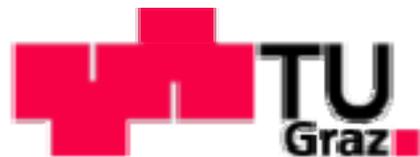


Christian Taudes

Demonstrationsexperimente zur Elektronik

Diplomarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades eines
Magisters
an der Naturwissenschaftlichen Fakultät der
Karl – Franzens – Universität Graz



Ao. Univ. – Prof. Dipl. Ing. Dr. techn. Gernot Pottlacher
Technische Universität Graz
Institut für Experimentalphysik

Mai 2006

Vorwort

Physikalische Experimente standen schon in der Schulzeit im Mittelpunkt meines Interesses. Es war daher gewissermaßen abzusehen, dass ich an der Universität das Fach Physik inskribierte. Mein Interesse am Experimentieren wurde hier verstärkt, sei es in den Vorlesungen „Experimentalphysik“, wo viele Demonstrationsversuche gezeigt wurden, oder in den „Laborübungen“ und „Schulversuchen“, wo ich selbst experimentieren konnte.

Es hat mich fasziniert, wie Theorie und Experiment zu einer Einheit verschmolzen, es hat mich fasziniert, eine Formel „zum Leben zu erwecken“ und umgekehrt Phänomene der Natur in eine Gleichung zu bringen.

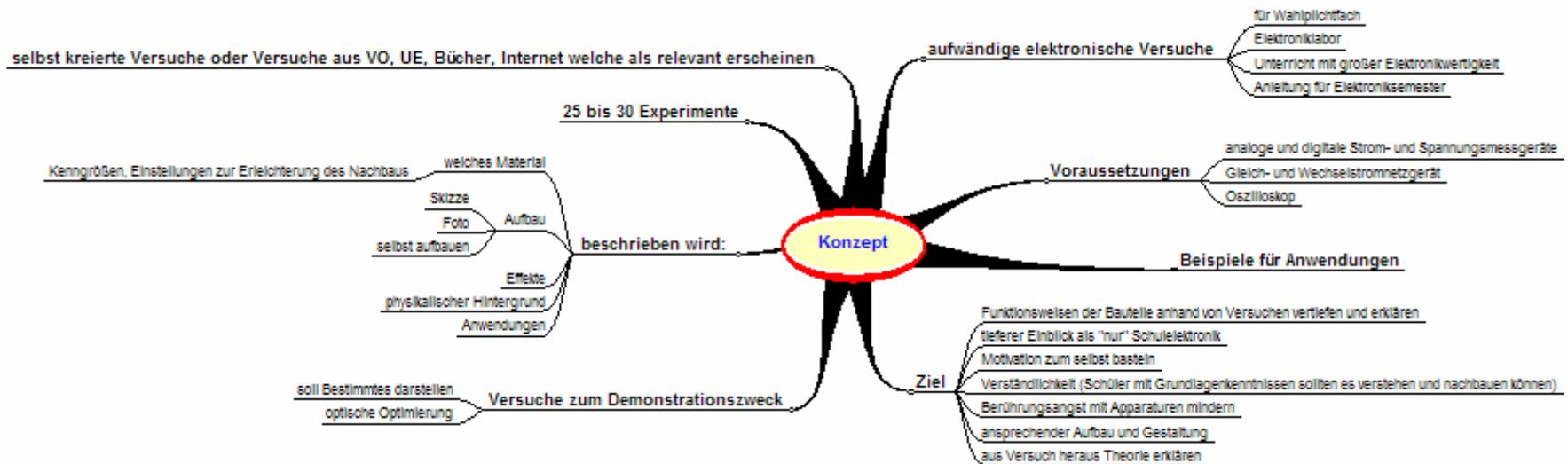
Ich war daher äußerst erfreut, als mir die Möglichkeit geboten wurde, meine Diplomarbeit zum Thema „Experimente“ zu schreiben. Schließlich wählte ich das Fachgebiet Elektronik, da diese in unserem privaten und beruflichen Leben eine wesentliche Rolle spielt. Da die Entwicklung auf diesem Gebiet äußerst rasch voran schreitet, ist es wichtiger denn je, die Grundlagen dieses Fachgebietes zu verstehen.

Die Arbeit sollte deshalb eine kompakte Sammlung von Experimenten beschreiben.

Meine Arbeit ist an jene gerichtet, die Interesse an diesem Fachgebiet bekunden, vor allem aber auch an Lehrerinnen und Lehrer, die sicher den einen oder anderen Beitrag in ihren Unterricht miteinbringen können.

Abschließend möchte ich mich recht herzlich beim Betreuer meiner Diplomarbeit, Herrn Ao. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. Gernot Pottlacher, bedanken, und zwar für die Möglichkeit diese fachdidaktische Arbeit zu verfassen, für die zur Verfügungstellung des Labors und sämtlicher Gerätschaften sowie für die harmonische Zusammenarbeit.

Großer Dank gebührt auch meiner Familie, die mich immer unterstützt hat.



Inhaltsverzeichnis

Fachdidaktik.....	1
<i>Definition eines Experiments.....</i>	<i>1</i>
<i>Warum Experimente im Unterricht?</i>	<i>1</i>
<i>Fachdidaktische Unterteilung von Experimenten.....</i>	<i>2</i>
<i>Voraussetzungen, Aufbau und Anforderungen von Experimenten</i>	<i>3</i>
<i>Forderungen des Lehrplans</i>	<i>4</i>
1. Widerstandsschaltungen.....	5
1.1 <i>Lineare und nichtlineare Widerstände</i>	<i>5</i>
1.2 <i>Kirchhoffsche Maschenregel.....</i>	<i>10</i>
1.3 <i>Kirchhoffsche Knotenregel.....</i>	<i>13</i>
1.4 <i>Innenwiderstand von Elektrizitätsquellen.....</i>	<i>16</i>
1.5 <i>Wheatstonesche Meßbrücke</i>	<i>19</i>
2. Kondensatorschaltungen	21
2.1 <i>Der Kondensator im Gleichstromkreis.....</i>	<i>21</i>
2.2 <i>Der Kondensator im Wechselstromkreis</i>	<i>26</i>
2.3 <i>Parallelschaltung von Kondensatoren</i>	<i>30</i>
2.4 <i>Serienschaltung von Kondensatoren</i>	<i>33</i>
2.5 <i>RC – Glied.....</i>	<i>35</i>
2.6 <i>CR – Glied.....</i>	<i>39</i>
3. Spulenschaltungen.....	42
3.1 <i>Die Spule im Gleichstromkreis.....</i>	<i>42</i>
3.2 <i>Die Spule im Wechselstromkreis</i>	<i>45</i>
3.3 <i>RL – Glied</i>	<i>50</i>
3.4 <i>LR – Glied</i>	<i>54</i>
4. Halbleiter	57
4.1 <i>Polprüfer</i>	<i>57</i>
4.2 <i>Kennlinie einer Diode.....</i>	<i>61</i>
4.3 <i>Einweg Gleichrichterschaltung</i>	<i>63</i>
4.4 <i>Brücken - Zweiweg - Gleichrichterschaltung</i>	<i>66</i>
5. Der Transistor	68
5.1 <i>Der Transistoreffekt.....</i>	<i>68</i>
5.2 <i>Strom- und Spannungsverstärkung.....</i>	<i>71</i>
5.3 <i>Verzögerungsschalter.....</i>	<i>77</i>
5.4 <i>Flip Flop.....</i>	<i>78</i>
5.5 <i>Astabiler Multivibrator.....</i>	<i>80</i>
5.6 <i>Schmitt Trigger.....</i>	<i>83</i>

6. Logikschaltungen	85
6.1 AND – Gatter.....	86
6.2 OR – Gatter	88
6.3 NOT – Gatter.....	90
6.4 NAND – Gatter.....	91
6.5 NOR – Gatter.....	93
7. Literaturverzeichnis.....	95
8. Abbildungsverzeichnis.....	96
9. Index.....	99

Fachdidaktik

Definition eines Experiments

„Ein Experiment (von lateinisch experimentum „Versuch, Beweis, Prüfung, Probe“) im Sinne der Wissenschaft ist ein methodisch angelegter Versuchsaufbau. Es dient der zielgerichteten Untersuchung einer – unter definierten Bedingungen (Rahmenbedingung) reproduzierbar hervorgerufenen – Erscheinung. Man kann sich Experimente als Fragen an die Natur vorstellen.“¹

In der Wissenschaft hat das Experiment die Aufgabe, eine bestimmte Erscheinung oder einen bestimmten Sachverhalt zu untersuchen. Dabei wird auf die Umgebung ein großes Augenmerk gelegt, damit das Experiment unter denselben Umständen wiederholt werden kann. Der Versuch beschreibt die Durchführung eines Experiments. Ein Experiment kann aus mehreren Versuchen bestehen.

In der Wissenschaft besteht die Hauptaufgabe des Experiments darin, Hypothesen zu bestätigen oder zu widerlegen. Jedoch haben Experimente auch eine große didaktische Wirkung. An Schulen und Universitäten verdeutlichen sie Sachverhalte und lehren wissenschaftliches Arbeiten.

Ein Experiment ist eine wissenschaftliche Frage, die den Gefragten, auf welcher Stufe der Ausbildung er sich auch immer befindet, motiviert, sich mit diesem Thema auseinander zu setzen um vielleicht die Antwort zu finden. Diese auffordernde Wirkung kann ausgezeichnet im Physikunterricht untergebracht werden und kann diesen sehr bereichern.

Warum Experimente im Unterricht?

- Vermitteln Inhalte
- Bieten eine direkte Anschauung
- Schüler werden direkt eingebunden – Eigentätigkeit wird gefordert und gefördert
- Schulung der Beobachtungsgabe

Diese Punkte verstärken den Lerneffekt, da der Schüler durch Experimente auf einer anderen Ebene angesprochen wird, als dies durch den Frontalunterricht geschieht.

Der bildende Wert des Experimentierens sei in folgenden Punkten zusammengefasst:

- Es gibt eine strenge, formale Struktur
- Es herrschen fachtypische Arbeitsweisen
- Selbstständige Lösungsfindung wird verlangt
- Es existiert eine reale Forschertituation
- Der Umgang mit realen Objekten wird geschult
- Soziales Verhalten wird verlangt

¹Quelle: www.wikipedia.de

Fachdidaktische Unterteilung von Experimenten

Einführendes Experiment

- Gibt eine Einführung in ein neues Themengebiet
- Macht auf ein bestimmtes Phänomen aufmerksam
- Hat große motivierende Wirkung

Entdeckendes Experiment

Dieser Typ unterteilt sich in vier Teile.

1. Die erste Phase ist die der Problemstellung. Hier sollte eine Problemfindung stattfinden.
2. Danach folgt die Planung des Experiments. Dabei werden Ableitungen von überprüfbareren Folgerungen der Hypothese gemacht. Auch wird ein Plan ausgearbeitet, wie das Experiment ablaufen sollte.
3. Im nächsten Schritt passiert die Durchführung. Hier spielen das Bereitstellen von Material, der Versuchsaufbau, die Durchführung des Versuchs und das Protokollieren eine große Rolle.
4. Zuletzt wird ausgewertet. Dabei wird ein Ergebnis hergeleitet und gedeutet. Dann wird das Ergebnis mit den Folgerungen aus der Hypothese verglichen, worauf diese bestätigt oder widerlegt wird.

Bestätigendes Experiment

Dabei wird ein allgemeingültiger Sachverhalt auf einen Einzelfall angewendet, um diesen zu bestätigen.

Schülerexperiment

- Üben manueller Geschicklichkeit
- Erlernen von Arbeitstechniken
- Erzieherische Bedeutung: Selbsteinschätzung, Zielstrebigkeit, soziales Verhalten

Demonstrationsexperiment

- Interesse wecken
- Stoffkenntnisse vermitteln
- Beobachtungsgabe schulen

Freihandexperiment

- Verwendung von Gegenständen aus dem täglichen Leben
- Geringe Vorbereitungszeit
- Verwendung von wenigen und günstigen Teilen

Voraussetzungen, Aufbau und Anforderungen von Experimenten

Hier soll angeführt werden, was für ein gelungenes Experiment nötig ist.

Ein Experiment muss:

- Der Alterstufe der Schüler angemessen sein
- Auf vorhandene Vorkenntnisse aufbauen
- In den zeitlichen Rahmen des Unterrichts passen
- Einen deutlich erkennbaren Effekt zeigen
- Eine sehr hohe Wahrscheinlichkeit des Gelingens aufweisen
- Den Sicherheitsrichtlinien entsprechen
- Mit der vorhandenen Ausrüstung durchführbar sein

Weitere Grundregeln für das Experimentieren sind:

- Kontrollproben durchführen
- Verwendung von großen Einzelteilen und Beschriftungen
- Tafel- oder Folienskizzen vom Aufbau
- Eventuelle Änderung der Sitzordnung
- Bewusstmachen des Ablaufes und der Hauptschritte
- Bei einem Fehlversuch: Erklärung, warum es nicht funktioniert (anschließend Verbesserung und Neudurchführung, falls die Hinderungsgründe aus dem Weg geräumt werden können)
- Erstellung eines Protokolls
- Ein Experiment sollte im Unterricht keine Belohnung oder Bestrafung darstellen

Forderungen des Lehrplans

Der Lehrplan der AHS - Oberstufe teilt sich in den allgemeinen Teil des Lehrplans und in die Lehrpläne der einzelnen Unterrichtsgegenstände.

Im allgemeinen Teil ist für den Bildungsbereich Natur und Technik folgendes gefordert:

„Die Natur als Grundlage des menschlichen Lebens tritt in vielfältiger, auch technisch veränderter Gestalt in Erscheinung. Die Kenntnisse über die Wirkungszusammenhänge der Natur sind als Voraussetzung für einen bewussten Umgang und die Nutzung mit Hilfe der modernen Technik darzustellen.

Verständnis für Phänomene, Fragen und Problemstellungen aus den Bereichen Mathematik, Naturwissenschaft und Technik bilden die Grundlage für die Orientierung in der modernen, von Technologien geprägten Gesellschaft.

Der Unterricht hat daher grundlegendes Wissen, Entscheidungsfähigkeit und Handlungskompetenz zu vermitteln. Die Schülerinnen und Schüler sind zu befähigen, sich mit Wertvorstellungen und ethischen Fragen im Zusammenhang mit Natur und Technik sowie Mensch und Umwelt auseinander zu setzen. Als für die Analyse und Lösung von Problemen wesentliche Voraussetzungen sind Formalisierung, Modellbildung, Abstraktions- und Raumvorstellungsvermögen zu vermitteln.“¹

Im Lehrplan für Physik findet man unter anderem unter Bildungs- und Lehraufgaben, welche Fähigkeiten Schüler entwickeln sollten und mit welchen Methoden vorgegangen werden sollte:

„Fähigkeit, Problemlösungsstrategien einzeln und im Team entwickeln zu können.

...

Fähigkeit, eigenständig arbeiten zu können.

...

Fähigkeit, einfache Experimente zu planen und durchführen zu können.

...

Fähigkeit, Hypothesen zu entwickeln, einzuschätzen und diskutieren zu können.“²

Bei der Methodenwahl ist unter anderem folgende Leitlinie zu berücksichtigen:

„Empirisch arbeiten und erfahrungsgeleitet lernen: Das Zusammenspiel von Beobachtung, Hypothesenbildung und überprüfendem Experimentieren sowie die Formulierung allgemeiner Gesetzmäßigkeiten als physikalische Methode hat in allen Formen des Unterrichts deutlich zu werden.“²

¹ Quelle: http://www.bmbwk.gv.at/medienpool/11668/lp_ahs_neu_allg.pdf

² Quelle: http://www.bmbwk.gv.at/medienpool/11862/lp_neu_ahs_10.pdf

1. Widerstandsschaltungen

Der Begriff „Widerstand“ hat in der Elektronik eine zweifache Bedeutung. Einmal wird damit die Eigenschaft eines elektrischen Leiters bezeichnet, sich dem elektrischen Stromfluss zu widersetzen, und zum anderen versteht man unter einem Widerstand ein Bauelement mit gewünschtem Widerstandsverhalten.

1.1 Lineare und nichtlineare Widerstände

Material und Schaltplan

- Widerstände
 - 1 x 10 Ω
 - 1 x 65 Ω
 - 1 x 100 Ω
 - 1 x 500 Ω
 - Diode
 - Steckplatte
- 1 x (200 mA, 250 V)
55 mm x 35 mm

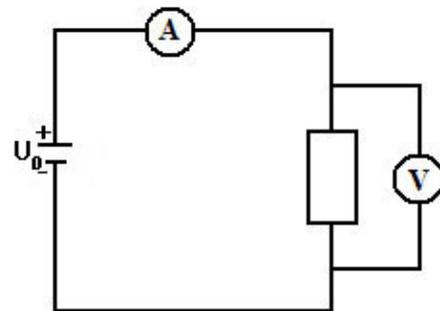


Abb.1.1: Schaltplan zu linearen und nichtlinearen Widerständen

Aufbau

Es soll ein einfacher Stromkreis aus einer Spannungsquelle U_0 (Gleichspannungsnetzgerät) und einem Widerstand R gebaut werden. Mit einem Spannungsmessgerät ist die Spannung, die am Widerstand abfällt, zu messen und mit dem Strommessgerät der Strom, der durch den Widerstand fließt. Das Experiment wird mit unterschiedlichen Widerständen und einer Diode durchgeführt.

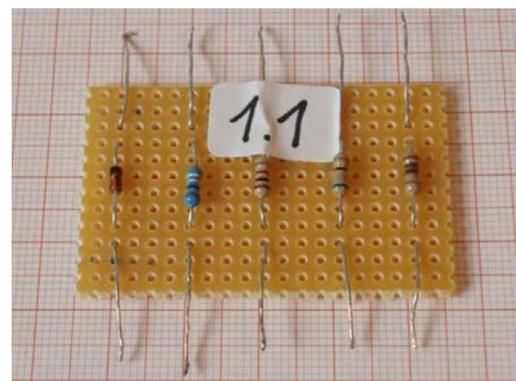


Abb.1.2: Schaltung zu linearen und nichtlinearen Widerständen

Beobachtung

Folgende Spannungs- und Stromwerte werden abgelesen:

	10 Ω Widerstand		65 Ω Widerstand		100 Ω Widerstand		500 Ω Widerstand	
U_0 [V]	U [V]	I [mA]	U [V]	I [mA]	U [V]	I [mA]	U [V]	I [mA]
0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0,85	87	0,95	15	0,96	10	0,97	2
3	2,67	254	2,91	44	2,91	30	2,96	6
5	4,58	435	4,73	71	4,89	49	4,94	9,5
7			6,82	104	6,86	69	6,92	13
9			8,83	134	8,86	90	8,91	17

Diode:

U in V	0	0,25	0,5	0,75	1	1,25	1,5	1,75
I in mA	0	0	0	6	74	214	435	580

Physikalischer Hintergrund

Aus der Motivation der Messungen sollen erst die Begriffe Spannung und Stromstärke beschrieben werden.

Die Stromstärke ist eine Basisgröße im Internationalen Einheitensystem und wird in Ampere (A) gemessen. Das Formelzeichen ist I.

Definition der Basiseinheit Ampere:

Ein Ampere ist die Stärke eines elektrischen Stromes, der durch zwei geradlinige parallele Leiter in einem Abstand von einem Meter fließt und der zwischen den Leitern je Meter Länge eine Kraft von $2 \cdot 10^{-7}$ N hervorruft.

Unter der Spannung U zwischen zwei Punkten eines Leiters versteht man das Verhältnis der in diesem Leiterteil umgesetzten Leistung zu dem durch den Leiter fließenden Strom.

SI Einheit der Spannung: $[U] = \frac{W}{A} = 1 \text{ V}$; V ... Volt

Definition der Spannungseinheit Volt:

Das Volt ist die elektrische Spannung zwischen zwei Punkten eines metallischen Leiters, in dem bei einem konstanten Strom von 1 A zwischen den beiden Punkten eine Leistung von 1 W umgesetzt wird.

Zwischen dem + und dem – Pol einer Spannungsquelle herrscht eine Potentialdifferenz. Elektronen zeigen das Bestreben, zum Punkt mit dem positiven Potential (+ Pol) zu wandern. Ermöglicht man diese Wanderung (durch Verbinden mit einem Draht), so fließt ein elektrischer Strom I. Die Elektronen wandern zwar vom Minuspol zum Pluspol, die so genannte „technische Stromrichtung“ wird aber entgegen der Bewegung der Elektronen definiert. Laut dieser Definition fließt ein elektrischer Strom also stets von Plus nach Minus.

Betrachtet man nun die Ergebnisse der Messung, so fällt auf, dass sich die Diode im Stromkreis anders verhält als die zuvor verwendeten Widerstände. Dies soll an Diagrammen veranschaulicht werden:

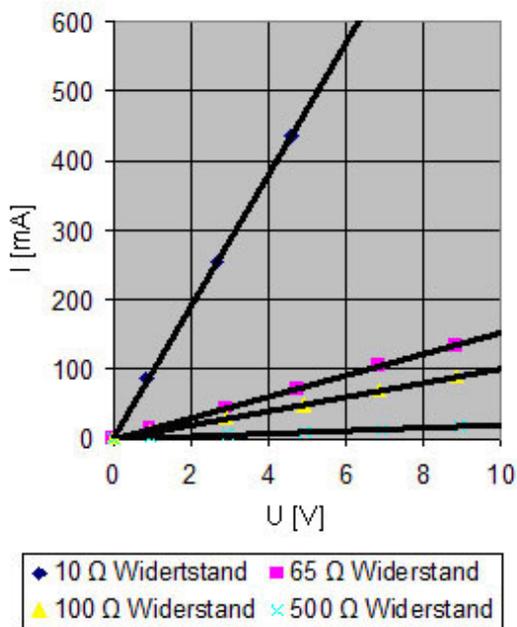


Abb.1.3: I – U Kennlinien der linearen Widerstände

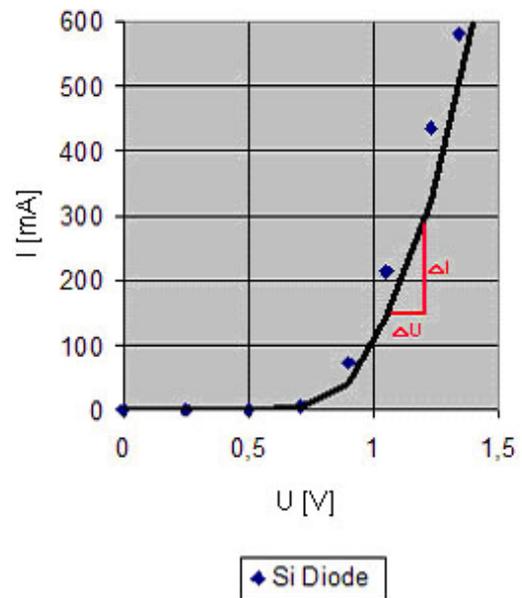


Abb.1.4: I – U Kennlinie eines nichtlinearen Widerstandes

Nach ihrem Verhalten im Stromkreis unterscheidet man lineare- und nichtlineare Widerstände.

Lineare Widerstände sind Widerstände mit einer linearen I – U Kennlinie.

Eine Geradengleichung ist gegeben durch

$$y = k \cdot x + d,$$

wobei k die Steigung und d der Abstand der Gerade im Nullpunkt zwischen Ordinate und Abszisse ist. Umgewandelt auf dieses Problem lautet die Gleichung:

$$I = k \cdot U \text{ oder } k = \frac{I}{U}.$$

Die Steigung der Widerstandsgeraden wird durch das Verhältnis von Strom zu Spannung festgelegt, und dieses entspricht dem Leitwert (G), also

$$G = \frac{I}{U}. \quad (1.1)$$

SI Einheit des Leitwertes: $[G] = \frac{A}{V} = 1 \text{ S}$; S ... Siemens

Bei genauer Beobachtung der gemessenen Daten bemerkt man, dass die Größe des verwendeten Widerstandes genau der reziproke Wert des Leitwertes ist, also

$$R = \frac{1}{G} = \frac{U}{I}. \quad (1.2)$$

Dies sei am 100 Ω Widerstand gezeigt:

U [V]	0	0,96	2,91	4,89	6,86	8,86
I [mA]	0	10	30	49	69	90
$G = \frac{I}{U}$ [S]	-	0,0104	0,0103	0,0100	0,0100	0,0102
$R = \frac{1}{G} = \frac{U}{I}$ [Ω]	-	96	97	99,8	99,42	98,44

Mit anderen Worten: Unter dem Widerstand R versteht man das Verhältnis der Spannung zwischen den Enden eines Leiters zur Stärke des Stromes im Leiter.

SI Einheit des Widerstandes: $[R] = \frac{V}{A} = 1 \Omega$; Ω ... Ohm

Die Beziehung

$$R = \frac{U}{I}, I = \frac{U}{R} \quad \text{oder} \quad U = R \cdot I \quad (1.2)$$

wird Ohmsches Gesetz genannt.

Nichtlineare Widerstände zeichnen sich durch eine nichtlineare I – U Kennlinie aus. Zwischen Strom und Spannung besteht keine Proportionalität. Das Ohmsche Gesetz (1.2) in der üblichen Form kann nicht angewendet werden.

Betrachtet man jedoch ein kleines Stück der Kennlinie (Abb.1.4), so stellt man fest, dass hier annähernd Linearität herrscht. Die Kennlinie verläuft in einem kleinen Bereich fast gerade. Ihr Anstieg ist durch die Differenzen ΔU und ΔI gegeben und damit wird der differentielle Widerstand entwickelt:

$$r = \frac{\Delta U}{\Delta I} \quad (1.3)$$

Mit dem differentiellen Widerstand kann man kleine Änderungen von I und U in dem betrachteten Kennlinienbereich berechnen.

U [V]	0,25	0,5	0,71	0,9	1,05	1,23	1,34
ΔU [V]		0,25	0,21	0,19	0,15	0,18	0,11
I [mA]	0	0	6	74	214	435	580
ΔI [mA]		0	6	68	140	221	145
$r = \frac{\Delta U}{\Delta I}$ [Ω]		∞	35	2,79	1,07	0,81	0,76

Bemerkung

Nichtlineare Widerstände sind besondere Widerstände. Es ist nicht einfach, den Begriff nichtlineare Widerstände abzugrenzen. Es gibt sehr viele Bauteile mit diesem Verhalten, zum Beispiel Halbleiterdioden und Transistoren. Sie werden aber nicht als nichtlineare Widerstände bezeichnet. Die eigentlichen nichtlinearen Widerstände sind zum Beispiel NTC – (Heißeleiter) und PTC – Widerstände (Kaltleiter). Der Widerstandswert von Heißeleitern wird mit ansteigender Temperatur geringer, der von Kaltleitern größer.

Wenn in weiterer Folge in dieser Arbeit die Rede von Widerständen sein wird, so werden ohmsche, also lineare Widerstände gemeint sein.

Weiters werden noch einstellbare Widerstände verwendet werden (Potentiometer). Bei diesen kann die Größe des Widerstandswertes in einem bestimmten Bereich mit

einer Drehachse eingestellt werden. Der Widerstandswert wird mit einem Schleifkontakt abgegriffen, der über eine bestimmte Länge der Widerstandsbahn bewegt wird. Diese Strecke wird Arbeitsbereich genannt.

Die Widerstandsverläufe zwischen dem Kleinst- und dem Größtwert können verschieden sein.

Beim linearen Widerstandsverlauf nimmt der Widerstandswert pro mm Bahnverlängerung immer um den gleichen Betrag zu. Das bedeutet, pro Drehwinkelgrad ergibt sich stets die gleiche Widerstandszunahme.

Beim positiv logarithmischen Verlauf nimmt der Widerstandsverlauf pro mm Bahnverlängerung zunächst sehr langsam zu, steigt gegen Ende des Arbeitsbereiches aber stark an. Einstellbare Widerstände mit positiv logarithmischem Widerstandsverlauf werden meist für die Lautstärkeneinstellung bei Rundfunk- und Fernsehgeräten verwendet, da die Empfindlichkeit unseres Ohres einen ähnlichen Verlauf hat. Pro Drehwinkelgrad ergibt sich somit eine gleichmäßige Lautstärkenzunahme.

Beim negativ logarithmischen Verlauf nimmt der Widerstand zunächst schnell zu und gegen Ende des Arbeitsbereiches abzuflachen.

Die Widerstandswerte von Festwiderständen werden durch den internationalen Farbcode angegeben. Die Farben der Ringe geben den Widerstandswert und die Toleranz an. Den letzten Ring erkennt man dadurch, dass dieser entweder Farben hat, den der erste Ring nicht haben kann (schwarz, gold oder silber) oder dadurch, dass der Abstand zwischen dem letzten und vorletzten Ring größer ist als der Abstand zwischen den übrigen Ringen.

Farbe	1. Ring (1. Wert)	2. Ring (2. Wert)	3. Ring Multiplikator	Letzter Ring (Toleranz)
schwarz	-	0	10^0	-
braun	1	1	10^1	$\pm 1\%$
Rot	2	2	10^2	$\pm 2\%$
orange	3	3	10^3	-
Gelb	4	4	10^4	-
Grün	5	5	10^5	$\pm 0,5\%$
Blau	6	6	10^6	-
violett	7	7	-	-
Grau	8	8	-	-
Weiß	9	9	-	-
Gold	-	-	10^{-1}	$\pm 5\%$
silber	-	-	10^{-2}	$\pm 10\%$

Es gibt auch Widerstände, die mit fünf oder sechs Ringen gekennzeichnet sind. Bei fünf Ringen geben die ersten vier den Widerstandswert an, der fünfte die Toleranz. Bei sechs Ringen geben die ersten vier den Widerstandswert an, der fünfte die Toleranz und der sechste den Temperaturkoeffizienten.

Von Bedeutung ist auch die Belastbarkeit eines Widerstandes. Sie gibt an, welche elektrische Leistung der Widerstand dauernd in Wärmeleistung umsetzen kann. Die Größe hängt also von der Fähigkeit des Widerstandes ab, Wärme an die Umgebung abzugeben. Beim Experiment war es dem 10Ω Widerstand bei einer Eingangsspannung von 5 V nicht mehr möglich die Wärme abzugeben, und damit wurde die Belastbarkeit überschritten und der Widerstand zerstört.

1.2 Kirchhoffsche Maschenregel

Material und Schaltplan

- Widerstände 1 x 100 Ω
1 x 150 Ω
- Steckplatte 35 mm x 40 mm

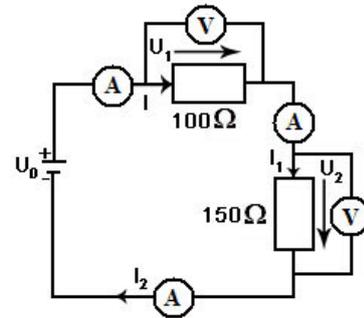


Abb.1.5: Schaltplan zur Kirchhoffschen Maschenregel

Aufbau

Es wird eine Serienschaltung aus den beiden Widerständen hergestellt wobei der Gesamtstrom (I), die Teilströme (I_1 , I_2), die Spannung (U) und die Teilspannungen (U_1 , U_2) zu messen sind.

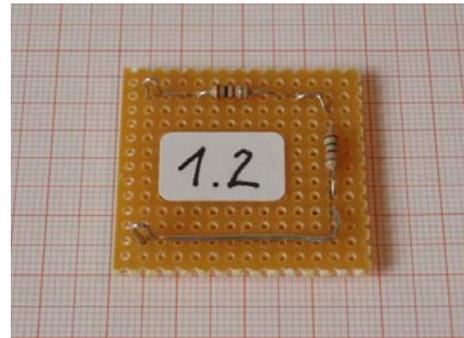


Abb.1.6: Schaltung zur Kirchhoffschen Maschenregel

Beobachtung

U_0 [V]	0	1	2	3	4	5
U_1 [V]	0	0,38	0,76	1,16	1,55	1,93
U_2 [V]	0	0,57	1,14	1,74	2,33	2,9
I [mA]	0	3,8	7,5	11	15	19
I_1 [mA]	0	3,8	7,5	11	15	19
I_2 [mA]	0	3,8	7,5	11	15	19

Bei der Messung des Gesamtwiderstandes der Schaltung mit dem Multimeter wird der Wert 250 Ω angezeigt.

