zu overload-Fehlern führen. Auch hier ist die Verwendung der nicht zugelassenen Codeworte für Differenzen entgegengesetzten Vor-



**Bild 4.16:** Verbesserung der Aussteuerbarkeit bei Hybrid-DPCM mit Kennlinienbegrenzung durch Reduktion der Stufenzahl für den Referenzwert  $V$ . Der Referenzwert kann für zulässige Vorhersagewerte nur die Werte 4 ... 12 annehmen.

- a) Aussteuer Grenzen der Normal-DPCM
- b) Aussteuer Grenzen der Hybrid-DPCM (16-Stufen-Kennlinie)
- c) Aussteuer Grenzen der Hybrid-DPCM (32- bzw. 24-Stufen Kennlinie)

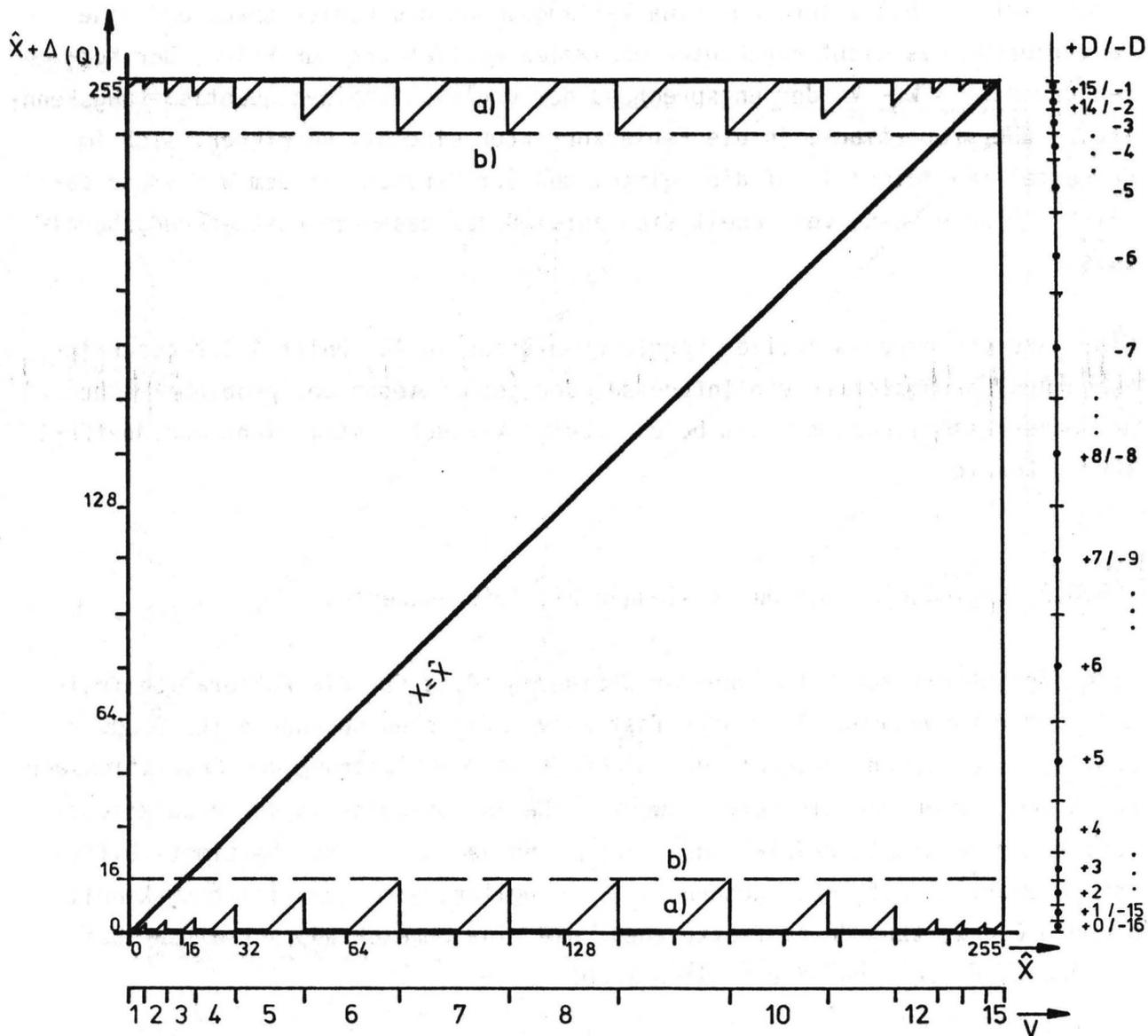
zeichens möglich und führt damit im Vergleich zu ungesteuerten DPCM-Systemen zur Verminderung der overload-Fehler in anderen Bereichen. Die reduzierte Zahl der Stufen und die entsprechende Vergrößerung der Stufenbreite des Referenzwertes  $V$  hat allerdings eine Verlangsamung des Fehlerabbaus und eine Vergrößerung des nicht abgebauten maximalen Restfehlers zur Folge. Der Korrekturwert  $F = W - V$ , der entsprechend der ungleichförmigen Quantisierungskennlinie überproportional in die Fehlerkorrektur eingeht, verringert sich im dargestellten Beispiel auf die Hälfte, und der Bereich, in dem  $W = V$  und damit  $F = 0$  sein kann, verdoppelt sich auf  $1/8$  des gesamten Aussteuerungsbereiches.

Hier wäre ein experimenteller Vergleich mit den in Abschnitt 4.3.2 beschriebenen Ausführungsformen von Interesse, der jedoch wegen der problematischen Hardware-Realisierung mit dem beschriebenen Versuchssystem nicht durchgeführt werden konnte.

#### 4.3.3.3 Ungleichförmige Quantisierung des Referenzwertes $V$

Eine Möglichkeit zur Erfüllung der Bedingung (4.4) für die Fehleraufbaufreiheit unter Verwendung aller oder fast aller möglichen Codeworte für  $D$  und  $V$  eröffnet sich durch geeignete ungleichförmige Quantisierung des Prädiktionswertes  $\hat{X}$  und Verwendung als Referenzwert  $V$ . Da in Abhängigkeit vom Prädiktionswert  $\hat{X}$  nur bestimmte Prädiktionsfehler  $\Delta$  und damit auch nur bestimmte Differenzcodeworte  $D$  auftreten können, ist es möglich, eine Quantisierungskennlinie und Codewortzuordnung festzulegen, die eine Bereichsüberschreitung bei der Addition von  $D$  und  $V$  unmöglich macht.

Eine konsequente Ausnutzung der sich hierbei ergebenden Möglichkeiten für die Quantisierersteuerung des DPCM-Coders führt zwangsläufig auf die Verwendung von Quantisierungskennlinien nach dem Vorschlag von Bostelmann. Ist von der Auslegung der Quellencodierung her der Bostelmann-Quantisierer vorteilhaft bzw. akzeptabel, so bietet sich hier die Möglichkeit für eine nahezu optimale Anordnung hinsichtlich der Fehlerfortpflanzung, ohne daß eine Beeinträchtigung der Verarbeitungsqualität der DPCM-Codierung eintreten kann. Dies ist wegen der relativ hohen Fehlerempfindlichkeit einer Bostelmann-DPCM-Codierung hier besonders wichtig.



**Bild 4.17:** Aussteuerbereich der Normal-DPCM und Hybrid-DPCM bei Verwendung einer Quantisierungskennlinie nach Bostelmann  
 Die Quantisierung des Referenzwertes erfolgt ungleichförmig in optimaler Weise (15 Stufen)  
 a) Grenzen des maximal erreichbaren Aussteuerbereiches  
 b) Aussteuergrenzen bei der üblichen, festen Eingangssignalbegrenzung

Bei einer Bostelmann-Quantisierungskennlinie mit  $2^{n+1}$  Stufen und  $2^n$  Codeworten der Länge  $n$  bit muß die optimale Quantisierung von  $\hat{X}$  in  $2^n - 1$  Stufen zur Gewinnung von  $V$  vorgenommen werden ( $0 < V < 2^n$ ). Die Stufengrenzen dieses Quantisierers müssen dabei den Repräsentativwerten des positiven Astes der Bostelmann-Kennlinie entsprechen, wobei der kleinste und der größte Wert ausgenommen wird.

Ein Bostelmann-DPCM-Coder erfordert zur Vermeidung der Fehlinterpretation von Codeworten aufgrund von Quantisierungsfehlern eine Begrenzung der Eingangs- oder auch der Differenzsignale. Die generelle Begrenzung des Eingangssignals, die den Gesamtaussteuerbereich oben und unten um jeweils den maximal möglichen Quantisierungsfehler einschränkt, ist hierfür nur die technisch einfachste Lösung. Günstiger, wenn auch technisch aufwendiger, ist eine Begrenzung nur in den Fällen, in denen durch Quantisierungsfehler wirklich eine fehlerhafte Interpretation von Codeworten erfolgen würde. Auf diese Weise kann eine praktisch vollständige Nutzung des gesamten Aussteuerbereichs durch einen Bostelmann-DPCM-Coder erreicht werden.

Die oben angegebene Quantisierungskennlinie für  $V$  erfordert eine Begrenzung nur in dem Maße, wie sie auch für die einwandfreie Funktion des DPCM-Coders allein notwendig ist und erlaubt somit eine Erweiterung eines DPCM-Systems nur durch Hinzufügen des  $V$ -Quantisierers und der Additions-/Subtraktionsstufe zum Hybrid-DPCM-System. Umgekehrt ist aber auch immer dann, wenn die Bedingung (4.4) erfüllt ist - z.B. infolge einer Begrenzung für  $(D+V)$  in einem Coder nach Bild 4.14 - die Fehldeutung von Codeworten aufgrund von Quantisierungsfehlern ausgeschlossen. Ein eingangsseitiger Begrenzer ist in diesem Fall nicht notwendig und der gesamte Aussteuerbereich kann genutzt werden.

Das Bild 4.17 zeigt im Vergleich zu 4.15 und 4.16 deutlich den erzielbaren Gewinn. Auch der Gewinn gegenüber einer generellen Eingangsbegrenzung ist zu erkennen.

Die Geschwindigkeit, mit der der Fehlerabbau erfolgt, ist abhängig vom übertragenen Bildsignal. Während große Anfangsfehler in einem oder wenigen Schritten meist stark reduziert werden, kann der Abbau kleinerer Restfehler bei konstantem Signal recht lange dauern. Durch die Übertragung größerer Differenzwerte wird der Abbauprozess jedoch beschleunigt.

#### 4.4. Verdeckung von Übertragungsfehlern durch Zeilenersetzung

Sofern durch Übertragungsfehler bzw. Fehlerfortpflanzung größere Teile einer Fernsehzeile gestört werden, eine Fortpflanzung in die folgenden Zeilen aber nicht stattfindet, wie dies z.B. bei eindimensional arbeitenden DPCM-Codierungen der Fall ist, kann es sinnvoll sein, die gestörte Zeile durch die Information benachbarter Zeilen zu ersetzen. Es muß dazu allerdings das Auftreten von Fehlern erkannt werden, was in begrenztem Umfang durch Ausnutzen der Redundanz des rekonstruierten Bildes /1.26 /oder aber durch die zusätzliche Übertragung redundanter Information möglich ist. Letzteres schließt auch den Fall der algebraischen Fehlerkorrektur mit ein, bei der u.U. das Auftreten nicht korrigierter Fehler im Kanaldecoder erkannt werden kann. Als Ersatz für die gestörte Bildzeile, die beim Empfänger ausgelassen wird, kann entweder die vorausgegangene, ungestörte Zeile eingesetzt werden, oder es wird der Mittelwert aus vorausgegangener und nachfolgender Zeile verwendet. Die Wirksamkeit des Verfahrens ist verständlicherweise vom Inhalt des Bildes abhängig, da bei hohem Detailgehalt in vertikaler Richtung, also insbesondere an näherungsweise horizontal verlaufenden Strukturen, die eingesetzte Zeile von der Originalzeile erheblich abweichen und so einen sichtbaren Störeffekt erzeugen kann. Auf die subjektive Bewertung dieser Fehlerverdeckungsverfahren wird in Abschnitt 7. eingegangen.

#### 4.5. Kombination von Zeilenersetzung und Hybrid-DPCM bei zweidimensionaler Prädiktion

Die Anwendung der Zeilenersetzung zur Fehlerverdeckung bei DPCM-Codierverfahren mit zweidimensionaler Prädiktion ist in allgemeinen nicht sinnvoll, da die ersetzte Zeile auch in die Prädiktion für die folgende Zeile eingeht und Fehler, die durch Amplitudenabweichungen gegenüber der im Coder verwendeten Information entstehen, sich in der bekannten Weise fortpflanzen. Durch die zusätzliche Anwendung der Hybrid-DPCM lassen sich auch diese Störeffekte beträchtlich reduzieren, so daß sich die Frage stellt, ob eine solche Anordnung in bestimmten Fällen Verbesserungen bringt.

Hier ist insbesondere der Fall interessant, daß Maßnahmen zur algebraischen Fehlerkorrektur angewendet wurden. Der dem Quellendecoder vorgeschaltete Kanaldecoder kann in den meisten Fällen erkennen, wenn durch die aufgetretenen Übertragungsfehler seine Korrekturfähigkeit überschritten wird. Das in /1.31/ beschriebene Korrektursystem für die Bildübertragung kann beispielsweise Fehlerbursts nur bis zu einer Länge von 26 bit korrigieren, längere Bursts werden jedoch praktisch immer erkannt und die jeweilige Zeile wird als unkorrigierbar angezeigt. Bursts der Länge  $> 26$  sind im rekonstruierten Bild auch bei optimalem Fehlerabbau durch das Hybrid-Verfahren stets deutlich sichtbar, so daß eine Verbesserung durch die Zeilenwiederholung denkbar ist.

Die experimentellen Vergleiche, die mit Hilfe des Versuchssystems angestellt wurden, bestätigen diese Annahme, wenn auch erwartungsgemäß eine gewisse Abhängigkeit vom Bildmaterial besteht (s. Kapitel 7.6). Inwieweit der zusätzliche Hardware-Aufwand lohnend ist, muß im Einzelfall abgewogen werden. Eine Anwendung dürfte jedoch dann lohnen, wenn in speziellen Fällen mit sehr langen Fehlerbursts zu rechnen ist (einige 100 bis 1000 bits).

#### 4.6. Fehlersichtbarkeit in den Farbkomponenten

Grundsätzlich lassen sich die Ausführungen der Abschnitte 4.1. ... 4.5. gleichermaßen auf Chrominanzsignale wie auf Luminanzsignale beziehen, sofern die gleichen Codierverfahren zur Anwendung kommen. Es kann aber davon ausgegangen werden, daß prinzipiell ähnliche DPCM-Codierverfahren, wenn auch mit abweichenden Prädiktoren, auf die U- und V-Komponente angewendet werden. Unterschiede in der Fehlersichtbarkeit zwischen Luminanz- und Chrominanzinformation können durch folgende drei Faktoren entstehen:

1. Farbabweichungen können eine andere subjektive Störwirkung besitzen als Leuchtdichteabweichungen.
2. Der Anteil der Chrominanzinformation an der insgesamt übertragenen Datenrate und damit die Anzahl der Fehler, die auf den Chrominanzanteil z.B. eines Vollbildes entfallen, ist geringer als für den Luminanzanteil.
3. Die horizontale und i.a. auch die vertikale Auflösung der Farbinformation ist geringer als die der Luminanzinformation, so daß ein gestörter Bildpunkt eine größere Fläche überdeckt.

Es spricht einiges dafür, daß die Faktoren 2. und 3. einander weitgehend kompensieren (s. auch Abschnitt 7.8.), so daß die visuelle Bewertung der Farbfehler im Vergleich zu Luminanzfehlern den größten Einfluß auf die spezifische Störwirkung haben dürfte.

Es erschien deshalb sinnvoll, sich bezüglich der Störwirkung der Fehler in den Chrominanzkomponenten auf einige grundlegende Messungen zu beschränken und diese zu den Luminanzfehlern in Relation zu setzen. Dies ist auch deswegen vertretbar, weil grundsätzlich verschiedene Verfahren zur Codierung der Chrominanzanteile zur Zeit für die Anwendung auf TV-Signale nicht in Betracht gezogen werden.

## 5. Versuchssystem zur gestörten Übertragung

Für die experimentelle Untersuchung der DPCM-Codierung und die subjektive Bewertung der Störwirkung von Übertragungsfehlern wurde eine Versuchsanordnung benutzt, die eine Hardware-Realisierung der wichtigsten Komponenten einer Übertragungskette für digitalisierte Farbfernsehsignale darstellt. Die gesamte Verarbeitung im Versuchssystem erfolgt im Real-Time-Betrieb.

Folgende Komponenten sind Teile des Versuchssystems und werden im folgenden kurz beschrieben:

1. Signalquellen und Aufbereitung der Quellsignale
2. Quellcoder und -decoder für Luminanz- und Chrominanzsignale
3. Nachbildung gestörter digitaler Übertragungskanäle
4. Bildwiedergabe und Betrachtungsplatz.

Ein Gesamtblockschaltbild des Versuchssystems ist in Bild 5.1 dargestellt.

### 5.1 Signalquellen und Aufbereitung

Wichtigste Signalquelle ist ein Farbdia positivabtaster, der ein reproduzierbares Signal hoher Qualität für die Meßreihen liefert. Über ein Empfangsgerät können auch Fernseh- und Rundfunksignale eingespeist werden. Nach Erzeugung der Komponenten Y, U und V aus den Farbsignalen erfolgt die Digitalisierung mit 8 bit je Bildpunkt für jede Einzelkomponente. Die Abtastfrequenzen, die von der Taktzentrale zur Verfügung gestellt werden, betragen entweder 10 MHz (Luminanz) und 2.5 MHz (Chrominanz) oder  $8.8 \text{ MHz} = 2 f_{sc}$  und  $2.2 \text{ MHz} = 0.5 f_{sc}$ .

#### 5.2.1 Quellcodierung und -decodierung der Luminanz

Bei der Luminanzcodierung stehen verschiedene Möglichkeiten zur DPCM-Codierung zur Verfügung, da Coder und Decoder hinsichtlich Prädiktion, Quantisierung und Quantisierersteuerung variabel sind. Folgende Prädiktoren können gewählt werden: (s. Abschn. 2.2.1)

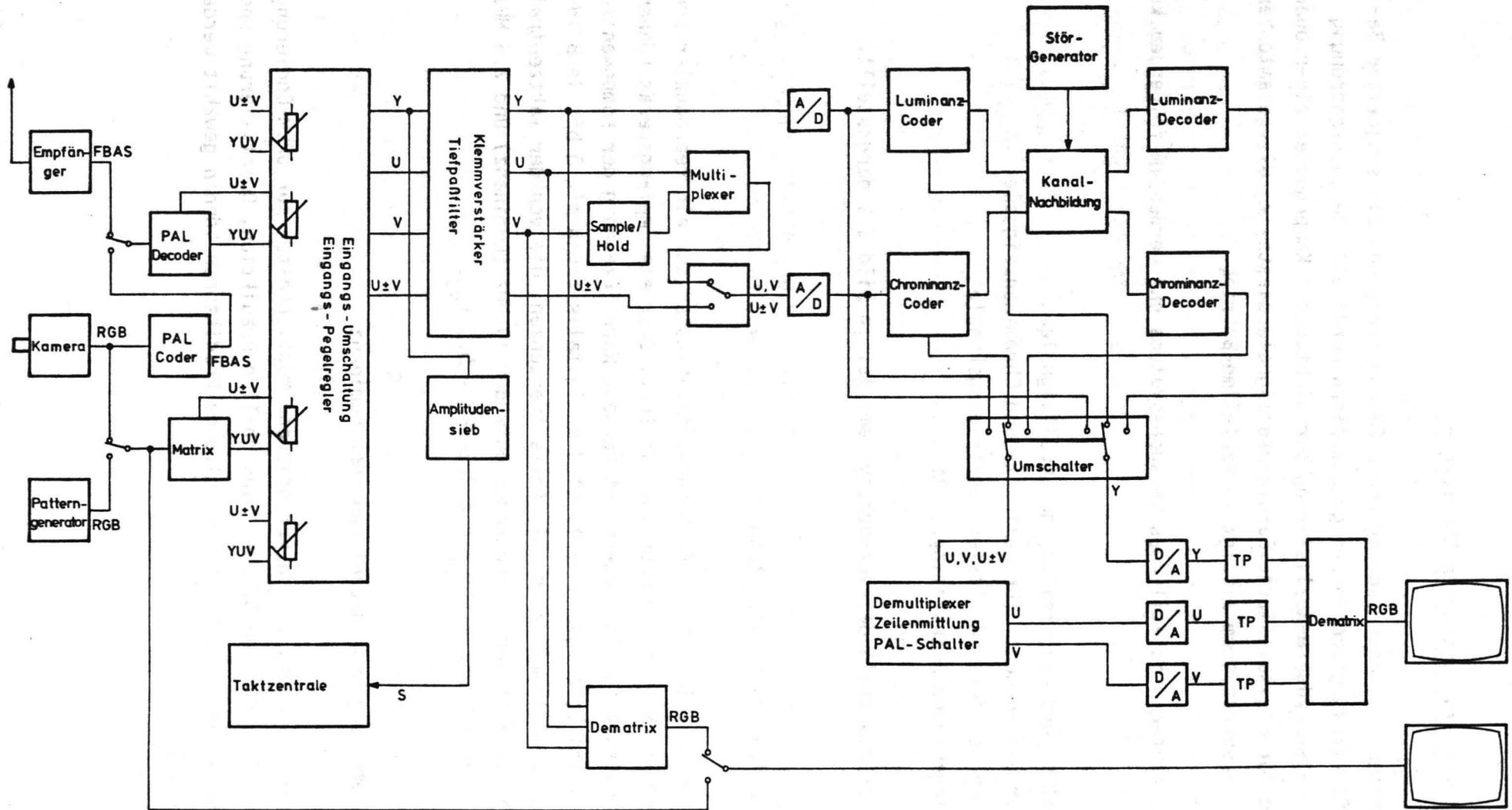


Bild 5.1 Blockschaltbild des Versuchssystems zur gestörten Übertragung DPCM-codierter Farbfernsehsignale

- (1)  $\hat{X} = A$
- (2)  $\hat{X} = 0.5 (A+D)$
- (3)  $\hat{X} = 0.5 (A+C)$
- (4)  $\hat{X} = A + 0.5(C-B)$
- (5)  $\hat{X} = 0.75(A+C) - 0.5 B$
- (6)  $\hat{X} = 0.75(A+C) - 0.516 B$
- (7)  $\hat{X} = 0.75(A+C) - 0.531 B$
- (8)  $\hat{X} = 0.5 A + 0.25(B+C)$

Die Quantisierung ist praktisch beliebig wählbar; zwischen mindestens 8 vorprogrammierten Kennlinien kann umgeschaltet werden. Die Untersuchungen erfolgten weitestgehend mit 4 bit-Kennlinien, die beiden wichtigsten sind in Tabelle 5.1 dargestellt. Eine Quantisierersteuerung nach /1.11/ und nach /1.15/ ist möglich (jeweils 3 Kennlinien). Tabelle 5.2 gibt Kennlinien und Umschaltkriterien an, die für die gesteuerte DPCM nach /1.11/ verwendet wurden.

Die Hybrid-DPCM (Version I) ist wahlweise anstelle der Normal-DPCM einschaltbar.

### 5.2.2 Quellcodierung und -decodierung der Chrominanz

Bei der Chrominanzcodierung ist nur eindimensionale Prädiktion möglich ( $\hat{X} = A$ ). Verarbeitet werden entweder parallel die Komponenten U und V oder zeilensequentiell U und V bzw. U + V und U - V. Wahlweise kann eine 4 bit-Normalkennlinie (5.1a) oder eine 4 bit-Bostelmann-Kennlinie (5.1b) verwendet werden. Ebenfalls wahlweise kann das Hybrid-DPCM-Verfahren eingesetzt werden.

### 5.3 Nachbildung des Übertragungskanals

Die Nachbildung des Übertragungskanals erfolgt rein digital durch Zusammenwirken mehrerer Pseudozufallsgeneratoren mit einstellbaren Ereigniswahrscheinlichkeiten die die Fehler generieren, mit Schaltungen, die spezielle Kanaleigenschaften wie die Fehlermultiplikation aufgrund des Modulationsverfahrens simulieren.

Statistisch unabhängige Einzelfehlerereignisse und Fehlerbursts können gleichzeitig mit voneinander unabhängigen Raten zwischen  $10^{-3}$  und  $10^{-10}$  erzeugt werden. Die Länge von Bursts und die Fehlerdichte innerhalb eines Burst ist in weiten Grenzen einstellbar.

