

LED-Aquarienbeleuchtung

Stand: 15.01.2018

Jahrgangsstufen	FOS/BOS 10
Fach/Fächer	Physik
Übergreifende Bildungs- und Erziehungsziele	Medienbildung/digitale Bildung, technische Bildung, Bildung für nachhaltige Entwicklung (Umweltbildung, Globales Lernen)
Benötigtes Material	ggf. PC/Smartphone mit Internetzugang für Recherche „Leuchtmittel“ (vgl. Hinweise zum Unterricht) Bei geplanter praktischer Realisierung: Netzgeräte, LEDs, Vorwiderstände, Steckbretter oder aber Verlötung auf Platinen

Kompetenzerwartungen

Lehrplan Physik FOS/BOS 10 (T, ABU) LB 3

Die Schülerinnen und Schüler ...

planen unter Anleitung Widerstandsschaltungen, bauen diese auf und berechnen die auftretenden elektrischen Größen Stromstärke, Spannung, Leistung und Widerstand, um z. B. den gefahrlosen Einsatz von Mehrfachsteckdosen im Haushalt für mehrere Verbraucher oder die grundsätzliche Struktur eines Haushaltsstromnetzes nachzuvollziehen und dessen erforderliche Dimensionierung abzuschätzen.

Aufgabe

Stefan möchte sein schönes Meerwasseraquarium beleuchten. Er baut hierfür eine Lichtschiene, die 12 Leuchtdioden (LEDs), Lichtfarbe Weiß, aufnehmen soll. Er möchte die Lichtschiene über ein bereits vorhandenes Steckernetzteil in Verbindung mit einer Zeitschaltuhr täglich 4,0 h betreiben. Das Netzteil liefert eine konstante Gleichspannung von 9,0 V bis zu einer maximalen Stromstärke von 1,0 A.

Die Kosten für 1 Kilowattstunde sind mit 35 Cent anzusetzen.

Der oben gewählte LED-Typ hat die Betriebsdaten $U_F = 3,6 \text{ V}$ und $I_F = 60 \text{ mA}$. Im unmittelbaren Bereich dieser Betriebsdaten darf eine LED als konstanter Widerstand aufgefasst werden.

Leuchtdioden reagieren sehr empfindlich auf eine Überschreitung der Betriebsdaten. Deshalb dürfen LEDs grundsätzlich nie ohne einen Vorwiderstand betrieben werden.

- 1 Entwerfen Sie in Ihrer Arbeitsgruppe einen geeigneten Stromlaufplan für die funktionsfähige Lichtschiene. Stellen Sie durch entsprechende Dimensionierung der Bauelemente sicher, dass die Betriebsdaten der Leuchtdioden eingehalten werden. Bringen Sie für eine nachfolgende Präsentation Ihre Unterlagen in eine ansprechende und nachvollziehbare Form.

Plenumsphase/ Bewertung

- 2 Vergleichen Sie die im Plenum zur weiteren Untersuchung ausgesuchten Schaltungsvorschläge bezüglich der soeben aufgelisteten Bewertungskriterien. Begründen Sie Vor- bzw. Nachteile detailliert. Hierfür können beispielsweise „Je ..., desto ...“-Beziehungen aufgestellt und ausgeführt werden. Führen Sie an passender Stelle aber auch geeignete Berechnungen durch. Nehmen Sie eine begründete abschließende Bewertung vor. Sollten Sie bei der Berechnung der Energiekosten nicht weiterkommen, hat Ihre Lehrkraft Hilfekärtchen vorbereitet (Hilfekärtchen 1 und/ oder Hilfekärtchen 2).

Hinweise zum Unterricht

Die Lösungshinweise unter den Hinweisen zum Unterricht sind nicht als vollständige, alternativlose Lösungserwartung zu sehen. Auch von einer strengen physikalischen Fachnotation wird hier abgesehen.

Bei der Durchführung der Versuche sind immer die gültigen Sicherheitsbestimmungen zu beachten. Hinweise dazu finden Sie u. a. in der Handreichung „Sicher experimentieren in Physik“ des ISB (vgl. [1]).

Zu Aufgabe 1:

Gegebenenfalls sind noch zusätzliche Informationen über LEDs interessant bzw. erforderlich:

- Vorteile gegenüber anderen Leuchtmitteln
- Siegeszug der LED im Beleuchtungsmarkt (z.B. veranschaulicht durch Umsatzanteile)
- Dioden im Allgemeinen
- Schaltsymbol
- Die LED muss so beschaltet werden, dass sich von der Anode (Dreieck) gegenüber der Katode (Strich) gemessen eine positive Spannung ergibt.

