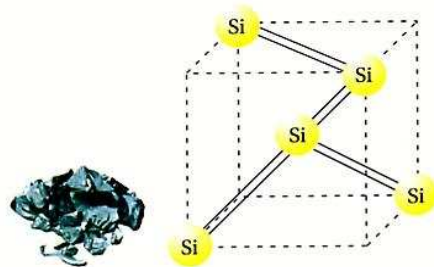


# 1 Profilbereich NTG

## 1.1 Halbleiter und Mikroelektronik

- der spezifische Widerstand von Halbleitern wie Germanium und Silicium liegt zwischen dem der reinen Leiter und der Nichtleiter  $\implies$  Halbleiter
- Silicium findet man im Quarzsand ( $SiO_2$ ) und ist das zweithäufigste Element der Erdrinde
  - aus dem Sand wird Siliciumpulver gewonnen  $\implies$  dieses wird durch spezielles Schmelzverfahren (Zonenschmelzen) und ein Ziehverfahren von Verunreinigungen befreit und in einen Kristall umgewandelt
- je nach Dotierung der Halbleiter unterscheidet man zwischen n-Halbleiter und p-Halbleiter

### 1.1.1 Leitung in Halbleitern



|   |                   | Hauptgruppen      |                   |                   |                   |    |
|---|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|----|
|   |                   | II                | III               | IV                | V                 | VI |
| 2 | 9,0<br>Be<br>4    | 10,8<br>B<br>5    | 12,0<br>C<br>6    | 14,0<br>N<br>7    | 16,0<br>O<br>8    |    |
| 3 | 24,3<br>Mg<br>12  | 27,0<br>Al<br>13  | 28,1<br>Si<br>14  | 31,0<br>P<br>15   | 32,1<br>S<br>16   |    |
| 4 | 40,1<br>Ca<br>20  | 69,7<br>Ga<br>31  | 72,6<br>Ge<br>32  | 74,9<br>As<br>33  | 79,0<br>Se<br>34  |    |
| 5 | 87,6<br>Sr<br>38  | 114,8<br>In<br>49 | 118,7<br>Sn<br>50 | 121,8<br>Sb<br>51 | 127,6<br>Te<br>52 |    |
| 6 | 137,3<br>Ba<br>56 | 204,4<br>Tl<br>81 | 207,2<br>Pb<br>82 | 209,0<br>Bi<br>83 | 209<br>Po<br>84   |    |

- Beispiel **Silicium**:
  - Silicium hat vier Valenzelektronen und bildet einen Kristall
  - jedes Siliciumatom hat vier unmittelbare Nachbaratome mit denen es eine Elektronen-Paar-Bindung eingeht (ein Elektron für Bindung mit Nachbaratom  $\implies$  vierfach positiv geladenen Atomrümpfen)
- bei tiefen Temperaturen stellt der Halbleiterkristall einen Isolator dar (keine beweglichen Ladungsträger)
- durch Energiezufuhr (z.B. Erwärmung) kann man Elektronen aus ihren Paarbindungen herauslösen  $\implies$  diese **Leitungselektronen** bewegen sich zwischen den Atomrümpfen

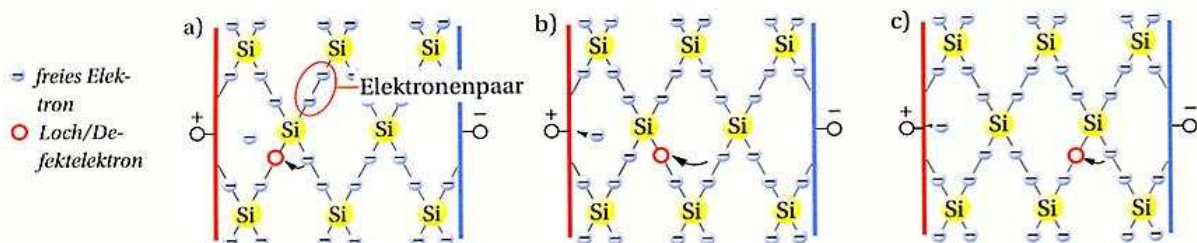
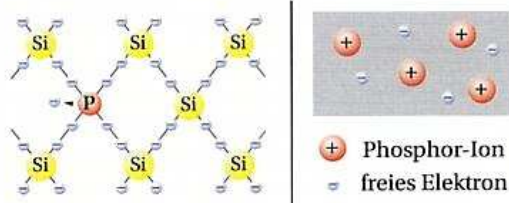
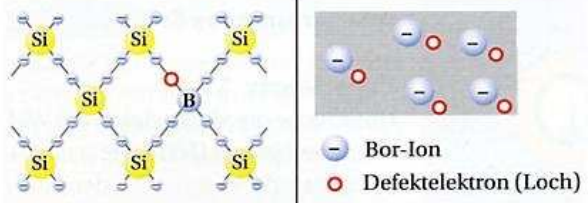


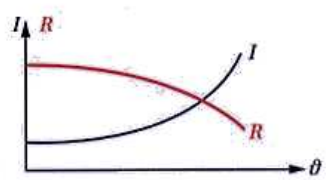
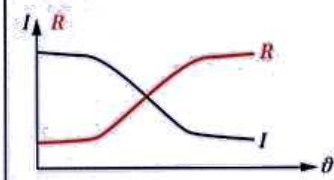
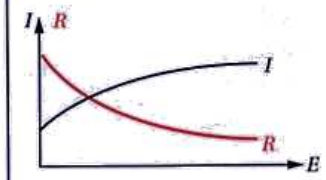
Abbildung 1: Eigenleitung in Silicium - Löcher (Defektelektronen) bewegen zum Minuspol

