
Halbleitersensorik

Halbleiter-Grundlagen und Optoelektronik in der Geomatik



Geodätische Messtechnik - Prof. Dr. H. Ingensand

ETH Zürich

Grundlagen der Halbleiter



Geodätische Messtechnik - Prof. Dr. H. Ingensand

ETH Zürich

Isolatoren, Halbleiter, Leiter

- Die Eignung von verschiedenen Stoffen zur Stromleitung wird durch die Zahl und Beweglichkeit der freien Ladungsträger in ihnen bestimmt.
- Die elektrische Leitfähigkeit fester Körper hat bei Raumtemperatur die Variationsbreite von 24 Zehnerpotenzen. Das führt zur Einteilung in drei elektrische Stoffklassen.

<u>Leiter(Metalle)</u>	<u>Halbleiter</u>	<u>Nichtleiter(Isolatoren)</u>
Silber Kupfer Aluminium	Germanium Silizium Galliumarsenid Selen	Glas Porzellan Kunststoff

- In **Metallen** ist die Zahl der freien Ladungsträger sehr gross (je Atom ein freies Elektron). Ihre Beweglichkeit ist eingeschränkt, die elektrische Leitfähigkeit hoch. Die Leitfähigkeit guter Leiter liegt bei 10^6 Siemens/cm
- In **Isolatoren** ist die Zahl der freien Ladungsträger gleich Null. Die elektrische Leitfähigkeit ist deshalb auch verschwindend gering. Die Leitfähigkeit bei guten Isolatoren liegt bei 10^{-18} Siemens/cm.
- Die elektrische **Leitfähigkeit der Halbleiter liegt** zwischen der von Metallen und Isolatoren.



Germaniumatom

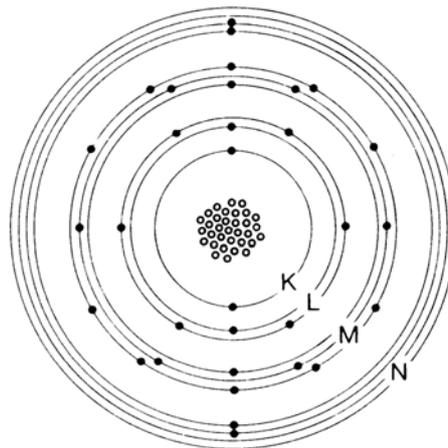
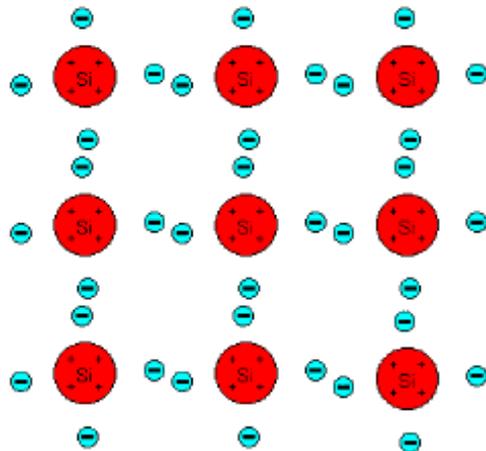


Abb.3 Modell des Germanium-Atoms
(Schalenbesetzung: K 2; L 2 + 6;
M 2 + 6 + 10; N 2 + 2)



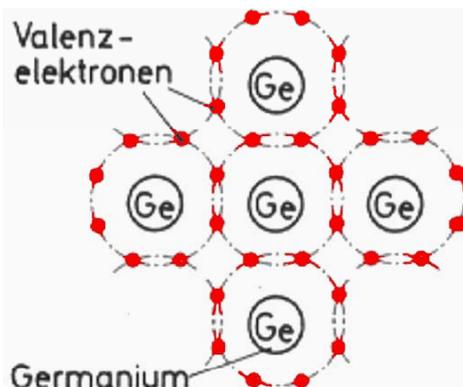
Halbleitergrundlagen: Was sind Halbleiter?



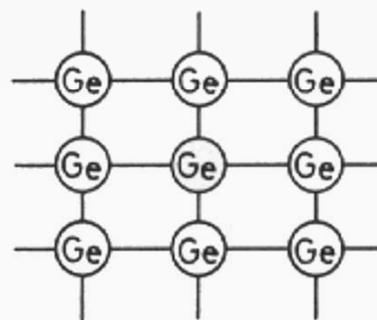
- Halbleiter sind Stoffe mit vierwertigen Atomen,
- In einem Halbleiter wie z.B. Silizium sind zwar alle vier äusseren Elektronen im Kristallgitter gebunden, sie lassen sich aber durch geringe Energiezufuhr befreien.
- Beim Erwärmen steigt daher die Leitfähigkeit des Halbleiters an (Eigenleitfähigkeit).
- Zu den Halbleitern gehören neben Silizium auch

Germanium, Selen Kohlenstoff und Verbindungen aus drei- und fünfwertigen Elementen wie z.B. Gallium-Arsenid.

Valenzelektronen (chemische Bindung d. Valenzelektronen)

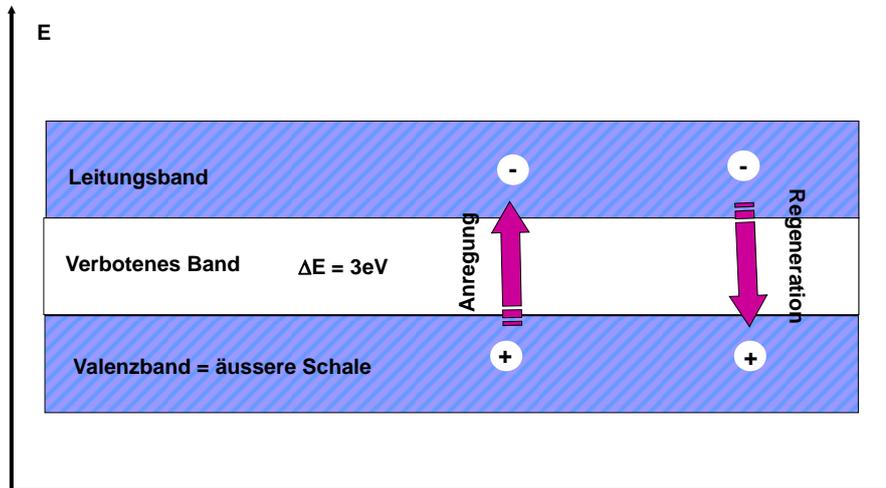


Die Atome sind in einer Ebene dargestellt.

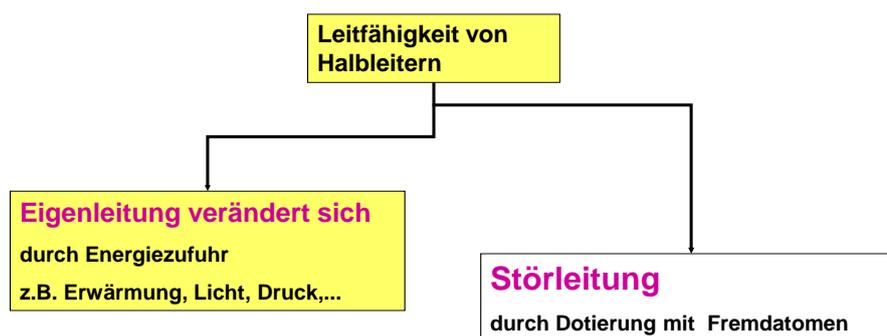


vereinfachte Darstellung

Halbleiter: Energieschema



Halbleiter: Leitfähigkeit *Eigenleitung und Störleitung*



z.B.: Beim Erwärmen steigt die Leitfähigkeit des Halbleiters an

Eigenleitung von undotierten Halbleitermaterialien

Durch Wärmezufuhr oder Lichteinstrahlung können auch undotierte Halbleiter freie Ladungsträger erzeugen. Mit steigender Temperatur nimmt die Zahl der Elektronen-Loch-Paare im Quadrat zu. Dadurch ergeben sich Grenzen für die maximale Betriebstemperatur in elektronischen Geräten:

- Germanium (90...100 °C)
- Silizium (150...200 °C)
- Galliumarsenid (300..350 °C)



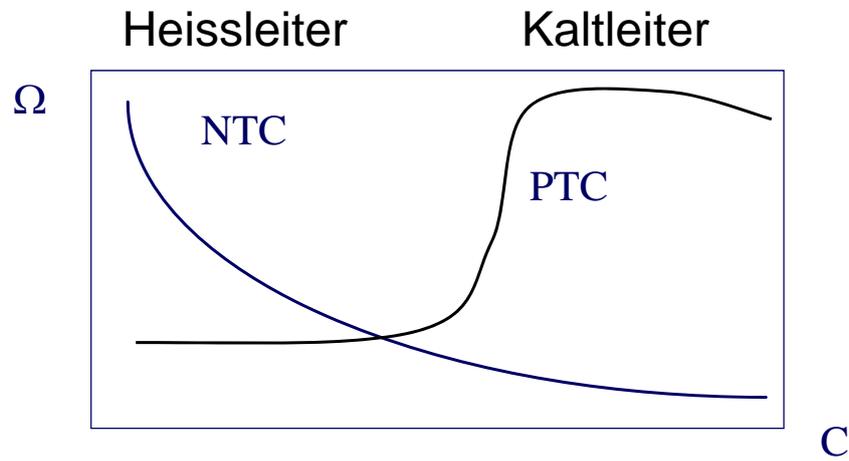
Halbleitersensoren , die auch in der Geomatik eingesetzt werden

