

Versuch ET 04 – Stellwiderstände

1 Versuchsziel

Kennen lernen der drei Grundschaltungen zum Einstellen von Strom und Spannung durch veränderliche Widerstände unter Anwendung der Zweipoltheorie.

2 Grundlagen

2.1 Anwendung von Stellwiderständen

In elektrischen Schaltungen muss häufig die einem Verbraucher zugeführte elektrische Spannung oder Stromstärke veränderlich sein. Da meistens Spannungsquellen mit konstanter Spannung vorhanden sind, kann diese Aufgabe sehr leicht durch Einfügen zusätzlicher, veränderlicher Widerstände in den Stromkreis gelöst werden.

Folgende Grundforderungen sind dabei meistens zu erfüllen:

1. Möglichst großer Einstellbereich,
2. geringe Verluste am Stellwiderstand,
3. linearer Verlauf der Kennlinie.

Diese Forderungen widersprechen einander zum Teil, sie können nicht gleichzeitig erfüllt werden. Es gibt daher für jeden Anwendungsfall eine optimale Schaltung und einen optimalen Bereich für die Bemessung des Stellwiderstandes.

Zur theoretischen Untersuchung führt man die Schaltung zweckmäßigerweise nach der Zweipoltheorie auf den Grundstromkreis zurück.

Die Kurven

$$\frac{I}{I_k} = f\left(\frac{R_a}{R_i}\right) \quad \text{und} \quad \frac{U}{U_1} = f\left(\frac{R_a}{R_i}\right)$$

charakterisieren die erreichbaren Kennlinienverläufe der Stellwiderstände (s. Versuch „Grundstromkreis“).

2.2 Grundschaltungen mit veränderlichen Widerständen

In den folgenden Ableitungen wird der mittels Schleifkontakt abgegriffene Teil des Stellwiderstandes mit r , der gesamte Widerstand als R bezeichnet.

2.2.1 Schaltung mit Vorwiderstand

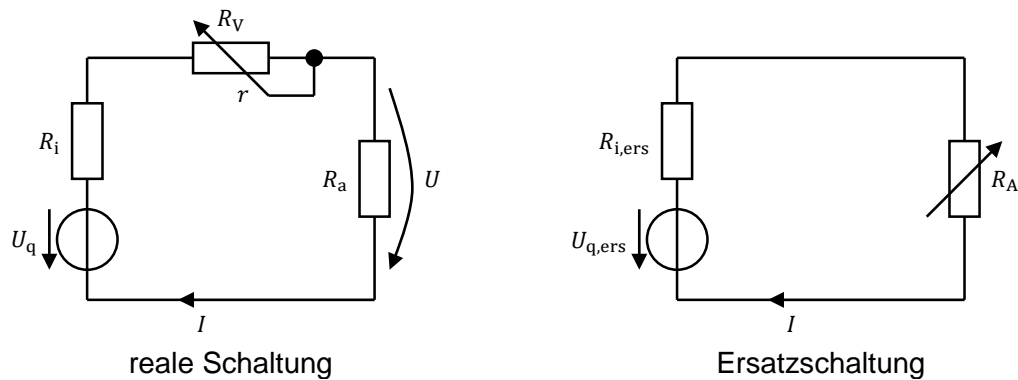


Abbildung 1: Schaltung mit Vorwiderstand

Die Größen der Ersatzschaltung haben dabei die Werte:

$$U_{q,ers} = U_q$$

$$R_{i,ers} = R_i + R_a$$

$$R_A = r \quad (0 \leq r \leq R_V)$$

Durch Einführen der Ersatzgrößen erhält man für den Strom I

$$I = \frac{U_{q,ers}}{R_{i,ers} + R_A} \quad \text{mit} \quad I_{\max} = I_{k,ers} = \frac{U_{q,ers}}{R_{i,ers}} \quad \text{bei} \quad R_A = 0$$

Für die normierte Darstellung ergibt sich daraus der bekannte Zusammenhang des Grundstromkreises (Abbildung 2) in der Form:

$$\frac{I}{I_{\max}} = \frac{1}{1 + \frac{R_A}{R_{i,ers}}} = \frac{1}{1 + \frac{r}{R_i + R_a}} \quad (1)$$

Aus Abbildung 2 ist ersichtlich, dass sich für $R_A > 8 R_{i,ers}$ der Strom I nur noch unbedeutend ändert. Für eine optimale Einstellbarkeit gemäß der drei Grundforderungen wählt man daher zweckmäßigerweise den Stellwiderstand R_V im Bereich

$$R_V = R_{A,\max} = 5 \dots 8(R_i + R_a). \quad (2)$$

Wird für das Verhältnis $\frac{R_V}{R_i + R_a}$ der Parameter p_V eingeführt, so legt p_V den Bereich fest, in dem der Strom I kontinuierlich eingestellt werden kann. Infolge der Proportionalität von Strom I und Spannung U am Widerstand R_a (Abbildung 1) ergibt sich für die normierte Spannung $\frac{U}{U_{\max}}$ der gleiche Verlauf wie für den Strom $\frac{I}{I_{\max}}$.