- jedes freie Elektron hinterlässt am Ort seiner ursprünglichen Gitterbindung ein **Loch**, auch **Defektelektron** genannt (Teilchen mit positiver Ladung)
- ein Loch wirkt auf ein in der Nähe befindliches Leitungselektron anziehend  $\implies$  unter Umständen füllt dieses die Elektronenlücke auf  $\implies$  Rekombination  $\implies$  **Eigenleitung**
- die Leitfähigkeit von Halbleitern kann durch **Einbringen von Fremdatomen** mit mehr oder weniger Valenzelektronen erhöht werden  $\implies$  **Dotierung**

| n-Halbleiter   | p-Halbleiter  |
|--|---|
|  <p>Wird ein Phosphoratom (fünfwertig) in Silicium dotiert, kann ein Außenelektron des Phosphors nicht gebunden werden und steht als freies Elektron für eine <b>n-Leitung</b> zur Verfügung.</p> |  <p>Wird in einen Siliciumkristall ein Boratom (dreiwertig) dotiert, kann ein Außenelektron eines Siliciumatoms nicht gebunden werden. Es bleibt ein Loch, das für eine <b>p-Leitung</b> zur Verfügung steht.</p> |

- beim Dotieren entstehen Störstellen mit freien Elektronen oder Löchern  $\implies$  Störstellenleitung
- **n-Halbleiter** durch Dotierung von Silicium (vierwertig) mit Phosphor (fünfwertig)
- **p-Halbleiter** durch Dotierung von Silicium (vierwertig) mit Bor (dreiwertig)

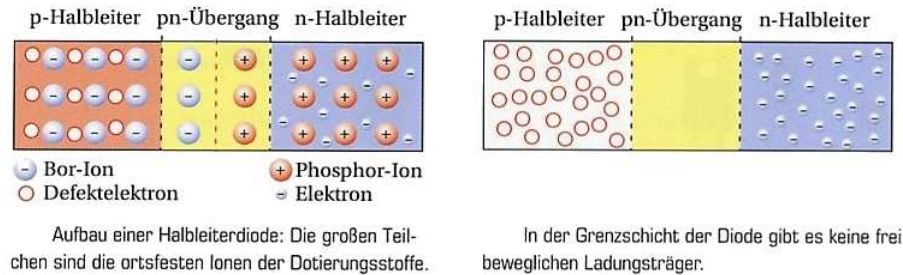
### 1.1.2 Halbleiterwiderstände

| Thermistoren   |   | Fotowiderstände (LDR)   |
|--|---|---|
| Heißeiter (NTC-Widerstand)   | Kaltleiter (PTC-Widerstand)   |   |
| <p>Mit steigender Temperatur <math>\vartheta</math> verkleinert sich der Widerstand.</p>  | <p>Mit steigender Temperatur <math>\vartheta</math> vergrößert sich der Widerstand.</p>  | <p>Mit zunehmender Beleuchtungsstärke <math>E</math> verkleinert sich der Widerstand.</p>  |

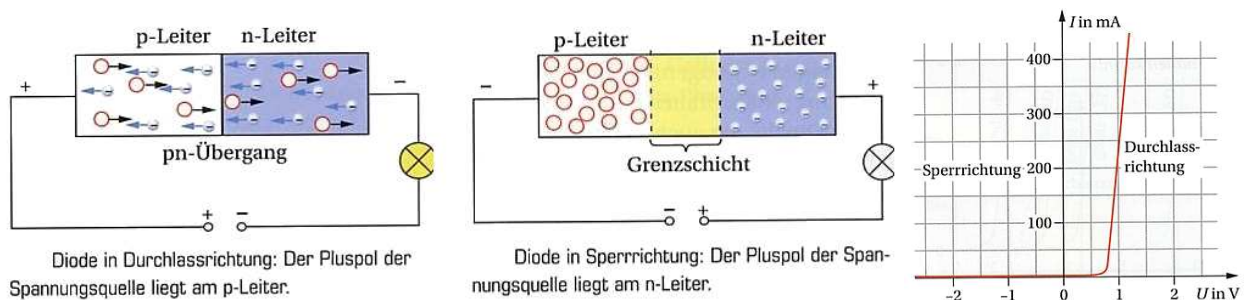
- der elektrische Widerstand von Halbleitern ist abhängig von seiner Temperatur (ähnlich Metalldrähten)  $\implies$  **Thermistoren**
  - mit einer Temperaturerhöhung schwingen die Gitteratome stärker um ihre Ruhelage  $\implies$  dies erhöht den elektr. Widerstand, **aber**

- mit einer Temperaturerhöhung erhöht sich auch die Anzahl der freien Ladungsträger (Elektronen, Löcher)  $\implies$  der elektr. Widerstand wird geringer
- **Fotowiderstände:** Beeinflussung der Leitfähigkeit eines Halbleiters durch Lichteinfall  $\implies$  stärkere Beleuchtung führt zu besserer Leitfähigkeit (z.B. Fahrstuhl Türen - unterbrochener Lichtstrahl lässt die Türen geöffnet)

