

Photoleitung in Halbleitern

Studiengang: KMT

Datum: 11.05.2010

Set: 2.08 Platz: 2

Teilnehmer: Michael Goldbach, Jürgen Döfinge

*gg. - 4j.
welcher Leitfähigkeit bewirkt typ!*

Zielstellung

- Ermittlung der Abhängigkeit der Photoleitfähigkeit von Strahlungsflußdichte und Lichtwellenlänge
- Bestimmung der Lebensdauer photoinduzierter Überschlußladungsträger

1. Begriffe und Formelzeichen

Nichtgleichgewichtsladungsträger, Photoleitung, Strahlungsflußdichte, Lebensdauer von Ladungsträgern, lineare und quadratische Rekombination

2. Versuchsvorbereitung

2.1. Wiederholen Sie die Vorlesung zu den o.g. Themen, insbesondere den Abschnitt 'Photoleitung in Halbleitern'. Machen Sie sich mit den in Punkt 1. angegebenen Begriffen und Formelzeichen vertraut. Machen Sie sich die Zusammenhänge zwischen den angegebenen Größen klar.

2.2. Beantworten Sie folgende Kontrollfragen:

- Worauf beruht die Erhöhung der elektrischen Leitfähigkeit durch Beleuchtung?
- Erklären Sie anhand des Bändermodells die Vorgänge im Halbleiter, die mit der Photoleitung verbunden sind!
- Wie hängt die Leitfähigkeit von der Strahlungsflußdichte und der Lichtwellenlänge ab? Wie unterscheiden sich hierbei Eigenleiter und Störleiter?
- Wie reagiert die Photoleitfähigkeit auf eine sprungartige Änderung der Strahlungsflußdichte?
- Welche Halbleiterwerkstoffe werden für Photowiderstände eingesetzt?

2.3. Machen Sie sich mit der Wirkungsweise der Meßschaltungen in Bild 1 und Bild 3 vertraut.

2.4. Erläutern Sie den Begriff Grenzfrequenz anhand eines passiven Tiefpasses.

3. Versuchsdurchführung und -auswertung

3.1. Abhängigkeit des Photowiderstandes von der Strahlungsflußdichte

Bauen Sie die Schaltung nach Bild 1 auf. Bestimmen Sie die Abhängigkeit des Photowiderstandes von der Strahlungsflußdichte für rotes, grünes und blaues Licht. Stellen Sie hierzu die Strahlungsflußdichte über den Strom durch die LED ein. Beschränken Sie sich dafür auf Werte für $L_e \geq 1 \mu\text{W}/\text{cm}^2$. Den Zusammenhang zwischen Strahlungsflußdichte und Stromstärke entnehmen Sie den am Arbeitsplatz ausliegenden Diagrammen.

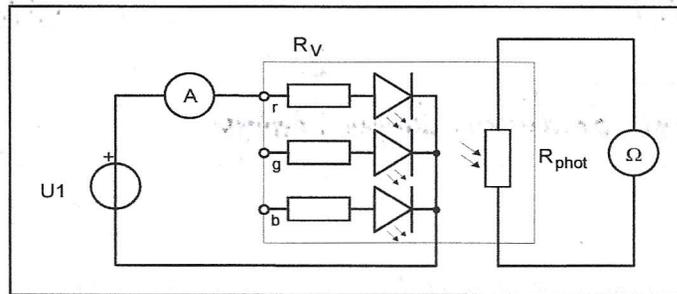


Bild 1: Bestimmung der Abhängigkeit der Photoleitfähigkeit von der Strahlungsflußdichte

Stellen Sie die Abhängigkeit des Leitwertes von der Strahlungsflußdichte L_e grafisch dar. Benutzen Sie eine logarithmische Darstellung $\log G_{\text{phot}} = f(\log L_e)$.