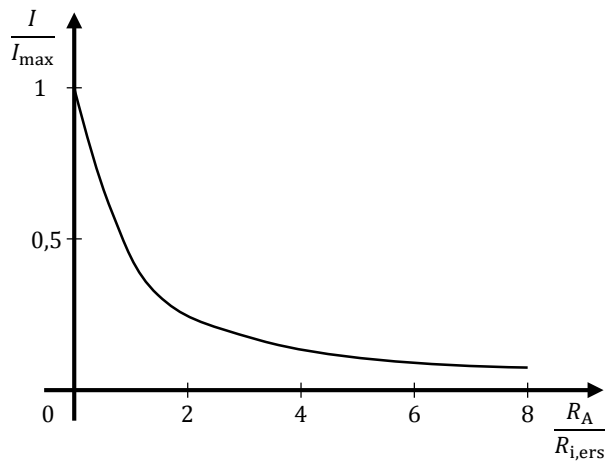


Abbildung 2: Darstellung der Funktion $\frac{I}{I_{\max}} = f\left(\frac{R_A}{R_{i,\text{ers}}}\right)$

Nachteil der Schaltung:

Eine kontinuierliche Einstellung des Stromes bis zum Wert $I = 0$ ist nicht möglich!

2.2.2 Schaltung mit Parallelwiderstand

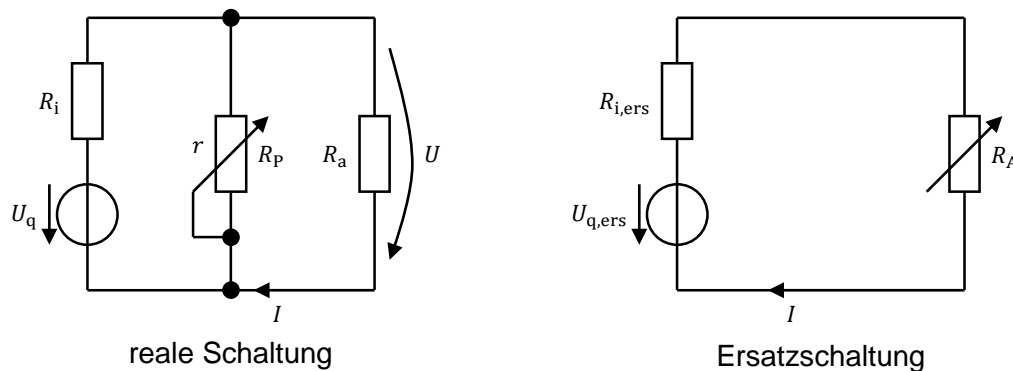


Abbildung 3: Schaltung mit Parallelwiderstand

Die Größen der Ersatzschaltung nehmen dabei folgende Werte an:

$$U_{\max} = U_{q,\text{ers}} = U_q \frac{R_a}{R_i + R_a} \quad (\text{bei } r = R_A \rightarrow \infty)$$

$$R_{i,\text{ers}} = R_i \parallel R_a$$

$$R_A = r \quad (0 \leq r \leq R_p)$$

Durch Einführen der Ersatzgrößen erhält man für die normierte Spannung $\frac{U}{U_{\max}}$ am Verbraucher R_a den vom Grundstromkreis bekannten Zusammenhang in der Form:

$$\frac{U}{U_{\max}} = \frac{1}{1 + \frac{R_{i,\text{ers}}}{R_A}} = \frac{1}{1 + \frac{R_i \parallel R_a}{r}} \quad (3)$$

Aus der Darstellung der Kennlinie des Parallelwiderstandes

$$\frac{U}{U_{\max}} = f\left(\frac{R_A}{R_{i,\text{ers}}}\right)$$

ist zu erkennen, dass sich die Spannung U für $R_A > 8 R_{i,\text{ers}}$ nur noch geringfügig ändert (Abbildung 4).