### 1.1.3 Halbleiterdioden



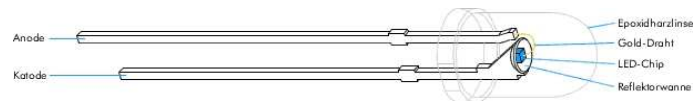
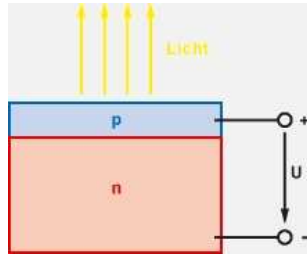
- eine Halbleiterdiode besteht aus zwei unterschiedlich dotierten Schichten des gleichen Halbleitermaterials; p- und n-Schicht (z.B. Silicium)
- an der Grenzschicht zwischen n- und p-Schicht diffundieren die Löcher in die n-Schicht und die Elektronen in die p-Schicht (besetzen dort die Löcher)  $\implies$  es entsteht dadurch in der Mitte eine von freien Ladungsträgern verarmte Raumladungszone, **pn-Übergang** genannt, einer bestimmten Breite (Bruchteile eines Millimeters)
- der pn-Übergang ist eine nichtleitende Grenzschicht



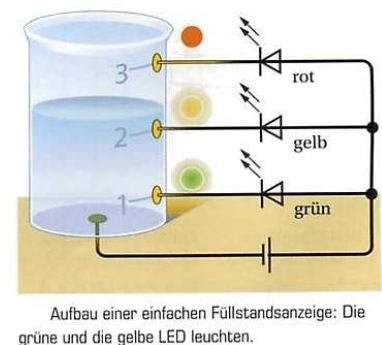
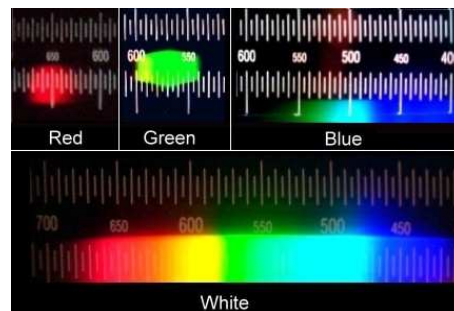
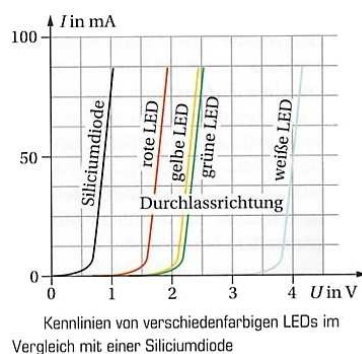
- wird eine Spannung angelegt, “-” an n-Schicht und “+” an p-Schicht, dann werden die freien Elektronen in die Grenzschicht (pn-Übergang) gedrückt
- ab einer bestimmten **Schwellenspannung** können die Elektronen die Grenzschicht überwinden  $\implies$  der Widerstand wird klein  $\implies$  **Durchlassrichtung** der Diode
- bei umgekehrter Polung wandern die Elektronen zum “+”-Pol  $\implies$  die Grenzschicht wird breiter und hat einen sehr hohen Widerstand, der den Stromfluss verhindert  $\implies$  **Sper(r)richtung** der Diode

## 1.1.4 Leuchtdioden

- **Leuchtdioden** (auch **Lumineszenzdioden**, **Lichtemitterdioden**, **LED** (Light Emitting Diode)) sind Halbleiterdioden, die in Durchlassrichtung betrieben, Licht einer bestimmten Farbe (Wellenlänge) aussenden (z.B. Infrarot, Rot, Grün, Blau, oder Ultraviolett)



- Funktionsprinzip:
  - LED besteht aus einem n-leitenden Grundhalbleiter und dünner p-Schicht
  - bei einer Spannung in Durchlassrichtung wandern Elektronen zum pn-Übergang und rekombinieren mit den Löchern, wobei die Elektronen ihre Energie in Form von Photonen abgeben
  - da die p-Schicht sehr dünn ist, können die Photonen entweichen
  - das Licht wird durch den linsenförmigen Kopf der LED gebündelt bzw. gestreut
- die Farbe ist abhängig vom Halbleitermaterial:
  - $AlGaAs$ ,  $GaAlAs$   $\Rightarrow$  rot (665 nm) und infrarot
  - $GaAsP$ ,  $AlInGaP$   $\Rightarrow$  rot, orange und gelb
  - $GaP$   $\Rightarrow$  grün
  - $InGaN$ ,  $GaN$   $\Rightarrow$  UV, blau und grün
  - weiße LEDs sind meist blaue LEDs mit einer Phosphorschicht

