



# **Medizinphysik II**

# **Strahlenmesstechnik**

**Dr. Roberto Mini**

# Strahlenmesstechnik

## Allgemeines

Eine ionisierende Strahlung manifestiert sich nur durch ihre Wechselwirkung mit Materie bzw. durch die in einem Absorber verursachten physikalischen, chemischen oder biologischen Folgereaktionen. Das Ziel der Strahlenmesstechnik ist die Registrierung solcher Reaktionen.

Da der Mensch diese nicht unmittelbar wahrnehmen kann, ist er beim Umgang mit ionisierender Strahlung in besonderem Masse auf eine zweckmässige Strahlenmesstechnik angewiesen. Für verschiedene dosimetrische Fragestellungen kommen sehr unterschiedliche Messverfahren zum Einsatz. Es ist deshalb wichtig, bei der Auswahl eines Verfahrens dessen Eigenschaften und Grenzen zu kennen.



## Allgemeines

- Aufgabe der Strahlenmesstechnik

Lieferung von quantitativer und/oder qualitativer Informationen über vorhandene Strahlungen und deren Wirkung

Einsatzbereiche

Physik

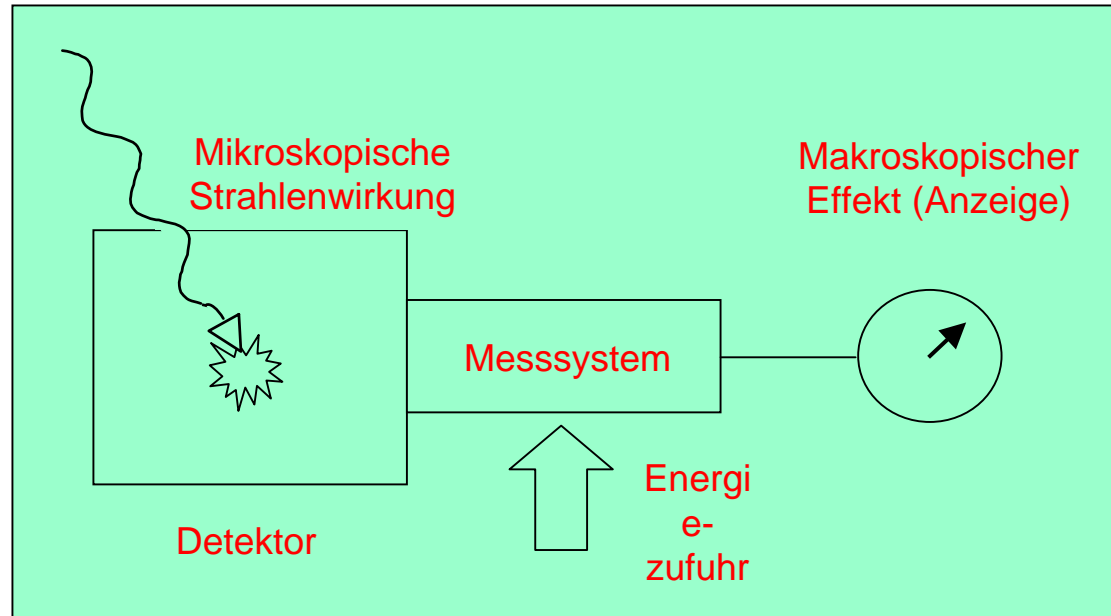
Medizin (Therapie, Diagnostik)

Strahlenschutz



## Strahlenmessapparatur

Bei vielen Fragestellungen wird in der Strahlenmesstechnik eine Sondenmesstechnik verwendet



**Messsonde**

**Auswertegerät**

**Anzeigegerät**

## Strahlenmessapparatur

### Messsonde:

- strahlenempfindliches festes, flüssiges oder gasförmiges Material (Sondenmaterial)
- ersetzt im Messvolumen das vorgegebene bzw. interessierende Material
- Sondenwand + zusätzliche Bauteile (z.B. elektrische Zuleitungen etc.) beeinflussen das Strahlenfeld

### Auswertesystem:

Das Auswerte- bzw. Anzeigesystem umfasst die ganze Auswerteeinheit  
Mit dieser werden die Sondensignale registriert, ausgewertet und angezeigt.

### Anzeige:

Als Anzeige versteht man schliesslich den an einer Skala des Anzeigesystems ablesbaren Zahlenwert. Dessen Bedeutung hängt von der angewandten Messtechnik ab. Die Interpretation dieser Zahlenwerte ist Aufgabe der Dosimetrie.



## Allgemeines

- Anwesenheit von ionisierender Strahlung kann nur aufgrund ihrer physikalischen **Wechselwirkungsprozesse** erfasst werden.
- Die beobachtbaren sekundären Strahlenwirkungen bestehen im wesentlichen in:

optischen Effekten (Absorption und Lumineszenz)  
elektrischen Effekten sowie  
thermischen Effekten (Erwärmung).



## Allgemeines

- Die beobachtbaren sekundären Strahlenwirkungen bestehen im wesentlichen in:

Optische Effekte	Elektrische Effekte	Thermische Effekte
<b>Absorption</b> Filmschwärzung Sonstige Verfahren	<b>Gasionisation</b> Nebelspurbildung Gasentladungen Primärionisationen Sekundärionisationen	<b>Geothermie</b> Wärmetönungen
<b>Lumineszenz</b> Fluoreszenz Phosphoreszenz Thermolumineszenz Radiolumineszenz	<b>Festkörperionisation</b>  <b>Elektronenspinresonanz</b>	
<b>Sonstige Leuchterscheinungen</b> Szintillationen		



## In der Medizin verwendete Messtechniken

Strahlungseffekte	Nachweisgrößen	Detektoren
Ionisation in Gasen oder Flüssigkeiten	elektrische Ladung, Strom	Elektrometer, Ionisationskammern  Proportionalzählrohr  Auslösezählrohr
Ionisation in Festkörpern	elektrische Ladung, Strom	Halbleiter, Leitfähigkeitsdetektor
Lumineszenz	spontane Lichtemission  UV-Lichtemission bei Lichtexposition  Lichtemission beim Aufheizen (Thermolumineszenz)  Lichtemission bei UV-Exposition (Radiophotolumineszenz)  Lichtemission beim Auflösen in geeigneten Lösungsmitteln (Lyolumineszenz)	Szintillationsdetektor, Leuchtschirm, Verstärkerfolie  Speicherfolien  Thermolumineszenzdosimeter (LiF, CaSO <sub>4</sub> , BeO, CaF <sub>2</sub> , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Li <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub> )  Phosphatgläser  organische Verbindungen, Alkalihalogenide
Chemische Reaktionen	Farbumschläge durch Oxidation, Bruch von Kettenmolekülen mit Farbänderung und Radikalbildung  Nachweis von chemischen Radikalen mittels Elektronenspin-Resonanz (ESR)	Eisensulfatdosimeter, Verfärbungsdosimeter aus organischen Verbindungen  kristalline Substanzen (Alanin)
Photographische Wirkung	Schwärzung (opt. Dichte), Spuren	Filmemulsionen
Exoelektronenemission	Oberflächenladungsemission nach thermischer oder optischer Anregung	Kristalline Substanzen z. B. BeO, LiF, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , CaSO <sub>4</sub>
Wärme	Temperaturdifferenz	Kalorimeter
Biologische Effekte	zelluläre Veränderungen	Ringchromosomenzählung, Fluoreszenzanalyse der DNS



## Forderung an ein Messsytem

Spezifität

Reproduzierbarkeit

Empfindlichkeit

Linearität bzw. Proportionalität

Messbereich

Messgenauigkeit



## Spezifität

Das bei einer Messung resultierende Messsignal muss der interessierenden physikalischen Messgrösse möglichst eindeutig zugeordnet werden können



## Reproduzierbarkeit

**Wiederholte Messung der gleichen physikalischen Grösse muss innerhalb bestimmter Fehlergrenzen den gleichen Messwert liefern**



## Empfindlichkeit

Die Empfindlichkeit eines Messsystems ist ein Mass für das Verhältnis von Messgrösse und Messsignal

Eine hohe Empfindlichkeit ist erwünscht um auch kleine Messgrössen möglichst genau messen zu können (Abgrenzung des Messsignals vom Signaluntergrund)

Eine zu hohe Empfindlichkeit des Messsystems schränkt aber nicht selten den Messbereich in unerwünschter Weise ein



## Linearität und Proportionalität

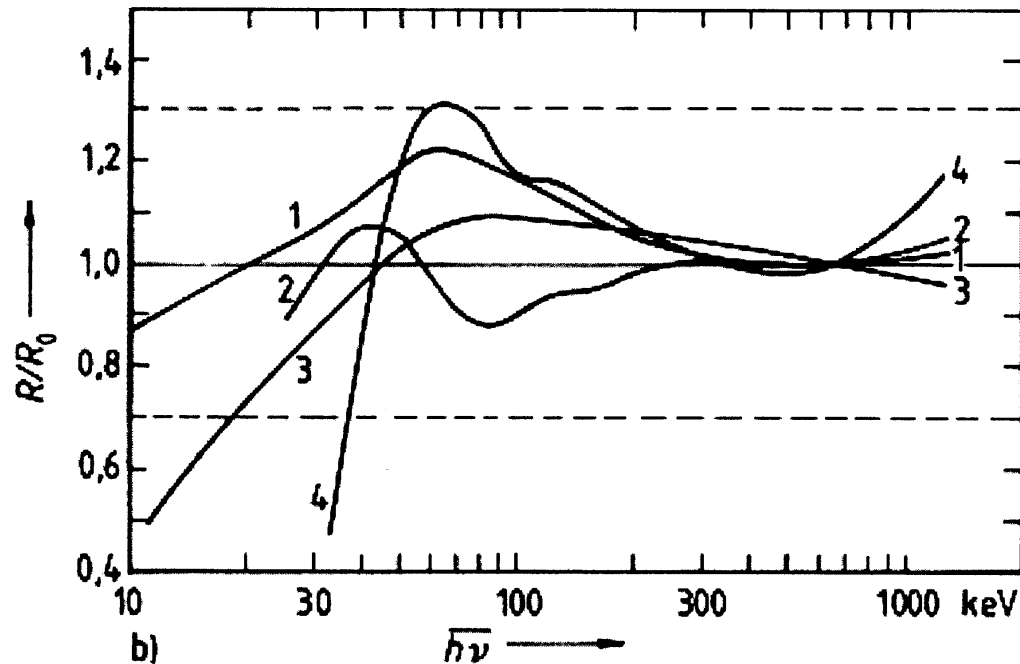
Die Anzeige eines Messsystems sollte über eine lineare Funktion mit der physikalischen Messgrösse verknüpft sein

Ist die Linearität über den gesamten Messgrössen-bereich streng erfüllt spricht man von Proportionalität zwischen Anzeige und Messgrösse

Bei den meisten Messsystemen ist die Linearität zwischen Anzeige und Messgrösse nur über einen bestimmten Messbereich erfüllt (Selbstablauf; Sättigung usw.)



## Energieabhängigkeit verschiedener Messsysteme



- 1 Ionisationskammerdosimeter mit dünner Wand
- 2 Szintillationsdosimeter
- 3 Stabdosimeter direkt ablesbar
- 4 Geiger-Müller-Zählrohr

## Messbereich

Da die in Medizin und Strahlenschutz zu erwartenden Dosisleistungen über viele Größenordnungen variieren können, muss bei der Auswahl des Dosimetriesystems auf den hierfür gültigen Messbereich geachtet werden.

Nicht selten sind für verschiedene Messaufgaben unterschiedliche Messsysteme zu verwenden.



