

## 7.2 Elektrische Leitungsvorgänge in Gasen

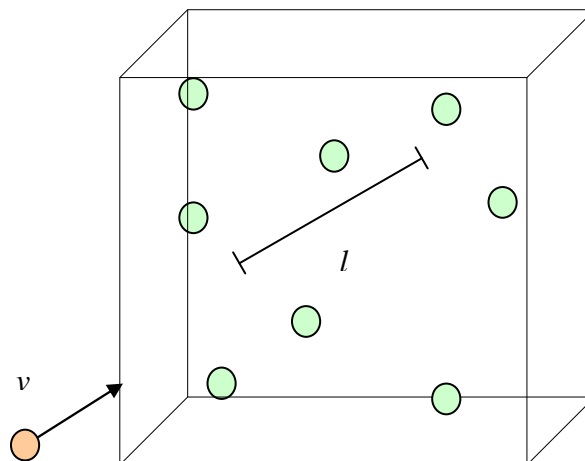
### 7.2.1 Leitfähigkeit von Gasen, Ionenzahl und Rekombinationsrate

Gase leiten nur, wenn sie Elektronen oder Ionen als Ladungsträger enthalten. Ladungsträger können durch Erhitzen, starke elektrische Felder oder die energiereiche Röntgen- oder Gamma Strahlung entstehen. Für den Ladungstransport ist auch hier, wie in der Lösung, die Anzahl der Ladungsträger die entscheidende Größe. In Lösungen sind aber die Ladungsträger durch Solvathüllen voneinander abgeschirmt. Deshalb ist dort die Anzahl der Ionen konstant oder nur langsam veränderlich. In Gasen sind die Ladungsträger schnell beweglich, positive und negative Ladungsträger können zu neutralen Teilchen rekombinieren, sobald sie auf einen geeigneten Partner treffen. Dadurch kann sich die Dichte der Ladungsträger zeitlich schnell verändern.

*Versuch 1 Kerze im Plattenkondensator: Man sieht die Luftströmung durch den Ladungstransport.*

*Versuch 2 Rauchverzehrer: Spitzenentladung ionisiert, der Rauch schlägt sich nieder.*

Die Änderung der Anzahl der Teilchen kann man abschätzen. Man stellt sich dazu ein Gas vor, indem pro Zeit gleich viele negative wie positive Ladungsträger erzeugt werden. Zur Abschätzung der Anzahl der durch Rekombination verschwindenden Ladungsträger denkt man sich z. B. die negativen Ladungsträger als im Raum ruhende Punkte, die von einem Schwarm positiv geladener Teilchen gleicher Geschwindigkeit durchflogen werden. Mit einer für das spezielle Gas typischen Trefferwahrscheinlichkeit kommt es zur Rekombination. Diese Trefferwahrscheinlichkeit ist das Produkt aus der Wahrscheinlichkeit, einen Zielpunkt zu finden und aus der Wahrscheinlichkeit, daß es ein einfliegendes Teilchen gibt. Beide einzelnen Wahrscheinlichkeiten sind zu der Dichte der jeweiligen Teilchensorte proportional.



*Abbildung 1 Modell zur Abschätzung der Anzahl der durch Rekombination verschwindenden Ladungsträger. Ruhende, negativ geladene Teilchen (grün) in einer Volumeneinheit, von links fliegt ein positives Teilchen (hellorange) mit Geschwindigkeit  $v$  ein. Die freie Weglänge  $l$  ist ein Maß für die Wahrscheinlichkeit einer Rekombination.*

Ionenerzeugung	
$\Delta n^{Erzeugung} = \alpha$	Anzahl der pro Zeit erzeugten Ionenpaare in einer Volumeneinheit
$n = n^- = n^+ = \alpha \cdot t$	Dichte der nach der Zeit $t$ erzeugten positiv und negativ geladenen Ionen
Ionenverlust durch Rekombination	
$\Delta n^{Rekombination} = \beta \cdot n^+ \cdot n^-$	Die Wahrscheinlichkeit einer Rekombination ist das Produkt aus der Wahrscheinlichkeit, einen Zielpunkt zu finden ( $\sim n^-$ ) und aus der Wahrscheinlichkeit, daß es ein einfliegendes Teilchen gibt ( $\sim n^+$ ): Daraus ergibt sich die Anzahl der pro Zeit verschwindenden Ladungsträger
Bilanz: Zeitliche Änderung der Dichte der Ladungsträger	
$\frac{dn}{dt} = \Delta n^{Erzeugung} - \Delta n^{Rekombination} = \alpha - \beta \cdot n^2$	Die Änderung der Dichte der Ladungsträger hängt ab vom Quadrat der Dichte der vorhandenen Ladungsträger, sie ist also im allgemeinen schnell veränderlich!

