

Massenspektrometer**Aufgaben**

- 1 Ein Massenspektrometer verwendet elektrische und magnetische Felder, um die Massen von Atom- und Molekül-Ionen zu messen (Material 1). Es soll angenommen werden, dass die Ionenquelle ausschließlich einfach positiv geladene Ionen ($q = +e$) mit unterschiedlichen Massen und verschiedenen Anfangsgeschwindigkeiten verlassen. Die Ionen werden als Ionenstrahl gebündelt. Anschließend treten die Ionen in einen Geschwindigkeitsfilter ein. Dieser besteht aus einem homogenen elektrischen Feld und einem homogenen magnetischen Feld, die senkrecht zueinander angeordnet sind. Nur Ionen mit einer bestimmten Geschwindigkeit v_0 können diesen Bereich geradlinig durchlaufen und in den Analysator eintreten. Im Geschwindigkeitsfilter und im Analysator sind die magnetischen Felder homogen mit gleich großer, zeitlich konstanter magnetischer Flussdichte B^1 .

- 1.1 Erläutern Sie, warum im Massenspektrometer ein Vakuum herrschen muss.

(2 BE)

- 1.2 Erläutern Sie die Funktionsweise des Geschwindigkeitsfilters unter Beachtung der maßgeblichen Kräfte, welche auf die Ionen wirken.
Skizzieren Sie jeweils eine mögliche Flugbahn von Ionen mit Geschwindigkeiten $v > v_0$ und $v < v_0$ in das Material 1.

Berechnen Sie die Geschwindigkeit v_0 für $E = 18000 \frac{\text{V}}{\text{m}}$ und $B = 0,06 \text{ T}$.

[zur Kontrolle: $v_0 = 3 \cdot 10^5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$]

(7 BE)

- 1.3 Erklären Sie den Verlauf der Flugbahnen der Ionen, die, wie in Material 1 abgebildet, in das Magnetfeld des Analysators eintreten.
Skizzieren Sie zwei mögliche Flugbahnen für Ionen mit gleicher Geschwindigkeit, aber unterschiedlicher Masse in das Material 1.

(4 BE)

- 1.4 Zeigen Sie, dass für den Bahnradius der Ionen im Analysator die Formel $r = \frac{m \cdot v}{B \cdot e}$ gilt.

Begründen Sie, dass durch die Verwendung des Geschwindigkeitsfilters die Proportionalität $r \sim m$ gilt.

(6 BE)

- 1.5 Berechnen Sie die Masse eines Ions, welches den Detektor auf einer Kreisbahn mit dem Radius $r = 56,0 \text{ cm}$ erreicht. Die Geschwindigkeit des Ions entspricht der Geschwindigkeit v_0 aus Aufgabe 1.2 und die magnetische Flussdichte beträgt weiterhin $B = 0,06 \text{ T}$.

(3 BE)

¹ Die magnetische Flussdichte wird in manchen Lehrbüchern auch als magnetische Feldstärke bezeichnet.

- 1.6 Ein anderes Massenspektrometer besitzt keinen Geschwindigkeitsfilter. Die Ionen durchlaufen hierbei eine Beschleunigungsstrecke mit der Beschleunigungsspannung U_B (Material 2).

Leiten Sie die Formel $v = \sqrt{\frac{2 \cdot e \cdot U_B}{m}}$ für die Geschwindigkeit der Ionen nach Durchlaufen der Beschleunigungsspannung her. Die Anfangsgeschwindigkeit der Ionen kann dabei vernachlässigt werden. Zeigen Sie unter Verwendung der Formel aus Aufgabe 1.4, dass für den Bahnradius der Ionen im Analysator nun die Proportionalität $r \sim \sqrt{m}$ gilt.

(6 BE)

- 1.7 Mit dem Massenspektrometer aus Aufgabe 1.6 wurde für verschiedene Ionen mit bekannter Masse m der Bahnradius r im Analysator gemessen (Material 3).

Bestätigen Sie die Proportionalität $r \sim \sqrt{m}$ durch eine geeignete grafische Auswertung.

(5 BE)

- 1.8 Das Auflösungsvermögen R eines Massenspektrometers ist über die Formel $R = \frac{m}{\Delta m}$ gegeben.

