Musterlösung zur Aufgabe A1.1

a) Im Anschlussbereich wird eine Zweidrahtübertragung verwendet. Die möglichen Anschlüsse sind somit gleich der Anzahl der Doppeladern im Hauptkabel: $\underline{N = 50}$.

b) Bei Zweidrahtübertragung ist ein Richtungstrennungsverfahren erforderlich, nämlich die so genannte **Gabelschaltung.** Diese hat die Aufgabe, dass beim Empfänger **A** nur das Sendesignal von Teilnehmer **B** ankommt, nicht jedoch das eigene Sendesignal. Dies gelingt bei schmalbandigen Signalen – zum Beispiel Sprache – im allgemeinen recht gut, jedoch nicht vollständig. Richtig ist der Lösungsvorschlag 1.

Der Lösungsvorschlag 2 ist ebenfalls zutreffend. Aufgrund von induktiven und kapazitiven Kopplungen kann es zu Übersprechen von der im gleichen Sternvierer befindlichen Doppelader kommen, wobei Nahnebensprechen (das heißt: der störende Sender und der gestörte Empfänger liegen örtlich zusammen) zu größeren Beeinträchtigungen führt als Fernnebensprechen.

Nicht zutreffend ist dagegen der letzte Lösungsvorschlag. Impulsinterferenzen – also die gegenseitige störende Beeinflussung benachbarter Symbole – können zwar durchaus auftreten, hängen aber nicht mit der Zweidrahtübertragung zusammen. Der Grund hierfür sind vielmehr (lineare) Verzerrungen aufgrund des spezifischen Dämpfungs– und Phasenverlaufs.

c) Die Gleichsignal–Dämpfung um den Faktor 4 kann wie folgt ausgedrückt werden:

$$a_{\rm K}(f = 0) = 20 \cdot {\rm lg}\ (4) = 12.04\,{\rm dB}\,.$$

Mit dem angegebenen Koeffizienten 5.1 dB/km ergibt sich somit die Leitungslänge 12.04/5.1 $\underline{= 2.36\ \rm km}$.

d) Mit den angegebenen Gleichungen und l = 2.36 km erhält man:

$$\begin{aligned} a_{\rm K}(f = 120\,{\rm kHz}) &= (5.1 + 14.3 \cdot 0.12^{\,0.59}) \cdot 2.36\ {\rm dB}\ \underline{\approx 21.7\,{\rm dB}}\,, \\ b_{\rm K}(f = 120\,{\rm kHz}) &= (32.9 \cdot 0.12 + 2.26 \cdot 0.12^{\,0.5}) \cdot 2.36\,{\rm rad}\ \underline{\approx 11.2\,{\rm rad}}\,. \end{aligned}$$

Musterlösung zur Aufgabe A1.2

a) Die Quantisierungsstufenzahl M wird meist als Zweierpotenz gewählt und für die Bitanzahl $N = \mathrm{ld}(M)$. Aus $M = 2^8 = 256$ folgt $\underline{N = 8}$.

b) Für die Bitrate gilt $R_\mathrm{B} = N \cdot f_\mathrm{A}$. Aus R_B = 64 kbit/s und $N = 8$ erhält man somit f_A $\underline{= 8\ \text{kHz}}$.

c) Durch die Bandbegrenzung ist die höchste im Signal $q(t)$ enthaltene Frequenz gleich 3.4 kHz. Nach dem Abtasttheorem müsste deshalb $f_\mathrm{A} \geq 6.8$ kHz gelten. Mit $f_\mathrm{A} = 8$ kHz ist die Bedingung erfüllt ⇒ JA.

d) Auch wenn der Einfluss des AWGN–Rauschens gering ist (kleine Rauschleistungsdichte N_0), kann das Sinken–SNR ρ_v einen durch das Quantisierungsrauschen gegebenen Grenzwert nicht unterschreiten:

$$\rho_v \approx \rho_\mathrm{Q} = 2^{2M} = 2^{16} \quad \Rightarrow \quad \rho_v \approx 48\,\mathrm{dB}\,.$$

