3 Nichtlineare Bauelemente und Sensoren

Wir wollen uns nun den Bauelementen zuwenden, für die die lineare Systemtheorie nicht zur Beschreibung ausreicht und die eine entscheidende Rolle in Datenverarbeitungsgeräten spielen. Die mit Abstand wichtigsten sind dabei die Halbleiterbauelemente. Daher wollen wir sie als erste betrachten. Dazu müssen wir zunächst die Mechanismen der Halbleiterphysik kennenlernen.

3.1 Halbleiterphysik

3.1.1 Energieniveaus und Bändermodell

Das Bohrsche Atommodell geht von einem Atomkern aus, der von Elektronen auf bestimmten Bahnen (Schalen) umkreist wird. Die Elektronen auf der äußeren Schale heißen *Valenzelektronen* und sind für die chemischen Eigenschaften des Atoms verantwortlich.

Betrachten wir zunächst das Verhalten des Wasserstoffs als des einfachsten Atoms. Im *Grundzustand* befindet sich sein einziges Elektron auf der untersten Schale. Wegen der Gültigkeit der Quantenphysik kann das Elektron durch Zufuhr äußerer Energie nicht in beliebige andere Energiezustände gehoben werden, sondern es sind nur besondere *diskrete* Energieniveaus $n=1 \ldots \infty$ erlaubt, die den Schalen entsprechen. Die Energie wird in der Atomphysik in eV (Elektronenvolt) gemessen (s. Tabelle in Abschn. 1.1). Abb. 43 zeigt links die erlaubten Energieniveaus des Wasserstoffs. Oberhalb von 13,6 eV hat sich das Elektron aus der Bindung des Kerns vollständig gelöst und bewegt sich frei im Raum, diese Energie nennt man *Ionisierungsenergie*. Atome mit mehreren Elektronen haben kompliziertere Energieniveaus, die aus den Emissionsspektren ermittelt werden können.

Anorganische *Festkörper* (mit Ausnahme von Gläsern und Kunststoffen) haben eine kristalline Struktur, in der sich die Atome in bestimmtem Gitterformen organisieren. Man unterscheidet *Leiter*, *Halbleiter* und *Nichtleiter*. Für Leiter - z.B. Kupfer - gilt, dass sich die Atomrümpfe in einer Gitterstruktur fixieren, während die Elektronen innerhalb des Gitters als frei bewegliches Elektronengas betrachtet werden können. Beim Anlegen eines elektrischen Feldes wandern dann die Elektronen und bilden den elektrischen Strom. In *Isolatoren* oder *Nichtleitern* sind die Elektronen mit den Atomrümpfen zusammen im Gitter

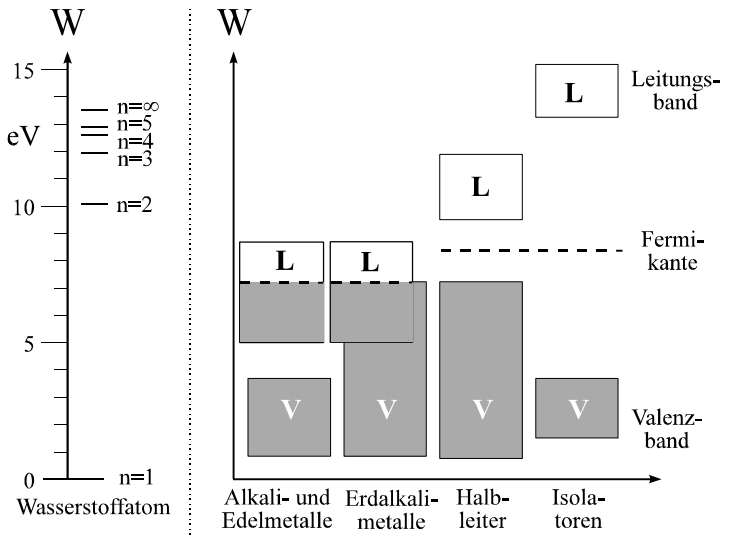

Abbildung 43: Energieniveaus des Wasserstoffatoms und Bändermodell für Festkörper

fixiert. Daher fließt auch bei Anlegen eines Feldes kein Strom, wenn man von der Influenzwirkung absieht.

Zur Erklärung der Effekte in *Halbleitern* betrachten wir Abb. 43. Hat das Wasserstoffatom noch diskrete Energiezustände, so sieht das völlig anders aus, wenn wir die Atome in einem Festkörperverband betrachten. Die diskreten Energieniveaus der schwach gebundenen äußeren Elektronen fächern auf zu breiten Energiebändern. Hierbei sind nur die beiden Bänder mit den höchsten Energieniveaus für das elektrische Verhalten eines Festkörpers wichtig. Die niedrigeren fächern weit weniger stark auf und können vernachlässigt werden. Das Band mit dem höchsten Energieniveau heißt *Leitungsband*, das mit dem zweithöchsten *Valenzband*.

Für die elektrischen Eigenschaften ist entscheidend, bis zu welcher Energie die Zustände mit Elektronen besetzt sind, d.h. wo die *Fermikante* liegt. Ein weiteres Kriterium ist die *Energielücke* zwischen den Bändern. Bei *Metallen* liegt die Fermikante, bis zu der Elektronenzustände besetzt sind, mitten im Leitungsband. Daher sind genügend viele bewegliche Elektronen vorhanden, um die Leitfähigkeit zu realisieren. Die elektrische Leitfähigkeit der Metalle nimmt mit zunehmender Temperatur ab, weil sich die freie Beweglichkeit der Leitungselektronen dadurch reduziert, dass die Ionen (Atomrümpfe) durch ihre thermische Bewegung die freien Weglängen verkleinern. Das spezielle Phänomen der Supraleitung betrachten wir hier nicht.

Bei allen *anderen Festkörpern* liegt die Besetzungskante (Fermikante) für die Temperatur $T \rightarrow 0\text{K}$ zwischen Leitungs- und Valenzband. Für niedrige Temperaturen ist daher das Valenzband vollständig gefüllt und das Material verhält sich wie ein Nichtleiter. Für das Verhalten bei steigender Temperatur ist die Größe der Bandlücke entscheidend. Bei Materialien mit Bandlücken $W_G \leq 2\text{eV}$ können schon bei Zimmertemperatur (300K) Elektronen in nennenswerter Zahl thermisch aktiviert werden, d.h. einige Elektronen halten sich im Leitungsband auf und verursachen eine endliche Leitfähigkeit. Solche Materialien heißen *Halbleiter*. Die am häufigsten verwendeten Materialien sind *Silizium, Germanium* und *Galliumarsenid*.

Nichtleiter haben eine Energielücke $W_G > 10\text{eV}$, so dass nur sehr wenige Elektronen durch thermische Effekte in das Leitungsband gelangen. Sie haben folglich eine sehr viel kleinere Leitfähigkeit als Halbleiter.

3.1.2 Kristallstrukturen üblicher Halbleiter

Der Kristall des wichtigsten Halbleiters, des *Siliziums* (Si) hat, ebenso wie *Germanium* (Ge), eine sog. *Diamant-Gitterstruktur*, wie sie Abb. 44 zeigt. Es handelt sich um eine raumzentrierte Tetraederstruktur, d.h. von einem Atom aus gesehen, befinden sich die Nachbarn raumsym-

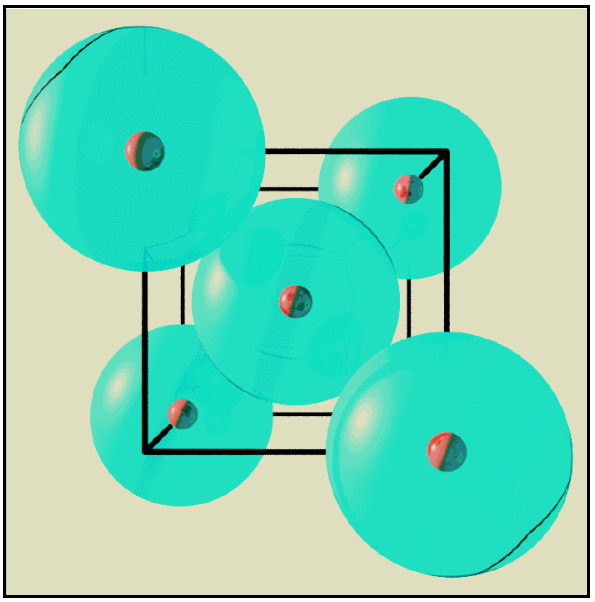

Abbildung 44: Räumliche Anordnung von Atomen im Diamant-Kristallgitter

metrisch an entfernten Eckpunkten eines regelmäßigen Tetraeders. Die kleinen Kugeln symbolisieren die Atomkerne, die großen die Schalen der Valenzelektronen. Die schwarzen Linien bilden ein kubisches Hilfsgerüst zur Veranschaulichung.

