

NOVA
DIDACTA

Sistemas Didáticos



PHYWE

**Efeito Fotoelétrico Externo e
Constante de Planck**

Seleção de Comprimento de Onda c / Espectrômetro de Rede

P2510502

MANUAL DO USUÁRIO

Soluções Tecnológicas

Seleção de comprimento de onda com espectrômetro de rede

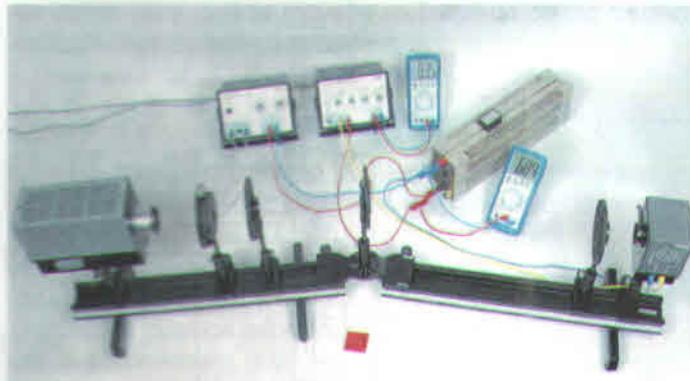


Fig. 1: Arranjo do experimento P2510502

O que você pode aprender...

- Energia de fóton
- Absorção de fóton
- Efeito fotoelétrico externo
- Função de trabalho
- Fotocélula
- Teoria quântica
- Constante de Planck
- Espectrômetro de rede

Princípio:

O efeito fotoelétrico é um experimento chave no desenvolvimento da física moderna. A luz branca de uma lâmpada incandescente é filtrada por um espectrômetro de rede e ilumina uma fotocélula. A energia máxima dos elétrons ejetados depende somente da frequência da luz incidente, e é independente de sua intensidade. Esta lei parece estar em contradição com a teoria eletromagnética ondulatória da luz, mas ela se torna compreensível no plano da teoria corpuscular da luz. A tensão de freamento U_0 em diferentes frequências de luz é determinada pelas características I/U da fotocélula e traçada pela frequência de luz f correspondente. O quantum de ação de Planck é então determinado por este gráfico.

Tarefas

1. Calcular a frequência f da luz dependente do ângulo do espectrômetro
2. Determinar experimentalmente a tensão de freamento U_0 para diferentes frequências de luz e traçá-la contra frequência da luz.
3. Calcular a constante de Planck a partir da dependência da tensão de freamento U_0 sobre a frequência f da luz.

O que você vai necessitar:			
Fotocélula sem caixa	✓	06779.00	1
Rede de difração, 600 linhas/mm	✓	08546.00	1
Filtro colorido, luz vermelha, >600 nm	✓	08416.00	1
Fenda, ajustável	✓	08049.00	1
Suporte para diafragma, em haste	✓	08040.00	1
Suporte para lente	✓	08012.00	2
Lente, com cavalete, $f = +100$ mm	✓	08021.01	2
Cabo de conexão, plugue de 4 mm, 32 A, vermelho, $l = 50$ cm	✓	07361.01	2
Cabo de conexão, plugue de 4 mm, 32 A, azul, $l = 50$ cm	✓	07361.04	2
Cabo de conexão, plugue de 4 mm, 32 A, vermelho, $l = 150$ cm	✓	07364.01	1
Cabo de conexão, plugue de 4 mm, 32 A, azul, $l = 150$ cm	✓	07364.04	2
Cabo de conexão, plugue de 4 mm, 32 A, amarelo, $l = 150$ cm	✓	07364.02	1
Cabo de conexão, plugue de 4 mm, 32 A, preto, $l = 150$ cm	✓	07364.05	1
Resistor variável, 100 Ohm	✓	06114.02	1
Lâmpada para experimento 2	✓	08129.01	1
Lâmpada halógena, 12 V, 50 W	✓	08129.06	1
Suporte G 3.65 para lâmpada halógena 50/100 W	✓	08129.04	1
Condensador duplo, $f = 60$ mm	✓	08137.00	1
Fonte DC	✓	13505.93	1
Amplificador universal de medição	✓	13626.93	1
Multímetro digital, 3 1/2 dígitos	✓	07122.00	2
Banco óptico de perfil, $l = 600$ mm	✓	08283.00	2
Base para banco óptico de perfil, ajustável	✓	08284.00	3
Junta articulada para banco óptico de perfil	✓	08285.00	1
Cavalete para banco de perfil óptico, $h = 80$ mm	✓	08286.02	5

