

Schweizerische Armee

65.90/I d

Technische Grundlagen
für
Übermittlungsgerätemechaniker

Band I

Gültig ab 1. Oktober 1974

65.90/I d

Technische Grundlagen
für
Übermittlungsgerätemechaniker
Band I

Gültig ab 1. Oktober 1974

Alle Rechte vorbehalten

Copyright 1973 by Eidg. Drucksachen- und Materialzentrale, 3027 Bern

Inhaltsverzeichnis

	Seite
A. Die physikalischen Grundlagen	11
I. Das Wesen der Materie	11
1. Einführung	11
2. Was wissen Sie schon über die Materie?	11
3. Der Aufbau der Materie	11
4. Das Wesentliche	15
5. Repetitionsaufgaben	15
II. Elektrizität	16
1. Einführung	16
2. Was wissen Sie schon über die Elektrizität?	16
3. Das Wesen der Elektrizität	16
4. Das Wesentliche	18
5. Repetitionsaufgaben	18
III. Der elektrische Stromkreis	19
1. Einführung	19
2. Was wissen Sie schon über den elektrischen Stromkreis?	19
3. Der elektrische Stromkreis und seine Kenndaten	19
4. Beispiele	26
5. Das Wesentliche	29
6. Repetitionsaufgaben	30
B. Elektrochemische Stromquellen	33
I. Galvanische Elemente	33
1. Einführung	33
2. Was wissen Sie schon über galvanische Elemente?	33
3. Das galvanische Element	33
4. Beispiele	36
5. Das Wesentliche	38
6. Repetitionsaufgaben	38
II. Akkumulatoren	40
1. Einführung	40
2. Was wissen Sie schon über Akkumulatoren?	40
3. Die Akkumulatoren	40
4. Beispiele	43
5. Das Wesentliche	48
6. Repetitionsaufgaben	49
C. Der Magnetismus	51
I. Permanentmagnete	51
1. Einführung	51
2. Was wissen Sie schon über Permanentmagnete?	51
3. Der Permanentmagnet	51
4. Das Wesentliche	55
5. Repetitionsaufgaben	55

	Seite
II. Elektromagnetismus	56
1. Einführung	56
2. Was wissen Sie schon über Elektromagnetismus?	56
3. Der Elektromagnetismus	56
4. Das Wesentliche	73
5. Repetitionsaufgaben	73
D. Die trigonometrischen Grundlagen	75
I. Die Winkelfunktionen	75
1. Einführung	75
2. Was wissen Sie schon über die Winkelfunktionen?	75
3. Die Winkelfunktionen	75
4. Beispiele	80
5. Das Wesentliche	83
6. Repetitionsaufgaben	84
II. Die Winkelfunktionen auf dem Rechenschieber	85
1. Einführung	85
2. Was wissen Sie schon über die Winkelfunktionen auf dem Rechenschieber?	85
3. Die Winkelfunktionen auf dem Rechenschieber	85
4. Beispiele	89
5. Das Wesentliche	91
6. Repetitionsaufgaben	92
E. Wechselströme	93
I. Der einphasige Wechselstrom	93
1. Einführung	93
2. Was wissen Sie schon über Wechselströme?	93
3. Der Wechselstrom	93
4. Beispiele	103
5. Das Wesentliche	105
6. Repetitionsaufgaben	105
II. Drehstrom	107
1. Einführung	107
2. Was wissen Sie schon über den Drehstrom?	107
3. Der Drehstrom	107
4. Beispiele	116
5. Das Wesentliche	118
6. Repetitionsaufgaben	118
F. Bauelemente	121
I. Widerstände	121
1. Einführung	121
2. Was wissen Sie schon über Widerstände?	121
3. Die Widerstände	121
4. Beispiele	131
5. Das Wesentliche	132
6. Repetitionsaufgaben	133

	Seite
II. Kondensatoren	134
1. Einführung	134
2. Was wissen Sie schon über Kondensatoren?	134
3. Kondensatoren	134
4. Beispiele	166
5. Das Wesentliche	170
6. Repetitionsaufgaben	171
III. Spulen	172
1. Einführung	172
2. Was wissen Sie schon über Spulen?	172
3. Spulen	172
4. Beispiele	193
5. Das Wesentliche	195
6. Repetitionsaufgaben	196
IV. Serieschaltung von Wirk- und Blindwiderständen	197
1. Einführung	197
2. Was wissen Sie schon über die Serieschaltung von Wirk- und Blindwiderständen?	197
3. Serieschaltung von Wirk- und Blindwiderständen	197
4. Beispiele	211
5. Das Wesentliche	222
6. Repetitionsaufgaben	223
V. Parallelschaltung von Wirk- und Blindwiderständen	224
1. Einführung	224
2. Was wissen Sie schon über die Parallelschaltung von Wirk- und Blindwiderständen?	224
3. Die Parallelschaltung von Reaktanzen mit realen Widerständen	224
4. Beispiele	231
5. Das Wesentliche	240
6. Repetitionsaufgaben	241
VI. Der Transformator	242
1. Einführung	242
2. Was wissen Sie schon über den Transformator?	242
3. Der Transformator	242
4. Beispiele	260
5. Das Wesentliche	265
6. Repetitionsaufgaben	265
VII. Der Serieschwingkreis	267
1. Einführung	267
2. Was wissen Sie schon über Serieschwingkreise?	267
3. Der Serieschwingkreis	268
4. Beispiele	275
5. Das Wesentliche	280
6. Repetitionsaufgaben	280

	Seite
VIII. Der Parallelschwingkreis	282
1. Einführung	282
2. Was wissen Sie schon über den Parallelschwingkreis?	282
3. Der Parallelschwingkreis	282
4. Beispiele	294
5. Das Wesentliche	300
6. Repetitionsaufgaben	301
IX. Die Bandfilter	302
1. Einführung	302
2. Was wissen Sie schon über Bandfilter?	303
3. Die Bandfilter	303
4. Beispiel	313
5. Das Wesentliche	315
6. Repetitionsaufgaben	315
G. Elektronenröhren	317
I. Die Diode	317
1. Einführung	317
2. Was wissen Sie schon über Dioden?	317
3. Die Diode	318
4. Beispiele	330
5. Das Wesentliche	332
6. Repetitionsaufgaben	332
II. Die Triode	334
1. Einführung	334
2. Was wissen Sie schon über Trioden?	334
3. Die Triode	334
4. Beispiel	342
5. Das Wesentliche	344
6. Repetitionsaufgaben	344
III. Die Pentode	347
1. Einführung	347
2. Was wissen Sie schon über die Pentode?	348
3. Die Pentode	348
4. Beispiel	354
5. Das Wesentliche	355
6. Repetitionsaufgaben	357
IV. Die Leistungspentode	358
1. Einführung	358
2. Was wissen Sie schon über die Leistungspentoden?	358
3. Die Leistungspentode	358
4. Beispiel	362
5. Das Wesentliche	364
6. Repetitionsaufgaben	364