Physikalischer Hintergrund

Es handelt sich hier um einen unverzweigten Stromkreis, das heißt, der Strom ist in der Reihenschaltung an jeder Stelle des Stromkreises gleich groß. Die

Eingangsspannung teilt sich an den in Reihe geschalteten Widerständen in Teilspannungen auf (U_1 und U_2). Eine solche Teilspannung wird Spannungsabfall genannt. Für die Berechnung des Spannungsabfalls bei $U_0 = 4 \text{ V}$ gilt das Ohmsche Gesetz (1.2):

$$U_1 = I \cdot R_1 = 0,015 \text{ A} \cdot 100 \Omega = 1,5 \text{ V}$$

$$U_2 = I \cdot R_2 = 0,015 \text{ A} \cdot 150 \Omega = 2,25 \text{ V}$$

$$U_0 = U_1 + U_2 = 3,75 \text{ V}$$

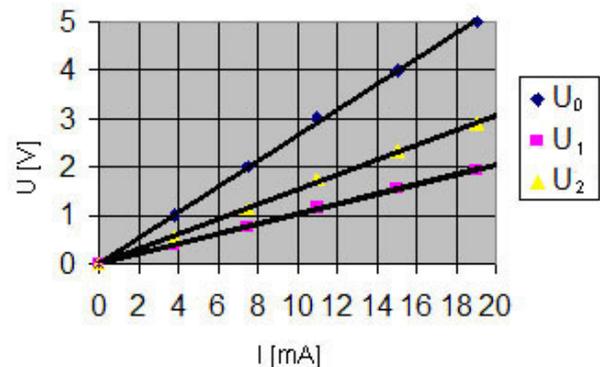


Abb.1.7: Teilspannungen in der Serienschaltung

Fließt durch einen Widerstand Strom, so entsteht an diesem Widerstand ein Spannungsabfall. Die Summe aller Spannungsabfälle (Teilspannungen) ergibt die Spannung der Quelle.

$$U_0 = \sum_{j=1}^2 I_j \cdot R_j$$

Bringt man alle Spannungsabfälle $I_j \cdot R_j$ mit negativem Vorzeichen auf die linke Seite und bezeichnet man sie dann ebenfalls mit U , so lässt sich dieses Verhalten durch $\sum_j U_j = 0$

ausdrücken.

In Worten zusammengefasst ergibt dies die **Maschenregel (2. Kirchhoffsche Gesetz)**:

In einem Teilkreis („Masche“) eines Netzwerks ist die Eingangsspannung gleich der Summe der auftretenden Spannungsabfälle.

Da zwei oder mehrere in Reihe geschaltete Widerstände eine Spannung aufteilen, nennt man eine solche Schaltung auch Spannungsteiler.

Der Gesamtwiderstand ergibt sich aus der Überlegung:

$$U (= I \cdot R_g) = I \cdot R_1 + I \cdot R_2 \Leftrightarrow R_g = R_1 + R_2$$

Allgemein gilt also:

$$R_g = \sum_j R_j \tag{1.4}$$

Bemerkung

Diese Beziehung spielt bei der Erweiterung des Messbereichs eines Spannungsmessgerätes durch Serienschaltung eines Vorwiderstandes eine Rolle. Jedes Messgerät hat einen Innenwiderstand (R_i), der beim Spannungsmessgerät möglichst hoch sein soll um die Spannungsquelle nicht zu sehr zu belasten. Nun habe das Spannungsmessgerät eine maximal messbare Spannung (Endausschlag), zu messen sei die n – fache Spannung:

$$U_{soll} = n \cdot U_i$$

Dem Instrument wird zu diesem Zweck ein Vorwiderstand R_v in Serie geschaltet, an dem die Differenz zwischen der zu messenden Spannung und der Spannung, die maximal am Instrument auftreten darf, abfällt.

$$U_{soll} = I \cdot R_v + I \cdot R_i \quad \text{bzw.}$$

$$n \cdot I \cdot R_i = I \cdot R_v + I \cdot R_i$$

und somit erhält man:

$$R_v = (n - 1) \cdot R_i$$

(1.5)

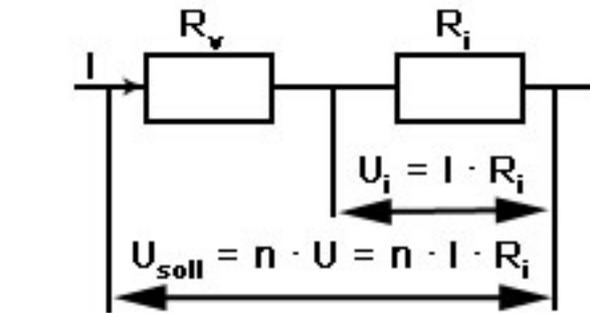


Abb.1.8: Messbereichserweiterung eines Spannungsmessgeräts

So muss zum Beispiel bei einer Spannungsmessbereichserweiterung auf $U_{soll} = 10 \cdot U_i$ der Vorschaltwiderstand $R_v = 9 \cdot R_i$ betragen.

1.3 Kirchhoffsche Knotenregel

Material und Schaltplan

- Widerstände 1 x 100 Ω
 1 x 150 Ω
- Steckplatte 35 mm x 40 mm

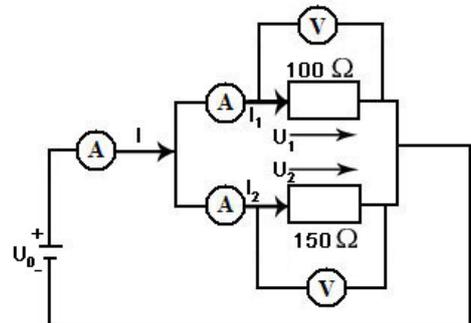


Abb.1.9: Schaltplan zur Kirchhoffschen Knotenregel

Aufbau

Es wird eine Parallelschaltung aus den beiden Widerständen hergestellt und der Gesamtstrom (I), die Teilströme (I_1, I_2), die Spannung (U) und die Teilspannungen (U_1, U_2) sind zu messen .

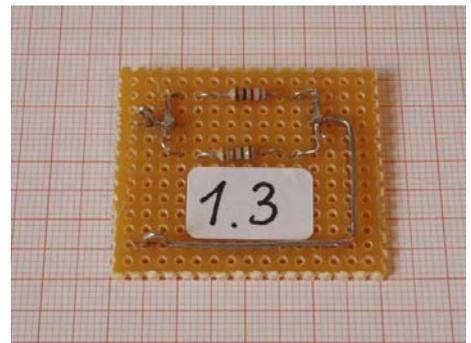


Abb.1.10: Schaltung zur Kirchhoffschen Knotenregel

Beobachtung

U_0 [V]	0	1	2	3	4	5
U_1 [V]	0	0,92	1,87	2,82	3,84	4,82
U_2 [V]	0	0,94	1,89	2,85	3,86	4,84
I [mA]	0	15	31	46	64	80
I_1 [mA]	0	10	19	28	43	50
I_2 [mA]	0	5	12	17,5	20	28

Bei der Messung des Gesamtwiderstandes der Schaltung mit dem Multimeter wird der Wert 60 Ω angezeigt.

Physikalischer Hintergrund

Werden zwei Widerstände parallel geschaltet, so liegen beide an derselben Spannung $U_0 = U_1 = U_2$. Hier herrscht eine geringe Abweichung, da der Innenwiderstand der Elektrizitätsquelle mit den Widerständen in Serie geschaltet ist

und damit wird die Spannung am größeren Widerstand etwas stärker als die beim kleineren. Jeder Widerstand wird von einem Strom durchflossen, der sich nach dem Ohmschen Gesetz (1.2) aus der Größe der Betriebsspannung und der Größe des Widerstands errechnet. Der Gesamtstrom I_g in der Parallelschaltung bei $U_0 = 4 \text{ V}$ ist gleich der Summe der Teilströme:

$$I_1 = \frac{U}{R_1} = \frac{4 \text{ V}}{100 \Omega} = 40 \text{ mA}$$

$$I_2 = \frac{U}{R_2} = \frac{4 \text{ V}}{150 \Omega} = 26,7 \text{ mA}$$

$$I_g = I_1 + I_2 = 66,7 \text{ mA}$$

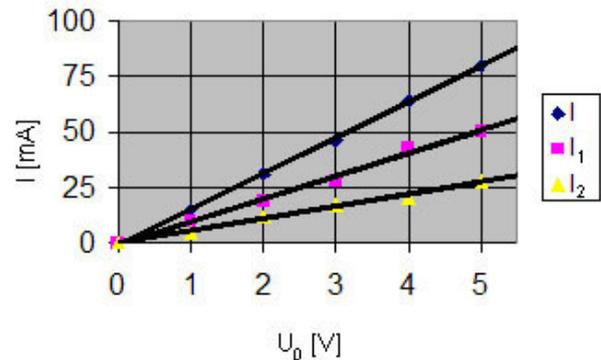


Abb.1.11: Ströme in der Parallelschaltung

Je mehr Widerstände nebeneinander geschaltet werden, desto größer wird der Gesamtstrom. Oder umgekehrt: Je größer der Gesamtstrom wird, desto kleiner wird der Gesamtwiderstand.

Die Summe aller Teilströme ergibt den Gesamtstrom:

$$I_g = \sum_{j=1}^2 \frac{U_j}{R_j}$$

Werden die zufließenden Ströme positiv und die abfließenden negativ gezählt, so ist die Summe aller Ströme Null:

$$\sum_j I_j = 0$$

In Worten zusammengefasst ergibt dies die **Knotenregel (1. Kirchhoffsches Gesetz)**:

In einem Stromverzweigungspunkt ist die Summe der zufließenden Ströme gleich der Summe der abfließenden.

Der Gesamtwiderstand ergibt sich aus der Überlegung:

$$I (= \frac{U}{R_g}) = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} \Leftrightarrow \frac{1}{R_g} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \Leftrightarrow R_g = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

$$\text{Allgemein gilt also: } \frac{1}{R_g} = \sum_j \frac{1}{R_j} \quad (1.6)$$

Bemerkung

Diese Beziehung spielt beispielsweise eine Rolle bei der Erweiterung des Messbereichs eines Strommessgerätes durch Parallelschaltung eines Nebenschlusswiderstandes (R_N). Das Strommessgerät hat einen Innenwiderstand (R_i), der möglichst klein sein soll. Nun habe das Strommessgerät einen bestimmten Endausschlag (gegeben durch R_i), zu messen sei der n -fache Strom:

$$I_{\text{soll}} = n \cdot I_i$$

Dem Instrument wird zu diesem Zweck ein niedriger Widerstand parallel geschaltet, so dass nur ein Teil des zu messenden Stromes I_{soll} durch das Instrument fließt.

$$I_{\text{soll}} (= I_i + I_N) = n \cdot I_i \quad \Rightarrow \quad I_N = (n - 1) \cdot I_i$$

$$\text{bzw.} \quad \frac{U}{R_N} = \frac{1}{n-1} \cdot R_i$$

und somit erhält man:

$$R_N = \frac{1}{n-1} \cdot R_i \quad (1.7)$$

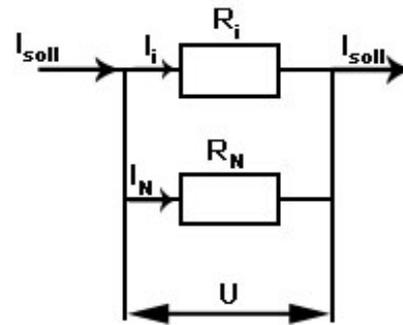


Abb.1.12: Messbereichserweiterung beim Strommessgerät

So muss zum Beispiel bei einer Strommessbereichserweiterung auf $I_{\text{soll}} = 10 \cdot I_i$ der Nebenschlusswiderstand $R_N = \frac{1}{9} \cdot R_i$ betragen, damit dort neun Teile des Gesamtstroms fließen können.

1.4 Innenwiderstand von Elektrizitätsquellen

Material und Schaltplan

- Potentiometer 1 x 1 k Ω linear
- Batterie 1 x (4,5 V)

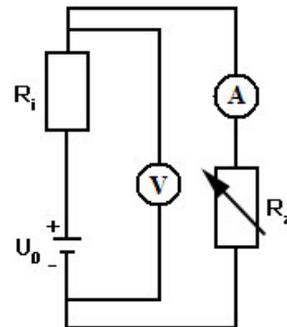


Abb.1.13: Schaltplan zum Innenwiderstand von Elektrizitätsquellen

Aufbau

U_0 Eingangsspannung

U_K Klemmspannung

R_i innerer Widerstand

R_a Außenwiderstand („Lastwiderstand“)

Mit dem Potentiometer wird der Lastwiderstand variiert und dabei werden U_K und I_K gemessen.



Abb.1.14: Schaltung zum Innenwiderstand von Elektrizitätsquellen

Beobachtung

$$U_0 = 4,55 \text{ V}$$

$$I_K = 4 \text{ A}$$

R_a [Ω]	1000	500	100	65	10
U_K [V]	4,54	4,5	4,39	4,31	3,6
I [mA]	0,5	8,5	46	66	370

Physikalischer Hintergrund

Jede Elektrizitätsquelle hat ladungstrennende Kräfte in sich, die elektrische Ladungen nachliefern, wenn solche entnommen werden, und die damit eine Eigenspannung U_0 aufrecht erhalten. Jede Quelle hat aber auch einen inneren Widerstand R_i , der daran erkennbar ist, dass beim Kurzschließen der Quelle der Strom nicht gegen unendlich ansteigt (auch nicht wenn $R_a = 0$ wäre). Das

Ersatzschaltbild einer Quelle enthält also U_0 mit einem in Serie geschalteten Innenwiderstand R_i . Die Spannung, die an U_0 und R_i anliegt, wird Klemmspannung (U_K) genannt. Wie man an der Messtabelle sieht, ist diese Klemmspannung abhängig vom entnommenen Strom. Die Stromänderung wird durch das Variieren des äußeren Widerstandes erreicht.

Werden die Daten in ein Diagramm eingetragen, so erhält man folgenden Zusammenhang:

Zwischen Klemmspannung und entnommener Stromstärke ergibt sich ein linearer Zusammenhang, da die Summe der an R_i und R_a auftretenden Spannungsabfälle gleich U_0 sein muss:

$$U_0 = I \cdot R_i + I \cdot R_a \quad (\text{Maschenregel})$$

Mit $I \cdot R_a = U_K$ gilt:

$$U_K = U_0 - I \cdot R_i$$

Diese Funktion wird in Abb.1.15 dargestellt.

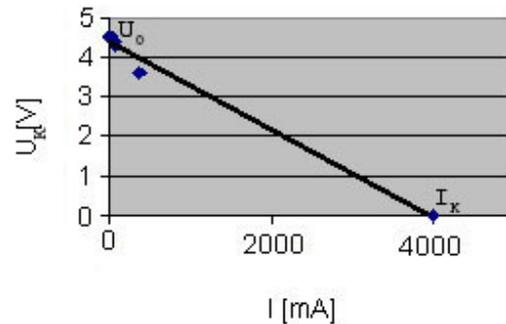


Abb.1.15: U – I Kennlinie zur Bestimmung des Innenwiderstandes

Bei diesem Strom geht R_a gegen Null und nur noch der Innenwiderstand bestimmt die Stromstärke.

Die maximale Klemmspannung (bei $I = 0$) wird auch Leerlaufspannung ($= U_0$) genannt.

Zur Bestimmung des inneren Widerstandes R_i und des Kurzschlussstromes I_K misst man den stromlosen Zustand U_K , wobei dann $U_K = U_0$ gilt. Schaltet man einen bestimmten Widerstand R_a in den Kreis und misst den Strom, dann erhält man R_i

$$\text{nach } R_i = \frac{U_0}{I} - R_a \quad \text{und den Kurzschlussstrom nach } I_K = \frac{U_0}{R_i}.$$

R_i ist nach der Messung der Steigung der U – I Kennlinie 1,14 Ω .

Bemerkung

Die Ergebnisse der Messung zur Innenwiderstandsbestimmung einer Batterie sind kritisch zu betrachten, da die Batterie bei der Kurzschlussstrommessung stark belastet wird und damit sehr schnell an Leistung verliert. Außerdem ist zu beachten, ob eine neue oder eine alte Batterie verwendet wird, da sich der Innenwiderstand bei diesen Fällen anders verhält.

Bei Ladungsquellen kann es sich um Spannungs- oder Stromquellen handeln. Um zu entscheiden, mit welcher Quelle man es zu tun hat, ist abzuklären, wie hoch der Widerstand des Verbrauchers bzw. dessen Ersatzwiderstand gegenüber dem Innenwiderstand der Quelle ist.

- Spannungsquelle:
- Innenwiderstand möglichst gering ($R_i \rightarrow 0$: „ideale Spannungsquelle“)
 - Verbraucherwiderstand ist sehr viel größer als der Innenwiderstand der Quelle \rightarrow Veränderung des Verbraucherwiderstandes verändert die Spannung der Quelle nicht
 - Spannungsquellen dürfen nicht kurzgeschlossen werden

- Stromquelle:
- Innenwiderstand möglichst hoch ($R_i \rightarrow \infty$: „ideale Stromquelle“)
 - Verbraucherwiderstand ist sehr viel kleiner als der Innenwiderstand der Quelle \rightarrow Veränderung des Verbraucherwiderstandes verändert den der Quelle entnommenen Strom nicht
 - Stromquellen dürfen kurzgeschlossen werden

Der Innenwiderstand einer Elektrizitätsquelle spielt eine große Rolle für die entnehmbare Leistung bzw. die optimale Leistungsanpassung eines Lastwiderstandes R_a an eine elektrische Energiequelle.

Die elektrische Leistung ist gegeben durch:

$$P = U \cdot I \quad (1.8)$$

$$P \dots \text{Leistung; } [P] = 1 \text{ VA} = \frac{\text{J}}{\text{s}} = 1 \text{ Watt}$$

Die an einen äußeren Verbraucher abgebbare Leistung ist maximal, wenn $R_a = R_i$ ist. Dies folgt aus der Überlegung:

$$P_a = U \cdot I = R_a \cdot I^2 = R_a \cdot \left(\frac{U_0}{R_i + R_a} \right)^2 = R_a \cdot \frac{U_0^2}{(R_i + R_a)^2} = U_0^2 \cdot \frac{R_a}{(R_i + R_a)^2} \quad \text{hat ein}$$

Maximum dort, wo die erste Ableitung Umkehrfunktion des nicht konstanten Terms (konstanter Term ist U_0^2) ein Minimum hat. Für das Minimum von

$$\frac{(R_i + R_a)^2}{R_a} = \frac{R_i^2}{R_a} + 2 \cdot R_i + R_a \quad \text{muss gelten:}$$

$$f'(R_a) = -\frac{1}{R_a^2} \cdot R_i^2 + 1 \stackrel{!}{=} 0 \Rightarrow R_a = R_i$$

Damit kann die meiste Leistung dann der Quelle entnommen werden, wenn der Innenwiderstand gleich dem Lastwiderstand ist.

1.5 Wheatstonesche Meßbrücke

Material und Schaltplan

- Potentiometer 1 x 1 k Ω linear
- Widerstände $R_1 = 220 \Omega$
 $R_2 = 500 \Omega$
 $R_x = 47 \Omega$
- Steckplatte 50 mm x 60 mm

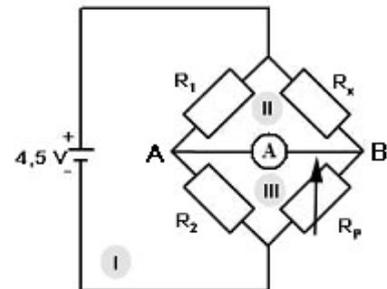


Abb.1.16: Schaltplan zur Wheatstoneschen Meßbrücke

Aufbau

Zwei Spannungsteiler R_1 mit R_2 und R_x mit dem Potentiometer werden parallel geschaltet. Die Verbindungen von R_1 mit R_2 und R_x mit dem Potentiometer werden über die Punkte A und B zusammengebracht. Zwischen diesen Punkten ist ein Strommessgerät angebracht. Dieses sollte den Messzeiger in der Mitte der Skala angebracht haben um negative und positive Ausschläge zu unterscheiden.

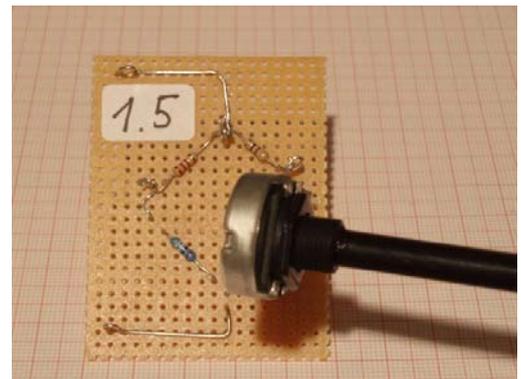


Abb.1.17: Schaltung zur Wheatstoneschen Meßbrücke

Beobachtung

Durch das Drehen am Potentiometer wird dessen Widerstand verändert und damit der Stromfluss zwischen A und B variiert.

I_{AB} [mA]	- 6	- 5	0	5	10	18,6
R_p [Ω]	930	484	109	43	20	0

Physikalischer Hintergrund

Dieses Experiment dient der Bestimmung eines unbekanntes Widerstandes R_x . Folgende Theorie ist nötig um die Wirkungsweise der Schaltung zu verstehen und um R_x berechnen zu können.

Schaltet man zwei Spannungsteiler parallel, so sind die Verhältnisse der Teilspannungen $\frac{U_2}{U_p}$ und $\frac{U_1}{U_x}$ in den beiden Teilern immer dann gleich groß, wenn auch die Widerstandsverhältnisse im linken und im rechten Spannungsteiler gleich

sind. Damit müssen aber nicht die beiden Widerstände, aus denen die Spannungsteiler aufgebaut sind, gleiche Ohmwerte haben. Im Spannungsteiler ist für die Größe der Teilspannungen nur das Verhältnis der Widerstände zueinander maßgeblich.

Die Parallelschaltung zweier Spannungsteiler nennt man Brückenschaltung. Die beiden Spannungsteiler heißen Brückenarme, die Verbindung zwischen den Punkten A und B Brückendiagonale. Besteht im Spannungsteiler $\frac{R_1}{R_2}$ das gleiche

Widerstandsverhältnis wie im Spannungsteiler $\frac{R_x}{R_p}$, so befindet sich die Brücke im

„Gleichgewicht“. Man sagt auch, sie ist auf Null „abgeglichen“, und spricht in diesem Zusammenhang vom „Nullabgleich“. Zwischen den Punkten A und B ist keine Spannung, das dazwischengelegte Strommessgerät zeigt keinen Strom an.

Sobald sich eines der beiden Spannungsteilerverhältnisse ändert, gerät die Brücke aus dem Gleichgewicht. Die beiden Teilspannungen U_2 und U_p sind dann nicht mehr gleich groß und zwischen den Punkten A und B entsteht eine Spannungsdifferenz, durch das dazwischen liegende Strommessgerät fließt ein Ausgleichsstrom, dessen Richtung und Größe sich aus der Art des Ungleichgewichts ergibt.

Die Wheatstonesche Messbrücke ist eine empfindliche Messschaltung, die - wie in diesem Versuch - zum Messen von Widerständen verwendet werden kann. Für den Nullabgleich benötigt man ein Messinstrument mit der Zeigerstellung in der Skalenmitte, weil je nach Art des Brückenungleichgewichts der Strom in die eine oder in die andere Richtung fließen kann. Die Widerstände R_1 und R_2 legen den Messbereich der Brücke fest, weswegen R_1 austauschbar eingebaut wird. Der unbekannte Widerstand ist R_x . Mit dem Potentiometer wird die Schaltung auf Null abgeglichen. Nach dem Abgleich wird der Widerstandswert des Potentiometers gemessen. Im abgeglichenen Zustand ist also $I_A = 0$. Dann ist der Strom I_{12} durch R_1 und R_2 der gleiche wie I_{xp} durch R_x und R_p ($I_{12} = I_{xp}$). Die Schaltung besteht aus einem Knoten und drei Maschen (I, II, III). Die Kirchhoffschen Regeln dafür angewendet, ergibt:

Knotenregel: $I = I_{12} + I_{xp}$

Masche I: $U = I_{12} \cdot R_1 + I_{12} \cdot R_2$

Masche II: $I_{12} \cdot R_1 = I_{xp} \cdot R_x \Rightarrow 0 = -I_{12} \cdot R_1 + I_{xp} \cdot R_x$

Masche III: $I_{12} \cdot R_2 = I_{xp} \cdot R_p \Rightarrow 0 = -I_{12} \cdot R_2 + I_{xp} \cdot R_p$

Beim Ausgleich gilt: $I_{12} = I_{xp}$

Aus den Gleichungen ergibt sich damit nach Kürzen von I_{12} bzw. I_{xp} das Verhältnis:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_x}{R_p} \Rightarrow R_x = R_p \cdot \frac{R_1}{R_2} \quad (1.9)$$

Bei dieser Messung beträgt der errechnete Wert des Widerstandes $R_x = 47,96 \Omega$, was nur um 2% vom wahren Wert abweicht.

Bemerkung

Bei diesem Versuch gehen Schwankungen der Spannungsquelle nicht in das Messergebnis mit ein, weil sie beide Spannungsteiler gleichermaßen betreffen und der Nullabgleich der Brücke nur von der Gleichheit der Spannungsteilerverhältnisse abhängt.

2. Kondensatorschaltungen

Neben den Widerständen sind die Kondensatoren die in der Elektronik am häufigsten gebrauchten Bauteile. Die Hauptanwendungszwecke von Kondensatoren sind Ladungsspeicherung und Glättung „welliger“ Gleichströme.

Der Umgang im Rahmen der in meinen Versuchen aufgeladenen Kondensatoren ist ungefährlich. Größere, für hohe Spannungen zugelassene Kondensatoren werden lebensgefährlich, wenn sie kurz zuvor an Spannungen über 65 V angeschlossen waren. Besondere Vorsicht ist somit beim Demontieren frisch aus dem Betrieb genommener elektrischer Geräte geboten. Die in diesem Gerät befindlichen Kondensatoren sind so zu behandeln, als ob sie geladen wären und somit mit einem hochbelastbaren Widerstand von etwa 100 Ω zu entladen.

2.1 Der Kondensator im Gleichstromkreis

Material und Schaltplan

- Widerstand 1 x 2 k Ω
- Leuchtdiode 2 x
- Schalter 1 x
- Kondensator 1 x 1000 μ F
- Steckplatte 65 mm x 50 mm

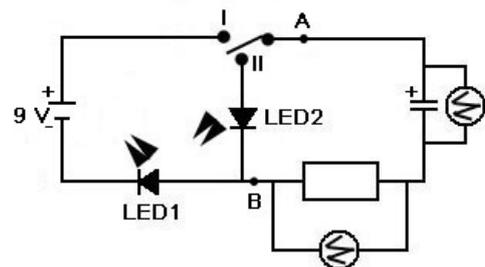


Abb.2.1: Schaltplan zum Kondensator im Gleichstromkreis

Aufbau

Ist der Schalter auf I geschaltet, so ist der Kreis mit dem Kondensator, dem Widerstand und der LED1 geschlossen. Bei der Schalterstellung II ist der Kreis mit dem Kondensator, dem Widerstand und der LED2 geschlossen. Bei der Stellung 0 fließt kein Strom. Mit Chan1 des Oszilloskops wird die Spannung beim Kondensator gemessen und mit Chan2 der Spannungsabfall am Widerstand, womit dann der Stromverlauf am Kondensator und Widerstand berechnet werden kann. Bei der Aufnahme der Lade- und Entladekurve wird der + Pol der Spannungsquelle an A und der – Pol an B

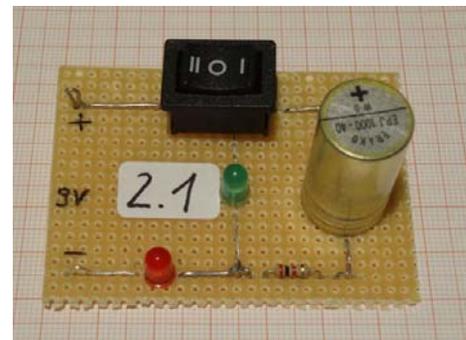


Abb.2.2: Schaltung zum Kondensator im Gleichstromkreis

angeschlossen damit die Dioden umgangen werden. Ansonsten würde sich der Kondensator nie vollständig entladen, da die Dioden erst ab einer bestimmten Spannung leiten ($\approx 0,6 \text{ V}$).

Beobachtung

Bei der Schalterstellung 0 ist keiner der beiden Stromkreise geschlossen und es fließt somit kein Strom (keine der Leuchtdioden brennt). Wird auf I geschaltet, so brennt LED1 anfänglich stark und erlischt dann allmählich. Bei folgender Schaltung auf II leuchtet LED2 anfänglich stark und erlischt dann wieder langsam.

Physikalischer Hintergrund

Mit den folgenden Versuchen soll demonstriert werden, wie sich der Kondensator im Stromkreis verhält und wie man die Kapazität eines Kondensators auf verschiedenen Wegen errechnet. Außerdem sollen die Hauptanwendungszwecke von Kondensatoren, nämlich die Ladungsspeicherung und Glättung, gezeigt werden.

Unter einem Kondensator versteht man zwei gegeneinander isolierte Leiter. Der Isolierstoff zwischen den Platten heißt Dielektrikum. Im einfachsten Fall handelt es sich um Luft. Im Ruhezustand sind beide Platten elektrisch neutral. Wird eine Spannungsquelle angeschlossen, so werden die beiden Platten entgegengesetzt geladen.

Das Fassungsvermögen des Kondensators für elektrische Ladungen heißt Kapazität (C). Sie stellt den Proportionalitätsfaktor zwischen den speicherbaren Ladungen und der Spannung dar.

$$Q = C \cdot U \Leftrightarrow C = \frac{Q}{U} \quad (2.1)$$

$$[C] = \frac{\text{A} \cdot \text{s}}{\text{V}} = 1 \text{ F} ; \text{F} \dots \text{Farad}$$

1 Farad ist eine sehr große Einheit, weshalb man gewöhnlich Kondensatoren vorfindet, die nur einen geringen Bruchteil der Kapazität von 1 F besitzen.

Wird ein Kondensator an die Spannungsquelle angeschlossen (Schalterstellung I), so ist zunächst seine eigene Spannung 0 V. In diesem Augenblick ist die Differenz zwischen seiner Spannung und der der Spannungsquelle am größten. Der Kondensator wirkt wie ein Kurzschluss. Es fließt der größtmögliche Strom, begrenzt durch den Innenwiderstand der Spannungsquelle, dem $2 \text{ k}\Omega$ Widerstand und der Leuchtdiode der Zuleitung. In diesem Moment brennt LED1 am hellsten. Aufgrund des Ladestroms steigt die Kondensatorspannung an. Die Differenz zur Spannungsquelle wird immer kleiner, der Widerstand bleibt gleich und somit wird nach dem Ohmschen Gesetz der Strom kleiner. Hat der Kondensator die gleiche Spannung wie die Quelle erreicht, so herrscht keine Spannungsdifferenz mehr und somit wird der Strom gleich Null. Der Strom ist der Spannung voraus gelaufen.

Grundsätzlich muss man unterscheiden, ob der Kondensator an Gleich- oder Wechselstrom anliegt.

Der Kondensator im Gleichstromkreis

Wie zuvor bei der Erörterung des grundsätzlichen Verhaltens eines Kondensators im Stromkreis festgestellt wurde, fließt nach dem Aufladen kein Strom mehr, was am allmählichen Erlöschen der roten Leuchtdiode erkennbar ist.

Die Zeit, die für das Aufladen des Kondensators benötigt wird, hängt vom Widerstand R und der Größe der Kapazität C ab. Tauscht man den verwendeten Widerstand gegen einen höherohmigen, so brennt die rote LED länger. Das heißt, die Aufladedauer des Kondensators wurde verlängert. Gleiches Verhalten wird beim Tausch des Kondensators mit einem mit größerer Kapazität ersichtlich. Aus diesen beiden Faktoren errechnet sich die Zeitkonstante:

$$\tau = R \cdot C \quad (2.2)$$

Die Zeitkonstante ist ein Maß für die Aufladegeschwindigkeit eines Kondensators. Sie gibt den Zeitabschnitt an, in dem die Kondensatorspannung auf etwa 63% angestiegen und der Ladestrom auf rund 37% seiner ursprünglichen Stärke abgesunken ist.

Die Einschaltzeit eines Kondensators beträgt fünf Zeitkonstanten, da nach Ablauf dieser die Spannung im Kondensator 99% der Quellspannung beträgt. Auch ist nach fünf Zeitkonstanten der Strom auf 1% des maximalen Stroms abgesunken.

Die Entladung eines Kondensators nimmt den gleichen Kurvenverlauf, aber dabei fallen die Spannung und der Entladestrom gemeinsam ab. Die Ausschaltzeit beträgt ebenfalls fünf Zeitkonstanten.

