

## APPLICATION NOTE

### ANO014 | Signalübertragung mit IR-Dioden und Photodetektoren



Zhelio Andreev, Erik Friedle

#### 1. EINLEITUNG UND THEORETISCHER HINTERGRUND

In der Signalübertragung ist die Kombination aus Infrarot (IR) Diode (IR-LED) und Photodetektor nicht mehr wegzudenken, dabei bietet dieses Duo eine einfache und vielfältige Möglichkeit Daten drahtlos zu übertragen. Die Anwendungen beschränken sich nicht nur auf industrielle Bereiche, auch im Alltag gibt es viele Berührungspunkte mit IR Kommunikation, beispielsweise bei Fernbedienungen, medizinischen Geräten, Bewegungsmelder oder auch in Sicherheitssystemen. Um diese Komponenten richtig zu verwenden, ist es wichtig zu verstehen wie sich das Team aus IR-Diode und Photodetektor in Applikationen verhält. In dieser Application Note soll deshalb auf das Verhalten von Phototransistoren und Photodioden bei unterschiedlichen Schaltungsparametern eingegangen werden. Dafür sollen die Auswirkungen auf den Kollektor- bzw. Photostrom, die Ausgangsspannung und für die Phototransistoren zusätzlich die Schaltzeiten analysiert werden.

Zunächst folgt eine kurze Einleitung wie sich die IR-LED und der Phototransistor bzw. die Photodiode allein verhalten, um zu verstehen was bei der Verbindung aus „Emitter“, der IR-LED, und „Detektor“, dem Phototransistor bzw. der Photodiode, zu beachten ist.

##### 1.1 IR-LED als Emmitter

###### Physikalische Größen im Datenblatt

- Spitzenwellenlänge (Peak wavelength –  $\lambda_{\text{PEAK}}$ ): Wellenlänge, bei der am meisten Licht emittiert wird
- Schwerpunktwellenlänge (Centroid wavelength –  $\lambda_{\text{CENTROID}}$ ): Mittlere Wellenlänge des Spektrums
- Strahlstärke (Radiant intensity) ist die abgestrahlte Leistung pro Raumwinkel in eine bestimmte Richtung (W/sr)
- Vorwärtsspannung (Forward voltage –  $V_f$ ): Spannung über der LED bei Betrieb in Durchflussrichtung

- Bandbreite des Spektrums (Spectral bandwidth –  $\Delta\lambda$ ): Bandbreite des Wellenlängenspektrums, dessen Intensität mindestens 50% des Maximums beträgt
- Betrachtungswinkel (Viewing Angle –  $2\Theta_{50\%}$ ): Winkel, in dem die IR-LED emittiert

Die IR-LED hat, wie jede Diode, eine  $I_f$ - $V_f$ -Kennlinie (siehe Abbildung 1).

Forward Current vs. Forward Voltage:

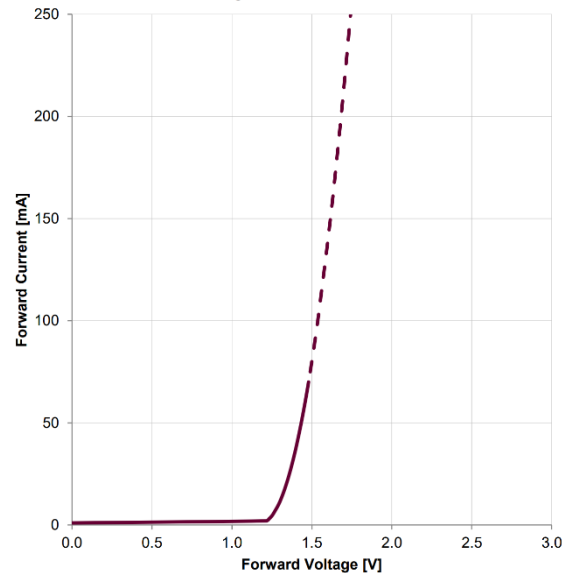


Abbildung 1: Beispielhafter Verlauf des Vorwärts-Strom  $I_f$  über die Vorwärts-Spannung  $V_f$  der IR-LED.

Diese dient zur eindeutigen Charakterisierung und beschreibt das Verhalten von Stromstärke und Spannung der IR-LED in Durchlassrichtung.

Für die Datenübertragung sind jedoch vor allem die optischen Eigenschaften entscheidend, insbesondere die IR-Emission bei einem gegebenen Strom. Der maßgebliche Parameter für IR-LEDs ist dabei die sogenannte Strahlstärke.

# APPLICATION NOTE

## ANO014 | Signalübertragung mit IR-Dioden und Photodetektoren

Bei den IR-LEDs von Würth Elektronik ist der Zusammenhang zwischen der Strahlstärke und dem Vorwärtsstrom annähernd linear (siehe Abbildung 2).

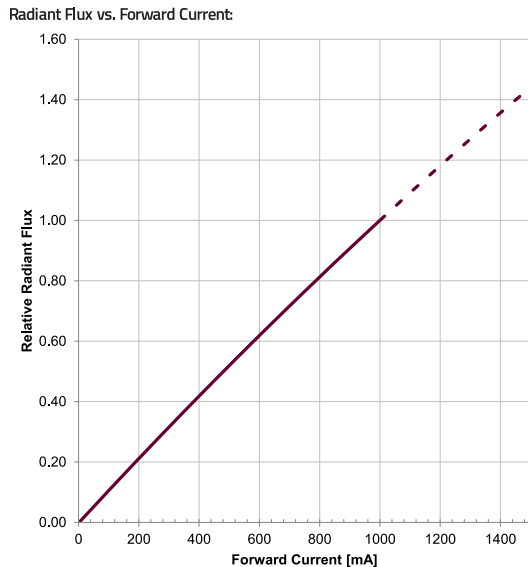


Abbildung 2: Beispielhafter Verlauf der Strahlungsintensität über den Vorwärts-Strom der IR-LED.

Dadurch lässt sich das elektrische und optische Verhalten nahezu vollständig charakterisieren.

Für die Datenübertragung sind jedoch weitere Parameter von entscheidender Bedeutung. Besonders wichtig sind die Wellenlänge (bei WE 850 nm oder 940 nm) sowie das emittierte Spektrum, das berücksichtigt werden muss. Diese Parameter sollten vor allem in der Datenübertragung bekannt sein, da sie – wie später gezeigt wird – auf den Detektor abgestimmt werden müssen. Im Zusammenhang mit der zuvor beschriebenen Strahlstärke spielt auch der Raumwinkel, in dem die LED emittiert, eine wichtige Rolle. Bei der Auswahl einer geeigneten IR-LED müssen diese Datenblattwerte an die jeweilige Anwendung und die spezifischen Gegebenheiten angepasst werden.

Bei der Übertragung von Daten wird die IR-LED im gepulsten Betrieb verwendet. Das hat den Vorteil, dass im Vergleich zum konstanten Betrieb weniger Energie benötigt wird und außerdem das Signal so einfacher digitalisiert werden kann. Um dabei nur kleine Verzögerungen auf Emittenseite zu verursachen, ist es wichtig, auf die Schaltzeiten der IR-LED zu achten. Wie in Abbildung 3 zu sehen ist, weisen IR-LEDs bei kleinen Stromstärken relativ lange Anstiegs- und Abfallzeiten auf; mit zunehmendem Strom nehmen diese deutlich ab.

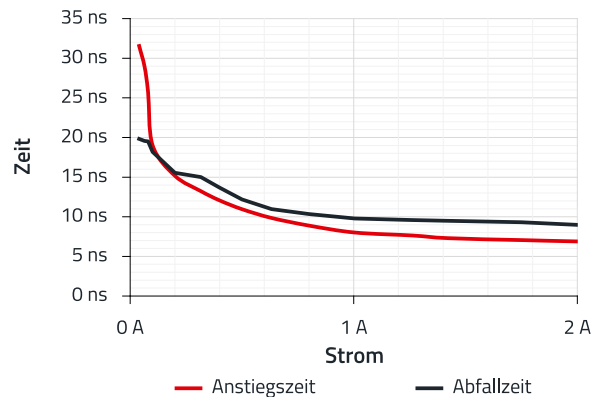


Abbildung 3: Beispielhafter Verlauf der Schaltzeiten von IR-LEDs.

