Technische Hochschule Rosenheim

Grundlagen der Informatik

Prof. Dr. J. Schmidt
Fakultät für Informatik

GDI – WS 2020/21

Information und Quellencodierung

Grundbegriffe

Leitfragen 3.1

- Einschub: Grundbegriffe der Wahrscheinlichkeitsrechnung
- Wie wird in der Informatik der Begriff Information statistisch gedeutet?
- Was versteht man unter der mittleren Wortlänge eines Codes und der Code-Redundanz?
- Welche Beispiele für Codierungen gibt es in der Informatik und welche charakteristischen Merkmale weisen diese auf?

Grundbegriffe der Wahrscheinlichkeitsrechnung

Relative Häufigkeit h

- Quotient aus Anzahl von Dingen (Ereignissen), die ein bestimmtes Merkmal aufweisen und der Gesamtzahl der auf dieses Merkmal hin untersuchten Dinge

$$h = \frac{\text{Anzahl der Ereignisse, die ein gewünschtes Merkmal aufweisen}}{\text{Anzahl der betrachteten Ereignisse}}$$

- Bedingung: $0 \leq h \leq 1$ gilt immer
- Vorgehensweise zur Bestimmung der relativen Häufigkeit wird auch **Abzählregel** genannt

Zufallsexperiment

- Vorgang oder Versuch, der dem Zufall unterliegt oder bei dem man aus anderen Gründen den Ausgang nicht vorhersagen kann
- Quantitative Aussagen sind unter Anwendung von mathematischen Methoden der Statistik möglich
  - Wiederholung der Versuche unter gleichbleibenden Bedingungen
- Gesamtheit aller möglichen Versuchsergebnisse wird als Menge der Elementarereignisse bezeichnet

Beispiele für Elementarereignisse

- Versuch „einmaliges Werfen einer Münze“
  - Elementarereignisse: { Kopf, Zahl }
- Versuch „einmaliges Werfen eines Würfels“
  - Elementarereignisse: { 1,2,3,4,5,6 }
- Versuch „Messung der Lebensdauer einer Glühbirne“
  - Unendliche Menge von Elementarereignissen

Zufallsexperiment (3)

Ermittlung der relativen Häufigkeit durch eine große Anzahl an Wiederholungen des Zufallsexperiments

Beispiele

- Wurf einer Münze

  Je öfter man eine Münze wirft, desto weniger werden sich h_{Kopf} und h_{Zahl} von dem Wert ½ unterscheiden.

- Würfelspiel

  Je öfter man einen Würfel wirft, desto weniger werden sich h_1, h_2, h_3, h_4, h_5 und h_6 von dem Wert 1/6 unterscheiden.

Mathematische Wahrscheinlichkeit (1)

Beziehung zwischen mathematischer Wahrscheinlichkeit und relativer Häufigkeit:
Gesetz der großen Zahl

$$p(A) = \lim_{n \to \infty} h(A)$$

Wahrscheinlichkeit, dass das Ereignis A eintritt

Relative Häufigkeit des Ereignisses A

Limes / Grenzwert der Folge

A: betrachtetes Ereignis
n: Anzahl der Versuche

Exakte mathematische Definition der Wahrscheinlichkeit durch die

Kolmogorowschen Axiome

- Axiom 1: Die Wahrscheinlichkeit p(A) für das Eintreffen eines bestimmten Ereignisses A ist eine reelle Funktion, die alle Werte zwischen Null und Eins annehmen kann:

$$0 \leq p(A) \leq 1$$

- Axiom 2: Die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten eines Ereignisses A, das mit Sicherheit eintrifft, hat den Wert 1:

$$p(A) = 1$$

Mathematische Wahrscheinlichkeit (3)

- Axiom 3: Für sich gegenseitig ausschließende Ereignisse A und B gilt:

$$p(A \text{ oder } B) = p(A) + p(B)$$
$$p(A \cup B) = p(A) + p(B)$$

(**Additionsgesetz**)

Folgerungen aus den Axiomen:

- Wahrscheinlichkeit für ein mit Sicherheit nicht eintretendes Ereignis A:
  $p(A) = 0$

- Wahrscheinlichkeit, dass das Ereignis A nicht eintritt:
  $p(\bar{A}) = 1 - p(A)$ $\quad \bar{A}$ = „nicht A“

