

Untersuchungen an Leuchtstofflampen

1 Ziel des Praktikumsversuches

Voraussetzung zur Durchführung des Versuches sind das Wissen über physikalische Zusammenhänge im Betrieb von Leuchtstofflampen und die Kenntnisse der elektrischen und elektronischen Besonderheiten verschiedener Betriebsarten. Dazu sollen Messungen bei 50 Hz- und Hochfrequenzbetrieb durchgeführt werden. Am Ende des Versuches sind Lichtstrom, Leistung, Vorschaltgerät und Ökonomie der untersuchten Betriebsarten zu vergleichen.

2 Grundlagen

Die physikalischen Grundlagen sind aus /1/ bis /5/ zu entnehmen. Besondere Schwerpunkte sollten dabei sein:

- Elementarprozesse und Gleichgewichte im Entladungsgas
- Elementarprozesse an den Elektroden
- Typen von Gasentladungen (Glimmentladung, Bogenentladung)
- Strahlung aus Gasentladungen
- Glimmlampen und Hochspannungsleuchtröhren
- Leuchtstofflampen

Bei der praktischen Versuchsdurchführung steht die Leuchtstofflampe im Mittelpunkt der Untersuchungen.

Die Leuchtstofflampe wird vorwiegend in der Innenbeleuchtung in Institutionen und Produktionsbereichen, aber auch zunehmend in privaten Haushalten eingesetzt. Die sich ständig erweiternde Verbreitung verdankt sie ihrer hohen Lichtausbeute, großen Lebensdauer, Betriebssicherheit und ihrer Variabilität des Farbortes und des allgemeinen Farbwiedergabeindex. Es wird damit gerechnet, daß bis zum Jahre 2000 die Leuchtstofflampe in der Innenbeleuchtung dominieren wird.

Die Weiterentwicklung der Leuchtstofflampe in den letzten Jahrzehnten machte eine höhere UV-Belastung der Leuchtstoffe möglich und führte folglich zu einer wesentlichen Verkleinerung ihrer geometrischen Abmessungen. Mit der Einführung des elektronischen Betriebes von Leuchtstofflampen begann die Verdrängung der Glühlampen besonders im Wohnbereich. Diese Entwicklung ist nicht abgeschlossen.

2.1 Aufbau und Wirkungsweise der Leuchtstofflampe

Leuchtstofflampen bestehen aus einer zylindrischen Glasröhre, deren innere Oberfläche mit einer dünnen Leuchtstoffschicht bedeckt ist. An beiden Enden der Röhre sind Füße mit Elektroden angeschmolzen (Bild 1).

In Bogenentladungslampen (Niederspannungslampen) werden selbstheizende Kathoden verwendet, die aus einer Wolframdoppelwendel oder einer Dreifachwendel, bedeckt mit einer Oxydschicht, bestehen. Der Kolben ist mit einer geringen Quecksilbermenge und mit Edelgas bis zu

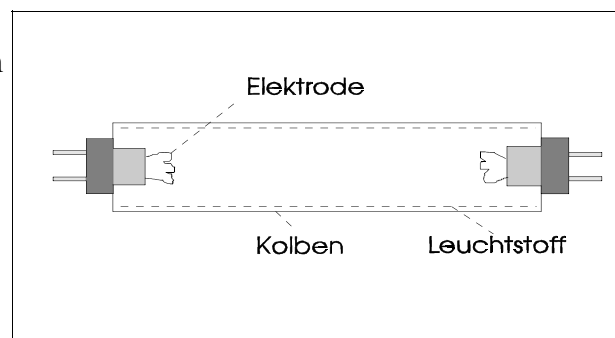


Bild 1: Schematischer Aufbau einer Leuchtstofflampe

einem Druck von einigen Torr gefüllt. Das Edelgas dient hauptsächlich der Erleichterung der Zündung und der Verringerung der Elektrodenzerstäubung (freie Weglänge der Ionen!). Nach der Zündung entsteht eine Niederdruckentladung im Edelgas und im Quecksilberdampf. Infolge der niedrigen Anregungs- und Ionisierungspotentiale des Quecksilbers gegenüber dem Edelgas ionisieren und strahlen praktisch nur Quecksilberatome (Bild 2).

