Elektrische Kennlinien

Florian Göbe

15. März 2005

Verwendete SI-Formelzeichen und -Einheiten

Formelzeichen	SI-Einheit	Bedeutung
B	T *(Tesla)*	Magnetfeld / Magnetische Flussdichte
f	Hz *(Hertz)*	Frequenz
G	S *(Siemens)*	elektrischer Leitwert
I	A *(Ampere)*	Strom (Stromstärke)
$\hat{I}$	A *(Ampere)*	Scheitelstrom
L	H *(Henry)*	Induktivität
R	Ω *(Ohm)*	elektrischer Widerstand
T	K *(Kelvin)*	Temperatur
U	V *(Volt)*	Spannung
$\hat{U}$	V *(Volt)*	Scheitelspannung
W	J *(Joule)*	Energie
X_L	Ω *(Ohm)*	Induktiver Widerstand
Z	Ω *(Ohm)*	Scheinwiderstand
Φ	Wb *(Weber)*	Magnetischer Fluss
$\varphi; \varphi_0$	*(Bogenmaß)*	Winkel; Phasenverschiebung
ω	s^{-1} *(Bogmß./s)*	Winkelgeschwindigkeit
Δ	——	Steht für eine Differenz

Verwendete Literatur

Sämtliche verwendete Literatur, sowie alle verwendeten Internetquellen sind im Abschnitt **8 Literatur** aufgeführt. Jeweils am Ende eines Abschnittes stehen die Verweise auf die darin verwendeten Quellen in eckigen Klammern.

Bilder und Tabellen

Alle Bilder und Tabellen sind als Anhänge zu betrachten und daher nicht zum Textumfang der Arbeit zu zählen. Zur besseren Übersicht und zum besseren Erkennen von Zusammenhängen wurden sie in den Text eingebunden.

Inhaltsverzeichnis

1 Vorwort

Man legt eine Spannung an eine Lampe an und sie leuchtet. Wenn die Spannung wächst, wird auch die Lampe heller und umgekehrt. Das kennt wohl jeder, zum Beispiel von der Fahrradbeleuchtung: Wenn man schneller in die Pedale tritt, wird die vom Dynamo induzierte Spannung größer und die Lampe leuchtet heller. Doch wieso leuchtet die Lampe überhaupt? Die Antwort ist einfach: Es fließt ein Strom durch den Glühdraht, der dadurch heiß wird und zu leuchten beginnt.
Da also der Strom für das Leuchten der Lampe verantwortlich ist, muss er in irgendeinem Zusammenhang mit der Spannung stehen. Schließlich leuchtet die Birne bei höherer Spannung heller und wird heißer als bei niedrigerer.

Dieses Verhältnis zwischen Spannung und Strom, das es selbstverständlich nicht nur bei Glühbirnen, sondern bei fast allen elektronischen Bauteilen, Leitern, Halbleitern und sogar einigen Gasen gibt, lässt sich gut in Diagrammen festhalten, wobei man normalerweise die Spannung als x-Koordinate und den Strom als y-Koordinate nimmt. Die dabei entstehende Linie nennt man ***Kennlinie*** des Bauteils. Sie kann linear (gerade) oder gekrümmt sein, aber auch ganz andere Formen annehmen, je nach Art und Beschaffenheit des Bauteils. Manchmal verhält sich die Kennlinie bei einem Anstieg auch anders als bei einem Abfall der Spannung.

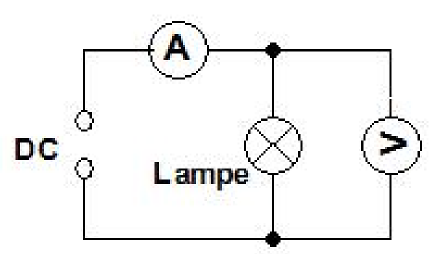
Darüber hinaus bezeichnet man in der Physik noch viele weitere Diagramme, die für die Beschaffenheit eines Bauteils stehen, wie beispielsweise ein B(magnetische Flussdichte)–U(Spannung)–Diagramm bei einer Spule oder ein Geschwindigkeit–Verbrauch–Diagramm eines Otto–Motors als Kennlinie. Das in x-Richtung verlaufende U heißt dabei *Parameter*, das in y-Richtung verlaufende B der *Wert*, der sich aus dem Parameter ergibt.
Die Kennlinie hat in Elektronik und Technik vor allem zwei wichtige Funktionen: Zum Einen stellt sie die Charakteristik eines Bauteils / Gerätes dar und lässt Vermutungen für eventuelle Proportionalitäten zu. Zum Anderen kann man an ihr nicht gemessene Werte, die sich zwischen den Messwerten befinden, ablesen.

Diese Arbeit befasst sich mit elektrischen (hauptsächlich I–U–)Kennlinien verschiedener Bauteile und ihrer experimentellen, computergestützten Erfassung.

2 Aufzeichnung und Auswertung einer Kennlinie

2.1 Messung an einer Glühbirne

Um eine *I–U*–Kennlinie einer Glühbirne aufzuzeichnen, braucht man im Grunde nur eine regelbare Spannungsquelle und zwei Messgeräte: Ein Voltmeter, um die angelegte Spannung zu messen, und ein Amperemeter, das den Strom misst. Man kommt natürlich auch mit einem Multimeter[1] aus, das beides messen kann. Voraussetzung dafür ist jedoch, dass die Messung nicht zu genau sein darf, da sonst durch die Geräte selbst Messfehler auftreten könnten.

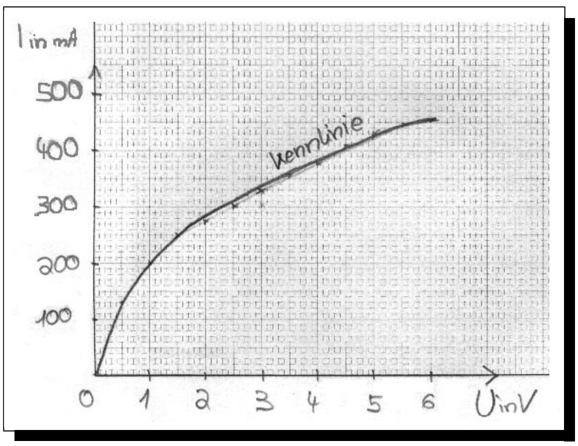


Ich habe für den Versuch ein Multimeter benutzt. Als Spannungsquelle diente mir das Power–Cassy[2], das ich hierbei jedoch nur zum Einstellen der Spannungen benutzte. Nun legte ich verschiedene Spannungen an die Glühbirne, die ich mit Hilfe des Messgerätes genau justieren konnte. War der gewünschte Wert erreicht, schaltete ich das Messgerät als Amperemeter in den Stromkreis, um den Strom zu messen. Die so ermittelten Messergebnisse notierte ich in dieser Tabelle:

U in V	I in mA
0	0
0,5	137
1,0	200
1,5	250
2,0	275
2,5	302
3,0	329
3,5	356
4,0	383
4,5	410
5,0	440
5,5	450
6,0	465

2.2 Grafische Darstellung

Anschließend zeichnete ich die ermittelten Werte als Punkte in ein Diagramm ein. Die Spannung U wird dabei auf der Recht– und der Strom I auf der Hochachse eingetragen. Dann verband ich die Punkte mit einer geglätteten Linie, das heißt mit einer möglichst gleichmäßigen Kurve ohne Knicke, etc. Diese Linie ist dann ein an die Kennlinie angenäherter Graph. Er *interpoliert* die fehlenden Werte, das bedeutet, die Linie zeigt auch Werte, die man nicht gemessen hat, die aber, wegen der Kontinuität der Kurve, wahrscheinlich sind. So kann man aus der gezeichneten Grafik zum Beispiel ablesen, dass der Strom für $U = 4{,}75$ V bei ca. $I = 430$ mA liegen muss. Natürlich ist der Graph, je mehr Messungen man durchführt, immer näher an der wahren Kennlinie.



