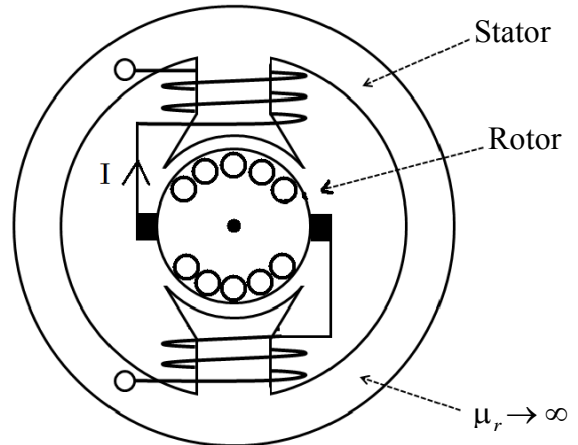


<b>Hochschule München FK 03</b>	<b>Prüfung Wintersemester 2014/15 Grundlagen der Elektrotechnik Dauer: 90 Minuten</b>	F. Palme, W. Rehm
<b>Zugelassene Hilfsmittel:</b> Taschenrechner, 1 DIN-A4-Blatt	<b>Matr.-Nr.:</b>	<b>Name, Vorname:</b>
	<b>Hörsaal:</b>	<b>Unterschrift:</b>

<b>A</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>Σ</b>	<b>N</b>
<b>P</b>						



**Aufgabe 1: Kfz-Anlasser** (ca. 17 Punkte)

Der Querschnitt eines Elektrostarters zeigt

- den *Stator* mit den beiden Statorwicklungen mit insgesamt  $N = 10$  Windungen und
- den *Rotor* mit jeweils  $N_r = 5$  Wicklungsstäben der Rotorwicklung, die über die beiden Kohlebürsten kontaktiert sind.

Es sind nur die Magnetfelder der beiden Statorwicklungen zu betrachten, **die Magnetfelder der Rotorstäbe werden vernachlässigt**, die Maschine befindet sich im Stillstand. Der Querschnitt der beiden Luftspalte zwischen den Polen und dem Rotor beträgt jeweils  $A = 100 \text{ cm}^2$ , die Luftspaltlänge ist jeweils  $l_L = 1 \text{ mm}$ . Die Permeabilität des Eisens sei unendlich groß,  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Vs/(Am)}$ .

- 1.1 Zeichnen Sie einige Feldlinien mit der richtigen Magnetfeldrichtung in den Motorquerschnitt ein, die durch die Statorwicklungen erzeugt werden.
- 1.2 Zeichnen Sie das Ersatzschaltbild des magnetischen Erregerkreises (alle auftretenden Größen bezeichnen) und berechnen Sie den gesamten magnetischen Widerstand  $R_m$  des Erregerkreises.

**Ersatzwert:**  $R_m = 1,8 \cdot 10^5 \text{ H}^{-1}$

- 1.3 Der Anlasser wird an einer Autobatterie mit einer Spannung  $U_0 = 12,6 \text{ V}$  und Innenwiderstand  $R_i = 30 \text{ m}\Omega$  betrieben. Wie groß muss der elektrische Widerstand  $R$  des Anlasserstromkreises sein, damit die maximale Leistung aus der Batterie zur Verfügung steht? Berechnen Sie den Strom  $I$ , der bei Kontaktierung des Anlassermotors an die Batterie zu Beginn des Startvorganges fließt.

**Ersatzwerte:**  $R = 50 \text{ m}\Omega, I = 190 \text{ A}$

- 1.4 Berechnen Sie den magnetischen Fluss  $\Phi$  und die magnetische Induktion  $B$  in den beiden Luftspalten, die bei dem Strom  $I$  aus Frage 1.3 entstehen. **Ersatzwerte:**  $\Phi = 10 \text{ mWb}$ ,  $B = 1,1 \text{ T}$

- 1.5 Berechnen Sie den magnetischen Fluss im Rotor  $\Phi_r$ , in den beiden von den Wicklungen umschlossenen Statorpolen  $\Phi_p$  und im Statorrückschluss  $\Phi_s$  links und rechts der Statorpole.

- 1.6 Der Stator hat einen wirksamen Eisenquerschnitt von  $A_s = 70 \text{ cm}^2$ . Berechnen Sie die magnetische Induktion  $B_s$  im Stator links und rechts der Statorpole.