Die Niederdruckentladung strahlt vorwiegend die Resonanzlinien (unteres Niveau ist der Grundzustand) 253,7 nm und 185,0 nm des Quecksilbers. Diese Strahlung wird durch den Leuchtstoff in sichtbare Strahlung transformiert. Die Niederdruckentladung ist nicht im thermischen Gleichgewicht. Die Elektronentemperatur liegt zwischen 10 000 K und 15 000 K, während die Gastemperatur zwischen 313 K und 323 K (40°C bis 50°C) liegt. Bei den angegebenen Gastemperaturen herrscht ein Quecksilberdampfdruck (Quecksilber befindet sich im Überschuß im Kolben) von ca. $5 \cdot 10^{-3}$ Torr (Tabelle 1).

Bei diesem Druck ist die Ausbeute der Resonanzstrahlung am günstigsten. Niedrigerer Dampfdruck würde zu wenig Hg-Atome zur Folge haben. Höherer Dampfdruck führt zu steigender Selbstabsorption der Resonanzstrahlung. Das Nichtgleichgewicht der Niederdruckentladung ist für die Energiebilanz günstig, da auf diese Weise Wärmeverluste gering gehalten werden.

Temperatur in °C	Dampfdruck in Torr	Temperatur in °C	Dampfdruck
0	$1,9 \cdot 10^{-4}$	250	74,1 Torr
20	$1,2 \cdot 10^{-3}$	300	246,5 Torr
40	$0,6 \cdot 10^{-4}$	350	672,3 Torr
60	$2,5 \cdot 10^{-2}$	410	2,4 atm
80	$0,9 \cdot 10^{-1}$	470	5,6 atm
100	$2,7 \cdot 10^{-1}$	530	11,3 atm
150	2,8	590	20,6 atm
200	17,1	650	34,7 atm

Tabelle 1: Dampfdruck des Quecksilbers in Abhängigkeit von der Temperatur

Ideal hinsichtlich der Lichtausbeute wäre eine Niederdruckentladung in einem Gas, das Resonanzlinien im sichtbaren Spektralbereich hat. Solche Elemente (Na, K, Tl, In) müssen jedoch hoch erhitzt werden, um in den gasförmigen Zustand zu gelangen. Dadurch geht die Lichtausbeute wieder zurück, ganz abgesehen vom Farbwiedergabeproblem durch die einzelnen Spektrallinien,

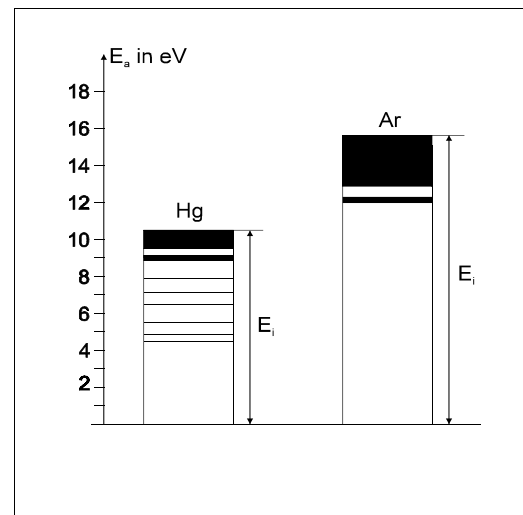


Bild 2: Termschemata des Hg-Atoms und des Edelgasatoms Argon (schwarz gezeichnete Gebiete: dicht liegende Terme, in Skizze nicht auflösbar)