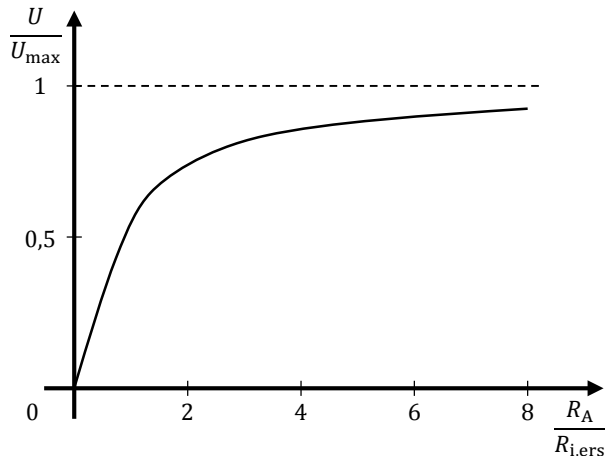


Abbildung 4: Darstellung der Funktion $\frac{U}{U_{\max}} = f\left(\frac{R_A}{R_{i,\text{ers}}}\right)$

Eine optimale Einstellbarkeit gemäß der drei Grundforderungen erhält man für einen Stellwiderstand R_P im Bereich

$$R_P = R_{A,\text{max}} = 5 \dots 8(R_i \parallel R_a). \quad (4)$$

Das Verhältnis $\frac{R_P}{R_i \parallel R_a}$ wird als Parameter p_P der Schaltung definiert und bedingt den Verlauf der Kennlinie. Die Spannung U am Verbraucher ist stets kleiner als $U_{q,\text{ers}}$. Für den Stromverlauf ergeben sich prinzipiell die gleichen Kurven wie für die Spannung, da im Verbraucher R_a Strom und Spannung proportional sind.

Nachteil der Schaltung:

Die Spannungsquelle U_q muss bei $r = 0$ einen Kurzschluss aushalten. Daher ist die Schaltung in der Praxis wenig gebräuchlich.

2.2.3 Schaltung mit Spannungsteiler

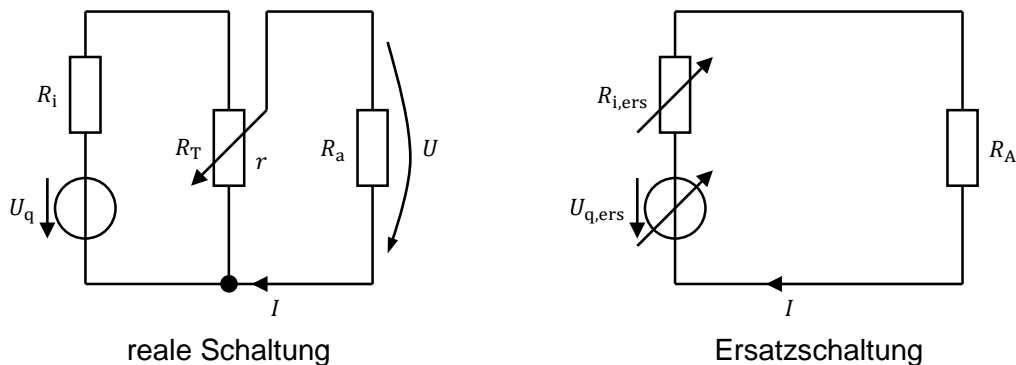


Abbildung 5: Schaltung mit Spannungsteiler

Für die Größen der Ersatzschaltung erhält man

$$U_{q,ers} = U_q \frac{r}{R_T + R_i}$$

$$R_{i,ers} = r \parallel (R_T - r + R_i) \quad (0 \leq r \leq R_T)$$

$$R_A = R_a$$

Die Schaltung kann also nur auf einen solchen Grundstromkreis zurückgeführt werden, bei dem sich sowohl $U_{q,ers}$ als auch $R_{i,ers}$ mit r ändern. Die Kennlinie $\frac{U}{U_{max}} = f(r)$ entspricht deshalb nicht mehr dem Spannungsverlauf am Grundstromkreis. Bei vernachlässigbar kleinem R_i erhält man für die Spannung am Verbraucher

$$U = U_q \frac{r}{R_T} \cdot \frac{R_A}{R_A + R_{i,ers}} = U_q \frac{r}{R_T} \cdot \frac{R_A}{R_A + r \parallel (R_T - r)} \quad (5)$$

und durch Einsetzen der Beziehung $r = R_T$ die maximale Spannung

$$U_{max} = U_q \cdot \quad (6)$$

Daraus ergibt sich die normierte Spannung am Verbraucher

$$\frac{U}{U_{max}} = \frac{r}{R_T} \cdot \frac{R_A}{R_A + R_{i,ers}} = \frac{r}{R_T} \cdot \frac{R_A}{R_A + r \parallel (R_T - r)} \quad (7)$$