Die genaue Abhängigkeit von der Stromstärke und die Größenordnung der Zeiten, ist allerdings von LED zu LED unterschiedlich und muss für die jeweilige Anwendung individuell betrachtet werden.

### 1.2 Phototransistor und Photodiode als Detektor

Nachdem das optische Signal auf der Emittenseite durch die IR-LED gesendet wurde, muss dieses nun auf der Detektorseite wieder in ein elektrisches Signal umgewandelt werden. Dafür bietet Würth Elektronik zwei Möglichkeiten: Den Phototransistor und die Photodiode. Bei beiden Bauteilen ist der Eingangsparameter das Infrarotlicht und der Ausgangsparameter eine Stromstärke, der sogenannte Photostrom für Photodioden bzw. der Kollektorstrom für den Phototransistor.

#### Physikalische Größen im Phototransistor Datenblatt

- Wellenlänge mit maximaler Sensitivität (Wavelength of peak sensitivity -  $\lambda_{\text{PEAK}}$ ): Wellenlänge, bei der die Sensitivität des Phototransistors maximal ist
- Größe der Bandbreite des Spektrums (Range of spectral bandwidth -  $\lambda$ ): Bandbreite der Wellenlänge, für die der Phototransistor sensitiv ist
- Kollektorstrom (Collector current -  $I_{\text{CE,P}}$ ): Strom, der durch den Phototransistor fließt (Näherung  $I_E \approx I_C$ )
- Kollektor-Emitter Dunkelstrom (Collector-Emitter dark current -  $I_{\text{CE,DARK}}$ ): Kollektorstrom, der ohne Beleuchtung durch den Phototransistor fließt
- Betrachtungswinkel (Viewing angle -  $2 \Theta_{50\%}$ ): Winkel, in welchem der Phototransistor detektiert

# APPLICATION NOTE

## ANO014 | Signalübertragung mit IR-Dioden und Photodetektoren

### Physikalische Größen im Photodioden Datenblatt

- Wellenlänge mit maximaler Sensitivität (Wavelength of peak sensitivity -  $\lambda_{PEAK}$ ): Wellenlänge, bei der die Sensitivität der Photodiode maximal ist
- Größe der Bandbreite des Spektrums (Range of spectral bandwidth -  $\lambda$ ): Bandbreite der Wellenlänge, für die die Photodiode sensitiv ist
- Photostrom (Photo current -  $I_P$ ): Strom, der durch die Photodiode fließt
- Dunkelstrom (Dark current -  $I_D$ ): Photostrom, der ohne Beleuchtung durch die Photodiode fließt
- Betrachtungswinkel (Viewing angle -  $2 \Theta_{50\%}$ ): Winkel, in welchem die Photodiode detektiert

Im Portfolio von WE gibt es diese Detektoren in den verschiedenen Bauformen mit den bereits oben genannten Wellenlängen von 850 nm und 940 nm. Für beide gilt, dass der in Abbildung 4 gezeigte Zusammenhang zwischen Bestrahlungsstärke und Photo- bzw.

Collector Current vs. Irradiance:

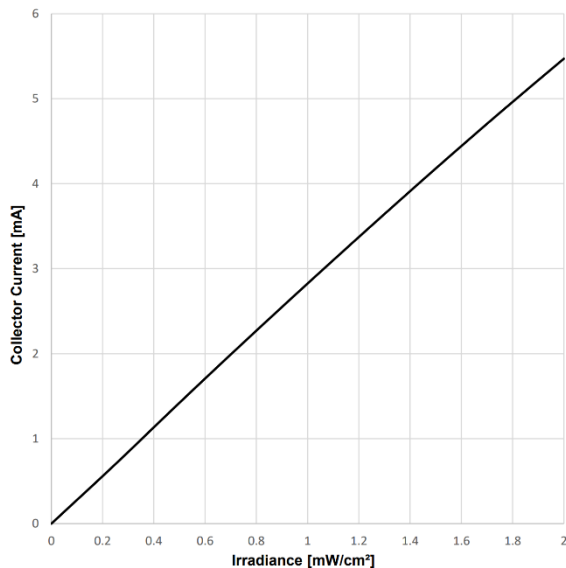


Abbildung 4: Typischer Verlauf des Stroms über der Bestrahlungsstärke.

Kollektorstrom sowohl für die Photodiode als auch den Phototransistor linear ist.

Die wichtigsten Unterschiede zwischen Photodiode und Phototransistor liegen in der Schaltzeit und dem Photo- bzw. Kollektorstrom. Die Schaltzeiten von Phototransistoren liegen in Bereich von Mikrosekunden, während sich Photodioden im Nanosekundenbereich bewegen. Dafür beträgt der Photostrom nur wenige Mikroampere und der Kollektorstrom liegt in der Größenordnung von Milliampere. Je nach

Anwendung muss entschieden werden, ob ein Phototransistor oder eine Photodiode sinnvoll ist. In dieser Application Note wird auf das Verhalten der beiden Bauteile bei unterschiedlichen Schaltungsparametern eingegangen.

Für beide Detektoren gibt es allgemein je zwei einfache Schaltungsmodelle. Für den Phototransistor sind es die sogenannte Common-Collector- (CC) und die Common-Emitter-Schaltung (CE) (Abbildung 5):

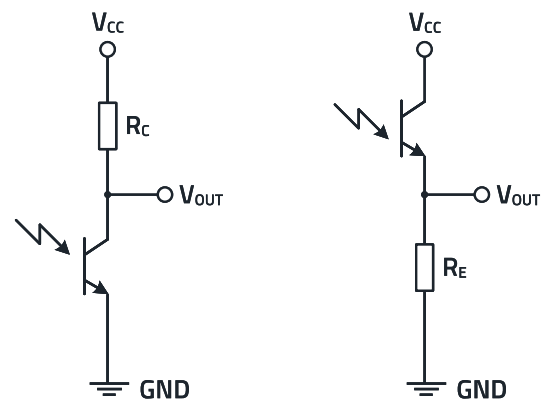


Abbildung 5: Schaltungsmodelle für den Photodetektor (Links die CC- und rechts die CE-Schaltung).

Bei steigender Bestrahlungsstärke sinkt die Ausgangsspannung in einer Emitterschaltung, während sie in einer Kollektorschaltung steigt. Die Schaltungsmodelle lassen sich auch auf die Photodiode übertragen. Berechnen lässt sich die Ausgangsspannung dabei nach dem Ohm'schen Gesetz. Das bedeutet für die Kollektorschaltung (1):

$$V_{OUT} = V_{CC} - R_L \cdot I_{CE/P} \quad (1)$$

Beziehungsweise für die Emitterschaltung:

$$V_{OUT} = R_L \cdot I_{CE/P} \quad (2)$$

Sowohl für den Phototransistor als auch für die Photodiode sind im Datenblatt die wichtigsten Kenngrößen angegeben. Der zentrale elektrische Parameter ist dabei der Kollektorstrom bzw. der Photostrom, der in Abhängigkeit von der Bestrahlungsstärke angegeben wird. Für beide Detektoren besteht ein linearer Zusammenhang, wie bereits in Abbildung 4 gezeigt wurde. Beim Phototransistor spielt zusätzlich die Kollektor-Emitter-Spannung bzw. die angelegte Versorgungsspannung eine Rolle:

# APPLICATION NOTE

## ANO014 | Signalübertragung mit IR-Dioden und Photodetektoren

Mit steigender Kollektor-Emitter-Spannung steigt auch der Kollektorstrom, wie in Abbildung 6 dargestellt.