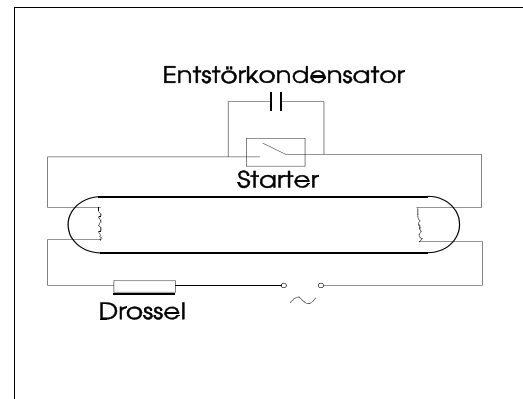


Bild 3: Grundschialtung einer Niederspannungsleuchtstofflampe bei Wechselspannungsbetrieb

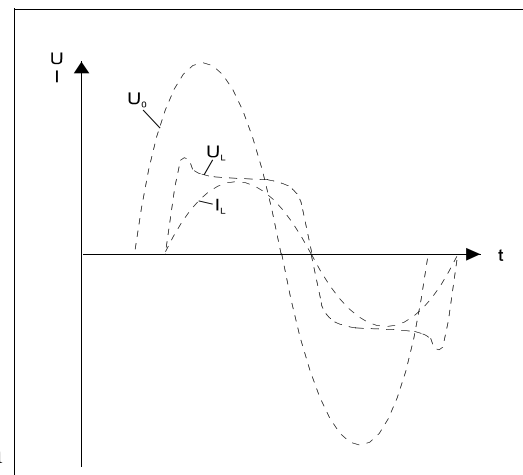


Bild 4: Zeitlicher Verlauf der Netzspannung U_0 , der Lampenspannung U_L und des Lampenstroms I_L bei induktivem Betrieb

was jedoch durch die breiten Spektralbanden der Leuchtstoffe gut gelöst wird. Quecksilber erwies sich hinsichtlich Dampfdruck und Lage der Resonanzlinien bisher als das günstigste Element.

2.2 Schaltung und Start der Leuchtstofflampe

Als Gasentladungslampe benötigt die Leuchtstofflampe einen Strombegrenzer. Die Niederspannungsleuchtstofflampe benötigt darüber hinaus noch eine Zündhilfe (Starter), da ihre Zündspannung über der Spannung des üblichen Netzes (230V) liegt. Als Grundschialtung hat sich die im Bild 3 dargestellte Schaltung durchgesetzt. Es gibt jedoch eine Vielzahl von Schaltungsmöglichkeiten.

Zur Schaltung gehören Lampe, Starter und Vorschalt-drossel. Der Starter besteht aus einer Glimmlampe mit einer Bimetallelektrode, die im Ruhezustand gegenüber ihrer Gegenelektrode einen Zwischenraum einhält.

Bei Anlegen der Netzspannung zündet im Starter eine Glimmentladung. Diese erwärmt den Bimetallstreifen. Er biegt sich durch und schafft durch Berührung seiner Gegenelektrode einen Kurzschluß. Jetzt fließt ein Strom durch die Wendel der Elektroden. Er ist begrenzt durch ihre Widerstände und durch die Vorschalt-drossel. Die Elektroden werden aufgeheizt und beginnen, Elektronen zu emittieren. Inzwischen hat sich der Bimetallstreifen des Starters abgekühlt. Er öffnet den Kontakt und unterbricht den Stromfluß durch die Elektroden. Hierbei induziert die vorgeschaltete Induktivität einen Spannungstoß, der die so vorbereitete Lampe in der Regel durchzündet. Die Elektroden emittieren weiterhin thermisch. Sie werden jetzt direkt durch den Bogenmechanismus geheizt. Es entsteht ein Brennfleck auf den Elektroden.

