

Block 01 — Vom Schaltplansymbol zum realen Bauteil

Student Group

First Name	Surname	Matrikel Nr.

Table of Contents

Block 01 — Vom Schaltplansymbol zum realen Bauteil	3
1.0 Einführung	3
1.0.1 Lernziele	3
1.0.2 Vorbereitung zu Hause	4
1.0.3 90-Minuten-Plan	4
1.0.4 Konzeptübersicht	4
1.1 Kerninhalt	5
1.1.1 Vom Schaltplansymbol zum realen Widerstand	5
Datenblätter lesen	5
1.1.2 Verlustleistung, Erwärmung und thermischer Widerstand	6
Derating	8
Temperaturabhängigkeit des Widerstandswerts	9
1.1.3 WiderstandsbaufORMen	9
Abmaße	9
Spezialfall: Shunt	10
Shunt mit vier Anschlüssen	11
Datenblattbeispiel	12
Exercise E01.1 Datenblatt eines realen Shunt-Widerstands	12
1.1.4 Digitale Logik	13
Vom realen Schalter zur Logik	13
Was bedeutet HIGH und LOW?	13
VCC und VDD	13
Schalter: Öffner und Schließer	14
Der Inverter	14
Mehrere Schalter: AND, OR und ihre Negationen	15
NAND und NOR	15
NAND	15

NOR	16
Was ist im ROM?	16
1.2 Häufige Fehler	17
1.3 Übungen	18
Exercise E01.2 Auswahl eines Shunts	18
Exercise E01.3 Temperatur und Derating	19
Exercise E01.4 Warum Kelvin-Messung?	19
Exercise E01.5 HIGH und LOW sind Spannungsbereiche	20
Exercise E01.6 Vom ROM zur Logik	20
1.4 Zusammenfassung	21
1.5 Ausblick	21

Block 01 — Vom Schaltplansymbol zum realen Bauteil

1.0 Einführung

Betrachten wir nun die vereinfachte Schaltung etwas genauer.

In der vereinfachten Schaltung fällt ein Bauteil besonders auf:

$R_{\text{SENSE}} = 50 \, \text{m}\Omega$

Ein Widerstand ist wahrscheinlich eines der bekanntesten elektrischen Bauteile. Trotzdem wirft dieser Widerstand bereits mehrere Fragen auf:

- Warum beträgt sein Widerstand nur wenige Milliohm?
- Wie groß ist die dadurch entstehende Messspannung?
- Wie viel Verlustleistung entsteht?
- Wie warm wird das Bauteil?
- Warum sind Strommesswiderstände häufig deutlich größer als normale SMD-Widerstände?
- Warum besitzen manche Shunts vier Anschlüsse?
- Welchen Einfluss haben Leiterbahn- und Kontaktwiderstände?
- Welche Angaben müssen in einem Datenblatt geprüft werden?

Damit eignet sich der Widerstand sehr gut als erstes Beispiel für eine zentrale Idee dieses Kurses:



Das ideale Modell ist notwendig, aber für den Aufbau einer realen elektronischen Schaltung nicht ausreichend.

Diese Idee wird uns im gesamten Semester begleiten.

Ein solcher Widerstand sieht in der Schaltung zunächst unspektakulär aus. In der realen Elektronik ist er jedoch alles andere als trivial: Durch ihn fließt der Motorstrom, er erzeugt Verlustwärme, sein Widerstandswert ändert sich mit der Temperatur und selbst Leiterbahnen und Lötstellen können Widerstände in einer ähnlichen Größenordnung besitzen.

Genau an diesem Beispiel soll in diesem Block der Übergang vom **idealen Schaltplansymbol** zum **realen Bauteil** betrachtet werden.

Im zweiten Teil wird dieselbe Idee auf Schalter übertragen. Ein idealer Schalter besitzt nur die Zustände „offen“ und „geschlossen“. Reale elektronische Schalter nähern sich diesen Grenzfällen nur an. Aus mehreren gesteuerten Schaltern lassen sich schließlich logische Funktionen aufbauen.

1.0.1 Lernziele

Nach diesem 90-minütigen Block können Sie

- zwischen Schaltplansymbol, idealisiertem Modell und realem Bauteil unterscheiden,
- wichtige Angaben eines Widerstandsdatenblatts gezielt finden und unter Berücksichtigung ihrer Randbedingungen interpretieren,
- aus Verlustleistung und thermischem Widerstand eine Bauteiltemperatur abschätzen,
- typische SMD- und THT-Bauformen hinsichtlich Größe, Handhabung und Belastbarkeit einordnen,
- einen Shunt hinsichtlich Messspannung, Verlustleistung und Einfluss auf den Laststromkreis bewerten,
- den Einfluss von Leiterbahn- und Kontaktwiderständen auf eine Milliohm-Messung erklären,
- den Aufbau und Zweck einer Kelvin-/Vierletermessung erklären,
- HIGH und LOW als Spannungsbereiche und nicht als feste Spannungswerte interpretieren,
- die Bedeutung von V_{CC} , V_{DD} , V_{SS} , V_{IL} und V_{IH} qualitativ einordnen,
- ideale und reale Schalter anhand von R_{on} und R_{off} unterscheiden,
- einfache Logikgatter aus gesteuerten Schaltern qualitativ nachvollziehen.

1.0.2 Vorbereitung zu Hause

Betrachten Sie die Leit-Schaltung am Beginn dieser Seite.

- Welche Bauteile und Funktionsgruppen erkennen Sie bereits?
- Welche Teile der Schaltung können Sie noch nicht erklären?
- Warum könnte ein Widerstand von nur $50\,\mathrm{m}\Omega$ im Motorstrompfad sinnvoll sein?
- Welche Informationen würden Sie benötigen, um diesen Widerstand tatsächlich zu bestellen?

Ohmsches Gesetz, elektrische Leistung sowie die lineare Temperaturabhängigkeit von Widerständen werden aus EEE1 vorausgesetzt.

