

# Elektrotechnisches Versuchspraktikum

Für Bachelor-Studierende der Studiengänge Elektrotechnik (ET, 3. Semester), Elektrotechnik my Track (ET my Track, 5. Semester), Allgemeine Ingenieurwissenschaften (AIW 5. Semester), Engineering Science (ES 5. Semester) und Technomathematik (TM 5. Semester)

Versuch Nr.: 1

Digitale Schaltungen

Institut für Autonome Cyber-Physische Systeme, E-24  
Ort: Harburger Schloßstrasse 28 (Channel 4), 1. Etage,  
Raum 1.021

Allgemeine Informationen unter:

<https://www.tuhh.de/mtec/teaching/e-praktikum>

Stand der Versuchsbeschreibung: 11.10.2022

## Das Wichtigste in Kürze

### Worum geht es?

Dieser Versuch soll ein Grundverständnis digitaler Signale im Vergleich zu analogen Signalen liefern und den Entwurf kombinatorischer Logik erklären.

### Was wird gemacht?

Als Anwendungsbeispiel dient zunächst die Ausbreitung von *digitalen Signalen auf Leitungen* mit Effekten der Laufzeit und der Reflexionen bei Fehlanpassung. Im zweiten Teil des Versuchs werden Schaltungen zur Wandlung analoger Signale in digitale Signale (*A/D-Wandlung*) und umgekehrt (*D/A-Wandlung*) erarbeitet. Hierzu wird ein synchroner 4-Bit-Zähler benötigt und daher zunächst in disjunktiver Normalform formuliert, mit zwei alternativen Methoden minimiert und dann mit Gattern realisiert.

### Welche Apparaturen und Instrumente werden verwendet?

Experimentier-Apparatur mit den Baugruppen rückgekoppelter Analog-Digital-Umsetzer, Funktionsgenerator, Digitaloszilloskop

### Was lernt man dabei? Man lernt,

- dass Signale sogar invertiert werden können, wenn die Leitung nicht korrekt abgeschlossen wird
- welche Effekte auftreten, wenn die Abtastfrequenz zu klein ist
- dass die wichtigste Komponente in einem rückgekoppelten Analog-Digital-Umsetzer ein Digital-Analog-Umsetzer ist
- was Schieberegister und D-Flipflops sind
- die Minimierungsverfahren von Karnaugh-Veitch und Quine-McCluskey
- Oszilloskop und Funktionsgenerator gezielt zu nutzen
- dass Geräte für die Effektivwertmessung je nach Signalform unterschiedliche Resultate liefern können

### Warum ist das wichtig?

Praktisch alle Sensoren für physikalische Größen liefern analoge Signale, die in digitale Signale umgewandelt werden müssen. Das soll schnell, genau und preiswert funktionieren. Um eine preiswerte Schaltung zu erhalten muss man bei gleicher Funktion die Zahl der Bauelemente reduzieren und so etwas ist bei Digitalisierungen durch Minimierungsverfahren für kombinatorische Logik üblich.

### Was wird von den Studierenden erwartet?

Es wird erwartet, dass die Versuchsunterlagen einschließlich der dort genannten Links vollständig durchgelesen und weitestgehend verstanden wurden, und dass die Kontrollfragen und Aufgaben in Teil C sowie die Tabellen in Teil F schriftlich bearbeitet wurden, bevor der Versuch stattfindet.

# Inhaltsverzeichnis

<b>A Zielsetzung</b>	<b>4</b>
<b>B Theorie</b>	<b>4</b>
B.1 Der Digital/Analog-Wandler . . . . .	4
B.1.1 Parallele D/A-Wandlung mit R2R-Kettenleiter . . . . .	4
B.1.2 Kenngrößen und Fehler . . . . .	6
B.2 Der Analog/Digital-Wandler . . . . .	7
B.2.1 Grundprinzipien . . . . .	7
B.2.2 Der rückgekoppelte Wandler . . . . .	7
B.2.3 Rückgekoppelter A/D-Wandler mit Zählstrategie . . . . .	8
B.2.4 Rückgekoppelter Wandler mit sukzessiver Approximation . . . . .	8
B.2.5 Kenngrößen und Fehler . . . . .	9
B.3 Entwurf kombinatorischer Logik . . . . .	9
<b>C Versuchsvorbereitung</b>	<b>11</b>
C.1 Funktionsgenerator und Oszilloskop . . . . .	11
C.2 A/D- und D/A-Wandlung . . . . .	12
C.3 Entwurf kombinatorischer Logik . . . . .	14
C.3.1 Minimierung nach Karnaugh-Veitch mit der Minterm-Methode . . . . .	14
C.3.2 Minimierung nach Quine und McCluskey . . . . .	16
<b>D Versuchsdurchführung</b>	<b>19</b>
D.1 Funktionsgenerator-Signale und Oszilloskop . . . . .	19
D.1.1 Analyse eines Sinus-Signals . . . . .	20
D.1.2 Analyse eines Rechteck-Signals . . . . .	21
D.1.3 Zweikanalbetrieb des Oszilloskops . . . . .	21
D.2 Signalübertragung zwischen digitalen Systemen . . . . .	22
D.3 D/A-Wandler . . . . .	23
D.4 A/D-Wandler . . . . .	26
D.5 Diskreter Aufbau eines Zählers . . . . .	29
<b>E Literaturhinweise</b>	<b>29</b>
<b>F Sections/Anhang</b>	<b>30</b>

# A Zielsetzung

Dieser Versuch soll ein Grundverständnis digitaler Signale in Gegenüberstellung zu analogen Signalen liefern. Zu diesem Zweck werden auch ein *Funktionsgenerator* und ein *Digitaloszilloskop* näher betrachtet, da beide für die Untersuchung von analogen und digitalen Schaltungen unverzichtbar sind. Als Anwendungsbeispiel dient zunächst die Ausbreitung von *digitalen Signalen auf Leitungen* mit Effekten der Laufzeit und der Reflexionen bei Fehlanpassung. Im zweiten Teil des Versuchs werden Schaltungen zur Wandlung analoger Signale in digitale Signale (*A/D-Wandlung*) und umgekehrt (*D/A-Wandlung*) erarbeitet. Hierzu wird ein synchroner 4-Bit-Zähler benötigt und daher zunächst in disjunktiver Normalform formuliert, mit Karnaugh-Veitch-Diagrammen minimiert und dann mit Gattern praktisch realisiert.

# B Theorie

## B.1 Der Digital/Analog-Wandler

Eine in der Amplitude kontinuierliche Größe heißt analog. Zur Umformung einer im Digitalrechner erzeugten Dualzahl  $a$  in eine analoge Größe dienen die **Digital/Analog-Wandler** (DAC). Eine Übersicht hierzu gibt z.B. <http://de.wikipedia.org/wiki/DA-Wandler>.

Bei proportionalem Zusammenhang zwischen der Dualzahl  $a$  und einer Ausgangsspannung  $U_a$  gilt die Gleichung:

$$U_a = aQ = (a_{n-1} \dots a_1 a_0)_2 Q \quad (1)$$

Die maximale Ausgangsspannung  $U_a$  der Wandler wird bestimmt durch die Stellenzahl  $n$  der Dualzahl  $a$  und das Quantisierungsintervall  $Q$ . Mit  $N = 2^n$  gelten die Bereiche:

$$0 \leq U_a \leq (N - 1)Q \quad (2)$$

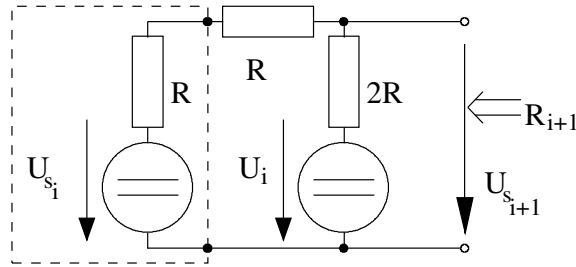
### B.1.1 Parallele D/A-Wandlung mit R2R-Kettenleiter

Zur Herleitung der Prinzipien zur Wandlung einer Dualzahl  $a$  in eine analoge Größe betrachtet man ihre Darstellung als Summe:

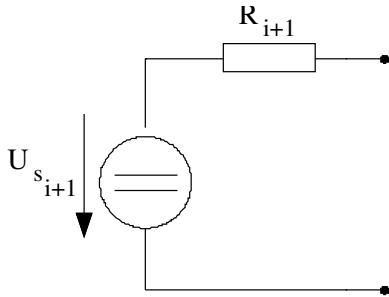
$$a = (a_{n-1} \dots a_1 a_0)_2 = \sum_{i=0}^{n-1} a_i 2^i \quad (3)$$

Bei der Verwendung von elektrischer Spannung als analoge Größe ergibt sich direkt das Prinzip der Spannungssummierung.

Ein verbreitetes Verfahren verwendet R2R-Kettenleiter. Zur Konstruktion (siehe Bild 1) nimmt man eine Spannungsquelle mit dem Innenwiderstand  $R$  und der Leerlaufspannung  $U_{s_i}$  und beschaltet sie mit den beiden Widerständen  $R$  und  $2R$  und der Spannungsquelle  $U_i$ .



