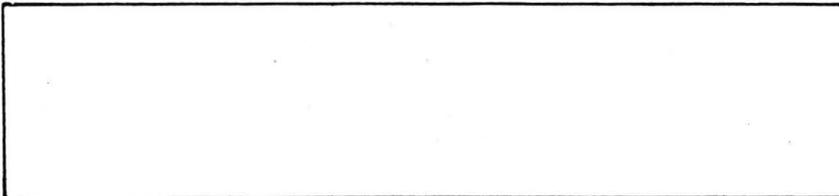


**Heinrich-Hertz-Institut
für Nachrichtentechnik
Berlin GmbH**

TECHNISCHER BERICHT NR. 222

**Bitfehleranalyse in einem
Breitbandkommunikationssystem
mit optischer Übertragung**



TECHNISCHER BERICHT NR. 222

Bitfehleranalyse in einem
Breitbandkommunikationssystem
mit optischer Übertragung

von

(Dr.-Ing. Thomas Hermes) (Bernd Hoen) (Dipl.-Ing. Fred Schmidt)

Oktober 1983

Bitfehleranalyse in einem Breitbandkommunikationssystem
mit optischer Übertragung

Inhaltsangabe

Im Heinrich-Hertz-Institut wurde in den Jahren 1976 - 1981 ein komplexes Experimentalsystem installiert, in dem u.a. hoch-ratige digitale optische Breitbandübertragung mit 280 Mbit/s bis hin zum Teilnehmer Einsatz findet.

In einer nachfolgenden zweijährigen Dauerbetriebsphase wurden umfangreiche Messungen der Bitfehlerrate vorgenommen, da durch diese im wesentlichen die Qualität des Nachrichtensystems bestimmt wird. Hierbei wurde die Häufigkeit des Auftretens von Bitfehlern über einen Zeitraum von mehr als 1400 Betriebsstunden registriert. Eine darüber hinaus durchgeführte Fehlerstrukturanalyse ergab Hinweise auf fehlerverursachende Systemteile.

Schließlich wurden neue Verfahren zur Fehlerlokalisierung entwickelt und erprobt, die besonders auch beim Betrieb von Systemen mit dezentraler Vermittlung wichtig sind.

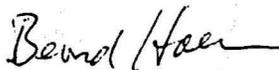
Um mögliche Auswirkungen bestehender Verbindungen auf die Bitfehlerrate ermitteln zu können, wurde während des Systembetriebes gemessen. Da es für die vorgenannten Untersuchungen keine käuflichen Meßgeräte gibt, mußten neue Geräte entwickelt und aufgebaut werden.

Der Bericht beschreibt zunächst das Experimentalsystem. Danach werden die unterschiedlichen Prinzipien von Bitfehlermessungen erläutert und ähnliche, aus Veröffentlichungen bekannte Messungen dargestellt. Als Ergebnis der folgenden Festlegungen des Meßumfangs ergeben sich die Anforderungen an die Meßapparatur, deren Aufbau und Wirkungsweise in einem weiteren Abschnitt beschrieben werden. Schließlich wird ausführlich über die Ergebnisse der Messungen berichtet.

Bearbeiter



(Dr.-Ing. Thomas Hermes)

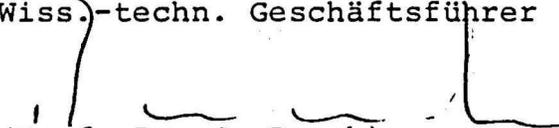


(Bernd Hoen)



(Dipl.-Ing. Fred Schmidt)

Wiss.-techn. Geschäftsführer


(Prof. Dr. C. Baack)

Abteilungsleiter



(G. Heydt)

Inhaltsverzeichnis

Seite

Abbildungsverzeichnis	1
Abkürzungsverzeichnis	2
1. Das System	3
1.1 Der Vermittlungsvorgang	6
1.2 Die Teilnehmerstationen	8
2. Prinzip bekannter Fehlerratenmessungen	10
2.1 Messung an einzelnen Versuchsstrecken	12
2.2 Messung während des laufenden Systembetriebes	12
3. Anforderungen an die Meßgeräte	13
4. Realisierung der Meßgeräte	15
4.1 Fehlerraten-Meßsender	18
4.2 Fehlerraten-Meßempfänger	19
4.3 Meßwertverarbeitung und -registrierung	20
5. Meßergebnisse	23
6. Zusammenfassung	32
Literaturverzeichnis	34

Abbildungsverzeichnis

Bild Nr.	Benennung	Seite
1	Das Experimentalsystem	4
2	Zeitmultiplex-Rahmen der 280 Mbit/s Teilnehmerschleife	6
3	Zeitplatz-Format	7
4	Teilnehmerstation für 280 Mbit/s	9
5	Prinzip des Fehlerratenmessers	11
6	Schema der Messung	15
7	Prinzip der Fehlermeßeinrichtungen	17
8	Fehlersummen-Registrierung	21
9	Fehlerstruktur-Registrierung	22
10	Summenhäufigkeit der Fehlerrate	24
11	Fehlerratenmessung vom 4.6.82	25
12	Fehlerratenmessung vom 27.7.-2.8.82	26
13	Ausschnitt aus der Fehlerstruktur	27
14	Fehlerratenmessung an der 140 Mbit/s-Teilnehmerschleife	29
Tabelle 1	Dienste im digitalen Breitbandnetz mit dezentraler Vermittlung	3

Abkürzungsverzeichnis

AMI	Alternate Mark Inversion Code
BER	Bit Error Rate
CCIR	Comite Consultatif International des Radiocommunications
CCITT	Comite Consultatif International Telephonique et Telegraphique
CNET	Centre National des Etudes Telecommunications
DPCM	Differential Pulse Code Modulation
ECL	Emitter-coupled Logic
FAS	Frame Alignment Signal
HDB3	High Density Bipolar 3 Code
HF	Hochfrequenz
IKB	Informationskennbit
LS-TTL	Low Power Schottky Transistor-Transistor-Logic
µP	Mikroprozessor
B6ZS	Pseudo-Ternary Code /15/
PAS	Prüf- und Auswertesystem
PCM	Pulse Code Modulation
RD	Rechner-Dienstkanal
RR	Rechner-Rückkanal
TS	Teilnehmerstation
VFE	Vorfeldeinrichtung
ZE	Zentrale Einheit
5B6B	Blockcode /16/

1. Das System

In den Jahren 1976 - 1981 wurde im Heinrich-Hertz-Institut ein Experimentalsystem aufgebaut, in dem digitale und analoge optische Breitbandübertragung, dezentrale und zentrale Vermittlung, Dienstintegration, zentrale Überwachung und Überleitung zwischen unterschiedlichen Teilnetzen innerhalb eines komplexen Gesamtsystems Anwendung finden /1/.

Mit der Konzipierung des Systems wurde im Jahre 1974 begonnen. Es entstand unter der Federführung des Heinrich-Hertz-Instituts in Zusammenarbeit mit sechs Firmen der deutschen Industrie.

Das Experimentalsystem setzt sich im wesentlichen aus einem analogen und einem digitalen Netz zusammen (Bild 1), die kompatibel miteinander verbunden sind und die beide dem Teilnehmer die Dienste Fernsprechen, Datenverkehr, Bildfernsprechen sowie TV- und Hörfunkverteilung gestatten (Tabelle 1).

Dienst	Bandbreite	Art der Wandlung	Abtastrate	Übertragungsr- rate	Zahl der Zeit- plätze/Rahmen
Farb TV	5,5 MHz	Hybride DPCM (4 Bit)	12,288 MHz Lum. und 4,096 MHz Chr.	65,536 Mbit/s	1024
Bildfern- sprechen	5,5 MHz	Hybride DPCM (4 Bit)	12,288 MHz Lum. und (4,096 MHz Chr.)	65,536 Mbit/s 49,152 Mbit/s	1024 (280. System) 768 (140. System)
Fern- sprechen	3,4 kHz	Deltamod.	64 kHz	64 kbit/s	1
Stereo- Rundfunk- Verteilg.	15 kHz	PCM	32 kHz/Kanal	1,024 Mbit/s	16
Daten	1,2 kbit/s 9,6 kbit/s	-	64 kHz	64 kbit/s	1

Tabelle 1: Dienste im digitalen Breitbandnetz mit dezentraler Vermittlung

Das digitale Netz besteht aus einzelnen Teilnehmerschleifen mit Übertragungsraten von 10 Mbit/s /2/, 17 Mbit/s /3/, 140 Mbit/s /4/ und 280 Mbit/s /5/. Die Teilnehmerschleifen sind über eine Ortstrasse (4 x 280 Mbit/s) und eine sogenannte Ferntrasse (2 x 560 Mbit/s) /6/ miteinander verbunden.

Während im analogen Netz die herkömmliche zentrale Vermittlung in einem Sternnetz eingesetzt wird, findet im digitalen System ausschließlich die dezentrale Vermittlung Anwendung.

Das Prinzip der dezentralen Vermittlung ist im wesentlichen dadurch gekennzeichnet, daß

- jeder Teilnehmer den Gesamtverkehr seiner Netzebene empfängt und
- die Teilnehmerstation autonom die Vermittlungsfunktionen wahrnimmt, ohne daß es einer Zentrale bedarf.

Im Experimentalsystem wurde die dezentrale Vermittlung in einer einzigen Netzebene nur für Schmalbanddienste (64 kbit/s) realisiert. Bei einer Bewegtbildübertragung mit etwa 65 Mbit/s ist die dezentrale Vermittlung in einer Hierarchieebene nur beschränkt möglich, da der Gesamtverkehr des gemeinsamen Übertragungspfades aufgrund der maximalen Taktrate heutiger integrierter Bauelemente (ECL) die Größenordnung von 300 Mbit/s nicht überschreiten soll. Im Experimentalsystem wurden für die Bewegtbildübertragung (Bildfernsprechen) daher am Übergang der breitbandigen Teilnehmerschleifen zur Ortstrasse als dezentrale Vorvermittlungen sogenannte Vorfeldeinrichtungen (VFE) /7/ installiert, die nur die Video-Information für die Teilnehmer der nachfolgenden Teilnehmerschleife auskoppeln. Bezogen auf die Breitbanddienste bedeutet dies also ein Zwei-Ebenen-Netz mit dezentraler Vermittlung.

1.1 Der Vermittlungsvorgang

Bei dem digitalen Netz handelt es sich um ein vollsynchrones Zeitmultiplexsystem mit Zeitplätzen zu 34 Bit und 500 μ s Zeitrahmendauer. Der Zeitmultiplexrahmen (Bild 2) besteht aus 4096 Zeitplätzen, die in 4 Unterrahmen (Spalten) zusammengefaßt werden. Spalte 1 ist für die Schmalbanddienste und maximal 32 Hörfunkkanäle reserviert, in Spalte 2 wird ein Verteil-TV-Programm eingespeist und die Spalten 3 und 4 werden für Dialog-Bewegtbildübertragung verwendet.

