

**passive Bauelemente**  
lineare und nichtlineare Widerstände, Kondensatoren und Spulen

Studiengang: KMT Datum: 08.06.2010  
 Set: 2.08 Platz: 2  
 Teilnehmer: Michael Goldbach, Jürgen Döfninger

**Zielstellung**

- Bestimmung des Temperaturverhaltens von Widerständen
- Bestimmung des Isolationswiderstandes von Kondensatoren
- Kennlinien nichtlinearer Widerstände
- Verhalten von Varistoren im Gleichstromkreis
- Bestimmung von unbekanntem Bauelementen

**1. Begriffe und Formelzeichen**

linearer Widerstand, nichtlinearer Widerstand, Thermistor, Varistor, Temperaturkoeffizient, Glättungs-  
faktor G, Stabilisierungsfaktor S, Kondensator, Spule, Kapazität, Induktivität

**2. Versuchsvorbereitung**

- 2.1. Wiederholen Sie den Vorlesungsabschnitt "Passive Bauelemente". Machen Sie sich mit den in Punkt 1. genannten Begriffen und Formelzeichen vertraut.
- 2.2. Mit Hilfe von Multimetern (ac- und dc-Spannungsmessung, ac- und dc-Strommessung) und ac/dc-Spannungsquellen sollen Sie von einem unbekanntem Zweipol feststellen, um welches Bauelement es sich handelt und welche wesentlichen Kenngrößen dieses Bauelement besitzt. Erläutern Sie, welche charakteristischen Eigenschaften der jeweiligen Bauelemente Sie für die eindeutige Unterscheidung nutzen, welche Meßschaltungen Sie verwenden und wie Sie die charakteristischen Eigenschaften bestimmen.

Folgende Bauelemente und die Nennwerte der jeweiligen Kenngrößen sind zu bestimmen:

Bauelement	Kenngröße
Ohmscher Widerstand	Nennwiderstand $R_N$
Kondensator	Nennkapazität $C_N$
Spule	Nenninduktivität $L_N$ Windungswiderstand $R_S$
Thermistor NTC	Bestimmung des Thermistortypes
Thermistor PTC	Bestimmung des Thermistortypes
Varistor	Varistorspannung $U_V$ (bei 1 mA)

- 2.3. Zur Spannungsbegrenzung wird in einer Schaltung nach Bild 1 ein Varistor eingesetzt. Entsprechend der folgenden Tabelle (wählen Sie einen Satz der Kennwerte A ... H aus) sind vom Varistor die Kennwerte  $c$  und  $\beta$  bekannt. Die Nenneingangsspannung beträgt  $230 V_{\text{eff}}$ . Es können solche Spannungsspitzen auftreten, daß die maximale Eingangsspannung auf den angegebenen Wert  $U_{\text{emax}}$  erhöht wird. Wie groß ist die maximale Spannung an R2, wenn die Widerstände R1 und R2 mit den angegebenen Werten dimensioniert sind?

	A	B	C	D	E	F	G	H
$c [V/A^\beta]$	390	430	450	450	390	430	390	430
$\beta$	0,055	0,07	0,065	0,065	0,055	0,07	0,055	0,07
R1 [k $\Omega$ ]	33,3	18	18	22,5	36	22,5	16	20
R2 [k $\Omega$ ]	50	36	22,5	45	45	45	16	33,3
$U_{\text{emax}} [V]$	1000	900	900	900	900	900	800	800

Stellen Sie die Kennlinie des Varistors für den notwendigen Strombereich dar und ermitteln Sie grafisch die Spannung an R2.

Welchen Einfluß hat der Varistor auf die Spannung an R2 bei der angegebenen Nenneingangsspannung? Begründen Sie Ihre Aussage anhand der Kennlinie des Varistors.

- 2.4. Bereiten Sie auf Millimeterpapier Diagramme zur Darstellung der Meßwerte vor. Es empfiehlt sich folgende Einteilung der Achsen:

Diagramm zu Punkt 3.4.: I:  $0 \leq I \leq 20 \text{ mA}$       2 mA/cm  
 U:  $0 \leq U \leq 20 \text{ V}$       2 V/cm

### 3. Versuchsdurchführung und -auswertung

#### 3.1. Selbstentladung von Kondensatoren

Laden Sie einen Elektrolytkondensator  $C=220 \mu\text{F}$  auf 15 V auf. Ziehen Sie den Kondensator aus der Meßanordnung und legen Sie ihn ohne die Kontakte zu berühren zur Seite. Messen Sie in Abständen von 0,5 h die Spannung des Kondensators mit einem Digitalmultimeter und notieren Sie Zeit und Spannungswert. Berechnen Sie aus den Meßwerten den Isolationswiderstand des Kondensators. Diskutieren Sie den Einfluß des Eingangswiderstandes des Multimeters (10 M $\Omega$ ) auf die Meßgenauigkeit.

#### 3.2. Temperaturverhalten von Widerständen

Bestimmen Sie den genauen Wert eines Widerstandes  $R=100 \Omega / P_{V_{\text{max}}}=2 \text{ W}$  durch Strom-Spannungsmessung für verschiedene Belastungsfälle. Berechnen Sie dafür zuvor die an den Widerstand anzulegende Spannung bei 5 % der Nennverlustleistung und legen Sie diese Spannung an. Messen Sie die Temperatur des Widerstandes mit dem Multimeter MX 54 und dem zugehörigen Temperaturfühler und bestimmen Sie den Widerstandswert. Wiederholen Sie die Messung für die Belastungen von 50 % und 100 % der Nennverlustleistung.

Ermitteln Sie aus den Meßwerten überschlägig den Temperaturkoeffizienten und ziehen Sie Schlußfolgerungen für den Einsatz von Widerständen.

P [W]	T [°C]	U [V]	I [mA]	R [ $\Omega$ ]
$\approx 0,1$	28,6	3,18	32,03	98,66
$\approx 1$	47,0	10,00	102,47	97,59
$\approx 2$	70,0	14,12	146,28	96,53



Vergessen Sie die Messung der Spannung Ihres Kondensators nicht!

### 3.3. Kennlinien von nichtlinearen Widerständen - PTC

Nehmen Sie Meßwerte zur Darstellung der Kennlinie  $I=f(U)$  eines PTC im Bereich von  $0 \text{ V} \leq U \leq 20 \text{ V}$  auf. Stellen Sie die Kennlinie in einem geeigneten Diagramm dar. Bestimmen Sie aus dem Diagramm die Grenzleistung  $P_T$ , unterhalb der keine signifikante Selbsterwärmung des Bauelementes auftritt. Erklären Sie anhand des Diagramms die Besonderheiten des Bauelementes und leiten Sie daraus Einsatzmöglichkeiten ab.