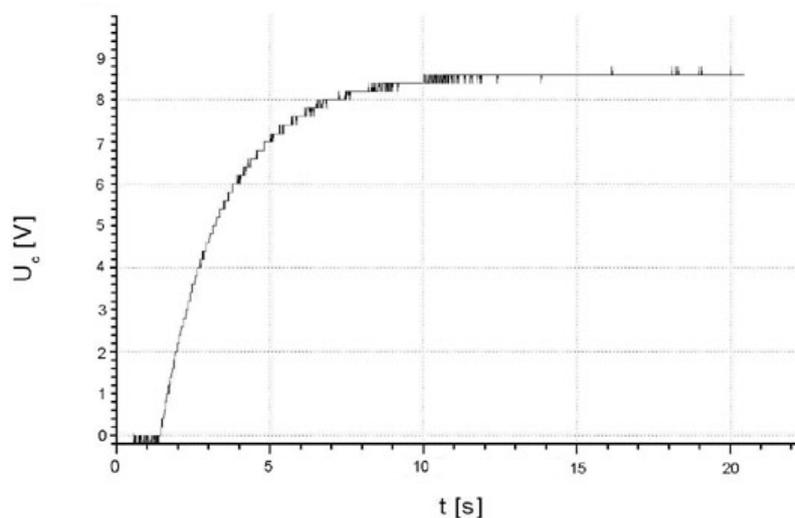


Abb.2.3: Ladekurve des Kondensators

Mit diesem Experiment soll die Kapazität mit Hilfe ihrer Definition und der Ladekurve ermittelt werden. Da es sich hier um ändernde Größe handelt, fließt in die Definition (2.1) das Δ ein. Daher lautet die Formel für die Kapazität:

$$C = \frac{\Delta Q}{\Delta U} \quad (2.3)$$

Zur Messung von C müsste nun ΔQ und ΔU gemessen werden. ΔQ ist aber schwierig zu messen (hierzu wäre ein Elektrometer nötig). Einfacher ist es, die Ladung über den

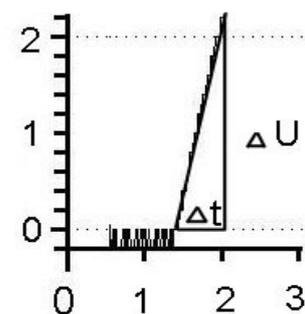


Abb.2.4: Zoom der ersten drei Sekunden der Ladekurve

durchschnittlichen Stromfluss \bar{I} zu berechnen:

$$\Delta Q = \bar{I} \cdot \Delta t \Rightarrow C = \bar{I} \cdot \frac{\Delta t}{\Delta U} \quad (2.4)$$

Die Vergrößerung des Anfangsbereichs der Ladekurve ergibt angenähert eine Gerade (Abb.2.4). Aus dieser Grafik ist es möglich, ΔU und Δt heraus zu lesen.

\bar{I} ist der mittlere Stromfluss in den ersten 0,6 s = Δt nach dem Einschalten. Mit dem Oszilloskop ist es nicht möglich direkt den Strom zu messen. Die Strommessung erfolgt indirekt, indem das Oszilloskop parallel zum Widerstand R geschlossen wird. Der Widerstand R und der Kondensator werden vom gleichen Strom durchflossen (Versuch 1.2). Die Spannung an R wird gemessen und durch das Ohmsche Gesetz (1.2) wird auf den Strom geschlossen.

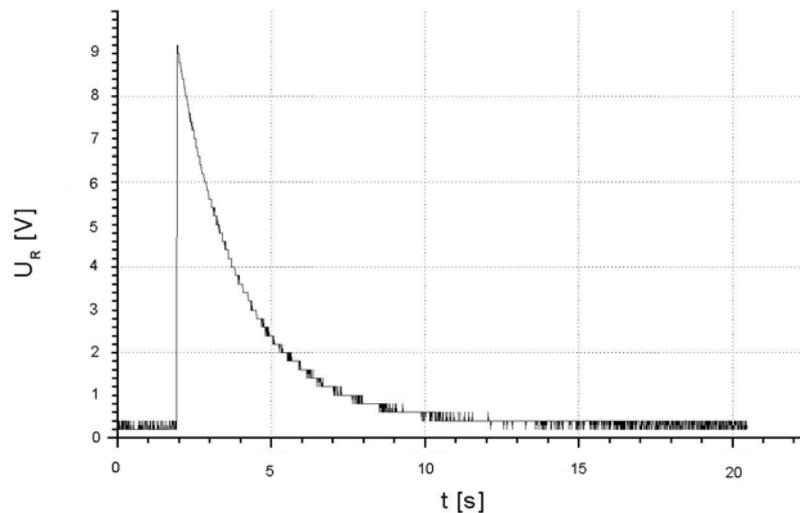


Abb.2.5: Spannung an R

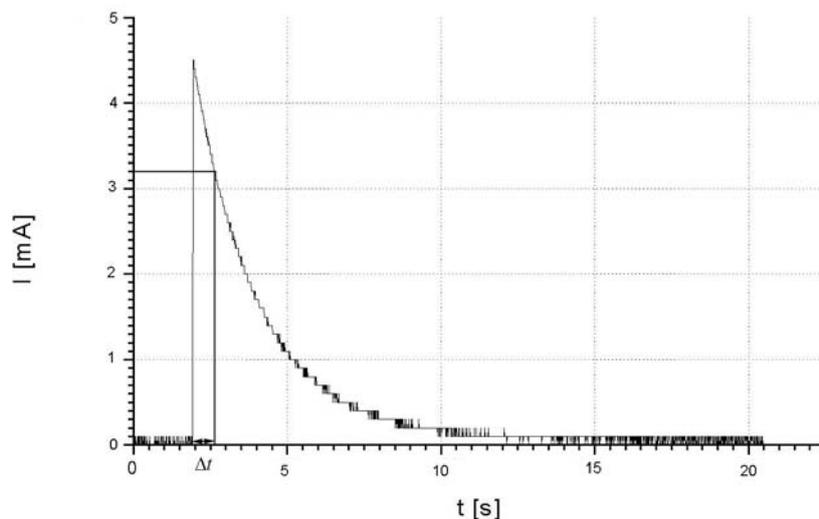


Abb.2.6: Strom durch R und C

Im ersten Moment, in dem der Kondensator an den Stromkreis angeschlossen wird, stellt er keinen Widerstand dar. Also ist der einzige Widerstand im Stromkreis der

2 k Ω Widerstand und demzufolge fließt ein Strom von $I = \frac{U}{R} = \frac{9 \text{ V}}{2000 \Omega} = 4,5 \text{ mA}$.

Wie aus der Abb.2.6 zu sehen ist, beträgt der Strom 0,6 s nach dem Einschalten 3,2 mA. Demnach ist der Mittelwert des Stroms über diese 0,6 s:

$$\bar{I} = \frac{1}{2} \cdot (4,5 \text{ mA} + 3,2 \text{ mA}) = 3,85 \text{ mA} .$$

Damit wird die Kapazität nach 2.4 errechnet: $C = \bar{I} \cdot \frac{\Delta t}{\Delta U} = 3,85 \text{ mA} \frac{0,6 \text{ s}}{2,2 \text{ V}} = 1050 \mu\text{F} .$

2.2 Der Kondensator im Wechselstromkreis

Material und Schaltplan

- Widerstand 1 x 330 Ω
- Kondensator 1 x 1 μF
- Steckplatte 50 mm x 35 mm

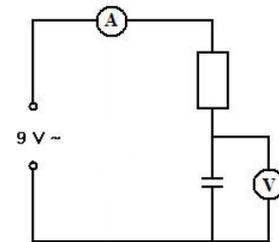


Abb.2.7: Schaltplan zum Kondensator im Wechselstromkreis

Aufbau

Bei diesem Versuch liegt eine Serienschaltung von einem Widerstand und einem Kondensator vor.

Bei der Wechselspannung ist zwischen dem effektiven Spannungswert (U_{eff}) und der Amplitude am Oszilloskop (\hat{U}) zu unterscheiden. Für die sinusförmige

Wechselspannung gilt: $U_{\text{eff}} = \frac{\hat{U}}{\sqrt{2}}$ (2.5)

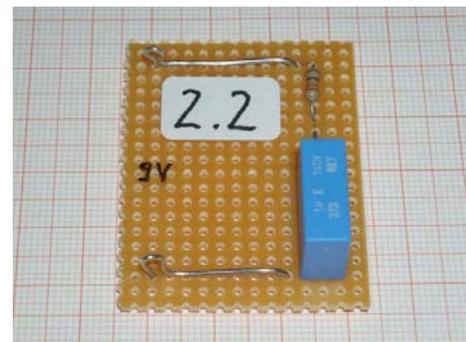


Abb.2.8: Schaltung zum Kondensator im Wechselstromkreis

Beobachtung

Es wird die am Kondensator anliegende Spannung und der Strom in Abhängigkeit der Frequenz gemessen.

f [Hz]	50	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
U_C [V]	8,9	8,8	8,5	7,6	6,7	5,9	5,2	4,6	4,2	3,8	3,5
I [mA]	4	8	10	12	15	17	18	20	21	21	21

Physikalischer Hintergrund

Die Elektronen des Wechselstromes führen Schwingbewegungen aus. Sie schwingen im Leiter hin und her und damit auf einen Kondensatorbelag herauf und von dem anderen Kondensatorbelag herab.

Die Wechelschwingung setzt sich also über den Kondensator hinweg fort.

Man sagt, ein Kondensator lässt Wechselstrom durch. Jedoch fließen die Elektronen nicht von einem Belag zum anderen durch das Dielektrikum hindurch. Die Ladungen der beiden Beläge sind über das elektrische Feld miteinander gekoppelt. Dadurch wird die Wechselstromschwingung weitergeleitet.

Wie man aus den gemessenen Werten sieht, sinkt die Spannung am Kondensator bei wachsender Frequenz. Das heißt, der Kondensator setzt der Wechselstromschwingung einen Widerstand (X_C), der abhängig von der Frequenz ist, entgegen.

Wird ein Kondensator mit einer größeren Kapazität eingebaut, so steigt der Widerstand bei gleich bleibender Frequenz. Dieser Umstand sollte eine Motivation sein, X_C in Abhängigkeit der Frequenz und der Kapazität mit folgender Formel zu berechnen:

$$X_C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C} \quad (2.6)$$

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$$

$$X_C = \frac{1}{\omega \cdot C}$$

X_C ... kapazitiver Blindwiderstand

C ... Kapazität

f ... Frequenz

ω ... Kreisfrequenz

f [Hz]	X_C [Ω]
50	3183
100	1592
200	796
300	531
400	398
500	318
600	265
700	227
800	199
900	177
1000	159

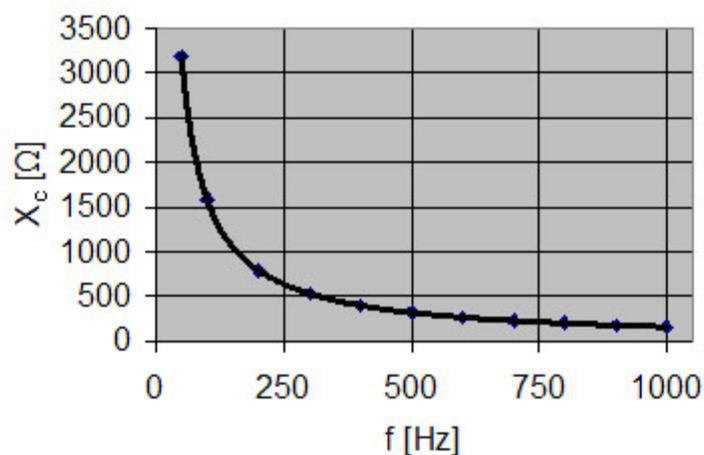


Abb.2.9: Kapazitiver Blindwiderstand in Abhängigkeit der Frequenz

Der Zusammenhang, dass der Strom der Spannung voraus läuft, lässt sich an der Wechselspannungs- bzw. Wechselstromkurve gut darstellen. Die Spannungskurve wird parallel zum Kondensator mit dem Oszilloskop aufgenommen. Für die Stromkurve legt man die Anschlüsse von Chan2 parallel zum Widerstand und dieser Eingang wird auf inversen Betrieb eingestellt. Da der Strom um den Faktor $\frac{1}{R}$ mit der Spannung proportional ist (1.2), wird auf Chan2 der Verlauf des Stromes angezeigt. Die Größe des Stromes kann diesem Diagramm nicht entnommen werden, da hier nur die Proportionalität einfließt. Die Messung findet bei 780 Hz statt.

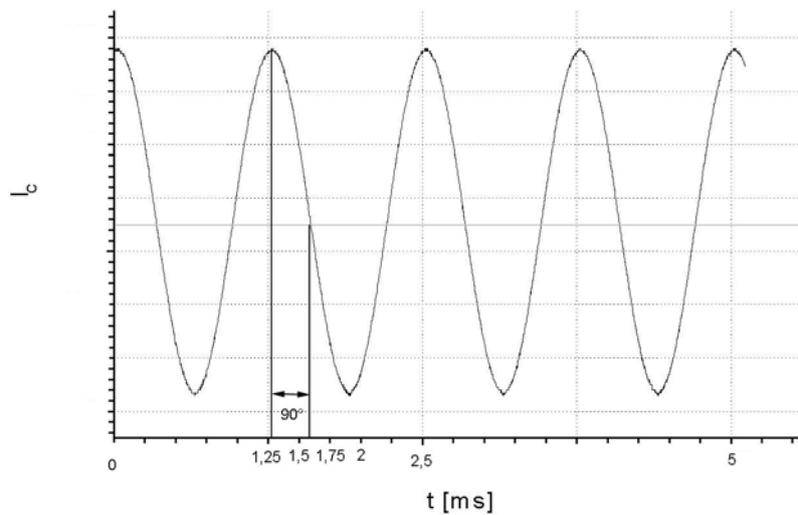


Abb.2.10: Stromfluss durch den Kondensator

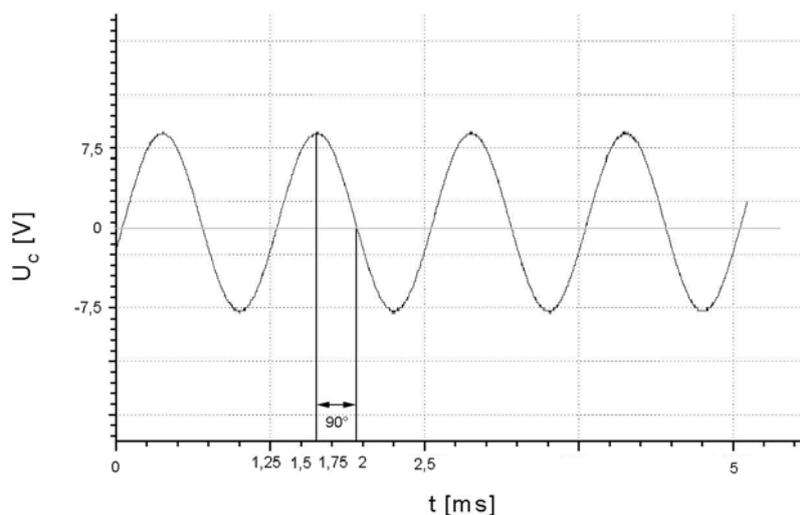


Abb.2.11: Spannung am Kondensator

Im Liniendiagramm decken sich die Kurven für Strom und Spannung nicht, das heißt, sie sind nicht phasengleich. Überträgt man das zu einem bestimmten Zeitpunkt bestehende Lageverhältnis zwischen dem Stand der Stromkurve und dem Stand der Spannungskurve in ein Zeigerdiagramm, so lässt sich an diesem ein Winkel von 90° ablesen.

Der Strom eilt der Spannung um 90° voraus. Dies ist aber nur beim verlustfreien Kondensator der Fall. Die Verluste werden durch einen Verlustwiderstand R erfasst, der zur verlustfreien Kapazität C in Serie liegt.

Für den verlustbehafteten Kondensator ist die Phasenverschiebung zwischen U und I kleiner als 90° . Dem Kondensator fehlt zur Vollkommenheit der Winkel δ . Dieser

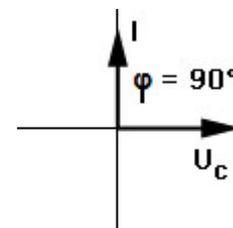


Abb.2.12: Zeigerdiagramm eines verlustfreien Kondensators

Winkel wird Verlustwinkel genannt. Der Verlustfaktor ist der Tangens des Verlustwinkels.

$$\tan \delta = \frac{U_R}{U_C} = \frac{I \cdot R}{I \cdot X_C} \quad (2.7)$$

$$\tan \delta = \frac{R}{X_C}$$

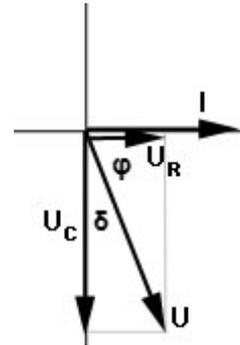
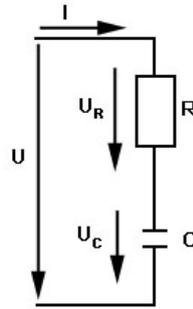


Abb.2.13: Ersatzschaltung eines verlustbehafteten Kondensators

Abb.2.14: Zeigerdiagramm eines verlustbehafteten Kondensators

Je kleiner der $\tan \delta$ eines Kondensators ist, desto verlustärmer, also desto besser ist der Kondensator. Der Kehrwert des $\tan \delta$ wird Güte (Q) genannt:

$$Q = \frac{1}{\tan \delta} = \frac{X_C}{R} \quad (2.8)$$

2.3 Parallelschaltung von Kondensatoren

Material und Schaltplan

- Widerstand 1 x 2 k Ω
- Leuchtdiode 2 x
- Schalter 1 x
- Kondensator 2 x 1000 μ F
- Steckplatte 90 mm x 45 mm

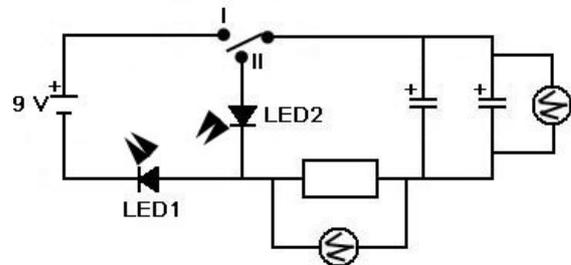


Abb.2.15: Schaltplan zur Parallelschaltung von Kondensatoren

Aufbau

Die beiden Kondensatoren in Parallelschaltung werden bei Schalterstellung I über R und LED1 geladen und bei Stellung II über R und LED2 entladen.

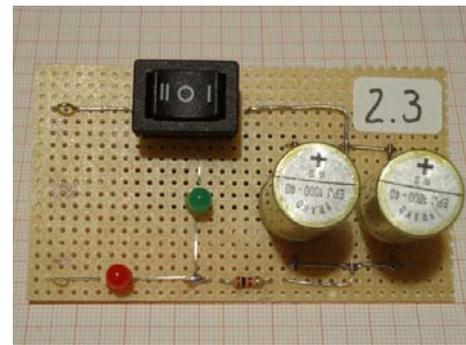


Abb.2.16: Schaltung zur Parallelschaltung von Kondensatoren

Beobachtung

Bei Schalterstellung I brennt LED1 erst sehr hell und erlischt dann langsam. Die Brenndauer ist etwa doppelt so lange wie bei Versuch 2.1.

Wird der Schalter auf die Stellung II gebracht, beginnt LED2 erst sehr hell zu brennen und erlischt dann langsam. Die Brenndauer ist auch hier etwa doppelt so lange wie bei Versuch 2.1.

Physikalischer Hintergrund

Die längere Leuchtdauer der Leuchtdioden deutet auf eine größere Kapazität hin. Die Gesamtkapazität wird mit Hilfe der Entladekurve berechnet. Dafür ist es nötig, die Funktionsgleichung der Ladekurve zu entwickeln und im Punkt U_0 die Tangente anzulegen. Diese Tangente schneidet die Abszisse in einem Abstand vom Nullpunkt, der genau der Zeitkonstante $\tau = R \cdot C$ (2.2) entspricht. Somit wird τ berechnet (es ist auch möglich, τ aus der Entladekurve zu messen), R ist bekannt und dadurch berechnet man die Kapazität C.

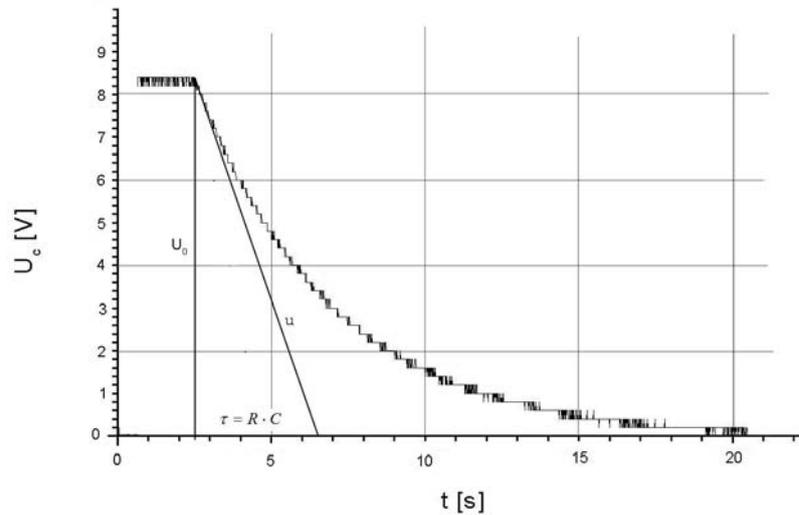


Abb.2.17: Entladekurve von zwei parallel geschalteten Kondensatoren

Die Herleitung der Funktionsgleichung der Spannung bei der Entladung des Kondensators passiert über die Definition des Stroms:

$$I(t) = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = \frac{dQ(t)}{dt} = Q'(t)$$

$$U_R(t) = R \cdot I(t) = R \cdot Q'(t)$$

$$U_0 = U_C(t) + U_R(t) \Leftrightarrow U_C(t) = U_0 - U_R(t) = U_0 - R \cdot Q'(t)$$

$$Q(t) = C \cdot U_C(t) \Leftrightarrow U_C(t) = \frac{Q(t)}{C}$$

$$\frac{Q(t)}{C} = U_0 - R \cdot Q'(t) \Leftrightarrow U_0 = \frac{Q(t)}{C} + R \cdot Q'(t) \Leftrightarrow \frac{U_0}{R} = \frac{1}{R \cdot C} Q(t) + Q'(t)$$

Vereinfachung der Randbedingungen: $t_0 = 0$; $U_0 = 0$

$$Q'(t) + \frac{1}{R \cdot C} Q(t) = 0 \Leftrightarrow Q'(t) = -\frac{1}{R \cdot C} Q(t) \Leftrightarrow \frac{Q'(t)}{Q(t)} = -\frac{1}{R \cdot C} \Leftrightarrow$$

$$\int_0^\tau \frac{Q'(\tau)}{Q(\tau)} dt = -\frac{1}{R \cdot C} \int_0^\tau dt \Leftrightarrow \ln \frac{Q(\tau)}{Q_0} = -\frac{1}{R \cdot C} \tau \Leftrightarrow \frac{Q(\tau)}{Q_0} = e^{-\frac{1}{R \cdot C} \tau} \Leftrightarrow$$

$$Q(\tau) = Q_0 \cdot e^{-\frac{1}{R \cdot C} \tau}$$

Wird τ wieder t gesetzt, so erhält man für die Entladekurve von Spannung und Strom:

$$U_C(t) = \frac{Q(t)}{C} = \frac{Q_0}{C} e^{-\frac{1}{R \cdot C} t} = U_0 \cdot e^{-\frac{1}{R \cdot C} t} \quad (2.9)$$

$$I(t) = Q'(t) = -\frac{Q_0}{R \cdot C} e^{-\frac{1}{R \cdot C} t} = -\frac{U_0}{R} e^{-\frac{1}{R \cdot C} t}$$

$$U_C(t)' = -\frac{U_0}{R \cdot C} \cdot e^{-\frac{t}{R \cdot C}} \Rightarrow U_C'(0) = -\frac{U_0}{R \cdot C}$$

Sei u die Tangente in U_0 . Sie ist gegeben durch:

$$u: U_C = -\frac{U_0}{R \cdot C} \cdot t + d$$

$$\text{im Punkt } (0, U_0): U_0 = -\frac{U_0}{R \cdot C} \cdot 0 + d \Leftrightarrow d = U_0$$

$$u: U_0 = -\frac{U_0}{R \cdot C} \cdot t + U_0$$

$$\text{Schnittpunkt von } u \text{ mit der Abszisse: } 0 = -\frac{U_0}{R \cdot C} \cdot t + U_0 \Leftrightarrow t = R \cdot C$$

Diese Entwicklung rechtfertigt die rechnerische Lösung:

t beträgt in der Skizze etwa 4 s und $R = 2 \text{ k}\Omega$. Also erhält man für

$$C = \frac{t}{R} = \frac{4 \text{ s}}{2000 \Omega} = 2 \text{ mF} = 2000 \mu\text{F}$$

Theoretisch kann man es folgendermaßen erklären:

An beiden Kondensatoren liegt die gleiche Spannung an (Versuch 1.3) und der Strom teilt sich am Knoten auf. Unter der Ladung Q versteht man das Produkt aus Stromstärke und Zeit:

$$Q = I \cdot t \tag{2.10}$$

$$[Q] = A \cdot s = 1 \text{ C}; C \dots \text{Coulomb}$$

Da sich die beiden Teilströme zum Gesamtstrom summieren, summieren sich auch die Teilladungen der beiden Kondensatoren zur Gesamtladung:

$$Q_g = Q_1 + Q_2$$

Daher ist die Gesamtkapazität:

$$C_g = \frac{Q_g}{U} = \frac{Q_1}{U} + \frac{Q_2}{U} = C_1 + C_2$$

Die Gesamtkapazität ist also die Summe der Einzelkapazitäten:

$$C_g = \sum_i C_i \tag{2.11}$$

Für diesen Versuch angewendet:

$$C_g = 1000 \mu\text{F} + 1000 \mu\text{F} = 2000 \mu\text{F}$$

2.4 Serienschaltung von Kondensatoren

Material und Schaltplan

- Widerstand 1 x 2 k Ω
- Leuchtdiode 2 x
- Schalter 1 x
- Kondensator 2 x 1000 μ F
- Steckplatte 70 mm x 70 mm

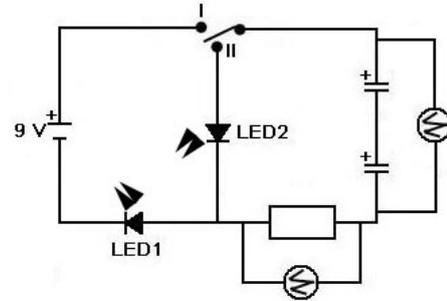


Abb.2.18: Schaltplan zur Serienschaltung von Kondensatoren

Aufbau

Die beiden Kondensatoren in Serienschaltung werden bei Schalterstellung I über R und LED1 geladen und bei Stellung II über R und LED2 entladen.

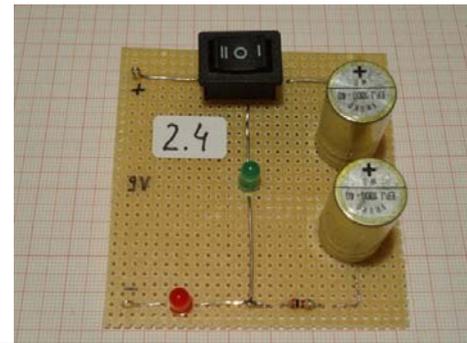


Abb.2.19: Schaltung zur Serienschaltung von Kondensatoren

Beobachtung

Bei Schalterstellung I brennt LED1 erst sehr hell und erlischt dann schnell. Die Brenndauer ist kürzer als beim Versuch 2.1.

Wird der Schalter auf die Stellung II gebracht, beginnt LED2 erst sehr hell zu brennen und erlischt dann schnell. Die Brenndauer ist auch hier kürzer als beim Versuch 2.1.

Physikalischer Hintergrund

Die kürzere Brenndauer der Leuchtdioden deutet auf eine kleinere Kapazität hin. In diesem Versuch wird die Gesamtkapazität wieder mit Hilfe der Zeitkonstante τ ermittelt. Wie bereits im Versuch 2.3 erwähnt, ist nach Ablauf der Zeitkonstante beim Laden die Spannung auf 63% der Gesamtspannung gestiegen, bzw. beim Entladen die Spannung um auf 37% der Gesamtspannung gesunken. Diese

Prozentwerte gehen aus folgender Überlegung hervor: Ist $t = R \cdot C$ und wird dies in

$$U_C = U_0 \cdot e^{\frac{-t}{R \cdot C}} \text{ eingesetzt, so erhält man: } U = \frac{U_0}{e} \approx 0,37 U_0.$$

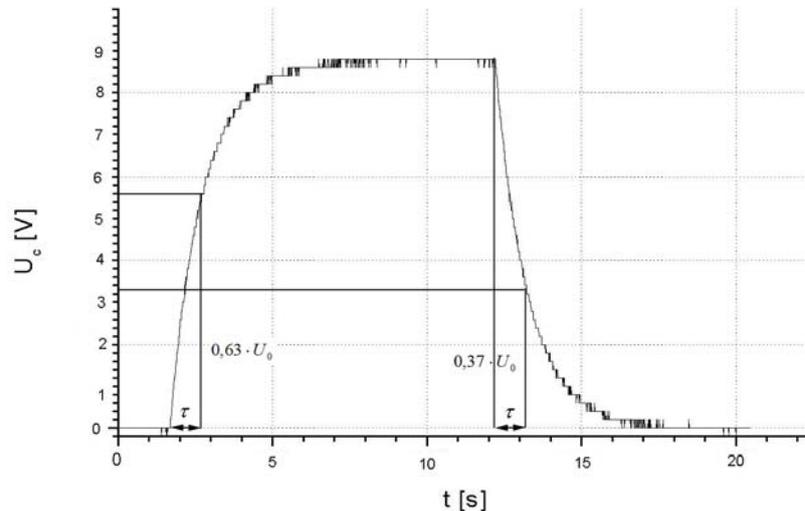


Abb.2.20: Lade- und Entladekurve zweier in Serie geschalteten Kondensatoren

Wie der Abb.2.20 entnommen werden kann, werden die 63% der Gesamtspannung der Ladekurve nach etwa 1 s erreicht, die 37% der Gesamtspannung bei der Entladekurve werden ebenfalls nach 1 s erreicht. Das heißt: $\tau = 1 \text{ s}$. Nun ist es möglich, die Gesamtkapazität zu berechnen:

$$\tau = R \cdot C \Leftrightarrow C = \frac{\tau}{R} = \frac{1 \text{ s}}{2000 \Omega} = 0,5 \text{ mF} = 500 \mu\text{F}$$

Theoretisch kann man es folgendermaßen erklären:

An beiden Kondensatoren liegt der gleiche Strom an (Versuch 1.2) und die Spannung teilt sich auf. Dadurch haben beide Kondensatoren die gleiche Ladung $Q_1 = Q_2 = Q$. Das „Teilstück“ zwischen C_1 und C_2 muss insgesamt gesehen elektrisch neutral, also ungeladen sein. Ladungen werden nur verschoben, daher muss $Q_1 = Q_2$ sein. Dieselbe Ladung muss sich aber auch auf den äußeren Platten befinden. Davon abgesehen müssen sich die Spannungen an den Kondensatoren summieren:

$$U = U_1 + U_2$$

Daraus ergibt sich:

$$\frac{Q}{C_g} = \frac{Q}{C_1} + \frac{Q}{C_2}$$

Es summieren sich hier also die Reziprokwerte der Einzelkapazitäten zur reziproken Gesamtkapazität:

$$\frac{1}{C_g} = \sum_i \frac{1}{C_i} \quad (2.12)$$

Für diesen Versuch angewendet:

$$\frac{1}{C_g} = \frac{1}{1000 \mu\text{F}} + \frac{1}{1000 \mu\text{F}} = \frac{2}{1000 \mu\text{F}} \Leftrightarrow 1000 \mu\text{F} = 2 \cdot C_g \Leftrightarrow C_g = 500 \mu\text{F}$$

2.5 RC – Glied

Material und Schaltplan

- Widerstand 1 x 2 k Ω
- Kondensator 1 x 150 nF
- Steckplatte 55 mm x 40 mm

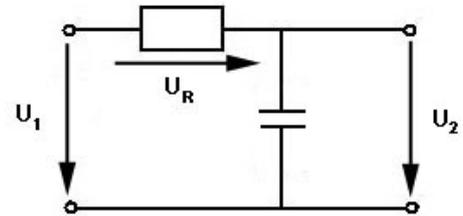


Abb.2.21: Schaltplan zum RC – Glied

Aufbau

Bei U_1 wird die gewünschte Spannung angelegt und bei U_2 wird die Ausgangsspannung gemessen.