Bei größerer Rauschstörung wird ρ_v durch die dann vorhandenen Übertragungsfehler weiter (signifikant) verringert. Dagegen führt die Abtastung zu keinem Qualitätsverlust, wenn das Abtasttheorem eingehalten wird. Die Abtastung kann dann vollständig rückgängig gemacht werden, wenn das Quellensignal $q(t)$ bandbegrenzt ist und die Signalrekonstruktion (ein idealer Tiefpass) richtig dimensioniert ist. Richtig sind somit die beiden letzten Aussagen.

Musterlösung zur Aufgabe A1.3

a) In jedem Rahmen werden 16 Bit des Basiskanals B1 und 16 Bit des Basiskanals B2 übertragen. Mit der Rahmendauer T_R gilt somit für die Bitrate (R_B = 64 kbit/s) eines jeden Rahmens:

$$R_\mathrm{B} = \frac{16\ \mathrm{bit}}{T_\mathrm{R}} \quad \Rightarrow \quad T_\mathrm{R} = \frac{16\ \mathrm{bit}}{64 \cdot 10^3\ \mathrm{bit/s}} \underline{= 250\,\mu\mathrm{s}}\,.$$

b) Für jedes einzelne der 48 Bit steht somit die Zeitdauer

$$T_\mathrm{B} = \frac{T_\mathrm{R}}{48} = \frac{250\,\mu\mathrm{s}}{48} \underline{= 5.208\ \mu\mathrm{s}}$$

zur Verfügung. Da bei der (modifizierten) AMI–Codierung jedes Binärsymbol durch ein Ternärsymbol gleicher Dauer ersetzt wird, ist die Symboldauer nach der AMI–Codierung ebenfalls gleich T_B.

c) Die Bruttodatenrate ist gleich dem Kehrwert der Bitdauer:

$$R_\mathrm{ges} = \frac{1}{T_\mathrm{B}} \underline{= 192\,\mathrm{kbit/s}}.$$

d) Die Anzahl der Steuerbit beträgt:

$$N_\mathrm{St} = 48 - 2 \cdot 16 - 4 \underline{= 12}.$$

Diese sind in der Grafik gelb markiert. Die in der letzten Teilfrage berechnete Gesamt–Bruttodatenrate setzt sich somit wie folgt zusammen:

$$R_\mathrm{ges} = 2 \cdot R_\mathrm{B} + R_\mathrm{D} + R_\mathrm{St} = 2 \cdot 64\,\mathrm{kbit/s} + 16\,\mathrm{kbit/s} + 48\,\mathrm{kbit/s} = 192\,\mathrm{kbit/s}.$$

e) Das Bit b_{10} = 0 wird dargestellt durch U_{10} $\underline{= –0.75\ \mathrm{V}}$,

b_{11} = 1 durch U_{11} $\underline{= 0\ \mathrm{V}}$ und

b_{12} = 0 durch U_{12} $\underline{= +0.75\ \mathrm{V}}$.

Zu beachten ist, dass die erste „0” mit positiver Polarität codiert wird und alle folgenden alternierend mit ±0.75 V: $U_1 = U_5 = U_9 = U_{12}$ = ... = +0.75V, $U_2 = U_7 = U_{10}$ = ... = –0.75V.

f) Das L–Bit hat die Aufgabe, das AMI–codierte Signal (über alle 48 Ternärsymbole) gleichsignalfrei zu halten. Da 22 mal das Binärsymbol „0” aufgetreten ist (also je 11 mal die Spannungswerte +0.75 V und –0.75 V) und dementsprechend 27 mal das Binärsymbol „1” (Spannungswert 0 V), ist U_{48} ebenfalls <u>gleich 0 V</u> zu setzen.

