

Block 1 — Der reale Widerstand

Student Group

First Name	Surname	Matrikel Nr.

Table of Contents

Block 1 — Der reale Widerstand	3
1.0 Einführendes Beispiel: Wie misst man 5 A?	3
Simulation	4
1.0.1 Lernziele	4
1.0.2 Vorbereitung	5
1.0.3 90-Minuten-Plan	5
1.0.4 Conceptual Overview	6
1.1 Wiederholung: Der ideale Widerstand	7
Beispiel	7
1.2 Der reale Widerstand	7
1.2.1 Nennwert und Toleranz	7
1.2.2 Verlustleistung	8
1.2.3 Temperaturkoeffizient	8
Beispiel	9
1.3 Shunt-Widerstände	9
1.3.1 Der Zielkonflikt	9
1.3.2 Warum sind Shunts häufig physisch groß?	10
1.4 Wenn die Leiterbahn Teil der Schaltung wird	10
Beispiel	11
Simulation	11
1.5 Vierletermessung / Kelvin-Anschluss	11
1.6 Rauscht ein Widerstand?	12
1.7 Motortreiber-Checkpoint	13
1.8 Common Pitfalls	13
1.9 Lernfragen	14
Aufgaben	14
Aufgabe 1.1: Auswahl eines Shunts	14
Aufgabe 1.2: Messfehler durch Kontaktwiderstände	15
Aufgabe 1.3: Temperaturabhängigkeit	15

Aufgabe 1.4: Experiment mit circuit.js	16
Aufgabe 1.5: Vorbereitung des nächsten Entwicklungsschritts	16
Zusammenfassung	17

Block 1 — Der reale Widerstand

1.0 Einführendes Beispiel: Wie misst man 5 A?

In einem mobilen Robotersystem soll ein Gleichstrommotor durch einen Mikrocontroller angesteuert werden. Neben der Drehzahl soll auch der Motorstrom erfasst werden.

Der Motor wird mit $U_M = 12\,\mathrm{V}$ versorgt und kann kurzzeitig einen Strom von $I_{M,\max} = 5\,\mathrm{A}$ aufnehmen.

Der Mikrocontroller kann jedoch nur Spannungen messen.

Eine sehr einfache Möglichkeit zur Strommessung ist ein sogenannter **Shunt-Widerstand**: Ein kleiner Widerstand wird in Reihe zum Motor geschaltet. Über den Spannungsabfall am Widerstand kann anschließend auf den Strom geschlossen werden.

Für den hier betrachteten Motortreiber soll zunächst

$$R_S = 10\,\mathrm{m}\Omega$$

angenommen werden.

Damit ergibt sich bei $5\,\mathrm{A}$:

$$U_S = R_S \cdot I_M = 10\,\mathrm{m}\Omega \cdot 5\,\mathrm{A} = 50\,\mathrm{mV}.$$

50 mV sind allerdings für einen ADC mit einem Messbereich von beispielsweise 0 ... 3,3 V ein sehr kleines Signal.

Warum verwenden wir also nicht einfach einen größeren Widerstand?

Bei $R_S = 1\,\Omega$ wären schließlich

$$U_S = 5\,\mathrm{V}$$

messbar.

Das Problem zeigt sich bei der Leistung:

$$P_S = R_S \cdot I_M^2$$

Für $R_S = 1\,\Omega$ ergibt sich

$$P_S = 25\,\mathrm{W}.$$

Der Messwiderstand würde damit einen erheblichen Teil der elektrischen Leistung aufnehmen und gleichzeitig die Spannung am Motor stark reduzieren.

Die Messung verändert das zu messende System.



Ein guter Strommesswiderstand muss klein genug sein, um den Stromkreis nur wenig zu beeinflussen. Dadurch wird aber auch die zu messende Spannung klein.

Dieses Spannungsniveau wird uns im Laufe des Semesters noch mehrfach beschäftigen.

Simulation

In der folgenden Simulation kann der Wert des Shunt-Widerstands verändert werden.