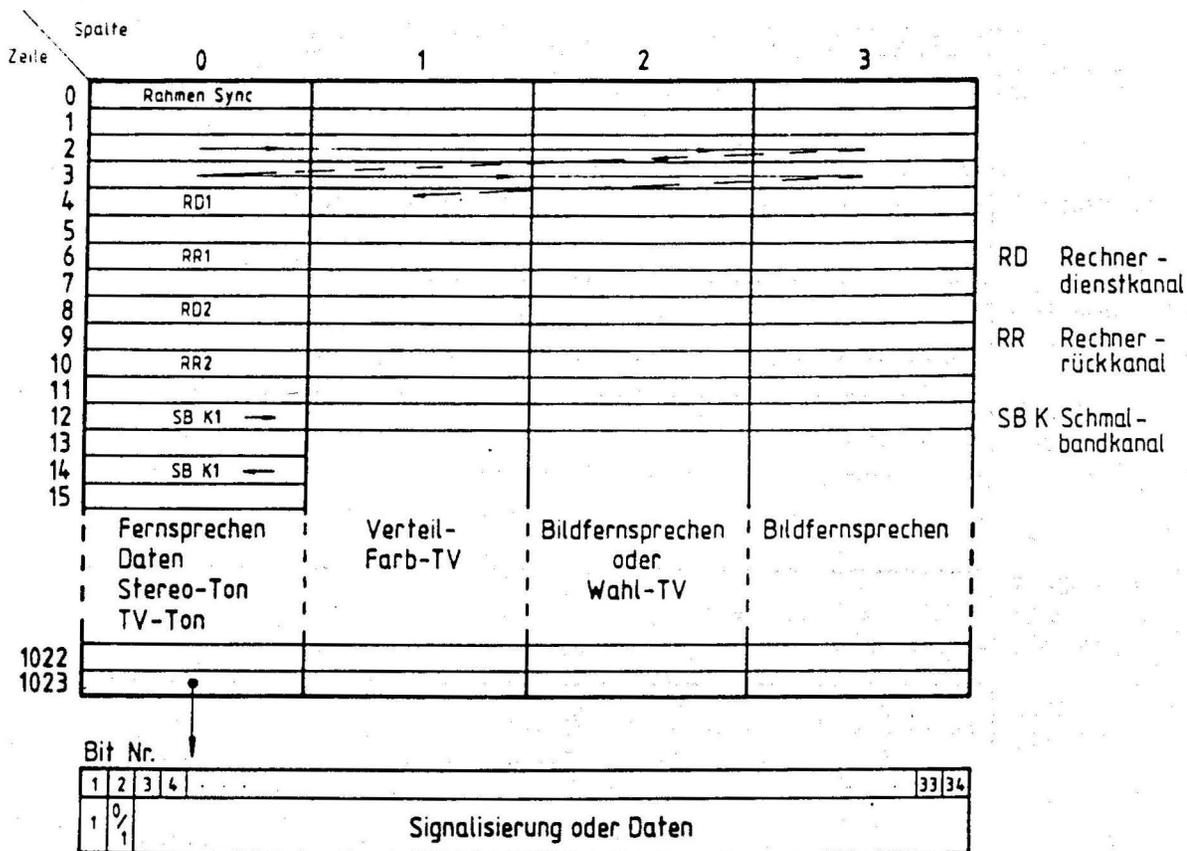


Bild 2 : Zeitmultiplex-Rahmen 280 Mbit/s (Teilnehmerschleife)

Ein Zeitplatz (Bild 3) besteht zunächst aus einem festen Synchronisier-Bit und einem Kennbit (IKB), das die verbleibenden 32 Bit als Signalisier- oder Gesprächsdaten kennzeichnet. Die 32 Nutzbit ergeben bei einer Zeitrahmen-Wiederholrfrequenz von 2 kHz einen 64 kbit/s-Kanal.

Für den Verbindungsaufbau wird der gleiche Zeitplatz wie für den Gesprächsdatenaustausch verwendet (in-slot-Signalisierung), zur Unterscheidung dient das 2. Bit des Zeitplatzes (IKB).

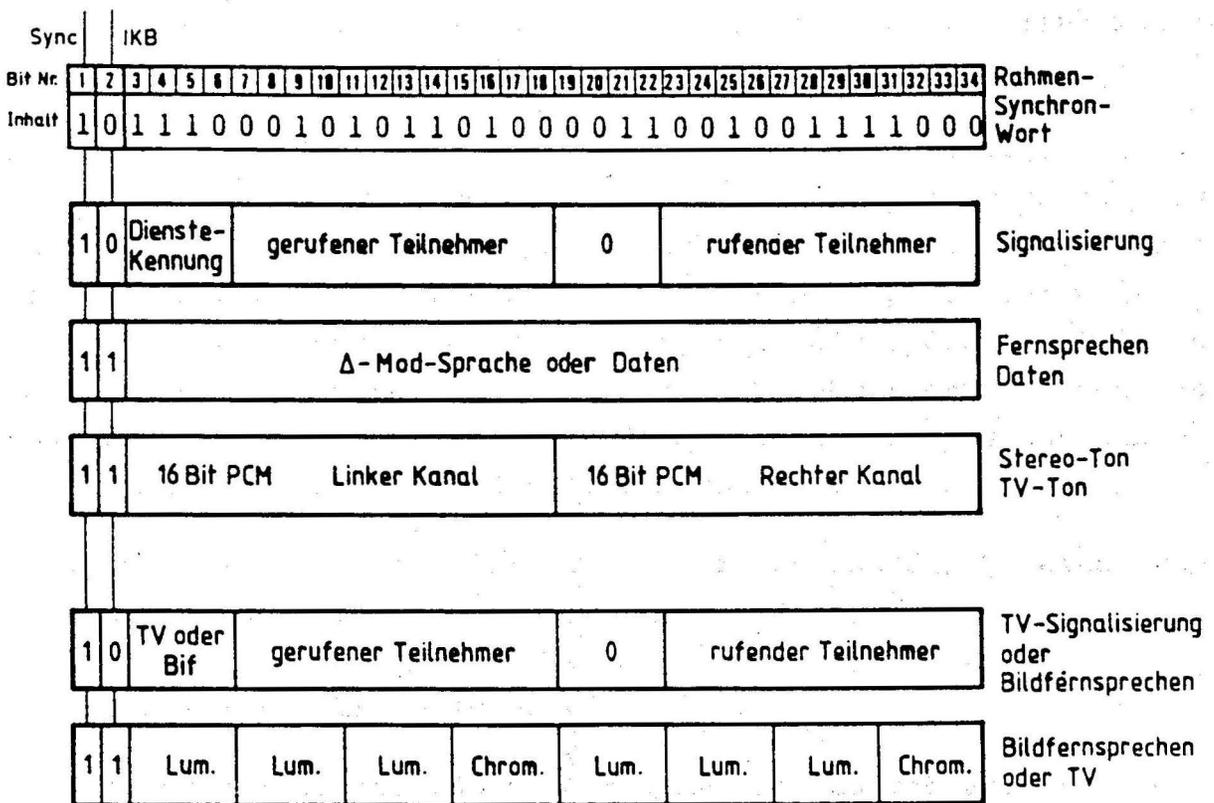


Bild 3: Zeitplatz - Format

Ein Verbindungsaufbau im System mit dezentraler Vermittlung beginnt zunächst damit, daß der rufende Teilnehmer A einen unbelegten Zeitplatz sucht, ihn mehrfach überprüft (um Kollisionen zu erkennen, werden hier Majoritätsprüfungen vorgenommen) und dann mit seiner Rufsignalisierung belegt. Diese besteht aus einer Spezifikation des gewünschten Dienstes (Dienstekennung), der Zieladresse (B) sowie der eigenen Absenderadresse (A) (Bild 3).

Sämtliche Teilnehmerstationen überwachen den Datenfluß auf für sie bestimmte Rufe. Erkennt der gerufene Teilnehmer (B) einen Ruf, wird die Zeitplatz-Nummer registriert und auf einem zugeordneten Zeitplatz eine Quittung, die aus Dienstekennung und den vertauschten Absender- und Zieladressen besteht, zurückgesandt (Bild 3). Damit liegt die Zeitlage für beide Teilnehmer für die Dauer der Verbindung fest.

Bei besetztem oder nicht vorhandenem Teilnehmer erfolgt ein Rufabbruch nach 800 ms (time out). Der Übergang in den Gesprächszustand erfolgt durch Wechsel des Kennbits bei Gerufenem und Rufendem, die Signalisierungsinformation wird durch Gesprächsdaten ersetzt (Bild 3). Der Gesprächsabbruch erfolgt dadurch, daß ein Teilnehmer das Senden einstellt. Der andere Teilnehmer erkennt den nunmehr freigewordenen Zeitplatz und stellt seinerseits das Senden ein. Damit ist die Verbindung ausgelöst.

Hervorzuheben ist, daß Kollisionen nur während der Verbindungsaufbauphase möglich sind.

1.2 Die Teilnehmerstationen

Die Teilnehmerstation 280 Mbit/s kann das gesamte Spektrum der Dialog- und Verteildienste abwickeln und führt sämtliche für die Vermittlung und das Ein-/Auskoppeln der Daten aus der 280 Mbit/s-Teilnehmerschleife notwendigen Funktionen durch.

Im Hinblick auf die Möglichkeit einer Großintegration wurde die Teilnehmerstation konsequent modular aufgebaut und enthält für jeden Dienst baugleiche Module (Bild 4). Daneben existieren nur zwei übergeordnete, für alle Dienste gemeinsam genutzte Module. Das HF-Teil synchronisiert selbständig auf den seriellen 280 Mbit/s-Datenstrom und führt die Serien/Parallel-Wandlung auf einen internen parallelen 17-Bit-Bus und umgekehrt durch. Die Zentrale Einheit (ZE) führt die Ruferkennung, die Detektion freier Zeitplätze sowie die Zeitplatzzählung durch /5/.

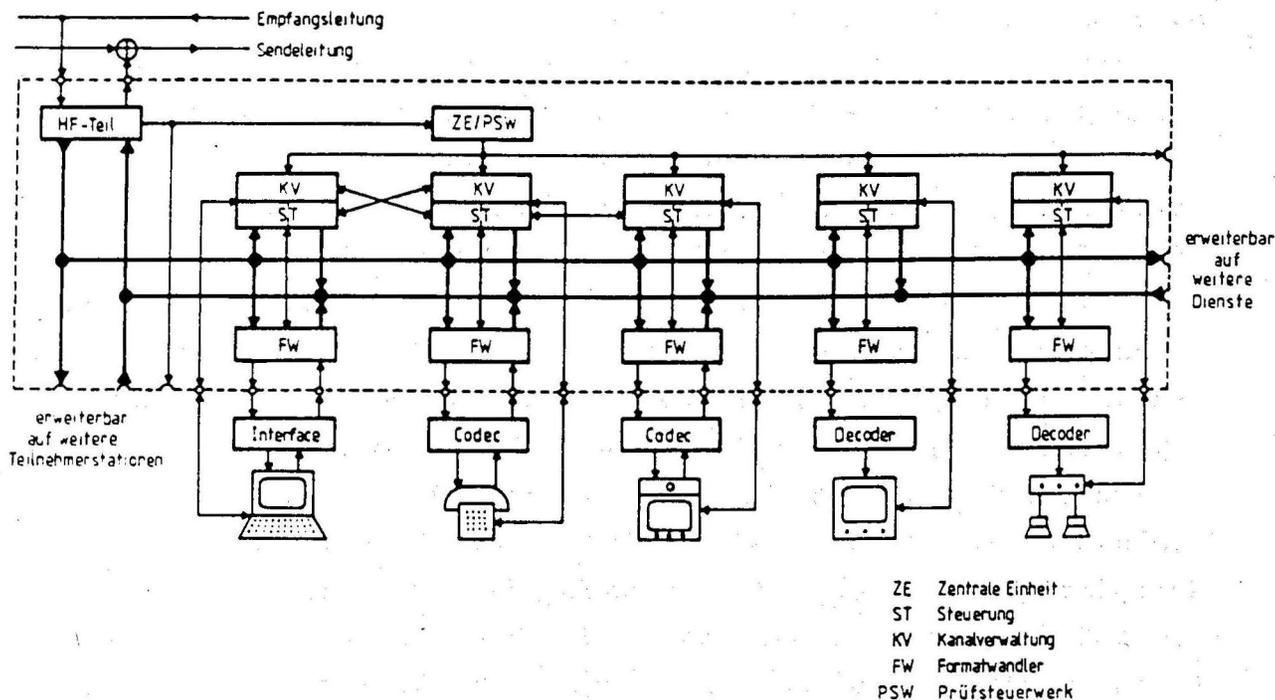


Bild 4 : Teilnehmerstation für 280 Mbit/s (TS*)

Eine Teilnehmerstation mit total unterschiedlicher Struktur ist in der 140 Mbit/s-Teilnehmerschleife eingesetzt. Ein Konzentratorenverhalten und die zentrale μ P-Steuerung erlauben auch hier den Anschluß mehrerer Teilnehmer an eine Teilnehmerstation /4/.