Musterlösung zur Zusatzaufgabe Z1.3

a) Die Kennung „0" zeigt bereits einen Basisanschluss an. Beim Primärmultiplexanschluss werden die Schnittstellen mit S_{2M} und U_{K2} bezeichnet, während das Netzabschlussgerät als NTPM (*Network Termination for Primary Rate Multiplex Access*) benannt ist.

b) Richtig ist die erste Antwort. Jeder NTBA ist durch ein Adernpaar mit der Ortsvermittlungsstelle verbunden. Die Kennung „K" in U_{K0} weist dabei auf eine Kupferleitung hin. Lediglich bei einem **Primärmultiplexanschluss** mit 30 B–Kanälen, einem D–Kanal und einem Synchronisationskanal ist eine Anbindung über Glasfaser möglich. Aber auch hierfür werden meist Kupferleitungen verwendet.

c) Im Hausanschlussbereich wird die Vierdrahtübertragung genutzt, wobei für jede Übertragungsrichtung eine Kupfer–Doppelader vorgesehen ist. Richtig ist also der zweite Lösungsvorschlag.

d) Nur bei Zweidrahtübertragung ist ein Richtungstrennungsverfahren erforderlich, wobei das einfachere Verfahren mittels Gabelschaltung in jedem NTBA realisiert ist. Richtig sind somit die Lösungsvorschläge 1 und 3.

e) Richtig sind die Lösungsvorschläge 1, 3 und 4. Ist die Länge auf 150 Meter begrenzt, so können bis zu acht Endgeräte an beliebigen Stellen angeschlossen werden. Man spricht von einem kurzen Bus. Ein erweiterter Bus liegt vor, wenn die Leitungslänge höchstens 500 Meter beträgt. In diesem Fall können bis zu vier Endgeräte angeschlossen werden, allerdings müssen diese auf die letzten 50 Meter vor dem Abschlusswiderstand (100 Ω) konzentriert sein. Bei einem Einzelanschluss kann die Leitungslänge auf einen Kilometer vergrößert werden (langer Bus). Analoge Endgeräte können nicht direkt an den S_0–Bus angeschlossen werden, sondern nur über einen Terminal–Adapter (TA).

Musterlösung zur Aufgabe A1.4

a) Richtig sind die zwei ersten Aussagen. Der modifizierte AMI–Code ist ein sog. Pseudo–Ternärcode mit $T_S = T_B$ und symbolweiser Codierung. Die angegebenen Zuordnungen gelten für den herkömmlichen AMI–Code. Dagegen wird beim modifizierten AMI–Code die binäre „1" durch den Spannungswert 0 V repräsentiert und die binäre „0" alternierend durch $+s_0$ bzw. $-s_0$, wobei für s_0 = 0.75 V zu setzen ist.

b) Die äquivalente Bitrate des AMI–codierten Signals beträgt $R_C = \text{ld}(3)/T_S$, während die Bitrate des redundanzfreien binären Quellensignals gleich $R_B = 1/T_B$ ist. Mit $T_S = T_B$ erhält man entsprechend dem **Kapitel 2.1** des Buches „Digitalsignalübertragung" für die (relative) Redundanz des modifizierten AMI–Codes:

$$r_{\rm AMI} = \frac{R_{\rm C} - R_{\rm B}}{R_{\rm C}} = 1 - \frac{1}{{\rm ld}\,(3)} \underline{\approx 36.9\,\%}.$$

c) Unter Verwendung des Einheitswiderstandes R = 1 Ω gilt für die Sendeleistung (mit der Einheit V^2):

$$P_{\rm S,\,AMI} = 1/2 \cdot {s_0}^2 = 1/2 \cdot 0.75\,{\rm V}^2 \approx 0.28\,{\rm V}^2.$$