Die Empfindlichkeit der Halbleiter auf Druck, Temperatur und Licht macht sie zu geeigneten Sensoren. → Halbleitersensoren

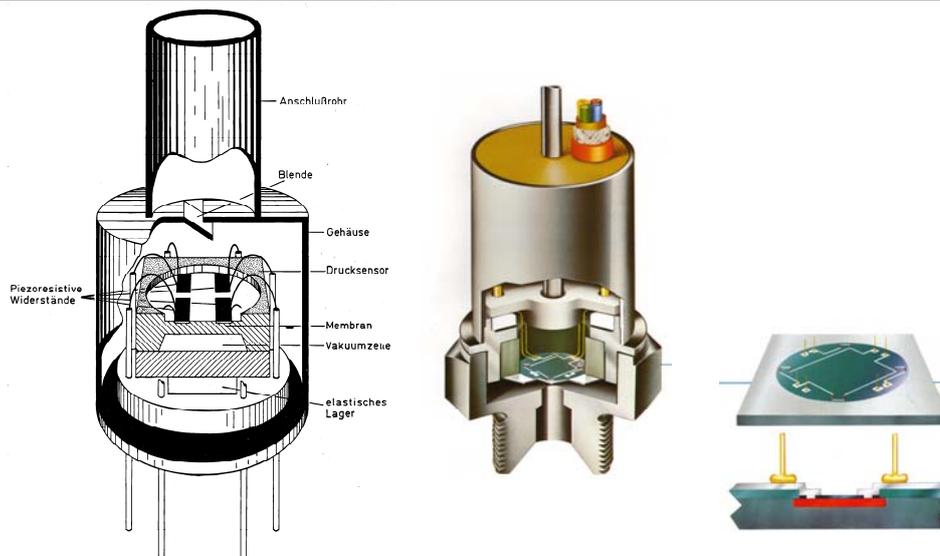
<i>Einflüsse</i>	<i>Sensoren</i>
Mechanische Kraft (Deformation) beeinflusst die Beweglichkeit der Ladungsträger)	<i>Piezoresistive Sensoren</i>
Temperatur (Zahl und Beweglichkeit der Ladungsträger)	<i>Halbleiter Temperatursensoren</i>
Belichtung (Zahl der Ladungsträger)	<i>Optosensoren</i>
Magnetfeld (Beeinflusst Weg der Ladungsträger)	<i>Magneto-resistive Sensoren</i>



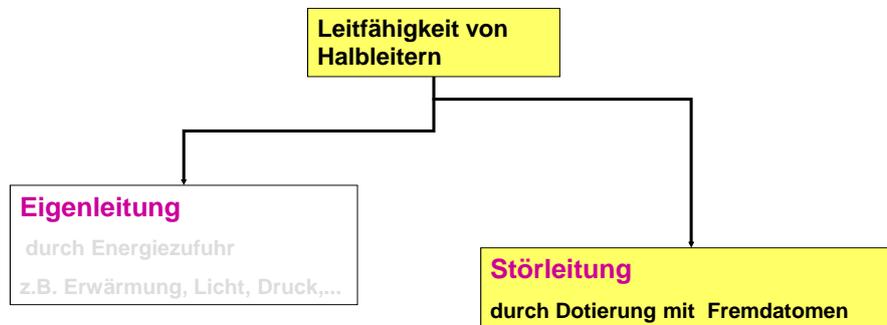
Widerstandsveränderung zur Temperaturmessung



Piezoresistiver Drucksensor



Halbleiter: Leitfähigkeit



Dotierung

Unter Dotierung versteht man das gezielte Verändern der Leitfähigkeit von Halbleitern, in dem man in den reinen Halbleiterwerkstoff (z.B. Silizium und Germanium) Fremdatome einbaut.

N-Dotierung (negative Ladungsträger)

Wenn in reines Silizium Phosphor(P) eingebaut wird, stehen pro Phosphoratom ein freies Elektron zur Verfügung. Da es sich bei den freien Elektronen um negativ geladenen Ladungsträger handelt, spricht man von einem n-Leiter.

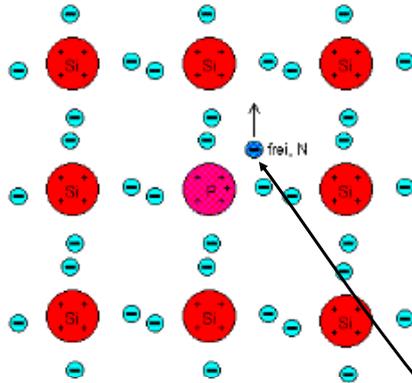
Schliesst man eine Stromquelle an den n-Leiter an, so entzieht der Plus-Pol dem n-Leiter die Elektronen, und es entsteht ein **Elektronenstrom** von Minus nach Plus.

P-Dotierung (positive Ladungsträger)

Wenn in reines Silizium Aluminium(Al) eingebaut wird, fehlen pro Aluminiumatom ein Elektron. Es entstehen Defektelektronen oder auch Löcher genannt. Da es sich bei den Löchern um positive Ladungsträger handelt, spricht man von einem p-Leiter.

Schliesst man eine Stromquelle an den p-Leiter an, so fließen Elektronen vom Minus-Pol in den p-Leiter und rekombinieren mit den Löchern. Der Plus-Pol entzieht nun dem p-Leiter die Elektronen und es fließt ein **Löcherstrom** von Plus nach Minus.

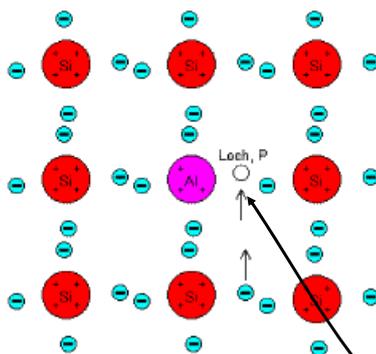
Halbleitergrundlagen:N-Leitfähigkeit



Mit Phosphor dotiertes N-Silizium

- Man verwendet für Halbleiterbauelemente kein reines Silizium, sondern solches, das mit Fremd-
atomen gezielt verunreinigt (dotiert) wurde, um eine bestimmte Leitfähigkeit herzustellen.
- Verwendet man fünfwertige Stoffe (z.B. Phosphor), dann erhält man freie Elektronen und damit eine negative (N)- Leitfähigkeit = Elektronenleitung

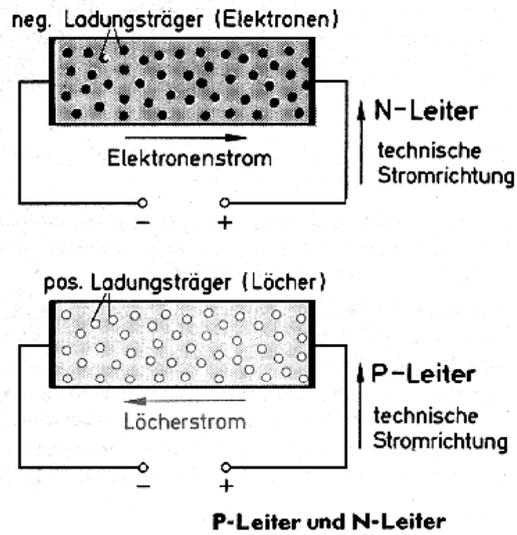
Halbleitergrundlagen:P-Leitung



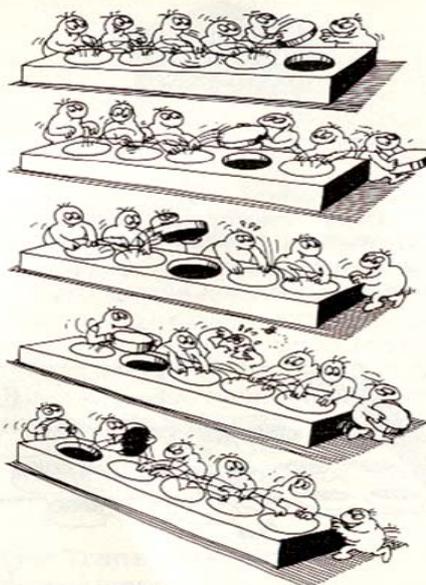
Mit Aluminium dotiertes P-Silizium

- Mit dreiwertigen Stoffen (z.B. Aluminium) erreicht man Elektronen-Fehlstellen, die zu einer P-Leitfähigkeit führen. Dabei wandern Elektronen-Löcher wie positive Ladungsträger durch den Kristall, indem benachbarte Elektronen ein Loch füllen und damit wieder ein neues Loch zurücklassen.
- P-Leitung = Löcherleitung

Halbleiter: Elektronen- und Löcherleitung



Löcherleitung



Aus Kosmos

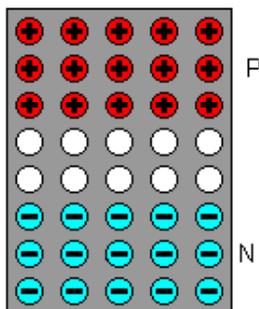
Die Diode als Kombination von N und P Leitern



Geodätische Messtechnik - Prof. Dr. H. Ingensand

ETH Zürich

Halbleitergrundlagen: Dioden



Schichtenaufbau einer Diode



Dioden lassen den Strom nur in einer Richtung durch.