Nach selbständiger Bearbeitung von Aufgabe 1 in Gruppenarbeit schließt sich nun eine Plenumsphase an, in der die Schülerinnen und Schüler ihre Lösungen präsentieren und erklären. Im Lehrer-Schüler-Gespräch werden ungeeignete Lösungen identifiziert und schließlich verworfen. Im Wesentlichen könnten folgende drei Schaltungen im Gespräch bleiben:

- Ein Vorwiderstand in Reihe zu 12 parallel geschalteten LEDs (Schaltung 1, vgl. Abbildung 1)
- Parallelschaltung aus 6 Zweigen mit jeweils einem 1 Vorwiderstand und 2 LEDs in Reihe geschaltet (Schaltung 2, vgl. Abbildung 2)
- Parallelschaltung aus 12 Zweigen mit jeweils einem Vorwiderstand und einer LED (Schaltung 3, ohne Abbildung)

Offensichtlich stellt Schaltung 2 einen Kompromiss dar und sollte daher unbedingt in die nachfolgende Gruppenarbeit (Bewertungsphase, Aufgabe 2) einbezogen werden.

Falls in Aufgabe 2 nur zwei Schaltungen bewertet werden sollen, wäre Schaltung 1 der Schaltung 3 vorzuziehen, weil Schaltung 1 sich besonders problematisch verhält, sowohl bei innerer Unterbrechung als auch bei Kurzschluss einer LED.

Nach kurzer Listung geeigneter Bewertungskriterien bearbeiten die Schülerinnen und Schüler die Aufgabe 2.

Als Bewertungskriterium sollte hier neben ...

- der Einhaltung der Betriebsdaten der Leuchtdioden,
- der Belastung des Netzteils
- und den anfallenden Energiekosten
- auch eine evtl. Überlastung der Vorwiderstände mit in Betracht gezogen werden.

Der Einsatz eines Hochlast-Widerstands mit einer Belastbarkeit von z. B. 5 W kostet gegenüber dem eines einfachen Kohleschicht-Widerstandes mit einer Belastbarkeit von 0,25 W nur wenige Cent Aufpreis und verhindert, dass die Schaltung unter Umständen enorm überhitzt. Der Sicherheitsaspekt sollte hierbei besonders betont werden.

Außerdem ist es im Vorfeld von Aufgabe 2 geboten, den Schülern beim Aspekt der Betriebssicherheit die beiden Möglichkeiten „innere Unterbrechung einer LED“ oder „Kurzschluss einer LED“ kurz vorzustellen.

Der Vollständigkeit halber wird im Lösungsvorschlag auch die Schaltung 3 thematisiert.

Zu Aufgabe 2:

Hilfekärtchen 1

Die von einer Spannungsquelle im Gleichstromkreis abgegebene elektrische Leistung lässt sich nach der Formel $P_{\text{el}} = U \cdot I$ berechnen. Die zugeführte elektrische Energie entspricht der verrichteten Stromarbeit $E_{\text{el}} = W_{\text{el}} = U \cdot I \cdot t = P_{\text{el}} \cdot t$.

Hilfekärtchen 2

Möchte man beispielsweise die vom Vorwiderstand aufgenommene elektrische Leistung berechnen, so verwendet man entsprechend die Formel $P_V = U_{R_V} \cdot I$.

Schaltung 1 (1 Vorwiderstand in Reihe zu 12 parallel geschalteten LEDs)

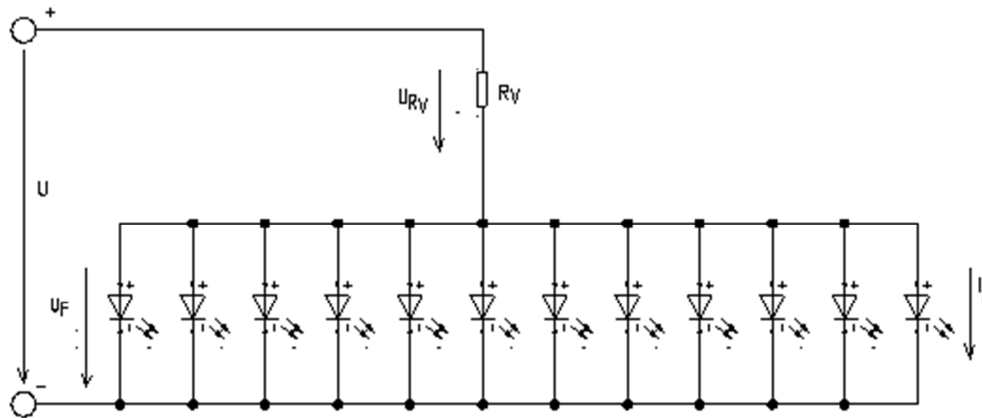


Abbildung 1: Schaltung 1

$$R_V = \frac{U_{R_V}}{I} \quad \text{wobei} \quad U_{R_V} = U - U_F \quad \text{und} \quad I = 12 \cdot I_F$$