Da *Si* und *Ge* vierwertig sind, teilt sich ein Atom mit den vier Nachbarn jeweils ein Elektronenpaar, so dass sich ein zweidimensionales Modell für *Si* aufstellen lässt, an dem die Halbleitereffekte erklärbar werden. Dieses ist in Abb. 45 und 46 dargestellt.

Bei T=0K ist die Gitterstruktur innerhalb eines *Einkristalls* - und bei den technischen Halbleitern handelt es sich um Einkristalle - regelmäßig, wie oben gesagt, und je fünf Siliziumatome teilen sich ihre Elektronen. Das Valenzband ist voll besetzt und das Leitungsband leer, Silizium verhält sich wie ein Nichtleiter.

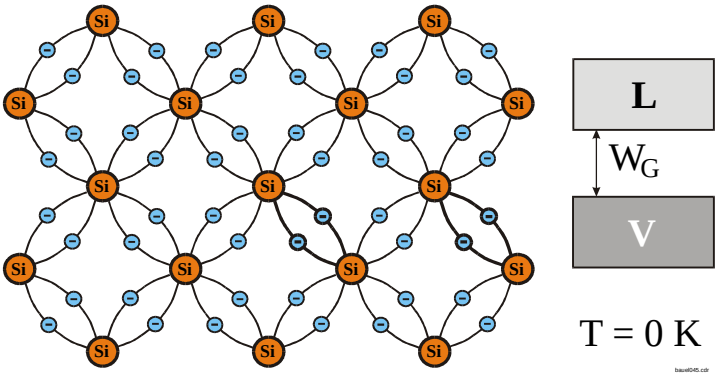

Abbildung 45: Zweidimensionales Modell für Silizium bei T=0 K, rechts Bändermodell

Bei Temperaturen über dem absoluten Nullpunkt werden einige Elektronen aus ihren Bindungen gerissen, wie Abb. 46 es modelliert.

Dadurch geraten einige Elektronen in das Leitungsband. Gleichzeitig entstehen Lücken im Valenzband, die *Defektelektronen* oder *Löcher* genannt werden. Es gibt dann zwei sich überlagernde Leitungsmechanismen, die *Elektronenleitung* im Leitungsband und die *Löcherleitung* im Valenzband.

Legt man ein äußeres Feld E an, so wandern die (negativ geladenen) Elektronen gegen die Feldrichtung, die Löcher in Feldrichtung. Bei einem reinen Einkristall sind die *Löcherkonzentration* n_p und die *Elektronenkonzentration* n_n gleich und werden *Eigenkonzentration* (intrinsic concentration) n_i genannt. Auf ihr beruht die *Eigenleitfähigkeit* des Materials. Für die Erzeugung von Paaren von Ladungsträgern ist nicht nur die Wärmebewegung verantwortlich, vielmehr können auch andere Energiequanten, wie Photonen, UV-Strahlung oder bewegte α-Teilchen Elektronen in das Leitungsband heben.

$$n_p = n_n = n_i. \qquad (93)$$

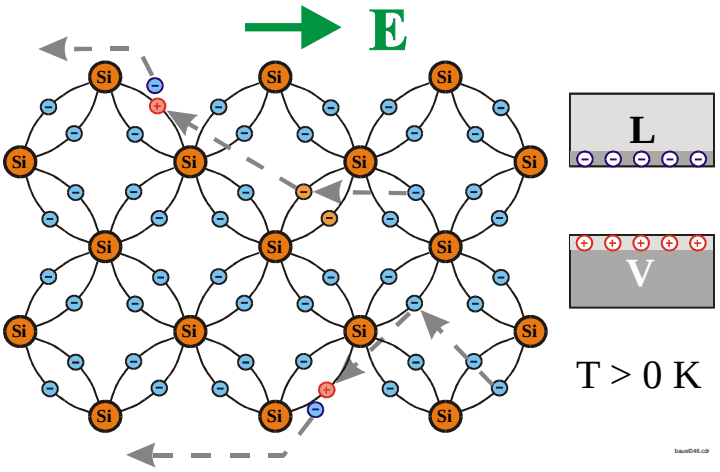

Abbildung 46: Modell der Eigenleitung von Silizium bei T>0 K

Neben diesem Effekt gibt es auch den reziproken der *Rekombination*. Die hierbei frei werdende Energie W_G wird als Wärmebewegung im Gitter oder als abgestrahltes Energiequant umgesetzt. Im thermodynamischen Gleichgewicht ist die Erzeugungsrate gleich der Rekombinationsrate, d.h. die Ladungsträgerkonzentration ist konstant.

Die Eigenleitung ist darüber hinaus durch *Verunreinigungen*, welche die Gitterstruktur stören, und Oberflächeneffekte an den Grenzen des Kristalls, wo die Bindungen zu Nachbarn fehlen, mitbestimmt.

3.2 Dotierte Halbleiter

Den Verunreinigungseffekt macht man sich bei der Nutzung von Halbleitern als elektronische Bausteine zunutze. Wichtig ist dabei, dass die Verunreinigungen, die als *Dotierungen* bezeichnet werden, der Gruppe der drei- oder fünfwertigen Atome angehören. Dadurch haben sie entweder ein Elektron mehr auf der äußersten Schale - sie heißen dann *Donatoren* - oder eins weniger - sie heißen dann *Akzeptoren*. die folgende Tabelle stellt einige Begriffe der beiden Halbleitertypen zusammen.

Elemente der V. Gruppe	**Elemente der III. Gruppe**
P, As, Sb	B, Al, Ga, In
Elektronen im Überschuss	ungesättigte Bindungen
überwiegend Elektronenleitung	überwiegend Löcherleitung
Elektronenspender, Donatoren	Elektronenfänger, Akzeptoren
n - Halbleiter	p - Halbleiter

Die Abb. 47 und 48 zeigen schematisch die Wirkung von Fremdatomen im Silizium-Einkristall.

Abb. 47 zeigt mit Phosphor, einem Donator, dotiertes Silizium. Das fünfte Elektron des Donators löst sich relativ leicht vom Atomrumpf, $W_G \gg W_D$ ($W_D \approx$ 0,02 eV), wobei ein unbewegliches, positiv geladenes Ion im Gitter fixiert bleibt. Die Elektronenleitung überwiegt.

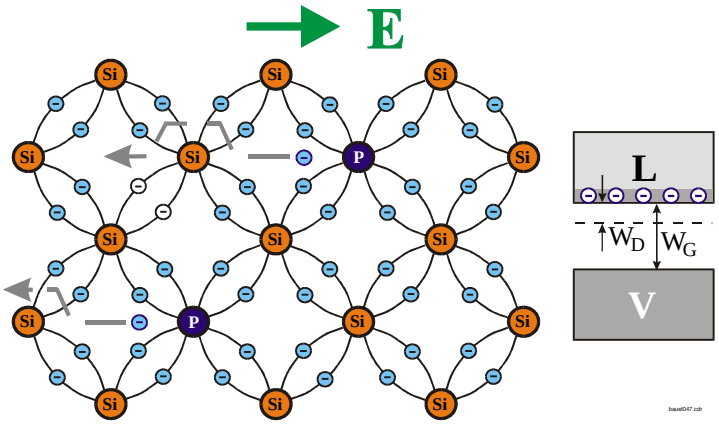

Abbildung 47: Modell der n-Leitung im Silizium mit Donator *P*

Abb. 48 zeigt ein mit Bor, einem Akzeptor, dotiertes Silizium. Hier gibt es durch die unvollständige Paarbindung des dreiwertigen Bors eine Auffüllung aus benachbarten Elektronenpaaren, wodurch einem

Defektelektron (Loch) eine Wanderung in der äußeren Feldrichtung ermöglicht wird. Das Energieniveau der Akzeptoren liegt im rechten Bändermodell dicht unterhalb des Niveaus des Leitungsbandes ($W_A \approx$ 0,02 eV). Auch hier gilt, dass $W_G \gg W_A$.