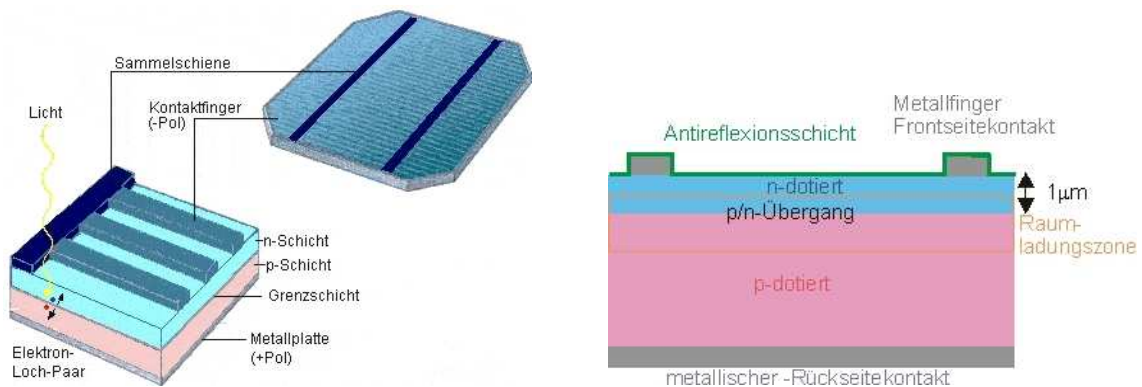


- Vorteile: geringer Energieverbrauch und Wärmeentwicklung, hohe Lebensdauer, stoß- und vibrationsfest, kleine Bauform
- Nachteile: Effizienz und Lichtfarbe ist mehr oder weniger temperaturabhängig, geringe Leuchtstärke
- Verwendung Leuchtmittel, Fernbedienung, LED-Drucker, Bildschirmbeleuchtung, etc.

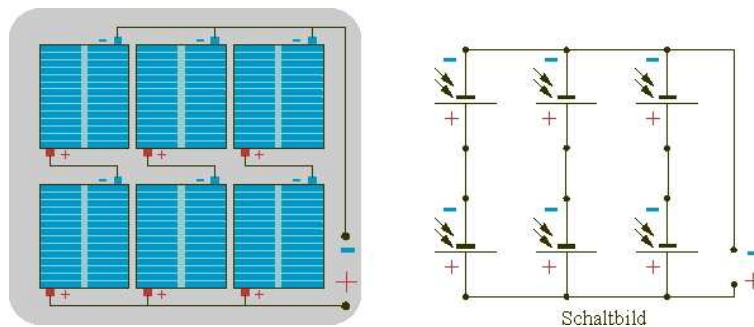


## 1.1.5 Solarzelle

- Material: Halbleiter wie  $CdTe$ ,  $GaAs$ ,  $CuInSe$  – aber weltweit am häufigsten Silicium.
- Aufbau: ca.  $0,001\text{ mm}$  dicke n-Schicht und  $0,6\text{ mm}$  dicke p-Schicht ( $Si$ -Substrat)  $\implies$  dazwischen eine Grenzschicht, der sogenannte p-n-Übergang
- die n-Schicht wird mit 5-wertigen Phosphor und die p-Schicht mit 3-wertiger Bor in das 4-wertige Silicium dotiert
- an der Grenzschicht zwischen n- und p-Schicht diffundieren die Löcher in die n-Schicht und die Elektronen in die p-Schicht  $\implies$  es entsteht dadurch eine von freien Ladungsträgern verarmte Raumladungszone einer bestimmten Breite

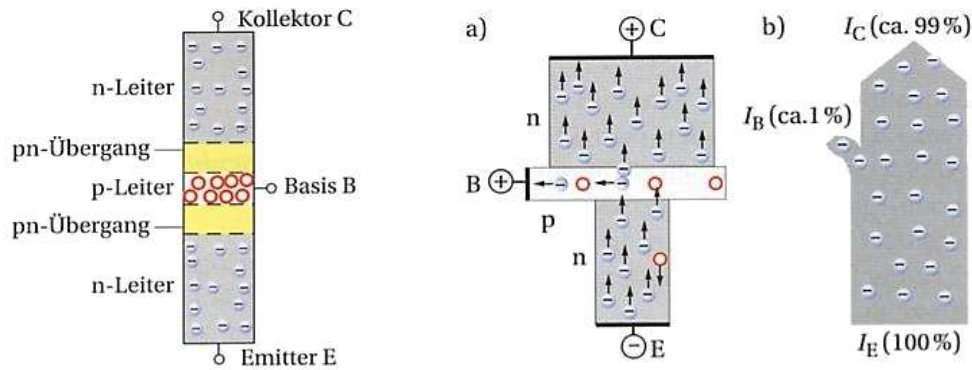


- Funktionsweise: die Raumladung ist der “Motor der Solarzelle”
- treffen Photonen auf die Raumladungszone, so lösen diese Elektron aus, wobei positive Löcher entstehen (**Photoeffekt**)  $\implies$  Löcher und Elektronen wandern durch die aufgebaute Feldkraft durch die Raumladungszone:
- das Elektron zur positiven Raumladung im n-dotierten Bereich und das positive Loch zur negativen Raumladung im p-dotierten Bereich  $\implies$  es entsteht an den Metallkontakten eine Spannung von ca.  $0,5\text{ V}$
- je intensiver die Beleuchtung und je großflächiger die Grenzschicht, desto mehr Elektronen-Loch-Paare entstehen  $\implies$  umso größer die Stromstärke ( $20\text{ mA}$ )
- nicht jedes Photon kann ein Elektron-Loch-Paar bilden und ein Elektron kann mit einem Loch wieder rekombinieren  $\implies$  es wird Wärme produziert  $\implies$  Wirkungsgrad einer Solarzelle ist begrenzt ( $10\% - 18\%$ )

