

Übersichtspraktikum

- Beitrag zur Nachrichtentechnik -

Bildübertragung über Richtfunk- und Glasfaserstrecke

Das Praktikum findet statt im
Raum R206 (2. OG)
Langer Kamp 19 C



Oktober 2004
IfN - Institut für Nachrichtentechnik
Technische Universität Braunschweig

Inhaltsverzeichnis

1	EINLEITUNG.....	1
2	WAS IST INFORMATION?	2
3	DISKRETISIERUNG	4
3.1	ABTASTUNG	4
3.1.1	Beispiele für die Abtastung im Audio- und Videobereich.....	6
3.2	QUANTISIERUNG	7
3.2.1	Beispiele für die Quantisierung im Audio- und Videobereich.....	8
3.3	ANALOG-DIGITAL-UMSETZUNG	9
4	QUELLENCODIERUNG.....	10
4.1	JPEG-CODIERUNG	10
4.2	HUFFMAN-CODIERUNG.....	13
5	DER KANAL	14
6	KANALCODIERUNG.....	17
6.1	BLOCKCODE.....	18
6.2	INTERLEAVING	19
6.3	PAKETIERUNG	20
7	VERSUCHSDURCHFÜHRUNG	22
	LITERATURVERZEICHNIS	28

1 Einleitung

Das Übersichtspraktikum für Studierende des fünften Semesters ist zur Orientierung im Studium gedacht und soll u.a. in Themen der Nachrichtentechnik und Hochfrequenztechnik einführen. In diesem Versuch werden Signale von einem PC über eine Nachrichtstrecke zurück zum PC übermittelt (**Abbildung 1**). Dazu kommen als Nachrichtstrecke die Übertragungssysteme Richtfunk und Glasfaser zum Einsatz. Die zu übertragenden Signale werden durch ein Bild einer Videokamera repräsentiert.

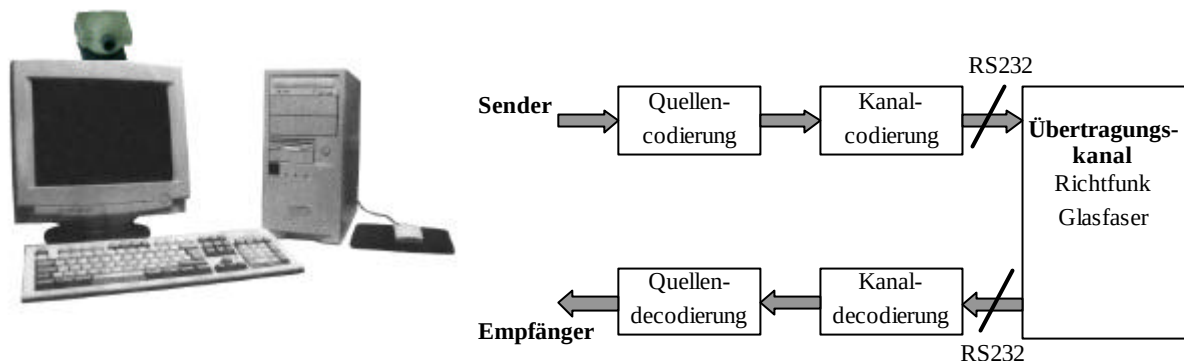


Abbildung 1: Übersicht über den Versuchsaufbau

Die Signale der Kamera werden digitalisiert und im Rechner für die Übertragung aufbereitet. Dabei steckt im Videobild neben der wichtigen Information auch ein unwichtiger Anteil, der durch Quellencodierung auf ein Mindestmaß beschränkt werden kann. Diese Datenreduktion ist bei Bildern besonders erfolgreich, weil dort sehr viele räumliche und zeitliche Ähnlichkeiten vorhanden sind. Die Übertragungszeit lässt sich damit drastisch reduzieren. Da die zur Übertragung verfügbaren Ressourcen der seriellen PC-Schnittstelle stark beschränkt sind, ist eine Reduktion durch die Quellencodierung von besonderem Interesse. Die Daten werden durch die Quellencodierung sehr fehleranfällig und müssen daher durch Hinzufügen eines Fehlerschutzes geschützt werden. Die Aufgabe des Fehlerschutzes wird durch die Kanalcodierung übernommen. Trotz des Fehlerschutzes erhält man aufgrund der Datenreduktion bei der Quellencodierung eine immer noch beachtlich geringere Datenmenge im Vergleich zu dem Umfang der Originaldaten. Bei einer unidirektionalen Übertragung bekommt der Fehlerschutz eine besondere Bedeutung zugeteilt, da keine Möglichkeit der Rückkopplung besteht, d.h. nicht korrekt empfangene Datenpakete können nicht erneut angefordert werden.

Im allgemeinen gibt es sowohl für Quellen- als auch für Kanalcodierung zahllose Verfahren. Für die Quellencodierung wird hier eine Reduktion nach dem JPEG-Verfahren realisiert (JPEG: Joint Photographic Experts Group), welches sich für Standbilder eignet. Für die Kanalcodierung wurde aus einer sehr großen Anzahl von Codern der Blockcoder ausgewählt, da er eine sehr einfache und doch effektive Korrektur von Fehlern ermöglicht.

2 Was ist Information?

Musik, Bilder oder Videos enthalten Information. Diese Information erlaubt es dem Empfänger, durch die erhaltene Kenntnis der empfangenen Nachricht, seinen Wissenstand zu verbessern. Dabei ist die Nachricht der Informationsträger, also die physikalische Darstellung als Signal. In **Abbildung 2** ([1], Seite 73) wird deutlich, daß die interessierende Information nur der Teil der Nachricht ist, der nicht redundante und relevante Elemente enthält. Redundanz bezeichnet hierbei den überflüssigen Teil in einer Nachricht, Irrelevanz dagegen den unverständlichen Teil. Da zum Empfänger nur sinnvolle Information übertragen werden soll, müssen vorher die sinnlosen Teile einer Nachricht wie Redundanz und Irrelevanz eliminiert werden.

	redundant	nicht redundant
irrelevant		
relevant		interessierende Information

Abbildung 2: Bestandteile einer Nachricht

Das Herausfiltern von redundanten und irrelevanten Teilen einer Nachricht erfolgt durch die sogenannte Quellencodierung. Nicht verständliche Teile einer Nachricht im Empfänger, die durch Störungen im Übertragungskanal hervorgerufen werden, können durch eine Kanalcodierung eliminiert oder wieder verständlich gemacht werden, d.h. die aufgetretenen Fehler können korrigiert werden. Durch die Anwendung von Quellen- und Kanalcodierung kann mehr Information in der gleichen Zeit auch auf gestörten Kanälen übertragen werden.

Die Information bildet einen stochastischen Prozeß und läßt sich daher anhand von Gleichungen ([6], Kapitel 1) beschreiben. Dabei haben häufig vorkommende Ereignisse einen geringen und selten auftretende Ereignisse einen größeren Informationsgehalt $I(x_i)$. Der Informationsgehalt steht also in fester Beziehung zur Auftrittswahrscheinlichkeit $p(x_i)$ des Ereignisses x_i . Der Informationsgehalt bestimmt die Aussagekraft eines bestimmten Ereignisses.

$$(1) \quad I(x_i) = \lg\left(\frac{1}{p(x_i)}\right) \quad , \text{ wobei } \lg(y) = \log_2(y) = \frac{\ln y}{\ln 2}$$

Aus den Wahrscheinlichkeiten $p(x_i)$ kann man den Informationsgehalt nach **Gleichung (1)** und daraus die Ereignisentropie $H(x_i)$ für das Ereignis x_i durch Multiplikation von $I(x_i)$ und $p(x_i)$ gewinnen. Die Ereignisentropie entspricht damit einem gewichteten Informationsgehalt.

Um herauszufinden, wieviel Redundanz in einer Information steckt, muß zunächst die Gesamtentropie (mittlerer Informationsgehalt oder Summe der Ereignisentropien) nach **Gleichung (2)** bestimmt werden. Dabei gibt N die Anzahl der verschiedenen möglichen Ereignisse an.

$$(2) \quad H(x) = \sum_{i=1}^N p(x_i) \cdot I(x_i)$$

Wenn alle Ereignisse mit der gleichen Wahrscheinlichkeit auftreten, so ist die Entropie maximal, also $H(x) = H_{\max}$, und es ergibt sich **Gleichung (3)**.

$$(3) \quad H_{\max} = H_0 = \sum_1^N \frac{1}{N} \cdot \lg(N) = \lg(N)$$

Die Redundanz bestimmt sich aus der Differenz zwischen der maximalen Entropie $H_{\max}$ und der tatsächlichen Gesamtentropie H (**Gleichung (4)**).

$$(4) \quad R = H_{\max} - H(x)$$

Die Redundanz soll nun am Beispiel des deutschen Alphabets verdeutlicht werden. In der **Tabelle 1** ([1], Seite 82a) sind in der ersten Spalte die verschiedenen Ereignisse (Buchstaben in einem deutschen Text) aufgeführt. Die dazugehörigen Wahrscheinlichkeiten $p(x_i)$ stehen in der 2. Spalte. Die Ereignisentropien sind in der dritten Spalte aufgelistet.

Ereignis x_i	$p(x_i)$	$p(x_i) \cdot \lg\left(\frac{1}{p(x_i)}\right)$
Zwischenschritt	0,15149	0,41251
E	0,14701	0,40661
N	0,08835	0,30927
R	0,06858	0,26512
I	0,06377	0,25323
S	0,05388	0,22705
T	0,04731	0,20824
D	0,04385	0,19783
H	0,04355	0,19691
A	0,04331	0,19616
U	0,03188	0,15847
L	0,02931	0,14927
C	0,02673	0,13968
G	0,02667	0,13945
M	0,02134	0,11842
O	0,01772	0,10389
B	0,01597	0,09585
Z	0,01423	0,08727
W	0,01420	0,08716
F	0,01360	0,08431
K	0,00956	0,06412
V	0,00735	0,05209
Ü	0,00580	0,04309
P	0,00499	0,03817
Ä	0,00491	0,03764
Ö	0,00255	0,02194
J	0,00165	0,01521
Y	0,00017	0,00217
Q	0,00014	0,00181
X	0,00013	0,00167

Tabelle 1: Entropie und Redundanz des deutschen Alphabets

Summiert man alle Ereignisentropien nach **Gleichung (2)** auf, so ergibt sich die Gesamtentropie $H(x) = 4,115 \frac{\text{bit}}{\text{Zeichen}}$. Aus **Gleichung (3)** resultiert die maximale Entropie zu $H_{\max} = \lg(30) = 4,907 \frac{\text{bit}}{\text{Zeichen}}$. Die Redundanz des deutschen Alphabets liegt also bei $R = 4,907 \frac{\text{bit}}{\text{Zeichen}} - 4,115 \frac{\text{bit}}{\text{Zeichen}} = 0,792 \frac{\text{bit}}{\text{Zeichen}}$.

Fragen:

- Sind Störungen im Übertragungskanal von irrelevanter oder redundanter Natur?
- Leite die Gleichung für $H_{\max}$ aus **Gleichung (2)** her.

3 Diskretisierung

Im Vergleich zu analogen Signalen haben digitale Signale eine Vielzahl von Vorteilen. Dazu gehören die Speicherung von digitalen Signalen und deren Korrekturfähigkeit bei fehlerhafter Übertragung. Bei einer Freiluftübertragung kann es zu Reflexionen an Hindernissen kommen und damit zu einem Mehrwegeempfang (Empfang des Signals von mehreren virtuellen Quellen). Die über verschiedene Wege ankommenden Signale überlagern sich und erschweren einen fehlerfreien Empfang von analogen Signalen. Digitale Signale sind aufgrund der Möglichkeiten der Erkennung und der Korrektur von Fehlern in der Übertragung sicherer. Durch das Zerlegen der Information in mehrere Pakete und durch Anhängen von Paketnummern an die einzelnen Pakete können die Daten trotz Zeitversatz bei einem Mehrwegeempfang sicher empfangen werden. Die maximale Informationsmenge, die in einer bestimmten Zeit übertragen werden kann, lässt sich durch den Einsatz der digitalen Signale sogar steigern. Um analoge Signale durch eine digitale Signalverarbeitung verarbeiten zu können oder vor Fehlern zu schützen, müssen die analogen Signale abgetastet und quantisiert werden. Durch die Abtastung erfolgt eine Wertübernahme nur zu bestimmten Zeitpunkten. Außerdem werden die Werte mit einer unendlichen Anzahl von möglichen Amplitudenwerten in diskrete Werte mit einer endlichen Anzahl von verschiedenen Amplitudenwerten transformiert. Diesen Vorgang nennt man Quantisierung.

