

Protokoll Übung 2

David Keller, Moritz Woltron, Matthias Fottner

Inhaltsverzeichnis

1	Schaltplan mit allen Strömen, Spannungen und Knoten	2
2	Aufstellen des Gleichungssystems in Matrixform durch “hinschauen”	3
2.1	Widerstände	3
2.2	Unabhängige Stromquelle $S3$	3
2.3	Unabhängige Spannungsquelle $S2$ ($\rightarrow +1$ Gleichung)	4
2.4	Stromgesteuerte Spannungsquelle $S1$ ($\rightarrow +1$ Gleichung)	5
2.5	Ausrechnen der Unbekanntenvektors x	6
3	Thevenin-Quelle bezüglich der Klemmen a und b	6
3.1	U_{Th}	6
3.2	I_{KS}	6
3.3	R_{Th} mithilfe von U_{Th} und I_{KS}	8
3.4	R_{Th} mithilfe von Testspannung U_T	8
4	Simulation in PSpice	11
4.1	Originalschaltung	11
4.2	Thevenin-Quelle	11
4.3	Vergleich der beiden Simulationen	12
5	Matlab-Simulation	13
5.1	Skript	13
5.2	Konsolenoutput	14

1 Schaltplan mit allen Strömen, Spannungen und Knoten

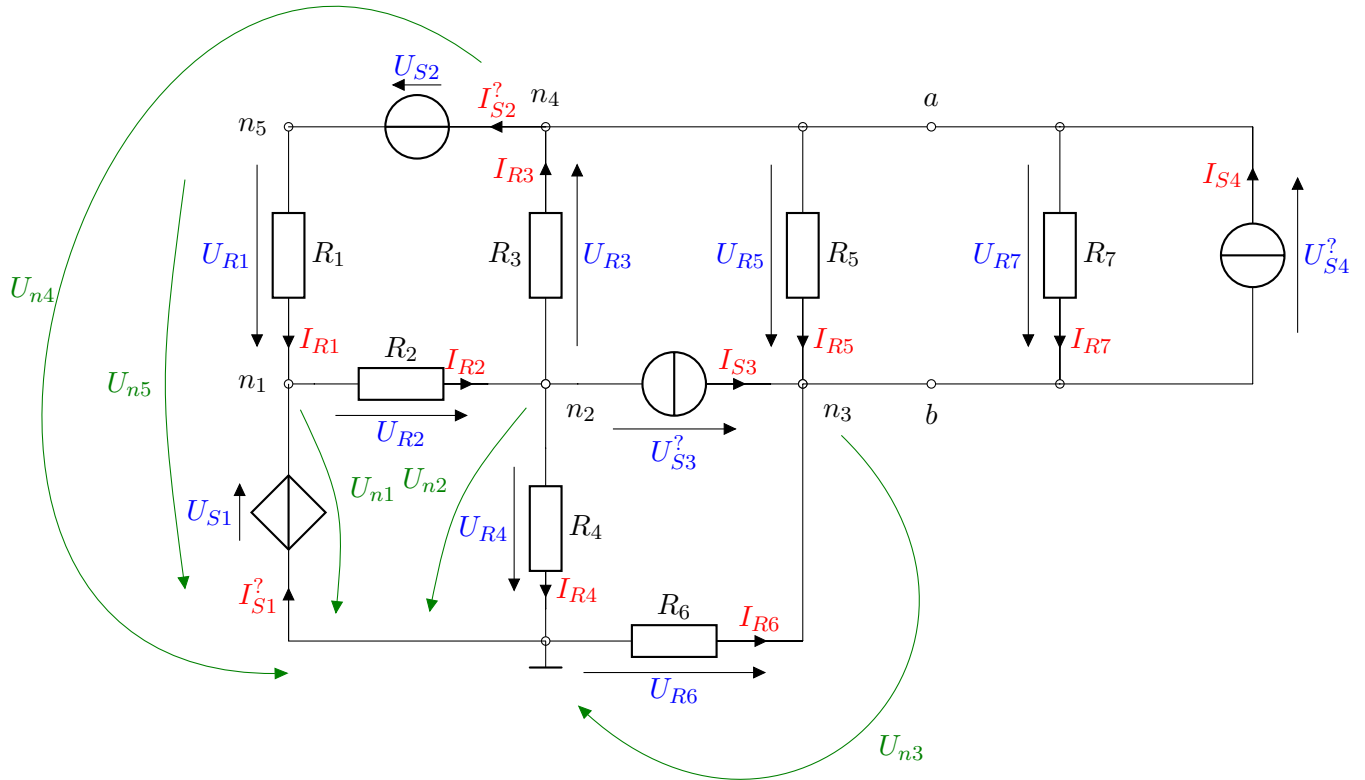


Abb. 1: Netzwerk mit allen eingezeichneten Strömen, (Knoten-)spannungen und Knoten