Tabelle 1 Dichte der Ladungsträger und ihre zeitliche Änderung im Gas

Man erkennt, daß im Gas im allgemeinen die Ladungsträgerdichte zeitlich nicht konstant ist. Das ist der wesentliche Unterschied zu den bisher besprochenen Vorgängen zum Ladungstransport. Als Folge davon gilt für die elektrische Leitung in Gasen das Ohmsche Gesetz nur unter speziellen Bedingungen, zum andern führt die zum Teil auch räumliche Variation der Ladungsträgerdichte und der dadurch erzeugten Feldstärken zu vielen unterschiedlichen Erscheinungen.

$\frac{dn}{dt} = 0 = \alpha - \beta \cdot n^2$	Bedingung für konstante Dichte der Ladungsträger im Gas
$n_0 = \sqrt{\frac{\alpha}{\beta}}$	

Tabelle 2 Die Dichte der Ladungsträger ist nur unter speziellen Bedingungen konstant

Die Dichte der Ladungsträger ist nur unter speziellen Bedingungen konstant. Eine Änderungen im Druck (proportional zur Dichte) oder in der Erzeugungsrate  $\alpha$  bzw. der Rekombinationsrate  $\beta$  führt zur sich selbst verstärkenden Zu- oder Abnahme der Ladungsträgerdichte.

Gasentladungen können nach *selbständigen* und *unselbständigen* Entladungen eingeteilt werden. In selbständigen Entladungen sorgen die Ladungsträger durch Stoßionisation für ihren eigenen Ersatz, wie z. B. in Glimm-, Leuchtstoff und Hochdrucklampen. In unselbständigen Entladungen werden die Ladungsträger durch Prozesse erzeugt, die mit dem Stromtransport nichts zu tun haben. Beispiele sind Zählrohre und Vakuumröhren.

## 7.2.2 Unselbständige Entladungen, Zählrohre

Die Ladungserzeugung im Gas durch ionisierende Strahlung ist eine der wichtigsten Anwendungen der elektrischen Leitung in Gasen. Dem Menschen zeigt offenbar kein Sinnesorgan ionisierende Strahlung an, deshalb ist man zu deren Erkennung auf künstliche Zähler und Dosimeter angewiesen. Die Strahlung zeigt sich in abzählbaren Ereignissen durch die Wechselwirkung mit Materie. Bei jedem Ereignis wird die gesamte Energie der Strahlung umgewandelt. Zur Messung der Strahlung gibt es deshalb zwei Kenngrößen: Die Anzahl der durch die

Strahlung verursachten Zerfallsereignisse in einer Zeiteinheit und die Energie der Strahlung, die das Ereignis verursacht. Ein Zählrohr ist ein zur Detektion beider Eigenschaften geeignete Vorrichtung. Es besteht aus einem metallischen Zylindermantel, der einen dazu isolierten Draht in der Zylinderachse umgibt. Der Zwischenraum ist mit Gas gefüllt. Zwischen Mantel und Draht liegt eine Spannung, die Anordnung entspricht also einem Zylinderkondensator.

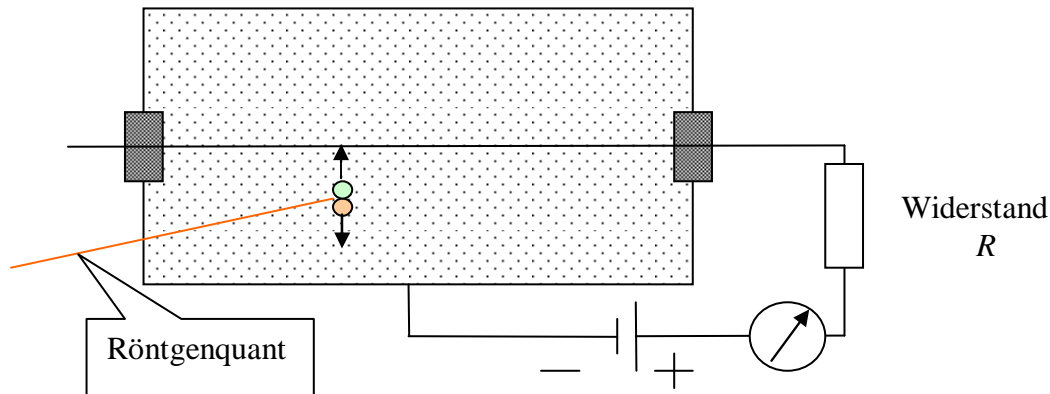


Abbildung 2 Schema einer Ionisationskammer

Ionisierende Strahlung, z.B. Röntgenstrahlung, erzeugt Ladungsträger. Die positiven Ladungsträger werden zum Mantel abgezogen, die negativen zum Draht. Ein einzelnes Quant erzeugt einen Strom, der bei geeigneter Wahl der Betriebsbedingung des Zählers proportional zur Energie der Strahlung ist. Die Intensität der Strahlung wird durch Zählung der in einer Einheit der Zeit einfallenden Quanten bestimmt. (vgl. auch [http://www.uni-tuebingen.de/uni/pki/skripten/V7\\_2AZaehlrrohr.DOC](http://www.uni-tuebingen.de/uni/pki/skripten/V7_2AZaehlrrohr.DOC))