Beim Auflösungsvermögen R kann die Masse m gerade von der Masse $m + \Delta m$ getrennt werden. Für das Massenspektrometer mit Beschleunigungsstrecke beträgt das Auflösungsvermögen nur $R \approx 60$. Wird stattdessen ein Geschwindigkeitsfilter verwendet, ist das Auflösungsvermögen deutlich höher. In Material 4 sind zwei Massenspektren dargestellt.

Begründen Sie, welches Massenspektrum mit dem Massenspektrometer mit Geschwindigkeitsfilter und welches mit dem Spektrometer mit der Beschleunigungsstrecke aufgenommen wurde. Ermitteln Sie das minimale Auflösungsvermögen, welches das Massenspektrometer mit dem Geschwindigkeitsfilter aufweisen muss.

(5 BE)

- 1.9 Die Massenbestimmung der Bestandteile einer Probe mit einem Massenspektrometer ist im Hinblick auf die Probe keine zerstörungsfreie Messmethode. Beurteilen Sie diese Aussage.

(2 BE)

- 2 Eine weitere Art eines Massenspektrometers ist das Flugzeitmassenspektrometer. Der grundlegende Aufbau ist in Material 5 dargestellt. Die Ionen mit Ladung q und Masse m werden zuerst aus der Ruhe durch die konstante Spannung U_B beschleunigt und durchlaufen anschließend mit konstanter Geschwindigkeit eine feldfreie Driftstrecke d . Am Ende der Driftstrecke können die Ionen detektiert und durch eine Messelektronik die Flugzeit t_d in der Driftstrecke bestimmt werden.

- 2.1 Zeigen Sie, dass für die Flugzeit t_d die Formel $t_d = \sqrt{\frac{d^2 \cdot m}{2 \cdot U_B \cdot q}}$ gilt.

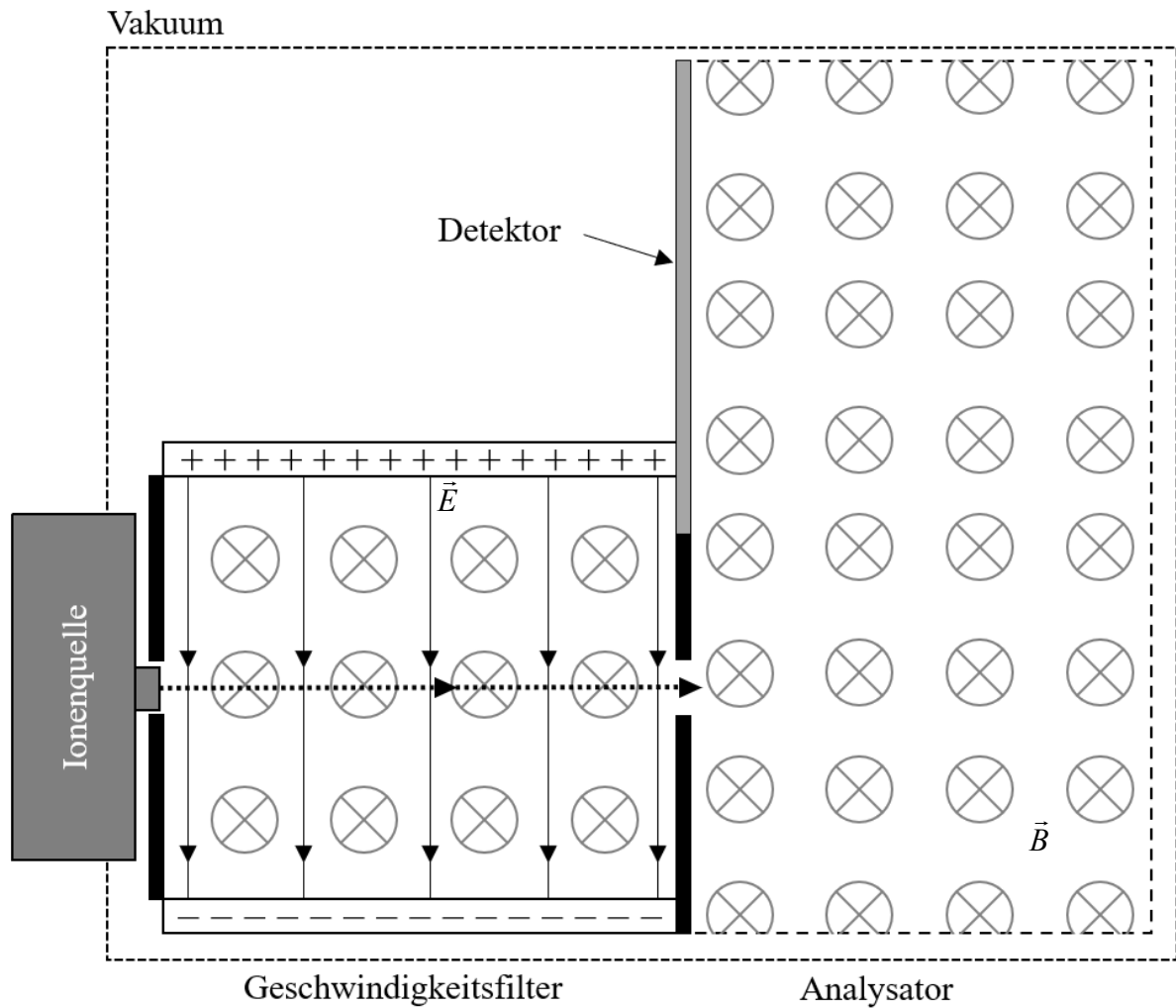
(5 BE)