Im Falle des Störleiters liegt lineare Rekombination vor, denn die Rekombinationsrate der Überschuss-träger ist deren Konzentration proportional, d.h. $r \sim \delta n$ im p-Leiter oder $r \sim \delta p$ im n-Leiter. Daraus folgt für die Abhängigkeit des Leitwertes von der Strahlungsflußdichte L_e ein linearer Zusammenhang

$$G_{\text{phot}} = \text{const.} \cdot L_e \quad /1/$$

Im Eigenleiter ist demgegenüber die Rekombinationsrate proportional dem Produkt der Konzentrationen von Überschusselktronen und -löchern $\delta n \delta p$. Es liegt dann eine quadratische Rekombination vor, die zu einer Abhängigkeit des Photoleitwertes von der Strahlungsflußdichte in der Form

$$G_{\text{phot}} = \text{const.} \cdot L_e^{1/2} \quad /2/$$

führt. Diese Abhängigkeit liefert in der logarithmischen Darstellung eine Gerade mit dem Anstieg 1/2.

$$\log G_{\text{phot}} = \log \text{const.} + \frac{1}{2} \log L_e \quad /3/$$

Stellen Sie anhand der grafischen Darstellungen fest, ob es sich bei dem untersuchten Photoleiter um einen Eigen- oder Störleiter handelt.

Vergleichen Sie die spektrale Empfindlichkeit des Photowiderstandes mit der des menschlichen Auges. Normieren Sie dazu den Leitwert bei jeweils vergleichbarer Strahldichte für alle drei Farben auf den höchsten Wert. Tragen Sie die Werte in das Diagramm der spektralen Empfindlichkeit des Auges ein. Stellen Sie einen Bezug zu diesen Werten her.

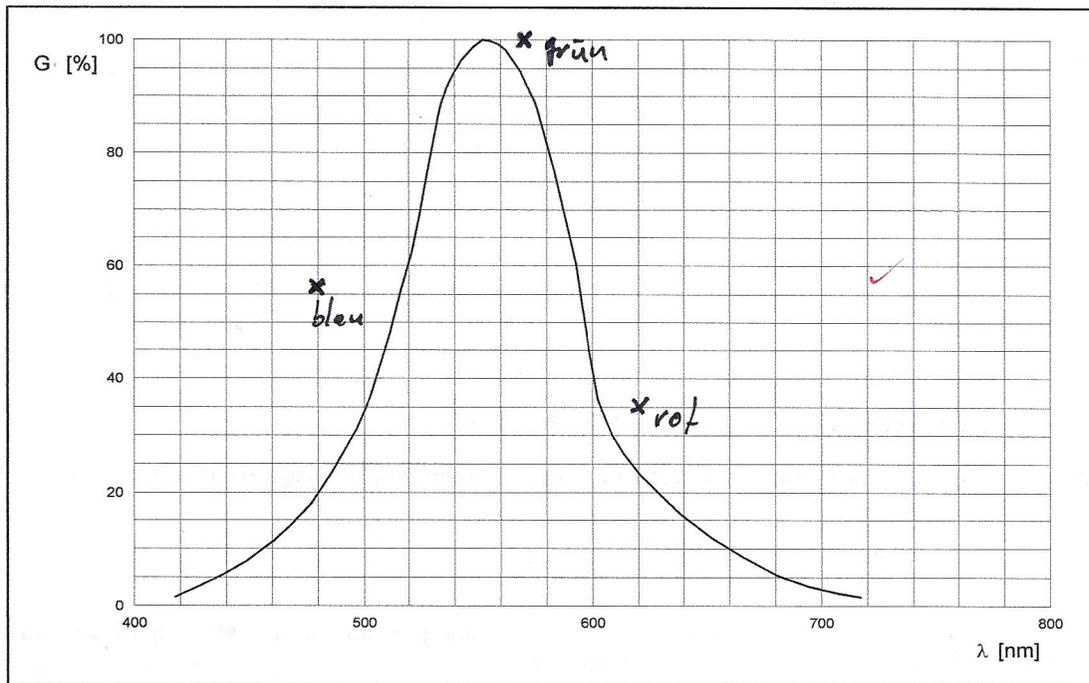


Bild 2: spektrale Empfindlichkeit des menschlichen Auges

3.2. Bestimmung der Lebensdauer der photoinduzierten Überschussladungen

Bauen Sie die Meßschaltung nach Bild 3 zur Bestimmung der Lebensdauer der photoinduzierten Überschussladungsträger auf. Stellen Sie die Eingangsspannung und die Spannung am Reihenwiderstand auf dem Oszilloskop dar. Stellen Sie am Funktionsgenerator eine positive Impulsspannung mit der Frequenz $f=100\text{ Hz}$ und $U_1=0,5 V_{SS}$ ein. Erhöhen Sie den Gleichspannungsoffset soweit nach positiven Werten, bis die Spannung über dem Widerstand R_M dreieckförmig ist.