Bei hohen Zählraten kann man auf die zeitliche Auflösung der einzelnen Ereignisse verzichten, man mißt nur noch den durch den Zähler fließenden Strom, der dann ein Maß für die Intensität der Strahlung ist. Allerdings kann dann nicht mehr zwischen der Energie der Strahlung und der Intensität unterschieden werden. In dieser Betriebsart bezeichnet man das Zählrohr als Ionisationskammer. Im Versuch mit der Röntgenröhre wird der Kondensator als Ionisationskammer betrieben.

**Versuch 3: Röntgenstrahl im Kondensator:** Man erkennt bei variabler Betriebsspannung den Proportional- und Sättigungsbereich einer Ionisationskammer

## 7.2.3 Selbständige Gasentladungen

### 7.2.3.1 Glimmentladungen

In einer Röhre sind zwei Elektroden eingeschmolzen. Legt man Hochspannung an, dann vermögen bei einem Druck von ca. 40mb durch Höhenstrahlung ionisierte Teilchen andere zu ionisieren: Es fließt ein Entladungsstrom. Je nach Druck, Gassorte und Spannung kann man unterschiedliche Leuchterscheinungen beobachten. Die Vielzahl der Effekte wird durch zeitlich und räumlich unterschiedliche Ladungsträgerdichten hervorgerufen. Die Unterschiede entstehen durch das im Gas variable Verhältnis von Rekombinations- zu Erzeugungsrate.

Wird die Kathode in einer Glimmentladungsröhre durchbohrt, dann tritt ein Strahl positiv geladener Ionen aus, die „Kanalstrahlen“. Durch ein Loch in der Anode treten die von der Kathode kommenden Elektronen aus, die „Kathodenstrahlen“.

*Versuch 4 Im abgedunkelten Hörsaal wird die Gasentladung gezeigt. In das evakuierte Glasrohr wird Luft eingelassen, bei ca. 0.1-10 mb beginnen die Leuchterscheinungen.*

*Versuch 5 Kathodenstrahlen: Man zeigt den elektronischen Charakter der Kathodenstrahlen, indem man mit einem Magneten die Strahlen ablenkt.*

### 7.2.3.2 Bogen- und Funkenentladung

Zwischen zwei Kohlestäben, der Kathode und der Anode, brennt ein Lichtbogen. Die an der Kathode austretenden Elektronen werden im Feld so weit beschleunigt, daß sie die Luftmoleküle ionisieren. Die positiven Luft Ionen fallen in die Kathode, die sich durch die freiwerdende kinetische Energie erhitzt (ca. 3500 °C) und weitere Elektronen aussendet. Noch heißer wird die Anode (ca. 4000 °C) durch die aufprallenden Elektronen. Diese werden auf hohe Geschwindigkeit beschleunigt, weil ihre freie Weglänge wesentlich größer als die der Ionen ist. Man bedenke auch, daß die in den Elektroden umgewandelte kinetische Energie quadratisch mit der Geschwindigkeit anwächst, so daß letztlich die kleinen und leichten Elektronen mehr Energie als die schweren aber auch großen Ionen umsetzen

Der Widerstand einer Bogenlampe nimmt mit zunehmender Erwärmung ab, weil sich die Elektronenemission erhöht. Deshalb muß der Strom mit einem Widerstand begrenzt werden.

*Versuch 6 Bogenlampe, Betrachtung des Anodenkraters.*

Funkenentladungen sind sehr kurz brennende Bogenentladungen ( $10^{-3}$ - $10^{-6}$  s). Die Durchschlagfeldstärke in Luft bei Normaldruck beträgt etwa 5 kV, 20 kV/cm, 70 kV. Jeder kennt die Funkenentladungen durch Blitze, bei denen einige Millionen Volt zum Durchschlag führen.