Hierbei ist berücksichtigt, dass das AMI–codierte Signal in der Hälfte der Zeit gleich 0 V ist. Bei Berücksichtigung des Widerstandes R = 100 Ω ergibt sich schließlich:

$$P_{\rm S,\,AMI} = \frac{0.28\,{\rm V}^2}{100\,\Omega} \underline{= 2.8\,{\rm mW}}.$$

d) Der MMS43–Code arbeitet tatsächlich blockweise, wobei m_q = 4 Binärsymbole durch m_c = 3 Ternärsymbole ersetzt werden:

$$4 \cdot T_{\rm B} = 3 \cdot T_{\rm S} \quad \Rightarrow \quad T_{\rm S} = 4/3 \cdot T_{\rm B}.$$

Das heißt: Der erste Lösungsvorschlag trifft nicht zu ebenso wie der letzte. Richtig ist der Vorschlag 2.
Bei Blockcodierung kann das Binärsymbol „0" nicht einheitlich durch das gleiche Codesymbol ersetzt werden. Vielmehr lässt sich die Codierung wie folgt beschreiben, wenn man zu Beginn von der laufenden digitalen Summe $\Sigma_0 = 0$ ausgeht (siehe Grafik auf der Angabenseite):

$$\begin{aligned} \mathbf{0101} \quad &\Rightarrow \quad \mathbf{0++}\ (\Sigma_1 = 2), \\ \mathbf{0111} \quad &\Rightarrow \quad \mathbf{-0+}\ (\Sigma_2 = 2), \\ \mathbf{0101} \quad &\Rightarrow \quad \mathbf{-0\ 0}\ (\Sigma_3 = 1). \end{aligned}$$

In der Aufgabe Z1.4 wird der MMS43–Code noch ausführlicher behandelt.

e) Der MMS43–Code gehört zur Klasse der 4B3T–Codes. Für diesen gilt:

$$R_{\rm B} = \frac{1}{T_{\rm B}}, \quad R_{\rm C} = \frac{{\rm ld}\,(3)}{T_{\rm S}}$$

$$\Rightarrow \quad r_{\rm MMS43} = 1 - \frac{R_{\rm B}}{R_{\rm C}} = 1 - \frac{T_{\rm S}/T_{\rm B}}{{\rm ld}\,(3)} = 1 - \frac{4/3}{{\rm ld}\,(3)} \underline{\approx 15.9\,\%}.$$

f) Pro Millisekunde werden auf dem U_{K0}–Bus die folgende Anzahl an Ternärsymbolen übertragen:

- Kanal B1: 64 Binärsymbole ⇒ 48 Ternärsymbole,

- Kanal B2: 64 Binärsymbole ⇒ 48 Ternärsymbole,
- D–Kanal: 16 Binärsymbole ⇒ 12 Ternärsymbole,
- Synchronisations– und Steuersymbole ⇒ 12 Ternärsymbole.

Dies ergibt als Summe 120 Ternärsymbole pro Millisekunde bzw. 120 000 Ternärsymbole pro Sekunde.

g) Unter Berücksichtigung des Hinweises auf der Angabenseite und der gegenüber dem (modifizierten) AMI–Code größeren Sendeamplitude s_0 = 2.5 V erhält man:

$$P_{\rm S,\,MMS43} = \frac{2}{3} \cdot \frac{{s_0}^2}{R} = \frac{2}{3} \cdot \frac{(2.5\,{\rm V})^2}{100\,\Omega}\ \underline{\approx 4.2\,{\rm mW}}\,.$$

Musterlösung zur Zusatzaufgabe Z1.4

a) Die erste Aussage trifft nicht zu: Beispielsweise ergibt sich beim AWGN–Kanal (additives weißes Gaußsches Rauschen) mit einem 4B3T–Code im Vergleich zum redundanzfreien Binärcode eine deutlich größere Fehlerwahrscheinlichkeit aufgrund der ternären Entscheidung. Der wesentliche Grund für die Verwendung eines redundanten Übertragungscodes ist vielmehr, dass über einen „Telefonkanal" kein Gleichsignalanteil übertragen werden kann. Auch die um 25% kleinere Schrittgeschwindigkeit ($1/T$) des 4B3T–Codes kommt den Übertragungseigenschaften von Kupferleitungen (starker Dämpfungsanstieg mit der Frequenz) entgegen. Bei gegebener Leitungsdämpfung lässt sich mit dem 4B3T–Code eine größere Länge überbrücken als mit einem redundanzfreien Binärsignal. Richtig sind also die Aussagen 2 und 3.