Bei genügend hoher Störstellenkonzentration ist der Beitrag der (temperaturabhängigen) Eigenleitung zu vernachlässigen. Es gilt somit im Arbeitsbereich (Zimmertemperatur) für die Konzentration der *Majoritäts-Ladungsträger*

$$n = N_D \; ; \qquad p = N_A . \qquad \textbf{(94)}$$

Daneben existieren die thermisch erzeugten *Minoritäts-Ladungsträger*, deren Konzentration stark temperaturabhängig ist.

$$n_i^2 \sim e^{-\frac{W_G}{kT}} . \qquad \textbf{(95)}$$

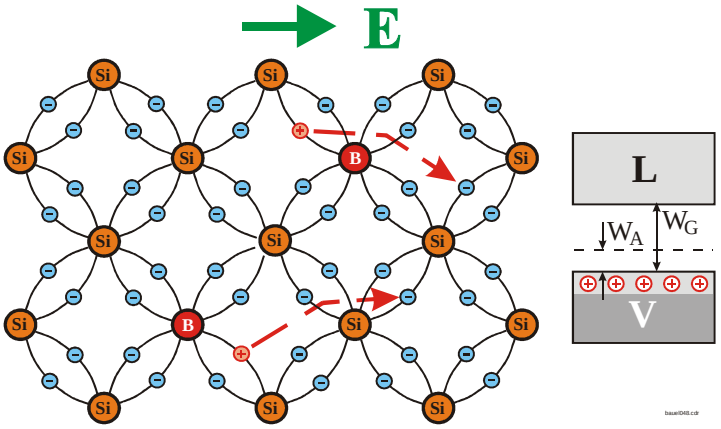

Abbildung 48: Modell der p-Leitung im Silizium mit Akzeptor *B*

n-dotierte Halbleiter werden *n-Halbleiter* genannt, p-dotierte *p-Halbleiter*.

3.2.1 PTC- und NTC-Widerstand

Die starke Temperaturempfindlichkeit von Halbleitern, die in Gl.(94) zum Ausdruck kommt, wird für temperaturabhängige Widerstände ausgenutzt. Diese Widerstandstypen heißen *NTC-Widerstände* (**N**egative **T**emperature **C**oefficient) oder *Heißleiter*. Um innere Temperatureffekte zu kompensieren, wird ein NTC-Widerstand mit geringem Strom betrieben, so dass die äußere Umgebungstemperatur für den Widerstandswert maßgeblich ist. Abb. 49 zeigt den typischen Widerstandsverlauf eines solchen *Heißleiters*.

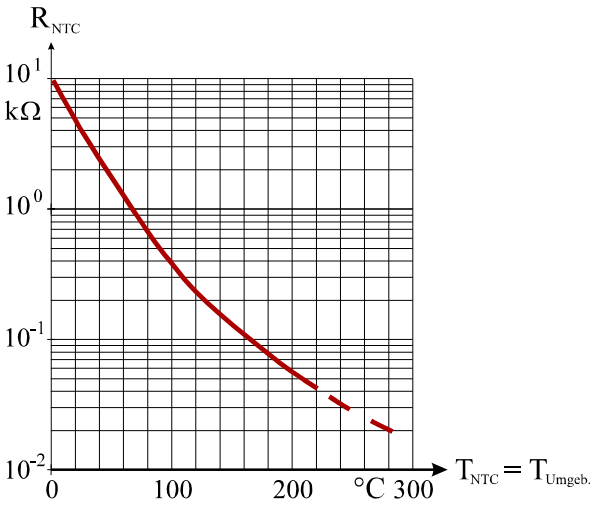

Abbildung 49: NTC-Widerstand (Typ Siemens A34-2/30) als Funktion der Außentemperatur ohne Eigenerwärmung

Bei stärkerer Belastung erwärmt sich der Widerstand infolge des durchfließenden Stromes, bis sich im Energieaustausch mit der Umgebung ein stationärer Zustand einstellt, bei dem sich eine bestimmte Temperaturdifferenz zwischen Widerstand und Umgebung ergibt. Infolge dieses Energieaustausches mit der Umgebung haben technische NTC-Widerstände Verzögerungszeiten, die im Bereich von 0,1 - 40 s liegen.

NTC-Widerstände ohne Eigenerwärmung dienen zur Temperaturkompensation in analogen Schaltungen und als Temperaturfühler, z.B. in Thermometerschaltungen. Solche mit Eigenerwärmung dienen als Strombegrenzer in Anlaßschaltungen, z.B. für Motoren, Glühlampen o.ä. oder als Verzögerungselemente für Relaisschaltungen.

Kaltleiter oder *PTC-Widerstände* (Positive Temperature Coefficient) sind Widerstände aus dotiertem polykristallinen Material, z.B. Titanatkeramik. Hier werden Halbleitereffekte und die Ferroelektrizität der Keramik ausgenutzt, so dass sehr steile Widerstandsanstiege bei Temperaturanstiegen zu beobachten sind, wie Abb. 50 schematisch zeigt.

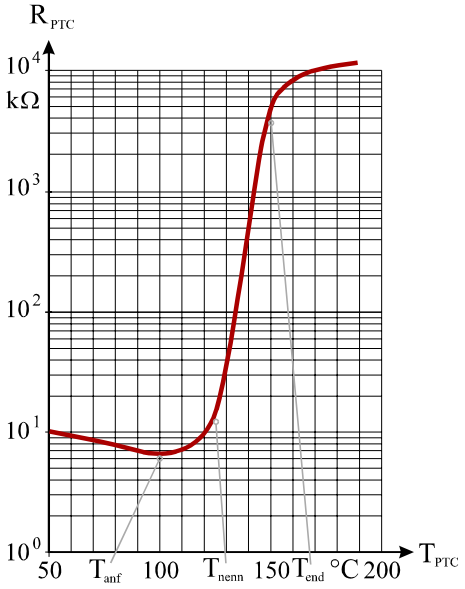

Abbildung 50: PTC-Widerstand als Funktion der Temperatur

PTC-Widerstände lassen sich, ähnlich wie NTC-Widerstände als Temperaturfühler einsetzen, z.B. als Flüssigkeits-Niveaufühler in Öl- oder Wassertanks. Wegen ihres stark nichtlinearen Verhaltens können sie auch zur Temperaturstabilisierung als Thermostat für temperaturempfindliche Schaltungen eingesetzt werden. Anzumerken ist noch, dass das Verhalten frequenzabhängig ist. Mit zunehmender Frequenz verringert sich der Bereich R_{nenn}-R_{end}.

3.2.2 Photowiderstand

Wir hatten bereits im Abschnitt 3.1.2 erwähnt, dass auch durch Zuführung von äußerer Energie, z.B. durch Strahlung die Bindungen der Atome im Kristall aufgebrochen werden können und Elektronen-Loch-Paare als Elemente der Stromleitung entstehen. Man nennt das den *inneren Photoeffekt*. Dadurch werden Ladungsträger in das Leitungsband gehoben und erhöhen die Leitfähigkeit des Materials. Bei den meisten Halbleiterbauelementen ist dieser Effekt unerwünscht, daher werden sie optisch und gegen Strahlung abgeschirmt.

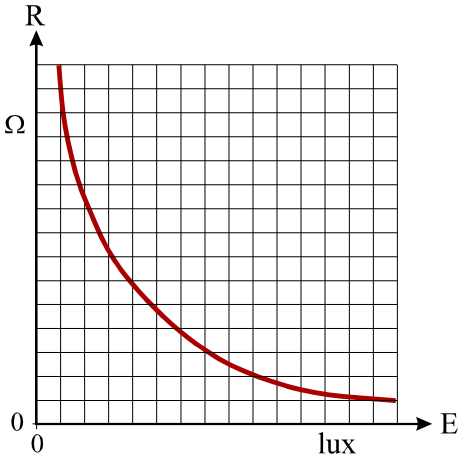

Abbildung 51: Verhalten eines Photowiderstandes bei verschiedenen Beleuchtungsstärken

Zur Steuerung durch Lichtschranken, für die Messung von Lichtstärken u.ä. ist dieser Effekt jedoch sehr nützlich.

Die Photowiderstände bestehen aus Halbleiter-Mischkristallen, wie *CdS*, *PbS*, *PbSe* oder *PbTe*. Sie sind bipolar, können also in beiden Richtungen betrieben werden. Den grundsätzlichen Widerstandsverlauf zeigt die nebenstehende Abbildung.

