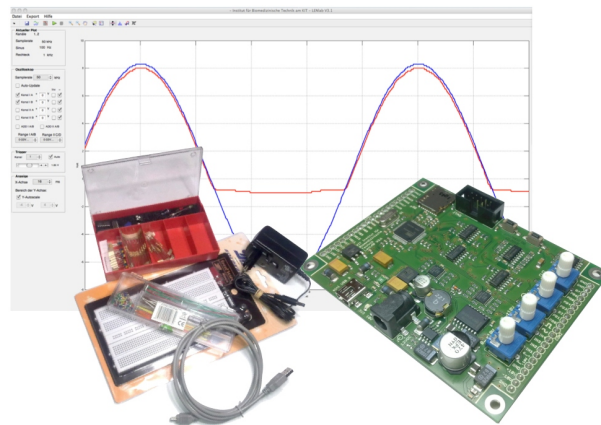


Kurs 3 **Sensorik**



Gruppe 80

Vorname	Nachname	Matrikel-Nr.	u-Account	E-Mail
Lucas Antonie	Romier	2214444	ukhie	lucas.romier@gmail.com
Aleksandra Marta	Wrzeszcz	2239492	ubsyj	a.wrzeszcz98@o2.pl
Timo Johannes	Weber	2253834	uhoiz	timo_weber@online.de

21. Mai 2019

Abstract

Dieser Leitfaden dient als Orientierung bei der Bearbeitung des Workshops Elektrotechnik und Informationstechnik. Er gibt Ihnen wichtige Hinweise, die Sie sowohl bei der Planung und Durchführung des Projekts als auch bei der Erstellung der abschließenden Projektdokumentation beachten sollten. Gleichzeitig dient dieses Dokument als Vorlage zur Erstellung der Ausarbeitung und enthält Beispiele, die Ihnen den Umgang mit \LaTeX erleichtern sollen.

Grundsätzlich sollen Sie sich bei der Durchführung und Ausarbeitung an die Anforderungen der Aufgabenstellung der jeweiligen Kurse halten.

Sie können die Quelldateien dieses Dokuments unmittelbar als Vorlage benutzen, um Protokolle zu den verschiedenen Kursen anzufertigen. Tauschen Sie dazu die einzelnen Quelldateien aus oder passen Sie den Text in den verschiedenen Dateien nach Ihren Bedürfnissen an.

Inhaltsverzeichnis

1	Vorbereitung	5
2	Aufgaben	6
2.1	Lüfterschaltung	6
2.1.1	Literaturrecherche	6
2.1.2	Materialien & Methoden	8
2.1.3	Aufgabe 2.1: Rechnung Lüfterschaltung 1	11
2.1.4	Aufgabe 2.2: Rechnung Lüfterschaltung 2	11
2.1.5	Diskussion	12
2.2	Lichtschanke	13
2.2.1	Literaturrecherche	13
2.2.2	Materialien & Methoden	14
2.2.3	Entladung Kondensator	18
2.2.4	Laden des Kondensators	18
2.2.5	Geschwindigkeitsmessanlage	18
2.2.6	Fragen zur Gesamtschaltung	20
2.2.7	Diskussion	20

Abbildungsverzeichnis

1	Kennlinie eines NTCs	7
2	Aufbau der 1. Lüfterschaltung	8
3	Praktischer Aufbau der 1. Lüfterschaltung	8
4	Aufbau der 2. Lüfterschaltung	10
5	Praktischer Aufbau der 2. Lüfterschaltung	10
6	Einfaches Schaltbild einer Lichtschanke	13
7	Spannungsverlauf von U_{Out}	14
8	Schaltung zur Messung der Entladung eines Kondensators	14
9	Gemessene Entladung des Kondensators	15
10	Schaltung zur Messung der Ladung und Entladung eines Kondensators durch eine Lichtschanke	15
11	Praktischer Aufbau 1 Lichtschanke	16
12	Gemessene Ladung und Entladung des Kondensators bei 1 Lichtschanke	16
13	Schaltung zur Messung der Ladung und Entladung eines Kondensators durch zwei Lichtschranken	17
14	Praktischer Aufbau 2 Lichtschranken	17
15	Ladung der Kondensatoren bei schneller Durchquerung	18
16	Ladung der Kondensatoren bei mittlerer Durchquerung	19
17	Ladung der Kondensatoren bei langsamer Durchquerung	19

Tabellenverzeichnis

1	Arbeitsaufteilung in der Gruppe	5
2	Genutzte Materialien	5
3	Entladung Kondensator	18
4	2 Lichtschranken Messungen	20

1 Vorbereitung

Arbeitsaufteilung:

Tabelle 1: Arbeitsaufteilung in der Gruppe

Aufgabe	Lucas	Aleksandra	Timo
Motivation		x	
Literaturrecherche			x
Lüfterschaltung	x	x	x
Geschwindigkeitsmessanlage	x	x	x
Dokumentation	x	x	x
Diskussionen	x	x	x
Bericht & Spice	x		

Genutzte Materialien:

Tabelle 2: Genutzte Materialien

Bauteiltyp	Beschreibung
Launchpad	Tiva C Series, 1x
Heißleiter	NTCLE100E3 (Vishay): $R_{25} = 10k\Omega$ (Toleranz $\pm 5\%$), $B_{25/85} = 3977K$ (Toleranz $\pm 0.75\%$), 1x
Lichtschanke	Emitter: V472P Detektor: S472P TELEFUNKEN Semiconductors
Transistor	BC547C (STMicroelectronics)
Speicherkondensatoren	diverse (Toleranz $\pm 20\%$)
Kohleschichtwiderstände	diverse (Toleranz $\pm 5\%$)

2 Aufgaben

2.1 Lüfterschaltung

2.1.1 Literaturrecherche

a)

Im Bereich der temperaturabhängigen Bauteile muss zwischen aktiven und passiven Elementen unterschieden werden. Aktive Temperatursensoren erzeugen selbstständig eine auszuwertende Spannung oder einen Strom und können ohne Versorgung betrieben werden. Passive Sensoren hingegen benötigen zum Betrieb eine Versorgungsspannung.

