# **E06**Physikalisches Praktikum

# Diodenkennlinien



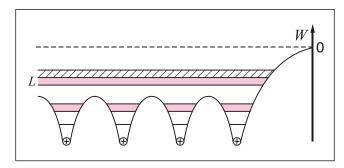
Dieser Versuch bietet eine erste Einführung in die Elektronik. Nach Untersuchungen von charakteristischen Kennlinien verschiedenartiger Dioden werden einfache Gleichrichterschaltungen aufgebaut und untersucht.

# 1. Theoretische Grundlagen

# 1.1 Das Bändermodell

In einem Atom können die Elektronen nur ganz bestimmte, diskrete Energien annehmen. Nähern sich zwei Atome einander, so spaltet sich jedes atomare Energieniveau in zwei Niveaus auf. Bei n-benachbarten Atomen erfolgt die Aufspaltung in n-Niveaus. In einem Festkörper ist die Zahl n der Atome so groß, dass die Aufspaltungsniveaus sich überlappen und damit jedem atomaren Energieniveau im Festkörper prinzipiell ein kontinuierliches Energieband entspricht.

Den Potentialverlauf einer linearen Kette von n-Atomen und die resultierenden Energiebänder zeigt  $\pmb{Bild 1}$ . Das gezeichnete Gesamtpotential ergibt sich dabei als Überlagerung der Coulomb-Potentiale jedes einzelnen Atoms.



**Bild 1:** Schematische Darstellung der Energiebänder in einem Kristallgitter

Die Elektronen auf inneren Schalen sind sehr stark an einer Atomhülle gebunden, und für diese Elektronen machen sich die Nachbaratome nur sehr wenig bemerkbar. Deshalb ist die Aufspaltung tieferer Energieniveaus vernachlässigbar, die Energiewerte der inneren Elektronen beim Festkörper sind praktisch identisch mit denen im Atom.

Jedes Energieniveau kann nach dem Pauli-Prinzip höchstens zwei Elektronen mit unterschiedlichem Spin aufnehmen, in jedem Energieband können sich demnach höchstens 2n Elektronen befinden. Da die

energetisch niedrigsten Bänder zuerst mit Elektronen gefüllt werden, wird die elektrische Leitfähigkeit eines Festkörpers durch das oberste nicht leere Band bestimmt.

Ist dieses Band voll besetzt, so kann ein Elektron nur von einer Atomhülle zu einer anderen gelangen, wenn dafür ein anderes Elektron in die entgegengesetzte Richtung wandert. Die entgegengesetzte Bewegung zweier gleicher Ladungen kann jedoch nicht zur Stromleitung beitragen; der Kristall ist in diesem Fall ein Nichtleiter. Das oberste vollgefüllte Band wird dann als Valenzband, das nächst höhere (leere) Band als Leitungsband bezeichnet.

In einem nur teilweise gefüllten Band hingegen können sich die Elektronen nahezu frei durch den Kristall bewegen und machen ihn damit zum Leiter. Das teilweise gefüllte Band wird dann Leitungsband, das nächst tiefere Band Valenzband genannt. Ein Leiter zeichnet sich also durch ein nur teilweise gefülltes Leitungsband aus.

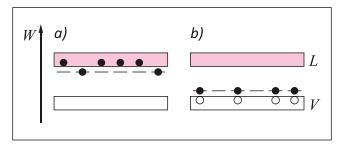
# 1.2 Stromleitung im Halbleiter

Während bei guten Isolatoren der Abstand zwischen Valenz- und Leitungsband einige eV beträgt, ist der Bandabstand bei dem Halbleiter Silizium nur 1,1 eV, bei Germanium 0,7 eV. Bei Temperaturen nahe des absoluten Nullpunktes von 0 K befinden sich praktisch alle Außenelektronen im Valenzband,