Jedoch sind alle experimentell ermittelten Kurven bloß verschieden genaue Annäherungen daran, da man die Messungen ja nicht unendlich dicht durchführen kann, um eine kontinuierliche Linie statt vieler Einzelpunkte zu erhalten. [1]

[1] Messgerät, das unter anderem Spannungen, Ströme, Widerstände etc. messen kann.
[2] Leybold **C**omputer **A**ssisted **S**cience **SY**stem, siehe Abschnitt 3.1

2.3 Rechnerische Interpolation

Man muss also irgendwie anders an die fehlenden Werte kommen. Die beste Möglichkeit dazu ist die rechnerische Interpolation der fehlenden Punkte. Hierbei muss man eine Gleichung, Funktion oder andere Definition der Punktmenge haben, die zur Kennlinie gehören. Die meisten Kennlinien, vor allem diejenigen einfacherer Bauteile wie Glühbirnen, verhalten sich nach einer einfachen Funktion. Ansätze dazu liefert einem meistens die aus dem Experiment gezeichnete Grafik.
In diesem Fall erinnert die Linie stark an den Graphen einer Wurzelfunktion. Anhaltspunkte dafür sind die abnehmende Steigung mit wachsenden x–Werten, sowie der Schnittpunkt mit der U–Achse bei $U = 0$.

Wir nehmen also an: $I \sim \sqrt{U}$

Als Funktionsgleichung formuliert bedeutet dies

$$\mathbf{I(U) = k \cdot \sqrt{U}}$$

..., wobei k eine Konstante ist, die nun für exakt diese Glühbirne steht.
Diese Konstante gilt es nun aus den Messwerten zu ermitteln:

$$I(U) = k \cdot \sqrt{U} \qquad | : \sqrt{U} \tag{1}$$

$$\Leftrightarrow k = \frac{I(U)}{\sqrt{U}} \tag{2}$$

Es bietet sich hierbei an, die Mittelwerte der Messungen zu verwenden. Da man zur Errechnung von k jedoch $\sqrt{U}$ braucht, erweitern wir die Tabelle zunächst um die Spalte $\sqrt{U}$ und errechnen schließlich das k für jedes U nach der obigen Formel:

U in **V**	$\sqrt{\mathbf{U}}$ in $\sqrt{\mathbf{V}}$	**I** in **mA**	**k** in $\frac{\mathbf{A}}{\sqrt{\mathbf{V}}}$
0	0	0	-
0,5	0,707	137	0,194
1,0	1,000	200	0,200
1,5	1,225	250	0,204
2,0	1,414	275	0,194
2,5	1,581	302	0,191
3,0	1,732	329	0,190
3,5	1,871	356	0,190
4,0	2,000	383	0,192
4,5	2,121	410	0,193
5,0	2,236	440	0,197
5,5	2,345	450	0,192
6,0	2,449	465	0,190

Nun wird aus den verschiedenen k-Werten der arithmetische Mittelwert gebildet:

$$\bar{\mathbf{k}} = \mathbf{0{,}1939}\ \frac{\mathbf{A}}{\sqrt{\mathbf{V}}}$$

Für $U = 0$ gibt es kein k, da man auf eine Division durch 0 stößt. Das ist so zu erklären, dass bei 0 V Spannung der Faktor k keine Rolle spielt. Der Graph verläuft **immer** durch den Ursprung, da ohne Spannung auch kein Strom fließen kann.

Die Kennliniengleichung für diese Glühbirne ist also:

$$\mathbf{I(U) = 0{,}1939\ \frac{A}{\sqrt{V}} \cdot \sqrt{U}}$$

Diese Funktionsgleichung lässt nun viel genauere Berechnungen der Ströme bei bestimmten Spannungen zu als die zeichnerische Kennlinie. Außerdem kann man sie einfach mit einem Funktionsplotter darstellen, ohne konkrete Messwerte benutzen zu müssen.[1, 2]

2.4 Der elektrische Leitwert

Eine Kennlinie zeigt das Verhältnis vom Strom zur Spannung. Bei der Glühbirne, wie auch bei den meisten anderen Bauteilen, gilt, dass eine höhere Spannung einen stärkeren Strom hervorruft.
Nehmen wir nun einmal eine lineare Kennlinie an (Spannung und Strom verhalten sich proportional ($U \sim I$)). Die doppelte Spannung ruft nun einen doppelt so starken Strom hervor.

$$I(U) = G \cdot U$$

In diesem Fall ist also nur der Proportionalitätsfaktor G ausschlaggebend für die Steigung der Kennlinie. Je größer G ist, desto rapider wächst der Strom bei steigender Spannung. Im Grunde gibt G also an, wie gut ein Leiter den Strom leitet. Daher nennt man den Faktor auch *elektrischer Leitwert*. Er ist wie folgt definiert:

$$G = \frac{I}{U} \qquad [G] = 1\ \frac{\mathrm{A}}{\mathrm{V}} = 1\ \mathrm{S} \quad \text{(Siemens)}$$

Folglich ist G auch der Kehrwert des *elektrischen Widerstandes (R)*: $G = R^{-1}$.

Bei nicht-linearen Kennlinien ist G auch von der Spannung abhängig. Es darf also nicht mit dem konstanten Faktor k aus Abschnitt 2.3 verwechselt werden. Es ist jedoch relativ leicht möglich, eine Funktionsgleichung für G in Abhängigkeit von U aufzustellen (Gleichung für die Glühbirne):

$$G(U) = \frac{I(U)}{U} = \frac{k \cdot \sqrt{U}}{U} = \frac{k \cdot \sqrt{U}}{\sqrt{U} \cdot \sqrt{U}} = \frac{k}{\sqrt{U}}$$

Aber wieso ist bei dieser Glühbirne der Leitwert bei kleinen Spannungen viel höher als bei großen? Also wieso ist bei einem kleinen Wert für U eine viel geringere Erhöhung notwendig, als bei großem U, um den gleichen Stromzuwachs zu erhalten? Wieso leitet die Glühbirne bei niedriger Spannung „besser“ als bei hoher?

Die Antwort ist der Strom selbst: Ist die Spannung höher, fließt ein stärkerer Strom durch den Leiter, also in diesem Fall durch den Glühdraht und heizt diesen auf mehrere tausend Kelvin. Durch die stärkere Bewegung der Atome bei der höheren Temperatur entsteht ein zusätzlicher Widerstand für den Strom. Und dieser steht, wie bereits erwähnt, im Gegensatz zum Leitwert. [6, 4, 3]

2.5 Der Ohmsche Widerstand

In der Elektrotechnik ist es oft wichtig, Ströme über eine Spannung zu regeln. Damit dies gut gelingt, strebt man für viele Teile einen konstanten Leitwert und damit auch Widerstand an. Hier verhalten sich Spannung und Strom proportional, die Kennlinie ist linear. Ein solches Bauteil mit konstantem Leitwert nennt man Ohmschen Widerstand. Ein Beispiel hierfür ist das Metall Konstantan, wie man schon am Namen hört. Es hat bei unterschiedlichsten Spannungen und Temperaturen einen nahezu gleichbleibenden Leitwert. Mehr dazu im Abschnitt 4. [6]

3 Computergestützte Kennlinienerfassung

3.1 Messen mit Leybold Cassy

Im Zeitalter der Computer erscheint die manuelle Erfassung von Messdaten und das anschließende Notieren der Ergebnisse in Tabellen reichlich überholt. Es ist nicht nur extrem aufwendig, sondern auch verhältnismäßig ungenau, da die Anzahl der Messungen stark begrenzt ist.
In modernen Forschungseinrichtungen werden Messdaten längst per Computer erfasst und ausgewertet. Für den Schulunterricht blieb dies aber aufgrund hoher Kosten und großem Aufwand lange nahezu unmöglich.