2 Aufstellen des Gleichungssystems in Matrixform durch “hinschauen”

2.1 Widerstände

Zuerst wird die Admittanzmatrix durch hinschauen bestimmt. Dazu werden auf der Hauptdiagonale alle den jeweiligen Knoten umgebenden Leitwerte addiert. Auf der Nebendiagonale werden die Werte der zwischen den Knoten liegenden Widerstände als negativer Leitwert eingetragen. Der Unbekanntenvektor besteht aus den Knotenspannungen, der Ergebnisvektor beträgt 0.

$$\text{Es gilt: } G_n = \frac{1}{R_n}$$

$$\begin{array}{c}
 \begin{array}{ccccc}
 & n1 & & n2 & & n3 & & n4 & & n5 \\
 n1 & G_1 + G_2 & \vdots & -G_2 & \vdots & 0 & \vdots & 0 & \vdots & -G_1 \\
 n2 & -G_2 & \vdots & G_2 + G_3 + G_4 & \vdots & 0 & \vdots & -G_3 & \vdots & 0 \\
 n3 & 0 & \vdots & 0 & \vdots & G_5 + G_6 & \vdots & -G_5 & \vdots & 0 \\
 n4 & 0 & \vdots & -G_3 & \vdots & -G_5 & \vdots & G_3 + G_5 & \vdots & 0 \\
 n5 & -G_1 & \vdots & 0 & \vdots & 0 & \vdots & 0 & \vdots & G_1
 \end{array}
 \begin{array}{c}
 \left[\begin{array}{c} U_{n1} \\ U_{n2} \\ U_{n3} \\ U_{n4} \\ U_{n5} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{array} \right]
 \end{array}
 \end{array}$$

2.2 Unabhängige Stromquelle S3

Der bekannte Strom I_{S3} der Stromquelle $S3$ fließt aus Knoten $n2$ (positiv) in den Knoten $n3$ (negativ)(vgl. Abb. 2). Bringt man nun die Größe auf die andere Seite des Gleichungssystems, so muss I_{S3} im Lösungsvektor negativ bei $n2$ und positiv bei $n3$ sein.

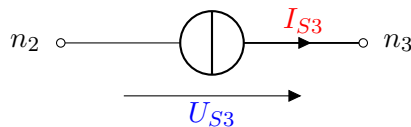


Abb. 2: freigestellte Stromquelle $S3$

Es ergibt sich folgende Änderung im Gleichungssystem:

$$\begin{array}{c}
n1 \quad n2 \quad n3 \quad n4 \quad n5 \\
\begin{array}{c}
n1 \\ n2 \\ n3 \\ n4 \\ n5
\end{array}
\begin{bmatrix}
G_1 + G_2 & -G_2 & 0 & 0 & -G_1 \\
-G_2 & G_2 + G_3 + G_4 & 0 & -G_3 & 0 \\
0 & 0 & G_5 + G_6 & -G_5 & 0 \\
0 & -G_3 & -G_5 & G_3 + G_5 & 0 \\
-G_1 & 0 & 0 & 0 & G_1
\end{bmatrix}
\begin{pmatrix} U_{n1} \\ U_{n2} \\ U_{n3} \\ U_{n4} \\ U_{n5} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ -I_{S3} \\ I_{S3} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}
\end{array}$$

2.3 Unabhängige Spannungsquelle $S2$ ($\rightarrow +1$ Gleichung)

Bei der unabhängigen Spannungsquelle kommt mit dem Strom $I_{S2}^?$ eine unbekannte Größe hinzu. Folglich muss auch eine weitere Gleichung im Gleichungssystem ergänzt werden. Diese erhält man, indem die bekannte Quellspannung U_{S2} mithilfe der Knotenspannungen ausgedrückt wird (vgl. Abb. 3):

$$U_{S2} = U_{n4} - U_{n5}$$

Beim Hinzufügen von $I_{S2}^?$ in den Unbekanntenvektor, muss auch die Strombilanz der Knoten $n4$ (positiv) und $n5$ (negativ) angepasst werden.

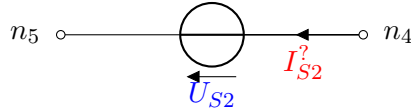


Abb. 3: freigestellte Spannungsquelle $S2$

$$\begin{array}{c}
n1 \quad n2 \quad n3 \quad n4 \quad n5 \quad I_{S2}^? \\
\begin{array}{c}
n1 \\ n2 \\ n3 \\ n4 \\ n5 \\ I_{S2}^?
\end{array}
\begin{bmatrix}
G_1 + G_2 & -G_2 & 0 & 0 & -G_1 & 0 \\
-G_2 & G_2 + G_3 + G_4 & 0 & -G_3 & 0 & 0 \\
0 & 0 & G_5 + G_6 & -G_5 & 0 & 0 \\
0 & -G_3 & -G_5 & G_3 + G_5 & 0 & 1 \\
-G_1 & 0 & 0 & 0 & G_1 & -1 \\
0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0
\end{bmatrix}
\begin{pmatrix} U_{n1} \\ U_{n2} \\ U_{n3} \\ U_{n4} \\ U_{n5} \\ I_{S2}^? \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ -I_{S3} \\ I_{S3} \\ 0 \\ 0 \\ U_{S2} \end{pmatrix}
\end{array}$$