der Kristall ist also ein Isolator. Mit steigender Temperatur bekommen immer mehr Elektronen aus dem gefüllten Valenzband genügend Energie, um in das unbesetzte Leitungsband zu springen. Sie hinterlassen dabei im Valenzband Löcher, die wiederum durch benachbarte Elektronen aufgefüllt werden können. Beim Anlegen einer elektrischen Spannung an einem Halbleiterkristall wandern die Elektronen in Richtung der Anode. Im Valenzband bedeutet dies, dass die jeweils freiwerdenden Löcher in entgegengesetzter Richtung, also zur Katode hinbewegt werden. Löcher können demnach aufgefasst werden als frei bewegliche positive Ladungsträger. Die Stromleitung im Halbleiter wird damit von zwei verschiedenen Arten von Ladungsträgern verursacht: von den im Leitungsband frei beweglichen Elektronen und von den im Valenzband frei beweglichen positiven Löchern.

# 1.3 Dotierung von Halbleitern

Die in **Abschnitt 1.2** beschriebenen elektrischen Eigenschaften treffen nur für Halbleiter zu, die frei von Fremdatomen sind. Schon Verunreinigungen im ppb-Bereich, d. h. 1 Fremdatom auf  $10^9$  Si-Atome, können diese Eigenschaften empfindlich verändern. Bei der Dotierung von Halbleitern werden diese Veränderungen gezielt herbeigeführt.



**Bild 2:** Bänderschema dotierter Halbleiter **a)** *n*-Dotierung, **b)** *p*-Dotierung

In einem reinen Siliziumkristall trägt jedes Atom mit vier Elektronen zur Bindung mit den vier Nachbaratomen bei. Baut man nur einige wenige fünfwertige Atome (*Phosphor oder Arsen*) in das Kristallgitter ein, so sind diese überzähligen Elektronen relativ schwach an die jeweilige Atomhülle gebunden. Dies macht sich auch im Bänderschema des Halbleiters bemerkbar: im Abstand von einigen Zehntel eV unter dem Leitungsband liegen mit Elektronen besetzte diskrete, ortsfeste "Verunreinigungsni-

*veaus*". Bei Zimmertemperatur ist die mittlere thermische Energie etwa  $(\frac{2}{3})k \cdot T = 0,075$  eV, so dass relativ viele Elektronen Energie besitzen, um das Leitungsband zu erreichen. Die Stromleitung in solchen Halbleitern wird also hauptsächlich von negativen Ladungsträgern verursacht, die durch thermische Anregung aus dem Verunreinigungsniveau in das Leitungsband gelangt sind. Man bezeichnet deshalb diesen Vorgang als *n*-Leitung und den Halbleiter als *n*-dotiert. Die fünfwertigen Atome heißen Donatoren.

Bei der *p*-Dotierung werden stattdessen dreiwertige Fremdatome (*Akzeptoren*) in den Kristall eingebaut (*Aluminium oder Bor*). Die Energieniveaus dieser ortsfesten Akzeptoren liegen einige Zehntel eV oberhalb des Valenzbandes. Thermisch angeregte Elektronen aus dem Valenzband können diese Akzeptor-Niveaus besetzen und hinterlassen dabei im Valenzband Löcher. Diese verhalten sich analog zum undotierten Halbleiter, nämlich wie freibewegliche positive Ladungen. Durch sie wird die Stromleitung im *p*-dotierten Halbleiter möglich.

# 1.4 Der pn-Übergang

Bringt man innerhalb eines Kristalls durch unterschiedliche Dotierungen die zwei Leitungstypen zusammen, so entsteht ein pn-Übergang (**Bild 3**). Durch die Wärmebewegung diffundieren Elektronen aus dem n-Bereich in den p-Bereich und rekombinieren dort mit Löchern.