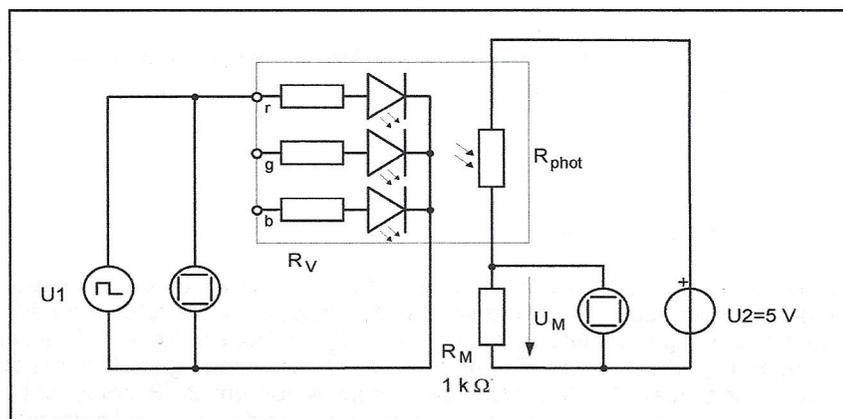


Bild 3: Bestimmung der Lebensdauer der photoinduzierten Überschussladungen

Verringern Sie dann die Frequenz, bis am Photostrom deutlich der Übergang in den stationären Zustand erkennbar wird. Bestimmen Sie mit Hilfe der Cursormessung die Zeit $t_{1/2}$, in der die Spannung U_M auf 50 % des stationären Wertes ansteigt.

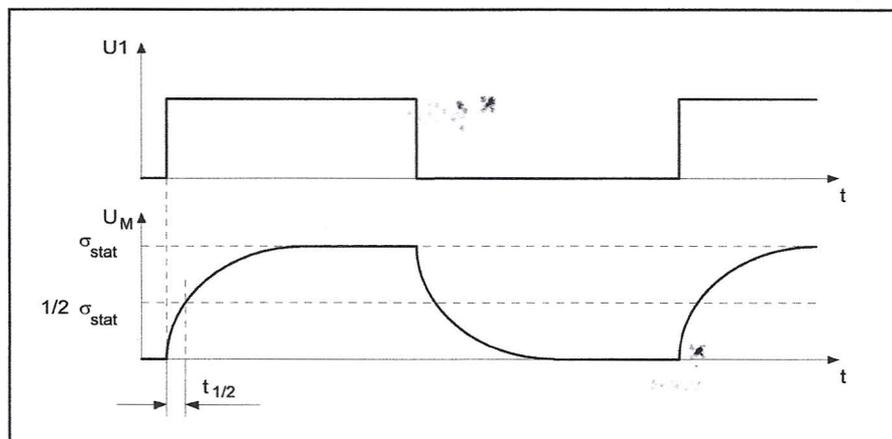


Bild 4: Bestimmung von $t_{1/2}$ aus dem Oszillogramm

Wie aus der Versuchsschaltung ersichtlich ist, wird die Spannung U_M gegeben durch

$$U_M = R_M \frac{U_2}{R_M + R_{\text{phot}}} \quad /4/$$

Wenn der Gleichanteil und die Amplitude der Strahlungsflußdichte so klein gehalten wird, daß $R_M \ll R_{\text{phot}}$ gilt, dann vereinfacht sich Gleichung 4 zu

$$U_M \approx \frac{R_M}{R_{\text{phot}}} U_2 = R_M * U_2 * G_{\text{phot}} \quad /5/$$

Die Spannung U_M gibt deshalb den zeitlichen Verlauf der Photoleitfähigkeit als Antwort auf eine Änderung der Beleuchtungsstärke wieder. Der Anstieg der Photoleitfähigkeit nach dem Einschalten des Lichtes folgt näherungsweise der Funktion

$$\sigma_{\text{phot}}(t) = \sigma_{\text{stat}} \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right] \quad /6/$$

Zum Zeitpunkt $t_{1/2}$ hat σ_{phot} 50 % von σ_{stat} erreicht. Die Lebensdauer der Überschussladungsträger berechnet sich aus $t_{1/2}$ gemäß Gleichung 6 zu

$$\tau = \frac{t_{1/2}}{\ln 2} \quad /7/$$

Bestimmen Sie τ aus Ihren Messungen!

