

Durch ein Elektronenstoß-Experiment nach Franck und Hertz soll die Existenz diskreter Energieniveaus im Quecksilberatom nachgewiesen werden. Aus der Strom- Spannungscharakteristik der Franck-Hertz-Röhre wird die Energie des angeregten Überganges bestimmt. Für diesen Versuch wurde ihnen im Jahre 1925 der Nobelpreis für Physik verliehen.

1. Theoretische Grundlagen

1.1 Prinzipaufbau des Versuches

In der Atomphysik kennt man im Wesentlichen zwei Gruppen von Experimenten, die Rückschlüsse auf die Elektronenhülle bei Atomen erlauben: spektroskopische Experimente, bei denen die Photonenenergie des absorbierten oder emittierten Lichts gemessen wird, und Elektronenstoß-Experimente, bei denen die Atome mit Elektronen "beschossen" werden. Aus der Energie- und Winkelverteilung der gestreuten Elektronen können Rückschlüsse sowohl auf die räumliche Struktur der Elektronenhülle als auch auf die Lage der Energieniveaus gezogen werden.

Vorgänge in einer Elektronenstrahlröhre (Triode, Bild 1):

In einer evakuierten Glasröhre werden Elektronen durch eine variable Spannung U_B von der Glühkathode zu einem Gitter hin beschleunigt. Nach Durchfliegen des Gitters werden sie durch eine kleine Gegenspannung U_G , die zwischen dem Gitter und der Anode liegt, wieder abgebremst.

Nur solche Elektronen, deren kinetische Energie am Gitter größer als $e \cdot U_G$ ist ($e=1,602 \cdot 10^{-19} \text{C}$, Elementarladung), treffen auf die Anode und können dann als Anodenstrom I_A nachgewiesen werden. In der Atomphysik verwendet man für die Einheit das Elektronenvolt. Beim Durchlauf einer Beschleunigungsspannung von $U_B=1\text{V}$ gewinnt ein Elektron die Energie

$$\Delta E_{kin,e} = e \cdot U_B = 1\text{eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{J}.$$

Die Elektronen sind in der Röhre gewöhnlich als konzentrische Zylinder angeordnet.

1.2 Vorgänge in der Franck-Hertz-Röhre

In einer Franck-Hertz-Röhre befindet sich zusätzlich etwas Quecksilber. Bei kalter Röhre ist das Quecksilber praktisch vollständig kondensiert, und die Röhre verhält sich wie eine Vakuum-Triode. Bei der vorgegebenen Polung der Spannungsquellen fließt ein Anodenstrom, sobald $U_B > U_G$ wird. Mit zunehmender Beschleunigungsspannung erreichen immer mehr der von der Kathode emittierten Elektronen das Gitter sowie die Anode. Der Anodenstrom wächst kontinuierlich an, bis U_B einen Sättigungswert erreicht, bei dem schließlich alle Elektronen zur Anode hin abgesaugt werden.

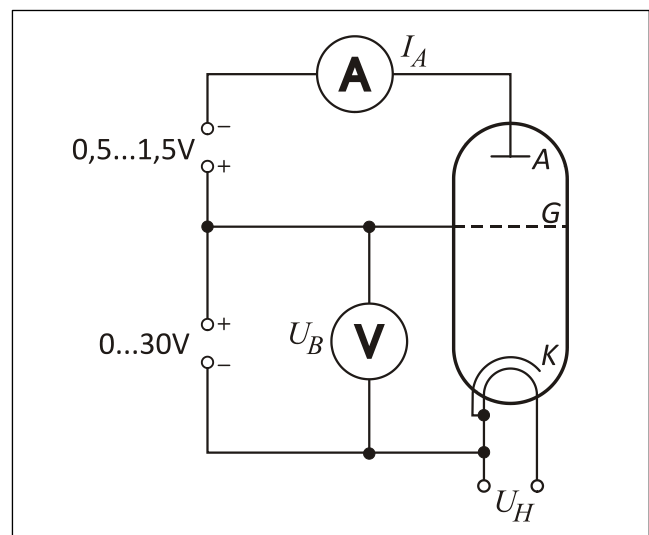


Bild 1: Prinzipaufbau des Versuches

A: Anode, G: Gitter, K: Kathode

Wird die Röhre auf etwa 180°C beheizt, so bildet sich Hg-Dampf mit einem Dampfdruck von etwa 20 mbar. Die mittlere freie Weglänge der Elektronen ist dann klein gegenüber dem Abstand zwischen Kathode und Gitter. Bei **elastischen Stößen** von Elektronen auf Hg-Atome wird praktisch keine Energie auf die Atome übertragen, da deren Masse sehr viel größer als die Elektronenmasse ist. Für den maximal möglichen Übertrag an kinetischer Energie $E_{kin,Hg}$ auf die vor dem Stoß ruhenden Hg-Atome gelten