2. Prinzip bekannter Fehlerratenmessungen

Ein wesentliches Qualitätsmerkmal für die Beurteilung eines digitalen Übertragungssystems ist die Häufigkeit des Auftretens von Bitfehlern. Die Bitfehlerhäufigkeit oder Bitfehlerrate (BER) ist das Verhältnis der im Zeitintervall gezählten Fehler zur Gesamtzahl der übertragenen Bits. Das Ergebnis unterliegt einer statistischen Varianz von der mittleren Fehlerrate, die von der Anzahl der im Zeitintervall gezählten Fehler abhängt. Über die Größe der erforderlichen Zeitintervalle zur Ermittlung der Varianz der Fehlerrate gibt es bislang nur für die 64 kbit/s-Verbindung CCITT- und CCIR-Empfehlungen /8/.

Das Prinzip von Fehlerhäufigkeitsmessungen an Datenverbindungen ist aus der Literatur bekannt /9/. Dazu wird eine Testdatenfolge ausgesendet und empfangsseitig auf ihre Richtigkeit überprüft. Zur Simulation realer Übertragungsdaten werden in der Regel Quasi-Zufallsgeneratoren verwendet, die binäre Testpulse abgeben, in der die Auftretenswahrscheinlichkeit für Null und Eins gleich groß ist.

Einen solchen Quasi-Zufallsgenerator, bestehend aus einem n-stufigen, rückgekoppelten Schieberegister, zeigt der in unterbrochenen Linien eingerahmte Teil des Bildes 5. Der Generator ist aufgebaut wie ein Scrambler, dessen Eingangsbitfolge Null ist. Für die Ausgangsdaten D des Schieberegisters mit n-Stufen und einer geeigneten Rückkopplung ergibt sich eine größtmögliche Zufallsfolge der Länge $N=2^n - 1$. Länge und Abgriffe der Schieberegister für Quasi-Zufallsgeneratoren sind aus der Literatur /10/ bekannt. Über Eigenschaften und Frequenzspektren von binären Quasi-Zufallsfolgen wird in /11/ berichtet.

Nachdem die gesendeten Quasi-Zufallsfolgen die Übertragungstrecke durchlaufen haben, werden sie am Empfangsort mit einer fehlerfreien Bitfolge verglichen. Da sich Sende- und Empfangsteil an verschiedenen Orten befinden können und die Messung von der Laufzeit der Signale unabhängig sein sollte, muß sich der Empfänger auf die empfangene Testsignalfolge synchronisieren.

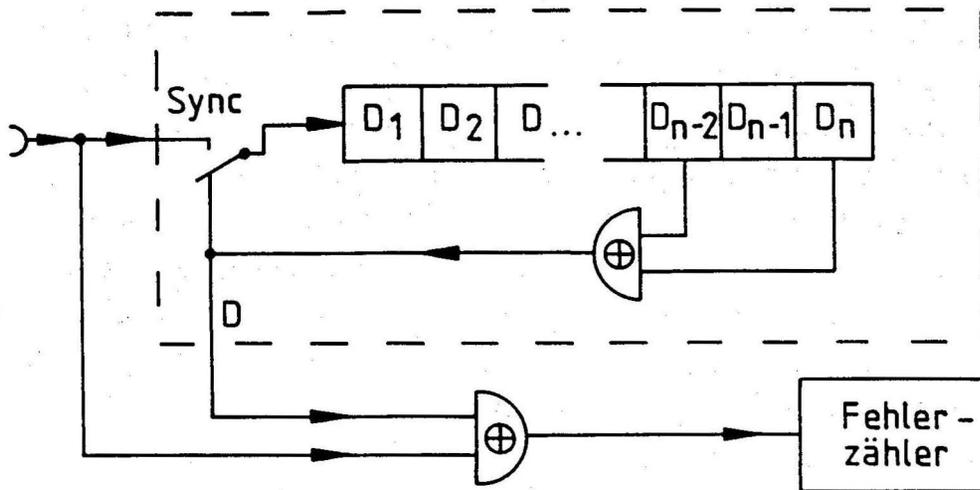


Bild 5: Prinzip des Fehlerratenmessers

Ein Descrambler als Meßempfänger synchronisiert sich wegen der fehlenden Rückkopplung selbst. Allerdings wird ein auf der Strecke verfälschtes Bit am Ausgang des Descramblers um die Zahl seiner Abgriffe vervielfacht angezeigt. Deswegen werden in Fehlerratenempfängern überwiegend synchronisierbare Quasi-Zufallsfolgengeneratoren verwendet, die nach dem gleichen Bildungsgesetz Bitfolgen erzeugen wie der Sendegenerator. Bild 5 zeigt das Prinzip des Fehlerratenempfängers. Zur Synchronisation des Empfängergenerators wird dessen Schieberegister einmalig mit den einlaufenden Daten gefüllt und dann rückgekoppelt. Jede Abweichung der empfangenen Daten von den im Schieberegister erzeugten Daten stellt einen Fehler dar und schaltet den Fehlerzähler weiter.

Je nachdem ob hohe oder geringe Fehlerraten mit burstartig auftretenden Fehlern gemessen werden sollen, ist für die Synchronisationssteuerung ein spezielles Sync-Kriterium zu finden. Da zwei asynchrone Bitfolgen eine Fehlerrate von ungefähr 0,5 haben, ist das Sync-Kriterium in jedem Fall niedriger anzusetzen. Bei den aus der Literatur bekannten Fehlermeßverfahren sind zwei Hauptanwendungsfälle zu unterscheiden.

2.1 Messung an einzelnen Versuchsstrecken

Über Messungen an einzelnen Versuchsstrecken gibt es mehrere Veröffentlichungen /12, 13/, die Fehlerratenmessungen bis 1,28 Gbit/s an PCM-Versuchsstrecken beschreiben. Darin werden die Testdaten von vier Quasi-Zufallsgeneratoren mit ca. 300 MHz Taktfrequenz in einen Multiplexer zu dem hochratigen Datenstrom zusammengefaßt. Hinter der Meßstrecke teilt ein Demultiplexer den hochratigen Datenstrom auf vier Empfänger auf. Die Auswertung erfolgt in den Empfängern nach dem im Bild 5 gezeigten Prinzip. Käufliche Fehlerratenmesser /z.B.14/ benutzen häufig das Prinzip der rückgekoppelten Schieberegister, um hochratige Übertragungsstrecken zu messen.

Die angegebenen Meßeinrichtungen lassen serielle hochratige Fehlerratenmessungen einzelner Übertragungsstrecken zu. Für Messungen in einem laufenden Zeitmultiplexsystem sind diese Geräte nicht ohne weiteres geeignet. Möglich wäre eine Adaption dieser Geräte an vorhandene Vermittlungseinrichtungen. Trotz dieser sehr aufwendigen Anpassung könnte damit nicht die system-spezifische Fehlerstruktur untersucht werden.

2.2 Messung während des laufenden Systembetriebes

Die gebräuchlichste Meßmethode, um Fehler während des Betriebes festzustellen, ist das Prüfen von Verstößen gegen den Übertragungscode. Standardisierte Angaben für ein geeignetes Meßgerät werden vom CCITT /15/ für niederratige Strecken mit Übertragungs-codes wie AMI, HDB3, B6ZS angegeben. Prinzipiell können bei diesem Verfahren nicht alle Übertragungsfehler gemessen werden. Außerdem ist die fehlervergrößernde Wirkung des Decodierers zu berücksichtigen.

Eine in Lichtleitkabelsystemen häufig verwendete Leitungscodierung ist der 5B6B Blockcode /16/. Durch ständige Überwachung der Paritätsunterschiede können Fehler während des Betriebes erkannt werden. Dafür muß die Bandbreite um 20 % erhöht und hoher schaltungstechnischer Aufwand für die Fehlerauswertung erbracht werden.

Eine andere Möglichkeit ist die Messung eines definierten Datenwortes. In Zeitmultiplexsystemen bietet sich das Rahmensyncwort (FAS frame alignment signal) als festgelegte Datenfolge an, die an verschiedenen Stellen des Systems überprüft werden kann. Ein Beispiel ist hier der entsprechend CCITT Rec. G. 732 standardisierte FAS-Monitor für 2 Mbit/s-Systeme /17/.

Die genannten Dauermessungen während des Betriebes gehen von der Voraussetzung aus, daß eine konstante mittlere Fehlerhäufigkeit gegeben ist und die Fehler unabhängig vom Zeitmultiplexrahmen statistisch gleichverteilt auftreten.

Da über die Verteilung von Bitfehlern in Breitbandkommunikationssystemen mit optischer Übertragung keine Untersuchungen bekannt sind, sollte ein möglichst hoher Anteil des gesamten Datenstroms gemessen und die Fehlerstruktur registriert werden. Die obengenannten Meßverfahren sind deshalb für optische Breitbandsysteme nicht unmittelbar anwendbar.

3. Anforderungen an die Meßgeräte

Für die eindeutige Registrierung von bündelartig auftretenden Bitfehlern (Bursts) reicht die Angabe der mittleren Fehlerrate nicht aus. Es muß die gesamte zeitliche Verteilung der Bitfehler, d.h. auch die sogenannte Fehlerstruktur registriert werden. Hierzu wird der Abstand zwischen den Bitfehlern gezählt und die Lage der Fehler im Zeitmultiplexrahmen aufgezeichnet.

Dies ist während des Systembetriebes durchzuführen, ohne daß die laufenden Verbindungen gestört werden. Aus diesem Grund müssen die für den Verbindungsauf- und -abbau im System vorgeschriebenen Signalisierungs-Algorithmen eingehalten werden /21/.

Zur Fehlerlokalisierung müssen Meßsender und -empfänger möglichst an viele Stellen des Netzes angekoppelt werden können, damit die Messung an Übertragungsstrecken sowohl in der 280 Mbit/s- als auch in der 140 Mbit/s-Teilnehmerschleife vorgenommen werden kann.

