

# Block 01 — Vom Schaltplansymbol zum realen Bauteil

## Student Group

| First Name | Surname | Matrikel Nr. |
|------------|---------|--------------|
|            |         |              |
|            |         |              |
|            |         |              |

## Table of Contents

|                                                             |    |
|-------------------------------------------------------------|----|
| <b>Block 01 — Vom Schaltplansymbol zum realen Bauteil</b>   | 3  |
| <b>1.0 Einführung</b>                                       | 3  |
| 1.0.1 Die Leit-Schaltung                                    | 4  |
| 1.0.2 Vereinfachtes Modell                                  | 5  |
| 1.0.3 Warum beginnen wir mit einem Widerstand?              | 6  |
| 1.0.1 Lernziele                                             | 6  |
| 1.0.2 Vorbereitung zu Hause                                 | 7  |
| 1.0.3 90-Minuten-Plan                                       | 7  |
| 1.0.4 Konzeptübersicht                                      | 7  |
| <b>1.1 Kerninhalt</b>                                       | 7  |
| 1.1.1 Vom Schaltplansymbol zum realen Widerstand            | 7  |
| Datenblätter lesen                                          | 8  |
| 1.1.2 Verlustleistung, Erwärmung und thermischer Widerstand | 8  |
| Derating                                                    | 9  |
| Temperaturabhängigkeit des Widerstandswerts                 | 9  |
| 1.1.3 Bauformen: Warum nicht immer das kleinste Bauteil?    | 10 |
| 1.1.4 Strommessung mit einem Shunt                          | 11 |
| Datenblattbeispiel                                          | 11 |
| 1.1.5 Warum braucht ein Shunt vier Anschlüsse?              | 11 |
| Falstad-Experiment                                          | 12 |
| 1.1.6 Vom realen Schalter zur Logik                         | 12 |
| Öffner und Schließer                                        | 13 |
| Inverter                                                    | 13 |
| NAND und NOR                                                | 13 |
| <b>1.2 Häufige Fehler</b>                                   | 14 |
| <b>1.3 Übungen</b>                                          | 14 |
| Kurze Aufgaben                                              | 14 |

|                                                             |    |
|-------------------------------------------------------------|----|
| Exercise E1.1 Shunt: Messspannung und Verlustleistung ..... | 14 |
| Exercise E2.2 Bauteiltemperatur .....                       | 14 |
| Exercise E3.3 Realer Schalter .....                         | 15 |
| Längere Aufgaben .....                                      | 15 |
| Exercise E4.4 Datenblatt eines Shunt-Widerstands .....      | 15 |
| Exercise E5.5 Zwei- und Vierletermessung .....              | 15 |
| <b>1.4 Zusammenfassung</b> .....                            | 16 |
| <b>1.5 Ausblick</b> .....                                   | 16 |

# Block 01 — Vom Schaltplansymbol zum realen Bauteil

## 1.0 Einführung

In diesem Semester wird die unten dargestellte Schaltung als durchgehendes Beispiel verwendet. Sie steuert einen Gleichstrommotor über eine MOSFET-Vollbrücke, erfasst den Motorstrom über einen Shunt und kann bei Überstrom selbstständig abschalten.

Auf den ersten Blick wirkt die Schaltung relativ komplex. Tatsächlich bestehen die meisten ihrer Teilfunktionen jedoch aus Bauelementen und Konzepten, die bereits in vorherigen Veranstaltungen behandelt wurden.