Sie wird aus einer N-dotierten und P-dotierten Siliziumschicht zusammengesetzt.

Zwischen beiden Schichten bildet sich eine nichtleitende Sperschicht geringer Dicke.

Freie Elektronen füllen in diesem Bereich Lücken, so dass wie im reinen Silizium praktisch keine freien Ladungsträger mehr vorhanden sind.

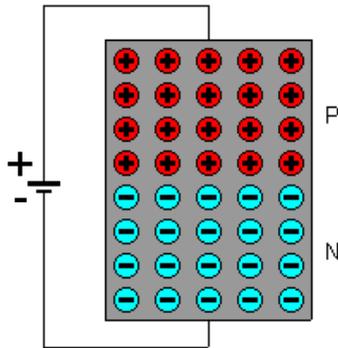
Die Diode ist damit zunächst ein Nichtleiter.



Geodätische Messtechnik - Prof. Dr. H. Ingensand

ETH Zürich

Halbleitergrundlagen: Diode in Durchlassrichtung



Diode in Durchlaßrichtung

Legt man an eine Diode eine kleine Spannung, dann verkleinert sich die Sperrschicht, wenn der N-Anschluss mit dem Minuspol und der P-Anschluss mit dem Pluspol verbunden werden. Die Ladungen an den Anschlüssen stossen dann ihre jeweiligen Ladungsträger im Kristall ab, so dass sie in Richtung der Sperrschicht gedrückt werden.

Ab einer Spannung von ca. 0,5 V beginnen sich die N- und die P-Schicht zu berühren → die Sperrschicht hebt sich auf.

Damit fließt nun auch ein Strom. Bei ca. 0,7 V ist eine gute Leitfähigkeit erreicht. Die Diode wird nun in Durchlassrichtung betrieben.

Diode=Ventil



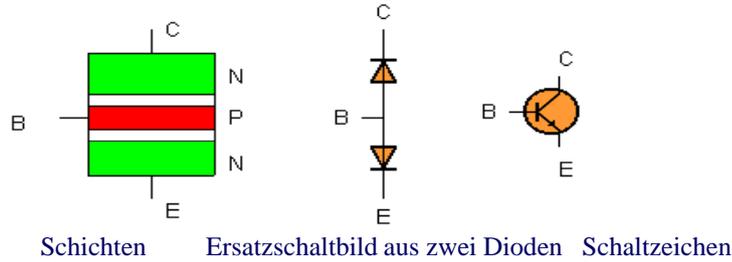
Dioden in Sperrrichtung Lawineneffekt (Avalanche) Zener-effekt

Der **Avalancheeffekt** (Lawineneffekt) tritt hervor, wenn die freien Elektronen durch ein elektrisches Feld (Vorspannung) stark beschleunigt werden und dann andere Elektronen aus ihren Bindungen schlagen. Die Sperrschicht wird lawinenartig von freien Elektronen überschwemmt, sie wird sehr niederohmig.

Eine Feldemission (**Zener-effekt**) passiert, wenn die Sperrspannung und damit die Feldstärke des elektrischen Feldes zu gross wird. Elektronen lösen sich dann aus den Kristallbindungen und dienen als freie Ladungsträger. Die in Sperrrichtung betriebene Halbleiterdiode wird also ab einer gewissen Spannung niederohmig.

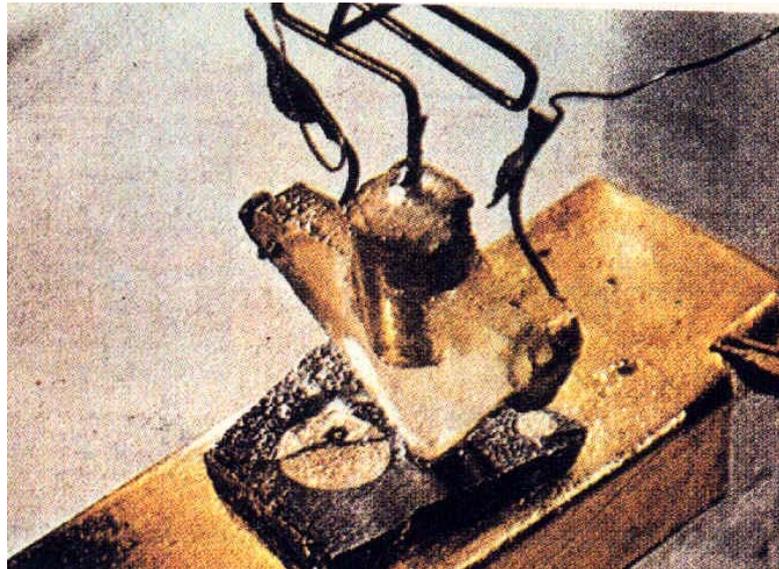


Halbleiter: *Transfer Resistor* Transistor

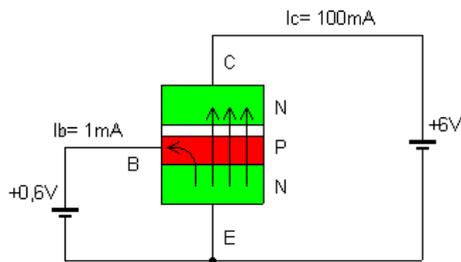


- Der Transistor besteht aus drei Schichten aus N- und P-dotiertem Halbleitermaterial mit zwei Sperrschichten.
- Die Schichtenfolge kann NPN oder PNP sein.
- Die einzelnen Schichten des Transistors bezeichnet man als Emitter (E), Basis (B) und Kollektor (C).
- Der Transistor wird überwiegend als Stromverstärker eingesetzt.

Der erste Transistor der Welt (ca. 1945)



Halbleiter: Transistor



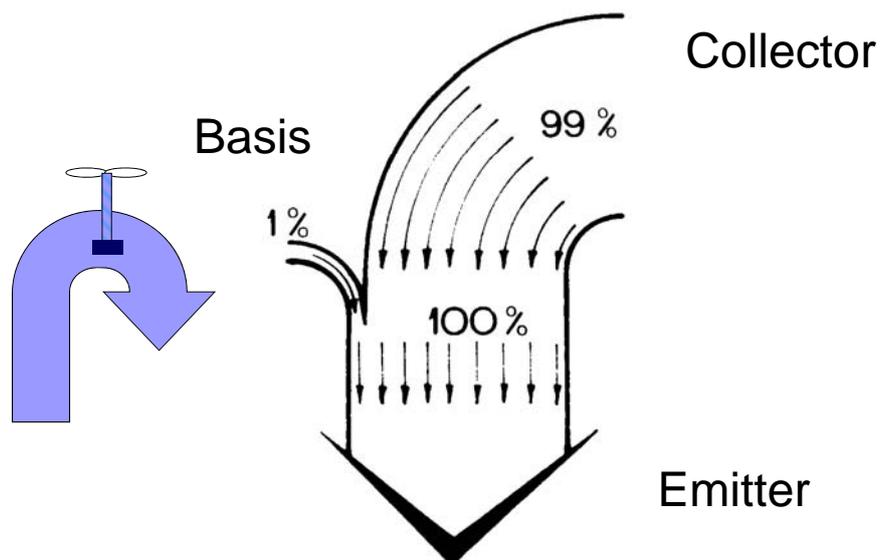
Das Sperschichtmodell der Verstärkung

Wenn eine Spannung von 0,6 V zwischen Basis und Emitter angelegt wird, wobei nur ein kleiner Strom durch die Basis-Emitter-Diode fließt, dann kann man einen wesentlich grösseren Strom beobachten, der vom **Kollektor zum Emitter** fließt.

Die Erklärung dafür findet sich in der sehr dünnen Basisschicht. Treten nämlich N-Ladungsträger in die Basis ein, gelangen sie sofort in das starke elektrische Feld der Basis-Kollektor-Sperrschicht. Die meisten der Ladungsträger werden zum Kollektor hin abgesaugt.