## Messgenauigkeit

Die Messgenauigkeit ist nicht selten von vielen Faktoren Abhängig:

- Nachweisempfindlichkeit
- Reproduzierbarkeit
- Externe Einflüsse
  - Luftdruck; Luftfeuchtigkeit; Temperatur
  - Elektrische Versorgung; äussere elektromagnetische Felder
- Detektoreigenschaften
  - Energie- und Richtungsabhängigkeit
  - Alterungsprozesse: Chemische Umwandlung, Verschmutzung
  - Selbstablauf; Sättigung

Um den Messaufwand und die Kosten in einem vernünftigen Rahmen zu halten, sollte die angestrebte Messgenauigkeit der Messaufgabe angepasst sein



## Fehlermöglichkeiten

### Vermeidbare Fehler (können beliebig gross sein)

- **Falsche Gerätewahl** (Empfindlichkeit bezüglich anderer Strahlenarten, falscher Arbeitsbereich etc.)
- **ungenau**e Funktionskontrolle
- **ungenau**es Ablesen
- **Kontamination** des Messgerätes
- **mangelhafte** Isolation
- **Lageeinfluss** des Anzeigeinstrumentes
- **elektrostatische** Effekte

### Systematische Fehler (abschätzbar und oft auch mittels entsprechender Faktoren rechnerisch korrigierbar)

- **falsche** Kalibrierung
- **Fehler** des Standards
- **Messfehler** durch Ungenauigkeiten in der Messanordnung
- **Energieabhängigkeit**
- **Richtungsabhängigkeit**
- **Luftdruck- und Temperaturabhängigkeit**
- **Totzeiteffekte**



## Zielsetzungen der Strahlenmesstechnik

### Strahlennachweis

- Qualitativer Strahlennachweis
- Quantitative Strahlenfeldmessungen

### Dosimetrie

- Bestimmung der primären Strahlenwirkung (Energiedosis)



## Strahlenmesstechnik

### Allgemeines

Die in der Strahlenmesstechnik verwendeten Messsysteme lassen sich in zwei Hauptgruppen aufteilen

- Strahlennachweisgeräte
- Strahlendosimeter

Diese Unterteilung aufgrund der Einsatzmöglichkeit der verschiedenen Messsysteme ist dabei nicht eindeutig, indem bestimmte Messsysteme als Nachweisgerät wie auch als Dosimeter eingesetzt werden können. Durch diese Aufteilung wird vielmehr die unterschiedliche Zielsetzung der Strahlenmesstechnik verdeutlicht.



## Strahlennachweisgeräte

Unter einem Strahlennachweisgerät versteht man eine Messeinrichtung, die die Anzahl Strahlenteilchen registriert, die in ein bestimmtes Messvolumen (Sonde) eindringen. Damit lässt sich das Vorhandensein einer ionisierender Strahlung und deren Intensität feststellen. Auffallendstes Merkmal dieser Geräte ist deren hohe Empfindlichkeit gegenüber Strahlungseinflüssen.

Die wichtigsten Strahlennachweisgeräte sind :

- Geiger-Müller-Zähler
- Proportionalzähler
- Szintillationszähler
- Photoemulsion (Röntgenfilme)
- Festkörperdetektoren



## **Qualitativer Strahlennachweis**

**Kontaminationsmessungen**

**Umweltüberwachung**

**Abfallüberwachung**



## Quantitative Strahlenfeldmessungen

### Quantitativer Teilchen- bzw. Quantennachweis

- Aktivitätsmessungen

### Strahlungsfeldanalyse

- Messung der räumlichen und zeitlichen Verteilung von
  - Teilchen- bzw. Quantenfluss
  - Teilchenart

### Spektrometrie



## Dosimeter

Unter einem Strahlendosimeter versteht man eine Messeinrichtung, die eine quantitative Ermittlung der strahleninduzierten Primärwirkungen (Energiedosis) erlaubt. Je nach Messsystem werden hierzu in einer Sonde die unterschiedlichsten physikalischen oder chemischen Reaktionen registriert, die über möglichst grosse Bereich dosisproportional sein müssen. Um die Energiedosis in einem bestimmten strahlenexponierten Medium (beispielsweise im Gewebe eines Patienten) zu kennen, geht man dabei in mehreren Schritten vor, indem man vorerst mit einem Strahlendosimeter die Strahlenwirkung in einem vom Messgerät vorgegebenen Medium (Sonde) feststellt und die resultierenden Dosiswerte anhand von strahlenphysikalischen Umrechnungsalgorithmen für das interessierende Medium umrechnet.

Als Strahlendosimeter werden folgende Messsysteme eingesetzt:

- Kalorimeter (Eichdosimeter)
- Ionisationskammer
- Photoemulsion
- Festkörperdosimeter



## Dosimetrie

„Dosis“ griechisch Menge bezeichnet in der Medizin eine Arzneimittelmenge die für eine bestimmte biologische Wirkung verantwortlich ist.

Für das „Arzneimittel“ Strahlung musste vorerst eine messbare Grösse, die mit den strahleninduzierten biologischen Wirkungen korreliert, gefunden werden.

Als Grösse für die Beschreibung der primären physikalischen Wirkung (Anregung und Ionisation von Atomen) in einem beliebigen Körper dient die Energiedosis D

Als Grössen für die Beurteilung von Strahlenrisiken in einem menschlichen Körper dienen die Äquivalentdosis H und die effektive Dosis E



## Dosimetrie

### Messsysteme zur direkten Dosisbestimmung (Absolutdosimetrie)

- Kalorimetrie
- biologische Methoden zur Dosismessung
- Ionisationsdosimetrie

### Relativverfahren: Messsysteme bei denen die Dosen indirekt mit Hilfe von strahlenfeldabhängigen Kalibrierfaktoren und Umrechnungen ermittelt werden

- Ionisationsdosimetrie
- Filmdosimetrie
- Thermolumineszenz-Dosimetrie



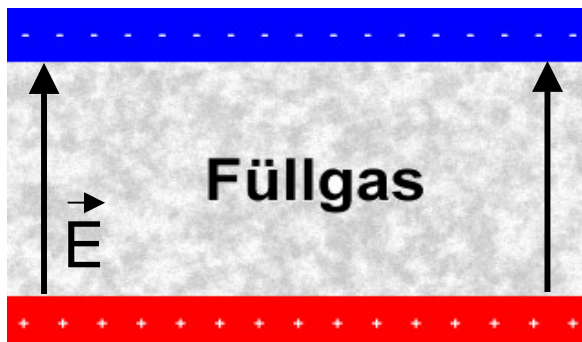
## In der Medizin verwendete Messtechniken



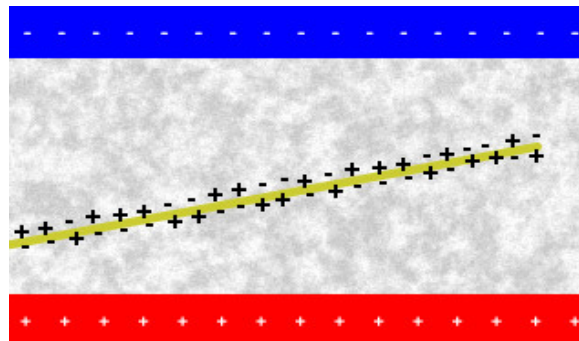
Strahlungseffekte	Nachweisgrößen	Detektoren
Ionisation in Gasen oder Flüssigkeiten	elektrische Ladung, Strom	Elektrometer, Ionisationskammern  Proportionalzählrohr  Auslösezählrohr
Ionisation in Festkörpern	elektrische Ladung, Strom	Halbleiter, Leitfähigkeitsdetektor
Lumineszenz	spontane Lichtemission  UV-Lichtemission bei Lichtexposition  Lichtemission beim Aufheizen (Thermolumineszenz)  Lichtemission bei UV-Exposition (Radiophotolumineszenz)  Lichtemission beim Auflösen in geeigneten Lösungsmitteln (Lyolumineszenz)	Szintillationsdetektor, Leuchtschirm, Verstärkerfolie  Speicherfolien  Thermolumineszenzdosimeter (LiF, CaSO <sub>4</sub> , BeO, CaF <sub>2</sub> , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Li <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub> )  Phosphatgläser  organische Verbindungen, Alkalihalogenide
Chemische Reaktionen	Farbumschläge durch Oxidation, Bruch von Kettenmolekülen mit Farbänderung und Radikalbildung  Nachweis von chemischen Radikalen mittels Elektronenspin-Resonanz (ESR)	Eisensulfatdosimeter, Verfärbungsdosimeter aus organischen Verbindungen  kristalline Substanzen (Alanin)
Photographische Wirkung	Schwärzung (opt. Dichte), Spuren	Filmemulsionen
Exoelektronenemission	Oberflächenladungsemission nach thermischer oder optischer Anregung	Kristalline Substanzen z. B. BeO, LiF, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , CaSO <sub>4</sub>
Wärme	Temperaturdifferenz	Kalorimeter
Biologische Effekte	zelluläre Veränderungen	Ringchromosomenzählung, Fluoreszenzanalyse der DNS

## Funktionsprinzip

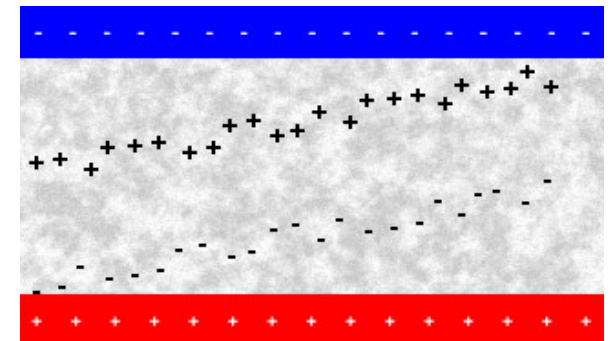
Sammlung von Ladung unter Wirkung von einem elektrischem Feld



Ionisationskammern bestehen aus einer mit Gas gefüllten Kammer und zwei Kondensator-platten. An den Platten liegt eine elektrische Spannung an

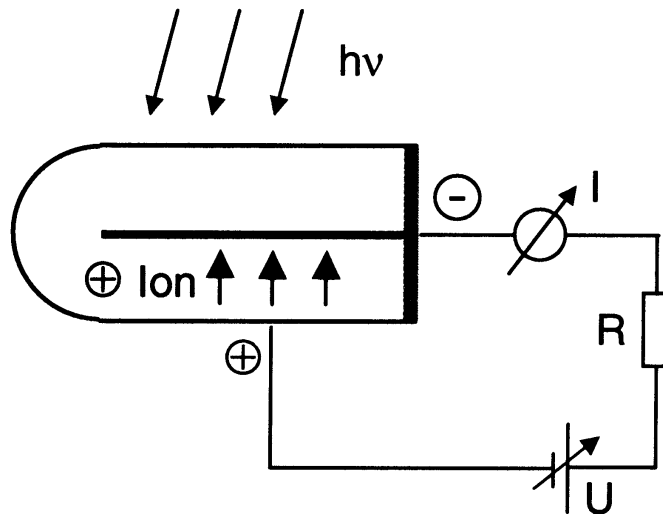


Tritt ein ionisierendes Teilchen in das Medium ein, erzeugt es auf seiner Flugbahn Elektronen-Ionen-Paare



Durch die anliegende Spannung werden die Ladungsträger getrennt und driften sofort entlang der elektrischen Feldlinien. Die Bewegung der Ladungsträger wird als Stromstoß registriert

## Funktionsweise



Prinzipdarstellung eines gasgefüllten Detektors

Der in einem Strahlenfeld resultierende Strom ist proportional zur Anzahl erzeugter Ionenpaare im Gasvolumen

- **Ionisationskammer**
- **Proportionalzählrohr**
- **Geiger-Müller-Zählrohr**



## Detektoren mit Gasfüllung

### Ionisationskammern

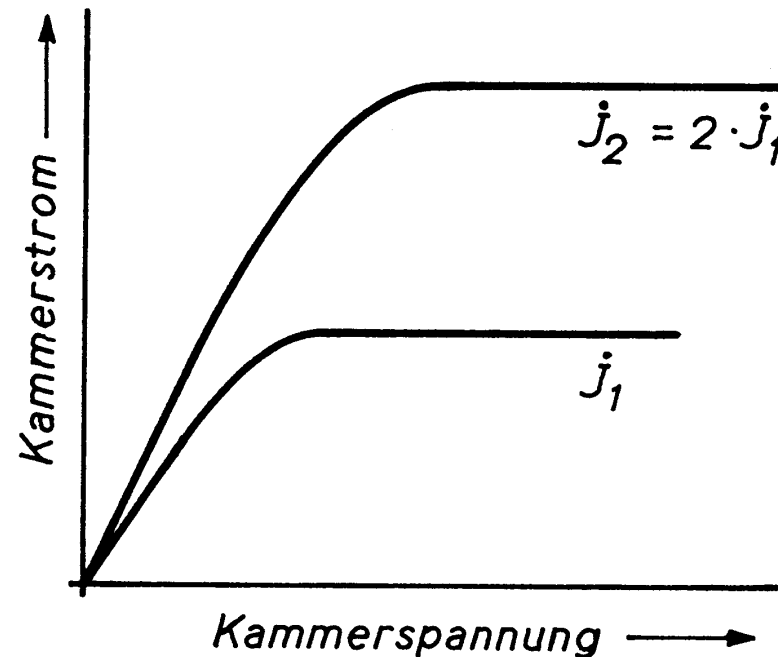
Durch Messung der strahleninduzierten Ionisationen (Ladung in Luft) lassen sich die Standard- oder Hohlraum-Ionendosis bestimmen.

