

Messung und Analyse der Fehler bei Datenübertragung auf Fernsprechanalenen

VON JOACHIM SWOBODA *

Mitteilung aus dem Institut für Nachrichtenvermittlung und Datenverarbeitung der Universität Stuttgart

(A.E.Ü. 23 [1969], Heft 8, 403–412; eingegangen am 21. Dezember 1968)

DK 681.327.8:621.395.3:621.391.82

Zur Erfassung der Fehlerstatistik bei Datenübertragung auf Fernsprechanalenen wurden 216 Datenübertragungen mit einer Gesamtdauer von 340 Stunden über unterschiedliche Leitungstypen und mit verschiedenen Modulationsarten vorgenommen. Es wurde nur zwischen richtig und falsch übertragenen Binärstellen unterschieden, aber die Richtig- und Falschstellen wurden in ihrer Reihenfolge vollständig registriert.

Die Auswertung der registrierten Fehler umfaßt neben der pauschalen Stellenfehlerwahrscheinlichkeit jeder Meßreihe vor allem die Prüfung eines neu vorgeschlagenen Kanalmodells. Letzteres wird insbesondere durch die Verteilung der Abstände zwischen aufeinanderfolgenden Fehler-Bits gekennzeichnet. Diese theoretische Fehlerabstandsverteilung enthält fünf Parameter und approximiert die gemessenen Verteilungen durchwegs erstaunlich gut. Für Orts- und Fernverbindungen, die über Hebdrehwähler führen, lassen sich typische Werte für diese fünf Verteilungsparameter angeben.

Measurement and Analysis of the Errors Occurring with Data Transmission on Telephone Channels

To ascertain the error statistics with data transmission on telephone channels 216 data transmissions with a total duration of 340 hours have been effected over different types of line and with the use of different modulation methods. A distinction was merely made between correctly and erroneously transmitted bits, but the correct and erroneous bits were fully registered in their time sequence.

The evaluation of the registered errors includes, besides the general bit error probability of each measurement series, above all the testing of a newly proposed channel model. The latter is characterized in particular by the distribution of the separations between successive error bits. This theoretical error separation distribution contains five parameters and approximates the measured distributions in all respect astoundingly well. For local and long-distance connections passing over two-motion selectors typical values can be stated for these five distribution parameters.

1. Einführung

1.1. Weshalb weitere Fehlermessungen?

Messungen über die Fehler bei Datenübertragung sind bereits mehrfach bekannt geworden, z. B. [2], [3], [4], [5]. Die in Büscheln auftretenden Fehler werden durch die pauschale Stellenfehlerwahrscheinlichkeit allein nur unzureichend beschrieben. Daher werden als Ergebnis von Messungen oft noch Blockfehlerwahrscheinlichkeiten für verschiedene Blocklängen angegeben. Letztere ist die Wahrscheinlichkeit, daß ein zufällig herausgeschnittener Block aus der Folge der Empfangsdaten mindestens einen Fehler enthält. Unter einem Fehler für die hier betrachteten binären Daten wird der Übergang von einer gesendeten Binärstelle „0“ in eine empfangene Stelle „1“ bzw. umgekehrt verstanden. Die Blockfehlerwahrscheinlichkeit ist auf einen speziellen Anwendungszweck ausgerichtet, beispielsweise läßt sich damit die optimale Blocklänge für ein fehlergesichertes Datenübertragungssystem angeben, bei dem der Empfänger eines gefälscht empfangenen Blocks vom Sender eine Wiederholung anfordert. Sollte für die Planung eines anderen Datenübertragungssystems im Hinblick auf den zu wählenden fehlererkennenden oder fehlerkorrigierenden Code die Kenntnis der Wahrscheinlichkeit für bestimmte

Fehlermuster erforderlich werden, so wären dafür neue Messungen nötig.

Es war deshalb das Ziel vorliegender Untersuchung, die Statistik der Fehlermessung durch solche Parameter zu beschreiben, daß spezielle Größen wie Blockfehlerwahrscheinlichkeit oder Fehlermusterwahrscheinlichkeiten nachträglich abgeleitet werden können. Diese Forderung nach einer möglichst allgemein verwendbaren Fehlerstatistik führt auf Modelle für den Übertragungskanal, wie sie z. B. schon von GILBERT [6] oder BERGER und MANDELROT [7] vorgeschlagen wurden. Von solchen Modellen wird erwartet, daß sie in allen statistischen Eigenschaften mit der gemessenen Übertragungsfehlerstatistik realer Kanäle möglichst gut übereinstimmen.

In einer weiteren Veröffentlichung [1] wurden die oben genannten Modelle mit den hier beschriebenen Messungen verglichen. Die Modelle erweisen sich als eine erste Näherung für den Büschelfehlerkanal. Jedoch kann ein neu vorgeschlagenes Kanalmodell, das ebenfalls in [1] ausführlich begründet wird, die Beschreibung realer Kanäle merklich verbessern. Das neue Kanalmodell wird für die Analyse im Abschnitt 4 herangezogen, und es wird daher auch hier kurz vorgestellt.

1.2. Das neue Kanalmodell

Der Modellkanal kann sich in g Zuständen Z_1, Z_2, \dots, Z_g unterschiedlicher Störintensität befinden.

* Priv.-Doz. Dr. J. SWOBODA, 79 Ulm-Söflingen, Königstraße 88.

Im Zustand Z_i ($i = 1, 2, \dots, g$) wird jede übertragene Binärstelle mit der Fehlereinfallswahrscheinlichkeit p_{Ei} ($i = 1, 2, \dots, g$) statistisch unabhängig gefälscht.

Der Stöorzustand kann sich nur unmittelbar nach einer *gefälschten* Stelle ändern, so daß der Zeitraum zwischen benachbarten Fehlerstellen nur *einem* Stöorzustand angehört. Diese Annahme vereinfacht die mathematische Handhabung des Modells außerordentlich. Nach einem Fehler geht der Kanal in einen neuen Zustand Z_i mit der Wahrscheinlichkeit W_i ($i = 1, 2, \dots, g$) über, und zwar statistisch unabhängig von dem vorangehenden Zustand¹.

Zur Beschreibung dieses Modells ist es nützlich, die Abstände zwischen aufeinanderfolgenden Fehlerstellen — im folgenden als Fehlerabstand bezeichnet — zu betrachten. Gemäß obiger Definition liegt ein zufällig herausgegriffener Fehlerabstand mit der Wahrscheinlichkeit W_i im Stöorzustand Z_i . Die Fehlerabstände haben die Länge von t oder mehr Schritten mit der Wahrscheinlichkeit

$$p(\geq t) = \sum_{i=1}^g W_i (1 - p_{Ei})^{t-1}. \quad (1)$$

Dabei ist der Abstand zwischen zwei unmittelbar benachbarten Fehlerstellen als $t = 1$ vereinbart. Alle Abstände sind damit größer oder gleich $t = 1$, und es folgt

$$p(\geq 1) = \sum_{i=1}^g W_i = 1. \quad (2)$$

Anstelle der Fehlerwahrscheinlichkeit p_{Ei} wird auch deren Kehrwert, der mittlere Fehlerabstand E_i im Zustand Z_i , verwendet:

$$p_{Ei} = 1/E_i \quad (i = 1, 2, \dots, g). \quad (3)$$

Die Fehlerabstandsverteilung nach Gl. (1) ist eine Überlagerung von g geometrischen Verteilungen. Wegen der Unabhängigkeitsannahme aufeinanderfolgender Stöorzustände Z_i sind auch die Fehlerabstände in dem Modell statistisch unabhängig. Damit ist die Fehlerabstandsverteilung eine hinreichende Beschreibung für das Modell. Die Zahl der freien Parameter E_i , W_i ist — wegen der Einschränkung nach Gl. (2) für W_i — gleich $2g - 1$.

1.3. Zur Messung und Analyse der Übertragungsfehler

Bei der Analyse der Übertragungsfehler wird nur zwischen richtig und falsch übertragenen Binärstellen unterschieden. Jedoch soll die Statistik über die *Reihenfolge* richtiger und falscher Stellen voll erfaßbar sein, und es könnte bei der Messung die ganze Folge dieser Stellen registriert werden. Wegen der oft langen fehlerfreien Zeiten ist es jedoch praktischer, die Folge der Abstände zwischen den gefälscht übertragenen Binärstellen zu registrieren. Statt der Folge

f r r r f f f r r r r r r f . . .