- 2.2 Ionen einer Probe tragen jeweils die Ladung $q = +2e$ und benötigen nach Durchlaufen der Beschleunigungsspannung $U_B = 1500 \text{ V}$ für die Driftstrecke $d = 50 \text{ cm}$ eine gemessene Flugzeit von $t_d = 1,74 \mu\text{s}$. Berechnen Sie die Masse der einzelnen Ionen als Vielfaches der atomaren Masseneinheit $u = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ und bestimmen Sie mithilfe des Periodensystems in Material 6, um welches stabile Element es sich handelt.

(5 BE)

Material 1

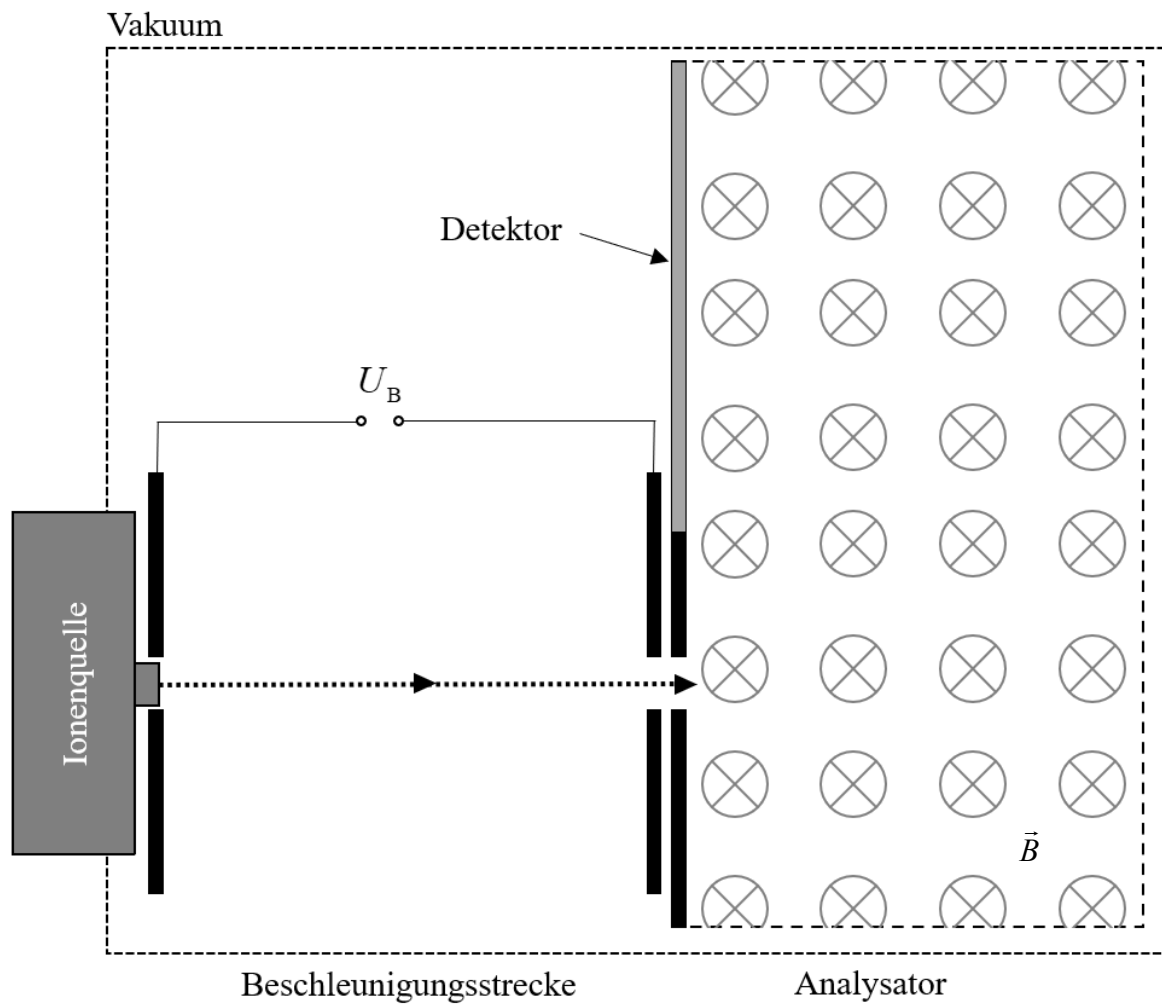
Massenspektrometer mit Geschwindigkeitsfilter



