

Block 1 — Der reale Widerstand

Student Group

First Name	Surname	Matrikel Nr.

Table of Contents

Block 1 — Der reale Widerstand	2
1.0 Intro	2
1.0.1 Einführendes Beispiel: Wie misst man den Strom eines Motors?	2
1.0.2 Lernziele	3
1.0.3 Preparation at Home	3
1.0.4 90-Minuten-Plan	4
1.0.5 Conceptual Overview	4
1.1 Der Shunt als Stromsensor	5
Beispiel	5
1.2 Warum ist ein Shunt häufig groß?	6
1.3 Toleranz	6
1.4 Verlustleistung und Erwärmung	7
1.5 Temperaturkoeffizient	7
Beispiel	7
1.6 Wann eine Leiterbahn zum Widerstand wird	8
1.7 Zweileiter- und Vierleitermessung	8
CircuitJS-Experiment	9
1.8 Bauformen von Widerständen	9
1.9 Und was ist mit Rauschen?	10
1.10 Unser Motortreiber nach Block 1	10
1.11 Common Pitfalls	11
1.12 Übungen	11
Aufgabe 1.12.1 Shunt-Auswahl	11
Aufgabe 1.12.2 Messfehler durch Leiterbahnen	12
Aufgabe 1.12.3 Temperaturdrift	12
Aufgabe 1.12.4 Der ADC	12
1.13 Lernfragen	13
1.14 Summary / Take-away	13
1.15 Vorbereitung auf Block 2	13

Block 1 — Der reale Widerstand

1.0 Intro

Ein Widerstand gehört zu den einfachsten elektrischen Bauelementen. Für einen idealen Widerstand gilt

$$\begin{aligned} R &= \frac{U}{I}. \end{aligned}$$

Damit scheint eigentlich alles bekannt zu sein.

In einer realen elektronischen Schaltung stellen sich aber schnell andere Fragen:

* Wie groß darf ein Widerstand sein? * Wie viel Leistung kann er umsetzen? * Warum gibt es einen $10\text{~}\Omega$ -Widerstand in einem vergleichsweise großen Gehäuse? * Warum ändert sich sein Widerstand mit der Temperatur? * Warum kann bei einem $10\text{~}\Omega$ -Widerstand bereits eine Leiterbahn das Messergebnis wesentlich verändern? * Und warum besitzt ein Widerstand manchmal **vier statt zwei Anschlüsse**?

Diese Fragen sollen anhand eines Beispiels untersucht werden, das uns durch das gesamte Semester begleiten wird.

1.0.1 Einführendes Beispiel: Wie misst man den Strom eines Motors?

Ein Mikrocontroller soll einen Gleichstrommotor steuern. Der Motor wird mit

$$\begin{aligned} U_{\text{M}} &= 12\text{~V} \end{aligned}$$

versorgt und kann einen Strom von bis zu

$$\begin{aligned} I_{\text{M,max}} &= 5\text{~A} \end{aligned}$$

aufnehmen.

Im Laufe des Semesters soll hierfür eine vollständige Motorendstufe entwickelt und analysiert werden.

Für die Regelung und den Schutz der Schaltung soll zunächst der Motorstrom gemessen werden.

Eine einfache Möglichkeit ist ein **Shunt-Widerstand** R_{S} im Strompfad.

Überlegen Sie zunächst ohne Rechnung:

* Sollte R_{S} eher groß oder eher klein sein? * Was spricht für einen großen Widerstand? * Was spricht für einen kleinen Widerstand? * Welche Spannung würden Sie gerne messen? * Was passiert mit der im Shunt umgesetzten Leistung?

Nehmen wir zunächst

$$\begin{aligned} R_{\text{S}} &= 10\text{~}\Omega \end{aligned}$$

an.