(r: richtige Binärstelle, f: falsche Binärstelle) wird die Folge der Fehlerabstände registriert

4, 2, 1, 8, . . .

¹ Die Annahme der statistischen Unabhängigkeit aufeinanderfolgender Zustände ist eine praktikable Näherung. Für ein erweitertes Kanalmodell [1] kann sie jedoch fallengelassen werden.

Die Analyse der Fehlerabstände wird auf Rechenmaschinen ausgeführt. Dabei soll das neue Kanalmodell, das in [1] nur am Beispiel *einer* Messung begründet wurde, nachstehend durch eine große Zahl von Messungen erhärtet werden. Insbesondere werden im Abschnitt 4.2 die zu jeder Messung ermittelten Modellparameter E_i und W_i graphisch zusammengestellt, um zu zeigen, inwieweit eine bestimmte Parameterwahl für die Gesamtheit der Messungen repräsentativ sein kann. Im Abschnitt 4.3 wird die Kovarianz aufeinanderfolgender Fehlerabstände als ein grobes Maß für die Beurteilung der Annahme herangezogen, ob die statistische Unabhängigkeit in dem Modell berechtigt ist. Die pauschalen Stellenfehlerwahrscheinlichkeiten, die bei den einzelnen Messungen mit anfielen, und die ein Maß für die mittlere Störintensität bilden, sind im Abschnitt 4.1 zusammengestellt.

2. Meßprogramm

Die Datenübertragung für die Erfassung der auftretenden Übertragungsfehler wurde im Ring geführt, so daß Sender, Empfänger und Fehlerregistriereinrichtung am gleichen Ort stehen können.

Das Meßprogramm umfaßt insgesamt 340 Meßstunden, bestehend aus 216 einzelnen Messungen, wobei jede Messung auch getrennt ausgewertet wurde. Jede Messung enthält nach Möglichkeit etwa 10000 falsch übertragene Binärstellen bzw. 10000 Fehlerabstände, falls die Meßdauer von 2 bis 3 Stunden hierfür ausreichte. Andernfalls wurde die Messung abgebrochen. Die Dauer der einzelnen Messungen lag zwischen etwa 10 Minuten bis 3 Stunden.

Die Messungen erfolgten in den Zeiten starken Fernsprechverkehrs, nämlich werktags (außer Samstag) von 9.00 bis 12.00 Uhr und von 14.00 bis 17.00 Uhr. Für diese Zeiten dürfte einigermaßen gleich starke Störung erwartet werden. Das gesamte Meßprogramm erstreckt sich über 103 Meßtage in der Zeit von Dezember 1966 bis Februar 1968.

Die Datenübertragung erfolgte über Fernsprechanäle, und zwar einerseits Ortsverbindungen über Hebdrehwählerämter (HDW), über Edelmetallmotordrehwählerämter (EMD) sowie über fest geschaltete Verbindungen ohne Wähler, andererseits über Fernverbindungen, die an den Ausgangsort Stuttgart zurückgeschleift wurden, und zwar als fest geschaltete Verbindung, sowie mit zusätzlichen Wahlstufen über HDW in der Ortsvermittlungsstelle. Eine genauere Beschreibung der Verbindungen findet sich im Abschnitt 2.2. Neben den verschiedenen Verbindungen wurden folgende Parameter von Messung zu Messung geändert:

2.1. Parameter für die Messungen

Die Übertragung erfolgte sowohl mit Frequenzmodulation (FM) als auch mit Phasenmodulation (PM). Es wurden genormte und inzwischen käufliche Modems der Industrie verwendet, die bei der Deutschen Bundespost zugelassen sind, um den Messungen allgemeine Gültigkeit zu verleihen. Die Typen der benutzten Modems werden im Abschnitt 3 genannt.

Der FM-Modem ist für Übertragungsgeschwindigkeiten von 600 und 1200 bit/s vorgesehen, der PM-Modem für 600, 1200 und 2400 bit/s. Mit diesen Geschwindigkeiten wurden Übertragungen auf allen Leitungstypen ausgeführt. (Der PM-Modem, der 2400 bit/s erlaubt, wird bis jetzt allgemein nur auf gemieteten Leitungen von der Deutschen Bundespost zugelassen.)

Der Pegel der Sendespannung wurde zwischen den absoluten Spannungspegeln -10 , -16 , -22 , -28 , -34 , -40 dB variiert. Die Deutsche Bundespost erlaubt einen maximalen Sendepiegel von -9 dB. Die gewählte Reihe bis zu sehr kleinen Pegelwerten hin hat zweifachen Grund: Erstens treten bei kleinem Pegel mehr Übertragungsfehler auf, und die Statistik liefert bei gleicher Meßdauer wegen der größeren Stichprobe engere Vertrauensintervalle. Da die Störintensität während des Tages nur näherungsweise konstant bleibt, ist man an kurzen Meßdauern interessiert. Zweitens sind z.B. nach dem Dämpfungsplan 55 weit größere Werte für die Dämpfung zwischen Sender und Empfänger zugelassen, als sie bei den benutzten Verbindungen aufgetreten sind. Die entsprechend geringen Werte für den Empfangspegel werden bei den Messungen durch den abgesenkten Sendepiegel nachgebildet.

Die übertragenen binären Daten bei den Messungen sind eine quasi-Zufallsfolge mit einer 511-bit-Periode. In einigen weiteren Meßreihen wurden nur „0“-Bits oder nur „1“-Bits übertragen, um eine eventuelle Fehlerunsymmetrie zu bemerken.

2.2. Untersuchte Verbindungen

Die für die Übertragungen benutzten Verbindungen sind ein Kompromiß zwischen dem Wunsch, eine repräsentative Auswahl aller denkbaren Verbindungen zu haben, und dem Aufwand, solche Verbindungen für eine Schleifenmessung bereit zu stellen. Im einzelnen wurden benutzt:

(HDW, Ort) Eine Ortswahlverbindung zwischen zwei Hauptanschlüssen, die zum gleichen Hebdrehwähleramt führen. Dämpfung etwa 4 dB (Stuttgart 294374—294916).

(HDW—HDW, Ort) Eine gewählte Ortsverbindung zwischen zwei Hauptanschlüssen, die zu verschiedenen Hebdrehwählämtern des gleichen Ortsnetzes führen. Dämpfung etwa 7 dB (Stuttgart 67241—294916).

(EMD, Ort) Eine gewählte Ortsverbindung zwischen zwei Hauptanschlüssen derselben, mit Edelmetallmotordrehwählern ausgerüsteten Ortsvermittlungsstelle. Dämpfung etwa 8 dB (Stuttgart 632188—632193).

(fest, Ort) Eine festgeschaltete zweidrähtige Ortsverbindung. Die Schleife war wahlweise etwa 2 bis 5 km lang; Dämpfung 4 bis 6 dB.

(fest, Fern) Eine fest geschaltete zweidrähtige Verbindung von Stuttgart nach Düsseldorf und zurückgeschleift nach Stuttgart, wahlweise als Richtfunk- oder Trägerfrequenzkabelstrecke. (Als gerichtete Zweidrahtverbindung ohne Gabeln liefert eine derartige Verbindung ohne die Dämpfung der Orts-

leitungen 3 Neper Verstärkung (genormter Sendepiegel -2 Np, Empfangspegel $+1$ Np, je für die niederfrequenten Seiten der NF/TF-Umsetzer). Bei einem Teil der Messungen wurde das Sendesignal vor dem NF/TF-Umsetzer gedämpft).

(HDW, Fern 1) Eine gewählte Fernverbindung kann nicht als Schleife an den Ausgangsort zurückgeführt werden. Statt einer gewählten Fernverbindung wurde das Ausgangssignal einer geschalteten Fernverbindung — von Stuttgart nach Düsseldorf und zurück — noch über eine gewählte HDW-Ortsverbindung (Stuttgart 294374—294916) geführt. Die geschaltete Fernverbindung ist dabei vierdrähtig mit 2/4-Drahtumsetzungen durch Gabeln an den Enden; Dämpfung etwa 13 dB.

(HDW, Fern 2) Verbindung ebenso wie HDW, Fern 1, jedoch eine kürzere geschaltete Fernverbindung von Stuttgart nach Göppingen und zurück; Dämpfung etwa 14 dB.