Hierzu wird eine Spannung zwischen zwei Elektroden angelegt. Die im dazwischen liegenden Gasvolumen gebildeten Ionen wandern zur entsprechenden Elektrode, wodurch im angeschlossenen Stromkreis ein elektrischer Strom induziert wird, der proportional zur Anzahl gebildeter Ionenpaare ist.

Damit lässt sich neben der Ionendosis auch die Energiedosis in Luft bestimmen, da der mittlere Energieaufwand zur Erzeugung eines Ionenpaares in Luft bekannt ist ( $W/e = 33.97 \text{ eV}$ )



## Wahl der Kammerspannung



Strom-Spannungs-Charakteristik einer Ionisationskammer für zwei verschiedene Ionendosisleistungen  $J_1$  und  $J_2$ . Der Kammerstrom nimmt zunächst stetig mit der Kammerspannung bis zur Sättigung zu. Im Sättigungsbereich ist der Kammerstrom weitgehend unabhängig von der Kammerspannung; der Strom ist dann proportional zur Dosisleistung.

## Ionisationskammern



Farmer Kammern  $0.6 \text{ cm}^3$

## Ionisations-Messsystem

### Universal Dosimeter UNIDOS von der Firma PTW

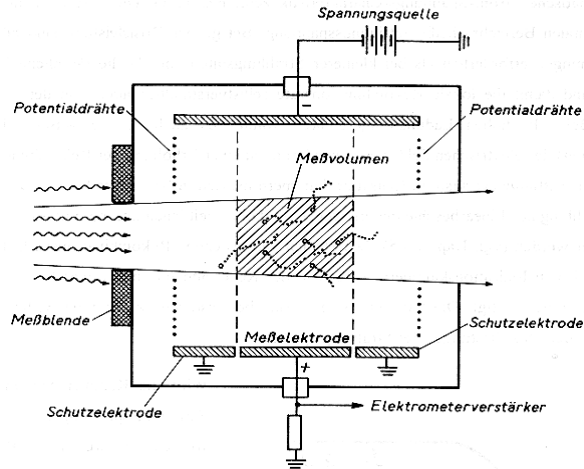


## Gasionisationssonden

### Einsatzbereiche

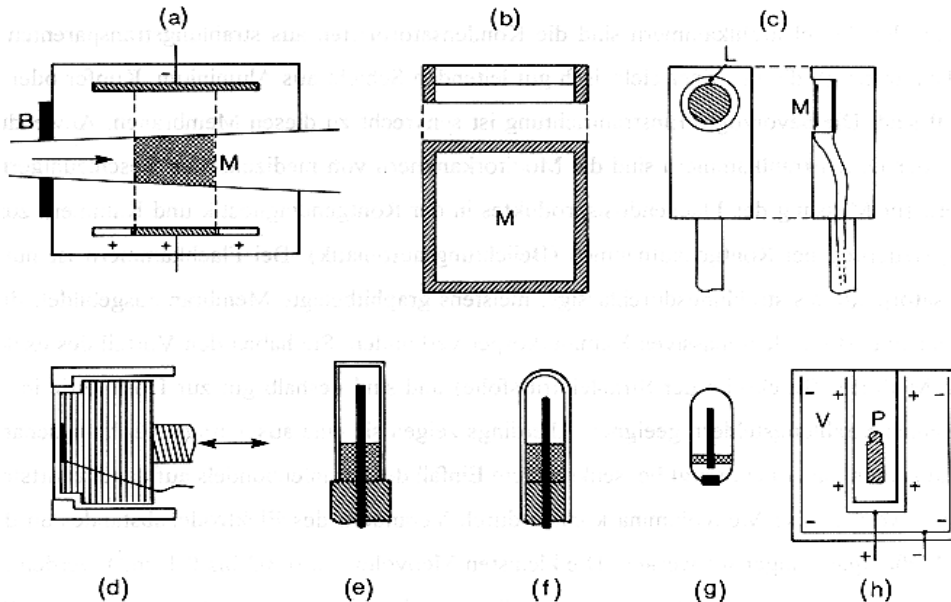
Anwendung	<u>Kammervol</u> (cm <sup>3</sup> )	Typ. Dosisleistung	<u>Ionisations-</u> <u>strom</u> [A]
Umgebungsstrahlung	$\geq 10^4$ +hoher Druck	0.1 mSv/h	$10^{-15}$ bis $10^{-13}$
Strahlenschutz ( <u>Ortsdosisleistung</u> )	$10^2$ bis $10^3$	10 bis 1000 mSv/h	$10^{-13}$ bis $10^{-11}$
Diagnostik	1-5	0.1 Gy/min	$10^{-11}$
Therapie	0.1 bis 1	1 Gy/min	$10^{-10}$
Weichstrahltherapie	0.03 bis 0.1	10 Gy/min	$10^{-10}$

## Bauformen von Ionisationskammern



### Parallelplattenkammer („Freiluftkammer“)

Dient in nationalen Laboratorien als Standardkammer für die Primärnormaldosimeter zu Eich- und Kalibrierzwecken



- a) Parallelplattenkammer.
- b) Durchstrahlkammer.
- c) Flachkammer.
- d) Extrapolationskammer.
- e) Zylinderkammer.
- f) Fingerhutkammer.
- g) Kondensatorkammer.
- h) Schachtkammer mit  $4\pi$  Geometrie

## Bauform von Ionisationskammern

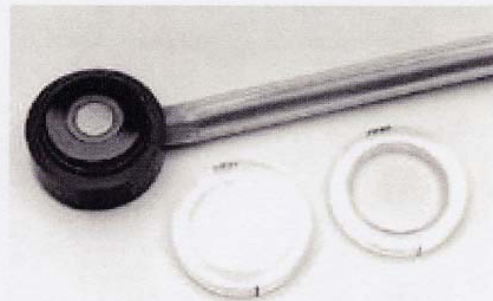
### Auswahl von klinisch verwendeten Ionisationskammern



Farmerkammer 0.6cc



Rigid Stem Chamber, 0.3 cc



Markus Chamber, 0.055 cc



PinPoint Chamber, 0.015 cc

## SS-Ionisationskammer



Fass Kammer  $600 \text{ cm}^3$

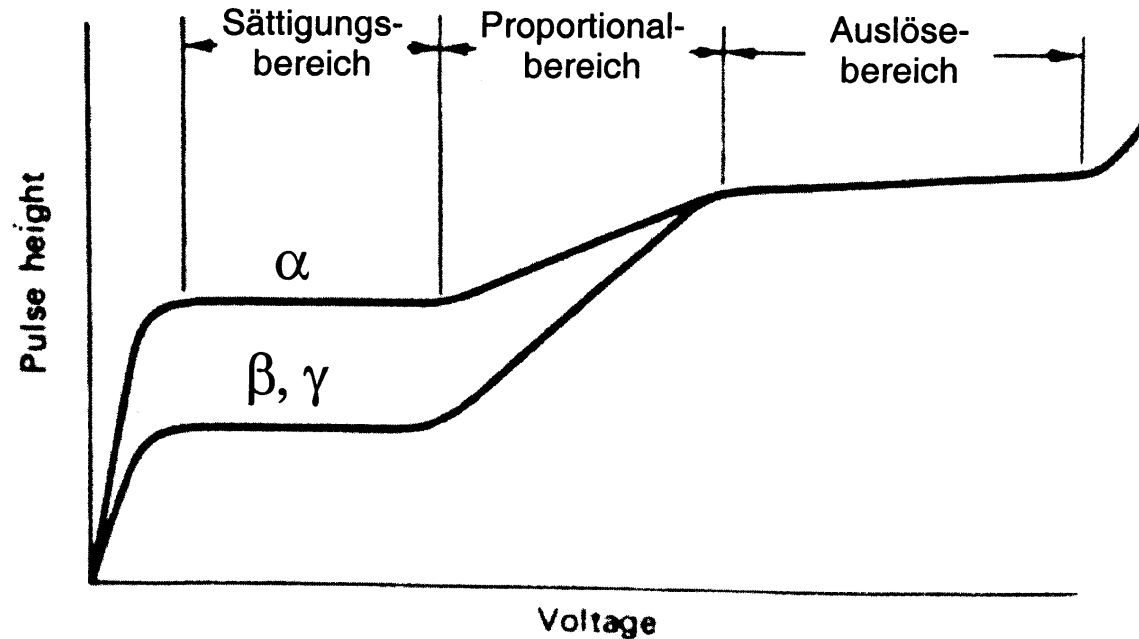
## **Zählrohre**

**Proportionalzähler**

**Geiger-Müller-Zähler**



## Kammer- bzw. Zählrohrspannung



Impulshöhe eines Zählrohres in Abhängigkeit von der Zählrohrspannung. Es lassen sich verschiedene Bereiche unterscheiden, wobei der Proportional- und der Auslösebereich für Zählrohre nutzbar sind.

## Proportionalzählrohr

- Arbeitsspannung: mehrere 100 V bis 1000 V
- Stossmultiplikation abhängig von der Arbeitsspannung
- Kammer meist mit Edelgas (Argon, Neon) gefüllt
- Total freigesetzte Ladung proportional zur deponierten Strahlungsenergie



## Proportional- und GM-Zähler

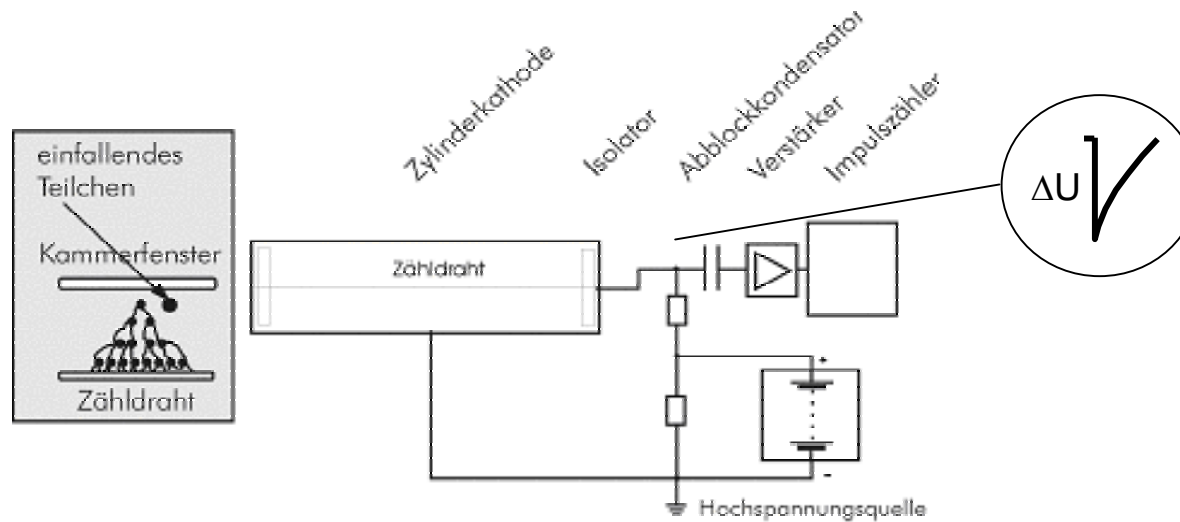
**Stossmultiplikation durch Beschleunigung der angestossenen Gaselektronen**

**Durch ionisierende Strahlung angestossene Elektronen werden durch eine hohe Zählerspannung derart beschleunigt, dass diese genügend Energie aufnehmen um im Zählgas eine Elektronenlawine auszulösen**