Wird eine lineare Kennlinie gefordert, so muss gelten

$$\frac{U}{U_{max}} = \frac{r}{R_T} ; \quad (8)$$

d. h. $R_A \gg R_{i,ers}$. Unter Berücksichtigung der Beziehung $R_i \ll R_T$ nimmt $R_{i,ers}$ seinen Maximalwert an bei $r = \frac{R_T}{2}$ und erreicht dabei den Wert

$$R_{i,ers,max} = \frac{R_T}{4} \quad (9)$$

Für lineare Einstellung gilt damit $R_A \gg \frac{R_T}{4}$. Infolgedessen muss bei gegebenem Verbraucher R_A ein sehr kleiner Stellwiderstand R_T gewählt werden, wodurch sich die Leistungsverhältnisse ungünstig gestalten (Grundforderung 2).

Man bezeichnet das Verhältnis $\frac{R_T}{R_a}$ als Parameter p_T und wählt als Kompromisslösung

$$p_T = \frac{R_T}{R_a} = 5 \dots 8 \quad (10)$$

2.3 Feineinstellung

Bei großem Stellbereich des Widerstandes ist oft die zu einer kleinen Widerstandsänderung Δr gehörende Änderung der Betriebsgröße ΔU bzw. ΔI so groß, dass gegebene Werte der Spannung U oder des Stromes I nicht mehr mit der gewünschten Genauigkeit eingestellt werden können. In diesem Fall schaltet man einen zweiten Widerstand R_F mit kleinem Stellbereich zur Feineinstellung ein. Für Schaltungen nach 2.2.1 und 2.2.2 kann der Widerstand R_F zur Feineinstellung entweder in Reihe oder parallel zum Grobstellwiderstand R geschaltet werden. Bei der Parallelschaltung wird zweckmäßigerweise dem Feinwiderstand R_F ein Festwiderstand R_0 zur Strombegrenzung vorgeschaltet. Für die Schaltung in 2.2.3 wird eine Feineinstellung durch Kettenschaltung mehrerer Spannungsteiler erzielt (Abbildung 6).

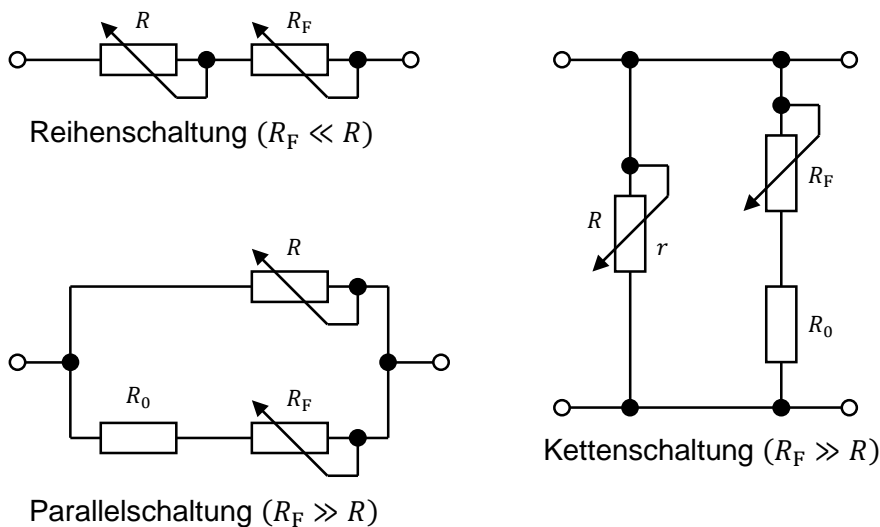


Abbildung 6: Prinzipschaltungen zur Feineinstellung

3 Versuchsvorbereitung

3.1

Stellen Sie Gleichungen der folgenden Funktionen für die Kennlinien der Stellwiderstände auf und zeichnen Sie die Kurven maßstabsgerecht.

$$3.1.1 \quad \frac{I}{I_{\max}} = f\left(\frac{r}{R_V}\right) \quad \text{mit } p_V = 5$$

$$3.1.2 \quad \frac{U}{U_{\max}} = f\left(\frac{r}{R_P}\right) \quad \text{mit } p_P = 5$$

$$3.1.3 \quad \frac{U}{U_{\max}} = f\left(\frac{r}{R_T}\right) \quad \text{mit } p_T = 5$$

3.2

Berechnen Sie die Verlustleistung P_V im Stellwiderstand bezogen auf die in der Gesamtschaltung umgesetzte Leistung P_{ges} für die drei Grundschaltungen als Funktion des bezogenen Stellwiderstandes $\frac{r}{R}$.