- 1.7 Der Strom  $I_{max}$  fließt auch durch die jeweils  $N_r = 5$  Stäbe im Rotor unterhalb der Polschuhe. Zeichnen Sie die richtigen Stromrichtungen (Kreuze oder Punkte) in die Rotorstäbe oben in das Bild ein, damit sich ein Drehmoment im Uhrzeigersinn ausbildet. Welche Kraft  $F$  erzeugt ein  $l = 150 \text{ mm}$  langer Rotorstab? Zur Berechnung wird angenommen, dass die Ankerstäbe im Luftspaltfeld liegen, statt im Rotoreisen. **Ersatzwert:**  $F = 35 \text{ N}$

- 1.8 Berechnen Sie das Drehmoment  $M$  des Anlassers, das er beim Startvorgang erzeugt, wenn alle Rotorstäbe auf einem auf die Rotorachse bezogenen wirksamen Radius von  $r = 50 \text{ mm}$  liegen.

**Aufgabe 2: RLC-Messbrücke** (ca. 20 Punkte)

Unbekannte Bauteilewerte  $R$ ,  $L$  und  $C$  können mit der in Abb. 1 dargestellten *RLC-Messbrücke* ermittelt werden, die mit einer sinusförmigen Wechselspannung  $\underline{U}_S$  der Frequenz  $f$  betrieben wird. Zur Bestimmung einer unbekanntes Impedanz  $\underline{Z}_x$  wird die Impedanz  $\underline{Z}$  solange variiert bis das Nullinstrument die Diagonalspannung  $\underline{U}_d = 0$  anzeigt (Brückenabgleich).

$\underline{U}_S = U \cdot e^{j\varphi_u} = 12 \cdot e^{j0} \text{ V}$   
 (komplexer Effektivwert)

Betriebsfrequenz:  $f = 10 \text{ kHz}$

Bauteile:  $R_1 = R_2 = R = 2 \text{ k}\Omega$

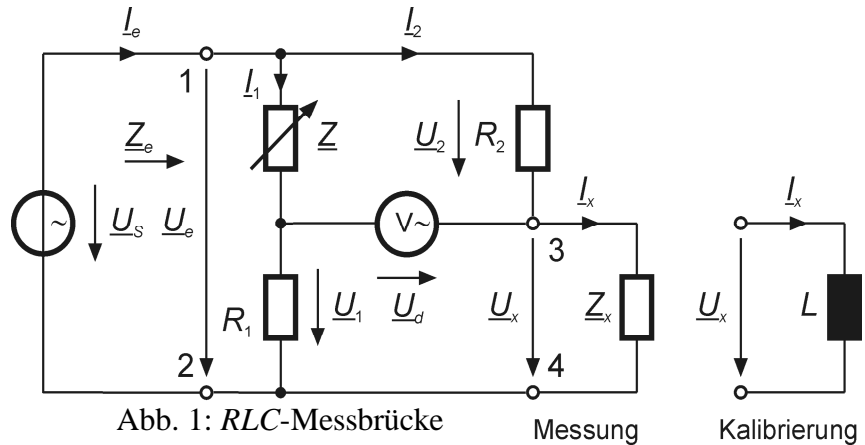


Abb. 1: RLC-Messbrücke

Messung

Kalibrierung

**Teil 1: Abgleichbedingung**

2.1 Berechnen Sie die Spannungen  $\underline{U}_1$  und  $\underline{U}_x$  allgemein in Abhängigkeit von  $\underline{U}_S$ ,  $R$ ,  $\underline{Z}$ ,  $\underline{Z}_x$ .

**Hinweis:** Spannungsteilerformel

2.2 Ermitteln Sie aus der Abgleichbedingung  $\underline{U}_d = 0$  eine Bestimmungsgleichung für  $\underline{Z}_x$  in Abhängigkeit von  $\underline{Z}$  und  $R$ .

2.3 Zeigen Sie dass zur Bestimmung einer Induktivität  $L$  nur ein Kondensator  $C$  die Brücke abgleichen kann und bestimmen Sie seine erforderliche Kapazität  $C(L, R)$ .

