



Institut für Elektrische Energiewandlung

Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h.c. Andreas Binder



**TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT**

Praktikum ETiT 1

-Grundlagen der Elektrotechnik-

Versuch 1

Gleichstromtechnik

VORBEREITUNGSAUFGABEN: LÖSUNGEN

1. Warum ist der spezifische Widerstand ρ im Allgemeinen temperaturabhängig (Mathiessen'sche Regel)?

Lösung: Der spezifische Widerstand ρ setzt sich in Metallen aus zwei Anteilen zusammen (Mathiessen'sche Regel):

a) Kollisionen der Leitungselektronen mit den um ihre Ruhelage schwingenden Atomrümpfen der Metallkristallstruktur. Mit sinkender Temperatur sinkt die Schwingungsamplitude der Atomrümpfe und ist beim absoluten Temperatur-Nullpunkt $T = 0$ Null. Daher sinkt dieser Anteil ρ_T (Index T : Temperatur-abhängig) mit sinkender Temperatur auf Null. **2P**

b) Kollisionen der Leitungselektronen mit Störstellen (Fremdatomen) und Gitterfehlern (Kristalldefekten). Diese Defekte sind temperaturunabhängig, so dass auch bei $T = 0$ ein endlicher spezifischer Widerstand ρ_G (G: Gitter) verbleibt. **2P**

2. Ein Kupferwiderstand hat bei Raumtemperatur (20°C) einen Widerstandswert von $R = 10 \Omega$. Wie groß ist der Widerstand bei 40°C und bei 50°C Umgebungstemperatur?

Lösung: $R_{20} = 10 \Omega$ $\alpha_{20} = 0.0039 /\text{K}$

$$R_g = R_{20} \cdot (1 + \alpha_{20} \cdot \Delta\vartheta)$$

$$R_{g1} = 10 \cdot (1 + 0.0039 \cdot (40 - 20)) = 10.78 \Omega \quad \mathbf{2P}$$

$$R_{g2} = 10 \cdot (1 + 0.0039 \cdot (50 - 20)) = 11.17 \Omega \quad \mathbf{2P}$$

3. Ein Kupferwiderstand hat bei Raumtemperatur (20°C) einen Widerstandswert von $R = 15 \Omega$. Der gemessene Widerstand beträgt a) $17,34 \Omega$ und b) $19,09 \Omega$. Wie groß ist die Temperatur des Widerstandes?

Lösung: $R_{20} = 15 \Omega$ $\alpha_{20} = 0.0039 /\text{K}$

$$R_g = R_{20} \cdot (1 + \alpha_{20} \cdot \Delta\vartheta)$$

$$\vartheta [^\circ\text{C}] = \frac{1}{\alpha_{20}} \cdot \left(\frac{R_g}{R_{20}} - 1 \right) + 20 [^\circ\text{C}]$$

$$\vartheta [^\circ\text{C}] = \frac{1}{0,0039} \cdot \left(\frac{17,34}{15} - 1 \right) + 20 [^\circ\text{C}] = 60 [^\circ\text{C}] \quad \mathbf{2P}$$

$$\vartheta [^\circ\text{C}] = \frac{1}{0,0039} \cdot \left(\frac{19,09}{15} - 1 \right) + 20 [^\circ\text{C}] = 90 [^\circ\text{C}] \quad \mathbf{2P}$$

4. a) Beschreiben Sie die Eigenschaften von NTC und PTC Widerständen. b) Diskutieren Sie die Anwendung eines PTC-Widerstands zur Temperaturüberwachung (Beispiel angeben)!

Lösung: a) Der PTC-Widerstand ist ein Halbleiterbauelement mit sehr großem positivem Temperaturkoeffizienten. **1.5 P** Der NTC-Widerstand ist ein Halbleiterbauelement mit sehr großem negativem Temperaturkoeffizienten. **1.5 P**

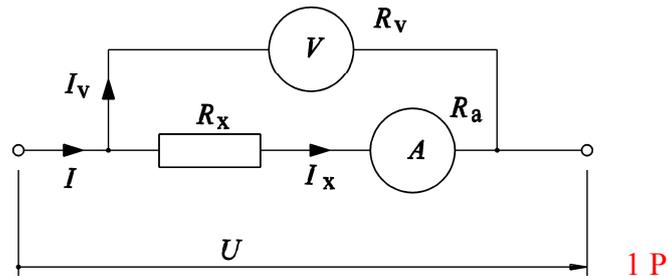
b) Die PTC-Widerstände werden, neben anderen Verwendungen, zur Temperaturüberwachung eingesetzt. Beispiel: Bleibt die Temperatur unter der „Sprungtemperatur“ (z. B. 145°C), so ist der Widerstand des PTC sehr klein und ein

Überwachungsstromkreis bleibt geschlossen. Wird die Sprungtemperatur um wenige Grad überschritten, steigt der Widerstand des PTC rasch an, was wie eine Unterbrechung des Überwachungsstromkreises wirkt und einen Alarm auslöst.