	Seite
V. Die Mischröhre	365
1. Einführung	365
2. Was wissen Sie schon über Mischröhren?	365
3. Grundsätzliches über Mischstufen	365
4. Die Mischröhren	368
5. Beispiel	374
6. Das Wesentliche	375
7. Repetitionsaufgaben	376
VI. Gasgefüllte Röhren	378
1. Einführung	378
2. Was wissen Sie schon über gasgefüllte Röhren?	378
3. Gasgefüllte Röhren	378
4. Das Wesentliche	402
5. Repetitionsaufgaben	403
VII. Die Katodenstrahlröhre	404
1. Einführung	404
2. Was wissen Sie schon über Katodenstrahlröhren?	404
3. Die Katodenstrahlröhre	404
4. Beispiel	409
5. Das Wesentliche	411
6. Repetitionsaufgaben	411
VIII. Röhrenbezeichnungen	412
1. Einführung	412
2. Schlüssel für die Typenbezeichnung von Vakuumröhren	412
3. Beispiele	412
H. Schlussbestimmungen	500

Anhang

Antworten zu den Fragen im Text

1. Was wissen Sie schon über die Materie?	413
2. Repetitionsaufgaben zu «I. Das Wesen der Materie»	413
3. Was wissen Sie schon über die Elektrizität?	415
4. Repetitionsaufgaben zu «II. Elektrizität»	416
5. Was wissen Sie schon über den elektrischen Stromkreis?	416
6. Repetitionsaufgaben zu «III. Der elektrische Stromkreis»	417
7. Was wissen Sie schon über die galvanischen Elemente?	421
8. Repetitionsaufgaben zu «I. Galvanische Elemente»	422
9. Was wissen Sie schon über Akkumulatoren?	424
10. Repetitionsaufgaben zu «II. Akkumulatoren»	424
11. Was wissen Sie schon über Permanentmagnete?	425
12. Repetitionsaufgaben zu «I. Permanentmagnete»	426
13. Was wissen Sie schon über Elektromagnetismus?	427

	Seite
14. Repetitionsaufgaben zu «II. Elektromagnetismus»	428
15. Was wissen Sie schon über die Winkelfunktionen?	430
16. Repetitionsaufgaben zu «I. Winkelfunktionen»	431
17. Was wissen Sie schon über die Winkelfunktionen auf dem Rechenschieber?	433
18. Repetitionsaufgaben zu «II. Die Winkelfunktionen auf dem Rechenschieber»	433
19. Was wissen Sie schon über Wechselströme?	435
20. Repetitionsaufgaben zu «I. Der Wechselstrom»	436
21. Was wissen Sie schon über Drehstrom?	439
22. Repetitionsaufgaben zu «II. Drehstrom»	440
23. Was wissen Sie schon über Widerstände?	444
24. Repetitionsaufgaben zu «I. Widerstände»	445
25. Was wissen Sie schon über Kondensatoren?	447
26. Repetitionsaufgaben zu «II. Kondensatoren»	448
27. Was wissen Sie schon über Spulen?	451
28. Repetitionsaufgaben zu «III. Spulen»	452
29. Was wissen Sie schon über die Serieschaltung von Wirk- und Blindwiderständen?	456
30. Repetitionsaufgaben zu IV. Serieschaltung von Wirk- und Blindwiderständen»	457
31. Was wissen Sie schon über die Parallelschaltung von Wirk- und Blindwiderständen?	461
32. Repetitionsaufgaben zu «V. Parallelschaltung von Wirk- und Blindwiderständen»	463
33. Was wissen Sie schon über den Transformator?	469
34. Repetitionsaufgaben zu «VI. Der Transformator»	469
35. Was wissen Sie schon über den Serieschwingkreis?	471
36. Repetitionsaufgaben zu «VII. Der Serieschwingkreis»	471
37. Was wissen Sie schon über den Parallelschwingkreis?	474
38. Repetitionsaufgaben zu VIII. Der Parallelschwingkreis»	474
39. Was wissen Sie schon über Bandfilter?	476
40. Repetitionsaufgaben zu «IX. Bandfilter»	477
41. Was wissen Sie schon über Dioden?	479
42. Repetitionsaufgaben zu «I. Die Diode»	480
43. Was wissen Sie schon über die Triode?	482
44. Repetitionsaufgaben zu «II. Die Triode»	483
45. Was wissen Sie schon über die Pentode?	486
46. Repetitionsaufgaben zu «III. Die Pentode»	487
47. Was wissen Sie schon über die Leistungspentode?	489
48. Repetitionsaufgaben zu «IV. Die Leistungspentode»	490
49. Was wissen Sie schon über Mischröhren?	491
50. Repetitionsaufgaben zu «V. Die Mischröhren»	492
51. Was wissen Sie schon über gasgefüllte Röhren?	494
52. Repetitionsaufgaben zu «VI. Gasgefüllte Röhren»	494
53. Was wissen Sie schon über Katodenstrahlröhren?	497
54. Repetitionsaufgaben zu «VII. Die Katodenstrahlröhre»	497

Sachverzeichnis

siehe Band II

Die technischen Grundlagen für Übermittlungsgerätemechaniker

Band I

(Vom 31. Oktober 1972)

erlassen gestützt auf Artikel 5, Absatz 2, Buchstabe a der Verfügung des Eidgenössischen Militärdepartementes vom 2. Juni 1969 über den Erlass von militärischen Reglementen.

Einführung

Das vorliegende Reglement entstand aus dem Bedürfnis eines gedrängten Lehrmittels für die Grundausbildung aller an elektronischen Geräten auszubildenden Truppenhandwerker. Für alle angehenden Übermittlungsgerätemechaniker, um den umfassenden Sammelbegriff zu verwenden, stellen Teile dieses Lehrbuches bekannte Tatsachen dar, während andere Teile – entsprechend der beruflichen Vorbildung – teilweise unbekannt, teilweise nur bruchstückweise in den Anforderungen des erlernten Berufes enthalten sind.

Das hier entstandene Elektronik-Lehrmittel verzichtet bewusst auf eingehende mathematische Beweisführungen und stellt das Experiment in den Vordergrund. Durch die illustrierte Beschreibung der grundlegenden Experimente, wie sie zu einem grossen Teil im Unterricht durchgeführt werden, soll das Lehrbuch einmal als Repetitorium, zum andern auch für ein beschränktes Selbststudium dienen. Diese letztere Forderung dient besonders zur Homogenisierung von Unterrichtsklassen mit Schülern ungleicher Vorbildung. Speziell für das Selbststudium sind die einführenden Abschnitte «Was wissen Sie schon über ...?» und die Repetitionsaufgaben am Schluss jedes Kapitels bestimmt. Zur Selbstkontrolle sind die Lösungen und deren Beurteilung im Anhang zusammengefasst.

A. DIE PHYSIKALISCHEN GRUNDLAGEN

I. Das Wesen der Materie

1. Einführung

Um das Wesen der Elektrizität und deren Erscheinungsformen zu begreifen, ist es erforderlich, den Aufbau der Materie zu studieren. Im Verlaufe der letzten hundert Jahre wurden der Natur die Geheimnisse über die Zusammensetzung und den Aufbau der Materie schrittweise abgerungen. Noch ist es der Wissenschaft nicht gelungen, die kleinsten Elementarteilchen sichtbar zu machen, obschon deren Existenz mit Hilfe von Experimenten nachweisbar ist. Das physikalische Verhalten von Elementarteilchen wurde oft aufgrund von Theorien und Berechnungen vorausgesagt, das Experiment lieferte lediglich noch den Beweis für die Richtigkeit der Theorie. Das Bild, das sich der moderne Mensch von der Welt macht, wurde massgebend von den Erkenntnissen der heutigen Physik geprägt.