Stufe	Rep.-W.	Stufe	Rep.-W.	Stufe	Rep.-W.
/ 53 ... 255 /	60	/ 254 ... 255 /	255	/ 96 ... 127 /	108
/ 38 ... 52 /	43	/ 251 ... 253 /	252	/ 64 ... 95 /	76
/ 26 ... 37 /	30	/ 245 ... 250 /	248	/ 40 ... 63 /	48
/ 17 ... 25 /	20	/ 233 ... 244 /	240	/ 24 ... 39 /	30
/ 10 ... 16 /	12	/ 217 ... 232 /	226	/ 12 ... 23 /	16
/ 6 ... 9 /	7	/ 193 ... 216 /	208	/ 6 ... 11 /	8
/ 3 ... 5 /	3	/ 161 ... 192 /	180	/ 3 ... 5 /	4
/ 0 ... 2 /	1	/ 128 ... 160 /	148	/ 0 ... 2 /	1
/ -2 ... -1 /	-1			/ -2 ... -1 /	-1
:	:			:	:
:	:			:	:
:	:			:	:

a) 16-Stufen-Kennlinie (4 bit) für 2-dimens. Prädiktion

b) 32-Stufen-Kennlinie (4 bit n. Bostelmann) für eindimensionale Prädiktion

Tab. 5.1: Verwendete Quantisierungskennlinien für die DPCM-Codierung ohne Kennlinienumschaltung

Stufe	Rep.-W.	Stufe	Rep.-W.	Stufe	Rep.-W.
/ 43 ... 255 /	48	/ 56 ... 255 /	62	/ 70 ... 255 /	76
/ 32 ... 42 /	36	/ 43 ... 55 /	48	/ 56 ... 69 /	62
/ 23 ... 31 /	26	/ 32 ... 42 /	36	/ 43 ... 55 /	48
/ 15 ... 22 /	18	/ 23 ... 31 /	26	/ 32 ... 42 /	36
/ 9 ... 14 /	11	/ 15 ... 22 /	18	/ 23 ... 31 /	26
/ 5 ... 8 /	6	/ 9 ... 14 /	11	/ 15 ... 22 /	18
/ 3 ... 4 /	3	/ 5 ... 8 /	6	/ 8 ... 14 /	11
/ 0 ... 1 /	1	/ 0 ... 4 /	2	/ 0 ... 7 /	4
/ -1 ... -2 /	-1	/ -1 ... -4 /	-2	/ -1 ... -7 /	-4
:	:	:	:	:	:
:	:	:	:	:	:
:	:	:	:	:	:

(I):  $0 \leq \Delta_{\text{Max}} \leq 15$       (II):  $16 \leq \Delta_{\text{Max}} \leq 31$       (III):  $32 \leq \Delta_{\text{Max}} \leq 255$

$\Delta_{\text{Max}} = \text{Max} \{ \Delta_A, \Delta_B, \Delta_C, \Delta_D \}$ ,  $\Delta_Y =$  Prädiktionsfehler für Bildpunkt Y

Tab. 5.2: 3 Quantisierungskennlinien für Kennlinienumschaltung in Anlehnung an einen Vorschlag von Erdmann

Als Kanalmodelle sind außer dem symmetrischen Binärkanal die differentielle 4-Phasenmodulation sowie die 16-Stufen-Amplitudenmodulation realisiert.

#### 5.4 Bildwiedergabe und Betrachtungsplatz

Für die Bildwiedergabe werden die in den DPCM-Decodern rekonstruierten Digital-signale aufbereitet, in Analogsignale umgesetzt und nach der Umformung in R-, G- und B-Signale auf einem Farbmonitor wiedergegeben.

Der Monitor ist hinsichtlich Farbwiedergabe und Schirmleuchtdichte exakt entsprechend der CCIR-Empfehlung 500 /1.29/ justiert und befindet sich in einem abgegrenzten Raum, in dem auch die Umgebungsbedingungen entsprechend CCIR genau eingehalten werden können.

## 6. Durchführung und Auswertung der subjektiven Meßreihen

### 6.1 CCIR-Empfehlungen

In der CCIR-Empfehlung 500 zur subjektiven Beurteilung der Qualität von Fernsehbildern sind über die reinen Betrachtungsbedingungen hinaus weitere Empfehlungen zur Durchführung von Messungen enthalten, die insgesamt für möglichst gut reproduzierbare und vergleichbare Meßergebnisse sorgen sollen. Soweit möglich, wurde versucht, diese Bedingungen bei den durchgeführten Meßreihen einzuhalten bzw. anzunähern.

### 6.2 Durchführung der Messungen

#### 6.2.1 Auswahl der Versuchspersonen

In der CCIR-Empfehlung wird der Einsatz ungeübter Beobachter ("non-expert observers") gegenüber geübten ("expert observers") bevorzugt. Die Zahl der Versuchspersonen (VP) sollte mindestens 10, besser aber etwa 20 betragen. Für schnelle Test- und Übersichtsmessungen sind auch kleinere Expertengruppen zulässig.

Die hier durchgeführten Meßreihen wurden zunächst mit 27 ungeübten VP und parallel z.T. mit 3 Experten durchgeführt. Dahier rechte gute Übereinstimmungen erzielt wurden, wurde dann die Mehrzahl der Meßreihen mit 6 ungeübten VP durchgeführt, um den Zeitaufwand für die Messungen möglichst niedrig zu halten.

#### 6.2.2 Beurteilungsskala

Da in den Meßreihen die Qualitätseinbußen ("impairments") der empfangenen Bilder durch Übertragungsfehler erfaßt werden sollten, war es sinnvoll, von den drei möglichen Beurteilungsskalen die sog. "impairment scale" zu verwenden. Die Skala hat 5 Stufen, die entsprechend der deutschen Notenskala in umgekehrter Reihenfolge benotet wurden:

- Note 1 : Bildfehler sind nicht erkennbar
- Note 2 : Bildfehler sind erkennbar, aber nicht störend
- Note 3 : Bildfehler sind etwas störend
- Note 4 : Bildfehler sind störend
- Note 5 : Bildfehler sind stark störend.

Nur die Zahlenwerte 1 .. 5 werden von den VP in ein Protokoll eingetragen; Zwischenwerte sind nicht zugelassen.

### 6.2.3 Testbilder

Für die zu untersuchende Fragestellung sind stillstehende Bilder am geeignetsten, da sie eine besonders kritische Beurteilung ermöglichen. Gegenüber ca. 5 geforderten Bildvorlagen wurde bei den Messungen die Anzahl auf 3 beschränkt, wiederum um Meßzeit und Gesamtaufwand zu reduzieren. Folgende 3 Farbdiaspositive wurden verwendet (s. Bild 6.1):

1. Strohhutmädchen (Porträt, ruhiger blauer Hintergrund)
2. Junge mit Spielzeug (viele Details und Streifenmuster)
3. Küche (mittlerer Detailgehalt, keine Besonderheiten)

### 6.2.4 Betrachtungsbedingungen

Nachstehend sind die Bedingungen der CCIR-Empfehlung für 50 Hz Bildwechselrate aufgeführt:

- |   |                                |
|---|--------------------------------|
| a) Betrachtungsabstand                        | 6 x Bildhöhe                   |
| b) Spitzenleuchtdichte $L_{Max}$              | $70 \pm 10 \text{ cd/m}^2$     |
| c) Fremdlicht, vom Schirm reflektiert         | $0.02 L_{Max}$                 |
| d) Kontrastumfang bei völliger Dunkelheit     | 100 : 1                        |
| e) Hintergrundleuchtdichte                    | $0.1 L_{Max}$                  |
| f) Übrige Raumbelichtung                      | schwach                        |
| g) Farbton des Hintergrunds                   | weiß (grau)                    |
| h) Raumwinkel des Hintergrunds nach e) und g) | 9 x Raumwinkel des Bildschirms |



Diese Bedingungen wurden eingehalten. Soweit davon abgewichen wurde, ist dies ausdrücklich angegeben. Durch die Festlegung des Betrachtungsabstandes ist die Zahl der Versuchspersonen, die den Bildschirm unter genügend geringem Betrachtungswinkel gleichzeitig sehen können, auf maximal 3 begrenzt. Dies läßt sich nur bei hinreichendem Raumangebot durch Einsatz mehrerer Monitore verbessern.

#### 6.2.5. Versuchsablauf

Nach einer kurzen Einweisung, die sich auf die Erläuterung der Art der auftretenden Fehler und der Beurteilungsskala beschränkt, werden den Beobachtern für jeweils 30 sec. die nach dem eingestellten Verfahren verarbeiteten und gestörten Bilder gezeigt. Eine Meßreihe umfaßt bei vier verschiedenen Codierverfahren, 12 Fehlerraten und drei verschiedenen Bildvorlagen 144 zu bewertende Bilder und wird aufgeteilt in zwei Sitzungen à 45 Minuten. Die Fehlerraten sind so gewählt, daß im Mittel alle Beurteilungen von 1 - 5 auftreten. Die Reihenfolge der Fehlerraten ist pseudozufällig, die Reihenfolge der Bilder ebenso, jedoch erscheint dasselbe Bild nicht zweimal hintereinander. Nach jeweils drei Bildern wird das Codierverfahren gewechselt. Zwischen den einzelnen Bildern ist eine Pause von ca. 10 sec., in der der Fernsehschirm grau, entsprechend der Leuchtdichte des Hintergrundes ist.

### 6.3. Auswertung der Ergebnisse

#### 6.3.1. Darstellung der Meßergebnisse; Notenmittelwerte

Die Versuchspersonen geben als Meßwerte ganzzahlige Qualitätsnoten  $U_i$  ab, die entsprechend der in Deutschland gebräuchlichen Skala Werte zwischen 1 (Fehler nicht erkennbar) und 5 (Fehler stark störend) annehmen können. Für die weitere Auswertung werden diese umgerechnet in Noten  $N_i$  entsprechend der Formel

$$N = 5 - U \quad (0 \leq N \leq 4)$$

Die auch verwendete Umrechnung

$$N' = (5 - U)/4 \quad (0 \leq N' \leq 1)$$

wird aus Gründen der Übersichtlichkeit der Ergebnisse hier nicht verwendet. Für jeden Meßpunkt einer Meßreihe wird zunächst über alle Versuchspersonen ein Notenmittelwert gebildet. Im allgemeinen wird auch noch über die

unterschiedlichen Testbilder gemittelt, die unter gleichen Bedingungen dargeboten wurden. In einigen Fällen, in denen besonders signifikante Unterschiede aufgrund des Bildmaterials beobachtet wurden, werden diese jedoch noch zusätzlich herausgestellt.

Die Notenmittelwerte  $\bar{N}_i$  werden als Einzelpunkte über der Fehlerrate (logarithmischer Maßstab) aufgetragen und zur besseren Sichtbarkeit durch Geradenstücke verbunden. Eine typische derartige Meßkurve ist in Bild 6.2 dargestellt. Dieses Bild enthält außerdem die Beurteilungskurve einer einzelnen typischen Versuchsperson für ein Bild.

### 6.3.2. Näherungsfunktion und charakteristische Werte

Nach /1.27/ läßt sich die subjektiv gemessene Abhängigkeit der Notenmittelwerte  $\bar{N}$  von der Störgröße, hier dem Logarithmus  $X$  der Fehlerrate, am einfachsten annähern durch eine Funktion

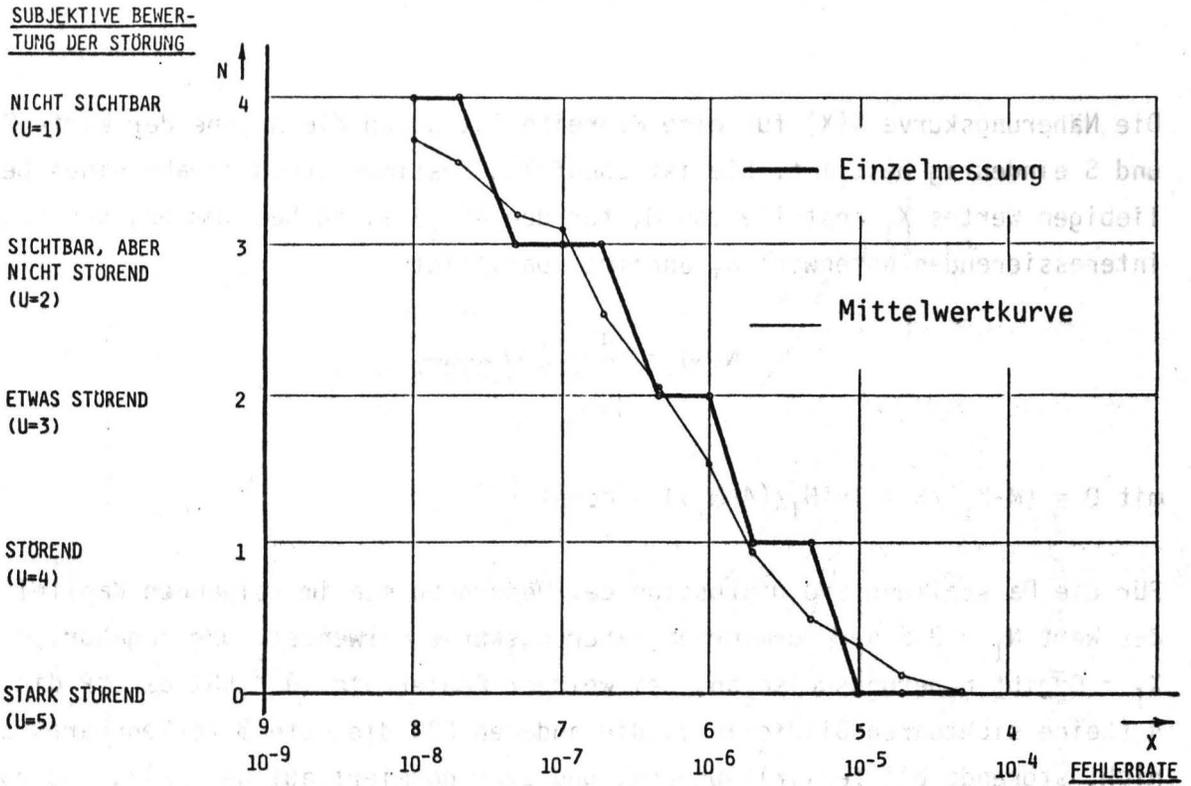
$$\bar{N}(X) = \frac{H}{1 + e^{-\frac{X-M}{S}}}$$

Die Funktion hat den in Bild 6.3 dargestellten typischen Verlauf und kann Werte zwischen 0 und  $H$  annehmen. Für  $X = M$  wird der Wert  $H/2$  erreicht, d.h.  $M$  bestimmt die Fehlerrate, für die die mittlere Qualitätsnote abgegeben wird. Der Wert  $H$  ist der asymptotisch erreichte maximale Notenmittelwert einer Meßreihe, der im allgemeinen kleiner ist als die maximal zu vergebende Note 4. Um diese zusätzliche Variable zu eliminieren, werden die Einzelmessungen mit  $4/H$  normiert. Damit wird

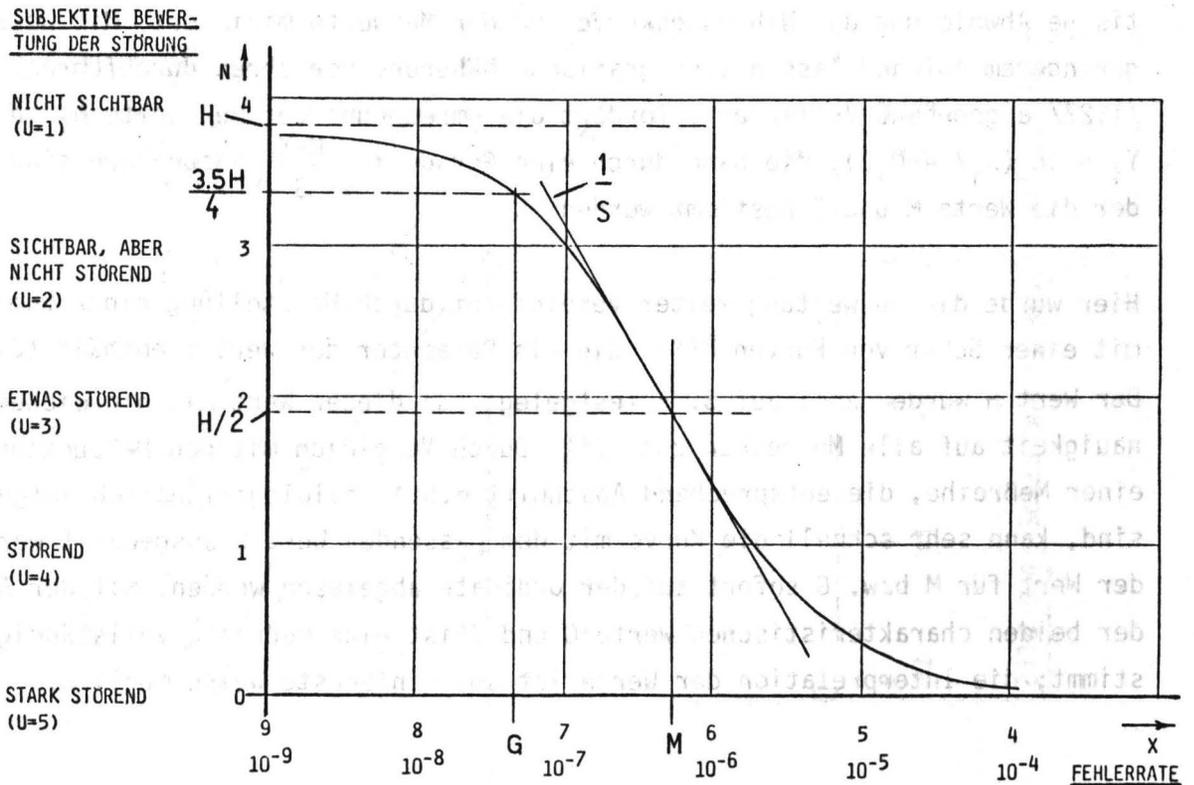
$$N(X) = \bar{N}_{\text{Norm}}(X) = \frac{4}{H} \bar{N}(X) = \frac{4}{1 + e^{-\frac{X-M}{S}}}$$

womit die Näherungsfunktion alle Werte zwischen 0 und 4 annehmen kann.

Der Parameter  $S$  bestimmt die Kurvenneigung. Im Punkt  $X = M$ , der gleichzeitig Wendepunkt der Kurve ist, beträgt die Steigung  $1/S$ . Damit ist  $S$  ein direktes Maß für die Änderung der Fehlerrate (logarithmisch), die um die mittlere Note 2 herum eine Änderung des Qualitätsurteils um eine Note bewirkt.



**Bild 6.2:** Typische Messkurven für die Notenmittelwerte  $\bar{N}_i$  im Vergleich zu einer Einzelmessung



**Bild 6.3:** Näherungskurve  $\bar{N}(X)$  und charakteristische Werte

Die Näherungskurve  $N(X)$  für eine Meßreihe ist durch die Angabe der Werte  $M$  und  $S$  eindeutig bestimmt. Sie ist ebenfalls bestimmt durch Angabe eines beliebigen Wertes  $X_I$  anstelle von  $M$ , für den  $N(X_I)$  einen bestimmten, besonders interessierenden Notenwert  $N_I$  annimmt. Damit ist

$$N(X) = \frac{4}{1 + e^{-(X-X_I)/S - D}}$$

mit  $D = (M-X_I)/S = \ln(N_I/(4-N_I)) = \text{const.}$

Für die Darstellung und Diskussion der Meßergebnisse im folgenden Kapitel wird der Wert  $N_I = 3.5$  der normierten Näherungskurve verwendet. Der zugehörige Wert  $X_I = G$  gibt näherungsweise an, bei welcher Fehlerrate  $10^{-6}$  50% der VP die Note 4 (keine sichtbaren Bildfehler), die anderen 50% die Note 3 (erkennbare, aber nicht störende Bildfehler) abgeben, und zwar normiert auf den Fall, daß von allen VP im Mittel als Grenzwert die Note 4.0 erreicht wird.

Die Bestimmung der Näherungskurve aus den Meßwerten kann auf unterschiedliche Weisen erfolgen. Die genaueste Methode ist die Auswertung mit Hilfe einer elektronischen Rechenanlage durch ein Programm, das iterativ die mittlere quadratische Abweichung der Näherungskurve und der Meßwerte minimiert. Mit wesentlich geringerem Aufwand lassen sich grafische Näherungsverfahren durchführen. Das in /1.27/ angegebene Verfahren erfordert die Umrechnung der Meßpunkte  $\bar{N}_i$  in Werte  $Y_i = \ln(N_i/(4-N_i))$ , die dann durch eine Gerade  $Y = \frac{M-X}{S}$  anzunähern sind, aus der die Werte  $M$  und  $S$  bestimmt werden.

Hier wurde die Auswertung weiter vereinfacht durch Herstellung einer Schablone mit einer Schar von Kurven  $\bar{N}(X)$ , die als Parameter den Wert  $S$  enthält (Bild 6.4). Der Wert  $H$  wurde dabei auf 3.75 festgelegt, da dieser Wert mit hinreichender Genauigkeit auf alle Meßreihen zutrifft. Durch Vergleich mit den Meßpunkten jeweils einer Meßreihe, die entsprechend Abschnitt 6.5.1. halblogarithmisch aufgetragen sind, kann sehr schnell die Kurve mit dem passenden Wert  $S$  ausgewählt werden und der Wert für  $M$  bzw.  $G$  sofort auf der Ordinate abgelesen werden. Mit der Angabe der beiden charakteristischen Werte  $G$  und  $S$  ist eine Meßreihe vollständig bestimmt; die Interpretation der Werte ist auf einfachste Weise möglich.

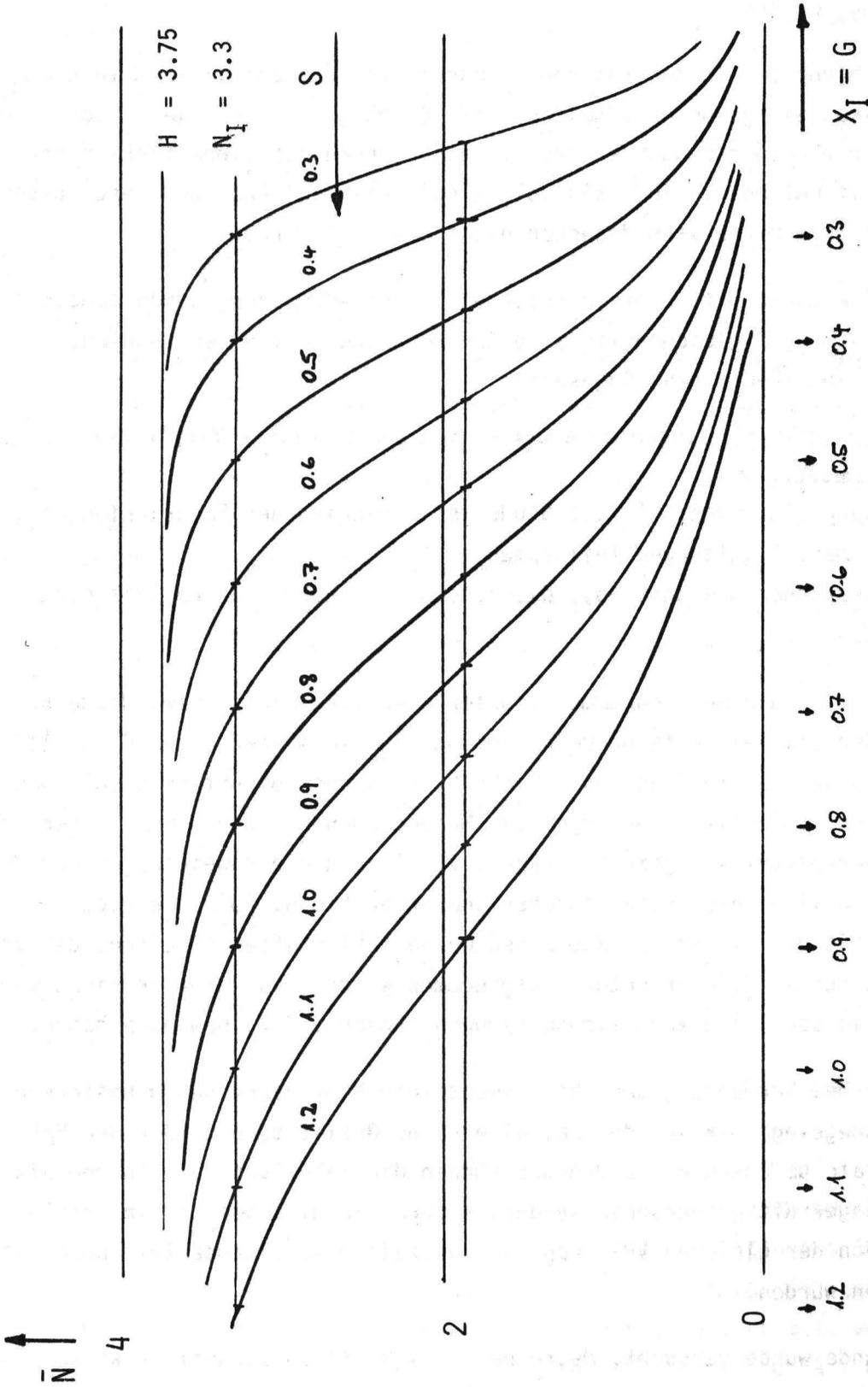


Bild 6.4 Schablone (transparent) zur Bestimmung von G und S aus den Meßkurven

## 7. Ergebnisse der subjektiven Untersuchungen zur Störwirkung von Übertragungsfehlern

Bei der Betrachtung der in den folgenden Abschnitten dargestellten Untersuchungsergebnisse müssen einige Besonderheiten berücksichtigt werden, die gerade in der Subjektivität der Meßwerte und der deshalb eingeschränkten Eindeutigkeit und Reproduzierbarkeit begründet sind. Ein vollständig einheitliches und geschlossenes Gesamtbild der Ergebnisse kann deswegen nicht erwartet werden.