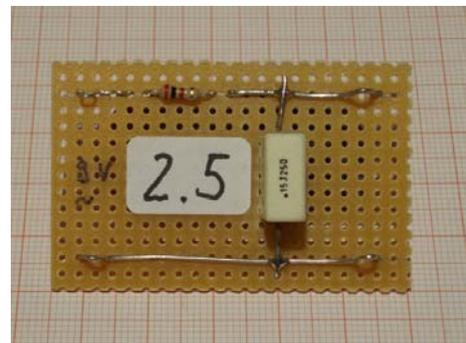


Abb.2.22: Schaltung zum RC - Glied

Beobachtung

Wird an U_1 eine sinusförmige Wechselspannung von 9 V (= U_{eff}) angelegt, so entnimmt man bei U_2 bei variierender Frequenz von U_1 folgende Spannungswerte:

f [Hz]	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
U_2 [V]	8,95	8,8	8,65	8,35	8,05	7,7	7,35	7	6,65	6,3
f [Hz]	550	600	650	700	750	800	850	900	950	1000
U_2 [V]	5,95	5,65	5,4	5,15	4,9	4,7	4,5	4,3	4,1	3,95

Physikalischer Hintergrund

Allgemeines zur Reihenschaltung von R und C

Wird an eine Reihenschaltung von R und C eine Wechselspannung angelegt, so treibt diese Spannung einen Strom durch die Reihenschaltung. Am Widerstand fällt die Spannung U_R ab. Diese Spannung liegt in Phase mit dem Strom I. Die Kondensatorspannung U_C eilt dem Strom um 90° nach. Das Zeigerdiagramm in Abb.2.14 zeigt die Phasenlagen der Spannungen. Die Gesamtspannung U ergibt sich nach der Gleichung:

$$U = \sqrt{U_R^2 + U_C^2} \quad (2.13)$$

Teilt man die Spannungszeiger durch den Strom I , so erhält man die Widerstandszeiger:

$$\frac{U_R}{I} = R, \quad \frac{U_C}{I} = X_C, \quad \frac{U}{I} = Z$$

Für den Wechselstromwiderstand Z gilt:

$$Z = \sqrt{R^2 + X_C^2} \quad (2.14)$$

Aus dem Zeigerdiagramm kann man auch die Gleichung für den Phasenwinkel φ entnehmen:

$$\tan \varphi = \frac{U_C}{U_R} = \frac{X_C}{R} \quad (2.15)$$

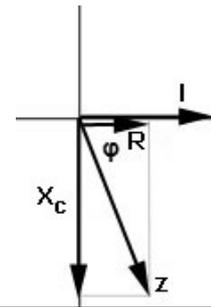


Abb.2.23: Zeigerdiagramm der Widerstände einer Reihenschaltung von R und C

RC – Glied

Das RC – Glied ist im Prinzip eine Reihenschaltung von R und C. Nur werden parallel zum Kondensator Ausgangsklemmen angebracht, an denen die Ausgangsspannung (U_2) abgelesen werden kann. Mit U_1 wird die Eingangsspannung bezeichnet.

Bei diesem Versuch wird das Verhalten des RC – Gliedes bei sinusförmiger Eingangsspannung U_1 untersucht. Das Auftragen der gemessenen Werte ergibt folgendes Diagramm:

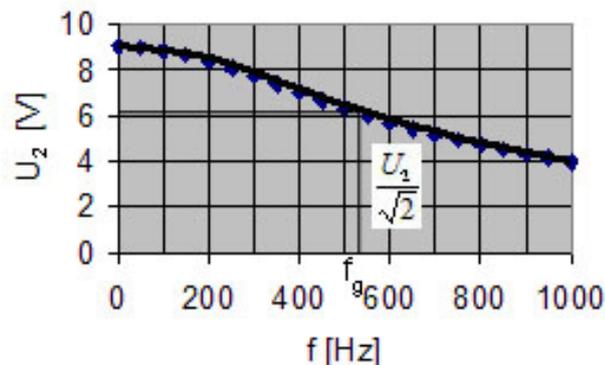


Abb.2.24: Verhalten der Ausgangsspannung in Abhängigkeit von der Frequenz

Bei tiefen Frequenzen hat der Kondensator einen großen Widerstand. Am Ausgang liegt fast die volle Eingangsspannung $U_2 \approx U_1$.

Bei hohen Frequenzen ist der Widerstand des Kondensators sehr klein. Er strebt gegen Null. Die Ausgangsspannung U_2 wird bei sehr hohen Frequenzen annähernd Null: $U_2 \approx 0$.

Das RC – Glied lässt tiefe Frequenzen durch und dämpft hohe Frequenzen stark. Da die tiefen Frequenzen passieren können, nennt man diese Schaltung Tiefpass.

Die Frequenz, bei der die Spannung U_2 auf das $\frac{1}{\sqrt{2}}$ fache von U_1 abgesunken ist,

nennt man Grenzfrequenz f_g . Grenzfrequenz deshalb, da Frequenzen bis zu diesem Bereich praktisch durchgelassen werden. Aus Abb.2.24 kann man entnehmen, dass die Grenzfrequenz etwa 530 Hz beträgt.

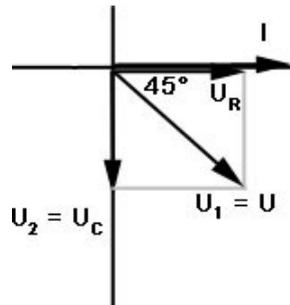


Abb.2.25: Zeigerdiagramm der Spannungen eines RC - Gliedes

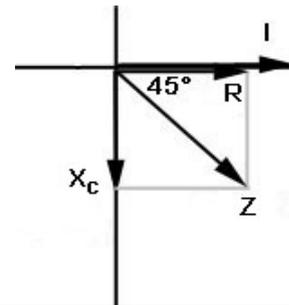


Abb.2.26: Zeigerdiagramm der Widerstände eines RC - Gliedes

Aus den Zeigerdiagrammen ist ersichtlich, dass $U_2 = \frac{U_1}{\sqrt{2}}$ dann ist, wenn U_R den gleichen Betrag wie U_2 bzw. U_C hat. Für f_g gilt also:

$$U_R = U_C \Leftrightarrow \frac{U_R}{I} = \frac{U_C}{I} \Leftrightarrow R = X_C$$

Aus dieser Bedingung kann die Gleichung für die Grenzfrequenz abgeleitet werden:

$$R = X_C$$

$$R = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_g \cdot C} \quad (2.16)$$

$$f_g = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot C}$$

Mit $\tau = R \cdot C$ gilt:

$$f_g = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \tau} \quad (2.17)$$

Damit ergibt sich der exakte Wert für die Grenzfrequenz durch:

$$f_g = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 2000 \, \Omega \cdot 150 \cdot 10^{-9} \, F} = 530,5 \, \mu F$$

Bei der Grenzfrequenz besteht zwischen U_1 und U_2 eine Phasenverschiebung von 45° . Dabei läuft U_1 der Spannung U_2 voraus, im Gegensatz zum RL – Glied (Versuch 3.3), wo es sich umgekehrt verhält.

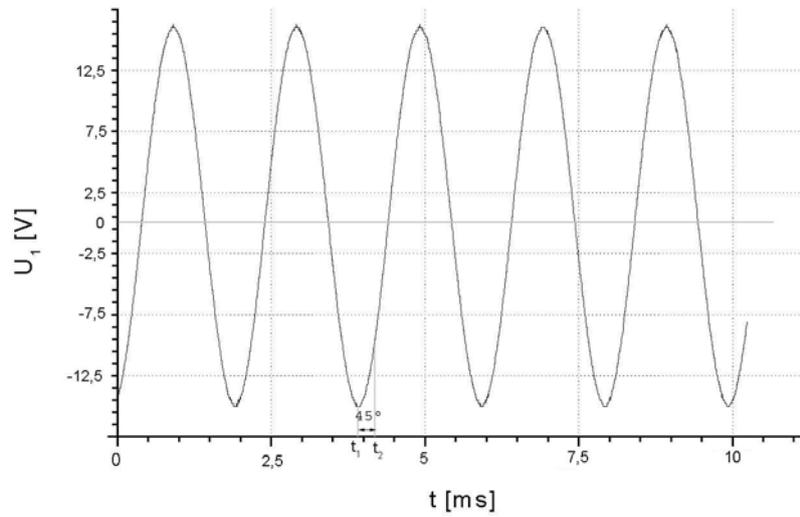


Abb.2.27: Eingangsspannung beim RC - Glied

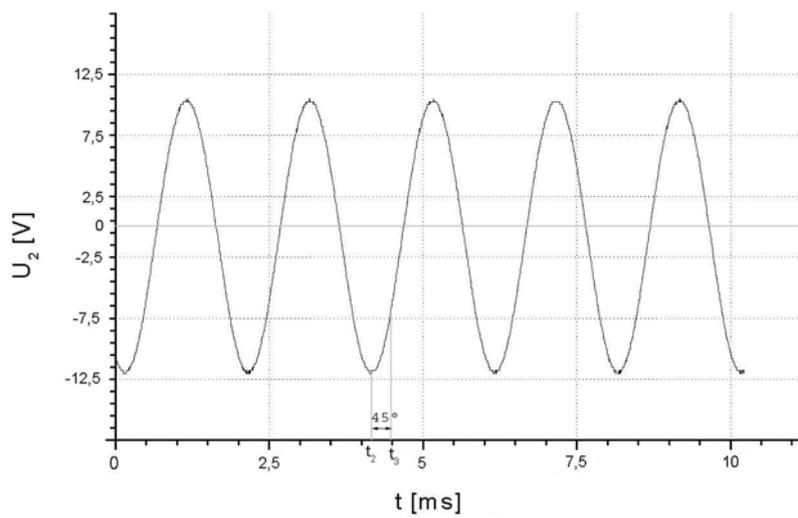


Abb.2.28: Ausgangsspannung beim RC - Glied

2.6 CR – Glied

Material und Schaltplan

- Widerstand 1 x 2 k Ω
- Kondensator 1 x 150 nF
- Steckplatte 55 mm x 40 mm

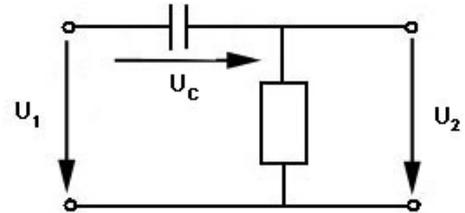


Abb.2.29: Schaltplan zum CR – Glied

Aufbau

Bei U_1 wird die gewünschte Spannung angelegt und bei U_2 wird die Ausgangsspannung gemessen.

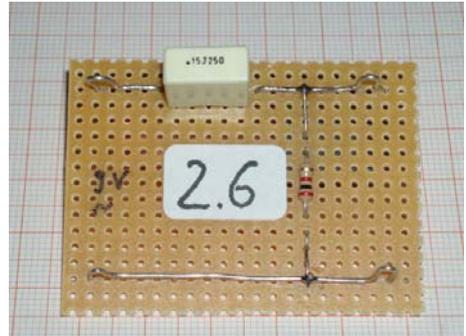


Abb.2.30: Schaltung zum CR - Glied

Beobachtung

Wird an U_1 eine sinusförmige Wechselspannung von 9 V (= U_{eff}) angelegt, so entnimmt man bei U_2 bei variierender Frequenz von U_1 folgende Spannungswerte:

f [Hz]	0	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
U_2 [V]	0	0,9	1,75	2,55	3,3	4	4,55	5,05	5,5	5,9	6,25
f [Hz]	550	600	650	700	750	800	850	900	950	1000	
U_2 [V]	6,55	6,8	7	7,15	7,35	7,45	7,6	7,7	7,8	7,85	

Physikalischer Hintergrund

Das CR – Glied ist dem RC – Glied sehr ähnlich. Die Bauteile in Längs- und Querzweig sind lediglich vertauscht. Bei Beobachtung der gemessenen Werte fällt aber auf, dass das Verhalten des CR – Gliedes bei sinusförmiger Wechselspannung unterschiedlicher Frequenz ganz anders ist als das des RC – Gliedes.

Das Auftragen der gemessenen Werte ergibt folgendes Diagramm:

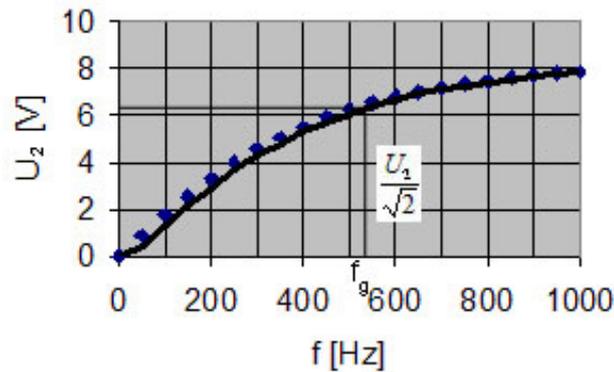


Abb.2.31: Verhalten der Ausgangsspannung in Abhängigkeit von der Frequenz

Bei tiefen Frequenzen ist der Widerstand des Kondensators sehr groß. Ein sehr großer Teil der Spannung U_1 fällt an C ab. Der Spannungsabfall an R ist fast Null: $U_2 \approx 0$

Bei hohen Frequenzen ist der Widerstand des Kondensators annähernd Null. Die Eingangsspannung liegt fast voll am Ausgang: $U_2 \approx U_1$

Man sieht, dass das CR – Glied hohe Frequenzen passieren lässt und tiefe stark dämpft. Eine Schaltung, die dieses Frequenzverhalten zeigt, wird Hochpass genannt.

Das CR – Glied hat ebenfalls eine Grenzfrequenz. Die Grenzfrequenz ist die Frequenz, bei der U_2 den $\frac{1}{\sqrt{2}}$

fachen Wert von U_1 hat. In der Abb.2.31 passiert dies bei etwa 530 Hz.

Bei der Grenzfrequenz muss U_R denselben Betrag wie U_C haben. Für f_g gilt:

$$U_R = U_C$$

Aus dieser Bedingung ergibt sich die gleiche Formel zur Berechnung der Grenzfrequenz, die auch für das RC – Glied gefunden wurde:

$$f_g = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot C}$$

$$f_g = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \tau}$$

Damit ergibt sich der exakte Wert für die Grenzfrequenz durch:

$$f_g = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 2000 \Omega \cdot 150 \cdot 10^{-9} F} = 530,5 F$$

Bei der Grenzfrequenz besteht zwischen U_1 und U_2 eine Phasenverschiebung von 45° . Dabei läuft U_2 der Spannung U_1 voraus, im Gegensatz zum LR – Glied (Versuch 3.4), wo es sich umgekehrt verhält.

Die vertauschten Rollen der Spannungen im Vergleich zum RC – Glied (Versuch 2.5) lassen sich dadurch erklären, dass der Anschluss des Oszilloskops in diesem Versuch nach dem Kondensator und im vorigen Versuch nach dem Widerstand erfolgte und somit der Kondensator nachgeschaltet wurde.

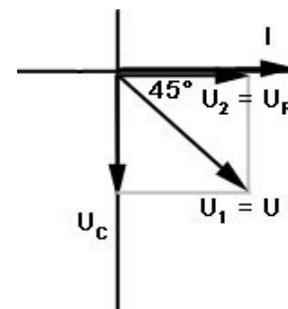


Abb.2.32: Zeigerdiagramm der Spannungen eines CR- Gliedes bei Grenzfrequenz

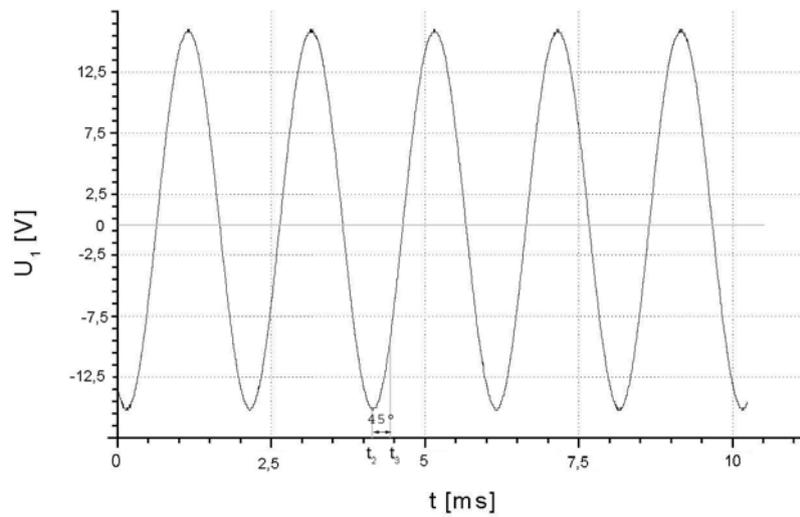


Abb.2.33: Eingangsspannung beim CR - Glied

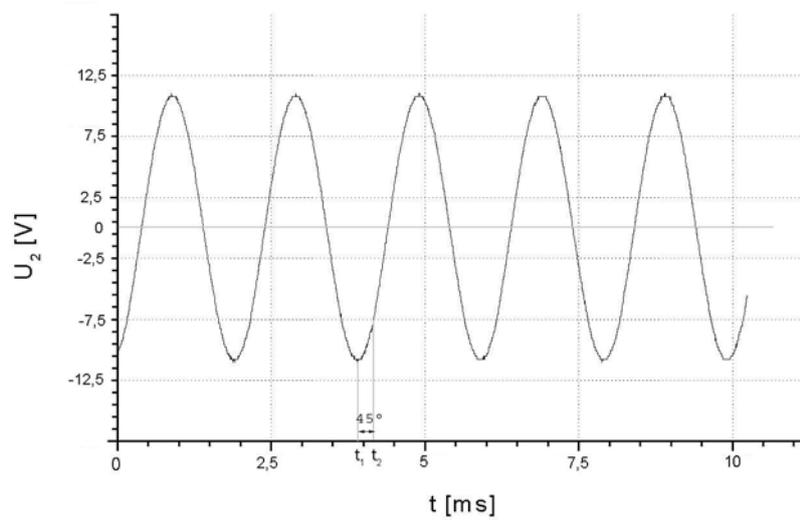


Abb.2.34: Ausgangsspannung beim CR - Glied

3. Spulenschaltungen

Die Spule ist ein sehr einfaches Bauelement, sie besteht im Wesentlichen nur aus aufgewickeltem Draht. Zur Wirkung des Drahtwiderstandes kommen magnetische Wirkungen hinzu. Diese magnetischen Wirkungen sind es, die die Spule zu einem unentbehrlichen Bauelement in allen Bereichen der Elektronik machen. Das gilt insbesondere für die Bereiche, in denen Wechselströme verarbeitet werden.

3.1 Die Spule im Gleichstromkreis

Material und Schaltplan

- Batterie 1 x 4,5 V
- Spule 1 x (500 Windungen)
- Glimmlampe 1 x
- Steckplatte 70 mm x 45 mm

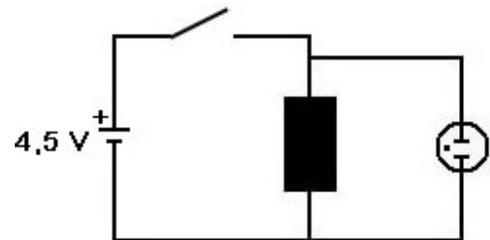


Abb.3.1: Schaltplan zur Spule im Gleichstromkreis

Aufbau

Parallel zu der Spule wird die Glimmlampe geschaltet, die erst ab einer Spannung von 60 V zu brennen beginnt.

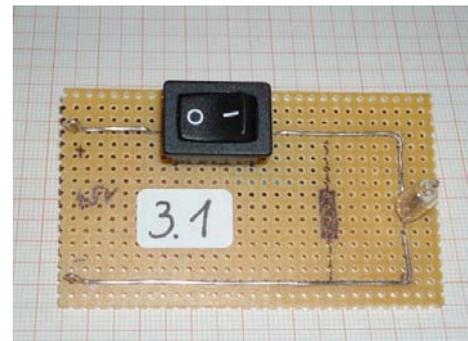


Abb3.2: Schaltung zur Spule im Gleichkreis

Beobachtung

Wird der Schalter mehrmals geöffnet und geschlossen, so beginnt die Glimmlampe kurz zu brennen.

Physikalischer Hintergrund

Wird eine Spule von einem sich zeitlich ändernden Strom durchflossen (hervorgerufen durch das schnelle Ein- und Ausschalten), so entsteht in ihrer Umgebung ein zeitlich sich änderndes magnetisches Feld. Dieses magnetische Feld induziert in der Spule eine Spannung (Selbstinduktion).

Die induzierte Spannung ist stets ihrer Ursache entgegengerichtet. Die Ursache des Magnetfeldes und damit auch der induzierten Spannung ist der Strom.

Nimmt der Strom durch die Spule zu, so entsteht eine Selbstinduktionsspannung, die dem Strom entgegengerichtet ist und die Zunahme des Stromes bremst.

Nimmt der Strom durch die Spule ab, so entsteht eine Selbstinduktionsspannung, die in Richtung des Stromes wirkt und die Abnahme des Stromes bremst.

Die Selbstinduktionsspannung ist eine Gegenspannung. Sie hängt einmal von den Aufbaugrößen einer Spule ab, also von der Windungszahl, von der Spulenlänge, vom Spulenquerschnitt und von der Art und Abmessung des Kerns. Zum anderen hängt die Selbstinduktionsspannung auch von der Größe und der Änderungsgeschwindigkeit des in die Spule durchfließenden Stromes ab.

Für die Selbstinduktionsspannung U_L gilt die Gleichung:

$$U_L = -L \frac{\Delta I}{\Delta t} \quad (3.1)$$

- U_L ... Selbstinduktionsspannung
- ΔI ... Änderung des Stromes
- Δt ... Änderung der Zeit
- L ... Induktivität

Der Einfluss aller Aufbaugrößen der Spule auf die Größe der Selbstinduktionsspannung wird durch den Selbstinduktionskoeffizienten L erfasst.

$$[L] = \frac{V \cdot s}{A} = \Omega \cdot s = 1H ; H \dots \text{Henry}$$

Eine Spule hat eine Induktivität von einem Henry, wenn bei gleichförmiger Stromänderung von 1 Ampere in 1 Sekunde eine Selbstinduktionsspannung von 1 Volt entsteht.

Zur Berechnung der Induktivität einer Spule ist folgende Gleichung geeignet:

$$L = N^2 \frac{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot A}{l_m} \quad (3.2)$$

- L ... Induktivität
- N ... Windungszahl
- μ_0 ... magnetische Feldkonstante
- μ_r ... Permeabilitätszahl
- A ... Spulenquerschnitt
- l_m ... mittlere Feldlinienlänge

Die Induktivität einer Spule ist der Windungszahl proportional.

Die Berechnung ergibt jedoch nur näherungsweise richtige Ergebnisse. Besonders schwierig ist es, die Permeabilitätszahl eines Eisenkerns zu bestimmen. Unsicher sind auch die Werte für die mittlere Feldlinienlänge.

Mit diesem Versuch soll das Verhalten der Spule im Gleichstromkreis beschrieben werden.

Mit Ausnahme der Ein- und Ausschaltvorgänge setzt die Spule dem Gleichstrom nur ihren meist sehr geringen Drahtwiderstand entgegen. Sie lässt Gleichstrom passieren.

Magnetfeldaufbau (Einschaltvorgang)

Wird der Schalter geschlossen, so steigt der Strom langsam an. Die Selbstinduktionsspannung U_L ist im ersten Augenblick nach dem Einschalten so groß wie die angelegte Spannung U . Die Selbstinduktionsspannung wirkt dem Strom entgegen. Sie bremst den Strom und ist die Ursache für das langsame Ansteigen.

Der Aufbau des Magnetfeldes dauert umso länger, je größer die Induktivität der Spule und je kleiner der Widerstand R ist. Der Ausdruck $\frac{L}{R}$ ist ein Maßstab für die Aufbaugeschwindigkeit des Magnetfeldes. Er wird mit τ bezeichnet.

$$\tau = \frac{L}{R} \quad (3.3)$$

Nach Ablauf einer Zeitkonstante nach dem Einschalten hat der Strom 63% seines Höchstwertes erreicht. Der Höchstwert I_{\max} ist praktisch nach 5 Zeitkonstanten erreicht. Damit ist auch das Magnetfeld einer Spule nach 5 Zeitkonstanten vollständig aufgebaut.

Die stromdurchflossene Spule hat in ihrem Magnetfeld eine bestimmte Energie gespeichert. Die Größe dieser Energie lässt sich mit folgender Gleichung errechnen:

$$W = \frac{1}{2} \cdot L \cdot I^2 \quad (3.4)$$

W ... Energie der Spule

L ... Induktivität

I ... Strom

Magnetfeldabbau (Ausschaltvorgang)

Wird im Stromkreis der Schalter geöffnet, so kommt es zu einem plötzlichen Zusammenbruch des Magnetfeldes. Die im Magnetfeld gespeicherte Energie wird plötzlich frei. Es entsteht unter Umständen eine sehr hohe Selbstinduktionsspannung.

Die Selbstinduktionsspannung (3.1) hängt von der Stromänderung innerhalb eines Zeitabschnitts und der Induktivität der Spule ab. Diese Gesetzmäßigkeit wird in diesem Versuch besonders wirksam, wenn die Spule abgeschaltet wird: die Stromänderung ΔI ist dann sehr groß, der Zeitabschnitt Δt sehr klein – eben nur dieser Moment des Abschaltens. Bei Spulen mit großen Induktivitäten kann U_L das Vielfache der angelegten Batteriespannung betragen, wie man es bei diesem Experiment gut sehen kann.

Bemerkung:

Oft ist die hohe „Abschaltspannung“ erwünscht, z.B. an den Zündkerzen des Kraftfahrzeugs. Vielfach macht sich diese Spannungsspitze auch sehr unangenehm bemerkbar. Die Funkenstrecke ist erheblich länger als sie der angelegten Spannung entspricht. Die „Abschaltfunken“ müssen durch geeignete Maßnahmen unterdrückt werden, weil sie die Schalterkontakte verbrennen und Funkstörungen verursachen. Halbleiterbauelemente können von den Spannungsspitzen zerstört werden, wenn man sie nicht durch besondere Maßnahmen schützt. So werden Transistorschaltungen mit einer Schutzdiode ausgestattet, um nicht an die große Spannung zu gelangen.

3.2 Die Spule im Wechselstromkreis

Material und Schaltplan

- Spule 1 x (500 Windungen)
- Widerstand 1 x 10 Ω
- Steckplatte 40 mm x 30 mm

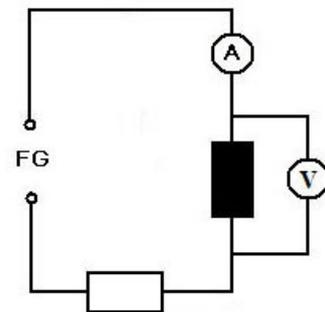


Abb.3.3: Schaltplan zur Spule im Wechselstromkreis

Aufbau

In Serie zu der Spule wird der Strom, parallel zur Spule die Spannung gemessen. Die Strommessung mit dem Oszilloskop erfolgt wie im Versuch 2.2.



Abb.3.4: Schaltung zur Spule im Wechselstromkreis

Beobachtung

Erst wird durch Spannungs- und Stromstärkemessung einer Gleichspannung der Widerstand der Spule berechnet: Bei einer Eingangsspannung von 0,5 V fließen 40 mA Strom und die Spannung an der Spule beträgt 0,06 V.

Danach wird bei variierender Frequenz und konstanter Stromstärke $I = 30 \text{ mA}$ die Spannung an der Spule gemessen:

f [Hz]	50	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
U [V]	0,1	0,21	0,4	0,58	0,78	0,98	1,19	1,37	1,57	1,77	1,98
f [Hz]	1100	1200	1300	1400	1500	1600	1700	1800	1900	2000	
U [V]	2,17	2,38	2,59	2,77	2,99	3,19	3,41	3,61	3,82	4,04	

Physikalischer Hintergrund

Erst soll der Widerstand dieser Spule berechnet werden:

Nach dem Ohmschen Gesetz (1.2) gilt: $R = \frac{U}{I} = \frac{0,06 \text{ V}}{0,04 \text{ A}} = 1,5 \Omega$

Wird eine Spule von einem Wechselstrom durchflossen, so wird ihr Magnetfeld in bestimmter zeitlicher Folge auf- und abgebaut.

In der ersten Viertelperiode eines sinusförmigen Wechselstromes erfolgt ein Aufbau des Magnetfeldes. In der zweiten Viertelperiode wird das Magnetfeld abgebaut. In der dritten Viertelperiode wird das Magnetfeld mit anderer Polung wieder aufgebaut, und während der vierten Viertelperiode erfolgt ein Abbau des Magnetfeldes.

Die Spulenspannung U_L ist immer dann am größten, wenn der Strom I durch Null geht.

Sie hat den Wert Null, wenn der Strom I seinen Höchstwert erreicht. Das bedeutet, dass zwischen der Spannung U_L und dem Strom I eine Phasenverschiebung von 90° besteht. Die Spannung eilt dem Strom um 90° voraus. Da dies nur für eine verlustfreie Spule gilt, kommt es bei den folgenden Abbildungen zu einer leichten Verzögerung.

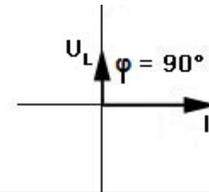


Abb.3.5: Zeigerdiagramm einer verlustfreien Spule

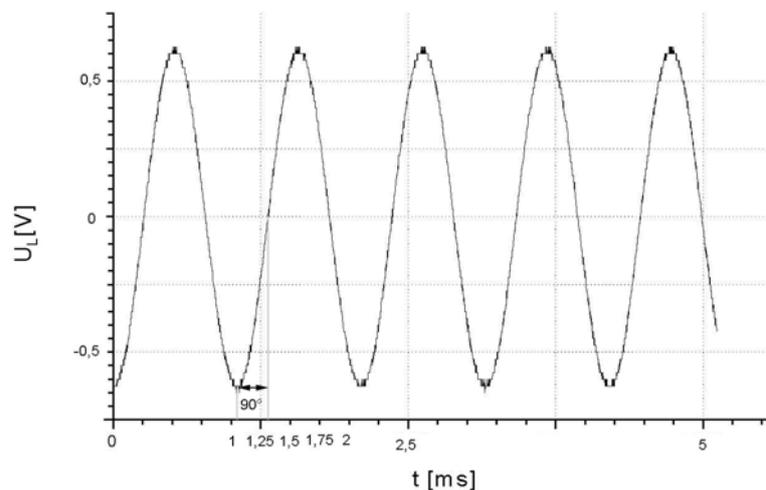


Abb.3.6: Spannung an der Spule

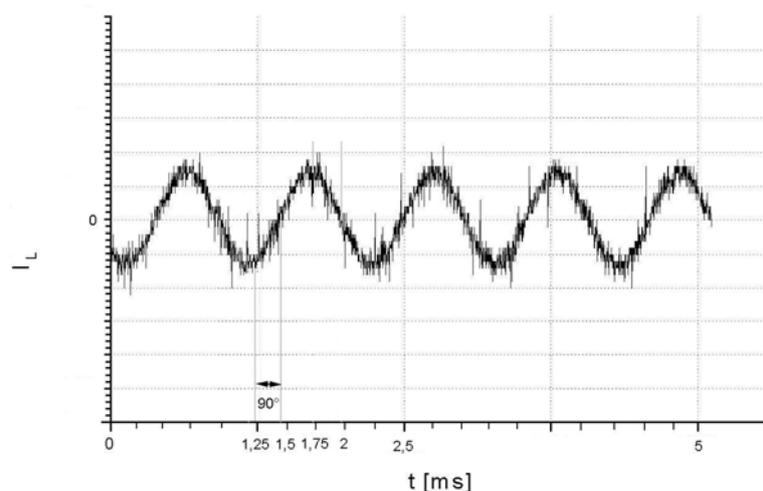


Abb.3.7: Stromfluss durch die Spule

Die Selbstinduktionsspannung einer Spule wirkt der Änderung ihrer Ursache entgegen. Die Spule hat somit eine Widerstandswirkung. Dieser wird induktiver Blindwiderstand (X_L) genannt:

$$X_L = \frac{U_L}{I}$$

$$X_L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L$$

$$X_L = \omega \cdot L$$

X_L ... induktiver Blindwiderstand

L ... Induktivität

f ... Frequenz

ω ... Kreisfrequenz

(3.5)

Aus der Messung ergeben sich für verschiedene Frequenzen verschiedene Widerstände:

f [Hz]	50	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
X_L [Ω]	3,3	7	13,3	19,3	26	32,7	39,7	45,7	52,3	59	66
f [Hz]	1100	1200	1300	1400	1500	1600	1700	1800	1900	2000	
X_L [Ω]	72,3	79,3	86,3	92,3	99,7	106,3	113,7	120,3	127,3	134,7	

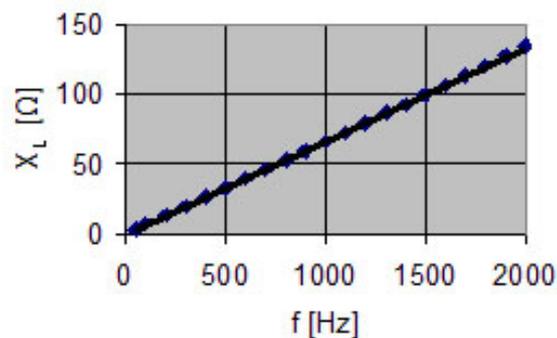


Abb.3.8: Abhängigkeit des induktiven Blindwiderstandes von der Frequenz

Die Induktivität der Spule entspricht nach der Gleichung 3.5 der Steigung der Geraden in Abb.3.8 gebrochen durch $2 \cdot \pi$.