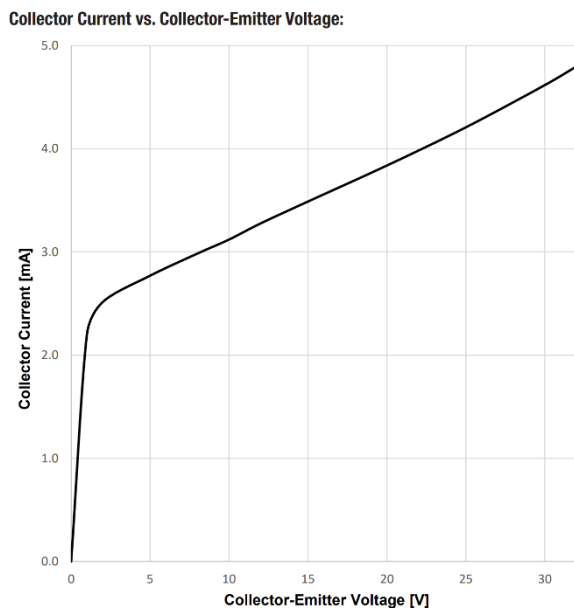


Abbildung 6: Kollektorstrom über der Kollektor-Emitter-Spannung.

Mit diesen zwei Graphen ist die elektrisch-optische Kopplung nahezu vollständig charakterisiert.

Ähnlich wie bei der IR-LED sind auch beim Photodetektor weitere optischen Parameter von Bedeutung. Dazu zählen die Wellenlänge mit maximaler Empfindlichkeit und die Bandbreite des Phototransistors, die – wie bereits oben erwähnt – optimal auf die IR-LED abgestimmt sein sollten. Ebenso ist der Betrachtungswinkel entscheidend, da dieser angibt in welchem Winkelbereich der Photodetektor detektieren kann. Diese Parameter sind, wie oben beschrieben, im Datenblatt angegeben.

Bei der Betrachtung der Bandbreite des Detektors sollte zusätzlich geprüft werden, ob ein Tageslichtfilter verwendet werden sollte. Dieser filtert sichtbares Licht und reduziert damit störende Einflüsse durch externe Lichtquellen.

### 1.3 Infrared Dream Team – Kombination aus Emitter und Detektor

Der Werbeslogan „Infrared Dream Team“ beschreibt die perfekt abgestimmte Kombination von Emitter und Detektor von Würth Elektronik. Um das zu garantieren gibt es eine optimale Kommunikationseffizienz zwischen Emitter und Detektor. Das wiederum ermöglicht schnelle Schaltzeiten und perfekte Kopplung von IR-LED und Photodetektor. Damit das funktioniert ist die Sensitivität des Photodetektors auf das Emissionsspektrum der IR-LEDs abgestimmt, siehe Abbildung 7.

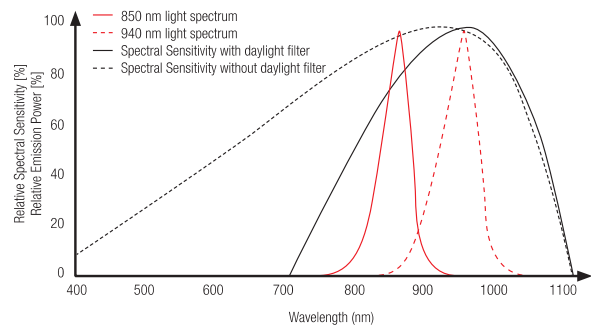


Abbildung 7: Relative Sensitivität des Phototransistors/der Photodiode bzw. relative Emissionsleistung der IR-LED über der Wellenlänge.

### 1.4 Schaltzeiten der Komponenten

Die Schaltzeit beschreibt die Verzögerung des Ein- bzw. Ausschaltvorgangs eines elektrischen Bauteils. Die gesamte Zeit der Schaltvorganges kann durch das Anlegen eines rechteckförmigen Impulses aufgezeigt werden. Für die Anwendung eines IR-Emitter und eines Detektors wird der Verlauf des an der IR-LED angelegten Signals mit dem am Lastwiderstand des Detektors verglichen. Abbildung 8 zeigt den Zusammenhang der Schaltzeiten.

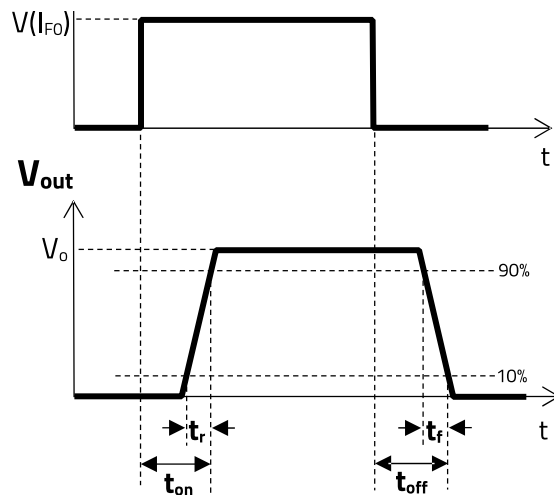


Abbildung 8: Schaltzeiten von Ein- und Ausgangssignal.

Der zeitliche Versatz zwischen der an die IR-Diode angelegten Spannung und der am Lastwiderstand des Phototransistors gemessenen Spannung beinhaltet sowohl die Verzögerung des IR-Diodenstroms, also auch die Verzögerung des Kollektorstroms des Phototransistors in Abhängigkeit des Lichteinfalls.

# APPLICATION NOTE

## ANO014 | Signalübertragung mit IR-Dioden und Photodetektoren

Die gesamte Verzögerung von der steigenden Flanke des Eingangssignal (in Abbildung 8 idealisiert dargestellt) bis zu 10% des Ausgangssignals ist die sogenannte Verzögerungszeit  $t_{D, EIN}$ . Die Zeit, die das Ausgangssignal von 10% bis 90% des Wertes braucht, ist die so genannte Anstiegszeit  $t_r$  (Englisch: rise time). Die Summe der beiden Zeiten wird als Anschaltzeit  $t_{EIN}$  bezeichnet. Umgekehrt ist die Zeit von fallender Flanke des Eingangssignals zu 90% des maximalen Wertes des Ausgangssignals die Ausschaltverzögerung  $t_{D, AUS}$ . Das Intervall von 90% bis 10% des Ausgangssignals ist die sogenannte Abfallzeit  $t_f$  (Englisch: fall time). Hier wird die Summe der beiden als Ausschaltzeit  $t_{OFF}$  bezeichnet. Im Folgenden soll das Verhalten der Anstiegs- bzw. Abfallzeit in Abhängigkeit verschiedener Schaltungsparameter betrachtet werden.

In der Praxis kann die Verzögerung vom Eingangssignal an der IR-LED bis zum Phototransistor vernachlässigt werden, da sich diese im Nanosekundenbereich bewegt und somit deutlich kleiner als die Schaltzeit des Phototransistors (Mikrosekundenbereich) ist.

Zur Beschreibung der Schaltzeiten des Phototransistors kann folgende Gleichung verwendet werden.<sup>[1]</sup>

$$t = \beta_0 \cdot \left( \frac{k \cdot T}{q \cdot I_{CE}} \cdot (C_{EB} + C_{CB}) + R_L \cdot C_{CB} \right) \quad (3)$$

$\beta_0$ : Photostromverstärkung

$k \cdot T$ : Boltzmann Konstante multipliziert mit Temperatur

$q$ : Elementarladung

$I_{CE}$ : Kollektorstrom

$C_{CB}$ : Kapazität zwischen Kollektor und Basis

$C_{CE}$ : Kapazität zwischen Kollektor und Emmitter

Wie aus der Gleichung (3) erkenntlich ist, ist die Schaltzeit von den parasitären Kapazitäten des Phototransistors abhängig. Aus der Analogie zum Kondensator ist bekannt, dass dieser eine bestimmte Zeit zum Laden und Entladen benötigt. Das führt genau wie hier zu Verzögerungen bzw. einer Anstiegs- und Abfallzeit der elektrischen Spannung.

Für die Photodiode werden die Schaltzeiten in dieser Application Note nicht gesondert betrachtet, diese bewegen sich, wie bereits erwähnt, im Bereich von unter 100 ns. Allgemein können die für den Phototransistor aufgezeigten Zusammenhänge auch auf die Photodiode übertragen werden.