$$R_V = \frac{U - U_F}{12 \cdot I_F}$$

$$R_V = \frac{9,0 \text{ V} - 3,6 \text{ V}}{12 \cdot 0,060 \text{ A}}$$

$$\mathbf{R_V = 7,5 \Omega}$$

Schaltung 2 (6 Zweige mit jeweils einem Vorwiderstand und 2 LEDs in Reihe)

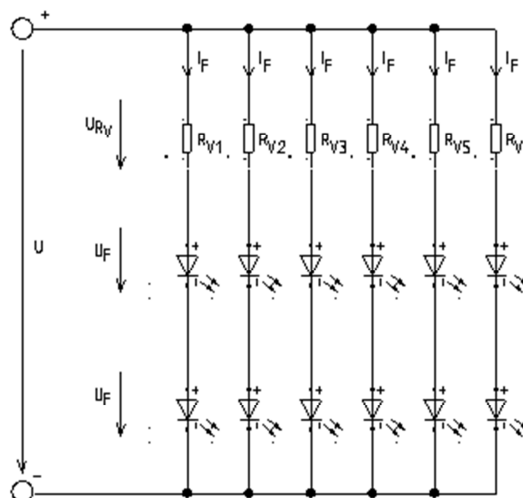


Abbildung 2: Schaltung 2

$$R_{V1} = R_{V2} = R_{V3} = R_{V4} = R_{V5} = R_{V6} = \frac{U - 2 \cdot U_F}{I_F}$$

$$R_{V1} = R_{V2} = R_{V3} = R_{V4} = R_{V5} = R_{V6} = \frac{9,0 \text{ V} - 2 \cdot 3,6 \text{ V}}{0,060 \text{ A}}$$

$$\mathbf{R_{V1} = R_{V2} = R_{V3} = R_{V4} = R_{V5} = R_{V6} = 30 \Omega}$$

Schaltung 3 (12 Zweige mit jeweils einem Vorwiderstand und einer LED, ohne Abb.)

$$R_{V1} = \dots = R_{V12} = \frac{U - U_F}{I_F}$$

$$R_{V1} = \dots = R_{V12} = \frac{9,0 \text{ V} - 3,6 \text{ V}}{0,060 \text{ A}}$$

$$\mathbf{R_{V1} = \dots = R_{V12} = 90 \Omega}$$

Zur Betriebssicherheit

Bei allen 3 Schaltungsvarianten ist gewährleistet, dass der erforderliche Stromfluss in der Zuleitung im Normalbetrieb kleiner als 1,0 A ist.

Schaltungen 1 und 3: $12 \cdot 0,060 \text{ A} = 0,72 \text{ A}$ und Schaltung 2: $6 \cdot 0,060 \text{ A} = 0,36 \text{ A}$

Eine Störung des Betriebes kann im Extremfall in einer inneren Unterbrechung einer LED ($R_{LED} \rightarrow \infty$) oder in einem Kurzschluss einer LED ($R_{LED} \rightarrow 0$) begründet liegen.

Schaltung 1 (1 Vorwiderstand in Reihe zu 12 parallel geschalteten LEDs):

Wie in der Angabe beschrieben, dürfen LEDs als konstante Widerstände im Bereich ihrer Betriebsdaten aufgefasst werden. In Schaltung 1 sind 12 derartige Widerstände parallel geschaltet. Innere Unterbrechung bei einer defekten LED bedeutet, dass der Gesamtwiderstand dieser Parallelschaltung durch den Wegfall eines Zweiges steigt. Nach den Gesetzen der Reihenschaltung steigt damit auch der Spannungsfall U_F an den übrigen LEDs, da der Wert des Vorwiderstandes R_V unverändert bleibt. Das wiederum erhöht den Stromfluss in den einzelnen Zweigen. Die übrigen LEDs leuchten heller und es besteht die Gefahr der Zerstörung der LEDs, falls der Wert für die maximal zulässige Stromstärke in einer einzelnen LED in Durchlassrichtung überschritten wird. Mit jeder weiteren ausfallenden LED steigt das Risiko der Zerstörung der übrigen LEDs an.