Eine mögliche Musterabhängigkeit von Bitfehlern soll mit dem Einspeisen von einstellbaren statischen Datenfolgen untersucht werden können.

Die Meßmethode hierfür kann nur aus einer Kombination der im Abschnitt 2 beschriebenen Fehlermessungen bestehen. Da die Messungen über einen repräsentativen Teil der Gesamtübertragungsrate durchzuführen sind, bietet sich die Übertragung von Testpulsfolgen in einem Breitbandkanal (ca. 65 Mbit/s) an. Der zu prüfende Breitbandkanal muß demnach im Zeitmultiplexsystem frei wählbar sein und darf eine Datenübertragung auf den anderen Kanälen nicht beeinträchtigen.

Zur Simulation realer Übertragungsbedingungen müssen Quasi-Zufallsgeneratoren verwendet werden, deren Spektral- und Laufeigenschaften an das Zeitmultiplexsystem angepaßt werden müssen. Da in den optischen Übertragungstrecken Scrambler eingesetzt sind, muß die Stufenzahl des Zufallsgenerators auf die der Scrambler abgestimmt werden /10/.

Zur Registrierung der laufenden Fehlerrate ist unabhängig von der Signallaufzeit im System ein exakter Bitvergleich zwischen dem empfangenen Datenstrom und dem aus einem gleichartig aufgebauten Quasi-Zufallsgenerator gewonnenen Solldatenstrom erforderlich.

Das Meßzeitintervall ist nach der auftretenden Fehlerhäufigkeit einzustellen und die Anzahl der Fehler sind im Intervall zu akkumulieren. Etwaige Neusynchronisierungen des Meßempfängers sind gesondert zu registrieren.

Da neben der Häufigkeit von Bitfehlern die Fehlerstruktur registriert werden soll, erfordert dies bei hohen Übertragungsraten einen großen Speicherplatzbedarf. Es muß daher versucht werden, die Aufzeichnung auf die wesentlichen Strukturparameter zu reduzieren. Eine übliche Methode ist es, den Abstand zwischen den Bitfehlern mit dem Bittakt auszuzählen und den Zählerstand zu registrieren /18/. Da Fehler, die von elektronischen Komponenten verursacht werden, häufig zum Zeitrahmen oder Zeitplatz synchron auftreten, ist es zweckmäßig, den Inhalt eines ganzen

Zeitplatzes aufzuzeichnen, falls darin ein Bitfehler festgestellt wurde.

Zum Eigentest der Meßeinrichtung muß das Einspeisen von definierten Fehlerraten möglich sein.

Die Eigenfehlerrate der Meßeinrichtung im Kurzschluß muß kleiner als 10^{-13} sein.

4. Realisierung der Meßgeräte

Als Systemschnittstelle, die alle Anforderungen erfüllte, ergab sich die in jeder 280 Mbit/s- und 140 Mbit/s-Schleife vorhandene parallele Schnittstelle des Bildfernsprechcodecs (Bild 6) der Teilnehmerstation.

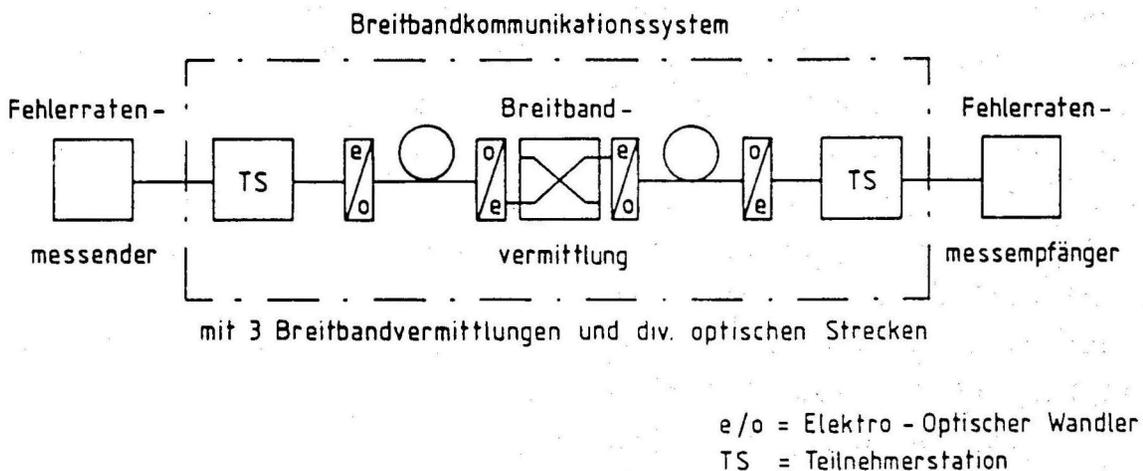


Bild 6 : Schema der Messung

Durch die Wahl dieser Schnittstelle wird es möglich, an jeder beliebigen Codec - Schnittstelle des Systems den Fehlerratensender anzuschalten und an einer beliebigen zweiten mit dem Empfänger zu messen. Darüber hinaus kann eine modifizierte, mobile Teilnehmerstation für 280 Mbit/s eingesetzt werden, die den seriellen Datenstrom an jedem Repeater auskoppelt und damit die Messung der Bitfehler nach jeder optischen Übertragungsstrecke zuläßt.

Die parallele Bildcodec-Schnittstelle der Teilnehmerstation gestattet zwar eine relativ geringe Taktfrequenz (4 MHz), erfordert aber eine Übergabe der Daten auf 16 parallelen Leitungen für Farbbildübertragung und auf 12 Leitungen für die Schwarz-Weiß-Bildübertragung.

Für diese Parallelschnittstelle ist ein parallel arbeitender Quasi-Zufallsfolgenerator entwickelt worden, der eine dem Dienst Bildfernsprechen entsprechende Datenrate von 65 Mbit/s (\cong 16 Bit) im 280 Mbit/s-System und 49 Mbit/s (\cong 12 Bit) im 140 Mbit/s-System für die Bitfehlerratenmessung erzeugt.

Zum Aufbau einer Meßverbindung zwischen zwei beliebigen Teilnehmerstationen wird zunächst der im Abschnitt 1.1 beschriebene Vermittlungsvorgang (Ruf-Quittungssignalisierung) vorgenommen. Danach kann im gleichen Kanal die Testdatenübertragung erfolgen.

Nachteilig für Dauermessungen ist bei dieser Meßmethode, daß kurzzeitige Burstfehler die Verbindung auslösen können und diese automatisch nicht wiederhergestellt werden kann. Für diese Anwendung ist eine Teilnehmerstation so modifiziert worden, daß sie ohne Einhaltung der sonst zwingend vorgeschriebenen Betriebsabläufe ständig in einem Breitbandkanal sendet. Die für die Vermittlung der Breitbandkanäle eingesetzte Vorfeldeinrichtung muß dann die entsprechende Verbindung dauernd durchschalten. Durch die Wahl der Koppelpunkte kann jede der 4 Orts- und Ferntrassenleitungen mit in die Messung einbezogen werden.

Mit einer auf den Empfang eines Breitbandkanals fest eingestellten Teilnehmerstation ist so an jedem Repeater des 280 Mbit/s-Systems aus dem seriellen Gesamtstrom der Prüfdatenstrom meßbar.

Die Verwendung der parallelen Bildcodec-Schnittstelle an der Teilnehmerstation läßt eine störungsfreie Herstellung von Verbindungen zwischen beliebigen Stationen zu. Sie kann mit

wesentlich geringeren Taktraten bedient werden als eine serielle Einspeisung. Darüber hinaus finden langsamere, hochintegrierte elektronische Schaltkreise für Sender und Empfänger Verwendung. Das Prinzip der Fehlermeßeinrichtung zeigt Bild 7.

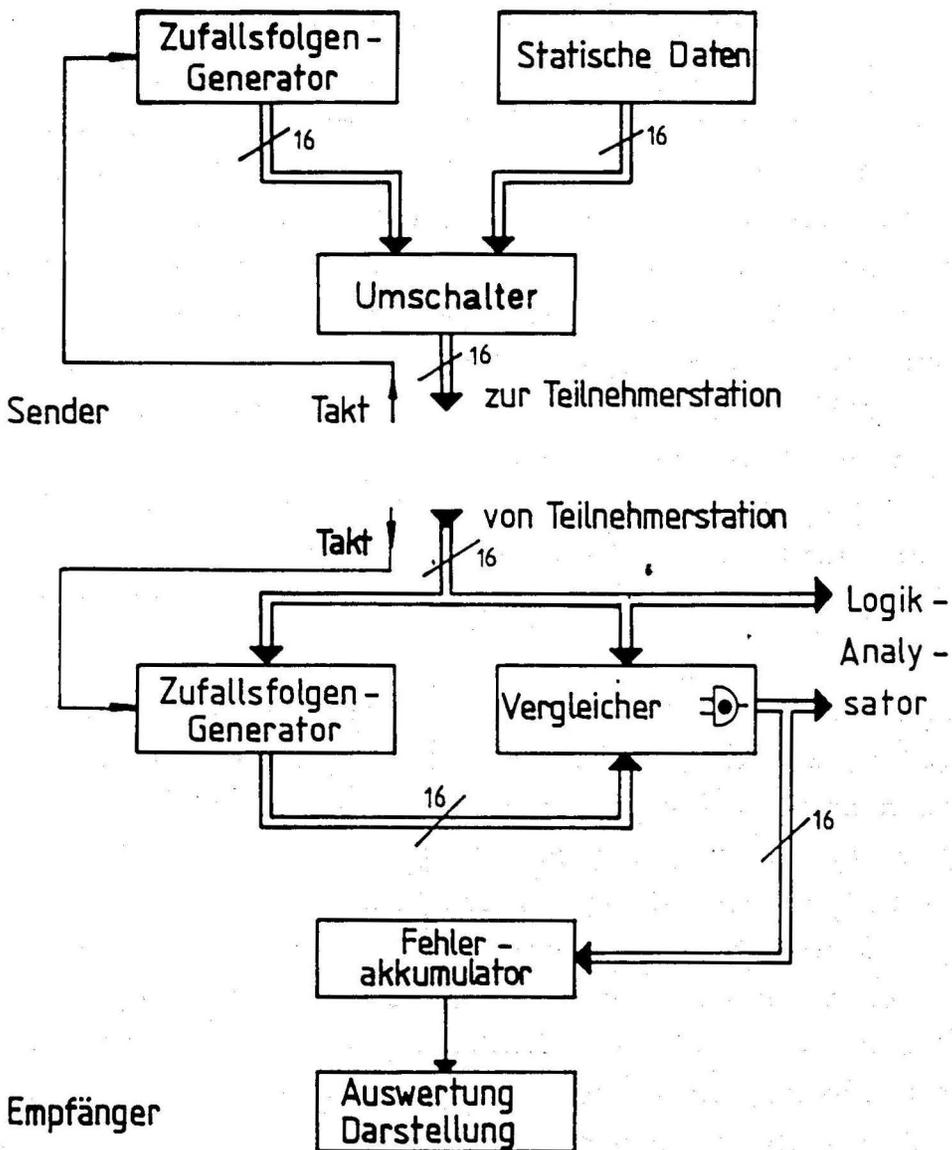


Bild 7: Prinzip der Fehlermeßeinrichtung

4.1 Fehlerraten-Meßsender

Neben der Möglichkeit, einstellbare, statische Testdaten zu generieren, sind Quasi-Zufallsfolgen mit gleichgroßer Auftretenswahrscheinlichkeit für Null und Eins zu erzeugen. Wie im Abschnitt 2 im Prinzip beschrieben, bestehen Quasi-Zufallsfolgen-generatoren aus mehrstufigen, rückgekoppelten Schieberegistern, deren Spektral- und Laufeigenschaften von der Anzahl der Stufen, der Rückkopplung und der Taktfrequenz beeinflußt werden.