## 2. SCHALTUNGS-AUFBAU ZUR ANALYSE

Für den Einsatz in realen Applikationen können, sowohl auf Emitter-, als auch auf Detektorseite, verschiedene Schaltungen mit Transistoren, Operationsverstärkern usw. verwendet werden. In dieser Application Note liegt jedoch der Schwerpunkt darauf, das Verhalten der Komponenten zu veranschaulichen, weshalb eine einfache Schaltung gewählt wurde. Diese ermöglicht es, die grundlegenden Eigenschaften der Komponenten zu erläutern und deren Verhalten auf komplexere Schaltungen zu übertragen. Auf Emitterseite wurde ein Pulsgenerator mit einer Reihenschaltung aus einem Vorwiderstand  $R_f$  und einer IR-LED geschaltet. Auf der Detektorseite findet sich ein ähnlicher Aufbau, bei dem die Emitterschaltung verwendet. Hier wird eine Versorgungsspannung  $V_{CC}$  an eine Reihenschaltung aus Phototransistor/Photodiode und einem Lastwiderstand  $R_L$  angelegt. Der gesamte Schaltplan, der für die folgenden Ergebnisse verwendet wurde, ist in Abbildung 9 dargestellt.

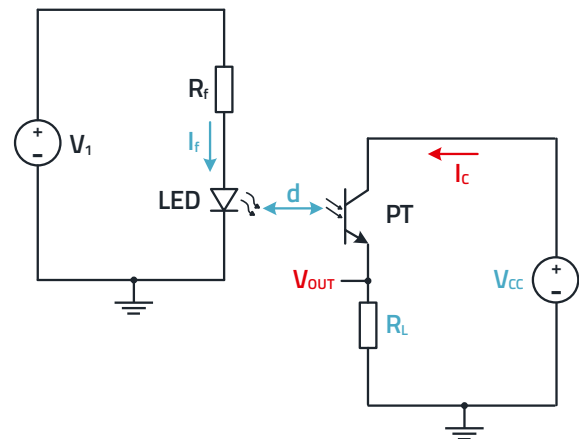


Abbildung 9: Schaltung für den Messaufbau mit Markierung der analysierten Parameter.

# APPLICATION NOTE

## ANO014 | Signalübertragung mit IR-Dioden und Photodetektoren

### 3. KOLLEKTORSTROM UND AUSGANGSSPANNUNG IN ABHÄNGIGKEIT VERSCHIEDENER PARAMETER

Die Schaltung nach Abbildung 9 wird verwendet, um den Kollektorstrom und die Ausgangsspannung bei verschiedenen Schaltungsparametern zu analysieren. Die für das Verständnis wichtigsten Parameter sind folgend aufgeführt:

- IR-LED Strom  $I_f$
- Abstand zwischen IR-LED und PT/PD  $d$
- Versorgungsspannung  $V_{CC}$
- Lastwiderstand  $R_L$

Zusätzlich sind diese Parameter in Abbildung 9 dargestellt, wobei die Messpunkte ebenfalls hervorgehoben sind.

#### 3.1 LED Strom

Bereits in Abbildung 2 ist der Zusammenhang zwischen Beleuchtungsstärke und Kollektorstrom dargestellt. Außerdem wird dort in Abbildung 4 das Verhältnis zwischen LED-Strom  $I_f$  und Strahlungsintensität gezeigt. Aus der Kombination dieser Informationen lässt sich schließen, dass die höhere Bestrahlungsintensität durch den höheren LED Strom einen Anstieg des Kollektorstroms auf Detektorseite zur Folge hat. Da beide einzelnen Zusammenhänge linear sind, folgt das auch für die Kombination. Das gilt sowohl für den Phototransistor (Abbildung 10), als auch für die Photodiode (Abbildung 11).

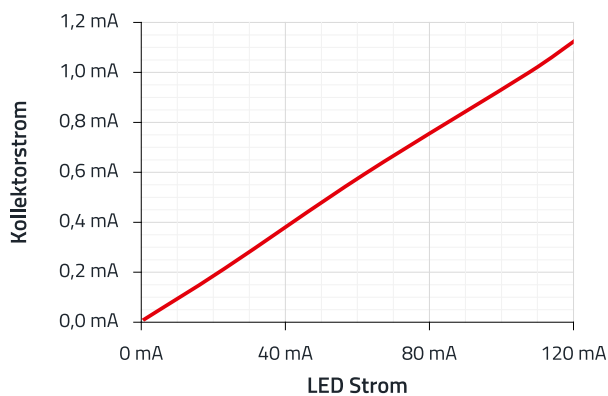


Abbildung 10: Kollektorstrom  $I_{CE}$  über LED-Strom  $I_f$  bei konstantem Abstand ([15414185A3011](#) auf [1541411NEA210](#) bei  $R_L = 50 \Omega$  und  $V_{CC} = 10 V$ ).

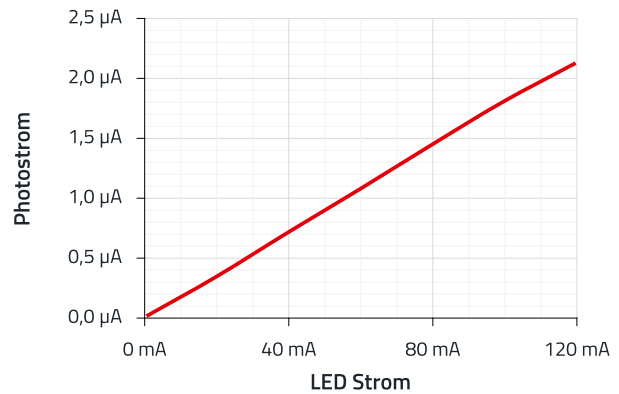


Abbildung 11: Photostrom  $I_P$  über LED-Strom  $I_f$  bei konstantem Abstand ([15414194A3011](#) auf [1541141ECA570](#) bei  $R_L = 50 \Omega$  und  $V_{CC} = 5 V$ ).

Für die Ausgangsspannung gilt dabei auch ein linearer Zusammenhang, denn nach Gleichung (2) gilt hier das Ohm'sche Gesetz.

#### 3.2 Abstand

Bei dem Entwurf von Emitter-Detektor-Schaltungen ist der Abstand  $d$  zwischen den beiden Komponenten „Emitter“ und „Detektor“ einer der wichtigsten Parameter. In Abbildung 12 für Phototransistoren und in Abbildung 13 für Photodioden ist zu erkennen, dass der Kollektorstrom  $I_C$  zunehmender Distanz quadratisch abnimmt.

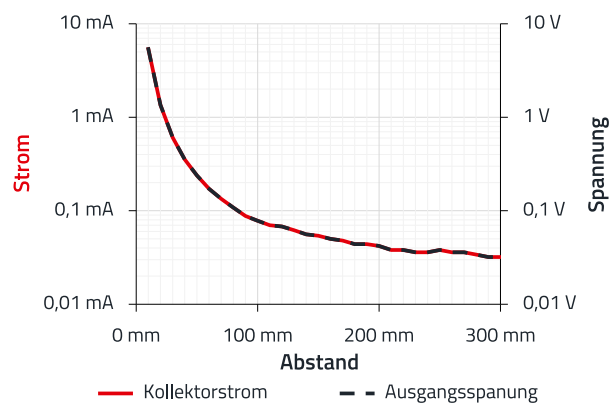


Abbildung 12: Kollektorstrom  $I_{CE}$  und Ausgangsspannung  $V_{OUT}$  über dem Abstand  $d$  ([15412094A3060](#) auf [1541201NBA300](#) bei  $I_f = 20 mA$ ,  $V_{CC} = 10 V$  und  $R_L = 1 k\Omega$ ).

# APPLICATION NOTE

## ANO014 | Signalübertragung mit IR-Dioden und Photodetektoren

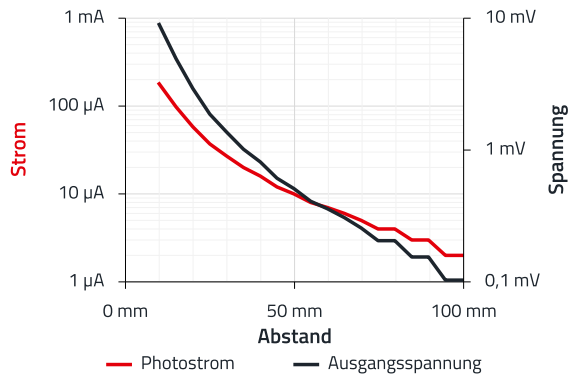


Abbildung 13: Photostrom  $I_P$  und Ausgangsspannung  $V_{OUT}$  über den Abstand  $d$  ([15414194A3011](#) auf [1541141ECA570](#) bei  $I_f = 100 \text{ mA}$ ,  $V_{CC} = 5 \text{ V}$  und  $R_L = 50 \Omega$ ).