**Der Zusammenhang zwischen erzeugter Ladung und primärer Strahlenwirkung hängt stark von der angelegten Zählerspannung ab**



## Proportionalzählrohr (PZ)



Gesammelte Ladung ist größer als primär gebildete Ladung

- Angelegte Spannung = mehrere 100 V bis 1000 V
- Kammervolumen meist gefüllt mit einem **Edelgas**
- **Gasverstärkung**, d.h. primär erzeugtes Elektron wird durch die hohe Spannung so stark beschleunigt, dass bei Zusammenstößen mit Gasatomen weitere Elektronen freigesetzt werden (**Elektronenlawine**)
- Die total freigesetzte Ladung (Impulshöhe) ist **proportional** zur Energie und Anzahl der primären Elektronen.
  - Bestimmung der Teilchen**art** ist möglich
  - Bestimmung der spektralen Verteilung der **Energie** der Teilchen ist möglich (Für  $\alpha$ -Teilchen und energiearme  $\beta$ - und  $\gamma$ -Strahlung)

## Geiger-Müller-Zähler

Arbeitsspannung  $> 1000 \text{ V}$

Grosse Stossmultiplikation

Freigesetzte Ladungen unabhängig von der primär deponierten Strahlungsenergie

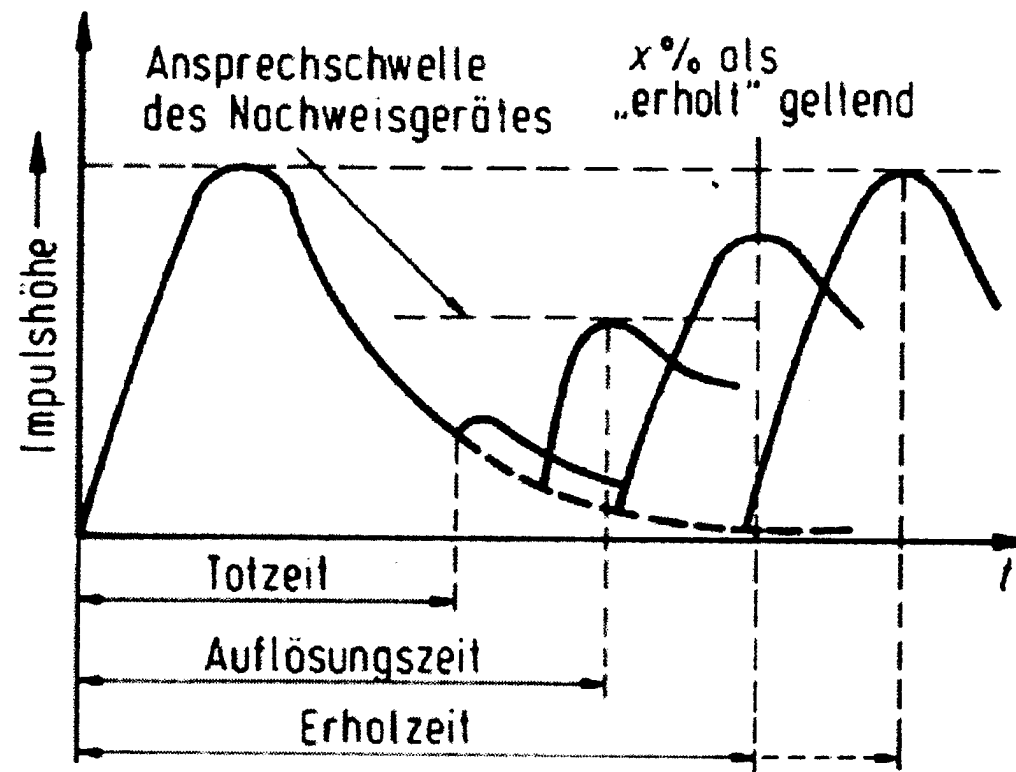
- Hochempfindliches Nachweisgerät
- kein Dosimeter!

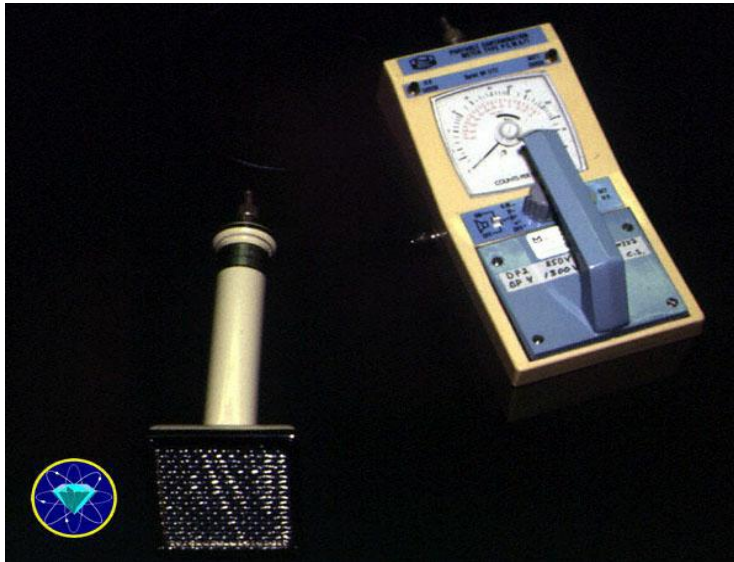
Probleme

- Löschung der Entladung
  - Absenkung der Spannung
  - Zusatz von organischen Löschgasen (Ethylalkohol)
- Totzeit (bis zu 10 ms)



## Totzeit





## In der Medizin verwendete Messtechniken



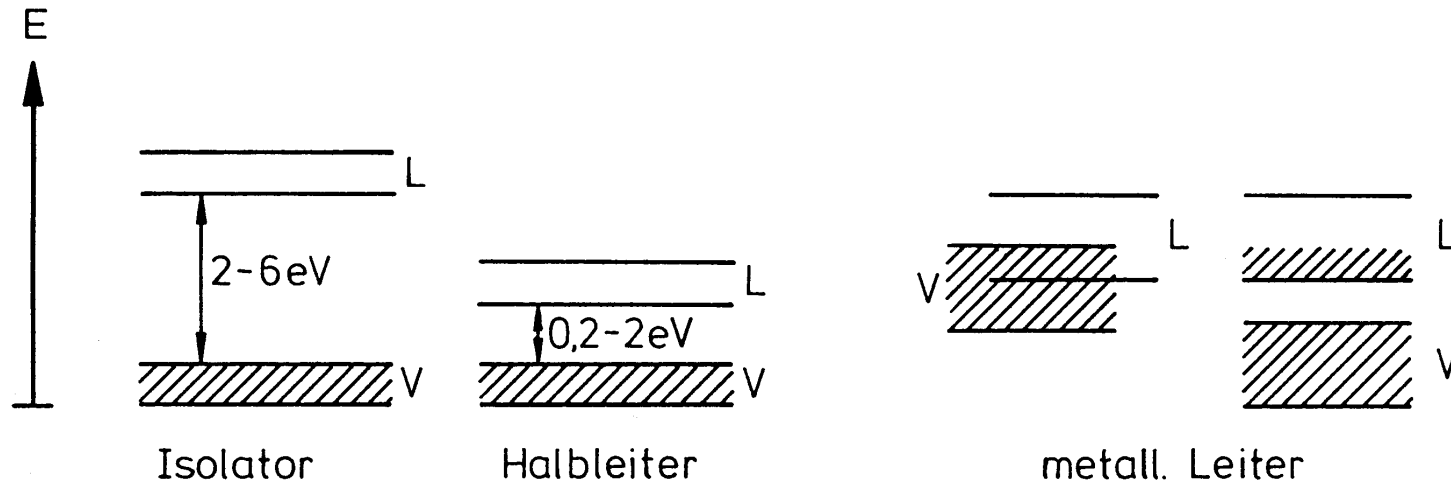
Strahlungseffekte	Nachweisgrößen	Detektoren
Ionisation in Gasen oder Flüssigkeiten	elektrische Ladung, Strom	Elektrometer, Ionisationskammern  Proportionalzählrohr  Auslösezählrohr
Ionisation in Festkörpern	elektrische Ladung, Strom	Halbleiter, Leitfähigkeitsdetektor
Lumineszenz	spontane Lichtemission  UV-Lichtemission bei Lichtexposition  Lichtemission beim Aufheizen (Thermolumineszenz)  Lichtemission bei UV-Exposition (Radiophotolumineszenz)  Lichtemission beim Auflösen in geeigneten Lösungsmitteln (Lyolumineszenz)	Szintillationsdetektor, Leuchtschirm, Verstärkerfolie  Speicherfolien  Thermolumineszenzdosimeter (LiF, CaSO <sub>4</sub> , BeO, CaF <sub>2</sub> , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Li <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub> )  Phosphatgläser  organische Verbindungen, Alkalihalogenide
Chemische Reaktionen	Farbumschläge durch Oxidation, Bruch von Kettenmolekülen mit Farbänderung und Radikalbildung  Nachweis von chemischen Radikalen mittels Elektronenspin-Resonanz (ESR)	Eisensulfatdosimeter, Verfärbungsdosimeter aus organischen Verbindungen  kristalline Substanzen (Alanin)
Photographische Wirkung	Schwärzung (opt. Dichte), Spuren	Filmemulsionen
Exoelektronenemission	Oberflächenladungsemission nach thermischer oder optischer Anregung	Kristalline Substanzen z. B. BeO, LiF, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , CaSO <sub>4</sub>
Wärme	Temperaturdifferenz	Kalorimeter
Biologische Effekte	zelluläre Veränderungen	Ringchromosomenzählung, Fluoreszenzanalyse der DNS

## Festkörperdetektoren

- Leitfähigkeitsdetektoren
- Halbleiterdetektoren
- Lumineszenzdetektoren



# Festkörperdetektoren



Anordnung von Valenzband und Leitungsband in Kristallen (V: Valenzband, L: Leitungsband, G: Energielücke). Beim Isolator ist der Bandabstand ca. 2-6 eV, beim Halbleiter etwa 0.2-2 eV. Beim Metallgitter überlappen entweder V- und L-Band oder das L-Band ist nur zur Hälfte gefüllt. In beiden Fällen sind Elektronen frei im Kristall beweglich.

## Leitfähigkeitsdetektor



Diamant-Detektor

## Halbleiter-Dosimetrie

In gewissen Stoffen wie Silizium und Germanium entstehen bei Bestrahlung Ladungsträgerpaare. Die Leitfähigkeitseigenschaften der Halbleiter werden durch das Bändermodell beschrieben.

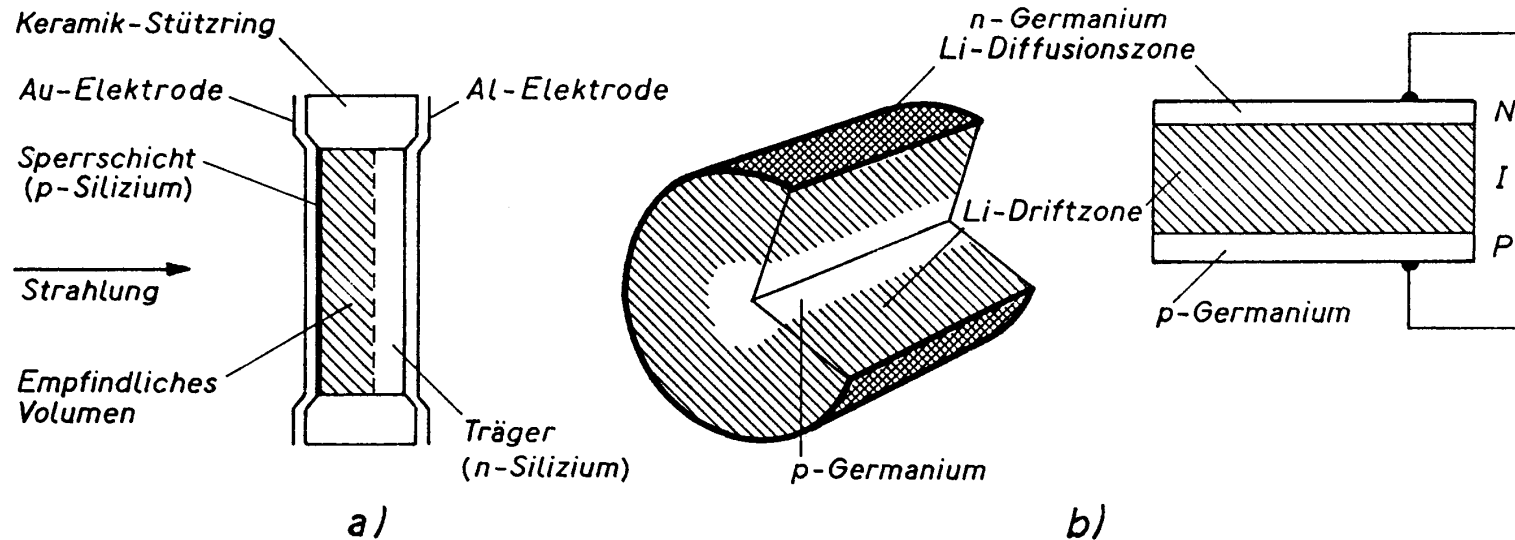
Im Valenzband sind die Ladungsträger unbeweglich. Durch Energiezufuhr (z. Bsp. Strahlenexposition) können diese in das höher liegende Leitungsband gehoben werden, in dem sie beweglich sind. Der Ladungstransport im Leitungsband wird durch Elektronen oder Löcher (Defektelektronen) bewirkt.