Aus diesem Grund entwickelte der Lehrmittelhersteller Leybold Didactic GmbH das sogenannte *Computer Assisted Scientific System* (kurz: CASSY). Es handelt sich dabei um ein Computerinterface, das über eine serielle (COM oder USB) Schnittstelle mit einem Computer verbunden wird. Es gibt verschiedene Ausführungen des CASSY für unterschiedliche Aufgabenbereiche. Man kann auch mehrere CASSY-Geräte miteinander verbinden, so dass man sie gleichzeitig benutzen kann. [5]

3.2 Power-Cassy

Links auf dem Bild zu sehen ist das Power-CASSY. Mit ihm kann man Spannungen zwischen -10 und $+10$ Volt im Millivolt-Bereich einstellen. Auf Wunsch kann es Gleichspannungen und Wechselspannungen in Sinus-, Dreiecks- und Rechtecksform erzeugen. Frequenz, Amplitude und Stellbereich sind dabei frei wählbar! Gleichzeitig kann es den fließenden Strom messen. Die gesamte Steuerung und Messung erfolgt dabei vom PC aus. Es ist auch möglich, auf Strom–Modus umzuschalten. Das Power-CASSY regelt dann die Spannung automatisch immer genau so hoch, dass eine vom Benutzer eingestellte Stromstärke erreicht wird. Dabei werden die Spannungen gemessen. Man hat also mit dem Power-CASSY allein bereits einen großen Funktionsumfang. [5]

3.3 Sensor-Cassy

Rechts oben im Bild sieht man das Sensor-CASSY. Es ist mit seinen zwei Messkanälen für Messungen in vielerlei Aufgabenbereichen geeignet. Mit Kanal B ist es möglich, Spannungen zu messen. Kanal A unterstützt überdies noch die Strommessung. Des weiteren kann man an beiden Kanälen Zusatzboxen für weitere Messungen anschließen (siehe Bild), die bei Leybold erhältlich sind. Dies ermöglicht eine enorme Flexibilität und, aufgrund der äußerst präzisen CASSY-Messinstrumente, sehr genaue Messungen. Das CASSY ist auf diese Weise für fast alle physikalischen Messungen, egal, ob sie mechanischer, optischer, elektrischer oder anderer Art sind, geeignet und bringt immer genaue und zufriedenstellende Messergebnisse. Im unteren Bereich des Sensor-CASSY befinden sich außerdem noch zwei Anschlüsse, an denen eine manuell am Einstellrad regulierbare Spannung (0–16 V) abgegriffen werden kann, sowie ein Umschalt-Relais, das vom Computer aus steuerbar ist und während der Messung aktiviert werden kann. [5]

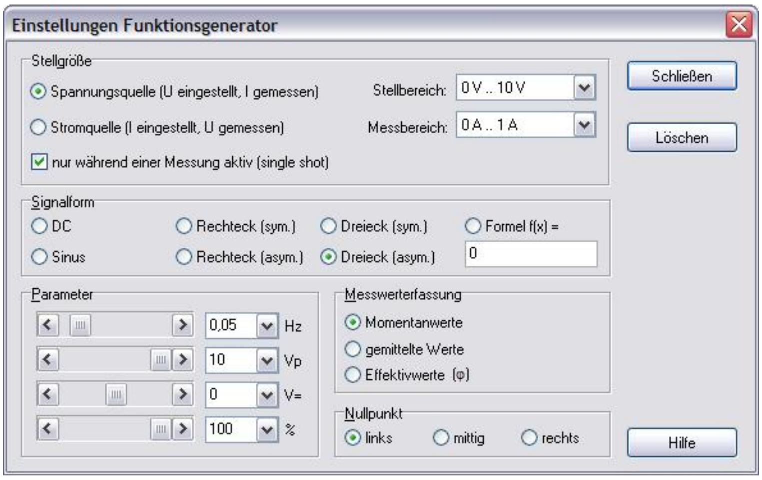
3.4 Cassy-Lab

CASSY-Lab ist die zum CASSY gehörende Software. Mit ihr kann man sämtliche Messdaten komfortabel in Tabellen erfassen und in Diagrammen darstellen. Dabei kommt das Programm auch problemlos mit großen Datenmengen zurecht: CASSY-Lab kann Messdaten in Abständen von $10\,\mu$s aus dem CASSY auslesen und insgesamt bis zu 16.000 Messwerte pro Messreihe aufnehmen! Dabei lässt es dem Benutzer viele Freiheiten bei der Messkonfiguration. Auch das Power-CASSY wird von CASSY-Lab aus gesteuert. Nach den Messungen ist es problemlos möglich, die Tabellen und Diagramme mit den Messwerten in andere Programme zu exportieren. [5]

4 Kennlinien Ohmscher Widerstände & Messgrundlagen

4.1 Vorbereitung

Nun wollen wir mal eine Kennlinie mit CASSY-Lab aufzeichnen. Dafür brauche ich in erster Linie das Power-CASSY. Ich verbinde also das Power-CASSY mit dem Computer und schließe mit zwei Kabeln den Widerstand an die beiden Pole des Power-CASSYs an. Nun starte ich CASSY-Lab. Im Startfenster wähle ich für den COM1–Anschluss die Option „CASSY“ und CASSY-Lab erkennt das angeschlossene Power-CASSY. Dann wechsle ich zur Registerkarte „CASSY“ und klicke auf das abgebildete Power-CASSY-Modul. Im daraufhin erscheinenden Fenster nehme ich die folgenden Einstellungen vor:



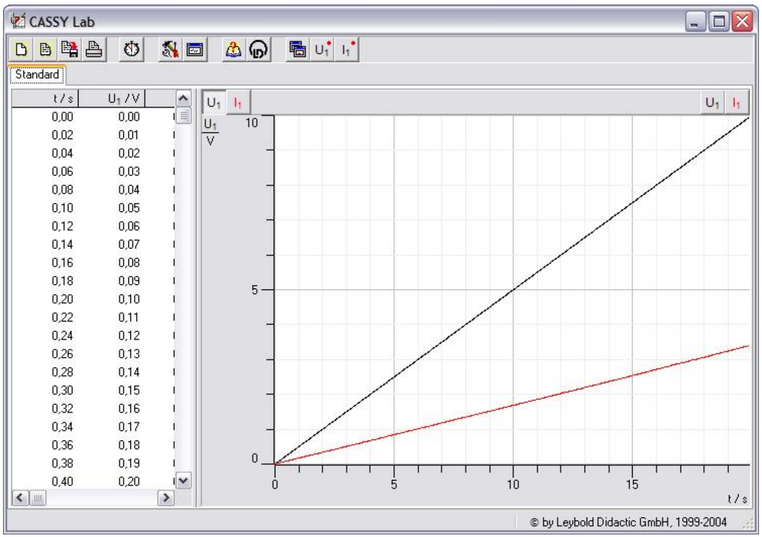
Zuerst schalte ich die Option „Spannungsquelle“ ein und aktiviere das Kontrollkästchen „Nur während einer Messung aktiv“, damit der Widerstand nicht schon während der Versuchsvorbereitung unter Spannung steht. Da dies die erste Messung dieses Widerstandes ist, lasse ich den Messbereich vorerst auf der gröbsten Einstellung. Als Signalform wähle ich „Dreieck(asymmetrisch)“. Das bedeutet, dass das Power-CASSY eine linear ansteigende und abfallende Spannung ausgibt. Als nächstes setze ich den Nullpunkt auf „links“, d.h., dass die Spannung nicht in den negativen Bereich abfällt, sondern sich stattdessen auf den Positiven beschränkt.
Ich möchte für dieses Experiment, dass die Spannung 20 Sekunden lang linear auf 10 Volt ansteigt. Die Amplitude stelle ich also auf $\hat{U} = 10\,\mathrm{V}$ ein. Eine konstante, absolute Spannung, auf die die Wechselspannung gelegt wird, brauchen wir nicht; ich belasse sie also auf 0 V. Der Regler darunter ist für das Verhältnis von Spannungsanstieg und Spannungsabfall verantwortlich. Da wir nur eine ansteigende Spannung brauchen, stelle ich ihn auf 100 % (50 % entspräche einem Gleichgewicht). Nun muss ich nur noch die Frequenz einstellen. Dabei entspricht für eine Periode die Periodentauer T der Experimentdauer t:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{t} = \frac{1}{20\,\mathrm{s}} = 0{,}05\,\mathrm{Hz}$$