Die Glimmentladung des Starters zündet nicht wieder, wenn an ihm nicht mehr die volle Versorgungsspannung anliegt, sondern die geringere Brennspannung der Lampen. Hat die Zündspannung nicht zum Zünden der Lampe ausgereicht, so beginnt der Zündablauf von vorn.

Der Zündvorgang (Vorheizen, Zündphase) ist für die Lebensdauer der Elektroden außerordentlich wichtig. Die Wendel muß ausreichend vorgeheizt sein, ehe der Zündimpuls entsteht. Eine Kaltzündung setzt die Lebensdauer der Elektroden stark herab. Es kann anstelle der Bogenentladung eine anomale Glimmentladung bei nicht ausreichender Vorheizung entstehen, die ebenfalls zu einer schweren Schädigung der Elektroden führt. Ebenso wichtig ist eine Mindestdauer des Zündimpulses, der durch Starter und Vorschaltinduktivität gemeinsam erzeugt wird. Starter und Vorschaltinduktivität sind also wichtige Bestandteile der Leuchtstofflampenschaltung, die auf die Lampe zurückwirken.

Die Induktivität als Vorschaltgerät hat zunächst gegenüber einem ohmschen Widerstand den Vorteil, daß sie reine Blindleistung aufnimmt. Sie verbessert jedoch auch etwas die Flimmereigenschaften

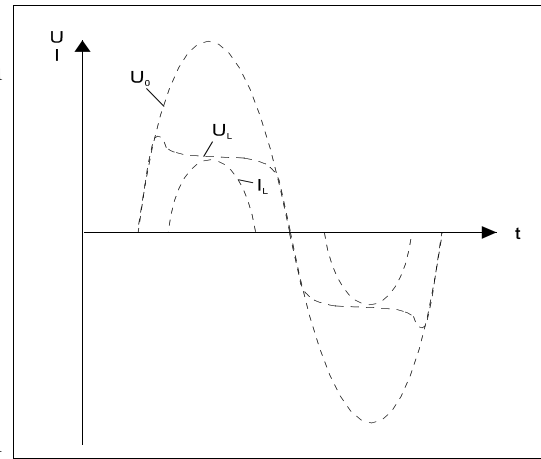


Bild 5: Zeitlicher Verlauf der Netzspannung U_0 , der Lampenspannung U_L und des Lampenstroms I_L bei ohmschem Betrieb

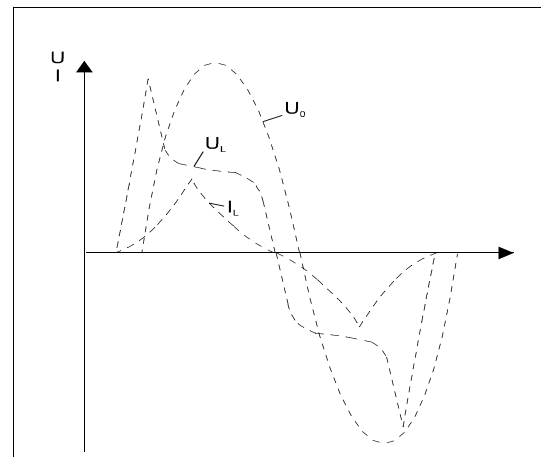


Bild 6: Zeitlicher Verlauf der Netzspannung U_0 , der Lampenspannung U_L und des Lampenstroms I_L bei kapazitivem Betrieb

der Leuchtstofflampen. Bei Wechselstrombetrieb zündet und erlischt die Entladung zwischen jeder Halbwelle (Bild 4). Bei einem ohmschen Vorwiderstand würden in der Zeit, in der die Versorgungsspannung niedriger als die Brennspannung der Lampen ist, die Entladung verlöschen und eine größere Dunkelspanne entstehen (Bild 5).

Der Kondensator als Vorschaltgerät hat den Nachteil, daß er die stromlose Pause sehr verlängert, damit das Flimmern der Lampe verstärkt und wegen des stark veränderlichen Stromes die Lebensdauer der Elektroden herabsetzt (Bild 6).