Ein Beispiel für ein passive temperaturabhängige Bauteile sind NTC/PTC-Widerstände. Diese Bauteile ändern aufgrund der Umgebungstemperatur ihren Widerstandswert, welcher wiederum Einfluss auf eine abzugreifende Messspannung hat.

Ein aktives temperaturabhängiges Bauteil ist das Thermoelement. Dieses erzeugt mittels zwei unterschiedlicher Metalle eine Spannungsdifferenz von etwa $10\mu V$ pro $1^\circ C$ Temperaturänderung entlang des Elements. Diese Spannung tritt aufgrund des sog. Seebeck-Effekts auf und kann gemessen und ausgewertet werden.

Ein weiteres temperaturabhängiges Bauteil ist der Bimetallschalter, der die Zustände „geöffnet“ und „geschlossen“ haben kann. Der Bimetallschalter besteht aus zwei verbundenen Metallen mit unterschiedlicher Temperatúrausdehnung, wodurch sich der Metallstreifen bei Erwärmung biegt und einen Kontakt schließt oder öffnet. [8] [7]

b)

NTC:

Ein NTC-Widerstand oder auch Heißeiter genannt, ist ein temperaturabhängiges Bauteil. Genauer ist der Widerstandswert abhängig von der Temperatur des Widerstands. Hierbei steht die Abkürzung NTC für die englische Beschreibung „negative temperature coefficient“. Sein Widerstand sinkt dementsprechend mit zunehmender Temperatur.

NTC-Widerstände werden nach ihrem Widerstandswert bei Referenztemperatur von $25^\circ C$ Celsius spezifiziert.

Veranschaulicht wird das Verhalten eines NTC/PTC-Widerstands durch zwei entgegengesetzt oder gleich orientierte Pfeile in Schaltsymbol entsprechend des Widerstandsverhaltens bei steigender Temperatur.

NTC-Widerstände bestehen aus Metalloxiden von Kupfer, Eisen, Nickel, Kobalt, Mangan und Titan, welches mit Bindemitteln vermischt ist. Typische Bauformen sind Zylinderausführungen, Platten, SMD-Elemente zur Platinenanwendung und Tropfen. Der Anschluss der Kontakte erfolgt über metallisierte Oberflächen.

Der Größte Einsatzbereich von NTC-Widerständen besteht in der Funktion als Temperatursensor. Als passive Temperaturfühler werden NTCs in jeglichen Thermometern eingesetzt. Beispielhaft sind Anwendungen in Klimaanlage für Fahrzeuge und Gebäude, zur Temperaturüberwachung in Maschinen und elektrischen Geräten und der Einsatz in Wetterstationen. Außerdem werden NTCs als Anlasswiderstände von Motoren in Geräten eingesetzt, in de-

nen Stern-Dreieck-Schaltungen nicht wirtschaftlich oder realisierbar sind. Anwendung finden NTC-Widerstände ausschließlich in Anwendungen mit einem Temperaturbereich von 0°C bis ca. 150°C , da ihr Widerstandswert nur in diesem Bereich verwertbare Werte liefert.

Nachteile beim Einsatz von NTCs sind zudem die nicht linear verlaufende Widerstandskurve, die Ansprechzeit, die das Bauteil aufgrund seiner Masse benötigt um sich zu erwärmen oder abzukühlen und die Eigenerwärmung aufgrund des fließenden Stroms.[8] [9]

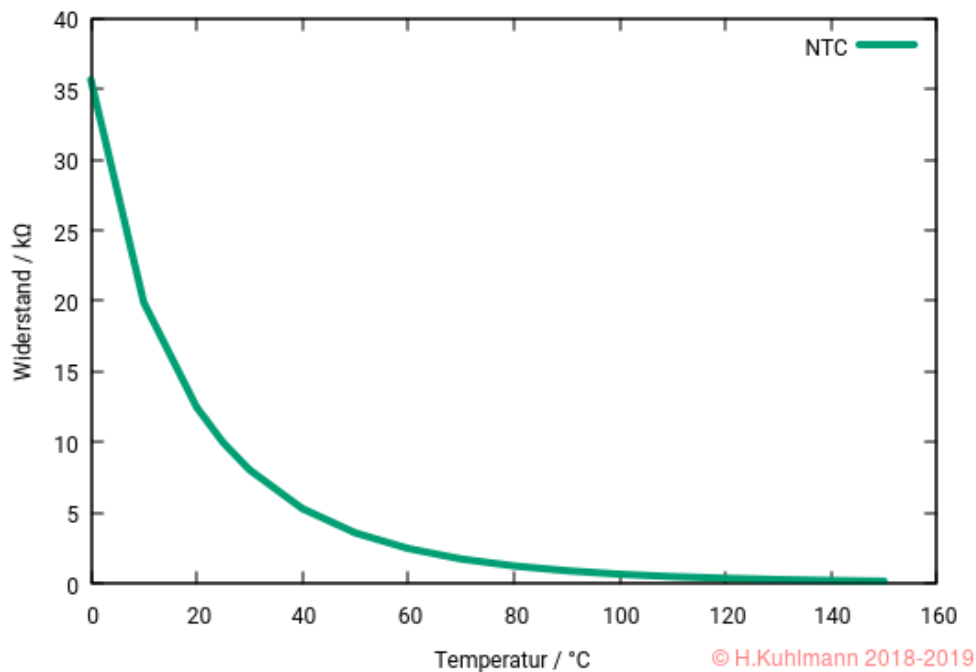


Abbildung 1: Kennlinie eines NTCs

$$R_T = R_N \cdot e^{B \cdot \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{N} \right)} \quad (1)$$

[8]