- Wahrscheinlichkeit, dass zwei Ereignisse A und B gemeinsam eintreten:
  $p(A \text{ und } B) = p(A) \cdot p(B)$
  $p(A \cap B) = p(A) \cdot p(B)$

  Bedingung:
  Ereignisse A und B
  schließen sich gegenseitig nicht aus
  und sind voneinander unabhängig

Beispiele

- Würfeln mit zwei **unterscheidbaren Würfeln** (rot und grün) gleichzeitig
  - Wahrscheinlichkeit grüner Würfel zeigt 1 und roter Würfel zeigt 2

$$p(A \text{ und } B) = 1/6 \cdot 1/6 = 1/36$$

- Würfeln mit **einem Würfel** hintereinander
  - Wahrscheinlichkeit, dass erst eine 1 und dann eine 2 gewürfelt wird

$$p(A \text{ und } B) = 1/6 \cdot 1/6 = 1/36$$

- Würfeln mit zwei **nicht unterscheidbaren Würfeln**
  - Wahrscheinlichkeit, dass 1 und 2 gewürfelt wird

$$p(E) = (1/6 + 1/6) \cdot 1/6 = 1/18$$

Anmerkungen

- Die vorherigen Folien umfassen nur das absolut Notwendige
- Viele wichtige Begriffe wurden nicht erläutert (z.B. bedingte Wahrscheinlichkeiten)
- Dies folgt in einer separaten Lehrveranstaltung

Statistischer Informationsgehalt

Informationsgehalt einer Nachricht (1)

Betrachtung des Begriffs Information unter einem spezifischen Blickwinkel

- Mathematisch fassbare Entscheidungsinformation
- Also
  - nicht semantische Bedeutung einer Information
  - nicht orientiert an dem mit der Nachricht verfolgten Zweck
- Das heißt:
  Zwei Nachrichten (eine mit besonderem Inhalt – eine mit „Unsinn“) können genau die gleiche Menge an Information enthalten.

Informationsgehalt einer Nachricht (2)

- Shannonsche Informationstheorie
  - Wurde maßgeblich von Claude Shannon bis 1950 entwickelt
- Zielsetzung
  - Mathematische Beschreibung des statistischen Informationsgehalts $I(x)$
  - eines Zeichens oder Wortes x,
  - welches mit einer Auftrittswahrscheinlichkeit $p(x)$ vorkommt

Informationsgehalt einer Nachricht (3)

Anforderungen an die mathematische Beschreibung

1. Je seltener ein bestimmtes Zeichen x auftritt, d.h. je kleiner $p(x)$, desto größer soll der Informationsgehalt dieses Zeichens sein

$$I(x) \sim \frac{1}{p(x)}$$

2. Gesamtinformation einer Zeichenkette, z.B. $x_1x_2x_3$ soll sich aus der Summe der Einzelinformationen ergeben

$$I(x_1x_2x_3) = I(x_1) + I(x_2) + I(x_3)$$

3. Für den Informationsgehalt eines mit Sicherheit auftretenden Zeichens x, also für den Fall $p(x) = 1$, soll gelten

$$I(x) = 0$$

➔ Logarithmusfunktion erfüllt die formulierten Anforderungen

Informationsgehalt einer Nachricht (4)

Mathematische Beschreibung des Zusammenhangs von Informationsgehalt und Auftrittswahrscheinlichkeit eines Zeichens x

$$I(x) = \log_b \frac{1}{p(x)}$$

b = Maßstab zur Informationsmessung

Festlegung: Zwei Zustände (0 und 1)
$\rightarrow b = 2$

Informationsgehalt einer Nachricht (5)

Statistischer Informationsgehalt

$$I(x) = \mathrm{ld}\,\frac{1}{p(x)} = -\mathrm{ld}\,p(x) \quad [Bit]$$

Zweierlogarithmus

- Anzahl der Elementarentscheidungen, die nötig sind, um eine Nachricht Zeichen für Zeichen eindeutig identifizieren zu können
- Maßeinheit: Bit
- Informationsgehalt eines Zeichens = Anzahl der Stellen des Binärworts, das man für eine eindeutige binäre Darstellung des Zeichens verwenden muss