1.0.3 90-Minuten-Plan

1. **Warm-up (8-10 min):** Leit-Schaltung und Shunt betrachten. Was zeigt das Schaltplansymbol – und welche Informationen fehlen für ein reales Bauteil?
2. **Realer Widerstand und thermisches Verhalten (25-30 min):** Datenblattangaben, Verlustleistung, thermischer Widerstand, Derating und Bauformen anhand des Shunts.
3. **Shunt und Messung (20-25 min):** Zielkonflikt bei der Shunt-Auswahl, Leiterbahnwiderstände, Zwei- und Vierletermessung sowie Datenblattbeispiel.
4. **Vom Schalter zur Logik (20-25 min):** HIGH und LOW, Versorgungsspannungen, idealer und realer Schalter, Inverter sowie AND/OR/NAND/NOR mit Falstad.
5. **ROM und Gate-Treiber-Logik (5-8 min):** funktionale ROM-Darstellung und Realisierung mit Logikgattern als Brücke zur späteren H-Brücke.
6. **Abschluss (3-5 min):** zentrale Aussagen und Ausblick auf Frequenzgang und Bode-Diagramm.

1.0.4 Konzeptübersicht

1. Ein Schaltplansymbol beschreibt nur die für ein Modell relevanten Eigenschaften. Für die Auswahl eines realen Bauteils müssen zusätzlich elektrische, thermische und mechanische Grenzen betrachtet werden.
2. Datenblattwerte sind nur zusammen mit ihren Randbedingungen sinnvoll. Besonders Leistungsangaben müssen immer im Zusammenhang mit Temperatur, Aufbau und Derating gelesen werden.
3. Verlustleistung führt zu einem Wärmestrom. Über den thermischen Widerstand kann daraus

näherungsweise eine Temperaturerhöhung bestimmt werden.

4. Bei kleinen Widerstandswerten im Milliohm-Bereich können Leiterbahnen, Kontakte und Lötstellen einen wesentlichen Teil des Messfehlers verursachen. Deshalb werden bei präzisen Shunt-Messungen Strompfad und Messpfad getrennt.
5. Ein Shunt stellt einen Zielkonflikt dar: Ein größerer Widerstand erzeugt ein größeres Messsignal, verursacht aber gleichzeitig einen größeren Spannungsabfall und höhere Verlustleistung.
6. Digitale Zustände HIGH und LOW entsprechen realen Spannungsbereichen. Sie sind nicht mit festen Spannungswerten gleichzusetzen.
7. Logikgatter lassen sich im vereinfachten Modell aus gesteuerten Schaltern aufbauen. Reale elektronische Schalter besitzen jedoch endliche Ein- und Ausschaltwiderstände sowie endliche Schaltzeiten.
8. Die Gate-Treiber-Logik kann funktional als ROM bzw. gespeicherte Wahrheitstabelle beschrieben oder direkt mit Logikgattern realisiert werden. Beide Darstellungen beschreiben dieselbe Zuordnung von Eingangs- zu Ausgangszuständen.

1.1 Kerninhalt

1.1.1 Vom Schaltplansymbol zum realen Widerstand

Im idealen Modell genügt für einen Widerstand die Beziehung

$$U = R \cdot I$$

Damit lässt sich ein großer Teil elektrischer Netzwerke analysieren. Für die Auswahl eines realen Bauteils ist der Wert R jedoch nur der Anfang.

Ein reales Widerstandsdatenblatt enthält unter anderem folgende Angaben:

- **Nominaler Widerstandswert R_N** : der Wert, für den das Bauteil spezifiziert ist.
- **Toleranz ΔR** : die zulässige Abweichung des tatsächlichen Widerstands vom Nennwert bei definierten Referenzbedingungen.
- **Temperaturkoeffizient TK** : die Änderung des Widerstandswerts mit der Temperatur.
- **Nennleistung P_N** : die maximal zulässige Verlustleistung unter den im Datenblatt genannten Randbedingungen.
- **Thermischer Widerstand R_{th}** : eine Beschreibung dafür, wie stark sich die Temperatur bei einer bestimmten Verlustleistung erhöht.
- **Maximale Betriebsspannung U_{max}** : die maximal zulässige Spannung am Bauteil.
- **Pulsbelastbarkeit**: die zulässige kurzzeitige Belastung.
- **Bauform**: mechanische Abmessungen und Anschlussart.
- **Parasitäre Eigenschaften**: insbesondere kleine zusätzliche Induktivitäten und Kapazitäten.

Diese Punkte werden im Folgenden nicht als Katalog gelernt. Stattdessen wird jeweils untersucht, **wann eine dieser Angaben für eine konkrete Schaltung relevant wird.**

Datenblätter lesen

Ein Datenblatt sollte nicht von Seite 1 bis zur letzten Seite „durchgelesen“ werden. Sinnvoller ist eine konkrete Fragestellung.

Für einen Widerstand kann die Suche beispielsweise so beginnen:

1. Welchen Widerstandswert benötige ich?
2. Welche Toleranz ist für meine Anwendung zulässig?
3. Welche Verlustleistung entsteht?
4. Wie warm darf das Bauteil werden?
5. Welche Bauform kann gefertigt bzw. handgelötet werden?
6. Gibt es besondere Angaben zur Pulsbelastung oder zum Layout?



Datenblattstrategie: Zuerst die Schaltungsanforderung formulieren, danach gezielt die dazugehörigen Angaben im Datenblatt suchen. Ein Zahlenwert ohne seine Randbedingungen ist häufig wertlos.

1.1.2 Verlustleistung, Erwärmung und thermischer Widerstand

Betrachten wir zunächst den Widerstand aus der Leit-Schaltung. Dieser soll aus dem Strom ein Spannungssignal generieren. Solche Messwiderstände werden auch **Shunt** genannt.

Der genutzte Shunt mit $R_{\text{SENSE}} = 50 \text{ m}\Omega$ wandelt beispielsweise einem Motorstrom von $I_{\text{M}} = 3 \text{ A}$ in eine Spannung von $U_{\text{M}} = 150 \text{ mV}$

Dabei entsteht aber auch eine Verlustleistung von

$$P_{\text{SENSE}} = I_{\text{M}}^2 R_{\text{SENSE}} = (3 \text{ A})^2 \cdot 50 \text{ m}\Omega = 450 \text{ mW}.$$

Die Zahl (450 mW) sagt jedoch noch nicht, ob der Widerstand dafür geeignet ist. Die elektrische Verlustleistung wird überwiegend in Wärme umgesetzt. Damit stellt sich die nächste Frage:

Wie stark erwärmt sich das Bauteil bei dieser Verlustleistung?

