

---

# Elektronik für Informatiker

*Eine Einführung in Analoge und Digitale Systeme für Informatiker mit Elektronikgrundlagen  
und Signalverarbeitung*

Prof. Dr. Stefan Bosse

Universität Koblenz - Praktische Informatik

# Digitale Konfiguration und Parametrisierung

## Digitale Parametrisierung



Bisher gab es nur statische analoge Schaltungen die durch externe Spannungsquellen (DAC) indirekt veränderlich wurden und fest verdrahtet waren.

- Jetzt wollen wir die digitale Parametrisierung von Bauteilen betrachten.
  - Digital einstellbare Widerstände
  - Digital einstellbare Kapazitäten

## Digital einstellbare Widerstände

Es gibt verschiedene Möglichkeiten:

1. Kopplung eines lichtempfindlichen Widerstands (LDR, Cd-S Materialien) mit einem Leuchtmittel, z.B. einer Leuchtdiode
  - Die Lichtintensität  $S$  der LED ist ungefähr proportional zur Stromstärke  $I$ , d.h. stromsteuerbar  $S \sim I$
  - Die Lichtempfindlichkeit des LDR ist "leider" der Kehrwert einer Funktion, d.h.  $R=1/f(S)$ .
2. Kopplung eines lichtempfindlichen Halbleiters (Fotodiode, Fototransistor / Bipolar oder FET) mit einem Leuchtmittel, z.B. einer Leuchtdiode
  - Die Lichtintensität  $S$  der LED ist ungefähr proportional zur Stromstärke  $I$ , d.h. stromsteuerbar  $S \sim I$
  - Die Lichtempfindlichkeit des Halbleiters ist schon "eher" proportional zu  $S$ , d.h.  $R=f(S)$ .

## Digital einstellbare Widerstände

3. Mit Analogschaltern und Widerstandsnetzwerken (wie bei DAC Schaltungen).
4. Mit geschalteten Kapazitäten!

## Der LDR

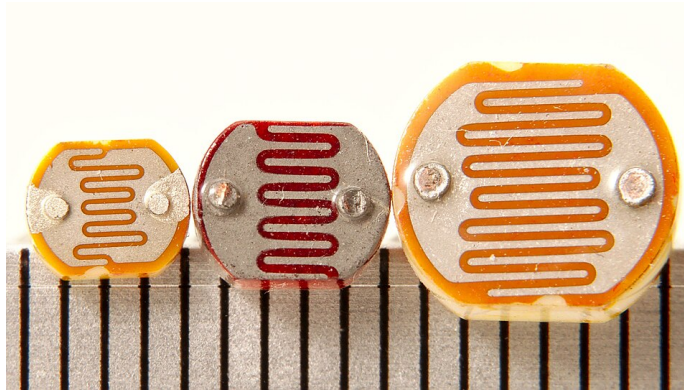


Abb. 1. Drei unterschiedlich große Cadmiumsulfid-Fotowiderstände neben einer Millimeterskala. Die auf jedem Gerät sichtbare mäanderförmige Spur vergrößert die beleuchtete Fläche und verstärkt die Widerstandsänderung mit Licht.

## Der LDR

Es gilt:

$$R(S) \approx R_0 \left( \frac{S_0}{S} \right)^\gamma$$
$$\gamma \approx [1, 2]$$

wobei  $S_0$  eine Referenzintensität ist und  $\gamma$  eine empirisch zu ermittelnde Exponentkonstante.

## Der Opto LDR

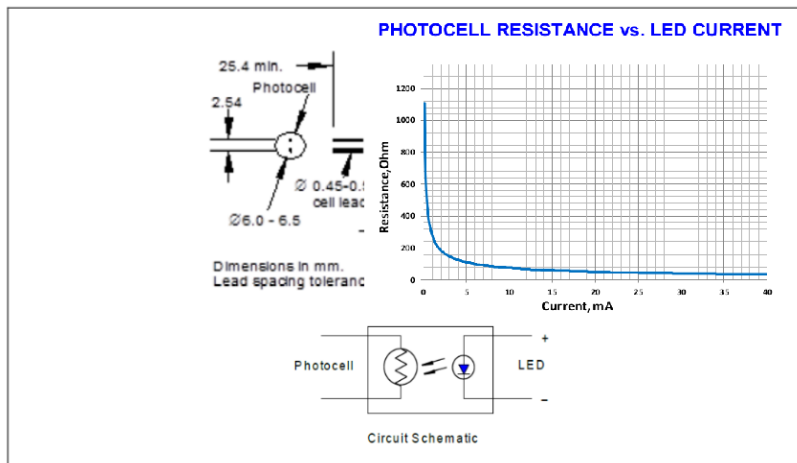
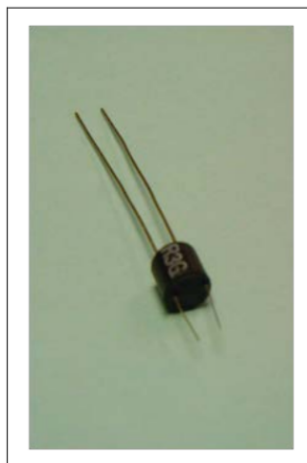