E06 – Diodenkennlinien Physikalisches Praktikum

Das gleiche geschieht mit den Löchern, die aus dem p-Bereich in den n-Bereich gelangen. Dadurch bildet sich im Grenzgebiet eine an Ladungsträgern verarmte Schicht, die als Isolator wirkt. Da die Atomrümpfe im Kristall ortsfest sind, entsteht durch die Diffusion im p-Bereich ein Gebiet mit negativer Raumladung, im n-Bereich ein Gebiet mit positiver Raumladung. Diese Diffusion setzt sich solange fort, bis die Energie der Ladungsträger nicht mehr ausreicht, um gegen das durch die Raumladung aufgebaute elektrische Feld anzulaufen Die Spannung, die zwischen den beiden Raumladungsgebieten herrscht, heißt Antidiffusionsspannung  $U_a$ .

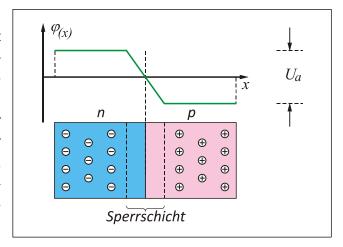


Bild 3: pn-Übergang ohne äußere Spannung

Beim Anlegen einer äußeren Spannung an den *pn*-Übergang (*Bild 4a*) hängt dessen Verhalten von der Polung dieser Spannung ab. Verbindet man den positiven Pol mit der *n*-Schicht, so werden die Ladungsträger von der Grenzschicht weggezogen, die an Ladungsträgern verarmte isolierende Sperrschicht wird also noch verbreitert und der *pn*-Übergang sperrt.

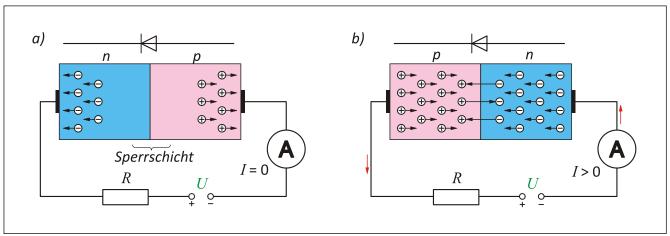


Bild 4a: pn-Übergang in Sperrrichtung

Bild 4b: pn-Übergang in Durchlasslichtung

Bei umgekehrter Polung der äußeren Spannung (**Bild 4b**) werden die freien Ladungsträger zur Grenzschicht hingezogen. Ist die äußere Spannung größer als die Antidiffusionsspannung, so wird die Sperrschicht vollkommen abgebaut und der *pn*-Übergang leitet.

Diese Eigenschaft des *pn*-Überganges, dass Strom nur in eine Richtung fließen kann, wird bei der Halbleiterdiode zur Gleichrichtung von Wechselströmen ausgenutzt. Bei realen Dioden lässt sich auch in Sperrrichtung ein sehr geringer Strom beobachten. Er wird verursacht durch thermische Anregung von Elektronen in der Raumladungszone. Bei fester Temperatur ist dieser Sperrstrom oberhalb einer bestimmten Sperrspannung konstant, da alle entstehenden Ladungsträger aus der Sperrschicht abgesaugt werden. Man spricht hier vom Sättigungsstrom.

# 1.5 Sonderformen der Diode

Eine für die Praxis wichtige Erscheinung erkennt man bei immer weiterer Erhöhung der Sperrspannung. Ab einer bestimmten Spannung, die im Wesentlichen von der Dotierung abhängt, steigt der Sperrstrom sprunghaft an.