Um diese Frage zu beantworten, hilft eine Analogie zur elektrischen Schaltung. In vielen technischen Systemen lässt sich ein Fluss durch die Beziehung

$$\Delta \text{Potentialdifferenz} = \text{Widerstand} \cdot \frac{d(\text{Transportgröße})}{dt}$$

beschreiben.

Für den elektrischen Strom gilt beispielsweise

$$U = R \cdot I.$$

Die Spannungsdifferenz (U) treibt dabei den elektrischen Strom (I) durch den elektrischen Widerstand (R) .

Eine sehr ähnliche Beschreibung lässt sich für den Wärmetransport verwenden:

$$\Delta T = R_{\text{th}} \cdot \dot{Q}.$$

Dabei bezeichnet

- ΔT die Temperaturdifferenz zwischen zwei thermischen Punkten,
- R_{th} den thermischen Widerstand zwischen diesen Punkten und
- $\dot{Q}$ den Wärmestrom.

Die Einheit des thermischen Widerstands ist

$$[R_{\text{th}}] = \frac{\text{K}}{\text{W}}.$$

Ein thermischer Widerstand von beispielsweise $R_{\text{th}} = 80 \text{ K/W}$ bedeutet: Fließt ein Wärmestrom von 1 W durch diesen thermischen Pfad, entsteht zwischen seinen Endpunkten eine Temperaturdifferenz von 80 K .

Im stationären Zustand muss die im Widerstand erzeugte Verlustleistung als Wärme an die Umgebung abgegeben werden. Für eine vereinfachte Betrachtung kann deshalb

$$\dot{Q} \approx P_{\text{Verlust}}$$

gesetzt werden.

Damit erhält man

$$\Delta T = P_{\text{Verlust}} \cdot R_{\text{th}}.$$

Die Temperatur des Bauteils ergibt sich dann näherungsweise zu

$$T_{\text{Bauteil}} = T_{\text{Umgebung}} + P_{\text{Verlust}} \cdot R_{\text{th}}.$$

Diese Beziehung ist das thermische Gegenstück zum Ohmschen Gesetz.

Wichtig: Ein thermischer Widerstand beschreibt immer einen Wärmepfad **zwischen zwei definierten Punkten**.

Beispiele sind etwa



- Bauteil → Umgebung,
- Sperrschicht → Gehäuse,
- Gehäuse → Kühlkörper.

Ein Wert für R_{th} ist daher nur zusammen mit der Angabe sinnvoll, zwischen welchen Punkten er gilt.

Angenommen, für den betrachteten Aufbau gilt näherungsweise

$$R_{\text{th}} = 80 \text{ K/W}.$$

Bei

$$P_{\text{Verlust}} = 450 \text{ mW}$$

ergibt sich eine Temperaturerhöhung von

$$\Delta T = 0.45 \, \text{W} \cdot 80 \, \text{K/W} = 36 \, \text{K}.$$

Bei einer Umgebungstemperatur von

$$T_{\text{Umgebung}} = 40^\circ \text{C}$$

folgt damit

$$T_{\text{Bauteil}} \approx 40^\circ \text{C} + 36 \, \text{K} = 76^\circ \text{C}.$$

Die Temperaturdifferenz kann dabei sowohl in Kelvin als auch in Grad Celsius angegeben werden:

$$\Delta T = 36 \, \text{K} = 36^\circ \text{C}.$$

Für absolute Temperaturen müssen Kelvin und Grad Celsius dagegen unterschieden werden.

Die Rechnung ist bewusst ein vereinfachtes stationäres Modell. In einem realen SMD-Bauteil existieren mehrere Wärmepfade gleichzeitig. Wärme kann beispielsweise über die Anschlüsse in die Kupferflächen der Leiterplatte, über das Gehäuse an die Luft und über weitere mechanische Verbindungen abgegeben werden.

Deshalb hängt der effektive thermische Widerstand unter anderem von

- Kupferfläche und Leiterbahnbreite,
- Leiterplattendicke und Lagenaufbau,
- Padgeometrie,
- Luftströmung,
- Einbaulage und
- benachbarten Wärmequellen

Derating

Die im Datenblatt angegebene Nennleistung gilt üblicherweise nur unter definierten thermischen Bedingungen. Oberhalb einer bestimmten Umgebungs- oder Anschlussstemperatur muss die zulässige Verlustleistung P reduziert werden (siehe [figure 1](#)).

Diese Reduzierung wird als **Derating** bezeichnet.

Fig. 1: Derating

SS/m

Temperaturabhängigkeit des Widerstandswerts

Die lineare Temperaturabhängigkeit von Widerständen wurde bereits in EEE1 behandelt:

$$R(T) = R(T_0) \left[1 + \alpha (T - T_0) \right]$$

Für Präzisions- und Shunt-Widerstände ist diese Beschreibung im üblichen Arbeitsbereich häufig ausreichend.

Bei stark temperaturabhängigen Bauteilen, insbesondere **NTC-Thermistoren**, wird dagegen häufig ein exponentielles Modell verwendet:

$$R(T) = R(T_0) \exp \left[B \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right]$$

Eine allgemeinere Arrhenius-artige Darstellung lautet

$$R(T) = A \exp \left(\frac{B}{T} \right)$$

Die Konstante B wird mit der Einheit K angegeben; damit die Temperatur ist ebenso in Kelvin einzusetzen.

1.1.3 Widerstandsbauformen

Abmaße

Für denselben Widerstandswert sind häufig viele unterschiedliche Bauformen verfügbar. Ein $(10 \sim \text{m}\Omega)$ -Widerstand kann beispielsweise als 0402, 0603, 0805, 1206 oder als bedrahtetes Bauteil ausgeführt sein.