$$\frac{E_{kin,Hg}}{E_{kin,e}} = 4 \frac{m_e}{m_{Hg}} = 0,001\% \quad (1)$$

wobei $E_{kin,e}$ die Energie der Elektronen vor dem Stoß beinhaltet.

Haben die Elektronen jedoch eine bestimmte Mindestenergie erreicht ($E_{kin,e} > 4,89 \text{ eV}$), so können sie bei einem Stoß das Hg-Atom **anregen**. Die kinetische Energie der Elektronen wird also in innere Energie E_{Hg} des Hg-Atoms umgewandelt, der Stoß ist dann **inelastisch**.

Dass eine **Mindestenergie** zur inneren Anregung erforderlich ist, führt auf eine der Grundaussagen der Quantenmechanik zum Atombau: die Energiezustände der Hüllenelektronen eines Atoms sind nicht kontinuierlich, sondern diskret verteilt (*gequantelt*). Dementsprechend kann ein Atom Energie auch nur gequantelt aufnehmen.

Hg-Atome haben eine Vielzahl von möglichen Anregungsniveaus zwischen 4,89 eV und 10,4 eV. Regt man sie mit darüberhinausgehenden Energien an, so werden sie ionisiert, verlieren also ein Hüllenelektron.

Ein angeregtes Atom gibt die aufgenommene Energie kurze Zeit später in Form eines Photons wieder ab. So beobachtet man intensive Linien: bei der Wellenlänge $\lambda = 254 \text{ nm}$, die der Anregung mit 4,89 eV entspricht und bei $\lambda = 185 \text{ nm}$, die 6,73 eV entspricht.

Im Franck-Hertz-Rohr treten bei kontinuierlicher Erhöhung der Beschleunigungsspannung inelastische Stöße erstmals unmittelbar vor dem Gitter auf, da die Elektronen dort ihre maximale kinetische Energie besitzen. Nach dem Stoß reicht die Energie der Elektronen nicht mehr aus, um gegen die Gegenspannung U_G anzulaufen, und der Anodenstrom sinkt stark ab. Bei weiterer Erhöhung von U_B wandert die Anregungszone auf die Kathode zu, die Elektronen können auf dem Weg zum Gitter wieder kinetische Energie aufnehmen und der Anodenstrom steigt wieder an.

Schließlich können die Elektronen kurz vor dem Gitter zum zweiten Mal Hg-Atome anregen, der Anodenstrom sinkt wieder, und so fort. Die I_A - U_B -Kennlinie der Röhre zeigt also periodische Schwankungen (**Bild 3b**). Der Abstand der Maxima entspricht der Anregungsenergie E_{Hg} des ersten Energieniveaus der Hg-Atome. Weitere Energieniveaus können mit der vorhandenen Anordnung nicht aufgelöst werden.

2. Versuch

2.1 Vorbetrachtung

Aufgabe: Beschreiben Sie mit eigenen Worten:

- Was passiert in einer Franck-Hertz-Röhre?
- Was soll dabei in diesem Versuch gemessen werden?
- Warum muss die Röhre auf etwa 180°C erhitzt werden?

2.2 Versuchsdurchführung

2.2.1 Verwendete Geräte

Franck-Hertz-Rohr, Betriebsgerät dazu, Rohrfen 230 V, Temperaturfühler, Oszilloskop

2.2.2 Betriebshinweise

Das Franck-Hertz-Rohr befindet sich zur Versuchsdurchführung in einem elektrisch beheizten Rohrfen. Sämtliche für das Rohr benötigten Betriebsspannungen (**Bild 2**), die Temperaturmessung und -regelung für den Rohrfen, die Verstärkung des Anodenstromes sowie weitere Hilfsspannungen werden in einem Franck-Hertz-Betriebsgerät bereitgestellt (**Bild 4**).