Das magnetische Feld zeigt in die Zeichenebene.

Material 2

Massenspektrometer mit Beschleunigungsstrecke



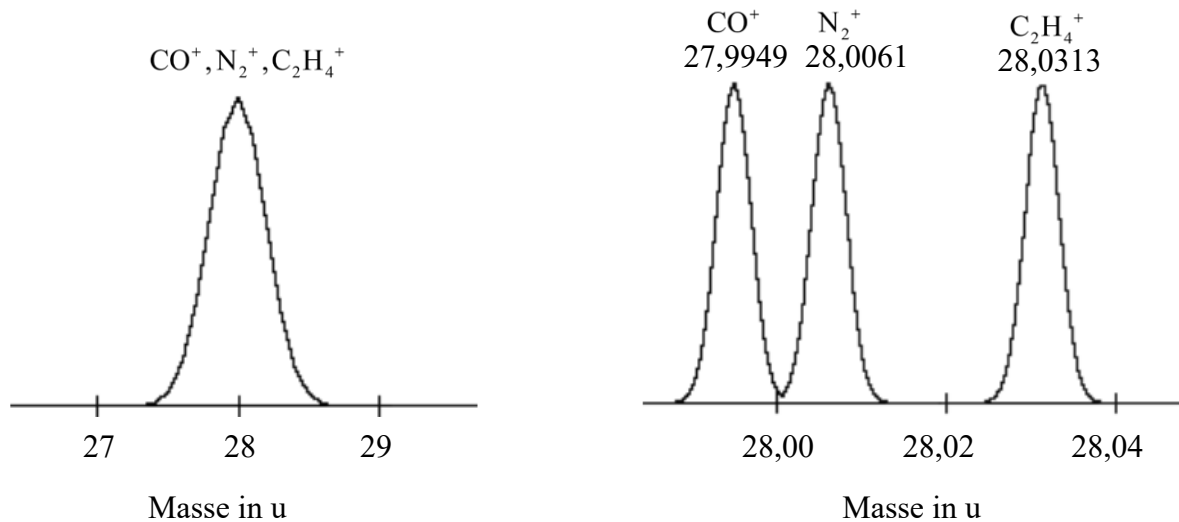
Material 3

Bahnradien für Ionen unterschiedlicher Masse

Masse m in 10^{-27} kg	1,67	6,65	14,97	23,26
Bahnradius r in cm	10,8	21,5	32,4	40,2