Bei SMD-Bauteilen ist zwischen imperialen und metrischen Baugrößenbezeichnungen zu unterscheiden:

imperial	metrisch	typische Abmessung
0402	1005	ca. $(1.0 \times 0.5 \sim \text{mm})$
0603	1608	ca. $(1.6 \times 0.8 \sim \text{mm})$

imperial	metrisch	typische Abmessung
0805	2012	ca. $(2.0 \times 1.25 \sim \mathrm{mm})$
1206	3216	ca. $(3.2 \times 1.6 \sim \mathrm{mm})$

Gerade in CAD-Systemen wie KiCad kann dies zu Verwechslungen führen: **0603 imperial** entspricht ungefähr **1608 metric**.

Die kleinste Bauform ist nicht automatisch die beste Wahl. Eine kleinere Bauform benötigt weniger Leiterplattenfläche, ist aber schwieriger zu handhaben und besitzt häufig eine geringere thermische Belastbarkeit.

Die folgenden Werte sind nur typische Größenordnungen; für eine reale Auswahl ist das Datenblatt entscheidend.

Bauform	Handlöten	typische Nennleistung	typische Verwendung
0402 / 1005Metric	schwierig	ca. $(50 \dots 100 \sim \mathrm{mW})$	hohe Packungsdichte
0603 / 1608Metric	mit Übung gut möglich	ca. $(100 \sim \mathrm{mW})$	Standard-SMD
0805 / 2012Metric	gut	ca. $(125 \sim \mathrm{mW})$	Entwicklung und universelle Anwendungen
1206 / 3216Metric	sehr gut	ca. $(250 \sim \mathrm{mW})$	höhere Belastbarkeit, Prototypen
THT 1/4 W	sehr einfach	typ. $(250 \sim \mathrm{mW})$	Handaufbau, Lehre, Prototypen

Wichtig: Die Bauform allein legt die Nennleistung nicht fest. Zwei 1206-Widerstände können je nach Technologie und Hersteller deutlich unterschiedliche Leistungsgrenzen besitzen.

Bei einem Shunt kommt ein bezüglich der Baugröße weiterer Punkt hinzu: Ein sehr kleiner Widerstandswert R bedeutet nicht, dass auch das Bauteil klein sein kann. Der Widerstand muss unter Umständen mehrere Ampere führen und dabei die entstehende Wärme abgeben.

Spezialfall: Shunt

Wie oben bereits schon berechnet wandelt ein Shunt wandelt einen Strom in eine messbare Spannung um.

In unserem Beispiel ergibt sich über $R_{\mathrm{SENSE}} = 50 \sim \mathrm{m}\Omega$ bei einem Strpm von $I_{\mathrm{M}} = 3 \sim \mathrm{A}$ eine Spannnung von $U_{\mathrm{SENSE}} = 150 \sim \mathrm{mV}$.

Aber: Warum wird nicht einfach ein deutlich größerer Widerstand verwendet, um ein größeres Messsignal zu erhalten?

Bei einem Shunt wirken zwei Anforderungen gegeneinander.

Eigenschaft	Kleiner (R_{SENSE})	Großer (R_{SENSE})
Messspannung $(U_{\mathrm{SENSE}} = I \cdot R_{\mathrm{SENSE}})$	– klein	+ groß
Eigenerwärmung / Verlustleistung $(P = I^2 R_{\mathrm{SENSE}})$	+ gering	– hoch

Eigenschaft	Kleiner R_{SENSE}	Großer R_{SENSE}
Spannungsabfall im Lastpfad	+ gering	– groß
Empfindlichkeit gegenüber Störungen	– höher	+ geringer
Anforderungen an Verstärker und Layout	– höher	+ geringer

Der Shunt muss daher so gewählt werden, dass die Messspannung ausreichend groß ist, ohne den Laststromkreis durch Spannungsabfall und Verlustleistung unnötig stark zu beeinflussen.

Shunt mit vier Anschlüssen

Bei Widerständen im Kiloohm-Bereich kann der Widerstand einer Leiterbahn normalerweise vernachlässigt werden. Bei einem Shunt im Milliohm-Bereich gilt dies nicht mehr.

Für eine Leiterbahn gilt näherungsweise

$$R = \rho \frac{l}{A} = \rho \frac{l}{b \cdot d}$$

Eine Kupferleiterbahn mit

$$l = 50 \text{ mm}, \quad b = 1 \text{ mm}, \quad d = 35 \text{ }\mu\text{m}$$

besitzt ungefähr

$$R_{\text{Leiterbahn}} \approx 25 \text{ m}\Omega$$

Damit liegt allein der Leiterbahnwiderstand bereits in derselben Größenordnung wie ein kleiner Shunt.

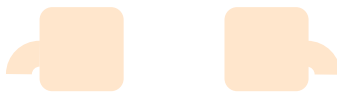
Wird die Spannung an den falschen Punkten gemessen, enthält das Messergebnis daher nicht nur den Spannungsabfall des Shunts, sondern zusätzlich Spannungsabfälle an Leiterbahnen, Kontakten und Lötstellen.

Fig. 2: Vierleiteranschluss eines Shunt-Widerstands

Cu Layer mit SMD Widerstand



Fehlerhafter 4-Leiter Anschluss



Korrektter 4-Leiter Anschluss



Text is not SVG - cannot display

Beim Vierleiter- oder Kelvin-Anschluss werden Laststrom und Spannungsmessung getrennt geführt. Zwei Anschlüsse führen den großen Laststrom. Zwei separate Sense-Leitungen erfassen die Spannung möglichst direkt am Widerstandselement.

Da der Eingang der nachfolgenden Messschaltung hochohmig ist, fließt durch die Sense-Leitungen nur ein sehr kleiner Strom. Ihr eigener Leitungswiderstand erzeugt deshalb praktisch keinen zusätzlichen Spannungsabfall.

Datenblattbeispiel

Exercise E01.1 Datenblatt eines realen Shunt-Widerstands

Wie sieht das Verhalten aus, wenn die Temperatur T gegen T_0 hin ansteigt?
 (Bsp. 2.5a) Beispiel Wirt und viele kleine Shunt-Serie Ohm- 2FC4 betrachtet. Ohm-Wert R_L
 Aussage lässt sich daraus für einen $(50 - \mathrm{m}\Omega)$ -Shunt ableiten?