1. Die grundlegenden Schaltungen mit **Widerständen** und **Leitern** wurden bereits in EEE1 eingeführt. Insbesondere Ohmsches Gesetz, spezifischer Widerstand und die lineare Temperaturabhängigkeit werden in diesem Kurs vorausgesetzt. (hier im wiki in englisch unter [EEE1: Resistance and Conductance](#)).
2. **Operationsverstärker**, **Rückkopplung** und einfache **Verstärkerschaltungen** wurden ebenfalls bereits behandelt. Komparator und Schmitt-Trigger werden später in diesem Kurs in einer konkreten Schutzschaltung detaillierter dargestellt (siehe [EEE1: Comparator and Schmitt Trigger](#)).
3. Halbleiterbauelemente wie **Diode**, **Bipolartransistor** und **MOSFET** wurden in EEE2 eingeführt. In diesem Kurs wird daher nicht erneut hergeleitet, wie ein MOSFET physikalisch funktioniert. Stattdessen interessiert uns, wie sich ein realer MOSFET in einer konkreten Leistungsschaltung verhält und wie er angesteuert werden muss (Einführung in die Halbleiterelemente in [EEE2: Electrical Engineering and Electronics 2](#), Block 11 -14).
4. Auch die digitale Logik auf der linken Seite der Schaltung ist im Grundstudium angestrichen worden. Boolesche Algebra und Wahrheitstabellen wurden bereits in der Digitaltechnik bzw. Informatik behandelt (hier im wiki unter [Boolean Algebra and Logic Gates](#))

Damit stellt sich zunächst eine berechtigte Frage:



**Wenn die einzelnen Bauteile und Grundprinzipien bereits bekannt sind - warum beschäftigen wir uns in Elektronischer Schaltungstechnik noch einmal damit?**

Die bisherigen Veranstaltungen haben hauptsächlich die **Modelle und Grundfunktionen einzelner Bauelemente** vermittelt. In einer realen Schaltung müssen diese Bauteile jedoch gemeinsam funktionieren.

1. Ein **Widerstand** besitzt beispielsweise nicht nur einen Widerstandswert. Er besitzt neben einem Temperaturkoeffizienten auch eine Toleranz, eine maximale Verlustleistung, eine Baugröße und einen thermischen Widerstand.
2. Ein **Kondensator** besitzt nicht nur eine Kapazität. Abhängig von Bauart, Spannung und

Frequenz ändern sich seine Eigenschaften teilweise erheblich.

3. Ein **MOSFET** ist nicht einfach nur „ein Schalter“. Im jedem Zustand besitzt er einen endlichen Widerstand; sein Gate muss geladen und entladen werden und seine zulässigen Spannungen und Ströme sind begrenzt.
4. Ein **Operationsverstärker** besitzt keine unendliche Verstärkung bei jeder Frequenz. Seine Eingangs- und Ausgangsspannungen sind begrenzt und hängen von der Versorgungsspannung ab.
5. Selbst eine digitale logische Funktion wird letztlich durch reale elektronische Schalter mit endlichen Schaltzeiten umgesetzt.

### Der Schwerpunkt dieses Kurses liegt daher nicht mehr auf der Frage

„Wie funktioniert dieses Bauteil grundsätzlich?“



### sondern auf den Fragen

1. „Wie verhält sich dieses Bauteil in einer realen Schaltung?“
2. „Welche Angaben im Datenblatt sind dafür relevant?“
3. „Welche Grenzen des idealen Modells werden wichtig?“
4. „Wie beeinflussen sich mehrere Bauteile gegenseitig?“

## 1.0.1 Die Leit-Schaltung

Die vollständige Schaltung kann in mehrere funktionale Bereiche zerlegt werden:

- **Nutzereingabe und Hauptschalter:**  
Aktivierung des Motortreibers und Vorgabe des PWM-Signals.
- **Gate-Treiber-Logik:**  
Erzeugung der Steuersignale für die vier Leistungstristoren und Vermeidung gleichzeitiger Einschaltzustände.
- **Gate-Treiber:**  
Anpassung der Logiksignale an die Anforderungen der MOSFET-Gates.
- **MOSFET-Vollbrücke:**  
Steuerung von Stromrichtung und Motorleistung.
- **Spannungsversorgung:**  
Versorgung des Leistungsteils und Erzeugung einer zusätzlichen Treiberspannung.
- **Strommessung:**  
Erfassung des Motorstroms über einen niederohmigen Shunt.
- **Überstromdetektion:**  
Verstärkung des Shuntsignals, Vergleich mit einer Referenzspannung und Abschaltung bei zu großem Strom.

Diese Blöcke werden im Laufe des Semesters schrittweise geöffnet und analysiert.