In den folgenden Abschnitten wollen wir uns mit den Eigenschaften und dem Verhalten der Elementarteilchen befassen, soweit dies für das Verständnis der Elektronik notwendig ist.

2. Was wissen Sie schon über die Materie? (Lösung Seite 413)

Jedes der folgenden Kapitel beginnt mit einigen einleitenden Fragen. Versuchen Sie jeweils diese zu beantworten, ohne dass Sie dafür fremde Hilfe beanspruchen. Die Antworten zu diesen Einführungsfragen und deren Bewertung finden Sie im Anhang (Seite 413).

- Welche Polarität hat die Ladung eines Elektrons?
- Wo treffen wir Protonen an?
- Kommen in einem Atomkern auch Neutronen vor?
- Was verstehen Sie unter dem Begriff «Atom»?
- Spiele Ionen in den Gasentladungsröhren eine Rolle?
- Ist Sauerstoff ein chemisches Element?

3. Der Aufbau der Materie

Zerlegt man einen beliebigen Stoff in immer kleinere Teilchen, so erhält man zuletzt das kleinstmögliche Teilchen, das noch die Eigenschaften des Stoffes aufweist, das *Molekül*. Ein Molekül z. B. Kochsalz besitzt noch die chemischen und physikalischen Eigenschaften von Kochsalz, eine weitere Teilung ist jedoch nicht mehr möglich.

Das einzelne Molekül setzt sich aus verschiedenen *Atomen* zusammen. Das Atom ist die kleinste Einheit eines *chemischen Elementes*. Bis heute sind über hundert chemische Elemente oder Grundstoffe bekannt.

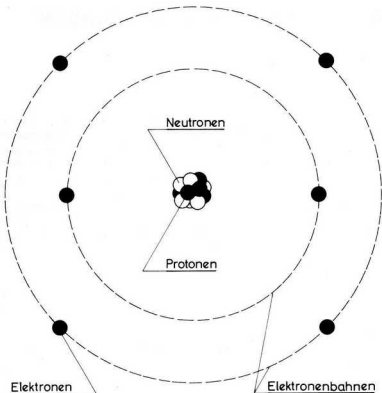


Bild 1: Aufbau des Kohlenstoffatoms

Lange Zeit galt das Atom als unteilbar. Die Wissenschaft löste jedoch das Rätsel um den Aufbau des Atomes und damit war auch schon der erste Schritt zur Atomumwandlung getan. Wir werden uns mit der Zusammensetzung des Atomes näher auseinandersetzen, da die Atombestandteile die eigentlichen Träger der Elektrizität darstellen.

Bild 1 zeigt uns den Aufbau des Kohlenstoffatoms. Jedes Atom besteht aus einem Atomkern und aus Elektronen, die diesen Atomkern wie Planeten umkreisen. Der Atomkern besteht aus *Protonen* und *Neutronen*. Die wesentlichen Bauteile der Materie haben folgende Eigenschaften:

Das *Elektron* ist der Träger der kleinsten *elektrischen Ladungseinheit*, der sogenannten *Elementarladung*. Die Polarität dieser Ladung ist *negativ*. Das Elektron ist im Verhältnis zu den Kernbestandteilen leicht, es wiegt etwa den zehntausendsten Teil eines Protons.

Das *Proton* weist eine *positive Ladung* gleicher Grösse wie die Elementarladung auf. Es bildet zusammen mit den Neutronen den Atomkern.

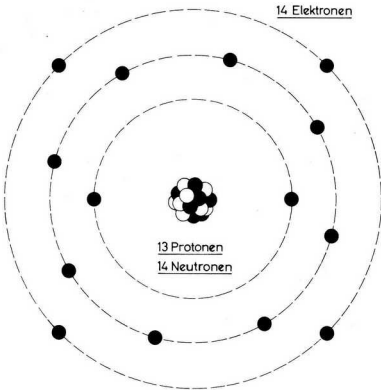


Bild 2: Negatives Aluminiumion

Neutronen sind elektrisch neutral und ungefähr gleich schwer wie die Protonen.

Elektronen, Protonen und Neutronen nennt man *Elementarteilchen*, sie sind die Bausteine aller Materie. Es existieren noch weitere Elementarteilchen, bis heute sind insgesamt deren zehn bekannt. Einige dieser Elementarteilchen haben eine extrem kurze Lebensdauer, andere neigen dazu sich umzuwandeln. Für unsere Betrachtungen sind vorerst nur die Bausteine der Atome, die Protonen, Neutronen und Elektronen, interessant. Zu einem späteren Zeitpunkt werden wir uns mit dem *Photon* zu befassen haben. Das Photon ist ebenfalls ein Elementarteilchen, es spielt im Zusammenhang mit der Funktionsweise von Photozellen und Photodioden eine wesentliche Rolle.

Der Aufbau der Atome unterliegt gewissen Gesetzen. Atome sind unter normalen Bedingungen nach aussen neutral, pro Proton im Atomkern finden wir je ein Elektron, das den Kern umkreist. Wird dieses Gleichgewicht gestört, so wird das Atom zum *Ion*. Besitzt ein Atom ein Elektron zuviel, so ist es gegen

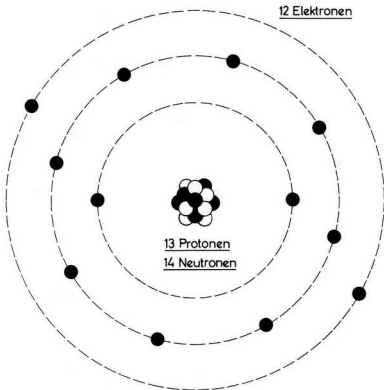


Bild 3: Positives Aluminiumion

aussen negativ geladen; ein negatives Ion heisst *Anion*. Besitzt das Atom dagegen ein Elektron zu wenig, so überwiegt die Kernladung der Protonen, es wird zum positiven Ion. Positive Ionen nennt man *Kationen*. Bild 2 zeigt ein Beispiel für ein negatives Aluminiumion. Bild 3 dagegen zeigt ein positives Aluminiumion.

Ionen sind oft in Flüssigkeiten anzutreffen, als Anwendungsbeispiele werden wir später die Elektrolyse und den Akkumulator kennen lernen.

Unter bestimmten Bedingungen treten auch in Gasen Ionen auf, in der Neonröhre und in der Glühlampe wird die Stromleitung mittels Ionen praktisch ausgewertet.

Elektronen sind nicht immer an einen Atomkern gebunden, in vielen Stoffen kommen diese frei vor und sind innerhalb des betreffenden Materials beweglich.