Notwendigerweise mußte mit unterschiedlichen Versuchspersonengruppen gemessen werden, wobei nur 3 VP gleichzeitig an einer Meßreihe teilnehmen konnten. Es wurden drei Arten von VP-Gruppen eingesetzt:

- a) 3 "Expert observers" (Ingenieure der Fernstechnik) für Vergleichs- und Übersichtsmessungen
- b) 27 "Non-expert observers" (meist Studenten verschiedener Fachrichtungen), die nur an max. 4 Sitzungen teilnahmen
- c) 6 Versuchspersonen wie unter b), die jedoch z.T. über längere Zeit eingesetzt wurden.

Die immer wieder in die Meßprogramme eingestreuten Vergleichs- bzw. Wiederholungsmessungen ließen zum Teil gute Übereinstimmung, zum Teil aber auch beträchtliche Abweichungen in der Beurteilung des gleichen Verfahrens von unterschiedlichen Gruppen erkennen. Objektive Änderungen der Meßbedingungen können nur in geringem Maße hierfür verantwortlich gemacht werden, zumal auch die Abweichungen der Meßkurven mehr zufälligen als systematischen Charakter haben. Auch die reduzierte Leuchtdichte, mit der die ersten Meßreihen wegen fehlerhaften Arbeitens der verwendeten, "geeichten" Meßeinrichtung aufgenommen wurden, ist hierfür nicht verantwortlich, wie spezielle Vergleichsmessungen (Abschn. 7.7) bewiesen haben.

Es muß deshalb bei Verwendung der Absolutwerte der Meßergebnisse ein Unsicherheitsbereich zugrundegelegt werden, der ca. eine halbe Qualitätsnote oder den Faktor 2 in der Fehlerrate umfassen kann. Dagegen können die relativen Bewertungen als sehr genau und aussagekräftig angesehen werden, sofern sie gleichzeitig innerhalb einer Sitzung oder von der gleichen VP-Gruppe in kurzzeitig aufeinanderfolgenden Sitzungen aufgenommen wurden.

Aus diesem Grunde wurde versucht, Meßreihen in inhaltlich sinnvoller Weise zusammenzustellen und zusammengehörige Ergebnisse in den folgenden Abschnitten und Diagrammen gemeinsam darzustellen. Es bietet sich auch an, Ergebnisse in ihrer Relation zueinander zu interpretieren und z.B. eine Verbesserung, die eine Verfahrens-

variante gegenüber einer anderen in der Fehlersichtbarkeit bewirkt, durch eine äquivalente Fehlerratenreduktion auszudrücken, die zur gleichen Verbesserung führen würde.

Aufgrund der oben erwähnten Ungenauigkeiten muß jedoch mit großer Vorsicht vorgegangen werden, will man Ergebnisse, die nicht in zusammengehörigen Meßreihen gewonnen wurden, in gleicher Weise zueinander in Beziehung setzen.

### 7.1 Fehlersichtbarkeit im Luminanzbild bei PCM und DPCM

Die unterschiedliche Art und Ausdehnung der Fehlereffekte und Fortpflanzungseigenschaften bei PCM und den verschiedenen DPCM-Verfahren lassen sehr unterschiedliche Bewertungen der Störwirkung von Übertragungsfehlern erwarten. Bild 7.1 läßt etwa den Gesamtbereich erkennen, in dem sich die Ergebnisse der durchgeführten Messungen bewegen. Während für die PCM-Darstellung (Kurve 5) der Schwellwert der Sichtbarkeit etwa bei einer Fehlerrate von  $10^{-5}$  erreicht wird, ist dies bei einer eindimensionalen DPCM mit Bostelmann-Quantisierer (Kurve 1) schon bei  $2...5 \times 10^{-9}$  der Fall, und im ersten Fall wird die schlechtestmögliche Qualitätseinstufung erst bei  $10^{-2}$ , im zweiten bei  $10^{-6}$  erreicht. Die gleiche Qualität kann also bei unterschiedlichen Codierverfahren bei Fehlerraten erreicht werden, die sich um einen Faktor bis zu  $10^4$ , in extremen Fällen noch stärker unterscheiden.

In dem Diagramm sind weiterhin die Ergebnisse für DPCM-Verfahren mit den Prädiktoren (Bezeichnung entsprechend Abschnitt 5.2.1)

$$(3) \hat{X} = 0.5 (A+C)$$

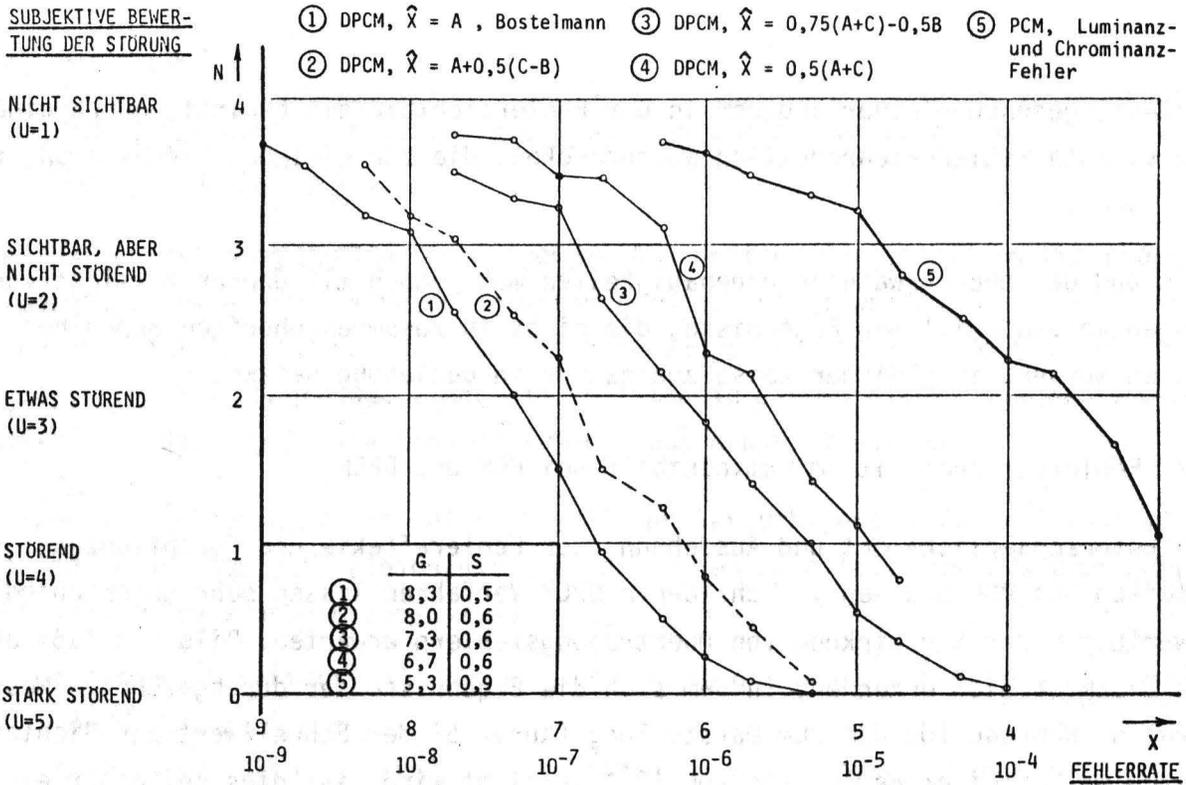
$$(4) \hat{X} = A + 0.5 (C-B)$$

$$(5) \hat{X} = 0.75 (A+C) - 0.5 B$$

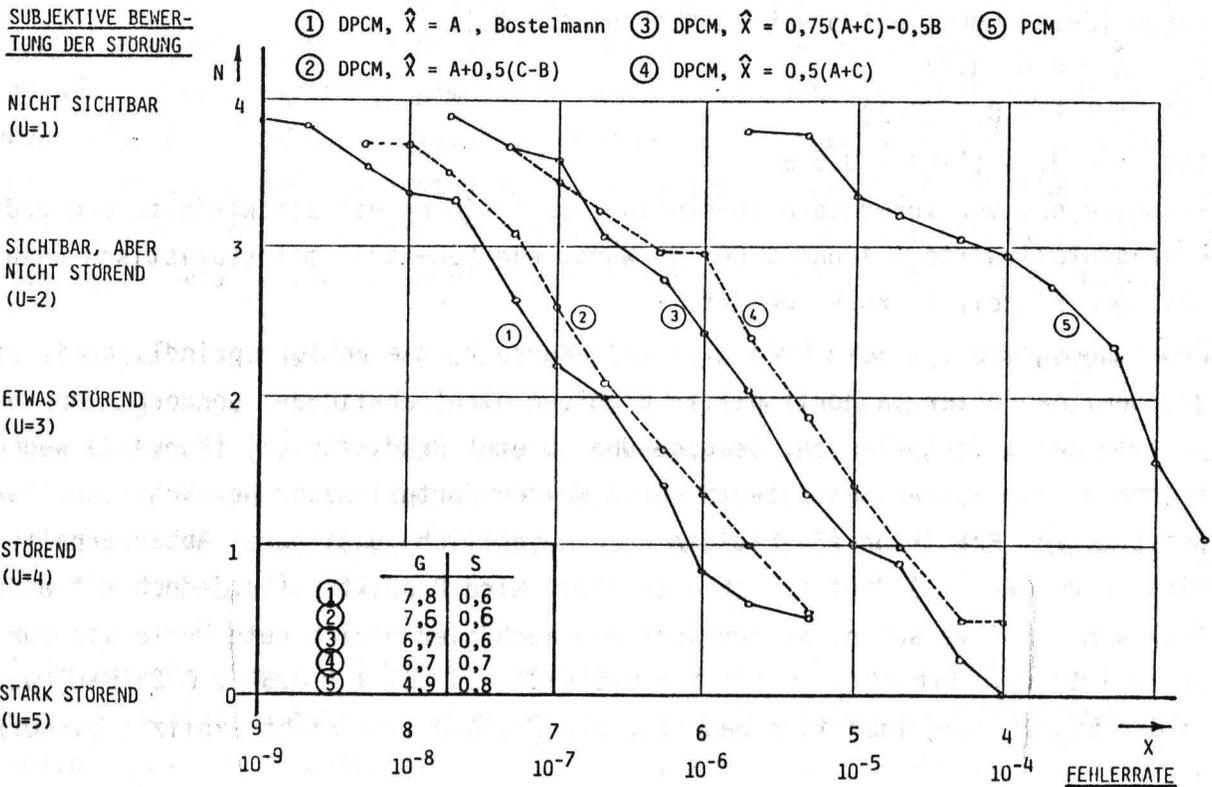
eingetragen. Der verwendete 16-stufige Quantisierer hat als kleinste und größte Repräsentativwerte  $\pm 1$  und  $\pm 60$ . Es wurde ein BSC-Kanal mit statistisch unabhängigen Einzelfehlern verwendet.

Erwartungsgemäß ist beim Prädiktor (4) (Kurve 2) die Fehlerempfindlichkeit am größten, da Fehler in horizontaler Richtung nicht abklingen, sondern sich über die gesamte Zeile fortpflanzen. Demgegenüber bietet Prädiktor (5) (Kurve 3) wegen des flächenhaften Fehlerabbaus trotz recht weiter Fortpflanzung beträchtliche Verbesserungen. Prädiktor (3) hat ein noch wesentlich günstigeres Abbauverhalten, was sich in der Kurve 4 deutlich ablesen läßt. Wird Prädiktor (5) jedoch mit einem Leak von 1.5 % versehen, so erreicht man auch hier gleich gute Werte wie für (3) (Bild 7.3). Die Prädiktoren (2)  $\hat{X} = 0.5(A+D)$  und (8)  $\hat{X} = 0.5A + 0.25(B+C)$  werden in der Störwirkung identisch bewertet wie (3) und sind nicht explizit eingetragen.

Zur Demonstration der möglichen Unterschiede in den Meßergebnissen sind in Bild 7.2 die Meßkurven einer anderen VP-Gruppe zu den gleichen Codierverfahren wie in Bild 7.



**Bild 7.1** Fehlersichtbarkeit bei verschiedenen Codierverfahren gemessen mit 27 Versuchspersonen (Binärsymmetrischer Kanal, Einzelfehler)



**Bild 7.2** Fehlersichtbarkeit bei verschiedenen Codierverfahren gemessen mit 6 Versuchspersonen (Binärsymmetrischer Kanal, Einzelfehler)

SUBJEKTIVE BEWERTUNG DER STÖRUNG

①  $\hat{\chi} = 0,75(A+C) - 0,5B$  , ohne Leak

②  $\hat{\chi} = 0,75(A+C) - 0,516B$  , mit Leak

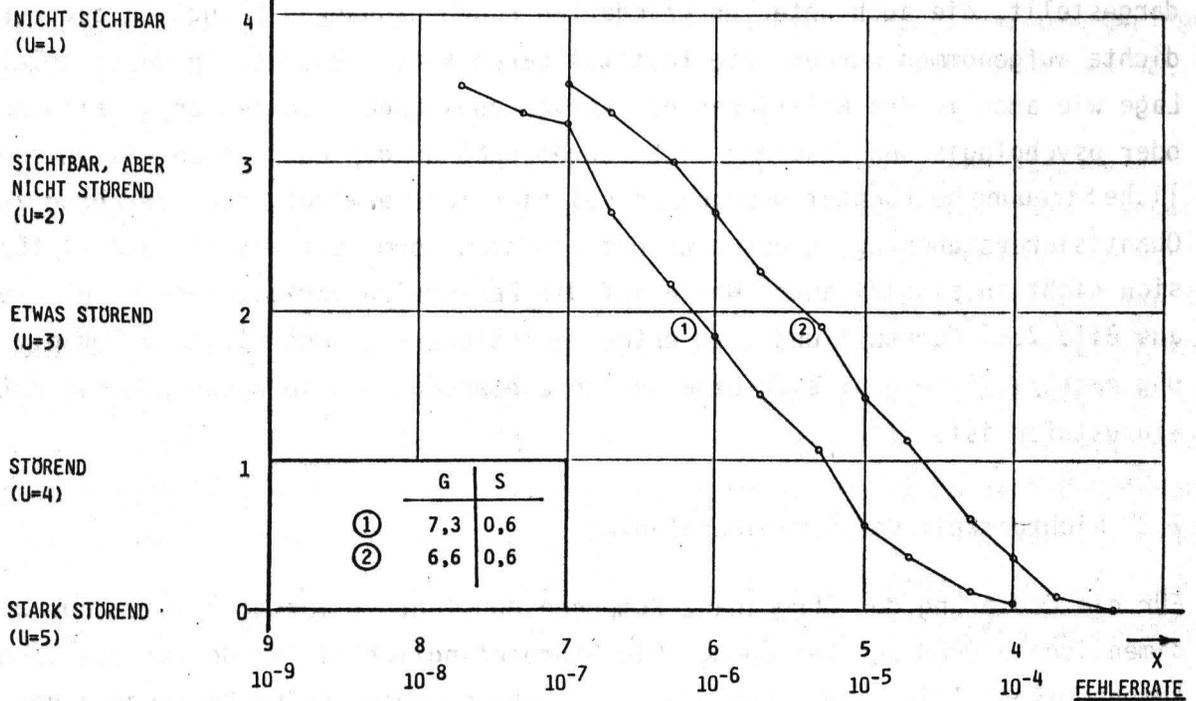


Bild 7.3 Fehlersichtbarkeit bei zweidimensionaler DPCM ohne und mit Prädiktor-Leak ( 27 Versuchspersonen )

SUBJEKTIVE BEWERTUNG DER STÖRUNG

①  $\hat{\chi} = A$  , Bostelmann, nur Luminanzfehler

②  $\hat{\chi} = A$  , Bostelmann, nur Chrominanzfehler

③ wie 1 , Hybrid-DPCM

④ wie 2 , Hybrid-DPCM

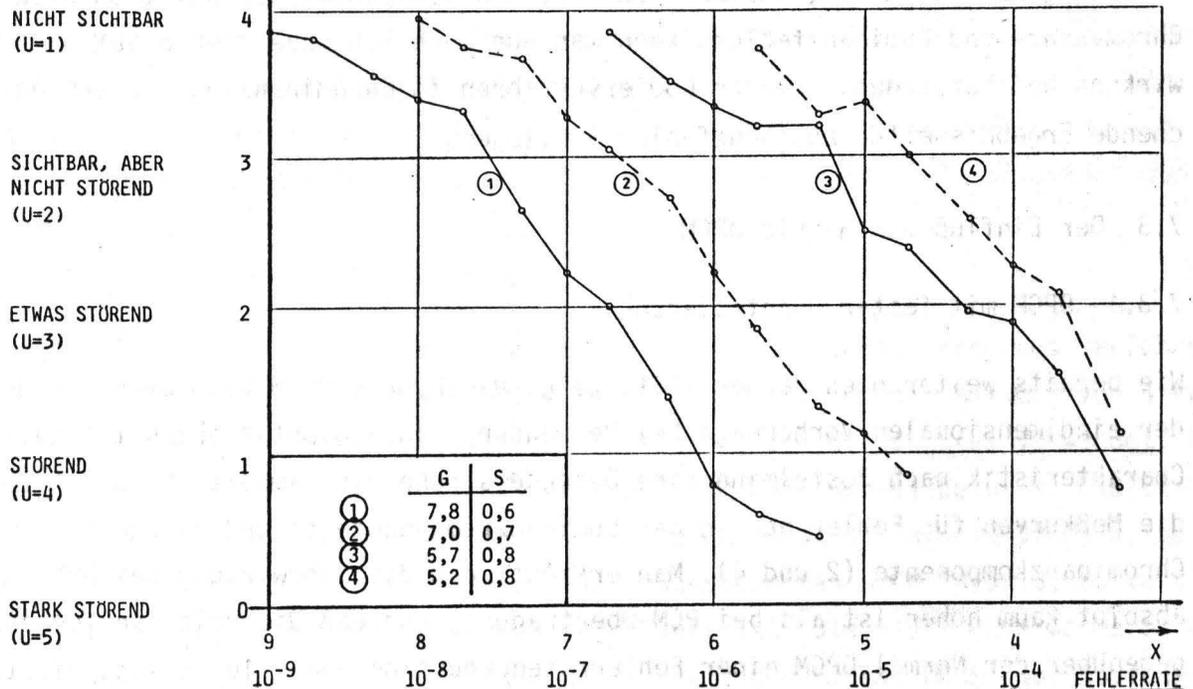


Bild 7.4 Wirksamkeit der Hybrid-DPCM und Sichtbarkeit von Chrominanzfehlern ( 6 Versuchspersonen )

dargestellt, die auch unter unveränderten Randbedingungen bezüglich der Leuchtdichte aufgenommen wurden. Die feststellbaren Verschiebungen in der absoluten Lage wie auch in den Relationen der Kurven zueinander konnten physikalischen oder psychologischen Ursachen nicht zugeordnet werden und müssen als unvermeidliche Streuung betrachtet werden. Es sei hier noch erwähnt, daß Verfahren zur Quantisierersteuerung in der hier untersuchten Form (Lit. /1.11/ und /1.15/) sich nicht in signifikanter Weise auf die Fehlersichtbarkeit auswirken. Dies ist aus Bild 7.6, Kurven 1 und 2 zu entnehmen (Steuerung nach /1.11/). Für die Steuerung nach /1.15/ ergibt sich eine Verschlechterung, die aber nur als geringfügig einzustufen ist.

## 7.2 Sichtbarkeit der Chrominanzfehler

Für die Codierung der Chrominanz-Komponenten steht im Versuchssystem nur die eindimensionale DPCM zur Verfügung. Die Störempfindlichkeit wurde für die Chrominanzkomponenten allein, sowie für die Luminanzkomponenten unter Verwendung der gleichen Codierung aufgenommen (Bild 7.4, Kurve 2 und 1). Entsprechende Messungen wurden dann unter Verwendung der Hybrid-DPCM durchgeführt. Aus den Kurven ist zu ersehen, daß bei Verwendung gleicher Codiervorgänge im Luminanz- und Chrominanzweg die Störwirkung im Chrominanzweg wesentlich niedriger liegt und einer im Verhältnis 4:1 bis 8:1 reduzierten Fehlerrate entspricht. Weiterhin sieht man, daß auch absolut die Störwirkung der Chrominanzfehler bei Verwendung der Hybrid-DPCM sehr niedrig liegt und damit im Vergleich zu den Luminanzfehlern praktisch keine Bedeutung hat (Bild 7.4, Kurven 3 und 4). Aus den gemessenen Relationen zwischen Chrominanz- und Luminanzfehlern kann man nun auch Schlüsse ziehen auf die Störwirkung bei Verwendung anderer Codiervorgänge im Chrominanzweg, sofern entsprechende Ergebnisse für Luminanzfehler vorliegen.

## 7.3 Der Einfluß der Hybrid-DPCM

### 7.3.1 DPCM mit fester Quantisierung

Wie bereits weiter oben dargestellt, zeigt die Hybrid-DPCM besonders für den Fall der eindimensionalen Vorhersage bei Verwendung eines Quantisierers mit gefalteter Charakteristik nach Bostelmann eine besonders hohe Wirksamkeit. Bild 7.4 zeigt die Meßkurven für Fehler nur in der Luminanzkomponente (1 und 3) und nur in der Chrominanzkomponente (2 und 4). Man erkennt, daß die Störwirkung bei Hybrid-DPCM absolut kaum höher ist als bei PCM-Übertragung, und daß die relative Verbesserung gegenüber der Normal-DPCM einer Fehlerratenreduktion von  $\geq 100:1$  entspricht. Es unterscheidet sich auch der visuelle Eindruck der Hybrid-DPCM bei normalen Be-

trachtungsabständen kaum von dem einer gestörten PCM-Übertragung; nur bei geringen Betrachtungsabständen sind die Fortpflanzungseffekte mit dem sehr schnellen Abklingen der Fehler im Bild zu erkennen.

Daß die Verwendung der Hybrid-DPCM bei anderen DPCM-Codierverfahren mit zweidimensionaler Prädiktion nicht so eindeutige Vorteile bringen muß, sondern sogar in der hier gewählten Konfiguration eine Qualitätsverschlechterung bewirken kann, zeigen die Kurven in Bild 7.5. Für die Prädiktion (3)  $X = 0,5 (A+C)$  wird hier die Hybrid-DPCM (Kurve 2) der Normal-DPCM gegenübergestellt (Kurve 1). Zusätzlich zeigen die Kurven 3 und 4 den starken Einfluß des Bildinhaltes auf die Fehlerfortpflanzung. Kurve 4, die nur auf den Meßwerten für das Testbild 2 (Junge mit Spielzeug) beruht, läßt eine gegenüber der Normal-DPCM wesentlich erhöhte Störwirkung erkennen, während für die übrigen Testbilder (1 und 3) eine leichte Reduktion der Störung erzielt wird. Gemittelt über alle drei Testbilder (Kurve 2) ergibt sich jedoch keine Verbesserung; eine Anwendung der Hybrid-DPCM ist in diesem Zusammenhang nicht zu empfehlen.

Ein sehr ähnliches Verhalten ergibt sich auch z.B. bei Prädiktor (2) und (5), für die keine expliziten Meßkurven beigefügt sind. Es ist jedoch in jedem dieser Fälle günstiger, anstelle der Hybrid-DPCM ein Leak von ca. 1.5 % vorzusehen, das die Störwirkung deutlich reduziert und keine Abhängigkeit vom Bildinhalt zeigt.