b) Die 4B3T–Codierung ergibt mit dem Initialwert $\Sigma_0 = 0$:

1100 ⇒ + + + ($\Sigma_1 = 3$),

0100 ⇒ – + **0** ($\Sigma_2 = 3$),

0110 ⇒ – – + ($\Sigma_3 = 2$),

1010 ⇒ + – – ($\Sigma_4 = 1$).

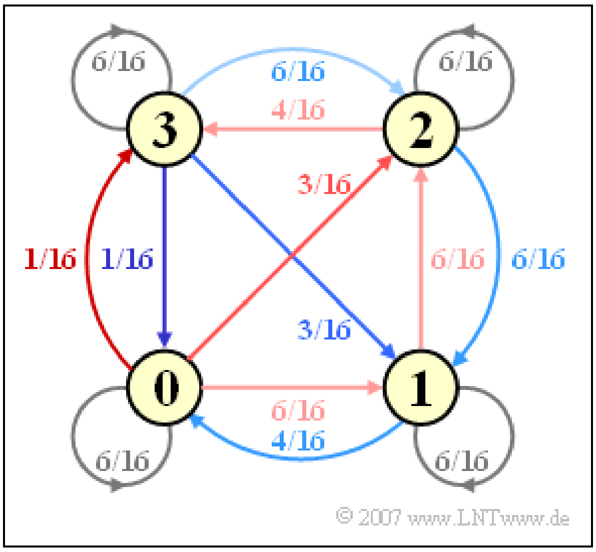
Der gesuchte Amplitudenkoeffizient ist somit a_{12} = –1.

c) Aus der Farbgebung der vorgegebenen Codetabelle kann man das folgende Markovdiagramm ermitteln. Daraus können die gesuchten Übergangswahrscheinlichkeiten abgelesen werden:

$\Pr(\Sigma_{l+1} = 0 \mid \Sigma_l = 0) = 6/16 = 0.375$,

$\Pr(\Sigma_{l+1} = 2 \mid \Sigma_l = 0) = 3/16 = 0.1875$,

$\Pr(\Sigma_{l+1} = 0 \mid \Sigma_l = 2) = 0$.



d) Die erste Aussage ist falsch, was man an den Asymmetrien im Markovdiagramm erkennt. Dagegen gibt es Symmetrien bezüglich der Zustände „0" und „3" sowie zwischen „1" und „2".

In der folgenden Berechnung schreiben wir anstelle von $\Pr(\Sigma_l = 0)$ vereinfachend Pr(0). Unter Ausnutzung der Eigenschaft Pr(3) = Pr(0) und Pr(2) = Pr(1) ergeben sich aus dem Markovdiagramm folgende Gleichungen:

$$\Pr(0) = \frac{6}{16} \cdot \Pr(0) + \frac{4}{16} \cdot \Pr(1) + \frac{1}{16} \cdot \Pr(3) \quad \Rightarrow \quad \frac{9}{16} \cdot \Pr(0) = \frac{4}{16} \cdot \Pr(1).$$

Aus der weiteren Bedingung Pr(0) + Pr(1) = 1/2 folgt weiter:

$$\Pr(0) = \Pr(3) = \frac{9}{26}, \quad \Pr(1) = \Pr(2) = \frac{4}{26}.$$

Diese Berechnung basiert auf der „Summe der ankommenden Pfeile im Zustand 0". Man könnte auch Gleichungen für die drei anderen Zustände angeben, die aber alle zum gleichen Ergebnis führen:

$$\begin{aligned}
\mathrm{Pr}(1) &= \frac{6}{16} \cdot \mathrm{Pr}(0) + \frac{6}{16} \cdot \mathrm{Pr}(1) + \frac{6}{16} \cdot \mathrm{Pr}(2) + \frac{3}{16} \cdot \mathrm{Pr}(3)\,, \\
\mathrm{Pr}(2) &= \frac{3}{16} \cdot \mathrm{Pr}(0) + \frac{6}{16} \cdot \mathrm{Pr}(1) + \frac{6}{16} \cdot \mathrm{Pr}(2) + \frac{6}{16} \cdot \mathrm{Pr}(3)\,, \\
\mathrm{Pr}(3) &= \frac{1}{16} \cdot \mathrm{Pr}(0) + \frac{4}{16} \cdot \mathrm{Pr}(2) + \frac{6}{16} \cdot \mathrm{Pr}(3)\,.
\end{aligned}$$

Richtig sind also <u>die Aussagen 2 und 3</u>.

Musterlösung zur Aufgabe A1.5

a) Die Gesamtdatenrate der insgesamt 32 Kanäle zu je 64 kbit/s ergibt R_B = 2.048 Mbit/s.

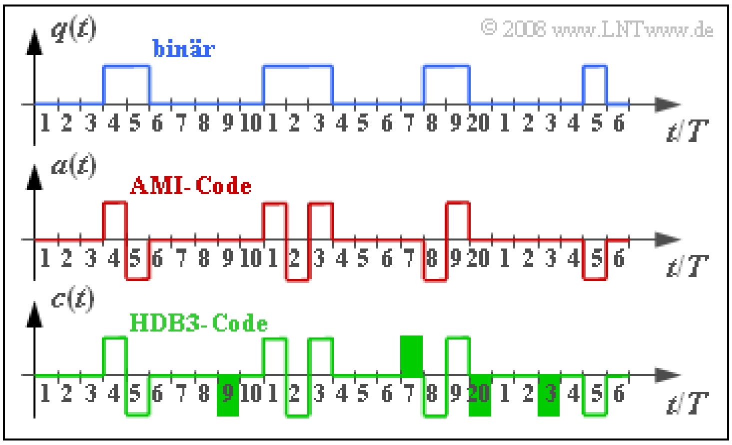
b) Die Bitdauer ist $T_B = 1/R_B$ = 0.488 µs. Pro Rahmen wird jeweils ein Byte (8 Bit) eines jeden Kanals übertragen. Daraus folgt:

$$T_R = 32 \cdot 8 \cdot T_B \underline{= 125\,\mu s}\,.$$

c) Bis zum Zeitpunkt $t = 6T$ ist im AMI–codierten Signal $a(t)$ genau einmal eine „+1” aufgetreten. Wegen $a_5 = -1$ wird beim HDB3–Code „**0 0 0 0**” durch

$$\underline{c_6 = 0, \;\; c_7 = 0, \;\; c_8 = 0, \;\; c_9 = -1}$$

ersetzt, während $c_{10} = a_{10} = 0$ durch die HDB3–Codierung nicht verändert wird (siehe Grafik).



d) Bis einschließlich a_{13} gibt es dreimal (⇒ ungerade Anzahl) eine „+1”. Wegen $a_{12} = +1$ wird dieser Nullblock wie folgt ersetzt:

$$\underline{c_{14} = 0, \;\; c_{15} = 0, \;\; c_{16} = 0, \;\; c_{17} = +1}\,.$$

e) Im AMI–codierten Signal tritt bis einschließlich a_{19} genau viermal „+1” auf ⇒ geradzahlige Anzahl. Da zudem $a_{19} = +1$ ist, lautet die Ersetzung entsprechend der Regel 2 auf der Angabenseite:

$$\underline{c_{20} = -1, \;\; c_{21} = 0, \;\; c_{22} = 0, \;\; c_{23} = -1}\,.$$

Das Nullsymbol a_{24} bleibt unverändert: $\underline{c_{24} = 0}$.