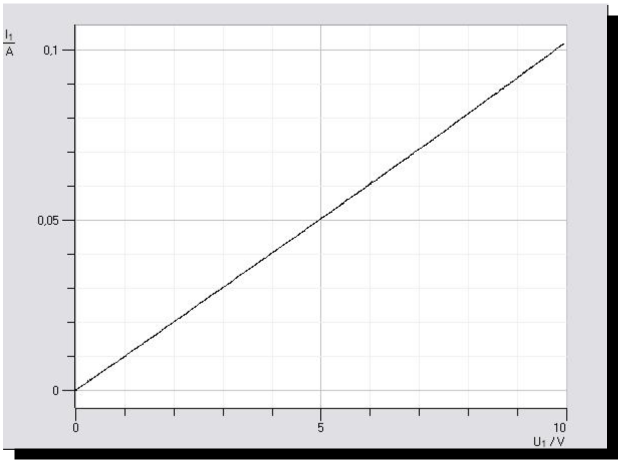
Als nächstes stelle ich die Messdauer im Messoptionsfenster auf 19,9 s, damit die Messung, auch bei einer eventuellen Ungenauigkeit des Power-CASSY, in jedem Fall vor Ablauf der Periodendauer beendet wird. Die Messreihe und damit das Diagramm werden dabei ja lediglich um eine Zehntelsekunde kürzer. Auf das Ergebnis hat dies bei einer so „langen“ Messung aber keine Auswirkung. Nun drücke ich die F9-Taste auf der Tastatur und die Aufzeichnung beginnt... [5]

4.2 „Kalte“ Messung

Das Power-CASSY legt nun die mit 0,5 $\frac{\text{V}}{\text{s}}$ ansteigende Spannung an den Widerstand und misst den Strom, der ihn durchfließt. Am linken Bildschirmrand werden die Messdaten nun in einer Tabelle aufgelistet. Zeitgleich wird der Graph gezeichnet. Nach exakt 19,9 Sekunden ist die Messung vorbei. Nun lasse ich noch die Achsen entsprechend der gemessenen Maximalwerte skalieren.
Werfen wir einen Blick auf das Ergebnis:



Im linken Bereich des CASSY-Lab-Fensters sieht man den Anfang der Tabelle, in der die Messwerte stehen. Rechts daneben befindet sich das U-t-Diagramm (schwarz) und das I-t-Diagramm (grau). Schon hier lässt sich anhand der linear ansteigenden Graphen erkennen, dass es sich um einen *Ohmschen Widerstand* (siehe dazu Abschnitt 2.5) handelt.
Um nun die I-U-Kennlinie zu erhalten, lege ich in den Darstellungsoptionen (F5 drücken und Registerkarte „Darstellung“ wählen) eine neue Darstellung mit dem Namen „Kennlinie“ an und wähle U für die x-Achse und I für die y-Achse. Anschließend skaliere ich das Bild wieder anhand der Maximalwerte.
Jetzt zeigt das Bild die I-U-Kennlinie dieses Widerstandes:



An diesem Diagramm ist nun ganz deutlich die Linearität der Kurve[3] erkennbar. Der Leitwert G ist also konstant. Berechnen wir ihn anhand der 5 V-Messung:

$$G = \frac{I}{U} = \frac{50{,}5\ \text{mA}}{5\ \text{V}} = 10{,}1\,\text{mS}$$

daraus folgt der Widerstand:

$$R = G^{-1} = (10{,}1\,\text{mS})^{-1} = 99\ \Omega$$

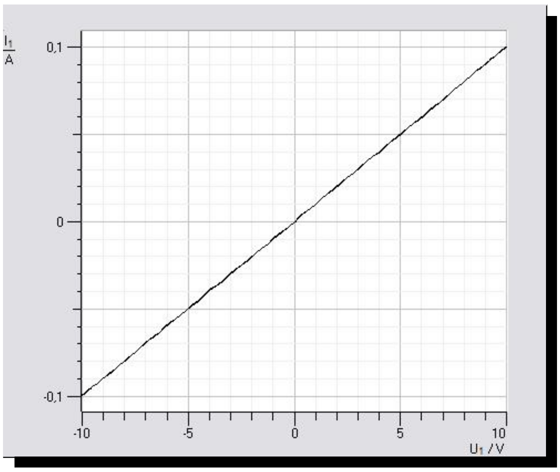
Ich habe für dieses Experiment einen 100 Ω–Kohlewiderstand mit einer Toleranz von ±5% benutzt. Das Ergebnis ist also durchaus zufriedenstellend. Der Widerstand hat sich während des Experimentes nicht merklich erhitzt.[4]

4.3 Widerstand bei Wechselstrom

Dass ein kaltbetriebener Widerstand ohmsche Eigenschaften hat, haben wir nun experimentell bestätigt. Allerdings änderte sich die Spannung mit 0,5 $\frac{\text{V}}{\text{s}}$ sehr langsam. Prüfen wir nun, wie sich der Widerstand bei Wechselstrom und im negativen Spannungsbereich verhält. Dafür lege ich den Nullpunkt in die Mitte und stelle eine Sinusspannung mit 50 Hz ein. Das Verhältnis von Anstieg und Abfall setze ich auf 50% (Gleichgewicht).

[3] auch gerade Graphen werden in der Mathematik „Kurve“ genannt.

Ich lasse CASSY-Lab nun die Kennlinie 5 Perioden lang aufzeichnen ($t = \frac{5}{50\text{Hz}} = 0{,}1\,\text{s}$):



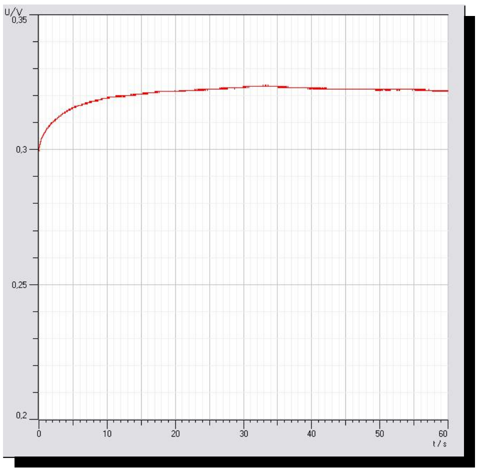
Die Grafik zeigt nun die Kennlinien der fünf Perioden. Man kann gut erkennen, dass sie alle linear verlaufen und sich fast perfekt decken. Ich wiederhole das Experiment mit einer Frequenz von $f = 500\,\text{Hz}$ und nehme entsprechend 0,01 s lang mit zehnfacher Messdichte auf. Das Ergebnis jedoch bleibt das Gleiche. Erst bei sehr hohen Frequenzen von über 5 kHz bekommt die Kennlinie leichte Abweichungen. Für Anwendugen in diesen Frequenzbereichen gibt es allerdings Spezialwiderstände, die auch hier konstante Kennlinien aufweisen.[4]

4.4 „Heiße“ Messung

Nun will ich prüfen, wie der Widerstand, der ja ohmsche Eigenschaften haben soll, auf hohe Temperatur reagiert. Eigentlich sollte der Leitwert gleich bleiben. Ich verwende hierfür einen relativ kleinen Widerstand von 33 Ω. Um ihn zu erhitzen, setze ich ihn 60 Sekunden lang einer Dauergleichspannung von 10 V aus. Für I prognostiziere ich dabei:

$$I = \frac{U}{R} = \frac{10\text{ V}}{33\ \Omega} = 0{,}3\,\text{A}$$

Bei 300 mA sollte sich der Widerstand (nicht zu schnell) merklich erhitzen. Ich führe den Versuch nun durch. Den Widerstand befestige ich dazu mit zwei Krokodilklemmen und hänge ihn aus dem Fenster. Nun starte ich das Experiment. Bereits nach kurzer Zeit beginnt er zu rauchen und schwarz zu werden. Eigentlich ein Indiz für große Hitze. Es ergibt sich folgendes Diagramm:



Bereits auf den ersten Blick sieht man, dass der Strom trotz konstanter Spannung nicht gleich bleibt, sich der Leitwert also verändert. Tatsächlich beträgt die Stromstärke zu Beginn genau 0,3 A, wie zuvor berechnet. Dann steigt sie jedoch mit der Zeit an: Nach 10 s fließen bereits 0,32 mA durch den Widerstand. Da die Spannung nicht geändert wurde, und etwa nach dieser Zeit das Rauchen anfing, führe ich den Stromzuwachs auf die hohe Temperatur zurück. Tatsächlich wurde der Widerstand, wie nach dem Experiment sichtbar wurde, sehr heiß. Sein Gehäuse war geschmolzen und verkohlt. Es muss sich daher um eine Erhitzung von mehreren hundert Kelvin gehandelt haben. Erstaunlich ist jedoch, dass der Leitwert unter hoher Temperatur stieg, statt – wie bei der Glühbirne – zu fallen. Die Ursache dafür liegt in der Beschaffenheit des Bauteils. Ich verwendete für das Experiment einen Kohlewiderstand und Kohle hat – im Gegensatz zu Metallen – die Eigenschaft, seine Leitfähigkeit bei hohen Temperaturen zu verbessern. Der Glühdraht der Glühbirne hingegen war aus Wolfram, einem Metall.[4, 6]

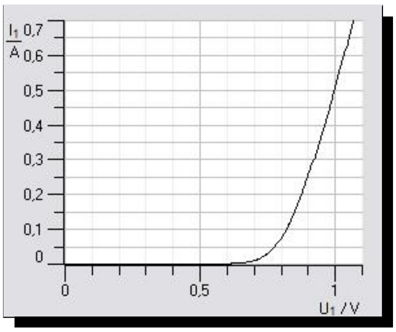
5 Röhren & Halbleiter

5.1 Dioden

Eines der wichtigsten elektronischen Bauteile ist die Diode (gr. *di hodos* – Zwei Wege / Zwei Anschlüsse). Sie hat im Wesentlichen die Funktion, als „Einbahnstraße“ für den Strom zu fungieren, ihn also nur in eine Richtung durchfließen zu lassen. Früher baute man Dioden aus Glasröhren, die evakuiert und mit zwei Elektroden versehen wurden. Die Kathode war dabei ein meist spiralförmiger Draht, durch den ein Heizstrom floss, um den Draht zu erhitzen. Dadurch konnten sich die Elektronen aus dem Draht lösen und durch das Vakuum zur Anode „fliegen“. Da der Strom so nur in eine Richtung – von der beheizten Kathode zur nicht beheizten Anode – fließen konnte, benutzte man die Diode unter anderem zum Gleichrichten von Wechselspannungen.
Heute benutzt man Halbleiterdioden, die nicht nur wesentlich kleiner als die alten Röhren, sondern auch sofort einsatzbereit sind und nicht erst geheizt werden müssen. Sie halten außerdem länger, sind wesentlich robuster und viel billiger in der Herstellung. Halbleiterdioden werden unter anderem aus Silicium oder Germanium hergestellt.[6, 7]

5.1.1 Die Siliciumdiode

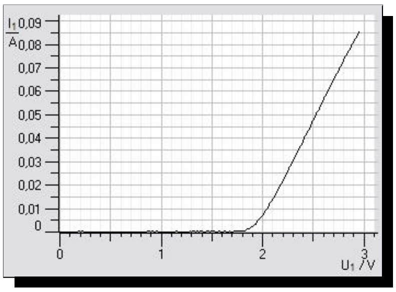
Silicium ist heute der wichtigste Halbleiter und zählt zur Familie der Halbmetalle. Es findet in der gesamten Elektronik in Form von Dioden und Transistoren Verwendung. Diese werden aus sehr reinem (99,9 Prozentigen) Silicium hergestellt, das mit speziellen Verfahren auf diese Konzentration gebracht wird. In dieser Form hat Silicium die Eigenschaft, nur in eine Richtung zu leiten. Eine Siliciumdiode ist daher im Grunde nichts weiter als ein kleiner Siliciumkristall, an dem rechts und links zwei Elektroden angebracht sind.
Ich messe nun zuerst die Kennlinie bei linear ansteigender Spannung. ($U_{max} = 1{,}1\,\mathrm{V}$; $t = 20\,\mathrm{s}$)



Auf den ersten Blick sieht die gemessene Kennlinie etwas merkwürdig aus: Die Spannung wächst, beim Strom jedoch tut sich nichts. Dann jedoch, zwischen 0,5 und 0,6 V, beginnt er anzusteigen und wächst plötzlich rapide. Bei 1,1 V fließt bereits ein ganzes Ampere durch die Diode!
Die Spannung, bei der die Diode zu leiten beginnt, heißt *Schwellenspannung*. Mit einem geeigneten Messgerät ist es möglich, sie genau zu bestimmen: 576 mV. Ist die Schwellenspannung überschritten, steigt der Strom exponentiell an. Der Leitwert der Diode steigt also mit der Spannung. Daher ist sie kein Ohmscher Widerstand! Die am Diodenwiderstand freigesetzte Energie wird in Form von Wärme abgegeben. [6, 7]

5.1.2 Die LED

Die LED (engl. *Light Emitting Diode* - Licht aussendende Diode) ist eine Diode, die Galliumarsenit als Halbleiter verwendet. Wird die Diode von Strom durchflossen, wird die freigesetzte Energie in Form von elektromagnetischen Wellen (Licht) abgegeben. → Die Diode leuchtet.



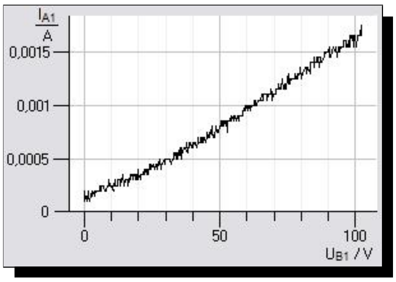
Eine Leuchtdiode verhält sich oberhalb der Schwellenspannung weitestgehend nach ohmschen Eigenschaften. Dies ist so zu erklären, dass die Diode immer einen Teil der Energie selbst verbraucht, um Licht zu erzeugen. Erhöht man die Spannung, leuchtet sie heller, also steigt auch der Widerstand. Deutlich zu erkennen ist, dass die Schwellenspannung bei dieser LED deutlich höher liegt als bei der Si-Diode, nämlich bei 1,8 V. [8]

5.1.3 Durchbruchspannung

Die Aufgabe einer Diode ist es, nur in eine Richtung zu leiten. Dies prüfe ich, indem ich eine negative Spannung bis -16 V anlege. Das Ergebnis: Die Diode sperrt ordnungsgemäß und es fließt kein Strom. Dies ändert sich jedoch schlagartig, wenn man einen bestimmten Spannungsbetrag, die sog. *Durchbruchspannung* überschreitet: Die Diode leitet dann plötzlich auch in die negative Richtung. Man spricht dabei von einem *Durchschlag.*
Die Durchbruchspannung ist von Diode zu Diode unterschiedlich und hängt hauptsächlich von ihrer Belastbarkeit ab. Winzige Dioden aus der Mikroelektronik können bereits bei einem Volt einen Durchschlag erleiden. [7]

5.1.4 Die Vakuumröhrendiode

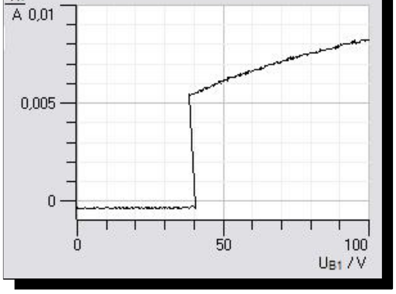
Die älteste Form der Diode ist, wie bereits erwähnt, die Röhre. Die Kathode wird mit einem Heizstrom geheizt. Dann wird zwischen Anode und Kathode eine ausreichende Anodenspannung angelegt. Nun beginnen die Elektronen die heiße Kathode zu verlassen und, von der Anode angezogen, durch das Vakuum zu ihr zu fliegen. → Die Röhre leitet, allerdings nur in eine Richtung! Ein Durchschlag in Sperrrichtung ist hier nur bei extrem hohen Spannungen von vielen Kilovolt zu erwarten, da die Elektronen dafür „aus eigener Kraft“ die Anode verlassen müssten. Ich will nun die Kennlinie einer Röhre aufnehmen. Dafür verwende ich die Leybold Demonstrationsdiode 555-610. Mit einem Kleinspannungstrafo lege ich die Heizspannung von 6 V an. Da das Power-Cassy nur Spannungen bis 10 V erzeugen kann, benutze ich das Röhrennetzgerät von Leybold. Zum Messen der Spannungen und Ströme benutze ich das Sensor-Cassy, das bis 100 V belastbar ist. Nun starte ich eine 10-Sekunden-Messung wobei ich die Spannung manuell langsam bis auf 100 V aufdrehe.