Untersuchen Sie insbesondere

- $R_{\mathrm{S}} = 1\,\mathrm{m}\Omega$
- $R_{\mathrm{S}} = 10\,\mathrm{m}\Omega$
- $R_{\mathrm{S}} = 100\,\mathrm{m}\Omega$
- $R_{\mathrm{S}} = 1\,\Omega$

und beobachten Sie

- die Spannung U_{S} ,
- die Verlustleistung P_{S} ,
- die Spannung am Motor und
- den Motorstrom.



Fix Me!

circuit.js-Simulation einsetzen

1.0.1 Lernziele

Nach diesem 90-minütigen Block können Sie

- den Zusammenhang zwischen Strom, Spannung und Widerstand mit dem Ohmschen Gesetz anwenden.
- die Verlustleistung eines Widerstands bestimmen.
- erklären, warum ein realer Widerstand neben seinem Widerstandswert weitere wichtige Kenngrößen besitzt.
- die Begriffe **Nennwiderstand**, **Toleranz**, **Nennleistung** und **Temperaturkoeffizient** erklären.
- einen geeigneten Shunt-Widerstand für eine einfache Strommessung dimensionieren.
- den Zielkonflikt zwischen Messsignal und Verlustleistung bei einer Shuntmessung erklären.
- erklären, weshalb bei kleinen Widerständen Leitungs- und Kontaktwiderstände relevant werden.
- das Prinzip einer Vierleiter- bzw. Kelvin-Messung erklären.
- einschätzen, wann das Rauschen eines Widerstands bei einer Messung relevant werden kann.

1.0.2 Vorbereitung

Aus EEE1 und EEE2 werden folgende Grundlagen vorausgesetzt:

- Ohmsches Gesetz
- Kirchhoffsche Regeln
- Reihen- und Parallelschaltung von Widerständen
- elektrische Leistung
- Spannungsteiler
- grundlegende Messung von Spannung und Strom

Zur Vorbereitung:

1. Wiederholen Sie die Zusammenhänge

$$U = R \cdot I$$

und

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

1. Berechnen Sie für einen Widerstand von $R = 100 \, \Omega$ die Verlustleistung bei
 - $I = 1 \, A$
 - $I = 2 \, A$
 - $I = 5 \, A$

1. Überlegen Sie: Warum ist die Angabe „ $R = 10 \, \Omega$ “ alleine nicht ausreichend,

um einen passenden realen Widerstand auszuwählen?

1.0.3 90-Minuten-Plan

1. Einstieg: Motorstrommessung (10 min)

1. Vorstellung des Semesterbeispiels „Motortreiber“
2. Warum muss der Motorstrom gemessen werden?
3. Vergleich verschiedener Shunt-Werte in circuit.js
4. Zielkonflikt zwischen Messsignal und Verlustleistung

1. Vom idealen zum realen Widerstand (20 min)

1. Wiederholung $U = R \cdot I$
2. Verlustleistung
3. Nennwert und Toleranz
4. Bauformen und Nennleistung
5. Temperaturabhängigkeit

1. Shunt als Messwiderstand (20 min)

1. Dimensionierung
2. Spannungsabfall
3. Verlustleistung
4. Einfluss auf das zu messende System
5. typische Größenordnungen

1. Wenn 10 mΩ plötzlich nicht mehr klein sind (20 min)

1. Leiterbahnwiderstand
2. Kontaktwiderstand
3. Zweileitermessung
4. Vierleitermessung / Kelvin-Anschluss
5. circuit.js-Experiment

1. Rauschen und Grenzen des idealen Widerstandsmodells (10 min)

1. thermisches Rauschen
2. qualitative Einordnung
3. Ausblick auf die spätere Verstärkerschaltung

1. Zusammenfassung und Motortreiber-Checkpoint (10 min)

1. Auswahl eines sinnvollen Shunts
2. Welche Probleme sind noch ungelöst?
3. Ausblick auf Block 2

1.0.4 Conceptual Overview

Aus EEE1/EEE2 ist der ideale Widerstand bekannt:

$$U = R \cdot I$$

In der elektronischen Schaltungstechnik reicht diese Beschreibung häufig nicht mehr aus.

