

3) Tintenstrahldrucker

Als preiswerte Alternative zum Laserdrucker sind Tintenstrahldrucker weit verbreitet. Sie sind günstig im Preis und liefern hervorragende Druckergebnisse.

Es gibt viele unterschiedliche Bauformen von Tintenstrahldruckern. Am häufigsten findet man Systeme, bei denen die Tintentröpfchen nur bei Bedarf aus dem Druckkopf emittiert werden. Auch hier gibt es wiederum verschiedene Verfahren der Tröpfchenerzeugung. Bei Druckern, bei denen das *Piezo*-Verfahren angewendet wird, bewegen sich geladene Tintentröpfchen durch elektrische Felder.

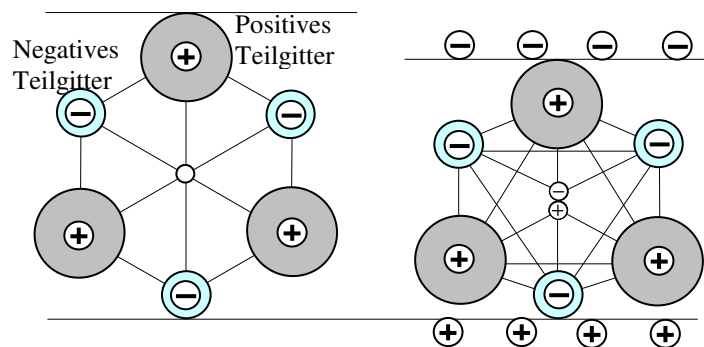
Wie wird das Schriftbild durch diese Felder gesteuert?



(i) Erklärung des Piezoeffektes:

Ein Piezokristall besteht aus zwei gleichartigen, ineinander liegenden Kristallgittern, deren Atome einmal positiv und einmal negativ ionisiert sind.

Ohne äußere Verformung liegen die Ladungsschwerpunkte der Teilgitter in jeder Elementarzelle genau übereinander, so dass sich jeweils Neutralität ergibt.



Bei Verformung des Kristalls verschieben sich die deformierten Teilgitter gegeneinander. Dabei verlagern sich auch die jeweiligen Ladungsschwerpunkte, weil die beiden Ionensorten *unterschiedliche Größe* haben. Dadurch erfolgt in jeder Elementarzelle eine Ladungstrennung, welche eine atomare „Spannungsquelle“ darstellt. Diese sind in Druckrichtung „in Reihe“ geschaltet, sodass im Außenbereich eine erhebliche Spannung entsteht.

(ii) Umkehrung des Piezoeffektes

Durch Anlegen einer äußeren Spannung wird der Piezoeffekt umgekehrt. Das Teilgitter der positiv geladenen Ionen wird zum äußeren Minuspol gezogen und umgekehrt. Dadurch rutschen die Teilgitter so ineinander, wie sie es bei Druckausübung täten. Das Volumen des Kristalls mindert sich somit in Feldrichtung. An die Rückwand der Tintenkammer montiert verkleinert der Piezokristall dann „auf Befehl“ (elektrische Spannung) das Volumen der Kammer, wodurch ein Tintentröpfchen durch die Düse nach vorne schießt. Siehe Abb. S2

(iii) Unser Piezokristall verschießt Tröpfchen der Masse $m = 3,25 \cdot 10^{-11} \text{ kg}$ mit $v_0 = 14 \text{ m/s}$.

Das nachfolgende Bauelement dient zur Aufladung des abgeschossenen Tröpfchens.

Zu diesem Zweck werden die Düse und die nachfolgende Ringelektrode an die Gleichspannungsquelle U_L gelegt. Ist Pol ① positiv, so werden die Tröpfchen positiv geladen und durch die negative Ringelektrode an Pol ② beschleunigt. Andernfalls umgekehrt.

Die Größe der Tröpfchenladung q lässt sich durch die Spannung U_L steuern.

q ist proportional zu U_L , also $q = k \cdot U_L$. Hier gilt $k = 2 \cdot 10^{-15} \text{ C/V}$.