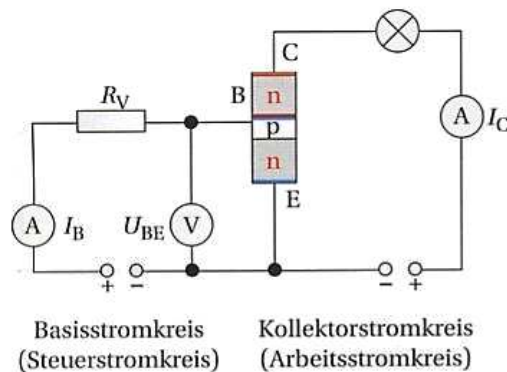


### 1.1.6 Halbleitertransistoren

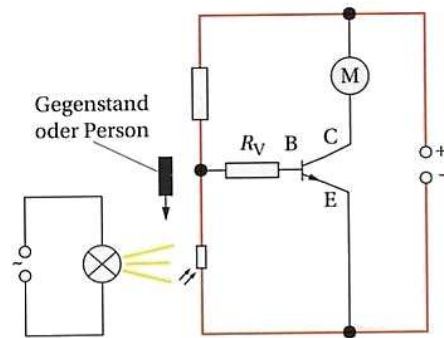
- Transistoren bestehen aus unterschiedlich dotierten Schichten eines Grundhalbleiters z.B. Silicium
- man unterscheidet nach der Dotierung den **npn-Transistor** und **pnp-Transistor**
- an dem Leitungsvorgang im Transistor sind neben den Elektronen auch die Löcher beteiligt



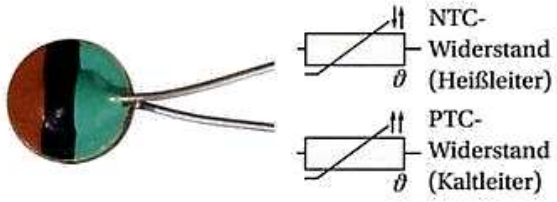





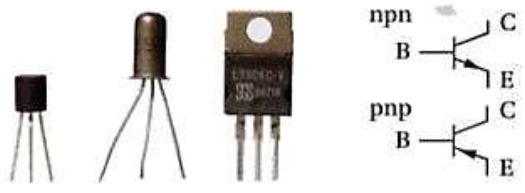

- die drei Bereiche eines Transistors werden als **Emitter E**, **Basis B** und **Kollektor C** bezeichnet
- Funktionsprinzip:
  - der Transistor besitzt zwei pn-Übergänge an der Verbindung B/E und B/C
  - liegt zwischen Emitter und Kollektor eine Spannung an, dann ist ein pn-Übergang in Sper(r)richtung geschaltet  $\Rightarrow$  es fließt kein **Kollektorstrom**
  - legt man zusätzlich eine Basis-Emitter-Spannung an, wird der gesperrte pn-Übergang auch in Durchlassrichtung geschaltet  $\Rightarrow$  es fließt ein Kollektorstrom
  - genauer: Elektronen aus dem Emitter gehen in die schwach dotierte, dünne Basis, diese wird von den Elektronen “überschwemmt”  $\Rightarrow$  aber nur wenige Elektronen gelangen zum Basisanschluß, denn
  - Kollektor ist breiter als der Emitter und hat mehr Kontaktfläche zur Basis  $\Rightarrow$  ein Großteil der Elektronen wird vom positiven Kollektor angezogen und überwindet den vorher gesperrten pn-Übergang  $\Rightarrow$  Kollektorstrom



- **Transistoreffekt:** ist der Effekt, dass bei einem kleinen Basisstrom ein wesentlich größerer Kollektorstrom fließt und das kleine Änderungen der Basisstromstärke große Änderungen der Kollektorstromstärke hervorrufen
- Transistor als **Schalter:** es fließt nur ein (Kollektor-)Strom durch den Transistor wenn ein Basisstrom fließt  $\implies$  Verwendung als Schalter
  - elektronische Schaltungen zwischen Schaltkreisen z.B. Computer, Radio, ...,  $\implies$  alle bedienbaren elektrischen Geräte
  - Lichtschranke an Rolltreppen, Fahrstuhltüren, Dämmerungsschalter für Straßenbeleuchtung etc.
- Transistor als **Verstärker:** eine kleine Änderung der Basisstromstärke führt zu einer großen Änderung der Kollektorstromstärke
  - Mikrofonverstärker – schwache elektrische Signale des Mikrofons werden verstärkt und an den Lautsprecher weitergeleitet
- Lichtschranke