Die dabei entstehende I-U-Kennlinie verläuft weitestgehend linear. Der Strom der Elektronen durch das Vakuum scheint also von keiner Schwellenspannung abhängig zu sein. Man muss hier von den kleinen Unebenheiten der Kurve absehen, da die Spannung erstens manuell geregelt wird und es sich zweitens bloß um eine Demonstrationsdiode von immensen Ausmaßen (Die Distanz zwischen Anode und Kathode beträgt mehrere Zentimeter!) und geringer Genauigkeit handelt. Eine qualitative Analyse lohnt sich aus diesen Gründen ebenfalls nicht. Der Strom beträgt bei 100 V gerade mal 1 mA, was ebenfalls auf Art und Beschaffenheit der Demonstrationsröhre zurückzuführen ist. In industriell gefertigten Röhren, wie sie früher in zahlreichen elektronischen Geräten zur Anwendung kamen, flossen wesentlich stärkere Ströme. [9]

5.1.5 Die Gas-Röhre

Man kann die Leitfähigkeit einer Diode verbessern, indem man sie mit einem speziellen Gas füllt. Für diesen Versuch verwende ich eine Gas-Triode, bei der ich allerdings nur Anode und Kathode anschließe.



Es sieht auf dieser Grafik so aus, als würde zu Beginn ein negativer Strom fließen. Dies ist jedoch auf einen Tarierfehler beim Sensor-Cassy um -0,3 mA zurückzuführen. Ich habe dies geprüft.
Man kann dem Diagramm jedoch recht schön entnehmen, dass es hier sehr wohl so etwas wie eine Schwellenspannung gibt. Außerdem fließen hier bei 100 V immerhin schon 8 mA, obwohl die Distanz zwischen A. und K. um einiges größer ist.
Bis 40 V leitet die Gas-Röhre so gut wie gar nicht, da das Gas (ein Helium-Torr-Gemisch) die Elektronen beim Durchfliegen der Röhre behindert. Bei ca. 40 V jedoch „zündet“ das Gas. Es ist zwischen Anode und Kathode aufgrund der Spannung vollständig ionisiert und die Anionen beginnen, Ladung zur Anode zu transportieren. Dies

geht wesentlich effizienter vonstatten als der Transport durch Elektronen im Vakuum, da viel mehr von ihnen gleichzeitig zur Verfügung stehen. Wenn man den Raum abdunkelt, kann man außerdem ein schwaches, bläuliches Leuchten um die Kathode herum erkennen, das von den Ionen hervorgerufen wird. Durch den plötzlichen Stromfluss fällt die Spannung zunächst minimal ab und der Graph geht ein kleines Stück zurück nach links. Dies ist aber für die Auswertung eher irrelevant. Es ist auch möglich, die Gas-Röhre ohne Heizspannung zu betreiben. Es ist dann jedoch eine sehr viel höhere Zündspannung von mehreren hundert Volt vonnöten, die das Sensor-CASSY nicht aushalten würde. [10]

5.2 Trioden

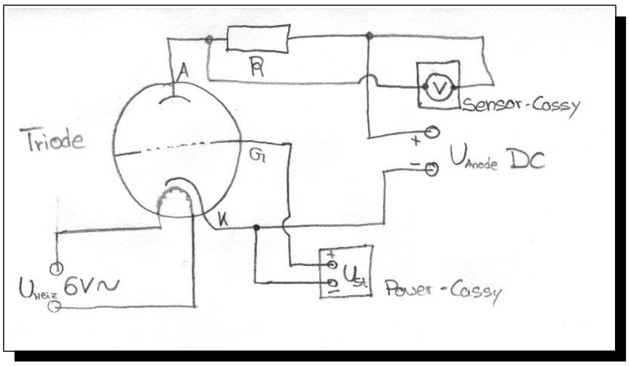
Trioden (gr. *tri hodos* – drei Wege(drei Anschlüsse)) haben in der Elektronik im Wesentlichen die Aufgabe, Ströme zu steuern und Signale zu verstärken. Eine Triode hat, abgesehen von Kathode und Anode, noch einen weiteren Anschluss. Dieser ist für die Stromsteuerung zuständig. Legt man eine geringe Spannung zwischen diesem Anschluss und Anode bzw. Kathode an, kann man über diese sog. *Steuerspannung* den Stromfluss regulieren. [10]

5.2.1 Funktionsprinzip der Hochvakuumtriode

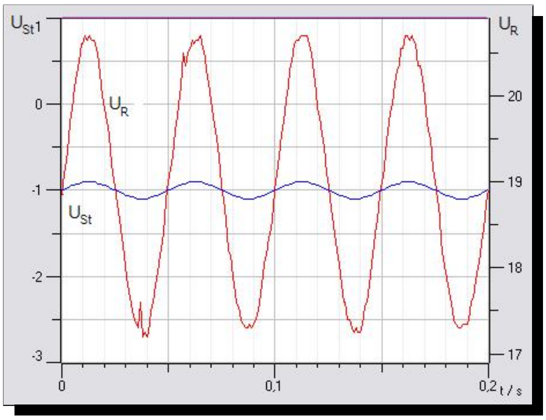
So wie die Dioden wurden auch die Trioden früher aus evakuierten Glasröhren gebaut. Diese sog. Hochvakuumtrioden funkionierten im Grunde wie eine Vakuumröhrendiode (siehe 5.1.4). Zwischen Anode und Kathode befindet sich jedoch ein dünnes Metallgitter, an das man von außen eine Spannung anlegen kann. Da sich dieses Gitter viel näher an der Kathode befindet als die Anode, reicht hier eine kleine Spannung aus, um einen großen Effekt zu erzielen: Legt man eine Spannungsquelle mit dem Minuspol an das Gitter und mit dem Pluspol an die Kathode, so ergibt sich eine zusätzliche Kathode, die die Elektronen durchqueren müssten. Die Elektronen schaffen es nun nicht mehr, sich in so großer Zahl aus der Elektronenwolke an der Kathode zu lösen. Auf diese Weise fließt ein Strom zwischen Kathode und Anode, der jedoch von der Gitterspannung beschränkt und so gesteuert werden kann.
Legt man nun keine Dauerspannung, sondern ein Signal als Steuerspannung an, so verhält sich der Anodenstrom entsprechend diesem Signal. Wird es stärker, fließt ein stärkerer Strom, wird es hingegen schwächer, reagiert auch der Strom entsprechend. Auf diese Weise kamen solche Trioden beispielsweise in Audioverstärkern vor. Das schwache Eingangssignal wurde als Steuerspannung an eine Triode gelegt, die es dann verstärkte. Oft schaltete man mehrere Trioden hintereinander, immer den Anodenstrom der vorherigen als Steuerstrom für die nächste Triode benutzend, wodurch man eine wesentlich größere Verstärkung erreichte.
Analog zur Familie der Dioden gibt es auch neben den Hochvakuumtrioden Gastrioden, die im Prinzip ähnlich arbeiten. Der einzige Unterschied ist, dass hier der Ionenfluss gesteuert wird (Siehe dazu Abschnitt 5.1.5).