Vergessen Sie die Messung der Spannung Ihres Kondensators nicht!

### 3.4. Kennlinien von nichtlinearen Widerständen - VDR

Nehmen Sie Meßwerte zur Darstellung der Kennlinie  $U=f(I)$  eines VDR im Bereich von  $0 \leq I \leq 10 \text{ mA}$  auf. Verwenden Sie zur Kennlinienaufnahme einen Vorwiderstand von  $100 \Omega$ . Stellen Sie die Meßwerte in dem vorbereiteten Diagramm dar.

Überprüfen Sie anhand einer logarithmischen Darstellung der Meßwerte, ob sich die  $I/U$ -Kennlinie durch die Potenzfunktion  $U=c \cdot I^\beta$  beschreiben läßt. Ermitteln Sie die Kennwerte  $c$  und  $\beta$  der Modellkennlinie des Varistors anhand der Meßwerte.

Ergänzen Sie die Darstellung der Kennlinie im Diagramm durch Hinzufügen von berechneten Werten bis zu einer Stromstärke von  $20 \text{ mA}$ .

Ermitteln Sie grafisch die Spannung  $U_2$  in der Schaltung in Bild 1 für den Fall  $U_e=40 \text{ V}$ .

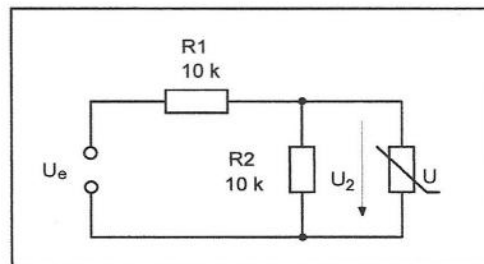


Bild 1: Einsatzschaltung des Varistors

Welchen Wert erreicht die Spannung  $U_2$ , wenn sich die Spannung  $U_e$  auf  $200 \text{ V}$  erhöht?



Vergessen Sie die Messung der Spannung Ihres Kondensators nicht!

Untersuchen Sie die im Bild 2 dargestellte Schaltung hinsichtlich ihrer Möglichkeit der Spannungsstabilisierung. Nehmen Sie dazu die Funktion  $U_2=f(U_1)$  im Bereich von  $0 \text{ V} \leq U_1 \leq 30 \text{ V}$  auf und stellen Sie diese in einem geeigneten Diagramm dar.

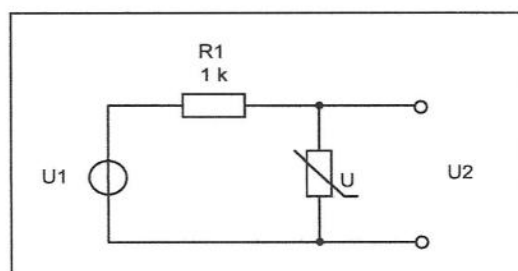


Bild 2: Stabilisierungsschaltung mit Varistor

Ermitteln Sie aus den Meßwerten den Glättungsfaktor und den Stabilisierungsfaktor.



Führen Sie den Versuch 3.1. zu Ende!

### 3.5. Bestimmung unbekannter Bauelemente

Wählen Sie zwei unbekannte Bauelemente aus und bestimmen Sie mit geeigneten Meßmethoden unter Zuhilfenahme der vorhandenen Meßgeräte die Art und den genauen Wert der sich darin befindenden Bauelemente (Widerstände, Kondensatoren, Induktivitäten, VDR, PTC, NTC). Bestimmen Sie unter Berücksichtigung von Toleranzen den möglichen Nennwert. Beschreiben Sie Ihre Meßmethoden und begründen Sie, warum gerade diese zum Ziel führten.

2.2.

### Ohmscher Widerstand:

Der ohmsche Widerstand ist durch eine lineare Strom-Spannungskennlinie gekennzeichnet.

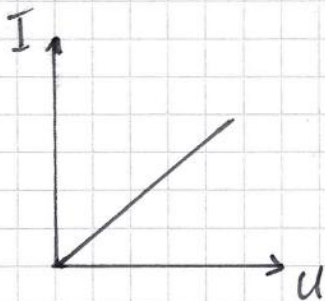
$$r = \frac{\Delta U}{\Delta I} = \text{const} = R$$

Der Wertebereich liegt in der Größenordnung von  $10^{-3} \Omega$  bis etwa  $10^{12} \Omega$ .

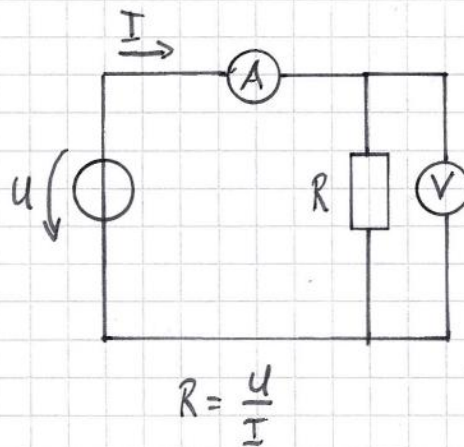
Der Widerstands Wert kann auch aus den materialistischen ( $\rho \rightarrow$  spezifische Widerstand) und geometrischen (Länge  $l$ , Querschnittsfläche  $A$ ) Eigenschaften ermittelt werden.