1 P

5. a) Geben Sie die stromrichtige Messschaltung für die Bestimmung des *Ohm'schen* Widerstands R_x an. b) Nennen Sie dabei alle verwendeten Messgeräte. c) Leiten Sie die Gleichung zur Bestimmung des Widerstandes aus den Messgrößen her.

Lösung: a)



b) Verwendete Messgeräte:

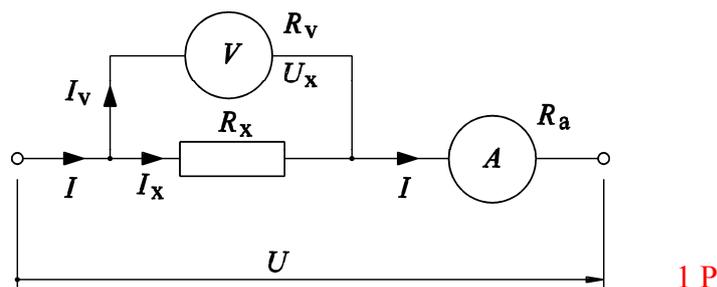
das Amperemeter 1 P

das Voltmeter 1 P

$$\begin{aligned} \text{c) } U &= I_x \cdot (R_x + R_a) & U / I_x &= R_x + R_a \\ R_x &= \frac{U}{I_x} - R_a & & \quad 1 \text{ P} \end{aligned}$$

6. a) Geben Sie die spannungsrichtige Messschaltung für die Bestimmung des *Ohm'schen* Widerstands R_x an. b) Nennen Sie dabei alle verwendeten Messgeräte. c) Leiten Sie die Gleichung zur Bestimmung des Widerstandes aus den Messgrößen her.

Lösung: a)



b) Verwendete Messgeräte:

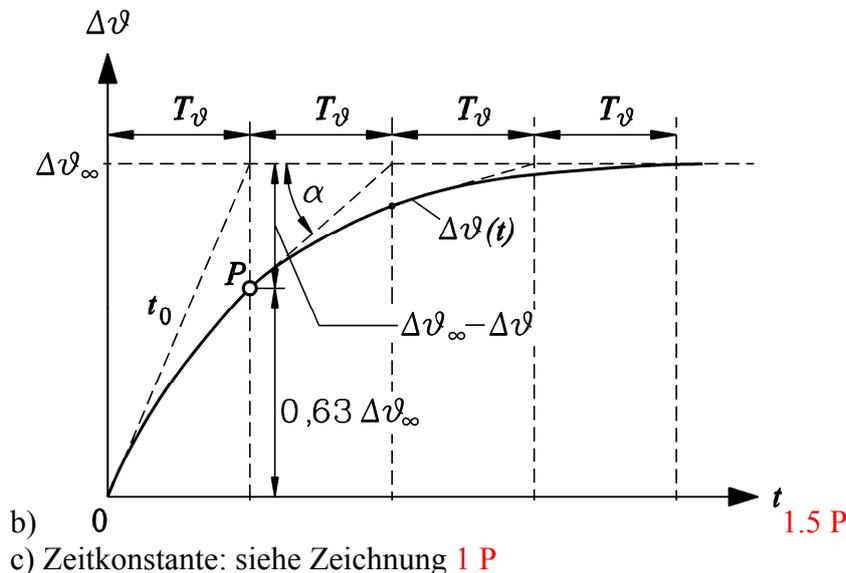
das Amperemeter 1 P

das Voltmeter 1 P

$$\begin{aligned} \text{c) } I &= I_x + I_v = \frac{U_x}{R_x} + \frac{U_x}{R_v} = U_x \left(\frac{1}{R_x} + \frac{1}{R_v} \right) \Rightarrow \frac{I}{U_x} - \frac{1}{R_v} = \frac{1}{R_x} \\ \frac{IR_v - U_x}{U_x R_v} &= \frac{1}{R_x} & R_x &= \frac{U_x}{I - I_v} & R_x &= \frac{U_x}{I - \frac{U_x}{R_v}} & & \quad 1 \text{ P} \end{aligned}$$

7. Geben Sie a) die Differentialgleichung für die Erwärmung des homogenen Körpers und b) die graphische Darstellung der Erwärmungskurve an. c) Tragen Sie die thermische Zeitkonstante ein!