3.2.3 VDR-Widerstand

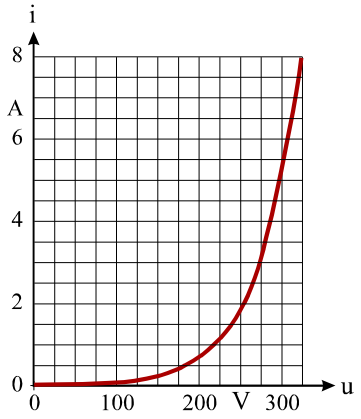

Abbildung 52: Strom-Spannungskennlinie eines VDR-Widerstandes

$$i = \pm\, a\,|u|^{\alpha} \qquad \textbf{(96)}$$

Eine weitere Anwendung poykristalliner Halbleiter sind spannungsabhängige Widerstände, die *VDR-Widerstände* (Voltage Dependend Resistors) oder *Varistoren* genannt werden. Sie bestehen aus gesintertem SiC- oder ZnO-Pulver. Die Nichtlinearität beruht auf einer spannungsabhängig veränderlichen Potentialbarriere an den Korngrenzen.

Die linke Abbildung zeigt eine typische Kennlinie, die auch durch folgende Gleichung beschrieben werden kann, wobei a und α durch die Herstellung und die Abmessungen beeinflusst werden.

Die Hauptanwendungsgebiete sind der Überspannungsschutz (besonders bei Freileitungen) und die Spannungsstabilisierung.

3.3 pn-Übergang

Die Funktion der wichtigsten Halbleiterbauelemente, der Dioden und Transistoren, wird durch die Grenzschicht zwischen p-dotiertem, Löcher leitendem, und n-dotiertem, Elektronen leitendem Halbleitermaterial bestimmt. Diese *Grenzschicht* wird auch *pn-Übergang* genannt.

Durch *Diffusion* von Elektronen aus dem n-Gebiet in das p-Gebiet und von Löchern aus dem p-Gebiet in das n-Gebiet entsteht in der Umgebung des pn-Übergangs eine *Raumladungszone*, die aus ortsfesten Donator- und Akzeptor-Ionen gebildet wird und die weitgehend von beweglichen Ladungsträgern entblößt ist. Diese wird *Sperrschicht* genannt.

Abb. 53 zeigt ein räumlich übertrieben dargestelltes Modell. a) zeigt die Grenzschicht und die Sperrschicht, sowie die Bereiche mit den ortsfesten Ionen im Kristallgitter. b) zeigt die Donator- und Akzeptorkonzentration,

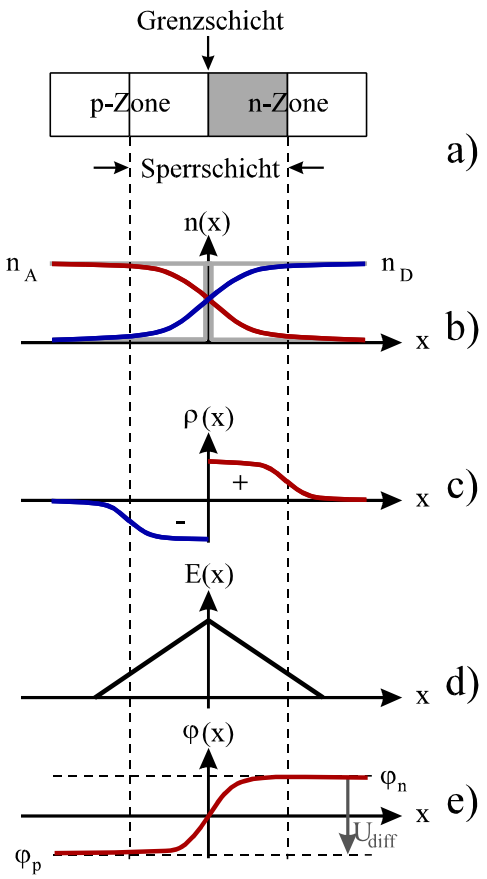

Abbildung 53:Der pn-Übergang:
a) Grenzschicht und Sperrschicht
b) Konzentration von Donatoren N_D und Akzeptoren N_A vor und nach der Diffusion
c) Raumladungsdichte
d) Feldstärkeverlauf über der Sperrschicht
e) Potentialverlauf und Diffusionsspannung U_{diff}

die infolge der *Rekombination* der diffundierenden Ladungsträger mit den ortsfesten Ionen nicht schlagartig an der Grenzschicht auf null zurückgeht, sondern sich kontinuierlich ändert. In c) ist die sich daraus ergebende Raumladungsdichte skizziert, die einen Feldstärkenverlauf wie in d) zur Folge hat, welcher wiederum den in e) dargestellten Potentialverlauf über der Sperrschicht bewirkt.

Die Potentialdifferenz zwischen beiden Enden der Grenzschicht nennt man *Diffusionsspannung* U_{diff}. Diese Spannung beträgt bei *Ge* 0,37V und bei *Si* 0,75V. Sie kann nicht direkt gemessen werden, weil sie durch die Kontaktspannung am Berührungspunkt kompensiert wird.

Aufgrund der geringeren Diffusionsspannung wurde Germanium in den Anfangszeiten der Halbleitertechnologie bevorzugt eingesetzt. Wegen der besser beherrschten Siliziumtechnologie wird Germanium heute jedoch nur noch in Spezialhalbleitern verwendet. Für Spezialdioden (Lumineszenz- und Laserdioden) wird auch *GaAs* verwendet.

3.3.1 Allgemeine Halbleiter-Dioden

Halbleiterdioden nutzen die physikalischen Effekte des pn-Übergangs. Dieser verhält sich bei Anlegen einer äußeren Spannung unsymmetrisch, wie Abb. 54 illustriert. In a) ist noch einmal die unbeschaltete Sperrschicht mit ihrem Potentialverlauf dargestellt.

Legt man nun eine äußere Spannung so an den pn-Übergang an, dass deren Pluspol die n-dotierte Seite und deren Minuspol die p-dotierte Seite kontaktieren, wie in b), so werden die beweglichen Ladungsträger auf beiden Seiten weiter abgesaugt, die Verarmungszone verbreitert sich, die Diode sperrt. Entsprechend wächst auch die Potentialdifferenz zwischen den Grenzen der Sperrschicht.

Polt man die äußere Spannung um, so erhält man den in c) dargestellten Fall. Die Ladungsträger aus der Stromquelle kompensieren die ortsfesten Ionenladungen teil-weise und bauen dadurch die Raumladungsdichte, die interne elektrische Feldstärke, das Potential und die Breite der Sperrschicht ab. Die Diode wird leitend.

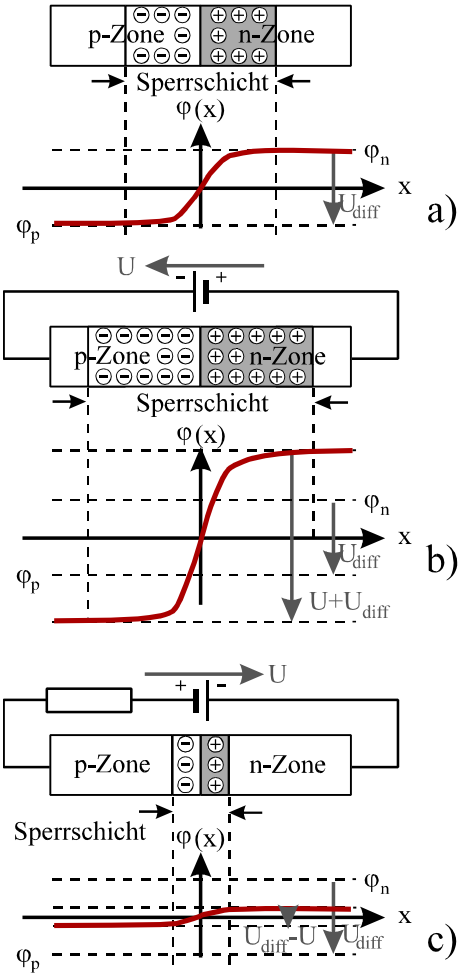

Abbildung 54: pn-Übergang
a) ohne äußere Spannung
b) äußere Spannung in Sperrichtung
c) äußere Spannung in Durchlaßrichtung

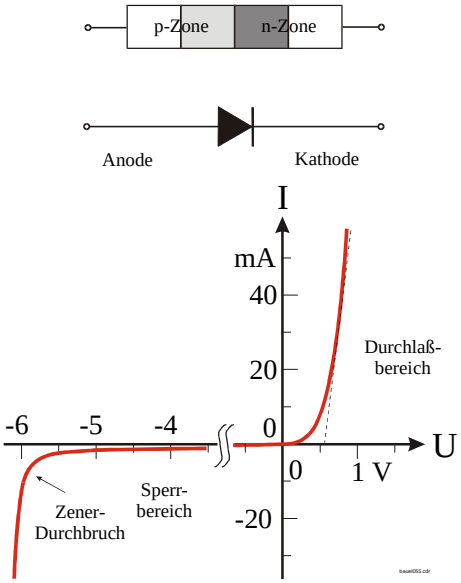

Abbildung 55: Schaltbild und Strom-Spannungs-Kennlinie einer Zener-Diode (BZX 97/C6V2)

Abb. 55 zeigt das Schaltbild und die Bezeichnungen der Anschlüsse, die in Anlehnung an Elektronenröhren *Anode* für den Anschluss an der p-Zone und *Kathode* für den Anschluss an der n-Zone genannt werden. Weiterhin ist dort die Strom-Spannungs-Kennlinie einer Diode dargestellt.
Im Durchlassbereich ist eine *Schwellenspannung* markiert, die etwa der Diffusionsspannung U_D des pn-Übergangs entspricht, d.h. bei allen Siliziumdioden gibt es einen Spannungsabfall von etwa 0,75V in Durchlassrichtung. Ist diese Schwelle überschritten, so wird die Diode leitend.