$$R = \rho \frac{l}{A}$$

### Kennlinie:

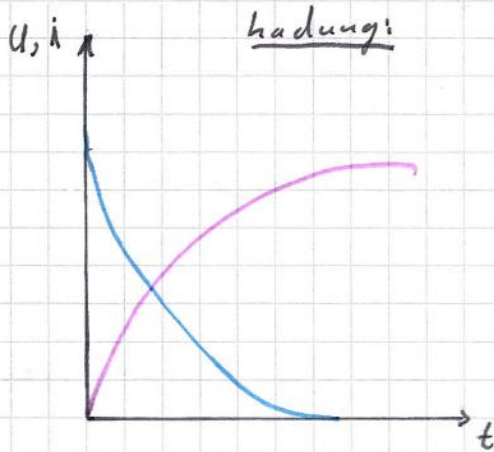


### Messschaltung:



## Kondensator:

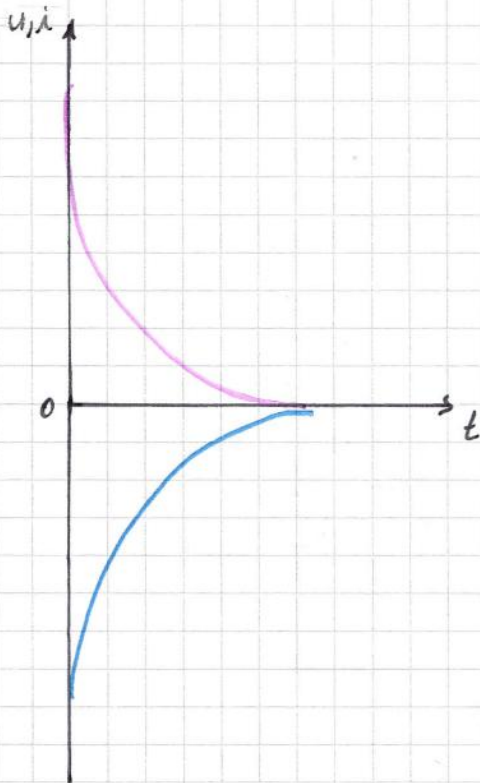
Der Kondensator ist durch eine exponentielle Kennlinie gekennzeichnet. Dabei ist zwischen dem Lade- und Entladevorgang zu unterscheiden.



$$u_c = U \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right)$$

$$i_c = \frac{U}{R} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$$

## Entladung:

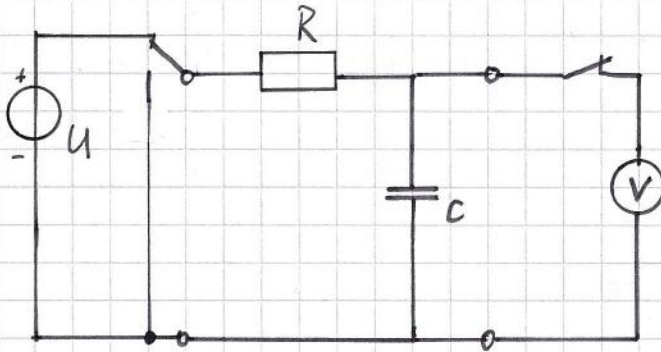


$$u_c = U \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$$

$$i_c = -\frac{U}{R} e^{-\frac{t}{\tau}}$$

$$\tau = R \cdot C$$

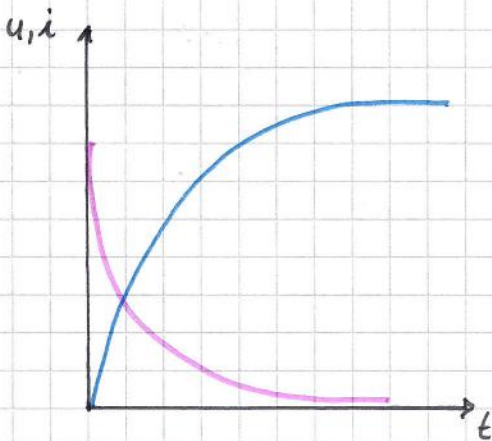
## Messschaltung:



## Spule:

Die Spule ist wie der Kondensator durch eine exponentielle Kennlinie gekennzeichnet. Es ist aber ein deutlicher Unterschied im Lade- und Entladevorgang zu erkennen.

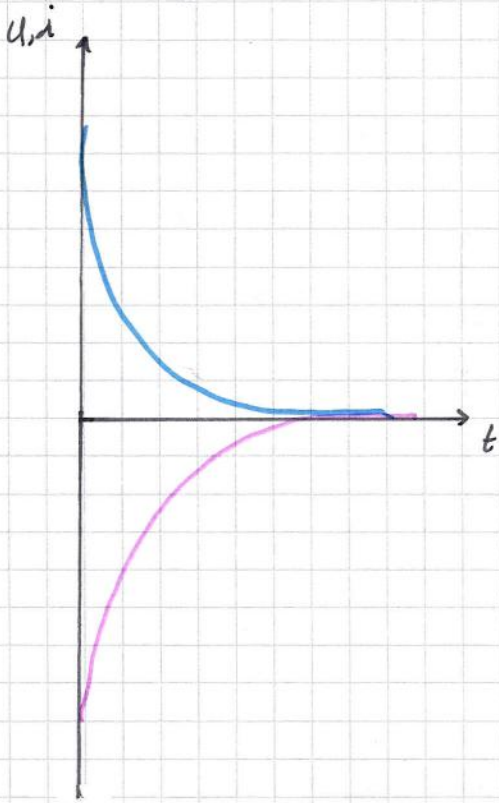
## Ladung:



$$u_L = U \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$$

$$i_L = \frac{U}{R} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) \approx \frac{U}{L} \cdot t \text{ für } t \ll \tau$$

### Entladung:

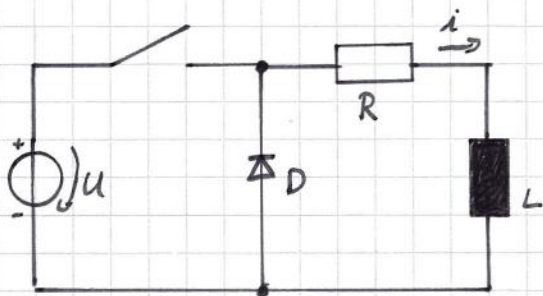


$$i_L = \frac{U}{R} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \approx \frac{U}{R} - \frac{U}{L} \cdot t \text{ für } t \ll \tau$$

$$u_L = U \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$$

$$\tau = \frac{L}{R}$$

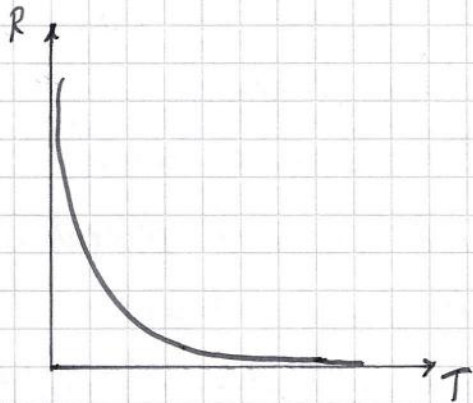
### Messschaltung:





## NTC:

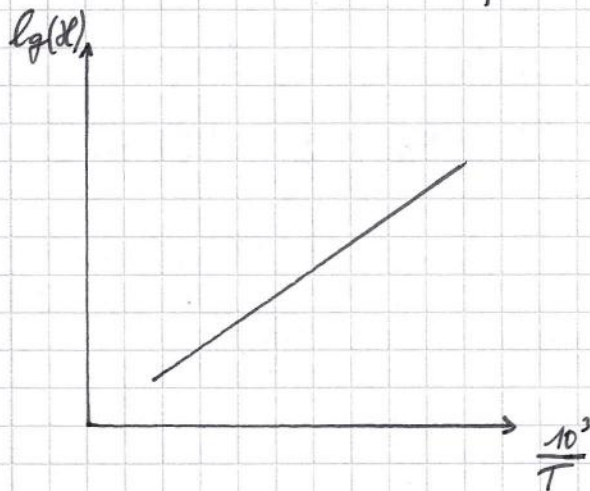
Der NTC oder auch Heißleiter ist ein temperaturabhängiger Widerstand, dessen Widerstandswert mit zunehmender Temperatur sinkt.