2.1.2 Materialien & Methoden

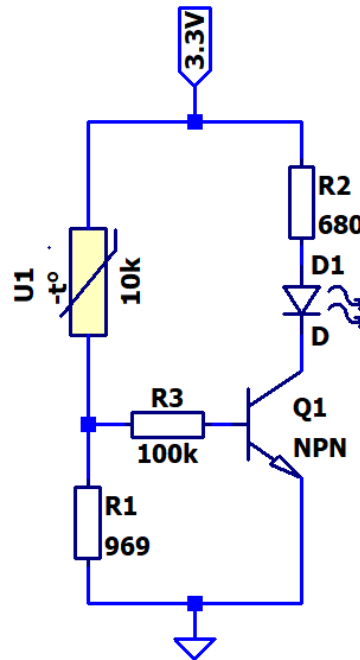


Abbildung 2: Aufbau der 1. Lüfterschaltung

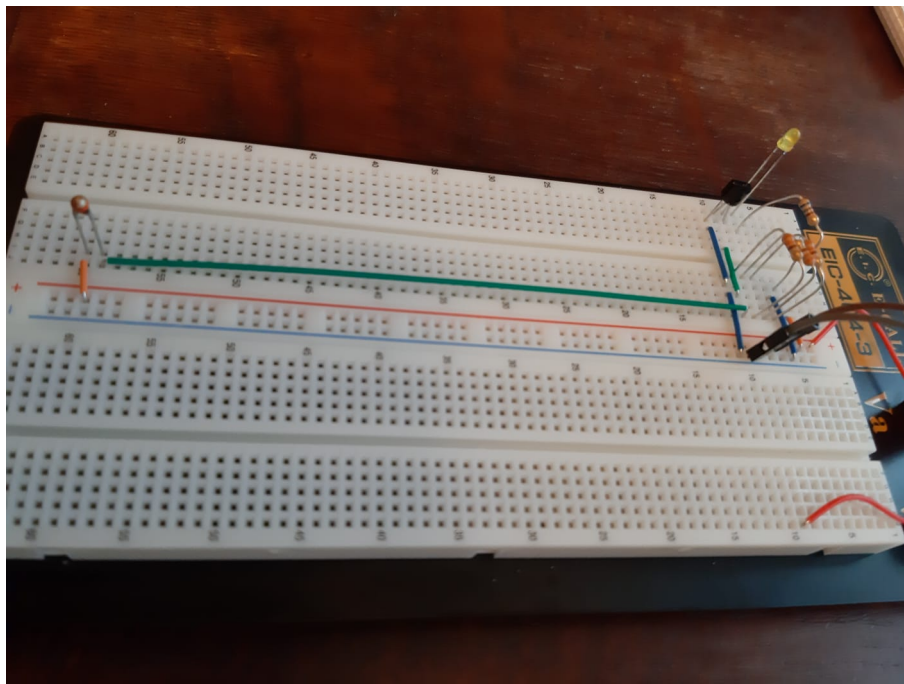


Abbildung 3: Praktischer Aufbau der 1. Lüfterschaltung

Durch folgende Rechnungen konnten wir auf die Widerstandswerte schließen:

Wie in der Aufgabenstellung gefordert, soll die Leistung des NTCs auf 15mW beschränkt sein. Hierfür wird für den vorhandenen Arbeitsbereich ($25^\circ\text{C} - 100^\circ\text{C}$) eine Berechnung des Widerstands R_1 benötigt. Der Widerstand bildet mit dem variablen Widerstandswert des NTCs den Gesamtwiderstand, von welchem aus die Leistung des NTCs berechnet werden kann. Vor die Basis des Transistors wird ein Widerstand geschaltet, für welchen gilt: $R_B \gg R_1$. Somit ist der Strom I_B in den Rechnungen vernachlässigbar klein.

Widerstand des NTCs bei 25°C : $10\text{k}\Omega$; 150°C : $182,6\Omega$ [2]

Berechnung des minimalen Widerstands R_1 zur Einhaltung der Leistungsvorgabe:

$$R_{ges} = 182.6\Omega + R_1$$

$$I_{ges} = \frac{3.3\text{V}}{R_{ges}}$$

$$U_{NTC} = 182.6\Omega \cdot I_{ges}$$

$$P_{NTC} = 182.6\Omega \cdot \left(\frac{3.3\text{V}}{R_{ges}} \right)^2 = 15 \cdot 10^{-3}\text{W}$$

$$\frac{182.6\Omega \cdot (3.3\text{V})^2}{(182.6\Omega + R_1)^2} = 15 \cdot 10^{-3}\text{W}$$

$$(182.6\Omega + R_1)^2 = \frac{182.6\Omega \cdot (3.3\text{V})^2}{15 \cdot 10^{-3}\text{W}}$$

$$182.6\Omega + R_1 = 3.3\text{V} \cdot \sqrt{\frac{182.6\Omega}{15 \cdot 10^{-3}\text{W}}} \quad (2)$$

$$R_1 = 3.3\text{V} \cdot \sqrt{\frac{182.6\Omega}{15 \cdot 10^{-3}\text{W}}} - 182.6\Omega$$

$$R_1 = 181.5\Omega$$

Daraus folgt, dass $R_1 > 181.5\Omega$ gilt, da ansonsten über den NTC mehr als 15 mW abfallen würden.

Da der NTC einen negativen Temperaturkoeffizienten besitzt, steigt sein Widerstand bei sinkender Betriebstemperatur und sinkt analog bei steigender Betriebstemperatur. Daraus folgt ein geringerer Strom für Temperaturen unter 150°C und damit einhergehend eine geringere Leistung am NTC. Unser Arbeitsbereich beschränkt sich auf 25 - 150 Grad, somit ist diese Folgerung ausreichend für unseren Anwendungsbereich.

2 Aufgaben

Eine gelbe LED besitzt einen Spannungsabfall von $2.2V$. Deshalb muss über die vor den LEDs geschalteten Widerstände eine Spannung von jeweils $1.1V$ abfallen. Wählt man einen Widerstand von 680Ω , so beträgt der Strom $1.618mA$. Dabei fallen über der LED genau $2.2V$ ab. [1]