**Abbildung 1:** Rekursive Konstruktion einer Kettenschaltung zur D/A-Wandlung mit Hilfe der Spannungssummierung



$$U_{s_{i+1}} = \frac{R}{2R}(U_{s_i} + U_i) = \frac{1}{2}(U_{s_i} + U_i) \quad (4)$$

$$R_{i+1} = R \quad (5)$$

**Abbildung 2:** Ersatzspannungsquelle für die Kettenschaltung von Abb. 1

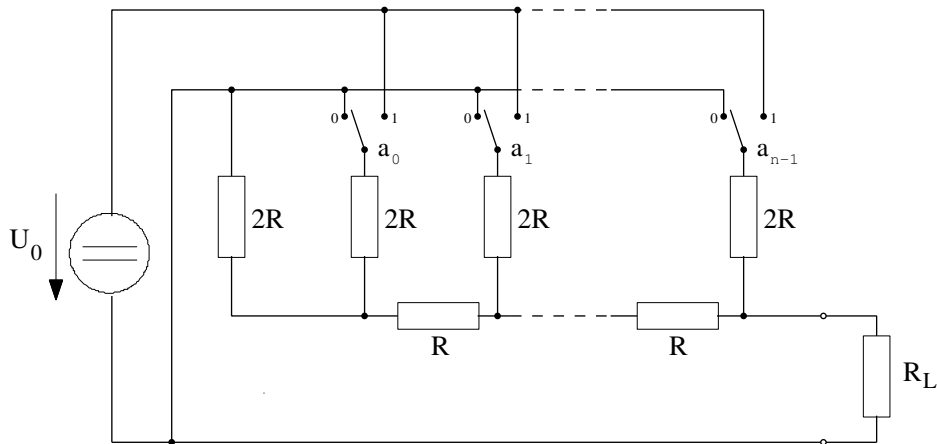
Für die Gesamtschaltung lässt sich die Ersatzspannungsquelle berechnen (siehe Bild 2). Ihre Leerlaufspannung ist genau die Summe der beiden ursprünglichen Spannungsquellen, gewichtet mit dem Faktor  $1/2$ ; ihr Innenwiderstand ist gleich geblieben. An diese Spannungsquelle kann man die gleiche äußere Beschaltung nach Bild 1 anbringen. Führt man dies rekursiv für  $i$  von 1 bis  $n - 1$  durch, so ergibt sich die in Gleichung 6 dargestellte Leerlaufspannung  $U_{s_n}$  für die Ersatzspannungsquelle der Iteration  $n - 1$ :

$$\begin{aligned} U_{s_n} &= \frac{1}{2}(U_{s_{n-1}} + U_{n-1}) \\ &= \frac{1}{2}(\dots \frac{1}{2}(\frac{1}{2}(U_{s_0} + U_0) + U_1) + \dots + U_{n-1}) \\ &= \frac{1}{2^n}(\sum_{i=0}^{n-1} U_i 2^i + U_{s_0}) \end{aligned} \quad (6)$$

Wählt man  $U_{s_0} = 0$  V und die Spannungen  $U_i = a_i U_0$ , so vereinfacht sich Gleichung 6 zu:

$$\begin{aligned} U_d(a) &= U_{s_n}(U_i = a_i U_0, U_{s_0} = 0) \\ &= \frac{U_0}{2^n} \sum_{i=0}^{n-1} a_i 2^i \end{aligned} \quad (7)$$

Die Schaltung des zugehörigen Wandlers findet man in Bild 3. Die Erzeugung der Spannungen  $U_i = a_i U_0$  erfolgt jeweils mit einem durch  $a_i$  gesteuerten Umschalter. Ein Lastwiderstand  $R_L$  am Ausgang beeinflusst nicht die Linearität des Wandlers. Wegen seines konstanten, von der Dualzahl  $a$  unabhängigen Innenwiderstandes  $R$  bleibt die Ausgangsspannung  $U_d$  immer proportional zu  $a$ .

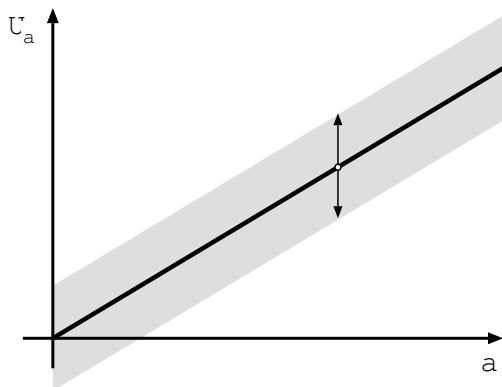


**Abbildung 3:** Schaltung eines nach dem Prinzip der Spannungssummierung als Kettenleiter aufgebauten D/A-Wandlers

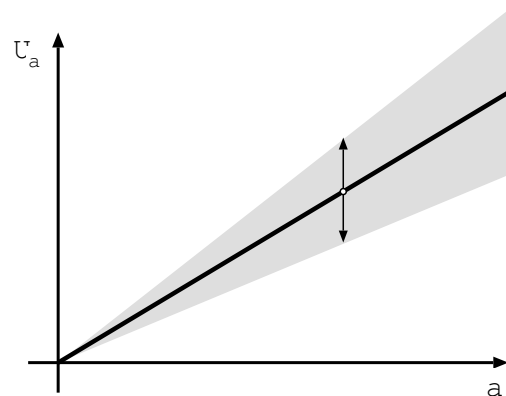
### B.1.2 Kenngrößen und Fehler

**Offset-Fehler** Wenn die Ausgangsspannung eines D/A-Wandlers bei  $a = 0$  einen Wert  $U_a \neq 0$  liefert, bezeichnet man diesen Fehler als ‘Offset-Fehler’, siehe Abb. 4. Er ist konstant über dem gesamten Wertebereich und kann abgeglichen werden. Er wird oft hervorgerufen durch Restströme, die durch die geöffneten elektronischen Schalter des Umsetzers fließen.

**Verstärkungsfehler** Ein Verstärkungsfehler liegt vor, wenn die Dualzahl zwar proportional auf den Analogwert abgebildet wird, die Neigung der Kennlinie jedoch zu groß oder zu klein ist, siehe Abb. 5. Der Fehler nimmt mit steigendem  $a$  zu. Er kann abgeglichen werden. Hervorgerufen wird er z.B. durch eine falsch eingestellte Referenzspannungsquelle.



**Abbildung 4:** Offset-Fehler bei Digital-/Analog-Wandlern



**Abbildung 5:** Verstärkungsfehler bei Digital-/Analog-Wandlern

## B.2 Der Analog/Digital-Wandler

### B.2.1 Grundprinzipien

Will man eine analoge Größe (Spannung, Strom, Druck, Temperatur etc.) in einer digitalen Schaltung verarbeiten, so muß man sie in ein digitales Signal mit meist mehreren Bits, eine Dualzahl, umwandeln. Diese Aufgabe erfüllt ein **Analog/Digital-Wandler** (Analog to Digital Converter, ADC bzw. Analog-Digital-Umsetzer ADU). Meist kann man die unterschiedlichen analogen physikalischen Größen in eine elektrische Größe umformen, daher arbeiten viele Umsetzer als Strom- oder Spannungswandler. In der Regel soll die vom Wandler erzeugte Dualzahl  $a$  proportional zu einer Eingangsspannung  $U_e$  sein:<sup>1</sup>

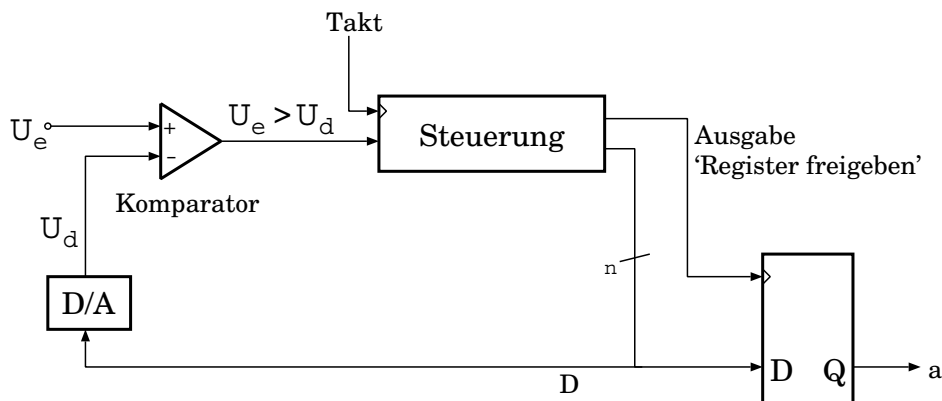
$$a = (a_{n-1} \dots a_1 a_0)_2 = \lfloor \frac{U_e}{Q} + 0.5 \rfloor \quad (8)$$

Dabei ist  $Q$  die Spannungseinheit, die man dem niedrigsten Bit von  $a$  ( $a_0$ ) zuordnet; sie erfüllt die obige Gleichung für  $a = 1$ .  $Q$  bezeichnet man als *Quantisierungsintervall*.