Solution

Betrachten Sie insbesondere den Typ **FC4L32**.

Solution

[illegible]

Die folgende Tabelle zeigt die Widerstände der Inrush-Leistung und nicht die absolute Nennleistung des Widerstandswert, Stromgrenze bestimmend.

Dan ist einatome Widerstand Wert $V_P \cdot I_{P-N} = 1 \sim (\text{mathrm{Wt}} \cdot V)$

Der Wert darf jedoch nur für die im Datenblatt angegebenen Pulsbedingungen verwendet werden und sollte nicht als zulässiger Dauerstrom interpretiert werden, muss eine deutlich höhere kurzzeitige Belastbarkeit der Nennleistung zulässig.

Der FC4L32 erscheint daher für den betrachteten Betriebspunkt grundsätzlich geeignet.

Für eine endgültige Bauteilwahl müssten zusätzlich insbesondere die reale Umgebungstemperatur, das Leiterplattenlayout, die erwarteten Stromspitzen und die ergibt sich damit näherungsweise geforderte Messgenauigkeit betrachtet werden.

$$P_{\max}(110^{\circ}\mathrm{C}) \approx 0.53 \sim W.$$

Die Verlustleistung der Leit-Schaltung von

$$\left[0.45 \sim \mathrm{W} \right]$$

liegt noch darunter, allerdings nur mit deutlich kleinerer thermischer Reserve als bei niedriger Umgebungstemperatur.

1.1.4 Digitale Logik

Vom realen Schalter zur Logik

Digitale Signale werden häufig mit den Zuständen **HIGH** und **LOW** beschrieben. Physikalisch stehen dahinter jedoch keine abstrakten Zustände, sondern Spannungen.

Ein Logikgatter muss daher zwei Aufgaben erfüllen:

- Eingangsspannungen als HIGH oder LOW erkennen und
- am Ausgang wieder eine entsprechende Spannung erzeugen.

Im einfachsten Modell kann man sich den Ausgang eines Logikgatters als Schalter vorstellen, der den Ausgang entweder mit der positiven Versorgungsspannung oder mit dem Bezugspotential verbindet.

Was bedeutet HIGH und LOW?

In Schaltplänen und Simulationen werden digitale Zustände häufig mit **H** für *HIGH* und **L** für *LOW* bezeichnet.

Im einfachsten idealisierten Modell gilt beispielsweise bei einer Versorgung von $5\text{~}\mathrm{V}$: $L \rightarrow 0\text{~}\mathrm{V}$ und $H \rightarrow 5\text{~}\mathrm{V}$.

In einer realen Digitalschaltung ist diese Zuordnung jedoch nicht so scharf. Ein Eingang erkennt vielmehr zwei Spannungsbereiche:

- Spannungen unterhalb einer Grenze V_{IL} werden sicher als **LOW** erkannt.
- Spannungen oberhalb einer Grenze V_{IH} werden sicher als **HIGH** erkannt.
- Dazwischen liegt ein Bereich, in dem der logische Zustand nicht eindeutig definiert ist.



HIGH und LOW sind logische Zustände - keine festen Spannungswerte.

Welche Spannungen als HIGH bzw. LOW erkannt werden, hängt von der verwendeten Logikfamilie und der Versorgungsspannung ab.

VCC und VDD

Die positive Versorgungsspannung digitaler Schaltungen wird häufig mit V_{CC} oder V_{DD} bezeichnet.

Die Bezeichnungen stammen ursprünglich aus unterschiedlichen Transistortechnologien:

- V_{CC} stammt aus Schaltungen mit Bipolartransistoren und bezeichnet die Versorgung auf der Kollektorseite.
- V_{DD} stammt aus MOS-Schaltungen und bezeichnet die Versorgung auf der Drain-Seite.

Als Bezugspotential findet man entsprechend Bezeichnungen wie V_{EE} oder V_{SS} .

In vielen heutigen Digitalschaltungen gilt näherungsweise $V_{\text{SS}} = 0 \sim \text{V}$ und beispielsweise $V_{\text{DD}} = 3.3 \sim \text{V}$ oder $V_{\text{DD}} = 5 \sim \text{V}$.

V_{DD} bzw. V_{CC} ist die **Versorgungsspannung** der Schaltung.



- Ein HIGH-Pegel liegt häufig nahe an dieser Spannung, ist aber nicht automatisch exakt gleich V_{DD} bzw. V_{CC} .
- Ebenso liegt auch ein LOW-Pegel nicht exakt bei $0 \sim \text{V}$

In Datenblättern finden sich deshalb Bereiche, welche Spannungswerte als HIGH und LOW gewertet werden.

Schalter: Öffner und Schließer

Im folgenden wird die Logik durch die vereinfachte Schalterschaltung dargestellt. Auch ein Schalter ist zunächst nur ein Modell.

- Ein ideal geschlossener Schalter besitzt $R_{\text{on}} = 0\Omega$. An ihm fällt keine Spannung ab und er erzeugt keine Verlustleistung.
- Ein ideal geöffneter Schalter besitzt dagegen $R_{\text{off}} \rightarrow \infty$. Durch ihn fließt kein Strom.

Ein realer Schalter erreicht beide Grenzfälle nicht vollständig:

$$R_{\text{on}} > 0, \quad R_{\text{off}} < \infty.$$

Im eingeschalteten Zustand entstehen daher Leitverluste. Im ausgeschalteten Zustand kann ein kleiner Leckstrom fließen.

Diese Beschreibung wird später beim MOSFET erneut wichtig. Dort wird aus dem abstrakten (R_{on}) der Datenblattwert $(R_{\text{DS(on)}})$.

Ein **Schließer** stellt bei Betätigung eine Verbindung her. Ein **Öffner** unterbricht eine bestehende Verbindung.

Aus gesteuerten Öffnern und Schließern können logische Funktionen aufgebaut werden.

Der Inverter

Die einfachste logische Schaltung ist der Inverter.