In Sperrrichtung sind die Ströme sehr viel kleiner; bei dem gezeigten Beispiel liegen sie bei Zimmertemperatur bei 1nA. Erhöht man die Spannung weiter, so erreicht man den so genannten *Zener-Bereich*, bei dem infolge des starken äußeren Feldes die festen Elektronen aus dem Gitterbereich herausgelöst werden. Sie verursachen einen sprunghaften Stromanstieg, der *Lawinendurchbruch*, *Zener-Effekt* oder *Avalanche-Effekt* genannt wird. Bei normalen Dioden wird in diesem Bereich die konstruktiv bedingte maximale *Wärme-Verlustleistung* überschritten und das Bauelement zerstört.

Beim Übergang vom sperrenden in den leitenden Zustand müssen die beweglichen Ladungsträger in die Raumladungszone hineingebracht und im umgekehrten Fall heraus befördert werden. Die Diode verhält sich daher ähnlich wie ein Kondensator, sie hat eine *Sperrkapazität* (in Sperrrichtung), die ihr Schaltverhalten beeinflusst.

3.3.2 Spezielle Halbleiterdioden

Der Zener-Effekt wird in speziellen ***Z-Dioden*** oder *Zener-Dioden* zur Spannungsstabilisierung verwendet. Die Diode darf nur mit einem maximalen *Zenerstrom* I_Z betrieben werden (max. Verlustleistung), der durch einen Vorwiderstand eingestellt wird. Abb. 55 zeigt die Kennlinie einer realen Z-Diode.

Kapazitäts-Dioden sind Dioden, die durch besondere Technologien einen abrupten Übergang von der n- zur p-Dotierung haben. Werden sie in Sperrichtung betrieben, so baut sich eine Raumladung auf, die spannungsabhängig ist, daher können sie als spannungsabhängige Kapazitäten verwendet werden, z.B. als Abstimm-Kondensatoren in UKW- und Fernseh-Schaltungen.

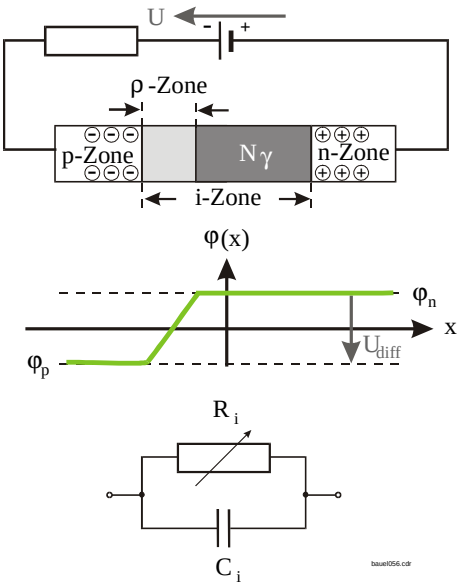

Abbildung 56:PIN-Diode mit Ersatz-Schaltbild

PIN-Dioden haben einen speziellen Aufbau, der in Abb. 56 gezeigt ist. Zwischen der p- und der n-Zone ist eine Zone äußerst schwach dotierten, hochohmigen Materials, die (nahezu) eigenleitende *i-Zone* (*intrinsic zone*).

Auch hier baut sich bei Betrieb in Sperrrichtung eine Raumladung in der ρ-Zone auf, die die Sperrkapazität C_i der PIN-Diode bestimmt. Sie ist daher ebenfalls als spannungsabhängiger Kondensator einsetzbar. Jedoch ist die Kapazität wegen der ρ-Zone, die eine messbare Dicke hat und die wie ein Dielektrikum wirkt, aufgrund der Gl.(15) geringer als bei normalen Dioden. Wegen dieser geringen Eigenkapazitäten werden sie in logischen Schaltkreisen als schnelle *Schaltdioden* eingesetzt.

Außerdem ist der ohmsche Wechselstrom-Widerstand R_i von der Länge der N_γ-Zone abhängig, die durch eine vergrößerte Raumladungszone entsprechend verkleinert wird. R_i ist nur bei höheren Frequenzen wirksam, weil eine Randbedingung darin besteht, dass die Lebensdauer der Ladungsträger $\tau \gg 1/f$ des Wechselstromes ist.

Schottky-Dioden haben einen Metall-n-Halbleiter-Übergang, wie in Abb. 57 dargestellt. An der Grenzschicht diffundieren Elektronen aus der n-Zone in das Metall, wodurch sich eine positive Raumladungszone im Halbleiter und durch Influenz eine negative Flächenladung auf der Grenzschicht bildet, die wieder eine Diffusionsspannung U_{diff} zur Folge haben, die jedoch nur halb so groß ist, wie beim pn-Übergang.

Wie bei normalen Dioden kann durch Anlegen einer äußeren Spannung in Sperrrichtung die Raumladungszone vergrößert und damit der StromFluss unterbunden oder in Durchlassrichtung die Raumladungszone abgebaut und damit die Leitfähigkeit der Grenzschicht stark erhöht werden. Die Zahl der an der Grenzschicht gespeicherten Ladungsträger ist jedoch sehr viel kleiner, daher sind beim Umschalten vom leitenden in den gesperrten Zustand nur sehr wenig Ladungsträger zu transportieren. D.h. die Umladekapazität ist sehr gering und erlaubt Schaltzeiten im Bereich von 100 ps.

Photo-Dioden haben einen pn-Übergang, der äußerer Lichteinstrahlung zugänglich ist. Sie werden in Sperrrichtung betrieben. Auf die Sperrschicht auffallende Lichtquanten erzeugen Ladungsträgerpaare (Loch-Elektron), die den *Photostrom* im äußeren Stromkreis bewirken.

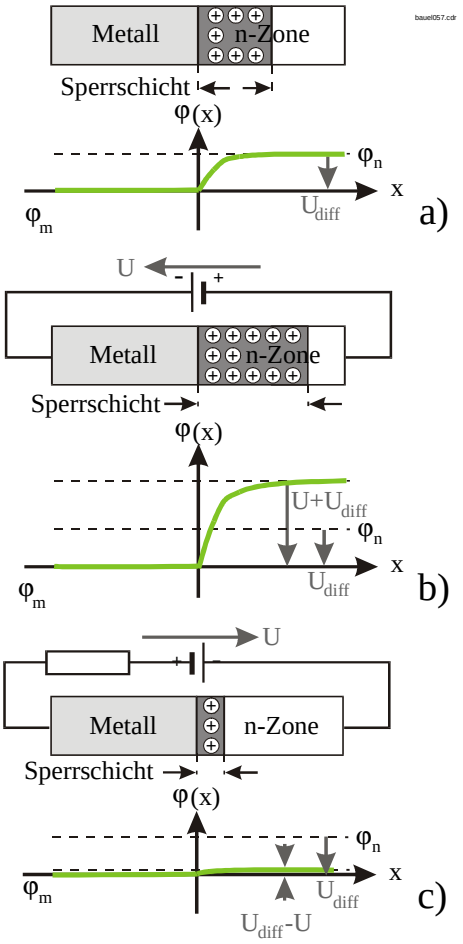

Abbildung 57: Schottky-Diode:
a) ohne äußere Spannung
b) in Sperrichtung
c) in Durchlaßrichtung