Lösung: a) $m \cdot c \cdot \frac{d\Delta\vartheta}{dt} + \alpha_A \cdot A \cdot \Delta\vartheta = P$ 1.5 P



8. a) Geben Sie die Formel für die thermische Zeitkonstante T_9 an. b) Welche Einflussgrößen auf die thermische Zeitkonstante T_9 treten auf? c) Wie wirken diese?

Lösung: a) $T = \frac{mc}{\alpha_A A}$ 1.5 P

b) Einflussgrößen: Masse und spezifische Wärmekapazität des Körpers, kühlwirksame Oberfläche des Körpers, Wärmeübergangszahl 1.5 P

c) Gemäß dieser Gleichung erfolgt die Erwärmung des Körpers umso rascher (T kleiner), je kleiner dessen Masse und spezifische Wärmekapazität ist und je größer die kühlende Fläche und die Wärmeübergangszahl ist. 1 P

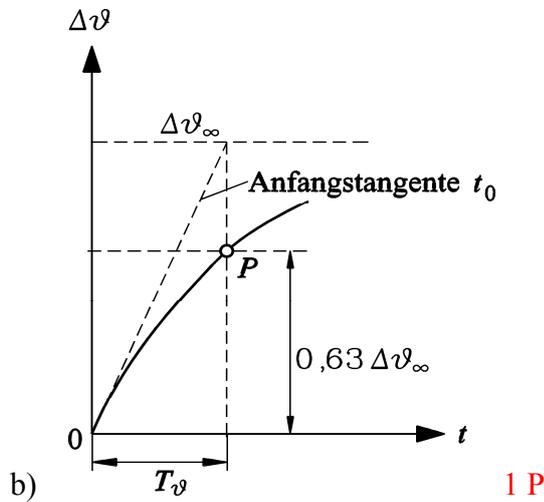
9. Erklären Sie den messtechnischen Ablauf zur Bestimmung der Übertemperatur $\Delta\vartheta$ anhand der gemessenen Erwärmungskurve (Skizze!).

Lösung: Bei konstanter Belastung P ist die Übertemperatur $\Delta\vartheta$ in gleichen Zeitabständen Δt zu messen und ihre Zunahme $\Delta(\Delta\vartheta)$ in **Abhängigkeit von der Übertemperatur $\Delta\vartheta$** aufzutragen. 1 P Es entsteht dabei eine Gerade. 1 P Die Verlängerung der Geraden durch die so entstehende Punkteschar schneidet auf der Ordinatenachse die Beharrungsübertemperatur ab 1 P. Zwecks Erreichung höherer Genauigkeit soll der Maßstab für $\Delta(\Delta\vartheta)$ etwa 3 bis 4-mal größer als jener für $\Delta\vartheta$ gewählt werden. 1 P

10. a) Wie wird die thermische Zeitkonstante T_9 messtechnisch bestimmt? Nennen Sie bitte zwei Wege. b) erläutern Sie Ihre Antwort mit einer Skizze!

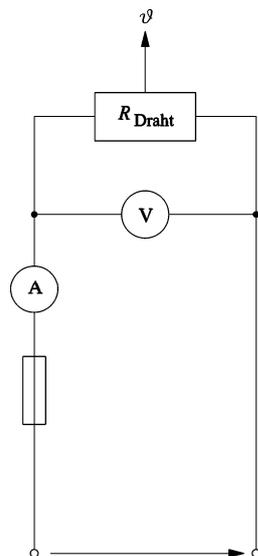
Lösung: a) Die **Zeitkonstante T_9** findet man entweder

- a1) als der Wert von der Zeit im Schnittpunkt der Anfangstangente der Erwärmungskurve mit der waagrechten Geraden $\Delta\vartheta_\infty$ **1.5 P**
 oder
 a2) besser mit Hilfe des berechneten Wertes $\Delta\vartheta = 0.63\Delta\vartheta_\infty$ (Bild 1.4.3-2). **1.5 P**



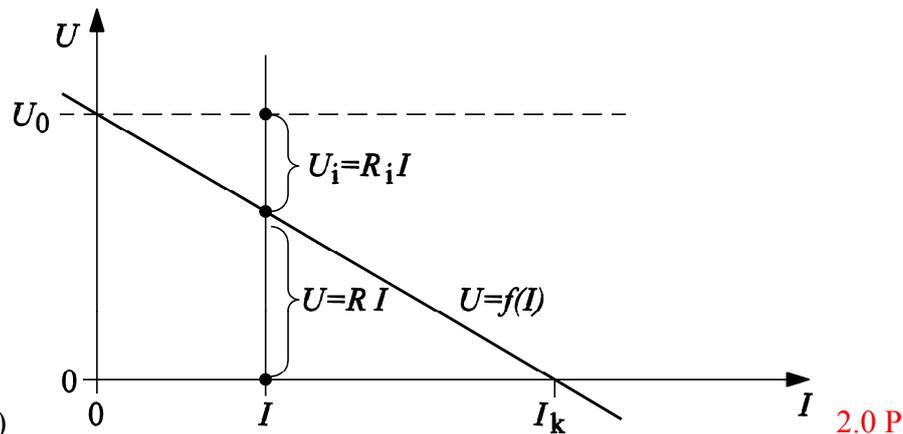
11. a) Geben Sie die Messschaltung zur Bestimmung der thermischen Widerstandsänderung an. b) Nennen Sie dabei alle verwendeten Messgeräte.