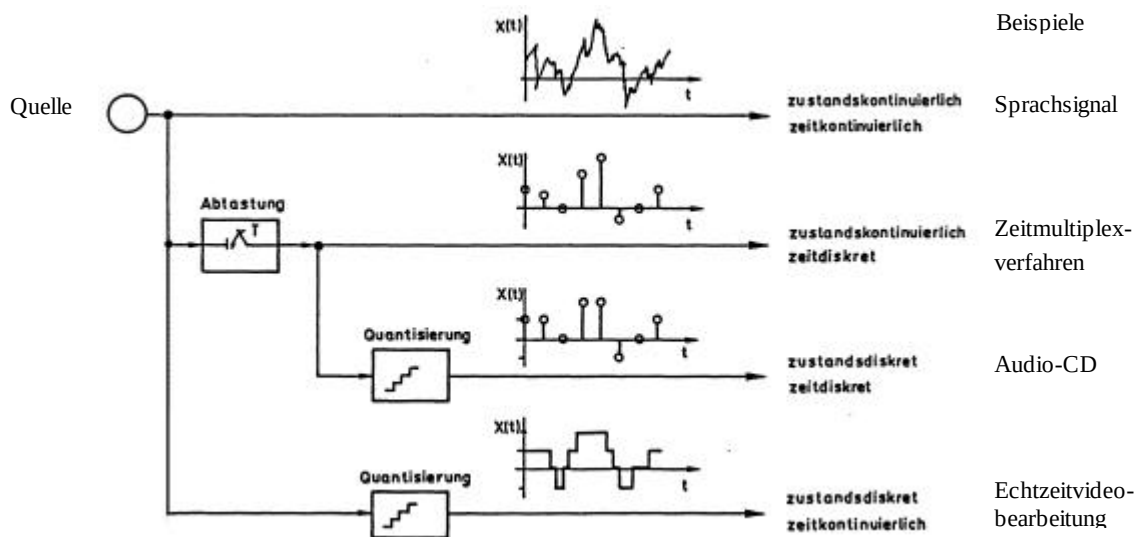


Abbildung 3: Abtastung und Quantisierung

Der Unterschied zwischen der Abtastung und der Quantisierung liegt in der Diskretisierung der Zeit oder des Zustandsparameters (**Abbildung 3** ([5], Seite 2.2 Bild 2)). Die beiden Maßnahmen zur Diskretisierung finden in verschiedensten Bereichen der Elektrotechnik Anklang und werden in den folgenden Unterkapiteln näher erklärt.

3.1 Abtastung

Bei der zeitlichen Diskretisierung, dem Sampling, werden Werte zu diskreten Zeitpunkten mit der Abtastfrequenz f_A übernommen.

$$t = n \cdot T = n \cdot \frac{1}{f_A}$$

Im einfachsten Fall findet eine Abtastung durch einen taktgesteuerten Taster nach **Abbildung 4** ([10], Seite 50) statt. Das abgetastete Signal lässt sich beschreiben durch

$$(5) \quad s_a(t) = s(t) \cdot \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(t - n \cdot T).$$

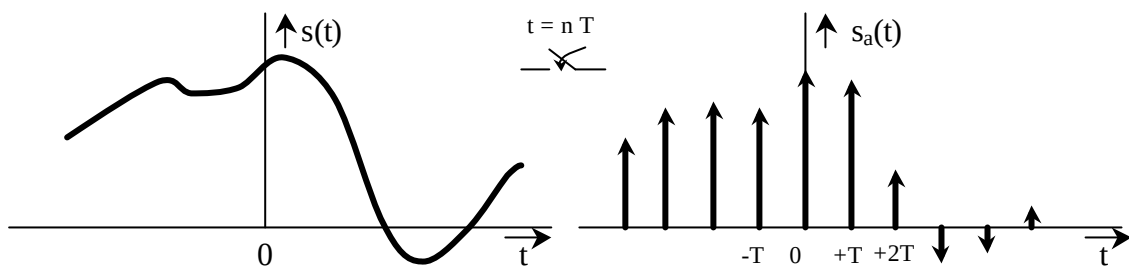


Abbildung 4: Abtastung im Zeitbereich

$\delta(t)$ wird als Dirac'sche Funktion bezeichnet. Bei $\delta(t)$ handelt es sich eigentlich um keine Funktion, sondern um eine Distribution. Sie zeichnet sich durch die folgende Eigenschaft aus:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \delta(x) dx = 1, \text{ wobei } \delta(x) = 0 \text{ für } x \neq 0.$$

Die Distribution gibt an, daß nur an der Stelle, wo das Argument der Dirac'schen Funktion null ist, ein Wert zugewiesen wird.

Jedes Signal läßt sich durch eine Vielzahl von harmonischen Sinusschwingungen mit unterschiedlich definierten Frequenzen, Phasen und Amplituden beschreiben. Die in einem Signal enthaltenen verschiedenen Frequenzen bilden das Spektrum des Signals (**Abbildung 5 links**). Ein Spektrum wird durch die im Signal enthaltene tiefste (z.B. 20 Hz) und höchste Frequenz (z.B. 20000 Hz) auf einen Bereich beschränkt. Es hat eine Bandbreite, die sich aus der Differenz der beiden Extremfrequenzen ergibt (z.B. 19980 Hz). Durch die Abtastung, d.h. durch die Diskretisierung im Zeitbereich, erfolgt im Frequenzbereich eine periodische Wiederholung des Spektrums zu Vielfachen der Abtastfrequenz f_A (**Abbildung 5 rechts**).

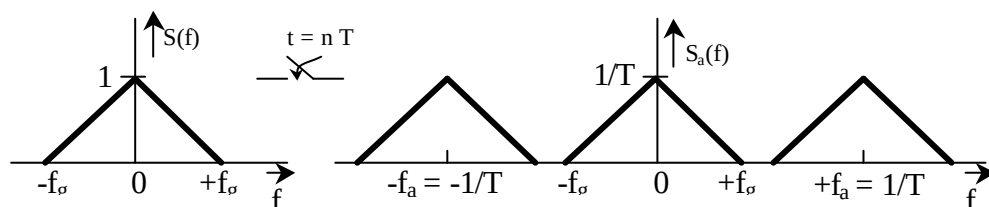


Abbildung 5: Abtastung im Frequenzbereich

Das Spektrum des abgetasteten Signals läßt sich beschreiben durch

$$(6) \quad S_a(f) = \frac{1}{T} \sum_{n=-\infty}^{\infty} S\left(f - \frac{n}{T}\right).$$

Aus **Gleichung (6)** läßt sich erkennen, daß das abgetastete Spektrum durch eine Addition von verschobenen Originalspektren gebildet wird.

Die Abtastfrequenz muß nach dem Nyquisttheorem mindestens die doppelte Bandbreite einhalten:

$$(7) \quad f_A = \frac{1}{T} \geq 2 \cdot f_g$$

Ist die Abtastfrequenz f_A größer als die Nyquistbandbreite $2 \cdot f_g$, so findet eine Überabtastung oder Oversampling statt, d.h. die Signale werden häufiger als benötigt von der Quelle ausgelesen (**Abbildung 6 oben**). Verletzt man hingegen das Abtasttheorem, so spricht man von einer

Unterabtastung (**Abbildung 6 unten**). Durch die Unterabtastung überlappen sich das Originalspektrum und die durch die Abtastung erzeugten periodischen Spektren. Es kommt dadurch zu Störungen im Bild, die als Alias-Störungen bezeichnet werden und durch zerrissene Strukturen im Bild auffallen.

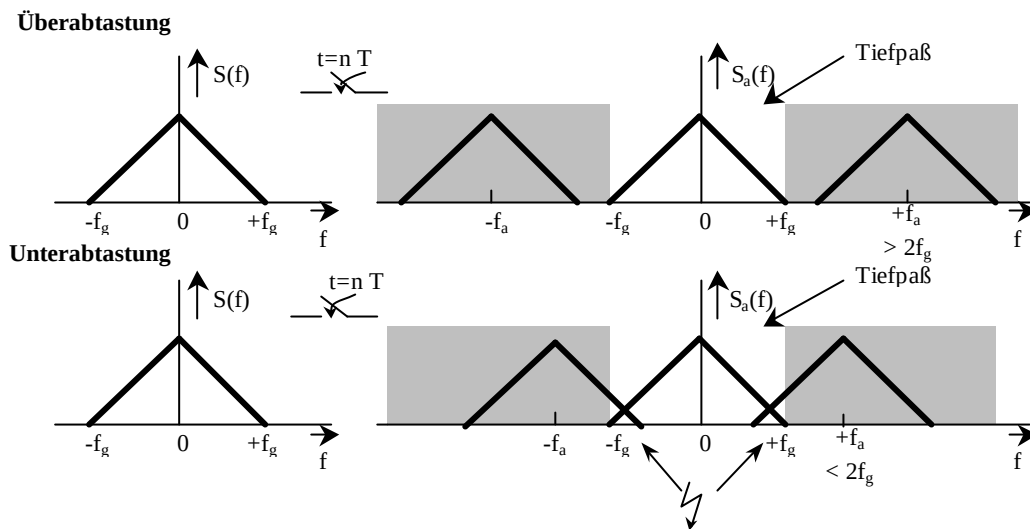


Abbildung 6: Über- und Unterabtastung

Durch die Abtastung ist das zu übertragende Spektrum durch die periodische Fortsetzung unendlich ausgedehnt. Um das Spektrum auf den wesentlichen Anteil zu reduzieren, muß nach der Abtastung eine Tiefpaßfilterung erfolgen. Die Grenzfrequenz des Filters sollte knapp über der maximalen Frequenz f_g des Signals liegen, so daß möglichst wenig Teile der Wiederholspektren durch den Tiefpaßfilter mit eingeschlossen werden.

Frage: Welche Bedingungen müssen für eine korrekte Abtastung eingehalten werden?

3.1.1 Beispiele für die Abtastung im Audio- und Videobereich

Im Audibereich erfolgt eine Überabtastung bei der Audio-CD (Compact Disc) mit 44,1kHz. Diese Abtastfrequenz ergibt sich in Abhängigkeit von der maximalen Frequenz der Musik auf einer CD von $f_g=20\text{kHz}$. Wegen dem Nyquisttheorem muß die Abtastung mindestens mit der doppelten Grenzfrequenz erfolgen, also $40\text{kHz} + 10\% \text{ Reserve} = 44\text{kHz}$. Die restlichen 0,1kHz wurden durch internationale Vereinbarungen so bestimmt, daß ein günstiges Zahlenverhältnis zwischen der Abtastfrequenz der CD und der Zeilenfrequenz des europäischen Fernsehstandards CCIR B,G besteht. In professionellen Audio-Studios werden höhere Abtastfrequenzen von 48kHz gewählt, um Reserven für eine Nachbearbeitung vorzuhalten. Beim Digital Satellite Radio (DSR) wird zum Einsparen von Übertragungskapazität ein Sendekanal mit nur 32kHz abgetastet. Die Grenzfrequenz wird dadurch auf 15kHz reduziert, was aber für die meisten Rundfunkanwendungen noch eine ausreichende Qualität bietet. Durch die Bandbreitenreduktion lassen sich mehr Sendekanäle in einem gegebenen Frequenzbereich übermitteln.

Im Videobereich bestehen die Fernsehsignale in Deutschland aus einem Helligkeitssignal (Luminanz Y) mit 5MHz Bandbreite und zwei weiteren Signalkomponenten für die Farbinformationen (Chrominanz U_{B-Y} und U_{R-Y}) mit einer Bandbreite von weniger als der Hälfte der Bandbreite des Luminanzsignals. Als Abtastfrequenz wird 13,5MHz für das Helligkeitssignal und 6,75MHz für die beiden Farbinformationssignale gewählt (CCIR 601).

3.2 Quantisierung

Bei der Quantisierung werden die abgetasteten, zustandskontinuierlichen Signale bestimmten Quantisierungsstufen zugeordnet. Die Stufen entstehen durch die Begrenzung der möglichen Amplitudenzahl auf eine beschränkte Anzahl. Bei der linearen Quantisierung sind die Höhen der einzelnen Stufen gleich. Jede Stufe erhält einen digitalen Code. Die Länge des digitalen Codes ergibt sich aus der Zahl der Quantisierungsstufen mit Hilfe der Gleichung

$$\text{Codelänge} = \text{ceil}(\text{ld}(\text{Anzahl der Stufen})) = \text{ceil}\left(\frac{\ln(\text{Anzahl der Stufen})}{\ln 2}\right),$$

wobei die Funktion $\text{ceil}()$ auf ganze Zahlen aufrundet. Man spricht bei einer Quantisierung von acht verschiedenen Stufen deshalb auch von einer 3-Bit-Quantisierung.