(HDW, Fern 3) Verbindung ebenso wie HDW, Fern 1, jedoch geschaltete Fernverbindung mit vier (statt zwei) TF-Strecken und entsprechend häufigeren NF/TF-Umsetzungen von Stuttgart über Rottweil, Donaueschingen, Freiburg und wieder zurück nach Stuttgart. Gabeln nur an den Enden in Stuttgart; Dämpfung etwa 14 dB.

2.3. Übersicht über Verbindungen und Messungen

In der Tabelle I sind für die im Abschnitt 2.2 beschriebenen Verbindungen die zugehörige Zahl von einzelnen Messungen, deren Gesamtdauer und deren mittlere Dauer angegeben.

3. Meßanordnung

Bild 1 zeigt das Blockschaltbild der Meßanordnung. Ein Datengenerator wird vom Sendetakt getrieben und liefert eine binäre quasi-Zufallsfolge mit der Periode von 511 Takten an den Sendemodem. Dieser gibt ein entsprechend moduliertes Signal über die benutzte Verbindungsleitung an den Empfangsmodem. Die binäre Folge, die den Empfänger-Modem verläßt, wird anhand eines zweiten, gleichartigen Datengenerators geprüft. Stimmen Empfangsfolge und der Ausgang des empfangsseitigen Datengenerators bitweise nicht überein, dann wird für

Tabelle I.

Verbindung	Zahl der Messungen	Dauer aller Messungen	mittlere Dauer je Messung
		Std.	Std.
HDW, Ort	44	66,4	1,51
HDW-HDW, Ort	43	45,1	1,05
EMD, Ort	22	70,6	3,21
fest, Ort	27	61,8	2,29
fest, Fern	26	53,0	2,04
HDW, Fern 1	20	17,1	0,85
HDW, Fern 2	16	15,6	0,98
HDW, Fern 3	18	11,3	0,63
insgesamt	216	340,9	1,58

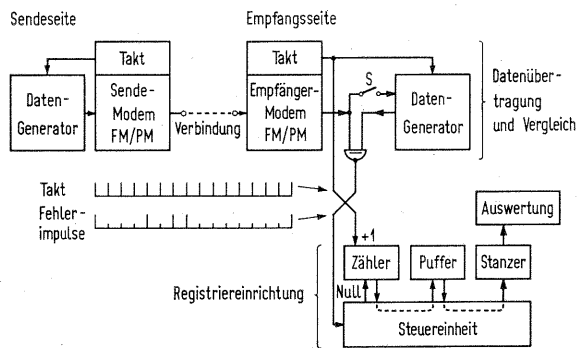


Bild 1. Blockschaltbild der Meßanordnung bestehend aus Datenübertragung, Vergleich und Fehler-Registriereinrichtung.

jedes offensichtlich falsch übertragene Bit ein Fehlerimpuls abgegeben. Der empfangsseitige Datengenerator kann vor Beginn der Messung mittels der Taste S auf die Empfangsfolge synchronisiert werden, so daß die beiden Datengeneratoren, um die Laufzeit der Verbindung verschoben, die gleiche Bitfolge abgeben.

In der Registriereinrichtung zählt ein elektronischer Zähler die Takte seit dem letzten Fehlerimpuls. Bei Eintreffen des nächsten Fehlerimpulses wird der Zählerinhalt in einen Pufferkernspeicher übertragen, und der Zähler wird noch vor Eintreffen des nächsten Taktimpulses auf Null gesetzt. Solange der Pufferspeicher nicht leer ist, werden die gespeicherten Fehlerabstände über einen Streifenstanzer ausgegeben. Für die in Bild 1 angenommenen Fehlerimpulse würde der Stanzer folgende Zeichen ausgeben: 4, 2, 1, 8, ... Der verwendete Stanzer leistet 150 Zeichen/s. Der Pufferspeicher kann bis zu 4096 Dezimalziffern aufnehmen. Bei den Versuchen zeigte sich, daß der Speicher fast nie zu mehr als 10% seiner Kapazität in Anspruch genommen wurde.

Für die Übertragung auf Fernverbindungen wurden außerdem die Fehlerimpulse bei Leitungsunterbrechung unterdrückt, was durch die Empfangspegelüberwachung der Modems ermöglicht wird (in Bild 1 nicht ersichtlich).

Folgende Typen von Modems wurden benutzt:

Frequenzmodulation (FM):

Felten & Guilleaume Fernmeldeanlagen (FGF) FM-Modem 1200/600 bit/s.

Phasenmodulation (PM):

Telefunken-Datenübertragungsgerät PhM 2400/1200/600.

Das im PM-Modem eingebaute Entzerrfilter, das in Stufen einstellbar ist, wurde nur bei der Übertragung mit 2400 bit/s über Trägerfrequenz-(Fern-)Verbindungen eingeschaltet. Bei den anderen Verbindungen lieferte das Filter keine signifikante Verbesserung der Übertragung. Der Kompromiß-Entzerrer im FM-Modem war bei allen Messungen in Betrieb.

Der Phasenmodem enthält bereits die nötigen Takteinrichtungen. Für die FM-Übertragung wurde

eine verbesserte Form der üblichen, digitalen Empfangstaktregelung benutzt, wie sie in [8] näher beschrieben ist.

Als Daten-Generatoren für die quasi-Zufallsfolge arbeiten auf Sendeseite und Empfangsseite rückgekoppelte Schieberegister, wie sie auch für die zyklische Codierung bei gesicherter Datenübertragung benutzt werden [9]. In Anlehnung an einen CCITT-Vorschlag (Dok. GT 43, Nr. 20) wird ein rückgekoppeltes Schieberegister mit neun Kippstufen und einem modulo-2-Addierglied benutzt, das eine Binärfolge mit der Periode $2^9 - 1 = 511$ liefert. Bild 2 zeigt das Prinzip dieses Schieberegisters, das für Sendeseite und Empfangsseite gleich ist; jedoch erfordert nur die Empfangsseite eine Synchronisationseinrichtung. Letztere besteht aus dem Eingang für die empfangene quasi-Zufallsfolge, auf die synchronisiert werden soll, und dem Umschalter S. Wenn der Schalter S während der letzten neun richtig empfangenen Binärschritte auf den Eingang umgelegt war, dann ist die Synchronisation auf die 511-bit-Periode der beiden Datengeneratoren erreicht.

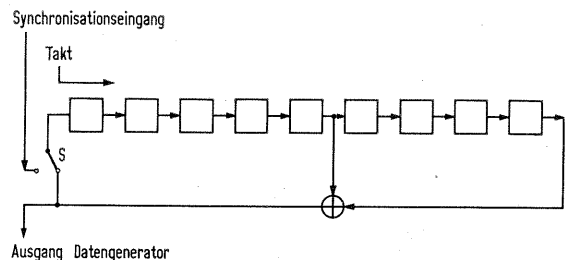


Bild 2. Blockschaltbild des Datengenerators für die Empfangsseite. Für die Sendeseite entfällt die Synchronisationseinrichtung.

4. Auswertung der Ergebnisse

Die statistische Auswertung der bei der Datenübertragung registrierten Fehler erfolgte mit Hilfe von Rechnerprogrammen. Auch die graphischen Darstellungen wurden vom Rechner ausgedruckt.

Obwohl als Hauptziel für diese Messungen ein verfeinertes statistisches Kanalmodell für die Übertragungsfehler angestrebt wird, soll zunächst die pauschale Stellenfehlerwahrscheinlichkeit p_E für die einzelnen Messungen dargestellt werden. Dieses pauschale Störungsmaß fällt ohnehin an und liefert bei der Zahl von über 200 Messungen ein vertrauenswürdiges Güte Merkmal der benutzten Verbindungen.