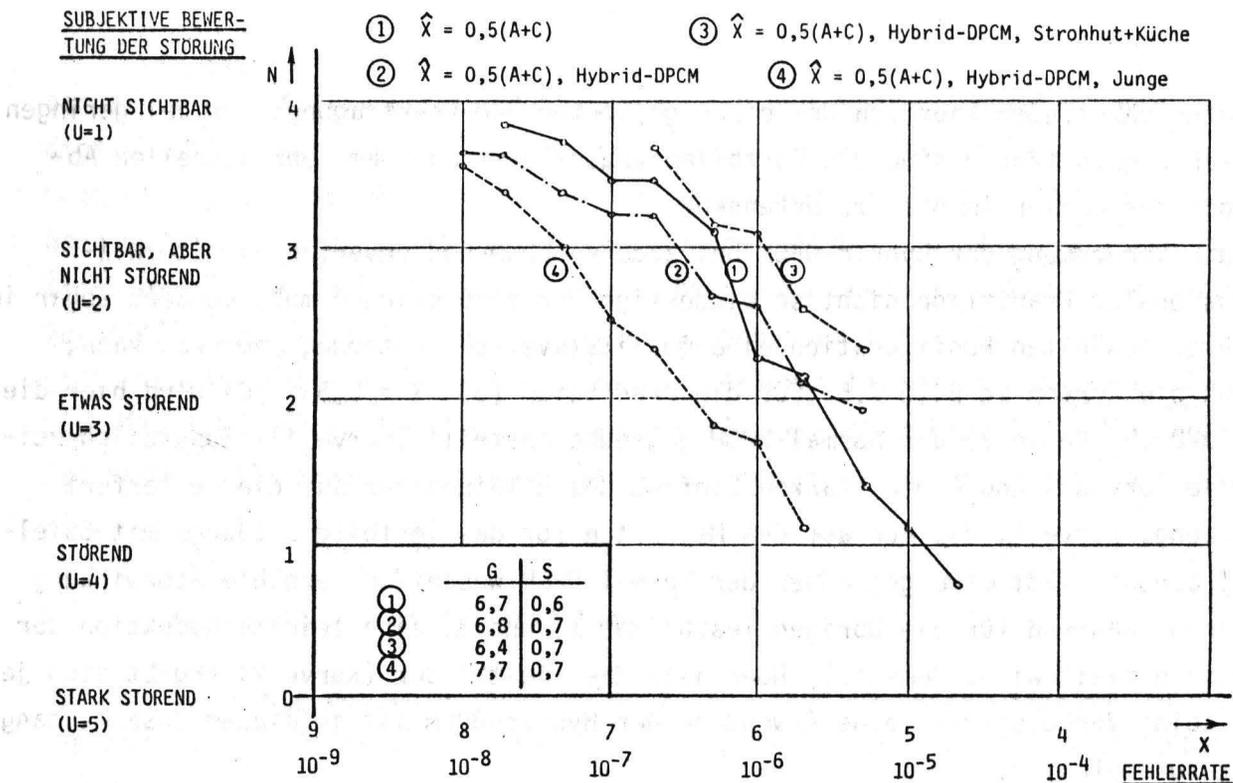
Wiederum etwas unterschiedlich ist das Verhalten für den Prädiktor

$$(4) \hat{X} = A + 0,5 (C-B),$$

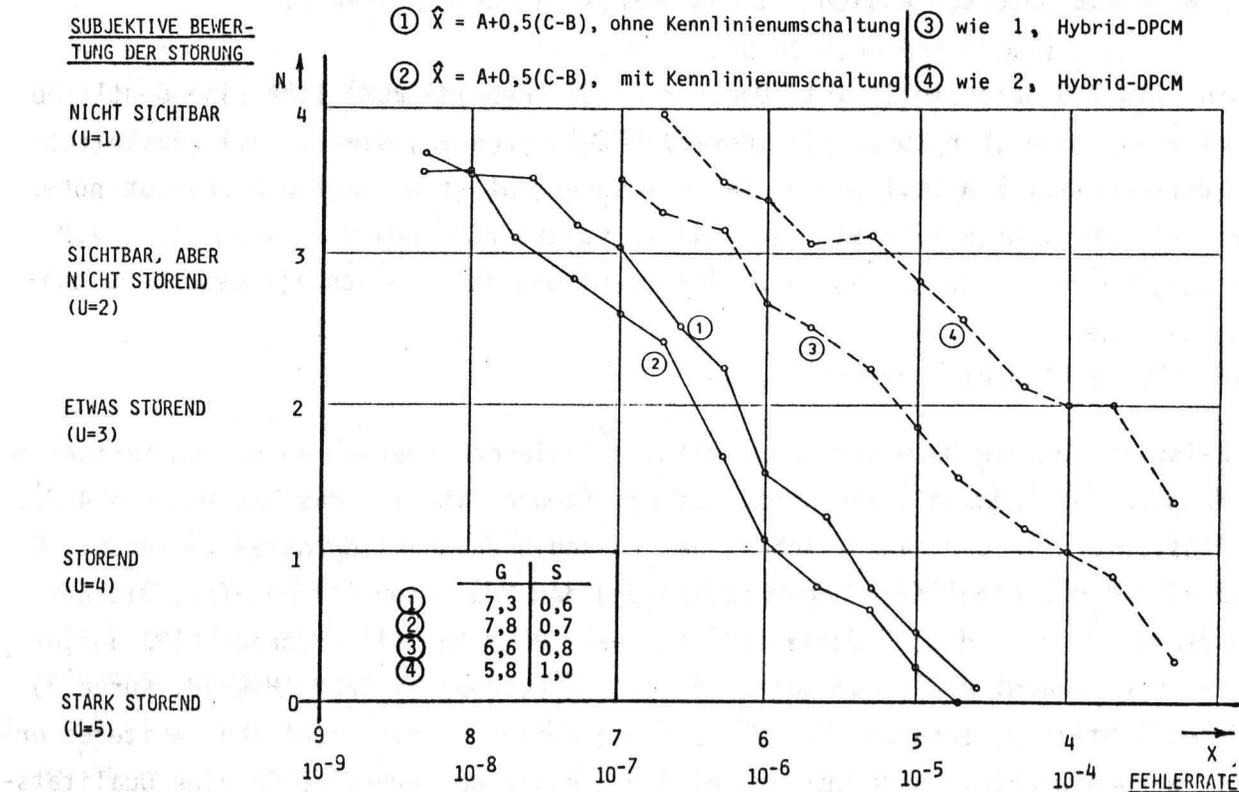
das in Bild 7.6 dargestellt ist. Die Kurve (3) (Hybrid-DPCM) läßt eine deutliche Verbesserung gegenüber Kurve (1) (Normal-DPCM) erkennen, die für alle Testbilder feststellbar ist. Ein Teil dieser Verbesserung geht sicher auf die absolut höhere Störsichtbarkeit beim Prädiktor (4) mit normaler DPCM-Codierung zurück (s. z.B. Bild 7.2, Kurve 2), jedoch ist auch insgesamt die Kombination als besonders günstig anzusehen.

### 7.3.2 DPCM mit Quantisierersteuerung

Als Beispiel für die DPCM-Codierung mit Quantisierersteuerung wurde das Verfahren von Musmann und Erdmann untersucht, das als Steuerkriterium das Maximum von 4 Prädiktionsfehlern in der Nachbarschaft des zu codierenden Bildpunktes verwendet. Es wurde zwischen 3 Kennlinien umgeschaltet und der Prädiktor (4) benutzt. Die Ergebnisse sind in Bild 7.6, Kurven (2) (Normal-DPCM) und (4) (Hybrid-DPCM) aufgetragen. Man erkennt klar, daß gegenüber der ungesteuerten DPCM (Hybrid, Kurve 3) eine beträchtliche, zusätzliche Verbesserung auftritt, die nicht ohne weiteres erwartet werden konnte. Insgesamt bringt der Einsatz der Hybrid-DPCM eine Qualitätsverbesserung, die einer Reduktion der Fehlerrate um 50:1 bis 100:1 entspricht, und



**Bild 7.5** Wirksamkeit der Hybrid-DPCM bei zweidimensionaler Vorhersage und verschiedenen Bildvorlagen (27 Versuchspersonen)



**Bild 7.6** Wirksamkeit der Hybrid-DPCM bei zweidimensionaler Vorhersage ohne und mit Kennlinienumschaltung (6 Versuchspersonen)

läßt, absolut gesehen, die Fehlersichtbarkeit sehr nahe an die der PCM-Übertragung heranrücken.

Eine genaue Analyse der Ursachen für dieses Verhalten ließ sich mit dem im Real-Time-Betrieb arbeitenden Versuchssystem nicht durchführen. Es wurde jedoch festgestellt, daß sich bei Vergrößerung der Quantisierungsstufen und damit des Aussteuerbereichs einer Quantisierungskennlinie der Fehlerabbau durch die Hybrid-DPCM verbessert. An kontrastreichen Bilddetails, die bei der Hybrid-DPCM besonders leicht zu Fehleraufbaueffekten führen, kann so durch die Auswahl der Kennlinie wieder der Fehlerabbau verbessert werden. Außerdem führen auch größere Übertragungsfehler im Empfänger im allgemeinen zur Verfälschung der Kennlinienauswahl. In fast allen Fällen erfolgt diese Verfälschung zu einer weiter gespreizten Kennlinie hin. Auch hierdurch wird der Fehlerabbau beschleunigt und Fehleraufbaueffekten entgegengewirkt.

### 7.3.3 Quantisierer mit reduzierter Stufenzahl

Mit einer weiteren Meßreihe wurden Überlegungen experimentell überprüft, durch Fortlassen der beiden äußeren Quantisierungsstufen einer Kennlinie eine Verbesserung des Fehlerabbaus bei der Hybrid-DPCM zu erzielen (s. Abschn. 4.3.2.3). Für die beiden zweidimensionalen Prädiktoren

$$(4) \hat{X} = A + 0,5 (C - B)$$

$$(5) \hat{X} = 0,75(A + C) - 0,5B$$

wurde die Hybrid-DPCM mit einer 16stufigen und einer 14stufigen Kennlinie bei 4 bit-Codeworten betrieben (Bild 7.7). Dabei waren die Repräsentativwerte der äußeren Stufen in beiden Fällen gleich groß (60/256). Die erzielbare Verbesserung, die sich aus dem Vergleich von Kurven 1 mit 2 sowie 3 mit 4 ergibt, ist beträchtlich und läßt sich durch Fehlerratenreduktionen von 30:1 bis 50:1 ausdrücken. Über die Anwendung kann jedoch, wie bereits oben angedeutet, nur im Einzelfall entschieden werden.

### 7.4 Abhängigkeit der Störwirkung vom Kanalmodell

In den Bildern 7.8 und 7.9 sind die Ergebnisse des Vergleichs zwischen unterschiedlichen Kanalmodellen dargestellt, und zwar für die beiden Prädiktoren

$$(4) \hat{X} = A + 0,5 (C - B),$$

$$(6) \hat{X} = 0,75 (A + C) - 0,516B.$$

Dem BSC-Kanalmodell (Kurve 1) wird gegenübergestellt ein Kanal mit 4-Phasen DPSK-Modulation (Kurve 3) und mit 16-Stufen-Amplitudenmodulation (Kurve 4).

SUBJEKTIVE BEWERTUNG DER STÖRUNG

- ①  $\hat{X} = A+0,5(C-B)$ , 16 Stufen-Kennlinie    ③  $\hat{X} = 0,75(A+C)-0,5B$ , 16 Stufen-Kennlinie  
 ②  $\hat{X} = A+0,5(C-B)$ , 14 Stufen-Kennlinie    ④  $\hat{X} = 0,75(A+C)-0,5B$ , 14 Stufen-Kennlinie

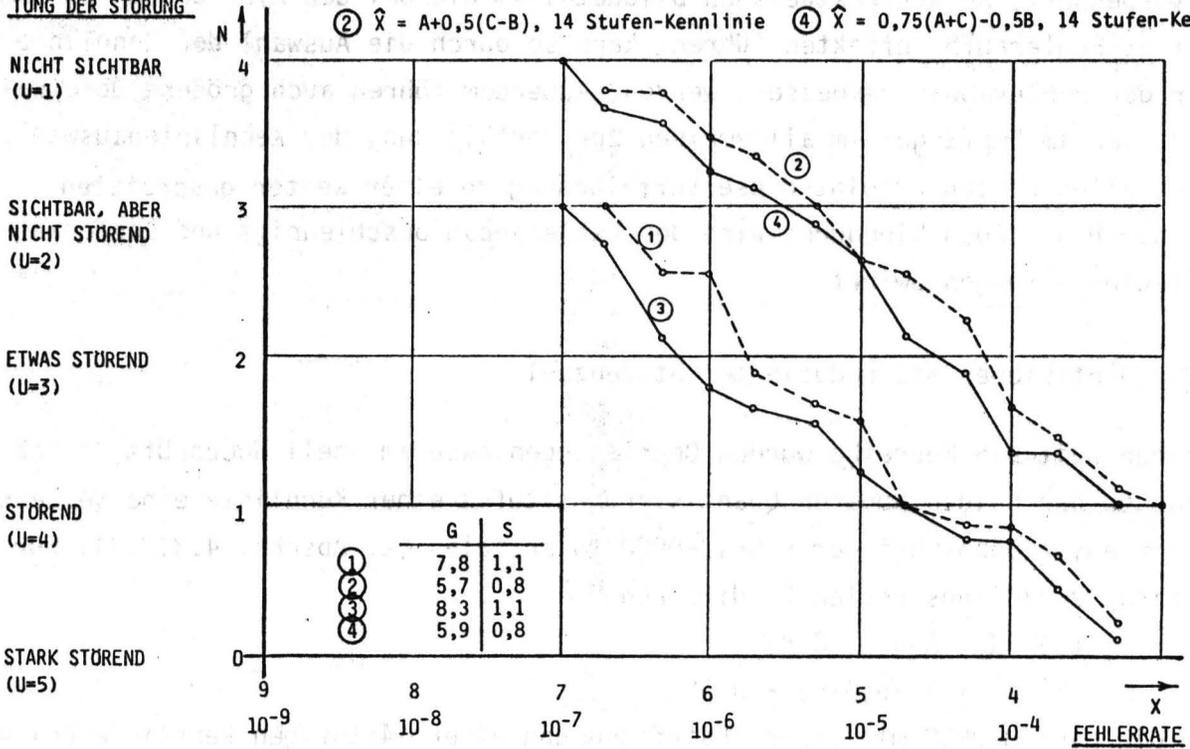


Bild 7.7 Wirksamkeit der Begrenzung der Kennlinie auf 14 Stufen bei zweidimensionalen Hybrid-DPCM-Verfahren

SUBJEKTIVE BEWERTUNG DER STÖRUNG

- ① Binärsymmetrischer Kanal
- ③ 4-Phasen-DPSK-Modulation
- ② Binärsymmetrischer Kanal, Hybrid-DPCM
- ④ 16-Level-ASK-Modulation

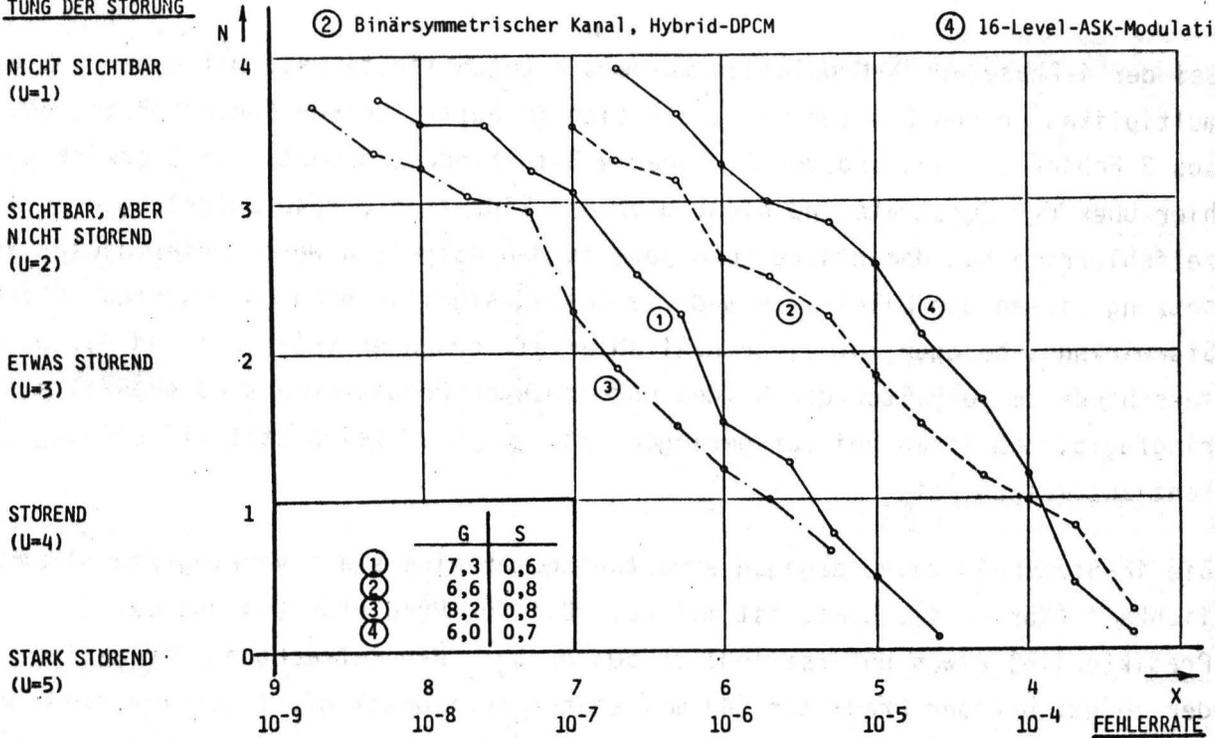


Bild 7.8

Fehlersichtbarkeit bei verschiedenen Kanalmodellen  
 Vorhersage  $\hat{X} = A + 0,5(C - B)$

SUBJEKTIVE BEWERTUNG DER STÖRUNG

- ① Binärsymmetrischer Kanal
- ③ 4-Phasen-DPSK-Modulation
- ② Binärsymmetrischer Kanal, Hybrid-DPCM
- ④ 16-Level-ASK-Modulation

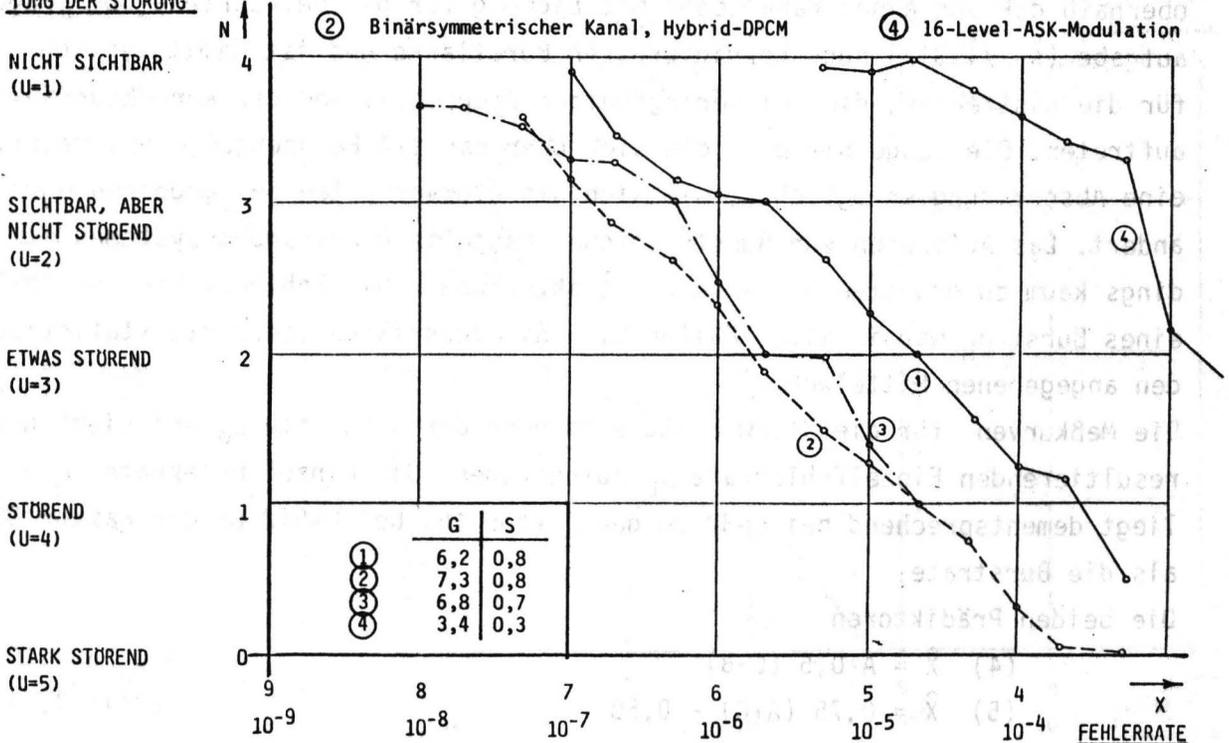


Bild 7.9

Fehlersichtbarkeit bei verschiedenen Kanalmodellen  
 Vorhersage  $\hat{X} = 0,75(A + C) - 0,516B$

Bei der 4-Phasen-DPSK-Modulation wurde der ungünstigste Fall mit einer Fehlermultiplikation von 2 untersucht, die sich im Auftreten von Fehlerbursts, bestehend aus 2 Fehlern im Abstand von 2, 3 oder 4 Bitperioden, äußert. Die Störwirkung wurde hier über der Burstrate und nicht über der Einzelfehlerrate aufgetragen. Die Einzelfehlerrate hat dementsprechend jeweils den doppelten Wert. Unter dieser Voraussetzung lassen die Bilder 7.8 und 7.9 keinen signifikanten Unterschied in der Störwirkung, bezogen auf die Einzelfehlerrate erkennen (Kurven 1 und 3). Die Unterschiede im Verhalten der beiden untersuchten Prädiktoren sind ebenfalls so geringfügig, daß ihnen bei der geringen Zahl von 6 VP keine statistische Signifikanz zuzumessen ist.

Die 16-Stufen-AM zeigt dagegen erwartungsgemäß eine stark verringerte Störempfindlichkeit (Kurven 4). Diese ist mit ca. 20:1 für Prädiktor (4) und ca. 100:1 für Prädiktor (6) etwas unterschiedlich ausgeprägt. Die Betrachtung der gestörten Bilder zeigt, daß der Prädiktor (4) mit seiner horizontal nicht abklingenden Fehlerfortpflanzung auch die verbleibenden Fehler kleiner Amplitude noch deutlich sichtbar macht und damit eine Grenze setzt für mögliche Verbesserungen, während beim Prädiktor (6) praktisch nur noch rauschähnliche Strukturen verbleiben, die wegen der höheren räumlichen Frequenzanteile weniger gut wahrgenommen werden.

### 7.5 Störwirkung von Fehlerbursts

Für die Messung der Störwirkung von Fehlerbursts wurden die beiden Burstlängen  $L = 32$  bit und  $L = 512$  bit ausgewählt. Die Länge 32 liegt nur wenig oberhalb der von einem Kanalcode mit Eignung für die betrachtete Übertragungsaufgabe (s. /1.31/) noch korrigierbaren Burstlänge und ist damit typisch für die Restfehler, die bei geringfügiger Überschreitung der Korrekturfähigkeit auftreten. Die Länge 512 bit, die sich über ca. 1/4 Fernsehzeile erstreckt, soll eine Abschätzung ermöglichen, wie sich das Störverhalten bei größeren Burstlängen ändert. Das Auftreten von Bursts solcher Länge in Übertragungssystemen ist allerdings kaum zu erwarten und auch nicht akzeptabel. Die Fehlerdichte innerhalb eines Burst  $p_H$  war in allen Fällen 0,5, die Burstlänge schwankte statistisch um den angegebenen Mittelwert.

Die Meßkurven für die Störwirkung sind über der Burstrate  $p_B$  und nicht über der resultierenden Einzelfehlerrate  $p_E$  aufgetragen. Die Einzelfehlerrate  $p_E = p_B \cdot L \cdot p_H$  liegt dementsprechend bei  $L=32$  um den Faktor 16, bei  $L=512$  um den Faktor 256 höher als die Burstrate.

Die beiden Prädiktoren

$$(4) \hat{X} = A + 0,5 (C - B) \quad (\text{Bild 7.10})$$

$$(5) \hat{X} = 0,75 (A + C) - 0,5B \quad (\text{Bild 7.11})$$

wurden untersucht, wobei normale und hybride DPCM-Codierung eingesetzt wurde.