In **Abbildung 7** wird ein monoton steigendes Eingangssignal (diagonale dünne Linie) durch die Quantisierung auf eine Treppenform überführt (dicke Linie). Die Differenz zwischen dem Eingangs- und dem Ausgangssignal wird als Quantisierungsfehler bezeichnet (**Abbildung 8**). Dieser Quantisierungsfehler wird in Parallelität zum Rauschen in der Analogtechnik auch als Quantisierungsrauschen bezeichnet. Der Quantisierungsfehler bewegt sich in diesem Beispiel zwischen den beiden Extremwerten 0 und Δ .

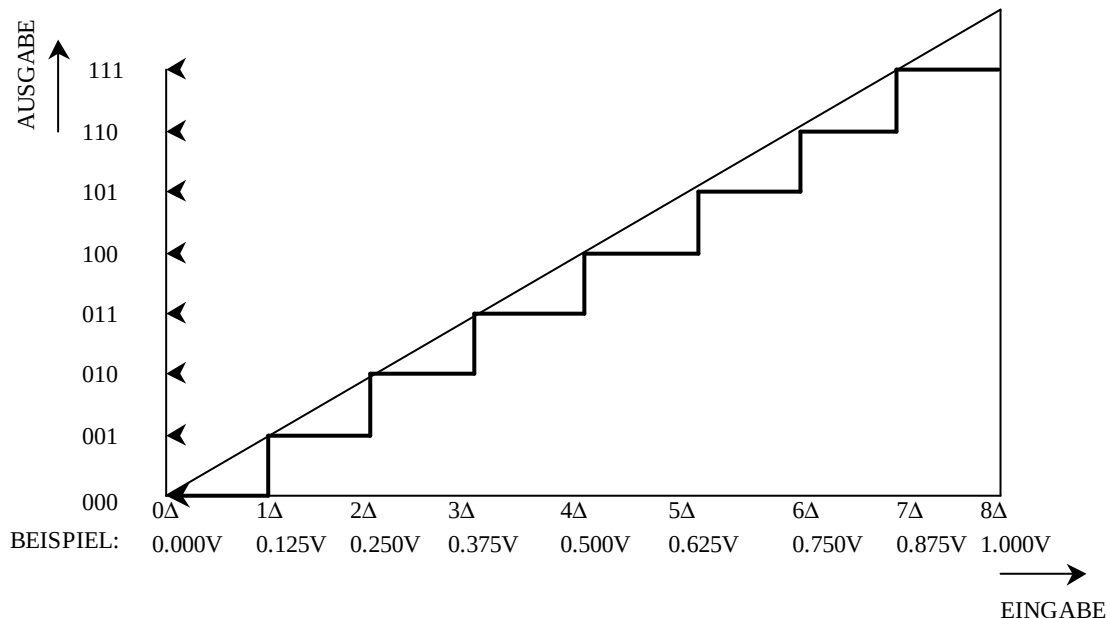


Abbildung 7: Quantisierungskennlinie

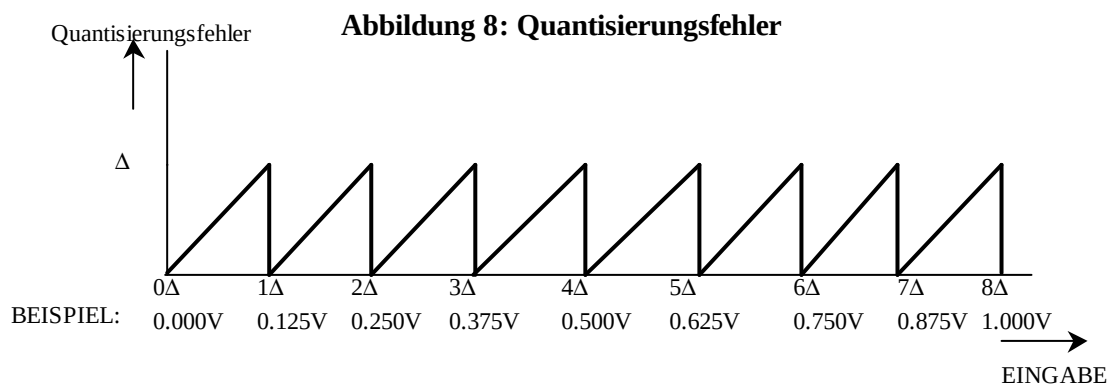


Abbildung 8: Quantisierungsfehler

Abbildung 9 zeigt ein weiteres Beispiel für die Quantisierung eines abgetasteten Signals. Durch eine 2-Bit-Quantisierung wird eine Abbildung der kontinuierlichen Werte in vier verschiedenen Stufen erlaubt, die durch verschiedenen Schattierungen hervorgehoben werden. Alle Signalwerte innerhalb einer Schattierung werden einem einzigen quantisierten Wert zugewiesen. Bei der kontinuierlichen Abtastung erfolgt eine Übernahme von diskreten Werten zu jedem Zeitpunkt, bei der zeitdiskreten Abtastung dagegen nur zu festen Zeitpunkten (**Abbildung 3**). Die unterschiedlichen Abtastungen besitzen verschiedene Quantisierungsfehlerverläufe.

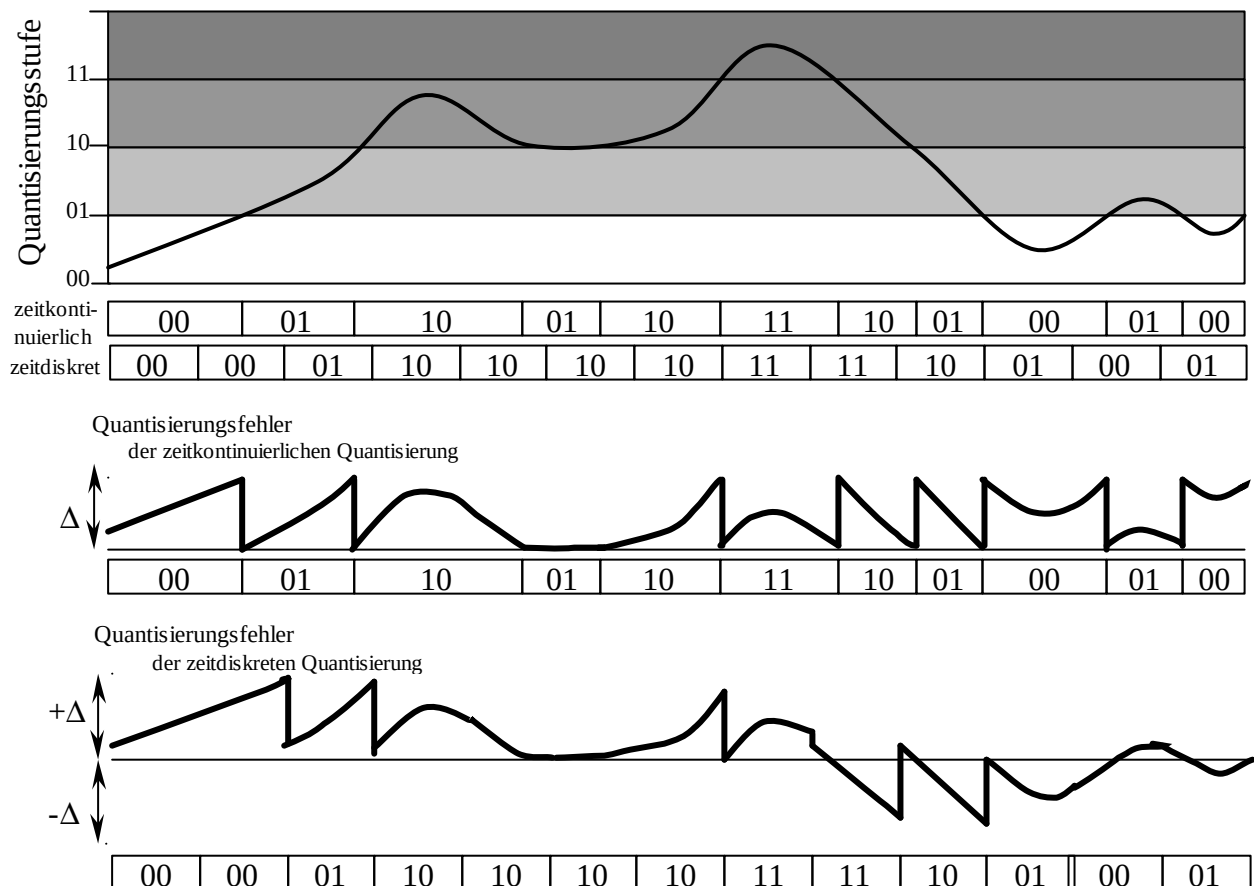


Abbildung 9: Quantisierung eines Signals bei diskreter und kontinuierlicher Abtastung

Quantisierungsfehler lassen sich im Allgemeinen nicht verhindern. Man muß bei der Wahl der Quantisierung deshalb darauf achten, daß die Quantisierungsfehler nicht als störend wahrgenommen werden können. Bei verrauschten Kanälen muß beachtet werden, daß durch die Rauschsignalamplituden der eigentliche Signalverlauf so verschlissen werden kann, daß ein ungewollter Übergang von einer Quantisierungsstufe zu einer anderen erfolgen kann. Aus diesem Grund muß auch bei der Stufenwahl auf die Amplituden des Kanalrauschens geachtet werden.

Frage: Mit wieviel Bit muß quantisiert werden, damit zwischen 256 Zuständen unterschieden werden kann?

3.2.1 Beispiele für die Quantisierung im Audio- und Videobereich

Im Audiobereich wurde aufgrund der Wahrnehmung des menschlichen Ohres eine Quantisierung von $n=16$ Bit festgelegt. Damit können bis zu $2^{16}=65536$ verschiedene Zustände (Stufen) beschrieben werden. Das Verhältnis zwischen dem Signal und dem durch die Quantisierung hinzugefügten Rauschens (Signal-Rauschabstand) ergibt sich aus **Gleichung (8)** zu $SNR=98\text{dB}$ (Signal-to-Noise-Ratio).

$$(8) \quad SNR = 6 \cdot n + 2 \text{ dB}$$

Für den Videobereich ergibt sich das SNR aus **Gleichung (9)** zu $\text{SNR}=58,8\text{dB}$ bei einer 8-Bit-Quantisierung und $\text{SNR}=70,8\text{dB}$ für eine 10-Bit-Quantisierung. In den meisten Videoanwendungen wird eine 8-Bit-Quantisierung angewandt. Nur in professionellen Anwendungen und in Studios wird eine höhere Quantisierung gewählt, damit keine zusätzlichen Fehler nach einer Weiterverarbeitung der Videodaten entstehen.

$$(9) \quad \text{SNR} = 6 \cdot n + 10,8\text{dB}$$

Im Computerbereich wird im allgemeinen eine Farbtiefe von 24 Bit gewählt. Diese 24 Bit folgen aus einer 8-Bit-Quantisierung für jede der drei Grundfarben Rot, Grün und Blau (RGB). Damit wird eine maximale Farbtiefe von $2^{24} = 16777216$ erreicht.

3.3 Analog-Digital-Umsetzung

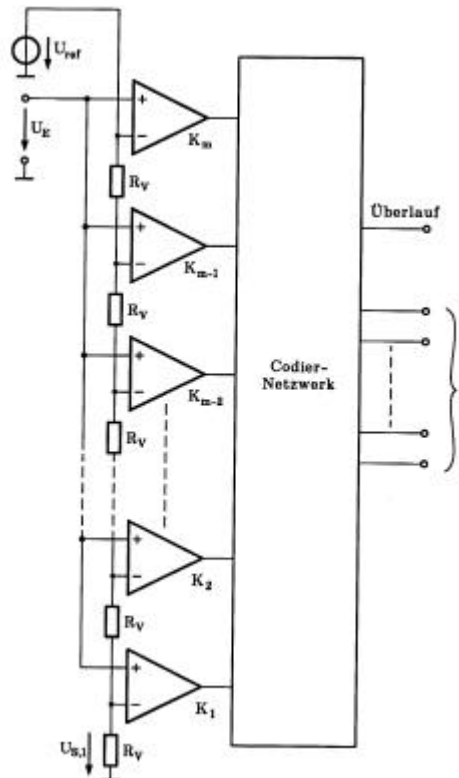


Abbildung 10: Der Flash-Umsetzer als ADU

Um aus analogen Signalen digitale Signale zu gewinnen, gibt es eine Vielzahl von Analog-Digital-Umsetzern. Diese unterscheiden sich in ihrer Umsetzzeit und ihrem Kostenaufwand erheblich. Für die Umsetzung gibt es eine Vielzahl von verschiedenen Techniken. Zu den Umsetzern mit hohem Zeitaufwand gehören der Sägezahn-Umsetzer und das Dual-Slope-Verfahren, die nach einem Zählverfahren die digitalen Werte bestimmen. Die Umsetzzeit ist dabei abhängig von der Anzahl der Quantisierungsstufen. Der Flash-Umsetzer (**Abbildung 10**) dagegen arbeitet mit einem direkten Verfahren und ist im Vergleich zum Sägezahn-Umsetzer sehr schnell. Da der Kostenaufwand proportional zur Anzahl der Quantisierungsstufen steigt, wird der Flash-Umsetzer nur für schnelle Anwendungen wie z.B. in der Videotechnik eingesetzt.