Bei $I_M = 5 \text{ mA}$ ergibt sich

$$U_S = R_S \cdot I_M = 10 \text{ m}\Omega \cdot 5 \text{ mA} = 50 \text{ mV}.$$

Die Verlustleistung beträgt

$$P_S = R_S \cdot I_M^2 = 10 \text{ m}\Omega \cdot (5 \text{ mA})^2 = 250 \text{ mW}.$$

Frage: Warum verwenden wir nicht einfach $R_S = 1 \text{ }\Omega$? Dann wären immerhin 5 mA messbar.

1.0.2 Lernziele

Nach diesem 90-Minuten-Block können Sie

- * bekannte Beziehungen wie $U = R \cdot I$ und $P = R \cdot I^2$ auf reale Widerstände anwenden,
- * erklären, warum ein Strommesswiderstand möglichst klein sein soll,
- * den Zielkonflikt zwischen Messspannung und Verlustleistung bei einem Shunt erklären,
- * Toleranz, Nennleistung und Temperaturkoeffizient eines Widerstands unterscheiden,
- * aus dem Temperaturkoeffizienten die Änderung eines Widerstandswerts abschätzen,
- * erklären, warum Leiterbahn- und Kontaktwiderstände bei kleinen Widerstandswerten relevant werden,
- * das Prinzip einer Vierleiter- bzw. Kelvin-Messung erklären,
- * für eine gegebene Strommessung einen geeigneten Shunt-Widerstand dimensionieren,
- * erklären, warum die physikalische Größe eines Widerstands nicht unmittelbar seinem Widerstandswert entspricht.

1.0.3 Preparation at Home

Aus [EEE1 Block 03 — Resistance and Power](#) sollten insbesondere bekannt sein:

- * Ohmsches Gesetz

$$U = R \cdot I$$

- * elektrische Leistung

$$P = U \cdot I = R \cdot I^2 = \frac{U^2}{R}$$

- * spezifischer Widerstand

$$R = \rho \cdot \frac{l}{A}.$$

Zur Vorbereitung:

* Wiederholen Sie die drei Gleichungen oben. * Überlegen Sie: Welcher der Widerstände $1\,\Omega$, $10\,\Omega$ und $100\,\Omega$ wäre für die Messung eines Stroms von $5\,\text{A}$ geeignet? * Berechnen Sie für jeden dieser Widerstände die Messspannung und die Verlustleistung.

1.0.4 90-Minuten-Plan

* **0-10 min — Warm-up:** Motorstrommessung mit Shunt. Abschätzung für $1\,\Omega$, $10\,\Omega$ und $100\,\Omega$.

* **10-30 min — Vom idealen zum realen Widerstand:** Widerstandswert, Toleranz, Verlustleistung, Erwärmung und Temperaturkoeffizient.

* **30-45 min — Warum sind Shunts so aufgebaut?** Bauformen, Widerstandsmaterial, Abmessungen und Strombelastbarkeit.

* **45-65 min — Wenn die Leiterbahn Teil der Messung wird:** Leiterbahn- und Kontaktwiderstände; Zwei- und Vierleiteranschluss.

* **65-80 min — CircuitJS-Experiment:** Messfehler durch Leitungs- und Kontaktwiderstände untersuchen.

* **80-87 min — Dimensionierungsaufgabe:** Shunt für den Semester-Motortreiber auswählen.

* **87-90 min — Wrap-up:** Was haben wir über unsere Motorendstufe gelernt? Ausblick auf den realen Kondensator.

1.0.5 Conceptual Overview

Beim idealen Widerstand interessiert nur eine Größe:

$$\boxed{R}$$

Beim realen Widerstand müssen weitere Eigenschaften betrachtet werden:

Eigenschaft	typische Frage
Widerstandswert R	Welcher Spannungsabfall entsteht?
Toleranz	Wie genau ist der angegebene Wert?
Nennleistung P_{N}	Wie stark darf der Widerstand belastet werden?
Temperaturkoeffizient TCR	Wie verändert sich R bei Erwärmung?
Bauform	Wie können Strom und Wärme abgeführt werden?
parasitäre Größen	Ist der Widerstand auch bei hohen Frequenzen noch ein idealer Widerstand?
Anschlusswiderstände	Messe ich wirklich nur R ?