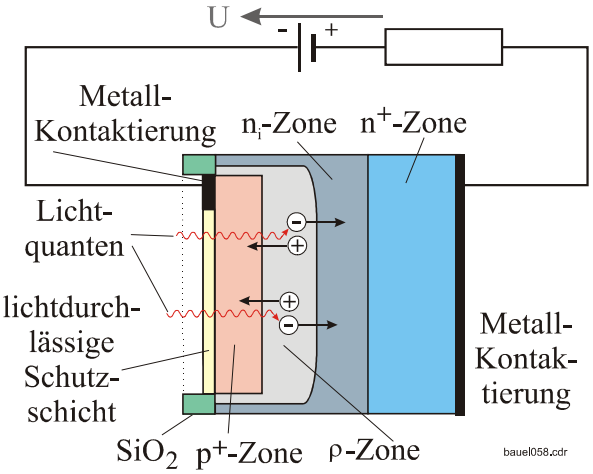

Abbildung 58: Aufbau einer Photo-Diode

Den Aufbau einer Photo-Diode zeigt nebenstehende Abbildung. Auf eine stark dotierte p^+-Zone folgt eine schwach dotierte n-Zone, die man auch als i-Zone interpretieren kann, gefolgt von einer stark dotierten n^+-Zone. Die stark dotierten Bereiche haben eine hohe Eigenleitfähigkeit. Die n-Zone ist der lichtempfindliche Bereich mit der Bildung der Ladungsträgerpaare bei der Einstrahlung von Lichtquanten. Man verwendet eine n-Zone, da die Beweglichkeit der Elektronen größer ist als die der Löcher und so größere Photoströme möglich sind. Die Driftgeschwindigkeit der Elektronen in der Diode beträgt 30-100 km/s, liegt also drei bis vier Zehnerpotenzen unterhalb der Lichtgeschwindigkeit.

Halbleitermaterialien haben stark ausgeprägte Lichtempfindlichkeitskurven mit Maxima bei den folgenden Werten, d.h. vor allem im rötlichen und infraroten Bereich. Das beruht darauf, dass in diesem Bereich die Energie der Lichtquanten gerade die Ladungsträger vom Valenzband in das Leitungsband heben kann, wir haben es mit einer Art Resonanzeffekt zu tun.

Halbleiter	Si	Ge	CdS	PbS
λ_{max} / nm	850	1500	2000	2000

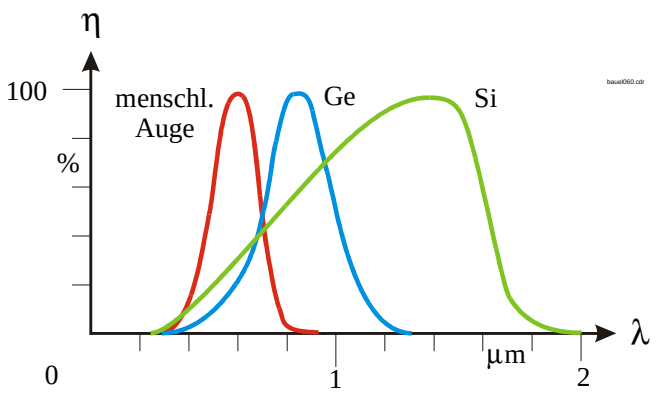

Abbildung 59: Relative Empfindlichkeit η von Ge und Si

Die nebenstehende Abbildung zeigt die relative Empfindlichkeit des menschlichen Auges im Vergleich zu *Si* und *Ge*. Die *Dunkelstrom-Kennlinie* einer Photodiode entspricht der in Abb. 55. Bei Beleuchtung verschiebt sie sich in Richtung der negativen I-Achse und schneidet auf ihr einen negativen Kurzschlussstrom ab, bzw. auf derU-Achse eine positive Leerlaufspannung (von ca. 0,5V), wie Abb. 60 zeigt. Die Photo-Diode ist also als *Photoelement* einsetzbar. Sie wandelt Lichtenergie in elektrische Energie um. Für eine maximale Energieausbeute muss der Innenwiderstand der Diode gleich dem Lastwiderstand sein, d.h. es wird Leistungsanpassung gefordert.

Lumineszenz-Dioden (LEDs) (Light Emitting Diodes) sind Halbleiterdioden aus hochdotiertem *Ga-As-P* (III-V)-Verbindungen. Dieses Material hat die Eigenschaft, dass bei Überschwemmung des pn-Übergangs mit Ladungsträgern im Betrieb in Durchlassrichtung diese (Löcher in der p-Schicht, Elektronen in der n-Schicht) teilweise *strahlend rekombinieren*, d.h. unter Aussendung eines Lichtquants kompensiert sich ein Elektron im Leitungsband mit einem Loch im Valenzband. Damit das Licht nach außen sichtbar wird, muss die p-Schicht dünn und lichtdurchlässig sein. Lichtquanten, die in das Substrat abstrahlen, können dort wieder Ladungsträgerpaare freisetzen, man spricht dann von *Selbstabsorption*.

Der ausgesendete Lichtstrom ist spektral scharf begrenzt, was sich aus dem Energieabstand *W* zwischen Leitungs- und Valenzband erklärt.

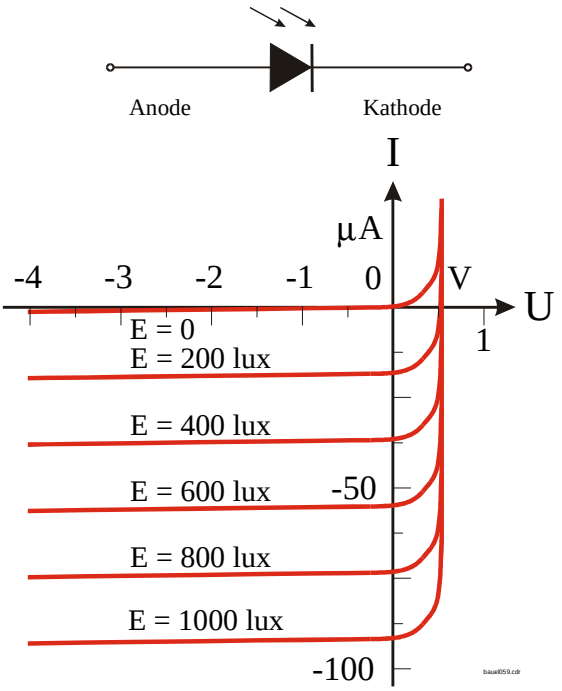

Abbildung 60: Kennlinienfeld einer Photo-Diode

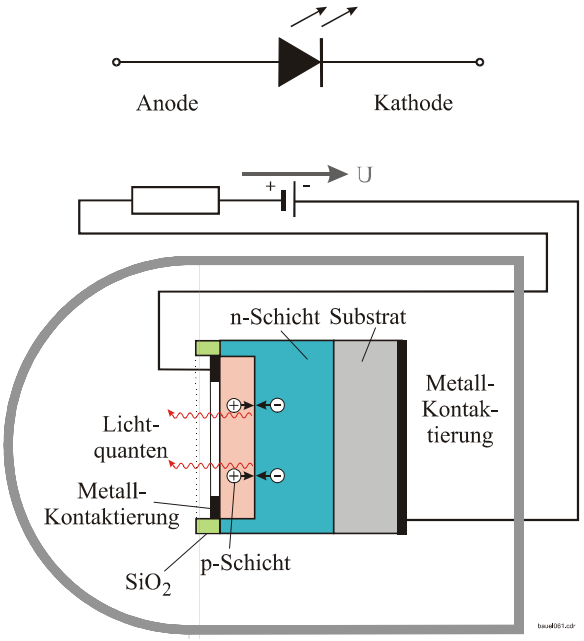

Abbildung 61: Lumineszenz-Diode (LED)

Das *Plancksche Strahlungsgesetz* ergibt die unten stehende Berechnung für die Wellenlänge λ; *f* ist die Frequenz, *c* die *Lichtgeschwindigkeit* und *h* das *Plancksche Wirkungsquantum*.

$$\begin{aligned} W &= h \cdot f, \\ &= h \cdot \frac{c}{\lambda}, \quad \Rightarrow \\ \lambda &= h \cdot \frac{c}{W}. \end{aligned} \qquad \textbf{(97)}$$

Die folgende Tabelle zeigt einige Eigenschaften von LEDs.