4.1. Pauschale Stellenfehlerwahrscheinlichkeit

In den Bildern 3 bis 8 ist für verschiedene Gruppen von Messungen die ermittelte Stellenfehlerwahrscheinlichkeit p_E in Abhängigkeit vom Sendepiegel aufgetragen. (Die Abweichung von der Konvention — unabhängige Größe als Ordinate und abhängige Größe als Abszisse — ist durch das Schnelldruckerformat bedingt.) Der Sendespannungspegel ist absolut zu verstehen, — 40 dB entspricht einer kleinen und — 10 dB einer großen Spannung. Die Frage, ob für die Störung der Sendeseite oder Empfangsseite relevant sei, ist für die Darstellung unerheb-

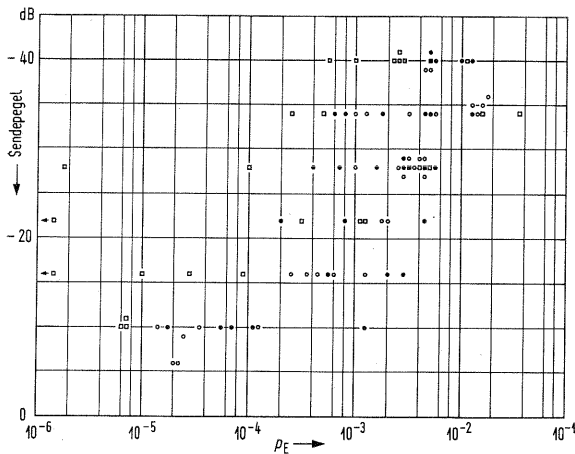


Bild 3. Für HDW-Ortsverbindungen die Stellenfehlerwahrscheinlichkeit p_E abhängig vom Sendepiegel;
□ FM-Übertragung, ○ PM-Übertragung,
■ • Verbindungen zwischen gleichen Hauptanschlüssen.

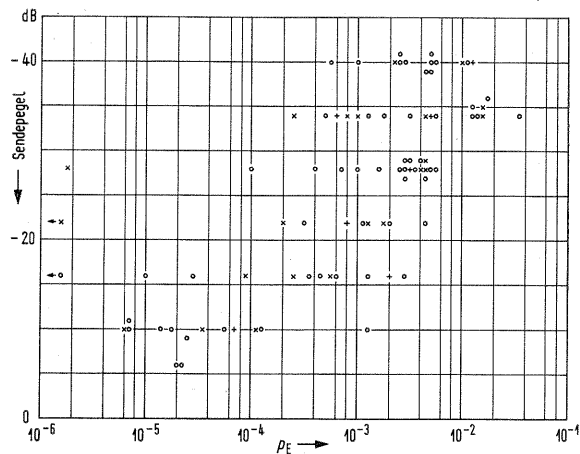


Bild 4. Für HDW-Ortsverbindungen die Stellenfehlerwahrscheinlichkeit p_E abhängig vom Sendepiegel;
Übertragungsgeschwindigkeit
× 600 bit/s, ○ 1200 bit/s, + 2400 bit/s.

lich, da die Leitungsdämpfung für eine Gruppe von Messungen praktisch konstant ist. Jeder Punkt in den Bildern entspricht einer Messung, wobei deren Dauer im Mittel bei $1\frac{1}{2}$ Stunden liegt. Zwei Messungen, die auf den gleichen Rasterpunkt fallen würden, sind in dichtester möglicher Nachbarschaft gesetzt.

In Bild 3 sind alle Messungen über gewählte HDW-Ortsverbindungen zusammengefaßt, also nach Abschnitt 2.2 alle Verbindungen der Gruppen ‚HDW, Ort‘ und ‚HDW-HDW, Ort‘. Es fällt auf, daß für einen festen Pegelwert die Restfehlerwahrscheinlichkeit p_E von Messung zu Messung um den Faktor 100 und sogar mehr schwanken kann. (Diese Schwankungen können nicht einer zu kleinen Stichprobe angelastet werden. Bei 10000 erfaßten Fehlerabständen je Messung verursacht die Stichprobengröße nur eine Schwankung von wenigen Prozent.) Sogar bei Verbindungen, die zwischen den gleichen Hauptanschlüssen gewählt wurden, kann p_E um den Faktor 20 schwanken. Um letzteres zu zeigen, sind in Bild 3 die Punkte der Gruppe ‚HDW-HDW, Ort‘ ausgefüllt, deren Verbindungen also zwischen gleichen Anschlüssen gewählt wurden.

Ferner sind in Bild 3 die Messungen mit einem Frequenz-Modem (FM) unterschieden von den Messungen mit einem Phasen-Modem (PM). Die Punkte ○ für PM und □ für FM treten sehr durchmischt auf. Allenfalls zeigen Messungen mit FM bei großem Sendepiegel eine leichte Tendenz zu geringerer Stellenfehlerwahrscheinlichkeit.

Summarisch kann jedoch für alle HDW-Ortsverbindungen festgestellt werden: Für einen großen Sendepiegel von etwa -10 dB liegt die Stellenfehlerwahrscheinlichkeit im wesentlichen bei $p_E \approx 10^{-5} \dots 10^{-3}$ und für schwachen Pegel von etwa -30 dB bei $p_E \approx 10^{-4} \dots 10^{-2}$. Ein Absenken des Pegels um 10 dB läßt p_E um etwa den Faktor 3 bis 10 anwachsen.

Das Bild 4 enthält die gleichen Messungen wie Bild 3; jedoch sind die Meßpunkte nach den unter-

schiedlichen Übertragungsgeschwindigkeiten aufgeschlüsselt. Es bedeuten ‚+‘ 2400 bit/s, ‚×‘ 600 bit/s und ‚o‘ 1200 bit/s. Die drei Arten der Punkte treten völlig durchmischt auf. Eine deutliche Abhängigkeit zwischen Übertragungsgeschwindigkeit und Stellenfehlerwahrscheinlichkeit kann damit bei HDW-Ortsverbindungen nicht festgestellt werden.

Das Bild 5 umfaßt alle Messungen auf EMD-Ortsverbindungen gemäß der Gruppe ‚EMD, Ort‘ im Abschnitt 2.2. Die □ und ■ bezeichnen FM-Übertragungen, wobei die vollen Quadrate eine Rate von 600 bit/s bedeuten. Die ○, ● und ▲ gehören zu PM-Übertragungen, aufgeschlüsselt nach der Rate von 1200, 600 und 2400 bit/s. Die Übertragungsgeschwindigkeit hat auf die pauschale Stellenfehlerwahrscheinlichkeit p_E offenbar keinen Einfluß, obwohl sich bei FM mit 600 bit/s die Art der Fehlerabstandsverteilung unterscheidet (vgl. Abschnitt 4.2.1). Die Stellenfehlerwahrscheinlichkeit für FM liegt dicht bei einer Geraden zwischen $-10 \text{ dB}/p_E = 2 \cdot 10^{-6}$ und $-30 \text{ dB}/p_E = 10^{-3}$. Die Stellenfehlerwah-

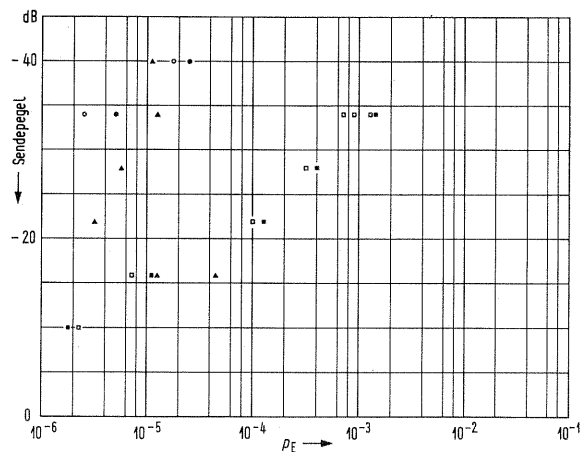


Bild 5. Für EMD-Ortsverbindungen die Stellenfehlerwahrscheinlichkeit p_E abhängig vom Sendepiegel;
□ FM, 1200 bit/s, ■ FM, 600 bit/s,
○ PM, 1200 bit/s, ● PM, 600 bit/s, ▲ PM, 2400 bit/s.

scheinlichkeit für PM ist dagegen im Mittel etwa um den Faktor 50 geringer, streut aber sehr stark.

Insgesamt treten, verglichen mit der Übertragung auf HDW-Verbindungen gemäß Bild 3, bei EMD-Verbindungen gemäß Bild 5 im Mittel merklich weniger Fehler auf.