Je nachdem, ob die Zahl der Elektronen oder Löcher überwiegt, spricht man von **n- oder p-leitendem Material**. Die durch Strahlung erzeugten Ionenpaare können als Stromsignale registriert werden.

In einem solchen Detektor werden bei gleicher Energieabsorption ca. 20'000mal mehr Ladungsträger erzeugt als in Luft. Entsprechend werden solche Detektoren vor allem dort angewandt, wo kurze Messzeiten und hohe räumliche Auflösung erreicht werden sollen.



## Halbleiter-Ionisationsdetektoren

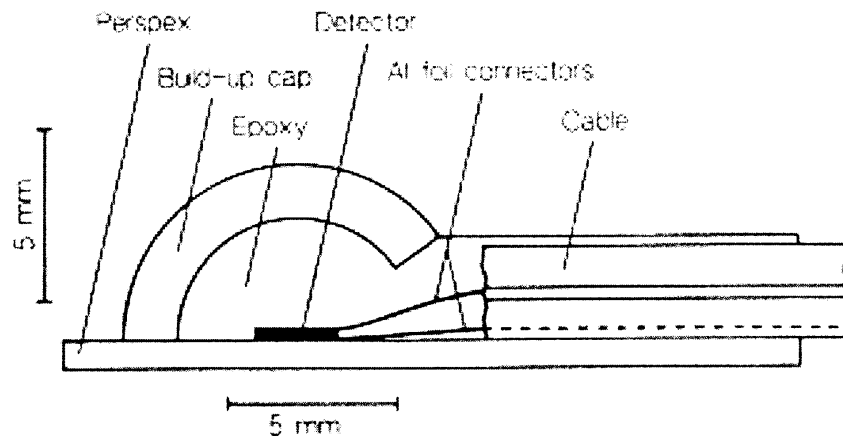


Bauformen von Halbleiterdetektoren. (a) Oberflächen-Sperrschichtdetektor (p-n-Diode). (b) Lithiumgedriftete Germaniumdetektoren (Ge(Li)s) mit p-i-n-Struktur in koaxialer (links) und planarer (rechts) Ausführung.

## Halbleiter

### Detektoren für in-vivo Dosimetrie:

- p-Si Halbleiter vorbestrahlt
- Temperaturabhängigkeit 0.35% pro °C (Kalibrationsbedingungen!)
- Je nach Anwendung unterschiedliche Bauform (variable Dicke von build-up cap)

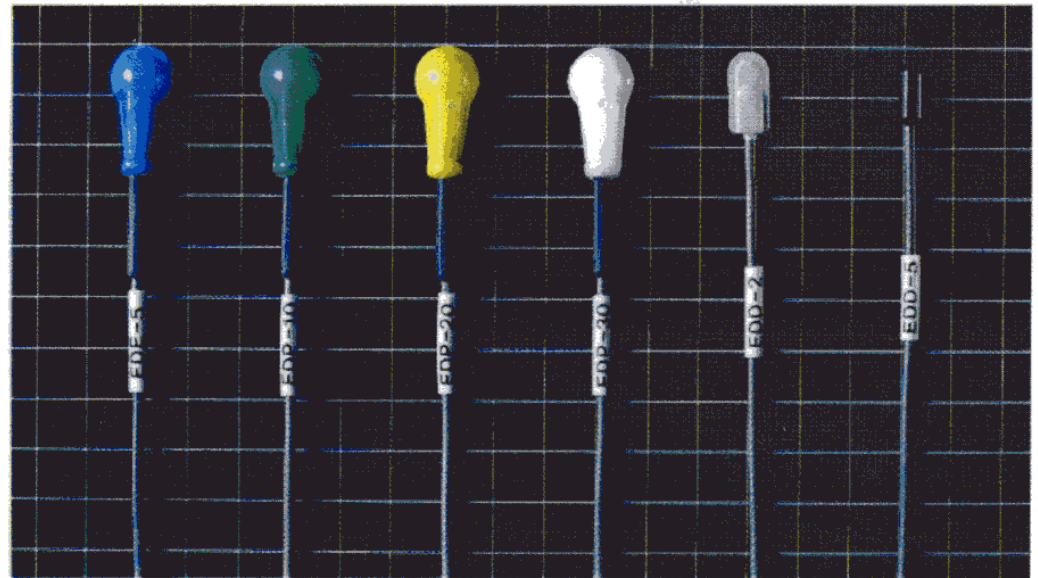
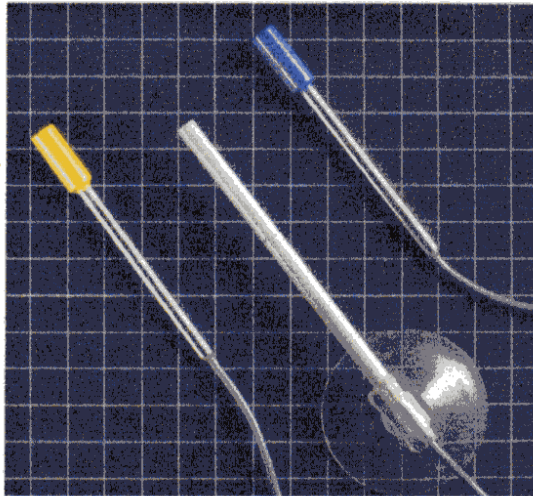


*Figure 11. The design of the Scanditronix p-Si patient dosimetry detector. The thickness of the build-up cap differs for different detectors.*

## Halbleiter-Detektoren

### Patientendosimetrie

#### Scanditronix p-Si Detektoren



Scanditronix patient dosimetry detectors. Left to right: EDE-5, EDP-10, EDP-20, EDP-30, EDD-2, EDD-5.

## In der Medizin verwendete Messtechniken



Strahlungseffekte	Nachweisgrößen	Detektoren
Ionisation in Gasen oder Flüssigkeiten	elektrische Ladung, Strom	Elektrometer, Ionisationskammern  Proportionalzählrohr  Auslösezählrohr
Ionisation in Festkörpern	elektrische Ladung, Strom	Halbleiter, Leitfähigkeitsdetektor
Lumineszenz	spontane Lichtemission  UV-Lichtemission bei Lichtexposition  Lichtemission beim Aufheizen (Thermolumineszenz)  Lichtemission bei UV-Exposition (Radiophotolumineszenz)  Lichtemission beim Auflösen in geeigneten Lösungsmitteln (Lyolumineszenz)	Szintillationsdetektor, Leuchtschirm, Verstärkerfolie  Speicherfolien  Thermolumineszenzdosimeter (LiF, CaSO <sub>4</sub> , BeO, CaF <sub>2</sub> , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Li <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub> )  Phosphatgläser  organische Verbindungen, Alkalihalogenide
Chemische Reaktionen	Farbumschläge durch Oxidation, Bruch von Kettenmolekülen mit Farbänderung und Radikalbildung  Nachweis von chemischen Radikalen mittels Elektronenspin-Resonanz (ESR)	Eisensulfatdosimeter, Verfärbungsdosimeter aus organischen Verbindungen  kristalline Substanzen (Alanin)
Photographische Wirkung	Schwärzung (opt. Dichte), Spuren	Filmemulsionen
Exoelektronenemission	Oberflächenladungsemission nach thermischer oder optischer Anregung	Kristalline Substanzen z. B. BeO, LiF, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , CaSO <sub>4</sub>
Wärme	Temperaturdifferenz	Kalorimeter
Biologische Effekte	zelluläre Veränderungen	Ringchromosomenzählung, Fluoreszenzanalyse der DNS

## Lumineszenzdetektoren

- Szintillatoren
- Verstärkerfolien
- Röntgenbildverstärker
- Thermolumineszenzdetektoren
- Photolumineszenzdetektoren



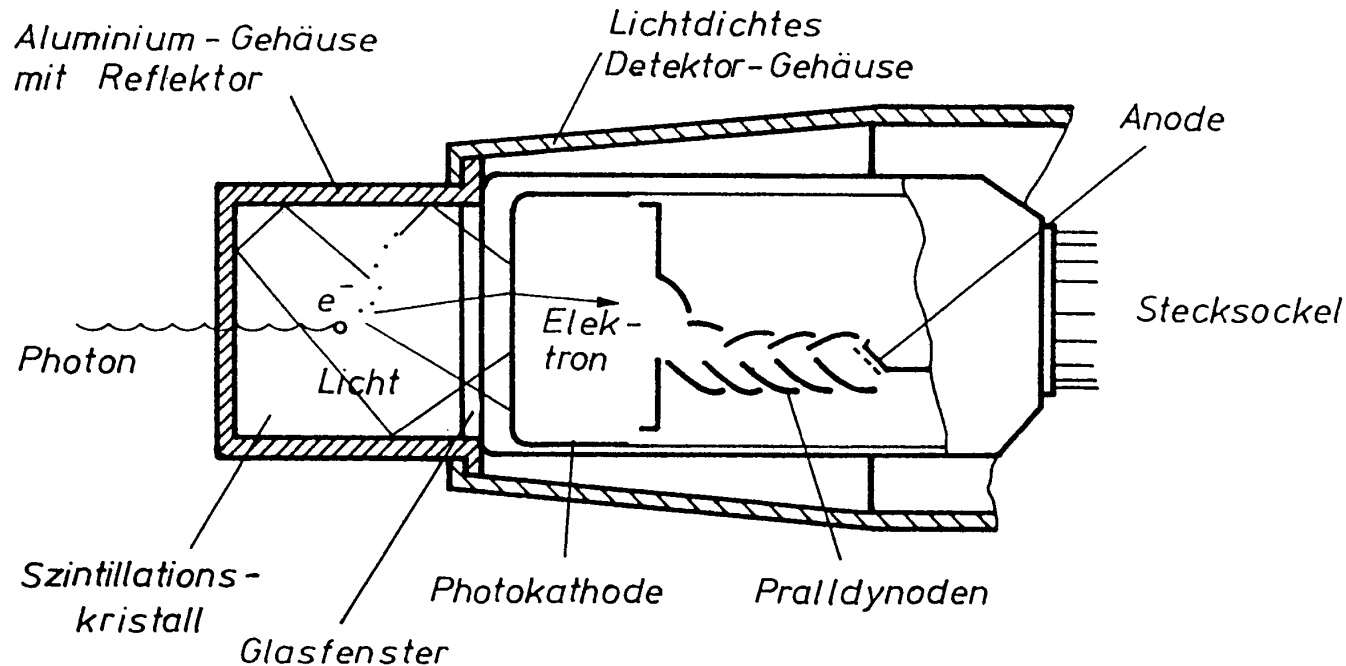
## Szintillatoren

Szintillator	$Z_{\text{eff}}$	$\lambda_{\text{max}}$ (nm)	Ausbeute (%)	Abklingzeit (ns)	Dichte ( $\text{g/cm}^3$ )	Bemerkungen
<b>Anorganische Szintillatoren:</b>						
NaJ(Tl)	50	410	10	250	3.67	sehr hygroskopisch, große und reine Kristalle
CsJ(Tl)	54	420-450	7.5	550	4.51	nicht hygroskopisch
ZnS(Ag)	27	450	10	3000	4.1	sehr kleine Kristalle
CdS(Ag)	44	760	10	>1000	4.8	gelb
CaWO <sub>4</sub>	59	430	5	>1000	6.06	kleine Kristalle
Gläser	20	400	0.5	40 - 50	2.0	chemisch inert, preiswert
<b>Organische Szintillatoren:</b>						
Anthrazen	5.8	445	5	25	1.25	org. Kristalle
Stilben	5.7	438	3.7	7	1.16	org. Kristalle
Terphenyl	5.8	415	2.75	12	1.12	org. Kristalle
Diphenylaze- thylen	5.8	390	1.3 - 4.6	7	1.18	org. Kristalle
Polyvinyl- toluol	5.6	380	2	3	1.0	fester Kunststoff mit 4% gelöstem Terphenyl und 0.1% Diphenylstilben als Aktivoren
Toluol	5.6	430	2-3	<3	0.87	org. Flüssigkeit mit gelöstem p-Terphenyl als Aktivator
Xylol	5.6	365-380	2.5-3.5	3	0.87	org. Flüssigkeit mit gelöstem Terphenyl, PBD oder DPO als Aktivoren

Daten einiger anorganischer und organischer Szintillatoren (nach [Kohlrausch]).