**Teil 2: Abgleich über einstellbaren Kondensator**

Bei Anschluss einer Kalibrierspule  $L$  an die Messklemmen 3–4 gemäß Abb. 1 ist die Brücke für  $C = 14 \text{ nF}$  als Impedanz  $\underline{Z}$  abgeglichen (Anzeige  $\underline{U}_d = 0$ ). Für diesen Abgleichfall wird am Widerstand  $R_2$  der komplexe Effektivwert  $\underline{U}_2 = (3 - j5,2) \text{ V}$  gemessen und die Brücke nimmt an den Eingangsklemmen 1–2 nur Wirkleistung  $P = 72 \text{ mW}$  auf.

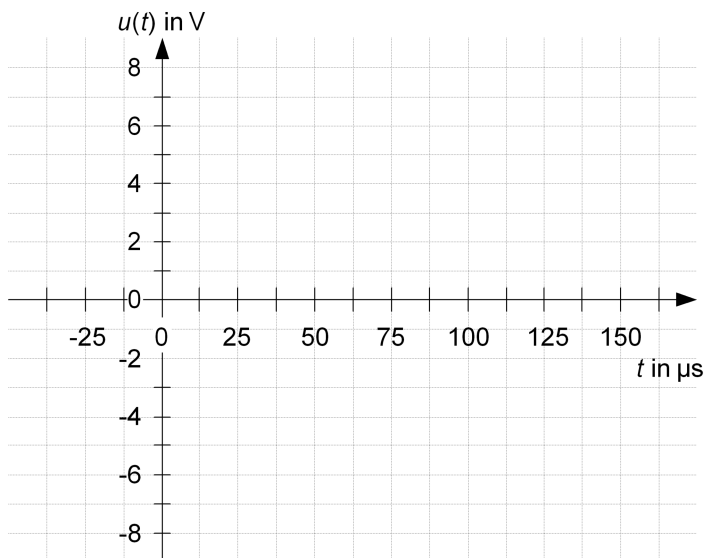


Diagramm 1

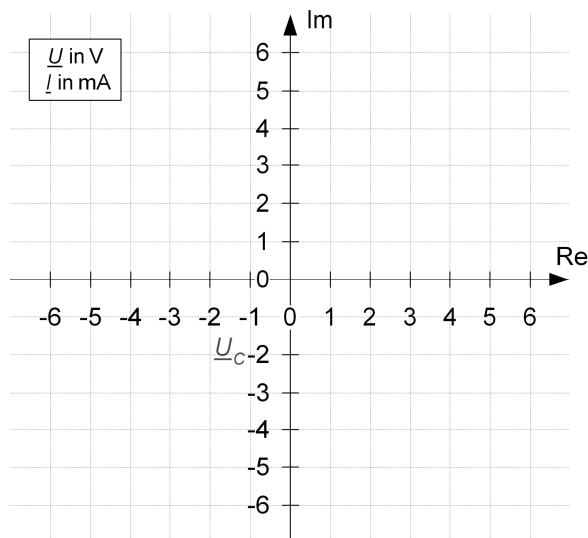


Diagramm 2

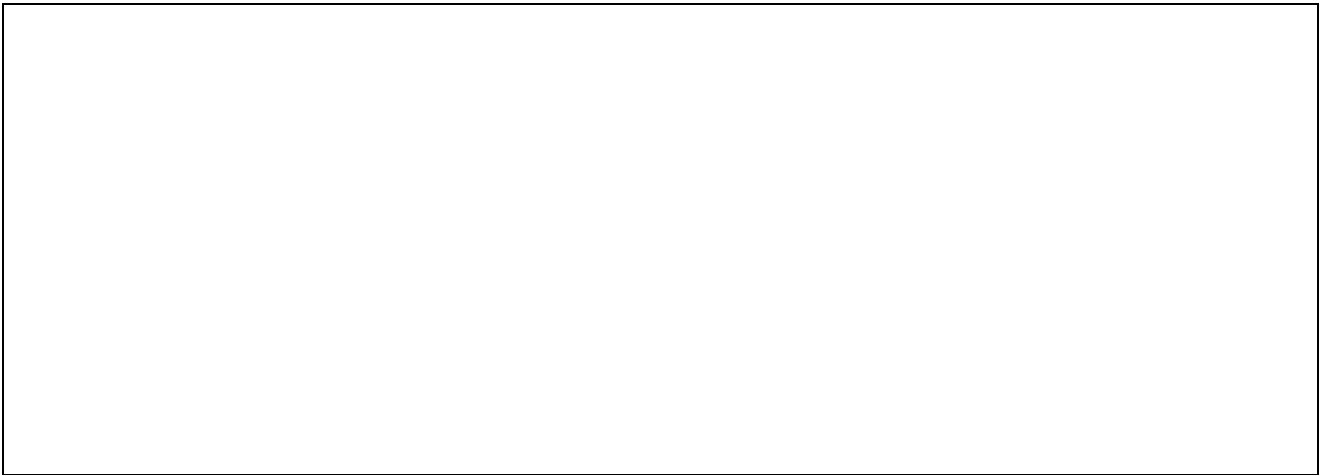
2.4 Geben Sie die Periodenzeit  $T$ , Amplitude  $\hat{U}_2$  und Phase  $\varphi_u$  der Spannung  $\underline{U}_2$  an. Zeichnen Sie den zugehörigen Zeitverlauf  $u_2(t)$  in das Diagramm 1 sowie den Effektivwert-Drehzeiger  $\underline{U}_2$  in die komplexe  $\underline{U}$ -Ebene (Diagramm 2).