Eine wichtige Randbedingung beim Schaltungsentwurf war hier die Anpassung an die parallele Bildcodec-Schnittstelle zur Teilnehmerstation. Die Übergabe der Bilddaten erfolgt auf 16 parallelen Datenleitungen (12 Leitungen Luminanz, 4 Leitungen Chrominanz) und einer Taktleitung mit 4,096 MHz. An der Teilnehmerstation für 140 Mbit/s, die nur Schwarz-Weiß-Bilder verarbeitet, existieren dementsprechend nur 12 Datenleitungen und eine Taktleitung. Die serielle Datenübertragungsrate beträgt 65,536- bzw. 49,152 Mbit/s. Herkömmliche serielle Quasi-Zufallsgeneratoren müßten mit diesen Taktraten arbeiten. Angesichts der vorhandenen Schnittstelle sind im Rahmen des Projektes parallel arbeitende Quasi-Zufallsgeneratoren entwickelt worden, die es gestatten, mit der niedrigen Frequenz der parallelen Schnittstelle den Generator synchron zu takten.

Die Veröffentlichung "Parallel arbeitende Scrambler, Descrambler und Zufallsfolgengeneratoren" /19/, beschreibt die entsprechenden Prinzipschaltungen. Danach kann mit wenigen logischen Baugruppen bei einem Abholtakt von 4,096 MHz an den parallelen Ausgängen der gleiche Zustand erzeugt werden, der bei seriellen Generatoren nach 16 Takten (ca. 65 MHz) erreicht würde. Da der gleiche parallel arbeitende Quasi-Zufallsgenerator auch an der Schnittstelle mit 12 Datenleitungen arbeiten soll, ist es zweckmäßig, den Meßsender aus zwei Generatoren zusammensetzen. Die Zahl der Generatorstufen muß mindestens so groß sein, wie die Zahl der Datenbits pro Zeitplatz (32). Daraus ergeben sich zwei Zufallsgeneratoren mit je 25 bzw. 9 Stufen, die jede mögliche Null-Eins-Folge im Zeitplatz erzeugen. Da die Stufenzahlen zu-

einander teilerfremd sind, ergibt ihre Kombination eine maximale Zykluslänge von

$$(2^{25}-1) \cdot (2^9-1) \sim 1,7 \cdot 10^{10}.$$

Die Schaltung für den in LS-TTL-Technologie aufgebauten Quasi-Zufallsgenerator findet auf einer Druckplatine (1 Europa-Karte 100x160 mm) Platz.

Zum Test der Meßgeräte können Bitfehler mit frei wählbarer Rate im Sender erzeugt werden. Für den nicht zulässigen Nullzustand des Zufallsgenerators ist eine Überwachungsschaltung mit Anzeige vorgesehen. Dieser Zustand stellt ein fehlerhaftes Verhalten dar und trat im Betrieb nicht auf.

4.2 Fehlerraten-Meßempfänger

Für den Empfang von Quasi-Zufallsfolgen eignet sich ein Descrambler wegen seiner Fehlervervielfachung nicht. Übertragungsfehler werden, gemäß der Zahl der Abgriffe vom Schieberegister, mehrfach auftreten und damit die Fehlerstruktur verfälschen. Eine unverfälschte Anzeige entsteht durch den Vergleich des empfangenen Testdatenstromes mit einem synchron laufenden Datengenerator. Der Aufbau des Empfängergenerators muß dabei der gleiche wie im Meßsender sein.

Zur Synchronisation des Empfängergenerators wird dessen Schieberegister vollständig mit der empfangenen Testdatenfolge geladen. Danach erfolgt der Vergleich zwischen den Empfangsdaten und den Daten des jetzt freilaufenden Generators. Eine zu große Zahl von aufeinanderfolgenden Fehlern löst eine Neusynchronisation aus. Für Systemmessungen mit Fehlerraten kleiner als 10^{-2} und seltenen Synchronisationsausfällen ist das Verfahren gut geeignet. Die Messung ist unabhängig von der Signallaufzeit.

Zum Test mit statischen Datenfolgen wird der Generator einmalig mit dem empfangenen Muster geladen und der Generatortakt abgeschaltet. Eine Einstellung der gesendeten Bitfolge im Empfänger ist dadurch überflüssig.

Der parallel arbeitende Quasi-Zufallsgenerator bietet auch im Empfänger die Möglichkeit, die 16- bzw. 12-Bit-Schnittstelle direkt zu bedienen und auch den Vergleich parallel mit wesentlich geringerer Taktrate durchzuführen.

Zur Anzeige der Fehlerstruktur ist ein Signal notwendig, das immer dann erscheint, wenn der parallele Halbwortvergleich wenigstens einen Fehler enthält. Mit diesem Triggersignal kann dann ein Logik-Analysator gestartet werden, der sowohl das 16 Bit-Halbwort als auch die Fehler bitgenau anzeigt.

4.3 Meßwertverarbeitung und -registrierung

Neben dem Generieren und Vergleichen der Daten im Empfänger ist eine Fehlerakkumulation für die Auswertung und Darstellung notwendig (Bild 7).

Ein 24-stufiger Binärzähler akkumuliert über regelmäßige Zeitabschnitte (150 ms) die Zahl der Fehler und stellt sie einem Mikroprozessor zur Auswertung zur Verfügung. An die Ausgänge einiger Zählerstufen sind Anzeigeneinheiten gekoppelt, die eine grobe Übersicht über die gemessenen Fehlerraten geben. Fehlerhafte Zustände wie fehlender Takt oder längere Zeit fehlende Datenwechsel in der Messung mit Quasi-Zufallsfolgen werden erkannt und angezeigt.

Mehr als $5 \cdot 10^5$ Fehler in 150 ms führen zur Neusynchronisierung des Empfängers und zur Ausgabe einer Meldung. Das Sync-Kriterium ist hier so gewählt, daß einerseits bei der Messung mit statischen Daten die falsche Synchronisation auch nur eines Bits im Halbwort zur Neusynchronisation führt, andererseits aber der Fehleratenempfänger genügend Toleranz gegenüber kurzfristigen Synchronisationsstörungen eines beliebigen HF-Teils aufweist. Solche kurzfristigen Störungen können z.B. beim Auftreten von Bitfehlern 2. Art (Bitslipping) entstehen, wo in der Regel die HF-Teile bereits mit dem ersten Rahmensyncwort nach der Störung wieder synchronisieren.

Die Mikroprozessor-Einheit stellt wählbar in 4 Zeitintervallen, die 10^8 bis 10^{11} Bit/Intervall entsprechen, die Fehlersummen einem nachgeschalteten Terminal oder Drucker zur Verfügung und versieht sie mit Zeitangabe und Zeichen für eine logarithmische Histogrammdarstellung. Die Neusynchronisierung und andere fehlerhafte Meßzustände führen zum sofortigen Ausdruck der detektierten Fehlerursache. Ein Beispiel für eine Fehlerregistrierung zeigt Bild 8. Zur graphischen Darstellung und Berechnung der Summenhäufigkeit der Fehlerrate werden die Fehlersummen auf geeigneten Datenträgern gespeichert und mit einem Digital-Rechner ausgewertet.

4.6.82 RANDOM DATEN

AUS DER 280 MBIT/S-SCHLEIFE UEBER DAS GANZE SYSTEM

12:04:26	3 :00
12:04:43	3 :00
12:05:00	5 :000
12:05:16	3 :00
12:05:33	0 :
12:05:49	0 :
12:06:06	0 :
12:06:23	3 :00
12:06:39	0 :
12:06:56	0 :
12:07:13	10 :0000
12:07:29	0 :
12:07:46	2 :00
12:08:02	0 :
12:08:19	0 :
12:08:36	3 :00

Bild 8: Fehlersummen -Registrierung

Wie Bild 7 prinzipiell zeigt, können die 16 Bit des empfangenen Halbwortes und das Ergebnis des 16 Bit-Vergleichs auf einen Logik-Analysator gegeben werden. Mit dem Auftreten von mindestens einem Fehler als Triggerbedingung entsteht z.B. der im Bild 9 dargestellte Ausdruck. Spalte C enthält den Vergleich, Spalte D

den Inhalt der ersten 15 Bit des empfangenen Halbwortes, Spalte E die Triggerbedingung und die State Count-Spalte den Abstand zwischen den fehlerhaften Halbworten.

Da nur 65 Mbit/s vom seriellen 280 Mbit/s-Datenstrom geprüft werden, können Fehlerfolgen, die über die 32 Bit des Testwortes hinaus auftreten, nicht angezeigt werden.

4.6.82 RANDOM DATEN START: 12:04

AUS DER 280 MBIT/S-SCHLEIFE UEBER DAS GANZE SYSTEM

LABEL BASE	C BIN	D BIN	E BIN	STATE COUNT DEC [REL]
START	...0000000000000000...	010111100111100...	0...	
+01	0000100000000101	110010010011000	1	13131915
+02	0000000100000000	010101010101100	1	38549966
+03	1010000000000000	100011110010100	1	1
+04	...0000101000000000...	010101101011101...	1...	74240243
+05	0000010000000010	000111000000100	1	8293954
+06	1000000000000000	001000010100011	1	1
+07	00100000000010100	010011111111111	1	74068221
+08	...0000100000000101...	110101111011101...	1...	288910062
+09	0000000000000100	000111011010100	1	146556019
+10	0000001010000000	10000111111010	1	1
+11	0000010100000000	000101110111000	1	6143217
+12	...0001000010101010...	110111000010101...	1...	31982280
+13	0000000101000000	111011100101101	1	134039962
+14	0000010000000010	011111001101110	1	215863568
+15	1000000000000000	010000111011110	1	1

Bild 9 : Fehlerstruktur - Registrierung

5. Meßergebnisse

In der zweijährigen Dauerbetriebsphase wurden umfangreiche Bitfehlermessungen über verschiedene optische Übertragungsstrecken mit 280 Mbit/s- und 140 Mbit/s Übertragungsrate durchgeführt. Um Aufschluß über die zeitliche Verteilung der Bitfehler zu bekommen, wurden sie über unterschiedlich lange Zeitintervalle akkumuliert. Während dieser Messungen war der Systembetrieb - lediglich um den Breitbandmeßkanal eingeschränkt - weiterhin möglich.

Im Bild 10 sind die Bitfehler in 28 Minuten Zeitintervallen entsprechend 10^{11} Bit akkumuliert und Messungen über insgesamt 1176 Stunden ausgewertet worden. Darin ist die Summenhäufigkeit der Fehlerrate über sämtliche Fehlerratenmessungen aufgetragen. Ausgewertet wurden Messungen mit Quasi-Zufallsfolgen bei 65 Mbit/s aus der 280 Mbit/s-Schleife über alle elektronischen Schalteinrichtungen, 32 km Lichtwellenleiter und 12 Repeater. Die berechnete Kurve gibt die prozentuale Häufigkeit an, bei der eine vorgegebene Fehlerrate erreicht oder unterschritten wurde. In der mittleren Fehlerrate von $4,6 \cdot 10^{-9}$ sind 10 burstartig aufgetretene Fehlerereignisse mit insgesamt 1 164 578 Bitfehler enthalten. Ohne diese Burstfehler war die mittlere Fehlerrate besser als 10^{-9} . Da die meisten Fehler, wie im folgenden beschrieben, auf den optischen Übertragungsstrecken mit einer Fehlermultiplikation durch die dort vorhandenen Descrambler entstanden, ist die tatsächliche Rate der Fehlerereignisse noch geringer.