Die Anzahl und die Tiefe der zu beobachtenden Minima hängt von mehreren Versuchsparametern ab: von der Gegenspannung, von der Elektronenemission an der Kathode und von der Temperatur der Röhre. Bei zu niedriger Temperatur und damit zu geringem Hg-Dampfdruck ist die mittlere freie Weglänge der Elektronen so groß, dass viele Elektronen vor dem ersten Stoß schon eine Energie von 10,4 eV erreichen und damit das Hg-Atom ionisieren können. Das führt zu einer Gasentladung in der Röhre. Bei zu hohem Dampfdruck treten aufgrund der kleinen mittleren freien Weglänge so viele elastische Stöße auf, dass nur ein geringer Anodenstrom entsteht, bei dem die Maxima und Minima schlecht zu ermitteln sind.

Die Elektronenemission der Kathode kann prinzipiell gesteuert werden durch den Kathodenheizstrom. Eine höhere Genauigkeit erzielt man bei Verwendung einer Röhre mit einem zusätzlichen Raumladungsgitter G_1 vor der Kathode (**Bild 2**). Durch die Steuerspannung U_1 , mit der das Raumladungsgitter auf ein positives Potential gegenüber der Kathode gebracht wird, kann der Emissionsstrom reguliert werden.

2.2.3 Versuchshinweise

Alle Angaben zu Bedienelementen beziehen sich auf **Bild 4**

Achtung: Im Regelfall ist das Betriebsgerät des Franck-Hertz-Versuches bereits durch das Laborpersonal eingeschaltet worden, d. h. **Vorsicht Verbrennungsgefahr!**

- Überprüfen Sie die Verbindung des Temperaturfühlers (DIN-Buchse „NiCr-Ni“) mit dem Franck-Hertz-Betriebsgerät (DIN-Buchse „Franck-Hertz-Rohr“).
- Der Temperaturfühler steckt in einer vorgesehenen Bohrung an der Rückseite des Rohrfens. Die Franck-Hertz-Röhre steckt vorn im Kupferrohr des Rohrfens.

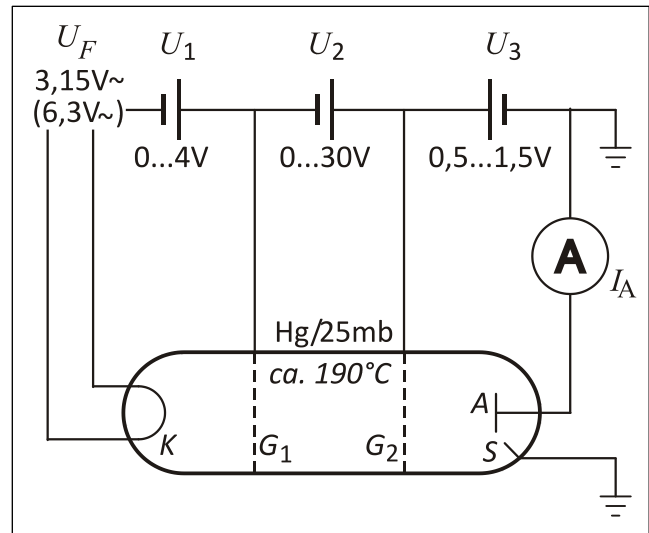


Bild 2: Schaltung des Franck-Hertz-Rohres

- K : Heizkathode
- U_1 : Steuerspannung
- U_2 : Beschleunigungsspannung
- U_3 : Gegenspannung
- G_1 : Raumladungsgitter
- G_2 : Beschleunigungsgitter
- A : Anode
- I_A : Anodenstrom
- S : Stift zur Ableitung von Kriechströmen

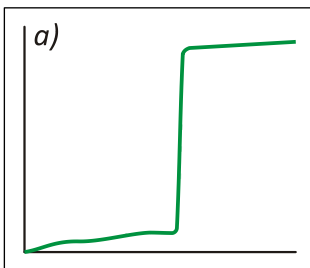
- Der Betriebsartschalter (**7**) sollte auf „**RESET**“ stehen.
- Überprüfen Sie die Voreinstellung $\vartheta_S = 186^\circ\text{C}$ und warten Sie ab, bis die Betriebstemperatur erreicht ist (*LED-Anzeige wechselt von rot nach grün, die Temperatur erreicht zunächst ein Maximum und nimmt dann bis zum Endwert ab*).

Achtung: Ein Blinken im Display (**6**) zeigt einen Aufbaufehler bei der Temperaturmessung an.