Nicht jede Teilfunktion kann bereits am Anfang vollständig verstanden werden. So wird beispielsweise der Bootstrap-Kondensator erst sinnvoll, nachdem die High-Side-Ansteuerung eines N-Kanal-MOSFETs untersucht wurde. Ebenso lässt sich die LC-Struktur der Hilfsversorgung erst später vollständig einordnen.

Die Schaltung wird daher wie ein „**Adventskalender**“ behandelt: In jedem Block wird ein weiterer

Teil geöffnet und mit bereits bekannten Konzepten verknüpft.

## 1.0.2 Vereinfachtes Modell

Für den Einstieg wird die reale Schaltung zunächst stark vereinfacht.

Die Vollbrücke wird zunächst durch ideale Schalter aufgebaut und Steuersignale werden durch einen abstrakten Logikblock erzeugt.

Damit bleiben drei wesentliche Funktionen sichtbar:

- **Steuern:**  
Die Logik entscheidet, welche Schalter geöffnet oder geschlossen sind.
- **Leistung übertragen:**  
Die Vollbrücke bestimmt Stromrichtung und Spannung am Motor.
- **Messen und schützen:** \\Der Shunt misst den Strom und die Schutzschaltung kann die Brücke abschalten.

Diese vereinfachte Darstellung ist kein alternatives Schaltungsdesign, sondern ein **Modell der vollständigen Schaltung**.

Im Verlauf des Semesters werden die idealisierten Blöcke schrittweise durch reale Schaltungen ersetzt.

Beispielsweise wird aus

1. dem idealen Schalter später MOSFET + Gate-Widerstand + Gate-Treiber, und aus
2. der Strommessung wird später RSENSE + Operationsverstärker + Filter + Komparator.

Aber auch in der vereinfachten Schaltung gibt es eine Nomenklatur, welche in vielen anderen Schaltungen zu finden sind:

| Abkürzung | Begriff                              | Erklärung                                                                                                                                                |
|-----------|--------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| CLK       | Clock                                | Signal des Taktgebers. Im Beispiel wird damit die PWM mit einer Frequenz von $30~\mathrm{kHz}$ erzeugt.                                                  |
| EN        | Enable                               | Freigabesignal der Schaltung. Nur bei aktivem EN darf der Motortreiber den Motor ansteuern.                                                              |
| HS        | High Side                            | Bezeichnet einen Schalter auf der Seite der positiven Versorgungsspannung der Halbbrücke. HS1 und HS2 sind die beiden High-Side-Schalter der Vollbrücke. |
| LS        | Low Side                             | Bezeichnet einen Schalter auf der Seite des Bezugspotentials bzw. der Masse. LS1 und LS2 sind die beiden Low-Side-Schalter der Vollbrücke.               |
| VM        | Motor Voltage / Motor Supply Voltage | Versorgungsspannung des Leistungsteils bzw. der Vollbrücke. Im Beispiel beträgt diese $20~\mathrm{V}$ .                                                  |
| RSENSE    | Sense Resistor / Shunt               | Niederohmiger Messwiderstand zur Erfassung des Motorstroms. Der Strom erzeugt daran die Messspannung $U_{\mathrm{SENSE}} = I \cdot R_{\mathrm{SENSE}}$ . |

| Abkürzung | Begriff                 | Erklärung                                                                                                                                        |
|-----------|-------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| OCP       | Over-Current Protection | Überstromschutz. Das Signal zeigt an, dass der festgelegte maximale Motorstrom überschritten wurde und dient zur Abschaltung der Leistungsstufe. |
| ROM       | Read Only Memory        | Nicht-flüchtiger Festwertspeicher, der Daten auch ohne Stromversorgung behält.                                                                   |

### 1.0.3 Warum beginnen wir mit einem Widerstand?

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 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 Messbereich bewerten,
- den Einfluss von Leiterbahn- und Kontaktwiderständen auf eine Milliohm-Messung erklären,
- den Aufbau und Zweck einer Kelvin-/Vierletermessung erklären,
- einen idealen und einen realen Schalter anhand von  $(R_{\text{on}})$  und  $(R_{\text{off}})$  unterscheiden,
- aus gesteuerten Schaltern Inverter, NAND und NOR qualitativ ableiten.