Begründen lässt sich das durch das Abstandsgesetz, danach gilt folgende Proportionalität für die Bestrahlungsstärke  $E_e$  und den Abstand  $d$ <sup>[2]</sup>:

$$E_e \sim \frac{1}{d^2} \tag{4}$$

Da, wie in Abbildung 4 dargestellt, ein linearer Zusammenhang zwischen Bestrahlungsstärke und Kollektor- bzw. Photostrom besteht, lässt sich Gleichung (3) auf Gleichung (4) übertragen.

Außerdem gilt wie bereits in 3.1 auch hier die Gleichung (2) für die Ausgangsspannung und da das Ohm'sche Gesetz linear ist, gilt auch hier die Proportionalität  $V_{OUT} \sim 1/d^2$  (siehe Abbildung 12 und Abbildung 13).

$$V_{out} \sim \frac{1}{d^2} \tag{5}$$

### 3.3 Versorgungsspannung

Für Phototransistoren gilt der Zusammenhang zwischen Kollektorstrom und Versorgungsspannung in Abbildung 14.

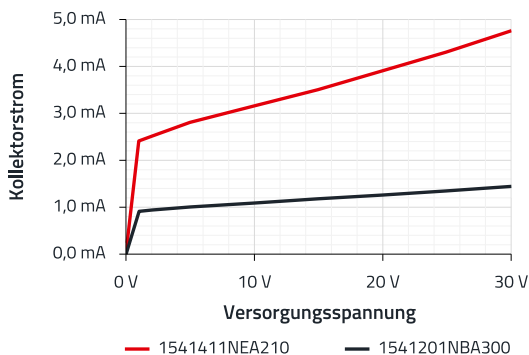


Abbildung 14: Kollektorstrom  $I_{CE}$  über Versorgungsspannung  $V_{CC}$  für verschiedene Phototransistoren ([15414185A3011](#) bei  $I_f = 100 \text{ mA}$  und  $R_L = 50 \Omega$ ).

Dort ist auch zu sehen, dass für verschiedene Phototransistoren unterschiedlich starke Abhängigkeiten von der Versorgungsspannung auftreten.

Dieser Verlauf entspricht der im Datenblatt beschriebenen Relation zwischen Kollektorstrom und Kollektor-Emitter-Spannung. Für den Zusammenhang zwischen Versorgungsspannung, Kollektor-Emitter-Spannung und Ausgangsspannung gilt:

$$V_{CC} = V_{CE} + V_{OUT} \tag{5}$$

Die abgebildeten Kurven erinnern stark an eine Kennlinie eines Bipolartransistors, wobei die Bestrahlungsstärke als Basisstrom gesehen werden kann. In diesem Zusammenhang lässt sich ein Kennlinienfeld mit folgenden Bereichen definieren:

- Sättigungsbereich:  $V_{CE} \leq V_{CE,SAT}$
- Cutoff-Bereich (Trennbereich):  $V_{CE} > 0$  &  $E_e = 0$ ,  $I_{CE} \approx 0$
- Aktiver Bereich (Durchlassbereich):  $V_{CE} > V_{CE,SAT}$

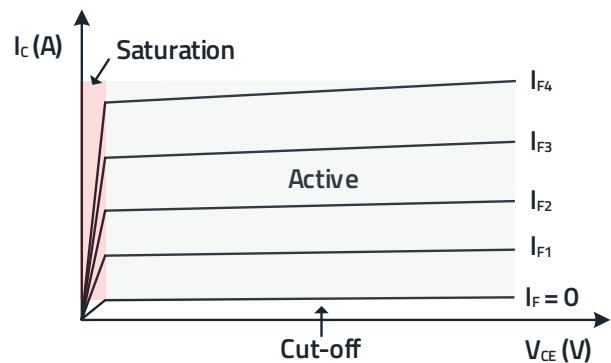


Abbildung 15: Typisches Kennlinienfeld eines Phototransistors.

Bei der Auswahl der Versorgungsspannung  $V_{CC}$  ist zudem zu beachten, dass sowohl der Kollektorstrom  $I_C$ , als auch die Ausgangsspannung  $V_{OUT}$  einen maximalen Wert haben. Definiert werden diese Maximalwerte durch das Ohm'sche Gesetz  $I_C < V_{CC} / R_L$ . Für die Ausgangsspannung gilt  $V_{OUT} < V_{CC}$ , denn auch hier gilt Gleichung (2).

Dieser Zusammenhang kann in Abbildung 16 gesehen werden.

# APPLICATION NOTE

## ANO014 | Signalübertragung mit IR-Dioden und Photodetektoren

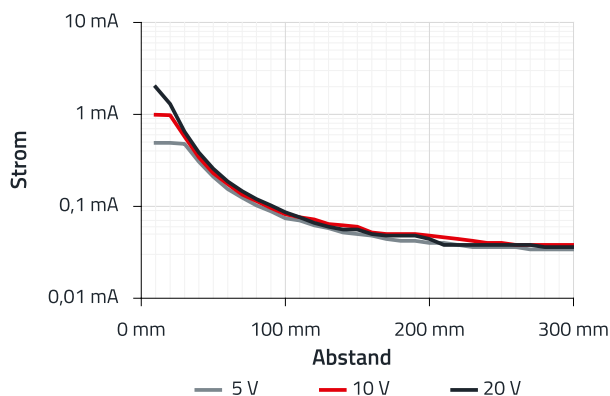


Abbildung 16: Kollektorstrom  $I_{CE}$  über dem Abstand  $d$  bei unterschiedlicher Versorgungsspannung  $V_{CC}$  und bei Begrenzung (15412094A3060 auf 1541201NBA300 bei  $I_f = 20 \text{ mA}$  und  $R_L = 10 \text{ k}\Omega$ ).

Für Photodioden gilt ein ähnlicher Zusammenhang zwischen Photostrom und Versorgungsspannung wie für den Phototransistor (siehe Abbildung 17).

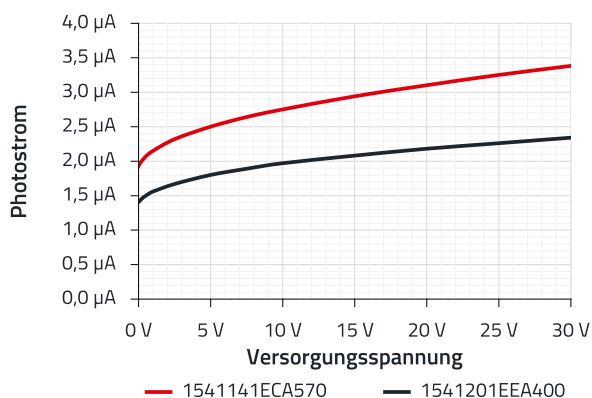


Abbildung 17: Photostrom  $I_P$  über der Versorgungsspannung  $V_{CC}$  für verschiedene Photodioden (15414185A3011 bei  $I_f = 100 \text{ mA}$ ,  $R_L = 50 \Omega$  und  $E_s = 1 \text{ mW/cm}^2$ ).

Allerdings sind nicht die gleichen eindeutigen Bereiche erkennbar wie beim Phototransistor. Dennoch gilt auch hier, dass verschiedene Photodioden unterschiedlich starke Abhängigkeiten von der Versorgungsspannung haben.

Der Verlauf aus Abbildung 17 entspricht dem erwarteten Verlauf aus der Kennlinie der (Photo-) Diode. Der Theorie zufolge steigt der Strom in Sperrrichtung mit zunehmender Spannung an. Ähnlich wie beim Phototransistor ist die Spannung über der Photodiode auch hier direkt mit der Versorgungsspannung verknüpft.

$$V_{CC} = V_{\text{DIODE}} + V_{\text{OUT}} \quad (6)$$

### 3.4 Lastwiderstand

Der geeignete Lastwiderstand für eine spezifische Anwendung hängt von den zuvor diskutierten Parametern ab.