2.5 Berechnen Sie die komplexen Ströme  $\underline{I}_1$  und  $\underline{I}_2$ .

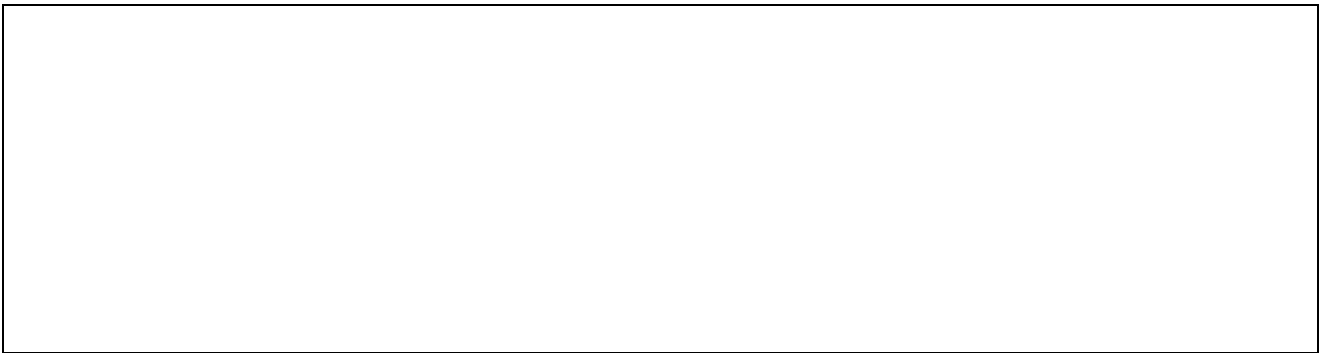
**Ersatzwert:**  $\underline{I}_2 = (1,2 - j2,1) \text{ mA}$

2.6 Berechnen Sie die an der Spule auftretende Spannung  $\underline{U}_x$  und ihre Induktivität  $L$ . Zeichnen Sie den zugehörigen Spulenstrom  $\underline{I}_x$  in die komplexe  $\underline{I}$ -Ebene (Diagramm 2).

**Ersatzwert:**  $\underline{U}_x = (7,2 + j4,2) \text{ mV}$



2.7 Geben Sie die Spannung  $U_{x,DC}$  an der Messklemme 3–4 für sehr niedrige Frequenzen ( $f \rightarrow 0$ , Gleichstrom) und  $U_{x,\infty}$  für sehr hohe Frequenzen ( $f \rightarrow \infty$ ) an, indem Sie in der Schaltung die sich jeweils für  $f \rightarrow 0$  bzw.  $f \rightarrow \infty$  ergebenden Blindwiderstände von  $L$  und  $C$  ansetzen.



**Aufgabe 3: Lichterkette** (ca. 19 Punkte)

Lichterketten sind schaltungstechnisch als  $M$  parallele Stränge organisiert, die jeweils aus der Reihenschaltung von  $N$  Strahlern bestehen. Nachfolgend sollen zwei Realisierungsvarianten untersucht werden, die jeweils an einer Niederspannungsquelle mit Nennspannung  $U_{0Q} = 24\text{ V}$  und Innenwiderstand  $R_{iQ}$  betrieben werden.