Die Steigung der Geraden beträgt: $k = \frac{134,7}{2000} = 0,0674$

Damit wird L errechnet: $L = \frac{0,0674}{2 \cdot \pi} = 0,0107 \text{ H} \approx 11 \text{ mH}$. Der genaue Wert der

Induktivität dieser Spule beträgt 10 mH.

Auch bei Spulen gibt es Verluste, diese können bei vielen Spulen in der Praxis nicht vernachlässigt werden. Man erfasst die Verluste mit Hilfe eines so genannten Verlustwiderstandes R , den man sich mit einer verlustfreien Spule in Reihe geschaltet denkt. Für die Reihenschaltung von Verlustwiderstand und Spule ergibt sich das in Abb.3.10 dargestellte Zeigerdiagramm. Hätte die Spule keine Verluste, so wäre der Winkel $\delta = 0$.

$$\tan \delta = \frac{U_R}{U_L} = \frac{I \cdot R}{I \cdot X_L} \quad (3.6)$$

$$\tan \delta = \frac{R}{X_L}$$

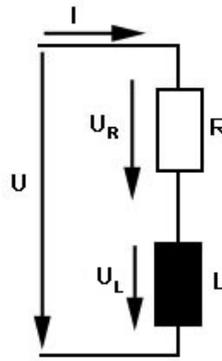


Abb.3.9: Ersatzschaltung einer verlustbehafteten Spule

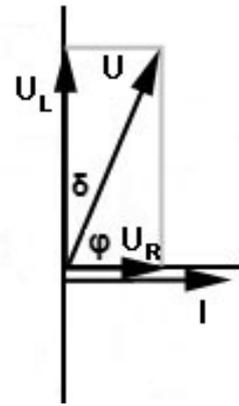


Abb.3.10: Zeigerdiagramm einer verlustbehafteten Spule

Je kleiner der $\tan \delta$ einer Spule ist, desto verlustärmer ist diese Spule. Der Kehrwert des $\tan \delta$ wird Güte Q genannt.

$$Q = \frac{1}{\tan \delta} = \frac{X_L}{R} \quad (3.7)$$

Reihenschaltung von Spulen:

Werden 3 Spulen in Reihe geschaltet, so entspricht dies drei in Reihe geschalteten induktiven Blindwiderständen.

$$X_{Lg} = X_{L1} + X_{L2} + X_{L3}$$

Mit Hilfe dieser Gleichung kann die Gesamtinduktivität abgeleitet werden.

$$X_{Lg} = X_{L1} + X_{L2} + X_{L3}$$

$$\omega \cdot L_g = \omega \cdot L_1 + \omega \cdot L_2 + \omega \cdot L_3$$

$$\omega \cdot L_g = \omega \cdot (L_1 + L_2 + L_3)$$

Für eine beliebige Anzahl n in Reihe geschalteter Spulen gilt somit:

$$L_g = \sum_{i=1}^n L_i \quad (3.8)$$

Bei der Reihenschaltung von Spulen ist die Gesamtinduktivität gleich der Summe der Einzelinduktivitäten.

Dies gilt nur, wenn die Spulen untereinander keine magnetische Kopplung haben, d.h., wenn keine Spule vom Magnetfeld der anderen Spule durchsetzt wird.

Parallelschaltung von Spulen:

Der Gesamtwiderstand von drei parallel geschalteten Spulen lässt sich mit folgender Gleichung berechnen.

$$\frac{1}{X_{L_g}} = \frac{1}{X_{L_1}} + \frac{1}{X_{L_2}} + \frac{1}{X_{L_3}}$$

Aus dieser Beziehung ergibt sich die Gesamtinduktivität L_g .

$$\frac{1}{\omega \cdot L_g} = \frac{1}{\omega \cdot L_1} + \frac{1}{\omega \cdot L_2} + \frac{1}{\omega \cdot L_3}$$

$$\frac{1}{\omega \cdot L_g} = \frac{1}{\omega} \left(\frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \frac{1}{L_3} \right)$$

Für eine beliebige Anzahl n parallel geschalteter Spulen gilt somit:

$$\frac{1}{L_g} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{L_i} \tag{3.9}$$

3.3 RL – Glied

Material und Schaltplan

- Spule 1 x (500 Windungen)
- Widerstand 1 x 43 Ω
- Steckplatte 55 mm x 35 mm

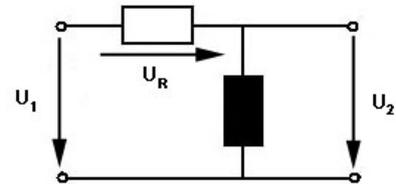


Abb.3.11: Schaltplan zum RL - Glied

Aufbau

Bei U_1 wird die gewünschte Spannung angelegt und bei U_2 wird die Ausgangsspannung gemessen.

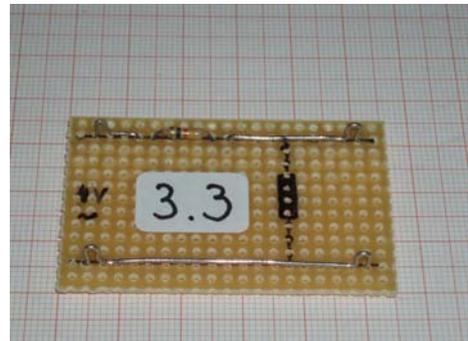


Abb.3.12: Schaltung zum RL - Glied

Beobachtung

Wird an U_1 eine sinusförmige Wechselspannung von 4 V angelegt, so entnimmt man bei U_2 bei variierender Frequenz von U_1 folgende Spannungswerte:

f [Hz]	0	50	100	200	300	400	500	600	700	800	900
U_2 [V]	0	0,35	0,61	1,13	1,62	2,04	2,36	2,66	2,86	3,06	3,19
f [Hz]	1000	1100	1200	1300	1400	1500	1600	1700	1800	1900	2000
U_2 [V]	3,31	3,44	3,53	3,55	3,65	3,68	3,71	3,77	3,83	3,85	3,93

Physikalischer Hintergrund

Allgemeines zur Reihenschaltung von R und L

Wird die Reihenschaltung von R und L von einem Wechselstrom durchflossen, so liegt an R die Spannung U_R und an L die Spannung U_L . U_R liegt mit I in Phase, U_L eilt dem Strom um 90° voraus (Abb.3.6 und Abb.3.7). Für die Gesamtspannung gilt die Gleichung (Abb.3.10):

$$U = \sqrt{U_R^2 + U_L^2} \quad (3.10)$$

Wird der Spannungszeiger durch den Strom I geteilt, so erhält man den Widerstandszeiger.

$$\frac{U_R}{I} = R, \quad \frac{U_L}{I} = X_L, \quad \frac{U}{I} = Z \quad (3.11)$$

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2}$$

Die Gleichung für den Phasenwinkel φ kann aus dem Zeigerdiagramm abgelesen werden:

$$\tan \varphi = \frac{U_L}{U_R} = \frac{X_L}{R} \quad (3.12)$$

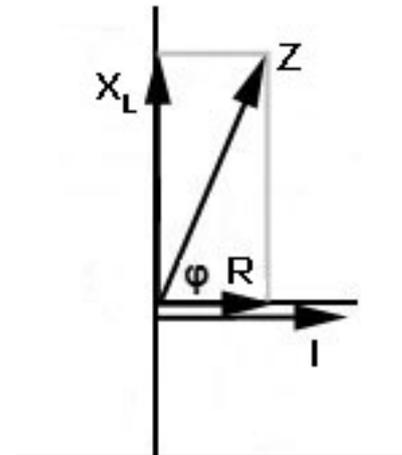


Abb.3.13: Zeigerdiagramm der Widerstände einer Reihenschaltung von R und L

RL – Glied

Eine Schaltung, bei der im Längszweig ein Widerstand und im Querzweig eine Spule liegt, wird RL – Glied genannt. Der ohmsche Widerstand der Spule soll vernachlässigbar klein sein.

Aus den gemessenen Daten kann folgendes Diagramm erstellt werden:

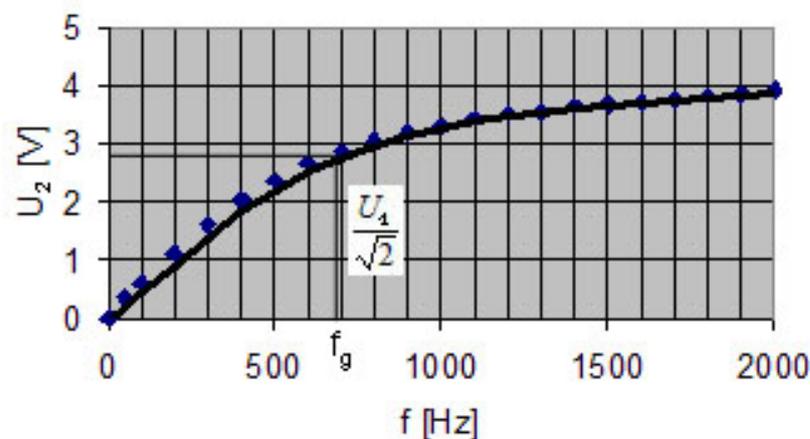


Abb.3.14: Abhängigkeit der Ausgangsspannung von der Frequenz beim RL - Glied

Bei hohen Frequenzen hat die Spule einen großen Widerstand X_L . Die Spannung an L wird wesentlich größer sein als die Spannung an R.

Bei tiefen Frequenzen ist der Widerstand der Spule sehr gering. Die Ausgangsspannung U_2 ist fast Null. Das heißt, dass das RL – Glied ein Hochpass ist.

Die Grenzfrequenz f_g eines RL – Gliedes liegt bei dem Spannungswert $U_2 = \frac{U_1}{\sqrt{2}}$. Aus dem Diagramm

(Abb.3.14) liest man damit eine Grenzfrequenz von etwa 690 Hz ab. Bei der Grenzfrequenz müssen die Beträge von U_2 und U_R gleich sein. Das Zeigerdiagramm der Spannungen ist in Abb.3.15 dargestellt.

Aus der Beziehung $U_L = U_R$ kann die Grenzfrequenz errechnet werden:

$$U_L = U_R$$

$$X_L = R$$

$$2 \cdot \pi \cdot f_g \cdot L = R \quad (3.13)$$

$$f_g = \frac{R}{2 \cdot \pi \cdot L}$$

Rechnerisch erhält man für die Grenzfrequenz dieser Schaltung:

$$f_g = \frac{43 \Omega}{2 \cdot \pi \cdot 10 \text{ mH}} = 684,4 \text{ Hz}$$

Bei der Grenzfrequenz beträgt die Phasenverschiebung zwischen U_1 und U_2 45° . Dabei läuft U_2 der Spannung U_1 voraus, im Gegensatz zum RC – Glied (Versuch 2.5), bei dem es sich umgekehrt verhält.

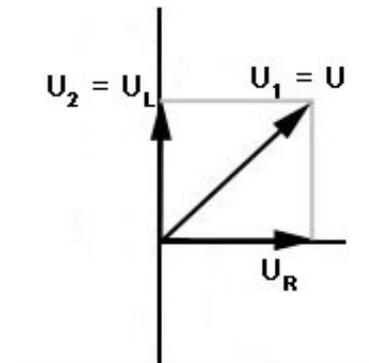


Abb.3.15: Zeigerdiagramm der Spannungen eines RL – Gliedes bei Grenzfrequenz

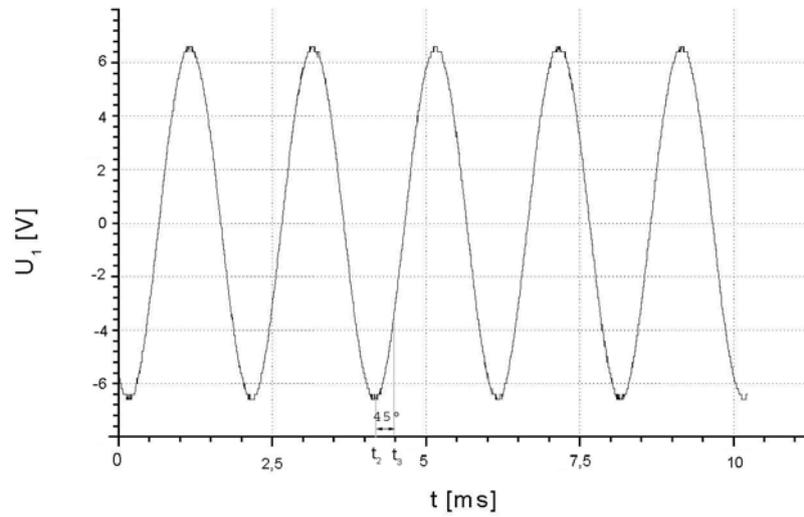


Abb.3.16: Eingangsspannung RL - Glied

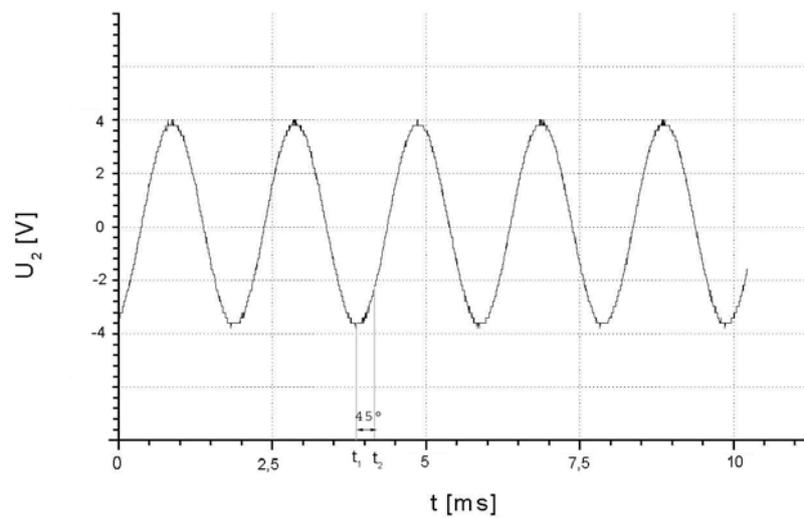


Abb.3.17: Ausgangsspannung RL - Glied

3.4 LR – Glied

Material und Schaltplan

- Spule 1 x (500 Windungen)
- Widerstand 1 x 43 Ω
- Steckplatte 55 mm x 40 mm

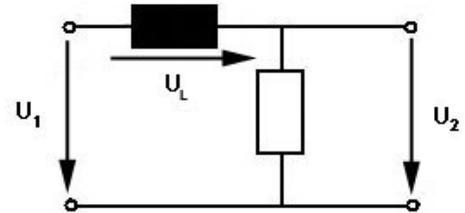


Abb.3.18: Schaltplan zum LR - Glied

Aufbau

Bei U_1 wird die gewünschte Spannung angelegt und bei U_2 wird die Ausgangsspannung gemessen.

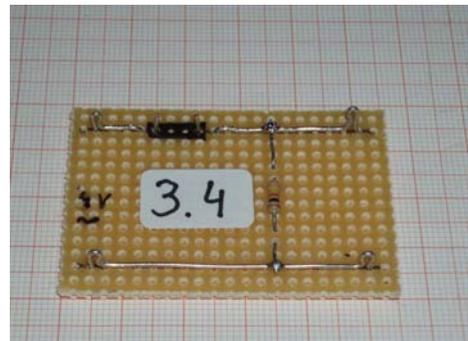


Abb.3.19: Schaltung zum LR - Glied

Beobachtung

Wird an U_1 eine sinusförmige Wechselspannung von 4 V angelegt, so entnimmt man bei U_2 bei variierender Frequenz von U_1 folgende Spannungswerte:

f [Hz]	0	50	100	200	300	400	500	600	700	800	900
U_2 [V]	4	4	4	4	3,98	3,71	3,45	3,10	2,87	2,72	2,50
f [Hz]	1000	1200	1300	1400	1500	1600	1700	1800	1900	2000	
U_2 [V]	2,35	2,06	1,94	1,82	1,7	1,63	1,51	1,46	1,38	1,29	

Physikalischer Hintergrund

Vertauscht man bei einem RL – Glied die Bauteile in Längs- und Querzweig, so erhält man ein LR – Glied. Bei tiefen Frequenzen ist der Widerstand der Spule sehr gering. Am Ausgang liegt fast die volle Eingangsspannung $U_2 \approx U_1$.

Bei hohen Frequenzen ist der Widerstand der Spule sehr groß. Die Ausgangsspannung U_2 ist nahezu Null. $U_2 \approx 0$

Somit ist das LR – Glied ein Tiefpass.

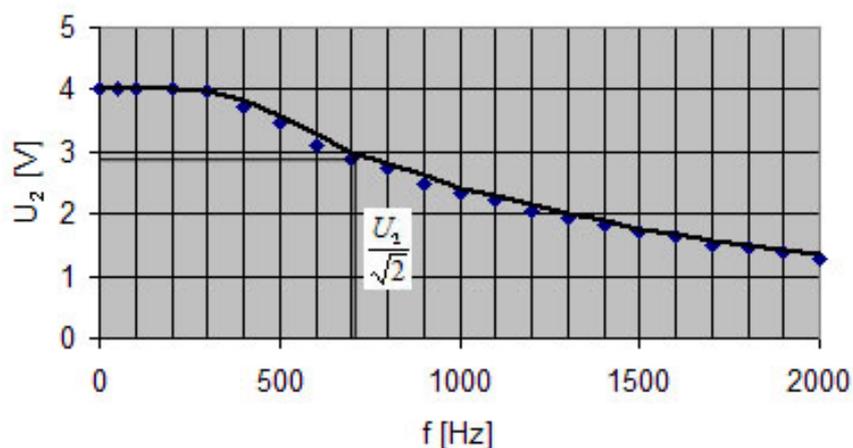


Abb.3.20: Abhängigkeit der Ausgangsspannung von der Frequenz beim LR - Glied

Aus dem obigen Diagramm (Abb.3.20) kann man eine Grenzfrequenz knapp über 700 Hz ablesen.

Bei der Grenzfrequenz sind die Beträge von U_L und U_R wiederum gleich. Aus dieser Bedingung ergibt sich die gleiche Formel zur Bestimmung der Grenzfrequenz, die auch für das RL – Glied gefunden wurde.

$$f_g = \frac{R}{2 \cdot \pi \cdot L} \quad (3.13)$$

Rechnerisch erhält man wie beim LR – Glied die Grenzfrequenz von $f_g = 684,4$ Hz.

Bei der Grenzfrequenz besteht zwischen U_1 und U_2 eine Phasenverschiebung von 45° . Dabei läuft U_1 der Spannung U_2 voraus, im Gegensatz zum CR – Glied (Versuch 2.6), bei dem es sich umgekehrt verhält.

Die vertauschten Rollen der Spannungen im Vergleich zum RL – Glied (Versuch 3.3) lassen sich dadurch erklären, dass der Anschluss des Oszilloskops in diesem Versuch nach der Spule und im vorigen Versuch nach dem Widerstand erfolgte und somit die Spule nachgeschaltet wurde.

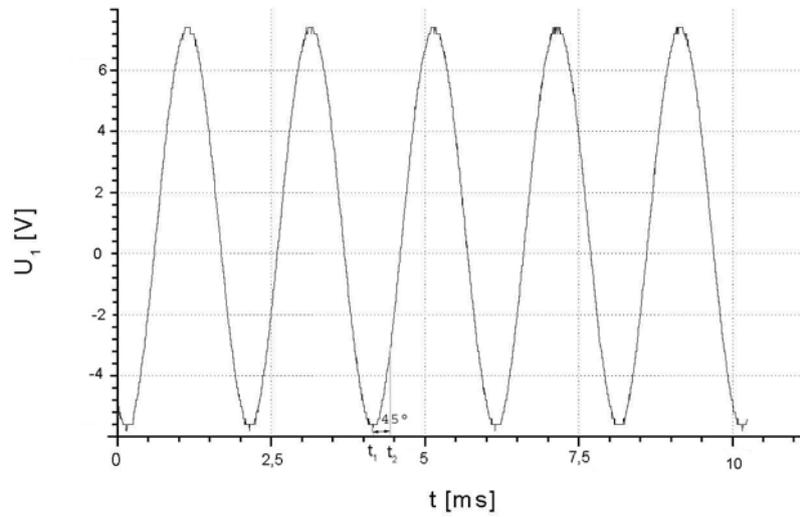


Abb.3.21: Eingangsspannung LR - Glied

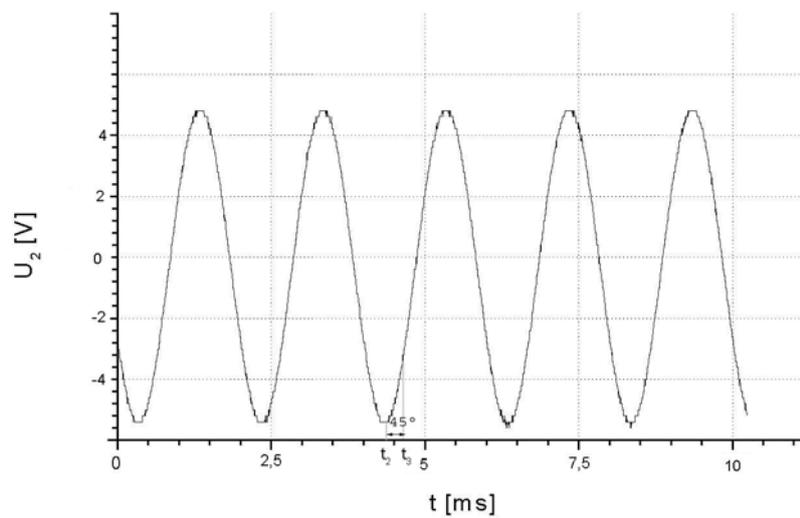


Abb.3.22: Ausgangsspannung LR - Glied

4. Halbleiter

Im Folgenden sollen Eigenschaften und Funktionsweisen von Halbleitern bzw. Halbleiterbauelementen besprochen werden. Dieses Kapitel behandelt Dioden-, Transistor-, und logische Schaltungen.

4.1 Polprüfer

Material und Schaltplan

- Widerstand 1 x 1 k Ω
- Leuchtdioden 2 x (rot, grün)
- Steckplatte 50 mm x 35 mm

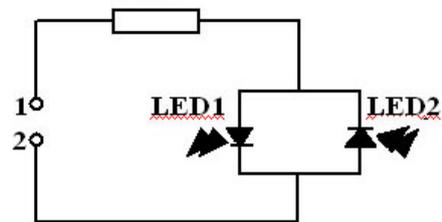


Abb.4.1: Schaltplan zum Polprüfer

Aufbau

Die zwei verschieden färbigen Leuchtdioden werden nach dem Vorwiderstand parallel geschlossen.

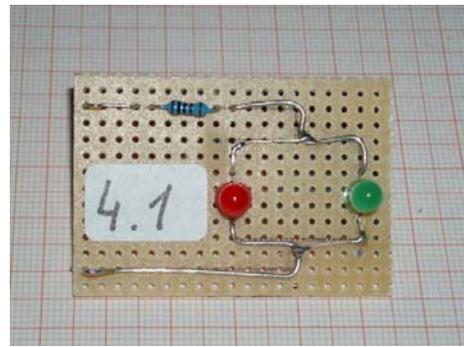


Abb.4.2: Schaltung zum Polprüfer

Beobachtung

Beim Anlegen einer Gleichspannung brennt immer nur eine der Leuchtdioden, abhängig davon, wo der + und der – Pol angeschlossen ist. Wird der + Pol an 1 angeschlossen, so brennt LED1 (rot). Wird der – Pol an 1 angeschlossen, so brennt die grüne Leuchtdiode (LED2).

Beim Anlegen einer Wechselfspannung blinken die Leuchtdioden abwechselnd, wobei die Leuchtdauer der einzelnen LEDs jeweils gleich lang ist. Sie wird um so größer, je kleiner die Frequenz der Wechselfspannung ist.

Physikalischer Hintergrund

Um die Funktionsweise dieser Schaltung bzw. von Halbleiterbauelementen erklären zu können, sind die physikalischen Grundlagen von Halbleitern und der Ladungstransport in Halbleiterkristallen notwendig.

Halbleiter leiten elektrischen Strom besser als Nichtleiter, aber schlechter als Leiter, und nehmen eine Stellung zwischen Isolator kristallen und Metallen ein. Halbleiterkristalle sind bei tiefen Temperaturen Isolatoren, bei hohen jedoch Leiter.

Der für die Elektronik wichtigste Halbleiterstoff ist das Silizium.

Für die Herstellung von Halbleiterbauelementen werden die reinen Siliziumkristalle dotiert. Das heißt, es werden gezielt Fremdatome in geringer Zahl in das Kristallgitter eingebracht um die Leitfähigkeit zu beeinflussen.

Man unterscheidet zwei Arten von Fremdatomen:

- Donatoren: besitzen im Kristallverband ein Elektron zu viel, sodass im Kristall bewegliche, negative Ladungsträger vorhanden sind.
- Akzeptoren: Binden jeweils ein Elektron aus dem Halbleiterkristall, sodass diesem negative Ladungsträger fehlen (Fehlstelle, Loch). Eine Fehlstelle entspricht einer positiven Elementarladung und ist im Kristall beweglich (p - leitend).

Aufbau eines Halbleiterkristalls:

Die Valenzelektronen stellen eine Bindung zu den Nachbarn her. Jedes Elektron ist bestrebt seine Elektronenschale aufzufüllen, sodass sie mit Valenzelektronen von Nachbaratomen eine Bindung herstellen (Valenzbindung). Die Elektronen werden somit von mehreren Atomen benutzt.

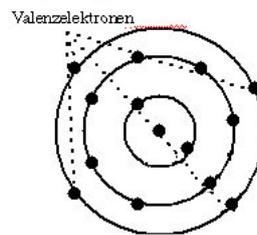


Abb.4.3:
Valenzelektronen des
Si - Atoms

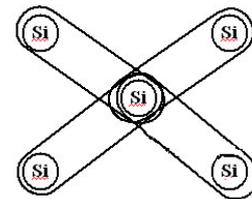


Abb.4.4: Bindung des Si –
Atoms mit Nachbaratomen

Jede Halbleiterstruktur besitzt eine geringe Eigenleitfähigkeit. Diese ist unter anderem abhängig von:

- Reinheitsgrad
- Vorhandenen freien Elektronen
- Temperatur

Die Ursachen für die Eigenleitfähigkeit sind:

- Restliche Verunreinigungen (Fremdatome)
- Aufbrechen von Kristallverbindungen durch Wärmeeinwirkung
- Fehlende Bindungsmöglichkeiten der Randatome (Oberflächenleitfähigkeit)

n - Silizium

Wird Silizium mit negativen Ladungsträgern übersättigt, beinhaltet es in seiner Struktur Elektronen, die keine feste Bindung zu einem Nachbaratom eingehen können, da alle Schalen besetzt sind. Diese Elektronen stehen als freie Ladungsträger zur Verfügung. Bei der Herstellung erhält hochreines Silizium einen Elektronenüberschuss, indem gezielt mit 5-wertigem Material (Phosphor, Arsen) dotiert wird.

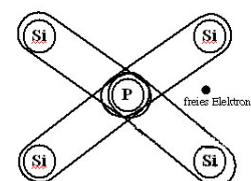


Abb.4.5: n - Silizium

Dabei können vier Elektronen Bindungen eingehen, das fünfte Elektron bleibt frei und kann sich im Kristall relativ frei bewegen. Diese Elektronen stellen die negativen Ladungen dar. Daraus folgt, je höher die Dotierung ist, desto niederohmiger ist das Material. Wird eine äußere Spannung an diesen Kristall gelegt, so bewegen sich die freien Ladungsträger (Elektronen) zum Pluspol.

p - Silizium

Durch gezieltes Dotieren mit 3 - wertigem Material (Aluminium, Gallium) erzeugt man im Silizium einen Elektronenmangel (Löcherüberschuss). Dabei gehen die Elektronen in Bindung, an einer Stelle fehlt nun jedoch ein Elektron, sodass ein Loch entsteht. Dies bedeutet einen positiven Ladungsüberschuss.

Die Löcher sind analog den Leitungselektronen im Material frei beweglich und stellen somit positive Ladungsträger dar. Auch hier steigt mit der Dotierung die Leitfähigkeit.

Legt man eine elektrische Spannung an, hüpfen die Elektronen von Loch zu Loch, sodass die Löcher sich zum Minuspol bewegen.

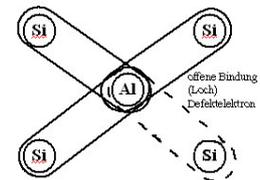


Abb.4.6:p - Silizium

pn - Übergang

Werden zwei unterschiedlich dotierte Gebiete eines Halbleiterkristalls räumlich zusammengebracht, so entsteht eine Grenzschicht mit speziellen elektronischen Eigenschaften.

pn - Übergang ohne äußere Spannung

Durch die Wärmeanregung des Kristallgitters wandern freie Elektronen des n - dotierten Gebietes in das p - dotierte Gebiet. Das heißt, freie Elektronen diffundieren vom n - leitenden Gebiet in den p - leitenden Bereich und Fehlstellen vom p - leitenden in den n - leitenden Teil. Die Dotierungsatome werden dadurch zu Ionen und es kommt zu einer Bildung einer Raumladungszone. Die Breite dieser ist temperaturabhängig.

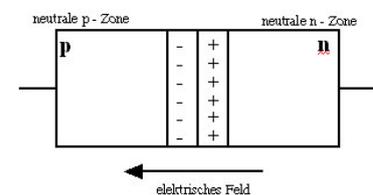


Abb.4.7: pn - Übergang ohne äußere Spannung

Durch den Potentialunterschied entsteht ein elektrisches Feld. Alle Ladungsträger bewegen sich der Feldrichtung und ihrer Ladungen entsprechend, sodass diese Zone an Ladungsträger verarmt und nicht mehr leitfähig ist (Sperrschicht). Durch die Ladungsträgerdiffusion bildet sich daher eine so genannte Diffusionsspannung.

pn -Übergang mit äußerer Spannung

Hier werden zwei Fälle unterschieden:

- Minuspol an der p - dotierten Zone:
Das innere elektrische Feld wird verstärkt und die Sperrschicht vergrößert sich. Die Sperrwirkung wird größer, so dass (fast) kein Strom fließt. Je größer die Spannung, desto breiter wird die Raumladungszone und ein elektrisches Feld wird aufgebaut.

- Minuspol an der n - dotierten Zone:
Das innere elektrische Feld wird geschwächt und die Sperrichtung abgebaut. Die Sperrwirkung verschwindet, sodass ein starker Strom fließen kann (Durchlassrichtung). Der Strom fließt allerdings erst nach Überwinden der Diffusionsspannung.

Ein elektronisches Bauelement mit einem n – leitenden und einem p – leitenden Bereich sowie einem pn – Übergang heißt Diode. Allgemein nennt man Bauelemente, die p – und n – leitende Bereiche enthalten, bipolar. Zwischen den beiden Anschlüssen der Diode ergibt sich

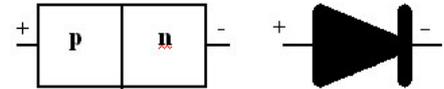


Abb.4.8: Diode

somit für Gleichstrom eine Durchlassrichtung und eine Sperrichtung (Ventilwirkung). Wird der Pluspol bei 1 angeschlossen, so ist die rote Leuchtdiode (LED1) in Durchlassrichtung geschaltet und brennt daher. Die grüne wird in diesem Fall hochohmig und wirkt wie ein offener Schalter. Werden die Anschlüsse vertauscht, so vertauschen auch die Leuchtdioden ihre Aufgaben.

Beim Wechselstrom ändert die Spannung periodisch ihre Polarität und ihre Größe. Folglich ändert der Elektronenstrom ständig die Richtung und damit werden die beiden Leuchtdioden abwechselnd in Durchlassrichtung bzw. in Sperrichtung betrieben. Wird die Frequenz erhöht, so wird das Blinken der Leuchtdioden kürzer, da die Polarität schneller wechselt.