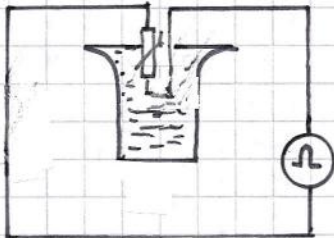
$$\alpha = \frac{1}{R} \cdot \frac{dR}{dT}$$

$$\alpha = \alpha_0 \cdot \frac{E_a}{k \cdot T^2}$$

$E_a$  - Aktivierungsenergie



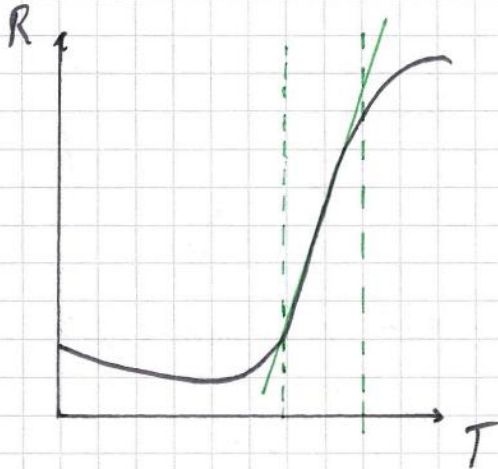
Über die untere Messschaltung wird die Temperatur und der Widerstand gemessen und im nebenstehenden Diagramm, als logarithmisierten Wert der Leitfähigkeit gegenüber der Temperatur, dargestellt.



Dabei ergibt sich die hier dargestellte lineare Funktion.

## PTC:

Der PTC oder Kaltleiter hat eine Kennlinie, welche erst ein sinken des Widerstandes, aber dann ein starkes ansteigen des Widerstandes, bei Temperaturerhöhung aufweist.

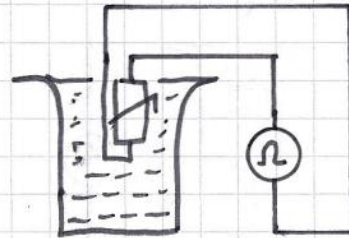
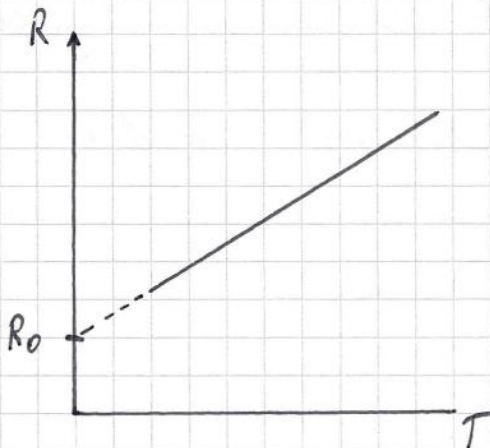


Wie man sehen kann, gibt es einen linearen Bereich (grün gezeichnet). In diesem Bereich kann folgende Gleichung angewendet werden.

$$R(T) = R(T_0) \cdot [1 + \alpha (T - T_0)]$$

$\alpha$  - Temperaturkoeffizient

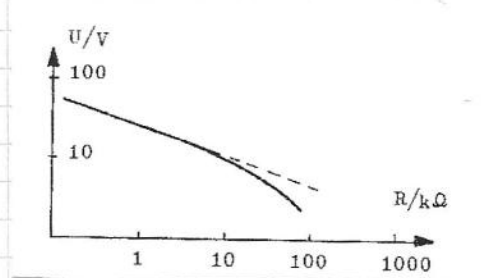
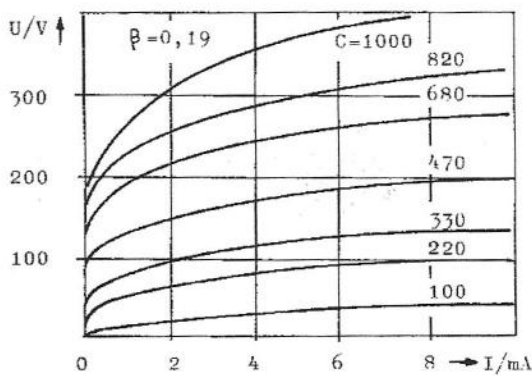
Somit lässt sich folgende Kennlinie mithilfe folgende Schaltung aufzeichnen:



## Varistor:

Varistoren sind spannungsabhängige Widerstände, deren Widerstand umso kleiner wird, je höher die Spannung steigt. Die Strom-Spannungskennlinie gehorcht der Beziehung  $U = C \cdot I^\beta$  wobei je nach Werkstoff  $C = 100 \dots 1000 \text{ V}$  bei  $(1 \text{ A})^\beta$  Strom und  $\beta = 0,17 \dots 0,25$  ist.

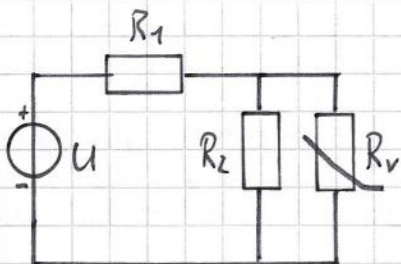
Das folgende Bild zeigt eine Kennlinie eines Varistors mit  $\beta = 0,19$ .



Das rechte Bild zeigt die U-R-Kennlinie eines Varistors. Diese resultiert aus der Gleichung

$$R = \frac{U}{I} = C \cdot U^{\frac{\beta-1}{\beta}}$$

Die Kennlinie eines Varistors lässt sich mithilfe folgende Schaltung aufnehmen.