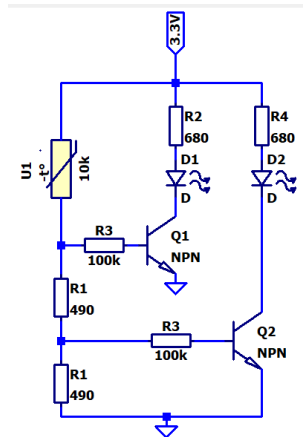


Abbildung 4: Aufbau der 2. Lüfterschaltung

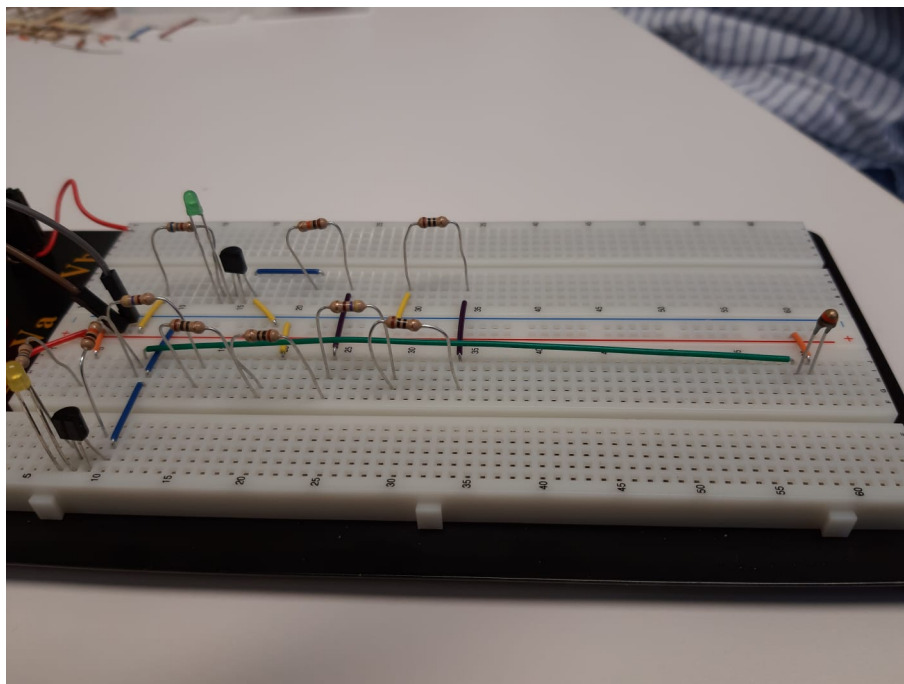


Abbildung 5: Praktischer Aufbau der 2. Lüfterschaltung

Notiz: Wir haben den NTC soweit außerhalb positioniert, um Interferenz mit den anderen Bauteilen (z.B. den Transistoren) zu vermeiden. Wir schalten vor der Diode einen Widerstand mit $100k\Omega$, um eine Verfälschung unserer Rechnung vorzubeugen und für jede Temperatur den zulässigen Diodenstrom einhalten zu können.

2.1.3 Aufgabe 2.1: Rechnung Lüfterschaltung 1

Laut Aufgabe soll ein Lüfter ab einer Temperatur von 49°C in Betrieb genommen werden. Der NTC besitzt bei 50°C einen Widerstandswert von 3605Ω . Um eine Schaltung des Lüfters bei dieser Temperatur zu konzipieren, muss der Widerstand R_1 passend gewählt werden. Da die Schaltschwelle bei 49°C stattfinden soll, nehmen wir als Widerstandswert des NTCs 3600Ω an.

$$R_{ges} = 3600\Omega + R_1$$

$$I_{ges} = \frac{U}{R_{ges}} = \frac{3.3V}{3600\Omega + R_1}$$

$$\begin{aligned} U_{R1} &= 0.7V = R_1 \cdot I_{ges} = R_1 \cdot \frac{3.3V}{3600\Omega + R_1} \\ 3.3V \cdot R_1 &= 2520V \cdot \Omega + 0.7V \cdot R_1 \\ 2.6V \cdot R_1 &= 2520V \cdot \Omega \\ R_1 &= 969.23\Omega \geq 181.5\Omega \end{aligned} \quad (3)$$

2.1.4 Aufgabe 2.2: Rechnung Lüfterschaltung 2

Laut Aufgabe soll ein zweiter Lüfter ab einer Temperatur von 78°C in Betrieb genommen werden. Der NTC besitzt bei 78°C einen Widerstandswert von ca. 1330Ω . Um eine Schaltung des Lüfters bei dieser Temperatur zu konzipieren, muss der Widerstand R_1 passend gewählt werden. Außerdem besitzt der NTC bei 80°C einen Widerstandswert von 1256Ω . [2]

$$R_{ges} = 1330\Omega + R_1 + R_2$$

$$R_1 = R_2$$

$$R_{ges} = 1330\Omega + 2 \cdot R_1$$

$$I_{ges} = \frac{U}{R_{ges}} = \frac{3.3V}{1330\Omega + 2 \cdot R_1}$$

$$U_1 = 2 \cdot R_1 \cdot I_{ges} = 2 \cdot R_1 \cdot \frac{3.3V}{1330\Omega + 2 \cdot R_1}$$

$$\begin{aligned}U_{R1} &= 1.4V = \frac{6.6V \cdot R_1}{1330\Omega + 2 \cdot R_1} \\1.4V \cdot (1330\Omega + 2 \cdot R_1) &= 6.6V \cdot R_1 \\1862V \cdot \Omega + 2.8V \cdot R_1 &= 6.6V \cdot R_1 \\R_1 &= 490\Omega \geq 181.5\Omega\end{aligned}\tag{4}$$

Überprüfung des Widerstandswertes bei $50^\circ C$ Schaltschwelle

$$R_{ges} = 3605\Omega + 2 \cdot 490\Omega = 4585\Omega$$

$$I_{ges} = \frac{U}{R_{ges}} = \frac{3.3V}{4585\Omega} = 0.72mA$$

$$U = R_{ges} \cdot I_{ges} = 4585\Omega \cdot 0.72mA = 0.705V$$

Somit ist unser errechneter Widerstand für beide Schaltungsteile verwendbar, da bei $49^\circ C$ die Spannung U minimal geringer wäre.

2.1.5 Diskussion

Wie in der Aufgabenstellung gefordert, erwärmten wir den NTC, um die Funktionalität der Schaltung zu überprüfen. Dabei benutzten wir abwechselnd ein Feuerzeug (Abstand 10cm) und einen Föhn (Abstand 5cm), um unterschiedlich präzise Ergebnisse zu erzielen. Beim praktischen Test funktionierte die Schaltung wie erwartet, denn die erste LED leuchtete ab ca. $50^\circ C$. Ab einer weiteren Erhitzung leuchtete auch die zweite LED nach kurzer Zeit. Beim Abkühlen erlosch die zweite LED zuerst, gefolgt von der ersten LED nach einer zeitlichen Verzögerung. Somit wäre unsere Schaltung als Lüfterschaltung praxistauglich.