Ein Beispiel für eine Fehlerratenmessung mit relativ gleichmässiger Fehlerhäufigkeit in kurzen Zeitintervallen ($16 \text{ s} \cong 10^9$ Daten) zeigt Bild 11.

Erst die gleichzeitig aufgenommene Fehlerstruktur-Registrierung im Bild 9 gibt Aufschluß über die Art der Fehler auf der Meßstrecke. Zum überwiegenden Teil verursachen hier optische Übertragungsstrecken mit Scramblern und Descramblern das spezielle Fehlermuster.

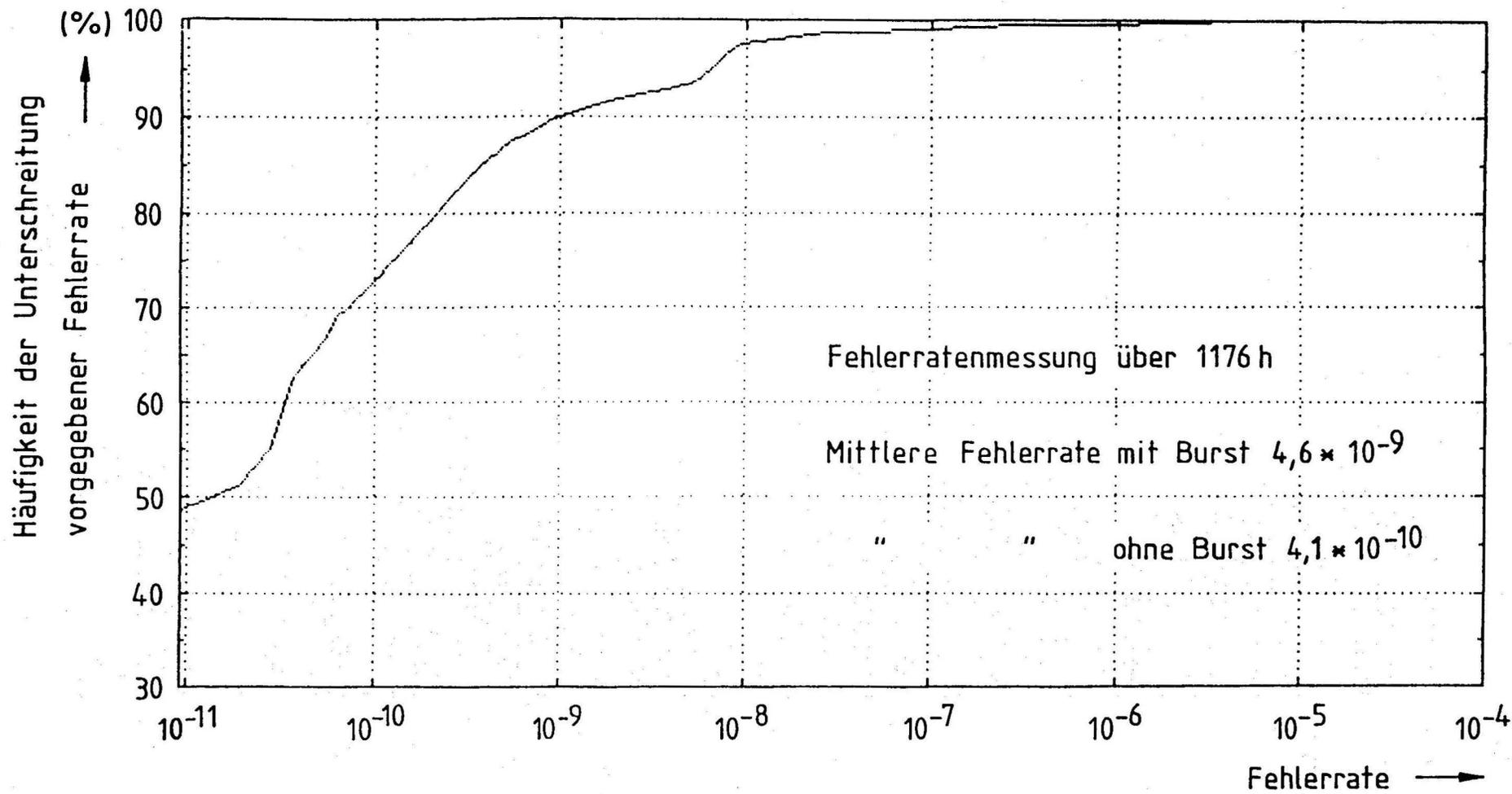


Bild 10 : Summenhäufigkeit der Fehlerrate

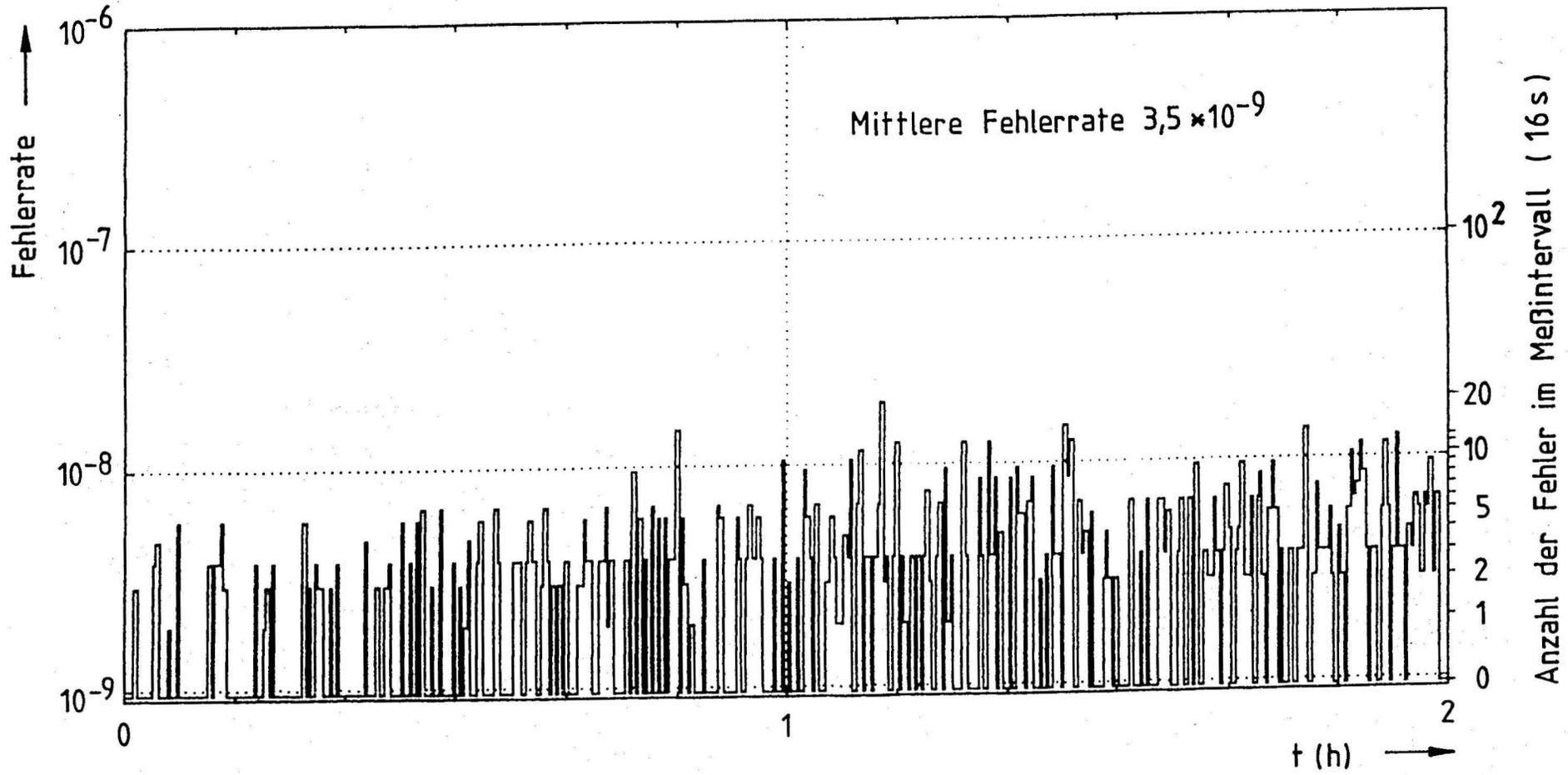


Bild 11 : Fehlerratenmessung vom 4.6.82

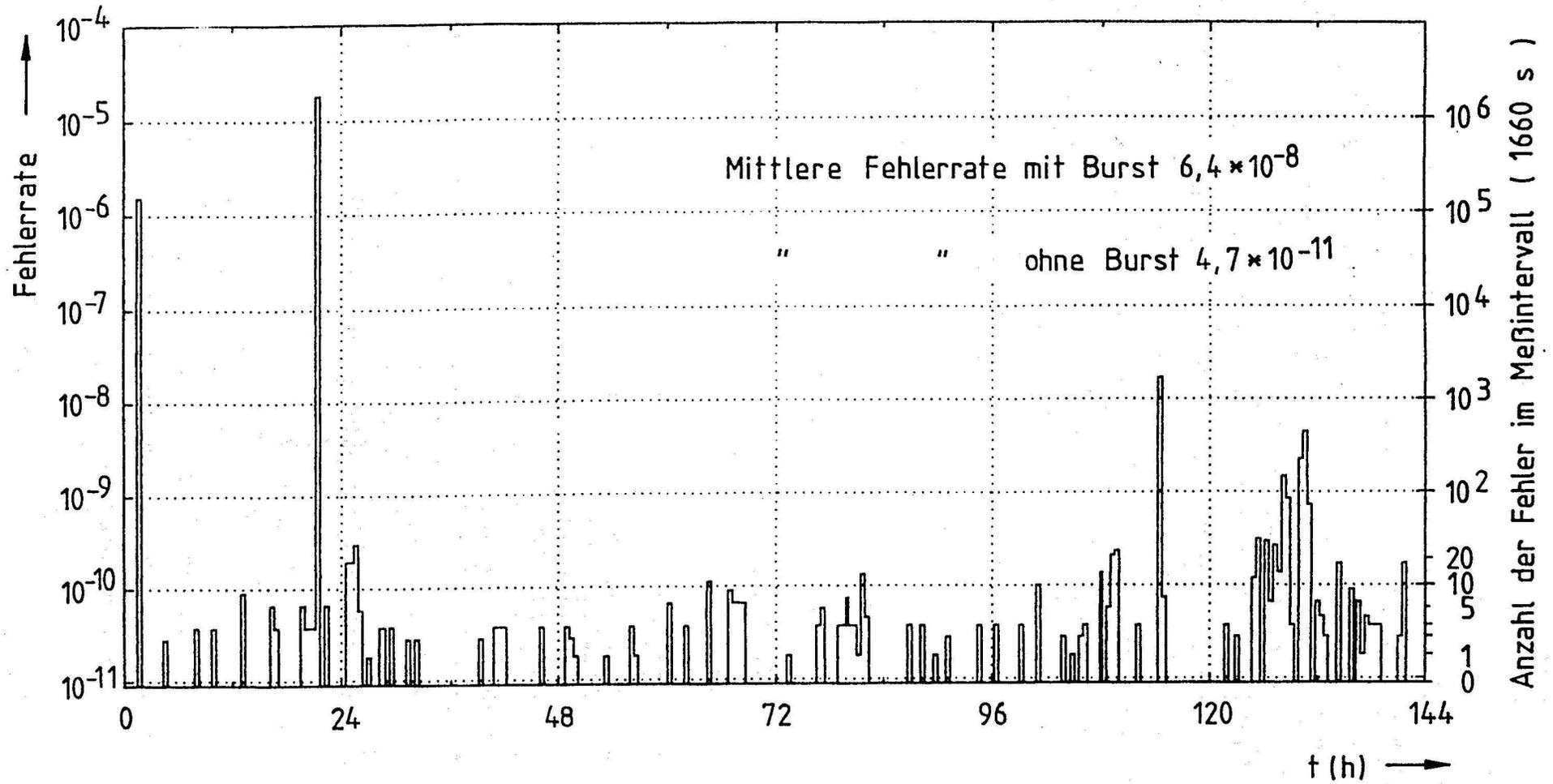


Bild 12: Fehlerratenmessung vom 27.7.- 2.8.82

Eine weitere Fehlerratenmessung mit Quasi-Zufallsfolgen über das ganze System in Zeitintervallen von ~28 Minuten $\hat{=} 10^{11}$ Bit zeigt Bild 12. Charakteristisch sind die burstartig auftretenden Fehler am Anfang der Messung. Aus der Fehlersummen-Registrierung geht hervor, daß bei dem zweiten Burst eine Neusynchronisierung des Empfängers erfolgte. Wegen der großen Fehlerzahl ist eine Fehlerstruktur-Registrierung des gesamten Bursts nicht möglich. Um die Ursache zu erkennen, reicht hier schon die Struktur am Anfang des Bursts. Diesen Ausschnitt aus der Fehlerstruktur-Registrierung etwa 21 Stunden nach Beginn der Messung gibt Bild 13 wieder.

ZEILE	SPALTE C	SPALTE D	E	ZAEHLER
+18	0001000000001010	100000000111001	1	3632308130
+19	0000000000001000	111011010110101	1	3802413449
+20	... 0000010100000000	... 101001110100111	... 1	... 1
+21	0000000000001010	011110111001011	1	91341108
		---001001100011010---		
+22	1011010100101111	100100110001101	1	1
		---010100111000110---		
+23	1111101001001010	101010011100011	1	1
		---000010111100110---		
+24	... 1000111000101010	... 100001011110011	... 1	... 1
		---111001111100100---		
+25	1001010000101100	011100111110010	1	1

Bild 13 : Ausschnitt aus Fehlerstruktur vom 27.7.82

Die aus den Spalten C und D rekonstruierten Quasi-Zufallsfolgen sind durch Bindestriche gekennzeichnet und vor den tatsächlich empfangenen Folgen in Spalte D eingefügt. Es ist deutlich eine Verschiebung um ein Bit (Bitslipping) zu erkennen. Ursache für diese sogenannten Bitfehler 2. Art (ein fehlendes oder zusätz-

liches Bit im Datenstrom) kann der Phasenjitter der Repeater sein, dessen Akkumulation zu Abtastzeitfehlern führen kann. Die Zahl der registrierten Fehler ist in diesem Fall stark von der Zeitrahmenstruktur, dem Synchronisationsalgorithmus des HF-Teiles und dem Sync-Kriterium des Meßempfängers abhängig.

Bei den hier verwendeten Geräten würde ein solcher Fehler der Fehlersumme von vielen Wochen bei normalem Betrieb entsprechen. Es ist daher zweckmäßig, auch eine mittlere Fehlerrate ohne derartige Fehler (Bursts) zu berechnen und die Anzahl der Burstergebnisse getrennt zu zählen.

Insgesamt sind allerdings Fehler 2. Art bei den Messungen nur selten beobachtet worden.