2.3.

ausgewählte Daten:

$$E: C = 390 \text{ VAF}^2$$

$$\beta = 0,055$$

$$R_1 = 36 \text{ k}\Omega$$

$$R_2 = 45 \text{ k}\Omega$$

$$U_{\text{emax}} = 900 \text{ V}$$

$$R_{\text{ers}} = R_1 \parallel R_2 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

$$R_{\text{ers}} = \frac{36 \text{ k}\Omega \cdot 45 \text{ k}\Omega}{36 \text{ k}\Omega + 45 \text{ k}\Omega}$$

$$\underline{R_{\text{ers}} = 20 \text{ k}\Omega}$$

$$U_{\text{ers}_1} = U_{\text{emax}} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

$$U_{\text{ers}_1} = 900 \text{ V} \cdot \frac{45 \text{ k}\Omega}{36 \text{ k}\Omega + 45 \text{ k}\Omega}$$

$$\underline{U_{\text{ers}_1} = 500 \text{ V}}$$

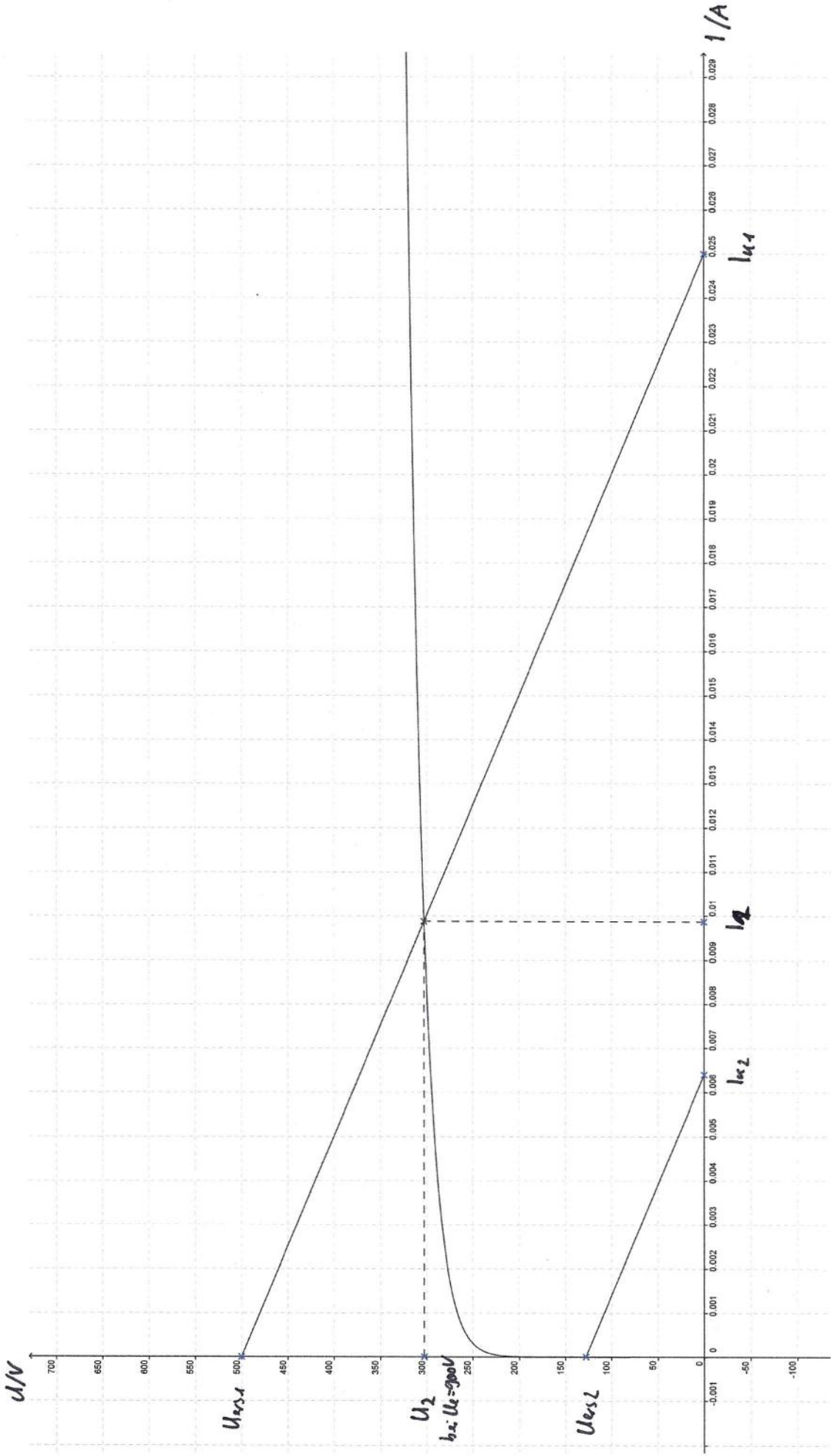
$$\underline{I_{K1} = \frac{500 \text{ V}}{20 \text{ k}\Omega} = 25 \text{ mA}}$$

grafisch ermitteltes U an R<sub>2</sub>:  $\approx 303 \text{ V}$  (Graph siehe Anhang)

$$U_e = 230 \text{ V} \quad R_{\text{ers}} = 20 \text{ k}\Omega \quad U_{\text{ers}_2} = 127,8 \text{ V} \quad I_{K2} = 6,4 \text{ mA}$$

(Graph siehe Anhang)

Bei  $U_e = 230 \text{ V}$  erkennt man an Graph durch den AP, dass der Strom, welcher durch den Varistor fließt gegen 0 geht. Daraus folgt dass der Widerstand des Varistors im Vergleich mit dem  $R_2$  sehr hoch ist (liegt im  $\mu\Omega$ -Bereich). Damit hat der Widerstand des Varistors am Gesamtwiderstand der Parallelschaltung mit dem  $R_2$  nur einen sehr kleinen bis keinen Anteil.

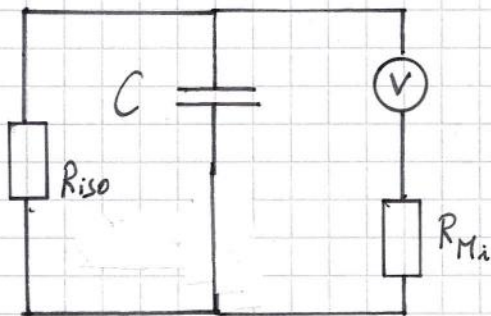




3.1.