Abstand (mm)	Spannung (kV)
1	4,8
5	17,5
10	30,8
50	69

*Tabelle 3 Durchschlagspannungen in Luft*

## 7.3 Strahlendosis und Strahlenwirkung

Energiereiche Strahlung wirkt ionisierend. Dadurch verändert sich das Material, was im biologischen und medizinischen Bereich zu vielfältigen Veränderungen, Krankheiten und zum Tod führen kann. Zur Abschätzung der Gefahr durch Strahlung ist neben ihrer biologischen Wirksamkeit vor allem auch ihre Reichweite wichtig. Bei beruflich strahlenexponierten Personen darf die Ganzkörperbestrahlung 50mSv/Jahr nicht überschreiten. Zum Vergleich: Die natürliche Strahlenbelastung beträgt etwa 0,15 mSv/Jahr. Eine kurzzeitige Bestrahlung mit der Äquivalentdosis von ~8 Sv ist tödlich.

## Tabellen zur Messung und Wirkung ionisierender Strahlung

J. Ihringer

Beliebiges Zerfalls Ereignis				
Aktivität	1 <i>Becquerel</i> [Bq]	1 Zerfall pro Sekunde		
Strahlenwirkung in 1 kg beliebiger Materie				
	Durch die Strahlung freigesetzte Energie		Ladung der durch die Strahlung erzeugten Ionen	
Dosis	1 <i>Gray</i> [Gy]	Bei Dosis 1 Gray erzeugt die Strahlung 1 J Energie	1 $\frac{\text{Coulomb}}{\text{kg}} \left[ \frac{\text{C}}{\text{kg}} \right]$	Bei Dosis 1 Coulomb/kg entsteht durch die Strahlung 1 C Ladung
Dosisleistung	1 $\frac{\text{Gray}}{\text{Sekunde}} \left[ \frac{\text{Gy}}{\text{s}} \right]$	Bei Dosisleistung 1 Gray/Sekunde erzeugt die Strahlung in 1 Sekunde 1 J Energie	1 $\frac{\text{Coulomb}}{\text{kg} \cdot \text{s}} \left[ \frac{\text{C}}{\text{kg} \cdot \text{s}} \right]$	Bei Dosisleistung 1 Coulomb/kg entsteht durch die Strahlung in 1 Sekunde 1 C Ladung
Strahlungswirkung in biologischer Materie				
Dosisäquivalent	1 <i>Sievert</i> [Sv]	1 Sv/ $\rho$ ist die Strahlungsdosis, die in biologischer Materie genau so wirkt wie eine Röntgenstrahlung der Dosis 1 Gy. Die <i>relative biologische Wirksamkeit</i> $\rho$ (Tabelle 2) hängt von der Art der Strahlung ab.		
Dosisäquivalentleistung	1 $\frac{\text{Sievert}}{\text{Stunde}} \left[ \frac{\text{Sv}}{\text{h}} \right]$	Dosisäquivalent in 1 Stunde. Wichtig ist der gesetzlich festgelegte Grenzwert: $20 \frac{\mu\text{Sv}}{\text{h}}$ ist die höchstzulässige Dosisleistung am Arbeitsplatz, die bei 40 Arbeitsstunden/Woche zur Jahresdosis von 50mSv führt *.		

Tabelle 4 Meßgrößen für radioaktive Strahlung

\* Anmerkung zu den Zahlenwerten zur Dosisäquivalentleistung:

- Diese Dosisleistung ist die gesetzliche Limitierung: Liegt sie am Arbeitsplatz darüber, „dann kommt der Staatsanwalt“. Ab dem Jahr 2000 liegt das Limit der Jahresdosis bei 20mSv. Grundsätzlich muß die Belastung minimiert werden, denn:
- Die Lebensdosis darf 400mSv nicht überschreiten
- Wird von 100 Personen die Lebensdosis ausgeschöpft, dann erkranken im Mittel 2 von ihnen an durch die Strahlenbelastung ausgelöstem Krebs. (Zum Vergleich: Von 100 Rauchern erkranken im Mittel 10 an Lungenkrebs).
- Zum Vergleich: Die Belastung durch natürliche Radioaktivität beträgt 2 bis 4 mSv pro Jahr

(Alte Einheit: 100 rem=1 Sievert)

Bewertungsfaktor für unterschiedliche Strahlungsarten			
Strahlungsart	$\rho \frac{Sv}{Gy}$	Energie MeV	Reichweite in organischem Gewebe
Röntgen- und $\gamma$ Strahlung	1 (Definition)	0,02	6,4 cm
		1	65 cm
$\beta$ -Strahlung	1	0,02	10 $\mu\text{m}$
		1	7 mm
Schnelle Neutronen	10		
Langsame Neutronen	5	0,3 eV	20cm
$\alpha$ -Strahlung	20	5	40 $\mu\text{m}$

*Tabelle 5 Bewertungsfaktor für unterschiedliche Strahlungsarten*