Bei einem Kurzschluss einer LED tendiert der Gesamtwiderstand dieser Parallelschaltung gegen Null. Am Vorwiderstand liegt dann die Betriebsspannung von 9,0 V an. Es ist daher sorgfältig zu prüfen, welche Belastbarkeit des Vorwiderstandes in dieser Schaltung gewählt werden muss:

$$P_{R_V} = U \cdot I = U \cdot \frac{U}{R_V} = 9,0 \text{ V} \cdot \frac{9,0 \text{ V}}{7,5 \Omega} = 11 \text{ W}$$

Das Netzgerät wird aber im Falle des LED-Kurzschlusses in jedem Fall durch einen deutlich erhöhten Stromfluss überlastet:

$$I = \frac{U}{R} = \frac{9,0 \text{ V}}{7,5 \Omega} = 1,2 \text{ A} > 1,0 \text{ A}$$

Schaltung 2 (6 Zweige mit jeweils einem Vorwiderstand):

Der Ausfall einer LED durch innere Unterbrechung führt dazu, dass diese sowie die zu ihr in Reihe geschaltete LED erlöschen. Für die übrigen 10 LEDs bleibt dieser Ausfall allerdings ohne Folgen.

Der Kurzschluss einer LED führt nach den Gesetzen der Reihenschaltung zu einem herabgesetzten Widerstand des jeweiligen Zweiges. Die zweite in Reihe geschaltete LED leuchtet daher heller und wird womöglich ebenfalls zerstört. Falls diese Zerstörung zu einer inneren Unterbrechung führt, bleibt dies wiederum ohne Folgen für die übrigen 10 LEDs.

Für den Fall, dass auch in der zweiten, in Reihe geschalteten LED ein Kurzschluss entsteht, liegt am Vorwiderstand dieses Zweiges die Gesamtspannung von 9,0 V an. Die erforderliche Belastbarkeit des Vorwiderstandes ist für diesen Fall zu prüfen:

$$P_{R_V} = U \cdot I = U \cdot \frac{U}{R_V} = 9,0 \text{ V} \cdot \frac{9,0 \text{ V}}{30 \Omega} = 2,7 \text{ W}$$

(Ein einfacher Kohleschicht-Widerstand wird hier bereits deutlich überlastet; daher sind Leistungswiderstände mit einer handelsüblichen Belastbarkeit von mindestens 3 W zu wählen.)

Das Netzgerät wird selbst in diesem Fall von 2 LED-Kurzschlüssen in einem Schaltungsweig nicht überlastet:

$$I = \frac{9,0 \text{ V}}{30 \Omega} + 5 \cdot 0,060 \text{ A} = 0,60 \text{ A} < 1,0 \text{ A}$$

Schaltung 3 (12 Zweige mit jeweils einem Vorwiderstand und einer LED, ohne Abb.):

Der Ausfall einer LED durch innere Unterbrechung sorgt dafür, dass die LED im betroffenen Zweig erlischt. Für die übrigen 11 LEDs bleibt dieser Ausfall allerdings ohne Folgen.

Der Kurzschluss einer LED führt nach den Gesetzen der Reihenschaltung zu einem herabgesetzten Widerstand des jeweiligen Zweiges. Für die übrigen 11 LEDs bleibt auch dieser Ausfall ohne Konsequenzen.

Die erforderliche Belastbarkeit des Vorwiderstandes ist für diesen Fall zu prüfen:

$$P_{R_V} = U \cdot I = U \cdot \frac{U}{R_V} = 9,0 \text{ V} \cdot \frac{9,0 \text{ V}}{90 \Omega} = 0,90 \text{ W}$$

(Ein einfacher Kohleschicht-Widerstand wird hier überlastet, weshalb Leistungswiderstände gewählt werden müssen.)

Das Netzgerät wird im Fall eines LED-Kurzschlusses nicht überlastet:

$$I = \frac{9,0 \text{ V}}{90 \Omega} + 11 \cdot 0,060 \text{ A} = 0,76 \text{ A} < 1,0 \text{ A}$$

Zu den Betriebskosten

Schaltung 1 (1 Vorwiderstand in Reihe zu 12 parallel geschalteten LEDs):

$$E_{\text{el}} = P_{\text{el}} \cdot t \quad \text{wobei} \quad P_{\text{el}} = U \cdot I$$

$$E_{\text{el}} = 9,0 \text{ V} \cdot 12 \cdot 0,060 \text{ A} \cdot 4,0 \text{ h} \quad E_{\text{el}} = 0,026 \text{ kWh}$$

$$\text{Stromkosten: } 0,026 \text{ kWh} \cdot 0,35 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} = 0,0091 \text{ €} = 0,91 \text{ Ct.}$$