Zur Verminderung des Flimmerns werden gelegentlich eine Lampe mit Induktivität und eine Lampe mit Kapazität geschaltet (Duoschaltung). Die Dunkelphase der einen Lampe fällt dabei in das Strahlungsmaximum der anderen Lampe. Wirksamer und ökonomischer ist jedoch die Verteilung mehrerer Lampen auf die drei Phasen des Drehstromnetzes.

Der Betrieb von Leuchtstofflampen mit höheren Frequenzen bringt den Vorteil kleinerer Vorschaltgeräte mit weniger Verlusten. Auch Kapazitäten werden bei höheren Frequenzen als Vorschaltgeräte gut einsetzbar. Die Lampe hat einen etwas höheren Wirkungsgrad und das Flimmern spielt keine Rolle mehr.

3 Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung

Die Messungen erfolgen mit einem Gerät (Leuchtstofflampenmeßgerät, LLMG), das die Leuchtstofflampe mit 50 Hz betreibt. Am Gerät können Strom, Spannung, Lampenspannung, Lampenleistung (Wirk-) und Lichtstrom abgelesen werden. Das für den HF-Betrieb benötigte Sinussignal wird mit dem RC-Generator GF mit einer Amplitude von 1 V und einer Frequenz von 20 kHz erzeugt, und wird über den Ausgang am RC-Generator abgenommen und mit dem Eingang des Verstärkers LV 103 verbunden. Der Ausgang des Verstärkers wird auf den HF-Eingang des Leuchtstofflampenmeßgrundgerätes (LLMG) geführt. Hierbei darf die Masseleitung nicht vergessen werden. Man beachte, daß die Ausgangsmasse des Verstärkers nicht mit der Massebuchse am LLMG verbunden werden darf, sondern nur mit der schwarzen Buchse am HF-Eingang des LLMG. Das Zweistrahloszilloskop EO 213 wird über die Meßbuchsen A, U und die Massebuchse am LLMG angeschlossen. Am LLMG haben die oberen Kippschalter von links nach rechts folgende Bedeutung:

- Netzschalter
- Umschalter der zu messenden Spannung
- Umschalter für die Frequenz
- Einschalter für den Starter

Unter dem Netzkippschalter befindet sich der Meßfunktionsdrehknopf, unter diesem ein Meßbereichsumschalter von 1 : 10.

Durchzuführende Meßaufgaben:

1. Machen Sie sich mit der Bedienung und dem Aufbau des Leuchtstofflampenmeßplatztes anhand der Anleitung vertraut! Schalten Sie die 8 W Leuchtstofflampe ein und lassen Sie sie etwa 10 Minuten einbrennen!
Messen Sie bei 50 Hz - Betrieb:
 - Lampenstrom
 - Lampenspannung
 - Lampenleistung
 - den relativen Lichtstrom
 - Gesamtspannung
 - Gesamtleistung

2. Beobachten Sie auf dem Oszilloskop den Verlauf von Strom und Spannung, sowie die dynamische Kennlinie bei 50 Hz und skizzieren Sie die Verläufe!
3. Stellen Sie im 20 kHz - Betrieb den gleichen Strom I wie bei 50 Hz ein! Messen Sie den Strom und den relativen Lichtstrom! Schalten Sie den Starter ein! Messen Sie jetzt den Strom und den relativen Lichtstrom!
4. Schalten Sie die Lampe nacheinander auf gleichen Strom, gleichen Lichtstrom und gleiche Lampenleistung wie bei 50 Hz! Messen Sie Spannung, Strom, Leistung, relativen Lichtstrom.
5. Beobachten Sie im HF-Betrieb den zeitlichen Verlauf von Strom und Spannung, sowie die dynamische Kennlinie der Lampe und skizzieren Sie die Verläufe!
6. Nehmen Sie im HF -Betrieb die stationäre U-I-Kennlinie der Lampe im Bereich von 120 mA bis 280 mA auf! Messen Sie gleichzeitig die Lampenleistung und den relativen Lichtstrom!