Ein Inverter besitzt einen Eingang (X) und einen Ausgang (Y) . Ist der Eingang LOW, wird der Ausgang HIGH. Ist der Eingang HIGH, wird der Ausgang LOW.

Eingang (X)	Ausgang (Y)
L	H
H	L

Das interessante Detail ist hier nicht die Wahrheitstabelle, sondern die elektrische Umsetzung.

Simulation: Inverter aus komplementären Schaltern

Die Schaltung ähnelt bereits einer Halbbrücke: Ein Schalter verbindet den Ausgang mit der positiven Versorgung, der andere mit Masse.

Auch hier dürfen niemals beide Schalter dauerhaft gleichzeitig eingeschaltet sein, um einen Kurzschluss der Versorgungsspannungsquelle zu vermeiden.

Genau dieses Prinzip begegnet uns später bei der MOSFET-H-Brücke erneut.

Mehrere Schalter: AND, OR und ihre Negationen

Mehrere Schalter können in Reihe oder parallel geschaltet werden.

Bei einer **Reihenschaltung** kann ein Strompfad nur entstehen, wenn alle notwendigen Schalter geschlossen sind. Dieses Verhalten entspricht der Grundidee eines AND-Gatters.

Simulation: AND mit Schaltern

\(X_0\)	\(X_1\)	AND
L	L	L
L	H	L
H	L	L
H	H	H

Bei einer **Parallelschaltung** genügt dagegen bereits ein geschlossener Pfad. Dieses Verhalten entspricht der Grundidee eines OR-Gatters.

Simulation: OR mit Schaltern

\(X_0\)	\(X_1\)	OR
L	L	L
L	H	H
H	L	H
H	H	H

NAND und NOR

Werden die Ausgänge von AND bzw. OR anschließend invertiert, entstehen NAND und NOR.

NAND

Beim NAND ist der Ausgang nur dann LOW, wenn beide Eingänge HIGH sind.

\(X_0\)	\(X_1\)	NAND
L	L	H

$\backslash(X_0\backslash)$	$\backslash(X_1\backslash)$	NAND
L	H	H
H	L	H
H	H	L

Simulation: NAND mit Schaltern

NOR

Beim NOR ist der Ausgang nur dann HIGH, wenn beide Eingänge LOW sind.

$\backslash(X_0\backslash)$	$\backslash(X_1\backslash)$	NOR
L	L	H
L	H	L
H	L	L
H	H	L

Für diesen Kurs ist nicht entscheidend, die algebraische Darstellung der einzelnen Gatter auswendig zu lernen.

Wichtig ist vielmehr:



- welche Spannungsbereiche HIGH und LOW repräsentieren,
- wie Schalter daraus logische Zustände erzeugen,
- welche Ausgangszustände sich aus den Eingangszuständen ergeben und
- dass auch Logikgatter letztlich aus realen Transistoren mit endlichen Widerständen und Schaltzeiten bestehen.

Der Zusammenhang ist für die spätere Motortreiberschaltung wichtig: Die Logik auf der linken Seite und die Leistungstransistoren auf der rechten Seite können beide als Netzwerke gesteuerter Schalter verstanden werden. Die Leistungsniveaus und die Anforderungen an die realen Schalter unterscheiden sich jedoch erheblich.

Was ist im ROM?

In der vereinfachten Darstellung der Leit-Schaltung wurde die Ansteuerlogik zunächst als **ROM** (Read only Memory) gezeigt.

Das ROM erhält die Eingangssignale:

- \$CLK\$
- \$EN\$ bzw. das invertierte $\overline{EN}$
- \$OCP\$

und erzeugt daraus die vier Steuersignale:

- \$HS1\$
- \$LS1\$
- \$HS2\$
- \$LS2\$

Die ROM-Darstellung ist dabei zunächst nur eine **funktionale Beschreibung**: Für jede mögliche Kombination der Eingangssignale ist festgelegt, welche Ausgangssignale HIGH bzw. LOW sein sollen.

Das ROM kann daher als gespeicherte Wahrheitstabelle verstanden werden. Die Adresseingänge \$A0\$, \$A1\$ und \$A2\$ wählen eine Zeile dieser Tabelle aus; an den Datenausgängen \$D0\dots D3\$ erscheinen die zugehörigen Ausgangszustände.

Für die reale Schaltung ist ein ROM jedoch nicht zwingend notwendig. Dieselbe logische Funktion kann auch direkt mit Logikgattern aufgebaut werden.

In der Gatter-Schaltung lassen sich einige Funktionen direkt wiedererkennen:

- \$EN\$ gibt den Betrieb grundsätzlich frei.
- \$OCP\$ kann die Freigabe sperren.
- \$CLK\$ bestimmt, welche Seite der H-Brücke angesteuert wird.
- Inverter erzeugen die jeweils komplementären Signale.
- AND-Gatter verknüpfen Freigabe, Takt und Schutzsignale.

Die beiden Darstellungen beschreiben damit im Kern dieselbe Aufgabe:

Darstellung	Bedeutung
ROM	Zuordnung von Eingangskombinationen zu Ausgangskombinationen
Gatter-Schaltung	direkte Realisierung derselben Zuordnung mit logischen Grundfunktionen

Die Gatter-Schaltung enthält zusätzlich noch ein Detail, das in der ROM-Darstellung nicht sichtbar ist: Zwischen den logischen Signalen und den vier Gate-Steuersignalen befinden sich RC-Glieder.

Diese erzeugen eine kleine zeitliche Verzögerung und dienen dazu, dass beim Umschalten nicht gleichzeitig High-Side- und Low-Side-Schalter eines Brückenzweigs eingeschaltet sind.

Diese sogenannte **Totzeit** wird später bei der H-Brücke noch genauer betrachtet.



Die ROM- und die Gatter-Darstellung zeigen zwei unterschiedliche Sichtweisen auf dieselbe Funktion:

- Das ROM beschreibt **was** ausgegeben werden soll.
- Die Gatter-Schaltung zeigt **wie** diese Funktion mit elementaren Logikbausteinen realisiert werden kann.