5.2.2 Spannungsverstärkung mit der Triode

Ich untersuche nun eine herkömmliche EC-95 Triode als Spannungsverstärker und benutze dafür den folgenden Aufbau:



Die Funktionsweise:
Als Anodenspannung U_{Anode} verwende ich zunächst 50 V. Der Anodenstrom I_{Anode} soll in der Triode von der Steuerspannung U_{St}, die aus dem Power-Cassy kommt, gesteuert werden. Um nun wieder eine Spannung zu erhalten, schalte ich den Widerstand R in die Schaltung, an dem ich dann eine Spannung U_R abgreifen kann.
Da das Ohmsche Gesetz $U = R \cdot I$ gilt, ist es ratsam, einen möglichst hohen Widerstand für eine effektive Verstärkung zu benutzen. Ich verwende daher den recht hohen Widerstand von $R = 20\,\mathrm{k\Omega}$. Als Steuersignal lege ich eine Sinusspannung U_{St} (20 Hz) mit einer Amplitude von 0,1 V an. Da an U_{St} kein Strom fließen, das Gitter also keine Elektronen auffangen soll, sorge ich dafür, dass U_{St} komplett im negativen Bereich bleibt und nur seinen Betrag sinusförmig ändert. Dies erreiche ich, indem ich einfach eine Gleichspannung von $-1\,\mathrm{V}$ über die Sinusspannung lege. U_R zeichne ich über das Sensor-Cassy auf.



Auf den ersten Blick wird die Verstärkung des Signals erkennbar (Zwar ist die Skala für U_R zu derjenigen für U_{St} aufgrund der hohen Anodenspannung verschoben, jedoch sind beide Skalierungen gleich).
Die Amplitude wurde also von 0,1 V auf 2,8 V verstärkt. Das entspricht einer Verstärkung um das 28fache!
Es ist jedoch auch zu erkennen, dass der Verlauf von U_R keine reine Sinusfunktion mehr beschreibt, sondern an manchen Stellen, vor allem bei den Scheitelspannungen, kleine „Zacken“ aufweist. Dies rührt daher, dass der Widerstand R sehr groß, der gesteuerte Anodenstrom jedoch gering ist. Daher reichen minimale Schwankungen des Stromes, die verschiedene Ursachen haben können (Kriechströme durch Influenz, etc.), um sich deutlich im Spannungsdiagramm bemerkbar zu machen. Man erreicht also mit größerem R zwar eine bessere Verstärkung, dafür leidet die Signalqualität darunter.
Um dem abzuhelfen, könnte man eine größere Steuerspannung verwenden, beispielsweise, indem man mehrere dieser Anordnungen zusammenschaltet, wobei das U_R des ersten Schaltkreises dem zweiten als U_{St} dient. Dabei stößt man jedoch auf ein weiteres Problem:
Je größer die Amplituden der Steuerspannungen werden, desto größer ist der Bereich, in dem die Triode den Anodenstrom steuern muss. Dabei treten erneute Qualitätsverluste auf. Die Sinuskurven werden dabei auf merkwürdige Art gestaucht, also an den Scheiteln flacher als normal. Dies rührt daher, dass die Steuerspannung die Elektronen ja nur davon abhalten kann, das Gitter zu passieren. Wenn die Gitterspannung jedoch so hoch ist, dass keine Elektronen mehr hindurchfliegen können, hat eine weitere Erhöhung keine Auswirkung mehr. Das Gleiche gilt, wenn sie niedrig genug ist, dass alle Elektronen das Gitter unbeschadet passieren. Da also die Spannung bei den Sinusscheiteln zu hoch bzw. zu tief ist, hat dies keine Auswirkung mehr auf I_{Anode} und damit auch nicht auf U_R. Also flacht der Sinus von U_R ab.

6 Elektromagnete

6.1 Die Spule bei Gleichstrom

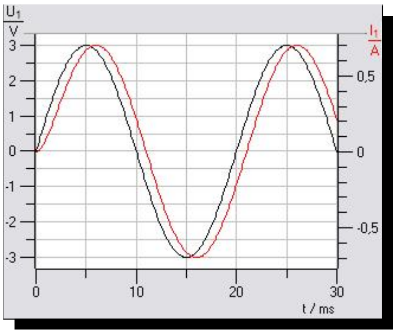
Eine Spule ist im Grunde nichts weiter als ein isolierter Draht, der mehrmals um ein Rohr gewickelt wird. Wenn man einen Strom durch sie fließen lässt, erzeugt er ein Magnetfeld, das innerhalb der Spule genau andersherum gerichtet ist als außerhalb. Befindet sich im Zentrum der Spule ein Eisenkern, wird das Magnetfeld zusätzlich verstärkt, da das Eisen selbst magnetisiert wird. Magnetfelder können Energie speichern, solange sie von Strom durchflossen werden. Dieser geht dabei quadratisch in die Energieformel ein: $W = \frac{1}{2}LI^2$. L ist dabei die Induktivität der Spule mit der Einheit $\frac{\mathrm{Vs}}{\mathrm{A}} = H$ (Henry). Sie ist für jede Spule konstant und bestimmt, wie viel Energie das Magnetfeld bei einem bestimmten Strom enthält.

Eine Spule bei Gleichstrom bietet eine relativ gewöhnliche Kennlinie. Sie zeigt bei niedrigen Temperaturen annähernd ohmsche Eigenschaften, wobei sie meist einen geringen Widerstand aufweist (Schließlich ist sie aus Draht gebaut).

6.2 Die Spule bei Wechselstrom

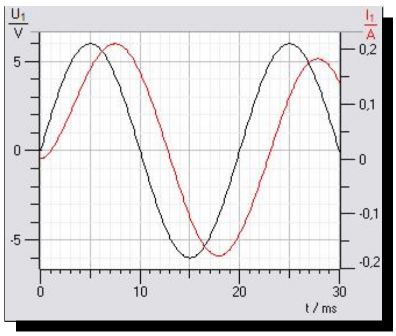
6.2.1 Beobachtungen

Nun messe ich eine Spule bei Wechselstrom (Sinus; $f = 50\,\mathrm{Hz}$; $\hat{U} = 3\,\mathrm{V}$) fünf Perioden lang (0,1 s). Das dabei entstehende U- und I-t-Diagramm zeigt eine Besonderheit:



Wie man deutlich erkennen kann, steigen Spannung (schwarze Linie) und Strom (graue Linie) nicht synchron an. Vielmehr zeigt der Strom eine Verzögerung um ca. 1 ms. Dieses Phänomen nennt man Phasenverschiebung und ist auf die Selbstinduktion der Spule zurückzuführen.
Sobald Strom die Spule durchfließt, baut er ein Magnetfeld B auf. Dadurch ändert sich der magnetische Fluss Φ, was wiederum eine Spannung induziert, die dem Strom entgegenwirkt. Auf diese Weise bremst sich der Strom in der Spule sozusagen selbst.

Wenn ich nun einen Eisenkern in die Spule lege, steigt ihre *Induktivität* (L), sie erzeugt also mit dem gleichen Strom ein stärkeres Magnetfeld (B). Dadurch wird auch eine höhere Selbstinduktion erreicht. Folglich ist auch die Phasenverschiebung größer, wie man an der Grafik unschwer erkennen kann. Sie hängt also unmittelbar mit der Induktivität zusammen. [5]



6.2.2 Der induktive Widerstand

Betrachten wir nun die Stromstärke. Lege ich eine Gleichspannung ($f = 0$) an die Spule an, ist der Strom deutlich stärker als die Spitzenwerte (I_{max}) bei der Wechselspannung ($f = 50\,\mathrm{Hz}$) waren. Nun erhöhe ich die Frequenz wiederum und I_{max} sinkt weiter. Ein Abnehmen von I bei ansonsten gleichem U deutet auf einen zusätzlichen „versteckten“ Widerstand hin, der sich proportional zur Frequenz verhält. Wenn ich den Eisenkern aus der Spule wieder entferne, merke ich, dass I_{max} wieder größer ist. Die Induktivität muss also ebenfalls mit diesem Widerstand zu tun haben. Daher nennt man ihn auch *induktiver Widerstand*. Sein Formelzeichen ist X_L.