Nur etwa ein Prozent der Ladungsträger, die vom Emitter ausgehen, gelangen zum Basisanschluss. Umgekehrt ist also der Kollektorstrom etwa 100 mal grösser als der Basisstrom. Der Kollektorstrom wird über die Basis-Emitter-Spannung bzw. über den Basisstrom gesteuert.

Transistorfunktion als Wasserdurchflussregelungsmodell



Halbleiter: Feldeffekttransistor

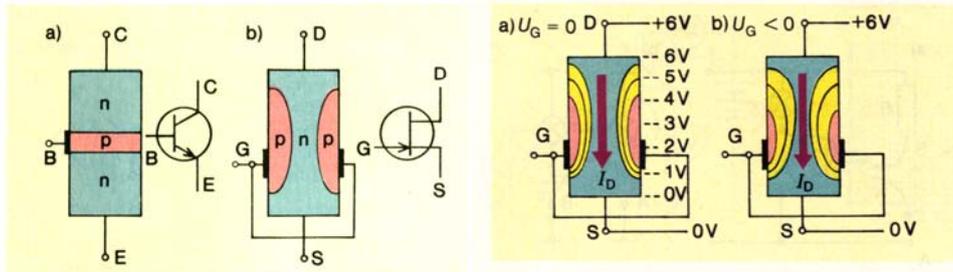
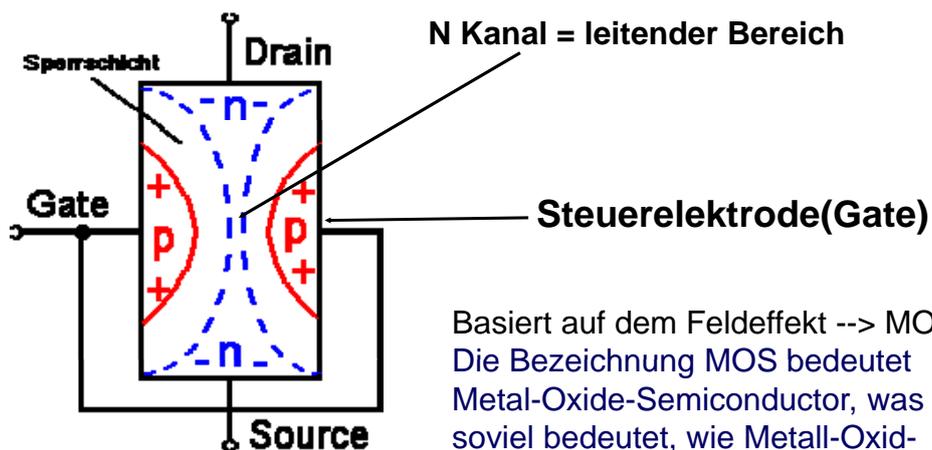


Bild 1: Vergleich a) npn-Transistor, b) n-Kanal-Feldefek Transistor

Bild 3: Sperrschichten eines Feldeffekt-Transistors
a) bei $U_G = 0$, b) Kanalverengung bei $U_G < 0$

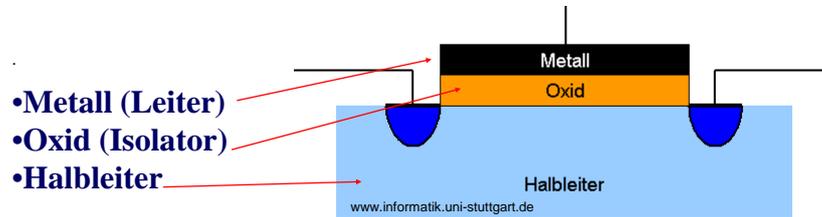
Steuerung durch elektrische Felder

MOS-Feldefekttransistor(MOS-FET)



Basiert auf dem Feldeffekt --> MOSFet
Die Bezeichnung MOS bedeutet Metal-Oxide-Semiconductor, was soviel bedeutet, wie Metall-Oxid-Halbleiterbauteil

MOS ist eine Abkürzung für Metal-Oxide-Semiconductor



- Metall (Leiter)
- Oxid (Isolator)
- Halbleiter

NMOS - Transistor

Der Ladungstransport erfolgt durch **negative** Ladungsträger.

Der Transistor **leitet** durch Anlegen einer **positiven** Steuerspannung.

Der Transistor **sperrt** durch Anlegen einer **negativen** Steuerspannung.

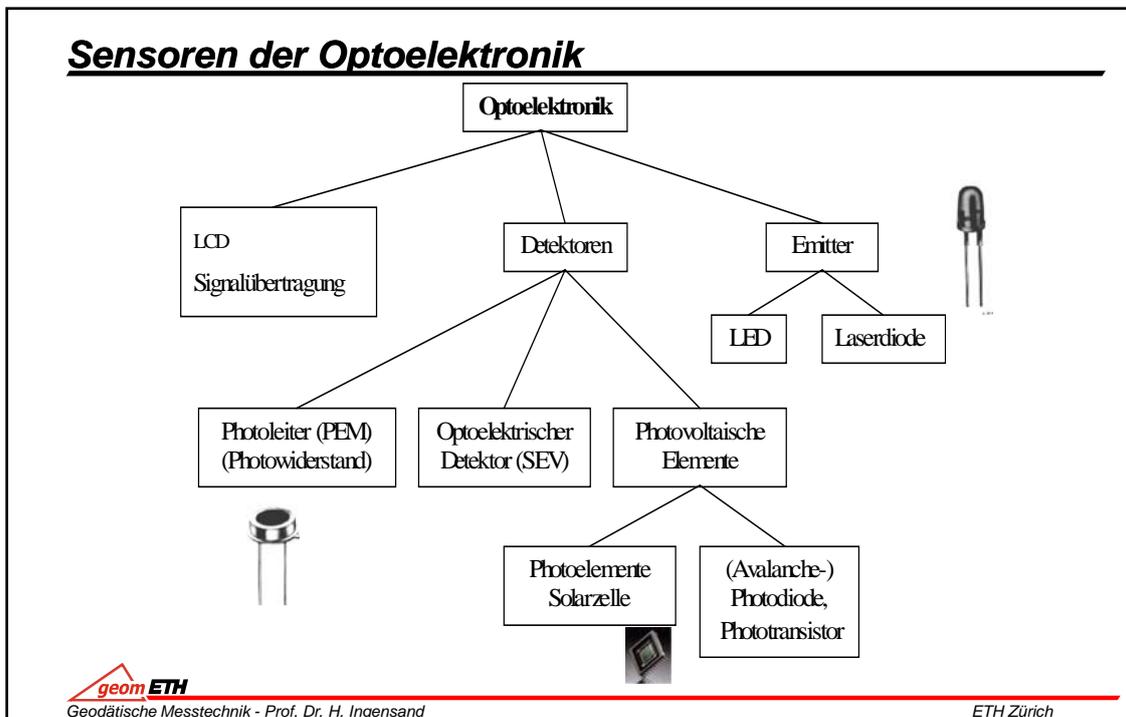
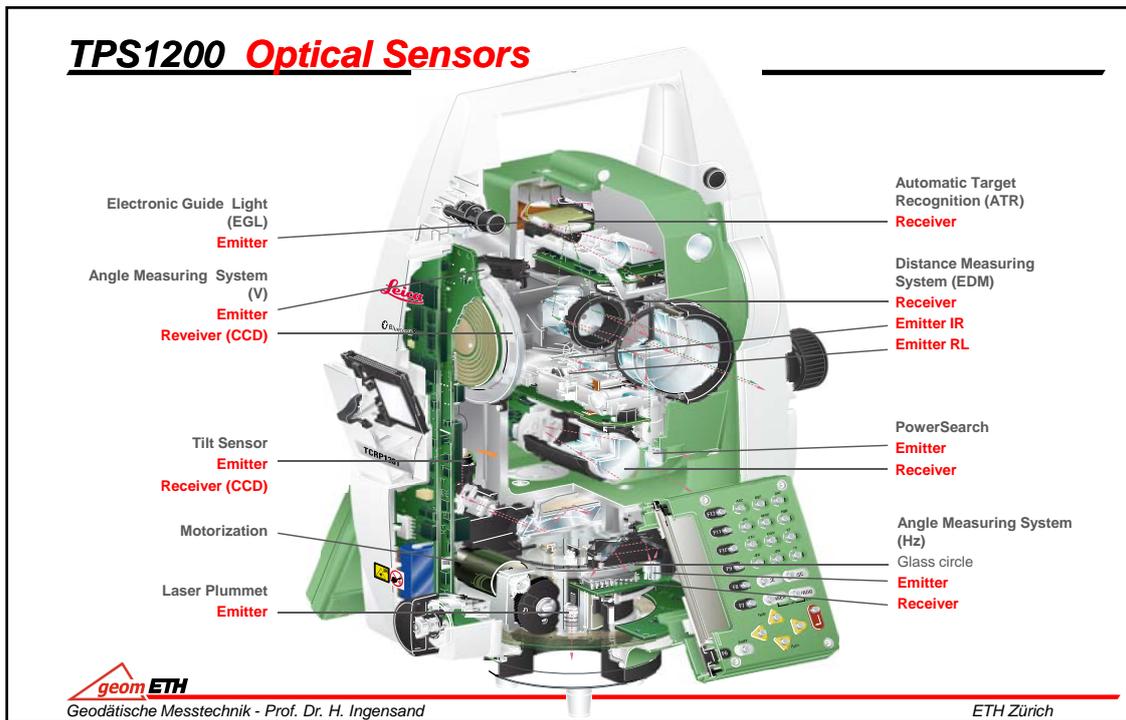
PMOS - Transistor

Der Ladungstransport erfolgt durch **positive** Ladungsträger.