1.2 Häufige Fehler

- **Nennwert und tatsächlichen Wert gleichsetzen**: Die Toleranz beschreibt bereits bei Referenzbedingungen eine mögliche Abweichung.
- **Nennleistung ohne Randbedingungen verwenden**: Eine Leistungsangabe gilt nur für die

im Datenblatt angegebenen thermischen Bedingungen.

- **Bauteilgröße mit fester Leistung verknüpfen:** Eine Bauform gibt keine allgemeingültige Nennleistung vor.
- **0603 als eindeutige Größenangabe verstehen:** Es muss zwischen imperialer und metrischer Bezeichnung unterschieden werden.
- **Leiterbahnen als ideale Leiter betrachten:** Bei Milliohm-Shunts können Leiterbahn- und Kontaktwiderstände einen erheblichen Messfehler erzeugen.
- **Kelvin-Sense zu weit vom Widerstand abgreifen:** Die Sense-Leitungen müssen den Spannungsabfall möglichst direkt am Widerstandselement erfassen.
- **Reale Schalter mit idealen Grenzfällen verwechseln:** Reale Schalter besitzen endliches (R_{on}) und (R_{off}) .

1.3 Übungen

Exercise E01.2 Auswahl eines Shunts

In einem Mess-Schaltplan ist eine Strommessung bis $I_M = 5\text{ A}$ vorgesehen. Die Bedingung für die Wahl des Shunts ist $P_{\text{Shunt}} \leq 0.5\text{ W}$. Welche Variante kann verwendet werden?

Variante	Widerstand
A	$20\text{ m}\Omega$
B	$50\text{ m}\Omega$

Bestimmen Sie für beide Shunts die Messspannung bei $I_M = 5\text{ A}$.

Mit kleinerem Widerstand sinken zwar Verlustleistung und

Spannungsabfall, aber die Messspannung sinkt ebenfalls.

Für Variante A gilt: $P_A = (5\text{ A})^2 \cdot 20\text{ m}\Omega = 0.5\text{ W}$.

Solution

Variante B überschreitet die Messspannung U_M und die zulässige Verlustleistung.

Für Variante A gilt: $P_A = (5\text{ A})^2 \cdot 20\text{ m}\Omega = 0.5\text{ W}$ und $U_A = 5\text{ A} \cdot 20\text{ m}\Omega = 100\text{ mV}$.

Für Variante B gilt: $P_B = (5\text{ A})^2 \cdot 50\text{ m}\Omega = 1.25\text{ W}$ und $U_B = 5\text{ A} \cdot 50\text{ m}\Omega = 250\text{ mV}$.

Unter dieser Randbedingung kann daher nur Variante A verwendet werden.

Die Wahl des Shunts ist daher ein Kompromiss zwischen

Für Variante A gilt:

• geringer Beeinflussung des Laststromkreises und

• einem ausreichend großen Messsignal

$U_{\text{SENSE,A}} = I_M \cdot R_{\text{SENSE}} = 5\text{ A} \cdot 20\text{ m}\Omega = 100\text{ mV}$.

Für Variante B gilt:

$U_{\text{SENSE,B}} = 5\text{ A} \cdot 50\text{ m}\Omega = 250\text{ mV}$.

$= 250\text{ mV}$.

Der größere Shunt erzeugt somit das größere Messsignal.

Exercise E01.3 Temperatur und Derating

Ein Schalterbauteil für ein Bordnetz mit einer Nennleistung von $P_{\text{Nenn}} = 150 \text{ W}$ ist im Schaltplan mit einem Widerstandssymbol dargestellt. Die zulässige Verlustleistung für die Widerstände beträgt $P_{\text{Zul}} = 100 \text{ W}$. Der thermische Widerstand von $R_{\text{th}} = 80 \text{ K/W}$ ist angenommen. Die Umgebungstemperatur beträgt $T_{\text{U}} = 60^\circ \text{C}$.

Solution

1. Bestimmen Sie die Temperaturerhöhung des Shunts.

Solution

$$T_{\text{B}} = T_{\text{U}} + \Delta T$$

Beispiel: Die Temperatur muss mit den zulässigen Temperaturen und Leistungsgrenzen des konkreten Bauteils verglichen werden.

- größere Kupferflächen,

zusätzliche Kühlmaßnahmen, oder bei $T_{\text{B}} = 96^\circ \text{C}$ noch die volle Nennleistung zulässig ist, bereits ein Derating berücksichtigt werden muss.

Damit folgt:

Auch der angenommene thermische Widerstand gilt nur für einen bestimmten

$$\Delta T_{\text{th}} = 0,45 \text{ W} \cdot \text{K/W} \cdot 80 \text{ K/W} = 36 \text{ K}.$$

den effektiven thermischen Widerstand verändern.

Exercise E01.4 Warum Kelvin-Messung?

Ein Schalterbauteil für ein Bordnetz mit einer Nennleistung von $P_{\text{Nenn}} = 150 \text{ W}$ ist im Schaltplan mit einem Widerstandssymbol dargestellt. Die zulässige Verlustleistung für die Widerstände beträgt $P_{\text{Zul}} = 100 \text{ W}$. Der thermische Widerstand von $R_{\text{th}} = 80 \text{ K/W}$ ist angenommen. Die Umgebungstemperatur beträgt $T_{\text{U}} = 60^\circ \text{C}$.

Solution Bei einer Zweileitermessung befinden sich im erfassten Strompfad zusätzlich Leiterbahn- und Kontaktwiderstände von insgesamt $R_{\text{parasitär}} = 20 \text{ m}\Omega$.

1. Welche Spannung fällt tatsächlich am Shunt ab?

Die absolute Abweichung beträgt höchstens $\pm 10\%$ der gemessenen Spannung.