Bestimmen Sie die Grenzfrequenz des Photowiderstandes. Gehen Sie von der Frequenz aus, mit der Sie die Messung zur Lebensdauer der Überschussladungsträger durchgeführt haben. Als Kurvenform wählen Sie eine sinusförmige Spannung mit $U_{AC} = 0,5 V_{SS}$. Erhöhen Sie am Funktionsgenerator den positiven Gleichspannungsoffset, bis die Spannung über R_M sinusförmig ist. Berechnen Sie anhand der Amplitude der Spannung über R_M den Wert, der einem Abfall um 3 dB entspricht. Erhöhen Sie die Frequenz der Eingangsspannung soweit, bis sich dieser berechnete Amplitudenwert eingestellt hat. Notieren Sie den Wert der Grenzfrequenz. Ziehen Sie aus diesem Ergebnis Schlußfolgerungen für die Einsatzmöglichkeiten des Photowiderstandes.

Süngen Dörfli Protokoll zu

Versuch 2 - Elektrooptische Bauelemente

(Photoleitung in Halbleitern)

Vorbereitung:2.2.

Der Widerstand eines Halbleiters ist bestimmt durch seine geometrischen Abmessungen und die Leitfähigkeit σ des Halbleitermaterials mit

$$\left(\sigma = e (n \mu_n + p \mu_p) \right), \text{ wobei } n \text{ bzw. } p$$

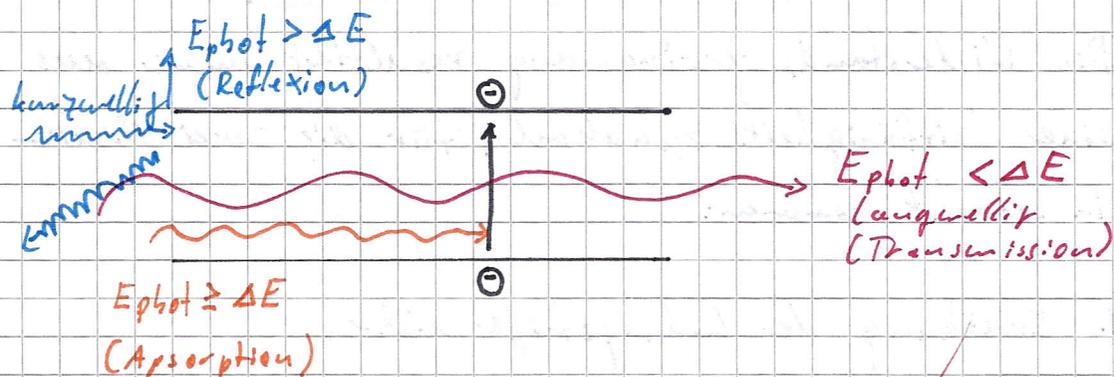
die Elektronen- bzw. Löcherdichte und μ_n bzw. μ_p ihre jeweilige Beweglichkeit darstellen.

Die Widerstandsverringering resultiert immer aus einer Leitfähigkeitszunahme, für die zwei Ursachen in Betracht kommen:

1. Erhöhung der Ladungsträgerdichten
2. Erhöhung der effektiven Beweglichkeit

Der erste Fall ist entscheidend für Photoleiter, die aus einem homogenen, ein kristallinen Halbleiter bestehen, der eigenleitend (intrinsic) oder mit Störstellen dotiert (extrinsic) sein kann.