2.2 Lichtschranke

2.2.1 Literaturrecherche

Die Lichtschranken sind ein gutes Beispiel für Anwendungen der fotoelektrischen Sensoren, genauer gesagt des fotoelektrischen Effekts in den Bereichen der Sicherheitstechnik, Logistik, Qualitätssicherung in der Produktion oder Messtechnik. Bezüglich des Fotoelektrischen Effekts unterscheidet man zwischen zwei Bauformen von Lichtschranken: [3] [4]

1. Einweg-Lichtschranken
2. Reflex-Lichtschranken

Bei den Grundbauteilen der Lichtschranken kann man unter anderem zwischen dem Sender und dem Empfänger unterscheiden. Bei einfachen Lichtschranken besteht der Sender aus einer LED oder Laserdiode, die zusammen mit einem Widerstand und einer Spannungsquelle geschaltet ist. Der Empfänger wird meistens durch eine Photodiode realisiert. In einfachen Schaltungen wird ein Spannungsteiler (Transistor mit einem Widerstand) eingebaut. Dazu werden noch Potentiometer, Operationsverstärker, eine Diode mit Widerstand und eine Spannungsquelle geschaltet. [5]

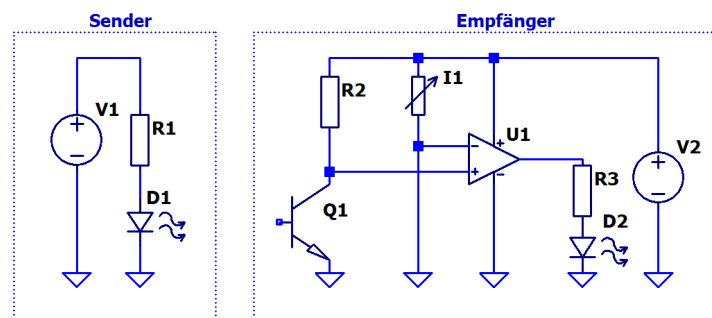


Abbildung 6: Einfaches Schaltbild einer Lichtschranke

Es gibt natürlich sowohl Vorteile als auch Nachteile der einzelnen Lichtschranken:

Einweg-Lichtschranken:

- + Sender und Empfänger benötigen kein Mindestabstand
- + Empfindlich auch für sehr kleine Objekte
- + Erkennt Objekte auch bei sehr hoher Geschwindigkeit
- Keine Garantie für Erkennung durchsichtiger Materialien

Reflex-Lichtschranken:

- + Bessere Einstellmöglichkeiten durch einen größeren Reflektor
- + Erkennung von blanken Metallteilen und gläsernen Oberflächen dank der Polarisationsfilter
- Sender und Empfänger benötigen ein Gehäuse [6]

2.2.2 Materialien & Methoden

Spannungsverlauf von U_{Out} bei bewegtem Körper:

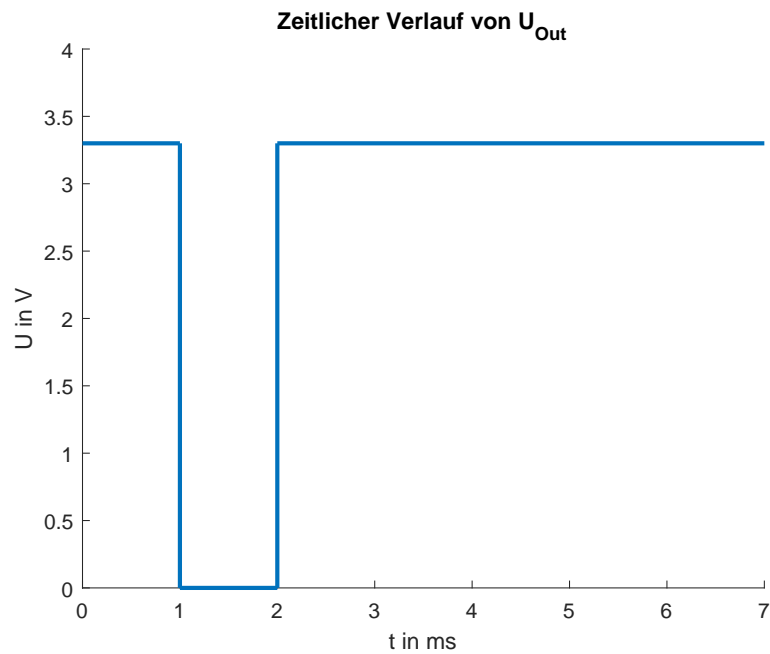


Abbildung 7: Spannungsverlauf von U_{Out}

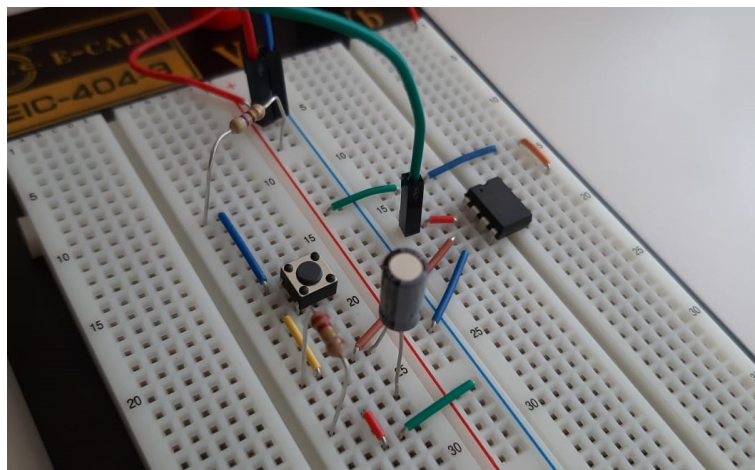


Abbildung 8: Schaltung zur Messung der Entladung eines Kondensators

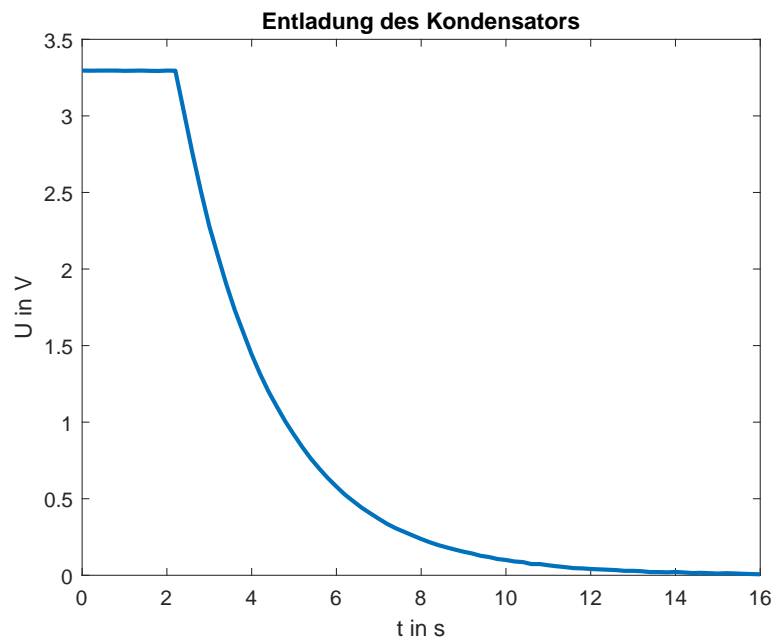


Abbildung 9: Gemessene Entladung des Kondensators

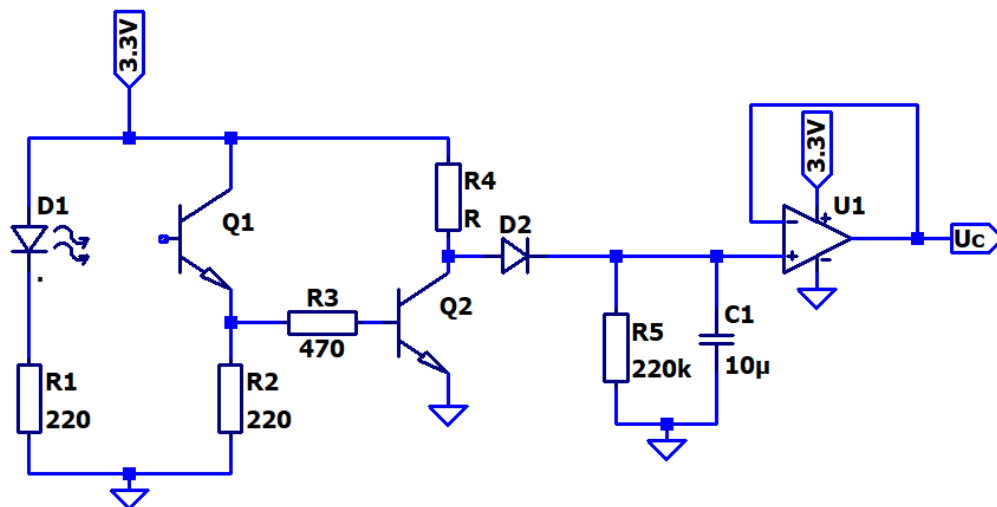


Abbildung 10: Schaltung zur Messung der Ladung und Entladung eines Kondensators durch eine Lichtschranke