## 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  $(50\text{ m}\Omega)$  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 wissen wir aus dem Schaltplansymbol – und was nicht?
2. **Kernkonzepte (55-60 min):** reales Bauteil, Datenblatt, Verlustleistung, Temperatur, Bauformen, Shunt und Kelvin-Messung.
3. **Vom Schalter zur Logik (15-18 min):** idealer und realer Schalter, Inverter, NAND und NOR.
4. **Geführte Übung (5-10 min):** kurze Datenblatt- bzw. Falstad-Aufgabe.
5. **Abschluss (5 min):** Zusammenfassung und typische Fehler.

## 1.0.4 Konzeptübersicht

1. Ein Schaltplansymbol beschreibt nur den Teil eines Bauteils, der für ein bestimmtes Modell relevant ist. Für die reale BauteilAuswahl sind zusätzliche elektrische, thermische und mechanische Angaben notwendig.
2. Verlustleistung ist erst zusammen mit dem thermischen Aufbau aussagekräftig. Ein elektrischer Wert wie  $(P=0.5\text{ W})$  beantwortet noch nicht die Frage, wie warm das Bauteil wird.
3. Bei Widerständen im Milliohm-Bereich können Leiterbahnen, Lötstellen und Kontaktwiderstände einen wesentlichen Teil des Messfehlers verursachen. Deshalb müssen Strompfad und Messpfad getrennt betrachtet werden.
4. Ein idealer Schalter besitzt  $(R_{\text{on}}=0)$  und  $(R_{\text{off}}\rightarrow\infty)$ . Reale Schalter nähern sich diesen Grenzfällen an; mehrere gesteuerte Schalter bilden die Grundlage digitaler Logik.

# 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  $\Delta R$** : 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 Shunt aus der Leit-Schaltung. Bei

$R_{\text{SENSE}} = 50 \sim \Omega$

und einem Motorstrom von

$$I_{\text{M}} = 3 \cdot I_{\text{A}}$$

entsteht eine Verlustleistung von

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

Die Zahl (450 mW) sagt jedoch noch nicht, ob der Widerstand dafür geeignet ist.

Die elektrische Verlustleistung wird überwiegend in Wärme umgesetzt. Näherungsweise kann die Temperaturerhöhung über den thermischen Widerstand beschrieben werden:

$$\Delta T = P \cdot R_{\text{th}}$$

Damit folgt

$$T_{\text{Bauteil}} = T_{\text{Umgebung}} + P \cdot R_{\text{th}}$$

Angenommen, für einen konkreten Aufbau gilt näherungsweise

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

Bei ( $P = 450 \text{ mW}$ ) steigt die Temperatur dann um

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

Bei einer Umgebungstemperatur von ( $40^\circ\text{C}$ ) ergibt sich damit

$$T_{\text{Bauteil}} \approx 76^\circ\text{C}$$

Diese Rechnung ist bewusst nur eine Näherung. Bei SMD-Bauteilen wird ein Teil der Wärme über die Anschlüsse in die Leiterplatte abgegeben. Kupferfläche, Leiterplattendicke, benachbarte Bauteile und Luftströmung verändern daher die tatsächliche Temperatur.

## Derating

Die im Datenblatt angegebene Nennleistung gilt üblicherweise nur unter definierten thermischen Bedingungen. Oberhalb einer bestimmten Umgebungs- oder Anschlussstemperatur muss die zulässige Verlustleistung reduziert werden.

Diese Reduzierung wird als **Derating** bezeichnet.

[DATENBLATTABBILDUNG: Derating-Kennlinie des verwendeten Shunts]

Lesen Sie aus der Kennlinie ab, bis zu welcher Temperatur die volle Nennleistung zulässig ist und wie die Belastbarkeit oberhalb dieser Temperatur abnimmt.

## Temperaturabhängigkeit des Widerstandswerts

Die lineare Temperaturabhängigkeit von Widerständen wurde bereits in EEE1 behandelt:

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

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 Temperatur ist dabei in Kelvin einzusetzen.