Damit ergibt sich ein grundsätzliches Vorgehen, welches uns durch das gesamte Semester begleiten wird:

$$\boxed{\text{Idealmodell}} \quad \rightarrow \quad \boxed{\text{reales Bauteil}} \quad \rightarrow \quad \boxed{\text{Schaltung}} \quad \rightarrow \quad \boxed{\text{System}}$$

\end{align*}

1.1 Der Shunt als Stromsensor

Ein Strom kann über den Spannungsabfall an einem bekannten Widerstand bestimmt werden:

$$\begin{aligned} I &= \frac{U_{\text{S}}}{R_{\text{S}}} \end{aligned}$$

Der Widerstand wird dann als **Shunt** oder **Strommesswiderstand** bezeichnet.

Für einen idealen Stromsensor wäre wünschenswert:

* große Messspannung, * keine Beeinflussung der zu messenden Schaltung, * keine Verlustleistung.

Diese drei Wünsche lassen sich mit einem einfachen Widerstand nicht gleichzeitig erfüllen.

Für die Messspannung gilt

$$\begin{aligned} U_{\text{S}} &= R_{\text{S}} \cdot I \end{aligned}$$

Ein großes R_{S} ist damit günstig.

Für die Verlustleistung gilt dagegen

$$\begin{aligned} P_{\text{S}} &= R_{\text{S}} \cdot I^2 \end{aligned}$$

Ein kleines R_{S} ist damit günstig.

Zusätzlich reduziert der Spannungsabfall U_{S} die Spannung, die für die eigentliche Last zur Verfügung steht.

Es entsteht also ein Zielkonflikt:

$\boxed{\text{großes } R_{\text{S}} \rightarrow \text{großes Messsignal, aber große Verluste}}$

$\boxed{\text{kleines } R_{\text{S}} \rightarrow \text{kleine Verluste, aber kleines Messsignal}}$

Beispiel

Für $I = 5 \text{ A}$:

R_{S}	U_{S}	P_{S}
$1 \text{ m}\Omega$	5 mV	25 mW
$10 \text{ m}\Omega$	50 mV	250 mW
$100 \text{ m}\Omega$	500 mV	2.5 W
1Ω	5 V	25 W

Der Widerstand von 1Ω liefert zwar ein sehr gut messbares Signal, würde aber einen erheblichen Teil der elektrischen Leistung in Wärme umsetzen.

1.2 Warum ist ein Shunt häufig groß?

Aus EEE1 ist bekannt:

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

Ein sehr kleiner Widerstand kann beispielsweise durch

* eine geringe Länge l , * eine große Querschnittsfläche A , * oder ein Material mit kleinem spezifischen Widerstand ρ

erreicht werden.

Bei einem Shunt kommen weitere Anforderungen hinzu:

* Er muss einen großen Strom führen können. * Er muss Verlustwärme an die Umgebung abgeben können. * Sein Widerstand soll sich bei Erwärmung möglichst wenig verändern. * Er muss teilweise große kurzzeitige Stromspitzen überstehen. * Der Spannungsabfall muss möglichst exakt abgegriffen werden können.

Ein physikalisch größerer Shunt ist daher **nicht automatisch hochohmiger**.

Im Gegenteil: Leistungs-Shunts besitzen häufig nur einige Milliohm.

Typische Shunts werden beispielsweise als **Metallstreifen- oder Metallfolienwiderstände** aufgebaut.

1.3 Toleranz

Der auf einem Widerstand angegebene Wert ist ein Nennwert.

Bei

$$R_{\text{S}} = 10 \, \text{m}\Omega$$

und einer Toleranz von $\pm 1\%$ kann der reale Widerstand zwischen

$$9.9 \, \text{m}\Omega$$

und

$$10.1 \, \text{m}\Omega$$

liegen.