2.4 Stromgesteuerte Spannungsquelle $S1$ ($\rightarrow +1$ Gleichung)

Bei der stromgesteuerten Spannungsquelle $S1$ kommt die unbekannte Größe $I_{S1}^?$ hinzu. Folglich muss auch hier das Gleichungssystem um eine Gleichung erweitert werden.

$$\begin{aligned}
 U_{S1} &= \alpha \cdot I_{R3} \\
 I_{R3} &= G_3(U_{n2} - U_{n4}) \\
 U_{S1} &= -U_{n1} \\
 \implies -U_{n1} &= \alpha \cdot G_3(U_{n2} - U_{n4}) \\
 0 &= \alpha \cdot G_3(U_{n2} - U_{n4}) + U_{n1}
 \end{aligned}$$

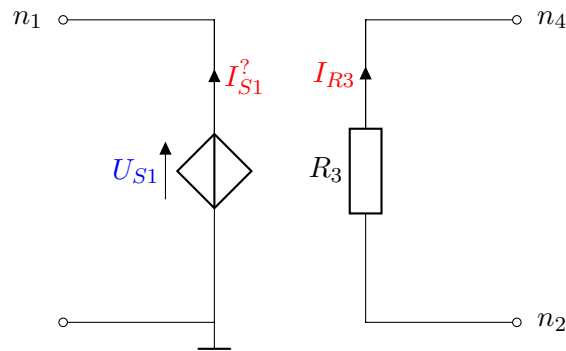


Abb. 4: freigestellte stromgesteuerte Spannungsquelle $S1$ mit Steuerungsstrom I_{R3}

	$n1$	$n2$	$n3$	$n4$	$n5$	$I_{S2}^?$	$I_{S1}^?$		
$n1$	$G_1 + G_2$	$-G_2$	0	0	$-G_1$	0	-1	$\left\{ \begin{matrix} U_{n1} \\ U_{n2} \\ U_{n3} \\ U_{n4} \\ U_{n5} \end{matrix} \right\} = \left\{ \begin{matrix} 0 \\ -I_{S3} \\ I_{S3} \\ 0 \\ 0 \end{matrix} \right\}$	
$n2$	$-G_2$	$G_2 + G_3 + G_4$	0	$-G_3$	0	0	0		
$n3$	0	0	$G_5 + G_6$	$-G_5$	0	0	0		
$n4$	0	$-G_3$	$-G_5$	$G_3 + G_5$	0	1	0		
$n5$	$-G_1$	0	0	0	G_1	-1	0		
$I_{S2}^?$	0	0	0	1	-1	0	0	$\left\{ \begin{matrix} I_{S2}^? \\ I_{S1}^? \end{matrix} \right\}$	$\left\{ \begin{matrix} U_{S2} \\ 0 \end{matrix} \right\}$
$I_{S1}^?$	1	αG_3	0	$-\alpha G_3$	0	0	0		
	$\underbrace{\hspace{15em}}_A$							x	b

2.5 Ausrechnen der Unbekanntenvektors x

Indem man beide Seiten der Gleichung mit der Inversen A^{-1} multipliziert, kann man nach x auflösen.

$$x = A^{-1}b$$

Man erhält mithilfe von Matlab für x (vgl. Kapitel 5.2, Z. 1-9):

$$x = \begin{Bmatrix} U_{n1} \\ U_{n2} \\ U_{n3} \\ U_{n4} \\ U_{n5} \\ I_{S2}^? \\ I_{S1}^? \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 5,6140 \text{ V} \\ -0,1754 \text{ V} \\ 23,1579 \text{ V} \\ 20,8772 \text{ V} \\ 0,8772 \text{ V} \\ -0,9474 \text{ A} \\ 1,5263 \text{ A} \end{Bmatrix}$$

3 Thevenin-Quelle bezüglich der Klemmen a und b

3.1 U_{Th}

Die Spannung U_{Th} entspricht der Leerlaufspannung an den Klemmen a und b ($U_{ab,LL}$), welche der Spannung U_{R5} entspricht (vgl. Abb. 5). Somit kann U_{Th} mithilfe der gewonnenen Knotenspannungen aus Kapitel 2.5 berechnet werden. Es gilt (vgl. Kapitel 5.2, Z. 12-14):

$$U_{Th} = U_{ab,LL} = U_{R5} = U_{n4} - U_{n3} = 20,8772 \text{ V} - 23,1579 \text{ V} = -2,2807 \text{ V}$$