Eine weitere beispielhafte Messung über 258 Stunden aus der 140 Mbit/s-Teilnehmerschleife heraus zeigt Bild 14. Die Ein- bzw. Auskopplung der Quasi-Zufallsfolgen erfolgte an der 12 Bit-parallelen Bildcodec-Schnittstelle der normalen Teilnehmerstation am Ende der Schleife. Zwischen den Stationen war zuvor eine Breitbandverbindung mit 49 Mbit/s hergestellt worden, die über insgesamt 40 km Lichtwellenleiter und 10 Repeater führte.

Mittlere Fehlerrate und Fehlerhäufigkeitsverteilung ergaben keine signifikanten Unterschiede zu anderen Messungen.

Die Messung in verschiedenen Breitbandspalten einer Leitung wie auch unterschiedliche Belegungen der Nachbarspalten des Zeitmultiplexrahmens während der Messung ergaben keine Änderung der Fehlerhäufigkeit und -struktur. Auch bei der Einspeisung von Quasi-Zufallsfolgen in einen Breitbandkanal und der Prüfung von leeren Nachbarkanälen in der Empfangsbetriebsart "Statische Daten" ergaben sich keine signifikanten Änderungen. Daraus kann geschlossen werden, daß die Übertragungsfehler auf einer Leitung gleichverteilt sind.

Ein Übersprechen zwischen den Breitbandkanälen im Zeitmultiplexsystem war nicht nachzuweisen, wohl aber eine Fehlerfortpflanzung von einem Kanal in den anderen durch den fehlervervielfachenden Descrambler-Mechanismus.

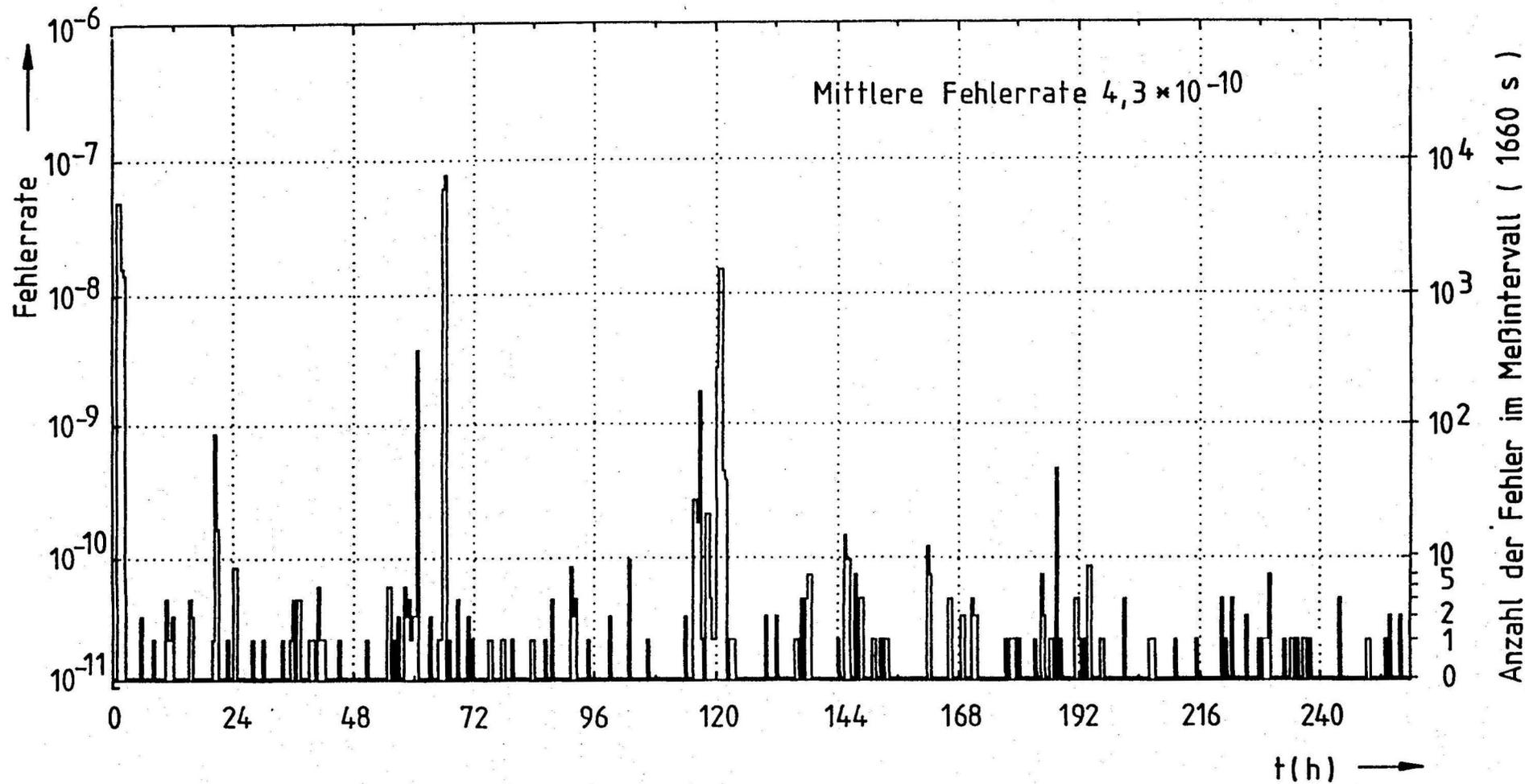


Bild 14 : Fehlerratenmessung an der 140 Mbit/s -Teilnehmerschleife

Eine Analyse der Fehlerstrukturen hat ergeben, daß die Bitfehler ganz überwiegend auf den optischen Übertragungstrecken und nicht in den hochratigen elektronischen Vermittlungseinrichtungen entstehen.

Diese Aussage wurde möglich durch die fehlervervielfachende Wirkung der in den Übertragungstrecken eingesetzten Descrambler. Auf der Übertragungstrecke entstandene Fehler ergeben eine typische Fehlerfolge, die sich in der Fehlerstruktur-Registrierung wiederfindet.

Der fehlervervielfachende Mechanismus der Descrambler sei im Folgenden kurz erläutert.

Im Zustand Synchronisieren arbeitet der im Bild 5 gezeichnete Fehlerratenmesser wie ein Descrambler. In diesem Fall ist der Sync-Schalter in der oberen Position und damit die Rückkopplung aufgetrennt. Der descrambelte Datenstrom ist an der Stelle des Fehlerzählers zu entnehmen. Ein auf der Übertragungstrecke entstandener Fehler trifft mit dem Datenstrom am Descramblereingang ein und erzeugt sofort nach Durchlaufen des Exklusiv-Oder-Gatters ein fehlerhaftes Bit. Der Fehler läuft dann in das Schieberegister des Descramblers ein und erzeugt beim Eintreffen an dessen Abgriffen wiederum jeweils ein verfälschtes Bit.

Bei einem 11-stufigen Descrambler mit einem Abgriff bei der neunten Stufe - wie u.a. im Experimentalsystem verwendet - entsteht damit ein typisches Fehlermuster von 100000000101. In der für die Messungen typischen Fehlerstruktur des Bildes 9 läßt sich dieses Muster oft wiederfinden, wobei es mitunter in das folgende Halbwort (State Count = 1) hineinreicht.