Der Transistor **leitet** durch Anlegen einer **negativen** Steuerspannung.

Der Transistor **sperrt** durch Anlegen einer **positiven** Steuerspannung.

Optoelektronik



Analogien Halbleiter \leftrightarrow Optoelektronik

- | | |
|---------------------|--|
| ➤ Halbleiterelement | ➤ Photowiderstand,
Photozelle (CCD Pixel) |
| ➤ Diode | ➤ Photodiode |
| ➤ Zenerdiode | ➤ Avalanchephotodiode |
| ➤ Transistor | ➤ Phototransistor |
| ➤ Peltiereffekt | ➤ Lumineszenzdiode |
| | ➤ Diodenlaser |



Photoelektrische Effekte

Äusserer Photoelektrischer Effekt

Aus der Oberfläche eines bestrahlten Metalls werden Elektronen herausgeschlagen. Es entsteht eine Ladung. Wenn man mit einer Hilfsspannung arbeitet, fliesst ein Strom. Bei bestrahlten Gasen können sich Ionen bilden, wie z.B. in der Erdatmosphäre, wo in der Ozonschicht durch die ultraviolette Strahlung der Sonne aus Sauerstoff Ozon gebildet wird. (vgl. Sonnenrad)

Innerer Photoelektrischer Effekt

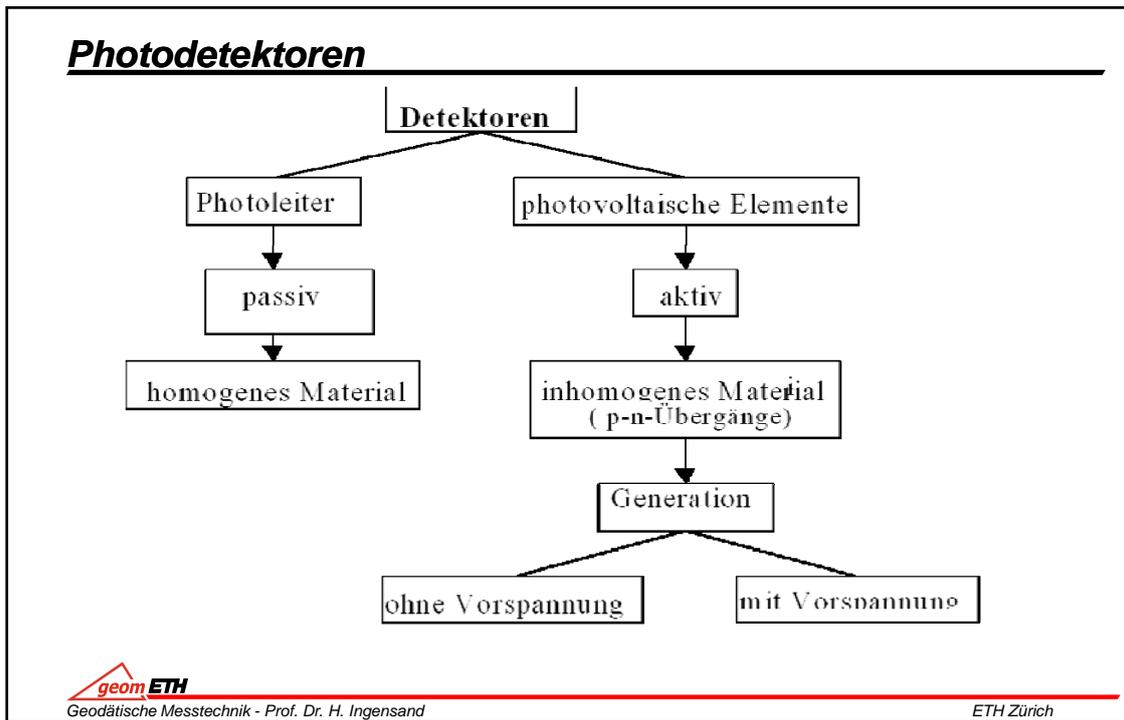
Bei Bestrahlung ändern sich die elektrischen Eigenschaften eines Stoffes. Die Leitfähigkeit von Selen z.B. nimmt bei Bestrahlung zu. Die Elektronen verbleiben dabei im Kristall, da sie ihn nicht verlassen können.

Sperrschicht-Photoeffekt (Dotierte Halbleiter)

Der Sperrschicht-Photoeffekt tritt an der Grenzfläche zwischen n- und p-dotierten Schichten eines Halbleiters auf. Die n-Schicht liegt auf der bestrahlten Seite. Sie ist sehr dünn, nur Bruchteile eines tausendstel Millimeters, damit das Licht bis auf den n-p Übergang durchscheint. Außerdem ist sie leicht positiv geladen. Die p-Schicht ist leicht negativ geladen und im Vergleich zur n-Schicht sehr dick, immerhin wenige Zehntel Millimeter.

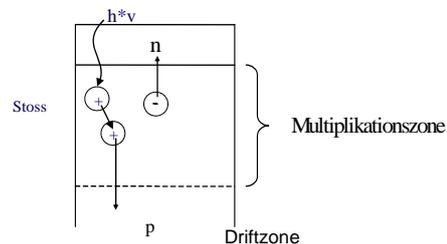
Literatur: Q7 Energietechnik und Kraftmaschinen 4 & 5, (Kristall-Gleichrichter S. 651; Photoeffekt S. 1007); Q1 Wie funktioniert das? - Die Energie S.110 ; Q9 StromBASISWISSEN Nr.110 (S. 3ff); Q3 Kleines Halbleiter-ABC (S.17, 35f, 45); Q21 Shell-Foliensammlung, Folie 6, Seiten 18ff





Avalanche Photodiode (APD)

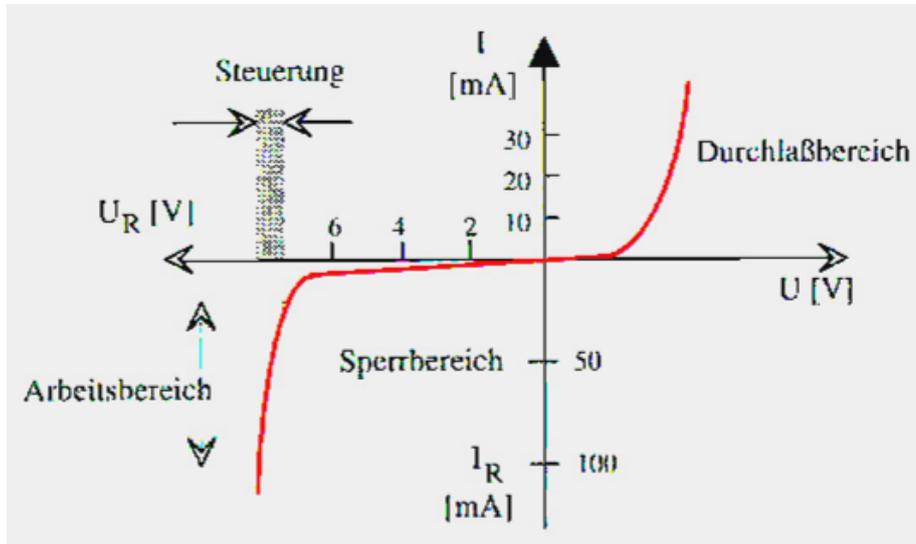
Innere Verstärkung bis Faktoren von 1000 kann man in **Avalanche Photodioden** (Lawinen-Photodioden) erreichen. Durch geeignete Dotierung und hohe Sperrspannungen (-180 Volt) werden in diesem Element Ladungsträger bewusst durch lokale Stossionisation und weniger durch Beleuchtung erzeugt, im Driftfeld beschleunigt und so ein Lawinendurchbruch gezündet. Die Anstiegszeiten können unter 100 ps liegen.



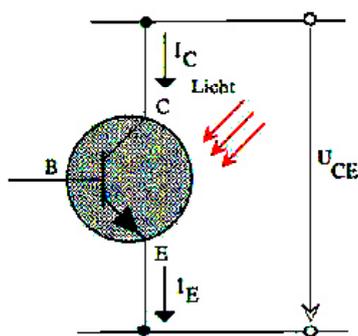
In der Multiplikationszone angestossene Elektronen reißen weitere Elektronen lawinenartig mit sich, die wiederum andere Elektronen losreißen.