1 ▶ Schaltplan für eine Lichtschrankenanlage mit einem Transistor

|  |   |
|--|---|
| <p><b>Thermistor</b></p> <p>Thermistoren sind stark temperaturabhängige Widerstände aus halbleitenden Metalloxiden. Ihr Widerstand vergrößert oder verkleinert sich mit steigender Temperatur.</p>                  | <p><b>Fotowiderstand</b></p> <p>Fotowiderstände sind beleuchtungsabhängige Widerstände, die auf ein Trägerplättchen aufgebracht sind. Ihr Widerstand verkleinert sich mit der Beleuchtungsstärke.</p>                   |
| <p><b>Gleichrichterdiode</b></p> <p>Gleichrichterdioden sind Bauelemente mit einem pn-Übergang, die in Sperrrichtung einen großen und in Durchlassrichtung einen kleinen Widerstand haben.</p>                     | <p><b>Leuchtdiode (LED)</b></p> <p>Leuchtdioden, z. B. aus GaAs, werden in Durchlassrichtung betrieben. Bei der Rekombination im pn-Übergang wird Energie frei, die in Form von Strahlung (Licht) abgegeben wird.</p>  |
| <p><b>Fotodiode</b></p> <p>Fotodioden werden in Sperrrichtung betrieben. Bei Beleuchtung des pn-Übergangs mit Licht entstehen Elektronen und Löcher. Die Stromstärke steigt an.</p>                               | <p><b>Fotoelement, Solarzelle</b></p> <p>Solarzellen sind flächenhafte Anordnungen von Fotoelementen. Bei einem Fotoelement entsteht bei Lichteinstrahlung zwischen p- und n-Anschluss eine Spannung.</p>             |
| <p><b>bipolarer Transistor</b></p> <p>Bipolare Transistoren sind Bauelemente, bei denen ein Arbeitsstromkreis durch einen Steuerstromkreis beeinflusst wird. Sie werden als Schalter und Verstärker genutzt.</p>  | <p><b>Feldeffektransistor</b></p> <p>Feldeffektransistoren sind Bauelemente, bei denen durch ein elektrisches Feld ein Arbeitsstromkreis beeinflusst wird. Sie werden als Schalter und Verstärker genutzt.</p>        |

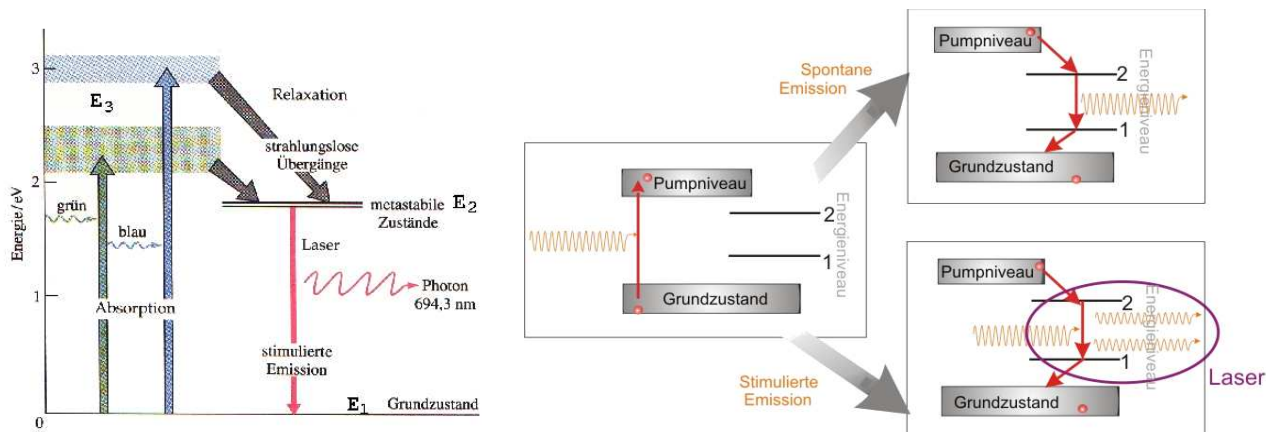


### 1.1.7 Laser

**LASER** = Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation

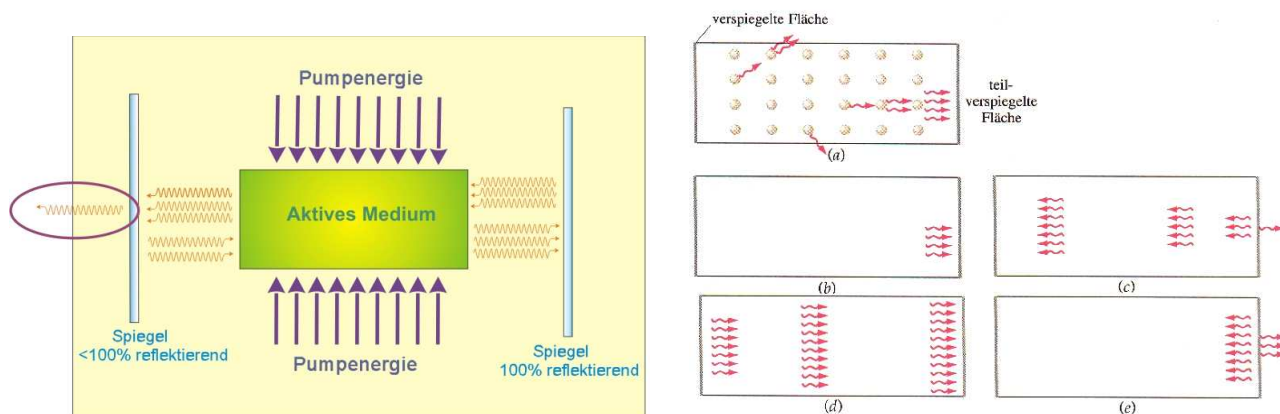
Lichtverstärkung durch stimulierte Emission von Strahlung