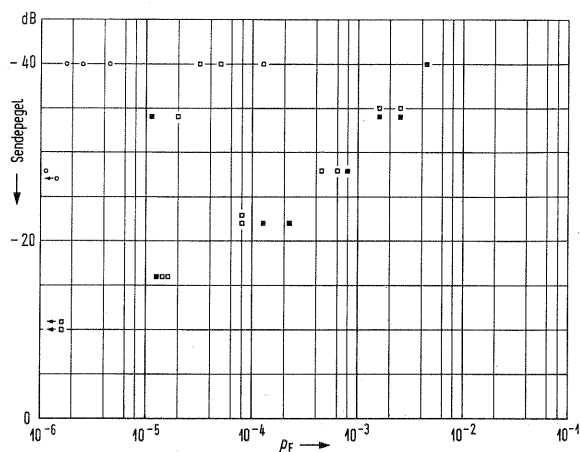


Bild 6. Für festgeschaltete, mietbare Ortsleitungen die Stellenfehlerwahrscheinlichkeit p_E abhängig vom Sendepiegel; \square FM, 1200 bit/s, \circ PM.

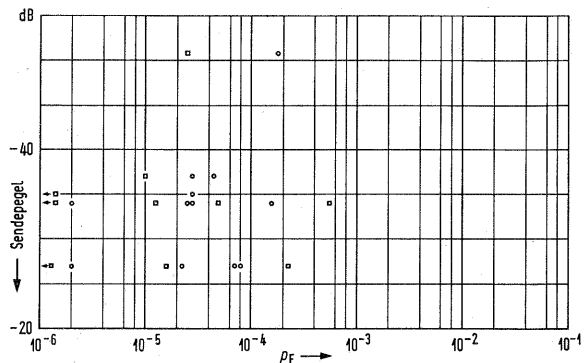


Bild 7. Für feste, mietbare Fernverbindungen die Stellenfehlerwahrscheinlichkeit abhängig vom Sendepiegel, gemessen am Eingang des NF/TF-Umsetzers; \square FM, \circ PM.

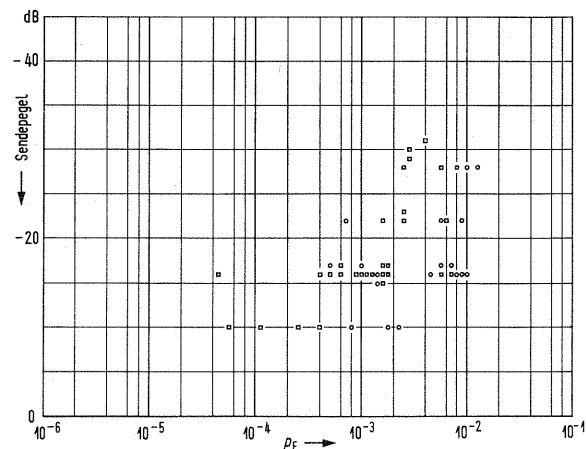


Bild 8. Für gewählte Fernverbindungen die Stellenfehlerwahrscheinlichkeit abhängig vom Sendepiegel; \square FM, \circ PM.

Bild 6 zeigt die Stellenfehlerwahrscheinlichkeit für fest geschaltete Ortsleitungen ohne Wähler (gemäß ‚fest, Ort‘ im Abschnitt 2.2), ebenfalls aufgeschlüsselt nach FM, 1200 bit/s (\square), FM, 600 bit/s (\blacksquare) und PM (\circ)-Übertragungen. Man erkennt, daß sich die Fehlerwahrscheinlichkeiten bei den festen Ortsleitungen als sehr ähnlich denen bei gewählten EMD-Verbindungen gemäß Bild 5 erweisen.

In Bild 7 sind alle Messungen auf festgeschalteten Fernverbindungen zusammengestellt (gemäß ‚fest, Fern‘ im Abschnitt 2.2), aufgeteilt nach FM-Übertragung (\square) und PM-Übertragung (\circ). Auffälliges Merkmal für die weit gestreuten Punkte von $p_E = 0 \dots 10^{-3}$ ist die weitgehende Unabhängigkeit der Stellenfehlerwahrscheinlichkeit vom Sendepiegel. (Der Pegel bezieht sich auf den Eingang des NF/TF-Umsetzers.) Weiterhin kann auch für die Modulationsart kein Einfluß auf p_E bemerkt werden. Eine Aufschlüsselung nach Funk- und Kabelverbindungen ist in Bild 7 wegen ebenfalls mangelnden Einflusses weggelassen.

Schließlich zeigt Bild 8 die Ergebnisse zusammengefaßt für alle drei Gruppen der gewählten Fernverbindungen (gemäß ‚HDW, Fern 1‘, ‚HDW, Fern 2‘ und ‚HDW, Fern 3‘). Es ist wiederum nach FM (\square)- und PM (\circ)-Übertragung unterschieden. Die Restfehlerwahrscheinlichkeit ist im Mittel um den Faktor 10 größer als bei den HDW-Ortsverbindungen gemäß Bild 3, dagegen etwa um den Faktor 100 größer als bei festgeschalteten Fernleitungen gemäß Bild 7. Von den 49 dargestellten Messungen in Bild 8 liegt p_E in 34 Fällen über 10^{-3} und in einem Fall sogar über 10^{-2} . Ein deutlicher Einfluß der Modulationsart ist nicht zu bemerken; die beiden Arten der Punkte treten gleichmäßig durchmischt auf. Ferner zeigt eine Unterscheidung nach den drei in Bild 8 zusammengefaßten Verbindungsgruppen (in Bild 8 nicht aufgeschlüsselt) ebenfalls keinen Einfluß.

4.2. Auswertung der Fehlerabstandsverteilung

Die Verteilung der Abstände zwischen den fehlerhaft übertragenen Binärstellen charakterisiert die Fehlerstatistik weitgehend. In dem vorgeschlagenen neuen Modell [1] ist sie sogar eine hinreichende Beschreibung.

An ein vertrauenswürdiges Kanalmodell sind u. a. zwei Forderungen zu stellen:

Die gemessene Abstandsverteilung einer Einzelmessung soll durch die theoretische Verteilung des Modells hinreichend angenähert werden.

Über die Parameter der theoretischen Verteilungen, die eine Gruppe von Messungen auf gleichen oder gleichartigen Leitungen approximieren, sollten Angaben allgemein möglich sein.

Die theoretischen Verteilungen werden durch die Parameter W_i und E_i ($i = 1, 2, \dots, g$) beschrieben (siehe Abschnitt 1.2). Dabei ist E_i die Erwartung des Fehlerabstandes im Störszustand Z_i und W_i die Wahrscheinlichkeit, daß nach einem Fehlerbit der Kanal in den Zustand Z_i übergeht.

Entsprechend den obigen Forderungen ist zunächst die Approximation einzelner gemessener Ab-

standsverteilungen zu diskutieren, und als zweiter Schritt sind die ermittelten Parameter vergleichbarer Messungen einander gegenüber zu stellen.

4.2.1. Fehlerabstandsverteilung und deren Approximation für Einzelmessungen

Die Fehlerabstandsverteilungskurven und deren Approximation können für alle 216 Messungen hier natürlich nicht dargestellt werden. Vielmehr zeigen die Bilder 9, 10 und 11 einige typische Vertreter. Diese Bilder enthalten:

Die gemessene Fehlerabstandsverteilung $h(\geq t)$, durch einzelne Punkte dargestellt. Dabei ist $h(\geq t)$ der Anteil der Abstände, die t oder mehr Binärschritte lang sind. Die (senkrechten) Vertrauensintervalle zu jedem Punkt sind durch die endliche Meßdauer bedingt und überdecken den „wahren Wert“ mit 95% Sicherheit.

Die theoretische Fehlerabstandsverteilung $p(\geq t)$ gemäß Gl. (1), wobei $g = 3$ verschiedene Störzustände des Kanals angenommen wurden. Nur in den Punkten, in denen die theoretische Verteilung nicht genau auf die gemessene Verteilung fällt (gerastet auf eine Druckposition des Schnelldruckers), ist auf der Koordinatenposition des theoretischen Wertes die Ziffer 3 (gemäß $g = 3$) ausgedrückt.

Ferner enthalten die Bilder die drei Komponenten $W_i(1 - 1/E_i)^{t-1}$ ($i = 1, 2, 3$) der theoretischen Verteilung, dargestellt als ausgezogene Kurven.