- 1 CD-ROM

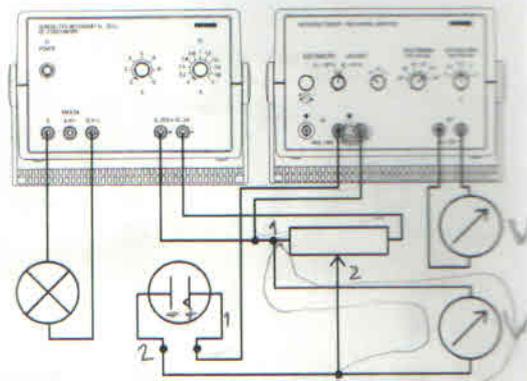
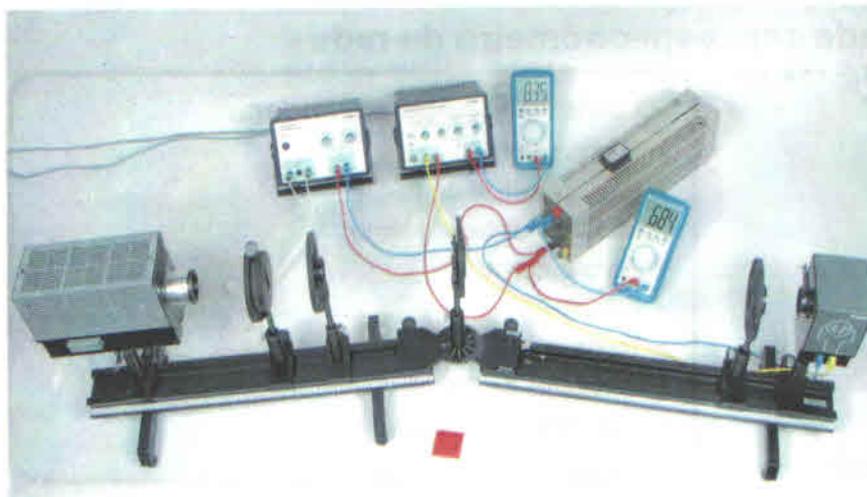


Fig. 2: Diagrama do circuito para o experimento

Montagem e Procedimento

O experimento para a demonstração do efeito fotoelétrico é formado por: uma célula fotoelétrica, cujo cátodo é irradiado por um feixe de luz caracterizada pela frequência f , um potenciômetro permitindo aplicar uma tensão U no ânodo da célula (positiva ou negativa com relação ao cátodo); um voltímetro para medir esta tensão; um microamperímetro para medir a corrente do efeito fotoelétrico

- Monte os dois bancos ópticos com juntas articuladas de modo que o arranjo fique firme na mesa e o banco direito possa ser girado
- Posicione a lâmpada em 9.0 cm, a fenda em 34.0 cm e a primeira lente de 100 mm em 44.0 cm da extremidade esquerda o banco óptico da esquerda e acenda a lâmpada
- Ajuste a largura da fenda para aproximadamente a mesma largura da fenda de entrada da fotocélula
- Mova o suporte de lâmpada dentro da caixa da lâmpada para focalizar a luz vinda da lâmpada no plano da fenda
- Mova a lente de tal maneira que a luz esteja paralela depois da lente - você pode avaliar o feixe na próxima parede
- Introduza a rede de 600 linhas por mm no suporte de diafragma no centro da junta articulada
- Alinhe as linhas da rede na vertical, observando o espectro em superfícies ao redor - mesma altura para ambos os lados da rede
- Coloque a célula na extremidade direita do banco óptico da direita, use a entrada da fenda da caixa
- Focalize a fenda que ilumina na entrada da fenda da fotocélula com a outra lente de 100 mm introduzida na frente da fotocélula
- Registre o ângulo como ângulo zero, onde toda a luz não difratada entra pela fenda de entrada da fotocélula
- Faça as conexões elétricas como na Fig. 2
- Ajuste o amplificador de medição para o modo de baixo desvio, amplificação 105 e constante de tempo 0.3 s
- Verifique a zeragem do amplificador universal - sem nenhuma conexão na entrada, ajuste a tensão de saída do amplificador para zero com o botão de zeragem

- Ajuste a tensão da fonte de alimentação no potenciômetro para 3 V, e corrente para 1 A.
- Observe a saída do amplificador que é proporcional à fotocorrente dependente da tensão de polarização
- Meça a tensão de polarização para corrente zero para diferentes ângulos no espectro de difração de primeira ordem da lâmpada - para a rede de 600 l/mm 13° to 25° .
- Assim que a luz puder passar pelo filtro vermelho (aproximadamente 21° acima do ângulo de difração), use o filtro para impedir que a luz UV de segunda ordem perturbe a medição.