Beobachtet man das Wechselstromverhalten einer Leuchtdiode (Diode), so kann nur eine Halbwelle des Wechselstroms die Diode passieren. Der andere Teil wird auf die Spannung Null „abgeglättet“. Daraus ergeben sich eine pulsierende Gleichspannung und die Gleichrichterwirkung der Diode.

4.2 Kennlinie einer Diode

Material und Schaltplan

- Widerstände 1 x 500 Ω
- Diode 1 x
- Steckplatte 45 mm x 35 mm

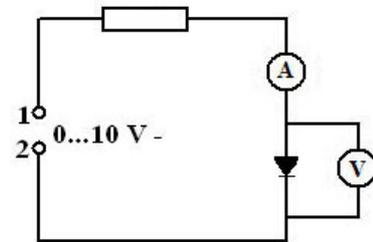


Abb.4.9: Schaltplan zur Kennlinie einer Diode

Aufbau

Hier wird ein einfacher Stromkreis aus einer veränderbaren Spannungsquelle, einem Schutzwiderstand und einer Halbleiterdiode gebaut. Mit den Messgeräten werden die an der Diode anliegende Spannung und der durchfließende Strom gemessen.

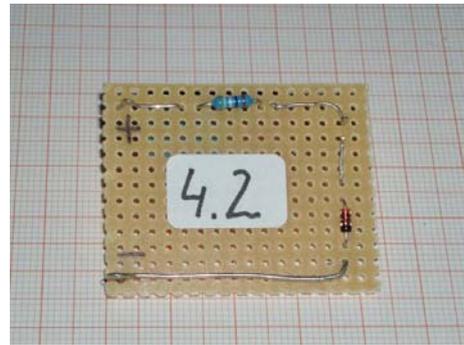


Abb.4.10: Schaltung zur Kennlinie einer Diode

Beobachtung

Erst wird beim Anschluss 1 der Pluspol angeschlossen. Die Diode wird in Durchlassrichtung betrieben und folgende Werte werden abgelesen:

U_F [V]	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
I [mA]	0	0,08	0,15	0,25	0,35	0,62	1,75	9	30

Wird nun der Pluspol an Anschluss 2 angebracht, so wird die Diode in Sperrichtung betrieben. Dabei wird bei kleinen Spannungswerten kein Stromfluss verzeichnet.

Physikalischer Hintergrund

Das $I - U$ Diagramm einer Halbleiterdiode heißt Kennlinie. Aus deren Verlauf können wichtige Eigenschaften des Bauteils herausgelesen werden. Der Durchlassstrom steigt bei kleinen positiven Spannungen auf hohe Werte an. Er darf einen bestimmten Maximalwert nicht überschreiten, da die Diode sonst thermisch zerstört wird. Ein Wertepaar (U/I) wird Arbeitspunkt genannt.

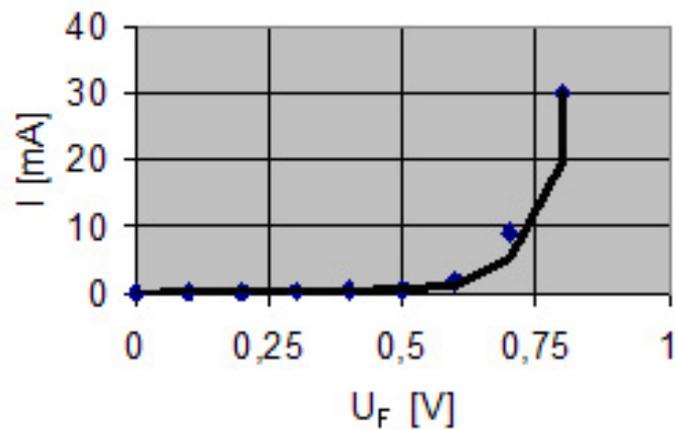


Abb.4.11: Kennlinie der Diode

Den Gleichstromwiderstand der Halbleiterdiode in diesem Arbeitsbereich erhält man als Steigung der Tangente an die Kennlinie in diesem Punkt. Üblicherweise nähert man eine Tangente durch eine Sekante an, die man mit Hilfe einer zweiten Spannungs-/Strommessung in der Nähe des Arbeitspunktes bestimmt. Zur Bestimmung der Steigung verwendet man die Spannungs- und Stromdifferenz ΔU und ΔI . Daher bezeichnet man den Gleichstromwiderstand auch als differentiellen Widerstand r . Der Gleichstromwiderstand ist vom Arbeitspunkt abhängig.

$$r = \frac{\Delta U}{\Delta I} \quad (1.3)$$

4.3 Einweg Gleichrichterschaltung

Material und Schaltplan

- Widerstand 1 x 1 k Ω
- Diode 1 x
- Schalter 2 x
- Kondensator 1 x 1 μ F
- Steckplatte 80 mm x 70 mm

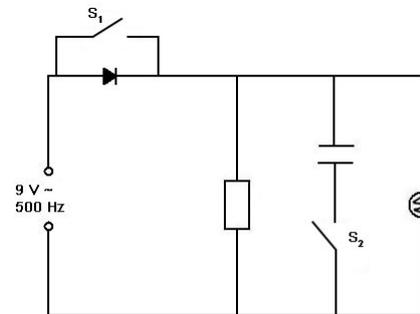


Abb.4.12: Schaltplan zur Gleichrichterwirkung einer Diode

Aufbau

Durch den Einbau der beiden Schalter wird verdeutlicht, welche Aufgaben die einzelnen Bauelemente besitzen. Mit S_1 kann die Diode umgangen werden, mit S_2 wird der Kondensator dazu geschaltet. Mit dem Funktionsgenerator wird der Stromkreis mit einer Eingangswechselspannung U_1 gespeist und mit dem Oszilloskop oder einem Spannungsmessgerät wird der Verlauf der Ausgangsspannung (U_2) parallel zum Widerstand bzw. Kondensator aufgezeichnet.

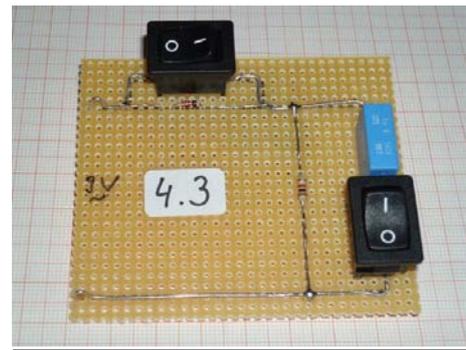


Abb.4.13: Schaltung zur Gleichrichterwirkung einer Diode

Beobachtung

Wird an die Schaltung eine sinusförmigen Wechselspannung von 9 V (U_{eff}) und 500 Hz (bei der Beobachtung mit dem analogen Spannungsmessgerät muss eine kleinere Frequenz verwendet werden) angelegt, so wird bei den verschiedenen Schalterstellungen folgendes beobachtet:

S_1 geschlossen und S_2 geschlossen:

Diese Schalterstellung entspricht der Schaltung des Kondensators im Wechselstromkreis (2.2).

S_1 geschlossen und S_2 offen:

Der Zeiger des analogen Messgerätes schlägt nach beiden Seiten aus.

S_1 offen und S_2 offen:

Der Zeiger des Messgerätes schlägt nur in eine Richtung aus, wobei er in der Mittelstellung länger verweilt.

S_1 offen und S_2 geschlossen:

Der Zeiger schwankt periodisch leicht vom Höchstwert ab.

Physikalischer Hintergrund

S₁ geschlossen und S₂ offen:

Der Stromkreis unterliegt der Eingangsspannung, bei der es sich um eine sinusförmige Wechselspannung handelt. Die Halbleiterdiode und der Kondensator spielen in diesem Fall keine Rolle, da sie umgangen werden.

S₁ offen und S₂ offen:

Nun fließt der Strom durch die Halbleiterdiode, nicht aber durch den Kondensator. Die Halbleiterdiode lässt den Wechselstrom in einer Richtung durch und sperrt ihn in die andere Richtung. Sie wirkt wie ein Stromventil. Die Halbleiterdiode ist deshalb das geeignete Bauelement zur Gleichrichtung von Wechselströmen.

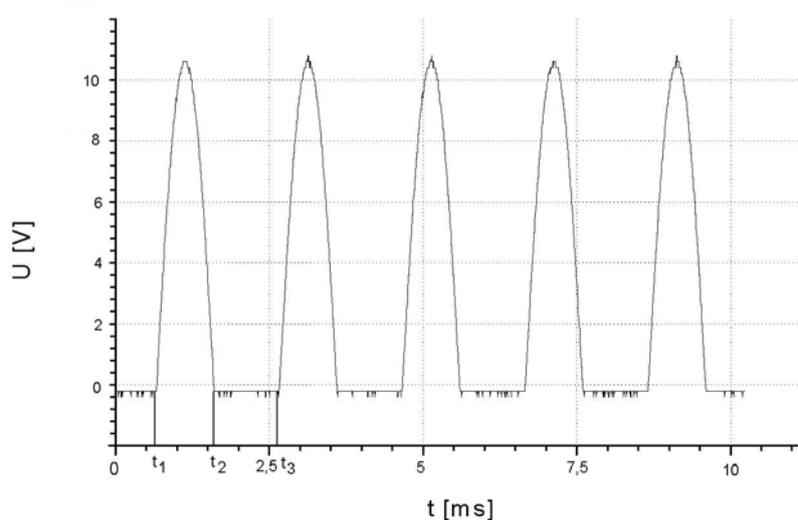


Abb.4.14: Oszilloskopaufzeichnung, wenn S₁ und S₂ geöffnet

Am Eingang liegt die Wechselspannung U_1 an. In der Zeit von t_1 bis t_2 hat die Kathode der Halbleiterdiode einen positiven Spannungswert gegenüber der Anode und ist damit in Durchlassrichtung geschaltet. Es fließt ein Strom I , dessen Größe durch den Verlauf der Spannung U_1 und durch den Lastwiderstand bestimmt ist. Am Widerstand fällt die Spannung ab, deren Verlauf dem Stromverlauf entspricht. An der Diode liegt in der Zeit von t_1 bis t_2 nur eine sehr kleine Spannung an ($U_D \approx 0,8 \text{ V}$).

In jedem Augenblick muss folgendes gelten:

$$U_1 = U_D + U_2$$

Wenn man U_D vernachlässigt, so ist $U_1 = U_2$.

Von t_1 bis t_2 schlägt der Zeiger des analogen Spannungsmessgerätes aus.

In der Zeit von t_2 bis t_3 hat die Kathode gegenüber der Anode ein negatives Potential. Die Diode ist jetzt in Sperrrichtung geschaltet. Ihr Widerstand ist sehr groß, sie lässt praktisch keinen Strom fließen. In diesem Zeitraum ist I gleich Null und damit ist auch U_2 gleich Null. In jedem Augenblick liegt nun der Eingangsspannungswert voll an der Diode:

$$U_1 = U_D \text{ und } U_2 = 0$$

Zusammenfassend lässt die hier gegebene Gleichrichterschaltung die positive Halbwelle der Wechselspannung durch und sperrt die negative Halbwelle.

Die Ausgangsspannung U_2 ist noch keine Gleichspannung. Ihr Verlauf besteht aus lauter positiven Halbwellen. Eine solche Spannung heißt Mischspannung. Sie enthält neben dem Gleichspannungsanteil noch Wechselspannungsanteile.

S_1 offen und S_2 geschlossen:

Wird nun S_2 geschlossen, so wird er Kondensator dazugeschaltet und dieser übernimmt die Aufgabe, dass die Wechselspannungsanteile, die bei geöffnetem S_2 vorhanden sind, geglättet werden.

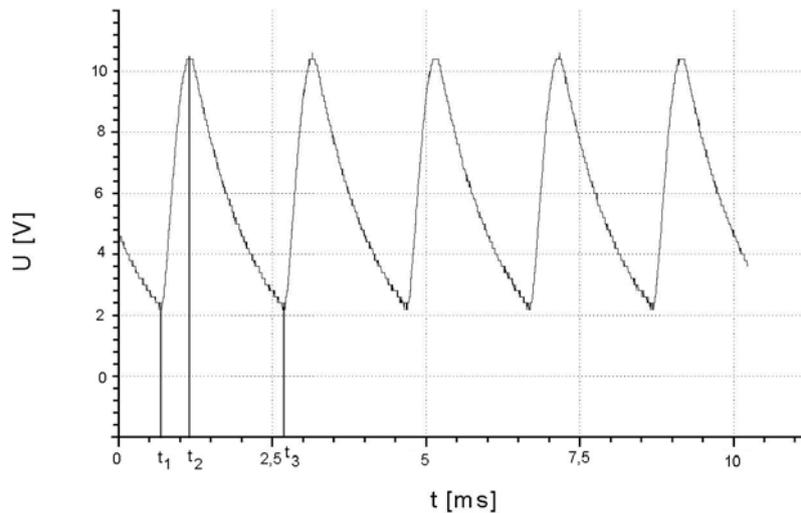


Abb.4.15: Oszilloskopaufzeichnung, wenn S_1 geöffnet und S_2 geschlossen

Solange die Diode leitet, zwischen t_1 und t_2 , wird der Kondensator aufgeladen. Zwischen t_2 und t_3 sperrt die Diode und in dieser Zeit entlädt sich der Kondensator, wodurch die Spannung bis auf Schwankungen aufrecht erhalten wird. In diesem Fall schwankt der Zeigerausschlag des Spannungsmessgerätes.

4.4 Brücken - Zweiweg - Gleichrichterschaltung

Material und Schaltplan

- Leuchtdioden 5 x
- Widerstand 1 x 500 Ω
 1 x 1 k Ω
- Kondensator 2 x (100 μ F)
- Steckplatte 80 mm x 60 mm

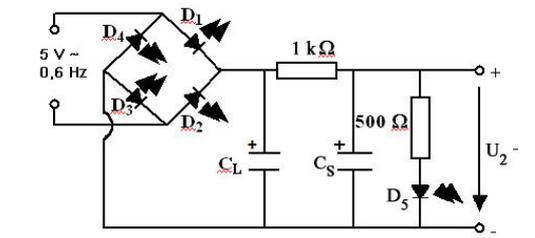


Abb.4.16: Schaltplan zur Brücken – Zweiweg – Gleichrichterschaltung

Aufbau

Diese Schaltung besteht aus zwei Stromkreisen.

Der erste ist jener mit den vier Leuchtdioden, an denen der Funktionsgenerator angeschlossen ist.

Der zweite Kreis ist durch das Siebglied und durch eine Leuchtdiode mit Vorwiderstand gekennzeichnet.

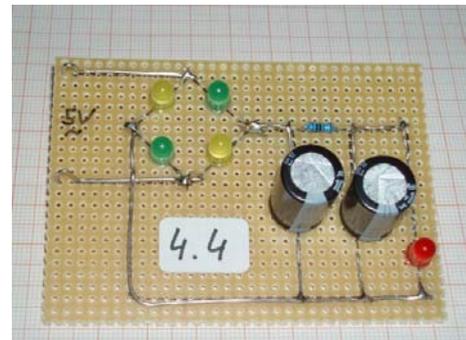


Abb.4.17: Schaltung zur Brücken – Zweiweg - Gleichrichterschaltung

Beobachtung

Beim Anlegen der Wechselspannung leuchten abwechselnd D_1 und D_3 bzw. D_2 und D_4 . D_5 leuchtet durchgehend mit kleinen Helligkeitsschwankungen.

Physikalischer Hintergrund

Während der positiven Halbwelle der Eingangsspannung (U_1) sind die Dioden D_1 und D_3 in Durchlassrichtung geschaltet. Es fließt der Strom I_1 .

Während der negativen Halbwelle der Eingangsspannung sind die Dioden D_2 und D_4 in Durchlassrichtung geschaltet. Es fließt der Strom I_2 . I_1 und I_2 durchfließen den zweiten Kreis in gleicher Richtung. Sie bilden zusammen den Strom I . Nach dem ersten Kreis liegt noch eine Mischspannung an. Ihr Wechselspannungsanteil wird nun durch das Nachschalten einer RC - Siebkette vernichtet.

Der Kondensator C_L wirkt als Ladekondensator. Er wird durch die positiven Halbwellen aufgeladen und gibt seine Ladung bei abnehmender Spannung ab. Der Kondensator C_S bildet mit dem 1 k Ω Widerstand einen frequenzabhängigen Spannungsteiler. Für Wechselspannungsanteile hat C_S einen geringen Widerstand, sie werden durch C_S praktisch kurzgeschlossen. C_S sperrt aber den Gleichstrom, sodass am Ausgang der Siebkette die Gleichspannung U_2 anliegt, was auch durch das konstante Leuchten von D_5 visuell veranschaulicht wird.

U_2 ist aber noch keine hundertprozentige Gleichspannung. Eine kleine Restwelligkeit lässt sich nicht vermeiden. Man kann die Restwelligkeit aber auf einen unmerkbar kleinen Wert herabrücken. Im Allgemeinen gilt:
Je größer die Kapazität der Kondensatoren C_L und C_S gemacht werden und je kleiner der der Siebkette entnommene Laststrom ist, desto kleiner ist die Restwelligkeit.

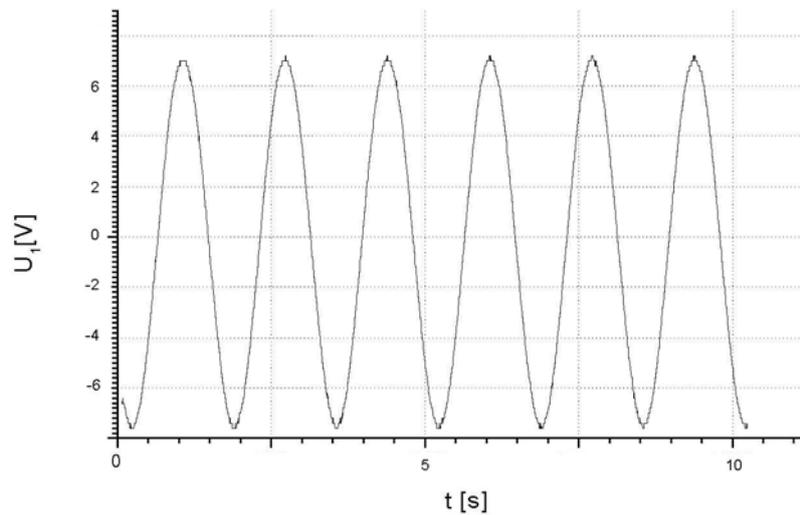


Abb.4.18: Eingangsspannung bei der Brücken – Zweiweg - Gleichrichterschaltung

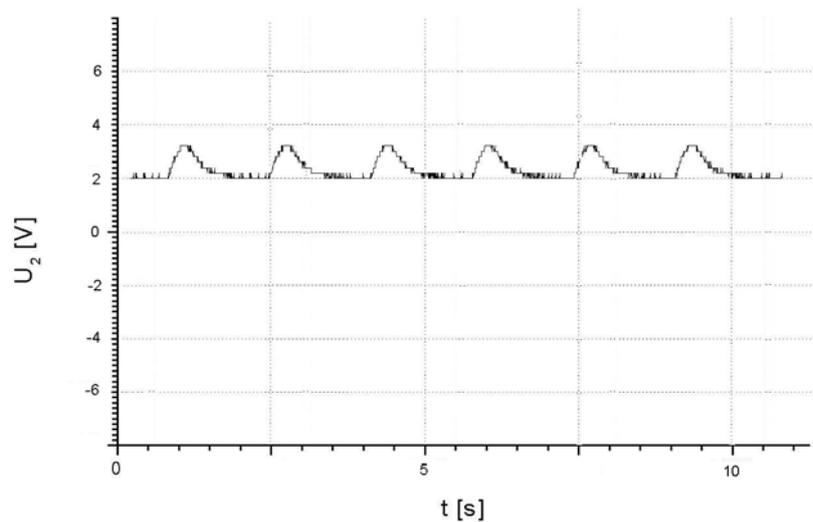


Abb.4.19: Ausgangsspannung bei der Brücken – Zweiweg - Gleichrichterschaltung

5. Der Transistor

Mit den folgenden Schaltungen soll der Aufbau und die Wirkungsweise von Transistoren vorgeführt werden.

Der Transistor ist im Prinzip ein elektrisch steuerbarer Halbleiterwiderstand. Daraus ergeben sich für die Elektronik unverzichtbar gewordene Eigenschaften, die die Grundlage für interessante Schaltungen bilden.

5.1 Der Transistoreffekt

Material und Schaltplan

- Widerstände 1 x 30 Ω
1 x 65 Ω
- Glühlämpchen 2 x (5 V; 125 mA)
- Schalter 1x
- Transistor 1x BD135
- Steckplatte 65 mm x 100 mm

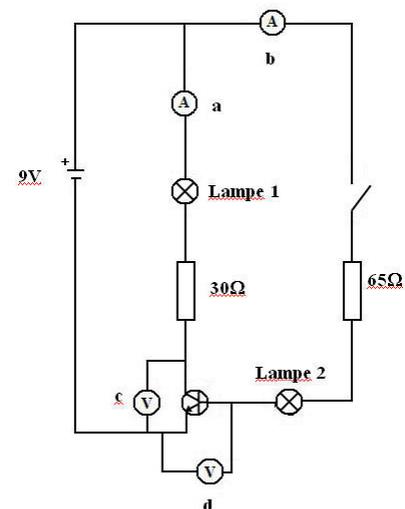


Abb.5.1: Schaltplan zum Transistoreffekt

Aufbau

Die Schaltung besteht aus zwei parallel geschalteten Lampen mit jeweils einen Vorwiderstand. Diese Lampen werden über einen Transistor wieder zusammengeführt.

In den folgenden Versuchen werden zwei Arten von Transistoren verwendet, nämlich der BD135 und der BC 547. Hier wird der erste benötigt, dessen Anschlüsse Basis, Kollektor und Emitter man der Abb.5.3 entnehmen kann.



Abb.5.2: Schaltung zum Transistoreffekt

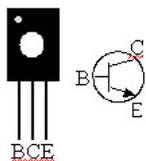


Abb.5.3: Anschlüsse des Transistors BD135

Beobachtung

Bei geöffnetem Schalter brennt keine der beiden Lampen. Die Strommessgeräte a und b zeigen 0 A an. Die Spannung beim Spannungsmessgerät c beträgt 9 V ($=U_{CE}$) und bei d ist die Spannung gleich 0 V ($=U_{BE}$).

Wird er geschlossen, so leuchtet die Lampe 1 wesentlich heller als die Lampe 2. Beim Strommessgerät a ist der Wert 127 mA und beim Strommessgerät b ist der Wert 77 mA abzulesen. U_{CE} beträgt 60 mV und U_{BE} 860 mV.

Physikalischer Hintergrund

Bei diesem Versuch wird deutlich, dass der Widerstand, den der Transistor bildet, zwischen den beiden Extremen offen und gesperrt pendelt. Verwirklicht wird dies durch die drei verschieden dotierten Schichten im Transistor. Je nach Schichtenfolge kann er ein PNP- oder ein NPN- Transistor sein. Im Schaltzeichen ist die jeweilige Transistorart an der Richtung der Pfeilspitze zu erkennen. Weist der Pfeil nach außen, so kennzeichnet er einen NPN- Transistor, wenn er nach innen zeigt, einen PNP- Transistor.

Die mittlere, sehr dünne Schicht (2 μm bis 50 μm) heißt Basis. Die äußeren Schichten nennt man entsprechend ihrer Funktion Emitter oder Kollektor. Emitter und Kollektor sind in der Praxis nicht symmetrisch gebaut und auch nicht gleich stark dotiert. Um beim Einbau eine Vertauschung zu vermeiden, muss darauf besonders geachtet werden, sie nicht zu verwechseln. Durch die drei Schichten mit wechselnder Folge der

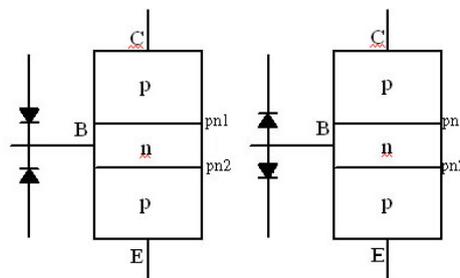


Abb.5.4: Aufbau von PNP- und NPN-Transistoren

Leitfähigkeit ergeben sich im Kristall zwei Übergänge: pn1 und pn2. Dies entspricht zwei entgegengesetzt aneinander gefügten Dioden. Beim PNP- Transistor liegen die beiden Kathoden gemeinsam an der Basis, beim NPN- Transistor die beiden Anoden.

Bei meinen Experimenten verwendete ich nur NPN- Transistoren. Grundsätzlich funktionieren PNP- und NPN- Transistoren gleich. Der umgekehrten Reihenfolge der Schichten entsprechend fließen lediglich die Ströme in jeweils entgegengesetzter Richtung.

Betrachten wir nun den Schaltkreis mit geöffnetem Schalter. In diesem Fall liegt die Eingangsspannung an Kollektor und Emitter an (U_{CE}). Augenscheinlich fließt kein Strom, da kein Lämpchen brennt. In diesem Fall ist die Basis Emitter Diode (pn2) in Flussrichtung gepolt, die Basis Kollektor Diode (pn1) in Sperrrichtung. Abgesehen von einem sehr geringen Leckstrom (12 nA beim Strommessgerät a) fließt kein

Strom. Die Kollektor Emitter Strecke sperrt den Strom wie ein sehr großer Widerstand oder ein geöffneter Schalter.

Wird der Schalter geschlossen, so liegt eine Spannung an Basis und Emitter an (U_{BE}). Dadurch wird pn2 in Flussrichtung gepolt und U_{BE} ist größer als die Schwellenspannung der BE Diode. Nun fließen Elektronen vom Minus Pol über den Emitter in die Basis um von dort zum Plus Pol zu gelangen. Dieses Eindringen in die Basis Zone bringt einen Abbau der Sperrschicht mit sich und da die Basis sehr dünn ist, diffundiert ein Großteil der Elektronen zu pn1. Von den positiven unkompensierten Donatoren im n leitenden Bereich der Sperrschicht werden sie in den Kollektor gesaugt und fließen zur positiven Elektrode. Sie geraten in die pn1 Sperrschicht und werden dort von der Kollektorspannung abgezogen. Damit fließt nun auch Strom über das erste Lämpchen, welches heller brennt, da der Vorwiderstand dieses Lämpchens 30Ω beträgt und der des zweiten 65Ω . Gemäß des Ohmschen Gesetzes muss der Strom, der über das erste Lämpchen fließt, größer sein, da die beiden parallel angeschlossenen Lampen an der gleichen Spannung liegen.

5.2 Strom- und Spannungsverstärkung

Material und Schaltplan

- Widerstände 1 x 30 Ω
1 x 120 Ω
- Glühlämpchen 1 x (5 V; 125 mA)
- Potentiometer 2 x (10 k Ω ; linear)
- Transistor 1x BD135
- Batterie + Fassung 1x (1,5 V; AA)
- Steckplatte 90 mm x 100 mm

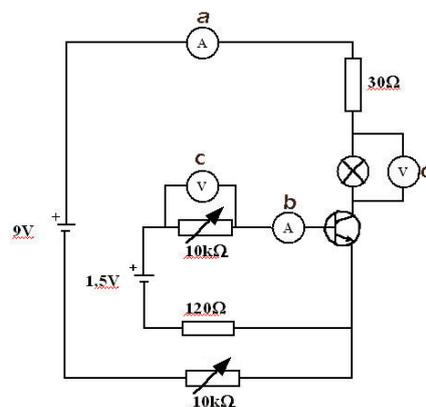


Abb.5.5: Schaltplan zur Strom- und Spannungsverstärkung

Aufbau

Die wesentlichen Bestandteile hier sind der innere und der äußere Stromkreis. Kernstück von diesem ist die 1,5 V Spannungsquelle und das lineare Potentiometer. Dieses wird in Serie mit dem 120 Ω Widerstand geschaltet und damit ist der Gesamtwiderstand des inneren Kreises variabel. Hauptbestandteile des äußeren Stromkreises ist die Glühlampe mit ihrem Vorwiderstand und die 9 V Spannungsquelle. Weiters wird hier auch ein Potentiometer eingebaut um die gewünschten Messungen durchführen zu können.



Abb.5.6: Schaltplatine zur Strom- und Spannungsverstärkung

Beobachtung

Durch das Drehen am Potentiometer kann die Helligkeit des Lämpchens verändert werden. Das Potentiometer ist mit dem 120 Ω Widerstand in Serie geschaltet. Das heißt, der Widerstand im inneren Stromkreis liegt immer zwischen 120 Ω und 10,12 k Ω . Das Lämpchen beginnt zu brennen, wenn das Potentiometer bei 1,7 k Ω eingestellt wird, also der Gesamtwiderstand 1,82 k Ω beträgt. Je kleiner dieser Widerstand wird, desto heller brennt das Lämpchen.

Strommessung:

I_B wird beim Strommessgerät b und I_C beim Strommessgerät a abgelesen.

I_B [mA]	0	0,05	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7
I_C [mA]	0	12,5	23	40	58	76	90	110	120
I_B [mA]	0,8								
I_C [mA]	130								

I_B [mA]	0	0	0,01	0,01	0,02	0,03	0,05	0,1	0,2
U_{BE} [V]	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,64	0,65	0,66
I_B [mA]	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	1,1
U_{BE} [V]	0,66	0,66	0,67	0,68	0,69	0,7	0,71	0,71	0,71

Messung bei $I_B = 0,4$ mA:

U_{CE} [V]	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,1
I_C [mA]	6	11	15	20	26	32	38	42	46
U_{CE} [V]	0,12	0,15	0,18	0,2	0,5	1,5	2,5	3,5	4,5
I_C [mA]	52	60	65	68	70	70	70	75	75

U_{CE} [V]	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4
U_{BE} [V]	0,6	0,61	0,61	0,62	0,63	0,64	0,65	0,66	0,66

Physikalischer Hintergrund

Die vom Emitter entsandten Elektronen fließen zu einem sehr geringen Teil (1% und weniger) zur Basis hinaus. Sie bilden den Basisstrom (I_B). Die meisten von ihnen laufen zum Kollektor. Die Höhe der Basis Emitter Spannung bestimmt die Geschwindigkeit, mit der die Elektronen vom Emitter in die Basis eindringen. Je höher sie ist, desto stärker werden die Elektronen beschleunigt und desto mehr dringen sie in die Basis Kollektor Sperrschicht ein und machen sie durchlässiger. Dem zu Folge wird der Kollektorstrom (I_C) größer.

Genau gesagt steuert man mit I_B den Abbau der Basis Kollektor Sperrschicht, man steuert ihren Widerstand zwischen sehr hohen (kein I_B) und sehr kleinen Werten (großer I_B).

Eingangskennlinie:

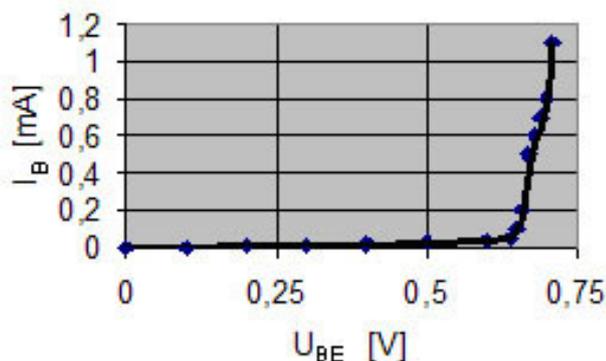


Abb.5.7: Eingangskennlinie des Transistors

Die Eingangskennlinie stellt die Abhängigkeit des Basisstromes I_B von der Basis – Emitter Spannung U_{BE} dar. Sie gibt also den Zusammenhang zwischen den Eingangsgrößen an. Da der pn – Übergang zwischen Emitter und Basis dabei in Durchlassrichtung betrieben wird, entspricht die Eingangskennlinie in guter Näherung der Kennlinie einer Diode (Abb.4.9). Ab einer bestimmten Schwellspannung (ca. 0,7 V) schaltete der Transistor die Emitter – Kollektor Strecke durch. Darauf beruht die Verwendung des Transistors als Schalter.