Material 4

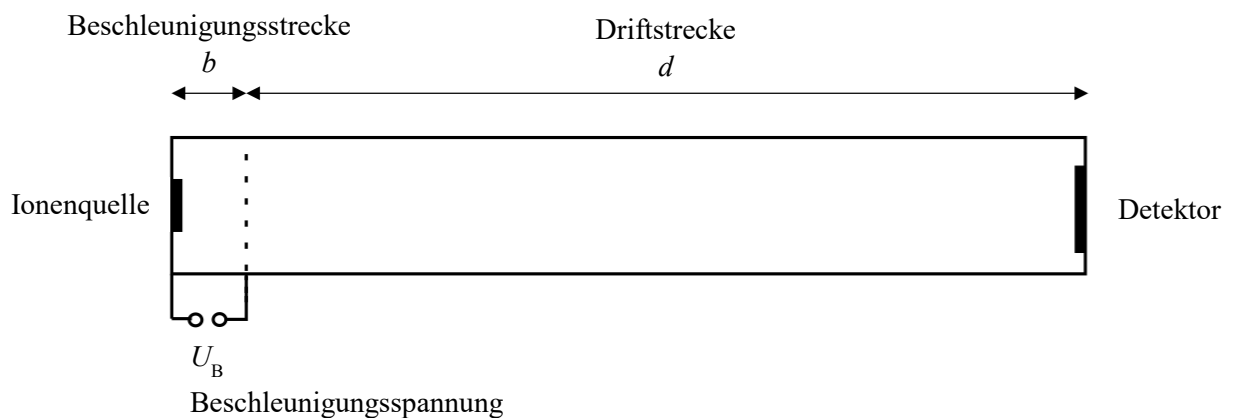
Zwei Massenspektren von drei verschiedenen, jeweils einfach ionisierten Molekülen



Die Massen sind als Vielfaches der atomaren Masseneinheit $1 \text{ u} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ angegeben.

Material 5

Flugzeitmassenspektrometer



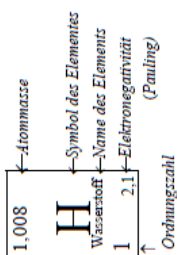
Material 6

Periodensystem der Elemente

Periodensystem																III	IV	V	VI	VII	VIII																
																10,81	12,01	14,01	16,00	19,00	20,18																
1	H	Wasserstoff														B	C	N	O	F	Ne	He															
		1	2,1															5	6	7	8	9	10														
		1,008																26,98	28,09	30,97	32,07	35,45	39,95														
2	Li	6,941	9,01															Al	Si	P	S	Cl	Ar														
		Lithium	Beryllium															Aluminium	Silicium	Phosphor	Schwefel	Chlor	Argon														
		3	1,0	4	1,5															13	14	15	16	17	18												
3	Na	22,99	24,31															Na	Mg																		
		Natrium	Magnesium															11	12	13	14	15	16	17	18												
																Nebengruppenelemente																					
4	K	39,10	40,08	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn																							
		Kalium	Calcium	Scandium	Titan	Vanadium	Chrom	Mangan	Eisen	Cobalt	Nickel	Kupfer	Zink																								
		19	0,8	20	1,0	21	1,3	22	1,5	23	1,6	24	1,6	25	1,5	26	1,8	27	1,8	28	1,8	29	1,9	30	1,6	31	1,6	32	1,8	33	2,0	34	2,4	35	2,8	36	
5	Rb	85,47	87,62	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd																							
		Rubidium	Strontium	Yttrium	Zirkonium	Niob	Molybdän	Technetium	Ruthenium	Rhodium	Palladium	Silber	Cadmium																								
		37	0,8	38	1,0	40	1,4	41	1,6	42	1,8	43	1,9	44	2,2	45	2,2	46	2,2	47	1,9	48	1,7	49	1,7	50	1,8	51	1,9	52	2,1	53	2,5	54			
6	Cs	132,91	137,33	Ba		Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg																							
		Cäsium	Barium	Lanthanoide		Hafnium	Tantal	Wolfram	Rhenium	Osmium	Iridium	Platin	Gold	Quecksilber																							
		55	0,7	56	0,9	72	1,3	73	1,5	74	1,6	75	1,9	76	2,2	77	2,2	78	2,2	79	2,4	80	1,9	81	1,8	82	1,8	83	1,9	84	2,0	85	2,2	86			
7	Fr	(223)	(226,03)	Ra		Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Cn																							
		Francium	Radium	Actinoide		Rutherfordium	Dubnium	Seaborgium	Bohrium	Hassium	Meitnerium	Darmstadtium	Roentgenium	Copernicium																							
		87	0,7	88	0,9	104	105	106	107	108	109	110	111	112																							
																Namen der Hauptgruppen										IV Kohlenstoffgruppe V Stickstoffgruppe VI Chalkogene VII Halogene VIII Edelgase											
																I Alkalimetalle II Erdalkalimetalle III Erdmetalle																					
																7																					

Periodensystem

der Elemente



Nebengruppenelemente