## Szintillationszähler



**Aufbau eines Szintillationszählers:** Das einfallende Photon erzeugt in einem Szintillator sichtbares Licht. Dieses löst in einer Photokathode Elektronen aus, die durch Stoßprozesse in den Dynoden des Sekundärelektronen-Vervielfachers (Photomultiplier) vervielfacht werden. Der mit der Zahl der Dynodenstufen exponentiell anwachsende Elektronenstrom wird als Spannungsimpuls an der Anode nachgewiesen.

## Thermolumineszenz-Dosimetrie (TLD)

Geeignete Stoffe (z.Bsp. LiF) werden durch Strahlenexposition in einen angeregten Zustand versetzt. Dabei gelangen Elektronen aus dem Valenz-Band in das Leiterband, in welchem sie frei beweglich sind. Bei der Diffusion können Elektronen durch den Ionen-Kristall an sog. Haftstellen eingefangen werden, die sich auf einem Energieniveau in der verbotenen Zone unterhalb des Leitungsbandes befinden. Die Haftstellen werden durch Einbau von Aktivatoratome in den Ionen-Kristal erzeugt.

Durch Erhitzen der Ionen-Kristalle (TLD's) gelangen die festgehaltenen Elektronen wieder in das Leitungsband und können durch Diffusion in das Valenzband zurückfallen, wo sie mit den Löchern rekombinieren. Die bei diesem Übergang freigesetzte Energie wird in Form von Licht abgegeben und kann mit einem Photomultiplier gemessen werden.

Die emittierte Lichtmenge ist ein Mass für die zuvor absorbierte Strahlenenergie.



## Thermolumineszenzdosimeter



## TLD-Messsystem

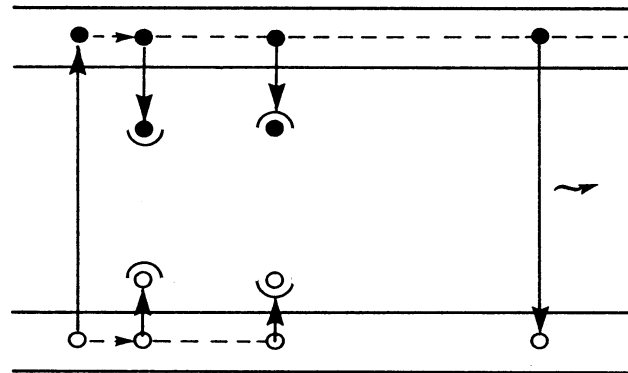


## TLD-Ausglühofen

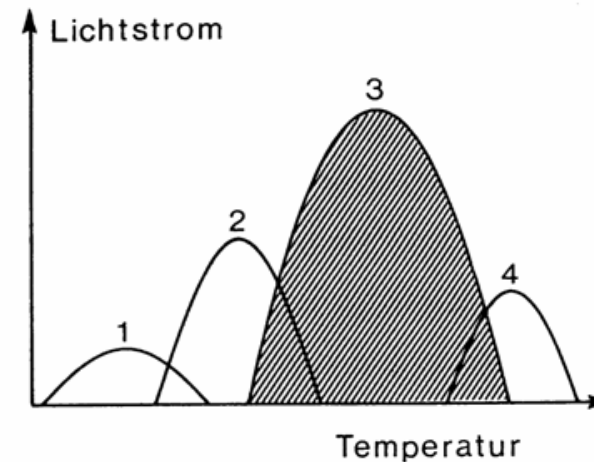
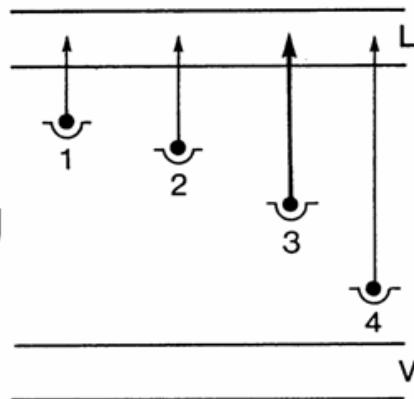


## Thermolumineszenz-Effekt

### Strahlenexposition

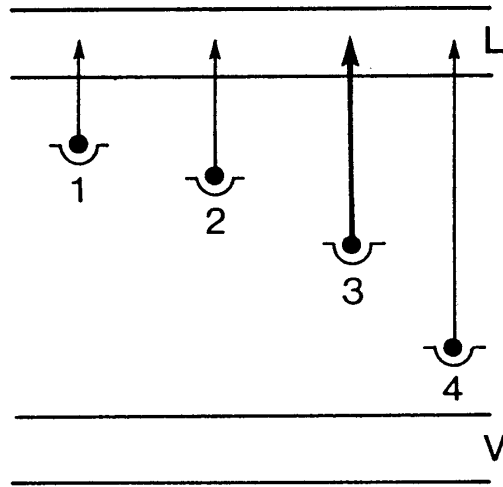


### Auswertung

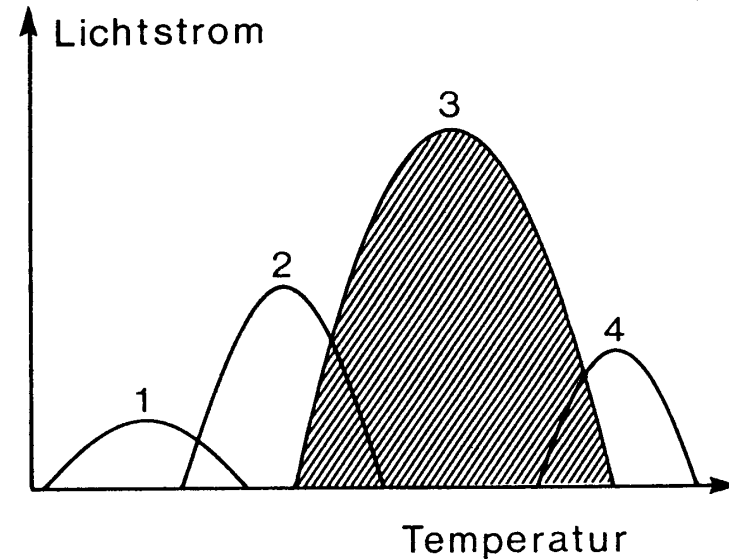


# Thermolumineszenzdetektoren TLD

Auswertung



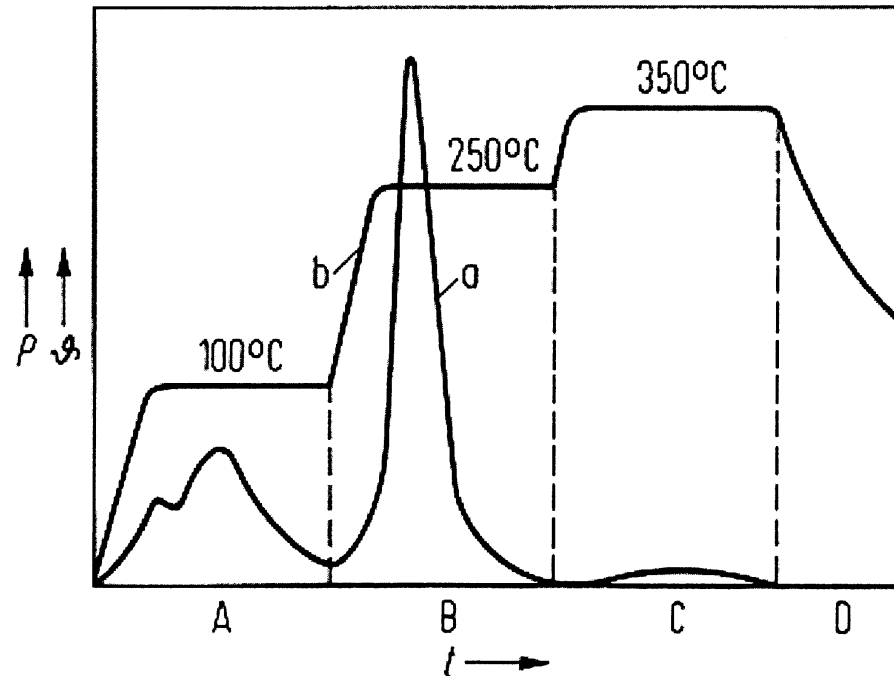
(a)



(b)

(a): Schematische Darstellung der Lage verschiedener Elektronentraps (1-4) in der Energielücke eines TLD. (b): Komponenten der zugehörigen Glowkurve beim Ausheizen eines bestrahlten TLD (schematisch). Die zu einer bestimmten Traptiefe gehörige Lichtausbeute entspricht der Fläche unter der entsprechenden Glowkurve. Experimentelle Glowkurven bestehen aus der Summe der Einzelkomponenten. Trap (1) entleert sich schon bei Zimmertemperatur, da der Abstand zum Leitungsband zu gering ist (Fading). Glowkurve (3) hat die höchste Lichtausbeute, da die Trappzustände (3) am stärksten besetzt waren.

## Glühkurve



Figur: Glowkurve für LiF. Kurve a zeigt die Glowkurve bei einem durch Kurve b gegebenen Temperatur-Zeit-Verlauf der Aufheizung. Die Messung der Lichtsumme ist auf den Bereich B beschränkt. Im Bereich C erfolgt das Annealing.

## Eigenschaften einiger Thermolumineszenzmaterialien:

TL-Material	Dosismeßbereich (Proportionalbereich <sup>1)</sup> ) in Gy	Dichte in $\text{g cm}^{-3}$	Effektive Ordnungszahl	Lage der Hauptmaxima der Glowkurve <sup>2)</sup> in °C	Wellenlänge der Maxima der TL-Emission in nm	Energieabhängigkeit des rel. Ansprechvermögens <sup>3)</sup> a)    b)		Fading bei Umgebungstemperatur <sup>4)</sup> M. Monate W. Wochen
LiF:Mg, Ti	$10^{-5}$ bis $10^2$ (bis 10)	2.64	8.2	200	400	1.25	1.40	5% in 12 M.
CaF <sub>2</sub> :Mn	$10^{-6}$ bis $10^4$ (bis $10^3$ )	3.18	16.3	260	500	15	17	10% in 24 h. 25% in 4 W.
CaF <sub>2</sub> :Dy	$10^{-7}$ bis $10^4$ (bis $10^3$ )	3.18	16.3	200, 240	480, 580	15	17	10% in 24 h 25% in 4 W.
CaSO <sub>4</sub> :Dy	$10^{-6}$ bis $10^3$	2.61	15.3	220, 250	480, 570	10	11.5	5% in 6 M.
CaSO <sub>4</sub> :Tm	$10^{-6}$ bis $10^3$	2.61	15.3	220, 250	450	10	11.5	5% in 6 M.
CaSO <sub>4</sub> :Mn	$10^{-7}$ bis $10^2$	2.61	15.3	100	500	10	11.5	35% in 24 h.
BeO	$10^{-4}$ bis $10^3$ (bis 10)	3.01	7.1	180, 200	330	0.8	0.97	> 5% in 6 M.
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	$10^{-3}$ bis $10^3$		10.2	240	400	3.3	3.5	gering <sup>5)</sup>
Li <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub>	$10^{-4}$ bis $10^3$ (bis 10)	2.3	7.4	220	600	0.9	1.04	> 5% in 3 M.