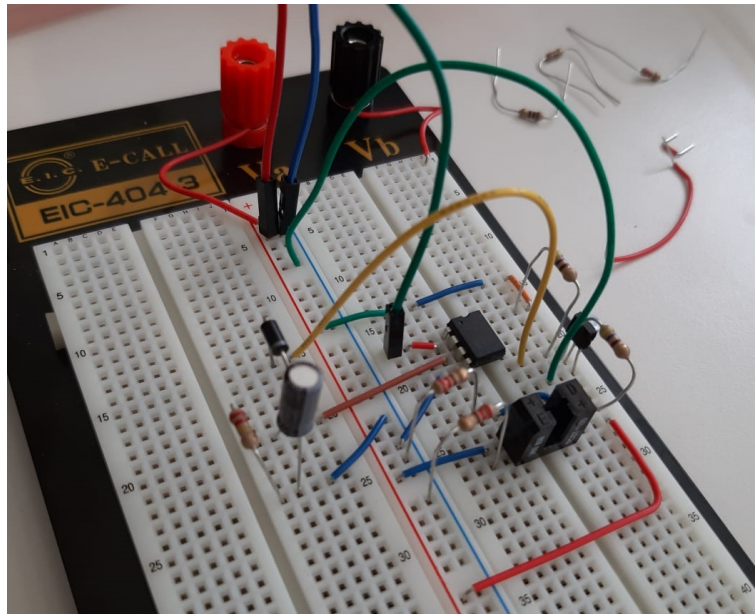


Abbildung 11: Praktischer Aufbau 1 Lichtschanke

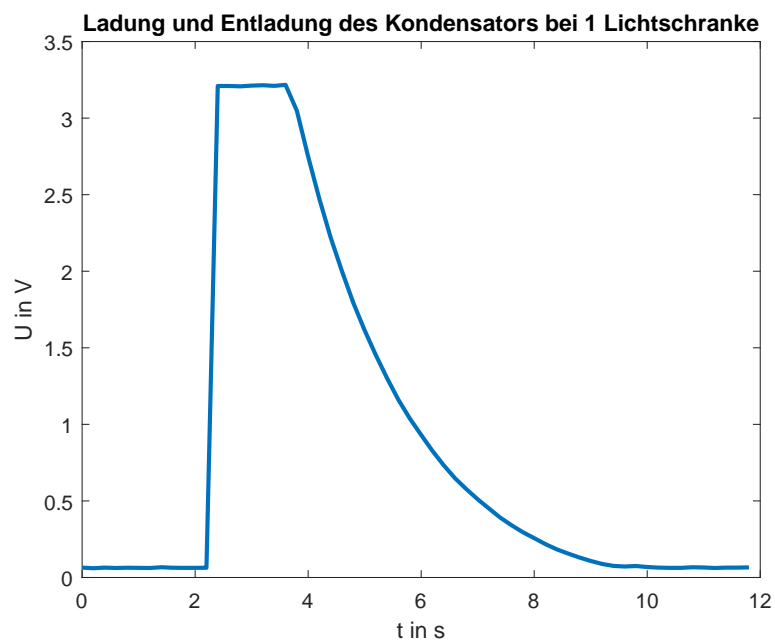


Abbildung 12: Gemessene Ladung und Entladung des Kondensators bei 1 Lichtschanke

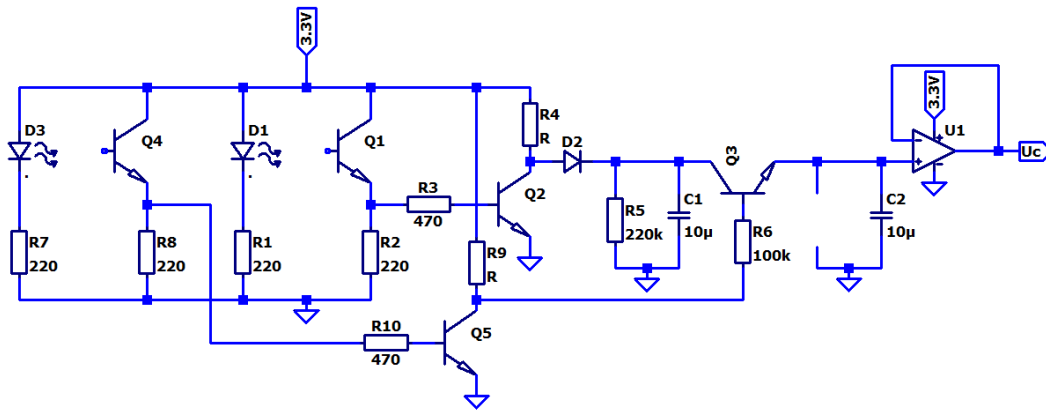


Abbildung 13: Schaltung zur Messung der Ladung und Entladung eines Kondensators durch zwei Lichtschranken

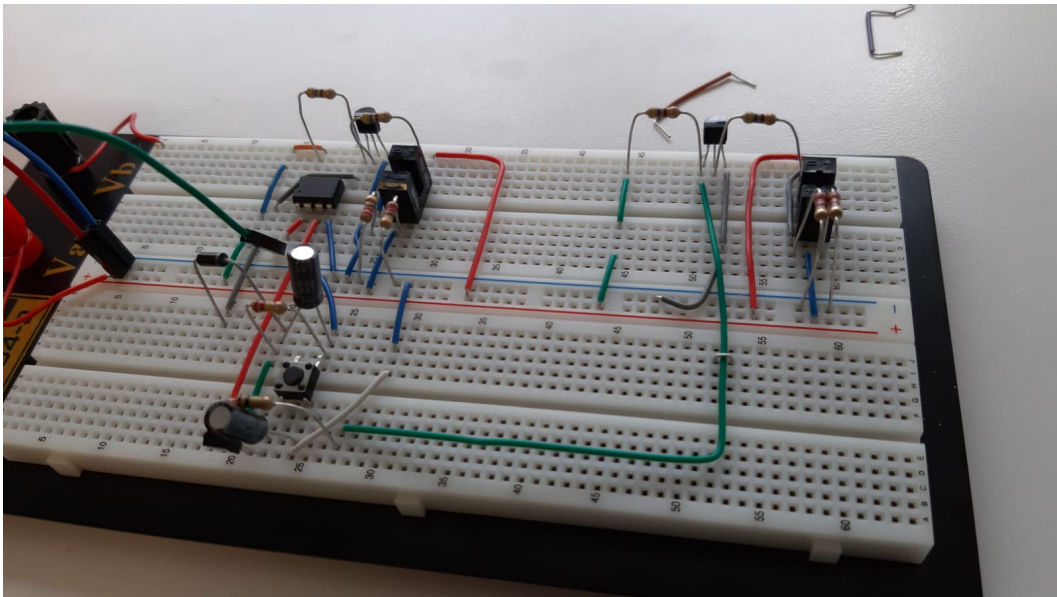


Abbildung 14: Praktischer Aufbau 2 Lichtschranken

2.2.3 Entladung Kondensator

$$U_c(t) = U_0 \cdot e^{-\frac{t}{R_C \cdot C}} \quad (5)$$

Tabelle 3: Entladung Kondensator

t	0 sec	1 sec	2 sec	3 sec	4 sec	5 sec
$U_c(t)$ errechnet	3.3V	2.09V	1.33V	0.84V	0.54V	0.34V
$U_c(t)$ gemessen	3.3V	2.089V	1.31V	0.835V	0.527V	0.335V

2.2.4 Laden des Kondensators

Um den Kondensator zu laden, schalten wir zwischen Diode und Transistor einen invertierenden Transistor mit Widerstandsverhältnis = 1, um das gewünschte Schaltverhalten der Lichtschranke zu erzielen.

Bei Durchtrennen der Lichtschranke lädt sich der Kondensator über den gewählten 470Ω Widerstand am Emitter des Invertierers sofort voll auf und entlädt sich, wie im vorherigen Aufgabenteil langsam, über den $220k\Omega$ Widerstand bei Freilassen der Lichtschranke.

Die Diode zwischen Kondensator und Invertierer dient dazu, die Entladung des Kondensators auf den Widerstand mit $220k\Omega$ zu beschränken.