Musterlösung zur Aufgabe A1.6

a) Aufgrund des größten Zählerexponenten (D^{11}) und des höchsten Nennerexponenten (D^4) kann der Vorschlag $E(D) = D^5 + D^3 + 1$ als Ergebnis ausgeschlossen werden ⇒ $E(D) = D^7 + D^5 + D^3 + 1$. Die Modulo–2–Multiplikation von $E(D)$ mit dem Generatorpolynom $G(D) = D^4 + D + 1$ liefert:

$$\begin{aligned} E(D) \cdot G(D) &= (D^7 + D^5 + D^3 + 1) \cdot (D^4 + D + 1) = \\ &= D^{11} + D^8 + D^7 + D^9 + D^6 + D^5 + \\ &+ D^7 + D^4 + D^3 + D^4 + D + 1 \,. \end{aligned}$$

Zu berücksichtigen ist hierbei, dass bei Modulo–2–Rechnungen $D^4 + D^4 = 0$ gilt. Damit ergibt sich der folgende Rest:

$$R(D) = D^{11} + D^9 + D^8 + D^6 + D^5 - E(D) \cdot G(D) = D^3 + D + 1 \,.$$

Richtig ist somit der Lösungsvorschlag 2.

b) Aus dem Ergebnis der Teilaufgabe a) folgt:

$$\mathrm{CRC0} = 1, \;\; \mathrm{CRC1} = 1,$$
$$\mathrm{CRC2} = 0, \;\; \mathrm{CRC3} = 1 \,.$$

Die folgende Tabelle zeigt einen zweiten Lösungsweg auf: die Registerbelegungen der vorne angegebenen Schaltung während der Taktzeitpunkte 0, ... , 8:

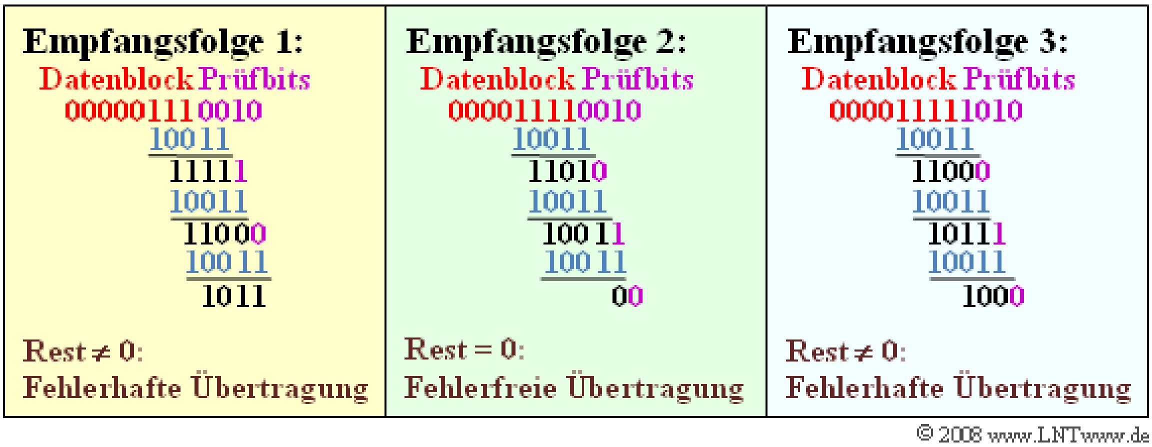
Takt	CRC3	CRC2	CRC1	CRC0
0	0	0	0	0
1	0	0	1	1
2	0	1	1	0
3	1	1	1	1
4	1	1	1	0
5	1	1	1	1
6	1	1	1	0
7	1	1	0	0
8	1	0	1	1

c) Der Empfänger teilt das Polynom $P(D)$ der Empfangsfolge durch das Generatorpolynom $G(D)$. Liefert diese Modulo–2–Division den Rest $R(D) = 0$, so wurden alle 12 Bit richtig übertragen. Dies trifft für den zweiten Lösungsvorschlag zu, wie ein Vergleich mit den Aufgaben a) und b) zeigt. Es gilt ohne Rest:

$$(D^{11} + D^9 + D^8 + D^6 + D^5 + D^3 + D + 1) : (D^4 + D + 1) = D^7 + D^5 + D^3 + 1 \,.$$

Bei Lösungsvorschlag 1 wurde das 6. Informationsbit verfälscht, beim letzten das CRC1–Bit. Richtig ist somit nur der Lösungsvorschlag 2.