Lösung: a) **1.5 p**



- b) das Amperemeter **0.5 P**
 das Voltmeter **0.5 P**
 das Ohmmeter **0.5 P**
 das Thermometer **0.5 P**
 die Stoppuhr **0.5 P**

12. a) Geben Sie die äußere Kennlinie einer belasteten, linearen Gleichspannungsquelle an. b) Tragen Sie die Leerlaufspannung und Kurzschlussstrom ein. c) Wodurch ist die Neigung der Kennlinie (im Bezug auf die Horizontale) bestimmt?



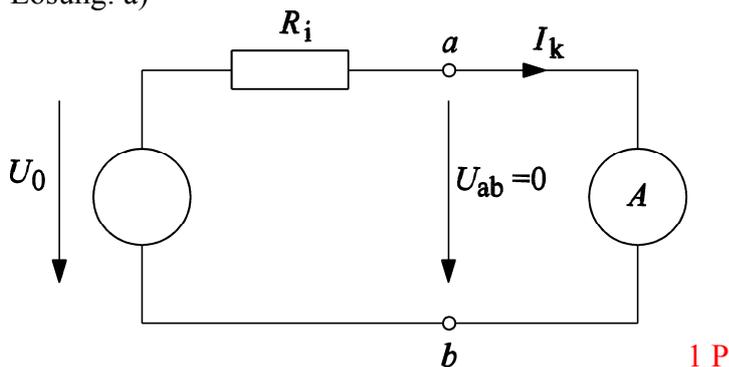
Lösung: a)

b) Siehe Zeichnung: 1 P

c) Die Neigung der Kennlinie (im Bezug auf die Horizontale) ist durch den Innenwiderstand bestimmt. 1 P

13. a) Geben Sie eine Messschaltung zur Bestimmung des Kurzschlussstromes einer Batterie an. b) Wie kann den Innenwiderstand R_i der Batterie bestimmt werden? Geben Sie bitte 2 Varianten. c) Diskutieren Sie kurz Vor- und Nachteile.

Lösung: a)

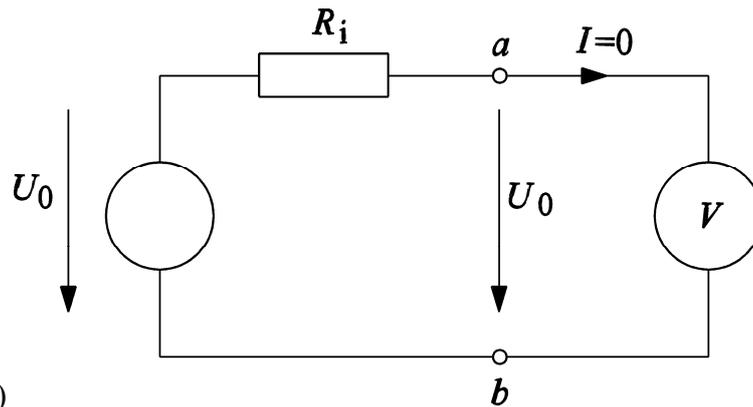


b) Der Innenwiderstand einer Batterie kann entweder durch (1) Kurzschluss- und Leerlaufversuch 1 P oder (2) aus den Messungen von U und I für zwei andere Belastungsfälle bestimmt werden 1 P.

c) Vorteil: (1) Großer Abstand zwischen Leerlauf- und Kurzschlusspunkt erlaubt eine genaue Ermittlung der Geradenneigung. Nachteil (1): Falls der Kurzschlussstrom zu groß ist, kommt nur die zweite Möglichkeit in Betracht. 1 P

14. a) Geben Sie eine Messschaltung zur Bestimmung der Leerlaufspannung einer Batterie an.

b) Geben Sie auch die typischen Werte des Innenwiderstandes unterschiedlicher Batterien an.