Ein reales Bauteil besitzt weitere Eigenschaften:

Ideales Modell

R

$\Downarrow$

Reales Bauteil

- Widerstandswert R
- Toleranz
- maximale Leistung
- Temperaturkoeffizient
- maximale Spannung
- parasitäre Eigenschaften
- Rauschen
- Bauform und Kontaktierung

$\Downarrow$

Anwendung

z.B. Strommessung im Motortreiber

Die zentrale Frage dieses Blocks lautet deshalb:



Wann reicht das ideale Bauteilmodell aus — und wann entscheidet das reale Bauteil über die Funktion der Schaltung?

1.1 Wiederholung: Der ideale Widerstand

Für einen idealen ohmschen Widerstand gilt

$$R = \frac{U}{I}$$

Der Widerstand wandelt elektrische Energie in Wärme um.

Die aufgenommene Leistung beträgt

$$P = U \cdot I$$

Mit dem Ohmschen Gesetz ergeben sich außerdem

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

und

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

Beispiel

Durch einen Widerstand von $R = 100\,\Omega$ fließt ein Strom von $I = 100\,\mathrm{mA}$.

Damit ergibt sich

$$P = R \cdot I^2 = 100\,\Omega \cdot (0{,}1\,\mathrm{A})^2 = 1\,\mathrm{W}$$

Ein kleiner bedrahteter Widerstand mit einer zulässigen Verlustleistung von beispielsweise $0{,}25\,\mathrm{W}$ wäre an dieser Stelle ungeeignet.



Die korrekte Berechnung des Widerstandswerts bedeutet noch nicht, dass ein beliebiger Widerstand dieses Werts verwendet werden kann.

1.2 Der reale Widerstand

Bei der Auswahl eines realen Widerstands müssen mehrere Kenngrößen berücksichtigt werden.

1.2.1 Nennwert und Toleranz

Ein Widerstand mit

$R_{\mathrm{N}} = 100\,\mathrm{k\Omega}$

und einer Toleranz von $\pm 1\%$ kann beispielsweise einen tatsächlichen Widerstand zwischen

$99\,\mathrm{k\Omega}$

und

$101\,\mathrm{k\Omega}$

besitzen.

Die Toleranz beschreibt zunächst nur die mögliche Abweichung vom Nennwert bei spezifizierten Umgebungsbedingungen.

1.2.2 Verlustleistung

Die elektrische Verlustleistung wird im Widerstand überwiegend in Wärme umgesetzt.

Ein Widerstand darf deshalb nicht nur nach seinem Widerstandswert ausgewählt werden.

Typische Leistungsklassen sind beispielsweise

- 0,063 W
- 0,125 W
- 0,25 W
- 0,5 W
- 1 W
- mehrere Watt bei Leistungswiderständen

Die zulässige Leistung hängt zusätzlich von der Umgebungstemperatur und der Möglichkeit zur Wärmeabgabe ab.

In Datenblättern wird dies häufig durch eine sogenannte **Derating Curve** beschrieben.

1.2.3 Temperaturkoeffizient

Der Widerstandswert eines realen Widerstands ist temperaturabhängig.

Für einen kleinen Temperaturbereich kann näherungsweise geschrieben werden:

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

Dabei ist

- T_0 die Bezugstemperatur,
- α der Temperaturkoeffizient.

Der Temperaturkoeffizient wird häufig in

$\mathrm{ppm/K}$

angegeben.

Ein Temperaturkoeffizient von

$$50 \, \mathrm{ppm/K}$$

entspricht

$$50 \cdot 10^{-6} \, \mathrm{/K}$$

Beispiel

Ein Shunt besitzt bei $25 \, ^\circ\mathrm{C}$

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

und

$$\alpha = 50 \, \mathrm{ppm/K}$$

Er erwärmt sich auf $75 \, ^\circ\mathrm{C}$.