Abb. 2. LunaInc LDR Optokoppler und Kennlinie

## Der Opto FET

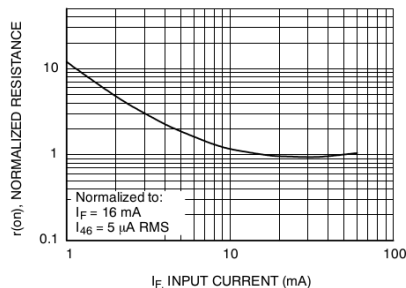


Figure 1. Resistance vs. Input Current

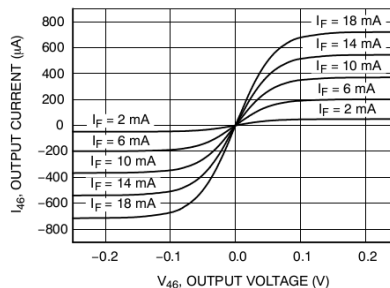


Figure 2. Output Characteristics

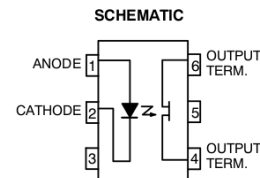


Abb. 3. OptoFet von Onsemi (H11F1M). Der FET hat nur einen kleinen Übertragungsbereich, d.h. wo der Widerstand konstant in Abhängigkeit von der FET Spannung  $V_{46}$  ist. D.h. nur für Kleinsignalanwendungen  $< \pm 0.1V$  geeignet.

## Ansteuerung der LED

- Man benötigt eine steuerbare Stromquelle, d.h.,  $I(U)$

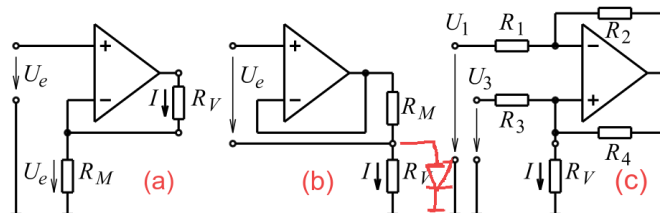


Abb. 4. Spannungsgesteuerte Stromquelle mit einem OpAmp:  $R_V$  ist der Verbraucher (Stromsenke). (a,b)  $I=U_e/R_M$   
 (c)  $I=(U_3-U_1)/R_3$

- Jetzt muss aber die Steuerspannung  $U_e$  noch digital erzeugt werden!
- Besser: Pulsweitenmodulation einer konstanten Spannung! Diese kann digital über getaktete digitale Zähler erfolgen, und Auflösungen von 12-16 Bit liefern, d.h. die Auflösung bestimmt die An- und Auszeiten eines Digitalsignals.