Lösung: a)

2 P

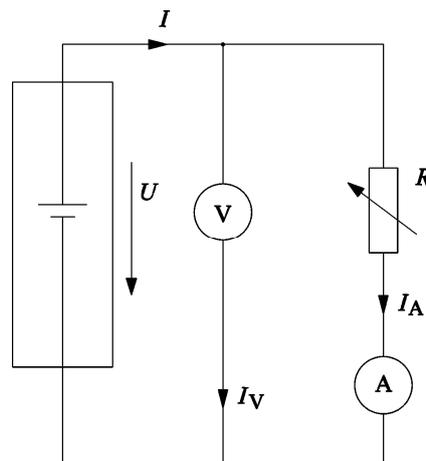
b) Die typische Werte des Innenwiderstandes:

Kohle-Zink $\sim 0.9 \Omega$ Alkali-Zink $\sim 0.4 \Omega$ Nickel-Cadmium $\sim 0.2 \Omega$ alle 3 korrekt: 2 P

1 korrekt: 0.7 P, 2 korrekt: 1.4 P

15. a) Geben Sie eine Messschaltung zur Bestimmung der Strom-Spannungs-Kennlinie einer Batterie an. b) Nennen Sie dabei alle verwendeten Messgeräte. c) Ist es besser die Batterie stromrichtig oder spannungsrichtig zu messen?

Lösung: a)



Messschaltung für die äußere Kennlinie einer Batterie 1 P

b) Amperemeter 1 P Voltmeter 1 P

c) Es ist besser, spannungsrichtig zu messen, da der (unbekannte) Innenwiderstand des Amperemeters nicht zum Innenwiderstand der Batterie gezählt wird (sondern zum variablen Belastungswiderstand, dessen Größe uns nicht interessiert). 1 P

16. Zur Vorbereitung für das Protokoll ist die Bestimmungsgleichung des Gesamtwiderstandes der Schaltungen 1 bis 8 anzugeben. Die Werte sind in eine Tabelle einzutragen. Vereinfachen Sie bitte die Endformeln soweit wie möglich (z.B. ohne Doppelbrüche)!

Nr.	Bestimmungsgleichung
1	$2 R_1$ 0.5 P
2	$R_1 R_2 / (R_1 + R_2)$ 0.5 P
3	$R_1 * (R_1 + R_2) / (2 * R_1 + R_2)$ 0.5 P

4	$R_2/2$ 0.5 P
5	$R_1 + R_1R_2/(R_1 + R_2)$ 0.5 P oder $(R_1^2 + 2R_1R_2)/(R_1 + R_2)$
6	$R_1R_2/2*(R_1 + R_2)$ 0.5 P
7	$2*R_1R_2/(R_1 + R_2)$ 0.5 P
8	$2*R_1R_2/(R_1 + R_2) = R(7)$ 0.5 P

Alles zusammen: 4 P

Bewertung: „nicht fertig“:

Kein willkürliches Multiplizieren, sondern möglichst einfach (siehe oben);

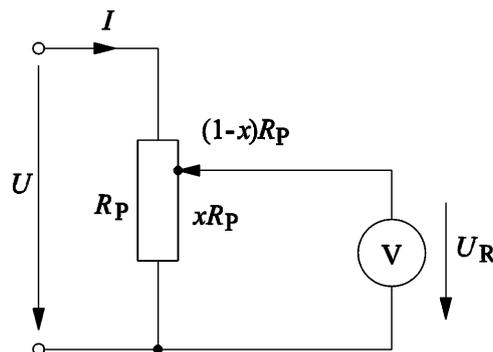
keine Unterbrüche stehen lassen;

besonders für Nr. 3: Addieren $R_1+R_1+R_2$ muss man als $2R_1+R_2$ haben;

je 2 Mängel („nicht fertig“) heißt Punkteabzug: -0.2 P

17. a) Geben Sie die Messschaltung für die Spannungsmessung einen unbelasteten Spannungsteiler an. b) Nennen Sie alle verwendeten Messgeräte! c) Leiten Sie die Bestimmungsgleichung für den Spannungsfall am Teiler ab. (Vereinfachen Sie den Ausdruck soweit wie möglich). d) Wofür werden Spannungsteiler benötigt? e) Ist ihr Einsatz bei großen Leistungen sinnvoll?

Lösung: a) 1 P



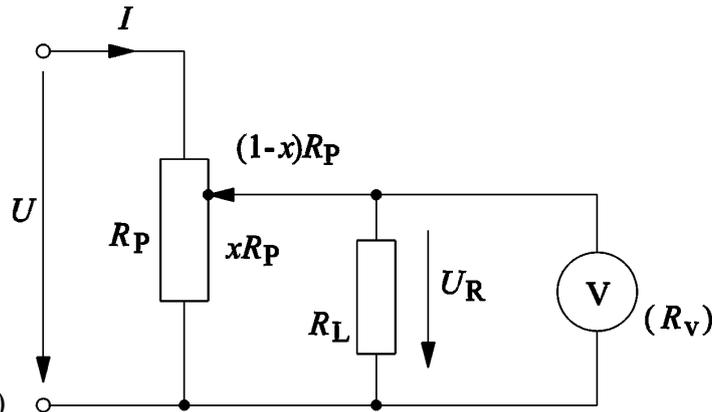
b) Voltmeter 0.5 P

$$c) \frac{U_R}{U} = \frac{I \cdot x \cdot R_p}{I \cdot R_p} = x \quad 1 \text{ P}$$

d) Ein Spannungsteiler wird benötigt für ein gleichmäßiges Einstellen der Spannung am Verbraucher zwischen Null und der (maximalen) verfügbaren Spannung U 1 P.