**Teil 1: Konventionelle Lichterkette mit Glühlämpchen**

Die Lichterkette soll zunächst für 50 Glühlämpchen und eine Gesamt-Nennleistung  $P_L = 12,5\text{ W}$  dimensioniert werden, die als ohmsche Widerstände mit Nennwiderstand  $R = 23\ \Omega$  betrachtet werden können (Abb. 1). Der Innenwiderstand  $R_{iQ}$  der Niederspannungsquelle mit Leerlaufspannung  $U_{0Q} = 24\text{ V}$  soll in diesem Fall vernachlässigt werden ( $R_{iQ} = 0$ ).

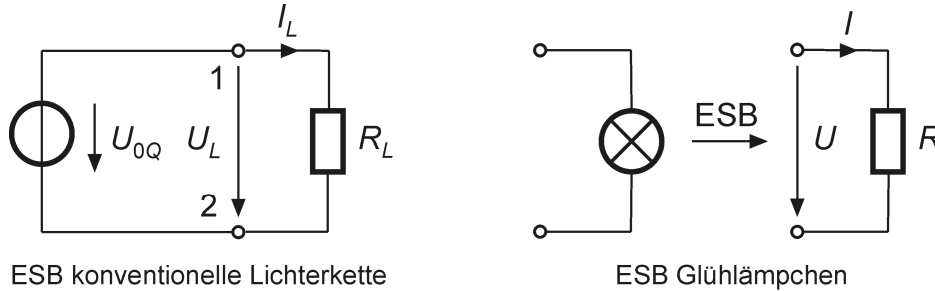


Abb. 1: Ersatzschaltbild (ESB) einer konventionellen Lichterkette

3.1 Berechnen Sie erforderliche Nennleistung  $P$  und Nennspannung  $U$  eines Glühlämpchens.

**Ersatzwert:**  $U = 4,8\text{ V}$

3.2 Berechnen Sie die Anzahl  $N$  der in Reihe geschalteten Glühlämpchen und die Anzahl  $M$  der Stränge.

3.3 Berechnen Sie den Lastwiderstand  $R_L$  den die gesamte Lichterkette für die Niederspannungsquelle darstellt und den im Betrieb fließenden Nennstrom  $I_L$ .

Beim Einschalten einer bislang ausgeschalteten Lichterkette (Umgebungstemperatur  $T_0 = 300 \text{ K}$ ) fließt ein deutlich höherer Strom  $I_{L0}$  durch die Lichterkette als im Nennbetrieb bei  $I_L$  (Glühfadentemperatur  $T_L = 2500 \text{ K}$ ).

3.4 Erläutern Sie kurz dieses Verhalten und berechnen Sie das Einschaltstromverhältnis  $I_{L0}/I_L$  unmittelbar nach dem Einschalten der Lichterkette.

**Hinweis:** Der Temperaturkoeffizient des Wolfram-Glühfadens beträgt  $\alpha = 4 \text{ ‰/K}$ .

Damit bei Durchbrennen eines Glühlämpchens nicht der gesamte Strang dunkel bleibt wird den Lämpchen jeweils ein temperaturabhängiger Widerstand parallelgeschaltet, der im Nennbetrieb einen Widerstand  $R_{NTC,1} \gg R$  aufweist und bei Ausfall des Lämpchens durch seine resultierende Erwärmung den sehr viel kleineren Widerstand  $R_{NTC,2} \ll R_{NTC,1}$  (Heißleiter, NTC) annimmt.

3.5 Dimensionieren Sie die erforderlichen Betriebswiderstände  $R_{NTC,1}$  und  $R_{NTC,2}$  so, dass sich bei Ausfall die Betriebsspannung  $U$  für die verbleibenden Glühlämpchen nicht ändert und dass die im Nennbetrieb von den Heißleitern aufgenommene Leistung nur 1 % der von den Lämpchen aufgenommenen Leistung beträgt.