Die Abstandsverteilungen sowohl für Orts- als auch für Fernverbindungen, die über Hebdrehwähler führen, zeigen alle einen dem Bild 9 ähnlichen Verlauf. Charakteristisch sind die drei ‚Buckel‘ in der Verteilungskurve, wobei die oberen beiden mehr oder weniger ausgeprägt sein können. Die drei ‚Buckel‘ lassen sich als Auswirkung von den drei Zuständen des Kanals mit unterschiedlicher Stör-

intensität interpretieren. Die gemessene Fehlerabstandsverteilung wird durch die theoretische Verteilung sehr gut approximiert. Nur an drei Punkten zeigt sich eine Abweichung; sonst stimmen die Verteilungen innerhalb der Quantisierung des Druckrasters überein. In dem dargestellten Beispiel entsprechen den drei Störintensitäten die mittleren Fehlerabstände $E_1 = 7940$, $E_2 = 39,8$ und $E_3 = 2,2$. Die Störintensität mit dem mittleren Fehlerabstand $E_3 = 2,2$ entspricht in Bild 9 der Komponente, die bereits für kleine Fehlerabstände ($t = 1, \dots, 10$) steil abfällt, und damit für den anfänglichen Abfall von $h(\geq t)$ verantwortlich ist. Der anfänglich schnelle Abfall von $h(\geq t)$ weist auf die mit großer Häufigkeit auftretenden kurzen Fehlerabstände innerhalb der Fehlerbüschel hin. Man bemerke ferner, daß für maximale Störung der mittlere Fehlerabstand die Länge $E_3 = 2$ hätte (entsprechend $p_{E3} = 0,5$).

Fest geschaltete Orts- und Fernverbindungen und (gewählte) EMD-Ortsverbindungen verhalten sich bezüglich der Fehlerabstände ziemlich ähnlich. Bild 10 gilt für eine fest geschaltete Fernverbindung, jedoch zeigen auch die fest geschalteten Ortsverbindungen und die EMD-Ortsverbindungen in der Fehlerabstandsverteilung diesen prinzipiellen Verlauf. Charakteristisch ist nach einem ersten Abfall ein längerer horizontaler Teil, innerhalb dessen die Fehlerabstandswerte nur geringe Wahrscheinlichkeit haben. Die Abstandsverteilung der Messung im Bild 10 könnte auch durch eine theoretische Verteilung mit nur zwei Komponenten ($g = 2$ Störzustände) noch einigermaßen gut approximiert werden. Jedoch fällt die Abstandsverteilung anderer gleichartiger Messungen für große Abstände ($t \gtrsim 10^2$) flacher oder in Form von zwei ‚Buckeln‘ ab, was eine generelle Approximation mit drei Komponenten als besser erscheinen läßt.

Ein deutlich anderes Bild zeigen die Übertragungen mit FM-Modem bei einer Rate von 600 bit/s auf den fest geschalteten Ortsverbindungen und den

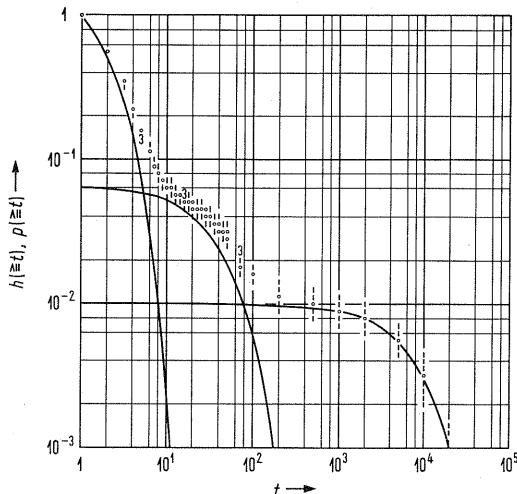


Bild 9. Gemessene Fehlerabstandsverteilung $h(\geq t)$ mit Vertrauensintervallen. Theoretische Verteilung $p(\geq t)$ für Grad $g = 3$, dargestellt durch „3“, falls die theoretische Verteilung nicht auf die Punkte der gemessenen Verteilung fällt. Ferner die drei Komponenten der theoretischen Verteilung. Verbindung Stuttgart-Düsseldorf und zurück einschließlich HDW-Wahlstufen, PM-Modem, 1200 bit/s, Sendepiegel - 28 dB.

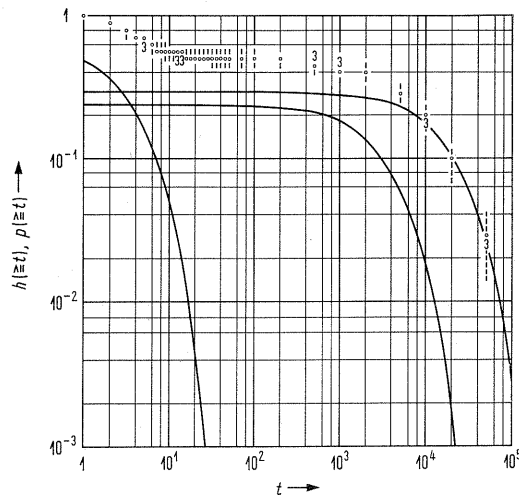


Bild 10. Wie Bild 9, jedoch Verbindung Stuttgart-Düsseldorf und zurück, festgeschaltet, PM-Modem, 1200 bit/s, Sendepiegel - 34 dB.

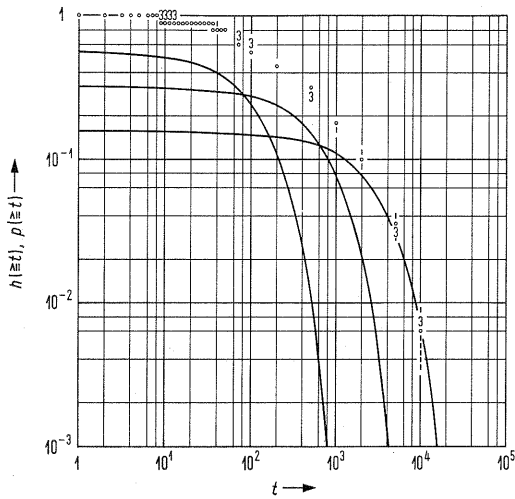


Bild 11. Wie Bild 9, jedoch EMD-Ortsverbindung, FM-Modem, 600 bit/s, Sendepiegel -34 dB.

EMD-Ortsverbindungen. Ihre Fehlerabstandsverteilungen haben einen Verlauf gemäß Bild 11. Charakteristisch ist der Abfall mit gleichmäßig zunehmender Steilheit ohne jegliche Stufen. Sehr kurze Fehlerabstände sind damit sehr unwahrscheinlich: Nach Bild 11 sind 90% der Fehlerabstände länger als 20 Schritte, so daß gebüschelte Fehler praktisch nicht auftreten. Man bemerkt, daß die Abstandsverteilung in Bild 11 durch nur zwei oder gar nur eine Komponente nur mangelhaft approximiert werden könnte. (In doppelt-logarithmischer Darstellung sind die Komponenten der theoretischen Verteilung, von ihrer Translation abgesehen, praktisch kongruent.)

Alle drei vorgestellten Beispiele zeigen eine sehr gute Übereinstimmung zwischen gemessener und theoretischer Fehlerabstandsverteilung. Um auch die Übereinstimmung für alle hier nicht vorgestellten Messungen zu zeigen, sind in Tabelle II für mehrere Gruppen von Messungen Abweichungsmaße angegeben. Aus jeder Gruppe wurden zufallsmäßig einige Messungen herausgegriffen und die abweichenden Druckpositionen zwischen gemessener und approximierter Abstandsverteilung gezählt. Damit läßt sich eine mittlere Betragsabweichung, gemessen im Druckerraster, angeben bzw. der mittlere Betrag des relativen Fehlers ausrechnen. Die Gruppen der Verbindungen in Tabelle II entsprechen den Vereinbarungen im Abschnitt 2.2.

Tabelle II.

Gruppe der Verbindungen	Abstandsverteilung, mittl. Abweichungsbetrag	
	in Druckpositionen	in % relativ
HDW, Ort und HDW-HDW, Ort	0,42	5,0
EMD, Ort	0,44	5,2
fest, Ort	0,37	4,4
fest, Fern	0,41	4,8
HDW, Fern 1, 2 und 3	0,44	5,2

Man entnimmt der Tabelle II, daß die gemessene Fehlerabstandsverteilung durch die theoretische Verteilung für Messungen jeder Gruppe etwa gleich gut approximiert werden kann. Die mittlere Betragsabweichung beträgt weniger als eine halbe Druckposition, was etwa 5% relative Abweichung zwischen den Verteilungskurven ist.