2.2.5 Geschwindigkeitsmessanlage

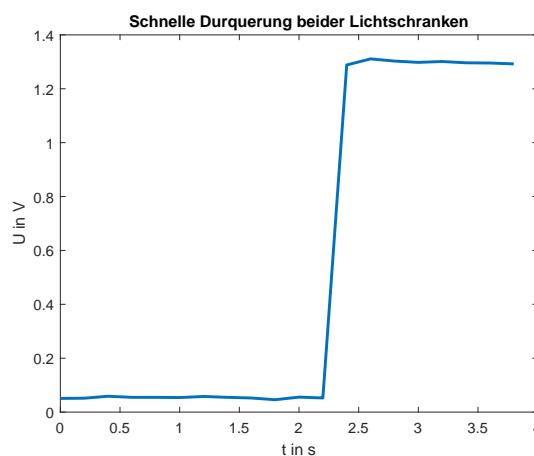


Abbildung 15: Ladung der Kondensatoren bei schneller Durchquerung

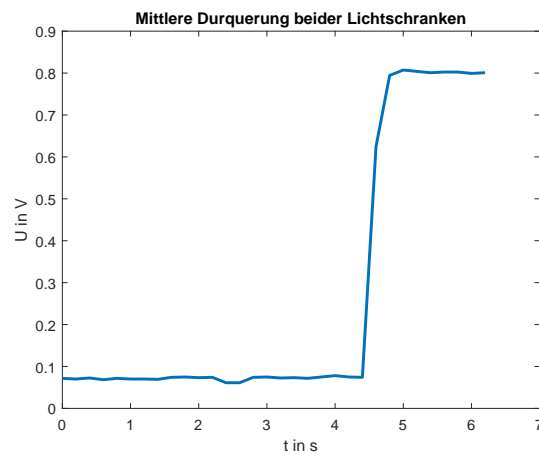


Abbildung 16: Ladung der Kondensatoren bei mittlerer Durchquerung

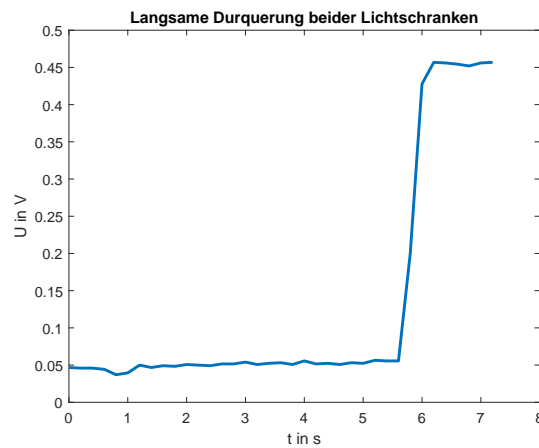


Abbildung 17: Ladung der Kondensatoren bei langsamer Durchquerung

Die Zeit wurde mit der Formel zur Entladung des Kondensators (5) durch Auflösen nach t berechnet.

Formel zur Berechnung der Geschwindigkeit (konstant ohne Beschleunigung):

$$v = \frac{s}{t} = \frac{8cm}{t} \quad (6)$$

Tabelle 4: 2 Lichtschranken Messungen

Messung	1	2	3
Gemessene Spannung	1.3 V	0.8V	0.45V
Kondensatorspannung	2.6V	1.6V	0.9V
Resultierende Zeit	0.52 sec	1.59 sec	2.86 sec
Resultierende Geschwindigkeit	15.38 $\frac{cm}{sec}$	5.08 $\frac{cm}{sec}$	2.78 $\frac{cm}{sec}$

2.2.6 Fragen zur Gesamtschaltung

Bei voller Ladung von C_1 wird die Hälfte der Ladung auf C_2 übertragen. Somit beträgt die maximale übertragene Ladung von C_1 auf C_2 :

$$\begin{aligned}
 Q_1 &= C_1 \cdot U_1 \\
 Q_2 &= \frac{Q_1}{2} \\
 &= \frac{10 \cdot 10^{-6} F \cdot 3.3V}{2} \\
 &= 16.5 \mu C
 \end{aligned} \tag{7}$$

Somit beträgt die maximale Ladung von C_2 bei vollem C_1 $16.5 \mu C$

Da sich durch den Ladungsausgleich beider Kondensatoren die Spannung halbiert, muss die gemessene Spannung verdoppelt in Betracht gezogen werden. Ansonsten würde die Geschwindigkeit verdoppelt errechnet werden. Durch den Abstand und die errechnete Zeit lässt sich dann die Geschwindigkeit errechnen (6).

Bei der Entladung kann auch ein Spannungsabfall stattfinden, da zwischen den beiden Kondensatoren keine ideale Leitung liegt. Diese Ungenauigkeiten können jedoch aufgrund von gerundeten Ergebnissen vernachlässigt werden.

2.2.7 Diskussion

Beim praktischen Versuch zur Ermittlung der Entladungskurve stürzte uns das Board bei jeder Messung ab. Erst nach Recherche fanden wir heraus, dass ein Vorwiderstand vor dem Kondensator einen Kurzschluss verhindert. Davon abgesehen funktionierte unsere konzipierte Schaltung der Aufgabenstellung gegenüber einwandfrei.

Bei der Geschwindigkeitsmessung bauten wir einen Invertierer ein, um die Lichtschranke an

unser Schaltverhalten anzupassen. Nach dieser Anpassung funktionierte die Messung wie erwartet.

Bei der endgültigen Geschwindigkeitsmessung stimmten die nach der Messung errechneten Werte mit der tatsächlichen Zeit überein. Deshalb schließen wir auf eine konstante Funktionalität unserer konzipierten Schaltung.

Literaturverzeichnis

- [1] <https://www.elektronik-kompodium.de/sites/bau/0201111.htm>,
Abrufdatum: 08. Mai 2019.
- [2] <http://www.vishay.com/docs/29049/ntcle100.pdf>, Abrufdatum: 08. Mai 2019.
- [3] Ekbert Hering; Gert Schönfelder. Sensoren in Wissenschaft und Technik. Springer (Berlin, Heidelberg), 2. Aufl. (2018)
- [4] Martin Löffler-Mang. Optische Sensorik. Springer-Verlag (Berlin Heidelberg New York), 2012. Aufl. (2011)
- [5] <https://www.electronicsplanet.ch/Schaltun/lichtsc1/lichtsc1.html>, Abrufdatum: 20. Mai 2019.
- [6] https://www.baumer.com/ch/de/service-support/know-how/funktionsweise/funktionsweise-und-technologie-von-lichtschrank-und-lichttastern/a/know-how_function_lichtschrank-lichttaster1, Abrufdatum: 20. Mai 2019.
- [7] Fischer, Rolf; Linse, Hermann. Elektrotechnik für Maschinenbauer. Vieweg u. Teubner (Wiesbaden), 14., überarb. u. akt. Aufl. 2012
- [8] Bernstein, Herbert. Formelsammlung. Springer Vieweg (Wiesbaden), 2., aktualisierte Auflage (2019)
- [9] Tietze, Ulrich; Schenk, Christoph; Gamm, Eberhard. Halbleiter-Schaltungstechnik. Springer (Berlin, Heidelberg), 12. Aufl. (2019)