• **Funktionsprinzip:**



- die Atome eines **aktiven Mediums** werden durch Bestrahlung (Photonen geeigneter Energie) angeregt  $\Rightarrow$  Elektronen auf Pumpniveau angehoben
- **Besetzungsinversion** es befinden sich mehr Atom im angeregten Zustand als im Grundzustand (Grundprinzip des Laser)
- **spontane Emission** Atom geht in den Grundzustand über und gibt Energiedifferenz als Photon ab (ungerichtet)
- **stimulierte Emission** Photon geeigneter Energie (ähnlich Anregung) stimuliert Atom zum Übergang in den Grundzustand  $\Rightarrow$  Laser-Photon
- das Laser-Photon hat die gleiche Phase, Polarisation und Richtung wie das stimulierende Photon

• **Verstärkung:**



- **Resonator** zwei parallele Spiegel (teildurchlässig & vollständig reflektierend) vervielfachen die Laser-Photonen durch Rückkopplung im aktiven Medium (reflektierte Laser-Photonen stimulieren ihrerseits die angeregten Atome zum Übergang) mittels Reflexion an den Spiegeln

- hoher Prozentsatz der Laser-Photonen werden an den Spiegel in das aktive Medium zurückreflektiert
- am teildurchlässigen Spiegel wird ein geringer Prozentsatz der Laser-Photonen ausgekoppelt  $\Rightarrow$  sichtbar Laserstrahl

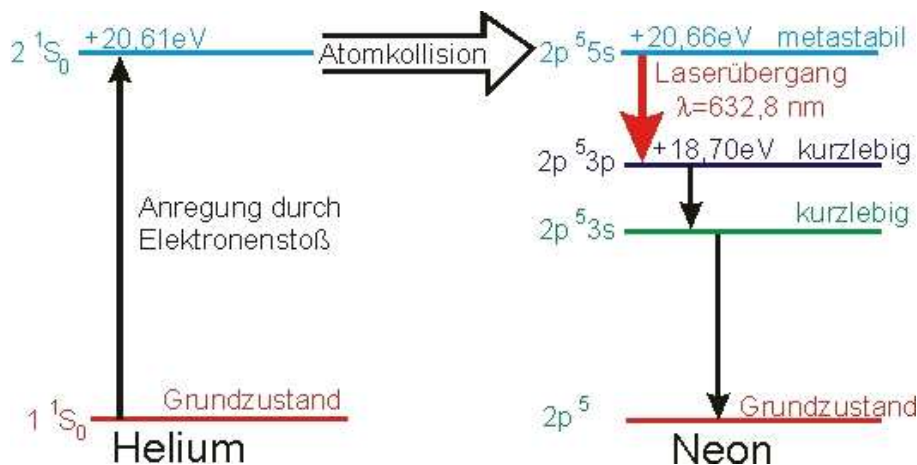
• **Laserarten:** (unvollständig)

- **Festkörperlaser** (Beispiel Rubinlaser)



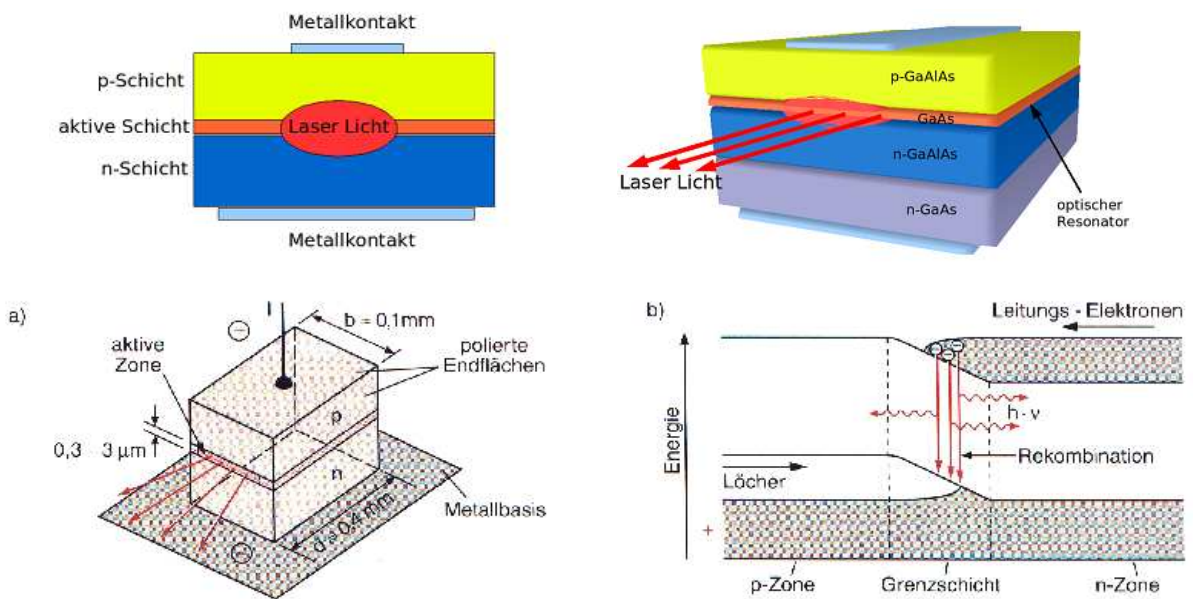
Durch optische Anregung (Quarz-Lampe) werden Elektronen auf ein kurzlebigen Anregungszustand gebracht aus dem diese spontan in einen niedrigeren aber langlebigen (metastabilen) Anregungszustand fallen. Erst durch induzierte Emission gelangen die Atome wieder in den Grundzustand und können erneut von außen angeregt werden. Auf diese Weise stehen sehr viele angeregte Atome im metastabilen Zustand für die induzierte Emission zur Verfügung.