Die Approximation wurde mit einem Gradientenverfahren auf einer Rechenmaschine ausgeführt. Der Zeitbedarf je Approximation war 3 bis 5 Minuten auf dem Telefunken-Rechner TR-4.

4.2.2. Fehlerabstandsverteilungen für Gruppen von Messungen

Die gemessenen Fehlerabstandsverteilungen werden durch ihre theoretischen Verteilungskurven mit dem Grad $g = 3$ gut approximiert. Daher genügt es, für eine gemessene Verteilung die Parameter $E_1, E_2, E_3, W_1, W_2, (W_3 = 1 - W_1 - W_2)$ der zugehörigen theoretischen Verteilung anzugeben.

Über diese Verteilungsparameter kann für eine Gruppe von Messungen Statistik getrieben werden, und es ist der Wunsch, z.B. für die HDW-Ortsverbindung gültige Parameter anzugeben. Über die Streuung der Parameter von Messung zu Messung darf man jedoch keine zu optimistischen Erwartungen hegen; es sei daran erinnert, daß bereits die pauschale Stellenfehlerwahrscheinlichkeit p_E für gleichartige Verbindungen um den Faktor 100 schwanken kann.

Es wird sich zeigen, daß unter dieser Einschränkung Parameterangaben möglich sind für Orts- und Fernverbindungen, die über Hebdrehwähler führen. Dagegen existieren für andere Verbindungen keine allgemeingültigen und vernünftigen Parameterwerte.

In Bild 12a, b sind die Parameterwerte für alle HDW-Ortsverbindungen, abhängig vom Sendepiegel (als Ordinate), zusammengestellt. Die Abszisse in Bild 12a gibt die Größe der Parameterwerte E_1, E_2 und E_3 an. Das zu jeder Messung gehörige Tripel E_3, E_2, E_1 wird durch \circ (für E_3), \times (für E_2) und \bullet (für E_1) in entsprechender Position dargestellt.

Entsprechend gibt Bild 12b die Parameterwerte $W_1(\bullet), W_2(\times)$ und $W_3(\circ)$ in entsprechender Position an. Man beachte, daß die Abszisse in Bild 12b aus drei getrennten Teilen besteht, je den Wertebereich um 10^{-1} darstellend.

Der Parameter E_3 , der als mittlerer Fehlerabstand für den Zustand starker Störung interpretiert werden kann, ist nach Bild 12a für alle Sendepiegel um den Wert 2 konzentriert. Die zugehörige Fehlerfallwahrscheinlichkeit ist $p_{E3} = 1/2$, was einer maximal möglichen Störung entspricht.

Der mittlere Fehlerabstand E_2 für den Zustand mittelstarker Störung konzentriert sich um den Wert 50, wobei geringerer Sendepiegel diesen Wert geringfügig absenkt.

Der Parameter E_1 , der den mittleren Fehlerabstand für den Zustand schwacher Störung angibt, liegt bei hohem Sendepiegel (-10 dB) um den Wert 25000 und bei geringem Pegel (-40 dB) um den Wert 2500. Man könnte E_1 auch als mittleren Ab-

stand zwischen den ‚Büscheln von Fehlerbüscheln‘ bezeichnen. Bei der Pegelabsenkung um 30 dB verringert sich dieser Abstand etwa um den Faktor 10 und läßt dadurch die pauschale Stellenfehlerwahrscheinlichkeit p_E anwachsen.

Die Parameterwerte W_i in Bild 12b sind die Anteile für die Fehlerabstände mit den Erwartungslängen E_i . Es fallen W_1 und W_2 mit absinkendem Sendepiegel im Mittel um den Faktor 2 bis 3, wodurch die langen und mittleren Fehlerabstände seltener werden. Die weite Streuung für W_1 entspricht der weiten Streuung von p_E in Bild 3. Die Werte für $W_3 = 1 - W_1 - W_2$ sind nur der Vollständigkeit halber angegeben.

Bild 12a, b enthält alle Messungen über HDW-Ortsverbindungen. Es ist die Frage, ob eine Aufschlüsselung nach unterschiedlichen Übertragungsgeschwindigkeiten oder nach unterschiedlichen Modems (FM gegenüber PM) Einflüsse auf die Parameter erkennen läßt. Eine hier nicht vorgestellte Aufschlüsselung zeigt keine be-

Bild 12.

(a) Statistik über die Fehlerabstandserwartungen E_1 (●), E_2 (×) und E_3 (○) abhängig vom Sendepiegel (Ordinate) für alle HDW-Ortsverbindungen.

(b) Statistik der zugehörigen Anteile W_1 (●), W_2 (×) und W_3 (○) an Fehlerabständen mit den Erwartungslängen E_1 , E_2 und E_3 .

merkenswerten Einflüsse. Insgesamt ist die Streuung aller Parameter in Bild 12a, b erstaunlich gering im Vergleich zu p_E in Bild 3. Anhand von Bild 12a, b kann die Abstandsverteilung ‚der‘ HDW-Ortsverbindung z. B. für -10 dB Sendepiegel, eingedenk einer Variationsbreite angegeben werden:

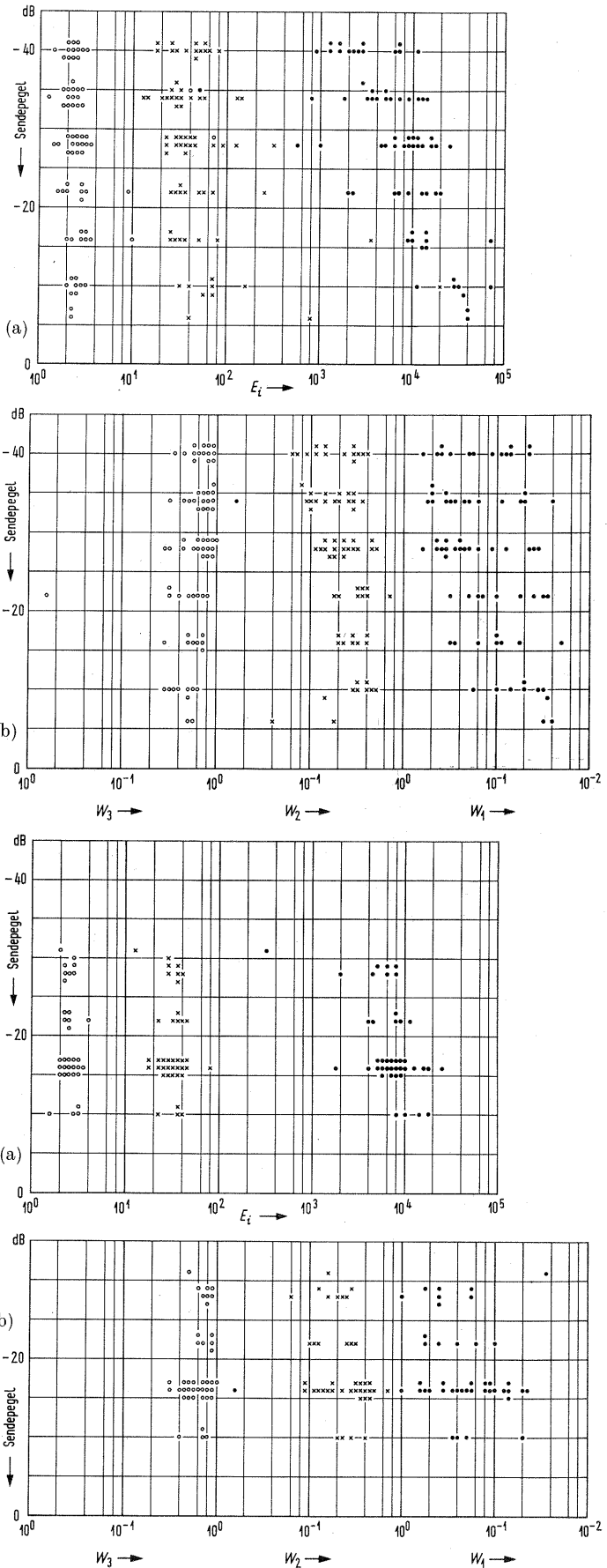
$$p(\geq t) = 0,15 \cdot (1 - 1/25000)^{t-1} + 0,35 \cdot (1 - 1/50)^{t-1} + 0,5 \cdot (1 - 1/2)^{t-1}.$$

Die Parameterwerte für alle HDW-Fernverbindungen in Bild 13a, b sind sehr ähnlich denen der HDW-Ortsverbindungen verteilt. Nur sind die Anteile W_1 und W_2 und die Erwartungslängen E_1 und E_2 (der größeren Abstände) etwas kleiner, was eine etwas größere Stellenfehlerwahrscheinlichkeit p_E bedingt.