## Digitale Pulsweitenmodulation

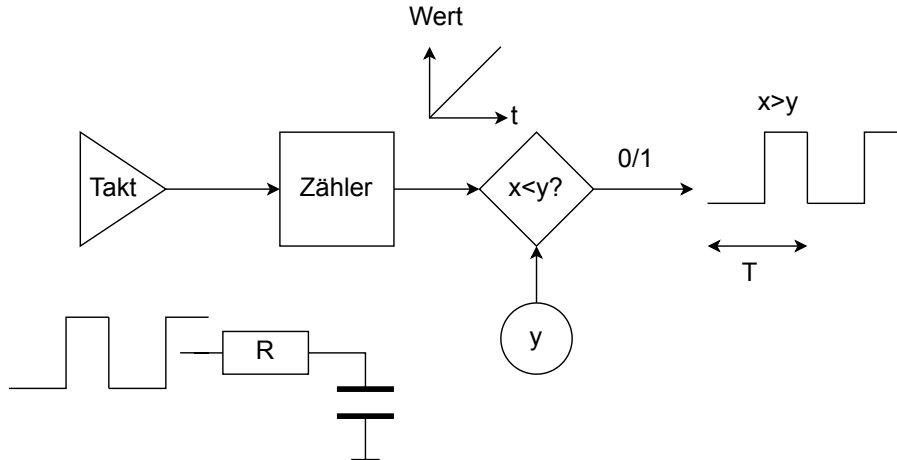


Abb. 5. Ein digitaler Pulsweitsignalgenerator. Es gibt einen digitalen Zähler und einen digitalen Komparator. Wenn der Zählerwert kleiner als der vorgegebene Digitalwert ist wird der Ausgang 0 sein, ist er größer dann 1. Der Zähler fängt nach dem maximalwert wieder bei Null an. Mit einem Tiefpassfilter ergibt sich ein mittlerer Strom (oder mittlere Spannung) die proportional zum dem Tastverhältnis ist, also der An/Auszeit.

## Geschaltete Kapazitäten als Widerstände

Eine wichtige Klasse von analogen integrierten CMOS-Schaltungen sind Schaltkondensatorschaltungen (SC), bei denen hochpräzise Widerstände mit großen Widerstandswerten durch Schalter und Kondensatoren implementiert werden.

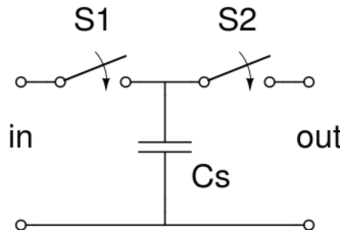


Abb. 6. SC Widerstände. Die Schalter können wieder durch (MOS)FET realisiert werden. Es muss hier die Frequenz variiert werden um einen effektiven Widerstand  $R$  einzustellen.

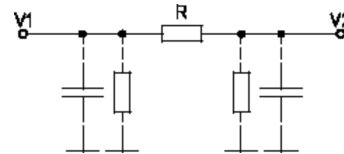


Abb. 7. SC Widerstände. Ersatzschaltbild.

Idealerweise ist der Widerstand:

$$R = \frac{1}{fC}$$

## Vergleich

Methoden	Vorteile	Nachteile
LDR	Großer Widerstandsbereich, Widerstand nahezu unabhängig von Signalspannung, bipolare Signalspannungen möglich, mittlerer Strombelastbarkeit, hohe Signalspannungen möglich (50V)	Widerstand ist Kehrwert einer Funktion der Intensität, langsame Änderung/Abklingen (bis zu 30 s von hell nach dunkel Übergang), träge, nicht integrierbar da CdS temperaturempfindlich ist und einen Lötprozess nicht "überlebt"
Opto-FET	Großer Widerstandsbereich, tendenziell proportionale Abhängigkeit des Widerstands von Lichtintensität, mittlere Strombelastbarkeit, integrierbar, schnelle Reaktion	Nichtlinearität des Widerstands mit Signalspannung, nur einsetzbar für niedrige Signalspannungen
Pulsweitenmodulation	Einfach digital umsetzbar und programmierbar	Die An/Austastung erzeugt insgesamt ein Rechtecksignal mit niedriger Frequenz (z.B. $f_{\text{clk}}=20$ MHz, Tastverhältnis 50%, $n=12$ Bit, $f_{\text{sig}}=2.5$ kHz, bei $n=16$ Bit dann 150 Hz!), Steuersignal kann sich auf eigentliches Signal überlagern
Geschaltete Kondensatoren	Einfach aufzubauen	Variable Frequenz erforderlich und schwieriger zu erzeugen, Schaltfrequenz überlagert sich zum Signal und muss gefiltert werden und begrenzt obere Frequenz des Signals selber (Samplingtheorem!)
Schaltnetzwerke mit Analogschaltern	Klar definierte diskrete Widerstandswerte	Hoher Schaltungsaufwand, nur wenige diskrete Widerstandswerte möglich, bei linearen Netzwerken nimmt der Diskretisierungsfehler (auflösung) mit kleiner "Bitwerten" stark zu

Tab. 1. Vergleich verschiedener veränderlicher und digital steuerbarer Bauteile (Widerstände)

## Digitale Konfiguration



Die Konfiguration einer Analogschaltung ist durch die Netzliste der Bauteile (Verbindungsgraph) gegeben, die frei konfigurierbar sein sollte. Die Parametrisierung ist i.A. ebenfalls Bestandteil, d.h., gegebene Bauteile in ihrem Wert ändern.

## Analogschalter und Analog-Multiplexer

- Analogschalter werden technisch mit Feldeffekttransistoren realisiert.
- Prinzipiell kann man mit nur einem FET einen Signalpfad trennen und wieder schließen.
- Der Durchgangswiderstand einer so einfachen Anordnung ist aber von der Polarität der Signalspannung abhängig.