e) Der Gebrauch von Spannungsteilern ist nur für kleinere Leistungen energetisch sinnvoll, da ein Teil der Gesamtenergie in den Widerständen in Wärme umgesetzt wird. 0.5 P

18. a) Geben Sie die Messschaltung für die Spannungsmessung an einem belasteten Spannungsteilers an. b) Geben Sie auch die Bestimmungsgleichung für U_R/U an, und vereinfachen Sie den Ausdruck soweit wie möglich. c) Bestimmen Sie U_R für $p = R_p/R = 10$ für vier Zahlenwerte von x (0, 0.4, 0.6, 1)!



Lösung: a) 1 P

b)
$$\frac{U_R}{U} = \frac{x}{1 + \frac{R_p}{R_L} \cdot x(1-x)} = \frac{x}{1 + px(1-x)} \quad p = R_p/R_L \quad 1 P$$

c)

x	0	0.4	0.6	1
U_R/U	0	0.118	0.176	1

Für Bedingung $p = 10$ 2 P

19. a) Geben Sie die Formel für den Strom I an der Spannungsquelle in Abhängigkeit von der Schleiferstellung x und $p = R_p/R$ beim belasteten Spannungsteiler an. b) Werten Sie die Formel für x (Zahlenwerte 0, 0.4, 0.6, 1) für drei unterschiedliche Parameter $p = R_p/R = 0, 1, 4$. c) Skizzieren Sie die drei Kurven $I(x)$ für $U/R_p = 1$ A durch sinnvolles Verbinden der berechneten Punkte.

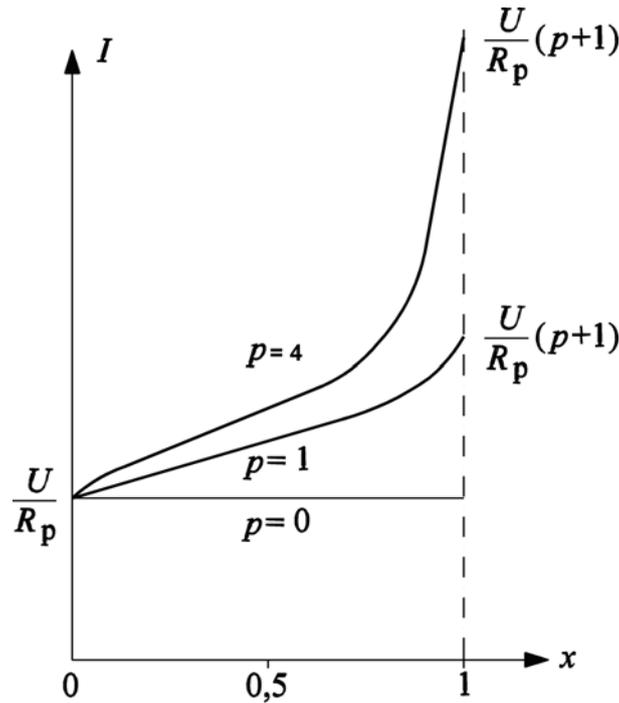
Lösung: a)
$$I = \frac{U(1 + p \cdot x)}{R_p(1 + p \cdot x(1-x))} \quad 0.5 P$$

b)

x	0	0,4	0,6	1
$I [A]$				
$p = 0$	1	1	1	1
$p = 1$	1	1,13	1,29	2
$p = 4$	1	1,33	1,74	4

2 P

c)

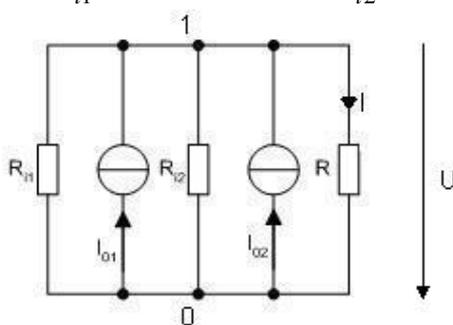


Der Strom an der Spannungsquelle in Abhängigkeit der Schleiferstellung für der Parameterwerte $p = R_p/R$
1.5 P

20. a) Wandeln Sie in der Schaltung in Bild 1.13-1 die Spannungsquellen in Stromquellen um und skizzieren Sie die so gewonnene Schaltung. b) Leiten Sie die Gleichung für den Strom I im Widerstand R in Abhängigkeit der Stromquellenparameter ab. c) Verifizieren Sie damit das Superpositions-gesetz! d) Vereinfachen Sie die Formelerggebnisse mit den Werten der Ersatzspannungsquellen soweit wie möglich!