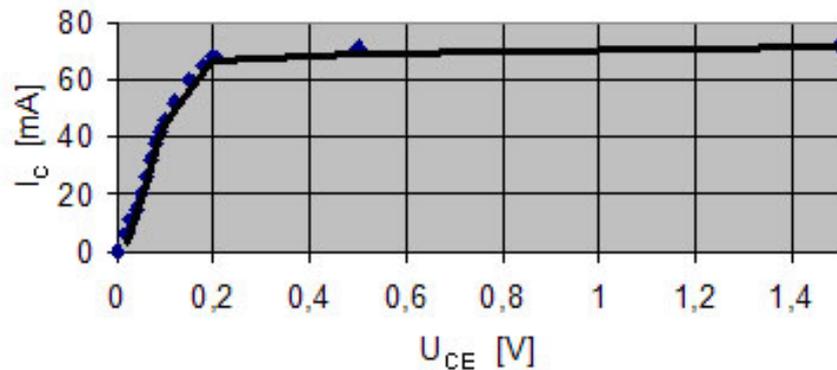
Ausgangskennlinie:

Abb.5.8: Ausgangskennlinie des Transistors

Die Ausgangskennlinie gibt an, wie die Kollektorstromstärke I_C von der Spannung U_{CE} zwischen Emitter und Kollektor (Ausgangsgrößen) abhängt. Diese Werte hängen stark von der Basisstromstärke I_B ab. Daher misst man die Ausgangskennlinie bei konstantem Basisstrom. Wird die Messung bei höherer Basisstromstärke durchgeführt, so wird der Maximalwert von I_C größer.

Die Ausgangskennlinie zeigt zunächst einen starken Anstieg. Dies erklärt sich aus dem geringen Widerstand eines durch gesteuerten Transistors. Mit steigender Spannung zwischen Emitter und Kollektor verbreitert sich die Sperrschicht zwischen Basis und Kollektor, und der Kollektorstrom steigt nur noch wenig.

Der Widerstand eines leitenden Transistors ist sehr gering. Der Kollektorstrom I_C muss dann durch einen Lastwiderstand begrenzt werden, damit der Transistor nicht überlastet wird. Dies passiert in diesem Versuch durch die Lampe und ihren Vorwiderstand.

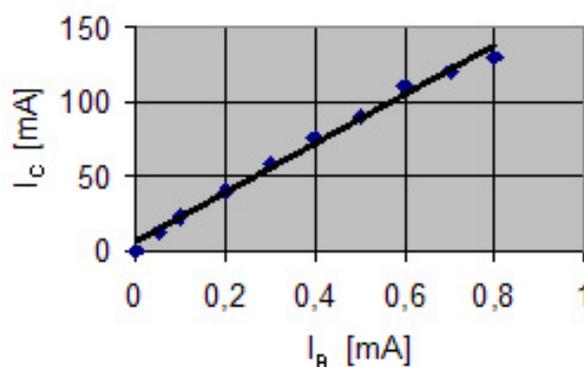
Stromsteuerkennlinie:

Abb.5.9: Stromsteuerkennlinie des Transistors

Eine Änderung des Basisstroms I_B um wenige Bruchteile von mA führt zu einer Änderung des Kollektorstromes um einige mA. Darauf beruht die Stromverstärkung des Transistors.

Die Stromverstärkung wird mit dem so genannten Stromverstärkungsfaktor angegeben:

$$\beta = \frac{I_C}{I_B} \quad (5.1)$$

Dieser gibt an, um wie viel der Kollektorstrom größer als der Basisstrom ist. In der Abb.5.9 gibt dieser Faktor die Steigung der Gerade an.

Verwendet man ein Wertepaar, um ihn zu berechnen, so erhält man:

$$\beta = \frac{90 \text{ mA}}{0,5 \text{ mA}} = 180$$

Der Stromverstärkungsfaktor gilt nur für einen bestimmten Arbeitsbereich. Innerhalb dieses Bereichs bewirkt eine Vergrößerung oder Verringerung des Basisstroms eine um den Stromverstärkungsfaktor multiplizierte Änderung des Kollektorstroms. Hat der Kollektorstrom einen bestimmten Maximalwert erreicht, dann lässt er sich auch durch einen großen Basisstrom kaum noch steigern.

Rückwirkungskennlinie:

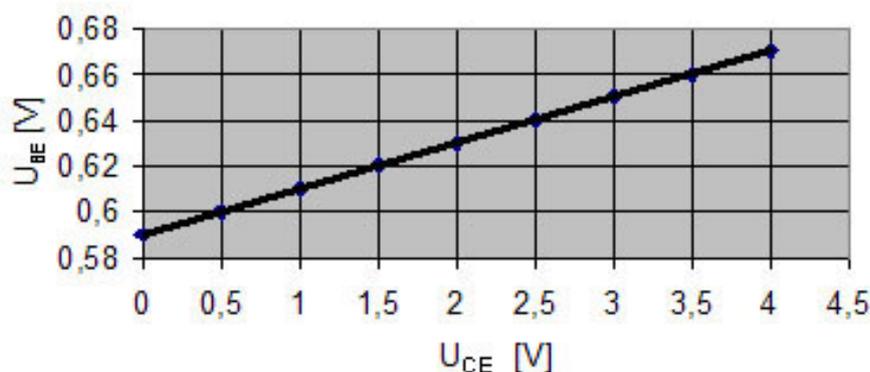


Abb.5.10: Rückwirkungskennlinie des Transistors

Die Kollektor - Emitterspannung U_{CE} wird durch den Transistor in die Kollektor – Basisspannung U_{CB} und in die Basis – Emitterspannung geteilt:

$$U_{CE} = U_{CB} + U_{BE} \quad (5.2)$$

Daher bedingt eine Erhöhung der Ausgangsspannung U_{CE} auch eine geringe Erhöhung der Eingangsspannung U_{BE} . Dies wird als Rückwirkung bezeichnet.

Arbeitspunkt und Arbeitsgerade:

Die Funktion eines Transistors wird durch die Basis – Emitterspannung, durch die Kollektor – Emitterspannung und durch die damit verbundenen Basis-, Kollektor- und Emitterströme festgelegt. Jeder Spannung entspricht ein ganz bestimmter Stromwert, der aus den Kennlinienfeldern abgelesen werden kann. Ein zusammengehöriges Strom – Spannungspaar bezeichnet man als Arbeitspunkt eines Transistors. Ein solcher Arbeitspunkt kann beispielsweise ein Wertepaar (U_{CE}/I_C) im Ausgangskennlinienfeld sein.

Das Verhalten des Transistors wird durch den Lastwiderstand R_L (Glühlämpchen mit Vorwiderstand) und die Betriebsspannung $U_B = 9 \text{ V}$ bestimmt. Dies kommt in der so genannten Arbeitsgeraden des Transistors zum Ausdruck, die im Ausgangskennlinienfeld eingetragen wird. Die Position und die Steigung der

Arbeitsgeraden werden durch den Lastwiderstand beeinflusst. Daher wird diese Gerade auch „Widerstandsgerade“ genannt.

Um die Arbeitsgerade im Ausgangskennlinienfeld eintragen zu können, ermittelt man zwei Punkte der Gerade:

1. Fall – Transistor sperrt :

$$I_C = 0 \text{ A};$$

$$U_{CE} = 9 \text{ V}$$

2. Fall – Transistor leitet :

$$U_{CE} = 0 \text{ V};$$

$$I_C = \frac{U_B}{R_L} = \frac{9 \text{ V}}{30 \Omega + 40 \Omega} = 129 \text{ mA}$$

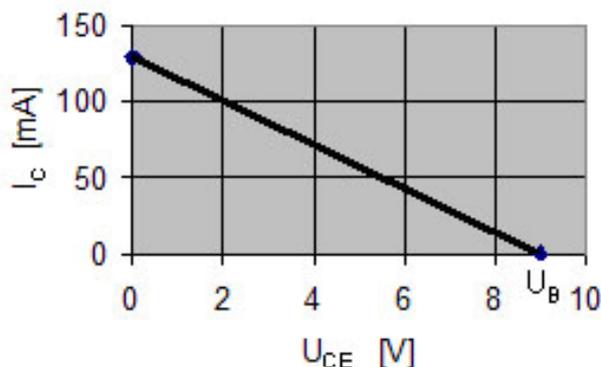


Abb.5.11: Arbeitsgerade des Transistors

Die im zweiten Fall errechneten 129 mA sind der Maximalstrom, der vom Glühlämpchen und ihrem Vorwiderstand verbraucht wird. Der 40 Ω Widerstand bei der Berechnung ergibt sich durch die Kenndaten der Glühbirne (5 V; 125 mA).

Damit erhält man einen Widerstand von $R = \frac{U}{I} = \frac{5 \text{ V}}{0,125 \text{ A}} = 40 \Omega$. Der maximale

Kollektorstrom kann auch aus den Tabellen entnommen werden, dort ist der höchste Wert 130 mA.

Die Basis – Emitterspannung U_{BE} legt den Arbeitspunkt des Transistors fest. Dieser Arbeitspunkt liegt auf der Arbeitsgeraden. Der Arbeitspunkt eines Schalttransistors liegt entweder am rechten Ende der Arbeitsgeraden (Transistor sperrt) oder am linken Ende der Arbeitsgeraden (Transistor leitet). Soll der Transistor Signale verstärken, so muss der Arbeitspunkt in der Mitte der Arbeitsgeraden liegen.

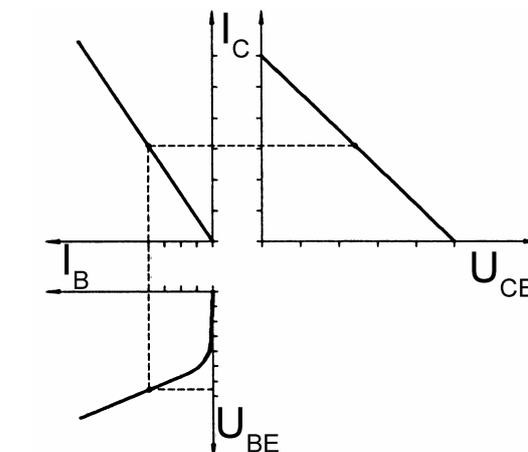


Abb.5.12: Festlegung des Arbeitspunktes anhand U_{BE}

Verlustleistungshyperbel

Beim Betrieb eines Transistors kommt es durch die Elektronenwanderung zur Erwärmung des Transistors. Die damit verbundene Leistung des elektrischen Stroms wird Verlustleistung genannt. Sie entspricht dem Produkt aus U_{CE} und I_C . Genau genommen kommt noch das Produkt aus U_{BE} und I_B hinzu, doch ist es im Verhältnis zu $U_{CE} \cdot I_C$ so klein, dass man es vernachlässigen kann.

$$P_{\text{tot}} = U_{BE} \cdot I_B + U_{CE} \cdot I_C \approx U_{CE} \cdot I_C \quad (5.3)$$

Die Gesamtverlustleistung wird in Wärme umgesetzt. Sie begrenzt die Belastbarkeit des Transistors. Wenn die Wärme durch Kühlmaßnahmen abgeführt wird, kann P_{tot} in gewissen Grenzen vergrößert werden.

Aus der Formel für die Leistung $P = U \cdot I$ folgt die Gleichung für I_C im Ausgangskennlinienfeld:

$$I = \frac{P_{\text{tot}}}{U} \quad (5.4)$$

Betrachtet man den Betrieb bei $I_B = 0,4 \text{ mA}$, so werden bei dieser Stromstärke folgende Werte aus den Tabellen abgelesen: $I_C = 70 \text{ mA}$; $U_{CE} = 1,5 \text{ V}$; $U_{BE} = 0,62 \text{ V}$. Daraus ergibt sich eine Verlustleistung von $P_{\text{tot}} = 0,1052 \text{ W}$. Mit der Formel 5.4 wird folgende Tabelle errechnet:

U [V]	I [mA]
0,03	3,51
0,05	2,1
0,1	1,05
0,2	0,53
0,5	0,21
1	0,11
1,5	0,07
2	0,05
2,5	0,04
3	0,03
3,5	0,03
4	0,02

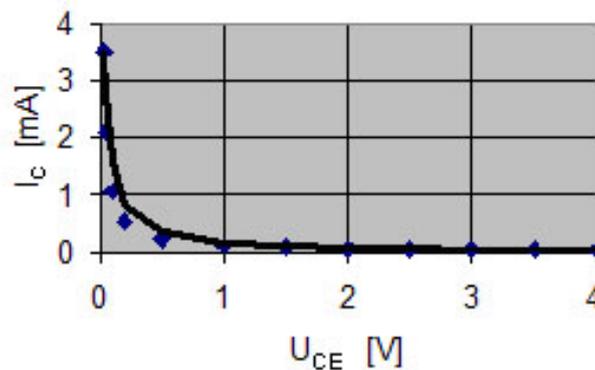


Abb.5.13: Verlustleistungshyperbel

5.3 Verzögerungsschalter

Material und Schaltplan

- Widerstände 1 x 30 Ω
1 x 1 k Ω
- Glühlämpchen 1 x (5 V; 125 mA)
- Kondensator 1 x 100 μ F
- Transistor 1x BD135
- Schalter 1x
- Steckplatte 65 mm x 65 mm

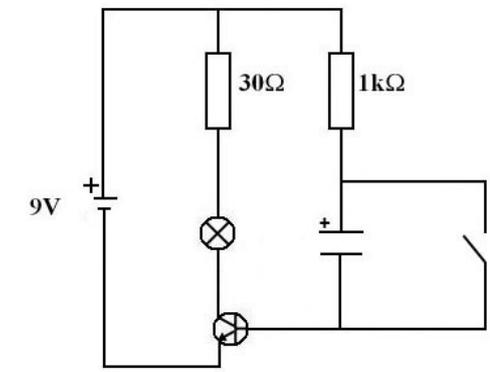


Abb.5.14: Schaltplan zum Verzögerungsschalter

Aufbau

Der Lampe mit ihrem Vorwiderstand wird ein RC Glied parallel geschaltet. Der Kondensator kann bei geschlossenem Schalter umgangen werden.

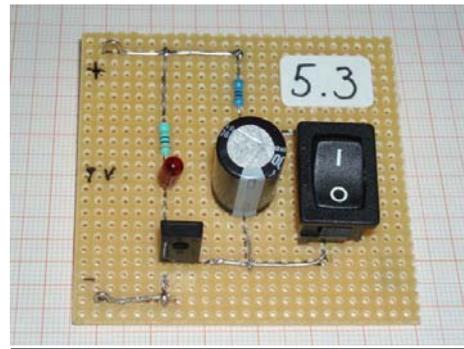


Abb.5.15: Schaltung zum Verzögerungsschalter

Beobachtung

Ist der Schalter zunächst geöffnet, brennt das Lämpchen nicht. Beim Schließen beginnt es zu brennen. Wird der Schalter nun wieder geöffnet, so erlischt die Lampe mit einer Verzögerung von etwa einer Sekunde.

Physikalischer Hintergrund

Bei geschlossenem Schalter wird der Transistor über den Basisvorwiderstand angesteuert. Dabei leuchtet die Lampe und der Kondensator wird entladen. Sobald der Schalter geöffnet wird, wird der Kondensator über den Basisvorwiderstand geladen. Es fließt ein Ladestrom über die Basis, der den Transistor durchsteuert (Lampe leuchtet). Der Ladestrom verschwindet, sobald der Kondensator geladen ist. Dadurch sperrt der Transistor und die Lampe erlischt.

Die Verzögerungszeit wird durch R und C bestimmt, da die Ladezeit des Kondensators zu seiner Kapazität C und dem Basisvorwiderstand proportional ist.

Folgende drei Schaltungen sind so genannte Kippschaltungen. Sie können bestimmte Schaltzustände einnehmen, die auf den Schalteigenschaften von Transistoren beruhen.

5.4 Flip Flop

Material und Schaltplan

- Widerstände 2 x 470 Ω
2 x 10 k Ω
- Leuchtdioden 2 x
- Transistor 2 x BD135
- Schalter 2 x
- Steckplatte 65 mm x 65 mm

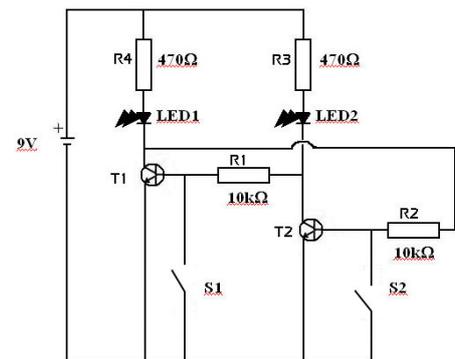


Abb.5.16: Schaltplan zum Flip Flop

Aufbau

Zwei Leuchtdioden mit ihren Vorwiderständen werden jeweils mit dem Emitter eines Transistors verbunden. Diese Verbindung wird abermals mit einer Leitung zur Basis des jeweiligen anderen Transistors gekreuzt. Auf diesen Leitungen sitzen ein 10 k Ω Widerstand und jeweils ein Schalter.



Abb.5.17: Schaltung zum Flip Flop

Beobachtung

S_1	S_2	LED ₁	LED ₂
geschlossen	geschlossen	dunkel	dunkel
offen	geschlossen	hell	dunkel
geschlossen	offen	dunkel	hell
offen	offen	keine Änderung	keine Änderung

Physikalischer Hintergrund

Solange die beiden Schalter S_1 und S_2 geschlossen sind, ist die Spannung U_{BE} an beiden Transistoren Null, beide Transistoren sperren. Wird der Schalter S_1 geöffnet,

so wird der Transistor T_1 über den Basisvorwiderstand R_3+R_1 angesteuert und LED_1 leuchtet. Da die Spannung am leitenden Transistor nahezu Null ist, bleibt T_2 gesperrt, auch wenn zusätzlich der Schalter S_2 geöffnet wird. Wird der Schalter S_1 bei offenem Schalter S_2 geschlossen, so sperrt der Transistor T_1 . Der Transistor T_2 wird über den Vorwiderstand R_2+R_4 angesteuert und LED_2 leuchtet.

Bemerkung

Zwei verschiedenen Schalterstellungen (zu/offen) entsprechen zwei verschiedene LED Helligkeiten (dunkel/hell). Ordnet man diesen beiden Zuständen jeweils die Werte „0“ und „1“ zu, so kann man das Verhalten der Schaltung in eine Wertetabelle eintragen.

S_1	S_2	LED_1	LED_2	Aufgabe
geschlossen	geschlossen	0	0	keine
offen	geschlossen	1	0	set
geschlossen	offen	0	1	reset
offen	offen	*	*	speichern

(* ... LED_1 und LED_2 bleiben im zuvor eingenommenen Zustand)

Mit dieser Kippschaltung hat man die Möglichkeit, einen Zustand der LED zu setzen (set) oder rückgängig zu machen (reset) - daher auch der oft verwendete Name „RS-Flipflop“.

Die Leuchtdioden im RS-Flipflop können nur zwei Zustände annehmen, sie verhalten sich binär. Der logische Wert „0“ entspricht einer niedrigen, der logische Wert „1“ einer hohen Spannung. Weiters sind die zwei möglichen Zustände stabil, deshalb wird auch oft der Name bistabiler Multivibrator verwendet.

Diese Kippschaltung hat in der Elektronik große Bedeutung erlangt. Es werden aber auch noch Kippschaltungen gebraucht, die wiederholt ein- und ausschalten. Eine solche Schaltung zeigt ein instabiles Schaltverhalten und heißt daher astabiler Multivibrator.

5.5. Astabiler Multivibrator

Material und Schaltplan

- Widerstände 2 x 30 Ω
2 x 1 k Ω
- Glühlämpchen 2 x (5 V; 125 mA)
- Transistor 2 x BD135
- Kondensator 1 x 100 μF
1 x 1000 μF
- Steckplatte 80 mm x 100 mm

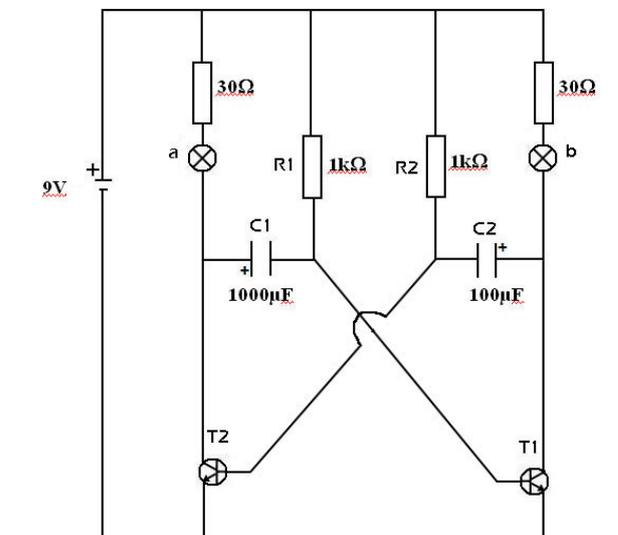


Abb.5.18: Schaltplan zum Astabilen Multivibrator

Aufbau

Die zwei Lämpchen mit ihren Vorwiderständen werden mit den Emittern der Transistoren in Verbindung gebracht. Bei dieser Verbindung zweigt eine Leitung zu den Kondensatoren ab. Die Kondensatoren mit den Widerständen R_1 und R_2 werden mit den Transistoren über ihre Basis miteinander gekoppelt.

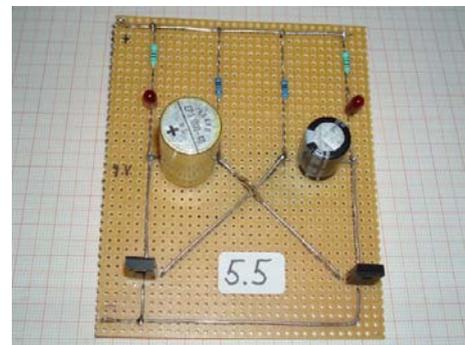


Abb.5.19: Schaltplatte zum Astabilen Multivibrator

Beobachtung

Die Lämpchen blinken abwechselnd, wobei die Leuchtzeit des Lämpchens a größer ist als die von b.

Physikalischer Hintergrund

Das abwechselnde Leuchten der Lämpchen ist das optische Signal dafür, dass die Transistoren abwechselnd schalten. Wird der Transistor T_1 gerade leitend, so sinkt die Spannung U_{CE1} (Kollektor Emitter Spannung des Transistors T_1) ab. Die Abnahme dieser Spannung wird über den Koppelkondensator C_2 auf die Basis des Transistors T_2 übertragen. Die sinkende Basisspannung bewirkt ein Ansteigen der Kollektor Emitter Spannung des Transistors T_2 (U_{CE2}). Damit wird T_1 noch besser

leitend. Nun wird der Kondensator C_2 über den Widerstand R_2 geladen. Damit steigt die Spannung im Kondensator, die T_2 ansteuert. T_2 wird damit leitend und U_{CE2} sinkt ab. C_1 überträgt diese abnehmende Spannung auf die Basis von T_1 . Dieser sperrt und U_{CE1} wirkt auf die Ansteuerung des Transistors T_2 zurück. Über den leitenden Transistor T_2 wird der Kondensator C_1 geladen. Wenn die Spannung an C_1 steigt, wird der Transistor T_1 wieder durchgesteuert und T_2 sperrt. Die Lampe a brennt deshalb länger, da - während C_1 geladen wird - T_2 leitet und damit brennt das Lämpchen a. Aufgrund der 10fachen Kapazität von C_1 gegenüber C_2 wird C_1 länger geladen und somit bleibt T_2 länger leitend.

Die beiden Transistoren schalten abwechselnd bei verschiedenen Basis Emitterspannungen, da die Kapazität der beiden verschieden ist. Wenn T_2 leitet, liegt an der Basis von T_1 eine hohe Spannung an, die nach und nach zusammenbricht, bis schlussendlich wieder T_1 durchgeschaltet wird.

Die Zusammenhänge zwischen den verschiedenen Spannungen und den Schaltzeiten sind in den folgenden Diagrammen dargestellt:

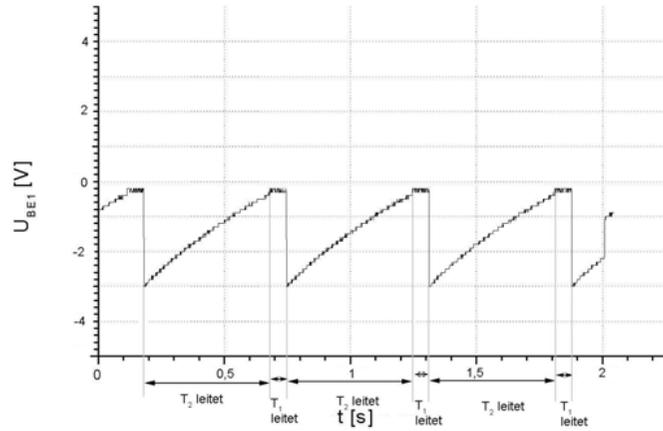


Abb.5.20: $U_{BE1} - t$ Diagramm

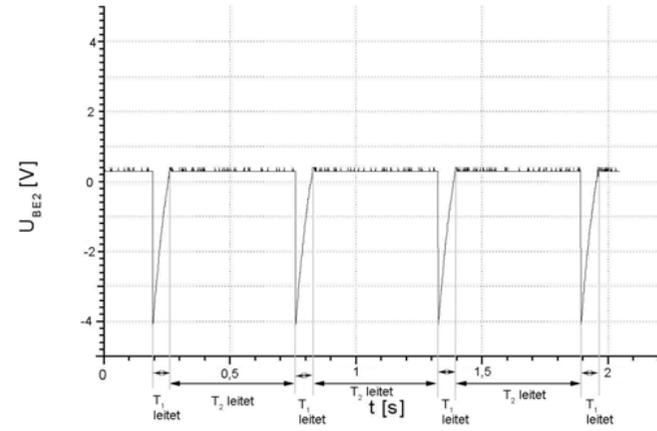


Abb.5.22: $U_{BE2} - t$ Diagramm

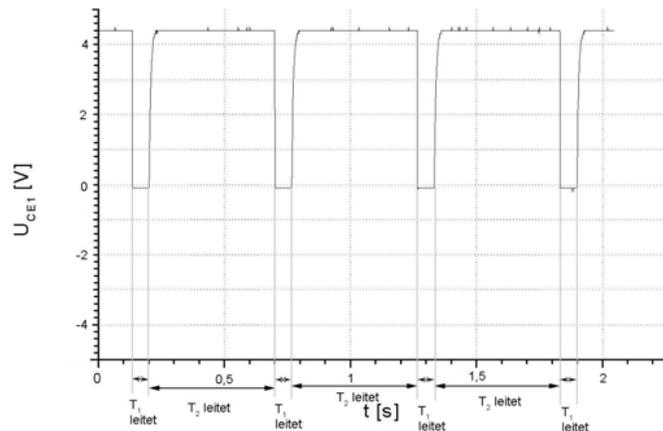


Abb.5.21: $U_{CE1} - t$ Diagramm

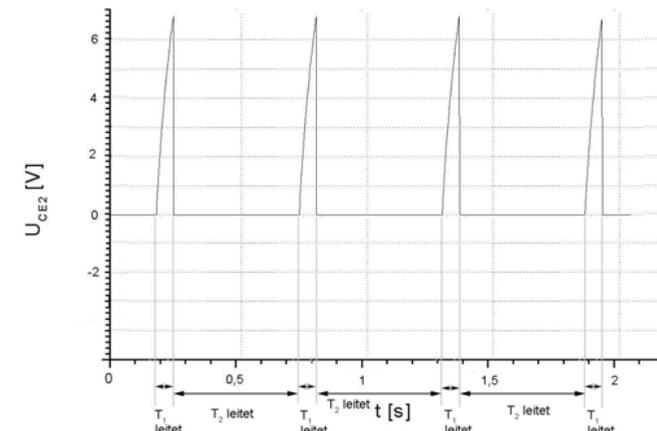


Abb.5.23: $U_{CE2} - t$ Diagramm

5.6 Schmitt Trigger

Material und Schaltplan

- Widerstände 4 x 470 Ω
1 x 4,2 k Ω
- Leuchtdioden 2 x
- Transistor 2 x BC547
- Potentiometer 1 x 10 k Ω linear
- Steckplatte 80 mm x 100 mm

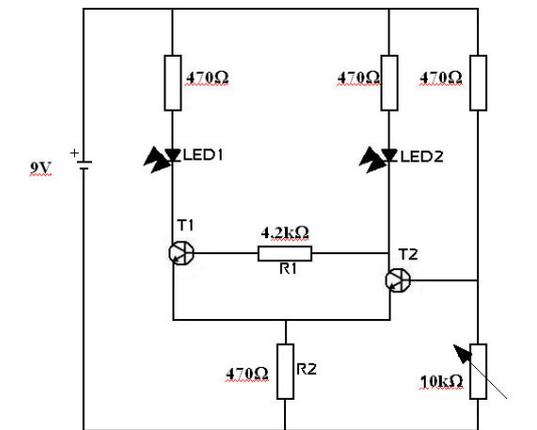


Abb.5.24: Schaltplan zur Schmitt Trigger Schaltung

Aufbau

Zwei Leuchtdioden liegen mit ihren Vorwiderständen an den Kollektoren von T_1 und T_2 , die wiederum über einen gemeinsamen Emitterwiderstand R_2 rückgekoppelt sind. Weiters ist die Basis von T_1 über den Widerstand R_1 mit dem Kollektor von T_2 verbunden. Die Basis von T_2 mündet über das Potentiometer in den Minuspol.



Abb.5.25: Schaltplatine zur Schmitt Trigger Schaltung

Beobachtung

Durch Drehen am Potentiometer wird dessen Widerstand von Null beginnend erhöht. Bei einem Wert unter 144 Ω brennen beide LEDs (LED_1 heller als LED_2) und bei diesem Wert erlischt LED_1 schlagartig, während LED_2 an Helligkeit gewinnt.

Physikalischer Hintergrund

Durch das Erhöhen von U_{BE2} (Eingangsspannung U_E) wird die Sperrspannung von T_2 überstiegen und T_2 durchgesteuert. Damit sinkt der Basisstrom für T_1 und die Stromstärke steigt durch den Emitterwiderstand R_2 . Dadurch wird der Spannungsabfall an R_2 höher als U_{BE2} , sodass die Basis von T_1 negativer als der Emitter an T_1 ist. T_1 sperrt schlagartig (U_{BE1} fällt von 0,78 V auf 0,04 V), und die Ausgangsspannung U_A (U_{CE1}) steigt steil an.

Sinkt die Eingangsspannung, so wird der Strom durch T_2 und durch R_2 geringer. Damit steigt U_{BE1} so lange, bis T_1 leitend wird. Der Kollektorstrom durch den Transistor T_1 erzeugt an R_2 einen Spannungsabfall, sodass der Emitter positiver als seine Basis wird. Dadurch sperrt T_2 und T_1 leitet. Die Ausgangsspannung U_A geht auf Null zurück.

Bemerkung

Diese Schaltung ist dann nötig, wenn beim Erreichen eines bestimmten Grenzwertes ein Schalter schlagartig betätigt werden soll. Zu diesem Zweck wird ein weiterer Transistor dazugeschaltet, welcher dann als Schalter agiert.

6. Logikschaltungen

Gatterschaltungen sind in ihrer Grundform Übertragungsglieder mit mehreren Eingängen und einem Ausgang. Je nach Betriebszustand des Gatters kann der Übertragungsweg für ein Signal vom Eingang zum Ausgang freigegeben oder gesperrt werden.

In der Digitaltechnik arbeitet man mit sich sprunghaft ändernden Größen, die sich meistens nur zwischen zwei Zuständen ändern im Sinne einer zweiwertigen binären Logik. Spannungen als binäre Variable werden nur durch die Merkmale Low = L und High = H beschrieben, die in eine Funktionstabelle eingetragen werden. Dabei steht das Symbol H für hohe Spannung und L für vergleichsweise niedrige Spannung. Da in der Praxis keine exakten Spannungswerte für die logischen Zustände Low und High zu erwarten sind, werden Toleranzen festgelegt, zwischen denen ein logischer Zustand liegen kann. In den folgenden Logikschaltungen kann der Low Zustand bei Spannungen bis 0,7 V angenommen werden, für den High Zustand sind Spannungen ab etwa 4,3 V zulässig.

Wird nun dem Zustand „H“ der Wert 1 und dem Zustand „L“ der Wert 0 zugeordnet, so folgen damit die Logiktabellen.

In meinen folgenden Ausführungen werden vorerst AND - , ODER – und das NOT – Glied untersucht, da diese den Einstieg in die Logikschaltungen bilden. In der Praxis digitaler Schaltungen benutzt man aber häufig andere Grundsaltungen wie NAND und NOR. Ein Grund dafür ist, dass man dadurch benötigte logische Grundfunktionen weiter reduzieren kann. So können die drei logischen Grundfunktionen AND, OR, NOT durch NAND – Glieder aufgebaut werden. Man kommt dann theoretisch mit einem einzigen Baustein für Logikschaltungen aus. Das NAND – Gatter ist deshalb einer der Hauptbausteine logischer Schaltungen und ist mit geringem Aufwand zu realisieren.