Damit gilt näherungsweise:

$$\Delta T = 50 \, \mathrm{K}$$

und

$$\frac{\Delta R}{R} = \alpha \cdot \Delta T = 50 \cdot 10^{-6} \cdot 50 = 0,0025$$

Der Widerstandswert verändert sich also um etwa

$$0,25 \, \%$$

Bei einer Strommessung erscheint diese Änderung direkt als Messfehler.

1.3 Shunt-Widerstände

Ein **Shunt** ist ein niederohmiger Widerstand, der zur Strommessung verwendet wird.

Der zu messende Strom fließt durch den Shunt.

Die entstehende Spannung

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

wird gemessen und daraus der Strom bestimmt:

$$I = \frac{U_{\mathrm{S}}}{R_{\mathrm{S}}}$$

1.3.1 Der Zielkonflikt

Für einen großen Shunt-Widerstand gilt:

- großes Messsignal
- einfache Spannungsmessung

- große Verlustleistung
- größerer Einfluss auf die Last

Für einen kleinen Shunt-Widerstand gilt:

- kleines Messsignal
- geringe Verlustleistung
- geringer Einfluss auf die Last
- höhere Anforderungen an die Auswerteelektronik

R_{S}	U_{S} bei 5 A	P_{S} bei 5 A
$1\,\mathrm{m}\Omega$	$5\,\mathrm{mV}$	$25\,\mathrm{mW}$
$10\,\mathrm{m}\Omega$	$50\,\mathrm{mV}$	$250\,\mathrm{mW}$
$100\,\mathrm{m}\Omega$	$500\,\mathrm{mV}$	$2{,}5\,\mathrm{W}$
$1\,\Omega$	$5\,\mathrm{V}$	$25\,\mathrm{W}$



Ein Shunt ist ein Kompromiss.

Ein möglichst großer Widerstand verbessert zunächst das elektrische Messsignal.

Ein möglichst kleiner Widerstand beeinflusst dagegen das zu messende System weniger.

1.3.2 Warum sind Shunts häufig physisch groß?

Ein kleiner Widerstandswert bedeutet nicht automatisch eine kleine Bauform.

Ein Shunt muss unter Umständen mehrere Ampere dauerhaft führen. Entscheidend sind deshalb insbesondere

- die zulässige Verlustleistung,
- die entstehende Temperatur,
- der Temperaturkoeffizient,
- die Stromdichte,
- die Kontaktierung und
- die Wärmeabfuhr über Leiterplatte oder Gehäuse.

Ein Shunt kann deshalb trotz eines Widerstandswerts von nur wenigen Milliohm deutlich größer sein als ein Widerstand im Kiloohm-Bereich.

1.4 Wenn die Leiterbahn Teil der Schaltung wird

Bei Widerständen im Bereich weniger Milliohm können Widerstände von

- Leiterbahnen,
- Lötstellen,
- Steckverbindern und
- Bauteilanschlüssen

nicht mehr selbstverständlich vernachlässigt werden.

Beispiel

Der Shunt besitzt

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

Zwischen dem eigentlichen Widerstandselement und den Messpunkten befinden sich zusammen zusätzliche Kontakt- und Leiterbahnwiderstände von

$$R_{\mathrm{K}} = 4 \, \mathrm{m\Omega}$$

Bei einer einfachen Zweileitermessung würde damit effektiv

$$R_{\mathrm{mess}} = R_{\mathrm{S}} + R_{\mathrm{K}}$$

gemessen.

Also:

$$R_{\mathrm{mess}} = 14 \, \mathrm{m\Omega}$$

Würde man weiterhin mit $10 \, \mathrm{m\Omega}$ rechnen, entstünde ein erheblicher Messfehler.

Simulation

In der Simulation sind die Leitungswiderstände bewusst stark übertrieben dargestellt.