Beim Flash-Umsetzter wird die Referenzspannung U_{ref} durch eine Kaskadierung der Widerstände in mehrere kleine Stufenspannungen unterteilt. Damit ergeben sich an jedem Widerstand verschiedene abgestufte Potentiale $U_{S,1}$ bis $U_{S,M}$, die an den negativen Eingängen der Komparatoren K_1 bis K_M anliegen. Durch das Anlegen einer Eingangsspannung U_E an den positiven Eingang der Komparatoren werden parallel Vergleiche ausgeführt. Die Komparatoren schalten am Ausgang dann auf ein hohes Potential, wenn das Potential am positiven Eingang größer als das Potential am negativen Eingang ist. Die Ausgangssignale der Komparatoren

bilden die digitalen Signale. Mit Hilfe des dazugeschalteten Codiernetzwerk können die Signale nach der Umsetzung noch datenreduziert oder fehlergeschützt werden. Die Umsetzzeit des Flash-Umsetzers wird nur durch die Laufzeit innerhalb der Komparatoren begrenzt und beträgt deshalb nur wenige Nanosekunden. Am Ausgang liefert der Umsetzer ein paralleles Codewort. Um einen seriellen Datenstrom zu erhalten, müssen die x Ausgangsdatenleitungen des Codiernetzwerkes noch durch einen Parallel-Serien-Wandler in eine Leitung überführt werden.

4 Quellencodierung

Liegen die von einer Quelle produzierten Signale in digitaler Form vor, so können diese durch eine Quellencodierung im Datenumfang reduziert werden. Bei der Datenreduktion sollte nur die Redundanz und Irrelevanz eliminiert werden, damit die interessierende Information vollständig erhalten bleibt. Als verlustlose Komprimierungsmaßnahmen stehen beispielsweise die Lauflängen-, Huffman- oder Shannon-Codierung zur Verfügung. Die in diesem Versuch benutzte Quellencodierung JPEG (Joint Photographic Expert Group) nutzt zwar auch eine verlustlose Codierung, jedoch bietet die JPEG-Komprimierung die Möglichkeit, die Daten noch weiter zu reduzieren, was allerdings Qualitätseinbußen zur Folge hat. Der Grad der Kompression wird durch die Wahl der Quantisierung eingestellt. Durch eine höhere Quantisierung bekommen benachbarte Pixel größere Abstufungen, d.h. es treten immer stärkere Störungen in Form von Blocking-Artefakten auf. Als Artefakte bezeichnet man allgemein die Störungen in einem Bild, die durch Komprimierungsmaßnahmen eingeleitet wurden.

JPEG dient zur Datenreduktion von stehenden Bildern. Um Daten von bewegten Bildern, also von Videos reduzieren zu können, gibt es die Möglichkeit, das Video in einzelne Bilder zu zerlegen und diese einzeln mit JPEG zu codieren. Auf der Empfängerseite werden die einzeln empfangenen Bilder decodiert und zu einem Videostrom wieder zusammengesetzt. Diese Codierung nennt sich Motion-JPEG. Durch das Motion-JPEG wird nur die Redundanz innerhalb eines Bildes betrachtet. Soll auch Ähnlichkeit zwischen benachbarten Bildern ausnutzt werden, so kann dieses durch die MPEG-Codierung (Moving Picture Expert Group) erfolgen. Die MPEG-Codierung ist sehr zeitaufwendig und in Echtzeit nur mit Hochleistungsrechnern oder mit Hardwarekomponenten zu bewältigen. Im MPEG-Standard gibt es verschiedene Komprimierungsverfahren mit unterschiedlichen Qualitäts- und Codierungsmerkmalen.

4.1 JPEG-Codierung

JPEG bezeichnet eine ganze Familie von Algorithmen zur Komprimierung digitalisierter Standbilder in Echtfarbqualität (24 Bit). Die Sammlung der unterschiedlichsten Verfahren wurde 1993 unter der Bezeichnung ISO 10918 als Standard [8] festgeschrieben. Die verlustbehafteten JPEG-Prozesse sind auf fotografische Aufnahmen mit fließenden Farbübergängen hin optimiert. Für andere Arten von Bildern sind sie weniger geeignet, beispielsweise für Bilddaten mit harten Kontrasten wie Cartoons, Liniengrafiken oder Texte, die meistens große Farbflächen und abrupte Farbwechsel enthalten. Fehler bei zu hoher Komprimierung wirken sich daher besonders stark auf Kanten aus.

Aus der Computergrafik sind Verfahren bekannt, die intern Komprimierungsmethoden wie Lauflängencodierung oder Huffman-Codierungen verwenden, wie beispielsweise GIF, PCX oder TIFF. Diese Methoden haben einen Kompressionsfaktor von nur ungefähr 2. Jedoch komprimieren diese Verfahren ohne Verluste und lassen eine Wiederherstellung des Originals bis auf das letzte Bit zu.

Der JPEG-Standard erfüllt folgende Kriterien:

- Komprimierung ohne Datenverlust oder alternativ
- Komprimierung mit Datenverlust und einstellbarer Kompressionsrate
- Vertretbare Komplexität
- Für alle Arten von Standbildern, also keine Beschränkung in der Farbtiefe
- Algorithmen als Hard- und als Softwarelösung realisierbar

Durch das JPEG-Verfahren sind ohne weiteres Kompressionsverhältnisse von 20:1 möglich, wobei dann aber bereits Bildfehler erkennbar werden.

Ein digitales Bild besteht aus Pixeln mit verschiedenen quantisierten Helligkeitsstufen. Der dadurch abgedeckte zweidimensionale Signalraum nennt sich Ortsbereich. Das JPEG-Verfahren zerlegt das Bild zuerst in mehrere 8x8-Pixel große Blöcke. Jeder Block wird dann durch JPEG gesondert weiterverarbeitet. Ein Beispiel für einen durch JPEG-codierten und -decodierten Block ist in **Abbildung 12** ([3], Seite 223-226) zu sehen. Als Ausgangsblock wurde ein dunkles Kreuz auf grauem Hintergrund verwendet (Matrix 1). Wegen der Helligkeitsunterschiede innerhalb eines Blockes sind verschiedene Frequenzanteile enthalten. Um diese verschiedenen Frequenzanteile zu bestimmen, wird die Diskrete Cosinus Transformation (DCT) eingesetzt, die eine Transformation vom Ortsbereich in den Frequenzbereich vornimmt (Matrix 2). Durch **Gleichung (10)** erhält man die Koeffizienten des Frequenzbereichs, wobei für jeden einzelnen Koeffizienten des Frequenzbereichs alle Koeffizienten des Ortsbereichs betrachtet werden müssen.

$$S(f_x, f_y) = \frac{1}{4} K(f_x) K(f_y) \sum_{x=0}^7 \sum_{y=0}^7 s(x, y) \cos((2x+1)f_x \frac{p}{16}) \cos((2y+1)f_y \frac{p}{16})$$

(10)

$$\text{wobei } K(f) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2}} & \text{für } f = 0 \\ 1 & \text{sonst} \end{cases}$$

Durch die DCT werden die Daten dekorreliert. Wenig strukturierte Bildbereiche werden durch niedrige Frequenzen (links oben) verdeutlicht. Feine Strukturen im Bild rufen dagegen hohe Frequenzanteile (rechts unten) hervor. Die für die subjektive Wahrnehmung des Menschen wichtigsten Koeffizienten sind $S(0,0)$ – auch Gleichspannungskoeffizient (DC-Koeffizient) genannt – und die Koeffizienten niedrigster Ordnung (**vergleiche Abbildung 11**). In der Koeffizienten-Matrix in **Abbildung 12** nimmt die Anzahl der Nullen zur unteren rechten Ecke, also zu den hohen Frequenzen hin, zu. Dies bedeutet, daß in der Matrix 2 weniger Zahlen codiert werden müssen als in der Matrix 1, was bei geeigneter Darstellung schon einen Komprimierungseffekt hervorruft.

Eine weitere Reduktion erfolgt durch eine Quantisierung, indem die einzelnen DCT-Koeffizienten durch die Werte einer Gewichtungsmatrix (Matrix 3) geteilt und auf ganze Zahlen gerundet werden. Die Gewichtungsmatrix ist aus umfangreichen psychophysiologischen Versuchen hervorgegangen. Sie wurde so festgelegt, daß zwischen Bildqualität und Komprimierung eine gute Balance besteht und stellt im Idealfall eine Irrelevanzreduktion dar.

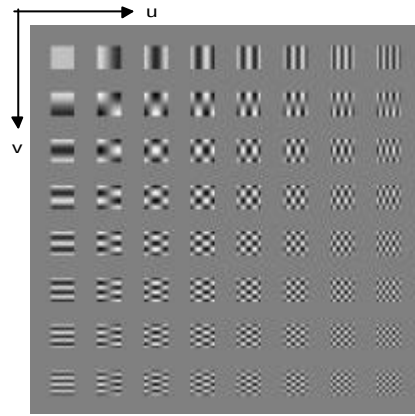


Abbildung 11: DCT-Basisfunktionen

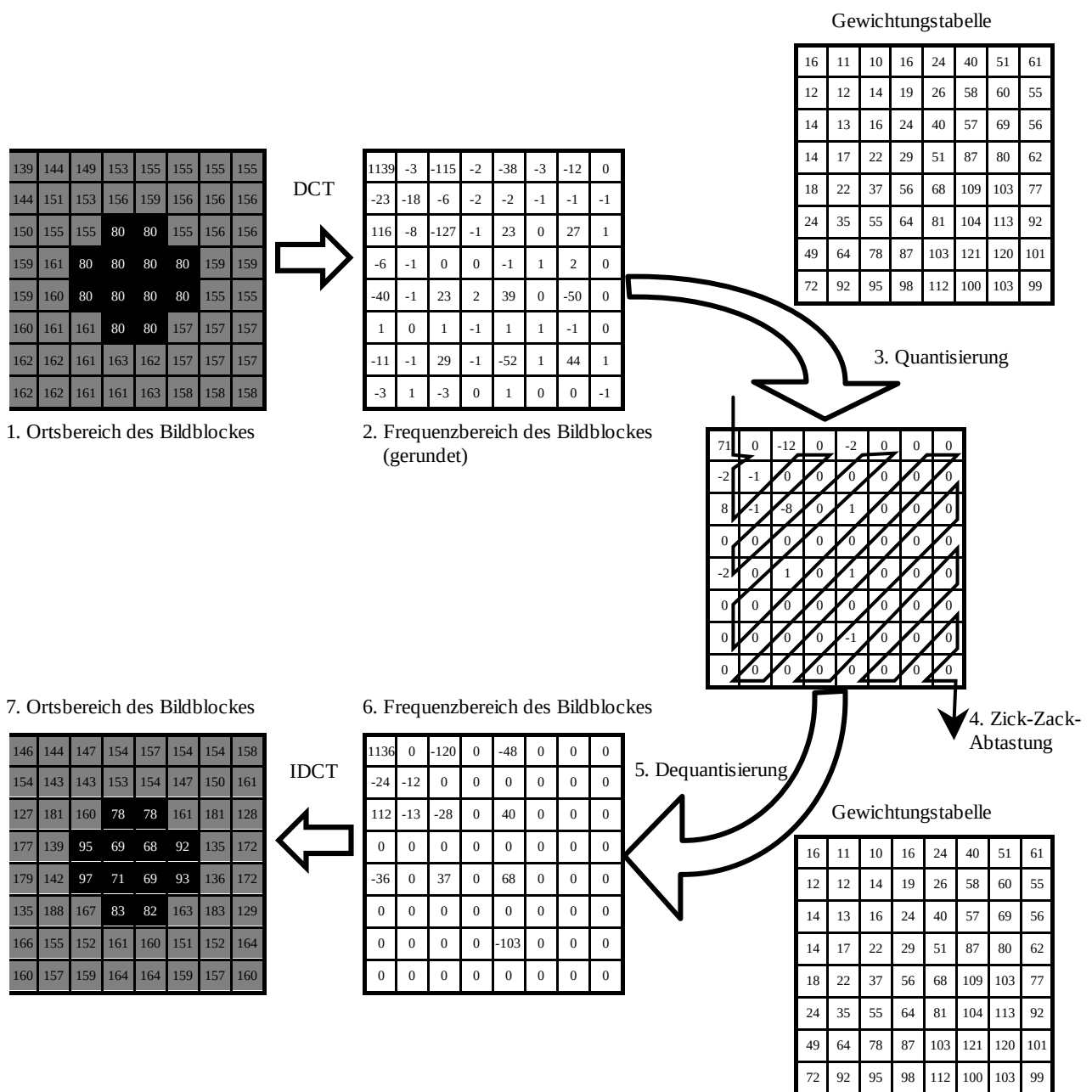


Abbildung 12: JPEG-Codierung eines Beispiel-Blockes von einem Bild

Wie schon erwähnt, nimmt die Anzahl der Nullen von oben links nach unten rechts hin zu. Durch die Quantisierung wird dieses noch verstärkt. Zwecks langer Nullfolgen werden die Daten aus der Matrix 4 in Zick-Zack-Richtung ausgelesen. Im Beispiel aus **Abbildung 12** ergibt sich folgende Zahlenkolonne:

71; 0; -2; 8; -1 ; -12; {2*0}; -1; 0; -2 ; 0 ; -8 ; 0 ; -2; {8*0} 1 0 1 {13*0} 1 {10*0} -1 {13*0}.