Wird für die Stromberechnung trotzdem exakt $10 \, \text{m}\Omega$ angenommen, überträgt sich dieser Fehler unmittelbar auf die gemessene Stromstärke.

Für eine präzise Strommessung werden deshalb häufig Widerstände mit kleinen Toleranzen eingesetzt oder die Messschaltung wird kalibriert.

1.4 Verlustleistung und Erwärmung

Ein realer Widerstand setzt elektrische Energie in Wärme um.

$$P = R \cdot I^2$$

zeigt eine wichtige Eigenschaft:

Eine Verdopplung des Stroms vervierfacht die Verlustleistung.

Für unseren Shunt mit $R_{\text{S}} = 10 \text{ m}\Omega$ ergibt sich:

Strom	Verlustleistung
1 A	10 mW
2 A	40 mW
5 A	250 mW
10 A	1 W

Die auf einem Widerstand angegebene Nennleistung darf nicht ohne Betrachtung der Umgebungsbedingungen verwendet werden.

Die zulässige Verlustleistung hängt unter anderem ab von

* Umgebungstemperatur, * Leiterplattenfläche, * Kupferfläche an den Anschlüssen, * Luftströmung, * Einbauposition.

Im Datenblatt wird dies häufig über eine **Derating-Kurve** angegeben.

1.5 Temperaturkoeffizient

Durch die Verlustleistung erwärmt sich ein Widerstand.

Bei realen Widerständen ändert sich damit auch der Widerstandswert.

Für kleine Temperaturänderungen kann näherungsweise geschrieben werden:

$$R(T) = R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta T)$$

Der Temperaturkoeffizient α wird bei Präzisionswiderständen häufig in

$$\text{ppm/K}$$

angegeben.

Dabei gilt

$$100 \text{ ppm} = 0.01\%$$

Beispiel

Ein Shunt besitzt einen Temperaturkoeffizienten von

$$50 \text{ ppm/K}$$

Er erwärmt sich gegenüber dem Referenzzustand um

$$\Delta T = 100 \text{ K}$$

Damit ergibt sich näherungsweise

$$\frac{\Delta R}{R} \approx 50 \cdot 10^{-6} \cdot 100 \approx 5 \cdot 10^{-3} = 0.5\%$$

Allein durch die Erwärmung entsteht also ein Messfehler in der Größenordnung von 0.5% .

1.6 Wann eine Leiterbahn zum Widerstand wird

Bei einem $10 \text{ m}\Omega$ -Widerstand können einige Milliohm Anschlusswiderstand normalerweise vernachlässigt werden.

Bei einem $10 \text{ m}\Omega$ -Shunt gilt das nicht mehr.

Betrachten wir beispielhaft eine Kupferleiterbahn mit

$$l = 10 \text{ mm}, \quad b = 1 \text{ mm}, \quad d = 35 \text{ }\mu\text{m}$$

Die Querschnittsfläche beträgt

$$A = b \cdot d = 1 \text{ mm} \cdot 0.035 \text{ mm} = 0.035 \text{ mm}^2$$

Mit ungefähr

$$\rho_{\text{Cu}} \approx 0.018 \text{ }\Omega \cdot \text{mm}$$

folgt

$$R_{\text{Leiterbahn}} = \rho_{\text{Cu}} \cdot \frac{l}{A} \approx 0.018 \text{ }\Omega \cdot \frac{10 \text{ mm}}{0.035 \text{ mm}^2} \approx 5 \text{ m}\Omega$$

Das ist bereits **die Hälfte unseres eigentlichen Shunt-Widerstands**.

Damit wird klar:

$$\boxed{\text{Bei sehr kleinen Widerständen gehört die Verdrahtung zur Schaltung.}}$$

1.7 Zweileiter- und Vierleitermessung

Bei einer gewöhnlichen Zweileitermessung fließt der Laststrom über dieselben Anschlüsse, an denen die Spannung gemessen wird.