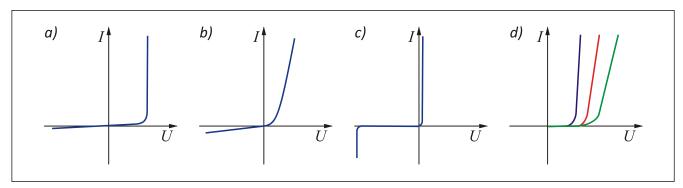


Bild 5: Diodenkennlinien a) Si-Diode, b) Ge-Diode, c) Zenerdiode, d) Lumineszenzdioden

# Dies hat zwei Ursachen zur Folge:

- Aufgrund der hohen Sperrspannung wird die kinetische Energie der als Sperrstrom fließenden Ladungen so groß, dass sie beim Stoß auf eine Atomhülle dort Elektronen herausschlagen und ins Leitungsband anheben können. Diese wiederum können weitere Elektronen herauslösen, so dass die Anzahl der freien Ladungsträger sich lawinenartig vergrößert (Lawinen- oder Avalanche-Effekt).
- Die zweite Ursache ist der Feldstärke-Effekt. Durch die angelegte Sperrspannung steigt die Feldstärke in der Sperrschicht. Ab etwa 10<sup>6</sup> V/cm reicht die Feldstärke aus, um Elektronen aus dem Valenzband zu heben und damit freie Ladungsträger zu erzeugen. Der sprunghafte Anstieg des Sperrstromes führt bei normalen Dioden zu unzulässiger Erwärmung und damit zu deren Zerstörung. Die maximal zulässige Sperrspannung von Dioden liegt in Größenordnung von 10 V bis 10 kV. Der typische Sperrstrom liegt zwischen einigen nA und einigen mA.

# 1.5.1 Silizium Dioden

Die am häufigsten verwendete Halbleiterdiode ist aus Silizium, da sie unter anderem eine hohe Temperaturstabilität von (-55 *bis* 175)°C aufweist und dazu robust bei hohen Durchflussströmen ist. Für Si-Dioden gibt es verschiedene Anwendungen. Hier sind zwei von ihnen:

# **Gleichrichtung**

Die Umwandlung von Wechselspannung in Gleichspannung erfolgt durch Silizium-pn-Dioden. Bei sehr großen Leistungen (*Leistungsgleichrichter*) verwendet man  $p^+sn^+$ -Dioden. Verpolungsschutzdioden und Freilaufdioden sind ebenfalls Gleichrichterdioden. Hochspannungsdioden bestehen aus mehreren in einem Gehäuse in Reihe geschalteten Diodenchips. Bei besonders hohen Frequenzen werden Schottky-Dioden eingesetzt.

#### **Schaltdiode**

Anforderungen an Schaltdioden sind kleine Sperrschichtkapazität und geringer differentieller Widerstand in Durchflussrichtung. Für die zweite Anforderung ist ein relativ hoher Strom in Durchflussrichtung nötig, da der differentielle Widerstand einer Diode umgekehrt proportional zum Strom ist.

#### 1.5.2 Germanium Dioden

Germaniumdioden haben einen wesentlich weicheren und früher (bei 0,2 V) einsetzenden Kennlinien-knick als Siliziumdioden (bei 0,55 V). Wegen dieser Eigenschaft und in der Ausführung als Spitzendiode eignen sie sich zur Gleichrichtung auch sehr hoher Frequenzen, u.a. in Detektorempfängern, aber auch zur Demodulation in Radargeräten und UKW-Empfängern. Da moderne Schottky-Dioden aus Silizium auch alle diese Eigenschaften besitzen und teilweise übertreffen, gibt es keinen Grund mehr, die wärmeempfindlichen Ge-Dioden zu verwenden.

Bevor sich Siliziumdioden und -transistoren durchgesetzt haben, war Germanium zur Herstellung von Halbleiterbauteilen gebräuchlich, da die Verarbeitung des selteneren Germaniums zunächst besser beherrscht wurde als die von Silizium. Germanium-Halbleiter vertragen gegenüber Silizium nur geringe Temperaturen (ca. 90 °C gegenüber Si-Dioden von ca. 150...175 °C) und haben höhere Sperrströme und Temperaturdriften.