Abbildung 18 zeigt, dass die Ausgangsspannung mit zunehmendem Lastwiderstand fast linear ansteigt.

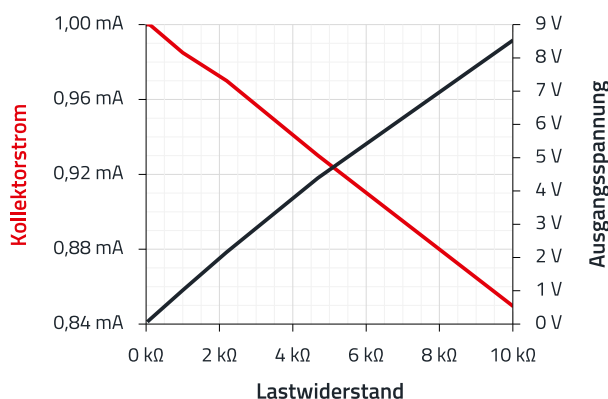


Abbildung 18: Kollektorstrom  $I_{CE}$  und Ausgangsspannung  $V_{OUT}$  über dem Lastwiderstand  $R_L$  bei konstanter Beleuchtungsstärke (15414185A3011 auf 1541411NEA210 bei  $I_f = 120 \text{ mA}$ ,  $V_{CC} = 20 \text{ V}$  und  $d = 60,5 \text{ mm}$ ).

Dass dies der Fall ist, folgt auch aus Gleichung (2). Der Verlauf ist jedoch nicht exakt linear, da die Kollektor-Emitter-Spannung mit steigender Ausgangsspannung abnimmt ( $V_{CE} = V_{CC} - V_{OUT}$ ). Dies führt zu einem Rückgang des Kollektorstrom, wie in Abbildung 6 gezeigt. In Kombination mit Gleichung (2) ergibt sich daraus der in Abbildung 18 dargestellte Verlauf für die Ausgangsspannung.

Während der Kollektorstrom allerdings nur kleine Änderungen bei Wechseln des Lastwiderstands erfährt ( $\sim \mu\text{A/k}\Omega$ ), ist die Änderung für die Ausgangsspannung deutlich größer. Das bedeutet für Anwendungen wird durch einen größeren Lastwiderstand eine größere Ausgangsspannung erreicht. Dabei kann die Beeinflussung durch den Kollektorstrom in den meisten Fällen vernachlässigt werden und der Zusammenhang von Lastwiderstand und Ausgangsspannung als linear angenommen werden kann.

Für die Photodiode zeigt sich eine ähnliche Abhängigkeit vom Lastwiderstand wie beim Phototransistor. Die Ursache dafür ist identisch und steht im Zusammenhang mit der Kurve für die Versorgungsspannung aus Abbildung 17. Da der Verlauf dort exponentiell ist, weist auch das Verhalten der Photodiode eine exponentielle Charakteristik auf.



# APPLICATION NOTE

## ANO014 | Signalübertragung mit IR-Dioden und Photodetektoren

Der Kollektorstrom nimmt ab und die Ausgangsspannung steigt nicht linear an. In diesem Fall, da der Photostrom und die Ausgangsspannung gering sind, dürfen diese Änderungen nicht vernachlässigt werden und müssen berücksichtigt werden (Abbildung 19).

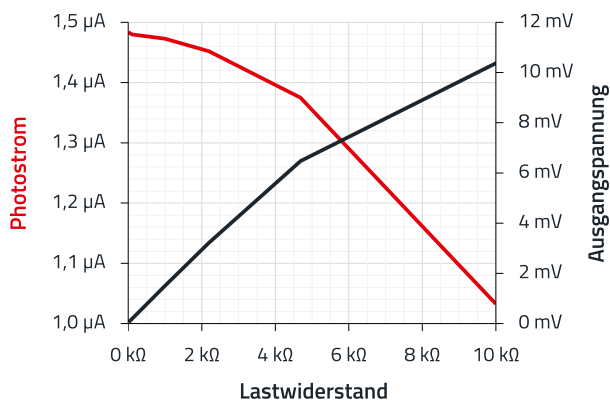


Abbildung 19: Photostrom  $I_P$  und Ausgangsspannung  $V_{OUT}$  über dem Lastwiderstand  $R_L$  bei konstanter Beleuchtungsstärke (15414194A3011 auf 1540051EC3590 bei  $I_f = 100$  mA,  $V_{CC} = 10$  V und  $d = 20$  mm).

### 3.5 Zusammenfassung

Aus den gezeigten Graphen ist erkenntlich, dass verschiedene Parameter den Kollektor-/Photostrom bzw. die Ausgangsspannung beeinflussen. In Tabelle 1 ist eine Zusammenfassung der Auswirkungen der einzelnen Parameter gegeben.

Parameter	Kollektorstrom $I_{CE}$	Photostrom $I_P$	Ausgangsspannung $V_{OUT}$
LED-Strom $I_f$	Steigt linear	Steigt linear	Steigt linear
Abstand $d$	Sinkt mit $1/d^2$	Sinkt mit $1/d^2$	Sinkt mit $1/d^2$
Versorgungsspannung $V_{CC}$	Steigt linear	Nähert sich exponentiell einem Wert an	Steigt linear
Lastwiderstand $R_L$	Sinkt annähernd linear	Sinkt exponentiell	Steigt annähernd linear

Tabelle 1: Auswirkungen der Parameter auf Kollektorstrom  $I_{CE}$  und Ausgangsspannung  $V_{OUT}$ .

Diese Informationen dienen als Grundlage für den Entwurf von Anwendungen, die IR-LED und Photodetektor enthalten.

Wie jedoch in 3.3 aufgezeigt wurde, sind der Kollektorstrom sowie die Ausgangsspannung durch die Versorgungsspannung begrenzt.

In Anwendungen gibt es mehrere Ansätze, um einem geringen Ausgangssignal entgegenzuwirken:

- Erhöhen des LED Stroms  $I_f$
- Verringern des Abstandes  $d$
- Erhöhen der Versorgungsspannung  $V_{CC}$

Außerdem kann durch Erhöhen des Lastwiderstandes  $R_L$  eine höhere Ausgangsspannung  $V_{OUT}$  erzielt werden.

Wenn die aufgeführten Optionen nicht ausreichen, gibt es die Möglichkeit Verstärkerschaltungen mit Operationsverstärkern oder Transistoren zu verwenden und das Signal zu verstärken.

### 4. SCHALTZEIT

Zur Untersuchung der Schaltzeiten wird, wie bereits erwähnt, eine IR-LED eingesetzt, die deutlich kürzere Anstiegs- und Abfallzeiten ( $t_{r/f} < 100$  ns) als der Phototransistor aufweist.

Gemessen werden die Anstiegs- und die Abfallzeit typischerweise über den Lastwiderstand  $R_L$ . In Abbildung 20 ist die Schaltung mit markierten Parametern dargestellt, diese sind:

- Kollektorstrom  $I_{CE}$
- Abstand zwischen IR-LED und PD  $d$
- Versorgungsspannung  $V_{CC}$
- Lastwiderstand  $R_L$

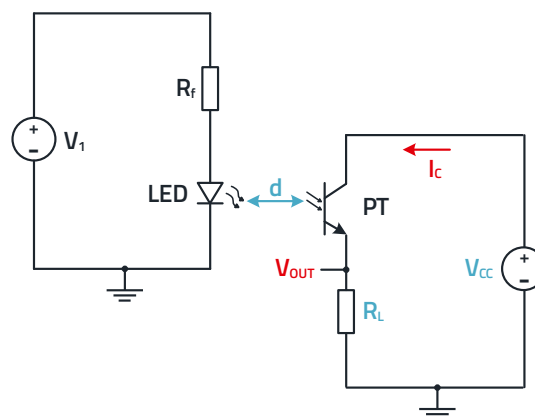


Abbildung 20: Schaltungsparameter für die Messung der Schaltzeit.

# APPLICATION NOTE

## ANO014 | Signalübertragung mit IR-Dioden und Photodetektoren

### 4.1 Kollektorstrom

Nachdem das Verhalten des Kollektorstroms bei verschiedenen Parametern bereits erläutert wurde, zeigt Abbildung 21 das Verhalten der Schaltzeit über dem Kollektorstrom.