$$X_L \sim fL$$

Da der Sinus der Wechselspannung jedoch aus dem jeweils aktuellen „Winkel“ φ innerhalb einer Periode der Phase entsteht, ist es wahrscheinlicher, dass X_L davon abhängt, ein wie großer Winkel $\Delta\varphi$ in einer bestimmten Zeit t überstrichen wird. Dafür benutzen wir die Winkelgeschwindigkeit $\omega = \Delta\varphi/\Delta t$. Ein Vollwinkel, also eine ganze Periode, entspricht im Bogenmaß 2π. Wir müssen die Freqzenz f, die ja die Anzahl der Perioden (überstrichene Vollwinkel) pro Sekunde angibt, also mit 2π multiplizieren, um auf ω zu kommen [6, 11]:

$$\textit{Vermutung:} \quad X_L = \omega L = 2\pi f L$$

6.2.3 Phasenverschiebung

Wie bereits erwähnt, ist es die Selbstinduktion, die für das Nachhinken des Stroms hinter der Spannung verantwortlich ist. Dies wollen wir nun eingehender betrachten.
Der Strom beträgt $I = \frac{U}{R}$. Zusätzlich zur Spannung U wirkt nun jedoch noch die Selbstinduktionsspannung $U_{ind} = -L\dot{I}(t)$.

$$\begin{aligned} I(t) &= \frac{U(t) - L\dot{I}(t)}{R} \quad | \cdot R \\ \Leftrightarrow R \cdot I(t) &= U(t) - L\dot{I}(t). \end{aligned}$$

Wäre die Spule nun ideal, also widerstandslos, könnte man $R = 0$ setzen:

$$\begin{aligned} 0 &= U(t) - L\dot{I}(t) \\ \Leftrightarrow \dot{I}(t) &= \frac{U(t)}{L} \end{aligned}$$

Bei der Sinusspannung lässt sich jedes U berechnen: $U(t) = \hat{U}\sin(\omega t)$. Eingesetzt in die obige Gleichung erhalten wir:

$$\begin{aligned} \dot{I}(t) &= \frac{\hat{U}\sin(\omega t)}{L} \\ \Longrightarrow I(t) &= (\frac{\hat{U}}{\omega L}) \cdot (-\cos(\omega t)) \end{aligned}$$

In der Funktion, die sich für $I(t)$ ergab, wird die Schwingung durch einen negativen Kosinus hervorgerufen. L^{-1} und ω^{-1} sind Vorfaktoren, wie in 6.2.2 vermutet. Die Schwingung der Spannung hingegen verhält sich nach dem Sinus.
Der Unterschied zwischen Sinus und Minus-Cosinus beträgt $\varphi_0 = \frac{\pi}{2}$ auf der φ-Achse. Diesen Wert erhält man, indem man $\sin(0)$ und $-\cos(\varphi_0)$ (also jeweils den Periodenanfang) gleichsetzt und nach φ_0 auflöst. Für eine ideale Spule beträgt die Phasenverschiebung also $\frac{\pi}{2}$.

Leiten wir nun die Formel für den induktiven Widerstand her. Da der Minus-Cosinus als Maximalwert 1 hat, ist sein Vorfaktor automatisch der Scheitelstrom:

$$\begin{aligned} \hat{I} &= \frac{\hat{U}}{\omega L} \quad | \cdot (\omega L) \\ \Rightarrow \hat{I}(\omega L) &= \hat{U} \quad | : \hat{I} \\ \Rightarrow R &= \omega L \\ &= 2\pi f L \end{aligned}$$

… womit die Formel für den induktiven Widerstand aus 6.2.2 bewiesen wäre.
Dies erklärt auch, warum die Phasenverschiebung bei größerem L (beispielsweise mit Eisenkern) größer wurde, sich also näher an $\frac{\pi}{2}$ angenähert hat: Weil mit einem höheren L eine stärkere Selbstinduktionsspannung gegeben ist, und so der induktive Widerstand im Verhältnis zum gleichgebliebenen, Ohmschen Widerstand einen stärkeren Einfluss bekommt. [6, 11]

6.2.4 Scheinwiderstand

Berücksichtigt man den ohmschen und induktiven Widerstand, spricht man vom sogenannten *Scheinwiderstand*. Man darf die beiden Größen jedoch nicht einfach aufaddieren, da wir für die Formel vorausgesetzt hatten, dass $R = 0$, die Spule also widerstandslos ist. Bei $I(t) = 0$ hingegen gibt es keine Selbstinduktion, also auch keinen induktiven Widerstand. Wir können hier also problemlos mit dem ohmschen Widerstand R rechnen. Die Formel für X_L bezieht sich jedoch auf den Scheitelstrom $\hat{I}$. Da das $\Delta\varphi$ zwischen $\hat{I}$ und $I = 0$ genau $\frac{\pi}{2}$ beträgt, also ein „rechter Winkel“ ist, kann man sie hier einfach mit dem Satz des Pythagoras vektoriell addieren.
Am Ende steht also die Formel [6, 11]:

$$Z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$$

7 Abschlussbericht

Alles in allem ist das Thema „Kennlinien“ ein sehr wichtiger Zweig der (Elektro–)Technik. Jedes Bauteil, jede Maschine, ja selbst jeder Draht besitzt seine eigene Kennlinie, die wichtige Informationen über das jeweilige Teil enthält. Daher ist das Thema auch sehr umfangreich und kaum in seiner ganzen Größe in einer Schulfacharbeit unterzubringen. Ich habe deshalb versucht, Bauteile aus verschiedenen grundlegenden Bereichen, wie Glühbirnen, Dioden oder Spulen, zu vermessen und vorzustellen, um so ein möglichst breites Spektrum verschiedener Kennlinien abzudecken.
Auch bemühte ich mich, auf jedes Teil individuell einzugehen um so seine besonderen Eigenschaften deutlich zu machen, statt überall nur das gleiche Prozedere durchzuführen. Sehr großen Wert legte ich dabei auf selbst durchgeführte Experimente und Messungen, sowie auf selbst ermittelte Messwerte, wie ich sie ausschließlich verwendete. Desweiteren habe ich versucht, einen Eindruck von computergestützten Messverfahren und deren vielfältigen Möglichkeiten zu vermitteln. Um in solchen Dingen unerfahrene Leser in diese neue Art der Messung einzuführen, verfasste ich das Kapitel 3, das ja selbst nur sekundär mit dem eigentlichen Thema zu tun hat. Es ist daher auch eher als Zusatz statt als Teil der eigentlichen Arbeit zu sehen.

Insgesamt hoffe ich, einen Eindruck von der Bedeutung einer Kennlinie und einen dahingehenden Überblick über die verschiedenen Bauteilgruppen und ihre jeweilige Besonderheit geschaffen haben zu können.

8 Literatur

[1] http://de.wikipedia.org/wiki/Kennlinie

[2] http://de.wikipedia.org/wiki/Interpolation

[3] http://de.wikipedia.org/wiki/Leitwert

[4] http://de.wikipedia.org/wiki/Elektrischer_Widerstand

[5] CassyLab, CassyLab-Hilfedatei, Version 1.5

[6] Micrsosoft Encarta Enzyklopadie Plus 2000, Microsoft Corporation, 1999

[7] http://de.wikipedia.org/wiki/Diode

[8] http://de.wikipedia.org/wiki/LED

[9] Leybold Gebrauchsanweisung – Demonstrationsdiode, Köln 1972

[10] Leybold Gebrauchsanweisung – Gas-Triode, Köln 1972

[11] Dorn-Bader Physik 12/13, Schroedel Verlag, Hannover 2000

9 Anhänge und Selbst.-Erklärung

9.1 Anhänge

Der PDF-Version dieser Facharbeit liegen keine Anhänge bei!

9.2 Erklärung über die selbständige Anfertigung der Arbeit

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst und keine anderen als die im Literaturverzeichnis (8) angegebenen Hilfsmittel verwendet habe. Insbesondere versichere ich, dass ich alle Literaturstellen, auf die ich mich bezogen habe, als solche kenntlich gemacht habe, indem ich die Nummern der verwendeten Quellen jeweils am Ende eines Abschnittes in eckigen Klammern aufgeführt habe.

Heiligenhaus, den 15. März 2005 Florian Göbe