SUBJEKTIVE BEWERTUNG DER STÖRUNG

NICHT SICHTBAR (U=1)

SICHTBAR, ABER NICHT STÖREND (U=2)

ETWAS STÖREND (U=3)

STÖREND (U=4)

STARK STÖREND (U=5)

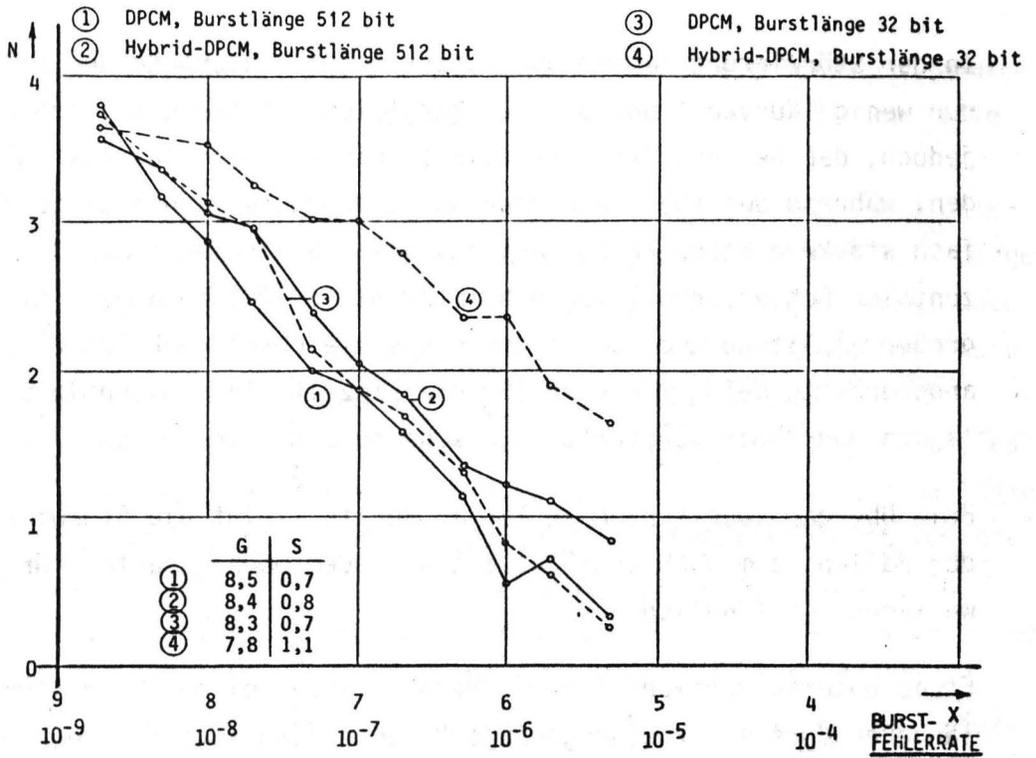


Bild 7.10

Fehlersichtbarkeit bei Burstfehlern, binärsymmetrischer Kanal  
Vorhersage  $\hat{X} = A + 0,5(C - B)$

SUBJEKTIVE BEWERTUNG DER STÖRUNG

NICHT SICHTBAR (U=1)

SICHTBAR, ABER NICHT STÖREND (U=2)

ETWAS STÖREND (U=3)

STÖREND (U=4)

STARK STÖREND (U=5)

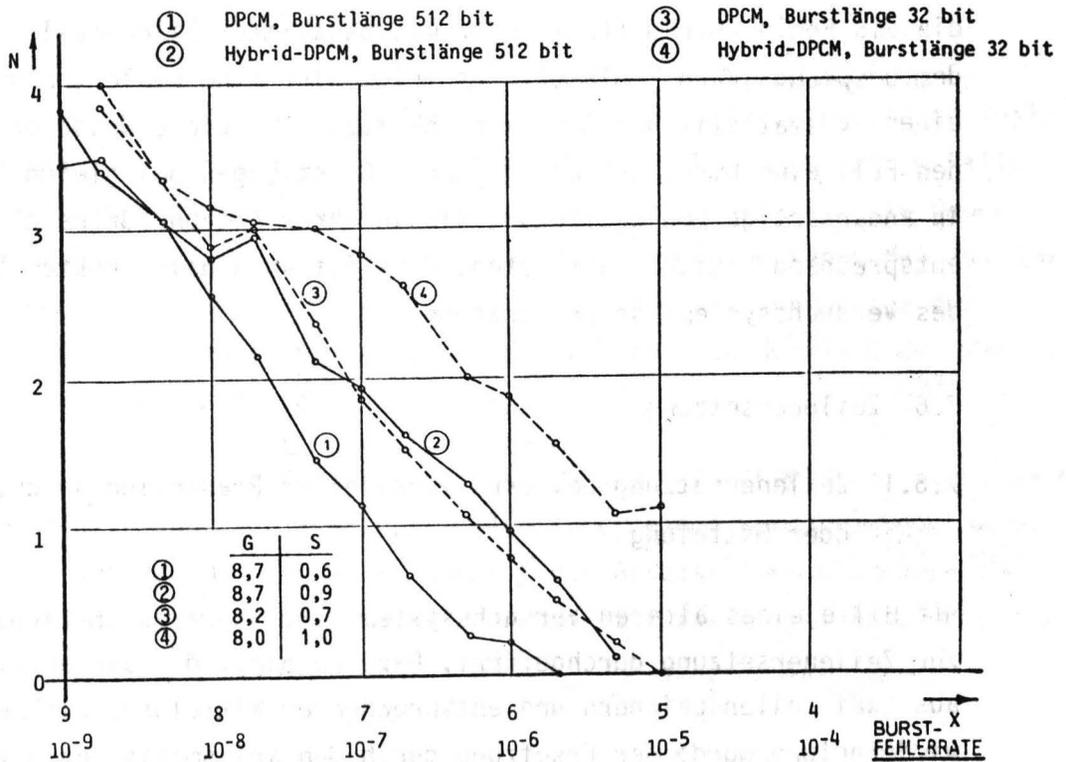


Bild 7.11

Fehlersichtbarkeit bei Burstfehlern, binärsymmetrischer Kanal  
Vorhersage  $\hat{X} = 0,75(A + C) - 0,5B$

In der Störwirkung langer und kurzer Bursts unterscheiden sich die Prädiktoren nur wenig (Kurven 1 und 3). Der Vergleich mit den Einzelfehlermessungen zeigt jedoch, daß bei Prädiktor (4) Bursts und Einzelfehler fast gleich bewertet werden, während bei (5) ein kurzer Burst gegenüber einem Einzelfehler eine vielfach stärkere Störwirkung besitzt. Dies hängt wieder mit der ausgeprägten horizontalen Fehlerfortpflanzung beim Prädiktor (4) zusammen, die für Einzelfehler großer Amplitude und für Fehlerbursts gleichartige Bildfehler erzeugt, während andererseits beim Prädiktor (5) die Einzelfehler innerhalb eines Burst sich überlagern und damit verstärkt in Erscheinung treten können.

Beim Übergang von kurzen zu langen Bursts steigt die Störwirkung dagegen in beiden Fällen kaum noch an. Dies ist nach dem oben gesagten für Prädiktor (4) ohne weiteres verständlich.

Etwas unterschiedlich sind die Verhältnisse bei der Hybrid-DPCM. Hier ist für die längeren Bursts nur eine geringe Verbesserung gegenüber der Normal-DPCM feststellbar (Kurven 2 und 1). Bei den kurzen Bursts dagegen ist die Verbesserung sehr deutlich (ca. 10:1).

Zur Erläuterung sei angeführt, daß bei Anwendung der Hybrid-DPCM mit zweidimensionaler Prädiktion der Störeindruck kaum noch durch die direkt gestörten Bildpunkte und durch die angrenzenden Fehlerflächen bestimmt ist, sondern hauptsächlich durch die vollständig neu durch das Hybridverfahren erzeugten Fehlerstrukturen, die als Fehleraufbaueffekte mehr mit bestimmten Bilddetails verknüpft sind als mit dem ursprünglichen Fehlerort. Es tritt also eine Fehlertransformation auf, die einen statistischen Charakter besitzt. Auf diese Weise entsteht im beschriebenen Fall eine Umsetzung der größeren Burstlängen bei gleichbleibender Häufigkeit in andersartige Fehlereffekte, die in ihrer Art und Größe gleichbleiben, aber entsprechend häufiger auftreten. Dies ist auch bei direktem Vergleich mit Hilfe des Versuchssystems sofort erkennbar.

## 7.6 Zeilenersetzung

### 7.6.1 Zeilenersetzung bei eindimensionaler Prädiktion durch Wiederholung oder Mittelung

Mit Hilfe eines älteren Versuchssystems für Schwarzweiß-Signale wurden Messungen zur Zeilenersetzung durchgeführt. Dazu enthielt das System eine Ergänzung bestehend aus zwei Zeilenspeichern und entsprechender Mittelungsarithmetik. Die reine Zeilenwiederholung wurde der Ersetzung durch den arithmetischen Mittelwert der entsprechenden Bildpunkte in der vorausgegangenen und der nachfolgenden Zeile des

aktuellen Halbbildes gegenübergestellt. Dabei wurde durch die Hardware immer dann eine ganze Zeile ersetzt, wenn mindestens ein Bitfehler in dieser Zeile aufgetreten war.

Die Ergebnisse der Messungen, die nicht unter exakt definierten Leuchtdichteverhältnissen durchgeführt wurden, sind in den Diagrammen 7.12. und 7.13 dargestellt. Diese enthalten zusätzlich als Vergleichskurven die unter identischen Randbedingungen aufgenommenen Meßkurven (Näherungskurven) für die eindimensionale DPCM mit Bostelmann-Quantisierer und für die PCM-Übertragung.

Bild 7.12 zeigt die Wirksamkeit der Zeilenersetzung durch Mittelung für 2 Testbilder und 3 VP (Experten). Mit einer Bewertung 6.3/0.6 wird für geringe Fehleraten  $\leq 10^{-6}$  nahezu PCM-Qualität erreicht, für höhere Fehlerraten steigt die Störwirkung stärker als für die PCM. Dies dürfte unter anderem auch auf das vermehrte Auftreten von Fehlern in benachbarten Zeilen zurückzuführen sein, wodurch die Genauigkeit der Ersetzung beträchtlich reduziert wird.

In Bild 7.13 ist die Abhängigkeit vom verwendeten Bildmaterial und der Unterschied zwischen Zeilenwiederholung und Mittelung durch Aufschlüsselung der Meßkurven sichtbar gemacht. Testbild 2 mit seinem ausgeprägten horizontalen Streifenmuster ist sehr viel empfindlicher gegenüber der Ersetzung als Testbild 1 mit seinen ruhigen Bildflächen und unregelmäßigen Detailstrukturen. Die Mittelung bringt gegenüber der Wiederholung von Zeilen eine relativ konstante Verbesserung, die etwa der Reduktion der Fehlerrate auf die Hälfte entspricht.

#### 7.6.2 Zeilenersetzung bei zweidimensionaler Prädiktion

Die Ersetzung einer gestörten Zeile im Decoder durch die letzte ungestörte Zeile des gleichen Halbbildes wurde im Versuchssystem dadurch erreicht, daß im Falle von Übertragungsfehlern das Neueinschreiben des Zeilenspeichers für die Dauer einer Zeile verhindert und die gespeicherte Information ein weiteres Mal aus dem Decoder ausgegeben wird. Diese Information wird auch für die Vorhersage der nächsten Zeile verwendet und kann sich mehr oder weniger von der im Coder verwendeten Information unterscheiden.

Die Messungen wurden mit Fehlerbursts der Länge 512 bit durchgeführt, wobei auch die Fälle der Beeinflussung von 2 Nachbarzeilen durch einen Burst richtig berücksichtigt sind. Es sei nochmals erwähnt, daß auf der Abszisse der Diagramme für die Störwirkung wiederum die Burstrate aufgetragen ist; die Einzelfehlerrate liegt um den Faktor 256 höher.

SUBJEKTIVE BEWERTUNG DER STÖRUNG

NICHT SICHTBAR (U=1)

SICHTBAR, ABER NICHT STÖREND (U=2)

ETWAS STÖREND (U=3)

STÖREND (U=4)

STARK STÖREND (U=5)

- ① DPCM,  $\hat{X} = A$ , Bostelmann
- ② Zeilenersetzung durch Mittelwert
- ③ PCM

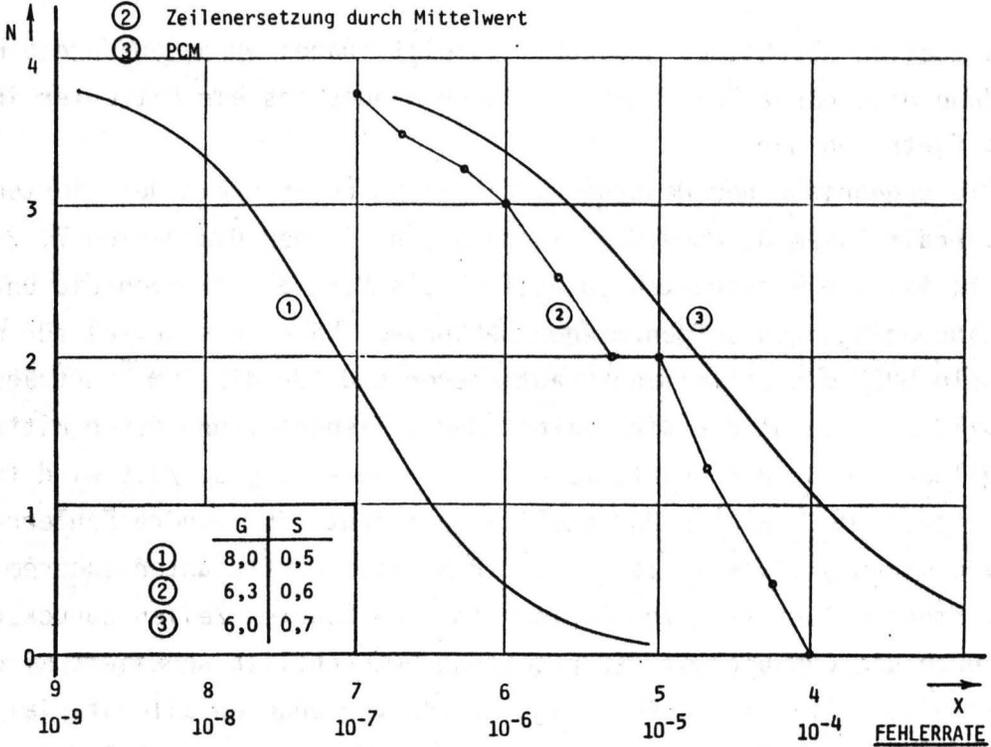


Bild 7.12

Wirksamkeit der Zeilenersetzung (Mittelwert) im Vergleich zur eindimensionalen DPCM und PCM

SUBJEKTIVE BEWERTUNG DER STÖRUNG

NICHT SICHTBAR (U=1)

SICHTBAR, ABER NICHT STÖREND (U=2)

ETWAS STÖREND (U=3)

STÖREND (U=4)

STARK STÖREND (U=5)

- ① Zeilenwiederholung, Junge
- ② Zeilenmittelung, Junge
- ③ Zeilenwiederholung, Strohhut
- ④ Zeilenmittelung, Strohhut

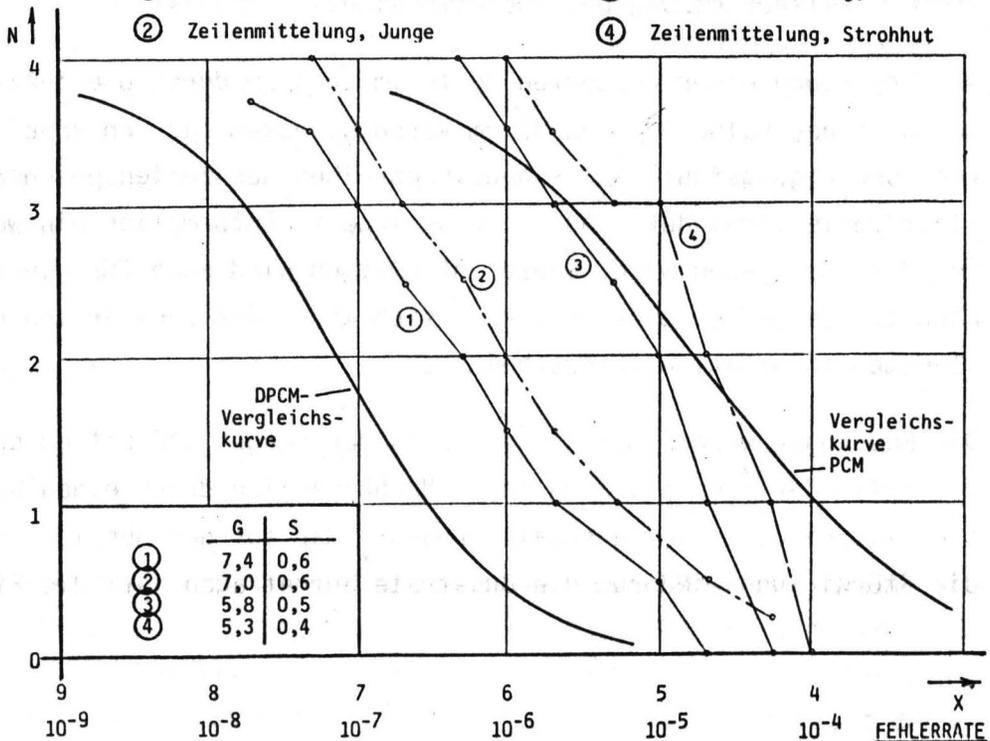


Bild 7.13

Einfluß der Bildvorlage auf die Zeilenersetzung durch Wiederholung und Mittelung

SUBJEKTIVE BEWERTUNG DER STÖRUNG

NICHT SICHTBAR (U=1)

SICHTBAR, ABER NICHT STÖRENDE (U=2)

ETWAS STÖRENDE (U=3)

STÖRENDE (U=4)

STARK STÖRENDE (U=5)

① DPCM, normal

② DPCM, Zeilenersetzung

③ Hybrid-DPCM, Zeilenersetzung

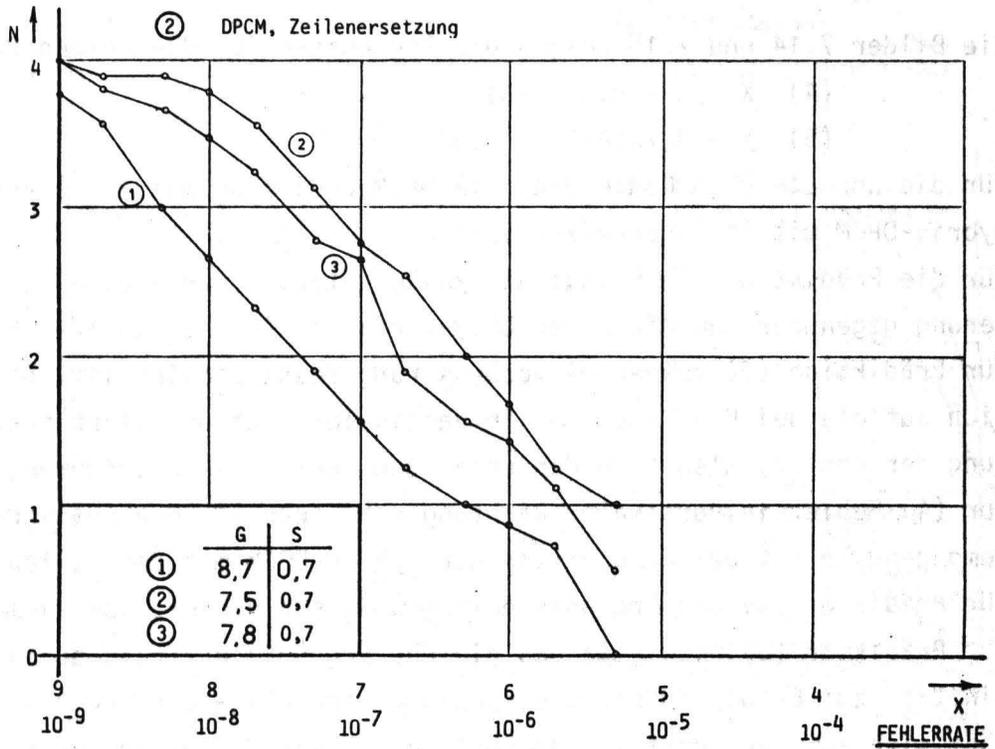


Bild 7.14

Wirksamkeit der Zeilenersetzung bei Burstfehlern (L=512 bit)

Vorhersage  $\hat{X} = A + 0,5(C - B)$ , binärsymmetrischer Kanal

SUBJEKTIVE BEWERTUNG DER STÖRUNG

NICHT SICHTBAR (U=1)

SICHTBAR, ABER NICHT STÖRENDE (U=2)

ETWAS STÖRENDE (U=3)

STÖRENDE (U=4)

STARK STÖRENDE (U=5)

① DPCM, normal

② DPCM, Zeilenersetzung

③ Hybrid-DPCM, Zeilenersetzung

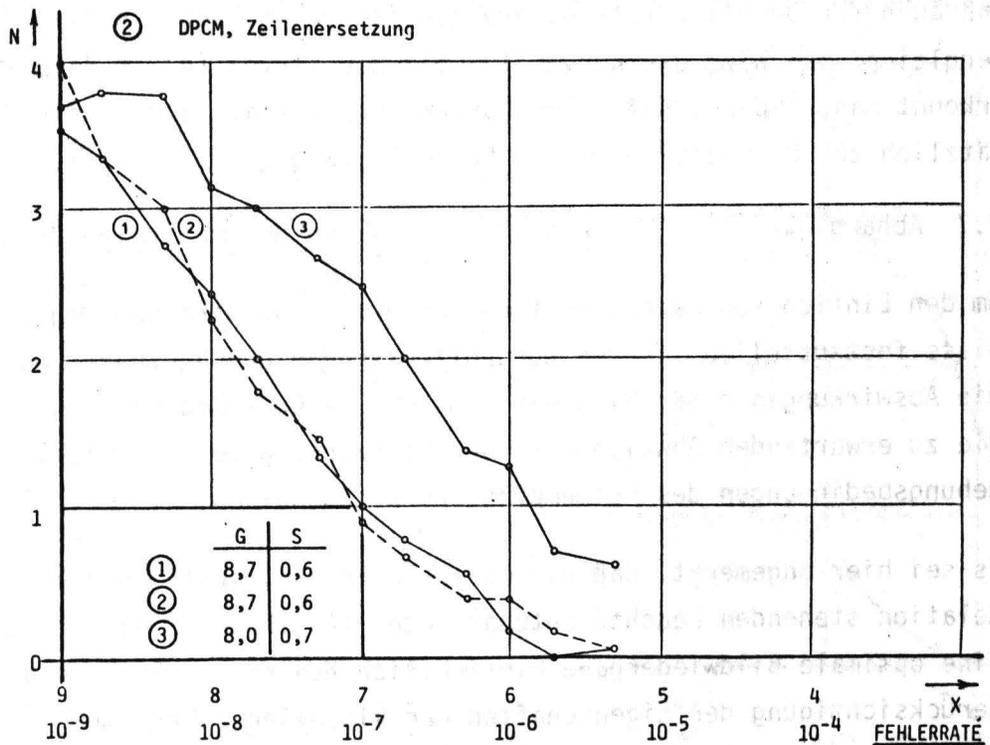


Bild 7.15

Wirksamkeit der Zeilenersetzung bei Burstfehlern (L=512 bit)

Vorhersage  $\hat{X} = 0,75(A + C) - 0,5B$ , binärsymmetrischer Kanal

Die Bilder 7.14 und 7.15 zeigen die Ergebnisse für die beiden Prädiktoren

$$(4) \hat{X} = A + 0,5 (C-B)$$

$$(5) \hat{X} = 0,75(A+C) - 0,5B$$

für die normale DPCM-Codierung, die DPCM-Codierung mit Zeilenersetzung und für die Hybrid-DPCM mit Zeilenersetzung.

Für die Prädiktion (4) bringt die Zeilensetzung (Kurve 2) eine erhebliche Verbesserung gegenüber dem einfachen DPCM-Verfahren (Fehlerratenreduktion < 10:1), während für Prädiktion (5) keinerlei Verbesserung festzustellen ist. Dies ist offensichtlich auf die bei Prädiktor (5) in vertikaler Richtung stark ausgeprägte Fortpflanzung der Fehler, also auch der Ersetzungsfehler zurückzuführen, während bei Prädiktor (4) Fehler in vertikaler Richtung sehr schnell abgebaut werden.

Demgegenüber ist bei Kombination der Hybrid-DPCM mit der Zeilenersetzung (Kurve 3) für Prädiktor (4) das Ergebnis geringfügig schlechter, aber immer noch nahe 10:1; für Prädiktor (5) wird etwa das gleiche Ergebnis erzielt, so daß hier erst die Kombination zum Erfolg führt. Die nahezu gleichartige Einschätzung beider Prädiktoren läßt sich auf den Fortfall der üblichen Fehlerfortpflanzung und den durch die Fehleraufbaueffekte der Hybrid-DPCM bestimmten Störeindruck zurückführen.