Allen Wandlern gemeinsam ist eine Übertragungskennlinie mit kontinuierlichem Abszissen- und diskretem Ordinatenvorrat. In Umkehrung zu dem im letzten Kapitel behandelten D/A-Wandler werden nun Intervalle der Größe  $Q$  auf eine zugehörige Dualzahl  $a$  abgebildet. Bei einer  $n$ -stelligen Dualzahl muß man  $N = 2^n$  Intervalle unterscheiden. Man ordnet diese Intervalle symmetrisch um die Werte  $0, Q, 2Q, \dots, iQ, \dots, (N - 1)Q$  der Abszisse an. Damit stimmen im Mittel die Werte der Eingangsspannung mit der gewandelten Dualzahl überein.

Eine detailliertere Diskussion zu den Verfahren der A/D-Wandler findet sich z.B. in <http://de.wikipedia.org/wiki/Analog-Digital-Umsetzer>. Im vorliegenden Versuch werden wir uns mit zwei rückgekoppelten Wandlungsverfahren beschäftigen.

### B.2.2 Der rückgekoppelte Wandler



**Abbildung 6:** Struktur der rückgekoppelten A/D-Wandler

<sup>1</sup>Bei Sonderanwendungen, etwa in der Audio-Signalverarbeitung, kommen auch Wandler mit z.B. logarithmischer Kennlinie zum Einsatz.

Prinzip aller rückgekoppelten Wandler ist der Vergleich der analogen Eingangsspannung  $U_e$  mit einer in ein analoges Referenzsignal  $U_d$  gewandelten Dualzahl  $D$  (siehe Bild 6). Diese Zahl  $D$  bewirkt eine Spannung  $U_d$ , welche durch die Summe aus der direkt gewandelten Spannung  $U_{DAC}$  und einer konstanten Verschiebung von  $-Q/2$  gebildet wird. Diese Spannung  $U_d$  liegt genau auf einer Grenze zwischen zwei Intervallen, mit denen man die Eingangsspannung  $U_e$  unterteilt. Es werden nun zwei Verfahren diskutiert.

- Wandler mit Zählstrategie (Zählverfahren). Diese Verfahren sind mit geringem Aufwand zu realisieren.
- Wandler mit der Strategie der sukzessiven Approximation (Wägeverfahren). Diese Verfahren besitzen kürzere Wandlungsdauer, benötigen aber etwas höheren Steuerungsaufwand.

Der Schaltungsaufwand aller rückgekoppelten Wandler wird hauptsächlich durch den D/A-Wandler im Rückkopplungszweig bestimmt, mit dem die Testzahl  $D$  in eine analoge Spannung umgesetzt wird.

### B.2.3 Rückgekoppelter A/D-Wandler mit Zählstrategie

Wandler mit Zählstrategie besitzen als Bestandteil der Steuerung einen Zähler, dessen Zählerstand  $D$  eine Hypothese für Eingangsspannung darstellt. Zu Beginn der Wandlung setzt man den (Rückwärts-)Zähler auf seinen maximalen Zählerstand und erniedrigt den Zählerstand  $D$  solange um '1', bis die analoge Spannung  $U_d$  kleiner ist als analoge Eingangsspannung  $U_e$ , vgl. Abbildung 6. Der letzte Zählerstand  $D$  wird als gewandelte Dualzahl  $a$  ausgegeben, denn die Eingangsspannung  $U_e$  liegt dann in dem Intervall  $[U_{DAC} - Q/2, U_{DAC} + Q/2)$  und es gilt  $U_{DAC} = D \cdot Q$ .

Im vorliegenden Versuch wird ein 4-Bit-Wandler untersucht, der Zähler besitzt also 4 Bits und die Steuerung startet den Zähler mit seiner größten darstellbaren Dualzahl  $D = 1111$ . Der Zählvorgang wird solange durchgeführt, bis  $U_e > U_d$  ist. Direkt nach Ende des Zählvorgangs wird der Zählerstand in das Ausgabe-Register geladen und eine neue Wandlung kann gestartet werden.

Kennzeichen dieses Wandlers ist seine von der Eingangsspannung  $U_e$  abhängige Wandlungszeit. Im günstigsten Fall ( $U_e = Q(N-1)$ ) ist die Wandlung nach dem Setzen des Zählers schon beendet, im ungünstigsten Fall ( $U_e = 0$ ) braucht sie  $N$  Schritte. Die mittlere Wandlungszeit beträgt  $N/2$  Taktzyklen:

$$\bar{t}_{Wandel} \sim N \quad (9)$$

### B.2.4 Rückgekoppelter Wandler mit sukzessiver Approximation

Bei der sukzessiven Approximation halbiert die Steuerung in jedem Schritt das Intervall, auf das die gesuchte Spannung bereits eingegrenzt wurde. Im ersten Schritt wird das Bit mit der höchsten Wertigkeit getestet (Most Significant Bit, MSB) durch Wahl der Binärzahl



$D = 1000$ . Diese entspricht der halben Maximalamplitude. Ist nun  $U_e \geq U_d$ , so lassen wir das getestete Bit gesetzt  $1xxx$ , das verbleibende Intervall ist die obere Hälfte der Amplituden und der nächste zu prüfende Zählerstand ist 1100. Bei  $U_e < U_d$  löschen wir dagegen das Bit zu  $0xxx$  und der nächste zu prüfende Zählerstand ist 0100. In jedem Schritt wird also ein Bit ermittelt und der Algorithmus terminiert bei einem  $n$ -Bit-Wandler in  $n$  Schritten.

Vorteile diese Wandlers sind seine kurze Wandlungszeit:

$$t_{Wandel} \sim n = ld N \quad (10)$$

Seine Strategie ist geeignet, um auch Wandler mit großen Wortlängen (z.B.  $n = 12, 16, 20$ ) aufzubauen.

### B.2.5 Kenngrößen und Fehler

**Offsetfehler** Als Offsetfehler beschreibt man die Verschiebung der Quantisierungskennlinie parallel zur Achse der Eingangsspannung. Er ist ein konstanter Fehler und wird hervorgerufen durch Drift der Eingangsspannung. Seine Ursache ist schaltungsbedingt (z.B. nicht genügend kompensierte Operationsverstärker in der Wandlerschaltung).

**Verstärkungsfehler** Ein Verstärkungsfehler liegt dann vor, wenn die Neigung der Kennlinie zwischen der Eingangsspannung und der gewandelten Dualzahl  $a$  sich ändert. Der relative, auf die augenblicklich anliegende Eingangsspannung bezogene Verstärkungsfehler ist konstant. Seine Ursache ist in der Regel schaltungsbedingt.

## B.3 Entwurf kombinatorischer Logik

Im vorliegenden Versuch wird der kombinatorische Teil eines 4-Bit-Rückwärtszählers mit UND- bzw. ODER-Gattern realisiert. Die Register sowie die Logikschaltung für Set und Enable bleiben dabei unberücksichtigt. Es wird die Lösung mit minimalem Hardware-Aufwand ermittelt.

Die gesuchte Boolesche Funktion bzw. kombinatorische Logik besitzt vier Eingangssignale für die vier Bits  $D_3, D_2, D_1, D_0$  des aktuellen Zählerstands und vier Ausgangssignale für die vier Bits  $E_3, E_2, E_1, E_0$  des jeweils folgenden Zählerstands. Mit vier Bits lassen sich 16 Zustände darstellen. Es sind also insgesamt 16 binäre Eingangsworte auf die zugehörigen 16 Ausgangsworte abzubilden. Hierzu haben sich zwei Verfahren etabliert, das *Karnaugh-Veitch-Diagramm* ist bis zu fünf Eingangsvariablen effizienter und das Verfahren nach *Quine und McCluskey* ist vorteilhaft bei größerer Zahl von Variablen. Beide sollen hier angewendet und ihre Resultate verglichen werden.

**Disjunktion** ODER-Verknüpfung von Termen, geschrieben  $A + B$  oder  $A \vee B$

**Konjunktion** UND-Verknüpfung von Termen, geschrieben  $A * B$  oder  $A \wedge B$

**Minterm oder Vollkonjunktion** Konjunktionsterm, in dem alle  $n$  Variablen der betrachteten  $n$ -stelligen booleschen Funktion oder ihre negierten Werte vorkommen und die Funktion den Wert 1 liefert. Beispiel:  $D_3 * \bar{D}_2 * \bar{D}_1 * D_0$

**Disjunktive Normalform** Disjunktion von Konjunktionstermen. Ein Konjunktionsterm wird ausschließlich durch konjunktive Verknüpfung von negierten oder nichtnegierten Variablen gebildet. Siehe auch [http://de.wikipedia.org/wiki/Disjunktive\\_Normalform](http://de.wikipedia.org/wiki/Disjunktive_Normalform). Eine *kanonische* disjunktive Normalform besteht aus einer Disjunktion von Mintermen.