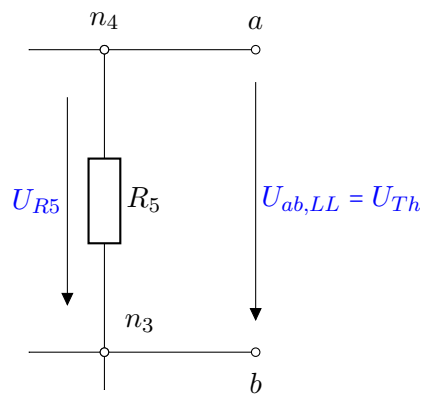


Abb. 5: Spannungsbetrachtung an den Klemmen a und b

3.2 I_{KS}

Bei I_{KS} handelt es sich um eine weitere Unbekannte, deshalb muss das Gleichungssystem um eine weitere Gleichung erweitert werden. Um den Kurzschluss zu simulieren, kann an den Klemmen a und b eine ideale Spannungsquelle mit 0 V Spannungsabfall angenommen werden (vgl. Abb. 6). Dieser Spannungsabfall entspricht U_{R5} , und somit kann folgende Gleichung aufgestellt werden:

$$U_{R5} = U_{KS} = U_{n4} - U_{n3} = 0$$

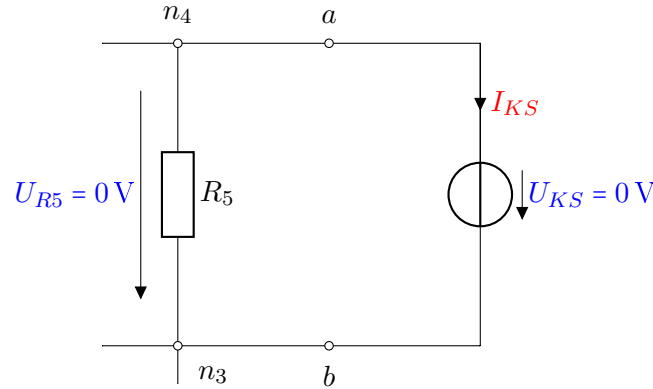


Abb. 6: Simulation des Kurzschlussstroms I_{KS}

Der Kurzschlussstrom I_{KS} muss als ausfließender Strom in Knoten n_4 und als zufließender Strom in Knoten n_3 ergänzt werden. Insgesamt ergibt sich folgendes Gleichungssystem:

	$n1$	$n2$	$n3$	$n4$	$n5$	$I_{S2}^?$	$I_{S1}^?$	I_{KS}		
$n1$	$G_1 + G_2$	$-G_2$	0	0	$-G_1$	0	-1	0	$\left\{ \begin{matrix} U_{n1} \\ U_{n2} \\ U_{n3} \\ U_{n4} \\ U_{n5} \end{matrix} \right\} = \left\{ \begin{matrix} 0 \\ -I_{S3} \\ I_{S3} \\ 0 \\ 0 \end{matrix} \right\}$	$\left\{ \begin{matrix} 0 \\ -I_{S3} \\ I_{S3} \\ 0 \\ 0 \end{matrix} \right\}$
$n2$	$-G_2$	$G_2 + G_3 + G_4$	0	$-G_3$	0	0	0	0		
$n3$	0	0	$G_5 + G_6$	$-G_5$	0	0	0	-1		
$n4$	0	$-G_3$	$-G_5$	$G_3 + G_5$	0	1	0	1		
$n5$	$-G_1$	0	0	0	G_1	-1	0	0		
$I_{S2}^?$	0	0	0	1	-1	0	0	0	$I_{S2}^?$	U_{S2}
$I_{S1}^?$	1	αG_3	0	$-\alpha G_3$	0	0	0	0	$I_{S1}^?$	0
I_{KS}	0	0	-1	1	0	0	0	0	I_{KS}	0
A_{IKS}									x_{IKS}	b_{IKS}

Bei erneutem Auflösen nach x_{IKS} und Ausrechnen der Gleichung mit Matlab erhält man für x_{IKS} (vgl. Kapitel 5.2, Z. 17-19):

$$x_{IKS} = \begin{Bmatrix} U_{n1} \\ U_{n2} \\ U_{n3} \\ U_{n4} \\ U_{n5} \\ I_{S2}^? \\ I_{S1}^? \\ I_{KS} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 5,7143 \text{ V} \\ 1,7764 \cdot 10^{-15} \text{ V} \\ 21,4286 \text{ V} \\ 21,4286 \text{ V} \\ 1,4286 \text{ V} \\ -0,8571 \text{ A} \\ 1,4286 \text{ A} \\ -0,5714 \text{ A} \end{Bmatrix}$$

Der Kurzschlussstrom I_{KS} entspricht somit 571,4 mA.