Der Einsatz der Zeilenersetzung in Verbindung mit der Hybrid-DPCM bringt also beim Auftreten langer Fehlerbursts Vorteile gegenüber der einfachen DPCM. Auch gegenüber der reinen Hybrid-DPCM verbleiben Vorteile, wie aus einem Vergleich mit den Bildern 7.10 und 7.11 ersichtlich ist.

Die Störwirkung der Zeilenersetzung ist nahezu unabhängig von der Burstlänge, so daß auch für 32-bit Bursts näherungsweise die Kurven von Bild 7.14 und 7.15 gelten. Vergleicht man hier die Kurven (3) mit den Kurven (4) in Bild 7.10 und 7.11, so erkennt man, daß bei Auftreten kurzer Bursts (ca. 32 bit) die Zeilenersetzung zusätzlich zur Hybrid-DPCM keinen Vorteil bringt.

## 7.7 Abhängigkeit der Fehlersichtbarkeit von der maximalen Bildschirmleuchtdichte

Um den Einfluß von Leuchtdichtewerten von Bildschirm und Umgebung auf die Meßergebnisse festzustellen, wurden Kontrollmessungen durchgeführt. Diese sollen erlauben, die Auswirkungen einer Nichteinhaltung der CCIR-Bedingungen bei der Messung, sowie die zu erwartenden Abweichungen der Störwirkung bei den nicht standardisierten Umgebungsbedingungen des Heimempfängers abzuschätzen.

Es sei hier angemerkt, daß die maximale Schirmleuchtdichte 70 cd/m<sup>2</sup> und die dazu in Relation stehenden Leuchtdichteparameter (Abschn. 6.2.4) so ausgewählt sind, daß eine optimale Bildwiedergabe hinsichtlich Kontrast-, Farb- und Detailerkennung unter Berücksichtigung der Eigenschaften der visuellen Wahrnehmung und gebräuchlicher Bildwiedergabegeräte gewährleistet ist.

SUBJEKTIVE BEWERTUNG DER STÖRUNG

NICHT SICHTBAR (U=1)

SICHTBAR, ABER NICHT STÖRENDE (U=2)

ETWAS STÖRENDE (U=3)

STÖRENDE (U=4)

STARK STÖRENDE (U=5)

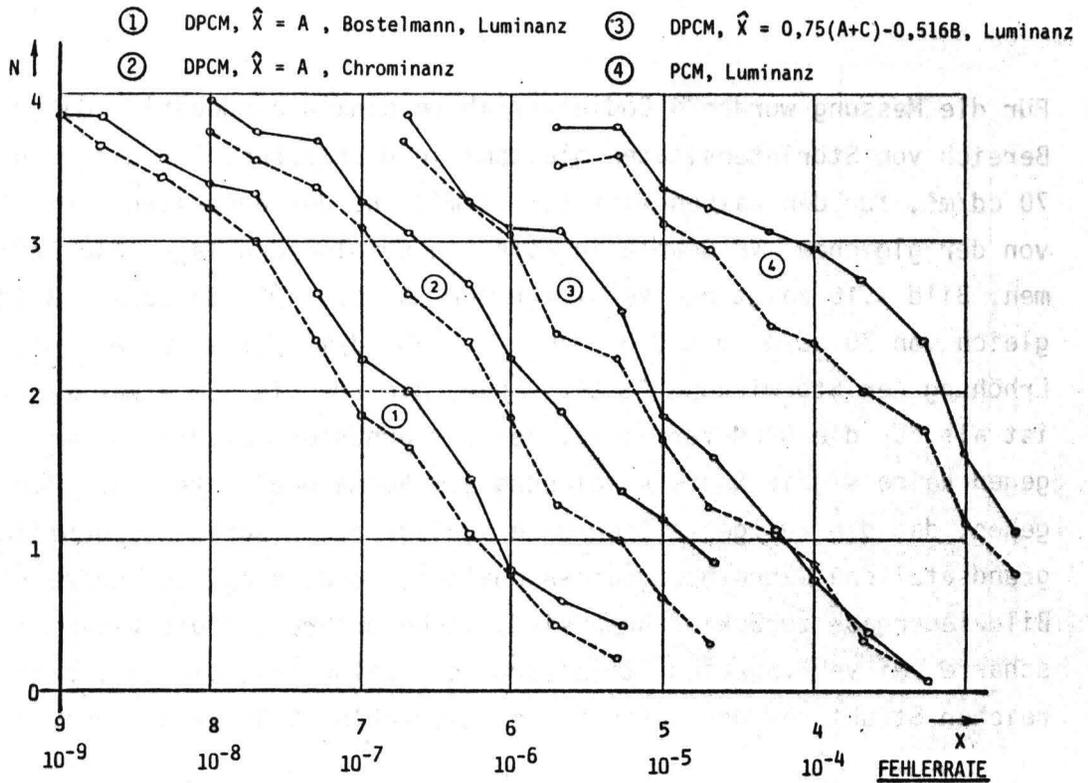


Bild 7.16

Leuchtdichteabhängigkeit bei verschiedenen Codierverfahren

—○— = 70 cd/m<sup>2</sup>, - - -○- - - = 35 cd/m<sup>2</sup> max. Leuchtdichte

SUBJEKTIVE BEWERTUNG DER STÖRUNG

NICHT SICHTBAR (U=1)

SICHTBAR, ABER NICHT STÖRENDE (U=2)

ETWAS STÖRENDE (U=3)

STÖRENDE (U=4)

STARK STÖRENDE (U=5)

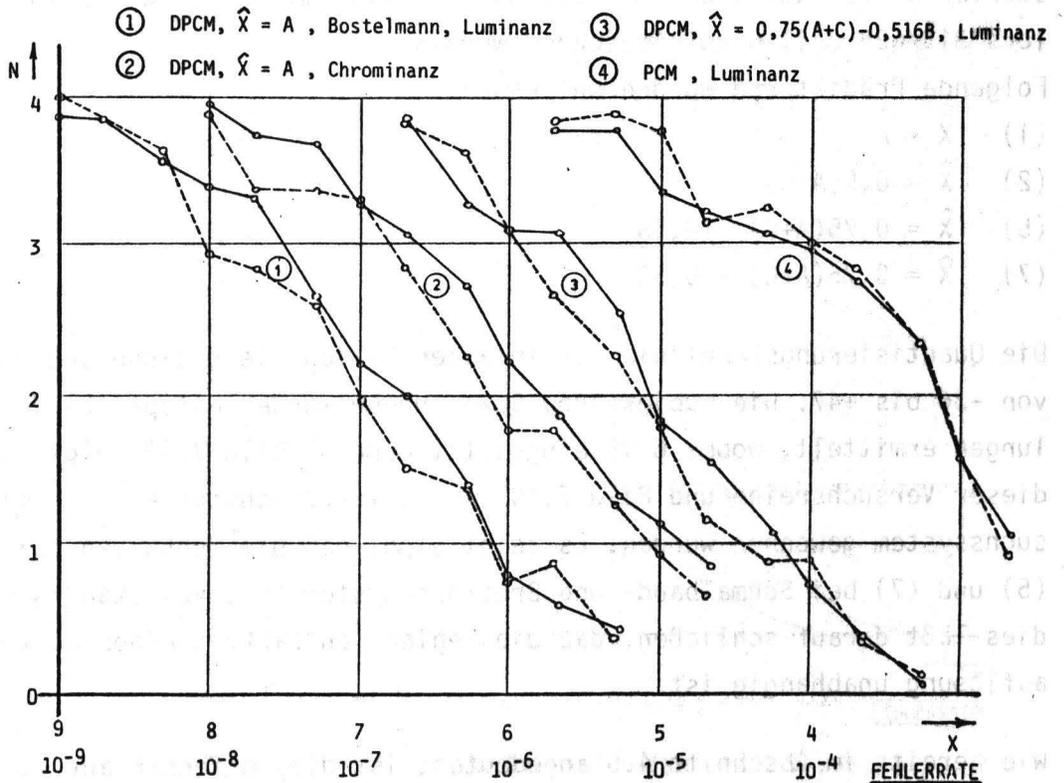


Bild 7.17

Leuchtdichteabhängigkeit bei verschiedenen Codierverfahren

—○— = 70 cd/m<sup>2</sup>, - - -○- - - = 140 cd/m<sup>2</sup> max. Leuchtdichte

Für die Messung wurden 4 Codierverfahren danach ausgewählt, daß sie den gesamten Bereich von Störintensitäten gleichmäßig überdecken. Für die CCIR-Leuchtdichte  $70 \text{ cd/m}^2$ , für den halben Wert ( $35 \text{ cd/m}^2$ ) und den doppelten Wert ( $140 \text{ cd/m}^2$ ) wurden von der gleichen VP-Gruppe an aufeinanderfolgenden Tagen die Meßkurven aufgenommen. Bild 7.16 zeigt den Vergleich von  $70 \text{ cd/m}^2$  mit  $35 \text{ cd/m}^2$ , Bild 7.17 den Vergleich von  $70 \text{ cd/m}^2$  mit  $140 \text{ cd/m}^2$ . Für  $35 \text{ cd/m}^2$  ist eine geringe, aber eindeutige Erhöhung der Störwirkung feststellbar, die für die PCM etwas stärker ausgeprägt ist als für die DPCM-Verfahren. Bei dem erhöhten Leuchtdichtewert  $140 \text{ cd/m}^2$  ist dagegen keine signifikante Abweichung zum Normalwert erkennbar. Man kann davon ausgehen, daß die festgestellten Unterschiede bei niedrigen Leuchtdichten nicht auf grundsätzliche Wahrnehmungseigenschaften, sondern auf sekundäre Effekte bei der Bildwiedergabe zurückzuführen sind, insbesondere auf die wesentlich bessere Bildschärfe bei verringertem Strahlstrom der Bildröhre, die die feinen und kontrastreichen Strukturen der auftretenden Bildfehler stärker hervortreten läßt.

#### 7.8 Fehlersichtbarkeit bei der Videobandbreite 1MHz

Auf Anregung der DFVLR, Braunschweig (R.Lippmann) wurden mit dem HHI-Betrachtungsort Messungen zur Fehlersichtbarkeit anhand schmalbandiger (1 MHz, 313 Zeilen), schwarz-weißer Videosignale vorgenommen, die mit ähnlichen DPCM-Verfahren verarbeitet worden waren. Dabei war die vollständige Testsequenz unterschiedlich gestörter Bilder auf Video-Magnetband (U-Matic) mit Hilfe eines Aufwärts-Normwandlers 313/625 Zeilen aufgezeichnet worden.

Folgende Prädiktoren wurden untersucht:

$$(1) \quad \hat{X} = A$$

$$(2) \quad \hat{X} = 0,5(A+C)$$

$$(5) \quad \hat{X} = 0,75(A+C) - 0,5B$$

$$(7) \quad \hat{X} = 0,75(A+C) - 0,53B$$

Die Quantisierungskennlinie war in allen Fällen die gleiche und umfaßte 16 Stufen von -36 bis +47. Die subjektiven Bewertungen wurden entsprechend den CCIR-Empfehlungen ermittelt, wobei 6 VP eingesetzt wurden. Bild 7.18 zeigt die Ergebnisse dieser Versuchsreihe und Bild 7.19 einige Vergleichskurven, die mit dem HHI-Verfahren gewonnen wurden. Es zeigt sich, daß die Meßkurven für die Prädiktoren (5) und (7) bei Schmalband- und Breitbandssystem fast vollständig übereinstimmen; dies läßt darauf schließen, daß die Fehlersichtbarkeit näherungsweise von der Bildauflösung unabhängig ist.

Wie bereits im Abschnitt 4.6 angedeutet, ist dies offenbar auf die gegenseitige Kompensation zweier gegenläufiger Effekte zurückzuführen. Bei Reduktion der Auflösung verringert sich entsprechend die Datenrate und damit auch die Zahl der bei

SUBJEKTIVE BEWERTUNG DER STÖRUNG

①  $\hat{\chi} = 0,75(A+C) - 0,5B$

③  $\hat{\chi} = 0,75(A+C) - 0,53B$

②  $\hat{\chi} = 0,5(A+C)$

NICHT SICHTBAR (U=1)

SICHTBAR, ABER NICHT STÖREND (U=2)

ETWAS STÖREND (U=3)

STÖREND (U=4)

STARK STÖREND (U=5)

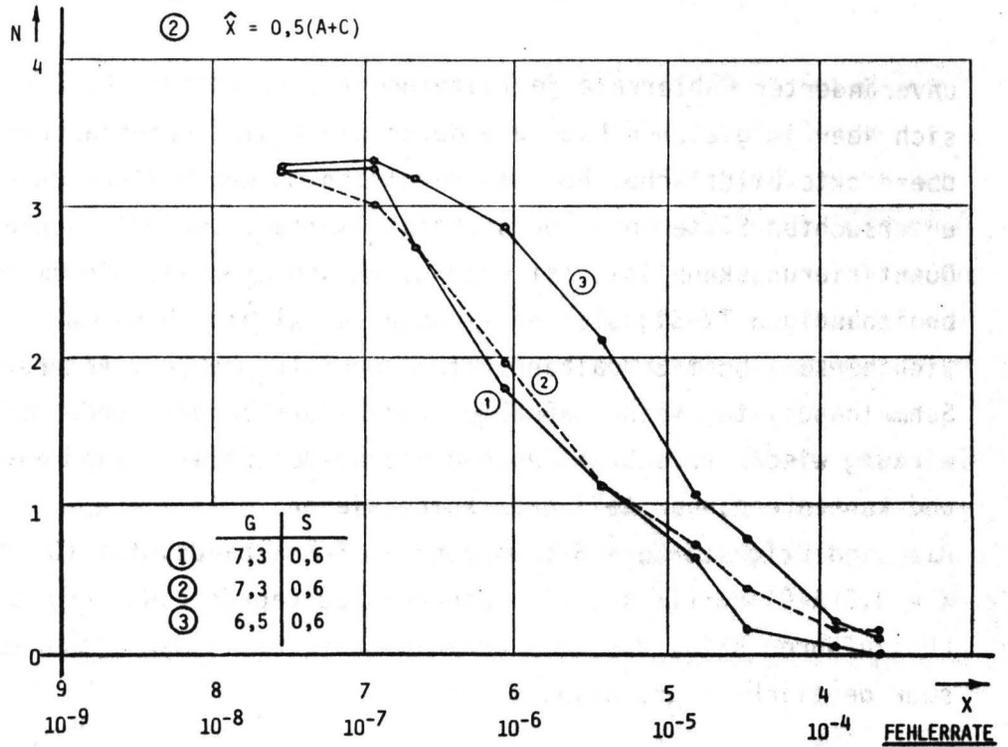


Bild 7.18

Fehlerempfindlichkeit verschiedener DPCM-Verfahren beim Schmalbandsystem der DFVLR

SUBJEKTIVE BEWERTUNG DER STÖRUNG

①  $\hat{\chi} = 0,75(A+C) - 0,5B$

③  $\hat{\chi} = 0,75(A+C) - 0,516B$

②  $\hat{\chi} = 0,5(A+C)$

NICHT SICHTBAR (U=1)

SICHTBAR, ABER NICHT STÖREND (U=2)

ETWAS STÖREND (U=3)

STÖREND (U=4)

STARK STÖREND (U=5)

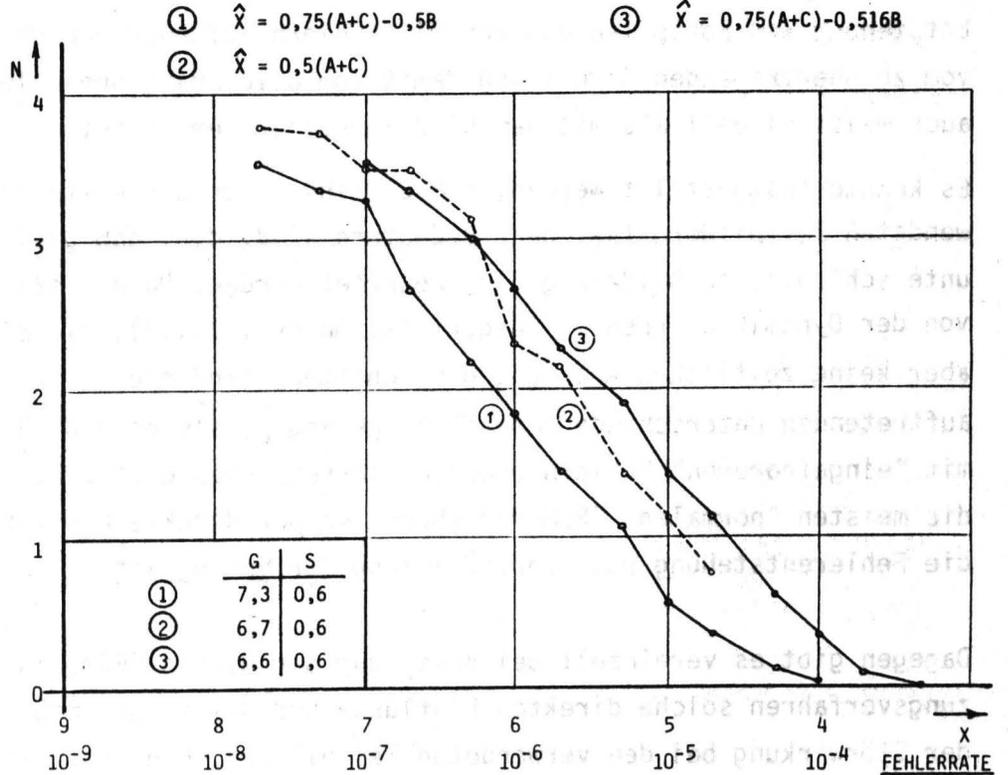


Bild 7.19

Fehlerempfindlichkeit der entsprechenden DPCM-Verfahren beim Breitbandsystem des HHI

unveränderter Fehlerrate je Zeiteinheit auftretenden Fehler. Andererseits vergrößert sich aber im gleichen Maße die durch die Fehlerfortpflanzung von einem Einzelfehler überdeckte Bildfläche. Bei dem Vergleich müssen weitere Unterschiede zwischen den untersuchten Systemen berücksichtigt werden. Die beim Schmalbandsystem verwendete Quantisierungskennlinie ist wesentlich schmaler als die im HHI zur Codierung von breitbandigen TV-Signalen verwendete Kennlinie. Dies müßte eine geringere Fehlersichtbarkeit beim Schmalbandsystem zur Folge haben. Andererseits enthält das Schmalbandsystem keine Maßnahmen zur Reduktion der Rundungsfehler, was die Fehlerwirkung wieder verstärkt. Auch diese beiden Effekte sind einander entgegengesetzt und können einander teilweise kompensieren.

Die eindeutig stärkere Störwirkung im Schmalbandsystem für den Fall der Prädiktion  $X = 0,5(A+C)$  dürfte auf die besonders ausgeprägte Wirkung der Rundungsfehler zurückzuführen sein, die beim Schmalbandsystem in den entsprechenden Testszenen sehr deutlich in Erscheinung trat.

## 7.9 Abhängigkeit der Fehlersichtbarkeit von Bildinhalt

Die Abhängigkeit der Fehlersichtbarkeit vom Bildsignal kann einerseits darin bestehen, daß nach Art und Häufigkeit gleichartige Bildverfälschungen vom Bildinhalt unterschiedlich stark verdeckt werden, andererseits aber auch darin, daß Entstehung und Fortpflanzung von Bildfehlern aufgrund von Übertragungsfehlern vom zu übertragenden Signal und damit vom Bildinhalt beeinflußt wird und dann auch meist visuell als mit dem Bild korreliert erscheint.

Es konnte festgestellt werden, daß Einflüsse von der ersteren Art bei den verwendeten Testbildern fast ohne Bedeutung sind, d.h. daß gleiche Fehler in den unterschiedlichen Bildern gleich bewertet werden. Da die stärkste Störwirkung von der Dynamik der Fehler ausgeht (s. Abschn. 4.1.4), die Bildvorlagen selbst aber keine zeitlichen Änderungen beinhalten, sind die auftretenden Unterschiede wesentlich geringer, als es z.B. Bildschirmaufnahmen mit "eingefrorenen" Fehlern erwarten lassen. Dies gilt z.B. für die PCM und für die meisten "normalen" DPCM-Verfahren, wo der direkte Einfluß des Signals auf die Fehlerentstehung und -fortpflanzung nur gering ist.

Dagegen gibt es vereinzelt bei Anwendung der Hybrid-DPCM bzw. bei Zeilenersetzungsverfahren solche direkten Einflüsse und damit auch meßbare Unterschiede in der Störwirkung bei den verwendeten Testbildern. Ein sehr extremer Fall ist in Bild 7.5 dargestellt. In einigen anderen Fällen wurden ähnliche, nicht ganz so

ausgeprägte Unterschiede zwischen den Bewertungen der einzelnen Testbilder festgestellt. In solchen Fällen wurde stets das Testbild Nr. 2 (Junge mit Spielzeug) deutlich schlechter bewertet als die beiden übrigen Bilder. Beobachtungen an realem TV-Programmmaterial zeigten jedoch, daß dort Bildvorlagen, die zu ähnlichen Effekten führen wie das Testbild 2, nur äußerst selten anzutreffen sind. Man kann deshalb davon ausgehen, daß durch Mittelung über die 3 Testbilder keinesfalls eine zu positive Gesamtbewertung gewonnen wird.

Insgesamt kann man feststellen, daß durch Verwendung von unbewegten Testbildern der vorliegenden Art eine sehr kritische Bewertung der Fehlersichtbarkeit möglich ist, die im Vergleich zu normalem TV-Programmmaterial durchaus als "worst case"-Messung anzusehen ist.

The first part of the document discusses the general principles of the proposed system. It outlines the objectives and the scope of the project, which is to develop a comprehensive framework for the management of the organization's resources. The document is divided into several sections, each addressing a different aspect of the system's design and implementation.

The second part of the document provides a detailed description of the system's architecture. It includes a flowchart illustrating the data flow between various components, as well as a list of the system's modules and their functions. The architecture is designed to be flexible and scalable, allowing for future expansion and integration with other systems.

The third part of the document discusses the implementation and testing of the system. It describes the steps taken to ensure that the system is installed correctly and that it operates as intended. The testing process involved a series of simulations and real-world scenarios to verify the system's performance and reliability.

The fourth part of the document provides a summary of the system's features and benefits. It highlights the key advantages of the proposed system, such as improved efficiency, enhanced security, and better data management. The document also includes a list of recommendations for the future development of the system.

The fifth part of the document contains a list of references and a bibliography. It includes citations to various sources used in the research and development of the system, as well as a list of related documents and reports. The references provide a comprehensive overview of the current state of the field and the sources of information used in the project.

The sixth part of the document is a conclusion and a list of appendices. The conclusion summarizes the main findings of the project and provides a final assessment of the system's value. The appendices include additional information, such as technical specifications, user manuals, and other documents that are relevant to the system's operation and maintenance.

The final part of the document is a list of acknowledgments and a list of authors. The acknowledgments thank the individuals and organizations that provided support and assistance during the project. The authors list the individuals who were involved in the development and implementation of the system.

## 8. Bildschirmaufnahmen als Ergänzung zu den Meßergebnissen

Über die Darstellung der Meßkurven und die Angabe der charakteristischen Werte G und S hinaus sind im folgenden zusätzlich einige Bildschirmaufnahmen wiedergegeben, die einen Eindruck von der Art der Bildfehler vermitteln sollen, die für einzelne Codierverfahren und Störstrukturen typisch sind. Nach den Ausführungen von Abschnitt 4.1.4 darf von diesen Bildern her keinesfalls die Störwirkung bei bestimmten Fehlerraten beurteilt werden. Auch der Vergleich unterschiedlicher Verfahren bei gleichen Fehlerraten muß mit Vorsicht vorgenommen werden, da die Bildwiedergabe irreführend sein kann. Die fotografischen Aufnahmen wurden im dynamischen Betrieb gemacht; dabei wurde jeweils genau 1 Vollbild belichtet. Fehler treten stets statistisch unabhängig in beiden Halbbildern des Vollbildes auf, dadurch wird ihre Sichtbarkeit gegenüber der Bildschirmwiedergabe weiter reduziert. Wegen des dynamischen Betriebes treten auch bei gleichbleibender Fehlerrate die Fehlerstrukturen stets an unterschiedlichen Orten auf, und auch die Zahl der sichtbaren Fehlerereignisse kann in einem gewissen Bereich variieren.

Es wurde ein Farbmonitor (BARCO) mit einer besonders feinen Lochmaske verwendet, so daß die üblichen Farbtripel-Strukturen auf den Bildern praktisch nicht erkennbar sind.