Farbe	**λ_{max}/nm**	**Basis-material**	**Spannung/V bei 10 mA**	**Licht-stärke/m cd bei 10 mA**	**Licht-leistung/µW bei 10 mA**
infrarot	900	Ga-As	1,3 ... 1,5		50 ... 200
rot	655	Ga-As-P	1,6 ... 1,8	1 ... 5	2 ... 10
hellrot	635	Ga-As-P	2,0 ... 2,2	5 ... 25	12 ... 60
gelb	583	Ga-As-P	2,0 ... 2,2	5 ... 25	13 ... 65
grün	565	Ga-P	2,2 ... 2,4	5 ... 25	14 ... 70
blau	490	Ga-N	3 ... 5	1 ... 5	3 ... 12

LEDs werden in großen Mengen als Anzeige- und Kontrolllampen verwendet, sowie als *Lichtsender* in *Optokopplern, elektrooptischen Wandlern* und *für Lichtwellenleiter*.

Laser-Dioden beruhen auf dem LED-Prinzip unter zusätzlicher Ausnutzung des Lasereffektes (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation). Dabei wird der Halbleiterquader an zwei parallelen Flächen mit Spiegeln so ausgestattet, dass sich eine stehende Welle mit der Eigenfrequenz des Halbleiters nach dem Planckschen Strahlungsgesetz ergibt. Nach obiger Tabelle muss dabei auf einige 10 nm genau geschliffen werden.

Dargestellt ist in Abb. 62 eine sogenannte Doppel-Hetero-Struktur, wie sie auch für LEDs verwendet wird. Eine *aktive Zone*, in der die Lichtquanten durch Rekombination erzeugt werden, ist von zwei *Hetero-Zonen* eingeschlossen, welche als Potentialbarriere für die injizierten Ladungsträger dienen, d.h. diese sind in der aktiven Schicht gefangen und müssen dort unter Aussendung von Lichtquanten rekombinieren, weil sie den höheren Bandabstand zu den benachbarten Schichten nicht überwinden können.

Bis zu einem Schwellenstrom arbeitet die Laserdiode als LED, darüber setzt der Lasereffekt ein, d.h. der optische Resonator wird durch die spontan emit-

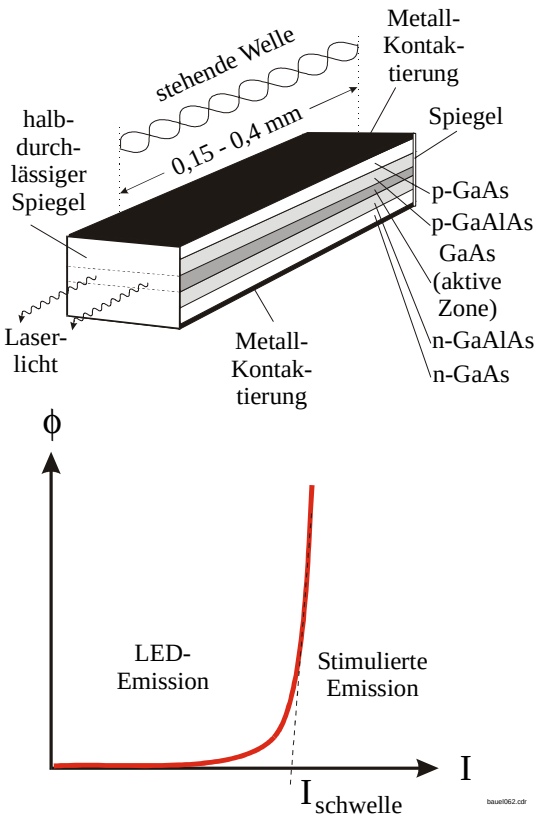

Abbildung 62: Aufbau einer Laser-Diode

tierten Lichtquanten angeregt, so dass sich eine stehende Welle ausbildet, in der die optische Energie pendelt. Ab einer bestimmten Energiedichte, die durch den *Injektionsstrom I* bestimmt ist, wird die strahlende Rekombination stark angeregt und es erfolgt ein steiler Anstieg des emittierten *Lichtstroms* ϕ. Dabei ergeben sich Wirkungsgrade bis zu 70%. Das durch den halbdurchlässigen Spiegel emittierte Licht ist *kohärent* und *monochromatisch*.

Technisch interessant ist, dass der Lichtstrom über den Injektionsstrom direkt mit Signalfrequenzen bis zu 10 GHz amplitudenmoduliert werden kann. Die Laserdiode ist damit ein sehr effektiver Sender für die optische Signalübertragung.

3.4 Sensoren und Energiewandler

Eine Reihe von Sensoren und Energiewandlern haben wir bereits kennen gelernt, wie NTC- und PTC-Widerstände als Temperatur-Sensoren oder Photowiderstände und -Dioden als Strahlungssensoren. Wir wollen hier noch einige weitere technisch wichtige kurz beschreiben.

Man unterscheidet zwischen *reziproken Energiewandlern*, die eine Energieform (nahezu) verlustfrei in eine andere umwandeln, hierzu gehören die meisten Mikrofone, Lautsprecher und Druckwandler. Andere, wie z.B. die bereits erwähnten Halbleiterwiderstände, werden durch eine physikalische Größe in ihren Werten verändert, d.h. die zu messende Größe *steuert* einen elektrischen Wert, z.B. einen Strom. Diese kann man *gesteuerte Sensoren* nennen.

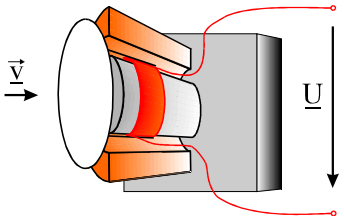

Abbildung 63: Elektrodynamischer Wandler

3.4.1 Reziproke Wandler

Die wichtigsten reziproken Wandler sind das *dynamische Mikrofon* (sowie der dynamische Lautsprecher) und die *Piezo-Druckwandler*.

Das ***dynamische Mikrofon*** gehorcht dem Induktionsgesetz nach Gl.(41). Sein Aufbau ist in der nebenstehenden Abb. wiedergegeben. Eine Spule mit N Windungen ist in einem möglichst homogenen Magnetfeld mit der Flussdichte B aufgehängt. Die an der Spule befestigte Membran schwingt mit der *Schallschnelle* $\underline{v}$ der Luftteilchen im Rhythmus der Schallgeräusche, die gemessen werden sollen, und übt dabei eine Kraft $\underline{F}$ auf die Membran aus. An der Spule vom Radius a wird dann eine Spannung U induziert, die durch einen äußeren Widerstand R einen Strom I fließen lässt.

Der ***dynamische Lautsprecher*** gehorcht dem Kraftgesetz nach Gl.(37). Die Kraft wird von einem Strom durch die Spule im Magnetfeld erzeugt.

$$\begin{bmatrix} \underline{U} \\ \underline{F} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} j\omega L & 2\pi aNB \\ -2\pi aNB & j\omega m + r + \frac{s}{j\omega} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{I} \\ \underline{v} \end{bmatrix} \qquad \textbf{(98)}$$

Beide Systeme lassen sich als *elektromechanischer Vierpol* beschreiben mittels der folgenden Vierpolgleichungen [Heckl], dabei sind: L die Induktivität der Spule und

m, *r*, und *s* bilden die *mechanische Impedanz*: *m* = Masse der Spule und Membran, *r* = mechanischer Reibungswiderstand im Luftspalt und an der Membranaufhängung, *s* = Steife der Membranaufhängung. Der Ausdruck $2\pi aNB$ wird auch *Wandlerkonstante* des elektrodynamischen Wandlers genannt, da er die Verknüpfung zwischen der elektrischen Größe *U* und der mechanischen Größe *v*, bzw. zwischen der mechanischen Größe *F* und der elektrischen Größe *I* herstellt. Der Vollständigkeit halber sei noch einmal darauf verwiesen, dass diese Größen Zeiger darstellen, die mechanischen Größen *F* und *v* darüber hinaus noch Vektoren.