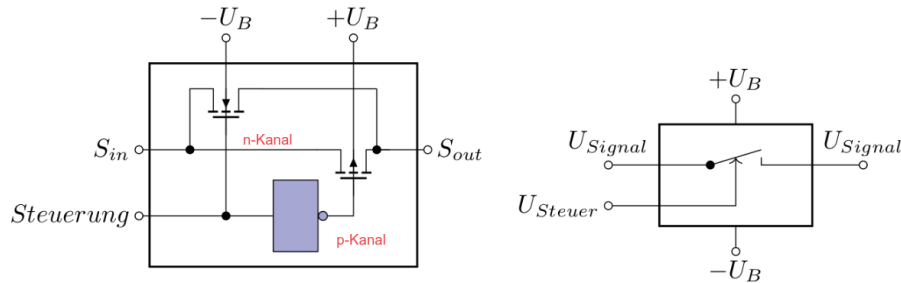


Abb. 8. Analogschalter, schematische Innenschaltung und symbolische Darstellung

## Analogschalter und Analog-Multiplexer

Analogschalter gibt es in vielfältigen Ausführungen. Analog zu mechanischen Schaltern gibt es Analogschalter als:

- einfache ein- oder mehrpolige Schalter,
- ein- oder mehrpolige Umschalter, die pro Schalter eine Auswahl zwischen zwei Leitungs- bzw. Signalfaden ermöglichen und
- Analogmultiplexer, also Umschalter mit mehreren Ausgängen, was eine Verteilung von Signalen auf verschiedene Ausgänge bzw. eine Auswahl verschiedener Eingangssignale ermöglicht.

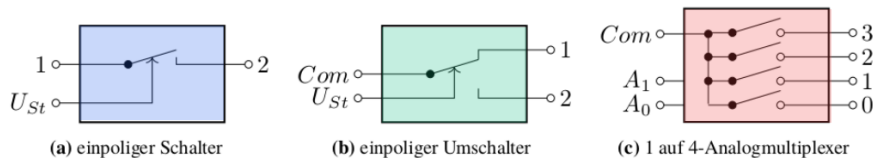


Abb. 9. Analogschalter, Umschalter und Analogmultiplexer

## Analogschalter und Analog-Multiplexer

- Die Steuereingänge an Analogschaltern sind Digitaleingänge, das heißt, diese Eingänge werden mit Digitalpegeln bedient. Es ist mindestens ein digitaler Steuereingang erforderlich.
- Analogmultiplexer haben Adresseingänge; zur Auswahl einer Adresse sind bei  $2^n$  Ein- bzw. Ausgangsleitungen  $n$  Adressleitungen erforderlich.
- Vielfach haben Analogschalter noch weitere Steuereingänge wie Chip-Select, Enable oder Power-Down, deren Funktion den jeweiligen Datenblättern zu entnehmen ist.



Generell gilt, dass die Spannungen am Signalpfad eines Analogschalters die Spannungen  $+U_B$  bzw.  $-U_B$  nicht über- bzw. unterschreiten dürfen.

- Um für Spannungen ober- bzw. unterhalb der Betriebsspannung einsetzbar zu sein, verfügen bestimmte Analogschalter über interne Gleichspannungswandler, sog. DC/DC-Wandler, mit deren Hilfe die Betriebsspannung für den Schalter auf dem Chip vergrößert wird.

## Analogschalter und Analog-Multiplexer

Wesentliche elektrische Parameter von Analogschaltern sind:

- der Durchlasswiderstand (On-Resistance, Größenordnung:  $< 1 \Omega$  bis wenige Ohm),
- die Gleichheit der Durchlasswiderstände bei verschiedenen Kanälen (On-Resistance Matching Between Channels, Größenordnung:  $< 1 \Omega$  bis wenige Ohm)
- die Schaltzeit für das Ein- ( $t_{\text{on}}$ ) bzw. Ausschalten ( $t_{\text{off}}$ , Größenordnung: einige ns),
- maximale Signalspannung, Betriebsspannung und Logik-Pegel.

## Programmierbare Verstärker

Um bestimmte Eigenschaften eines Verstärkers digital programmierbar zu machen, werden in den Signalpfad oder einen Rückkopplungspfad Analogschalter oder Analogmultiplexer eingefügt. Diese erlauben es, mit digitalen Steuersignalen Verstärkung oder Frequenzgang zu ändern oder einen von mehreren Eingangs- oder Ausgangskanälen auszuwählen.