### 1.1.3 Bauformen: Warum nicht immer das kleinste Bauteil?

Für denselben Widerstandswert sind häufig viele unterschiedliche Bauformen verfügbar. Ein  $10\,\text{k}\Omega$ -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. $1.0 \times 0.5 \text{ mm}$  |
| 0603     | 1608     | ca. $1.6 \times 0.8 \text{ mm}$  |
| 0805     | 2012     | ca. $2.0 \times 1.25 \text{ mm}$ |
| 1206     | 3216     | ca. $3.2 \times 1.6 \text{ mm}$  |

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 / 1005 | schwierig             | ca. $50 \dots 100 \text{ mW}$ | hohe Packungsdichte                     |
| 0603 / 1608 | mit Übung gut möglich | ca. $100 \text{ mW}$          | Standard-SMD                            |
| 0805 / 2012 | gut                   | ca. $125 \text{ mW}$          | Entwicklung und universelle Anwendungen |
| 1206 / 3216 | sehr gut              | ca. $250 \text{ mW}$          | höhere Belastbarkeit, Prototypen        |
| THT 1/4 W   | sehr einfach          | typ. $250 \text{ mW}$         | Handaufbau, Lehre, Prototypen           |

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

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

### 1.1.4 Strommessung mit einem Shunt

Ein Shunt wandelt einen Strom in eine messbare Spannung um:

$$U_{\text{SENSE}} = I_{\text{M}} R_{\text{SENSE}}.$$

Für  $(R_{\text{SENSE}} = 50 \sim \text{m}\Omega)$  und  $(I_{\text{M}} = 3 \sim \text{A})$  gilt

$$U_{\text{SENSE}} = 150 \sim \text{mV}.$$

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

Bei einem Shunt wirken zwei Anforderungen gegeneinander.



Ein größerer Shunt erzeugt eine größere Messspannung und erleichtert damit die nachfolgende Signalverarbeitung. Gleichzeitig steigen Spannungsabfall, Verlustleistung und Eigenerwärmung.

Ein kleinerer Shunt beeinflusst den Laststromkreis weniger. Dafür wird die Messspannung kleiner. Offsetspannungen, Störungen und zusätzliche Widerstände im Layout gewinnen relativ an Bedeutung.

### Datenblattbeispiel

Für diesen Block sollte ein konkreter Vierleiter-Shunt mit einem Widerstandswert in der Größenordnung  $(10 \dots 50 \sim \text{m}\Omega)$  verwendet werden.

Im Datenblatt sind mindestens folgende Punkte zu untersuchen:

1. Nennwiderstand und Toleranz,
2. Temperaturkoeffizient,
3. Nennleistung,
4. Derating,
5. Pulsbelastbarkeit,
6. Abmessungen,
7. Lage der Last- und Sense-Anschlüsse.

Die entscheidende Frage lautet nicht „Welcher Wert steht im Datenblatt?“, sondern jeweils: **Unter welchen Bedingungen gilt dieser Wert?**

### 1.1.5 Warum braucht ein Shunt vier Anschlüsse?

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.



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.

## Falstad-Experiment

Die Simulation enthält

1. einen  $(50 \text{ m}\Omega)$ -Shunt,
2. zwei Leiterbahn- bzw. Kontaktwiderstände,
3. einen einstellbaren Laststrom,
4. eine Zweileiter- und eine Vierleitermessung.

Vergleichen Sie beide Messspannungen. Erhöhen Sie anschließend den Laststrom und die Leiterbahnwiderstände. Welche Messung verändert sich und warum?

### 1.1.6 Vom realen Schalter zur Logik

Auch ein Schalter ist zunächst nur ein Modell.

Ein ideal geschlossener Schalter besitzt

$$R_{\text{on}} = 0.$$

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  $R_{\text{on}}$  der Datenblattwert  $R_{\text{DS(on)}}$ .

## Öffner und Schließer

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

Aus gesteuerten Öffnern und Schließern können logische Funktionen aufgebaut werden.

## Inverter

Beim Inverter gilt:

| $A$ | $Y$ |
|-----|-----|
| 0   | 1   |
| 1   | 0   |

Damit ist

$$Y = \overline{A}.$$

## NAND und NOR

Werden mehrere gesteuerte Schalter miteinander verschaltet, entstehen beispielsweise NAND- und NOR-Funktionen.