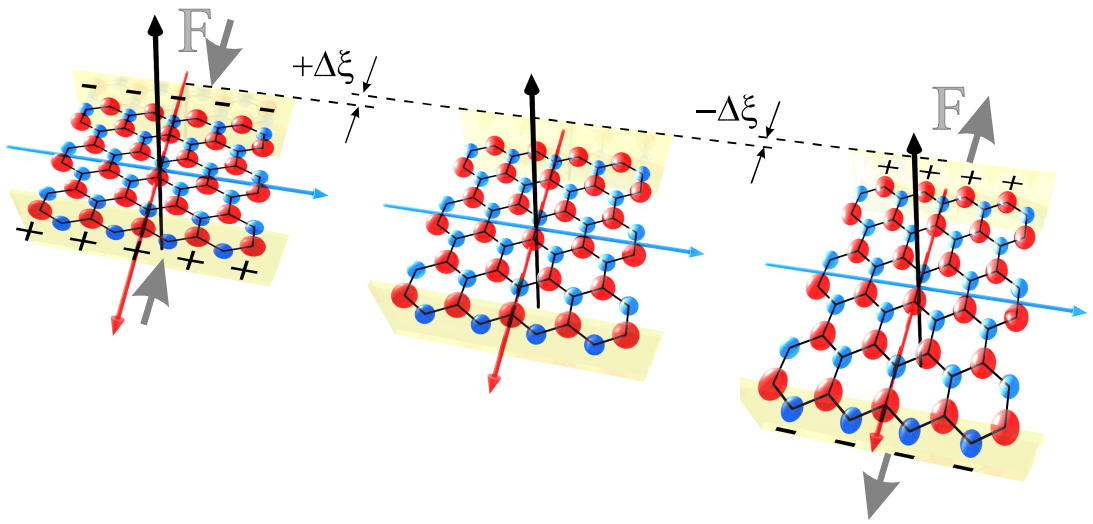

Abbildung 64: Prinzip des piezoelektrischen Wandlers

Der ***piezoelektrische Wandler*** wird als billiges Mikrofon in Massenprodukten, als Hochton-Lautsprecher in Boxen und als Wasser- und Körperschallmikrofon zur Schwingungsmessung verwendet. Hier wird der *piezoelektrische Effekt* ausgenutzt, der in Abb. 64 veranschaulicht ist (longitudinaler Piezoeffekt). Kristalle mit zwei unterschiedlich geladenen Atomarten, wie *Quarz*, *Seignettesalz* oder *Barium-Titanat* erzeugen bei äußerer Krafteinwirkung in bestimmten Richtungen auf passend aufgebrachten Elektroden an der Oberfläche Ladungsverschiebungen, die zu Messbaren elektrischen Spannungen führen, oder umgekehrt erzeugen elektrische Spannungen an den Elektroden Kontraktionen oder Dilatationen des Kristalls.

$$\begin{bmatrix} \underline{I} \\ \underline{F} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} j\omega C & K \\ -K & j\omega m + r + \dfrac{s}{j\omega} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{U} \\ \underline{v} \end{bmatrix} \qquad \textbf{(99)}$$

Auch diese Wandler lassen sich als *elektromechanischer Vierpol* beschreiben mit den folgenden Vierpolgleichungen, wobei *K* der piezoelektrische Umwandlungsfaktor und *C* die Kapazität des Kristalls ist, und die übrigen Größen der Gl. (97) entsprechen. Zu beachten ist, dass die obige Gleichung zu einer sog. *Ersatzspannungs-Darstellung* führt, bei der Spannung und Kraft links vom Gleichheitszeichen stehen und die nebenstehende Gleichung eine *Ersatzstrom-Darstellung* ist, da Strom und Kraft links stehen.

3.4.2 Weitere gesteuerte Sensoren

Dehnungs-Messstreifen [Tietze] sind dünne Konstantan- oder Platin-Iridium-Schichten, die auf dehnbare Folien aufgebracht werden.

Heute werden häufig auf Siliziumschichten aufgebrachte Widerstände verwendet, die eine höhere Empfindlichkeit haben, aber auch einen merkbaren Temperaturkoeffizienten, der in der Praxis kompensiert werden muss. Abb. 65 zeigt eine Siliziummembran als *Drucksensor*. Dabei ist oben die Druck- und Zugverteilung auf der Membran skizziert und unten die Anordnung der Dehnungsstreifen. Das Ganze wird in einer Brückenschaltung nach Abb. 66 betrieben. Nach Gl.(18) erhöht sich der Widerstand, wenn infolge von Dehnung sein Querschnitt ab- und seine Länge zunimmt. Bei Stauchung geschieht das Gegenteil.

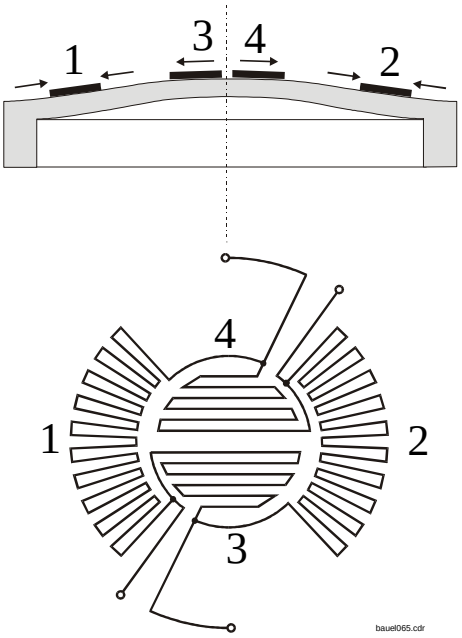

Abbildung 65: Anordnung von Dehnungs-Messstreifen auf einer Membran zur Druckmessung

Dadurch erreicht man zweierlei. Einerseits verdoppelt sich die Empfindlichkeit gegenüber den Dehnungen auf der Membran, andererseits werden gleichsinnige Effekte, wie Abweichungen vom Widerstands-Sollwert durch Herstellungsschwankungen und Temperatur-Effekte kompensiert. Trotzdem liegt die relative Widerstandsänderung nur bei $\Delta R/R \approx 0{,}5 - 5\%$.

$$\frac{U_D}{U_{ref}} = \frac{R+\Delta R}{2R} - \frac{R-\Delta R}{2R} = \frac{\Delta R}{R}. \qquad \textbf{(100)}$$

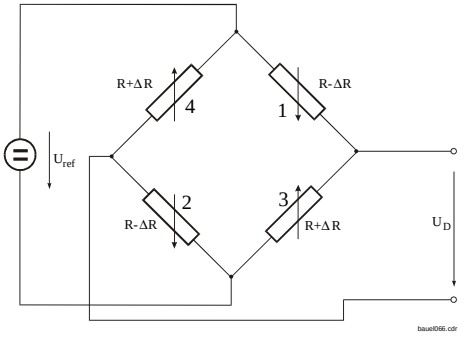

Abbildung 66: Messschaltung für Dehnungs-Messstreifen

Die Ausgangsspannung setzt sich aus zwei Anteilen zusammen, einem druckabhängigen und einem Offset, der kompensiert werden muss. Beide vergrößern sich bei Erhöhung der Referenzspannung. Eine technische Grenze hierfür ist durch die Erwärmung der Dehnungs-Messstreifen infolge des hindurchfließenden Stromes gegeben.

Feuchtemesser [Tietze] dienen der Messung der relativen Feuchte. Als Sensor verwendet man eine Kapazität mit feuchteempfindlichem Dielektrikum, dessen Dielektrizitätskonstante mit zunehmender Wasseraufnahme ebenfalls zunimmt. Abb. 67 zeigt den schematischen Aufbau. Damit der Wasserdampf vom Dielektrikum auf-genommen werden kann, müssen die Kondensator-Elektroden dampfdurchlässig sein. Da hier Materie-Transport in das Dielektrikum stattfindet, ist der Sensor träge, d.h. er hat Zeitkonstanten im Sekunden- oder Minutenbereich.

Neben der Aufbauskizze ist die Kennlinie eines industriell gefertigten Feuchtesensors (Valvo 2322691 90001) gezeigt.

Die Kapazitätsänderung kann als Scheinwiderstandsänderung gemessen werden oder als Verstimmung eines Schwingkreises.

Für die Kennlinie lässt sich die folgende mathematische Näherung verwenden:

$$\frac{C}{C_0} = 1 + 0{,}4 \cdot \left(\frac{F_{rel}}{100\%} \right)^{1{,}4} . \qquad \textbf{(101)}$$

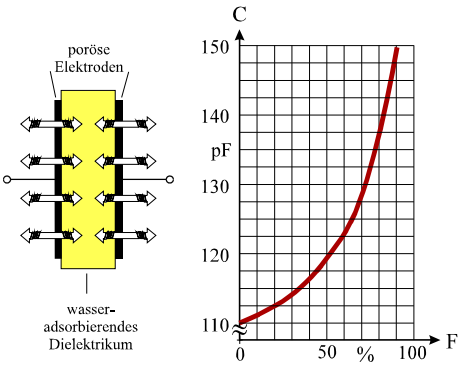

Abbildung 67: Aufbau und Kennlinie eines kapazitiven Feuchtemessers