Berechnen Sie und stellen Sie maßstäblich dar:

$$3.2.1 \quad \frac{P_V}{P_{\text{ges}}} = f\left(\frac{r}{R_V}\right) \quad \text{mit } p_V = 0,5; 5; 50$$

$$3.2.2 \quad \frac{P_V}{P_{\text{ges}}} = f\left(\frac{r}{R_P}\right) \quad \text{mit } p_P = 0,5; 5; 50$$

$$3.2.3 \quad \frac{P_V}{P_{\text{ges}}} = f\left(\frac{r}{R_T}\right) \quad \text{mit } p_T = 0,5; 5; 50$$

3.3

Eine Glühlampe 220 V/100 W soll in ihrer Helligkeit unter Berücksichtigung der drei Grundforderungen verändert werden. Schlagen Sie die optimale Schaltung vor (Skizze) und bestimmen Sie den optimalen Größenbereich sowie die Nennleistung des gewählten Stellwiderstandes!

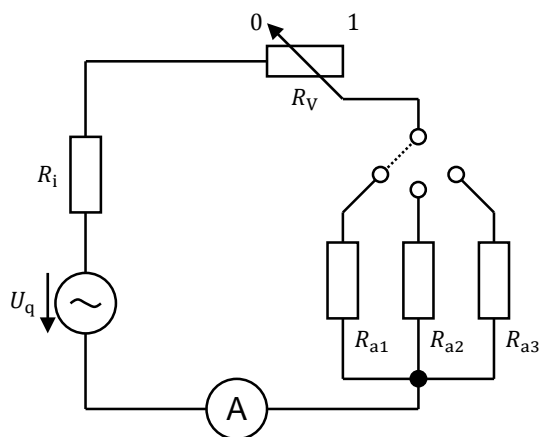
4 Versuchsdurchführung

4.1 Schaltung mit Vorwiderstand

4.1.1

Messen Sie in Schaltung 4.1.1 die Stromstärke I in Abhängigkeit vom bezogenen Stellwiderstand $\frac{r}{R_V}$ bei drei Werten von R_a . Stellen Sie die Kennlinien $\frac{I}{I_{\max}} = f\left(\frac{r}{R_V}\right)$ für R_{a1} , R_{a2} und R_{a3} dar ($0 \leq \frac{r}{R_V} \leq 1$)! Die Maximalströme I_{\max} werden jeweils **bei $r = 0$** erreicht.

Berechnen Sie die Parameter $p_V = \frac{R_V}{R_i + R_a}$ und kennzeichnen Sie damit die aufgenommenen Kurven.



$$\begin{aligned} U_q &\approx 7 \text{ V} \\ R_i &= 1 \ \Omega \\ R_V &= 330 \ \Omega \\ R_{a1} &= 5 \ \Omega \\ R_{a2} &= 51 \ \Omega \\ R_{a3} &= 498 \ \Omega \end{aligned}$$

Abbildung 7: Messschaltung 4.1.1

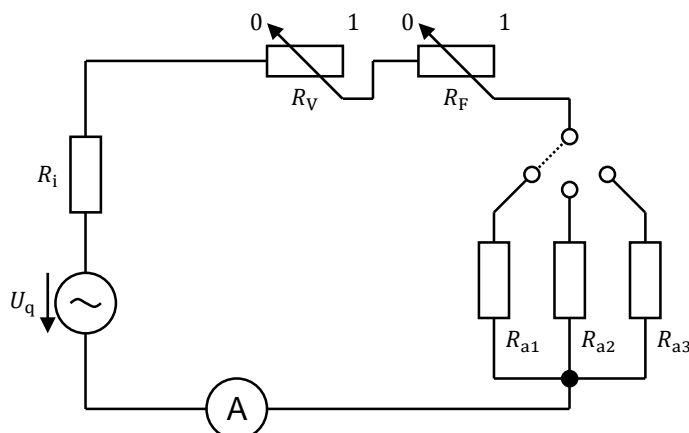
4.1.2

Ersetzen Sie in Schaltung 4.1.1 den Vorwiderstand R_V durch die Reihenschaltung $R_V + R_F$. Messen Sie für den Lastwiderstand R_{a2} die Kennlinie $\frac{I}{I_{\max}} = f\left(\frac{r}{R_V}\right)$, $0 \leq \frac{r}{R_V} \leq 1$ bei der Endstellung $\frac{r}{R_F} = 1$ des Feineinstellwiderstandes R_F .

Übernehmen Sie die in Aufgabe 4.1.1 gemessene Kennlinie für R_{a2} (entspricht der Kennlinie $\frac{I}{I_{\max}} = f\left(\frac{r}{R_V}\right)$ bei der Endstellung $\frac{r}{R_F} = 0$ des Feineinstellwiderstandes R_F) in das Diagramm.