Elementarteilchen mit Ladungen gleicher Polarität stossen sich gegenseitig ab, während ungleichartige Ladungen sich gegenseitig anziehen. Demzufolge

müssten die Elektronen, die den positiv geladenen Atomkern umkreisen, von diesem angezogen werden und in den Kern hineinfallen. Auf die um den Atomkern kreisenden Elektronen wirkt jedoch, dank deren Masse, eine Fliehkraft. Diese Fliehkraft ist nun genau so gross wie die elektrische Anziehungskraft zwischen Atomkern und Elektron, die beiden Kräfte heben sich gegenseitig auf. Das Elektron zieht seine Bahnen, ohne in den Kern zu fallen. Die Zusammensetzung des Atomkernes scheint jedoch das Gesetz über die elektrischen Anziehungskräfte Lügen zu strafen, befinden sich doch im Atomkern auf engstem Raum positive Elementarteilchen, Protonen, beisammen. Aufgrund der elektrischen Kräfte, die in den gleichnamigen Ladungen wirksam werden, müsste der Atomkern eigentlich explodieren. Er tut dies nicht, weil im Kern Kräfte wirken, die weitaus stärker sind als die elektrischen Kräfte. Diese Kernkräfte verleihen der Atombombe, die nach dem Prinzip der Kernspaltung arbeitet, ihre ungeheure Explosionsenergie.

4. Das Wesentliche

Die gesamte Materie ist aus wenigen Elementarteilchen zusammengesetzt. Die wichtigsten Elementarteilchen sind die leichten, negativ geladenen Elektronen, die schweren, positiv geladenen Protonen und die schweren Neutronen, die keine Ladung aufweisen.

Protonen und Neutronen bilden den Atomkern, die Elektronen umkreisen diesen Kern. Das Atom ist normalerweise gegen aussen elektrisch neutral. Ionen sind Atome, deren Ladungsgleichgewicht zwischen Kern und Elektronen gestört ist.

5. Repetitionsaufgaben (Lösung Seite 413)

- Was versteht man unter einem Molekül?
- Zeichnen Sie den Aufbau eines Atoms mit acht Protonen und acht Neutronen im Atomkern.
- Was versteht man unter einem chemischen Element?
- Wieviele chemische Elemente gibt es?
- Wie heissen die drei wichtigsten Elementarteilchen und welches sind deren Eigenschaften?
- Unter welchen Bedingungen wird ein Atom zum Ion?
- Welches ist der Unterschied zwischen Anionen und Kationen?
- Wo spielen die Ionen in der Elektrotechnik eine Rolle?
- Warum bewirken die elektrischen Abstossungskräfte innerhalb des Atomkernes zwischen den Protonen keine Explosion?
- Warum werden die negativen Elektronen von der positiven Kernladung nicht angezogen?
- Gibt es noch weitere Elementarteilchen als nur die bekannten Atombausteine?

II. Elektrizität

1. Einführung

Viele Erscheinungsformen der Elektrizität waren bereits in früheren Jahrhunderten bekannt, ohne dass man sich diese Phänomene erklären konnte. Später nutzte man die Wirkungen der Elektrizität aus, man baute elektrische Geräte, ohne die genauen Ursachen für deren Funktionieren zu kennen. Im folgenden Abschnitt wollen wir uns mit dem Wesen der Elektrizität auseinandersetzen.

2. Was wissen Sie schon über die Elektrizität? (Lösung Seite 415)

- a) Ist Kupfer ein elektrischer Leiter?
- b) Welche Eigenschaften weist ein Isolator auf?
- c) Welche Elementarteilchen sind in einem metallischen Leiter die eigentlichen Träger des elektrischen Stromes?
- d) Damit in einem Leiter ein elektrischer Strom fließen kann, muss eine treibende Kraft vorhanden sein. Geben Sie ein Beispiel für die Ursache eines elektrischen Stromes.
- e) Ist ein elektrischer Strom in Gasen möglich?
- f) Kennen Sie ein Beispiel für den Stromfluss in Flüssigkeiten?

3. Das Wesen der Elektrizität

In festen Körpern können sich die freien Elektronen bewegen. Unter dem Einfluss der Umgebungstemperatur führen die freien Elektronen unregelmässige Schwirrbewegungen aus. *Freie Elektronen* sind Elektronen, die sich in einem kristallin aufgebauten Verband von Atomen frei bewegen. Die gesamthaft in einem Leiter vorhandenen freien Elektronen werden oft auch *Elektronengas* genannt, weil sie sich ähnlich wie Gas in einer Röhre verhalten. Da jedes Elektron seine elektrische Elementarladung besitzt, ist die Bewegung eines Elektrons gleichbedeutend mit der Bewegung einer elektrischen Ladung. Solange diese Bewegungen unregelmässig und unregelmässig erfolgen, lässt sich nach aussen hin in einem Leiter praktisch keine Wirkung feststellen. Gelingt es jedoch, die Elektronen gleichmässig in einer Richtung zu bewegen, kommt ein elektrischer Strom zustande. Ein elektrischer Strom fliesst nur dann, wenn im betreffenden Stoff genügend freie Elektronen vorhanden sind. Die Zahl der freien Elektronen ist ein direktes Mass für die Leitfähigkeit eines Stoffes. Sie bestimmt somit die ganze Skala vom besten *Leiter* über schlechte Leiter zu den *Halbleitern* und den *Isolatoren*.

Kupfer ist der meistverwendete Leiter in der Elektrotechnik. Noch bessere Leitereigenschaften weist das Silber auf (bester Leiter). Aluminium ein etwas schlechterer Leiter als Kupfer wird verwendet, wo der Kupferpreis zu sehr ins Gewicht fällt (Höchstspannungs-Verteilnetz). Versilberte Leitungen werden verwendet, wo es auf maximale Oberflächenleitung ankommt, nämlich bei Höchstfrequenzen. Gold als Leitermetall wird auch als Überzug von Leitern oder Kontakten verwendet, trotzdem es einen gegenüber dem Silber etwas vergrösserten Widerstand aufweist (vergleichbar mit Aluminium), weil es als edelstes Metall nicht oxidiert.

Die elektrische Leitung ist temperaturabhängig. Die Temperatur ist ein Mass für die Schwingbewegung der freien Elektronen sowie der Atomreste, welche eine Schwingbewegung um ihre Ruhelage im Kristallgitter ausführen. Je höher die Temperatur, desto höher die Schwingamplitude. Je grösser aber die Schwingamplituden werden, umso mehr sind die Elektronen durch Zusammenstösse unter sich und mit den Atomresten, behindert. Dem Fliessen von Ladungen wird somit ein mit der Temperatur steigender Widerstand entgegengesetzt.

In den Halbleitern nimmt mit steigender Temperatur – im Gegensatz zu den Leitern – die Leitfähigkeit beträchtlich zu. Das Halbleitermaterial gehorcht zwar dem gleichen Gesetz des mit der Temperatur zunehmenden Widerstandes. Doch werden hier bei zunehmender Schwingamplitude der Atome einzelne zusätzliche Elektronen aus ihrer festen Bindung herausgeschleudert und nehmen damit an der Stromleitung teil: Die zunehmende Zahl freier Elektronen bewirkt eine höhere Leitfähigkeit, welche die Abnahme der Leitfähigkeit durch die Temperaturbewegung übertrifft. Die bekanntesten Halbleitermaterialien sind Germanium und Silizium. Es sind dies die Grundstoffe, die zur Herstellung von Transistoren und Halbleiterdioden dienen.