Observações sobre a operação:

A entrada do amplificador de medição tem uma resistência de 10,000 Ohm. Se o amplificador for ajustado para amplificação 104, então, um volt na saída do amplificador corresponde a 0.0001 V na entrada e assim a uma corrente de 10 nA.

A constante de tempo é ajustada para evitar erros devidos à influência de ruído na fonte. O paquímetro na junta articulada pode ser lido como segue: pegue o próximo menor ângulo

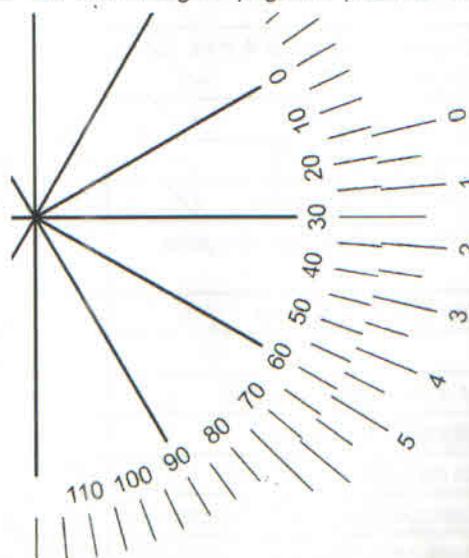


Fig. 3: Exemplo para leitura do paquímetro: A próxima marca mais baixa perto da marca zero é 15° , as próximas marcas coincidentes estão em 1.5° , portanto o ângulo lido é 16.5°

lendo na escala no interior perto da marca do zero da escala no exterior e acrescente o ângulo lido no vernier, onde as linhas do vernier (fora, que se move) e as linhas da escala na placa redonda (fixa, no centro) coincidem, veja exemplo na Fig. 3.

Teoria e avaliação

O efeito fotoelétrico externo foi descrito pela primeira vez em 1886 por Heinrich Hertz. Logo ficou claro que este efeito mostra certas características que não podem ser explicadas pela teoria ondulatória clássica da luz. Por exemplo, quando a intensidade da luz que incide em um metal se torna mais intensa, a teoria ondulatória clássica esperaria que os elétrons liberados pelo metal absorvessem mais energia. No entanto, experimentos mostraram que a energia máxima possível dos elétrons ejetados depende apenas da frequência da luz incidente e é independente de sua intensidade.

A explicação teórica foi dada por Einstein em 1905. Ele sugeriu que poder-se-ia considerar que a luz se comportava como partículas de certa forma, movendo-se a uma velocidade constante (a velocidade da luz no vácuo) e possuindo a energia $E = hf$. A explicação de Einstein do efeito fotoelétrico, demonstrando o comportamento de partícula da luz de fótons, contribuiu para o desenvolvimento da teoria quântica. Assim, o efeito fotoelétrico externo é um dos experimentos chave no desenvolvimento da física moderna e Einstein obteve o Prêmio Nobel em Física "por sua descoberta da lei do efeito fotoelétrico".

Tarefa 1: Calcular a frequência da luz f dependente do ângulo do espectrômetro

A frequência da luz irradiando a fotocélula é determinada usando a seguinte equação:

$$d \sin \alpha = n \lambda \quad (1)$$

$$\alpha = \arcsin (\lambda / d) \quad (2)$$

α é o ângulo do espectrômetro, d é a constante do reticulado (aqui: 1/600 mm), λ é o comprimento de onda da luz emitida e a ordem de difração n é 1 neste caso.

A frequência da luz f pode ser calculada a partir do comprimento de onda λ por $f = c / \lambda$ com velocidade da luz $c = 299.792.458$ m/s.

Tarefa 2: Determinar a tensão de freamento U_0 experimentalmente para diferentes frequências de luz e traçá-la contra a frequência f da luz

Dentro da fotocélula, um cátodo com revestimento especial de baixa função de trabalho é situado junto com um ânodo de metal em um tubo em vácuo. Se um fóton de frequência f atingir o cátodo, então um elétron pode ser liberado do material do cátodo (efeito fotoelétrico externo) se a energia do fóton for suficiente.