Zusätzlich zum ersten Mechanismus spielt der zweite Fall bei Bauelementen eine Rolle, deren photoempfindliches Material eine polykristalline Zusammensetzung aufweist. Ein Beispiel stellen Dünnschicht-Photowiderstände aus Cadmiumsulfid dar. In solchen polykristallinen Filmen existieren zwischen den Korngrenzen Barrieren, durch die der Stromfluß gehemmt wird. Die Barrieren sind sehr schmale Zonen mit geringer Leitfähigkeit. Durch Absorption optischer Strahlung verringert sich der Widerstand der Barrieren stark, so daß der Stromfluß bei Bestrahlung viel größer wird als im Dunkelfall. Dieser Effekt kommt einer Erhöhung der effektiven Beweglichkeit gleich. (siehe folgendes Bild)



$\Delta n \rightarrow$ Nicht gleich gewichtet.

$n_0 \rightarrow$ Gleich gewichtet

$$n = n_0 + \Delta n$$

$$\chi = \chi(0) + \Delta \chi = \frac{1}{2} (n_0 \mu_n + p_0 \mu_p) + \frac{1}{2} (\Delta n \mu_n + \Delta p \mu_p)$$

Es ist also zu erkennen, dass bei Absorption so viel

Energie aufgenommen ist, dass weitere Ladungsträger vom Valenzband ins Leitungsband übergehen und somit die Leitfähigkeit zunimmt.

Die Leitfähigkeit ist somit von der Wellenlänge des Lichtes und der Grenzfrequenz und der entsprechenden Grenzwellenlänge des Materials abhängig.

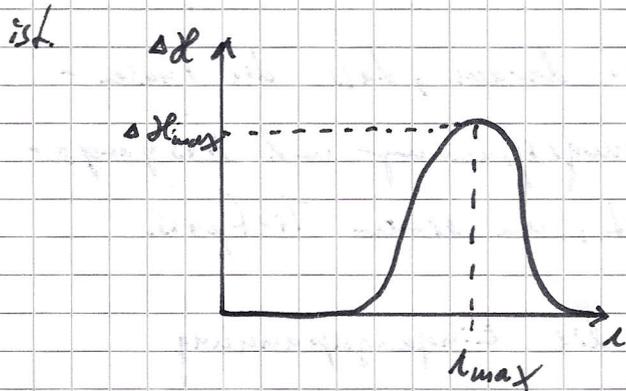
Dabei ergibt sich die Grenzfrequenz ω_g aus

$$\omega_g = \frac{b+1}{\tau_p + b\tau_n} \quad \text{Wobei } b \text{ das Beweglichkeits-}$$

verhältnis aus $b = \frac{\mu_n}{\mu_p}$ ist. Des Weiteren

sind τ_p und τ_n die Lebensdauer der Ladungsträger.

Die Leitfähigkeit ist dann am höchsten wenn die Wellenlänge des empfangenen Lichts gleich der Wellenlänge der Grenzfrequenz des Materials ist.



• Bandlücke

• Frequenzverhalten einer IP L.D. $\Rightarrow f_f$

Der Unterschied zwischen Eifenleiter und Störstellenleiter ergibt sich dabei, dass beim Eifenleiter die Leitfähigkeitserhöhung aus den angeregten Ladungsträgern der Bandlücke entspannt.

Beim Störstellenleiter sorgt die Ionisation der in den Störstellen hinzuhemmenden Ladungsträger für eine Erhöhung der Leitfähigkeit. Dabei muss die Störstellenleiter geschützt werden, um thermische Ionisation auszuschalten.

Für Fotowiderstände werden folgende Materialien verwendet:

- Cadmiumsulfid (CdS)
- Cadmiumselenid (CdSe)
- Blei(II)-sulfid (PbS)
- Indiumantimonid (InSb)

Die Grenzfrequenz ergibt sich daraus, dass die Phasenverschiebung zwischen Eingangsspannung und Ausgangsspannung 45° aufweist, an einem Tiefpass.

Daraus ergibt sich, dass die Eingangsspannung das $\sqrt{2}$ -fache der Ausgangsspannung ist bzw. die Ausgangsspannung somit das $\frac{1}{\sqrt{2}}$ -fache der Eingangsspannung. Dies entspricht 3dB.

Die Grenzfrequenz wird somit erreicht wenn, das Eingangssignal um 3dB abgefallen ist, also in etwa das 0,707-fache.