Avalanche Photodioden werden in EDM als Empfangsdioden eingesetzt.

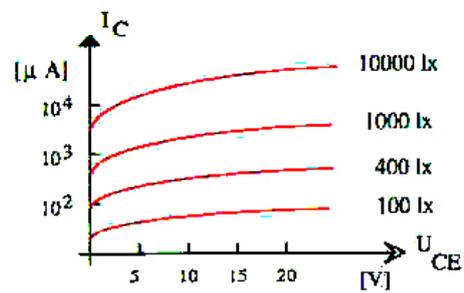
Halbleiter: Avalanchephotodiode APD



Optoelektronik: Fototransistor



Phototransistor



Kennlinie eines Phototransistors

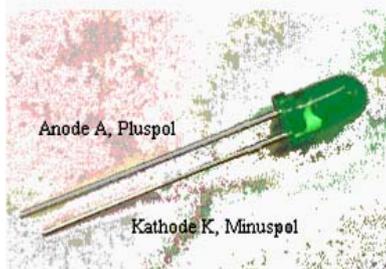
Lichtemittierende Halbleiter



Geodätische Messtechnik - Prof. Dr. H. Ingensand

ETH Zürich

Halbleiter:Leuchtdiode



Die Leuchtdiode (LED) ist eine „normale“ Diode auf der Basis des Halbleiter-Materials Gallium-Arsenid.

Der pn-Übergang kann auch umgekehrt zur Lichterzeugung aus Strom genutzt werden.

Dabei wird die pn-Diode in Vorwärtsrichtung betrieben => Minoritätsträger werden in p- und n-Gebiet injiziert und können dort gegebenenfalls strahlend rekombinieren.

Das funktioniert nur, falls strahlende Rekombination der dominierende Prozess ist, d.h. bei Halbleitern mit direkter Bandlücke (z.B: GaAs)

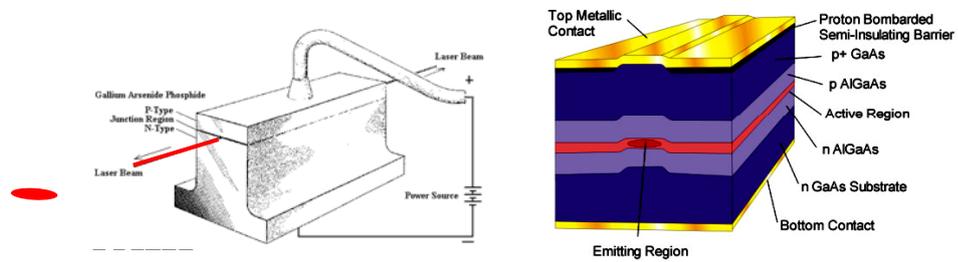
$E_g(\text{GaAs}) = 1,35 \text{ eV}$ entspricht 400nm (IR)



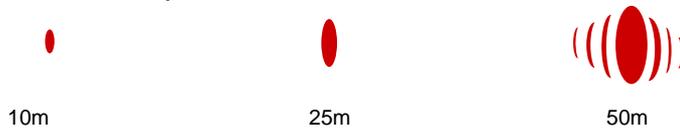
Geodätische Messtechnik - Prof. Dr. H. Ingensand

ETH Zürich

Diodenlaser



Strahlprofil als Funktion der Distanz



Geodätische Messtechnik - Prof. Dr. H. Ingensand

ETH Zürich

Superluminescent Diodes (SLD)

- **SLD is a semiconductor optical amplifier with no input signal, where weak spontaneous emission into the waveguide mode is followed by strong laser amplification**

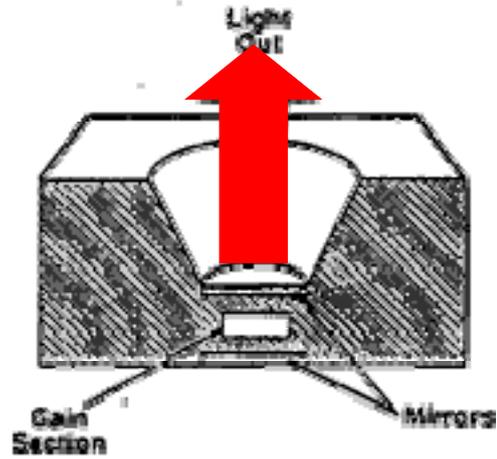


Geodätische Messtechnik - Prof. Dr. H. Ingensand

ETH Zürich

Vertikal emittierende Laser

Surface emitting lasers mit vertikaler
Spiegelanordnung

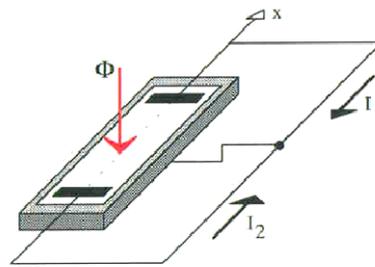


Positionsempfindliche Halbleitersensoren

Position Sensitive Diode (PSD)

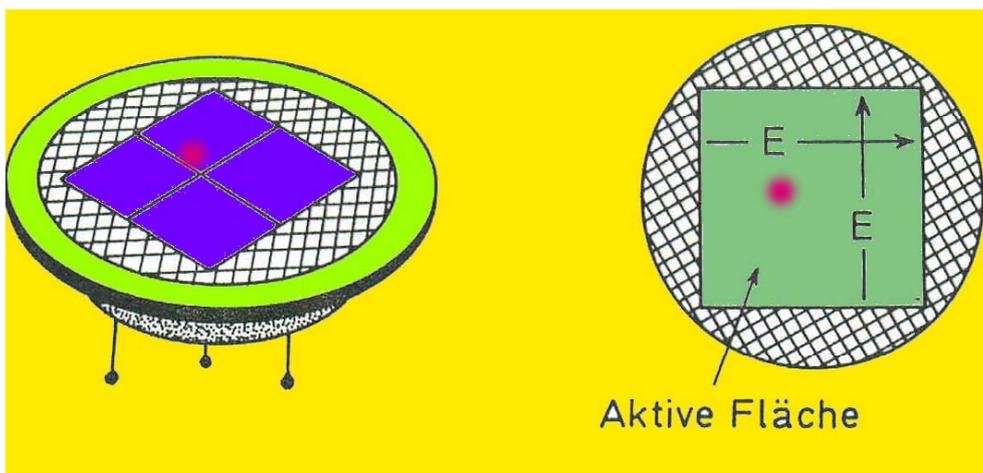
Optische Sensoren: Eindimensionale Lateraleffektdiode

Die Lateraleffektdiode hat an der p-Schicht zwei gegenüberliegende Kontakte und einer an der n-Schicht, so dass bezogen auf diesen zwei verschiedene Ströme (I_1 und I_2) messbar sind. Die Position des auftreffenden Lichts bezogen auf die Distanz von Kontakt lässt sich aus dem Verhältnis von I_1 und der Summe beider Ströme I_1+I_2 berechnen. Lateraleffektdioden sind auch als zweidimensionale Positionsdetektoren erhältlich.



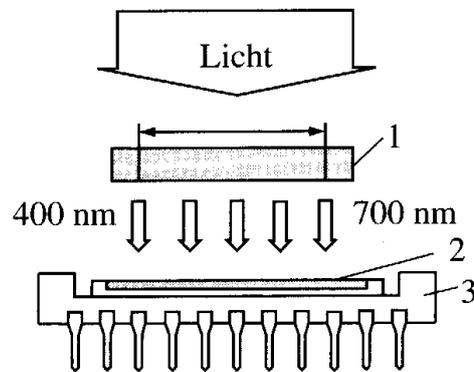
Aus Schlemmer

Optische Sensoren: 4 Quadranten und Lateralodiode



Aktive Fläche

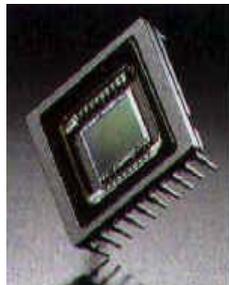
Optosensoren: „Diodenzeile“



- 1 lineares Verlaufsfilter
- 2 Diodenzeile
- 3 IC-Trägergehäuse

Die Funktion von CCD Halbleitersensoren

Die lichtempfindliche Schicht der Halbleitersensoren ist in die Oberfläche des Substrates integriert. Viele kleine Fotozellen Pixel (**P**icture **E**lements) sind dort dicht an dicht im Mikrometerabstand angeordnet und "warten" auf einfallende Photonen (Lichtteilchen). Der Einfall von Photonen bewirkt eine Spannungszunahme in den Fotozellen und zwar proportional zur Lichtmenge. Diese Spannungen können dann mit Hilfe weiterer Elektronik in Bildpunkte umgerechnet werden