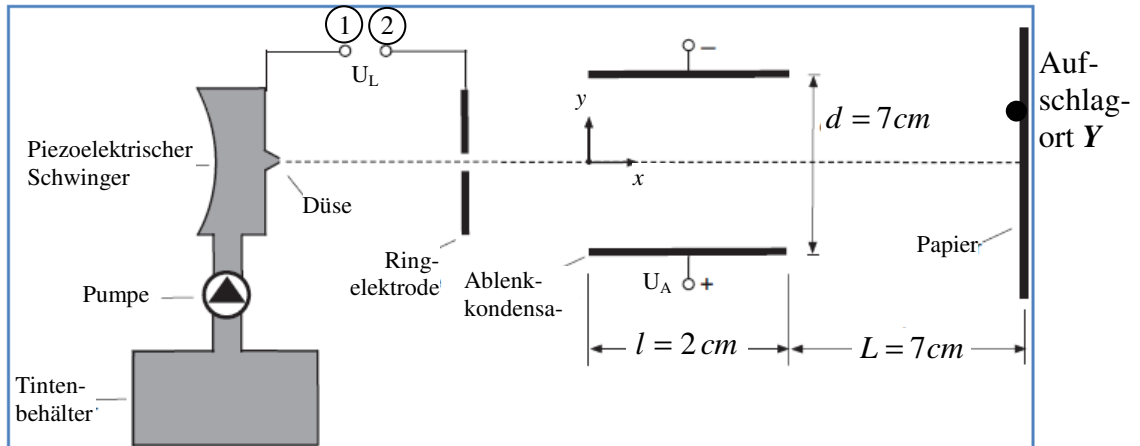
Bei z.B. $U_L = 200 \text{ V}$ wird die Tröpfchenladung $q = 2 \cdot 10^{-15} \text{ C/V} \cdot 200 \text{ V} = 4 \cdot 10^{-13} \text{ C}$.

U_L bewirkt also (1) Aufladung und (2) Beschleunigung des Tröpfchens.

(iv) Am Ablenkkondensator liegt die konstante Ablenkspannung $U_A = 4,2 \text{ kV}$.

Je nach Polung der Ladespannung U_L ist das Vorzeichen der Tröpfchenladung entweder positiv oder negativ. Dadurch werden die Tröpfchen im Ablenkkondensator entweder nach oben oder unten abgelenkt.

(v) Aufbau



Plattenabstand $d = 7\text{ cm}$; Plattenlänge $l = 2\text{ cm}$; Driftlänge $L = 7\text{ cm}$

Aufgaben

- Beschreibe den Piezoeffekt.
Erkläre, wie mit dem umkehrten Piezoeffekt gezielt Tintentröpfchen verschossen werden.
- Ermittle Ladung q , welche ein Tröpfchen durch die Ladespannung $U_L = 150\text{ V}$ erhält.
- Mit einer Hochgeschwindigkeitskamera wurde ermittelt, dass sich die Geschwindigkeit der Tröpfchen durch die Beschleunigung mit der Ladespannung $U_L = 200\text{ V}$ zwischen der Düse und der Ringelektrode, lediglich um 1,2% vergrößert. Bestätige durch eine physikalische Überlegung und durch eine Rechnung, dass das Messergebnis stimmig ist.
- Beschreibe anhand der obigen Skizze die Bewegung eines Tröpfchens von der Düse bis zum Auftreffpunkt auf dem Papier. Begründe die Aussagen.
- Bestätige, dass sich die seitliche Beschleunigung zwischen den Kondensatorplatten aus der Formel $a_y = \frac{q \cdot U_A}{m \cdot d}$ ergibt.
Zeige, dass die seitliche Beschleunigung der Tröpfchen etwa 75 mal größer ist als die Erdbeschleunigung $g = 9,81\text{ m/s}^2$.
- Der Auftreffpunkt auf dem Papier errechnet sich nach $Y = \frac{a_y \cdot l}{v_0^2} \cdot \left(\frac{l}{2} + L \right)$.
Zeige, bei $L = 7\text{ cm}$ Driftlänge und $U_L = 200\text{ V}$ ergibt sich die Aufschlagstelle $Y = 6,03\text{ mm}$
- Wie groß muss die Ladespannung U_L sein, damit der der Tintentropfens $Y = 3\text{ mm}$ oberhalb der Symmetrieachse aufschlägt?

Lösungen

a) Piezoeffekt: Siehe oben.

b) $q = 2 \cdot 10^{-15} \text{ C/V} \cdot 150 \text{ V} = 3 \cdot 10^{-13} \text{ C}$

c) Durch die Ladespannung $U_L = 200 \text{ V}$ erhalten die Tröpfchen die Ladung $q = 4 \cdot 10^{-13} \text{ C}$.

Die Tröpfchen verlassen die Düse mit der Geschwindigkeit $v_0 = 14 \text{ m/s}$.

U_L bewirkt nicht nur Aufladung der Tröpfchen, sondern auch noch eine Beschleunigung.

Es ist zu zeigen, dass ihre Geschwindigkeit durch die Beschleunigung mit $U_L = 200 \text{ V}$ um 1,2% größer wird und somit auf den Endwert $v_0 = 1,012 \cdot 14 \text{ m/s} = 14,17 \text{ m/s}$ steigt.