Durch die Lauflängen-Codierung wird anstelle zehn einzelner Nullen nur die Information "10mal Wert 0" {10*0} gesendet. Für eine noch stärkere Reduktion können die letzten Werte weggelassen werden. Die eigentliche Einstellung des Reduktionsgrades bzw. der Bildqualität erfolgt durch einen Qualitätsfaktor, mit dem die Gewichtungsmatrix multipliziert wird.

Bevor die lauflängencodierten Daten übertragen werden, findet eine Huffman-Codierung (siehe **Kapitel 4.2**) statt, die den Datenumfang noch weiter reduziert.

Auf der Empfängerseite wird die Zick-Zack-Abtastung wieder rückgängig gemacht. Es erfolgt nach der inversen Huffman- und Lauflängen-Codierung eine Dequantisierung. Die entstandene Matrix 6 wird durch die IDCT (Inverse Discrete Cosinus Transformation) wieder in den Ortsbereich transformiert (**Gleichung (11)**).

$$(11) \quad s(x, y) = \frac{1}{4} \sum_{f_x=0}^7 \sum_{f_y=0}^7 K(f_x) K(f_y) S(f_x, f_y) \cos((2x+1)f_x \frac{\pi}{16}) \cos((2y+1)f_y \frac{\pi}{16})$$

$$\text{wobei } K(f) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2}} & \text{für } f = 0 \\ 1 & \text{sonst} \end{cases}$$

In **Abbildung 12** sind die zwischen Grafik 1 und Grafik 7 auftretenden Differenzen auf die Quantisierung zurückzuführen. Da das Bild in kleine Blöcke zerlegt wird, wird die Blockstruktur nach der Decodierung der Daten um so deutlicher, je stärker die Quantisierung gewählt wurde.

Durch das JPEG-Verfahren lassen sich die Datenmengen noch weiter reduzieren, indem die Luminanz- und Chrominanzinformation aufgrund der unterschiedlichen Empfindlichkeit des Auges hinsichtlich Helligkeit und Farbe unterschiedlich stark quantisiert werden. Für die Chrominanzwerte kann eine noch stärkere Quantisierung gewählt werden.

Neben den laufenlängen- und Huffman-codierten Bilddaten werden Zusatzdaten, wie die Huffman-Code-Tabellen für die einzelnen Blöcke und noch viele weitere Daten übertragen. Diese zusätzlichen Daten werden durch Markierungen kenntlich gemacht. Sie sind sehr fehlerempfindlich und können schon bei einem einzigen Bitfehler zu einem Totalausfall oder zu Quantisierungsfehlern im Bild führen.

4.2 Huffman-Codierung

Mittels der Huffman-Codierung erfolgt eine Datenreduktion, indem häufig vorkommenden Werten kurze Codewörter und selten vorkommenden Werten lange Codewörter zugewiesen werden. Gleichzeitig wird immer die Präfix-Eigenschaft eingehalten, d.h. jedes kürzere Codewort darf niemals den Anfang eines längeren Codewortes bilden.

Die Berechnung der Codewörter erfolgt durch einen Algorithmus nach Huffman. Dieser soll an einem kleinen Beispiel verdeutlicht werden. Es gibt die drei Ereignisse x_1 bis x_3 , die mit den

Wahrscheinlichkeiten $p(x_1) = 0,6$; $p(x_2) = 0,3$; $p(x_3) = 0,1$ auftreten. In diesem Fall ergibt sich der mittlere Informationsgehalt $H(x) = 1,3 \frac{\text{bit}}{\text{Zeichen}}$.

Um die Huffman-Codierung in einer Tabelle auszuführen, benutzt man die nun folgende Beschreibung:

1. Wahrscheinlichkeiten p nach absteigenden Werten sortieren.
2. In den letzten beiden Spalten vor die schon vorhandenen Codewörter W die Werte „0“ und „1“ anhängen.
3. Die Wahrscheinlichkeiten in den letzten beiden Spalten addieren und zu einer Spalte zusammenfassen.
4. Wenn mehr als eine Wahrscheinlichkeit vorhanden ist, wieder zurück zu Punkt 1.

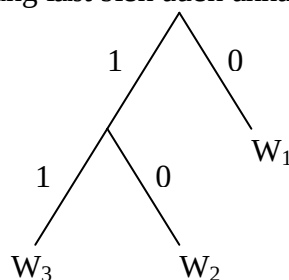
Ereignisse			Codieraufwand
1	$p(x_1) = 0,6$	$p(x_2) = 0,3$ $p(x_3) = 0,1$	
2		$W_2 = 0$ $W_3 = 1$	$(0,3+0,1) \frac{\text{bit}}{\text{Zeichen}} = 0,4 \frac{\text{bit}}{\text{Zeichen}}$
3	$p(x_1) = 0,6$	$p(x_2) + p(x_3) = 0,4$	
2	$W_1 = 0$	$W_2 = 10$ $W_3 = 11$	$(0,6+0,3+0,1) \frac{\text{bit}}{\text{Zeichen}} = 1 \frac{\text{bit}}{\text{Zeichen}}$
3	$p(x_1) + p(x_2) + p(x_3) = 1,0$		$L = 1,4 \frac{\text{bit}}{\text{Zeichen}}$

Tabelle 2: Beispiel für Huffman-Codierung

Der Codieraufwand errechnet sich durch die Addition der in der Zeile bearbeiteten Ereignis-Wahrscheinlichkeiten (**Tabelle 2, rechter Teil**). Am Ende werden alle Zeilen des Codieraufwands addiert. Daraus ergibt sich die mittlere Codewortlänge L (**Gleichung (12)**).

$$(12) \quad L = \sum_{i=1}^N p(x_i) \cdot L(x_i)$$

Die nach Huffman erfolgte Codierung lässt sich auch anhand eines Baumes darstellen:



Die aus der Codierung resultierende Redundanz berechnet sich aus **Gleichung (13)**:

$$(13) \quad R = L - H(x) = (1,4 - 1,3) \frac{\text{bit}}{\text{Zeichen}} = 0,1 \frac{\text{bit}}{\text{Zeichen}}$$

Frage: Leiten Sie $H(x)$ aus dem vorangegangenen Beispiel her.

5 Der Kanal

Die Nachrichtenübertragung erfolgt von einer Quelle (Sender) zu einer Senke (Empfänger) über einen Kanal. Der Anteil an gesendeter Information, die den Empfänger tatsächlich erreicht, wird Transinformation genannt. Die Transinformation ergibt sich aus

$$(14) \quad T(X, Y) = \begin{cases} H(X) - H(X|Y) \\ H(Y) - H(Y|X) \end{cases}.$$

Die Größe der Transinformation spiegelt die Qualität des Übertragungskanals wieder. Die maximal fehlerfrei übertragbare Information wird als Kanalkapazität C bezeichnet. τ gibt die Zeit an, in der ein Quellenzeichen übertragen wird.

$$(15) \quad C = \max_{p(x)} \frac{T(X, Y)}{t}$$

Abbildung 13 ([1], Seite 87) zeigt den Informationsfluß in einem gestörten Kanal. Hierbei sendet die Quelle Zeichen mit einer Entropie $H(X)$ aus. Aufgrund von Verlusten im Übertragungskanal erreicht ein Teil der Nachricht die Senke nicht. Dieser Teil nennt sich Äquivokation $H(X|Y)$. Außerdem wird durch Störung im Übertragungskanal noch weitere Information hinzugefügt, die als Irrelevanz oder als bedingte Entropie $H(Y|X)$ beschrieben wird.

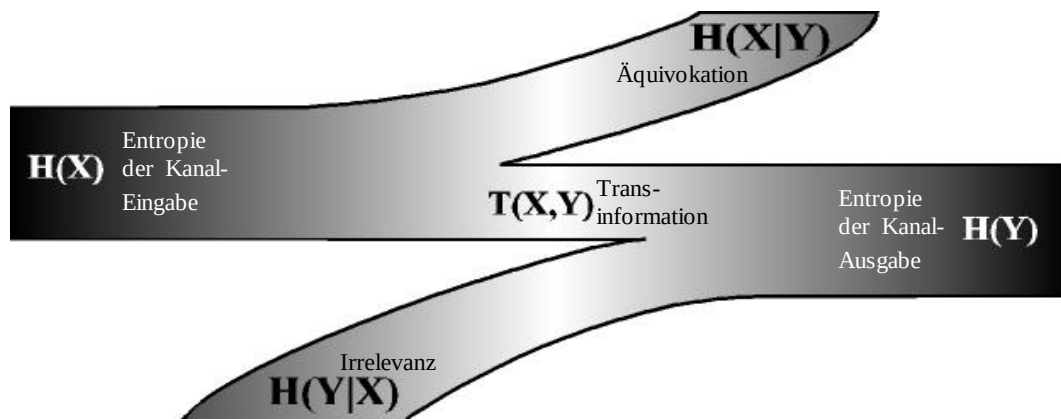


Abbildung 13: Informationsfluß in einem gestörten Kanal

Bei einer störungsfreien Übertragung werden die bedingten Entropien $H(Y|X)$ und $H(X|Y)$ zu null und damit ist

$$(16) \quad H(X) = H(Y) = T(X, Y).$$

Ist die Übertragung vollständig gestört, so ist $H(X) = H(X|Y)$ und $H(Y) = H(Y|X)$ und damit $H(X, Y) = H(X) + H(Y)$.

In **Abbildung 14** ([4], Seite 58) ist ein Bild oszillografiert, welches aus einer Schar von möglichen digitalen Signalverläufen besteht. Während der Übertragung kann das Signal in der Amplitude und in der Laufzeit gestört werden. Daher muß im Empfänger zwischen einem gesendeten Null- oder Eins-Symbol unter Einhaltung von festgelegten Entscheidungsschwellen entschieden werden. Die Schwellen werden innerhalb der kleinen Öffnungen (siehe Pfeile) durch ein Zeitraster und eine Amplitudenschwelle festgelegt.