Beispiel Informationsgehalt

- Berechnung Informationsgehalt bei nicht-binären Nachrichten
  - Gegeben: Buchstabe b tritt in einem deutschsprachigen Text mit einer Wahrscheinlichkeit von 0,016 auf
  - Gesucht: Informationsgehalt dieses Zeichens
  - Lösung:

$$I(b) = \mathrm{ld}\,\frac{1}{0.016} = \frac{\log(\frac{1}{0.016})}{\log(2)} \approx \frac{1.79588}{0.30103} \approx 5.97\ [Bit]$$

Erinnerung – praktisches Rechnen mit Logarithmen

- Umwandlungsgleichung

$$\log_b(x) = \frac{\log_{10}(x)}{\log_{10}(b)} \quad \text{also} \quad \log_2(x) = \mathrm{ld}(x) = \frac{\log_{10}(x)}{\log_{10}(2)}$$

  - mit $\log_{10}(2) = \log(2) = 0.30103$

- Schreibweisen:
  - $\log_{10}(x)$ wird zu $\log(x)$
  - $\log_2(x)$ wird zu $\mathrm{ld}(x)$
  - $\log_e(x)$ wird zu $\ln(x)$ mit $e \approx 2.71828...$

Entropie einer Nachrichtenquelle (1)

- Nachricht setzt sich i.A.
  - aus Zeichen bzw. aus zu Worten verbundenen Zeichen zusammen,
  - die jeweils unterschiedlichen Informationsgehalt tragen, da sie mit unterschiedlicher Häufigkeit auftreten

- Einführung des Begriffs
  - des mittleren Informationsgehalts
  - bzw. Entropie H einer Nachrichtenquelle,

  die aus den Zeichen $x_1, x_2, \ldots, x_n$ eines Alphabets A besteht

Entropie einer Nachrichtenquelle (2)

- Summe der mit den Auftrittswahrscheinlichkeiten gewichteten Informationsgehalte der Zeichen

$$H = \sum_{i=1}^{n} p(x_i) \cdot \mathrm{ld}\,\frac{1}{p(x_i)} = -\sum_{i=1}^{n} p(x_i) \cdot \mathrm{ld}\,p(x) = \sum_{i=1}^{n} p(x_i) \cdot I(x_i)$$

  - Der höchste mittlere Informationsgehalt ergibt sich, wenn alle Zeichen mit der gleichen Wahrscheinlichkeit auftreten
  - Einheit: Bit / Zeichen

Ungewissheit einer Nachrichtenquelle (1)

- Andere Interpretation des Entropie-Begriffs…

  … zum Vergleich von Nachrichtenquellen

  - Je kleiner die Entropie umso größer die Sicherheit mit der man das Auftreten eines bestimmten Zeichens vorhersagen kann.
  - Je höher die Entropie einer Nachrichtenquelle, desto größer ihre Unsicherheit (Surprisal).

Ungewissheit einer Nachrichtenquelle (2)

- Beispiel: Zwei Nachrichtenquellen
  - A_1 = {a, b, c, d} mit den Auftrittswahrscheinlichkeiten

    $p(a) = {}^{11}/_{16}, \quad p(b) = p(c) = {}^{1}/_{8}, \quad p(d) = {}^{1}/_{16}$
  - A_2 = {+, -, *} mit den Auftrittswahrscheinlichkeiten