1. Messen Sie zunächst die Spannung an den äußeren Anschlusspunkten.
2. Messen Sie anschließend unmittelbar über dem Shunt.
3. Vergleichen Sie beide Ergebnisse.



circuit.js-Simulation „Zweileiter/Kelvin“ einsetzen

1.5 Vierleitermessung / Kelvin-Anschluss

Bei einer Vierleitermessung werden Strompfad und Messpfad voneinander getrennt.

Zwei Anschlüsse führen den Laststrom durch den Widerstand.

Zwei weitere Anschlüsse messen die Spannung möglichst direkt am eigentlichen Widerstandselement.

Da der Eingang der später verwendeten Messschaltung sehr hochohmig sein soll, fließt über die Sense-Leitungen nur ein sehr kleiner Strom.

Damit erzeugen deren Leitungswiderstände nur einen sehr kleinen zusätzlichen Spannungsabfall.



Bei kleinen Widerstandswerten wird nicht nur die Größe des Bauteils wichtig, sondern auch die Frage:



Wo genau wird die Spannung gemessen?

1.6 Rauscht ein Widerstand?

Auch ein ideal erscheinender Widerstand erzeugt aufgrund der thermischen Bewegung der Ladungsträger eine kleine Rauschspannung.

Für die Effektivspannung des thermischen Widerstandsrauschens gilt:

$$u_{\mathrm{n}} = \sqrt{4 k_{\mathrm{B}} T R \Delta f}.$$

Dabei sind

- k_{B} die Boltzmann-Konstante,
- T die absolute Temperatur,
- R der Widerstand,
- Δf die betrachtete Bandbreite.

Wichtig ist zunächst nur die qualitative Aussage:

- höherer Widerstand $\rightarrow$ höheres thermisches Spannungsrauschen
- höhere Temperatur $\rightarrow$ höheres Rauschen
- größere Bandbreite $\rightarrow$ höheres gemessenes Rauschen

Ein niederohmiger Shunt besitzt deshalb selbst zunächst nur eine kleine thermische Rauschspannung.

Das eigentliche Problem liegt an anderer Stelle:

Die **Nutzspannung** am Shunt ist ebenfalls sehr klein.

Bei unserem Motortreiber entstehen bei $5\,\mathrm{A}$ nur

$$U_{\mathrm{S}} = 50\,\mathrm{mV}.$$

Bei kleinen Motorströmen sind es entsprechend nur wenige Millivolt.

Diese Spannung muss später verstärkt werden.

Damit werden unter anderem

- Offsetspannungen,
- Rauschen des Verstärkers,
- Störungen der PWM und
- Massepotentiale

relevant.

Diese Probleme werden in späteren Blöcken wieder aufgegriffen.

1.7 Motortreiber-Checkpoint

Unser Semesterbeispiel besitzt nun erstmals einen konkreten Strommesswiderstand:

Motortreiber — Stand nach Block 1

$3\,\mathrm{V}$ Mikrocontroller

$\Downarrow$

?

$\Downarrow$

MOSFET-Vollbrücke

$\Downarrow$

12-V-Gleichstrommotor

$\Downarrow$

$R_{\mathrm{S}} = 10\,\mathrm{m}\Omega$ Shunt

$\Downarrow$

?

$\Downarrow$

ADC des Mikrocontrollers

Wir können den Motorstrom jetzt grundsätzlich in eine Spannung wandeln.

Allerdings bleiben mehrere Probleme offen:

- Bei $5\,\mathrm{A}$ entstehen nur $50\,\mathrm{mV}$.
- Das Signal enthält später Störungen durch die PWM.
- Der ADC arbeitet typischerweise in einem wesentlich größeren Spannungsbereich.
- Über den Shunt fließen hohe und schnell veränderliche Ströme.
- Die Versorgung der Leistungselektronik ist ebenfalls nicht ideal.

Diese offenen Punkte werden im Laufe des Semesters schrittweise gelöst.

1.8 Common Pitfalls

- „Ein $10\text{-m}\Omega$ -Widerstand ist praktisch ein Kurzschluss.“

Nicht für eine Strommessung. Bei mehreren Ampere entsteht eine messbare Spannung und eine relevante Verlustleistung.