Es wird in keinem Leiter ein Strom fliessen, ohne dass eine Ursache für diesen Stromfluss vorhanden ist. Die Ursache für den elektrischen Stromfluss heisst *Potentialdifferenz*. Wir stellen uns zwei isoliert aufgestellte Kupferkugeln vor. Auf eine dieser Kugeln lassen wir von aussen her eine grosse Menge freier Elektronen fliessen. Der anderen Kugel führen wir eine bedeutend geringere Menge Elektronen zu. Beide Kugeln sind jetzt elektrisch geladen. Da eine Kugel mehr Elektronen aufweist als die andere, hat sich zwischen ihnen eine Potentialdifferenz aufgebaut. Da die Kugeln isoliert aufgebaut sind, bleibt diese Potentialdifferenz bestehen. Verbindet man beide Kugeln mit Hilfe eines Leiters, so fliessen von der Kugel mit dem Elektronenüberfluss solange Elektronen auf die Kugel mit der geringeren Ladung, bis die Potentialdifferenz verschwunden ist. Beide Kugeln weisen nun die gleich grosse Menge Elektronen auf. Im Leiter ist für die Dauer des Ladungsausgleiches ein elektrischer Strom geflossen. Wenn sich in einem Leiter Elektronen in gemeinsamer Richtung bewegen, spricht man von einem elektrischen Strom.

In der Praxis wird die Potentialdifferenz auf verschiedene Arten erzeugt; die Batterie der Taschenlampe, der Akkumulator des Motorfahrzeuges, der Gene-

rator des Kraftwerkes, sie alle erzeugen die Potentialdifferenz die notwendig ist, um den gewünschten elektrischen Strom fließen zu lassen.

Die Wirkung des elektrischen Stromes pflanzt sich im guten Leiter annähernd mit Lichtgeschwindigkeit fort. Das einzelne Elektron dagegen bewegt sich innerhalb des Leiters sehr langsam vorwärts. Der Stromfluss lässt sich am besten mit einer langen Röhre, die mit Kugellagerkugeln gefüllt ist, vergleichen. Drücke ich an einem Röhrenende auf die Kugeln, so macht sich der Druck am anderen Ende sofort bemerkbar, indem einige Kugeln aus der Röhre herausfallen, obschon das einzelne Kugeln innerhalb der Röhre nur einen ganz kurzen Weg zurückgelegt hat.

In festen Körpern wird ein elektrischer Strom ausschliesslich durch Elektronen verursacht, da die Ionen fest an ihre Standorte gebunden sind. In Flüssigkeiten dagegen wird der elektrische Strom hauptsächlich durch Ionen getragen; in Gasen können Ionen und Elektronen Träger des Stromes sein. Wir erinnern uns an das Beispiel der beiden Kupferkugeln, dort haben wir gesehen, dass ein Ausgleich der Ladungen stattfand. Elektronen und Ionen sind gleichwertige Ladungsträger, beide können Träger des elektrischen Stromes sein.

4. Das Wesentliche

Freie Elektronen und Ionen sind die Träger des elektrischen Stromes.

Wir unterscheiden zwischen Leiter, Halbleiter und Nichtleiter. Ein Leiter weist viele freie Elektronen auf, der Nichtleiter hat keine freie Elektronen, während der Halbleiter nur sehr schlecht leitend ist und seine Leitereigenschaften unter dem Einfluss der Temperatur ändert.

Bewegen sich Elektronen oder Ionen in einer gemeinsamen Richtung, so fließt ein elektrischer Strom.

Die Potentialdifferenz ist die Ursache des elektrischen Stromes.

5. Repetitionsaufgaben (Lösung Seite 416)

- a) Was verstehen Sie unter dem Ausdruck «Elektronengas»?
- b) Welches ist der Unterschied zwischen einem Leiter und einem Nichtleiter?
- c) Welche Bedeutung hat der Halbleiter für die Elektronik?
- d) Unter welchen Bedingungen fließt ein elektrischer Strom?
- e) Nennen Sie die Träger des elektrischen Stromes.
- f) Durch was unterscheidet sich der elektrische Strom in festen Leitern von demjenigen in Flüssigkeiten?
- g) Wie rasch pflanzt sich die Wirkung des elektrischen Stromes in einem guten Leiter fort?
- h) Welche Geräte dienen der Erzeugung einer elektrischen Potentialdifferenz?

III. Der elektrische Stromkreis

1. Einführung

In allen elektrotechnischen Einrichtungen, selbst in den allereinfachsten Geräten, finden wir Bauelemente, die zu einem Stromkreis zusammengeschaltet sind. Kein Bauteil ist in der Lage, für sich allein zu arbeiten. Die Kenntnis der Vorgänge in elektrischen Stromkreisen und deren Gesetze ist deshalb für das Verständnis der Elektronik eine Grundbedingung. Die Elektronik ist ein Fach, das grosse Anforderungen an das Vorstellungsvermögen stellt, viele Begriffe sind abstrakt und lassen sich oft nur mit Hilfe von Modellen aus der Mechanik verstehen. Für das Studium des elektrischen Stromkreises wird uns das Modell des geschlossenen Wasserstromkreises gute Dienste leisten. Wir werden dieses Modell überall dort verwenden, wo sich mit dessen Hilfe die Vorgänge anschaulich darstellen lassen.

2. Was wissen Sie schon über den elektrischen Stromkreis?

(Lösung Seite 416)

- a) Was ist ein elektrischer Strom?
- b) Welche Bedingungen müssen erfüllt sein, damit ein elektrischer Strom fliesst?
- c) Welches ist die eigentliche Ursache für das Fließen eines elektrischen Stromes?
- d) Mit welcher Einheit wird die elektrische Spannung gemessen?
- e) Was sagt das ohmsche Gesetz aus?
- f) Kennen Sie die Einheit für den elektrischen Widerstand?
- g) Wann brennt in der Haushaltung eine Sicherung durch?

3. Der elektrische Stromkreis und seine Kenndaten

a. Der Wasserkreislauf als Modell für den elektrischen Stromkreis

Der Höhenunterschied zwischen dem Stausee und der Turbine bestimmt den Druck, den das Wasser auf die Schaufeln der Turbine ausübt. Die Bauart der Turbine und der Querschnitt der Wasserleitung bestimmen zusammen mit dem Druck die Wassermenge, welche pro Zeiteinheit durch das System fliesst. Druck und Wassermenge pro Zeiteinheit ergeben zusammen die Leistung der Turbine. Je grösser Druck und Wassermenge pro Zeiteinheit sind, desto grösser wird die Leistung der Turbine. Ähnlich verhält es sich mit dem elektrischen Stromkreis. Die Potentialdifferenz, welche die Ursache des Stromflusses ist, entspricht dem Druck im Wasserstromkreis. Die Wassermenge pro Zeiteinheit, die durch die Wasserleitung fliesst, entspricht dem elektrischen Strom. Der Reibungswiderstand der Wasserleitung und der Widerstand der Turbine entsprechen dem Widerstand der Leitungsdrähte und dem Widerstand des Verbrauchers im elektrischen Stromkreis. Tabelle 1 zeigt die Gegenüberstellung

der Masseneinheiten des Wasserstromkreises mit den Masseneinheiten des elektrischen Stromkreises.