6.1 AND – Gatter

Material und Schaltplan

- Widerstand 1 x 4,2 k Ω
- Dioden 2 x
- Steckplatte 80 mm x 40 mm

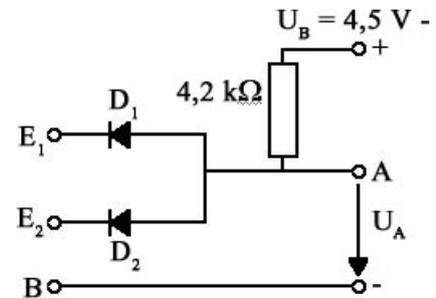


Abb.6.1: Schaltplan zum AND – Gatter

Aufbau

Werden an den beiden Eingängen logische „0“ verlangt, so verbindet man E_1 bzw. E_2 mit B, um an diesen Eingang das tiefe Potential anzulegen ($U_1 = U_2 = 0$). An E_1 oder E_2 herrscht das logische Ereignis „1“, wenn U_1 bzw. U_2 hoch ist und damit die Eingänge mit dem + Pol der Spannungsquelle verbunden werden. Die Ausgangsspannung (U_A) wird zwischen A und – gemessen.

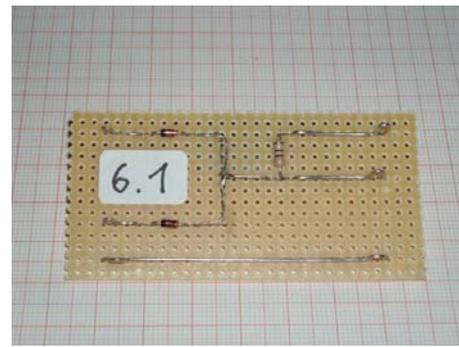


Abb.6.2: Schaltung zum AND - Gatter

Beobachtung

Wird E_1 und E_2 an den + Pol der Spannungsquelle angeschlossen, so bleibt die Betriebsspannung auch am Ausgang erhalten: $U_B = U_A = 4,5$ V
 Ist E_1 an B und E_2 am + Pol angeschlossen, so beträgt $U_A = 0,73$ V.
 Ist E_2 an B und E_1 am + Pol angeschlossen, so beträgt U_A ebenfalls 0,73 V.
 Bei Anschluss beider Ereigniseingänge an B beträgt $U_A = 0,69$ V.

Physikalischer Hintergrund

Liegen beide Eingänge auf hohem Potential, so ist es nicht möglich, dass die Spannung über die Dioden und B abfließt. Dies ist somit die einzige Möglichkeit, dass der Ausgang auf demselben Potential wie die Dioden liegt.

Wird eine der Dioden auf das tiefe Potential gelegt, das heißt, E_1 oder E_2 werden an B angeschlossen, so wird die entsprechende Diode in Flussrichtung geschaltet und es entsteht ein Spannungsteiler, welcher bis auf 0,7 V die Spannung abführt. Der Ausgang wird über die mit B verbundene Diode auf das tiefe Potential gezogen. Dies ist auch der Fall, wenn beide Dioden mit B verbunden sind.

Damit wird mit dieser Schaltung folgende Funktions- und Logiktablelle realisiert:

E ₁	E ₂	A
L	L	L
H	L	L
L	H	L
H	H	H

Funktionstabelle

E ₁	E ₂	A
0	0	0
1	0	0
0	1	0
1	1	1

Logiktablelle

Das AND – Gatter kann auch als Serienschaltung von Schalter beschrieben werden: Nur wenn beide Schalter geschlossen sind, kann Strom fließen.



Abb.6.3: UND in Schalterlogik

6.2 OR – Gatter

Material und Schaltplan

- Widerstand 1 x 4,2 k Ω
- Dioden 2 x
- Steckplatte 80 mm x 40 mm

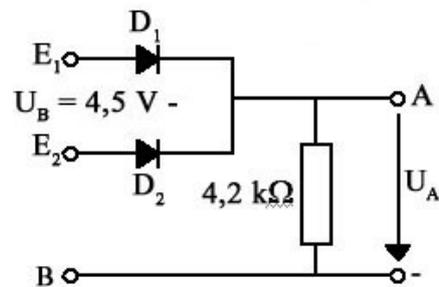


Abb.6.4: Schaltplan zum OR – Gatter

Aufbau

Der + Pol der Spannungsquelle wird dann bei E_1 oder E_2 angeschlossen, wenn für E_1 oder E_2 das logische Ereignis „1“ verlangt wird.

Wird das logische Ereignis „0“ verlangt, so wird der entsprechende Ereigniseingang an B angeschlossen. Die Ausgangsspannung (U_A) wird zwischen A und – gemessen.

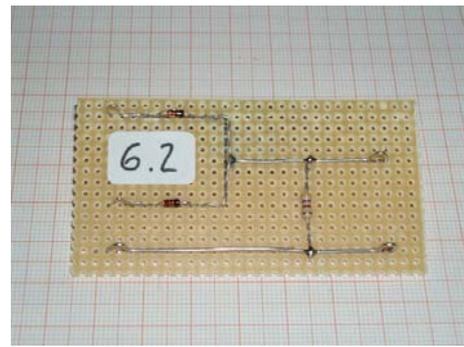


Abb.6.5: Schaltung zum OR - Gatter

Beobachtung

Wird E_1 und E_2 an B angeschlossen, so beträgt $U_A = 0$ V.

Ist E_1 oder E_2 am + Pol der Spannungsquelle angeschlossen, so beträgt $U_A = 3,75$ V.

Bei Anschluss beider Ereigniseingänge an den + Pol beträgt $U_A = 3,79$ V.

Physikalischer Hintergrund

Werden beide Dioden auf das tiefe Potential gelegt, das heißt, E_1 und E_2 werden an B angeschlossen, nimmt die Schaltung schon wegen des fehlenden Eingangssignals den logischen Wert 0 an. In diesem Fall herrscht keine Spannung zwischen dem Ausgang und dem tiefen Potential.

Wird ein Eingang an den + Pol angeschlossen, so ist die dazugehörige Diode in Flussrichtung geschaltet und diese bildet mit dem Widerstand einen Spannungsteiler. Damit liegt auch der Ausgang auf einem hohen Potential und U_A beträgt 3,39 V. Dies ist auch der Fall, wenn beide Ereigniseingänge an das hohe Potential angeschlossen werden.

Damit wird mit dieser Schaltung folgende Funktions- und Logiktablelle realisiert:

E ₁	E ₂	A
L	L	L
H	L	H
L	H	H
H	H	H

Funktionstabelle

E ₁	E ₂	A
0	0	0
1	0	1
0	1	1
1	1	1

Logiktablelle

Das OR – Gatter kann auch als Parallelschaltung von Schalter beschrieben werden: Ist wenigstens einer der beiden Schalter geschlossen, so kann Strom fließen.



Abb.6.6: ODER in Schalterlogik

6.3 NOT – Gatter

Material und Schaltplan

- Widerstand 1 x 1 k Ω
1 x 10 k Ω
- Transistor 1 x BC141
- Steckplatte 60 mm x 50 mm

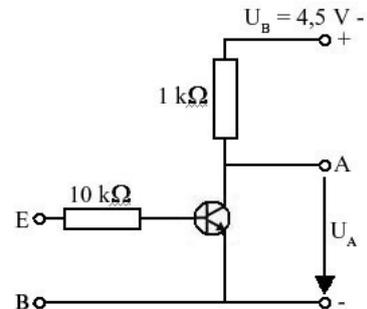


Abb.6.7: Schaltplan zum NOT – Gatter

Aufbau

Wird bei E das logische Ereignis „1“ verlangt, so muss an E auch der + Pol der Spannungsquelle angeschlossen werden. Beim logischen Ereignis „0“ wird E an B angeschlossen.

Hier wird der Transistor BC141 verwendet, dessen Anschlüsse in Abb.6.9 angegeben sind.

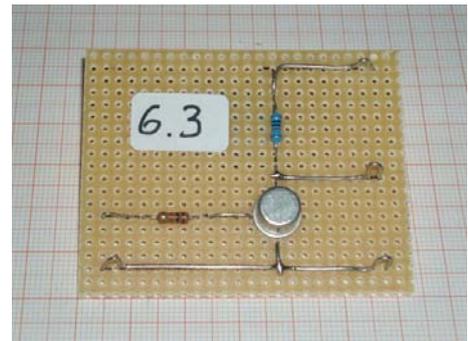


Abb.6.8: Schaltung zum NOT - Gatter

Beobachtung

Wird E an das tiefe Potential angeschlossen, so beträgt $U_A = U_B = 4,5$ V. Bei Anschluss von E am + Pol ist $U_A = 0,02$ V.

Physikalischer Hintergrund

U_A entspricht der Kollektor - Emitterspannung des Transistors. Ist die Eingangsspannung „low“, so sperrt der Transistor und die Ausgangsspannung ist gleich der Betriebsspannung („high“). Liegt am Eingang eine Basis – Emitterspannung an („high“), so steuert der Transistor durch und die Ausgangsspannung ist nahezu Null („low“).

Da der Transistor die Eingangsspannung jeweils in ihr logisches Gegenteil umwandelt, wird die Schaltung auch Inverter genannt.

Mit dieser Schaltung wird folgende Funktions- und Logiktablelle realisiert:

E	A
L	H
H	L

Funktionstabelle

E	A
0	1
1	0

Logiktablelle

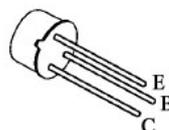


Abb.6.9: Anschlüsse des BC141

6.4 NAND – Gatter

Material und Schaltplan

- Widerstand 1 x 1 k Ω
2 x 10 k Ω
- Transistor 2 x BC141
- Steckplatte 60 mm x 50 mm

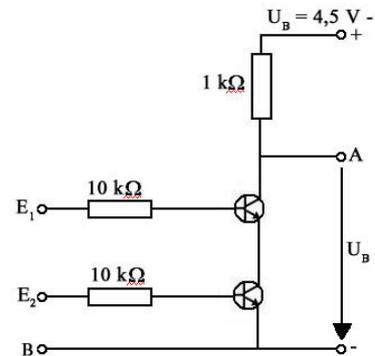


Abb.6.10: Schaltplan zum NAND – Gatter

Aufbau

Wird bei E_1 oder bei E_2 das logische Ereignis „1“ verlangt, so muss an diese Ereigniseingänge der + Pol der Spannungsquelle angeschlossen werden. Beim logischen Ereignis „0“ wird E_1 oder E_2 an B angeschlossen.

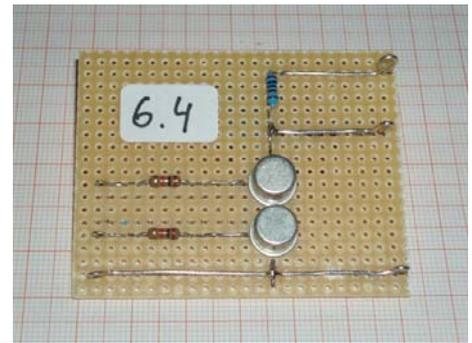


Abb.6.11: Schaltung zum NAND - Gatter

Beobachtung

Wird an E_1 und an E_2 die tiefe Spannung angelegt, so beträgt $U_A = U_B = 4,5 \text{ V}$.
Wird an E_1 oder an E_2 der + Pol (und jeweils der andere Eingang an 0) angeschlossen, so ist $U_A = 4,5 \text{ V}$.
Bei Anschluss beider Ereigniseingänge an „high“ herrscht eine Ausgangsspannung von $U_A = 0,05 \text{ V}$.

Physikalischer Hintergrund

Hier wird die logische Schaltung nur aus Widerständen und Transistoren aufgebaut. Man spricht von einer Widerstand – Transistor – Logik (RTL). Mindestens einer der beiden Transistoren muss sperren, um eine hohe Ausgangsspannung zu erreichen. Dies geschieht dadurch, dass höchstens an einem der beiden Transistoren eine hohe Spannung anliegt.

Sind beide Transistoren auf hohem Potential, so existiert für beide eine Basis – Emitterspannung, die dafür verantwortlich ist, dass die beiden Kollektor – Emittterstrecken frei geschaltet werden und dadurch wird der Ausgang auf „low“ gezogen.

Mit dieser Schaltung wird folgende Funktions- und Logiktablelle realisiert:

E_1	E_2	$E_1 \wedge E_2$	$\neg (E_1 \wedge E_2)$
L	L	L	H
H	L	L	H
L	H	L	H
H	H	H	L

Funktionstabelle

E_1	E_2	$E_1 \wedge E_2$	$\neg (E_1 \wedge E_2)$
0	0	0	1
1	0	0	1
0	1	0	1
1	1	1	0

Logiktablelle

(\wedge , \vee , \neg sind die Abkürzungen für die logischen Verknüpfungen and, or, not)

Bemerkung

Da diese Schaltung das Inverse AND Gatter beschreiben soll, kann sie auch durch Zusammenschließen vom AND Gatter und dem NOT Gatter realisiert werden. Zu diesem Zweck verbindet man den Ausgang des AND Gatters mit dem Eingang des Inverters, die Leitungen des tiefen Potentials und die Eingänge der Betriebsspannung werden ebenfalls miteinander verbunden. Die Ereigniseingänge in diesem Aufbau sind weiterhin die Eingänge des AND Gatters und die Ausgangsspannung ist nun U_A beim Inverter.

Dieser Aufbau besteht aus Dioden, Widerständen und Transistoren. Deshalb spricht man in diesem Fall auch von einer Dioden – Transistor – Logik (DTL).

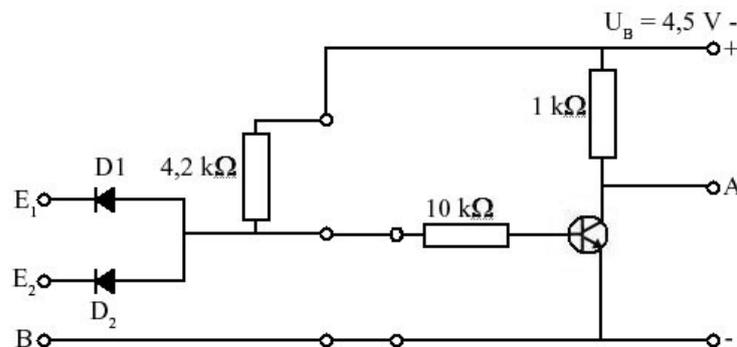


Abb.6.12: NAND Gatter in DTL

6.5 NOR – Gatter

Material und Schaltplan

- Widerstand 1 x 1 k Ω
2 x 10 k Ω
- Transistor 2 x BC141
- Steckplatte 100 mm x 40 mm

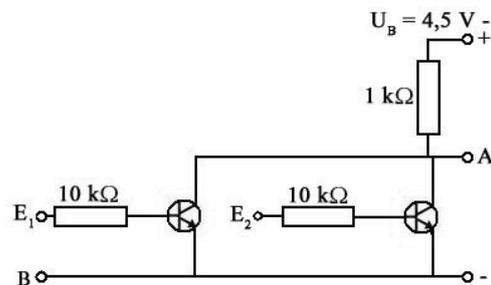


Abb.6.13: Schaltplan zum NOR – Gatter

Aufbau

Wird bei E_1 oder bei E_2 das logische Ereignis „1“ verlangt, so muss an diese Ereigniseingänge der + Pol der Spannungsquelle angeschlossen werden. Beim logischen Ereignis „0“ wird E_1 oder E_2 an B angeschlossen.

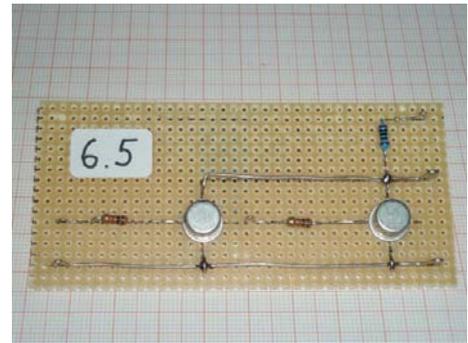


Abb.6.14: Schaltung zum NAND - Gatter

Beobachtung

Wird an E_1 und an E_2 „low“ angelegt, so beträgt $U_A = U_B = 4,5 \text{ V}$.

Wird an E_1 oder an E_2 der + Pol (und der andere Eingang jeweils an den - Pol) angeschlossen, so ist $U_A = 0,02 \text{ V}$.

Bei Anschluss beider Ereigniseingänge herrscht eine Ausgangsspannung von $U_A = 0,01 \text{ V}$.

Physikalischer Hintergrund

Bei dieser Schaltung in RTL muss mindestens ein Transistor in Flussrichtung geschaltet sein, um den Ausgang auf das tiefe Potential zu ziehen. Dies geschieht dadurch, dass mindestens ein Ereigniseingang mit „high“ gespeist wird. Die dadurch anliegende Basis – Emitterspannung schaltet den Kollektor – Emitter Weg frei und die Spannung zwischen Ausgang und dem tiefen Potential kann ausgeglichen werden.

Wird keiner der beiden Transistoren vom hohen Potential angesteuert, so bleibt der Transistor gesperrt und damit die Ausgangsspannung hoch.

Mit dieser Schaltung wird folgende Funktions- und Logiktablelle realisiert:

E_1	E_2	$E_1 \vee E_2$	$\neg (E_1 \vee E_2)$
L	L	L	H
H	L	H	L
L	H	H	L
H	H	H	L

Funktionstabelle

E_1	E_2	$E_1 \vee E_2$	$\neg (E_1 \vee E_2)$
0	0	0	1
1	0	1	0
0	1	1	0
1	1	1	0

Logiktablelle

Bemerkung

Diese Schaltung kann auch in der DTL verwirklicht werden. Da es sich um die Umkehrung des logischen „OR“ handelt, wird dabei das OR - mit dem Not Gatter zusammenschlossen. Dabei werden wie zuvor beim NAND Gatter in DTL der Ausgang des AND Gatters mit dem Eingang des Inverters, die Leitungen des tiefen Potentials und die Eingänge der positiven Betriebsspannung miteinander verbunden. Die Ereigniseingänge sind weiterhin die Eingänge des AND Gatters und die Ausgangsspannung ist nun U_A beim Inverter.

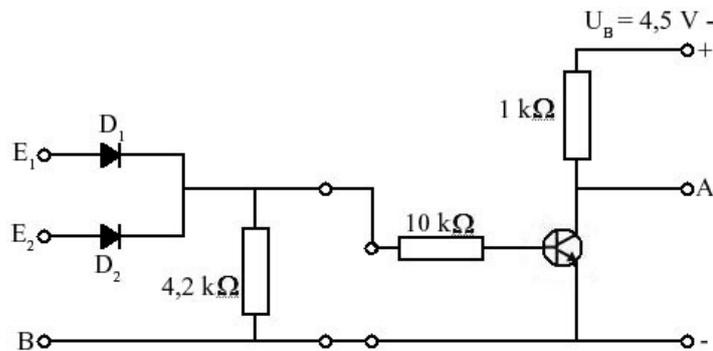


Abb.6.15: NOR Gatter in DTL

7. Literaturverzeichnis

- [1] Böhmer E.: Elemente der angewandten Elektronik; 9. Auflage; Vieweg Verlag; Braunschweig, Wiesbaden; 1994
- [2] Glaga J., Lindner G.: Wege in die Elektronik; Ravensburger Verlag; 1980
- [3] Tietze U., Schenk Ch.: Halbleiter – Schaltungstechnik; 10. Auflage; Springer Verlag; Berlin, Heidelberg, New York; 1993
- [4] Beuth K.: Elektronik 2, Vogel Verlag, Würzburg, 1977
- [5] Bitterlich W.: Einführung in die Elektronik; Springer Verlag; Wien, New York; 1967
- [6] Sprockhoff G.: Physikalische Schulversuche; 4. Auflage; Volk und Wissen Volkseigener Verlag; Berlin; 1975
- [7] Nussbaumer A., Nussbaumer P.: Projekt Elektronik; 1. Auflage; öbvhpt Verlag, Wien; 1991
- [8] Duenbostl T., Leiss Ernst, Zikmunda W.: Schülerversuchsheft 2 – Optik-Elektrizität; Hölder – Pichler – Tempsky Verlag; Wien; 1984
- [9] Jäger: Experimentalphysik 2; 26. Auflage; Institut für Experimentalphysik; TU Graz; Graz; 2002
- [10] Rumpf K.: Hardware und Betriebssysteme; Institut für Experimentalphysik; Uni Graz; Graz; 2004
- [11] URL: <http://www.physik.uni-regensburg.de/didaktik/>; März 2006
- [12] URL: <http://www.physik.uni-erlangen.de/>; März 2006
- [13] URL: <http://www.zbp.univie.ac.at/LinksPhysik.html>; März 2006

8. Abbilungsverzeichnis

Abb.1.1: Schaltplan zu linearen und nichtlinearen Widerständen.....	5
Abb.1.2: Schaltung zu linearen und nichtlinearen Widerständen.....	5
Abb.1.3: I – U Kennlinien der linearen Widerstände	7
Abb.1.4: I – U Kennlinie eines nichtlinearen Widerstandes	7
Abb.1.5: Schaltplan zur Kirchhoffschen Maschenregel	10
Abb.1.6: Schaltung zur Kirchhoffschen Maschenregel	10
Abb.1.7: Teilspannungen in der Serienschaltung.....	11
Abb.1.8: Messbereichserweiterung eines Spannungsmessgeräts	12
Abb.1.9: Schaltplan zur Kirchhoffschen Knotenregel.....	13
Abb.1.10: Schaltung zur Kirchhoffschen Knotenregel	13
Abb.1.11: Ströme in der Parallelschaltung	14
Abb.1.12: Messbereichserweiterung beim Strommessgerät	15
Abb.1.13: Schaltplan zum Innenwiderstand von Elektrizitätsquellen	16
Abb.1.14: Schaltung zum Innenwiderstand von Elektrizitätsquellen	16
Abb.1.15: U – I Kennlinie zur Bestimmung des Innenwiderstandes	17
Abb.1.16: Schaltplan zur Wheatstoneschen Meßbrücke	19
Abb.1.17: Schaltung zur Wheatstoneschen Meßbrücke	19
Abb.2.1: Schaltplan zum Kondensator im Gleichstromkreis	21
Abb.2.2: Schaltung zum Kondensator im Gleichstromkreis	21
Abb.2.3: Ladekurve des Kondensators	23
Abb.2.4: Zoom der ersten drei Sekunden der Ladekurve	23
Abb.2.5: Spannung an R beim Kondensator im Gleichstromkreis.....	24
Abb.2.6: Strom durch R und C	24
Abb.2.7: Schaltplan zum Kondensator im Wechselstromkreis	26
Abb.2.8: Schaltung zu linearen und nichtlinearen Widerstände.....	26
Abb.2.9: Kapazitiver Blindwiderstand in Abhängigkeit der Frequenz.....	27
Abb.2.10: Stromfluss durch den Kondensator	28
Abb.2.11: Spannung am Kondensator	28
Abb.2.12: Zeigerdiagramm eines verlustfreien Kondensators.....	28
Abb.2.13: Ersatzschaltung eines verlustbehafteten Kondensators	29
Abb.2.14: Zeigerdiagramm eines verlustbehafteten Kondensators.....	29
Abb.2.15: Schaltplan zur Parallelschaltung von Kondensatoren	30
Abb.2.16: Schaltung zur Parallelschaltung von Kondensatoren	30
Abb.2.17: Entladekurve von zwei parallel geschalteten Kondensatoren	31
Abb.2.18: Schaltplan zur Serienschaltung von Kondensatoren	33
Abb.2.19: Schaltung zur Serienschaltung von Kondensatoren	33
Abb.2.20: Lade- und Entladekurve zweier in Serie geschalteten Kondensatoren.....	34
Abb.2.21: Schaltplan zum RC – Glied.....	35
Abb.2.22: Schaltung zum RC - Glied.....	35
Abb.2.23: Zeigerdiagramm der Widerstände einer Reihenschaltung von R und C.....	36
Abb.2.24: Verhalten der Ausgangsspannung in Abhängigkeit von der Frequenz.....	36
Abb.2.25: Zeigerdiagramm der Spannungen eines RC - Gliedes.....	37
Abb.2.26: Zeigerdiagramm der Widerstände eines RC - Gliedes.....	37
Abb.2.27: Eingangsspannung beim RC - Glied	38
Abb.2.28: Ausgangsspannung beim RC - Glied	38
Abb.2.29: Schaltplan zum CR – Glied.....	39
Abb.2.30: Schaltung zum CR - Glied.....	39
Abb.2.31: Verhalten der Ausgangsspannung in Abhängigkeit von der Frequenz.....	40
Abb.2.32: Zeigerdiagramm der Spannungen eines CR-Gliedes bei Grenzfrequenz	40
Abb.2.33: Eingangsspannung beim CR - Glied	41
Abb.2.34: Ausgangsspannung beim CR - Glied	41
Abb.3.1: Schaltplan zur Spule im Gleichstromkreis	42
Abb.3.2: Schaltung zur Spule im Gleichkreis	42
Abb.3.3: Schaltplan zur Spule im Wechselstromkreis	45
Abb.3.4: Schaltung zur Spule im Wechselstromkreis	45
Abb.3.5: Zeigerdiagramm einer verlustfreien Spule	46

Abb.3.6: Spannung an der Spule.....	46
Abb.3.7: Stromfluss durch die Spule	46
Abb.3.8: Abhängigkeit des induktiven Blindwiderstandes von der Frequenz.....	47
Abb.3.9: Ersatzschaltung einer verlustbehafteten Spule.....	48
Abb.3.10: Zeigerdiagramm einer verlustbehafteten Spule.....	48
Abb.3.11: Schaltplan zum RL - Glied	50
Abb.3.12: Schaltung zum RL - Glied	50
Abb.3.13: Zeigerdiagramm der Widerstände einer Reihenschaltung von R und L	51
Abb.3.14: Abhängigkeit der Ausgangsspannung von der Frequenz beim RL-Glied.....	52
Abb.3.15: Zeigerdiagramm der Spannungen eines RL–Gliedes bei Grenzfrequenz.....	52
Abb.3.16: Eingangsspannung RL - Glied	53
Abb.3.17: Ausgangsspannung RL - Glied	53
Abb.3.18: Schaltplan zum LR - Glied	54
Abb.3.19: Schaltung zum LR - Glied	54
Abb.3.20: Abhängigkeit der Ausgangsspannung von der Frequenz beim RL-Glied.....	55
Abb.3.21: Eingangsspannung LR - Glied	56
Abb.3.22: Ausgangsspannung LR - Glied	56
Abb.4.1: Schaltplan zum Polprüfer	57
Abb.4.2: Schaltung zum Polprüfer	57
Abb.4.3: Valenzelektronen des Si - Atoms	58
Abb.4.4: Bindung des Si – Atoms mit Nachbaratomen.....	58
Abb.4.5: n - Silizium	58
Abb.4.6: p - Silizium	59
Abb.4.7: pn – Übergang ohne äußere Spannung.....	59
Abb.4.8: Diode	60
Abb.4.9: Schaltplan zur Kennlinie einer Diode.....	61
Abb.4.10: Schaltung zur Kennlinie einer Diode	61
Abb.4.11: Kennlinie der Diode.....	62
Abb.4.12: Schaltplan zur Gleichrichterwirkung einer Diode.....	63
Abb.4.13: Schaltung zur Gleichrichterwirkung einer Diode.....	63
Abb.4.14: Oszilloskopaufzeichnung wenn S_1 und S_2 geöffnet	64
Abb.4.15: Oszilloskopaufzeichnung wenn S_1 geöffnet und S_2 geschlossen	65
Abb.4.16: Schaltplan zur Brücken – Zweiweg – Gleichrichterschaltung.....	66
Abb.4.17: Schaltung zur Brücken – Zweiweg - Gleichrichterschaltung.....	66
Abb.4.18: Eingangsspannung bei der Brücken – Zweiweg -Gleichrichterschaltung.....	67
Abb.4.19: Ausgangsspannung bei der Brücken – Zweiweg -Gleichrichterschaltung.....	67
Abb.5.1: Schaltplan zum Transistoreffekt.....	68
Abb.5.2: Schaltung zum Transistoreffekt.....	68
Abb.5.3: Anschlüsse des Transistors BD135.....	69
Abb.5.4: Aufbau von PNP– und NPN- Transistoren	69
Abb.5.5: Schaltplan zur Strom- und Spannungsverstärkung.....	71
Abb.5.6: Schaltung zur Strom- und Spannungsverstärkung.....	71
Abb.5.7: Eingangskennlinie des Transistors	72
Abb.5.8: Ausgangskennlinie des Transistors	73
Abb.5.9: Stromsteuerkennlinie des Transistors	73
Abb.5.10: Rückwirkungskennlinie des Transistors.....	74
Abb.5.11: Arbeitsgerade des Transistors	75
Abb.5.12: Festlegung des Arbeitspunktes anhand U_{BE}	75
Abb.5.13: Verlustleistungshyperbel	76
Abb.5.14: Schaltplan zum Verzögerungsschalter.....	77
Abb.5.15: Schaltung zum Verzögerungsschalter	77
Abb.5.16: Schaltplan zum Flip Flop.....	78
Abb.5.17: Schaltung zum Flip Flop.....	78
Abb.5.18: Schaltplan zum Astabilen Multivibrator	80
Abb.5.19: Schaltung zum Astabilen Multivibrator	80
Abb.5.20: $U_{BE1} - t$ Diagramm.....	82
Abb.5.21: $U_{CE1} - t$ Diagramm.....	82
Abb.5.22: $U_{BE2} - t$ Diagramm.....	82
Abb.5.23: $U_{CE2} - t$ Diagramm.....	82
Abb.5.24: Schaltplan zur Schmitt Trigger Schaltung.....	83
Abb.5.25: Schaltung zur Schmitt Trigger Schaltung	83

Abb.6.1: Schaltplan zum AND – Gatter.....	86
Abb.6.2: Schaltung zum AND - Gatter	86
Abb.6.3: UND in Schalterlogik.....	87
Abb.6.4: Schaltplan zum OR – Gatter	88
Abb.6.5: Schaltung zum OR - Gatter.....	88
Abb.6.6: ODER in Schalterlogik.....	89
Abb.6.7: Schaltplan zum NOT – Gatter.....	90
Abb.6.8: Schaltung zum NOT - Gatter	90
Abb.6.9: Anschlüsse des BC141.....	90
Abb.6.10: Schaltplan zum NAND – Gatter.....	91
Abb.6.11: Schaltung zum NAND - Gatter	91
Abb.6.12: NAND Gatter in DTL	92
Abb.6.13: Schaltplan zum NOR – Gatter	93
Abb.6.14: Schaltung zum NAND - Gatter	93
Abb.6.15: NOR Gatter in DTL.....	94

9. Index

Abschaltfunken	44	magnetische Feldkonstante	43
Akzeptoren	58	Maschenregel	11
Ampere	6	Mischspannung	66
AND – Gatter	86	mittlere Feldlinienlänge	43
Arbeitsgerade	74	n - Silizium	58
Arbeitspunkt	61	NAND - Gatter	91
Astabilen Multivibrator	80	Nichtlineare Widerstände	8
Ausgangskennlinie	73	NOR – Gatter	93
Basis	69	NOT - Gatter	90
Brücken–Zweiweg - Gleichrichterschaltung	66	Ohmsches Gesetz	8
CR – Glied	39	OR – Gatter	88
Dielektrikum	22	p - Silizium	59
Donatoren	58	Parallelschaltung	13
Eingangskennlinie	72	Permeabilitätszahl	43
Einweg Gleichrichterschaltung	63	pn - Übergang	59
Emitter	69	Polprüfer	57
Entladekurve	31	Potentiometer	8
Farad	22	RC – Glied	35
Flip Flop	78	RC - Siebkette	66
Grenzfrequenz	36	RL - Glied	50
Güte	29	Rückwirkungskennlinie	74
Halbleiter	57	Schmitt Trigger	83
Heißleiter	8	Selbstinduktion	43
Henry	43	Selbstinduktionskoeffizienten	43
Hochpass	40	Serienschaltung	10
Induktiver Blindwiderstand	47	Spannungsmessbereichserweiterung	12
Induktivität	43	Spannungsquelle	17
Innenwiderstand	16	Spulenschaltungen	42
internationalen Farbcode	9	Strommessbereichserweiterung	15
Kaltleiter	8	Stromquelle	18
Kapazität	22	Stromsteuerkennlinie	73
kapazitiver Blindwiderstand	27	Stromverstärkungsfaktor	74
Knotenregel	14	technische Stromrichtung	6
Kollektor	69	Tiefpass	36
Kondensatorschaltungen	21	Transistor	68
Kurzschließen	16	Transistoreffekt	68
Kurzschlussstrom	17	Valenzelektronen	58
Ladekurve	23	Verlustfaktor	29
Lastwiderstand	16	Verlustleistungshyperbel	76
Leerlaufspannung	17	Verlustwinkel	29
Leitwert	7	Verzögerungsschalter	77
Lineare Widerstände	7	Volt	6
Logikschaltungen	85	Wheatstoneschen Meßbrücke	19
LR - Glied	54	Widerstandsschaltungen	5
Magnetfeldaufbau	44	Zeitkonstante	23