2.2.3.1 Einstellen der Rohrparameter

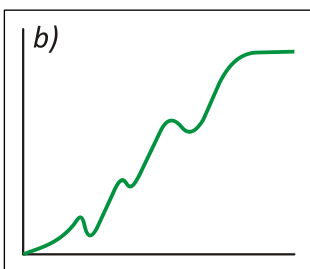
- Überprüfen Sie die Anschlüsse des Oszilloskops: Buchsen (**9**) mit x -Eingang, Buchsen (**11**) mit y_A -Eingang.
- Stellen Sie den Betriebsartenschalter (**7**) auf „**Sägezahn**“. Die Beschleunigungsspannung U_2 wird automatisch mit einem Sägezahnverlauf auf jeweils maximal **30V** geregelt.
- Stellen Sie die Gegenspannung auf $U_3 = 6\text{V}$ (**Regler (3)**) ein. Bei U_3 -Stellung des Wahlschalter (**5**) zeigt die Anzeige die Gegenspannung U_3 im Display (**6**) an.
- Beobachten Sie die Oszilloskop-Kennlinie. Diese sollte die typische Franck-Hertz-Kurve ausbilden (**Bild 3f**).
- Erhöhen Sie die Saugspannung U_1 langsam. Bei U_1 -Stellung des Wahlschalter (**5**) zeigt die Anzeige die Saugspannung U_1 im Display (**6**) an.
- Beobachten Sie die Oszilloskop-Kennlinie weiter.
- Gehen Sie vorsichtig vor und brechen Sie bei Auftreten einer Übersteuerung (**Bild 3b**) die Erhöhung der Spannung ab.

2.2.3.2 Optimierung der Franck-Hertz-Kurve



a) Optimierung der Betriebstemperatur

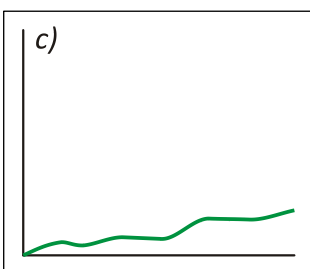
- Falls die Franck-Hertz-Kurve sprunghaft ansteigt (**Bild 3a**) und durch das Einschubloch des Rohrofens eine Gasentladung als blaues Leuchten im Franck-Hertz-Rohr zu beobachten ist, sofort den Betriebsartenschalter auf „**RESET**“ stellen und abwarten bis die Betriebstemperatur erreicht wird (*Laborpersonal verständigen*).



b) Optimierung von U_1

Eine höhere Saugspannung U_1 sorgt für einen höheren Emissionsstrom der Elektronen.

- Falls die Franck-Hertz-Kurve zu steil ansteigt, also bereits unterhalb von $U_2 = 30\text{V}$ die Aussteuerungsgrenze des Stromverstärkers erreicht und die Kurve oben abgeschnitten wird (**Bild 3b**), verkleinern Sie U_1 bis die Kurvensteigung **Bild 3d** entspricht.



- Falls die Franck-Hertz-Kurve zu flach ansteigt, also der Auffängerstrom I_A überall unter **5nA** bleibt, (**Bild 3c**), vergrößern Sie U_1 bis die Kurvensteigung **Bild 3d** entspricht.
- Falls die Franck-Hertz-Kurve trotz Erhöhung von U_1 zu flach bleibt, muss der Sollwert ϑ_S für die Ofentemperatur mit dem Schraubenzieherpotentiometer verkleinert werden (*Laborpersonal*).

c) Optimierung von U_3

Eine höhere Gegenspannung U_3 bewirkt eine stärkere Ausprägung von Maxima und Minima der Franck-Hertz-Kurve, gleichzeitig wird der Auffängerstrom insgesamt reduziert.

- Falls Maxima und Minima der Franck-Hertz-Kurve schlecht ausgeprägt sind (**Bild 3d**), erhöhen Sie abwechselnd zunächst Gegenspannung U_3 und dann die Saugspannung U_1 , bis die Kurvenform aus **Bild 3f** erreicht wird.
- Falls die Minima der Franck-Hertz-Kurve unten „abgeschnitten“ werden (**Bild 3e**), verkleinern Sie abwechselnd zunächst die Gegenspannung U_3 und dann die Saugspannung U_1 , bis die Kurvenform aus **Bild 3f** erreicht wird.