Heute sind Germaniumdioden in Form von Spitzendioden manchmal noch dort gefragt, wo es auf eine geringe Durchlassspannung ankommt und nur sehr kleine Ströme unter  $1\,\mathrm{mA}$  fließen dürfen. Germanium-Spitzendioden können Frequenzen bis mindestens  $10\,\mathrm{GHz}$  gleichrichten.

#### 1.5.3 Zenerdioden

Zenerdioden (*Z-Dioden*) sind Si-Dioden, die im Bereich des reversiblen Durchbruchs betrieben werden. Aufgrund ihrer Kennlinie könne sie in Schaltungen zur Stabilisation und Begrenzung von Spannungen eingesetzt werden.

Bei Z-Dioden wird das Durchbruchverhalten zur Spannungsstabilisierung benutzt. Dazu schaltet man im einfachsten Fall die Z-Diode mit einem Widerstand in Reihe und legt eine Spannung an, die größer ist als die Sperrspannung, bei der der Durchbruch auftritt (*Zenerspannung*). Über der Z-Diode liegt dann genau die Zenerspannung an, während die restliche Spannung über dem Widerstand abfällt.

#### 1.5.4 Lumineszenzdioden

Bei Lumineszenzdioden (*LED*, engl. light emitting diode) wird der pn-Übergang immer in Flussrichtung betrieben. Da in beiden Bahngebieten Minoritätsträger indiziert wurden, steigt die Rekombinationsrate bedeutend an. Die bei der Rekombination freiwerdende Energie wird entweder als Wärme an das Kristallgitter abgegeben oder als elektromagnetische Strahlung emittiert. Die Strahlungsemission (*Elektronenlumineszenz*) stellt den zum inneren lichtelektrischen Effekt einen wechselseitigen Prozess dar. Wird in einem Schritt die gesamte Rekombinationsenergie abgegeben, gilt:

$$W = e \cdot U = \frac{h \cdot c}{\lambda} .$$

U: Schwellenspannung

e: Elementarladung

*λ: emittierte Strahlung* 

c: Lichtgeschwindigkeit

h: Plancksches Wirkunsquantum

Durch den Einbau zusätzlicher Störquellen im Kristall läuft der Rekombinationsprozess in mehreren Schritten ab. Somit wird nur noch ein Teil der Energie als Strahlung frei (siehe Tab.2).

#### 2.Versuch

# 2.1 Vorbetrachtung

Aufgabe 1: Wie hoch ist die Schwellenspannung einer Si-Diode bzw. einer Ge-Diode?

**Aufgabe 2:** Berechnen Sie die Frequenz f aus den gegebenen Wellenlängen. Welche Schwellenspannungen U muss an der Diode angelegt werden, damit die pn-Übergänge leitend werden und die LEDs zu leuchten beginnen.

(Wellenlängen der LEDs:  $\lambda_{gr\ddot{u}n}$ =550 nm;  $\lambda_{gelb}$ =590 nm;  $\lambda_{rot}$ =700 nm;  $\lambda_{infrarot}$ =1140 nm)

# 2.2 Versuchsdurchführung

#### 2.2.1 Verwendete Geräte

Stabilisiertes Netzgerät; Funktionsgenerator; Oszilloskop HM400; 2 Vielfachmessgeräte VC170; 4 Si-Dioden 1N4007; Ge-Diode AA118; 2 Zenerdioden ZPD6,2, ZPD9,1; 4 Lumineszenzdioden

#### 2.2.2 Versuchshinweise

Hinweis:

Wird die Spannung variiert, so wird der Strom abgelesen und notiert bzw. umgekehrt.