Verfahren von Karnaugh und Veitch Das Karnaugh-Veitch-Diagramm (Karnaugh-Veitch-Symmetrie-Diagramm, Karnaugh-Tafel, KV-Diagramm, KVS-Diagramm) dient der übersichtlichen Darstellung und Vereinfachung Boolescher Funktionen durch Umwandlung der disjunktiven Normalform in einen minimalen logischen Ausdruck. Hierzu werden Tafeln erzeugt, in denen sich benachbarte Felder jeweils in einer Variable nur um ein Bit unterscheiden, so dass eine Zusammenfassung der Felder gemäß  $A \vee \neg A = 1$  möglich ist. Eine anschauliche Beschreibung findet sich in <http://de.wikipedia.org/wiki/Karnaugh-Veitch-Diagramm>.

Verfahren von Quine und McCluskey Das Verfahren nach Quine und McCluskey ist eine Methode um Boolesche Funktionen in kanonischer disjunktiver Normalform zu minimieren. Dieses Verfahren erstellt durch Zusammenfassen von Termen eine sogenannte Primtermtabelle und reduziert diese Tabelle nachfolgend durch Spaltendominanzprüfung und Zeilendominanzprüfung. Das Verfahren ist z.B. erläutert in [http://de.wikipedia.org/wiki/Verfahren\\_nach\\_Quine\\_und\\_McCluskey](http://de.wikipedia.org/wiki/Verfahren_nach_Quine_und_McCluskey) und lässt sich gut anhand des dort entwickelten Beispiels nachvollziehen.

## C Versuchsvorbereitung

Die folgenden Fragestellungen sind bereits vorab zu bearbeiten. Die Lösungen sind Teil des Versuchskolloquiums.

### C.1 Funktionsgenerator und Oszilloskop

**Effektivwerte** Berechnen Sie per Integration über eine Signalperiode die Effektivwerte (die quadratischen Mittelwerte, siehe <http://de.wikipedia.org/wiki/Effektivwert>) für die folgenden periodischen Funktionen (zwischen den Amplituden  $-u_0$  und  $u_0$ ) :

- Sinusschwingung
- Rechteckschwingung mit variablem Tastverhältnis

**Reflexion bei Fehlanpassung** Ermitteln Sie den Reflexionskoeffizienten an einem Kabelende für die drei Situationen, dass das Kabelende offen ist, kurzgeschlossen wird und mit dem Wellenwiderstand abgeschlossen wird. Siehe z.B. <http://de.wikipedia.org/wiki/Reflexionsfaktor>.

## C.2 A/D- und D/A-Wandlung

**Schieberegister und D-Flipflop** Beschreiben Sie kurz Aufbau und Funktion eines Schieberegisters und eines D-Flipflops. Skizzieren Sie den Aufbau eines D-Flipflops. Als Literaturquelle kann z.B. <http://de.wikipedia.org/wiki/Schieberegister> und <http://de.wikipedia.org/wiki/D-Flipflop#D-Flipflop> dienen.

**Rückgekoppelte A/D-Wandler** Beschreiben Sie kurz, welches gemeinsame Funktionsprinzip allen rückgekoppelten A/D-Wandlern zugrunde liegt. Nutzen Sie hierzu Abb. 6.

**Kalibrieren des D/A-Wandlers.** Beschreiben Sie kurz das Vorgehen zum Kalibrieren des im Versuch benutzten D/A-Wandlers hinsichtlich Offset und Verstärkung mit Quantisierungseinheit  $Q = 0.25V$ . Lesen Sie dazu das folgende Kapitel zur Versuchsdurchführung. Arbeitsschritte? Welche Aspekte sind zu beachten?

**Abtasten einer sinusförmigen Eingangsspannung.** Bestimmen Sie die Zahlenfolge, die entsteht, wenn Sie ein cosinusförmiges Signal  $x_e = \cos(\omega_0 t)$  beginnend bei  $\omega_0 t = 0$  jeweils  $i$ -mal pro Periode abtasten.

- Ermitteln Sie jeweils 10 Werte der Zahlenfolge für die Werte von  $i$  in folgender Tabelle.
- In welchen Fällen können Sie aus den 10 Abtastpunkten die ursprüngliche Cosinus-Funktion rekonstruieren? Begründen Sie!

Punkt	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$i = 5$										
$i = 2$										
$i = 1$										
$i = 0,5$										
$i = 0,9$										

### C.3 Entwurf kombinatorischer Logik

Entwerfen Sie einen 4-bit-Rückwärtszähler und minimieren Sie die zugehörige Boolesche Funktion mit den Verfahren nach Karnaugh-Veitch sowie Quine- McCluskey. Das Eingangssignal der Booleschen Funktion besteht aus den Werten  $(D_3, D_2, D_1, D_0) = 1111, 1110, 1101, \dots, 0000$  und soll auf die jeweils nächstkleinere Binärzahl  $(E_3, E_2, E_1, E_0) = (D_3, D_2, D_1, D_0) - 1$  abgebildet werden. Füllen Sie dazu die folgende Tabelle vollständig aus.

	Eingabe				Ausgabe			
	$D_3$	$D_2$	$D_1$	$D_0$	$E_3$	$E_2$	$E_1$	$E_0$
15	1	1	1	1	1	1	1	0
14	1	1	1	0	1	1	0	1
13								
12								
11								
10								
9								
8								
7								
6								
5								
4								
3								
2								
1								
0	0	0	0	0	1	1	1	1

#### C.3.1 Minimierung nach Karnaugh-Veitch mit der Minterm-Methode

- Füllen Sie die folgenden vier Karnaugh Tafeln für die vier Ausgangs-Bits mit den Mintermen, also mit den Einsen. Tip: Tragen Sie in die Felder zunächst als kleine Zahlen in eine Ecke die zugehörigen Zählerstände 15, 14, ..., 0 ein, das erleichtert die Übersicht.

<b>E<sub>3</sub></b>	$D_3$	$D_3$	$\bar{D}_3$	$\bar{D}_3$	
$D_2$					$D_0$
$D_2$					$\bar{D}_0$
$\bar{D}_2$					$\bar{D}_0$
$\bar{D}_2$					$D_0$
	$D_1$	$\bar{D}_1$	$\bar{D}_1$	$D_1$	
<b>E<sub>1</sub></b>	$D_3$	$D_3$	$\bar{D}_3$	$\bar{D}_3$	
$D_2$					$D_0$
$D_2$					$\bar{D}_0$
$\bar{D}_2$					$\bar{D}_0$
$\bar{D}_2$					$D_0$
	$D_1$	$\bar{D}_1$	$\bar{D}_1$	$D_1$	

<b>E<sub>2</sub></b>	$D_3$	$D_3$	$\bar{D}_3$	$\bar{D}_3$	
$D_2$					$D_0$
$D_2$					$\bar{D}_0$
$\bar{D}_2$					$\bar{D}_0$
$\bar{D}_2$					$D_0$
	$D_1$	$\bar{D}_1$	$\bar{D}_1$	$D_1$	
<b>E<sub>0</sub></b>	$D_3$	$D_3$	$\bar{D}_3$	$\bar{D}_3$	
$D_2$					$D_0$
$D_2$					$\bar{D}_0$
$\bar{D}_2$					$\bar{D}_0$
$\bar{D}_2$					$D_0$
	$D_1$	$\bar{D}_1$	$\bar{D}_1$	$D_1$	

- Markieren Sie nun mit Schleifen die Terme, die zusammengefasst werden können. Tip: Berücksichtigen Sie dabei, dass sich Schleifen auch überlappen dürfen. Dies ist von Vorteil, denn je größer die Schleife, umso kleiner der resultierende Boolesche Term.
- Schreiben Sie nun die minimierten vier Booleschen Funktionen für die Ausgangswerte in disjunktiver Normalform hin.

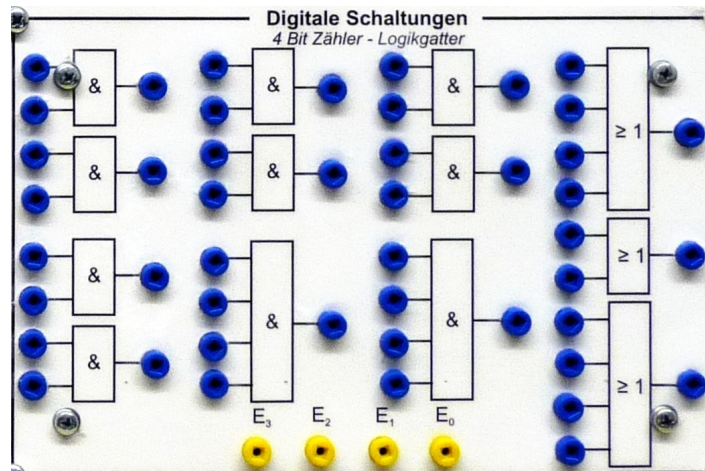
$$E_3 =$$

$$E_2 =$$

$$E_1 =$$

$$E_0 =$$

- Prüfen Sie, ob diese Funktionen mit den verfügbaren Gattern nach Abbildung 7 realisiert werden können. Ihre Booleschen Funktionen werden Sie im Kolloquium erläutern und anschließend im Versuchsaufbau realisieren.