**Teil 2: Energieeffiziente LED-Lichterkette**

Nun wird eine Lichterkette mit  $M = 7$  parallelen Strängen und  $N = 7$  in Reihe geschalteten Leuchtdioden (LED) je Strang betrachtet. Die LEDs können im Nennbetriebspunkt durch das in Abb. 2 dargestellte vereinfachte Spannungsquellen-Ersatzschaltbild mit Durchlassspannung  $U_{0LED} = 3,3 \text{ V}$  und differentiellem Innenwiderstand  $R_{iLED} = 0,8 \text{ }\Omega$  modelliert werden, wodurch sich die Lichterkette im Nennbetrieb durch ein Gesamt-ESB gemäß Abb. 2 beschreiben lässt mit  $U_{0L}$  und  $R_{iL}$ . Für die Niederspannungsquelle gilt  $U_{0Q} = 24 \text{ V}$  und  $R_{iQ} = 1,2 \text{ }\Omega$ .

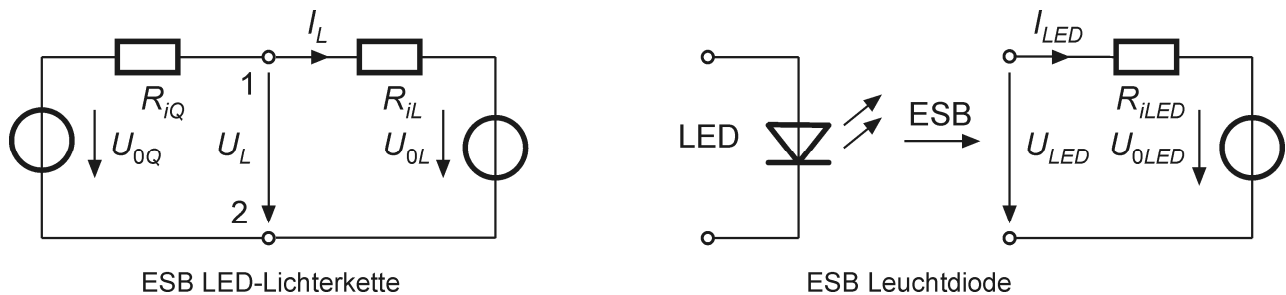


Abb. 2: Vereinfachtes Ersatzschaltbild (ESB) einer LED-Lichterkette

3.6 Geben Sie die Kenngrößen  $U_{0L}$  und  $R_{iL}$  des Spannungsquellen-ESB der LED-Lichterkette **rechts der Eingangsklemmen 1–2** allgemein und zahlenmäßig an.

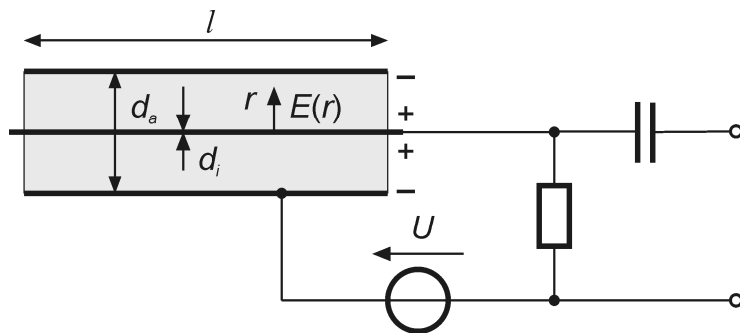
**Ersatzwerte:**  $U_{0L} = 22 \text{ V}$ ,  $R_{iL} = 1 \text{ }\Omega$

3.7 Berechnen Sie den Betriebsstrom  $I_L$  und die Betriebsspannung  $U_L$  der LED-Lichterkette.



**Aufgabe 4: Zählrohr** (ca. 16 Punkte)

Zur Messung der Dosisleistung ionisierender Strahlung werden *Zählrohre* eingesetzt. Das in Abb. 1 vereinfacht dargestellte Zählrohr verwendet einen Zylinderkondensator zur Erzeugung eines hohen elektrischen Feldes  $E$  zwischen dem leitenden Außenmantel (Durchmesser  $d_a$ ) und einem dünnen Metalldraht (Dicke  $d_i$ ) in der Mitte eines stirnseitig strahlungsdurchlässig verschlossenen Rohres der Länge  $l$ . Diese nachfolgend als idealer Zylinderkondensator  $C$  angenommene Anordnung ist mit passendem Detektionsgas gefüllt (Dielektrizitätszahl  $\epsilon_r = 1$ ), dessen Moleküle durch eintretende hochenergetische Strahlung ionisiert werden. Die so getrennten positiven und negativen Ladungsträger gelangen durch das Feld  $E$  auf die entsprechenden Kondensatorflächen und werden kapazitiv als Impuls ausgekoppelt und detektiert (nicht weiter betrachtet).