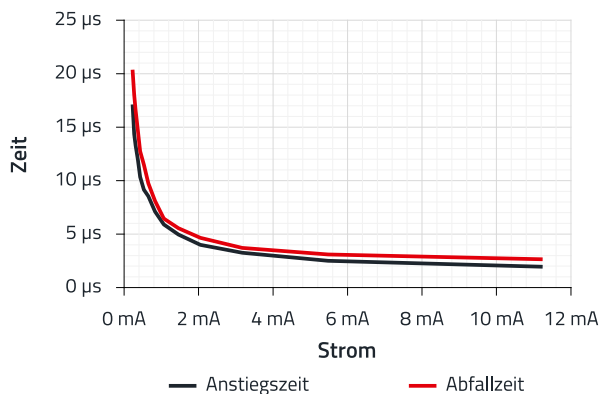


Abbildung 21: Anstiegs- und Abfallzeit über dem Kollektorstrom  $I_{CE}$  (15414185A3011 auf 1541411NEA210 bei  $I_f = 100 \text{ mA}$ ,  $V_{CC} = 10 \text{ V}$  und  $R_L = 50 \Omega$ ).

Dabei kann festgehalten werden, dass die Anstiegs- und Abfallzeit gegenproportional zum Kollektorstrom sind und für einen größeren Kollektorstrom deutlich geringer sind. Generell ist die Abfallzeit meist größer als die Anstiegszeit.

### 4.2 Abstand

Es wurde gezeigt, dass bei Vergrößerung des Abstandes der Kollektorstrom stark abnimmt. Für die Schaltzeiten folgt damit, dass bei höherer Distanz die Anstiegs- und Abfallzeit ansteigen, siehe Abbildung 22.

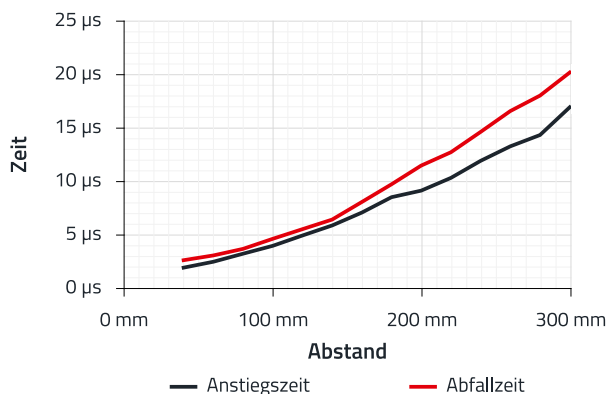


Abbildung 22: Anstiegs- und Abfallzeit über dem Abstand  $d$  (15414185A3011 auf 1541411NEA210 bei  $I_f = 100 \text{ mA}$ ,  $V_{CC} = 10 \text{ V}$  und  $R_L = 50 \Omega$ ).

Aus der Kombination von Gleichung (3) und Gleichung (4) ergibt sich, dass die Beziehung hier quadratisch ist. Daraus folgt, dass der Kollektorstrom mit  $1/d^2$  sinkt und die Schaltzeiten mit  $1/I_{CE}$  steigen.

### 4.3 Lastwiderstand

In Abbildung 23 wird der Verlauf der Schaltzeiten über dem Lastwiderstand aufgezeigt.

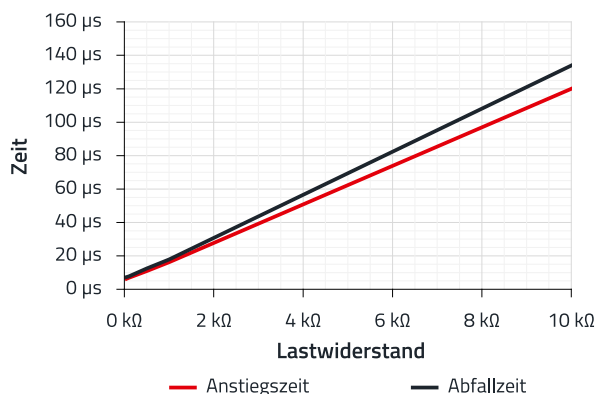


Abbildung 23: Anstiegs- und Abfallzeit über den Lastwiderstand  $R_L$  (15414185A3011 auf 1541411NEA210 bei  $I_f = 100 \text{ mA}$ ,  $V_{CC} = 10 \text{ V}$  und  $E_e = 1 \text{ mW/cm}^2$ ).

Die dort dargestellte Beziehung ist linear.

Wie bereits erklärt, entstehen diese Verzögerungen unter anderem durch parasitäre Kapazitäten. Die genaue Beziehung aus der Theorie ist in Gleichung (3) gezeigt. Vereinfacht kann hier der Lade- bzw. Entladevorgang des Kondensators als Vergleich genommen werden. Dort gilt für die Zeitkonstante:  $\tau = R \cdot C$ . Um den Prozess zu veranschaulichen kann diese Beziehung auf die parasitären Kapazitäten des Phototransistors übertragen werden. Daraus lässt sich der lineare Verlauf der Schaltzeiten über dem Widerstand anschaulich aufzeigen.

### 4.4 Versorgungsspannung

Die Beziehung zwischen Anstiegs- bzw. Abfallzeit und der Versorgungsspannung ist in Abbildung 24 dargestellt.

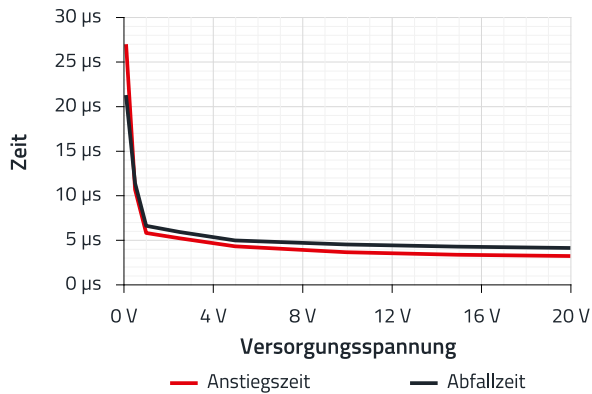


Abbildung 24: Anstiegs- und Abfallzeit über der Versorgungsspannungen  $V_{CC}$  bei konstanter Last (15414185A3011 auf 1541411NEA210 bei  $I_f = 100 \text{ mA}$ ,  $R_L = 100 \Omega$  und  $E_o = 1 \text{ mW/cm}^2$ ).

Sie ähnelt einer umgedrehten Kennlinien des Phototransistors, was darauf hinweist, dass bei einem geringeren Kollektorstrom im Sättigungsbereich eine deutlich höhere Schaltzeit als im aktiven Bereich vorliegt. Dieser Zusammenhang kommt daher, dass die Beziehung zwischen Schaltzeit und Kollektorstrom gegenproportional ist. Auch hier ist die Abhängigkeit der Anstiegs- und Abfallzeit von der Versorgungsspannung unterschiedlich für jeden Phototransistor. Zusätzlich wird deutlich, dass es, ähnlich wie für den Bipolartransistor wichtig ist, den Phototransistor im aktiven Bereich zu verwenden.

### 4.5 Ergebnisse

Für eine Übersicht sind in Tabelle 2 die wichtigsten Erkenntnisse zusammengefasst, diese können als Basis für das Schaltungsdesign mit Phototransistors gesehen werden.

Parameter	Auswirkung auf die Schaltzeit
Kollektorstrom	Fällt mit $\frac{1}{I_{CE}}$
Abstand	Steigt mit $d^2$
Versorgungsspannung	Fällt linear
Lastwiderstand	Steigt linear

Tabelle 2: Auswirkungen der Parameter auf die Schaltzeiten.

Die Schaltzeiten hängen stark vom Kollektorstrom ab, deshalb kann durch die Distanz zwischen Emitter und Detektor die Schaltzeit stark beeinflusst werden. Zudem muss eine geeignete Versorgungsspannung gewählt werden, um den Phototransistor im aktiven Bereich zu betreiben. Besonders wichtig ist jedoch, dass ein unpassender Lastwiderstand zu einer starker Reduktion der Schaltzeit führen kann.