**Abbildung 7:** Logikgatter für den 4 Bit Zähler

### C.3.2 Minimierung nach Quine und McCluskey

Entwerfen Sie nun die Booleschen Terme nach dem Verfahren von Quine und McCluskey. Halten Sie sich z.B. an das Beispiel in [http://de.wikipedia.org/wiki/Verfahren\\_nach\\_Quine\\_und\\_McCluskey](http://de.wikipedia.org/wiki/Verfahren_nach_Quine_und_McCluskey).

- Was ist eine kanonische disjunktive Normalform?
- Welches Bitmuster gehört zum Minterm  $m_9$ ?
- Was ist ein Primterm?

Beginnen Sie nun mit der Minimierung der Booleschen Funktion für  $E_3$ . Schreiben Sie dazu zunächst die Minterme hin (also alle Terme, deren Boolesche Funktion den Wert  $E_3 = 1$  liefert), geordnet nach der Zahl der Einsen. Vervollständigen Sie hierzu die folgende Tabelle, als Hilfestellung sind einige Werte bereits eingetragen. Fassen Sie dann in den folgenden Tabellen die Terme so weit wie möglich zusammen.

Füllen Sie auch die Quine-McCluskey-Tabellen in Abschnitt F aus.

Überprüfen Sie ihre Ergebnisse: Haben Sie sowohl für Karnaugh-Veitch als auch für Quine-McCluskey die gleichen Funktionen für  $E_0$  bis  $E_3$  erhalten?



Kl.	$m_x$	$D_3$	$D_2$	$D_1$	$D_0$	$P$
0	$m_0$	0	0	0	0	$P_1$
1						
2	$m_9$	1	0	0	1	✓
	$m_{10}$	1	0	1	0	
	$m_{12}$					
3	$m_{11}$	1	0	1	1	✓
	$m_{13}$					
	$m_{14}$					
4	$m_{15}$					

$m_x + m_y$	$D_3$	$D_2$	$D_1$	$D_0$	$P$
$m_9 + m_{11}$	1	0	-	1	

$m_w + m_x + m_y + m_z$	$D_3$	$D_2$	$D_1$	$D_0$	$P$
$m_9 + m_{11} + m_{13} + m_{15}$	1	-	-	1	$P_2$

$m_s + m_t + m_u + m_v + m_w + m_x + m_y + m_z$	$D_3$	$D_2$	$D_1$	$D_0$	$P$

Schreiben Sie alle Primterme aus obigen Zusammenfassungsschritten explizit hin.

$$P_1 =$$

Stellen Sie nun die Primtermtabelle auf und führen Sie abwechselnd Spaltendominanzprüfungen und Zeilendominanzprüfungen durch bis keine weiteren Spalten und Zeilen gestrichen werden können.

	$m_0$													
$P_1$														

Die resultierende Boolesche Funktion lautet

$$E_3 =$$

Wiederholen Sie diesen Ablauf nun für die anderen Bits  $E_2$ ,  $E_1$  und  $E_0$  des Ausgangsworts und verwenden Sie hierzu die Leertabellen im Anhang.

$$E_2 =$$

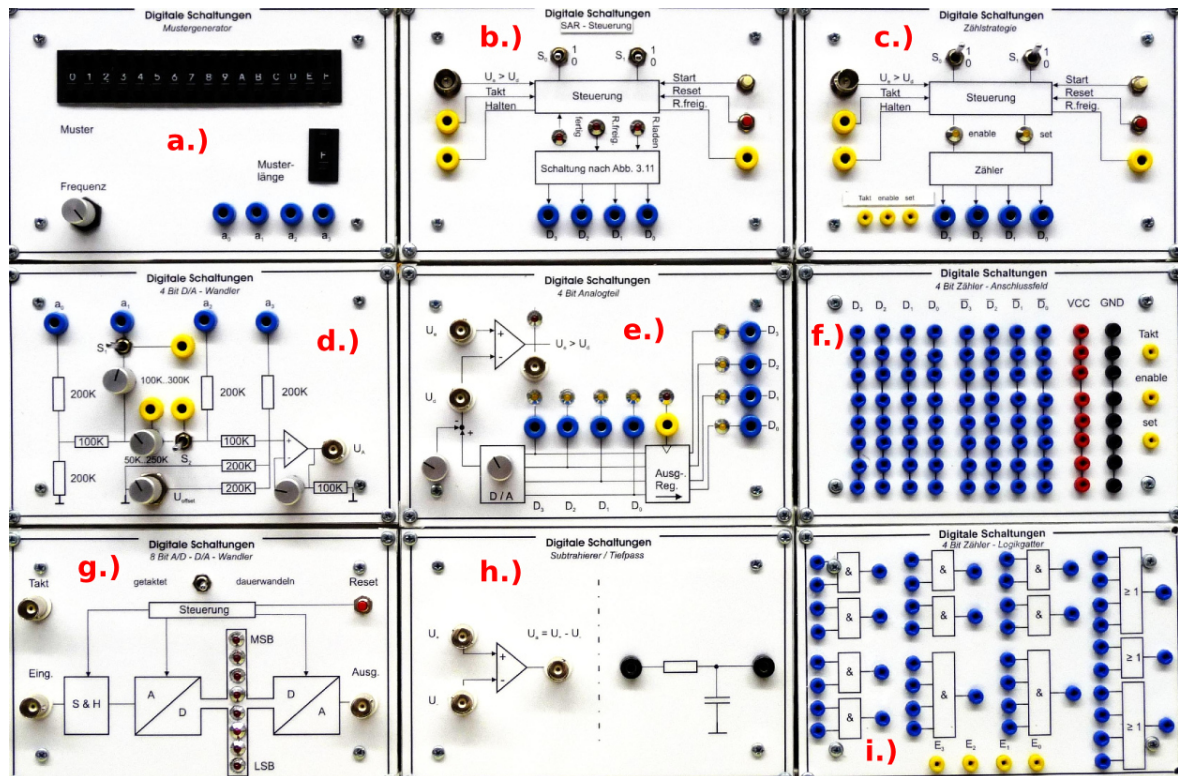
$$E_1 =$$

$$E_0 =$$

Vergleichen Sie die insgesamt vier Booleschen Funktionen mit dem Ergebnis der Karnaugh-Weitch-Diagramme. Lassen sich diese Resultate ineinander überführen oder benötigen beide Lösungen unterschiedliche Gatterzahlen?

## D Versuchsdurchführung

**Anmerkungen:** Bitte bringen Sie einen Taschenrechner mit. Beim Umstecken von Verbindungsleitungen im Versuchsaufbau bitte keine Kurzschlüsse erzeugen. Eine Übersicht des Versuchsaufbaus ist in Abbildung 8 dargestellt.



**Abbildung 8:** Versuchsaufbau: a.) Mustergenerator, b.) SAR-Steuerung, c.) Zählstrategie, d.) 4-Bit-D/A-Wandler, e.) 4-Bit-Analogteil, f.) 4-Bit-Zähler-Anschlussfeld, g.) 8-Bit-A/D-D/A-Wandler mit Abtast-Halteglied, h.) Subtrahierer/Tiefpass, i.) 4-Bit-Zähler-Logikgatter

### D.1 Funktionsgenerator-Signale und Oszilloskop

Unverzichtbare Geräte zur Untersuchung digitaler und analoger Schaltungen sind ein Funktionsgenerator und ein Oszilloskop. Ein Funktionsgenerator dient zur Erzeugung von elektrischen Signalen wie Sinus-, Rechteck- und Dreieckschwingungen. Ein Oszilloskop dient zur grafischen Darstellung elektrischer Signale und zur Messung von deren Eigenschaften. Das für den Versuch vorgesehene Oszilloskop TDS2002B von Tektronix besitzt zwei Eingangskanäle, 60 MHz Bandbreite und eine Abtastfrequenz von 1 Gigasamples/Sekunde.

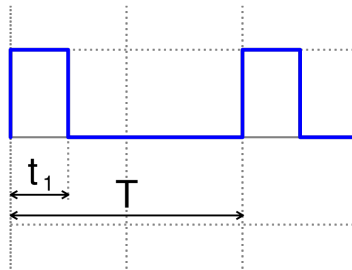
### D.1.1 Analyse eines Sinus-Signals

1. Schalten Sie Funktionsgenerator und Oszilloskop ein.
2. Stellen Sie beim Funktionsgenerator die Werkseinstellungen her, indem Sie zunächst **Shift** und anschließend **2** drücken.
3. Verbinden Sie nun den 50  $\Omega$ -Ausgang des Funktionsgenerators über BNC-Kabel und ein T-Stück mit dem Eingang des ersten Kanals (*CH 1*) des Oszilloskops. An das T-Stück schließen Sie ein weiteres BNC-Kabel an und über ein weiteres T-Stück dann einerseits einen 50  $\Omega$ -Abschlusswiderstand sowie andererseits mittels Adapter *BNC/Bananen* das digitale Multimeter.
4. Wählen Sie die Sinus-Signalform am Funktionsgenerator aus, indem Sie die **Wave**-Taste wiederholt drücken, bis im Display ein Sinus-Kurvenzug erscheint.
5. Stellen Sie die Frequenz auf 1 kHz, indem Sie am Funktionsgenerator zunächst Taste **1** und anschließend Taste **kHz** drücken.
6. Um das Signal im Display des Oszilloskops sichtbar zu machen, drücken Sie dort die Taste **Autoset**, die die Achsen automatisch skaliert, was für viele Signale nützlich ist, um einen ersten qualitativen Eindruck zu bekommen.
7. Da Sie möglichst exakte Werte für die Spitze-Spitze-Spannung  $U_{ss}$ , den Offset  $U_{\text{offset}}$  und die Frequenz  $f$  erhalten wollen, gehen Sie mit der Taste **Measure** ins Messmenü des Oszilloskops. Mit den fünf Optionstasten am Display können Sie fünf verschiedene Größen zeitgleich messen. Da wir am Funktionsgenerator *Amplitude* und *Offset* ändern werden, benötigen wir Messungen für die Typen  $U_{ss}$  und *Mittelwert*. Zusätzlich messen Sie bitte die *Frequenz* und tragen die drei Resultate hier ein.
  