## Fadingeigenschaften verschiedener TLD

TL-Material (: Dotierung)	Thermisches Fading bei 20-25°C	optisches Fading (einschl. UV)
LiF:Mg,Ti	5% in 3 Monaten	schwach
Li <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub> :Mn	10% in 2 Monaten	schwach
CaSO <sub>4</sub> :Dy	1-2% pro Monat	schwach
CaSO <sub>4</sub> :Mn	36% pro Tag	
BeO	bis 8% in 3 Monaten	stark
CaF <sub>2</sub> :Dy	25% im 1. Monat	stark
CaF <sub>2</sub> :Mn	10% im 1. Monat	
CaF <sub>2</sub> (nat.)	< 3% in 9 Monaten	Trap-Wanderung

Fadingeigenschaften der für die Dosimetrie verwendeten Glow-Peaks einiger üblicher Thermolumineszenzmaterialien.

## In der Medizin verwendete Messtechniken



Strahlungseffekte	Nachweisgrößen	Detektoren
Ionisation in Gasen oder Flüssigkeiten	elektrische Ladung, Strom	Elektrometer, Ionisationskammern  Proportionalzählrohr  Auslösezählrohr
Ionisation in Festkörpern	elektrische Ladung, Strom	Halbleiter, Leitfähigkeitsdetektor
Lumineszenz	spontane Lichtemission  UV-Lichtemission bei Lichtexposition  Lichtemission beim Aufheizen (Thermolumineszenz)  Lichtemission bei UV-Exposition (Radiophotolumineszenz)  Lichtemission beim Auflösen in geeigneten Lösungsmitteln (Lyolumineszenz)	Szintillationsdetektor, Leuchtschirm, Verstärkerfolie  Speicherfolien  Thermolumineszenzdosimeter (LiF, CaSO <sub>4</sub> , BeO, CaF <sub>2</sub> , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Li <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub> )  Phosphatgläser  organische Verbindungen, Alkalihalogenide
Chemische Reaktionen	Farbumschläge durch Oxidation, Bruch von Kettenmolekülen mit Farbänderung und Radikalbildung  Nachweis von chemischen Radikalen mittels Elektronenspin-Resonanz (ESR)	Eisensulfatdosimeter, Verfärbungsdosimeter aus organischen Verbindungen  kristalline Substanzen (Alanin)
Photographische Wirkung	Schwärzung (opt. Dichte), Spuren	Filmemulsionen
Exoelektronenemission	Oberflächenladungsemission nach thermischer oder optischer Anregung	Kristalline Substanzen z. B. BeO, LiF, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , CaSO <sub>4</sub>
Wärme	Temperaturdifferenz	Kalorimeter
Biologische Effekte	zelluläre Veränderungen	Ringchromosomenzählung, Fluoreszenzanalyse der DNS

## Chemische Dosimeter

Metallionen in wässriger Lösung werden durch ionisierende Strahlen in eine andere Oxidationsstufe überführt. Sie zeigen entsprechend ihrer chemischen Wertigkeit in der Lösung charakteristische Lichtabsorptionen, die mit einem Spektralphotometer gemessen und zur Bestimmung ihrer Konzentration verwendet werden können.

Zur Absolutbestimmung der Wasser-Energiedosis werden chemische Dosimeter auf der Basis von Eisensulfat-Lösungen ("Fricke-Lösung") verwendet, die in Ampullen mit Volumina zwischen 1 und 10 ml zum Einsatz kommen. Bei entsprechender Kalibrierung der Lösung lassen sich damit Wasser-Energiedosen von 10-400 Gy mit Messunsicherheiten von etwa 1% bestimmen.



## In der Medizin verwendete Messtechniken



Strahlungseffekte	Nachweisgrößen	Detektoren
Ionisation in Gasen oder Flüssigkeiten	elektrische Ladung, Strom	Elektrometer, Ionisationskammern  Proportionalzählrohr  Auslösezählrohr
Ionisation in Festkörpern	elektrische Ladung, Strom	Halbleiter, Leitfähigkeitsdetektor
Lumineszenz	spontane Lichtemission  UV-Lichtemission bei Lichtexposition  Lichtemission beim Aufheizen (Thermolumineszenz)  Lichtemission bei UV-Exposition (Radiophotolumineszenz)  Lichtemission beim Auflösen in geeigneten Lösungsmitteln (Lyolumineszenz)	Szintillationsdetektor, Leuchtschirm, Verstärkerfolie  Speicherfolien  Thermolumineszenzdosimeter (LiF, CaSO <sub>4</sub> , BeO, CaF <sub>2</sub> , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Li <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub> )  Phosphatgläser  organische Verbindungen, Alkalihalogenide
Chemische Reaktionen	Farbumschläge durch Oxidation, Bruch von Kettenmolekülen mit Farbänderung und Radikalbildung  Nachweis von chemischen Radikalen mittels Elektronenspin-Resonanz (ESR)	Eisensulfatdosimeter, Verfärbungsdosimeter aus organischen Verbindungen  kristalline Substanzen (Alanin)
Photographische Wirkung	Schwärzung (opt. Dichte), Spuren	Filmemulsionen
Exoelektronenemission	Oberflächenladungsemission nach thermischer oder optischer Anregung	Kristalline Substanzen z. B. BeO, LiF, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , CaSO <sub>4</sub>
Wärme	Temperaturdifferenz	Kalorimeter
Biologische Effekte	zelluläre Veränderungen	Ringchromosomenzählung, Fluoreszenzanalyse der DNS

## Film-Dosimetrie

Die Filmdosimetrie beruht auf der quantitativen Auswertung der optischen Dichte bestrahlter und entwickelter Filmemulsionen. Zur Kalibrierung wird die Schwärzung mit dem unter gleichen Bestrahlungsbedingungen erhaltenen Messergebnis eines absoluten Dosimetrieverfahrens in Beziehung gebracht.

Der Film zeichnet sich nicht nur durch sein grosses Auflösungsvermögen aus, sondern erreicht auch eine grosse Empfindlichkeit. Sein Ansprechvermögen hängt in der Praxis nicht von der Dosisleistung ab.

In der Strahlentherapie werden Filme wegen deren mit anderen Dosimetern unerreichten Auflösungsvermögen insbesondere zur Bestimmung relativer Dosisverteilungen in Phantomen verwendet.

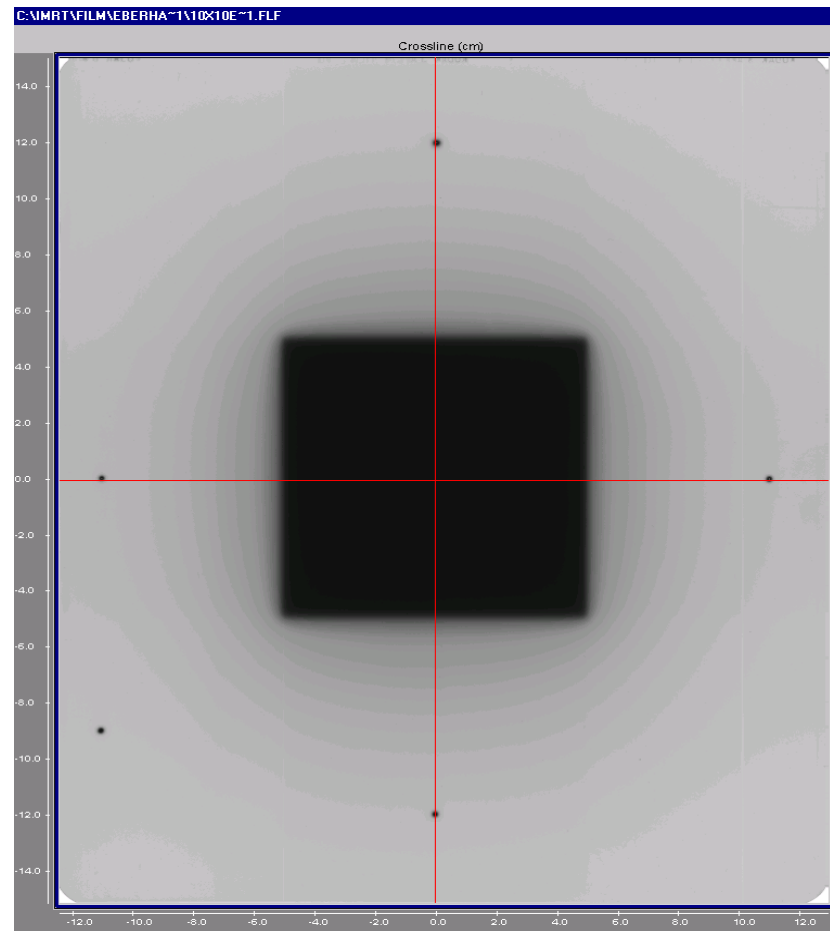
Grosser Nachteil der Filme ist die Tatsache, dass die Schwärzung wesentlich durch die Filmentwicklung beeinflusst werden kann sowie die starke Energieabhängigkeit des Ansprechvermögens A:

$$\text{Photonen :} \quad A(35\text{KeV})_{\text{max}} = 40 * A(500\text{KeV})$$

$$\text{Elektronen:} \quad A(100\text{KeV})_{\text{max}} = 2 * A(500\text{KeV})$$