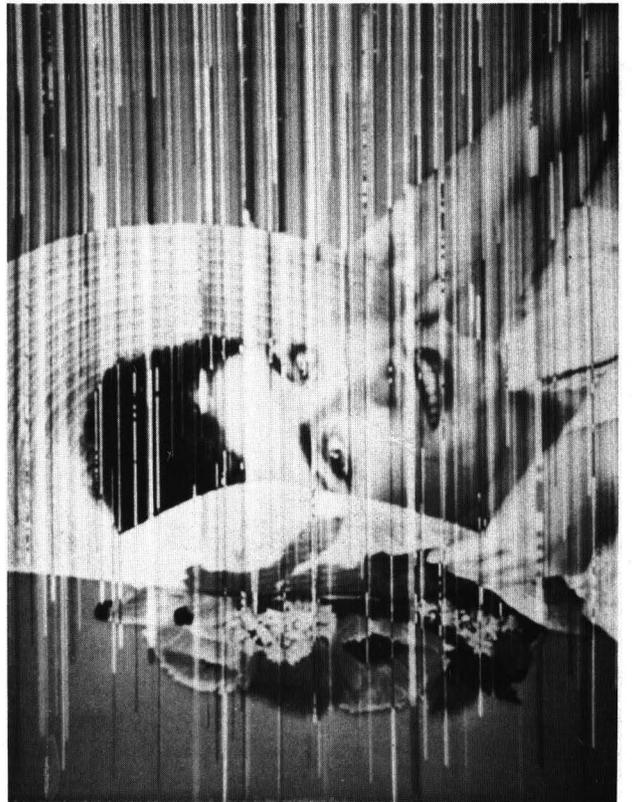
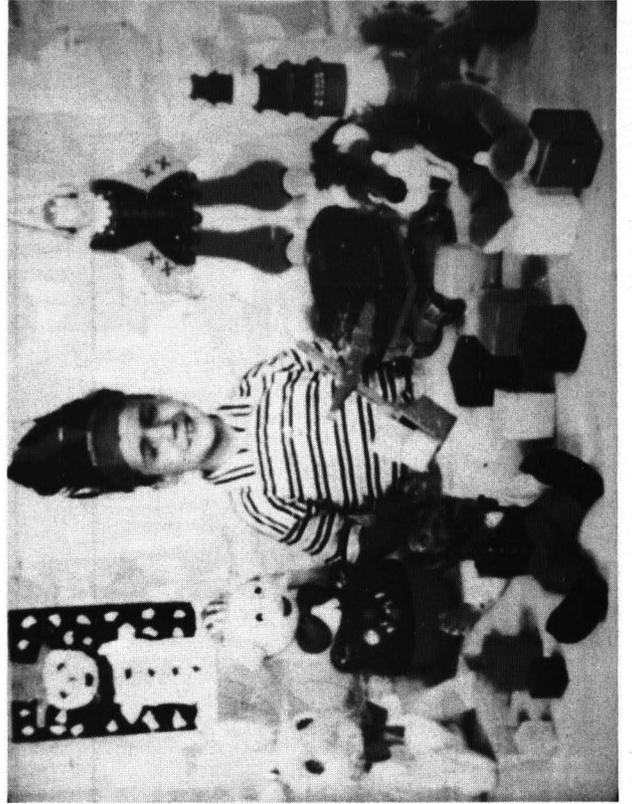
Aus Kostengründen konnten die Bilder nur im Schwarzweiß-Druck wiedergegeben werden. Farbabzüge zu einzelnen Bildern sind auf Anfrage beim Verfasser erhältlich.

Prädiktor : -  
Quantisierer: 8 bit gleichförmig (PCM)  
Fehlerrate :  $5 \times 10^{-4}$   
Kanalmmodell : Symmetr. Binärkanal

Prädiktor :  $\hat{X} = A$   
Quantisierer: }  
Fehlerrate : } s. unten links  
Kanalmmodell : }  
DPCM-Coder : Hybrid

Prädiktor :  $\hat{X} = A$   
Quantisierer: 4 bit, Bostelm. (Tab. 5.1 b)  
Fehlerrate :  $5 \times 10^{-4}$   
Kanalmmodell : Symmetr. Binärkanal  
DPCM-Coder : Normal

Prädiktor : }  
Quantisierer: }  
Fehlerrate : } s. oben  
Kanalmmodell : }  
DPCM-Coder : }

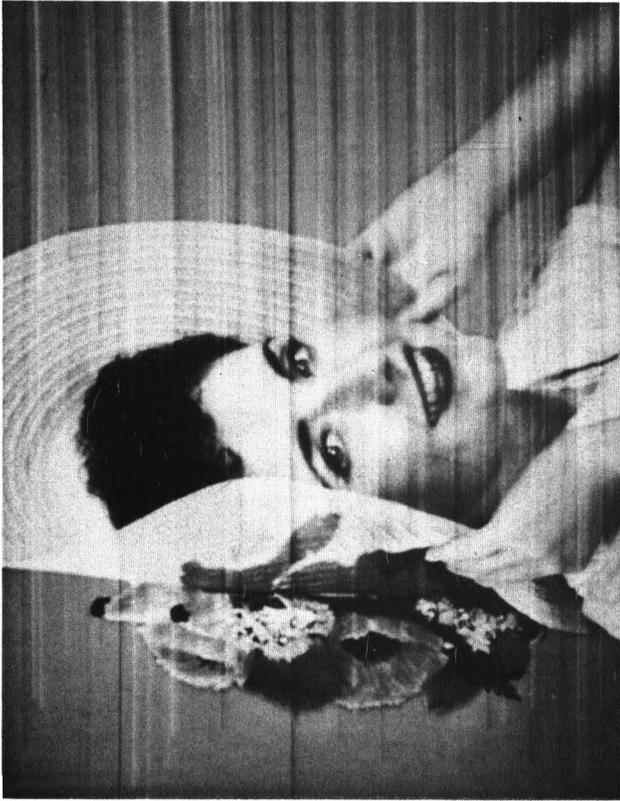


Prädiktor :  $\hat{X} = 0.5A + 0.25(B+C)$   
Quantisierer: 16 Stufen, 4 bit (Tab. 5.1 a)  
Fehlerrate :  $5 \times 10^{-4}$  (nur Luminanzfehler)  
Kanalmodell : Symmetr. Binärkanal  
DPCM-Coder : Normal

Prädiktor :  $\hat{X} = A + 0.5(C-B)$   
Quantisierer: }  
Fehlerrate : } s. links oben  
Kanalmodell : }  
DPCM-Coder : }

Prädiktor :  $\hat{X} = 0.5(A+C)$   
Quantisierer: }  
Fehlerrate : } s. oben  
Kanalmodell : }  
DPCM-Coder : }

Prädiktor : }  
Quantisierer: }  
Fehlerrate : } s. oben  
Kanalmodell : }  
DPCM-Coder : }

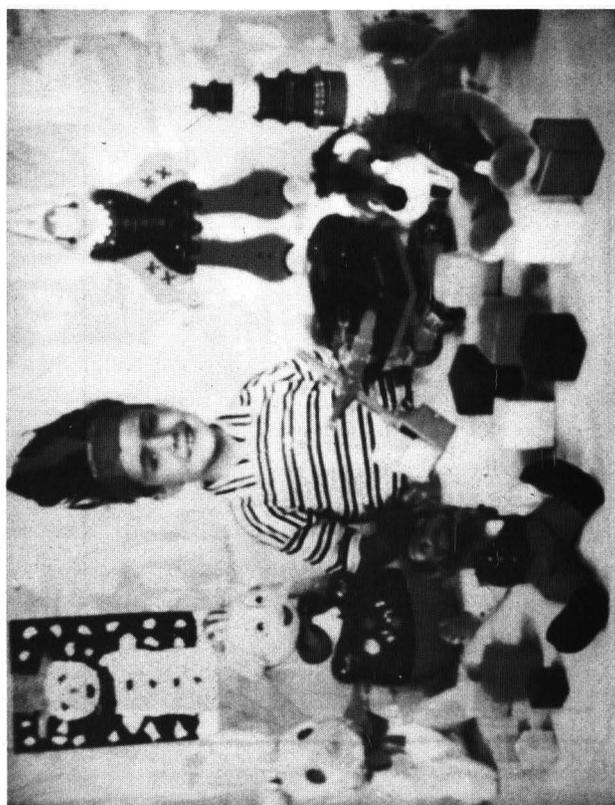


Prädiktor :  $\hat{X} = 0.75(A+C) - 0.5 B$   
Quantisierer: 16 Stufen, 4 bit (Tab. 5.1 a)  
Fehlerrate :  $5 \times 10^{-4}$  (nur Luminanzfehler)  
Kanalmode11 : Symmetr. Binärkanal  
DPCM-Coder : Normal

Prädiktor :  $\hat{X} = 0.75(A+C) - 0.516 B$   
Quantisierer: }  
Fehlerrate : } s. oben links  
Kanalmode11 : }  
DPCM-Coder : }

Prädiktor : }  
Quantisierer: } s. oben  
Fehlerrate : }  
Kanalmode11 : }  
DPCM-Coder : }

Prädiktor :  $\hat{X} = 0.75(A+C) - 0.531 B$   
Quantisierer: }  
Fehlerrate : } s. oben links  
Kanalmode11 : }  
DPCM-Coder : }



Prädiktor :  $\hat{X} = A + 0.5(C-B)$

Quantisierer: 16 Stufen, 4 bit (Tab. 5.1 a)

Fehlerrate :  $5 \times 10^{-4}$  (nur Luminanzfehler)

Kanalmodell : 16-level-Modulation

DPCM-Coder : Normal

Prädiktor :  $\hat{X} = 0.75(A+C) - 0.5 B$

Quantisierer: s. links oben

Fehlerrate :  $4 \times 10^{-3}$

Kanalmodell :

DPCM-Coder : } s. links oben

Prädiktor :  $\hat{X} = 0.75(A+C) - 0.5 B$

Quantisierer: }  
Fehlerrate : } s. oben  
Kanalmodell : }  
DPCM-Coder : }

Prädiktor :  $\hat{X} = 0.5(A+C)$

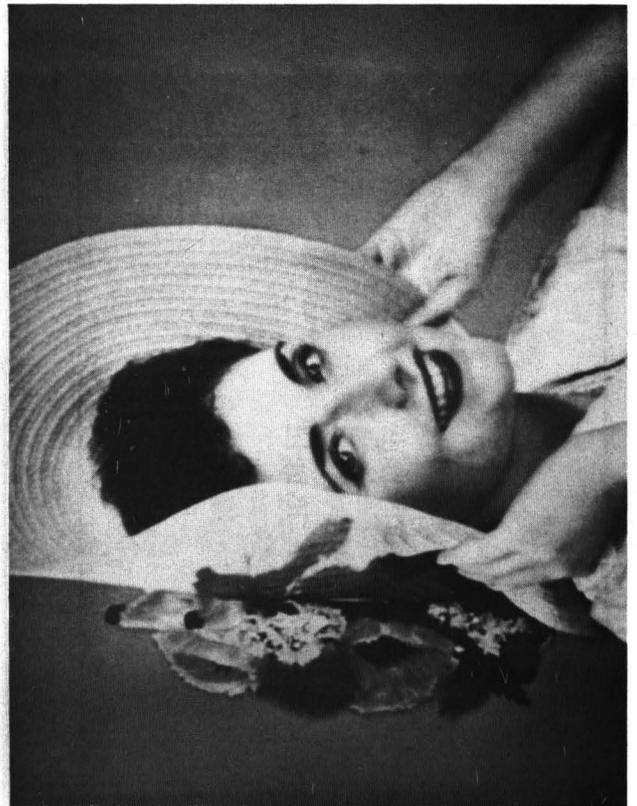
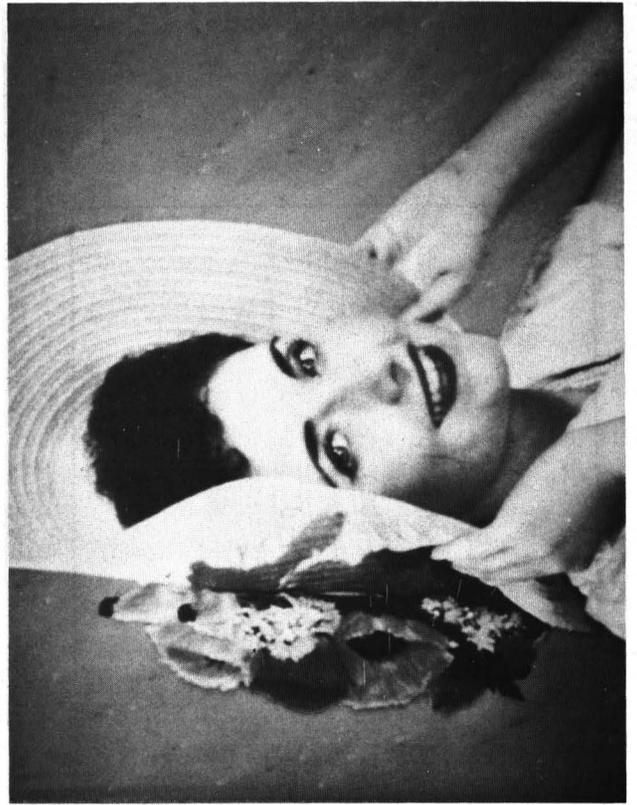
Quantisierer: s. links oben

Fehlerrate :  $5 \times 10^{-4}$

Kanalmodell : Symmetr. Binärkanal

DPCM-Coder : Hybrid

(vgl. auch nächste Seite)



Prädiktor :  $\hat{X} = 0.5(A+C)$

Quantisierer: 16 Stufen, 4 bit (Tab. 5.1 a)

Fehlerrate :  $5 \times 10^{-4}$  (nur Luminanzfehler)

Kanalmodell : Symmetr. Binärkanal

DPCM-Coder : Hybrid

Prädiktor :  $\hat{X} = A + 0.5(C-B)$

Quantisierer: gest., 3 Kennl. (Tab. 5.2)

Fehlerrate : } s. links oben

Kanalmodell : }

DPCM-Coder : Hybrid

Prädiktor :  $\hat{X} = A + 0.5(C-B)$

Quantisierer: } s. oben

Fehlerrate : }

Kanalmodell : }  
DPCM-Coder : Hybrid

Prädiktor :  $\hat{X} = A + 0.5(C-B)$

Quantisierer: 14 Stufen, ähnl. Tab. 5.1 a

Fehlerrate : } s. links oben

Kanalmodell : }

DPCM-Coder : Hybrid



Prädiktor :  $\hat{X} = A + 0.5(C-B)$   
Quantisierer: 16 Stufen, 4 bit (Tab. 5.1 a)  
Fehlerrate : Burstrate  $2 \times 10^{-5}$   
Kanalmodell : Symmetr. Binärkanal  
DPCM-Coder : Normal  
Burstlänge : 512 bit (fest)  
Burstsdichte : 0.5

Prädiktor : }  
Quantisierer: } s. oben links  
Fehlerrate : }  
Kanalmodell : }  
DPCM-Coder : Normal + Zeilenersetzung  
Burstlänge : }  
Burstsdichte : } s. oben links

Prädiktor : }  
Quantisierer: } s. oben  
Fehlerrate : }  
Kanalmodell : }  
DPCM-Coder : Hybrid  
Burstlänge : }  
Burstsdichte : } s. oben

Prädiktor : }  
Quantisierer: } s. oben links  
Fehlerrate : }  
Kanalmodell : }  
DPCM-Coder : Hybrid + Zeilenersetzung  
Burstlänge : }  
Burstsdichte : } s. oben links

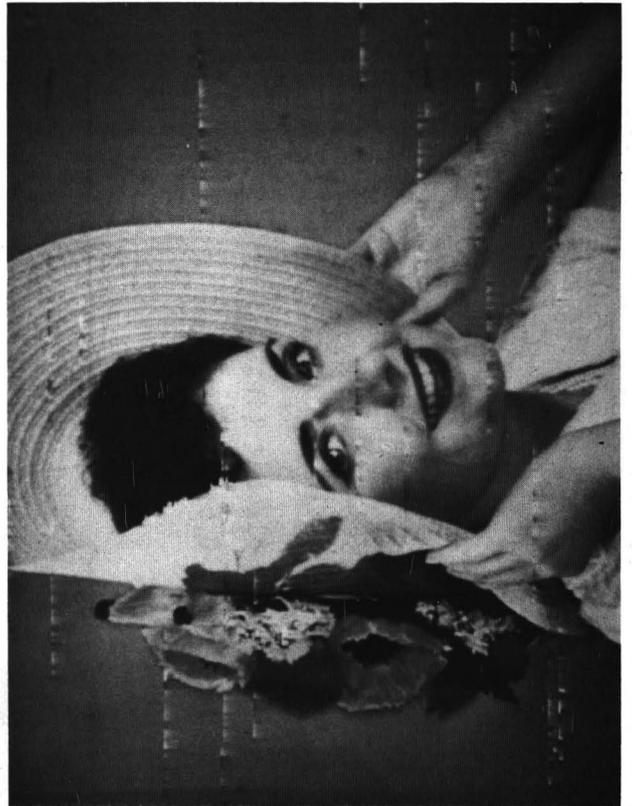
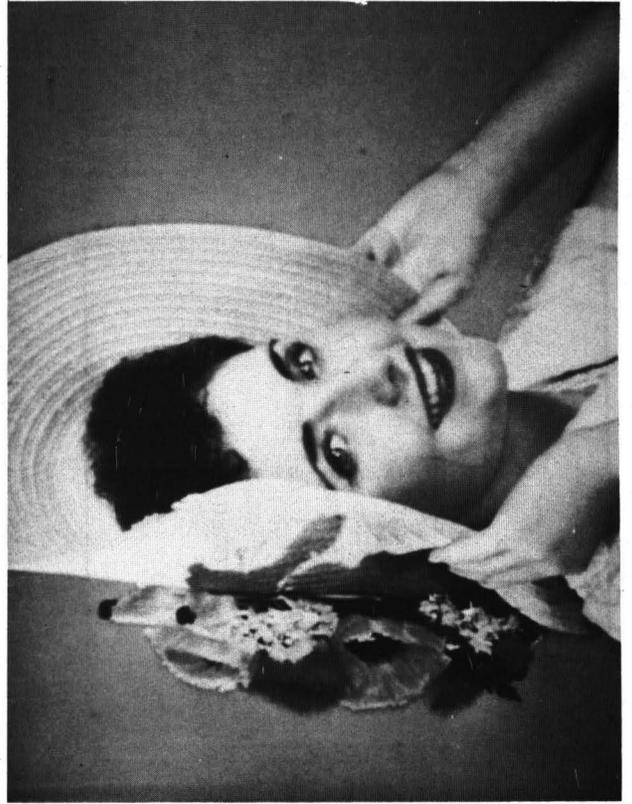


Prädiktor :  $\hat{X} = 0.75(A+C) - 0.5 B$   
 Quantisierer: 16 Stufen, 4 bit (Tab. 5.1 a)  
 Fehlerrate : Burstrate  $2 \times 10^{-5}$   
 Kanalmodell : Symmetr. Binärkanal  
 DPCM-Coder : Normal  
 Burstlänge : 512 bit (fest)  
 Burstdichte : 0.5

Prädiktor : }  
 Quantisierer: } s. oben links  
 Fehlerrate : }  
 Kanalmodell : }  
 DPCM-Coder : Normal+ Zeilenersetzung  
 Burstlänge : }  
 Burstdichte : } s. oben links

Prädiktor : }  
 Quantisierer: } s. oben  
 Fehlerrate : }  
 Kanalmodell : }  
 DPCM-Coder : Hybrid  
 Burstlänge : }  
 Burstdichte : } s. oben

Prädiktor : }  
 Quantisierer: } s. oben links  
 Fehlerrate : }  
 Kanalmodell : }  
 DPCM-Coder : Hybrid+ Zeilenersetzung  
 Burstlänge : }  
 Burstdichte : } s. oben links

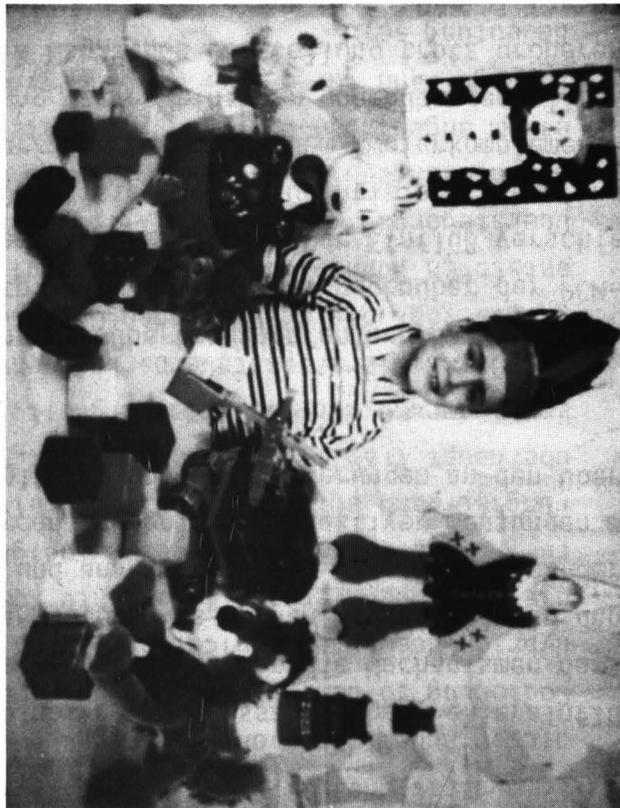
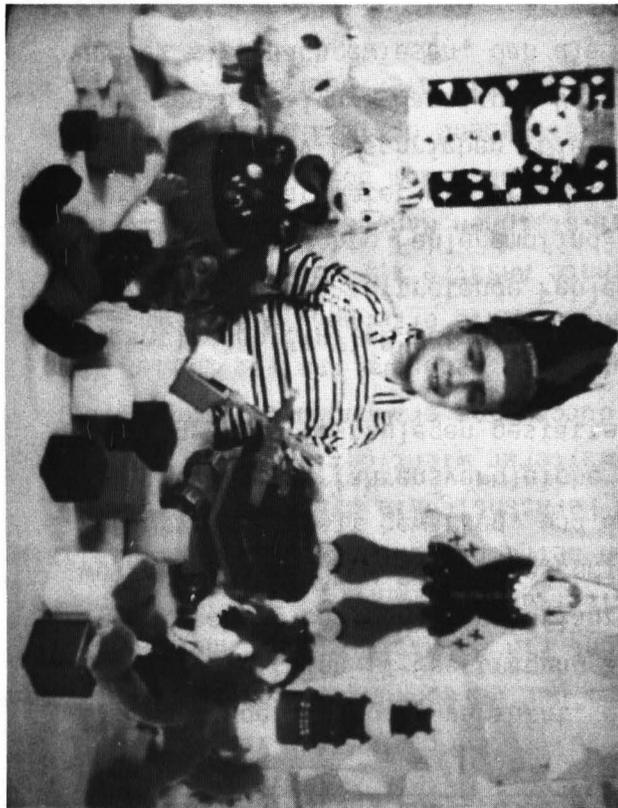
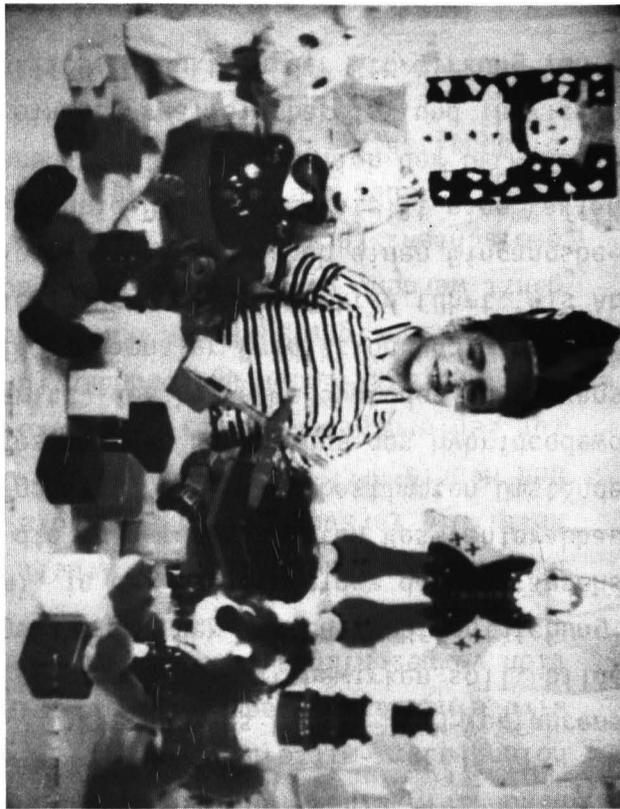
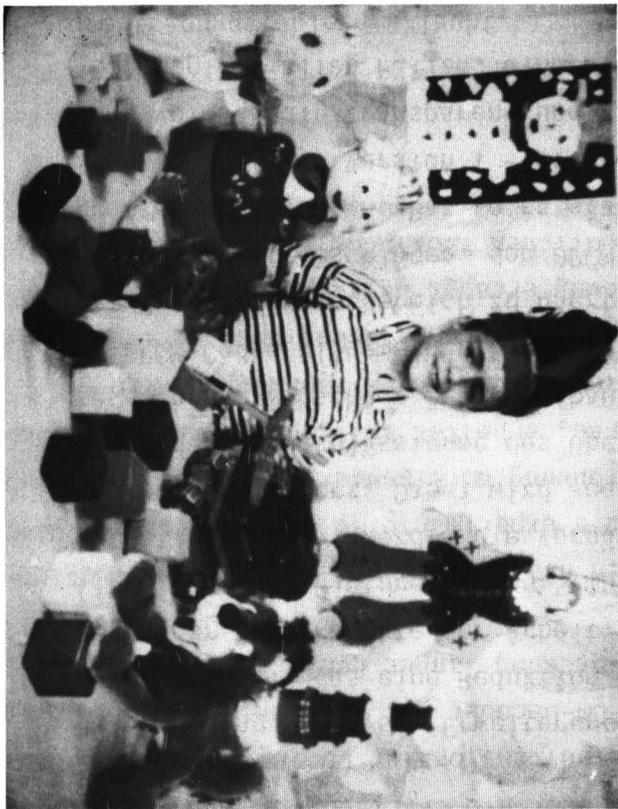


Prädiktor :  $\hat{X} = 0.75(A+C) - 0.5 B$   
Quantisierer: 16 Stufen, 4 bit (Tab. 5.1 a)  
Fehlerrate : Burstrate  $2 \times 10^{-5}$   
Kanalmmodell : Symmetr. Binärkanal  
DPCM-Coder : Hybrid  
Burstlänge : 512 bit (fest)  
Burstdichte : 0.5

Prädiktor :  $\hat{X} = A + 0.5(C-B)$   
Quantisierer: }  
Fehlerrate : } s. oben links  
Kanalmmodell : }  
DPCM-Coder : Normal + Zeilenersetzung  
Burstlänge : }  
Burstdichte : } s. oben links

Prädiktor : }  
Quantisierer: }  
Fehlerrate : } s. oben  
Kanalmmodell : }  
DPCM-Coder : }  
Burstlänge : 32 bit (fest)  
Burstdichte : 0.5

Prädiktor : }  
Quantisierer: }  
Fehlerrate : } s. oben  
Kanalmmodell : }  
DPCM-Coder : Hybrid+ Zeilenersetzung  
Burstlänge : }  
Burstdichte : } s. oben



## 9. Zusammenfassung und Schlußfolgerungen

Die vorliegende Arbeit versucht, einige notwendige Aussagen über Fehlereinflüsse bei der digitalen TV-Übertragung zu liefern. Dazu werden die Mechanismen der Fehlerentstehung und Fehlerfortpflanzung erläutert, es werden Modifikationen und Erweiterungen an DPCM-Codecs beschrieben und analysiert, die eine Reduktion der Fehlersichtbarkeit bewirken, und es werden Ergebnisse subjektiver Messungen mitgeteilt, die Verfahrensvergleiche ermöglichen und die Forderungen an den Übertragungskanal festzulegen gestatten.