d) In nachfolgender Grafik sind die Modulo–2–Divisionen für die drei angegebenen Empfangsfolgen in vereinfachter Form (mit Nullen und Einsen) dargestellt. Man erkennt, dass nur bei der Empfangsfolge 2 die Division ohne Rest möglich ist. Richtig sind also die Lösungsvorschläge 1 und 3.



In ausgeschriebener Form lauten die Polynomdivisionen:

$$(1) \quad (D^6 + D^5 + D^4 + 1) : (D^4 + D + 1) \quad \Rightarrow \quad \text{Rest } D^3 + D + 1\,,$$
$$(2) \quad (D^7 + D^6 + D^5 + D^4 + 1) : (D^4 + D + 1) \quad \Rightarrow \quad \text{ohne Rest}\,,$$
$$(3) \quad (D^7 + D^6 + D^5 + D^4 + D^3 + 1) : (D^4 + D + 1) \quad \Rightarrow \quad \text{Rest } D^3\,.$$

Musterlösung zur Aufgabe A1.7

a) Richtig ist der zweite Lösungsvorschlag, wie ein Vergleich der Signalverläufe $c(t)$ und $b(t)$ zeigt.

b) Die Symboldauer (Bitdauer) von $q(t)$ beträgt $T_q = 1/R_q = 0.488\ \mu\text{s}$.

Die Symboldauer T_c des AMI–Codes (und des HDB3–Codes) ist genau so groß. Dagegen ist die Symboldauer (Bitdauer) nach der 1T2B–Codierung nur halb so groß: $T_b = T_c/2 = 0.244\ \mu\text{s}$.

c) Mit der angegebenen Gleichung ergibt sich mit $M_q = 2$, $M_c = 3$ und $T_c = T_q$:

$$r_{\rm HDB3} = 1 - \frac{T_c \cdot {\rm ld}\,(M_q)}{T_q \cdot {\rm ld}\,(M_c)} = 1 - \frac{1}{{\rm ld}\,(3)} \underline{= 36.9\,\%}\,.$$

d) Passt man die Gleichung an den zweiten Coder an, so erhält man mit $M_c = 3$, $M_b = 2$ und $T_b = T_c/2$:

$$r_{\rm 1T2B} = 1 - \frac{T_b \cdot {\rm ld}\,(M_c)}{T_c \cdot {\rm ld}\,(M_b)} = 1 - \frac{{\rm ld}\,(3)}{2} \underline{= 20.7\,\%}\,.$$

e) Die gesuchte Redundanz erhält man, wenn man die angegebene Gleichung auf das Eingangssignal $q(t)$ und das Ausgangssignal $c(t)$ bezieht. Mit $M_q = M_b = 2$ und $T_b = T_q/2$ folgt daraus:

$$r_{\rm HDB3+1T2B} = 1 - \frac{T_b \cdot {\rm ld}\,(M_q)}{T_q \cdot {\rm ld}\,(M_b)} = 1 - \frac{T_b}{T_q} \underline{= 50\,\%}\,.$$

Zum gleichen Ergebnis kommt man über die Rechnung

$$\begin{aligned} 1 - r_{\rm HDB3+1T2B} &= (1 - r_{\rm HDB3}) \cdot (1 - r_{\rm 1T2B}) = \\ &= (1 - 1 + \frac{1}{{\rm ld}\,(3)}) \cdot (1 - 1 + \frac{{\rm ld}\,(3)}{2}) = 50\,\%\,. \end{aligned}$$

$$\Rightarrow \quad r_{\rm HDB3+1T2B} = 50\,\%\,.$$