Lösung: a) Die beiden Spannungsquellen werden in Stromquellen umgewandelt.

$$I_{01} = \frac{U_{01}}{R_{i1}} \quad \mathbf{0.6 P} \quad I_{02} = \frac{U_{02}}{R_{i2}} \quad \mathbf{0.6 P}$$



0.8 P

b) Lösung durch Kirchhoff'sche Regeln angewendet.

Zusammen ergeben die Quellen den Strom: $I_{i1} + I_{i2} + I = I_{01} + I_{02}$

Die Spannungsfälle an den 3 Widerständen sind gleich:

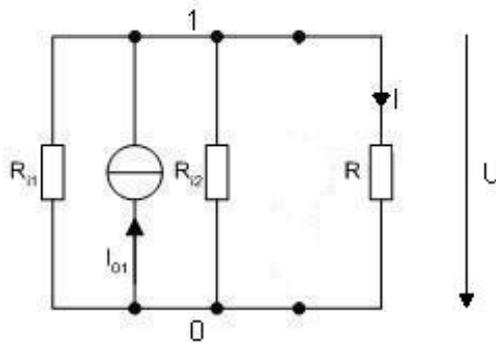
$$R_{i1}I_{i1} = R_{i2}I_{i2} \quad R_{i1}I_{i1} = RI \quad RI = R_{i2}I_{i2}$$

Daraus folgt der Strom:

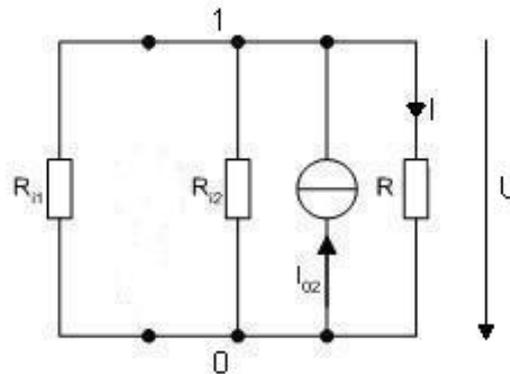
$$I = \frac{I_{01} + I_{02}}{R} \cdot \frac{1}{\frac{1}{R_{i1}} + \frac{1}{R_{i2}} + \frac{1}{R}} \quad \mathbf{0.5 P}$$

c) Superpositionsprinzip:

Fall A: Strom $I_{02} = 0$:



Fall A: Strom $I_{02} = 0$



Fall B: Strom $I_{01} = 0$:

Zusammen ergeben die Quellen den Strom: $I_{i1A} + I_{i2A} + I_A = I_{01}$

Die Spannungsfälle an den 3 Widerständen sind gleich:

$$R_{i1}I_{i1A} = R_{i2}I_{i2A} \quad R_{i1}I_{i1A} = RI_A \quad RI_A = R_{i2}I_{i2A}$$

Daraus folgt der Strom:

$$I_A = \frac{I_{01}}{R} \cdot \frac{1}{\frac{1}{R_{i1}} + \frac{1}{R_{i2}} + \frac{1}{R}} \quad 0.4 \text{ P}$$

Fall B: Strom $I_{01} = 0$:

$$\text{Analog zu vorhin ergibt sich: } I_B = \frac{I_{02}}{R} \cdot \frac{1}{\frac{1}{R_{i1}} + \frac{1}{R_{i2}} + \frac{1}{R}} \quad 0.4 \text{ P}$$

Superposition der beiden Fälle A und B liefert:

$$I = I_A + I_B = \frac{I_{01} + I_{02}}{R} \cdot \frac{1}{\frac{1}{R_{i1}} + \frac{1}{R_{i2}} + \frac{1}{R}}, \text{ siehe Punkt b). } 0.2 \text{ P}$$

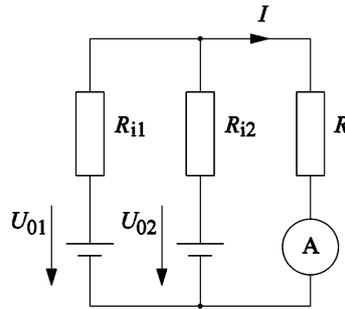
$$\text{d) } I = \frac{(U_{01}/R_{i1}) + (U_{02}/R_{i2})}{R} \cdot \frac{1}{\frac{1}{R_{i1}} + \frac{1}{R_{i2}} + \frac{1}{R}} \quad I = \left(\frac{U_{01}}{R_{i1}} + \frac{U_{02}}{R_{i2}} \right) \frac{R_{i1}R_{i2}}{R_{i1}R + RR_{i2} + R_{i1}R_{i2}}$$

$$I = \frac{U_{01}R_{i2} + U_{02}R_{i1}}{R_{i1}R + RR_{i2} + R_{i1}R_{i2}} \quad 0.5 \text{ P}$$