3.3 R_{Th} mithilfe von U_{Th} und I_{KS}

Der Innenwiderstand R_{Th} der Thevenin-Quelle entspricht dank der Quellenäquivalenz von Norton- und Thevenin-Quelle dem Quotienten aus U_{Th} und I_{KS} . Somit ergibt sich (vgl. Kapitel 5.2, Z. 22-24):

$$R_{Th} = R_N = \frac{U_{Th}}{I_{KS}} = \frac{-2,2807 \text{ V}}{-0,5714 \text{ A}} = 3,9912 \Omega$$

3.4 R_{Th} mithilfe von Testspannung U_T

Um den Innenwiderstand der Thevenin-Quelle zu erhalten, werden zuerst alle unabhängigen Quellen im Netzwerk durch deren idealen Innenwiderstand ersetzt. Zusätzlich wird an den Klemmen a und b eine frei wählbare Testspannung U_T angelegt (vgl. Abb. 7). Daraus ergibt sich ein unbekannter Teststrom $I_T^?$, der vom Knoten n_4 in den Knoten n_3 fließt. Das Gleichungssystem aus Kapitel 2.4 muss somit um eine weitere Gleichung ergänzt werden

$$U_T = U_{R5} = U_{n4} - U_{n3}$$

und man erhält folgende Matrixgleichung:

$$\underbrace{\begin{array}{c} n1 \quad n2 \quad n3 \quad n4 \quad n5 \quad I_{S2}^? \quad I_{S1}^? \quad I_T^? \\ \begin{array}{l} n1 \\ n2 \\ n3 \\ n4 \\ n5 \\ I_{S2}^? \\ I_{S1}^? \\ I_T^? \end{array} \end{array}}_{A_T} \begin{bmatrix} G_1 + G_2 & -G_2 & 0 & 0 & -G_1 & 0 & -1 & 0 \\ -G_2 & G_2 + G_3 + G_4 & 0 & -G_3 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & G_5 + G_6 & -G_5 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & -G_3 & -G_5 & G_3 + G_5 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ -G_1 & 0 & 0 & 0 & G_1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & \alpha G_3 & 0 & -\alpha G_3 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \underbrace{\begin{pmatrix} U_{n1} \\ U_{n2} \\ U_{n3} \\ U_{n4} \\ U_{n5} \\ I_{S2}^? \\ I_{S1}^? \\ I_T^? \end{pmatrix}}_{x_T} = \underbrace{\begin{pmatrix} 0 \\ -I_{S3} = 0 \\ I_{S3} = 0 \\ 0 \\ 0 \\ U_{S2} = 0 \\ 0 \\ U_T \end{pmatrix}}_{b_T}$$