$t$ in min	$U$ in V	$R_{iso}$ in M $\Omega$
0	15,03	-
30	14,31	166,67
60	14,00	230,50
90	13,78	282,68
120	13,60	327,34

$$R_{iso} = \frac{t}{\ln\left(\frac{U_1}{U_2}\right) \cdot C}$$



Aufgrund des hohen Isolationswiderstandes gegenüber dem Innenwiderstand  $R_{Mi}$  des Multimeters weist der  $R_{Mi}$  einen großen Einfluß auf die Messschaltung auf. Die Parallelschaltung führt dazu, dass der Gesamtisolationwiderstand, während der Messung, mehr als  $\frac{1}{10}$  groß ist. Er sinkt von mehreren hundert Megaohm auf unter 10 M $\Omega$ . Dadurch kann ein größerer Strom fließen und der Kondensator wird wesentlich schneller entladen. Dies führt zur Verfälschung des Messergebnisses. Daher sollte die Messzeit so kurz wie möglich gehalten werden.

3.2.

$$\alpha = \frac{R - R_{20}}{R_{20} \cdot (T - T_{20})}$$

$$\alpha (P=1W) = \frac{97,59 \Omega - 98,66 \Omega}{98,66 \Omega (47^\circ C - 28,6^\circ C)}$$

$$\underline{\underline{\alpha (P=1W) = -5,89 \cdot 10^{-4} \frac{1}{K}}}$$

$$\alpha (P=2W) = \frac{96,53 \Omega - 98,66 \Omega}{98,66 \Omega (70^\circ C - 28,6^\circ C)}$$

$$\underline{\underline{\alpha (P=2W) = -5,22 \cdot 10^{-4} \frac{1}{K}}}$$

$$\underline{\underline{\bar{\alpha} = -5,56 \cdot 10^{-4} \frac{1}{K}}}$$





### Schlussfolgerung

Aus der Änderung des Widerstandes ist zu erkennen, dass ein realer Widerstand nicht gänzlich temperaturunabhängig ist, allerdings ist die Änderung, in dem gemessenen Temperaturintervall, mehr als vernachlässigbar und der Schluss lässt zu, dass lineare Widerstände als temperaturunabhängig betrachtet werden können.

### 3.3.

$$P_T = U_T \cdot I_T$$

graphisch ermittelte Werte:  $U_T = 4V$  ;  $I_T = 25,7 \text{ mA}$

$$P_T = 4V \cdot 25,7 \text{ mA}$$

$$\underline{\underline{P_T = 102,8 \text{ mW}}}$$

U in V	I in mA	U in V	I in mA	U in V	I in mA
0	0	9	30,2	18	20,0
1	6,9	10	29,0	19	19,3
2	13,8	11	27,8	20	18,5
3	20,4	12	26,7		
4	25,7	13	25,1		
5	30,0	14	23,8		
6	30,9	15	22,8		
7	31,5	16	21,8		
8	31,0	17	21,0		

Bei einer Spannung bis zu 4V verhält sich der PTC wie ein ohmscher Widerstand. Oberhalb dieser Spannung ist die Temperatur-abhängigkeit des Kaltleiters zu erkennen, da sich die I-U-Kennlinie nicht mehr linear verhält. So steigt nach überschreiten des Wertes (4V) zunächst auch der Strom weiter an. Mit zunehmender Spannung sinkt I dann wieder. Aufgrund dieses Stromverhaltens ergibt sich eine Anwendung (u.a.) als Strombegrenzer und somit als Überspannsicherung.

### 3.4.

	I in mA	U in V	log I	log U
gemessen	0	0	-	-
	1	10,00	0,00	1,000
	2	10,57	0,30	1,024
	3	10,90	0,48	1,037
	4	11,18	0,60	1,048
	5	11,35	0,70	1,055
	6	11,50	0,78	1,060
	7	11,60	0,85	1,064
	8	11,70	0,90	1,068
	9	11,79	0,95	1,072
berechnet	10	11,87	1,00	1,075
	11	11,97	1,04	1,078
	12	12,05	1,08	1,081
	13	12,12	1,11	1,084
	14	12,18	1,15	1,086
	15	12,26	1,18	1,088
	16	12,31	1,20	1,090
	17	12,37	1,23	1,092
	18	12,42	1,26	1,094
	19	12,47	1,28	1,096
	20	12,52	1,30	1,098

→ zur Berechnung von B und c verwendete Werte

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{C_1}{C_2} \cdot \frac{I_1^{\beta}}{I_2^{\beta}} \quad | \log$$

$$\log\left(\frac{U_1}{U_2}\right) = \log\left(\frac{C_1}{C_2}\right) + \beta \log\left(\frac{I_1}{I_2}\right) \quad | C_1 = C_2$$

$$\log\left(\frac{U_1}{U_2}\right) = \log(1) + \log\left(\frac{I_1}{I_2}\right) \quad | \because \log\left(\frac{I_1}{I_2}\right)$$

$$\frac{\log\left(\frac{U_1}{U_2}\right)}{\log\left(\frac{I_1}{I_2}\right)} = \beta \quad \left| \begin{array}{l} U_1 = 10 \text{ V} \quad I_1 = 1 \text{ mA} \\ U_2 = 11,87 \text{ V} \quad I_2 = 10 \text{ mA} \end{array} \right.$$

$$\beta = \frac{\log\left(\frac{10 \text{ V}}{11,87 \text{ V}}\right)}{\log\left(\frac{1 \text{ mA}}{10 \text{ mA}}\right)}$$

$$\underline{\underline{\beta = 0,075}} \quad \checkmark$$

$$U = c \cdot I^{\beta} \quad | : I^{\beta}$$

$$c = \frac{U}{I^{\beta}} \quad | U = 11,87 \text{ V} \quad I = 10 \text{ mA}$$

$$c = \frac{11,87 \text{ V}}{(10 \text{ mA})^{0,075}}$$

$$\underline{\underline{c \approx 10 \frac{\text{V}}{\text{mA}^{0,075}}}} \quad \checkmark$$