3.1.

rot:

$L_1 / \frac{\mu W}{cm^2}$	$R / k\Omega$	$\log(L_1) / \frac{\mu W}{cm^2}$	$\log\left(\frac{1}{R}\right) / k\Omega$
1,19	76	0,08	-1,88
1,73	57	0,24	-1,76
2,33	45	0,37	-1,65
2,98	37	0,47	-1,57
3,67	32	0,56	-1,51
4,40	28	0,64	-1,45
5,15	24	0,71	-1,38
14,72	12	1,17	-1,08
26,34	8	1,42	-0,90
39,43	6	1,60	-0,79
53,28	5	1,73	-0,70
67,50	4	1,83	-0,60
127,43	3	2,11	-0,48
199,80	2,2	2,30	-0,34
228,62	2	2,36	-0,30

grün:

$L_c / \frac{\mu W}{cm^2}$	$R / k\Omega$	$\log(L_c) / \frac{\mu W}{cm^2}$	$\log\left(\frac{1}{R}\right) / k\Omega$
1,27	20,7	0,10	-1,32
1,63	17,8	0,21	-1,25
2,04	15,1	0,31	-1,18
2,45	13,5	0,39	-1,13
2,93	12,2	0,47	-1,09
8,69	6,1	0,94	-0,79
16,06	4,2	1,21	-0,62
24,26	3,3	1,38	-0,52
32,85	2,7	1,52	-0,43
41,84	2,4	1,62	-0,38
50,72	2,1	1,71	-0,32
59,73	1,9	1,78	-0,28
77,47	1,7	1,89	-0,23
103,49	1,5	2,01	-0,18
128,29	1,3	2,11	-0,11

blau:

$L_e / \frac{\mu W}{cm^2}$	$R / k\Omega$	$\log(L_e) / \frac{\mu W}{cm^2}$	$\log\left(\frac{1}{R}\right) / \frac{1}{k\Omega}$
1,16	36,6	0,06	- 1,56
2,24	23,7	0,35	- 1,37
3,27	18,5	0,51	- 1,27
4,27	15,7	0,63	- 1,20
5,23	13,8	0,72	- 1,14
6,16	12,5	0,79	- 1,10
7,07	11,6	0,85	- 1,06
7,96	10,7	0,90	- 1,03
8,82	10,1	0,95	- 1,00
9,68	9,6	0,99	- 0,98
10,50	9,2	1,02	- 0,96
11,31	8,7	1,05	- 0,94
12,13	8,3	1,11	- 0,92
14,47	7,8	1,16	- 0,89
15,22	7,5	1,18	- 0,88

Aus der graphischen Darstellung erkennt man, dass sich die logarithmisierten Werte annähernd auf einer Geraden befinden \rightarrow die ursprünglichen Werte (Messwerte) haben keinen lin. Ausstieg \rightarrow kein Störleiter, sondern Eigenleiter.