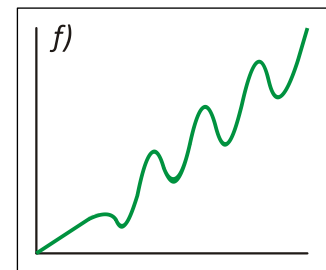
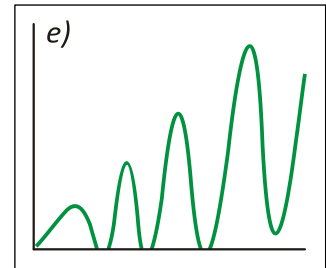
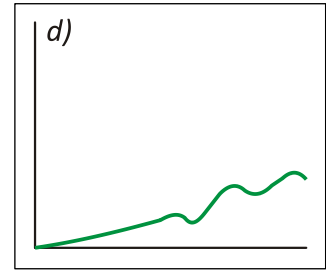


Bild 3: Skizzen als Einstellhilfen

2.2.3.3 Kurvenaufnahme

- Nehmen Sie zur Auswertung die Franck-Hertz-Kurve manuell auf.
- Stellen Sie dazu den Betriebsartschalter (**7**) auf „MAN“.
- Erhöhen Sie mit dem Potentiometer (**8**) die Beschleunigungsspannung U_2 in **1V-Schritten** für den gesamten Bereich. Lesen Sie die Beschleunigungsspannung U_2 am Multimeter ab (**Ausgang 9**) $U_2/10$).
- Stellen Sie zur Anodenstrommessung den Wahlschalter (**5**) auf „I“ und lesen Sie am Display (**6**) den dazugehörigen Anodenstrom (in nA) ab.

Hinweis: Parallel zum Ausgang (**9**) ist ein Multimeter zur Messung der Beschleunigungsspannung U_2 geschaltet. Der abzulesende Wert muss mit dem Faktor **10** multipliziert werden, da dieser Ausgang ein Teilverhältnis von 1/10 aufweist.

Bestimmung der Maxima

- Bestimmen Sie zur Ergänzung der Messwerte die Lage der Maxima.
- Erhöhen Sie mit dem Potentiometer (**8**) langsam die Beschleunigungsspannung U_2 bis zum ersten Maximum des Anodenstroms I_A und notieren Sie den Wert von U_2 .
- Ermitteln Sie genauso die weiteren Maxima.
- Wiederholen Sie den gesamten Messvorgang noch einmal.
- Optimieren Sie aber zunächst die Franck-Hertz-Kennlinie (**Ablauf nach 2.2.3.2 und 2.2.3.3**).

2.3 Versuchsauswertung

- Stellen Sie die ermittelten Messwerte in einem Diagramm als Funktion $I = f(U_2)$ graphisch dar.
- Zur quantitativen Auswertung stellen Sie die Energie E der jeweiligen Maxima als Funktion der Anzahl der Energieniveaus in einem Diagramm graphisch dar ($E = f(n_{max})$). Dabei entspricht die Energie E den Wert von U_2 aber in eV für $I = \max$.
- Aus der Steigung der Geraden ergibt sich die Anregungsenergie E_{Hg} der Hg-Atome.

- Vergleichen Sie ihren Wert für das erste Anregungsniveau mit dem Tabellenwert (Tabellenwert: 4,89 eV).
- Schätzen Sie die Messunsicherheit ab.

3. Ergänzung

- Was würde man bei dem Versuch beobachten, wenn man die Gegenspannung weglässt?
- Warum fällt die Strom-Spannungs-Kennlinie beim Erreichen der Anregungsenergie nicht plötzlich, sondern kontinuierlich ab?

Beleuchtet man z.B. Quecksilber- oder Natriumdampf mit Licht, so findet eine Anregung der Atome nur dann statt, wenn die Photonenenergie genau der Energiedifferenz eines optisch erlaubten Überganges entspricht. Bei Elektronenstoß-Experimenten ist das anders. Da die kinetische Energie der Elektronen nicht quantisiert ist, kann eine Anregung auch dann stattfinden, wenn die Elektronenenergie größer als die erforderliche Anregungsenergie ist.