4 Auswertung

1. Berechnen Sie den Leistungsfaktor (Lampe wird als ohmscher Widerstand angesehen), den ohmschen Widerstand und die Induktivität der Drossel! Berechnen Sie ebenfalls die Lichtausbeute der Leuchtstofflampe und Leistungsfaktor!
2. Skizzieren Sie die beobachteten Verläufe von Strom und Spannung bei 50 Hz- und HF-Betrieb! Vergleichen Sie diese.
3. Berechnen Sie die relative und absolute Lichtausbeutesteigerung gegenüber 50 Hz! Berechnen Sie den Leistungsfaktor der Lampe! Welche der Betriebsarten sollte in der Praxis angewendet werden?
4. Werten Sie die Ergebnisse graphisch aus! Zeichnen Sie die Kennlinien $U_L = F(U_{HF})$, $h = f(I_L)$ und $P, \Phi = f(I_{HF})$.
5. Vergleichen Sie höherfrequenten Betrieb mit dem Betrieb bei 50 Hz unter den Gesichtspunkten Lichtstrom, Leistung, Vorschaltgerät und Ökonomie!

5 Vorbereitungsaufgaben

1. Erklären Sie die Funktionsweise einer Leuchtstofflampe! Erklären Sie die Notwendigkeit eines Puffergases in der Leuchtstofflampe!
2. Betrachten Sie den prinzipiellen Verlauf der $U = f(I)$ - Kennlinie einer Gasentladung. Erläutern Sie, in welchen Bereichen dieser Kennlinie die gekanteten Gasentladungslampen betrieben werden.
3. Welche Unterschiede gibt es zwischen Glimmlampe, Hochspannungsleuchtröhre und Leuchtstofflampe?
4. Eine 8 W Leuchtstofflampe habe bei 50 Hz - Betrieb eine Brennspannung von 56 V. Berechnen Sie die relative Lichtausbeutesteigerung bei 20 kHz, wenn der Anodenfall um 8 V sinkt, die Feldstärke in der positiven Säule und der Katodenfall, sowie der Lampenstrom und der Lichtstrom konstant bleiben. Berechnen Sie unter den gleichen Voraussetzungen die relative Lichtausbeuteerhöhung für eine 13 W Lampe ($U_L=50V$)!
5. Wie kann man auf einfache Weise den Lichtstrom einer Leuchtstofflampe mit einer Siliziumfotodiode messen? (Elektrodenbereiche vernachlässigen!)
6. Informieren Sie sich über die verschiedenen Betriebsarten von Leuchtstofflampen (Schaltungen, Lichtausbeuten)!

7. Wie können ohmscher Widerstand, Induktivität und Leistungsfaktor der Drossel in einer Standardbeschaltung gemessen werden? (Voraussetzung: Lampe hat keinen Blindanteil!)
8. Warum wurde der höherfrequente Betrieb in den Frequenzbereich 20 kHz bis 100 kHz gelegt?
9. Wie verändert sich die Lichtausbeute mit der Frequenz?
10. Was wissen Sie über Höchsthfrequenz-Niederdrucklampen?

6 Literatur

1. Riemann, M.: Lampen (Teil 1). Lehrbrief TH Ilmenau 1982
2. Rochlin, G. N.: Gasentladungslichtquellen (Übersetzung) Staatsverlag Moskau - Leningrad 1966
3. Neumann, E.: Die physikalischen Grundlagen der Leuchtstofflampen und -röhren. Verlag Technik Berlin 1945
4. Elenbaas, W.: Leuchtstofflampen und ihre Anwendung. Philips Technische Bibliothek 1962
5. Kiefer, I.: Ultraviolette Strahlen. Walter de Gruyter Berlin - New York 1977