Solution Der insgesamt erfasste Widerstand beträgt:

$$R_{\text{gesamt}} = R_{\text{Bauteil}} + R_{\text{parasitär}} = 150 \text{ m}\Omega + 20 \text{ m}\Omega = 170 \text{ m}\Omega.$$

$$U_{\text{gesamt}} = I_{\text{Nenn}} \cdot R_{\text{gesamt}} = 1,5 \text{ A} \cdot 170 \text{ m}\Omega = 0,255 \text{ V}.$$

Der relative Fehler beträgt $\pm 10\%$.

$$U_{\text{Bauteil}} = U_{\text{gesamt}} \cdot \frac{R_{\text{Bauteil}}}{R_{\text{gesamt}}} = 0,255 \text{ V} \cdot \frac{150 \text{ m}\Omega}{170 \text{ m}\Omega} = 0,227 \text{ V}.$$

$$U_{\text{Bauteil}} = I_{\text{Nenn}} \cdot R_{\text{Bauteil}} = 1,5 \text{ A} \cdot 150 \text{ m}\Omega = 0,225 \text{ V}.$$

$$U_{\text{gesamt}} = I_{\text{Nenn}} \cdot R_{\text{gesamt}} = 1,5 \text{ A} \cdot 170 \text{ m}\Omega = 0,255 \text{ V}.$$

Damit beträgt der relative Messfehler $\pm 10\%$.

Exercise E01.5 HIGH und LOW sind Spannungsbereiche

Ein digitaler Bauelementeingang, HIGH oder LOW, ist ein Spannungspegel, der korrekt?

Laut Datenblatt gelten Eingangsspannungen bis $V_{\text{IL}} = 0.8 \text{ V}$ sicher als LOW und Eingangsspannungen ab $V_{\text{IH}} = 2.0 \text{ V}$ sicher als HIGH.

1. Ordnen Sie die Spannungen 0.4 V , 1.4 V und 2.8 V den Zuständen LOW, undefiniert oder HIGH zu.

Solution
Die HIGH- und LOW-Spannungsbereiche sind durch die Spannungspegel V_{IH} und V_{IL} definiert. Ein Eingangsspannungswert, der zwischen V_{IL} und V_{IH} liegt, ist als logischer Zustand nicht eindeutig definiert.

Alle Eingangsspannungen unterhalb der garantierten HIGH-Schwelle V_{IH} werden sicher als HIGH interpretiert.

- die möglichen Ausgangspegel,

Außerhalb des garantierten Eingangsspannungsbereichs ist die Veranschaulichung des logischen Zustands nicht zwingend exakt die Veranschaulichung des logischen Zustands. Ein Eingangsspannungswert von 0.4 V liegt unterhalb von $V_{\text{IL}} = 0.8 \text{ V}$ und wird daher sicher als **LOW** erkannt.

Sie ist jedoch nicht mit dem logischen Zustand HIGH gleichzusetzen.

1.4 V liegt zwischen V_{IL} und V_{IH} . Für diesen Bereich ist kein eindeutiger logischer Zustand garantiert.

2.8 V liegt oberhalb von $V_{\text{IH}} = 2.0 \text{ V}$ und wird daher sicher als **HIGH** erkannt.

Exercise E01.6 Vom ROM zur Logik

Die Wahrheitstabelle zeigt die Eingangs- und Ausgangssignale eines ROMs. Das ROM hat drei Eingangsleitungen und vier Datenausgänge.

Solution
1. Wie viele unterschiedliche Eingangskombinationen können mit drei binären Eingängen ausgewählt werden?

Solution

Das ROM besitzt vier Datenausgänge.

Bei der ROM-Veranschaulichung wird die Eingangs-Signalfunktion als Ausgangskombination als für jede ausgewählte Eingangskombination wird daher ein Wort aus vier Bits für jede ausgewählte Eingangskombination.

Darüber hinaus können später beispielsweise

Das ROM besitzt zwei logische Ausgänge, die die Eingangs-Signalfunktion als Ausgangskombination als für jede ausgewählte Eingangskombination wird daher ein Wort aus vier Bits für jede ausgewählte Eingangskombination.

Damit können mit drei binären Eingängen ausgewählt werden.

Bei der ROM-Veranschaulichung wird die Eingangs-Signalfunktion als Ausgangskombination als für jede ausgewählte Eingangskombination wird daher ein Wort aus vier Bits für jede ausgewählte Eingangskombination.

Das ROM besitzt zwei logische Ausgänge, die die Eingangs-Signalfunktion als Ausgangskombination als für jede ausgewählte Eingangskombination wird daher ein Wort aus vier Bits für jede ausgewählte Eingangskombination.

Sie ist jedoch nicht mit dem logischen Zustand HIGH gleichzusetzen.

Außerdem wird deutlich, dass auch die Logik selbst aus realen elektronischen

Schaltplan ist. Damit entsteht die Verbindung zum später behandelten MOSFET als Leistungsschalter.

1.4 Zusammenfassung

- Das ideale Widerstandsmodell beschreibt nur einen Teil des realen Bauteilverhaltens.
- Ein Datenblatt wird ausgehend von einer konkreten Schaltungsanforderung gelesen.
- Verlustleistung und thermischer Widerstand bestimmen gemeinsam die Temperaturerhöhung eines Bauteils.
- Baugröße beeinflusst Fertigung, thermisches Verhalten und Belastbarkeit, legt diese Eigenschaften aber nicht allein fest.
- Ein Shunt erzeugt ein Messsignal, beeinflusst aber gleichzeitig den Laststromkreis.
- Bei Milliohm-Widerständen müssen Leiterbahn- und Kontaktwiderstände mit betrachtet werden.
- Kelvin-Anschlüsse trennen Laststrompfad und Messpfad.
- Reale Schalter besitzen endliche Ein- und Ausschaltwiderstände und bilden die Grundlage elektronischer Logik.

1.5 Ausblick

In der Motortreiberschaltung ändern sich Spannungen und Ströme nicht nur zwischen zwei statischen Zuständen. Durch die Pulsweitenmodulation treten periodische Signale mit unterschiedlichen Frequenzanteilen auf.

Im nächsten Block werden deshalb **Frequenzgang, Dezibel und Bode-Diagramm** als grundlegende Werkzeuge eingeführt.

From:

<https://wiki.mexle.org/> - **MEXLE Wiki**

Permanent link:

https://wiki.mexle.org/elektronische_schaltungstechnik/block01?rev=1790542253

Last update: **2026/09/27 22:50**