Falscher Lösungsweg: Zunächst denkt man, dass U_L eine Zusatzgeschwindigkeit v_{el} erzeugen würde, welche zu v_0 dazu addiert werden müsste. Die Zusatzgeschwindigkeit v_{el} ergäbe sich durch die Umwandlung der elektrischen Energie $W_{el} = q \cdot U_L = 4 \cdot 10^{-13} \text{ C} \cdot 200 \text{ V} = 8 \cdot 10^{-11} \text{ J}$ in kinetische Energie $W_{kin} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_{el}^2$. Umstellen ergäbe dann $v_{el} = \sqrt{2 \cdot W_{kin} / m} = \sqrt{2 \cdot W_{el} / m}$.

Also $v_{el} = \sqrt{2 \cdot 8 \cdot 10^{-11} \text{ J} / 3,25 \cdot 10^{-11} \text{ kg}} = 2,219 \text{ m/s}$.

Damit müsste die Endgeschwindigkeit $v = (14 + 2,219) \text{ m/s} = 16,219 \text{ m/s}$ sein. Das ist falsch.

Richtiger Lösungsweg: Nicht die Geschwindigkeiten, die *Energien* muss man addieren: Ein Tropfen verlässt die Düse mit $v_0 = 14 \text{ m/s}$. Er hat somit die Anfangsenergie $W_0 = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_0^2 = W_0 = 0,5 \cdot 3,25 \cdot 10^{-11} \text{ kg} \cdot (14 \text{ m/s})^2 = 3,185 \cdot 10^{-9} \text{ J}$. Dazu addiert sich die elektrische Energie $W_{el} = q \cdot U_L = 4 \cdot 10^{-13} \text{ C} \cdot 200 \text{ V} = 8 \cdot 10^{-11} \text{ J}$, so dass das Tröpfchen nach Verlassen der Ringelektrode die kinetische Energie $W_{kin} = 3,185 \cdot 10^{-9} \text{ J} + 8 \cdot 10^{-11} \text{ J} = 3,265 \cdot 10^{-9} \text{ J}$ besitzt. Die Endgeschwindigkeit v ergibt sich dann aus $W_{kin} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$ durch Umstellen: $v = \sqrt{2 \cdot W_{kin} / m} = v = \sqrt{2 \cdot 3,265 \cdot 10^{-9} \text{ J} / 3,25 \cdot 10^{-11} \text{ kg}} = 14,175 \text{ m/s}$. Das ist etwa 1,2% größer als $v_0 = 14 \text{ m/s}$. Die Ladespannung U_L bewirkt also so gut wie keine Beschleunigung.

d) Siehe oben.

e) Die seitliche Beschleunigung entsteht durch die elektrische Kraft des Kondensatorfeldes auf die geladenen Tröpfchen. Nach Newton gilt $a = F / m$. Die elektrische Kraft ergibt sich aus der Feldstärke gemäß $F = q \cdot E$. Die Feldstärke wiederum ergibt sich aus der angelegten Spannung $E = \frac{U_A}{d}$. Alles zusammen: $a_y = \frac{q \cdot U_A}{m \cdot d}$.

$$a_y = \frac{q \cdot U_A}{m \cdot d}$$

Einsetzen ergibt $a_y = \frac{4 \cdot 10^{-13} \text{ C} \cdot 4200 \text{ V}}{3,25 \cdot 10^{-11} \text{ kg} \cdot 0,07 \text{ m}} = 738,5 \text{ m/s}^2$.

Das ist $738,5/9,81 = 75,28$ mal größer als die Erdbeschleunigung.

f) $Y = \frac{a_y \cdot l}{v_0^2} \cdot \left(\frac{l}{2} + L \right) = \frac{738,5 \text{ m/s}^2 \cdot 0,02 \text{ m}}{(14 \text{ m/s})^2} \cdot \left(\frac{0,02}{2} + 0,07 \right) = 6,028 \cdot 10^{-3} \text{ m}$.

g) In $Y = \frac{a_y \cdot l}{v_0^2} \cdot \left(\frac{l}{2} + L \right)$ den Ausdruck $a_y = \frac{q \cdot U_A}{m \cdot d}$ einsetzen: $Y = \frac{q \cdot U_A \cdot l}{m \cdot d \cdot v_0^2} \cdot \left(\frac{l}{2} + L \right)$

Nun q durch $q = k \cdot U_L$ mit $k = 2 \cdot 10^{-15} \text{ C/V}$ ersetzen: $Y = \frac{k \cdot U_L \cdot U_A \cdot l}{m \cdot d \cdot v_0^2} \cdot \left(\frac{l}{2} + L \right)$.

Jetzt nach U_L umstellen. $U_L = \frac{m \cdot d \cdot v_0^2 \cdot Y}{k \cdot U_A \cdot l \cdot (l/2 + L)}$. Auswerten $U_L = 99,5 \text{ V}$