Wesentlichen Einfluß auf die Störwirkung von Übertragungsfehlern hat die bei der DPCM-Decodierung auftretende Fehlerfortpflanzung, die eine gegenüber der PCM-Übertragung erhöhte Fehlerempfindlichkeit zur Folge hat. Der Einfluß verschiedener Codierparameter wie Prädiktion, Quantisierung und Quantisierersteuerung wird qualitativ beschrieben. Die Codewortzuordnung nach dem Zweierkomplement-Code und die Sign & Magnitude-Darstellung werden einander gegenübergestellt, und es wird nachgewiesen, daß die Sign & Magnitude Darstellung trotz größerer Maximalstörampplitude insgesamt eine geringere Störwirkung hat. Die bisher nicht erkannte Tatsache, daß Rundungsfehler des DPCM-Prädiktors sich auf die Fehlerfortpflanzung ungünstig auswirken, wird erläutert und Möglichkeiten zur Abhilfe werden angegeben.

Beschreibung, Analyse, Erweiterung und Optimierung des Hybrid-DPCM-Verfahrens nach van Buul, das eine Reduktion der Fehlersichtbarkeit bewirken soll, bilden einen der Schwerpunkte der Arbeit. Ausgehend von der ersten Veröffentlichung (1976, Vortrag Picture Coding Symposium), in der die Grundidee des Verfahrens mitgeteilt wurde, werden die Vorgänge, die zu dem erwünschten Restfehlerabbau führen, analysiert. Dabei wird auch aufgezeigt, daß unter bestimmten Umständen wegen der Vernachlässigung des Übertrages bei der Berechnung des Hybridcodewortes ein unerwünschter Fehleraufbau auftritt, der bei Anwendung des Verfahrens im DPCM-Codec allgemeiner Form mit zweidimensionaler Prädiktion und eingeschränktem Quantisierungsbereich zu unerträglichen Begrenzungseffekten führt. Als Abhilfe wird vorgeschlagen, den DPCM-Schleifenbegrenzer durch einen Eingangsbegrenzer zu ersetzen. Das so entstandene Hybrid-DPCM-System stellt eine Variante - bezeichnet als Version I - des Verfahrens dar, die bezüglich der DPCM-Codierung vollständig transparent und zudem einfach realisierbar ist und in vielen, jedoch nicht allen Fällen, eine beträchtliche Reduktion der Störwirkung von Übertragungsfehlern erlaubt.

In einer nachfolgenden Veröffentlichung von van Buul (1978, IEEE Transactions on Communications) wird das Hybrid-DPCM-Verfahren in einer veränderten Form - in dieser Arbeit Version II genannt - vorgestellt. Dort wird der Vorgang der DPCM-Codierung so beeinflusst, daß Überträge bei der Berechnung der zu übermittelnden Hybrid-Codeworte gar nicht entstehen können. Ein Nachteil dieser Anordnung ist die gegenüber Version I erhöhte Komplexität des Verfahrens, die insbesondere für höhere Verarbeitungsgeschwindigkeiten beträchtlichen zusätzlichen Realisierungsaufwand erfordert und für Breitband-Fernsehsignale die Realisierbarkeit überhaupt fraglich erscheinen läßt. Ein weiterer wichtiger Nachteil ist die Verminderung der Codiergenauigkeit, die durch eine erzwungene Einschränkung der Quantisiereraussteuerbarkeit entsteht. Eine genauere Analyse dieses Vorganges läßt die gravierenden Übersteuerungseffekte erkennen, die signalabhängig entstehen können. Zwei von van Buul erwähnte Ansätze zur Verminderung dieser Übersteuerung werden ebenfalls unter realistischen Randbedingungen analysiert, mit dem Ergebnis, daß insbesondere DPCM-Coder nach dem Bostelmann-Prinzip mit einem angepaßten Hybrid-DPCM-Zusatz sich weitgehend optimal verhalten. Diese Aussage kann für andere Anwendungsgebiete, als sie hier betrachtet werden, von Bedeutung sein.

Neben der Hybrid-DPCM bietet sich die Zeilenersetzung zur Reduktion der Störwirkung von Übertragungsfehlern an (Fehlerverdeckung). Sie setzt allerdings das Vorhandensein einer Fehlererkennung voraus. Über die Ersetzung durch Zeilenwiederholung oder -mittelung hinaus, die bei eindimensionaler Codierung möglich ist, wird eine Zeilenwiederholung auch für DPCM-Decoder mit zweidimensionaler Prädiktion vorgeschlagen, insbesondere zur Verdeckung langer Fehlerbursts.

Den zweiten Schwerpunkt der Arbeit bilden die Messungen der Fehlerempfindlichkeit. Die Versuchseinrichtung, die für die experimentelle Untersuchung der DPCM- und Hybrid-DPCM-Codierung und die Durchführung umfassender subjektiver MeBreihen zur Fehlerempfindlichkeit entwickelt wurde, arbeitet vollständig im Real-Time-Betrieb. DPCM-Coder und -Decoder für Luminanz- und Chrominanzkomponenten des Farbfernsehsignals können durch die Hybrid-DPCM-Erweiterung nach Version I ergänzt werden. Die digitale Kanalnachbildung erzeugt beliebige Fehlerraten bei gemischten Störstrukturen und unterschiedlichen Kanalmodellen. Ein Betrachtungsplatz erlaubt die Einhaltung der Empfehlungen des CCIR für die Beurteilung der Bildqualität.

Die Ergebnisse der subjektiven Untersuchungsreihen sind in Form von Sichtbarkeitskurven dargestellt, in denen die Bildqualität über der Fehlerrate aufgetragen ist. Eine Charakterisierung jeder einzelnen Meßkurve durch zwei Kennwerte wird zusätzlich angegeben. Bei den verschiedenen untersuchten Verfahren unterscheiden sich die Fehlerraten, die zu einer Qualitätsbeurteilung "gut - sehr gut" führen, um bis zu 4 Zehnerpotenzen. Weiterhin bewegt sich die Qualitätsverminderung durch Erhöhen der Fehlerrate um den Faktor 10 bei den einzelnen Verfahren zwischen 1 und 2 Qualitätsnoten (im Bereich maximaler Änderung).

Einige wesentliche Einzelaussagen, die sich aus den subjektiven Meßreihen ergeben, lassen sich wie folgt aufzählen: Beschreibt man Unterschiede in der Fehlerempfindlichkeit verschiedener Verfahren durch die Unterschiedlichkeit der Fehlerraten für jeweils gleiche Qualitätsurteile, so erstreckt sich der Bereich für die üblichen Prädiktoren und Quantisierer bei der Codierung der Luminanzkomponente über den Faktor 20 ... 50. Chrominanzfehler sind bei gleicher Codierung um den Faktor 4 ... 8 weniger sichtbar als Luminanzfehler. Die Verwendung der Hybrid-DPCM (Version I) bringt in einigen Fällen Verbesserungen um den Faktor 10 ... 100, in anderen Fällen keine Verbesserung. Die gesteuerte Quantisierung in Verbindung mit der Hybrid-DPCM ergibt eine besonders günstige Kombination. Zusätzliche Verbesserungen ca. um den Faktor 20 erreicht man durch den Verzicht auf 2 der 16 Quantisiererstufen. Die Verwendung der 16-Stufen-Amplitudenmodulation in Verbindung mit 4 bit-DPCM ergibt u.U. eine extrem geringe Fehlersichtbarkeit mit zulässigen Fehlerraten  $>10^{-4}$ . Die besonders hohe Störwirkung von langen Fehlerbursts läßt sich auch bei 2-dimensionaler Prädiktion durch Zeilenersetzungsmaßnahmen, z.T. in Kombination mit der Hybrid-DPCM, um den Faktor  $\sim 10$  verbessern. Einige Ergebnisse lassen vermuten, daß die Fehlersichtbarkeit von der Abtastfrequenz praktisch vollständig unabhängig ist.

Die dargestellten Ergebnisse stellen nur eine Auswahl der insgesamt durchgeführten Meßreihen dar. Darüberhinaus ist eine Reihe weiterer Kombinationsmöglichkeiten denkbar, deren Untersuchung interessant wäre.

Die vergleichende Beurteilung der Hybrid-DPCM (Version II), die mit dem Experimentalsystem noch nicht möglich ist, könnte interessante Ergebnisse für stärker gestörte Kanäle ohne Fehlerkorrektur erbringen.

In einer nachfolgenden Veröffentlichung von van Buul (1978, IEEE Transactions on Communications) wird das Hybrid-DPCM-Verfahren in einer veränderten Form - in dieser Arbeit Version II genannt - vorgestellt. Dort wird der Vorgang der DPCM-Codierung so beeinflusst, daß Überträge bei der Berechnung der zu übermittelnden Hybrid-Codeworte gar nicht entstehen können. Ein Nachteil dieser Anordnung ist die gegenüber Version I erhöhte Komplexität des Verfahrens, die insbesondere für höhere Verarbeitungsgeschwindigkeiten beträchtlichen zusätzlichen Realisierungsaufwand erfordert und für Breitband-Fernsehsignale die Realisierbarkeit überhaupt fraglich erscheinen läßt. Ein weiterer wichtiger Nachteil ist die Verminderung der Codiergenauigkeit, die durch eine erzwungene Einschränkung der Quantisiereraussteuerbarkeit entsteht. Eine genauere Analyse dieses Vorganges läßt die gravierenden Übersteuerungseffekte erkennen, die signalabhängig entstehen können. Zwei von van Buul erwähnte Ansätze zur Verminderung dieser Übersteuerung werden ebenfalls unter realistischen Randbedingungen analysiert, mit dem Ergebnis, daß insbesondere DPCM-Coder nach dem Bostelmann-Prinzip mit einem angepaßten Hybrid-DPCM-Zusatz sich weitgehend optimal verhalten. Diese Aussage kann für andere Anwendungsgebiete, als sie hier betrachtet werden, von Bedeutung sein.

Neben der Hybrid-DPCM bietet sich die Zeilenersetzung zur Reduktion der Störwirkung von Übertragungsfehlern an (Fehlerverdeckung). Sie setzt allerdings das Vorhandensein einer Fehlererkennung voraus. Über die Ersetzung durch Zeilenwiederholung oder -mittelung hinaus, die bei eindimensionaler Codierung möglich ist, wird eine Zeilenwiederholung auch für DPCM-Decoder mit zweidimensionaler Prädiktion vorgeschlagen, insbesondere zur Verdeckung langer Fehlerbursts.

Den zweiten Schwerpunkt der Arbeit bilden die Messungen der Fehlerempfindlichkeit. Die Versuchseinrichtung, die für die experimentelle Untersuchung der DPCM- und Hybrid-DPCM-Codierung und die Durchführung umfassender subjektiver Meßreihen zur Fehlerempfindlichkeit entwickelt wurde, arbeitet vollständig im Real-Time-Betrieb. DPCM-Coder und -Decoder für Luminanz- und Chrominanzkomponenten des Farbfernsehsignals können durch die Hybrid-DPCM-Erweiterung nach Version I ergänzt werden. Die digitale Kanalnachbildung erzeugt beliebige Fehlerraten bei gemischten Störstrukturen und unterschiedlichen Kanalmodellen. Ein Betrachtungsplatz erlaubt die Einhaltung der Empfehlungen des CCIR für die Beurteilung der Bildqualität.

Die Ergebnisse der subjektiven Untersuchungsreihen sind in Form von Sichtbarkeitskurven dargestellt, in denen die Bildqualität über der Fehlerrate aufgetragen ist. Eine Charakterisierung jeder einzelnen Meßkurve durch zwei Kennwerte wird zusätzlich angegeben. Bei den verschiedenen untersuchten Verfahren unterscheiden sich die Fehlerraten, die zu einer Qualitätsbeurteilung "gut - sehr gut" führen, um bis zu 4 Zehnerpotenzen. Weiterhin bewegt sich die Qualitätsverminderung durch Erhöhen der Fehlerrate um den Faktor 10 bei den einzelnen Verfahren zwischen 1 und 2 Qualitätsnoten (im Bereich maximaler Änderung).

Einige wesentliche Einzelaussagen, die sich aus den subjektiven Meßreihen ergeben, lassen sich wie folgt aufzählen: Beschreibt man Unterschiede in der Fehlerempfindlichkeit verschiedener Verfahren durch die Unterschiedlichkeit der Fehlerraten für jeweils gleiche Qualitätsurteile, so erstreckt sich der Bereich für die üblichen Prädiktoren und Quantisierer bei der Codierung der Luminanzkomponente über den Faktor 20 ... 50. Chrominanzfehler sind bei gleicher Codierung um den Faktor 4 ... 8 weniger sichtbar als Luminanzfehler. Die Verwendung der Hybrid-DPCM (Version I) bringt in einigen Fällen Verbesserungen um den Faktor 10 ... 100, in anderen Fällen keine Verbesserung. Die gesteuerte Quantisierung in Verbindung mit der Hybrid-DPCM ergibt eine besonders günstige Kombination. Zusätzliche Verbesserungen ca. um den Faktor 20 erreicht man durch den Verzicht auf 2 der 16 Quantisiererstufen. Die Verwendung der 16-Stufen-Amplitudenmodulation in Verbindung mit 4 bit-DPCM ergibt u.U. eine extrem geringe Fehlersichtbarkeit mit zulässigen Fehlerraten  $> 10^{-4}$ . Die besonders hohe Störwirkung von langen Fehlerbursts läßt sich auch bei 2-dimensionaler Prädiktion durch Zeileneretzungsmaßnahmen, z.T. in Kombination mit der Hybrid-DPCM, um den Faktor  $\sim 10$  verbessern. Einige Ergebnisse lassen vermuten, daß die Fehlersichtbarkeit von der Abtastfrequenz praktisch vollständig unabhängig ist.

Die dargestellten Ergebnisse stellen nur eine Auswahl der insgesamt durchgeführten Meßreihen dar. Darüberhinaus ist eine Reihe weiterer Kombinationsmöglichkeiten denkbar, deren Untersuchung interessant wäre.

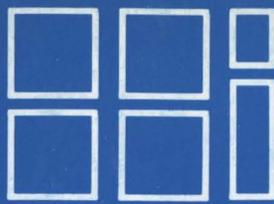
Die vergleichende Beurteilung der Hybrid-DPCM (Version II), die mit dem Experimentalsystem noch nicht möglich ist, könnte interessante Ergebnisse für stärker gestörte Kanäle ohne Fehlerkorrektur erbringen.

Eine Systematisierung der Aussagen zur Fehlerempfindlichkeit und die damit verbundene Möglichkeit ihrer Voraussage für neuentwickelte Codierverfahren erscheint aufgrund der vorliegenden Ergebnisse und der komplexen stochastischen Abhängigkeiten als nicht möglich. Es müssen deshalb von Fall zu Fall jeweils erneut subjektive Messungen mit Hilfe von Experimentalaufbauten oder Simulationen durchgeführt werden. Dies dürfte spätestens dann notwendig werden, wenn konkrete Vorschläge für Codierverfahren zur Standardisierung vorzuschlagen sind, und wenn genauere Aussagen über Fehlerraten und -strukturen der zu verwendenden Übertragungskanäle vorliegen.

## 10. Literaturangaben

- /1.1/ Heitmann, J.: "Ein systemkompatibles digitales Farbfernsehsignal", Rundfunktechnische Mitteilungen, Bd. 20, Nr. 6 (Dezember 1976), S. 236 ... 241
- /-.-/ Hausdörfer, M. und Heitmann, J.: "Zwischenberichte zum BMFT-Vorhaben NT 417a", 1973-1976
- /1.2/ Weston, M.: "A PAL/YUV Digital System for 625-Line International Connections", BBC Research Department Report No. 1976/24
- /1.3/ Wengenroth, G.: "Berichte über die Arbeiten des FI der DBP zur Codierung von Farbfernsehsignalen", Projektausschuß "Bildkompression", 1973 ... 1976
- /1.4/ Wengenroth, G. und Wendt, H.: "Die optimale Bandbreite für Leuchtdichte- und Farbdifferenzsignale", Fernseh- und Kinotechnik, Bd. 31, Nr. 11 (November 1977), S. 393 ... 397
- /1.5/ O'Neal, J.B.: "Predictive Quantizing Systems (Differential Pulse Code Modulation) for the Transmission of Television Signals", BSTJ Vol. 45 (1966), pp. 689 ... 721
- /1.6/ Candy, J.C. and Bosworth, R.H.: "Methods for Designing Differential Quantizers Based on Subjective Evaluations of Edge Busyness", BSTJ Vol. 51, No. 7, September 1972, pp. 1495 ... 1516
- /1.7/ Thoma, W.: "Optimizing the DPCM for Video Signals Using a Model of the Human Visual System", Proc. International Zürich Seminar 1974, pp. 3.1 ... 3.7
- /1.8/ Pirsch, P. und Stenger, L.: "Statistical Analysis and Coding of Colour Video Signals", Acta Electronica, Vol. 19, No. 4 (1976), pp. 277 - 287
- /1.9/ Habibi, A.: "Comparison of Nth-Order DPCM Encoder with Linear Transformations and Block Quantization Techniques", IEEE Trans. COM 19, No. 6 (1971), pp. 948 - 956
- /1.10/ Max, J.: "Quantizing for Minimum Distortion", IRE Trans IT-6 (1960), pp. 7 - 12
- /1.11/ Musmann, H.G. und Erdmann, W.D.: "Verfahren zum Übertragen von Bildsignalen mit Hilfe der DPCM und gesteuertem Quantisierer", Patentanmeldung P 2740945.6 vom 10.9.1977
- /-.-./ Erdmann, W.D.: "Ein an die Wahrnehmungseigenschaften des menschlichen Auges angepaßter, gesteuerter Quantisierer für Bildsignale", Dissertation, TU Hannover, 1977
- /1.12/ Stenger, L.: "Eine an die Wahrnehmungseigenschaften des Auges angepaßte Pulscodemodulation der TV-Chrominanzsignale", Der Fernmelde-Ingenieur, Bd. 32, Nr. 4, April 1978
- /1.13/ Musmann, H.G.: "Codierung von Videosignalen", NTZ, Band 24, Februar 1971, S. 114 - 116

- /1.14/ Bostelmann, G.: "A Simple High Quality DPCM Codec for Video Telephony Using 8 Mbit per Second", NTZ, Band 27, März 1974, S. 115 - 117
- /1.15/ Kummerow, Th.: "Ein DPCM-System mit zweidimensionalem Prädiktor und gesteuertem Quantisierer", NTG-Tagungsband Signalverarbeitung, April 1973, S. 425 - 439
- /1.16/ Kummerow, Th.: "Statistics for Efficient Linear and Non-Linear Picture Encoding", Proc. International Telemetering Conference, Vol. VIII, Oct. 1972, pp. 149 - 161
- /1.17/ Kummerow, Th.: "Improving DPCM Picture Coding by Adaptive Quantizer Switching", Vortrag, Picture Coding Symposium, August 1974, Goslar
- /1.18/ In der Smitten, F.: "Informationsreduzierende Quellencodierung von Farbsignalen auf der Basis optischer Valenzklassen", NTZ, Band 27, Mai 1974, S. 176 - 181
- /1.19/ Jaeger, P.A.: "Die optimale Amplituden-Quantisierung von Farbinformation", Dissertation, ETH Zürich, 1974
- /1.20/ Stenger, L.: "Die Pulscodemodulation der Chrominanzsignale des Farbfernsehens", Dissertation, TU Hannover, 1977
- /1.21/ Lippmann, R. und Jung, P.: "Error Response of DPCM-Decoders", NTZ, Band 28, Dezember 1975, S. 431 - 436
- /1.22/ Kitchen, J.A. et al.: "Subjective Effects of DPCM Errors and Predictor Leak on Visual Telephone Pictures", Proc. IEE (Engl.), Vol. 124, No. 9, September 1977, pp. 737 ... 742
- /1.23/ Heitmann, J.: "Separate DPCM Encoding of TV Signals of the European Color Standards", Vortrag, Picture Coding Symposium, Jan. 1976, Asilomar, Ca., USA
- /1.24/ van Buul, M.C.W.: "Hybrid D-PCM, a Combination of PCM and DPCM", Vortrag, Picture Coding Symposium, Jan. 1976, Asilomar, Ca., USA
- /1.25/ van Buul, M.C.W.: "Hybrid D-PCM, a Combination of PCM and DPCM", IEEE Trans. COM, Vol. 26, March 1978, pp. 362 - 368
- /1.26/ Lippmann, R.: "A Technique for Channel Error Correction in DPCM Picture Transmission", Proc. ICC, June 1973, pp. 48 - 12 ... 48 - 16
- /1.27/ Prosser, R.D. et al.: "Quality Grading of Impaired Television Pictures", Proc. IEE, Vol. 111, March 1964, pp. 491 - 502
- /1.28/ Golomb, S.W.: "Shift Register Sequences", Holden-Day, San Francisco, 1967
- /1.29/ CCIR, Section 11 C: "Method for the Subjective Assessment of the Quality of Television Pictures", Recommendation 500, 1974
- /1.30/ Pirsch, P.: "New Predictor Design for DPCM Coding of Television Signals", 1979 Picture Coding Symposium, Ipswich, England
- /1.31/ Stammnitz, P.: "Error Protection of 34 Mbit/s DPCM Encoded Television Signals with Multiple Error Correcting BCH Codes" Proc. Int'l. Zürich Seminar, März 1980



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