- **„Je größer der Shunt, desto besser die Messung.“**

Das Messsignal wird größer, aber gleichzeitig steigen Spannungsabfall und Verlustleistung.

- **„Ein 0,25-W-Widerstand kann kurzzeitig beliebig viel Strom führen.“**

Auch Pulsbelastbarkeit und maximale Temperatur sind begrenzt und müssen dem Datenblatt entnommen werden.

- **„Ein Widerstand hat immer exakt seinen aufgedruckten Wert.“**

Toleranz, Temperatur und weitere Einflüsse verändern den realen Wert.

- **„Leiterbahnen haben keinen Widerstand.“**

Bei Widerständen von wenigen Milliohm können Leiterbahn- und Kontaktwiderstände die gleiche Größenordnung erreichen.

- **„Die beiden Anschlüsse eines Shunts reichen immer aus.“**

Bei präziser Messung wird häufig eine Kelvin- bzw. Vierleiterkontaktierung verwendet.

- **„Der große Shunt wird wegen des Rauschens benötigt.“**

Die Baugröße wird vor allem durch Stromtragfähigkeit, Verlustleistung, thermische Eigenschaften und Kontaktierung bestimmt.

1.9 Lernfragen

1. Warum sollte der Widerstand eines Shunts möglichst klein sein?
2. Welcher Nachteil entsteht durch einen sehr kleinen Shunt?
3. Warum ist ein $1\,\Omega$ -Shunt bei einem Motorstrom von $5\,\mathrm{A}$ meist ungeeignet?
4. Welche Größen bestimmen die Verlustleistung eines Shunts?
5. Warum kann sich ein Shunt während des Betriebs erwärmen?
6. Welche Auswirkung kann die Erwärmung auf die Strommessung haben?
7. Warum können Leiterbahnwiderstände bei einem $10\,\mathrm{m}\Omega$ -Shunt relevant sein?
8. Was unterscheidet eine Zwei- von einer Vierleitermessung?
9. Warum sind leistungsfähige Shunts häufig physisch relativ groß?
10. Weshalb ist das thermische Rauschen nicht der Hauptgrund für die große Bauform eines Shunts?

Aufgaben

Aufgabe 1.1: Auswahl eines Shunts

Ein Gleichstrommotor wird mit $12\,\mathrm{V}$ betrieben. Der maximale Motorstrom beträgt $I_{\mathrm{max}} = 4\,\mathrm{A}$.

Zur Auswahl stehen folgende Widerstände:

Bauteil	Widerstand	Nennleistung
A	$1\,\mathrm{m\Omega}$	$25\,\mathrm{W}$
B	$10\,\mathrm{m\Omega}$	$5\,\mathrm{W}$
C	$50\,\mathrm{m\Omega}$	$1\,\mathrm{W}$
D	$100\,\mathrm{m\Omega}$	$5\,\mathrm{W}$

1. Berechnen Sie für alle vier Widerstände die Spannung bei I_{max} .
2. Berechnen Sie die jeweilige Verlustleistung.
3. Welche Widerstände dürfen aufgrund ihrer Nennleistung nicht eingesetzt werden?
4. Welche Vor- und Nachteile besitzen die verbleibenden Widerstände?
5. Welchen Widerstand würden Sie für die Anwendung auswählen? Begründen Sie Ihre Entscheidung.

Aufgabe 1.2: Messfehler durch Kontaktwiderstände

Ein Strom von $3\,\mathrm{A}$ fließt durch einen Shunt mit

$$R_{\mathrm{S}} = 10\,\mathrm{m\Omega}.$$

Durch Leiterbahnen und Anschlüsse befinden sich im Messpfad zusätzlich zweimal

$$R_{\mathrm{K}} = 1{,}5\,\mathrm{m\Omega}.$$

1. Berechnen Sie die tatsächliche Spannung direkt über dem Shunt.
2. Berechnen Sie die Spannung, die bei einer Zweileitermessung erfasst wird.
3. Welcher Strom würde aus dieser Spannung berechnet, wenn weiterhin

$R_{\mathrm{S}} = 10\,\mathrm{m\Omega}$ angenommen wird?