- **Gaslaser** (Beispiel Helium-Neon-Laser)



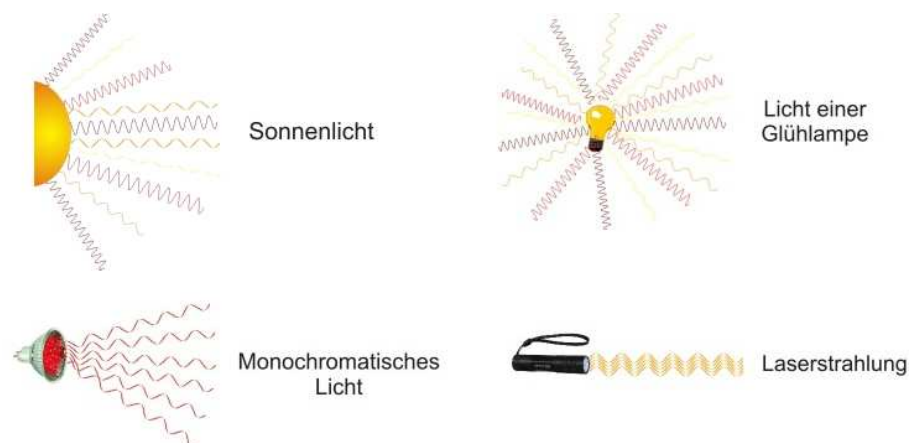
In einem Helium-Neon-Gasgemisch gehen durch Stoßanregung mit Elektronen die Helium-Atome in einen angeregten metastabilen Zustand über (optischer Übergang nicht möglich). Die angeregten Heliumatome geben ihre Energie durch Stöße an die Neonatome ab, welche dabei in den metastabilen Zustand angeregt werden (Besetzungsinversion). Das Neon-Atom sendet beim stimulierten Übergang in den kurzlebigen Zustand das (rote) Laser-Photon aus und geht dann in den Grundzustand über.

- **Halbleiterlaser**



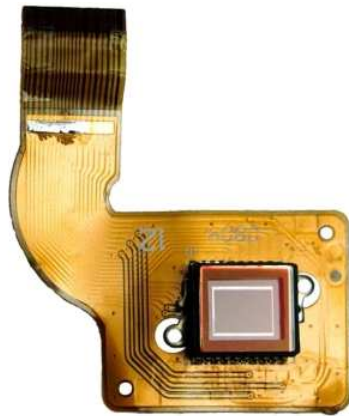
Eine Laserdiode erzeugt Laserstrahlung (ähnlich visuelles Licht der Leuchtdiode (LED)). Dazu wird ein p-n-Übergang mit starker Dotierung bei hohen Stromdichten betrieben. Die Wahl des Halbleitermaterials bestimmt die emittierte Wellenlänge. Die Emission von Licht entsteht durch Rekombinationsprozesse von Elektronen und Löchern am pn-Übergang. Die Endflächen des Bauelements sind teilreflektierend und bilden somit einen optischen Resonator, in dem sich eine stehende Lichtwelle ausbilden kann. Liegt eine Besetzungsinversion (durch elektrisches Pumpen – ein elektrischer Gleichstrom in Durchlassrichtung sorgt für stetigen Nachschub von Elektronen und Löchern) vor, wird die stimulierte Emission zum dominierenden Strahlungsprozess. Die Laserdiode emittiert dann Laserstrahlung.

• **Eigenschaften des Laserlichts**

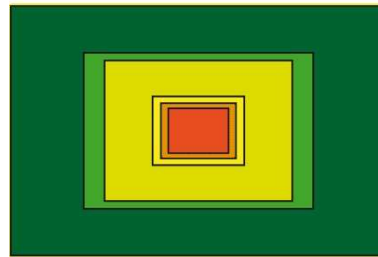


- **hochgradig monochromatisch** (einfarbig) mit Linienhalbwertsbreiten von  $1\text{ kHz}$  (natürliche Linienbreite von Neon  $800\text{ MHz}$ )
- **hochgradig kohärent** gleiche Phasen in räumlicher und zeitlicher Richtung (ohne Sprünge und vollkommen vorhersagbar) mit Kohärenzlängen bis zu  $300\text{ km}$
- **hochgradig gerichtet** d.h. sehr geringe Divergenz von wenigen Bogenminuten

# 1.1.8 CCD- & CMOS-Detektor



**sensor sizes**



**digital SLRs**

- 35mm (24 x 36 mm)
- APS-C (22 x 15 mm)
- 4/3" (18 x 13,5 mm)

**compact cameras**

- 2/3" (8,8 x 6,6 mm)
- 1/1,8" (7,2 x 5,3 mm)
- 1/2,5" (5,8 x 4,3 mm)