Damit misst das Voltmeter nicht nur

$$U_{\text{S}} = I \cdot R_{\text{S}}$$

sondern auch Spannungsabfälle an

* Leiterbahnen, * Lötstellen, * Kontakten, * Anschlussflächen.

Bei einem **Vierleiteranschluss** werden die Anschlüsse getrennt:

* zwei Anschlüsse führen den großen Laststrom (**Force**), * zwei Anschlüsse messen ausschließlich die Spannung (**Sense**).

Da durch die Sense-Leitungen nahezu kein Strom fließt, entsteht dort nahezu kein zusätzlicher Spannungsabfall.

Dieses Verfahren wird auch als **Kelvin-Anschluss** bezeichnet.



Abbildung: Vergleich Zweileiter- und Vierleiteranschluss eines Shunts

CircuitJS-Experiment

In der folgenden Simulation wird der Shunt durch

$R_{\text{S}} = 10 \text{ m}\Omega$

dargestellt.

Zusätzlich werden die Anschlüsse jeweils durch einen parasitären Widerstand von beispielsweise

$R_{\text{P}} = 2 \text{ m}\Omega$

modelliert.

Aufgaben:

- * Stellen Sie einen Strom von 5 A ein. * Bestimmen Sie die Spannung direkt über R_{S} .
- * Bestimmen Sie die Spannung einschließlich der Anschlusswiderstände. * Welcher Strom würde jeweils berechnet, wenn bei der Auswertung $R_{\text{S}} = 10 \text{ m}\Omega$ angenommen wird? * Wie groß ist der relative Messfehler? * Variieren Sie R_{P} . * Ab welchem Verhältnis $R_{\text{P}}/R_{\text{S}}$ würden Sie die Anschlusswiderstände nicht mehr vernachlässigen?

1.8 Bauformen von Widerständen

Nicht jeder Widerstand eignet sich für jede Anwendung.

Bauart	typische Eigenschaften	typische Verwendung
Dickschicht	günstig, universell	Standard-SMD-Widerstände
Dünnschicht	präziser, häufig kleiner TCR	genaue Analogschaltungen
Drahtwiderstand	hohe Leistungen möglich, aber parasitäre Induktivität möglich	Leistungswiderstände
Metallfolie / Metallstreifen	sehr kleine Widerstände, hohe Ströme, kleiner TCR möglich	Strommessung / Shunts

Die konkrete Auswahl erfolgt nicht allein anhand des Widerstandswerts.

Das **Datenblatt** muss zusätzlich beispielsweise auf

- * maximale Verlustleistung, * maximalen Strom, * Toleranz, * Temperaturkoeffizienten, * zulässige

Umgebungstemperatur, * Impulsbelastbarkeit

untersucht werden.

1.9 Und was ist mit Rauschen?

Jeder reale Widerstand erzeugt thermisches Rauschen.

Für die effektive Rauschspannung eines Widerstands gilt:

$$u_{\rm n} = \sqrt{4kTRB}$$

Dabei sind

* k die Boltzmann-Konstante, * T die absolute Temperatur, * R der Widerstand, * B die betrachtete Bandbreite.

Interessant ist dabei:

$$u_{\rm n} \sim \sqrt{R}$$

Ein sehr kleiner Shunt-Widerstand besitzt daher auch ein sehr kleines thermisches Widerstandsrauschen.

Die physikalische Größe eines Leistungs-Shunts entsteht also nicht primär wegen seines thermischen Rauschens.

Bei der späteren Verstärkung der kleinen Shunt-Spannung werden allerdings das Rauschen und die Offsetspannung des Verstärkers wichtig.

Darauf kommen wir in einem späteren Block zurück.