Bei allen Messungen überwogen diese typischen Fehler ganz deutlich jedes andere Muster. Aus dem Fehlermuster ist allerdings nur zu entnehmen, daß der Fehler auf der Strecke Scrambler-Laser-Lichtwellenleiter-Empfänger-Descrambler entstanden ist. Da im Experimentalsystem 2 Scramblertypen mit unterschiedlicher Beschaltung verwendet wurden, konnte der Fehlerort damit grob eingegrenzt werden. Zur genauen Fehlerlokalisierung wurde die mobile Fehlermeßeinrichtung eingesetzt. Wie weiterführende Arbeiten /20/ belegen, wäre jedoch prinzipiell über unterschiedlicher Scramblerbeschaltung eine fehlerhafte Strecke sofort zu lokalisieren.

Fehler, die durch elektronische Komponenten, wie Teilnehmerstation oder Breitbandvermittlungseinrichtung verursacht werden, entstehen meistens synchron zum Worttakt. Daher werden sie auch an immer wiederkehrenden Stellen des aufgezeichneten Halbwortes angezeigt. Die Folge und die Stelle der Fehler im Wort lassen Folgerungen auf die fehlerhaften Komponenten und die darin verwendeten Bauteile zu.

Was eine mögliche Musterabhängigkeit der Bitfehlerrate angeht, so haben Untersuchungen mit statischen Datenmustern keine signifikanten Unterschiede zu Messungen mit Quasi-Zufallsfolgen ergeben. Allerdings ist zu berücksichtigen, daß sich - bedingt durch den Zeitmultiplexrahmen - nicht jedes beliebige Datenmuster einstellen ließ. Bei der hohen Zahl der möglichen Kombinationen (2^{16}) konnte nicht jede geprüft werden.

Prinzipiell werden durch die Verwendung von Scramblern auf allen Übertragungstrecken alle statischen Daten verwürfelt übertragen, um u. a. für eine ausreichende Anzahl von Signalübergängen zur Bittaktrückgewinnung zu sorgen. Unabhängig von der Statistik des Eingangssignals entstehen dabei keine Gleichanteile und nur geringe niederfrequente Komponenten des Leistungsdichtespektrums.

Treffen von einem Zufallsfolgen-Generator erzeugte Daten auf einen Scrambler, so verändert sich die Datencharakteristik hinter dem Scrambler nicht wesentlich, solange die Stufenzahl von Scrambler und Zufallsfolgen-Generator zueinander teilerfremd sind. Beim Einspeisen von statischen Daten dagegen entsteht eine wesentliche Veränderung. Unabhängig vom statischen Muster ist hinter dem Scrambler die Häufigkeit der auftretenden logischen Null und Eins gleich groß. Bei periodischer Wiederholung der Daten entsteht ein Zyklus, dessen maximale Länge bei einem n -stufigen Scrambler das 2^n -fache der Länge der periodisch wiederholten Daten beträgt. Die längste Nullfolge in diesem Datenstrom ist dann gleich der längsten Nullfolge in den Daten vermehrt um die Zahl der Schieberegisterstufen - im Experimentalsystem bedingt durch das Zeitrahmenformat 33 Nullen im Datenstrom plus 11 Nullen als Länge des Scramblers - also 44 Nullen.

Diese Folgen wurden von der Laseransteuerung, der Arbeitspunktregelung des optischen Empfängers und der Phasenregelschleife zur Bittaktrückgewinnung ohne Fehler verarbeitet.

Zweckmäßig für die Untersuchung möglicher Musterabhängigkeiten wäre der Betrieb der optischen Übertragungstrecken völlig ohne Scrambler/Descrambler. Die vom Hersteller für diesen Betrieb nicht dimensionierten optischen Sende- und Empfangseinheiten verhindern eine Übertragung längerer Null- bzw. Einsfolgen. Damit war eine experimentelle Analyse einer möglichen Bitmusterabhängigkeit der Fehlerrate und ihrer Ursachen nur eingeschränkt durchführbar.

6. Zusammenfassung

Zur Beurteilung der Übertragungsgüte des digitalen, diensteintegrierten Breitbandnetzes sind Fehlerraten- und Fehlerstrukturmeßgeräte entwickelt worden, die es gestatten, während des Systembetriebes Messungen mit Quasi-Zufallsfolgen oder fest einstellbaren Datenmustern in einem Breitbandkanal (65- bzw. 49 Mbit/s) durchzuführen.

Dauermessungen über mehr als 1400 Stunden mit Quasi-Zufallsfolgen aus der 280 Mbit/s- und der 140 Mbit/s-Teilnehmerschleife über hochratige Vermittlungseinrichtungen, 12 Repeater und 32 km Lichtwellenleiter, haben eine mittlere Fehlerrate von weniger als 10^{-9} ergeben. Dabei sind burstartig auftretende Fehler nicht mit berücksichtigt.

Eine Fehlerstrukturanalyse zeigte, daß die Bitfehler überwiegend auf den optischen Übertragungstrecken entstehen.

Bitfehler 2. Art wurden nur selten registriert.

Die Messungen erfolgten in allen Breitbandkanälen, wobei sich Unterschiede in den einzelnen Kanälen nicht nachweisen liessen. Exemplarische Messungen mit verschiedenen fest eingestellten Bitmustern ergaben keine signifikanten Unterschiede der Bitfehlerrate zu Messungen mit Quasi-Zufallsfolgen. Dieses Ergebnis sollte aber vor dem Hintergrund gesehen werden, daß die optischen Übertragungstrecken mit Scramblern und Descramblern betrieben werden.

Die mobilen Meßsender und Empfänger, die an vielen Stellen des Netzes einkoppelbar waren, ermöglichen bei erhöhter Fehlerrate eine schnelle Lokalisation der Fehlerquelle. Ein typischer Fall war dabei, daß durch Alterung eines Lasers die Fehlerrate allmählich anstieg.

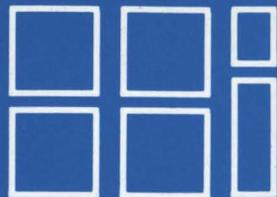
Speziell in Systemen mit dezentraler Vermittlung kommt der Fehlerlokalisierung eine erhebliche Bedeutung zu, da eine einzige Fehlerquelle unter Umständen das gesamte Netz erheblich stören kann. Daher wäre es wünschenswert, in diesem Fall Vorkehrungen zu treffen, daß im laufenden Systembetrieb eine eindeutige, einen individuellen Störer identifizierende Fehlerlokalisierung möglich wird. Ein geeignetes Verfahren dafür könnte der Einsatz individuell rückgekoppelter Scrambler/Descrambler-Paare im gesamten System sein /20/.

Die diesem technischen Bericht zugrunde liegenden Arbeiten wurden durch das Bundesministerium für Forschung und Technologie gefördert. Für den Inhalt sind die Autoren allein verantwortlich.

Literaturverzeichnis

- /1/ Evers, R.
Abschlußbericht zum Forschungsvorhaben Breitbandkommunikation mit optischen Kanälen
BMFT-FB-T 83-118
- /2/ Reim, A.; Schenkel, K.D.
Digitales Kommunikationssystem DIKOS
NTZ Bd. 34 (1981) 10, Seite 658-663
- /3/ Jeschko, A.
Silk-System für Integrierte Lokale Kommunikation
Hasler Mitteilungen, 40. Jahrgang, Nr. 1, März 1981
- /4/ Ballering, H; Thielmann, H.
Digitale Teilnehmerschleife mit dezentraler Vermittlung
Techn. Mitteilung TEKADE, Seite 36-41, 1978
- /5/ Arkat, S.; Kreutzer, H.W.; Schmidt, F.; Teich, G.; Weber, J.
Teilnehmerstation in einem diensteintegrierten digitalen Nachrichtennetz
NTZ Bd. 32 (1979), Heft 8, Seite 560-565
- /6/ Burgmeier, J.; Gier, J.; Trimmel, H.
Digitalsignalübertragung mit 560 Mbit/s über Lichtwellenleiter - ein Versuchssystem für das Heinrich-Hertz-Institut
Telcom Report 4 (1981) Heft 2, Seite 98-103
- /7/ Burmeister, M.; Hoen, B.; Kliem, H.; Teich, G.; Weber, J.
Line Concentrators for an Experimental Digital Wideband Network with Decentralized Switching
ISS'81, Montreal, Sept. 1981, Session 42c, Paper 1
- /8/ Schweizer, L.
Bitfehler im digitalen Nachrichtennetz - Eine Übersicht
Frequenz 35 (1981) 1, Seite 9-14
- /9/ Schuon, E.; Wolf, H.
Nachrichten-Meßtechnik
Springer Verlag, 1981, Seite 222-223
- /10/ Gelbrich, H.J.
Beitrag zur Ermittlung der optimalen Zykluslänge quasiszufälliger, zyklisch wiederkehrender binärer Testmuster für Bitfehlermessungen
Techn. Bericht der DBP 44 TBr 50, Sept. 1974
- /11/ Schweizer, L.
Eigenschaften und Anwendungen von Quasi-Zufallsfolgen
Frequenz 25 (1970), Seite 230-234

- /12/ Hanke, G.
Entwurf eines 1,28 Gbit/s-PCM-Versuchssystems mit Bitfehlermeßeinrichtung in integrierter Schaltungstechnik
Techn. Bericht d. DBP 442 TBr 52 Mai 1974
- /13/ Petschacher, R.; Gruber, G.; Holz, M.
Error-Rate Measurements on a 1 Gbit/s Fibre-Optic Communications Link
Electronics Letters 26th Oct. 1978 Vol. 14 No. 22 p.711-713
- /14/ Cho, Y.; Conolly, J.B.
Modern Technique in PCM-Measurements
Measurements in Telecommunication CNET, Lannion 1977,
p. 107-112
- /15/ CCITT Yellow Book Vol. IV, Fascicle IV.4
Spezifikation für ein In-Service Code Violation Monitor für Digital Transmission Systems
Recommendation O.161
- /16/ Drullmann, R.; Kammerer, W.
Leitungscodierung und betriebliche Überwachung bei regenerativen Lichtleiterkabel-Übertragungssystemen
Frequenz 34 (1980) 2, Seite 45-52
- /17/ CCITT Yellow Book Vol. IV, Fascicle IV.4
Specification for an Instrument to Monitor the Frame Alignment Signal of Frame Structures that are in Accordance with Recommendation G.732
Recommendation O.162
- /18/ Seifert, G.; Russ, W.; Herzer, R.
Structure Investigations of Transmission Errors in Digital Communication Channels
NTZ-Archiv 1979 Heft 6, Seite 143-148
- /19/ Hermes, Th.; Hoen, B.
Parallel arbeitende Scrambler, Descrambler und Zufallsfolgeneratoren
Zur Publikation in der Elektronik angenommen
- /20/ Hermes, Th.
Verfahren zum Lokalisieren von Fehlerquellen in digitalen Systemen
Patentanmeldung P 3218 858.7 vom 14.5.1982 ersetzt am 13.5.1983 durch P 3317 972.7 und EP 8373 0049
- /21/ Saniter, J.
Betriebsabläufe in einem digitalen Breitbandnetz mit dezentraler Vermittlung
Interner Bericht des Heinrich-Hertz-Instituts, Frühjahr 1983



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