Se os elétrons emitidos atingirem o ânodo, eles são absorvidos por ele, devido à função de trabalho do ânodo e o resultado é uma fotocorrente.

O efeito fotoelétrico é uma interação de um fóton com um

elétron. Nesta reação, momento e energia são conservados, o elétron absorve o fóton e depois da reação tem o fóton com plena energia hf . Se a energia do fóton hf for maior do que o trabalho de extração W_c (função de trabalho do cátodo), depois da reação o elétron pode deixar a substância com uma energia cinética máxima

Isto é chamado de efeito fotoelétrico externo e é descrito por:

$$hf = W_c + W_{kin} \quad (\text{Equação de Einstein}) \quad (3)$$

A energia cinética W_{kin} para os elétrons emitidos é determinada usando o método do campo elétrico de freamento: uma polarização negativa com relação ao cátodo é aplicada no ânodo da célula fotoelétrica. Isto desacelera os elétrons e assim diminui a intensidade da corrente fotoelétrica I já que nem todos os elétrons têm energia máxima, mas têm uma distribuição de energia. O valor da polarização em que nenhum elétron atinge o ânodo e I se torna zero é chamada tensão de freamento e é indicada U_0 .

Traçando I contra a tensão de polarização aplicada U_{bias} revela-se a dependência de U_0 do comprimento de onda λ da luz incidente.

Tarefa 3: Calcular a constante de Planck a partir da dependência da tensão de freamento da frequência da luz.

Os elétrons só podem atingir o ânodo se sua energia cinética W_{kin} for maior do que a energia que eles perdem voando contra a direção do campo elétrico criado pela tensão de polarização U_{bias} além do campo elétrico desconhecido de polarização, ver Fig 3.

Tabela 1: Resultado

espectrômetro ângulo	λ/nm	$f/10^{12}$ Hz	U_0/V
13,5	389	772	1,3
14	403	744	1,2
15	431	696	1,05
16,5	473	634	0,9
18	515	582	0,7
19	543	552	0,55
20	570	526	0,47
22	624	480	0,32
24	678	442	0,25

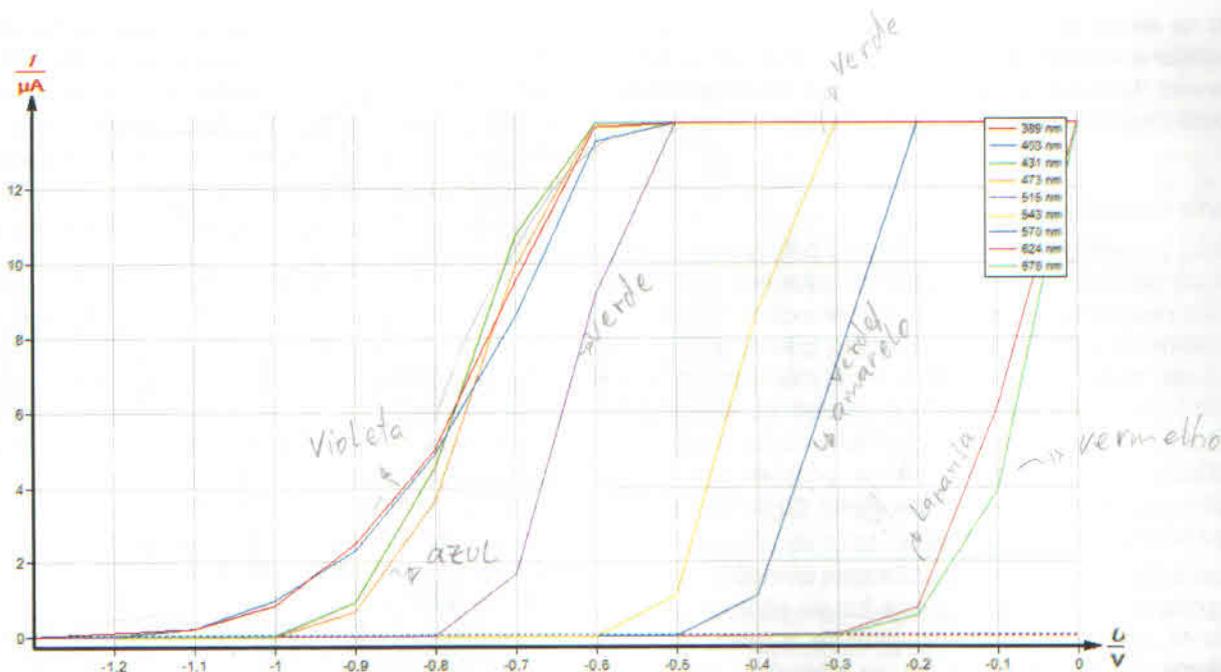


Fig. 4: Intensidade da corrente fotoelétrica I como função da tensão de polarização em diferentes frequências da luz irradiada