    $p(+) = {}^{1}/_{6}, \quad p(-) = {}^{1}/_{2}, \quad p(*) = {}^{1}/_{3}$

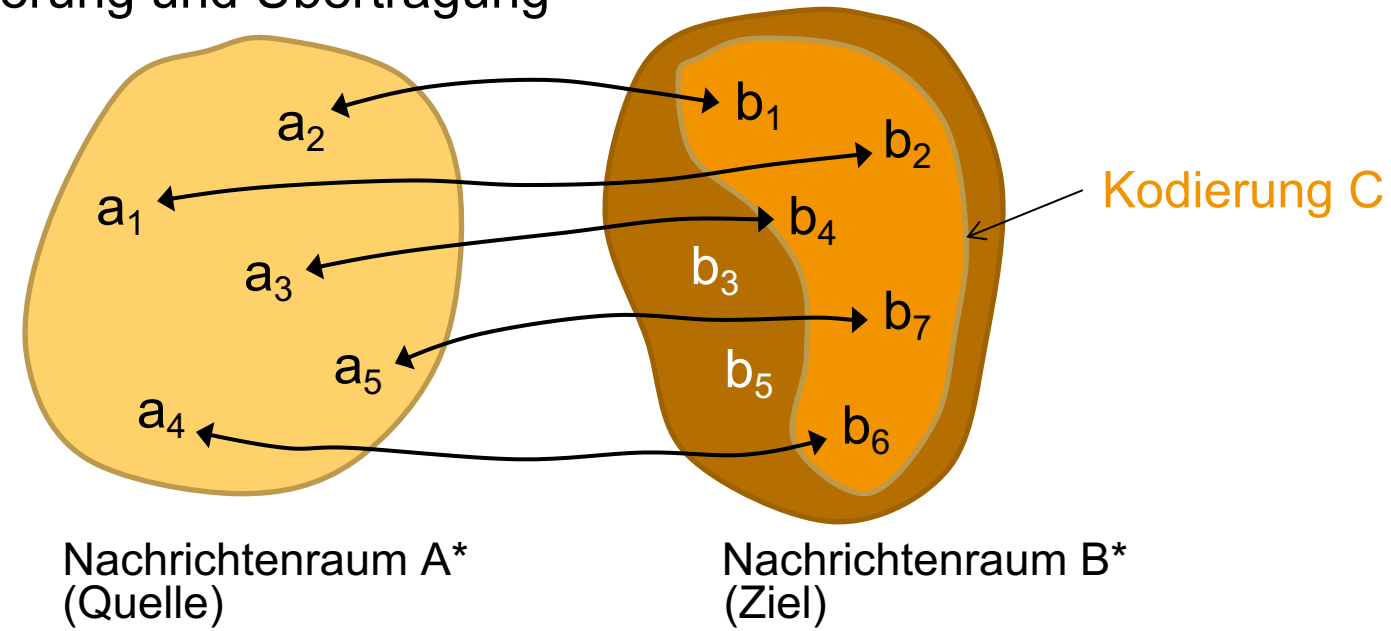
$$H_1 = \frac{11}{16} \cdot \mathrm{ld}\,\frac{16}{11} + \frac{1}{8} \cdot \mathrm{ld}\,8 + \frac{1}{8} \cdot \mathrm{ld}\,8 + \frac{1}{16} \cdot \mathrm{ld}\,16 \approx 1.372 \left[\frac{Bit}{Zeichen}\right]$$

$$H_2 = \frac{1}{6} \cdot \mathrm{ld}\,6 + \frac{1}{2} \cdot \mathrm{ld}\,2 + \frac{1}{3} \cdot \mathrm{ld}\,3 \approx 1.460 \left[\frac{Bit}{Zeichen}\right]$$

  - Ungewissheit für A_2 ist größer als für A_1, da H_2 größer als H_1

Codierung – Begriffsdefinitionen (1)

- Zielsetzung: problemspezifische Darstellung einer Nachricht bei Speicherung und Übertragung



- Codierung C
  - eine umkehrbar eindeutige Abbildung von A* in B*
  - Beachte: $C \subseteq B^*$ gilt, d.h. C ist eine Teilmenge von B*

- Binärcodierung C
  - Zielmenge ist ein Nachrichtenraum B* über dem Alphabet {0, 1}

Codierung – Begriffsdefinitionen (2)

- Schematische Darstellung der Codierung und Übertragung von Nachrichten

- Erwartungen an „gute“ Codierung
  - Darstellung der zu sendenden Daten mit möglichst wenig Zeichen
  - Möglichst unempfindlich gegen Störungen
  - Code sollte in DV-Anlage leicht zu verarbeiten sein

Mittlere Wortlänge L

- wesentliches Charakteristikum eines Codes
- definiert als

$$L = \sum_{i=1}^{n} p_i \cdot l_i$$

mit

- p_i zugehörige Auftrittswahrscheinlichkeit
- l_i Wortlänge des i-ten Zeichens bzw. Wortes im Zielcode

- gewichtete Summe über alle n codierten Zeichen

Shannonsches Codierungstheorem

- Für jede Codierung einer Nachrichtenquelle ist

  $$H \leq L$$

- H (Entropie) ist Untergrenze für eine optimale Codierung
  - Fokus: Wortlängenreduktion
- Wenn alle Wahrscheinlichkeiten gleich sind, gilt

  $$H = L$$

- Hinweis:
  - Dies gilt für verlustfreie Codierung
  - bei verlustbehafteter Codierung ist die Abbildung von Quell- auf Zielnachrichtenraum aber auch nicht mehr umkehrbar eindeutig