An anderer Stelle [1] wird gezeigt, daß die Fehlerabstandsverteilung einer Einzelmessung durch eine theoretische Verteilung vom Grad $g=4$ besonders gut approximiert wird. Es zeigt sich aber, daß dann die Parameterwerte innerhalb einer Gruppe gleich-

Bild 13.

Wie Bild 12 a, b, jedoch für alle Fernverbindungen mit HDW-Wahlstufen.



artiger Messungen stärker streuen und sich sogar überschneiden. Deshalb wurde für die theoretischen Verteilungen die Überlagerung von $g = 3$ geometrischen Verteilungen zugrunde gelegt.

Werden die Verteilungsparameter für fest geschaltete Orts- und Fernverbindungen sowie für EMD-Wählerverbindungen gemäß Bild 12 a, b zusammengestellt, was hier nicht gezeigt wird, dann lassen sich daraus wegen allzu großer Streuungen keine allgemein verbindlichen Parameterwerte entnehmen. Man mag geneigt sein, für diese Verbindungen die Gültigkeit des vorgeschlagenen Kanalmodells mit seiner theoretischen Fehlerabstandsverteilung in Frage zu stellen; da aber jede einzelne gemessene Abstandsverteilung sehr gut approximiert wird, besteht dafür kein zwingender Grund.

Es erscheint zunächst als ein gewisser Kompromiß, jede Einzelmessung durch die theoretische Verteilung statt mit dem Grad $g = 3$ mit dem Grad $g = 2$ weniger gut zu approximieren, und dafür eine geringere Streuung für die Parameter einer Gruppe von Messungen zu erhoffen. Jedoch zeigen dann zahlreiche Messungen, eine so starke Verschlechterung in der Approximationsgüte, so daß dadurch die Modellvorstellung fraglich wird.

Die Unterschiede in den Parametern von Messung zu Messung legen vielmehr die Vermutung nahe, daß diese im Mittel schwächer gestörten Verbindungen von Fall zu Fall unterschiedliche physikalische Ursachen der Störung haben. Jede der möglichen Ursachen kann zwar durch das vorgeschlagene Kanalmodell mit $g = 3$ Komponenten gut erfaßt werden, aber je nach Ursache sind die Parameterwerte verschieden.

4.3. Zur statistischen Unabhängigkeit der Fehlerabstände

In dem vorgeschlagenen Kanalmodell wird als einfachster Fall statistische Unabhängigkeit zwischen den aufeinanderfolgenden Fehlerabständen angenommen. Dies ist nur eine Näherung [1]. Als ein Maß für diese Abweichung wird der Kovarianzfaktor k [10] eingeführt. Bei Unabhängigkeit ist $k = 0$, und $k = 1$ bezeichnet maximale Abhängigkeit. Zwar ist die Kovarianz allgemein ein etwas zweifelhaftes Maß, da sich auch bei Abhängigkeit $k = 0$ einstellen kann. Hier aber ist die Abhängigkeit dadurch gekennzeichnet, daß auf einen langen Fehlerabstand bevorzugt wieder ein langer Fehlerabstand folgt [1], und dies schlägt sich in einem positiven Kovarianzfaktor nieder.

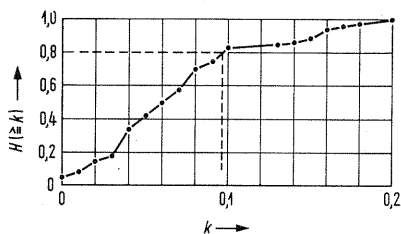


Bild 14. Häufigkeitsverteilung der Kovarianzfaktoren k für aufeinanderfolgend benachbarte Fehlerabstände bei HDW-Ortsverbindungen.

Das Bild 14 zeigt die Häufigkeitsverteilung $H(\leq k)$ für die Kovarianzfaktoren, die für die HDW-Ortsverbindungen ermittelt wurden. Es bezeichnet $H(\leq k)$ den relativen Anteil an Messungen, deren Kovarianzfaktor kleiner oder gleich k ist. Man entnimmt der Darstellung, daß die Kovarianz k für 80% der Messungen kleiner als 0,1 ist.

4.4. Anmerkungen zur Messung und Analyse

Bei den Messungen auf Fernverbindungen wurden kürzere Leitungsunterbrechungen, die durch die Empfangspegelüberwachung signalisiert werden, nicht beachtet. Eine andauernde Unterbrechung ereignete sich bei den insgesamt 97 Stunden dauernden Messungen auf Fernverbindungen zweimal.

Die Entscheidung, ob ein empfangenes Bit richtig übertragen wurde, verlangt, daß während einer ganzen Messung Sende- und Empfangstakt synchron laufen. Der Empfänger-Bit-Takt verlor seine Synchronisation während der Fernverbindungen bei PM-Übertragung fünfmal und bei FM-Übertragung einmal.

Der Einfall der Fehler bei den festgeschalteten Ortsverbindungen, insbesondere aber bei den festen Fernverbindungen, war in stärkerem Maße unregelmäßig. Bei einer Fernverbindung ereignete sich z. B. über eine Stunde kein Fehler und dann traten innerhalb weniger Sekunden viele hundert Fehler auf. Daher zeigen verschiedene, aber gleichartige Messungen sehr unterschiedliche Fehlerzahlen.

Die vorliegende Arbeit wurde von der Deutschen Forschungsgemeinschaft durch eine Sachbeihilfe wesentlich unterstützt. Die Deutsche Bundespost hat für die Messungen sowohl die Leitungen als auch FM-Modems in großzügiger Weise kostenlos zur Verfügung gestellt; in gleicher Weise hat die Firma AEG-Telefunken die PM-Modems überlassen.

Der Deutschen Forschungsgemeinschaft, der Deutschen Bundespost, den beteiligten Herren im Fernmeldetechnischen Zentralamt, der Oberpostdirektion Stuttgart und der Fernmeldeindustrie wird für ihr bereitwilliges Entgegenkommen sehr gedankt.

Schrifttum

- [1] SWOBODA, J., Ein statistisches Modell für die Fehler bei binärer Datenübertragung auf Fernsprechanälen. A.E.Ü. **23** [1969], 313–322.
- [2] ALEXANDER, A. A., GRYB, R. M. und NAST, D. W., Capabilities of the telephone network for data transmission. Bell Syst. tech. J. **39** [1960], 431–476.
- [3] AULHORN, H., LANGE, H. und MARKO, H., Probleme und Anwendungen der Datenübertragung. Elektron. Rechenanlagen **3** [1961], 148–159.
- [4] FONTAINE, A. B. und GALLAGER, R. G., Error statistics and coding for binary transmission over telephone circuits. Proc. Inst. Radio Engrs. **49** [1961], 1059–1065.
- [5] TOWNSEND, R. L. und WATTS, R. N., Effectiveness of error control in data communication over the switched network. Bell Syst. tech. J. **43** [1964], 2611–2638.
- [6] GILBERT, E. N., Capacity of a burst-noise channel. Bell Syst. tech. J. **39** [1960], 1253–1265.
- [7] BERGER, J. M. und MANDELBROT, B., A new model for error clustering in telephone circuits. IBM J. Res. Develop. **7** [1963], 224–236.
- [8] SWOBODA, J., Ein Vorschlag zur Taktsynchronisation bei Datenübertragung. A.E.Ü. **22** [1968], 509–513.
- [9] PETERSON, W. W., Error correcting codes. J. Wiley & Sons, New York 1962.
- [10] VAN DER WAERDEN, B. L., Mathematische Statistik. Springer-Verlag, Berlin 1957.