8. Variieren Sie den Offset am Funktionsgenerator, bis Sie am Oszilloskop einen Mittelwert von 1 V erreichen. **Hierzu ziehen Sie den Drehregler *Offset* heraus** und drehen, bis sich der gewünschte Wert am Oszilloskop einstellt. Um das Ergebnis mit dem Multimeter zu bestätigen, stellen wir dieses auf Gleichspannung.
9. Entfernen Sie am Funktionsgenerator nun den Offset. Hierzu drücken Sie den Drehregler ***Offset*** wieder hinein. Um eine Spitze-Spitze-Spannung ( $U_{ss}$ ) von 1 V zu erhalten, drehen Sie den Drehregler ***AMPL*** am Funktionsgenerator, bis sich am Oszilloskop der entsprechende Wert einstellt. Hierzu ziehen Sie den Drehregler ***AMPL*** heraus. Kontrollieren Sie den Wert mit dem Multimeter (Wechselspannung), beachten Sie jedoch, dass das Multimeter den Effektivwert anzeigt. Stellen Sie also im Messmenü des Oszilloskops eine weitere Messung *Effektivwert* ein, berechnen Sie zusätzlich unter Berücksichtigung Ihrer schriftlichen Vorbereitung aus dem angezeigten Effektivwert die

Spitze-Spitze-Spannung und tragen Sie die Resultate von Messung und Berechnung hier ein.

### D.1.2 Analyse eines Rechteck-Signals

Stellen Sie am Funktionsgenerator mit der Taste **Wave** ein Rechtecksignal ein. Verändern Sie das Tastverhältnis  $\frac{t_1}{T}$  (siehe Abb. 9) auf 20%, 50%, 80%, indem Sie am Funktionsgenerator folgende Tasten hintereinander drücken: **Shift + 7 + Zahlwert + Hz/%**. Führen Sie die in der letzten Aufgabe erläuterten Messungen durch und tragen Sie die Resultate von Messung und Berechnung wiederum hier ein.



**Abbildung 9:** Rechteck-Signal: Das Tastverhältnis entspricht dem Quotient von Dauer des High-Pegels  $t_1$  und der Periodendauer  $T$  (Angabe in der Regel in %)

### D.1.3 Zweikanalbetrieb des Oszilloskops

#### Null-Linien der Kanäle

Schließen Sie das Ausgangssignal des Funktionsgenerators (50- $\Omega$ -Ausgang) an beide Eingänge des Oszilloskops an (*CH1*, *CH2*). Vergessen Sie nicht, über ein T-Stück ebenfalls den Abschlusswiderstand anzuschließen. Erzeugen Sie mit dem Funktionsgenerator ein Rechtecksignal mit  $U_{ss} = 1V$  und  $U_{offset} = 0$ . Nachdem Sie die Taste **Autoset** gedrückt haben, sehen Sie das Signal auf beiden Kanälen im Display des Oszilloskops. Die Marke 1-> am linken Bildrand des Displays ist die Nullamplitude des ersten Kanals, die Marke 2-> ist die Nullamplitude des zweiten Kanals.

#### Offset und Amplitude

Erhöhen Sie am Funktionsgenerator die Amplitude (**AMPL**) und verstellen Sie anschließend am Oszilloskop den Drehregler *Volt/Div* des ersten Kanals so, dass maximaler und minimaler Spannungswert wieder ins Display passen. Variieren Sie nun den Offset am Funktionsgenerator und zentrieren Sie den zweiten Kanal im Display des Oszilloskops mit dem Regler **Position**.

#### Triggerung

Bei Signalen, die mit dem Oszilloskop untersucht werden, handelt es sich typisch um zeitlich schnell veränderliche Signale. Um den gesuchten kurzen Zeitausschnitt des Signals darstellen zu können bedarf es einer Triggerung. Das verwendete Oszilloskop

besitzt einen Speicher aus 2500 Punkten und schreibt kontinuierlich Daten in diesen Speicher ohne zunächst diese Daten anzuzeigen. Dem Oszilloskop wird vom Anwender eine (*Triggerbedingung*) vorgegeben. Ist diese Bedingung erfüllt, so wird die Aufnahme nach 1250 weiteren Abtastwerten gestoppt und der Speicherinhalt wird so auf dem Bildschirm angezeigt, dass der Triggerpunkt horizontal in der Bildschirmmitte liegt, links davon der zeitlich vorausgehende *Pre-Trigger*-Datenbereich und rechts der zeitlich folgende *Post-Trigger*-Datenbereich.

Benutzen Sie im Folgenden nur den ersten Kanal des Oszilloskops. Den zweiten Kanal können Sie durch mehrmaliges Drücken auf **CH2 Menu** ausblenden. Erzeugen Sie mit dem Funktionsgenerator nun ein Dreiecksignal mit beliebiger Amplitude und stellen Sie das Signal mittels der Taste **Autoset** im Display des Oszilloskops dar. Variieren Sie mit dem Drehregler **Triggerlevel** den Triggerpunkt.

Grundsätzlich ist es ebenfalls möglich, nach Impulsbreite (Dauer des High-Pegels) zu triggern. Erzeugen Sie hierzu ein beliebiges Rechtecksignal mit 20% Tastverhältnis (**Shift + 7 + 20 + Hz/%**) und merken Sie sich die Impulsbreite, die Sie im Oszilloskop an der Zeitachse ablesen können. Gehen Sie nun ins Triggermenü und ändern den Trigger-Typ mit den entsprechenden Optionstasten auf Impuls. Außerdem muss die Bedingung auf '=' und die Impulsbreite auf den vorher vom Signal abgelesenen Zeitwert angepasst werden.

## D.2 Signalübertragung zwischen digitalen Systemen

Im folgenden soll Ihnen empirisch deutlich gemacht werden, wie digitale Signale durch Übertragung von einem Bauteil zum nächsten Bauteil verändert werden. Dies wird zum einen durch den Wellenwiderstand der Leitung, zum anderen durch die Ausgangs- und Eingangswiderstände der Schaltungen bewirkt.

### Flankensteilheit

Ihre Aufgabe besteht nun darin die Anstiegszeit ( $\Delta t$ ) von 0% bis 63% der Amplitude eines Rechtecksignals zu messen. Erzeugen Sie dazu ein 1 kHz-Rechtecksignal und erhöhen Sie die horizontale Dehnung (Regler **Horizontal** für Kanal 1) im Oszilloskop so weit, bis der Anstieg deutlich sichtbar wird. Drücken Sie jetzt auf die Taste **Cursor**, um ins Cursor-Menü zu gelangen und stellen Sie Cursor 1 mit dem Multifunktionsrad (der große Drehregler ohne Beschriftung oben in der Mitte vom Oszilloskop) so ein, dass er am Anfang bei ca. 0% vom Anstieg steht. Mit den Optionstasten am Display können Sie zum Cursor 2 wechseln und diesen anschließend mit dem Multifunktionsrad ans Ende bei ca. 63% des Anstiegs setzen. Die Zeit  $\Delta t$  im Display ist die zu ermittelnde Flankensteilheit. Ergebnis:

Benutzen Sie das Signal der letzten Aufgabe und schließen Sie den Ausgang des Funktionsgenerators an den ersten Kanal des Oszilloskops sowie über das RC-Glied des Experimentierboards an den zweiten Kanal des Oszilloskops an. Messen Sie wie bereits

im vorherigen Schritt die Anstiegszeiten der beiden Kanäle. Berechnen Sie hieraus die Zeit-Konstante des RC-Glieds ( $\tau = RC$ ). Ergebnis:

### Leitungsreflexionen

Erzeugen Sie ein 1 MHz-Rechtecksignal mit 20% Tastverhältnis und schließen Sie den Ausgang des Funktionsgenerator mit einem Kabel an ein T-Stück und dieses an den ersten Kanal des Oszilloskops sowie an ein BNC-Kabel mit 30 Metern Länge an. Das Ende des langen BNC-Kabels wird über ein T-Stück an den zweiten Kanal des Oszilloskops angeschlossen. Interpretieren Sie das im Oszilloskop dargestellte Signal berechnen Sie die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Signals auf dem Kabel mit folgenden Konfigurationen am Ende des 30m Kabels:

- $50\Omega$  Abschlusswiderstand
- offen
- Kurzschluss (hier können Sie einen Adapter BNC/Bananenstecker nehmen und mittels Kabel kurzschließen)

Hinweis: Es reicht aus wenn Sie die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Signals nur einmal berechnen.