Code-Redundanz R

- Differenz aus mittlerer Wortlänge L und Entropie H

$$R_C = L - H \qquad \text{(Einheit: Bit/Zeichen)}$$

- Gibt an wie groß der Anteil einer Nachricht ist, der im statistischen Sinne keine Information trägt
- Wünschenswert: Codes mit geringer Redundanz
  - geringerer Speicherbedarf und schnellere Nachrichtenübertragung
- Redundanz kann jedoch zur Störsicherheit beitragen
  - Rekonstruktion/Sicherheit bei Datenübertragung/Speicherung

Quellen-Redundanz R_Q

- Differenz aus maximal möglicher Entropie der Quelle H_0 und tatsächlicher Entropie H

$$R_Q = H_0 - H \quad \text{(Einheit: Bit/Zeichen)}$$

- maximale Entropie H_0
  - erhält man, wenn alle Zeichen des Alphabets A gleich wahrscheinlich sind. Mit |A| = n:

$$H_0 = \sum_{i=1}^{n} p(x_i) \cdot \mathrm{ld}\frac{1}{p(x_i)} = \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{n} \cdot \mathrm{ld}\, n = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} \mathrm{ld}\, n = \frac{1}{n} n \,\mathrm{ld}\, n = \mathrm{ld}\, n$$

- unabhängig vom tatsächlich verwendeten Code

Unterscheidung Codierung fest/variabel

- Codierung mit fester Wortlänge (Block-Codes)
  - alle codierten Zeichen weisen eine konstante Wortlänge auf
- Codierung mit variabler Wortlänge
  - Häufig auftretende Zeichen erhalten kurzen Code
  - Selten auftretende Zeichen erhalten langen Code
- Erster technischer Code mit variabler Länge
  - Morse-Code
    (keine Binärkodierung, da drei Zeichen: Punkt, Strich und Pause)

ASCII-Code

- ASCII = American Standard Code for Information Interchange
- ist eine festgelegte Abbildungsvorschrift (Norm) zur binären Codierung von Zeichen
  - umfasst Klein-/Großbuchstaben des lateinischen Alphabets
  - (arabische) Ziffern
  - und viele Sonderzeichen
- Codierung erfolgt in einem Byte
  - ⇒ 256 verschiedene Zeichen darstellbar

ASCII-Code

- Erstes Bit wird vom Standard-ASCII-Code nicht genutzt
  - ⇒ 128 Zeichen darstellbar
- Unterschiedliche, speziell normierte, ASCII-Code-Erweiterungen
  - nutzen das erste Bit, um weitere 128 Zeichen darstellen zu können

Beispiele für Codes – Ausschnitt ASCII-Code

Dezimal	Oktal	Hexa	Binär	Zeichen
032	040	20	00100000	(leer)
033	041	21	00100001	!
034	042	22	00100010	"
035	043	23	00100011	#
036	044	24	00100100	$
037	045	25	00100101	%
038	046	26	00100110	&
039	047	27	00100111	'
040	050	28	00101000	(
041	051	29	00101001	)
042	052	2A	00101010	*
043	053	2B	00101011	+
044	054	2C	00101100	,
045	055	2D	00101101	-
046	056	2E	00101110	.
047	057	2F	00101111	/
048	060	30	00110000	0
049	061	31	00110001	1
050	062	32	00110010	2
051	063	33	00110011	3
052	064	34	00110100	4
053	065	35	00110101	5
054	066	36	00110110	6
055	067	37	00110111	7
056	070	38	00111000	8
057	071	39	00111001	9
058	072	3A	00111010	:
059	073	3B	00111011	;
060	074	3C	00111100	<
061	075	3D	00111101	=
062	076	3E	00111110	>
063	077	3F	00111111	?