21. a) In welchen Netzwerken ist das Superpositionsgesetz zulässig? b) Leiten Sie die Gleichungen für I , I_1 , I_2 aus den Bildern 1.13-1 bis 1.13-3 ab. Vereinfachen Sie bitte die Endformeln soweit wie möglich! c) Zeigen Sie, dass $I = I_1 + I_2$ ist.

Lösung: a) Das Superpositionsgesetz ist in linearen Netzwerken zulässig. 0.5 P

b) Zunächst I : mit beiden Spannungsquellen, Bild (1.13.-1):



$$U_{01} = R_{i1}I_{01} + RI$$

$$U_{02} = R_{i2}I_{02} + RI$$

$$I = I_{01} + I_{02}$$

3 Gleichungen, 3 Unbekannte:

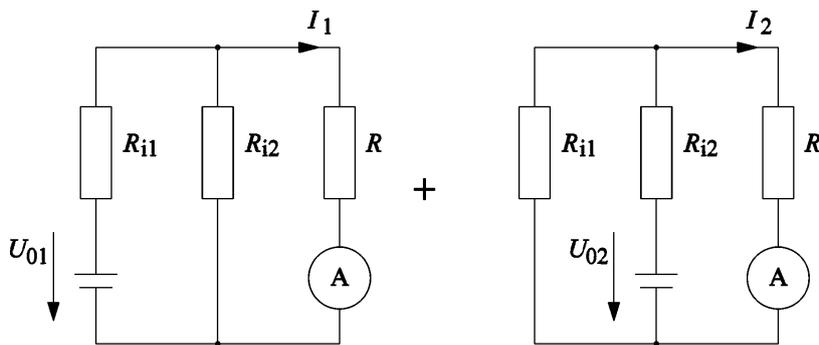
$$I_{01} = \frac{U_{01} - RI}{R_{i1}} \quad I_{02} = \frac{U_{02} - RI}{R_{i2}} \quad I = \frac{U_{01} - RI}{R_{i1}} + \frac{U_{02} - RI}{R_{i2}}$$

$$I + RI \left(\frac{1}{R_{i1}} + \frac{1}{R_{i2}} \right) = \frac{U_{01}}{R_{i1}} + \frac{U_{02}}{R_{i2}}$$

$$I \cdot \frac{R_{i1}R_{i2} + RR_{i2} + RR_{i1}}{R_{i1}R_{i2}} = \frac{U_{01}R_{i2} + U_{02}R_{i1}}{R_{i1}R_{i2}}$$

$$\text{Lösung: } I = \frac{U_{01}R_{i2} + U_{02}R_{i1}}{R_{i1}R_{i2} + RR_{i2} + RR_{i1}} \quad 1.5 \text{ P}$$

Fall 1: nur Spannungsquelle U_{01} :



$$U_{01} = R_{i1}I'_{01} + RI_1 \quad 0 = R_{i2}I'_{02} + RI_1 \quad I_1 = I'_{01} + I'_{02}$$

3 Gleichungen, 3 Unbekannte: I_1, I'_{01}, I'_{02}

$$I'_{01} = \frac{U_{01} - RI_1}{R_{i1}} \quad I'_{02} = -\frac{RI_1}{R_{i2}}$$

$$I_1 + RI_1 \left(\frac{1}{R_{i1}} + \frac{1}{R_{i2}} \right) = \frac{U_{01}}{R_{i1}}$$

$$\text{Lösung: } I_1 = \frac{U_{01}R_{i2}}{R_{i1}R_{i2} + RR_{i2} + RR_{i1}} \quad 1 \text{ P}$$

Fall 2: nur Spannungsquelle U_{02} :

Analoges Problem zu Fall 1, das durch Tausch der Indizes 1 und 2 gelöst wird:

$$\text{Lösung: } I_2 = \frac{U_{02}R_{i2}}{R_{i1}R_{i2} + RR_{i2} + RR_{i1}} \quad 0.5 \text{ P}$$

$$\text{c) } I = I_1 + I_2 = \frac{U_{01}R_{i2} + U_{02}R_{i1}}{R_{i1}R_{i2} + RR_{i2} + RR_{i1}} \quad 0.5 \text{ P}$$