## 5. ZUSAMMENFASSUNG

Für eine praktische Anwendung sollten die allgemeinen Zusammenhänge nun klar geworden sein. Der nächste Schritt besteht darin, diese effektiv zu verknüpfen und die passenden Bauteile sowie Einstellungen zu wählen.

Zusammenfassend kann festgestellt werden:

- LED Strom: Ein höherer LED-Strom führt zu einer höheren Bestrahlungsstärke und damit zu einem größeren Ausgangssignal sowie kürzeren Schaltzeiten (bis zur Sättigung des Systems).
- Abstand: Ein größerer Abstand zwischen LED und Empfänger reduziert die Bestrahlungsstärke ( $\approx 1/r^2$ ), was zu kleineren Ausgangssignalen und längeren Schaltzeiten führt.
- Versorgungsspannung: Eine höhere Versorgungsspannung erhöht den verfügbaren Ausgangsspannungshub und kann die Schaltgeschwindigkeit verbessern, insbesondere durch Vermeidung tiefer Sättigung.
- Lastwiderstand: Ein größerer Lastwiderstand führt zu einem größeren Ausgangssignal, erhöht jedoch gleichzeitig die Zeitkonstante (RC) und damit die Schaltzeiten.

Mit dem Ziel kurze Schaltzeiten und große Ausgangssignale zu erzielen, beeinflussen fast alle Parameter beides entweder positiv oder negativ. Das bedeutet, dass ein größerer LED Strom, ein kleinerer Abstand und eine große Versorgungsspannung grundsätzlich optimiert werden können, um ein größeres und schnelleres Ausgangssignal zu erzielen. Die Ausnahme bildet hierbei der Lastwiderstand, denn bei Vergrößerung von diesem folgt zwar ein größeres Ausgangssignal, aber eben auch eine längere Schaltzeit. Hier muss ein anwendungsabhängiges Mittel zwischen Signalgröße und Schnelligkeit gefunden werden.

Mit diesen Informationen können nun simple Schaltungen entworfen werden, aber auch für komplexere Anwendungen helfen diese Informationen das Verhalten zu verstehen.

# APPLICATION NOTE

ANO014 | Signalübertragung mit IR-Dioden und Photodetektoren

## A. Anhang

### A.1 Literatur

- [1] S.M. Sze, Kwok K. Ng, „Physics of Semiconductors“, April 2006
- [2] Francisco Vera et al 2014 Eur. J. Phys. 35 01501

# APPLICATION NOTE

## ANO014 | Signalübertragung mit IR-Dioden und Photodetektoren

### WICHTIGER HINWEIS

Der Anwendungshinweis basiert auf unserem aktuellen Wissens- und Erfahrungsstand, dient als allgemeine Information und ist keine Zusicherung der Würth Elektronik eiSos GmbH & Co. KG zur Eignung des Produktes für Kundenanwendungen. Der Anwendungshinweis kann ohne Bekanntgabe verändert werden. Dieses Dokument und Teile hiervon dürfen nicht ohne schriftliche Genehmigung vervielfältigt oder kopiert werden. Würth Elektronik eiSos GmbH & Co. KG und seine Partner- und Tochtergesellschaften (nachfolgend gemeinsam als „WE“ genannt) sind für eine anwendungsbezogene Unterstützung jeglicher Art nicht haftbar. Kunden sind berechtigt, die Unterstützung und Produktempfehlungen von WE für eigene Anwendungen und Entwürfe zu nutzen. Die Verantwortung für die Anwendbarkeit und die Verwendung von WE-Produkten in einem bestimmten Entwurf trägt in jedem Fall ausschließlich der Kunde. Aufgrund dieser Tatsache ist es Aufgabe des Kunden, erforderlichenfalls Untersuchungen anzustellen und zu entscheiden, ob das Gerät mit den in der Produktspezifikation beschriebenen spezifischen Produktmerkmalen für die jeweilige Kundenanwendung zulässig und geeignet ist oder nicht.

Die technischen Daten sind im aktuellen Datenblatt zum Produkt angegeben. Aus diesem Grund muss der Kunde die Datenblätter verwenden und wird ausdrücklich auf die Tatsache hingewiesen, dass er dafür Sorge zu tragen hat, die Datenblätter auf Aktualität zu prüfen. Die aktuellen Datenblätter können von [www.we-online.com](http://www.we-online.com) heruntergeladen werden. Der Kunde muss produktspezifische Anmerkungen und Warnhinweise strikt beachten. WE behält sich das Recht vor, an seinen Produkten und Dienstleistungen Korrekturen, Modifikationen, Erweiterungen, Verbesserungen und sonstige Änderungen vorzunehmen. Lizenzen oder sonstige Rechte, gleich welcher Art, insbesondere an Patenten, Gebrauchsmustern, Marken, Urheber- oder sonstigen gewerblichen Schutzrechten werden

hierdurch weder eingeräumt noch ergibt sich hieraus eine entsprechende Pflicht, derartige Rechte einzuräumen. Durch Veröffentlichung von Informationen zu Produkten oder Dienstleistungen Dritter gewährt WE weder eine Lizenz zur Verwendung solcher Produkte oder Dienstleistungen noch eine Garantie oder Billigung derselben.

Die Verwendung von WE-Produkten in sicherheitskritischen oder solchen Anwendungen, bei denen aufgrund eines Produktausfalls sich schwere Personenschäden oder Todesfällen ergeben können, sind unzulässig. Des Weiteren sind WE-Produkte für den Einsatz in Bereichen wie Militärtechnik, Luft- und Raumfahrt, Nuklearsteuerung, Marine, Verkehrswesen (Steuerung von Kfz, Zügen oder Schiffen), Verkehrssignalanlagen, Katastrophenschutz, Medizintechnik, öffentlichen Informationsnetzwerken usw. weder ausgelegt noch vorgesehen. Der Kunde muss WE über die Absicht eines solchen Einsatzes vor Beginn der Planungsphase (Design-In-Phase) informieren. Bei Kundenanwendungen, die ein Höchstmaß an Sicherheit erfordern und die bei Fehlfunktionen oder Ausfall eines elektronischen Bauteils Leib und Leben gefährden können, muss der Kunde sicherstellen, dass er über das erforderliche Fachwissen zu sicherheitstechnischen und rechtlichen Auswirkungen seiner Anwendungen verfügt. Der Kunde bestätigt und erklärt sich damit einverstanden, dass er ungeachtet aller anwendungsbezogenen Informationen und Unterstützung, die ihm durch WE gewährt wird, die Gesamtverantwortung für alle rechtlichen, gesetzlichen und sicherheitsbezogenen Anforderungen im Zusammenhang mit seinen Produkten und der Verwendung von WE-Produkten in solchen sicherheitskritischen Anwendungen trägt.

Der Kunde hält WE schad- und klaglos bei allen Schadensansprüchen, die durch derartige sicherheitskritische Kundenanwendungen entstanden sind.

### NÜTZLICHE LINKS



Application Notes  
[www.we-online.com/appnotes](http://www.we-online.com/appnotes)



**REDEXPERT** Design Platform  
[www.we-online.com/redexpert](http://www.we-online.com/redexpert)



Toolbox  
[www.we-online.com/toolbox](http://www.we-online.com/toolbox)



Produkt Katalog  
[www.we-online.com/products](http://www.we-online.com/products)

### KONTAKT INFORMATION



[appnotes@we-online.com](mailto:appnotes@we-online.com)  
Tel. +49 7942 945 - 0



Würth Elektronik eiSos GmbH & Co. KG  
Max-Eyth-Str. 1 74638 Waldenburg Germany  
[www.we-online.com](http://www.we-online.com)

# APPLICATION NOTE

ANO014 | Signalübertragung mit IR-Dioden und Photodetektoren

## REVISIONSHISTORIE

Dokument Version	Veröffentlichungsdatum	Änderungen
ANO014a	2026/05/04	Ursprüngliche Version der Application Note

*Hinweis:* Die aktuelle Version des Dokuments und das Veröffentlichungsdatum sind in der Fußzeile jeder Seite dieses Dokuments angegeben.