Dezimal	Oktal	Hexa	Binär	Zeichen
064	100	40	01000000	@
065	101	41	01000001	A
066	102	42	01000010	B
067	103	43	01000011	C
068	104	44	01000100	D
069	105	45	01000101	E
070	106	46	01000110	F
071	107	47	01000111	G
072	110	48	01001000	H
073	111	49	01001001	I
074	112	4A	01001010	J
075	113	4B	01001011	K
076	114	4C	01001100	L
077	115	4D	01001101	M
078	116	4E	01001110	N
079	117	4F	01001111	O
080	120	50	01010000	P
081	121	51	01010001	Q
082	122	52	01010010	R
083	123	53	01010011	S
084	124	54	01010100	T
085	125	55	01010101	U
086	126	56	01010110	V
087	127	57	01010111	W
088	130	58	01011000	X
089	131	59	01011001	Y
090	132	5A	01011010	Z
091	133	5B	01011011	[
092	134	5C	01011100	\
093	135	5D	01011101	]
094	136	5E	01011110	^
095	137	5F	01011111	_

Dezimal	Oktal	Hexa	Binär	Zeichen
096	140	60	01100000	`
097	141	61	01100001	a
098	142	62	01100010	b
099	143	63	01100011	c
100	144	64	01100100	d
101	145	65	01100101	e
102	146	66	01100110	f
103	147	67	01100111	g
104	150	68	01101000	h
105	151	69	01101001	i
106	152	6A	01101010	j
107	153	6B	01101011	k
108	154	6C	01101100	l
109	155	6D	01101101	m
110	156	6E	01101110	n
111	157	6F	01101111	o
112	160	70	01110000	p
113	161	71	01110001	q
114	162	72	01110010	r
115	163	73	01110011	s
116	164	74	01110100	t
117	165	75	01110101	u
118	166	76	01110110	v
119	167	77	01110111	w
120	170	78	01111000	x
121	171	79	01111001	y
122	172	7A	01111010	z
123	173	7B	01111011	{
124	174	7C	01111100	|
125	175	7D	01111101	}
126	176	7E	01111110	~
127	177	7F	01111111	(entf.)

Unterscheidung zwischen Ziffern und Zeichen im ASCII-Code

- Ziffern als ASCII-Codes
  - Angabe des Zeichens (Ziffer) in Hochkomma

'0'	→	00110000	(dezimal 48)
'4'	→	00110100	(dezimal 52)
'5'	→	00110101	(dezimal 53)
'8'	→	00111000	(dezimal 56)

- Ziffern als numerischer Wert
  - Angabe einer Ziffer (ohne Hochkomma)

0	→	00000000	(dezimal 0)
4	→	00000100	(dezimal 4)
5	→	00000101	(dezimal 5)
8	→	00001000	(dezimal 8)

Beispiele für Codes – Unicode

- ASCII-Code mit seinen 256 Zeichen ist sehr begrenzt
- Unicode
  - Code, in dem die Zeichen oder Elemente praktisch aller bekannten Schriftkulturen und Zeichensysteme festgehalten werden können
  - Zeichen werden nach Klassen katalogisiert und erhalten einen Zeichenwert
- Einen eigenen Unicode erhalten auch
  - Steuerzeichen (Silbentrennung, Leerzeichen oder Tabulatorzeichen)
  - oder Zeichen mathematischer Formeln
- Zusätzlich ist zu jedem Zeichen bzw. Element eine Menge von Eigenschaften definiert
  - z.B. Schreibrichtung

Beispiele für Codes – Unicode

- 1991: Gründung des Unicode-Konsortium
  - Ermittelt die aufzunehmenden Zeichen
  - Vergebenen Zeichenwerte haben verbindlichen Charakter
- Zeichenwerte der von Unicode erfassten Zeichen wurden bis vor kurzem noch ausschließlich durch
  - eine zwei Byte lange Zahl ausgedrückt
  - bis zu 65536 verschiedene Zeichen darstellbar
  - BMP (Basic Multilingual Plane) = 2-Byte-System
- Unicode-Version 3.0 (1999)
  - bereits 49194 Zeichen enthalten

Beispiele für Codes – Unicode

- Unicode-Version 3.1 (2001)
  - 94140 Zeichen enthalten
- 4-Byte-System wird verwendet
  - Codes von Unicode-Zeichen werden hexadezimal mit vorangestelltem `U+` dargestellt
- Neue Unicode-Version
  - Neuauflage des Buchs „The Unicode Standard“
  - Darstellung aller Zeichenklassen, Zeichen, Zeichenwerte, usw.
  - www.unicode.org

BCD-Code

- Weitere Art der binären Kodierung von Zahlen bzw. Ziffern sind BCD-Werte (Binary Coded Decimals)
- Für jede Dezimalziffer werden vier oder manchmal auch acht Bits verwendet
- Jeweiligen Ziffern werden nacheinander durch ihren Dualwert angegeben