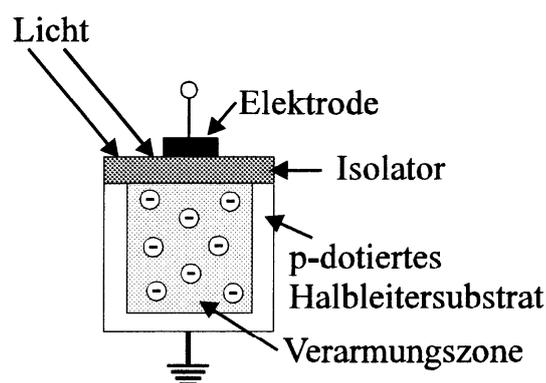


CCD-Bildsensor mit integriertem A/D-Wandler

Die Eimerkette: Belichtung und Auswertung

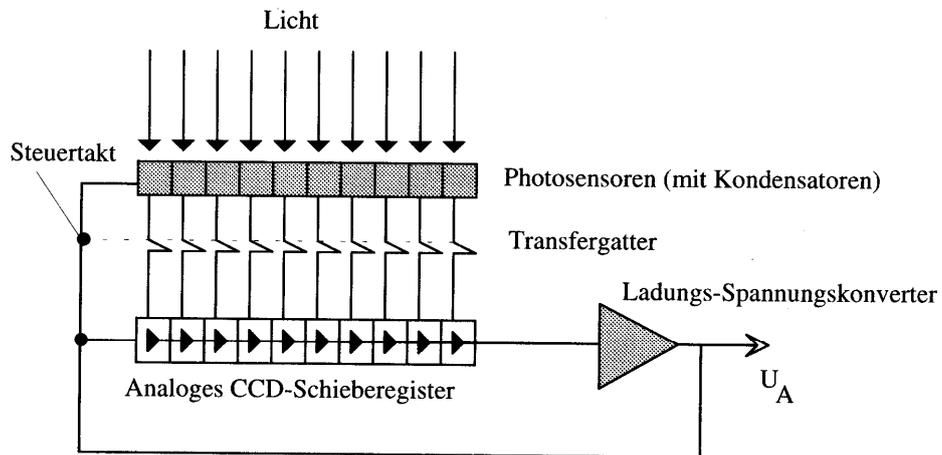
- Um ohne Vorspannungen zu arbeiten, muss der Bildsensor vor jeder Aufnahme den Sensor entladen und damit scharf gemacht werden.
- Nun wird die Blende geöffnet und die Photonen laden die Fotosensoren auf. Die Blende wird wieder geschlossen und zurück bleiben die verschiedenen Spannungen, welche nun abtransportiert werden müssen
- Der CCD-Chip verwendet das Eimerkettenprinzip um Ladungen einer Bildzeile zu einem Messverstärker zu bringen.
- Ein Taktsignal steuert dabei das Umfüllen der Sammeleimer in das jeweilige Nachbargefäß, ohne dass Ladungen verloren gehen, den bildlich gesprochen wird nicht der ganze Eimer weitergereicht, sondern nur der Inhalt.
- Am Ende der Kette steht ein Messverstärker, der die enthaltene Ladung erfasst und in eine proportionale Spannung umsetzt.

Optische Sensoren: Pixel eines CCD Sensors

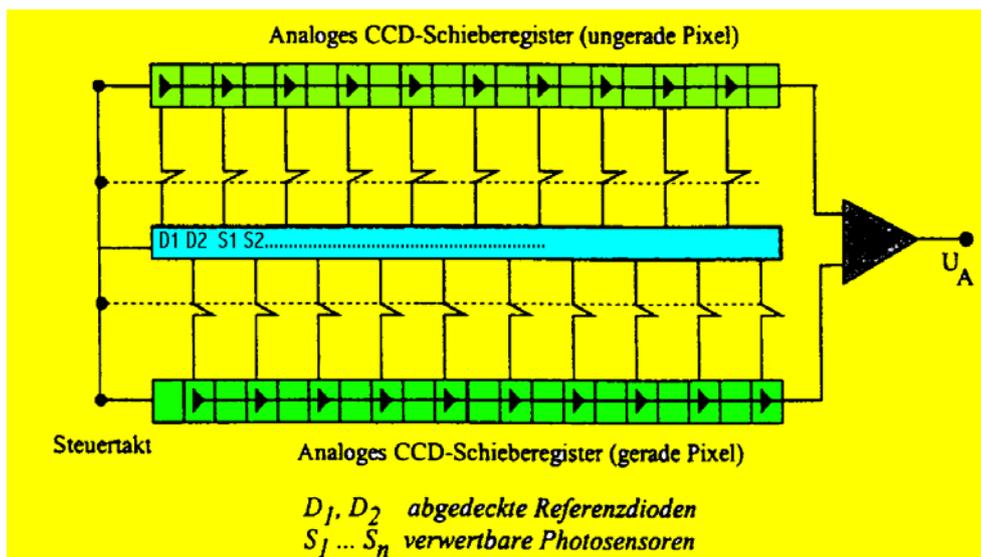


MOS-Struktur (Metal-Oxide-Semiconductor)

Optische Sensoren: CCD Zeilensensor



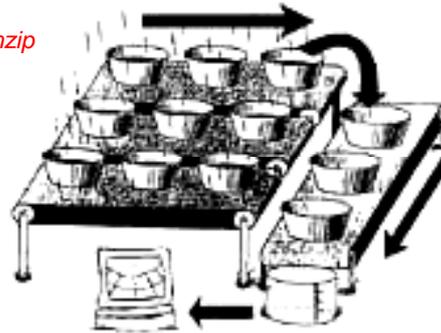
CCD: 2 Kanalschieberegister beim Zeilensensor



Optoelektronik: CCD Sensoren

CCD steht für *Charge Coupled Devices (Ladungsgekoppelte Systeme)*. Sie bestehen aus einer Anzahl von einzelnen *Photosensoren*, die *Ladungsträger* während des *Lichteinfalls* erzeugen, die in einem *Kondensator* gesammelt und einem *analogen Schieberegister* zugeführt werden, aus dem die *Informationen* dann ausgelesen werden können.

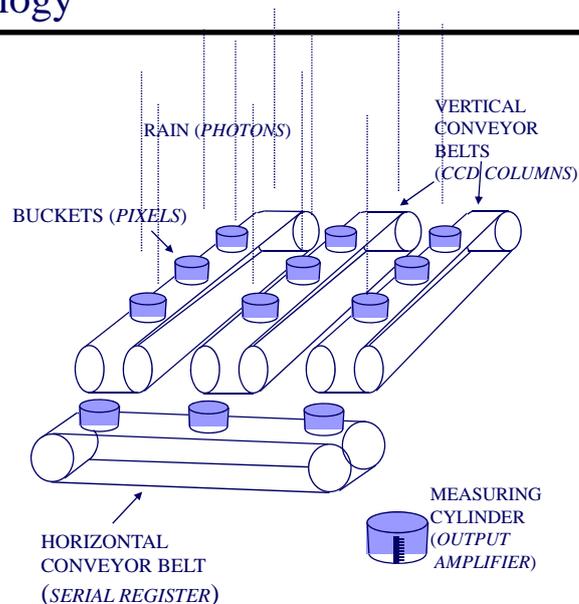
·Eimerkettenprinzip



Geodätische Messtechnik - Prof. Dr. H. Ingensand

ETH Zürich

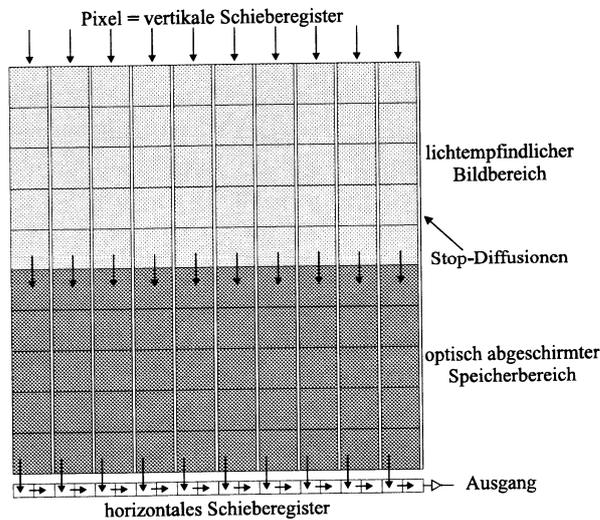
CCD Analogy



Geodätische Messtechnik - Prof. Dr. H. Ingensand

ETH Zürich

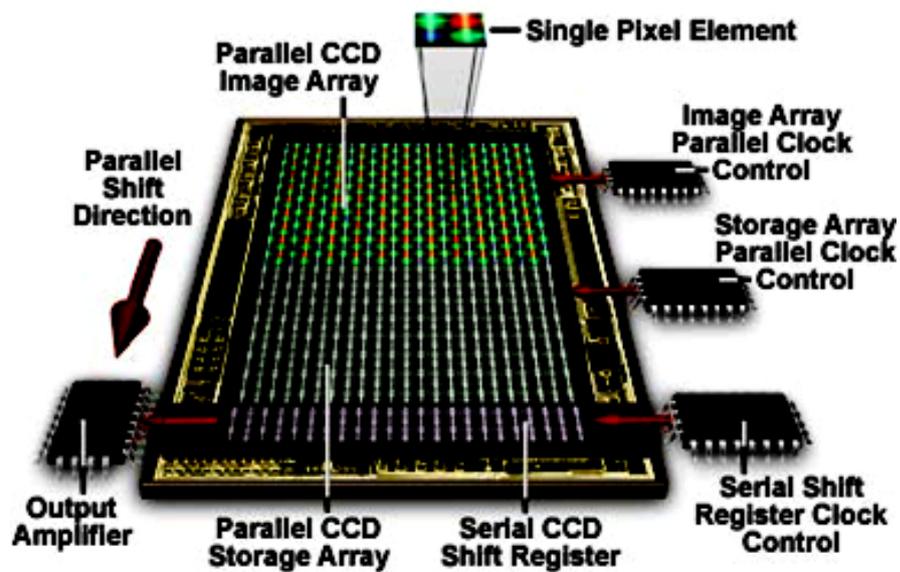
CCD Arrays: Frame-Transfer-Konzept (FT-Konzept)