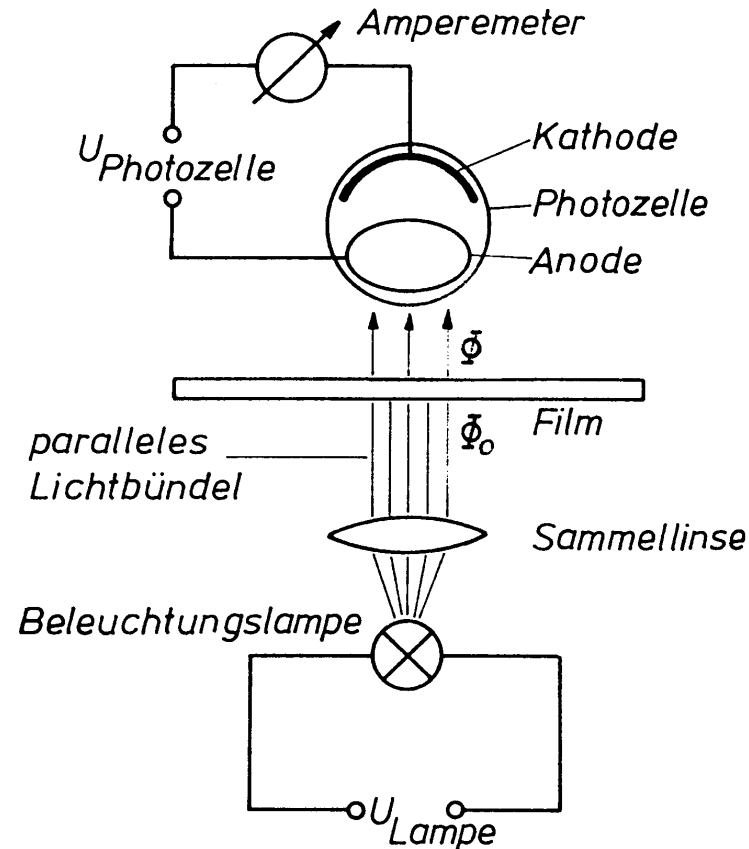
## Filmschwärzung



## Densitometrie

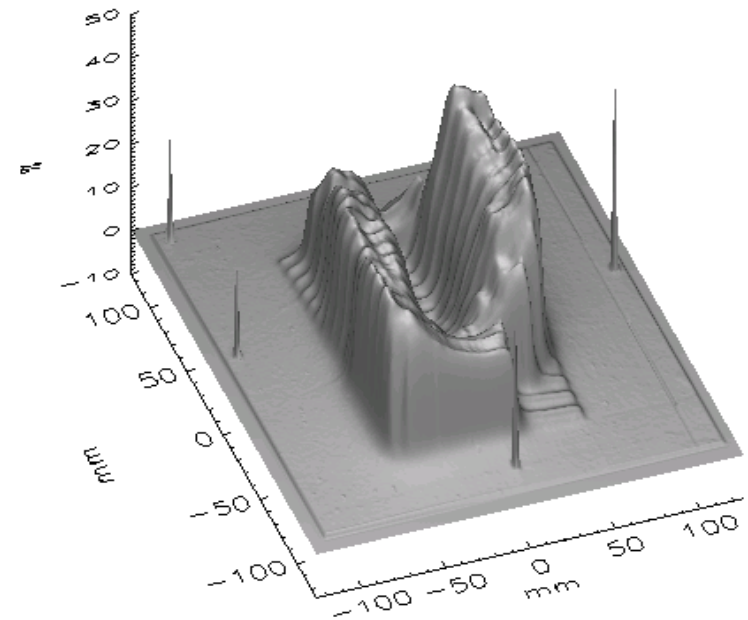
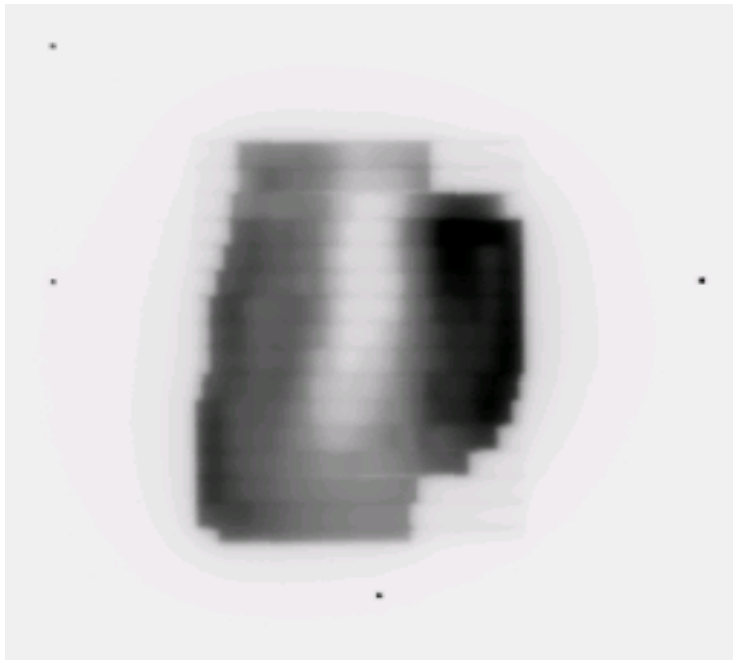


## Prinzip der Filmdosimetrie

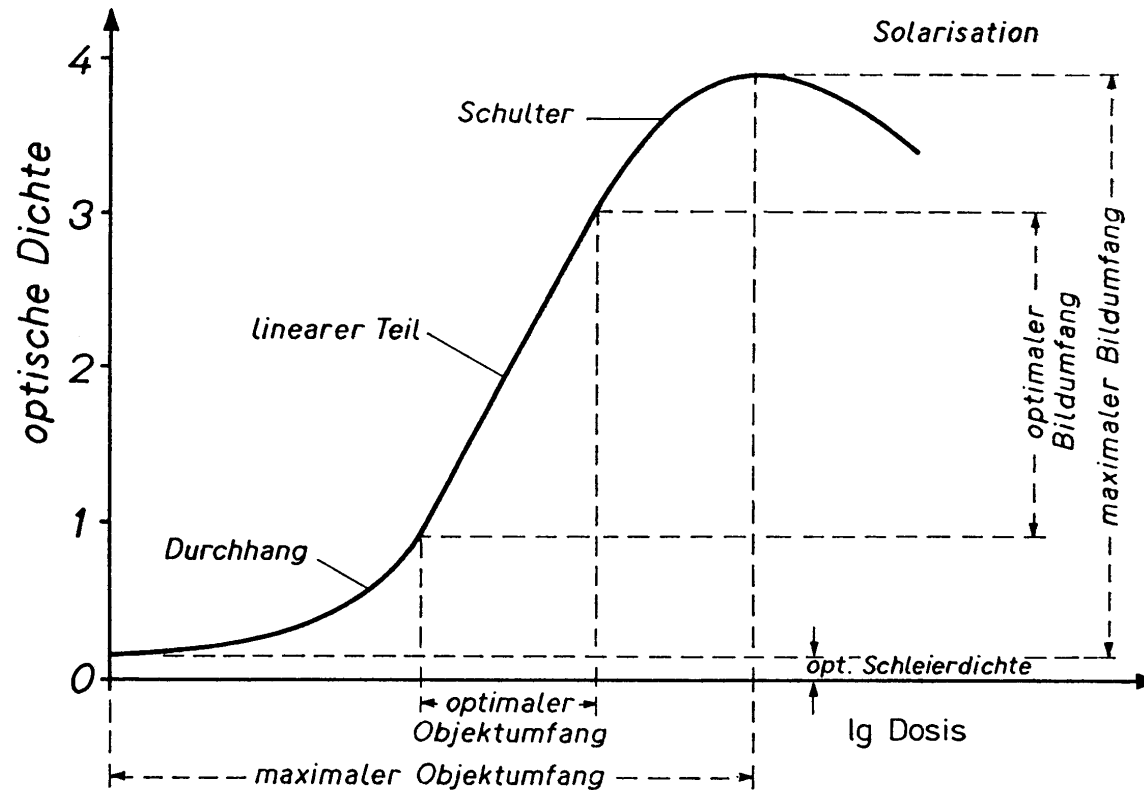


Prinzip eines Densitometers zur Messung der optischen Dichte (Schwärzung) von photographischen Schichten.

# Filmdosimetrie

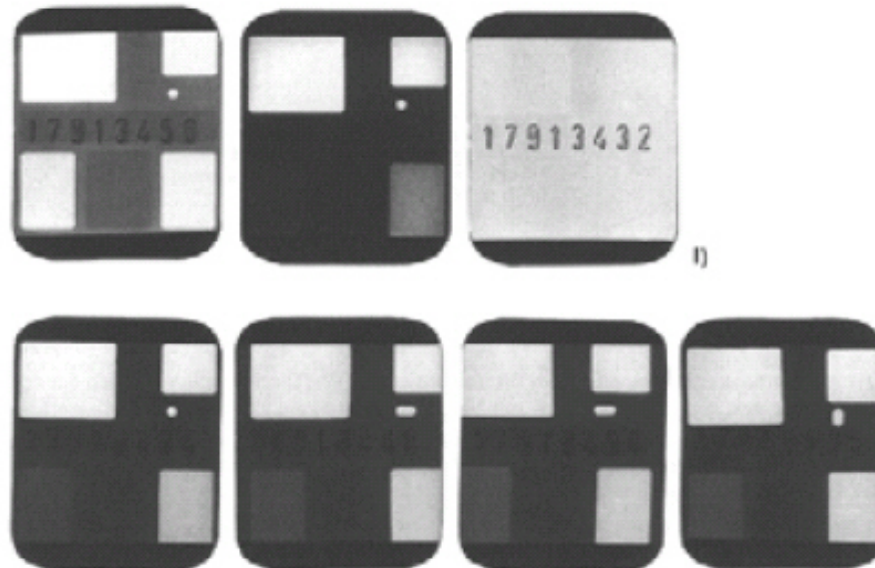


## Optische Dichte



Schematische Dichtekurve einer photographischen Schicht im lichtoptischen Bereich. In der Photometrie wird auch die Belichtung als Abszisse verwendet.

## Energieabhängigkeit der Filmdosimetrie



## In der Medizin verwendete Messtechniken



Strahlungseffekte	Nachweisgrößen	Detektoren
Ionisation in Gasen oder Flüssigkeiten	elektrische Ladung, Strom	Elektrometer, Ionisationskammern Proportionalzählrohr Auslösezählrohr
Ionisation in Festkörpern	elektrische Ladung, Strom	Halbleiter, Leitfähigkeitsdetektor
Lumineszenz	spontane Lichtemission UV-Lichtemission bei Lichtexposition Lichtemission beim Aufheizen (Thermolumineszenz) Lichtemission bei UV-Exposition (Radiophotolumineszenz) Lichtemission beim Auflösen in geeigneten Lösungsmitteln (Lyolumineszenz)	Szintillationsdetektor, Leuchtschirm, Verstärkerfolie Speicherfolien Thermolumineszenzdosimeter (LiF, CaSO <sub>4</sub> , BeO, CaF <sub>2</sub> , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Li <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub> ) Phosphatgläser organische Verbindungen, Alkalihalogenide
Chemische Reaktionen	Farbumschläge durch Oxidation, Bruch von Kettenmolekülen mit Farbänderung und Radikalbildung Nachweis von chemischen Radikalen mittels Elektronenspin-Resonanz (ESR)	Eisensulfatdosimeter, Verfärbungsdosimeter aus organischen Verbindungen kristalline Substanzen (Alanin)
Photographische Wirkung	Schwärzung (opt. Dichte), Spuren	Filmemulsionen
Exoelektronenemission	Oberflächenladungsemission nach thermischer oder optischer Anregung	Kristalline Substanzen z. B. BeO, LiF, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , CaSO <sub>4</sub>
Wärme	Temperaturdifferenz	Kalorimeter
Biologische Effekte	zelluläre Veränderungen	Ringchromosomenzählung, Fluoreszenzanalyse der DNS

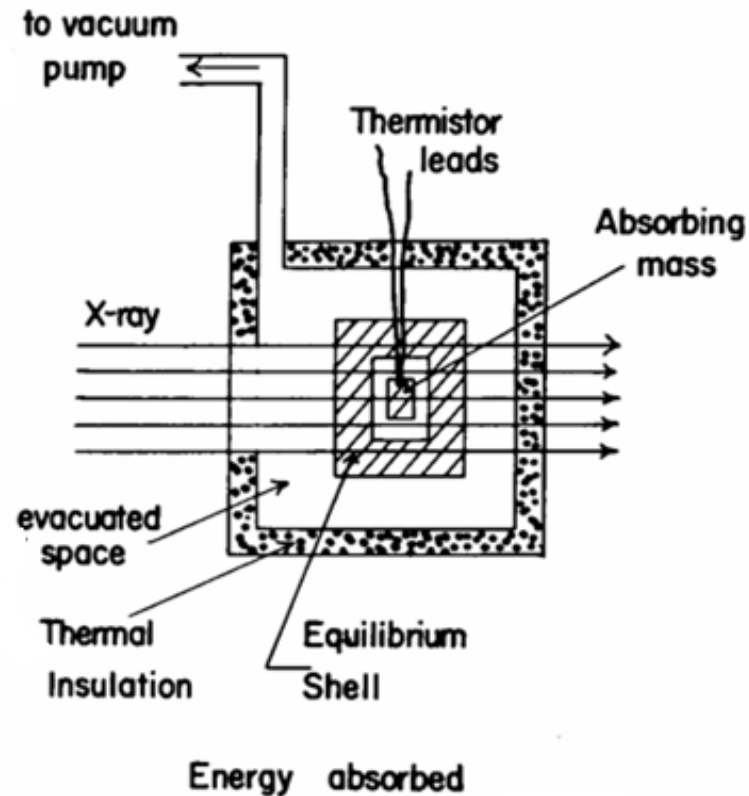
## Kalorimeter

Durch Messung der in einem Absorber strahleninduzierten Erwärmung kann direkt die absorbierte Strahlenenergie bestimmt werden. Voraussetzung dafür ist, dass die absorbierte Strahlenenergie vollständig in Wärme umgewandelt wird. Andere Formen der Energieumwandlung (zBsp. chemische oder Kristallgitter-Veränderungen) müssen bekannt sein oder vernachlässigt werden können.

Als Absorbermaterialien werden Wasser oder Graphit verwendet. Die Kalorimetrie ist zur Absolutbestimmung der Energiedosis gut geeignet, benötigt aber hohe Dosen und einen grossen Messaufwand .



## Kalorimeter



Schematic diagram illustrating the method of measuring energy locally absorbed.



---

# Medizinphysik II

## Strahlenmesstechnik