Dezimalzahl	Dualzahl	Duale BCD Darstellung
294	100100110	0010.1001.0100 2 9 4
16289	11111110100001	0001.0110.0010.1000.1001 1 6 2 8 9

Beispiele für Codes – BCD

- Bitmuster 1010, 1011, …, 1111 werden im BCD-Code nicht verwendet, da nur 10 Ziffern existieren
- Oft anderweitige Nutzung
  - z.B. 1010 für das Vorzeichen +
  - und 1011 für das Vorzeichen –
- Ineffektive (Speicherplatz verschwendende) Art der Speicherung von Dezimalzahlen
- Spezielle Anwendungsbereiche
  - Ansteuerung von LCD-Anzeigen
  - Speicherung von Dezimalzahlen (Telefonnummern, o.ä.)
  - exakte Darstellung von Brüchen möglich (z.B. 0.1_{10})

Beispiele für Codes – Gray

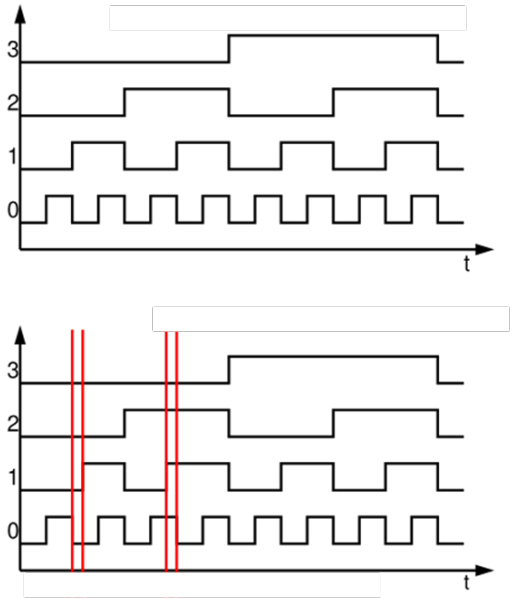
- Gray-Codes
  - sind Ziffern-Codes,
  - die nach folgendem Prinzip erzeugt werden:
    - Benachbarte Zahlen werden so kodiert,
    - dass sie sich in möglichst wenigen Bits unterscheiden (Idealfall: nur 1 Bit)
- Folge
  - 1-Bit-Fehler führen zwar zu fehlerhaften Code-Wörtern
  - Aber:
    - Bei technischer Interpretation werden keine schwerwiegenden Fehler verursacht
    - (da man eine benachbarte Zahl erhält)

Gray-Code

- Code, der zur Kodierung von Binärzahlen verwendet wird
- Zwei aufeinanderfolgende Codewörter unterscheiden sich immer nur um ein Bit

Dezimal	Gray (Binär)	Dezimal	Gray (Binär)	Dezimal	Gray (Binär)
1	0001	6	0101	11	1110
2	0011	7	0100	12	1010
3	0010	8	1100	13	1011
4	0110	9	1101	14	1001
5	0111	10	1111	15	1000

Gray-Code



- Anwendungsbereich
  - Binäre Ausgabe von Werten von A/D-Wandlern (A/D = Analog/Digital) zur Vermeidung unsinniger Zwischenwerte beim Auslesen
  - → Verwendung zur Übertragung digitaler Signale über analoge Kanäle
- Sollen Werte in Gray-Zahlen arithmetisch weiterverarbeitet werden,
  - müssen diese zuerst in Dualzahlen umgewandelt werden

Beispiele für Codes – Gray

- andere Zielsetzung:
  - nutze nicht alle möglichen Codewörter
  - nicht genutzte Codes: Fehlerwörter

	00	01	11	10
00	0 0000	1 0001	2 0011	3 0010
01				4 0110
11	8 1100	7 1101	6 1111	5 1110
10	9 1000			

- Beispiel:
  - 10 Codewörter, 6 Fehlerwörter
  - 1-Bit-Fehler
    - erzeugt mit hoher Wahrscheinlichkeit Codewort eines benachbarten Werts oder ein Fehlerwort
    - ergibt nur mit geringer Wahrscheinlichkeit Codewort eines wesentlich verschiedenen Werts
  - Fehlerbehandlung (bei Entstehung eines Fehlerworts)
    - Günstigste Strategie:
      Korrektur auf das nächstliegende Nutzwort