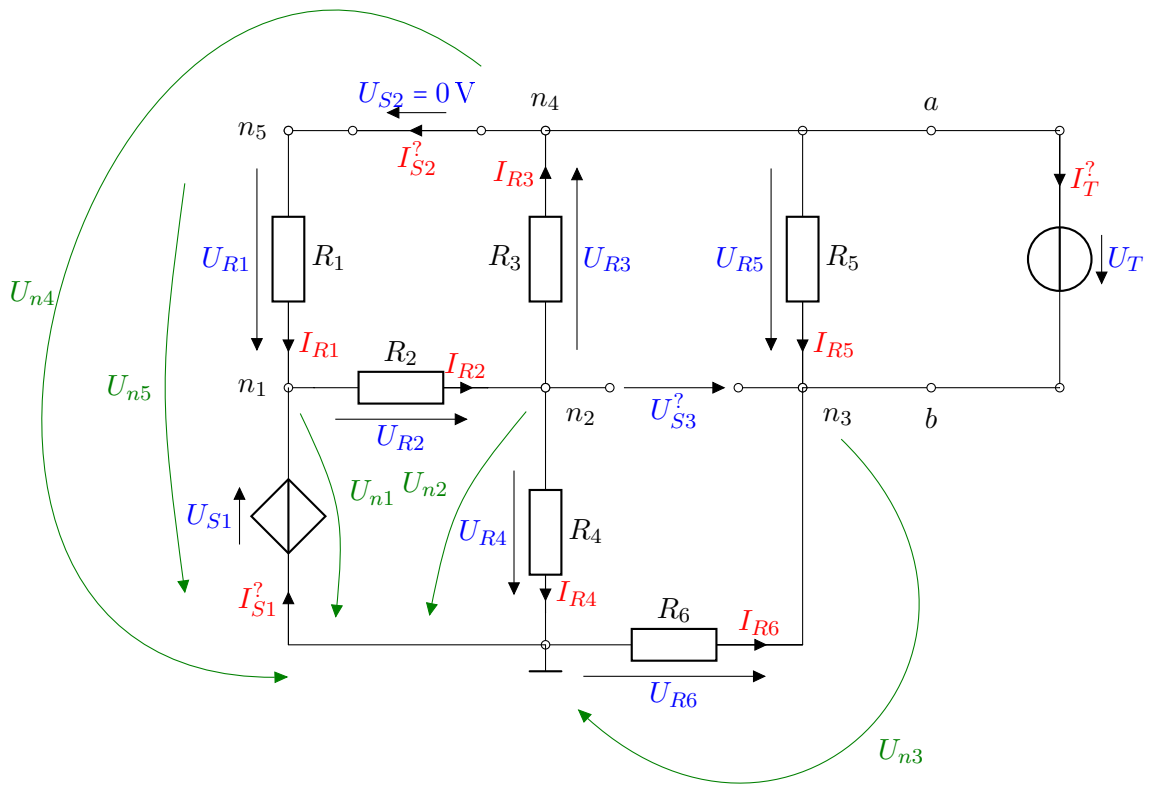


Abb. 7: Netzwerk mit idealen Innenwiderständen der unabhängigen Quellen und der Testspannung U_T

Legt man nun die Testspannung U_T willkürlich auf 1 V fest, so kann man das Gleichungssystem nach dem x-Vektor auflösen und erhält mithilfe Matlabs den Wert des Stromes $I_T^?$ (vgl. Kapitel 5.2, Z. 27-29).

$$I_T^? = -0,2505 \text{ A}$$

Die Situation kann wie in Abbildung 8 dargestellt werden:

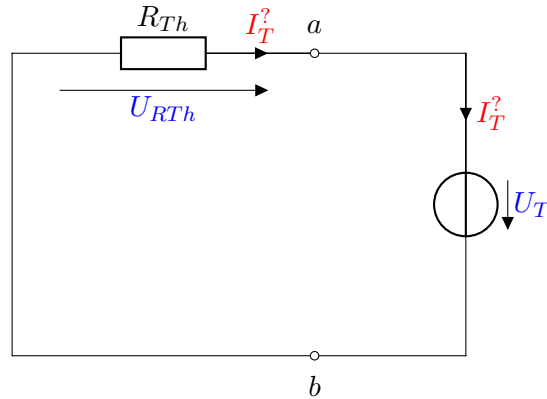


Abb. 8: Testspannung am Innenwiderstand der Thevenin-Quelle

Es lässt sich also folgende Maschengleichung bestimmen:

$$U_{RTh} = -U_T = -1 \text{ V}$$

und letztlich der Widerstand R_{Th} mithilfe des ohm'schen Gesetzes (vgl. Kapitel 5.2, Z. 32-34):

$$R_{Th} = \frac{U_{RTh}}{I_T^?} = \frac{-1 \text{ V}}{-0,2505 \text{ A}} = 3,9912 \Omega$$

Dieser Wert deckt sich mit dem ausgerechneten Wert für R_{Th} aus Kapitel 3.3.

4 Simulation in PSpice

4.1 Originalschaltung

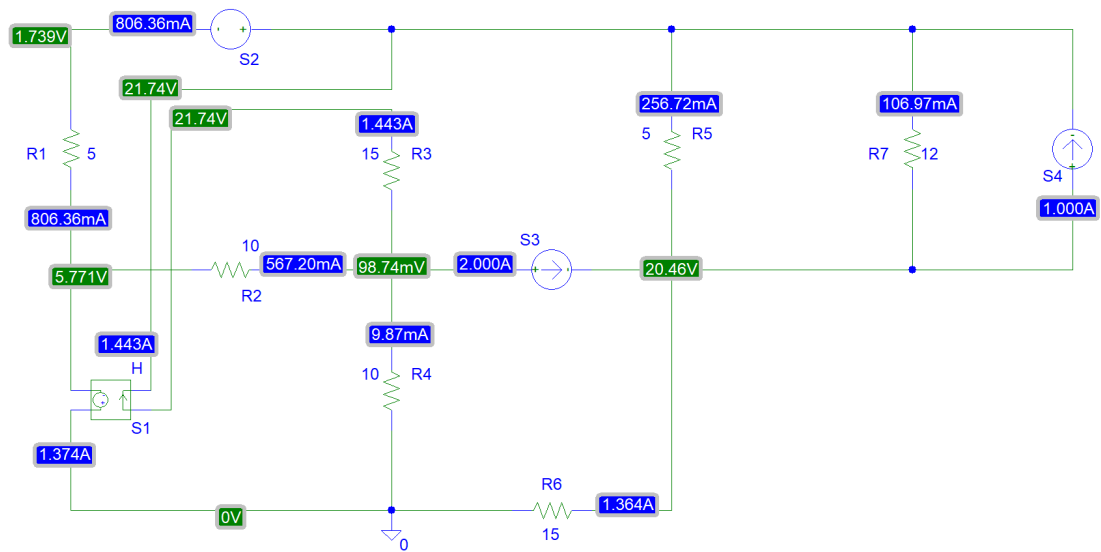


Abb. 9: PSpice-Simulation der Originalschaltung (vgl. Abb. 1)

4.2 Thevenin-Quelle

Bei der Simulation mit der Thevenin-Quelle wird das Netzwerk links von den Klemmen a und b durch eine ideale Spannungsquelle mit der Spannung U_{Th} und einem in Serie geschaltetem Innenwiderstand R_{Th} ersetzt. Die Werte hierfür wurden in Kapitel 3 berechnet. Der Schaltplan aus Abbildung 10 liegt der Simulation zugrunde.