1.10 Unser Motortreiber nach Block 1

Vom späteren Motortreiber kennen wir bisher erst einen kleinen Teil:

$$\boxed{\text{Motor}} \rightarrow \boxed{R_{\rm S}} \rightarrow \boxed{\text{GND}}$$

Wir wissen nun:

* Der Motorstrom kann über einen Shunt gemessen werden. * Ein kleiner Shunt beeinflusst den Motor nur wenig. * Ein kleiner Shunt erzeugt aber auch nur eine kleine Messspannung. * Der Shunt muss bezüglich Strom, Leistung und Temperatur dimensioniert werden. * Leiterbahn- und Kontaktwiderstände dürfen nicht unkritisch vernachlässigt werden. * Für präzise Messungen bietet sich ein Kelvin-Anschluss an.

Es bleibt aber ein neues Problem:

Bei

$$R_{\rm S} = 10 \sim \text{m}\Omega$$

und

$$\begin{aligned} I_{\text{M,max}} &= 5 \text{ mA} \end{aligned}$$

erhalten wir lediglich

$$\begin{aligned} U_{\text{S,max}} &= 50 \text{ mV} \end{aligned}$$

Ein Mikrocontroller mit einem ADC-Bereich von $0 \dots 3.3 \text{ V}$ nutzt damit nur einen sehr kleinen Teil seines Messbereichs.

Wie aus 50 mV später ein gut messbares Signal wird, werden wir im Laufe des Semesters untersuchen.

1.11 Common Pitfalls

* „Ein größerer Widerstand ist auch physikalisch größer.“\

Widerstandswert und geometrische Abmessung dürfen nicht verwechselt werden.

* „Ein kleiner Shunt setzt keine Leistung um.“\

Auch bei sehr kleinem R kann aufgrund des großen Stroms über $P = I^2 R$ eine relevante Verlustleistung entstehen.

* „Ein 1-W-Widerstand kann immer 1 W umsetzen.“\

Die zulässige Verlustleistung hängt von den thermischen Randbedingungen ab. Das Datenblatt ist zu beachten.

* „Leiterbahnen haben keinen Widerstand.“\

Diese Näherung ist nur dann sinnvoll, wenn der Leiterbahnwiderstand gegenüber den relevanten Widerständen vernachlässigbar ist.

* „Mit einem Voltmeter messe ich automatisch die Spannung direkt am Shunt.“\

Entscheidend ist, an welchen geometrischen Punkten die Spannung abgegriffen wird.

* „Der große Shunt ist wegen des Rauschens so groß.“\

Die wesentlichen Gründe sind Stromtragfähigkeit, Verlustleistung, thermisches Verhalten und die gewünschte Präzision.

1.12 Übungen

Aufgabe 1.12.1 Shunt-Auswahl

Ein Motor zieht maximal

$$\begin{aligned} I_{\text{max}} &= 8 \text{ A} \end{aligned}$$

Zur Auswahl stehen:

Shunt	Widerstand	maximale Verlustleistung
A	$5 \text{ m}\Omega$	1 W
B	$10 \text{ m}\Omega$	1 W
C	$50 \text{ m}\Omega$	2 W

- * Berechnen Sie für alle drei Shunts die maximale Messspannung.
- * Berechnen Sie die Verlustleistung.
- * Welche Bauteile können bei 8 A prinzipiell eingesetzt werden?
- * Welche weiteren Datenblattangaben würden Sie vor der endgültigen Auswahl prüfen?

Aufgabe 1.12.2 Messfehler durch Leiterbahnen

Ein Shunt mit

$$R_{\text{S}} = 20 \text{ m}\Omega$$

wird zur Messung eines Stroms von

$$I = 4 \text{ A}$$

eingesetzt.

Durch Leiterbahnen und Kontakte kommen in der Zweileitermessung zusätzlich

$$R_{\text{P}} = 3 \text{ m}\Omega$$

hinzu.