Für NAND gilt

$$Y = \overline{A \cdot B}.$$

| $A$ | $B$ | $Y$ |
|-----|-----|-----|
| 0   | 0   | 1   |
| 0   | 1   | 1   |
| 1   | 0   | 1   |
| 1   | 1   | 0   |

Für NOR gilt

$$Y = \overline{A + B}.$$

| $A$ | $B$ | $Y$ |
|-----|-----|-----|
| 0   | 0   | 1   |
| 0   | 1   | 0   |

| $\backslash(A\backslash)$ | $\backslash(B\backslash)$ | $\backslash(Y\backslash)$ |
|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| 1                         | 0                         | 0                         |
| 1                         | 1                         | 0                         |



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.

## 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  $\backslash(R_{\rm on}\backslash)$  und  $\backslash(R_{\rm off}\backslash)$ .

## 1.3 Übungen

### Kurze Aufgaben

#### Exercise E1.1 Shunt: Messspannung und Verlustleistung

Ein Strommesswiderstand mit  $\backslash(R_{\rm SENSE}=50\sim\mathrm{m}\Omega\backslash)$  wird von einem Strom von  $\backslash(I=3\sim\mathrm{A}\backslash)$  durchflossen.

1. Bestimmen Sie die Messspannung  $\backslash(U_{\rm SENSE}\backslash)$ .
2. Bestimmen Sie die Verlustleistung  $\backslash(P_{\rm SENSE}\backslash)$ .
3. Erläutern Sie, warum ein größerer Shunt nicht automatisch die bessere Wahl ist.

#### Exercise E2.2 Bauteiltemperatur

Ein Widerstand setzt  $\backslash(P=300\sim\mathrm{mW}\backslash)$  um. Für den betrachteten Aufbau gilt

näherungsweise  $(R_{\text{th}} = 120 \sim \text{K/W})$ . Die Umgebungstemperatur beträgt  $(T_{\text{U}} = 50^\circ \text{C})$ .

1. Bestimmen Sie die Temperaturerhöhung.
2. Bestimmen Sie die erwartete Bauteiltemperatur.
3. Nennen Sie zwei Randbedingungen, welche die reale Temperatur zusätzlich beeinflussen.

### Exercise E3.3 Realer Schalter

Ein elektronischer Schalter besitzt im eingeschalteten Zustand  $(R_{\text{on}} = 50 \sim \text{m}\Omega)$ . Durch ihn fließt ein Strom von  $(I = 4 \sim \text{A})$ .

1. Bestimmen Sie den Spannungsabfall.
2. Bestimmen Sie die Verlustleistung.
3. Vergleichen Sie das Ergebnis mit dem idealen Schalter.

## Längere Aufgaben

### Exercise E4.4 Datenblatt eines Shunt-Widerstands

Verwenden Sie das in Abschnitt 1.1.4 angegebene Datenblatt.

Suchen Sie folgende Angaben und notieren Sie jeweils die Fundstelle:

1. Nennwiderstand und Toleranz,
2. Temperaturkoeffizient,
3. Nennleistung,
4. zulässiger Temperaturbereich,
5. Derating-Kennlinie,
6. Pulsbelastbarkeit,
7. mechanische Abmessungen,
8. Lage der Last- und Sense-Anschlüsse.

Beantworten Sie anschließend: Unter welchen Randbedingungen darf der Widerstand seine angegebene Nennleistung umsetzen?

### Exercise E5.5 Zwei- und Vierleitermessung

Untersuchen Sie die Falstad-Simulation aus Abschnitt 1.1.5.

1. Vergleichen Sie die gemessene Spannung bei Zwei- und Vierleitermessung.
2. Verdoppeln Sie den Laststrom.
3. Verdoppeln Sie anschließend die Leiterbahnwiderstände.
4. Bestimmen Sie den relativen Messfehler der Zweileitermessung.
5. Erläutern Sie, wo die Sense-Leitungen auf einer realen Leiterplatte angeschlossen werden müssen.

## 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=1790519608](https://wiki.mexle.org/elektronische_schaltungstechnik/block01?rev=1790519608)

Last update: **2026/09/27 16:33**