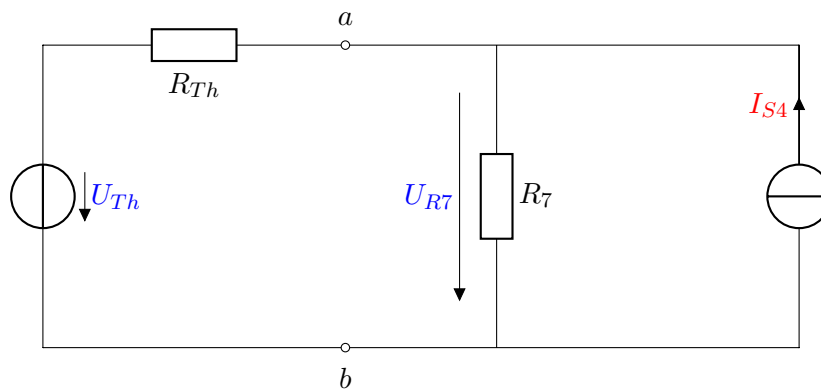


Abb. 10: Ersatzschaltung mit Thevenin-Quelle

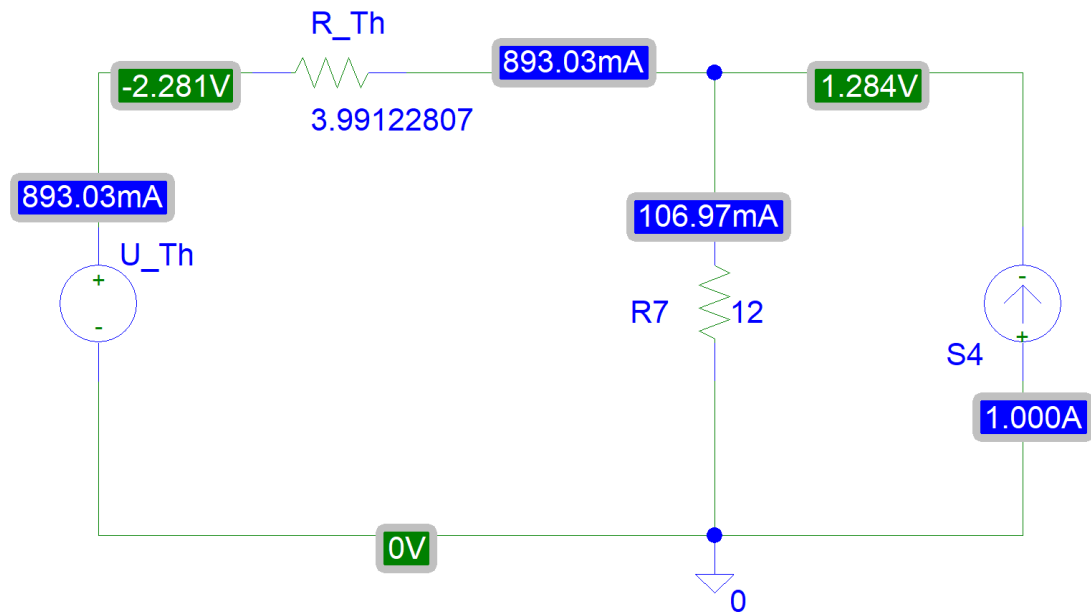


Abb. 11: PSpice-Simulation der Thevenin-Ersatzschaltung (vgl. Abb. 1)

4.3 Vergleich der beiden Simulationen

Die Ströme I_{R7} und I_{S4} sind in beiden Simulationen identisch. Bei der Originalschaltung ist an der Klemme a ein Potential von 21,74 V zu verzeichnen, an der Klemme b 20,46 V (vgl. Abb. 9). Dieser Potentialunterschied von $21,74 \text{ V} - 20,46 \text{ V} = 1,28 \text{ V}$ entspricht dem Potentialunterschied von 1,284 V zwischen a und b bei der Thevenin-Simulation (vgl. Abb. 11). Der Unterschied von 0,004 V ist auf die Darstellungsungenauigkeit der Zahlen in der Abbildung zurückzuführen. Somit können aus Sicht des an den Klemmen angeschlossenen Netzwerkes die beiden Simulationen als identisch betrachtet werden.