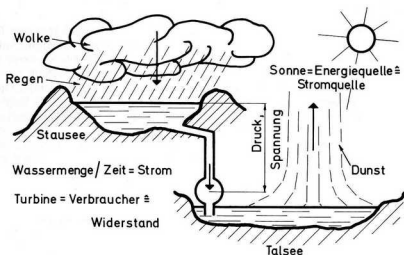


Bild 4: Wasserkreislauf und Stromkreis

Wasserstromkreis			Elektrischer Stromkreis		
Grösse	Mass-einheit	Formel-zeichen	Grösse	Mass-einheit	Formel-zeichen
Druck	N/m ² od. N/cm ²	p	Spannung	Volt V	U
Strom	m ³ /s		Strom	Ampère A	I
Reibungs-widerstand	N	F	Widerstand	Ohm Ω	R
Leistung	W	P	Leistung	Watt W	P
Arbeit	J	W	Arbeit	Watt-sekunden Ws	W

Tabelle 1

b. Die Masseinheiten

Die Tabelle 1 macht uns mit verschiedenen Masseinheiten bekannt. Es gibt verschiedene Systeme für die Masseinheiten. In der Elektrotechnik hat sich das System mit den vier *Grundeinheiten* Meter, Sekunde, Kilogramm und Ampère bewährt. Mit diesen Grundeinheiten lassen sich alle Grössen der Elektrotechnik beschreiben.

In früheren Zeiten wurden dafür viele weitere Einheiten verwendet. Diese Einheiten sind in Fachbüchern und Gerätebeschreibungen noch oft anzutreffen. Wir werden uns an die vier Grundeinheiten halten und die alten Masseinheiten lediglich der Vollständigkeit halber aufzeichnen, um auch das Studium älterer Unterlagen zu ermöglichen.

Das Mass-System, das für die Belange der Elektrotechnik mit den vier Grundeinheiten Meter, Sekunde, Kilogramm und Ampère auskommt, heisst **Giorgi-System**.

c. Die elektrische Spannung

In unserem Modell haben wir die *elektrische Spannung* mit dem Druck verglichen. Die Spannung verursacht in einem Stromkreis den Stromfluss. Die Potentialdifferenz wird durch die Spannungsquelle erzeugt. In Spannungsquellen werden Elektronen vom Plus- zum Minuspol verlagert. Die bekanntesten Spannungsquellen sind: Trockenbatterie, Akkumulator und Generator. Gleichspannungsquellen sind gepolt, sie weisen einen Minuspol und einen Pluspol auf. Am Minuspol herrscht ein Elektronenüberschuss, am Pluspol ein Elektronenmangel.

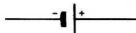
Die Einheit der Spannung ist das *Volt*. Die Abkürzung für das Volt lautet: V
In Formeln wird für Spannungen der Buchstabe *U* verwendet (aus dem Französischen: *Utilité* = Nützlichkeit, Verwertbarkeit).

Schaltzeichen:

Spannungsquelle
allgemein



Batterie oder
Akkumulator



Leiter



Verbindung von
Leitern



Massenanschluss



Erdung



Bild 5: Schaltzeichen

Die Spannungswerte in Stromkreisen sind je nach der Art der Anlage sehr unterschiedlich. Es gibt Stromkreise, in denen Spannungen auftreten, die eine grössere Masseinheit für die Spannungsangabe erfordern. Ebenso können Spannungen in Erscheinung treten, die in einer kleineren Einheit als in Volt angegeben werden müssen. Diese Forderung gilt für die meisten Einheiten der Elektrotechnik. Zur Vereinfachung der Schreibweise hat man deshalb folgende Kurzbezeichnungen eingeführt:

1 Billionstel	= 1 Pico	= 1 p	= $1 \cdot 10^{-12}$
1 Milliardstel	= 1 Nano	= 1 n	= $1 \cdot 10^{-9}$
1 Millionstel	= 1 Mikro	= 1 μ	= $1 \cdot 10^{-6}$
1 Tausendstel	= 1 Milli	= 1 m	= $1 \cdot 10^{-3}$
1 Tausend	= 1 Kilo	= 1 k	= $1 \cdot 10^{+3}$
1 Million	= 1 Mega	= 1 M	= $1 \cdot 10^{+6}$
1 Milliarde	= 1 Giga	= 1 G	= $1 \cdot 10^{+9}$

Auf die Einheit der Spannung übertragen ergeben sich folgende Beispiele:

1 millionstel Volt	= 1 Mikrovolt	= 1 μ V
1 tausendstel Volt	= 1 Millivolt	= 1 mV
1 Tausend Volt	= 1 Kilovolt	= 1 kV
1 Million Volt	= 1 Megavolt	= 1 MV

Tabelle 2 zeigt einige Beispiele über die Grösse von Spannungen, wie sie in der Praxis vorkommen.

Spannungsquelle	Wert der Spannung
Empfangsantenne	0,5 bis 500 μ V
Mikrophone	1 bis 100 mV
Tonabnehmer	20 bis 400 mV
Taschenlampenbatterien	1,5 bis 6 V
Autoakkus	6 bis 24 V
Telephonanlagen	48 V
Lichtnetz	220 V
Kraftnetz	380 V
Überlandnetz	150 bis 380 kV
Spannungen für Bildröhren in Fernsehempfängern	16 kV
Laboranlagen	mehrere MV

Tabelle 2

Elektrische Spannungen können lebensgefährlich sein!

Die Spannungsgrenze, die als lebensgefährlich betrachtet wird, ist in verschiedenen Ländern verschieden hoch angesetzt. Die Höhe der Spannung, die ein Mensch ertragen kann, ohne ernsthaften Schaden zu nehmen, hängt zur Hauptsache von seiner Konstitution und von der Feuchtigkeit seiner Haut ab. Unter ungünstigen Verhältnissen kann bereits eine Spannung unter hundert Volt tödlich wirken. *Beim Experimentieren mit Spannungsquellen ist deshalb immer äusserste Vorsicht angebracht.*

d. Der elektrische Strom

Der *elektrische Strom* entsprach im Modell der geflossenen Wassermenge pro Zeiteinheit. Im Stromkreis kann die Stromstärke ermittelt werden, indem man die Elektronenmenge misst, die während einer bestimmten Zeit durch den Leiter geflossen ist. Die Elektronenmenge entspricht der Wassermenge im Wasserkreis.

Die Einheit für den Strom ist das *Ampère*. Die Abkürzung für das Ampère lautet: A

In Formeln wird für den Strom der Buchstabe *I* verwendet (aus dem Französischen: Intensité).

Die Bewegungsrichtung der Elektronen im Stromkreis verläuft vom Minuspol zum Pluspol der Spannungsquelle. Bevor man sich über das Wesen des elektrischen Stromes Klarheit verschaffen konnte, wurde aufgrund einer Übereinkunft, einer Konvention, die Stromrichtung festgelegt. Man einigte sich damals auf folgende Regel:

Der Strom fließt im Gleichstromkreis vom Pluspol zum Minuspol der Spannungsquelle.

Heute wissen wir, dass diese Annahme falsch war. Trotzdem hält man an dieser Regel fest, da alle Regeln über die Richtung der Magnetfelder in Elektromagneten, Motoren und Generatoren auf dieser *konventionellen Stromrichtung* basieren.