$$E(r) = \begin{cases} \frac{Q}{2\pi\epsilon_0\epsilon_r \cdot l r} & \text{innerhalb } C \\ 0 & \text{sonst (kein Streufeld)} \end{cases}$$

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_r \cdot l}{\ln \frac{d_a}{d_i}} \quad \begin{matrix} d_i = 0,5 \text{ mm} \\ U = 400 \text{ V} \end{matrix}$$

$$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{As}}{\text{Vm}}$$

Abb. 1: Zählrohr (vereinfacht)


**Teil 1: Dimensionierung des Zählrohrs**

Das Zählrohr wird über eine Spannungsquelle mit  $U = 400 \text{ V}$  vollständig geladen. Die Kapazität soll  $C = 2 \text{ pF}$  und die maximale Feldstärke  $E_{max} = 577 \text{ kV/m}$  betragen.

4.1 Welche Ladung trägt das Zählrohr und welche maximale dielektrische Verschiebungsdichte  $D_{max}$  tritt auf? **Ersatzwert:**  $Q = 0,64 \text{ nC}$

4.2 Wo tritt die maximale Feldstärke  $E_{max}$  auf? Berechnen Sie die erforderliche Länge  $l$  des Zählrohrs und damit den Manteldurchmesser  $d_a$ . **Ersatzwerte:**  $l = 8 \text{ cm}$ ,  $d_a = 6 \text{ mm}$

- 4.3 Berechnen Sie die Spannung  $U(r)$  zwischen der Mittelelektrode und einer Stelle  $r$  im Zählrohr allgemein durch Integration von  $E(r)$  und quantitativ für  $r_0 = 2$  mm. Skizzieren Sie die Verläufe von  $E(r)$  und  $U(r)$  im Bereich  $d_i/2 < r < d_a/2$  (jeweils Anfangs- und Endpunkt quantitativ angeben sowie Charakteristik des Verlaufs).

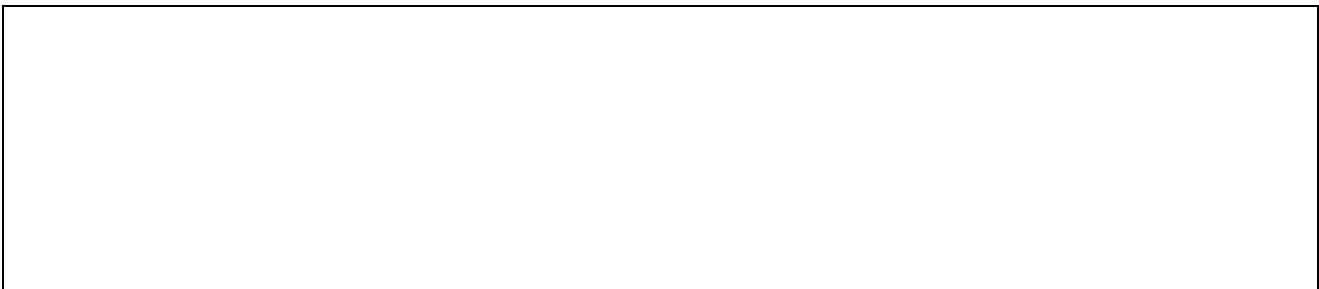


## Teil 2: Messbetrieb

Das geladene Zählrohr wird ionisierender Strahlung ausgesetzt. Ein Detektionsereignis setzt dabei lawinenartig im Mittel  $N = 10^8$  Ladungsträger frei.

- 4.4 Berechnen Sie die kurzzeitige Ladungszunahme  $\Delta Q$  im Zählrohr pro Detektionsereignis und die daraus resultierende impulsartige Spannungszunahme  $\Delta U$ .

**Hinweis:** Elementarladung  $e^- = 1,6 \cdot 10^{-19}$  As



Diese Ladungszunahme wird durch eine nicht näher gezeichnete Schaltung kapazitiv als Stromimpuls ausgekoppelt und gezählt.

- 4.5 Berechnen Sie die Aktivität  $A$  (Teilchen pro Sekunde) als mittlere Zählrate der detektierten Strahlung wenn dabei ein mittlerer Strom  $I = 1,6$  nA fließt.