5 Matlab-Simulation

5.1 Skript

```
1  clc
2  Ohm = char(hex2dec('03A9'));
3
4  %% Variablendefinition der bekannten Werte
5
6  r1 = 5;
7  r2 = 10;
8  r3 = 15;
9  r4 = 10;
10 r5 = 5;
11 r6 = 15;
12
13 Us2 = 20;
14 Is3 = 2;
15 a = 4;
16
17 g1 = 1/r1;
18 g2 = 1/r2;
19 g3 = 1/r3;
20 g4 = 1/r4;
21 g5 = 1/r5;
22 g6 = 1/r6;
23
24 %% Definition der Systemmatrix in der Form A * x = b
25
26 A = [g1+g2, -g2, 0, 0, -g1, 0, -1;
27      -g2, g2+g3+g4, 0, -g3, 0, 0, 0;
28      0, 0, g5+g6, -g5, 0, 0, 0;
29      0, -g3, -g5, g3+g5, 0, 1, 0;
30      -g1, 0, 0, 0, g1, -1, 0;
31      0, 0, 0, 1, -1, 0, 0;
32      1, (a*g3), 0, -(a*g3), 0, 0, 0];
33
34 b = [0; -Is3; Is3; 0; 0; Us2; 0];
35
36 %% Lsen der Systemgleichung
37 x_temp = A^(-1)*b;
38
39 x = sprintf('%0.4fV\n%.4fV\n%.4fV\n%.4fV\n%.4fV\n%.4fA\n%.4fA', x_temp(1),
40             x_temp(2), x_temp(3), x_temp(4), x_temp(5), x_temp(6), x_temp(7))
41
42 %% Berechnung von U_Th
43 U_Th_temp = x_temp(4)-x_temp(3);
44
45 U_Th = sprintf('%0.4fV', U_Th_temp)
46
47
48 %% Berechnung von R_Th ber den Kurzschlussstrom IKS: A_IKS * x_IKS = b_IKS
49
50 A_IKS = [g1+g2, -g2, 0, 0, -g1, 0, -1, 0;
51          -g2, g2+g3+g4, 0, -g3, 0, 0, 0, 0;
52          0, 0, g5+g6, -g5, 0, 0, 0, -1;
53          0, -g3, -g5, g3+g5, 0, 1, 0, 1;
54          -g1, 0, 0, 0, g1, -1, 0, 0;
55          0, 0, 0, 1, -1, 0, 0, 0;
56          1, (a*g3), 0, -(a*g3), 0, 0, 0, 0;
```

```

57     0, 0, -1, 1, 0, 0 , 0, 0;];
58
59 b_IKS = [0; -Is3; Is3; 0; 0; 0; Us2; 0; 0];
60
61 %% Lsen der Systemgleichung
62 x_IKS = A_IKS^(-1)*b_IKS;
63
64 I_KS = sprintf('%.4f A',x_IKS(8))
65
66 %% R_Th mithilfe von U_Th und I_KS
67
68 R_Th_temp = U_Th_temp/x_IKS(8);
69
70 R_Th = sprintf('%.4f %s',R_Th_temp, Ohm)
71
72
73
74 %% Berechnung von R_Th ber die Testspannung U_T: A_T * x_T = b_T
75
76 U_T = 1;
77
78 A_T = [g1+g2, -g2, 0, 0, -g1, 0, -1, 0;
79        -g2, g2+g3+g4, 0, -g3, 0, 0, 0, 0;
80        0, 0, g5+g6, -g5, 0, 0, 0, -1;
81        0, -g3, -g5, g3+g5, 0, 1, 0, 1;
82        -g1, 0, 0, 0, g1, -1, 0, 0;
83        0, 0, 0, 1, -1, 0, 0, 0;
84        1, (a*g3), 0, -(a*g3), 0, 0, 0, 0;
85        0, 0, -1, 1, 0, 0 , 0, 0;];
86
87 b_T = [0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; U_T];
88
89 %% Lsen der Systemgleichung und auslesen des Teststroms I_T?
90 x_T_temp = A_T^(-1)*b_T;
91
92 I_T = sprintf('%.4f A',x_T_temp(8))
93
94 %% R_Th mithilfe von U_T und I_T
95
96 R_Th_temp2 = -(U_T)/x_T_temp(8);
97
98 R_Th = sprintf('%.4f %s',R_Th_temp2, Ohm)

```

5.2 Konsolenoutput

```

1  x =
2
3      '5.6140 V
4      0.0000 -0.1754 V
5      0.0000 23.1579 V
6      0.0000 20.8772 V
7      0.0000 0.8772 V
8      0.0000 -0.9474 A
9      0.0000 1.5263 A'
10
11
12  U_Th =
13
14      '-2.2807 V'
15

```

```
16
17 I_KS =
18
19     ' - 0.5714_μA '
20
21
22 R_Th =
23
24     ' 3.9912_Ω '
25
26
27 I_T =
28
29     ' - 0.2505_μA '
30
31
32 R_Th =
33
34     ' 3.9912_Ω '
```