Como a tensão de contato está na mesma ordem de magnitude que a tensão de polarização, não podemos desprezá-la. Portanto, não é possível determinar a energia cinética absoluta dos elétrons. Apesar disso, a constante de Planck pode ser calculada a partir da dependência da tensão de freiamto da frequência da luz, como mostram as seguintes considerações:

Na tensão de freiamto U_0 , a energia cinética W_{kin} do elétron é igual à energia perdida no campo elétrico eU (U incluindo a tensão de freiamto U_0 e a tensão de contato U_{AC}):

$$e(U_0 + U_{AC}) = W_{kin} \quad (4)$$

A tensão de contato é calculada a partir dos potenciais eletroquímicos do anódo U_A e catódo U_C . A multiplicação de ambos pela carga do elétron $e = 1.602 \cdot 10^{-19}$, pois resulta em suas funções de trabalho correspondentes W_A e W_C . Portanto a equação (4) é equivalente a

$$eU_0 + W_A - W_C = W_{kin} \quad (5)$$

Para calcular a constante de Planck h usando o efeito fotoelétrico, comparamos (5) com a equação de Einstein (3):

$$W_{kin} = eU_0 + W_A - W_C = hf - W_C \quad (6)$$

Conseqüentemente, a função de trabalho do catódo não aparece na fórmula para a tensão de freiamto e (6) pode ser escrita como a seguinte função linear

$$\begin{aligned} eU_0 &= hf - W_A & \text{or} \\ U_0 &= f \cdot h/e - U_A & (7) \end{aligned}$$

Como U_A é uma constante, existe uma relação linear entre a tensão de freiamto U_0 e a frequência f da luz. A inclinação da função linear fornece a constante de Planck h .

A inclinação medida é:

$$0.00329 \text{ V/THz}$$

A multiplicação por e resulta: $h = 5.27 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$

O valor calculado pode se desviar $\pm 25 \%$ do valor da literatura: $h = 6.62 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$.

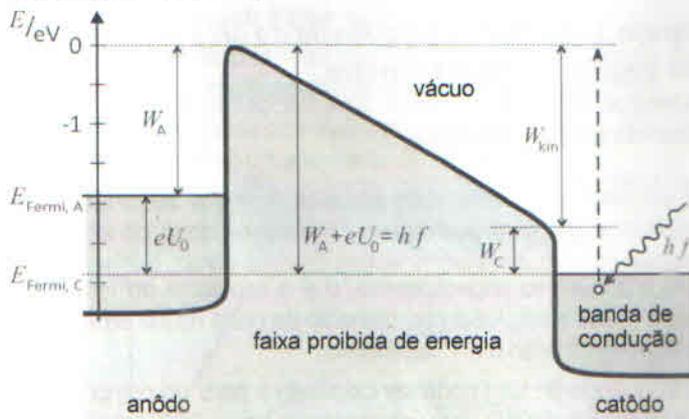


Fig. 5: Diagrama de energia para elétrons em uma fotocélula iluminada com $\lambda = 436 \text{ nm}/f = 688 \text{ THz}$ e polarização $U_0 = 1 \text{ V}$

Notas

A função de trabalho do catodo não aparece na fórmula para a tensão de freiamento. Isto é devido ao fato de que os elétrons vêm do nível de Fermi no catodo e depois têm que atingir a superfície do anodo e assim já puderam passar pela superfície do catodo.

A função de trabalho do catodo por outro lado determina se a energia do fóton é suficiente para liberar um elétron do catodo. Historicamente, este comprimento de onda limiar do efeito fotoelétrico também foi importante para a descoberta deste efeito e só foi compreendida mais tarde, quando o espectro de energia de elétron dos elétrons liberados foi sistematicamente examinado com a dependência da frequência e da intensidade da luz.

Determinando a tensão de freiamento U_0 você encontrará curvas tendo somente uma pequena inclinação ao cruzar o eixo x (ponto zero). Portanto, é complicada uma determinação precisa da tensão de freiamento.