Kennzeichnen Sie in Ihrem Diagramm den Feineinstellbereich!

Hinweis: I_{\max} ist immer der Strom **bei $R_V = R_F = 0$** . Dieser Wert wurde schon in Aufgabe 4.1.1 gemessen.



$$\begin{aligned} U_q &\approx 7 \text{ V} \\ R_i &= 1 \ \Omega \\ R_F &= 33 \ \Omega \\ R_V &= 330 \ \Omega \\ R_{a2} &= 51 \ \Omega \end{aligned}$$

Abbildung 8: Messschaltung 4.1.2

4.1.3

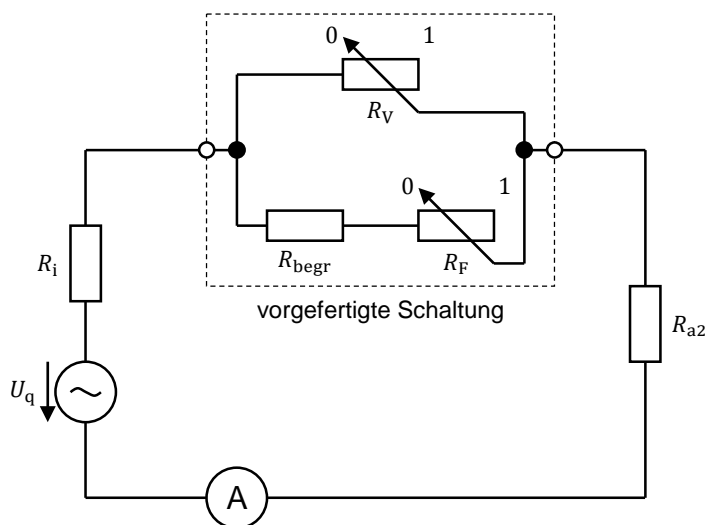
Ersetzen Sie in Schaltung 4.1.1 den Vorwiderstand R_V durch die Parallelschaltung $R_V \parallel R_F$. Messen Sie für den Lastwiderstand R_{a2} die Kennlinie $\frac{I}{I_{\max}} = f\left(\frac{r}{R_V}\right)$, $0 \leq \frac{r}{R_V} \leq 1$ bei den beiden Endstellungen $\frac{r}{R_F} = 0$ und $\frac{r}{R_F} = 1$ des Feineinstellwiderstandes R_F .

Kennzeichnen Sie in Ihrem Diagramm den Feineinstellbereich!

Geben Sie den möglichen Einstellbereich an, wenn dem Widerstand R_F kein Festwiderstand R_{begr} vorgeschaltet ist!

Hinweise:

- Messung von I_{\max} bei $R_V \parallel R_F = 0$. Dieser Wert wurde schon in Aufgabe 4.1.1 gemessen.
- Benutzen Sie beim Einfügen von R_F in die Schaltung den vorgefertigten Aufbau mit eingebautem Festwiderstand R_{begr} .



$$\begin{aligned}
 U_q &\approx 7 \text{ V} \\
 R_i &= 1 \ \Omega \\
 R_{begr} &= 244 \ \Omega \\
 R_F &= 3300 \ \Omega \\
 R_V &= 330 \ \Omega \\
 R_{a2} &= 51 \ \Omega
 \end{aligned}$$

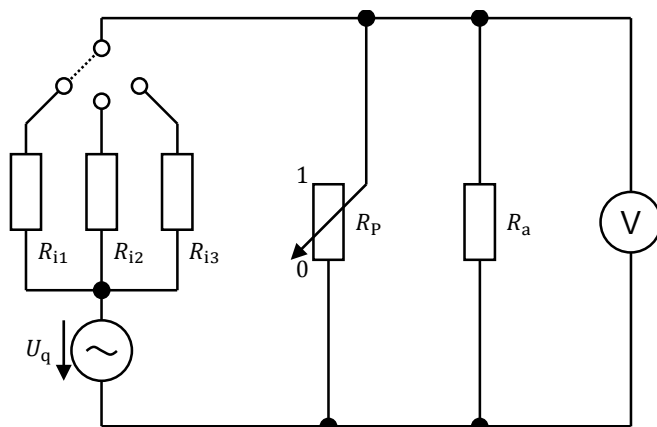
Abbildung 9: Messschaltung 4.1.3

4.2 Schaltung mit Parallelwiderstand

4.2.1

Messen Sie in Schaltung 4.2.1 die Spannung U am Außenwiderstand R_a in Abhängigkeit vom bezogenen Stellwiderstand $\frac{r}{R_P}$ bei drei verschiedenen Innenwiderständen R_i . Stellen Sie die Kennlinien $\frac{U}{U_{\max}} = f\left(\frac{r}{R_P}\right)$ für R_{i1} , R_{i2} und R_{i3} dar ($0 \leq \frac{r}{R_P} \leq 1$)! Die Maximalspannungen U_{\max} sind jeweils bei $r \rightarrow \infty$, d. h. **bei abgetrenntem Stellwiderstand R_P** zu messen.