## Invertierender Verstärker mit digital programmierbarer Verstärkung

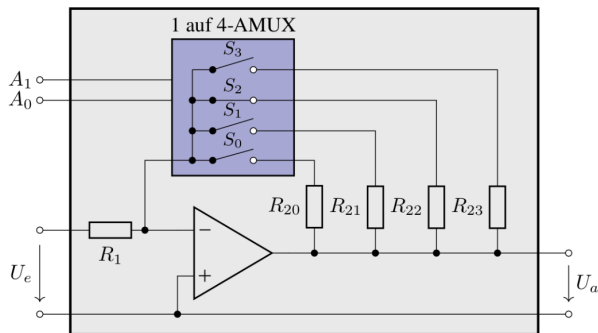


Abb. 10. Parametrisierung durch Konfiguration (Verschaltung)

## Invertierender Verstärker mit digital programmierbarer Verstärkung

- Bei einer linearen Gewichtung der Widerstände R20-R23 kann man nur vier diskrete verschiedene Verstärkungen einstellen (oder n). Es ist immer nur ein Schalter geschlossen.
- Man kann wie bei den Digital-Analog Wandlern aber auch eine potenzierte Gewichtung verwenden, d.h. auch mehrere Schalter können geschlossen werden, und es wird z.B. gewählt  $R_{21}=R_{20}/2$ ,  $R_{22}=R_{21}/2$ , usw.

anliegende Adresse	geschlossener Schalter	Verstärkung
00	$S_0$	$-\frac{R_{20}}{R_1}$
01	$S_1$	$-\frac{R_{21}}{R_1}$
10	$S_2$	$-\frac{R_{22}}{R_1}$
11	$S_3$	$-\frac{R_{23}}{R_1}$

Abb. 11. Adresse und Verstärkung bei linearer Gewichtung

## Matrixschalter

- Bisher haben wir 1:1, 1:n oder n:1 Schalter betrachtet.
- Für vollständig konfigurierbare (schaltbare) Analogschaltungen, d.h., mit freier Verschaltung von Ein- und Ausgängen anstelle von manuell gesteckten Kabeln, wird ein  $n \times m$  Matrixschalter benötigt.
- Ein  $n \times m$  Matrixschalter kann prinzipiell aus  $m$  1:n Multiplexern aufgebaut werden und erlaubt die beliebige Verschaltung der  $n$  Anschlüsse (nennen wir sie die  $x$  Seite) mit jeden anderen der  $m$  Anschlüsse (nennen wir sie die  $y$ -Seite).

## Matrixschalter

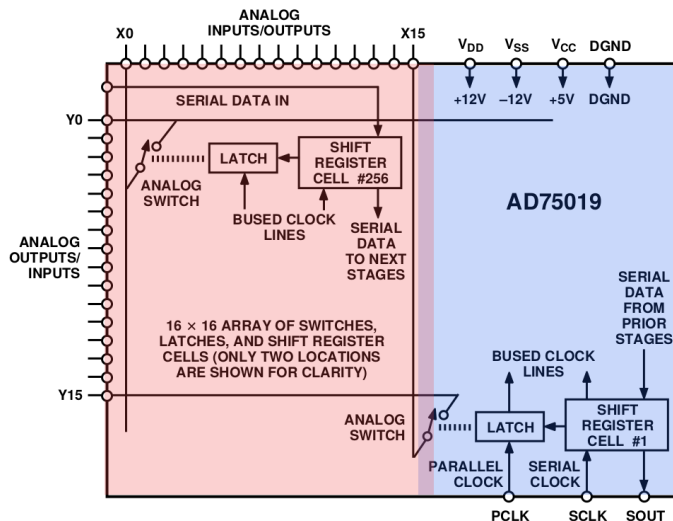


Abb. 12. Analog Devices AD75019 16 × 16 Kreuzmatrixschalter

## Zusammenfassung

- Es gibt verschiedene Methoden Widerstände digital adaptiv in Analogrechner zu integrieren. Die Methoden haben alle Vor- und Nachteile. Damit wird ein Analogrechner parametrisierbar.
- Anlogschalter basierend auf (MS)FET Bauteilen können verwendet werden um eine Schaltung auch vom Verbindsgraph konfigurierbar zu machen.
- Vollständige Kreuzmatrixschalter haben eine ( $\sim$  quadratische) Komplexität von  $N \times M$  Schaltelementen, der Aufwand ist hoch. Will man einen Operationsverstärker mit wenigstens 4 Widerständen frei verschalten braucht man schon eine  $11 \times 11$  Matrix.
- Analogschalter brauchen einen Levelshifter für das Steuersignal wenn bipolare Signale (pos./neg. Werte) verarbeitet werden sollen (und neg. bezugspotenzial).c