Aufgabe 1a: Aufnahme der Diodenkennlinie einer Si- bzw. einer Ge-Diode

# in Durchlassrichtung

- Bauen Sie die Schaltung nach Bild 6 auf.
- Beginnen Sie mit der Si-Diode und betreiben Sie diese zuerst in Durchlassrichtung (*Pfeil zeigt in Stromrichtung*).
- Nehmen Sie die Diodenkennlinie auf, indem Sie die Spannung *U* vorsichtig *in* 0,1V-Schritten erhöhen.
- Bei I>1 mA, erhöhen Sie den Strom I in 1mA-Schritten bis 5 mA.
- Bei I>5 mA, erhöhen Sie den Strom I in 5mA-Schritten bis 20 mA. (Der Wert von 20 mA darf aber nicht überschritten werden.)

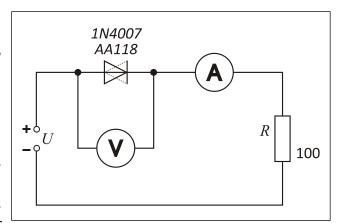


Bild 6: Versuchsaufbau zur Aufgabe 1a

#### in Sperrrichtung

- Betreiben Sie die entsprechende Diode in Sperrrichtung.
- Erhöhen Sie die Spannung *U von* (0 ... 5)V *in* 1V-Schritten.

Aufgabe 1b: Aufnahme der Diodenkennlinie zweier Zenerdioden

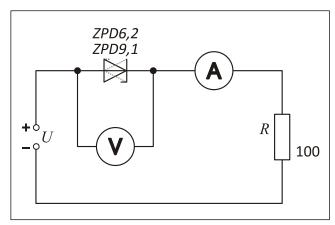


Bild 7: Versuchsaufbau zur Aufgabe 1b

## in Durchlassrichtung

- Bauen Sie die Schaltung nach Bild 7 auf.
- Betreiben Sie die beiden Dioden zunächst nacheinander in Durchlassrichtung.
- Gehen Sie analog zur *Aufgabe 1a* vor.

#### ZPD6,2 in Sperrrichtung

- Nehmen Sie die Diodenkennlinie auf, indem Sie die Spannung *U* vorsichtig *in* 1V-Schritten erhöhen.
- Bei *U*>5 V, erhöhen Sie die Spannung *in* 0,2V-Schritten bis 5,8 V.
- Bei *U*=5,8V, erhöhen Sie den Strom in 1mA-Schritten bis 5mA.
- Bei *I*>5 mA, erhöhen Sie den Strom *I in* 5mA-Schritten bis 20 mA. (Der Wert von 20 mA darf aber nicht überschritten werden.)

# ZPD9,1 in Sperrrichtung

- Nehmen Sie die Diodenkennlinie auf, indem Sie die Spannung *U* vorsichtig *in 2V-Schritten* erhöhen.
- Bei *U*>8 V, erhöhen Sie die Spannung *U in* 0,2V-Schritten bis 8,8 V.
- Bei *U*=8,8 V, erhöhen Sie den Strom *I in* 1mA-Schritten bis 5 mA.
- Bei *I*>5mA, erhöhen Sie den Strom *I in* 5mA-Schritten bis 20 mA. (*Der Wert von* 20 mA darf aber nicht überschritten werden.)

Aufgabe 1c: Aufnahme der Diodenkennlinie von unterschiedlichen Lumineszenzdioden

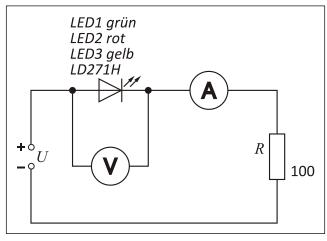


Bild 8: Versuchsaufbau zur Aufgabe 1b

• Bauen Sie die Schaltung nach Bild 8 auf.

# LED's dürfen nur in Durchlassrichtung betrieben werden!

- Nehmen Sie die Diodenkennlinie auf, indem Sie die Spannung *U* vorsichtig *in* 0,5V-Schritten erhöhen.
- Bei I>0 mA, erhöhen Sie den Strom I in 1mA-Schritten bis 5 mA.
- Bei I>5 mA, erhöhen Sie den Strom I in 5mA-Schritten bis 20 mA. (Der Wert von 20 mA darf aber nicht überschritten werden.)