Wenn wir einen Stromkreis untersuchen, arbeiten wir mit der konventionellen Stromrichtung; beschäftigen wir uns jedoch mit physikalischen Vorgängen im Zusammenhang mit Bauelementen, beispielsweise Röhren, so arbeiten wir mit der Richtung des Elektronenstromes.

Für die Stromeinheit werden die gleichen Kurzbezeichnungen verwendet wie für die Spannungseinheiten.

Tabelle 3 zeigt einige Beispiele über die Grösse von Strömen, wie sie in der Praxis vorkommen.

Anlage	Wert des Stromes
Empfangsantenne	0,01 bis 1 μ A
Mikrophone	0,01 bis 100 mA
Glühlampen in Taschenlampen	100 bis 500 mA
Transistoren	0,1 mA bis 10 A
Haushaltapparate	1 bis 15 A
Autoanlasser	50 bis 100 A
Kraftwerke	bis 50 kA
Elektroöfen	bis 100 kA

Tabelle 3

e. Der elektrische Widerstand

Der *elektrische Widerstand* entspricht dem Leitungswiderstand des Wasserrohres und dem Widerstand der Turbine. Das Wasser wird an den Wandungen

der Leitung gebremst, die Schaufeln der Turbine verursachen eine weitere Bremsung des Wasserstromes. Ähnlich verhält es sich mit dem elektrischen Strom. Die Elektronen werden im Leiter durch die unbeweglichen Atome und Ionen gebremst, im Verbraucher, beispielsweise in einer Glühlampe, wird den Elektronen der Durchgang erneut erschwert. Die Summe der Leitungswiderstände und des Verbraucherwiderstandes ergibt den Gesamtwiderstand des Stromkreises. Der Widerstand hängt von der Art des Leiters und von der Grösse des Verbrauchers ab. Eine Leitung mit geringem Querschnitt wird dem Wasser einen grösseren Widerstand entgegensetzen als eine solche mit einem grossen Querschnitt. Eine Turbine mit kleiner Durchlassöffnung wird einen grösseren Widerstand erzeugen als ein anderes Modell mit einem grossen Durchlassquerschnitt.

Die Einheit für den Widerstand ist das *Ohm*. Die Abkürzung für das Ohm lautet Ω (Griechischer Buchstabe «Omega»)

In Formeln wird für Widerstände der Buchstabe *R* verwendet (aus dem Französischen: *Résistance*).

Schaltungssymbol für den Widerstand:

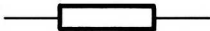


Bild 6: Widerstandssymbol

Oft kommt es vor, dass man an Stelle des Widerstandes dessen *Leitwert* bestimmt. Unter dem Leitwert eines Widerstandes versteht man dessen Reziprokwert.

Die Einheit für den Leitwert ist das Siemens. Die Abkürzung für das Siemens lautet: S

In Formeln wird für Leitwerte der Buchstabe *G* verwendet.

f. Das ohmsche Gesetz

Das ohmsche Gesetz beschreibt die Zusammenhänge zwischen Strom, Spannung und Widerstand im Stromkreis.

Wird im Wasserkreislauf der Druck erhöht, so steigt die Durchlaufmenge an; erweitert man bei gleichbleibendem Druck den Leitungsquerschnitt und die Durchlassöffnung der Turbine, so steigt die Durchlaufmenge ebenfalls an. Genau gleich verhält sich der elektrische Stromkreis.

Wird die Spannung bei gleichbleibendem Leitungswiderstand und gleichbleibendem Verbraucher erhöht, so wird im Kreis ein grösserer Strom fliessen. Wird die Spannung unverändert belassen, verkleinert man jedoch den Widerstand, so wird der Strom wiederum zunehmen.

Bild 7 zeigt einen geschlossenen Stromkreis, bestehend aus Spannungsquelle und Verbraucher. Parallel zur Spannungsquelle befindet sich ein Messinstrument, das den Wert der Spannung misst. In den Stromkreis wurde ein Messinstrument geschaltet, das den Stromwert angibt.

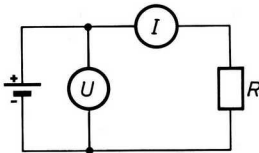


Bild 7: geschlossener Stromkreis

Die Bedingungen im Stromkreis werden durch das ohmsche Gesetz wie folgt formuliert:

$$U = R \cdot I$$

g. Die elektrische Leistung

Die Leistung der Wasserturbine hängt vom Druck des Wassers und von der Wassermenge, die pro Zeiteinheit durch diese fliesst, ab. Die abgegebene Leistung der Turbine steigt proportional mit dem Wasserdruck und der Wassermenge pro Zeiteinheit an. Analog dazu verhält sich die Leistung im elektrischen Stromkreis. Im Widerstand wird die elektrische Leistung in Wärme umgesetzt. Je grösser Strom und Spannung werden, desto grösser wird die *Leistung*, desto wärmer wird der Widerstand. Die elektrische Leistung ist der angelegten Spannung und dem fliessenden Strom proportional.

Die Einheit für die elektrische Leistung ist das *Watt*. Die Abkürzung für das Watt lautet: *W*

In Formeln wird für die Leistung der Buchstabe *P* verwendet (*puissance*).

Die Leistungsformel für Gleichstromkreise lautet:

$$P = U \cdot I$$

P = Leistung in Watt

U = Spannung in Volt

I = Strom in Ampère

Für die Leistungseinheit werden die gleichen Kurzbezeichnungen verwendet wie für die Spannungs- und Stromeinheiten.

Tabelle 4 zeigt einige Beispiele über die Grösse von Leistungen, wie sie in der Praxis vorkommen.

Anlage	Wert der Leistung
Empfangsantennen	Bruchteile von mW
Kopfhörer	einige mW
Glühlampen	einige W... 1 kW
Tragbare Heizöfen	1 bis 2 kW
Bahnen	einige 100 kW
Elektro-Schmelzöfen	einige MW

Tabelle 4

h. Die elektrische Arbeit

Wenn die Turbine während einer gewissen Zeit Leistung abgegeben hat, so hat sie eine bestimmte Arbeit erbracht. Arbeit ist das Produkt aus Leistung mal Zeit. Wird ein elektrischer Heizofen für eine bestimmte Zeit in Betrieb genommen, so nimmt dieser aus dem Lichtnetz eine Arbeit auf. Diese Arbeit haben wir dem Elektrizitätswerk zu bezahlen; wir bezahlen Kilowattstunden. Eine Kilowattstunde wird dann bezogen, wenn beispielsweise ein Heizofen mit einer Leistungsaufnahme von 2 Kilowatt während dreissig Minuten angeschaltet bleibt.

Die Einheit für die elektrische Arbeit ist die *Wattsekunde*. Die Abkürzung dafür lautet: Ws

In Formeln wird für die Arbeit der Buchstabe *W* verwendet.

Für die elektrische Arbeit sind weiter gebräuchlich die Wattstunde (Wh) und die Kilowattstunde (kWh).

In Physikbüchern trifft man oft auf die Arbeitseinheit *Joule*. 1 Joule (J) entspricht einer Wattsekunde (Ws).