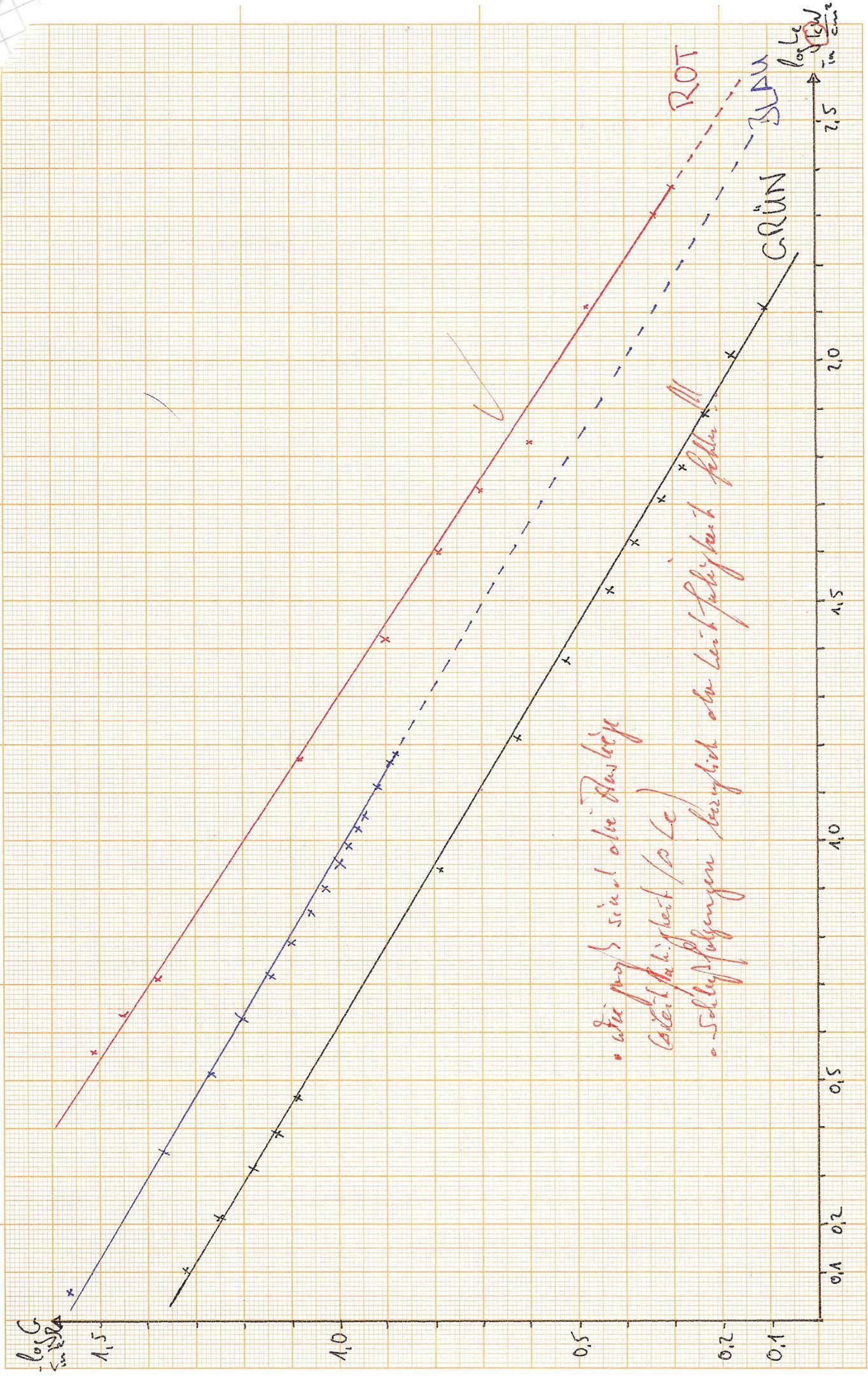
Auswertung des Vergleiches der spektralen Empfindlichkeit des Photowiderstandes mit der des menschlichen Auges.

grün: $L_e = 16,06 \frac{\mu W}{cm^2}$, $R = 4,2 k\Omega$, $G = 0,24 \frac{1}{k\Omega} \hat{=} 100\%$

rot: $L_e = 14,72 \frac{\mu W}{cm^2}$, $R = 12 k\Omega$, $G = 0,083 \frac{1}{k\Omega} \hat{=} 35\%$

blau: $L_e = 15,22 \frac{\mu W}{cm^2}$, $R = 7,5 k\Omega$, $G = 0,13 \frac{1}{k\Omega} \hat{=} 56\%$

Zur Auswertung sei zu erwähnen, dass der Photowid. das Spektrum des menschlichen Auges abdeckt. \rightarrow Anwendungsbereich des Ph.w. ist auch in einem Bereich zu finden, welcher das Spektrum des menschlichen Auges verlangt. z.B. Messung der Lichtempfindlichkeit, Lichtstärke (Kamera)



3.2.

$$t_{1/2} = 24 \text{ ms}$$

$$\tau = \frac{t_{1/2}}{\ln(2)} = \frac{24 \text{ ms}}{\ln(2)}$$

$$\underline{\underline{\tau = 34,62 \text{ ms}}}$$

$$U_{RM} = 0,28 \text{ V}$$

$$U_{RMf_g} = U_{RM} \cdot 0,707 \\ = 0,198 \text{ V}$$

$$\underline{\underline{f_g = 8,87 \text{ Hz}}}$$

Hieraus lässt sich nun Schlussfolgerungen, dass als Einsatzmöglichkeit zB "Helligkeitsmessung" bei Straßenbeleuchtung in Betracht zu ziehen ist. Da der Photowiderstand nicht auf jede kurzzeitige Änderung (zB Wolken) reagiert.