Werte für  $U_e = 40V$ :

$$U_{\text{ers}} = U \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

$$U_{\text{ers}} = 40V \cdot \frac{10k\Omega}{10k\Omega + 10k\Omega}$$

$$\underline{\underline{U_{\text{ers}} = 20V}}$$

$$R_{\text{ers}} = R_1 \parallel R_2 = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

$$I_k = \frac{U_{\text{ers}}}{R_{\text{ers}}} = \frac{20V}{5k\Omega}$$

$$\underline{\underline{R_{\text{ers}} = 5k\Omega}}$$

$$\underline{\underline{I_k = 4mA}}$$

graphisch ermittelte Werte für  $U_e = 40V$ :

$$\underline{\underline{U_2 = 10,5V}}$$

Werte für  $U_e = 200V$ :

$$U_{\text{ers}} = 200V \cdot \frac{10k\Omega}{10k\Omega + 10k\Omega}$$

$$\underline{\underline{U_{\text{ers}} = 100V}}$$

$$\underline{\underline{R_{\text{ers}} = 5k\Omega}}$$

$$\underline{\underline{I_k = \frac{100V}{5k\Omega} = 20mA}}$$

graphisch ermittelter Wert:

$$\underline{\underline{U_2 = 12,8V}}$$

$U_1$ in V	$U_2$ in V
0	0
1	1,035
2	2,035
3	3,030
4	4,030
5	5,020
6	6,020
7	6,990
8	7,910
9	8,700
10	9,410

$U_1$ in V	$U_2$ in V
11	9,98
12	10,46
13	10,80
14	11,05
15	11,24
20	11,85
25	12,15
30	12,35

graphisch ermittelte Werte:

$$U_1 = 30V$$

$$\Delta U_1 = 15V$$

$$U_2 = 12,35V$$

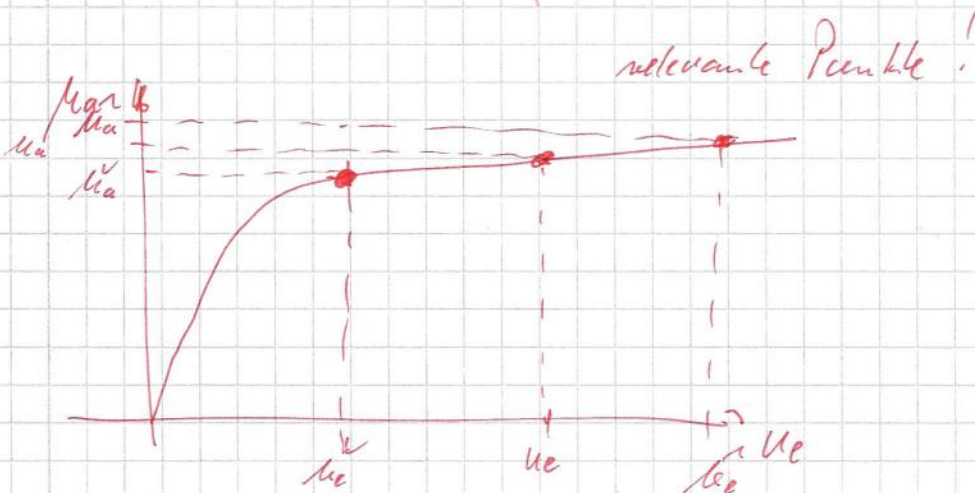
$$\Delta U_2 = 1,11V$$

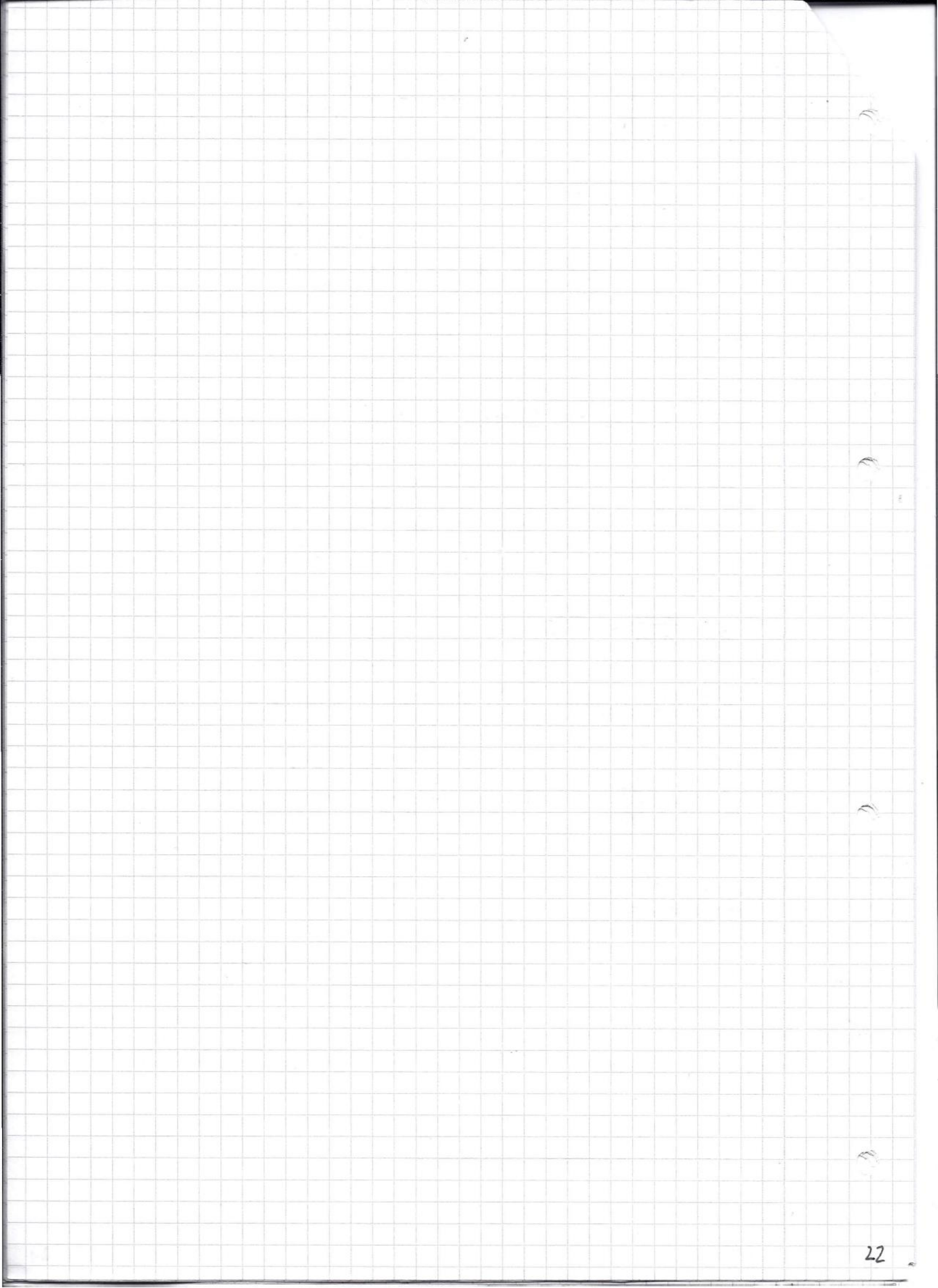
$$G = \frac{\Delta U_1}{\Delta U_2} = \frac{15V}{1,11V}$$