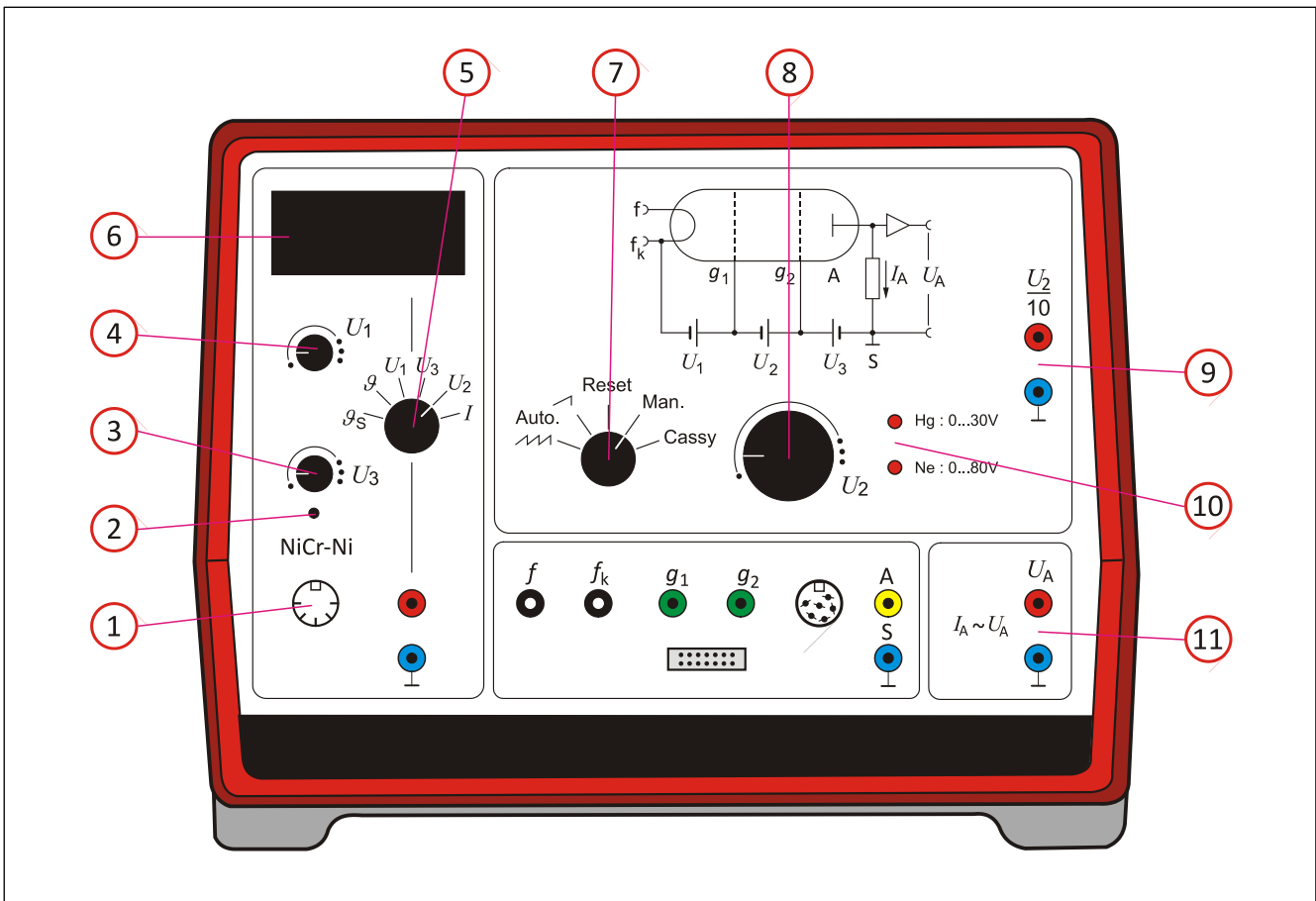


Bild 4: Franck-Hertz-Betriebsgerät

Parameter- und Anzeigefeld

- (1) Anschluss Temperaturfühler
- (2) Schraubenzieherpotentiometer Solltemperatur
- (3) Potentiometer Gegenspannung U_3
- (4) Potentiometer Saugspannung U_1
- (5) Auswahlschalter für Parameter- und Messwerte
- (6) Digitalanzeige des mit (5) ausgewählten Parameter- bzw. Messwertes

Betriebsfeld

- (7) Betriebsartschalter
- (8) Potentiometer zum manuellen Einstellen der Beschleunigungsspannung U_2
- (9) Anschluß Oszilloskop x -Auslenkung
- (10) LEDs zur Temperaturanzeige des angeschlossenen Rohres
- (11) Anschluß Oszilloskop y -Auslenkung