Welcher Reflexionsfaktor liegt vor und woran lässt sich dieser an der jeweiligen Signalform erkennen?

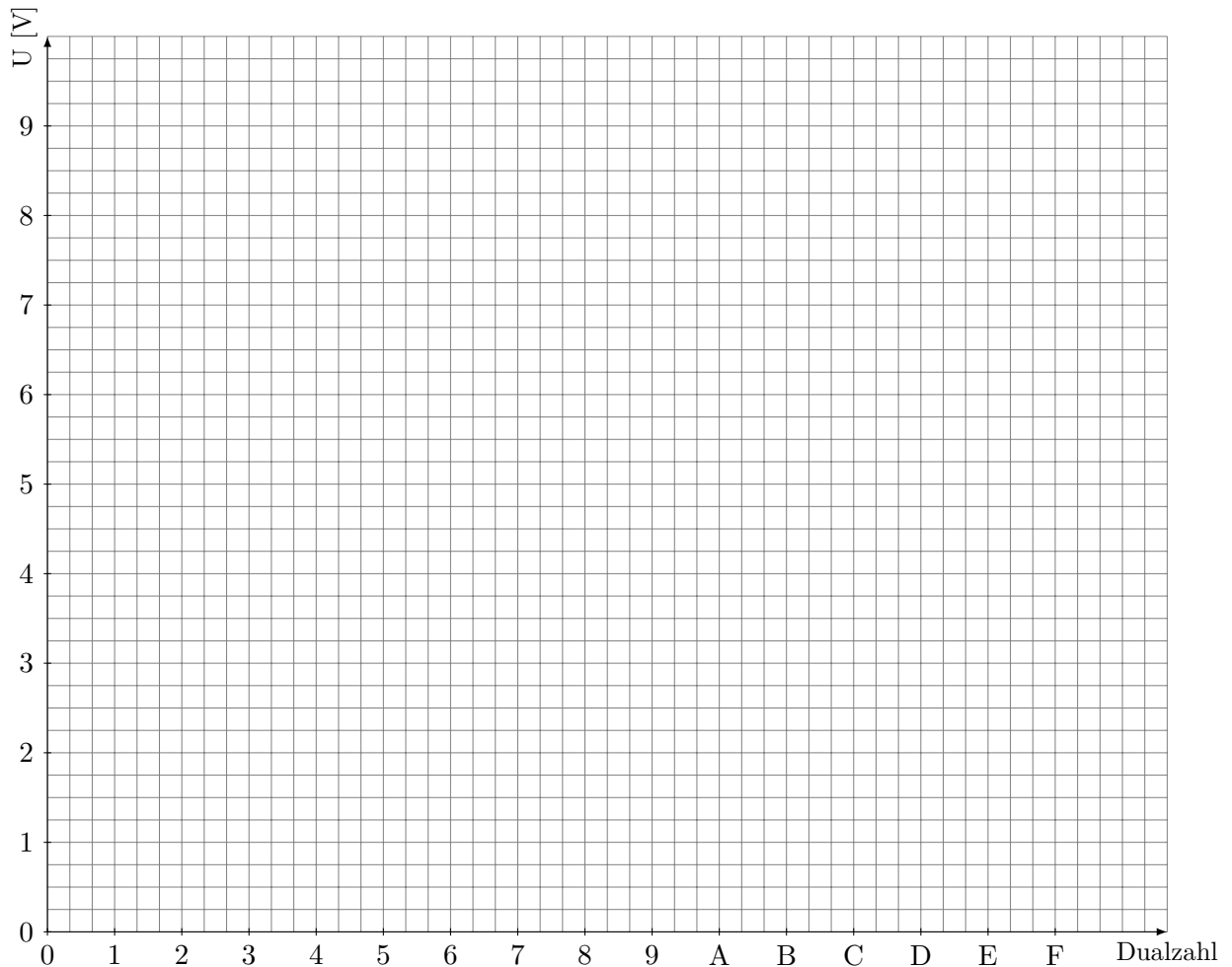
## D.3 D/A-Wandler

### D/A-Wandler Vorbereitung.

Verbinden Sie die Digitalleitungen  $a_0, a_1, a_2, a_3$  zwischen dem Mustergenerator (Abb. 8 a.) und dem 4-Bit-D/A-Wandler (Abb. 8 d.). Verbinden Sie den Ausgang  $U_A$  des D/A-Wandlers mit dem Multimeter und dem Oszilloskop.

Stellen Sie die Potentiometer P1 und P2 des D/A-Wandlers korrekt ein. Orientieren Sie sich hierbei an den Widerständen der Abb. 3. Schalten Sie die Versorgungsspannung ein. **Der Schalter befindet sich auf der Rückseite des Versuchsaufbaus (rechts unten).** Kalibrieren Sie den D/A-Wandler mit  $Q = 0.25$  V. *Wie gehen Sie dabei vor? Welche Werte müssen die Potentiometer  $P_1$  und  $P_2$  aufweisen?* Notieren Sie die verbleibenden Verstärkungs- und Offsetfehler.

**Kennlinie des kalibrierten D/A-Wandlers.** Nehmen Sie die Kennlinie des kalibrierten D/A-Wandlers auf. Schalten Sie dazu die Sequenzlänge des Mustergenerators auf '0' (entspricht Sequenzlänge 1) und tasten Sie mit dem niedrigsten Wahlschalter alle möglichen Dualwerte durch. Tragen Sie die Messwerte in ein Diagramm ein. Hinweis: Der Mustergenerator stellt die Dualwerte hexadezimal dar.



**Offset-Fehler.** Simulieren Sie einen Offset-Fehler durch Drehen des Potentiometers  $P_3$  nach rechts bis zum Anschlag, nehmen Sie die Kennlinie auf und tragen Sie diese Kennlinie in das Diagramm der vorherigen Aufgabe ein. Kalibrieren Sie danach wieder den Wandler.

**Verstärkungs-Fehler.** Simulieren Sie einen Verstärkungsfaktor durch Drehen des Potentiometers  $P_4$  zum rechten Anschlag. Tragen Sie die Kennlinie in das gemeinsame Diagramm der vorherigen beiden Aufgaben ein und kalibrieren Sie danach wieder den Wandler.

**Widerstandstoleranzen im Kettenleiter.** Simulieren Sie Widerstandstoleranzen im Kettenleiter durch Verändern eines Längs- und Querwiderstandes mit  $P_1$  bzw.  $P_2$ . Zur genauen Einstellung eines Widerstandswertes am Potentiometer trennen Sie es mit  $S_1$  bzw.  $S_2$  vom Netzwerk und justieren Sie mit Hilfe eines als Ohmmeter geschalteten Digitalmultimeters den gewünschten Wert ein. Betrachten Sie sich die folgenden Kennlinien auf dem Oszilloskop, nehmen Sie sie anschließend mit dem Voltmeter genau auf



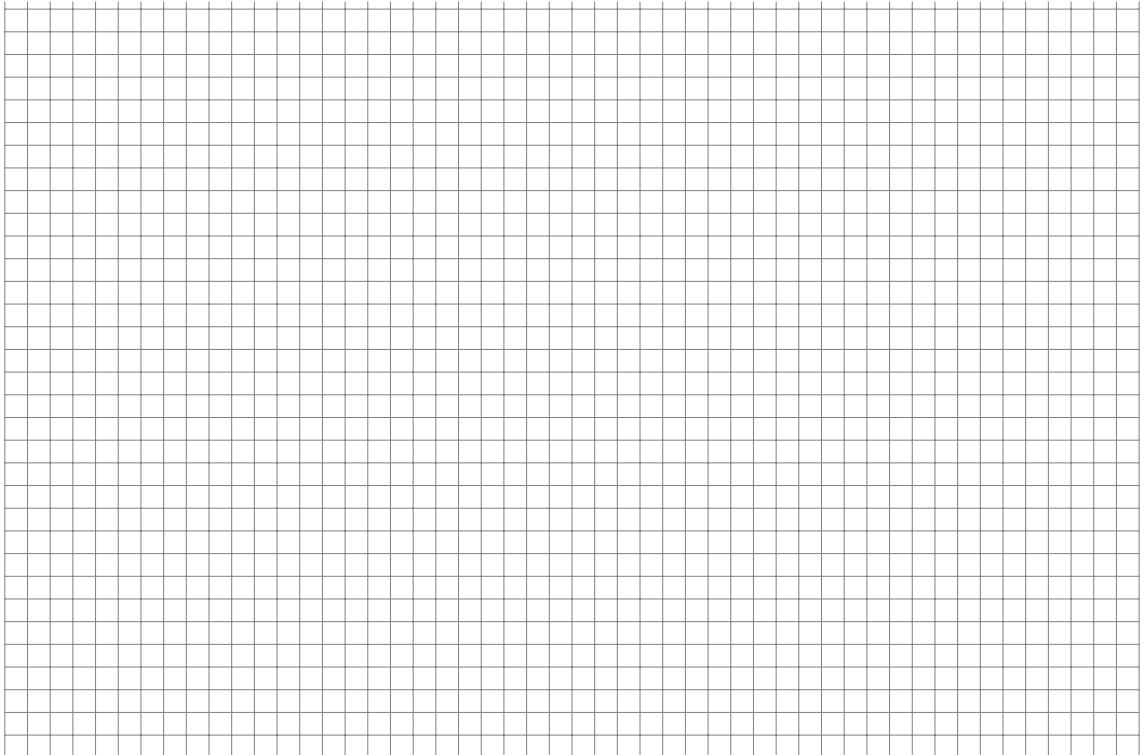
und übertragen Sie die Kennlinien in ein Diagramm:

a)  $P_1 = 100 \text{ k}\Omega$ ;  $P_2 = 100 \text{ k}\Omega$

b)  $P_1 = 200 \text{ k}\Omega$ ;  $P_2 = 50 \text{ k}\Omega$

Um welche Fehlerarten handelt es sich? *Diskutieren Sie die unterschiedlichen Auswirkungen von Fehlern durch  $P_1$  und  $P_2$ . Welche Dualstellen werden durch den fehlerhaften Widerstand jeweils am stärksten beeinflusst?*

Finden sie Argumente, die Ihre Thesen belegen und legen Sie diese schriftlich dar.



## D.4 A/D-Wandler

**Vorbereitung.** Kalibrieren Sie den rückgekoppelten A/D-Wandler (Abb. 8 e.) durch Verstärkungs- und Offsetabgleich ( $P_2$  und  $P_1$ ). Nutzen Sie hierfür die zwei Drehregler, welche sich auf und neben dem Schaltbild des D/A-Wandlers befinden. Nehmen Sie als Quantisierungseinheit  $Q$  die Spannung 0.25 V. Beachten Sie hierbei Abb. 6.

### Wandlung mit Zählstrategie.

a) Einzelschritt:

Verbinden Sie die Zählstrategie-Steuerung (Abb. 8 c.) mit dem Rückkopplungsteil (Abb. 8 e.). Hinweis: Verbinden Sie  $D_0$  bis  $D_3$  Schalten Sie die Steuerung in die Betriebsart 'Einzelschritt' ( $S_0, S_1 = (0, 0)$ ) und wandeln Sie die Spannungen:

$$U_0 = (0, 0.75, 2.6) \text{ V}$$

im Einzelschrittverfahren. *Wieviele Wandlungsschritte erwarten Sie?* Vergleichen Sie mit Abschnitt B.2.3. Protokollieren Sie bei der Messung die Anzahl der Wandlungsschritte und die gewandelten Dualzahlen. **Erzeugen Sie die Eingangsspannungen mit dem Netzteil.**

b) Kontinuierliches Wandeln:

Schalten Sie die Zählstrategie-Steuerung um in die Betriebsart 'Dauerwandeln' ( $S_0, S_1 = (1, 1)$ ) und stellen Sie die Spannungen  $U_d$  und  $U_e$  auf dem Oszillographen gleichzeitig bei gleicher Kalibrierung der Kanäle 1 und 2 dar. Variieren Sie die Eingangsspannung  $U_e$  und diskutieren Sie das Ergebnis mit dem betreuenden Assistenten.

### Wandlung mit sukzessiver Approximation.

a) Einzelschritt:

Verbinden Sie die Steuerung für sukzessive Approximation (Abb. 8 b.)) mit dem Rückkopplungsteil (Abb. 8 e.)). Schalten Sie die Steuerung in die Betriebsart 'Einzelschritt' ( $S_0, S_1 = (0, 0)$ ) und wandeln Sie die gleichen Spannungen wie in der vorherigen Aufgabe:

$$U_0 = (0, 0.75, 2.6) \text{ V}$$

im Einzelschrittverfahren. *Wieviele Wandlungsschritte erwarten Sie?* Hinweis: Vergleichen Sie mit Abschnitt B.2.4. Protokollieren Sie bei der Messung die angelegten Testwerte  $D$  und die gewandelten Dualzahlen.

b) Kontinuierliches Wandeln:

Schalten Sie die Steuerung für sukzessive Approximation um in die Betriebsart 'Dauerwandeln' ( $S_0, S_1 = (1, 1)$ ) und stellen Sie die Spannungen  $U_d$  und  $U_e$  auf dem Oszilloskop gleichzeitig bei gleicher Kalibrierung der Kanäle A und B dar. Variieren Sie die Eingangsspannung  $U_e$  und diskutieren Sie das Ergebnis mit dem betreuenden Assistenten.



## D.5 Diskreter Aufbau eines Zählers

Realisieren Sie einen A/D-Wandler mit Zählstrategie, wobei Sie den Zähler mit UND- und ODER-Gattern auf dem Steckbrett rechts unten realisieren. Hierfür benötigen Sie die von Ihnen bereits in Aufgabe C.3.1 bzw. C.3.2 ermittelte disjunktive Normalform.

Anmerkung: Das resultierende Signal  $(E_3, E_2, E_1, E_0)$  der Logik wird auf die gleichnamigen Buchsen des Steckbretts rechts unten geschaltet. Dies sind die Eingänge zu den Registern. Die Ausgänge der Register liegen auf dem Steckbrett rechts in der Mitte und dienen als Eingangssignal für die Logikschaltung auf dem Steckbrett rechts unten.

Beweisen Sie durch Variation der analogen Eingangsspannung über den gesamten Eingangsspannungsbereich und Kontrolle der resultierenden Digitalzahl die korrekte Funktion und erläutern Sie den Test und das Resultat.

## E Literaturhinweise

- [1] U. Tietze, Ch. Schenk:  
Halbleiterschaltungstechnik.  
Springer-Verlag 1983
- [2] Wikipedia-Artikel, siehe <http://de.wikipedia.org> und dortige Links auf weiterführende Skripten und Demonstrationsprogramme. Hinweise auf die relevanten Stichworte von Wikipedia, sind in den Text dieser Versuchsanleitung integriert.

# F Sections/Anhang

Kl.	$m_x$	$D_3$	$D_2$	$D_1$	$D_0$	$P$

$m_x + m_y$	$D_3$	$D_2$	$D_1$	$D_0$	$P$

$m_w + m_x + m_y + m_z$	$D_3$	$D_2$	$D_1$	$D_0$	$P$

$m_s + m_t + m_u + m_v + m_w + m_x + m_y + m_z$	$D_3$	$D_2$	$D_1$	$D_0$	$P$

Schreiben Sie alle Primterme aus obigen Zusammenfassungsschritten explizit hin.

$$P_1 =$$

Stellen Sie nun die Primtermtabelle auf und führen Sie abwechselnd Spaltendominanzprüfungen und Zeilendominanzprüfungen durch bis keine weiteren Spalten und Zeilen gestrichen werden können.

	$m_0$														
$P_1$															

Die resultierende Boolesche Funktion lautet

Kl.	$m_x$	$D_3$	$D_2$	$D_1$	$D_0$	$P$

$m_x + m_y$	$D_3$	$D_2$	$D_1$	$D_0$	$P$

$m_w + m_x +$ $m_y + m_z$	$D_3$	$D_2$	$D_1$	$D_0$	$P$

$m_s + m_t + m_u + m_v + m_w + m_x + m_y + m_z$	$D_3$	$D_2$	$D_1$	$D_0$	$P$

Schreiben Sie alle Primterme aus obigen Zusammenfassungsschritten explizit hin.



$$P_1 =$$

Stellen Sie nun die Primtermtabelle auf und führen Sie abwechselnd Spaltendominanzprüfungen und Zeilendominanzprüfungen durch bis keine weiteren Spalten und Zeilen gestrichen werden können.

	$m_0$														
$P_1$															

Die resultierende Boolesche Funktion lautet

Kl.	$m_x$	$D_3$	$D_2$	$D_1$	$D_0$	$P$

$m_x + m_y$	$D_3$	$D_2$	$D_1$	$D_0$	$P$

$m_w + m_x + m_y + m_z$	$D_3$	$D_2$	$D_1$	$D_0$	$P$

$m_s + m_t + m_u + m_v + m_w + m_x + m_y + m_z$	$D_3$	$D_2$	$D_1$	$D_0$	$P$

Schreiben Sie alle Primterme aus obigen Zusammenfassungsschritten explizit hin.

$$P_1 =$$

Stellen Sie nun die Primtermtabelle auf und führen Sie abwechselnd Spaltendominanzprüfungen und Zeilendominanzprüfungen durch bis keine weiteren Spalten und Zeilen gestrichen werden können.

	$m_0$														
$P_1$															

Die resultierende Boolesche Funktion lautet