Berechnen Sie die Parameter $p_P = \frac{R_P}{R_i \parallel R_a}$ und kennzeichnen Sie damit die aufgenommenen Kurven.



$$\begin{aligned}
 U_q &\approx 7 \text{ V} \\
 R_{i1} &= 805 \, \Omega \\
 R_{i2} &= 50 \, \Omega \\
 R_{i3} &= 12 \, \Omega \\
 R_P &= 330 \, \Omega \\
 R_a &= 804 \, \Omega
 \end{aligned}$$

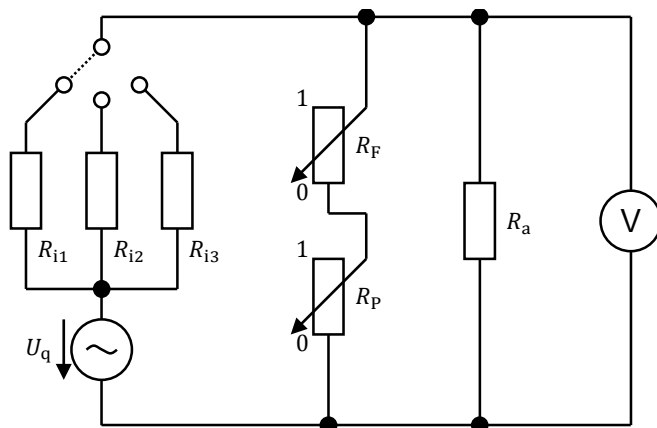
Abbildung 10: Messschaltung 4.2.1

4.2.2

Ersetzen Sie in Schaltung 4.2.1 den Parallelwiderstand R_P durch die Reihenschaltung $R_P + R_F$. Messen Sie für den Innenwiderstand R_{i2} die Kennlinie $\frac{U}{U_{\max}} = f\left(\frac{r}{R_P}\right)$, $0 \leq \frac{r}{R_P} \leq 1$ bei der Endstellung $\frac{r}{R_F} = 1$ des Feineinstellwiderstandes R_F .

Übernehmen Sie die in Aufgabe 4.2.1 gemessene Kennlinie für R_{i2} (entspricht der Kennlinie $\frac{U}{U_{\max}} = f\left(\frac{r}{R_P}\right)$ bei der Endstellung $\frac{r}{R_F} = 0$ des Feineinstellwiderstandes R_F) in das Diagramm. Kennzeichnen Sie in Ihrem Diagramm den Feineinstellbereich!

Hinweis: U_{\max} ist immer die Spannung **bei abgetrenntem Parallelwiderstand R_P** . Dieser Wert wurde schon in Aufgabe 4.2.1 gemessen.



$$\begin{aligned}
 U_q &\approx 7 \text{ V} \\
 R_{i2} &= 50 \, \Omega \\
 R_F &= 33 \, \Omega \\
 R_P &= 330 \, \Omega \\
 R_a &= 804 \, \Omega
 \end{aligned}$$

Abbildung 11: Messschaltung 4.2.2

4.2.3

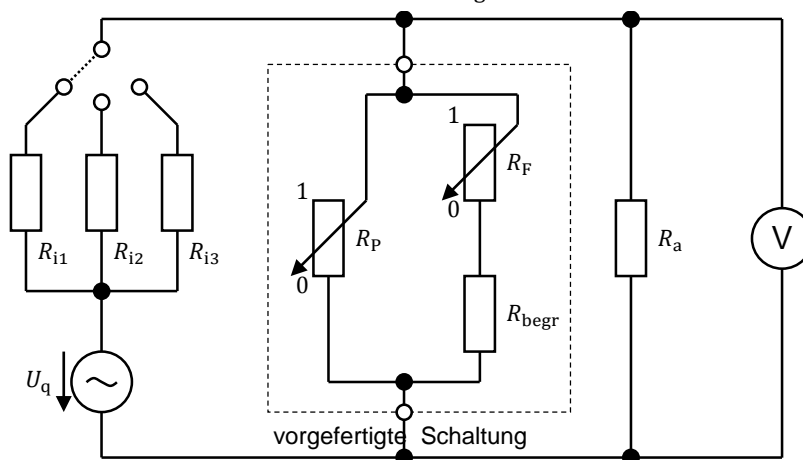
Ersetzen Sie in Schaltung 4.2.1 den Parallelwiderstand R_P durch die Parallelschaltung $R_P || R_F$. Messen Sie für den Innenwiderstand R_{i2} die Kennlinie $\frac{U}{U_{\max}} = f\left(\frac{r}{R_P}\right)$, $0 \leq \frac{r}{R_P} \leq 1$ bei den beiden Endstellungen $\frac{r}{R_F} = 0$ und $\frac{r}{R_F} = 1$ des Feineinstellwiderstandes R_F .