$$\underline{\underline{G \approx 13,51}}$$

$$S = G \cdot \frac{U_2}{U_1} = 13,51 \cdot \frac{12,35V}{30V}$$

$$\underline{\underline{S \approx 5,56}}$$

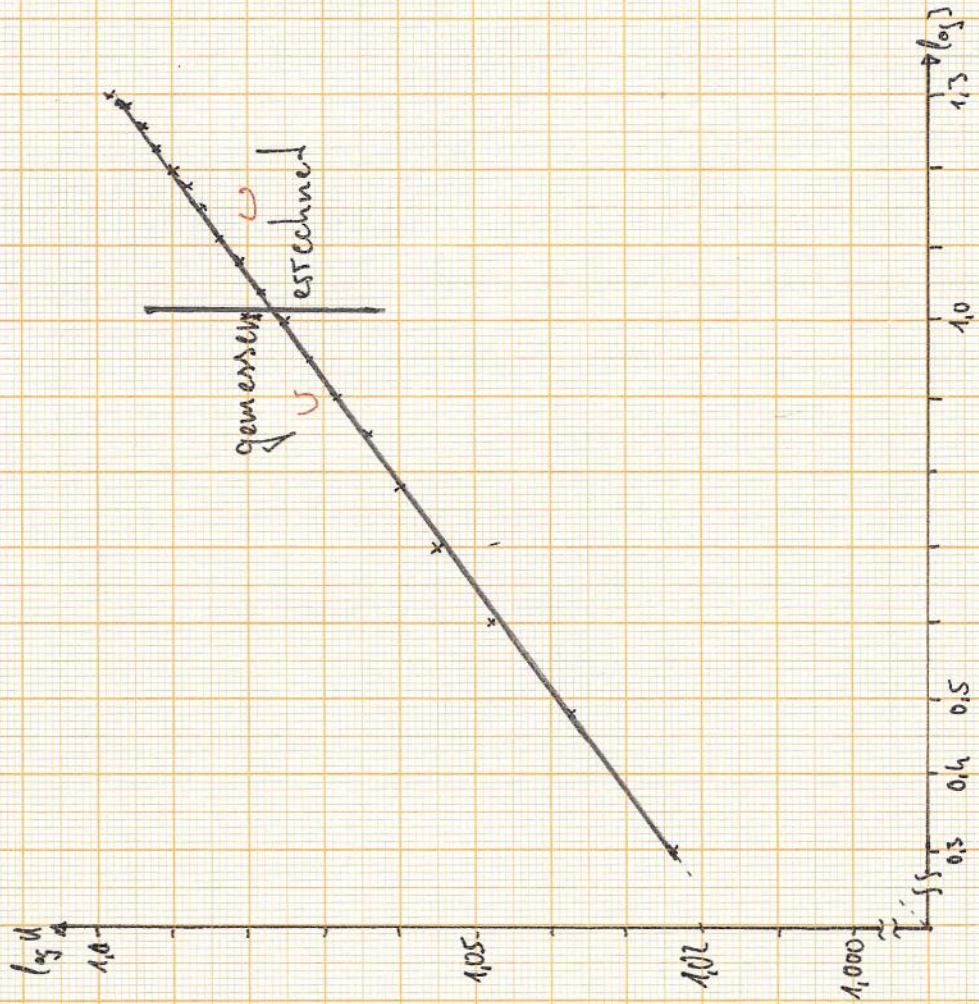
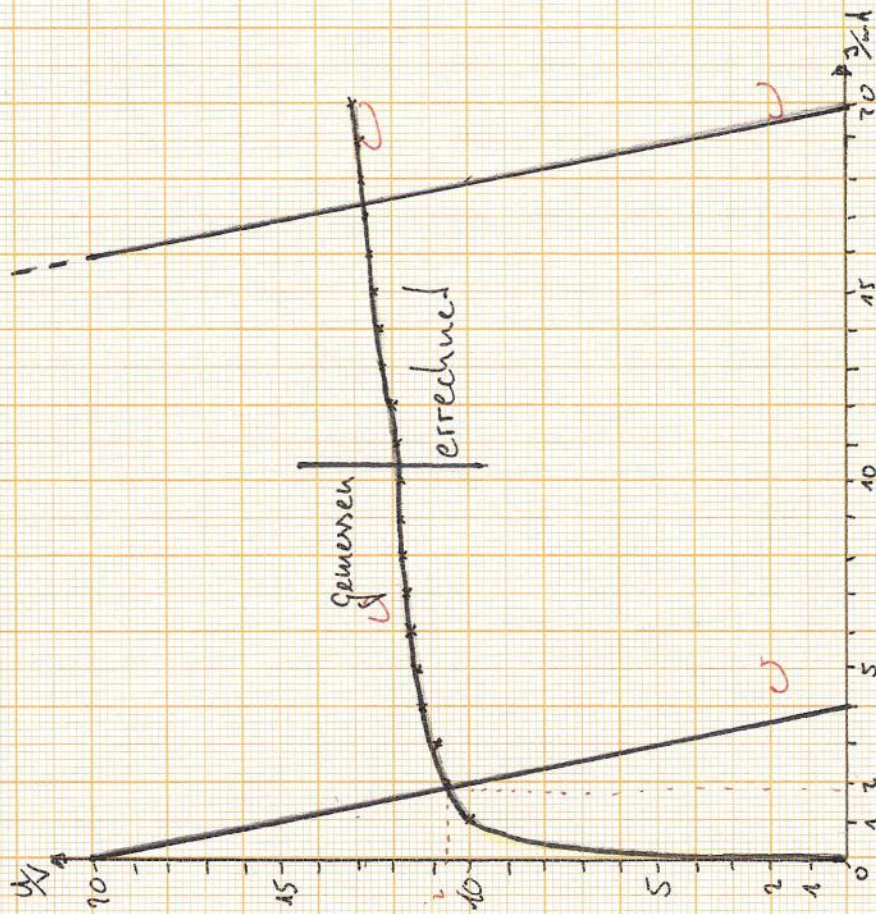




⑥ Rente



J.S.



3.4.