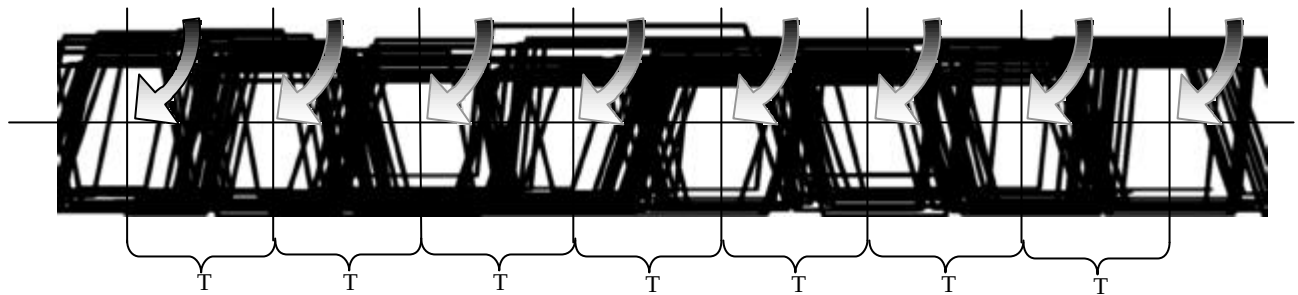


Abbildung 14: Augendiagramme eines Nachrichtensignals

Die Form der **Abbildung 14** wird auch als Augendiagramm bezeichnet. Der Schwellwert für die Amplitude ergibt sich in diesem Beispiel aus dem Mittelwert der beiden Extremamplituden (horizontale Linie). Wird diese Schwelle vom Signal überschritten, so wird im Schwellenwertdetektor ein Eins-Symbol interpretiert. Beim Unterschreiten dieser Schwelle wird für ein gesendetes Null-Symbol entschieden. Die Detektion in der Amplitude darf zudem nur zu bestimmten Zeitpunkten mit dem Abtaststrahl T erfolgen. Nimmt die Störung im Kanal durch Amplitudenschwankungen und zeitlichen Jitter zu, so werden die Augenöffnungen immer kleiner und damit die Fehleranfälligkeit größer, was sich in Form von Bitfehlern äußert. Wie sich Bitfehler auf ein uncodiertes Schwarzweißbild (BMP-Format) auswirken, macht die **Abbildung 15** oben deutlich. Betrachtet man die jeweiligen „Fehler“-bilder, also die Differenz des fehlerfreien zum fehlerhaften Bild, so erkennt man, daß bei einem Kanal mit einer Bitfehlerrate (BER: Bit Error Rate) von $1 \cdot 10^{-2}$ noch keine Bitfehler sichtbar sind.

Originalbild



„Fehler“-bilder bei den Bitfehlerraten $1 \cdot 10^{-2}$, $1 \cdot 10^{-1}$ und $5 \cdot 10^{-1}$



Abbildung 15: Auswirkung von Bitfehlern auf ein uncodiertes SW-Bild

Bei einem quellencodierten Bild wäre diese Bitfehlerrate viel zu hoch, denn ein einziger Fehler kann schon zum Ausfall des gesamten Bildes führen. In gestörten Kanälen müssen deshalb quellencodierte Daten stets einen Fehlerschutzmechanismus besitzen.

Frage: Wie groß ist die Transinformation $T(X,Y)$ bei einer vollständig gestörten Übertragung?

6 Kanalcodierung

In Übertragungskanälen treten zwei Arten von Bitfehlern auf: Einzelbitfehler und Burstfehler. Letztere setzen sich aus einer Folge von benachbarten Bitfehlern zusammen. Um die zu übertragenden Daten vor Fehlern zu schützen, wird eine Kanalcodierung eingesetzt. Bei der Kanalcodierung muß im Gegensatz zur Quellencodierung wieder Redundanz zu den eigentlichen Daten im Sender hinzugefügt werden. Die Zusatzdaten ermöglichen es dem Empfänger, Fehler zu detektieren und zu korrigieren.

Abbildung 16 zeigt eine Vielzahl von Kanalcodes mit verschiedenen Korrektureigenschaften. Kanalcodes gliedern sich in die zwei großen Familien: Blockcodes und Faltungscodes. Die Familie der Blockcodes läßt sich wiederum in zyklische und nicht zyklische Blockcodes unterteilen. Zu den einfacheren Blockcodes gehören das Paritybit und der in diesem Praktikumsversuch verwendete Hammingcode. Durch diesen Code lassen sich nur einfache Bitfehler korrigieren. Zyklische Codes eignen sich besonders gut zur Korrektur von Burstfehlern. Zyklische Codes bilden die Codewörter aus einem Generatorpolynom. Die erzeugten Codewörter sind zyklisch, d.h. ein gültiges Codewort kann um beliebig viele Stellen rotiert werden und ergibt wieder ein

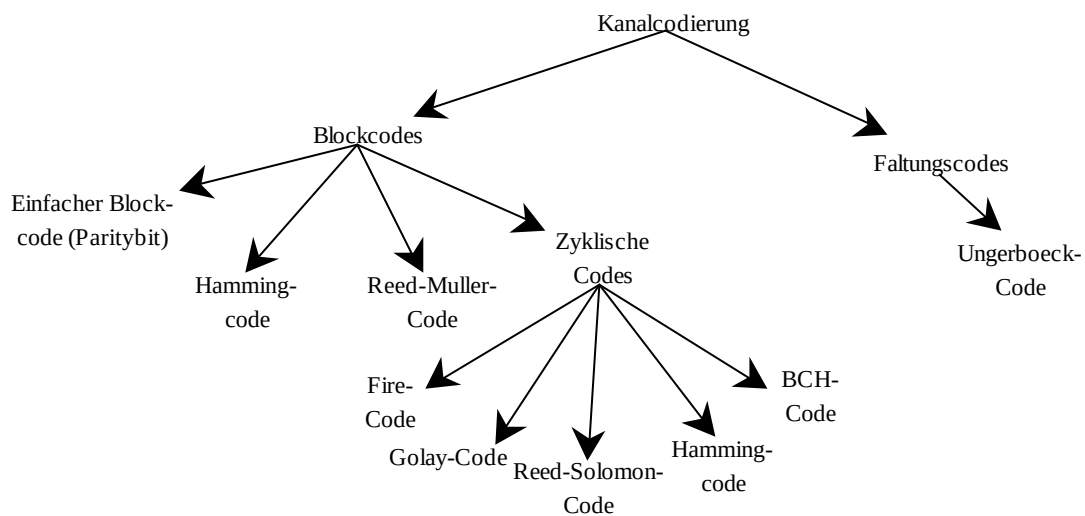


Abbildung 16: Methoden des Fehlerschutzes

gültiges Codewort. Zu diesen zyklischen Codes gehört der Reed-Solomon-Code. Er wird sehr häufig, wie zum Beispiel für die Korrektur von Burstfehlern bei einer Audio-CD genutzt. Der Fire-Code erlaubt die Korrektur von bis zu zwei Burstfehlern innerhalb eines Codewortes. Durch die BCH-Codes können stochastisch verteilte Einzel-Bitfehler korrigiert werden.

Um auch Burstfehler durch bitfehlerkorrigierende Kanalcodes korrigieren zu können, benutzt man die Technik des Interleavings. Das Interleaving transformiert die Burstfehler in einzelne Bitfehler, die dann durch den Kanalcoder unter Einhaltung der Korrekturmöglichkeiten beseitigt werden können.

Häufig werden Kanalcodes mit bitfehlerkorrigierenden Eigenschaften und Kanalcodes mit burstfehlerkorrigierenden Eigenschaften in Kombination benutzt (**Abbildung 17**). Die

Burstfehler werden durch den inneren Fehlerschutz und die noch übrig bleibenden Bitfehler durch den äußeren Fehlerschutz korrigiert.

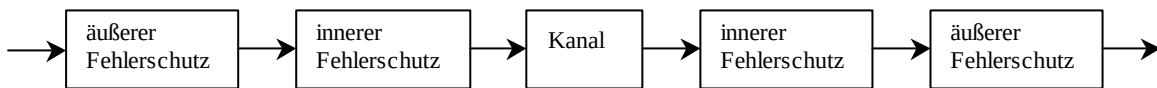


Abbildung 17: Verkettete Codes

6.1 Blockcode

Beim Blockcode wird die zu schützende Nachricht in kleine Blöcke der Länge n zerlegt. Ein Block enthält damit n Nachrichtenstellen. Zum Erhalten der Codewörter der Länge $N = n + k$ werden k Kontrollstellen zum Fehlerschutz pro Block angehängt. Im folgenden sollen $n=4$ Nachrichtenstellen durch den Blockcode geschützt werden. Dazu werden $k=3$ Kontrollstellen angehängt. Die Kontrollstellen k_1 bis k_3 werden aus den Nachrichtenstellen n_1 bis n_4 durch die Modulo-Operationen $\oplus$ der einzelnen Nachrichtenstellen nach **Gleichung (17)** berechnet:

$$(17) \quad \text{Coder:} \begin{cases} k_1 = n_1 \oplus n_2 \oplus n_4 \\ k_2 = n_1 \oplus n_3 \oplus n_4 \\ k_3 = n_1 \oplus n_2 \oplus n_3 \end{cases}$$

$\oplus$	0	1
0	0	1
1	1	0

Die Codewörter der Länge $N=7$ erhält man durch Anhängen der 3 Kontrollstellen an die 4 Nachrichtenstellen:

n_1	n_2	n_3	n_4	k_1	k_2	k_3
-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

Dieses Codewort wird übertragen. Aus den Stellen des empfangenen Codewortes wird der Syndromvektor $\vec{s} = (s_1, s_2, s_3)$ nach **Gleichung (18)** bestimmt.

$$(18) \quad \text{Decoder:} \begin{cases} s_1 = k_1 \oplus n_1 \oplus n_2 \oplus n_4 \\ s_2 = k_2 \oplus n_1 \oplus n_3 \oplus n_4 \\ s_3 = k_3 \oplus n_1 \oplus n_2 \oplus n_3 \end{cases}$$

Codewort								
		Nachrichtenstellen				Kontrollstellen		
		n_1	n_2	n_3	n_4	k_1	k_2	k_3
$\vec{s}$	0	1	1	0	1	1	0	0
	0	1	0	1	1	0	1	0
	0	1	1	1	0	0	0	1
	kein Fehler	1. Stelle falsch	2. Stelle falsch	3. Stelle falsch	4. Stelle falsch	5. Stelle falsch	6. Stelle falsch	7. Stelle falsch

Tabelle 3: Syndromtabelle

Anschließend wird in der Syndromtabelle (**Tabelle 3**) der Syndromvektor gesucht, aus der die fehlerhafte Stelle herauslesbar ist. Das fehlerhafte Bit wird dann einfach durch Invertierung (NOT) korrigiert. Bei einer Mehrbitfehler-Situation kann der Syndromvektor irgendeinen Wert annehmen, der mit den tatsächlichen defekten Stellen nichts zu tun hat. Fehler sind dann nicht korrigierbar.

Beispiel: $\vec{n} = (1001) \Rightarrow \vec{k} = (001)$

Empfangene Codewörter

$\vec{N} = (1001001) \Rightarrow \vec{s} = (000) \Rightarrow \text{kein Fehler}$

$\vec{N} = (1011001) \Rightarrow \vec{s} = (011) \Rightarrow 3. \text{ Stelle falsch}$

$\vec{N} = (1001101) \Rightarrow \vec{s} = (100) \Rightarrow 5. \text{ Stelle falsch}$

$\vec{N} = (1011101) \Rightarrow \vec{s} = (111) \Rightarrow 1. \text{ Stelle falsch} \quad \swarrow$

Im Beispiel oben tritt im letzten Fall $\vec{N} = (1011101)$ eine Verletzung auf, da der Decoder feststellt, daß an der ersten Stelle ein Fehler sein soll, aber in Wirklichkeit an den Stellen 3 und 5 ein Fehler auftrat. Treten beim Empfang mehrere Fehler an den Kontrollstellen auf, so kann es auch passieren, daß die korrekten Nachrichtenstellen durch die Korrekturmaßnahme verfälscht werden.

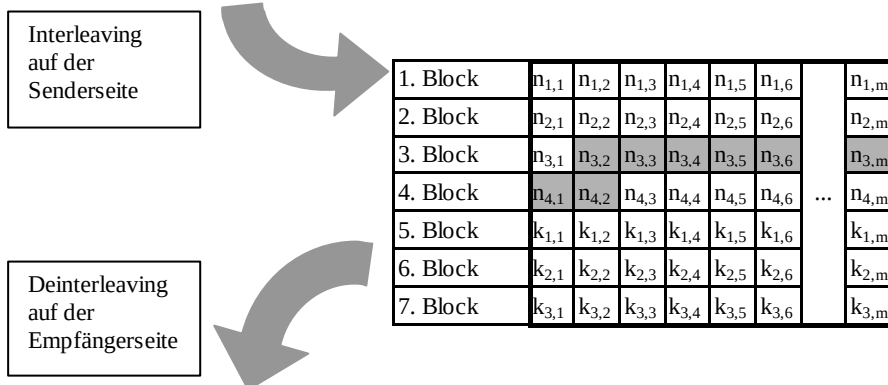
Frage: Wie heißen die korrekten Nachrichtenstellen für die empfangenen Codewörter 1111111 und 0111110?