1. Bestimmen Sie den relativen Messfehler.
2. Erklären Sie, wie eine Vierleitermessung diesen Fehler reduziert.

Aufgabe 1.3: Temperaturabhängigkeit

Ein Shunt besitzt

$$R_{\mathrm{S}} = 20\,\mathrm{m\Omega}$$

bei $25\,\mathrm{^\circ C}$ und einen Temperaturkoeffizienten von

$$\alpha = 75\,\mathrm{ppm/K}.$$

Im Betrieb erwärmt er sich auf $100\,\mathrm{^\circ C}$.

1. Berechnen Sie die Temperaturänderung.
2. Bestimmen Sie näherungsweise den neuen Widerstandswert.
3. Berechnen Sie den dadurch entstehenden relativen Fehler der Strommessung,

falls die Auswertung weiterhin mit $20\,\mathrm{m\Omega}$ rechnet.

Aufgabe 1.4: Experiment mit circuit.js



circuit.js-Aufgabe einsetzen

Variieren Sie den Shunt zwischen

$$1\,\mathrm{m\Omega} \leq R_{\mathrm{S}} \leq 1\,\mathrm{\Omega}.$$

Erstellen Sie eine Tabelle für mindestens fünf Werte mit

- R_{S}
- Motorstrom
- Shuntspannung
- Verlustleistung am Shunt
- Motorleistung

Beantworten Sie anschließend:

1. Ab wann beeinflusst der Shunt den Motorstrom sichtbar?
2. Welche Shuntspannung wäre für eine direkte Messung mit einem 3,3-V-ADC günstig?
3. Warum ist genau dieser Widerstandswert trotzdem möglicherweise ungeeignet?

Aufgabe 1.5: Vorbereitung des nächsten Entwicklungsschritts

Für den Motortreiber wird

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

gewählt.

Der relevante Motorstrom liegt zwischen

$$0\,\mathrm{A}$$

und

$$5\,\mathrm{A}.$$

1. Bestimmen Sie den Spannungsbereich am Shunt.
2. Vergleichen Sie diesen mit dem Eingangsbereich eines ADC von 0 ... 3,3 V.
3. Welcher Anteil des ADC-Messbereichs wird maximal genutzt?
4. Welche elektronische Funktion müsste zwischen Shunt und ADC eingefügt werden,

um den Messbereich besser auszunutzen?



Die letzte Aufgabe führt zu einem Problem, das wir später lösen werden:

Wie können wenige Millivolt zuverlässig gemessen und verstärkt werden?

Zusammenfassung

- Der ideale Widerstand wird durch $U=R \cdot I$ beschrieben.
- Ein reales Bauteil besitzt zusätzlich Toleranz, Leistungsgrenzen und Temperaturabhängigkeit.
- Ein Shunt wandelt einen Strom in eine messbare Spannung.
- Ein kleiner Shunt beeinflusst die Last wenig, erzeugt aber auch nur ein kleines Messsignal.
- Bei sehr kleinen Widerständen werden Leiterbahn- und Kontaktwiderstände relevant.
- Mit einer Kelvin-Verbindung können Strom- und Spannungsmesspfad getrennt werden.
- Die physische Größe eines Shunts wird wesentlich durch Strom, Verlustleistung und Wärmeabfuhr bestimmt.

Ausblick auf Block 2:

Im Motortreiber ändern sich die Ströme sehr schnell. Warum reicht dann ein großes Netzteil alleine nicht aus? Und warum befinden sich direkt neben elektronischen Bauteilen häufig mehrere unterschiedliche Kondensatoren?

→ **Block 2: Der reale Kondensator**

From:

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

Permanent link:

https://wiki.mexle.org/elektronische_schaltungstechnik_mr_spo1/1_widerstaende

Last update: 2026/09/25 13:12