- * Welche Spannung soll idealerweise gemessen werden?
- * Welche Spannung wird bei der Zweileitermessung tatsächlich gemessen?
- * Welcher Strom wird daraus berechnet, wenn weiterhin $R_{\text{S}} = 20 \text{ m}\Omega$ angenommen wird?
- * Wie groß ist der relative Fehler?
- * Wie verändert sich die Situation bei einer idealen Kelvin-Messung?

Aufgabe 1.12.3 Temperaturdrift

Ein $10 \text{ m}\Omega$ -Shunt besitzt

$$\text{TCR} = 75 \text{ ppm/K}$$

Während des Betriebs erwärmt er sich von 25°C auf 105°C .

- * Bestimmen Sie die relative Widerstandsänderung.
- * Bestimmen Sie den Widerstand bei 105°C .
- * Welcher Messfehler ergibt sich, wenn weiterhin mit exakt $10 \text{ m}\Omega$ gerechnet wird?

Aufgabe 1.12.4 Der ADC

Der Shunt unseres Motortreibers besitzt

$$R_{\text{S}} = 10 \text{ m}\Omega$$

Der maximale Motorstrom beträgt 5~A .

Die Spannung soll mit einem 12-Bit-ADC gemessen werden, dessen Messbereich

0~V bis 3.3~V

beträgt.

* Wie groß ist die maximale Shunt-Spannung? * Wie groß ist die Spannung eines ADC-Schritts? * Wie viele ADC-Schritte werden für den gesamten Motorstrombereich tatsächlich genutzt? * Welcher Stromänderung entspricht ungefähr ein ADC-Schritt? * Welche Idee hätten Sie, um die Messung zu verbessern?

1.13 Lernfragen

* Warum soll ein Shunt-Widerstand möglichst klein sein? * Warum darf er auch nicht beliebig klein gewählt werden? * Warum hängt die Verlustleistung eines Shunts quadratisch vom Strom ab? * Welche Eigenschaften eines Widerstands finden sich neben R typischerweise im Datenblatt? * Was bedeutet ein Temperaturkoeffizient in ppm/K ? * Warum können Leiterbahnen bei einem Shunt relevant sein? * Was ist der Unterschied zwischen Zwei- und Vierleitermessung? * Was bedeutet „Kelvin-Anschluss“? * Warum sind Hochstrom-Shunts häufig vergleichsweise große Bauteile? * Ist thermisches Rauschen der Hauptgrund für die Baugröße eines Shunts? * Warum benötigen wir für unseren Motortreiber später wahrscheinlich noch einen Verstärker?

1.14 Summary / Take-away

$$U_{\text{S}} = R_{\text{S}} \cdot I$$

$$P_{\text{S}} = R_{\text{S}} \cdot I^2$$

Für einen realen Widerstand reicht die Angabe von R nicht aus.

Wichtig sind unter anderem:

$$R, \quad P_{\text{N}}, \quad \text{Toleranz}, \quad \text{TCR}, \quad \text{Bauform}$$

Bei sehr kleinen Widerständen gilt zusätzlich:

$$\{\text{Leiterbahnen und Kontakte sind Teil der Schaltung.}\}$$

Der Kelvin-Anschluss trennt den Pfad des großen Laststroms vom Pfad der Spannungsmessung.

1.15 Vorbereitung auf Block 2

Unser Motortreiber kann Ströme von mehreren Ampere schalten.

Beim Schalten kann sich der Strom sehr schnell ändern.

In der Nähe der MOSFETs finden sich deshalb häufig gleichzeitig beispielsweise

* ein großer Elektrolytkondensator und * mehrere kleine Keramikkondensatoren.

Dabei stellt sich eine zunächst merkwürdige Frage:

Warum benötigt man einen 100 nF -Kondensator, wenn direkt daneben bereits ein $470\text{ }\mu\text{F}$ -Kondensator sitzt?

Im nächsten Block betrachten wir deshalb den **realen Kondensator**.

From:

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

Permanent link:

https://wiki.mexle.org/elektronische_schaltungstechnik/1_widerstaende?rev=1789690375

Last update: 2026/09/18 02:12