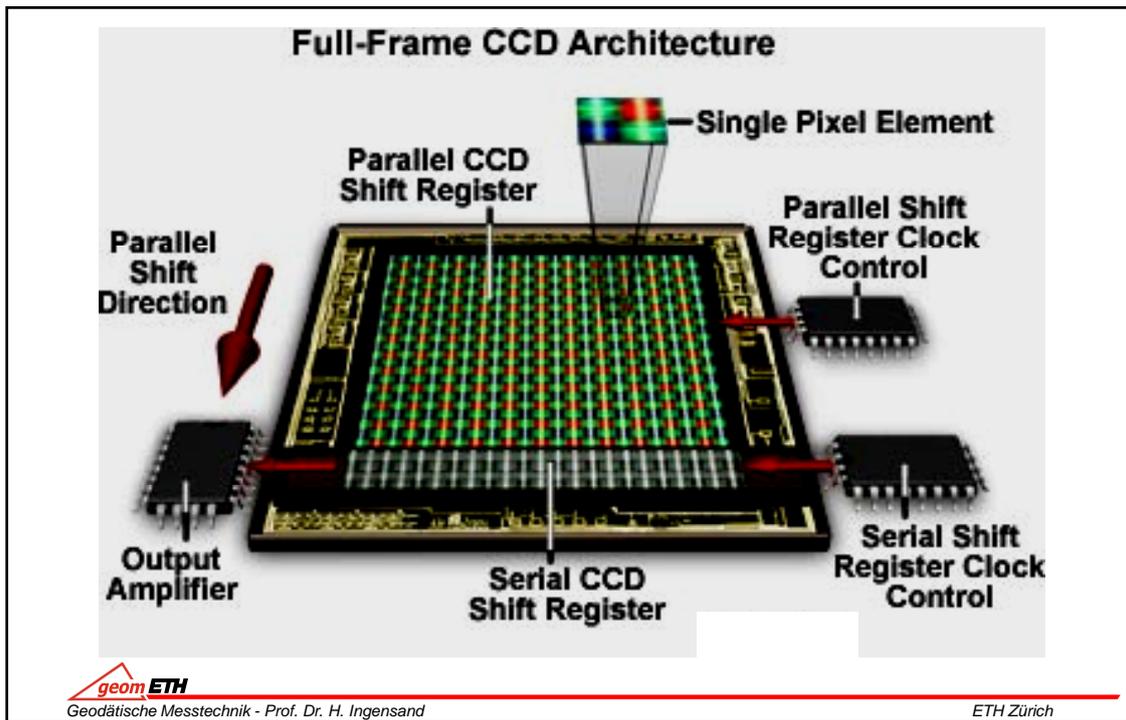


Hier besteht die Chip-Fläche aus einem photosensitiven Teil (**Bildbereich**) und einem abgedeckten, etwa gleich grossen Teil, in dem die Ladungen gespeichert werden, dem **Speicherbereich**.

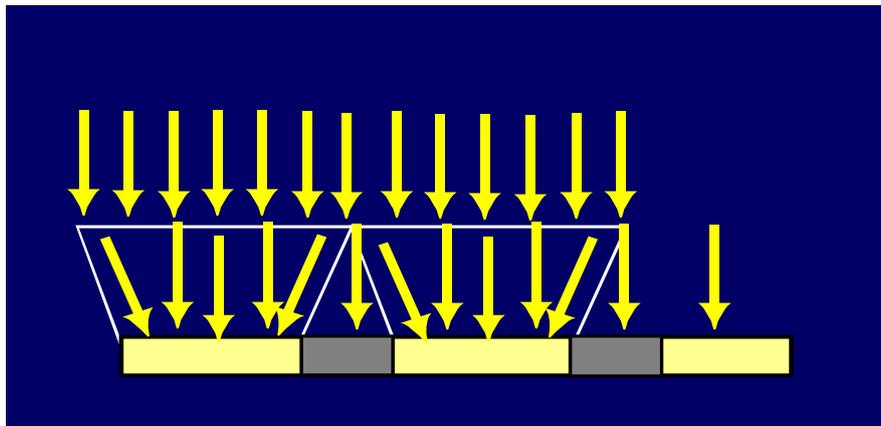
Bei diesem Konzept existieren keine singulären Photodioden, vielmehr ist die gesamte Schicht unter den Elektroden photosensitiv. Während der Integrationsphase (Belichtungszeit) werden die Photoelektronen unter den Elektroden mit hohem Potential im Bildbereich gesammelt. In der Vertikalaustastücke zwischen den Halbbildern wird das gesamte eben aufgenommene Halbbild in den Speicherbereich transferiert. Danach wird das zweite Halbbild im Bildbereich aufgenommen. Gleichzeitig wird während jedes Zeilenrücklaufes eine Zeile aus dem Speicherbereich in das Ausleseschieberegister transferiert und von dort an den Ausgabeverstärker gegeben. Der Zeilensprung wird dadurch erreicht, daß durch geeignete Ansteuerungen die Halbbilder jeweils um einen halben Bildpunkt versetzt integriert werden. Daher ist die Anzahl der Zeilen im Bildbereich nur halb so groß wie deren Anzahl im Vollbild.

Frame-Transfer CCD Architecture





CCD-Sensoren - Probleme Lichtausbeute



Mikrolinsen

Microlens or Lenslet Arrays

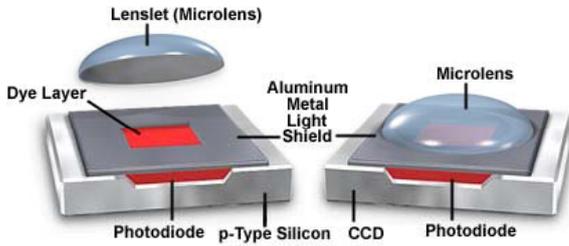


Figure 1

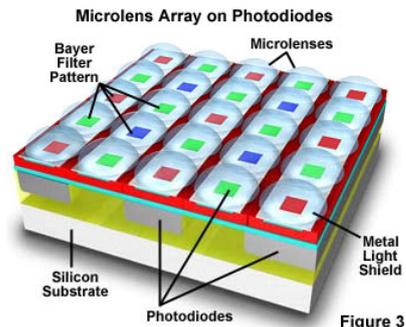
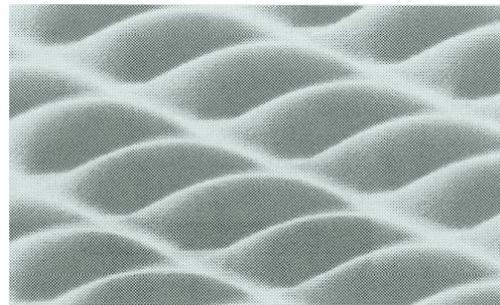
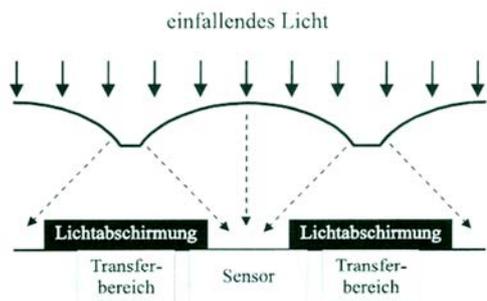


Figure 3



Mikrolinsen



CMOS-Sensoren

- Complementary Metal Oxide Semiconductor
- + Eigene Verstärkereinheit je Pixel
- + Hohe Dynamik
- + Bilddaten selektiv auslesbar
- + Überstrahlresistenz
- + „camera on the chip“
- „neue“ Technologie



CCD CMOS-Sensoren



CMOS-Sensoren



Range Imaging Kameras

Ende