Schaltung 2 (6 Zweige mit jeweils einem Vorwiderstand):

$$E_{\text{el}} = 9,0 \text{ V} \cdot 6 \cdot 0,060 \text{ A} \cdot 4,0 \text{ h} \quad E_{\text{el}} = 0,013 \text{ kWh}$$

$$\text{Stromkosten: } 0,013 \text{ kWh} \cdot 0,35 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} = 0,0045 \text{ €} = 0,45 \text{ Ct.}$$

Schaltung 3 (12 Zweige mit jeweils einem Vorwiderstand und einer LED, ohne Abb.):

$$E_{\text{el}} = 9,0 \text{ V} \cdot 0,060 \text{ A} \cdot 12 \cdot 4,0 \text{ h} \quad E_{\text{el}} = 0,026 \text{ kWh}$$

$$\text{Stromkosten: } 0,026 \text{ kWh} \cdot 0,35 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} = 0,0091 \text{ €} = 0,91 \text{ Ct.}$$

In allen drei Schaltungen leuchten die 12 LEDs entsprechend ihren Betriebsdaten. Der unterschiedliche Energiebedarf muss also in den Vorwiderständen begründet liegen. Der Spannungsfall am Vorwiderstand in Schaltung 1 beträgt 5,4 V, in Schaltung 2 nur 1,8 V. Der Stromfluss durch den Vorwiderstand in Schaltung 1 beträgt 0,72 A, in Schaltung 2 jeweils nur 0,060 A. Nach der Beziehung $P_V = U_{R_V} \cdot I$ wird dem Vorwiderstand von Schaltung 1 also die 36fache elektrische Energie zugeführt, die letztlich als Wärmeleistung abgeführt werden muss. Berücksichtigt man, dass bei Schaltung 2 aber 6 Vorwiderstände zum Einsatz kommen, erhält man immerhin noch die 6fache nicht nutzbare Leistungsaufnahme beim Vorwiderstand in Schaltung 1.

Der Spannungsfall an den Vorwiderständen in Schaltung 3 beträgt ebenfalls 5,4 V. Es fließt im Vergleich zu Schaltung 1 zwar nur 1/12 des Stromflusses. Mit insgesamt 12 Vorwiderständen wird aber insgesamt dieselbe Wärmeleistung umgesetzt.

Abschließende Bewertung

Unter Berücksichtigung aller gewonnenen Erkenntnisse, ist Schaltung 2 zu bevorzugen. Sie „benötigt“ deutlich weniger elektrische Energie. Zudem werden die übrigen LEDs bei einem Ausfall einzelner LEDs nicht in Mitleidenschaft gezogen. Man benötigt zwar 5 Bauteile mehr als für Schaltung 1, allerdings fällt dies in den Gesamtkosten (einfache Schichtwiderstände) kaum ins Gewicht.

Schaltung 3 erfordert noch mehr Bauteile und „benötigt“ die gleiche elektrische Energie wie Schaltung 1. Allerdings ist sie bezüglich der Betriebssicherheit ebenfalls als eher unkritisch zu bewerten.

Anregung zum weiteren Lernen

Die im Unterricht evtl. nicht weiter behandelte Schaltung 3 könnte in einer Hausaufgabe näher untersucht werden. Die dazu erforderlichen Techniken wurden im Unterricht behandelt, so dass es sich um eine reine Übungs-/ Reproduktionsaufgabe handelt. Entsprechende Ausführungen finden sich unter „Hinweise zum Unterricht“.

Die Lichtschiene könnte mit überschaubarem finanziellem Aufwand auch praktisch realisiert werden.

Gerade im Bereich der farbenprächtigen Meerwasseraquaristik scheint es reizvoll, die Lichtschiene mit unterschiedlichen Lichtfarben auszustatten. Typische Durchlassspannungen variieren im Bereich von 1,8 V (rot) bis 3,6 V (blau). Es könnte eine entsprechende Schaltung für vorgegebene Stückzahlen an verschiedenfarbigen LEDs entwickelt werden.

Quellen- und Literaturangaben

Abbildung 1: Schaltung 1, eigene Zeichnung, Stefan Boxdorfer, 31.01.2017

Abbildung 2: Schaltung 2, eigene Zeichnung, Stefan Boxdorfer, 31.01.2017

- [1] Handreichung „[Sicher experimentieren in Physik](#)“ verfügbar zum Download auf den Internetseiten des [Staatsinstituts für Schulqualität und Bildungsforschung](#), 15.06.2017