# Aufgabe 2: Untersuchung der Si-Diode als Gleichrichter

# Einfachgleichrichtung

- Bauen Sie die Schaltung ohne sowie mit Diode (1N4007) nach Bild 9 auf.
- Schalten Sie einen Ausgang des Oszilloskops parallel zum Widerstand.
- Legen Sie die Betriebsspannung mit Hilfe des Funktionsgenerators  $von\ U_{SS}=3\ V$  an.
- Zeichnen Sie die Oszilloskopbilder auf Millimeterpapier ab.

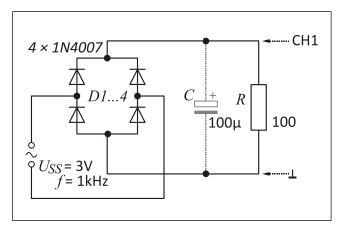


Bild 10: Versuchsaufbau Grätzgleichrichtung

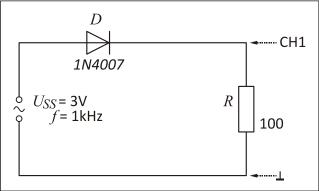


Bild 9: Versuchsaufbau Einfachgleichrichtung

# Grätzgleichrichtung

- Bauen Sie die folgende Schaltung *ohne* sowie *mit* Kondensator ( $100 \mu F$ ) nach *Bild* 10 auf.
- Schalten Sie einen Ausgang des Oszilloskops parallel zum Widerstand.
- Legen Sie die Betriebsspannung mit Hilfe des Funktionsgenerators **von**  $U_{SS}$ =3 V an.
- Zeichnen Sie die Oszilloskopbilder auf *Millimeter*papier ab.

# 2.3 Versuchsauswertung

Aufgabe 1a-c: Aufnahme der Diodenkennlinien

- Stellen Sie Ihre Messwerte pro Bauteil in einem Diagramm als Funktion I = f(U) graphisch dar, wobei die Durchlass- sowie die Sperrrichtung in einem Diagramm dargestellt werden (typische U-I-Dioden-Kennlinie).
- Schätzen Sie dabei den relativen Fehler ab.
- Tragen Sie folgendes in die Diagramme ein:
  - die Schwellenspannung der Si- und Ge-Dioden (durch Anlegen einer Tangente),
  - die Durchbruchsspannung der Zenerdioden (durch Anlegen einer Tangente), sowie
  - die Schwellenspannung der LEDs

und vergleichen Sie diese mit den Tabellenwerten.

# 3. Ergänzung

	$U_F$ / V	$I_F$ / mA	$U_R$ / V	$I_R$ / $\mu$ A	ϑ <sub>i</sub> / °C	P <sub>tot</sub> / mW
Si-Diode 1N4007	1,1	1000	1000	5	-55175	
Ge-Diode AA118	1,0	50	90	80	75	
Z-Diode ZPD6,2	1,0	100	6,2	0,1 bei RT	-65200	500
Z-Diode ZPD9,1	1,0	100	9,1	0,1 bei RT	-65200	500
LED1 grün	2,1	20	5		-4085	
LED2 rot	1,6	20	5		-4085	
LED3 gelb	1,9	20	5		-4085	
Infrarotdiode LD271H	1,1	130	5			220

Tab.1: Kennwerte der zu verwendenden Dioden

	Bandabstand	Emittierte Wellenlänge		
	ΔW/eV	λ/nm	Farbe	
Si	1,12	1130	infrarot	
InP	1,3	950	infrarot	
GaAs	1,43	900	infrarot	
GaS	2,24	730 560	rot grün	
ZnSe	2,6	480	blau	
SiC	3,1	400	blau	
ZnS	3,7	340	ultraviolett	

Tab.2: Elektronenlumineszenz in Halbleitern