Há uma corrente negativa para tensões de polarização mais altas. Esta corrente é devida à fotocorrente do anodo para o catodo. Elétrons também podem ser liberados do anodo. O número de elétrons também depende da frequência da luz e de uma forma diferente daquela para o catodo. Pode-se supor, que a intensidade e sensibilidade de comprimento de onda da fotocorrente inversa do anodo

para o catodo é diferente daquela da corrente de elétrons do catodo maior para o anodo. Portanto, o deslocamento do ponto zero pela intensidade de luz devido a este efeito é diferente para comprimentos de onda diferentes, tornando o ponto zero da curva característica U / I da fotocélula uma medida não muito confiável.

A corrente inversa global pode no entanto ser considerada como pequena, por causa da função de trabalho muito menor do catodo comparada ao anodo. Isto justifica o desprezar deste efeito.

Além disso, o deslocamento do ponto zero dependente da intensidade teria que ser medido para cada comprimento de onda e teria que ser levado em conta tentando obter uma normalização com respeito à intensidade.

Como os efeitos da distribuição de energia de elétrons também estão presentes, o ganho na precisão por este procedimento não será tão grande, como geralmente recomenda-se. Tanto a função de trabalho para os elétrons que deixam a substância, quanto a energia do elétron antes da reação com o fóton não têm extremos máximos, de modo que a precisão global obtida deste método é limitada.

Para uma medição precisa da constante de Planck, são mais adequadas medições por raios X, mas o experimento do efeito fotoelétrico se justifica por sua grande relevância histórica.

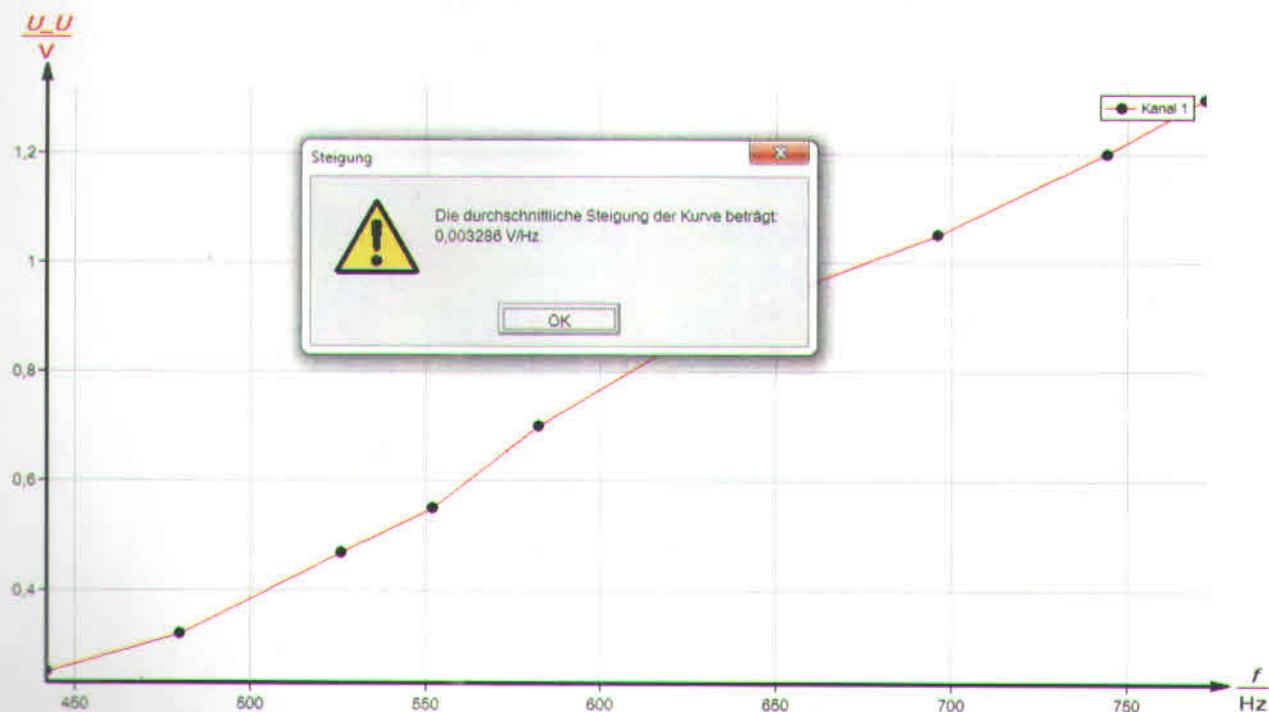


Fig. 6: Tensão de freiamento U_0 como função da frequência da luz irradiada.

Espaço para anotações