Kennzeichnen Sie in Ihrem Diagramm den Feineinstellbereich!

Geben Sie den möglichen Einstellbereich an, wenn dem Widerstand R_F kein Festwiderstand R_{begr} vorgeschaltet ist!

Hinweise:

- U_{\max} ist die Spannung **bei abgetrennten Stellwiderständen R_P und R_F** . Dieser Wert wurde schon in Aufgabe 4.2.1 gemessen.
- Benutzen Sie beim Einfügen von R_F in die Schaltung den vorgefertigten Aufbau mit eingebautem Festwiderstand R_{begr} .



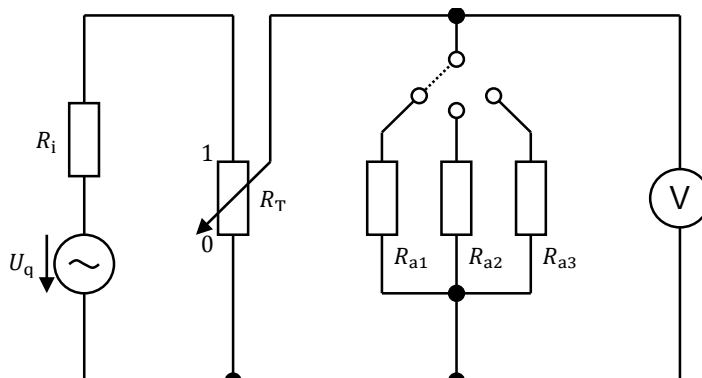
$$\begin{aligned} U_q &\approx 7 \text{ V} \\ R_{i2} &= 50 \Omega \\ R_{\text{begr}} &= 244 \Omega \\ R_F &= 3300 \Omega \\ R_P &= 330 \Omega \\ R_a &= 804 \Omega \end{aligned}$$

Abbildung 12: Messschaltung 4.2.3

4.3 Schaltung mit Spannungsteiler

Messen Sie in Schaltung 4.3 die abgegriffene Spannung U in Abhängigkeit vom bezogenen Stellwiderstand $\frac{r}{R_T}$ bei drei verschiedenen Außenwiderständen R_a . Stellen Sie die Kennlinien $\frac{U}{U_{\max}} = f\left(\frac{r}{R_T}\right)$ für R_{a1} , R_{a2} und R_{a3} dar ($0 \leq \frac{r}{R_T} \leq 1$)! Die Maximalspannungen U_{\max} werden jeweils **bei $r = R_T$** erreicht.

Berechnen Sie die Parameter $p_T = \frac{R_T}{R_a}$ und kennzeichnen Sie damit die aufgenommenen Kurven.



$$\begin{aligned} U_q &\approx 7 \text{ V} \\ R_i &= 1 \Omega \\ R_T &= 330 \Omega \\ R_{a1} &= 13 \Omega \\ R_{a2} &= 49 \Omega \\ R_{a3} &= 509 \Omega \end{aligned}$$

Abbildung 13: Messschaltung 4.3

5 Literatur

- [1] S. Altmann, D. Schlayer, Lehr- und Übungsbuch Elektrotechnik, Fachbuchverlag Leipzig - Köln, 1995.
- [2] W.-E. Büttner, Grundlagen der Elektrotechnik 1, Oldenbourg Verlag München - Wien, 2004.

6 Anhang

6.1 Geräteliste

- 1 Netzgerät 6 V~/50 Hz, 4 A
- 1 Digital-Multimeter (Fluke 75 III)
- 1 Stellwiderstand 0 - 33 Ω , 3,1 A
- 1 Stellwiderstand 0 - 330 Ω , 1,4 A
- 1 Stellwiderstand 0 - 3300 Ω , 0,91 A
- 4 vorgefertigte Schaltungen:
 - Schaltung „Vorwiderstand“
 - Schaltung „Feineinstellung“
 - Schaltung „Parallelwiderstand“
 - Schaltung „Spannungsteiler“