6.2 Interleaving

Viele Kanalcodes erlauben eine Korrektur von einzelnen Bitfehlern in einem Codewort. In realen Kanälen treten auch Bitfehler in Folge, sogenannte Burstfehler auf. Mit Hilfe des Interleavings können Burstfehler unter Umständen auch durch einen einfachen Kanalcode, wie den Hammingcode, korrigiert werden, indem die Burstfehler in einzelne Bitfehler aufgeteilt werden. Beim Interleaving werden die Codewörter auf der Senderseite immer horizontal in eine Matrix geschrieben. Das Auslesen der Matrix erfolgt dann vertikal. Auf der Empfängerseite schreibt man die empfangenen Daten wiederum vertikal in eine Matrix. Damit ergeben sich horizontal wieder Codewörter. Der Hammingcode kann in einem Codewort nur einen Bitfehler eindeutig korrigieren. Treten aber mehrere Fehler trotz Interleaving in einem Codewort auf, so ist der Kanalcode überfordert und korrigiert an falschen Stellen. Dieses ist zum Beispiel der Fall, wenn der Burst größer als die Interleavertiefe m ist.

Ein Beispiel mit einer Interleavertiefe m zeigt **Abbildung 18**. Die zu übertragenden Daten füllen eine $7 \times m$ -Bit-Matrix auf. Das Interleaving transformiert diese Matrix in eine $m \times 7$ -Bit-Matrix. Die Daten werden nun horizontal ausgelesen und übertragen. Im Beispiel tritt während der Übertragung ein Burstfehler der Länge $m+1$ auf (schattierte Felder). Auf der Empfängerseite werden die Daten durch das Deinterleaving von einer $m \times 7$ -Bit-Matrix wieder in eine $7 \times m$ -Bit-Matrix überführt. Die einzelnen Codewörter in der Matrix enthalten nun noch jeweils einen Bitfehler, bis auf das 2. Codewort. Obwohl dieses Codewort als fehlerhaft erkannt wird, kann der Blockdecoder die fehlerhaften Daten nicht korrigieren und das Codewort wird unbrauchbar. Für ein quellencodiertes Bild kann das im schlimmsten Fall einen kompletten Bildausfall zur Folge haben.

1. Codewort	$n_{1,1}$	$n_{2,1}$	$n_{3,1}$	$n_{4,1}$	$k_{1,1}$	$k_{2,1}$	$k_{3,1}$
2. Codewort	$n_{1,2}$	$n_{2,2}$	$n_{3,2}$	$n_{4,2}$	$k_{1,2}$	$k_{2,2}$	$k_{3,2}$
3. Codewort	$n_{1,3}$	$n_{2,3}$	$n_{3,3}$	$n_{4,3}$	$k_{1,3}$	$k_{2,3}$	$k_{3,3}$
4. Codewort	$n_{1,4}$	$n_{2,4}$	$n_{3,4}$	$n_{4,4}$	$k_{1,4}$	$k_{2,4}$	$k_{3,4}$
5. Codewort	$n_{1,5}$	$n_{2,5}$	$n_{3,5}$	$n_{4,5}$	$k_{1,5}$	$k_{2,5}$	$k_{3,5}$
6. Codewort	$n_{1,6}$	$n_{2,6}$	$n_{3,6}$	$n_{4,6}$	$k_{1,6}$	$k_{2,6}$	$k_{3,6}$
...	...						
m. Codewort	$n_{1,m}$	$n_{2,m}$	$n_{3,m}$	$n_{4,m}$	$k_{1,m}$	$k_{2,m}$	$k_{3,m}$



1. Codewort	$n_{1,1}$	$n_{2,1}$	$n_{3,1}$	$n_{4,1}$	$k_{1,1}$	$k_{2,1}$	$k_{3,1}$
2. Codewort	$n_{1,2}$	$n_{2,2}$	$n_{3,2}$	$n_{4,2}$	$k_{1,2}$	$k_{2,2}$	$k_{3,2}$
3. Codewort	$n_{1,3}$	$n_{2,3}$	$n_{3,3}$	$n_{4,3}$	$k_{1,3}$	$k_{2,3}$	$k_{3,3}$
4. Codewort	$n_{1,4}$	$n_{2,4}$	$n_{3,4}$	$n_{4,4}$	$k_{1,4}$	$k_{2,4}$	$k_{3,4}$
5. Codewort	$n_{1,5}$	$n_{2,5}$	$n_{3,5}$	$n_{4,5}$	$k_{1,5}$	$k_{2,5}$	$k_{3,5}$
6. Codewort	$n_{1,6}$	$n_{2,6}$	$n_{3,6}$	$n_{4,6}$	$k_{1,6}$	$k_{2,6}$	$k_{3,6}$
...	...						
m. Codewort	$n_{1,m}$	$n_{2,m}$	$n_{3,m}$	$n_{4,m}$	$k_{1,m}$	$k_{2,m}$	$k_{3,m}$

- 1 Bitfehler
- 2 Bitfehler → nicht eindeutig korrigierbar
- 1 Bitfehler
- 1 Bitfehler
- 1 Bitfehler
- 1 Bitfehler
- 1 Bitfehler

Abbildung 18: Beispiel für das „Block“-Interleaving

Eine Erweiterung zum Interleaving ist das sogenannte Scrambling, bei dem die Positionen der einzelnen Bits nicht systematisch, sondern durch einen speziellen Algorithmus pseudo-statistisch verändert werden. Der Algorithmus muß auf der Senderseite und auf der Empfängerseite integriert sein, um eine Wiederherstellung der Ursprungsmatrix zu ermöglichen. Jedoch kann bei sehr hohen Bitfehlerraten auch das Scrambling eine vollständige Korrektur aller Bitfehler nicht garantieren. Hierzu müßten bessere Kanalcoder greifen.

6.3 Paketierung

In diesem Versuch werden Sender und Empfänger über eine asynchrone serielle Schnittstelle verbunden, wobei die Übertragung nur in eine Richtung stattfindet. Da die serielle PC-Schnittstelle für eine bidirektionale Verbindung ausgelegt wurde, müssen Maßnahmen getroffen werden, um die unidirektionale Übertragung trotz Asynchronität und fehlender Rückkopplung sicher zu machen.

Bei Asynchronität erfolgt die Übermittlung der Daten zu für den Empfänger unvorhersehbaren Zeitpunkten. Der Empfänger ist daher nicht in der Lage, die empfangenen Daten einem festen Zeitraster zuzuordnen. Um dieses Problem zu lösen, zerlegt man den Datenstrom in kleine

Pakete und teilt jedem Paket eine Paketnummer zu. Der Empfänger weiß durch das Auslesen des Headers immer, welche Paketnummer vorliegt und ob das Paket vollständig ist. Die im Header enthaltene Symbolfolge darf jedoch kein Bestandteil der zu übertragenden Information sein. Ist die Verbindung komplett gestört, so kann der Empfänger mit Hilfe der Paketnummer und -größe, verlorengegangene Daten erkennen und auffüllen. Das Auffüllen kann z.B. durch Wiederholung des zuletzt empfangenen Datenpaketes bzw. von Teilen desselben erfolgen. Würde man die Daten nicht auffüllen, so würde es zu einem Versatz der Daten in der Interleaver-Matrix kommen, welcher für einen sehr großen Anteil der Daten eine Mehrbitfehlersituation hervorrufen und zu einem Bildausfall führen würde.

7 Versuchsdurchführung

Dieser Versuch soll dazu anregen, die Grenzen der hier verwendeten Quellen- und Kanalcodierung auszutesten. Es werden die Grundlagen dargestellt, die für eine schnelle und sichere Übertragung sorgen. Aufgrund einer Softwarelösung für die Quellen- und Kanalcodierung ist nur eine Übertragung von Standbildern möglich. Wollte man auch Video live übertragen, so werden Hardwarecoder und -decoder zur schnellen Auswertung der großen Datenmengen benötigt.

Im Praktikumsversuch kann zwischen den beiden Übertragungsstrecken Glaserfaser und Richtfunk gewählt werden. Zur Verarbeitung und Übertragung der vom PC gelieferten Daten wird ein Adapter (**Abbildung 19**) benötigt. Er sorgt für die richtige Modulation und Verstärkung der Signale auf der Senderseite und für eine Verstärkung und Detektion der Signale auf der Empfängerseite.

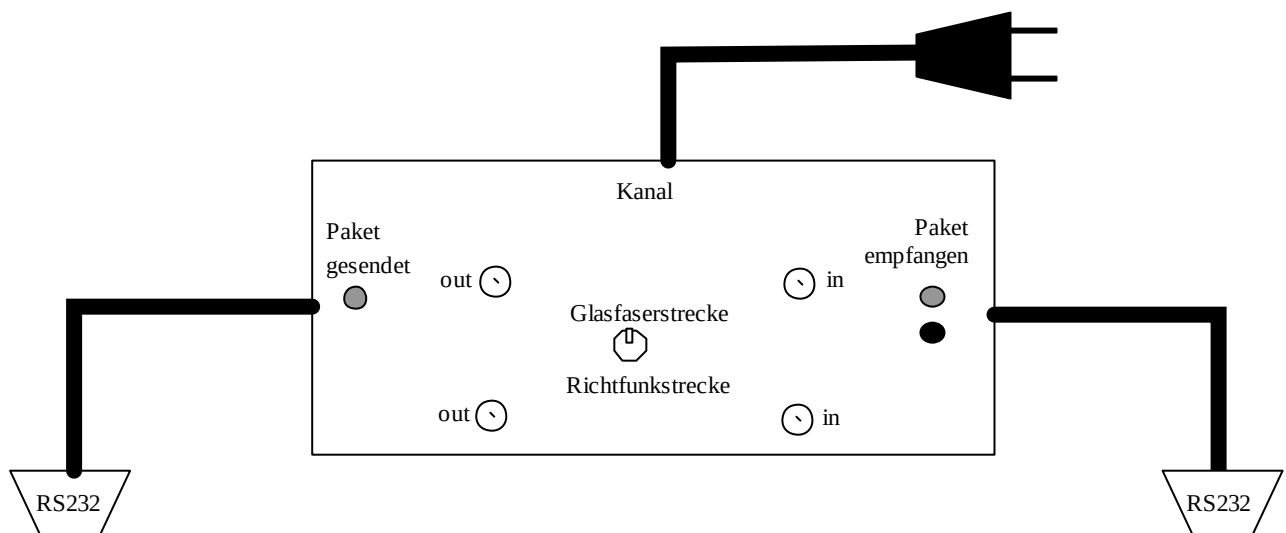


Abbildung 19: Versuchsaufbau

Die Praktikumssoftware bietet eine graphische Benutzeroberfläche, die sich in fünf Bildschirmseiten gliedert. Zwischen den Seiten kann beliebig gewechselt werden, nur sind eine Bildaufnahme und Quellencodierung zwingend notwendig, um den Seiten zu Kanalcodierung und Übertragung arbeiten zu können. Zu den einzelnen Bildschirmseiten folgen nun Beschreibungen und Fragen, die während des Versuchs beantwortet werden sollen.

Um die Benutzeroberfläche zu starten, klicken Sie doppelt mit der Maus auf das Icon „Übersichtspraktikum“. Es sollte dann die **Abbildung 20** aber noch ohne ein gespeichertes und quellencodiertes Bild erscheinen.

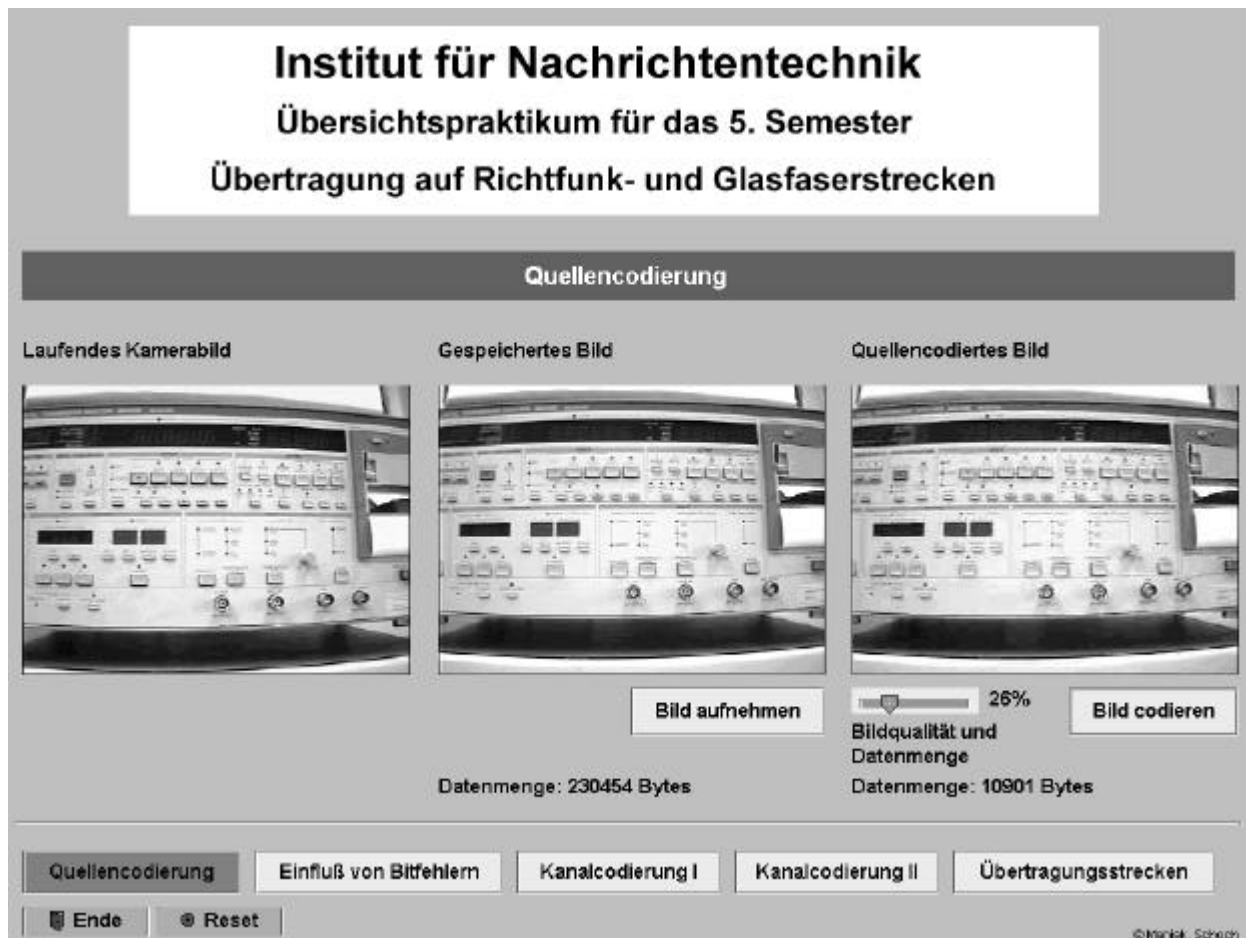


Abbildung 20: Erste Seite – Bildaufnahme und Quellencodierung

Die erste Seite (**Abbildung 20**) der Oberfläche dient zur Bildaufnahme und zur Einstellung der Quellencodierung. Das Kamerabild hat eine Auflösung von 320x240 Pixeln und ist pro Farbe (Rot, Grün, Blau) mit 8 Bit quantisiert. Es ergibt sich damit eine Bilddatenmenge von 230400 Bytes. Vor den Bilddaten ist noch ein BMP-Header der Länge 54 Byte abgelegt, der verschiedene Zusatzdaten zum Bild enthält. Für die Übertragung der BMP-Datei über die serielle Schnittstelle RS232, deren Datenrate hier bei 9,6 kbit/s liegt, wären mehrere Minuten nötig. Mit Hilfe einer JPEG-Codierung kann die Datenmenge und damit die Übertragungszeit des Bildes stark reduziert werden. Der Grad der Komprimierung kann mit Hilfe eines Qualitätsreglers gewählt werden. Wird 100% ausgewählt, so findet eine verlustlose Komprimierung des Bildes statt.

- Fragen:
- 1.1 Wie muß der Qualitätsregler eingestellt werden, um eine noch subjektiv hinreichend gute Qualität zu erhalten?
 - 1.2 Welchem Kompressionsfaktor entspricht dies?
 - 1.3 Wie machen sich Quantisierungsfehler bemerkbar?

Institut für Nachrichtentechnik

Übersichtspraktikum für das 5. Semester

Übertragung auf Richtfunk- und Glasfaserstrecken



Abbildung 21: Zweite Seite – Einfluß von Bitfehlern

Auf dem zweiten Bildschirmmenü (**Abbildung 21**) soll die Auswirkung von Bitfehlern auf ein quellencodiertes Bild verdeutlicht werden. Dabei ist zu beachten, daß sich Bitfehler im quellencodierten Bild kritischer als im uncodierten Bild auswirken (**vergleiche Abbildung 15**). Bitfehler in einem quellencodierten Bild können zum kompletten Bildausfall führen (**Kapitel 4.1**). Der Regler legt die statistische Bitfehlerwahrscheinlichkeit (BER) für einen simulierten Übertragungskanal fest. Die resultierende Bitfehleranzahl im Bild wird unter dem rechten Bild angezeigt. Durch eine Mittelwertbildung der statistischen Bitfehlerzahlen erhält man die deterministisch eingestellte Bitfehlerwahrscheinlichkeit.

- Fragen:**
- 2.1 Bis zu welcher Bitfehlerrate ist die Qualität subjektiv noch sehr gut? (überwiegend keine Artefakte)
 - 2.2 Bis zu welcher Bitfehlerrate hat man eine noch hinreichend gute Qualität? (Artefakte, aber Bild noch erkennbar)
 - 2.3 Ab welcher Bitfehlerrate ist an eine Übertragung ohne Korrektur nicht mehr zu denken? (überwiegend kein Bild mehr)
 - 2.4 Warum schwankt die Bitfehleranzahl? (Hinweis: Würfel)
 - 2.5 Warum gibt es einzelne Fälle, wo bei hoher Bitfehlerzahl das Bild noch erkennbar ist?

Institut für Nachrichtentechnik

Übersichtspraktikum für das 5. Semester

Übertragung auf Richtfunk- und Glasfaserstrecken

Kanalcodierung I: Korrektur von Einzelbitfehlern durch Blockcodierung



Abbildung 22: Dritte Seite – Korrektur von Einzelbitfehlern durch Blockcodierung

Da quellencodierte Daten sehr empfindlich gegen Störungen sind, müssen sie geschützt werden. Auf der dritten Seite wird die Kanalcodierung eingeführt. Der implementierte Bitfehlergenerator erzeugt Fehler, die durch den Kanalcode korrigiert werden sollen. Der Regler legt wie auf der Seite zuvor die deterministische Bitfehlerrate fest. Die aufgrund der eingestellten Bitfehlerrate erzeugten Fehler sind immer in Relation zur Datenmenge zu setzen.

Fragen: 3.1 Warum gibt es Restbitfehler?
 3.2 Ab welcher Bitfehlerrate ist der Kanalcode überfordert?
 (Restbitfehler ist größer als null)

Institut für Nachrichtentechnik

Übersichtspraktikum für das 5. Semester

Übertragung auf Richtfunk- und Glasfaserstrecken

Kanalcodierung II: Blockcodierung und Interleaving zur Korrektur von Burstfehlern



Abbildung 23: Vierte Seite – Blockcodierung und Interleaving zur Korrektur von Burstfehlern

Auf der vierten Seite erfolgt die Integration eines hinschaltbaren Interleavers und eines Burstfehlergenerators. Bursts sind Störungen, die durch einen zeitweise kompletten Ausfall des Übertragungskanal hervorgerufen werden. Diese Burstfehler werden mit Hilfe des Interleavers zu einzelnen Bitfehlern transformiert und können so bis zu einer bestimmten Burstfehlerlänge durch einen bitfehlerkorrigierenden Blockcode korrigiert werden. Durch den Regler kann die Länge eines Bursts in Bytes angegeben werden. Bei Überschreiten einer bestimmten Grenze ist der Kanalcoder inklusive Interleaver überfordert.

- Fragen:**
- 4.1 Wie groß darf ein Burstfehler maximal sein, damit der vor der Kanalcodierung implementierte Interleaver noch eine eindeutige Fehlerkorrektur ermöglicht? (Restfehler: 0)
 - 4.2 Woher kommt diese Grenze und wovon hängt sie ab?
 - 4.3 Wieso produziert ein Burstfehler der Länge 8 Byte nur 29 Bitfehler im Bild?
 - 4.4 Warum gibt es den Fall, daß null Bitfehler im Bild zu sehen sind, aber mehrere Restfehler vorhanden sind?
 - 4.5 Warum kommt es vor, daß das nicht korrigierte Bild dargestellt wird und das korrigierte Bild nicht mehr? (Hinweis: Das nicht korrigierte Bild enthält auch Kontrollstellen)

Institut für Nachrichtentechnik

Übersichtspraktikum für das 5. Semester

Übertragung auf Richtfunk- und Glasfaserstrecken



Abbildung 24: Fünfte Seite - Übertragung des codierten Bildes über die Übertragungskanäle

Bevor eine Übertragung stattfinden kann, muß der Adapter aus **Abbildung 19** in Betrieb genommen werden. Die Senderseite und die Empfängerseite müssen mit den RS232-Schnittstellen des Computers verbunden werden. Zusätzlich muß der Kanalschalter nach oben gelegt werden (Glasfaserstrecke) und, falls noch nicht geschehen, muß der Lichtwellenleiter in die beiden vorgesehenen Öffnungen gesteckt werden. Zuletzt muß der Kanal durch den Netzstecker versorgt werden (rote LED leuchtet). Wird das quellencodierte Bild übertragen, so blinken die grünen LEDs im Takt. Die grünen LEDs zeigen aufgrund ihrer Trägheit nur die Übertragung der einzelnen Pakete an. Eine Störung der Glasfaserstrecke ist im Versuch nur durch leichtes Ziehen am Lichtwellenleiter möglich, um die Intensität des Lichtstrahls zu verringern. Dadurch können Bitfehler bei der Übertragung entstehen.

Das letzte Menü (**Abbildung 24**) dient zur Übertragung des quellencodierten Bildes über verschiedene Übertragungsstrecken. Beachten Sie: Ein quellencodiertes Bild muß vorhanden sein. Während der Übertragung wird bei eingeschaltetem Kanalcoder die Paketnummer unter dem empfangenen Bild angegeben. Nach einer fehlerbehafteten Übertragung, die sich durch Paketverluste bzw. -teilverluste äußert, wird dort auch die Anzahl der korrigierten Bitfehler und die noch verbleibenden Restbitfehlerzahl angegeben.

Bei der zweiten Nachrichtenstrecke erfolgt die Übertragung über eine Richtfunkstrecke. Dazu muß der AM-Ausgang mit dem Modulator verbunden werden. Der AM-Eingang des Kanals wird an den Ausgang des Tiefpaßfilters gesteckt. Dann muß der Schalter am Kanal nach unten gelegt werden (Richtfunkstrecke). Durch den Startdrehknopf ist die Trägerfrequenz des Sender auf 3,26 GHz und die des Empfängers auf 3,24 GHz einzustellen. Zuletzt muß der Vorverstärker

eingeschaltet werden. Nun kann das quellencodierte Bild über die Richtfunkstrecke übertragen werden. Sollten die Richtfunk- und die Lichtwellenleiterstrecke nun einwandfrei funktionieren, so kann man auch während der Übertragung das Übertragungsmedium durch den Kanalschalter wechseln. Dieses ist möglich, da beide Systeme parallel laufen.

Um nun die Fehleranfälligkeit der Richtfunkstrecke zu testen, kann mit Hilfe von Hindernissen die Übertragung zwischen Empfänger- und Senderantenne gestört werden.

*Fragen: 5.1 Wie lange dauert die Übertragung eines Bildes mit der geringsten Qualitätsstufe?
5.2 Wie lange dauert die Übertragung eines Bildes mit der höchsten Qualitätsstufe?
5.3 Ab welcher Datenmenge kann ein verlorengegangenes Datenpaket korrigiert werden?*

Literaturverzeichnis

- [1] Reimers, Ulrich: Grundlagen der Informationstechnik Nachrichtentechnik I, IfN Braunschweig, Sommer 1999
- [2] Reimers, Ulrich: Aktuelle Systeme für die Elektronischen Medien, IfN Braunschweig, Sommer 1996
- [3] Reimers, Ulrich: Fernsehtechnik- und Bildübertragung II, IfN Braunschweig, Frühjahr 1997
- [4] Hartmann, Harro Lothar: Repertorium Digitale Nachrichtenübertragung, IfNS Braunschweig, Frühjahr 1995
- [5] Hartmann, Harro Lothar u. Bziuk, Wolfgang: Stochastische Prozesse in Nachrichtensystemen, IfNS Braunschweig, Ausgabe 1995
- [6] Rohling, Hermann: Einführung in die Informations- und Codierungstheorie, Teubner Studienbücher, 1995
- [7] Heise, Werner u. Quattrocchi, Pasquale: Informations- und Codierungstheorie Springer Verlag, zweite Auflage 1989
- [8] Pennebaker, William B. u. Mitchell, Joan L.: JPEG – Still Image Data Compression Standard, Library of Congress Cataloging-in Publication Data, 1993
- [9] Klein, J. W. u. Dullenkopf, P. u. Glasmachers, A.: Elektronische Messtechnik – Meßsysteme und Schaltungen, Teubner Studienbücher, 1992
- [10] Lüke, Hans Dieter: Signalübertragung, Springer Verlag, siebte Auflage 1999