Die Formel für die Arbeit lautet allgemein:

$$W = P \cdot t$$

W = Arbeit in Wattsekunden bzw. in Wattstunden

P = Leistung in Watt

t = Zeit in Sekunden (Stunden)

4. Beispiele

a. Berechnung des Widerstandes

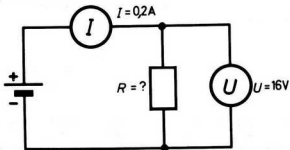


Bild 8

Bild 8 zeigt einen Stromkreis. Mit Hilfe des Ampèremeters wird der Strom und mit Hilfe des Voltmeters die Spannung gemessen. Gesucht ist der Wert des Widerstandes.

Vorgehen:

– Grundformel anschreiben

$$U = R \cdot I$$

– Grundformel nach R umstellen

$$R = \frac{U}{I}$$

– Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$R = \frac{16 \text{ V}}{0,2 \text{ A}}$$

$$R = 80 \Omega$$

Wir wollen diese Art des Vorgehens für die Lösung aller Aufgaben anwenden. Sobald die Ausrechnungsformeln etwas umfangreicher werden, verliert man leicht die Übersicht, es ist deshalb angebracht, Zahlenwerte und Masseinheiten zu trennen, wir schreiben links die Zahlenwerte und rechts die Einheiten an. Dieses Verfahren hat zudem den grossen Vorteil, dass Fehler in der Aufstellung der Formel leicht erkannt werden, da die Einheitenprobe nicht stimmt. Wir haben gelernt, dass die Elektronik mit den vier Grundeinheiten Meter, Sekunden, Kilogramm und Ampère auskommt. Zur Vereinfachung wird in der Elektrotechnik das Volt (V) eingeführt: $V = m^2 kg s^{-3} A^{-1}$; ($1VA = 1Ws = 1kgm^2s^{-2}$). Obiges Beispiel zeigt uns, dass die Einheit Ohm nichts anderes darstellt als den Quotienten Volt durch Ampère, wir haben demzufolge mit dem Ohm keine neue Einheit eingeführt.

b. Berechnung des Stromes

Bild 9 zeigt einen Widerstand als Verbraucher. Der Strom ist zu bestimmen.

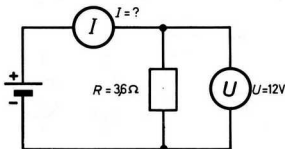


Bild 9

Vorgehen:

- Grundformel anschreiben
- Grundformel nach I umstellen
- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$U = R \cdot I$$

$$I = \frac{U}{R}$$

$$I = \frac{12 \text{ V} \cdot \text{A}}{3,6 \text{ V}}$$

$$I = 3,33 \text{ A}$$

c. Berechnung der Spannung

In Bild 10 ist die Spannung zu bestimmen.

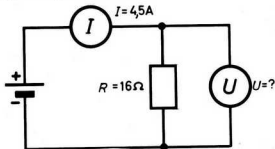


Bild 10

Vorgehen:

- Grundformel anschreiben
- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$U = R \cdot I$$

$$U = 16 \cdot 4,5 \frac{\text{V} \cdot \text{A}}{\text{A}}$$

$$U = 72 \text{ V}$$

d. Berechnung der Leistung und der Arbeit

Bild 11 zeigt einen Widerstand, welcher an 12 V liegt. Er bleibt während 20 min eingeschaltet. Bestimmen Sie die Leistung des Widerstandes und die geleistete Arbeit.

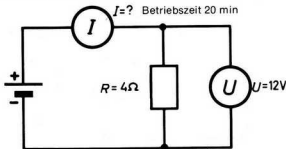


Bild 11

Vorgehen: (für die Berechnung der Leistung)

- Grundformel anschreiben
- Grundformel für das ohmsche Gesetz anschreiben
- Grundformel nach I umstellen
- diese Gleichung in die erste Grundformel einsetzen

$$P = U \cdot I$$

$$U = R \cdot I$$

$$I = \frac{U}{R}$$

$$P = \frac{U^2}{R} \quad (P = U \cdot \frac{U}{R})$$

$$[P] = V \cdot V \cdot \frac{A}{V} = V \cdot A = W$$

$$P = \frac{12 \cdot 12}{4}$$

$$P = 36 \text{ W}$$

- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

Die Einheit Volt mal Ampère wird in Watt ausgedrückt.

Vorgehen: (für die Berechnung der Arbeit)

- Grundformel anschreiben
- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$W = P \cdot t$$

$$W = 36 \cdot \frac{1}{3} \text{ W} \cdot \text{h}$$

$$W = 12 \text{ Wh}$$

Das Resultat erscheint einfacher, wenn wir an Stelle der Sekunden mit Stunden rechnen.

5. Das Wesentliche

Für die Belange der Elektrotechnik genügen vier Einheiten: Meter, Sekunde, Volt und Ampère.

Im Gleichstromkreis spielen fünf Begriffe eine Rolle:

- Die *Spannung* verursacht den Stromfluss, sie wird in Volt gemessen und ist mit dem Druck im Wasserkreislauf vergleichbar.
- Der *Strom* entspricht einer bestimmten Menge geflossener Ladungsträger pro Zeiteinheit, er wird in Ampère gemessen und ist mit der geflossenen Wassermenge pro Zeiteinheit im Wasserkreislauf zu vergleichen.
- Der *Widerstand* setzt dem Strom einen Widerstand entgegen, er wird in Ohm gemessen und ist mit dem Reibungswiderstand der Wasserleitung vergleichbar. Seinen Kehrwert nennt man *Leitwert*, er wird in Siemens gemessen.
- Die *Leistung* ist das Produkt aus Strom und Spannung, ihre Masseinheit ist das Watt. Ein Watt entspricht einem Volt mal einem Ampère.

– Die *Arbeit* ist das Produkt von Leistung und Zeit. Sie wird in Wattsekunden gemessen.

Das *ohmsche Gesetz* gibt Auskunft über die Zusammenhänge zwischen Spannung, Strom und Widerstand im Stromkreis. Die Grundformel lautet: $U = R \cdot I$.

6. Repetitionsaufgaben (Lösung Seite 417)

- Nennen Sie die vier Einheiten für die Bedürfnisse der Elektronik im Giorgi-System.
- Erstellen Sie eine Tabelle mit allen Abkürzungen für kleine und grosse Ströme und Spannungen.
- Was verstehen Sie unter dem Begriff «Leitwert»?
- Welches ist die Masseinheit für die elektrische Leistung?
- Geben Sie die Masseinheiten für Spannung, Strom und Widerstand an, und nennen Sie die äquivalenten Begriffe für das Modell des Wasserkreislaufes.
- Ermitteln Sie im Bild 12 die Spannung, die Leistung, die im Widerstand R umgesetzt wird, die Arbeit, die die Spannungsquelle während einer Betriebsdauer von 25 min liefert und den Leitwert des Widerstandes.

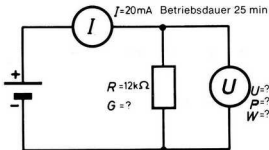


Bild 12

- Ermitteln Sie für die Schaltung nach Bild 13 die Leistung, die in den Widerständen R_1 und R_2 verbraucht wird. Wie gross sind die Ströme I_2 und I_3 ? Wie gross ist R_2 ? Wir gehen von der Voraussetzung aus, dass die Ampèremeter einen vernachlässigbar kleinen Innenwiderstand aufweisen.

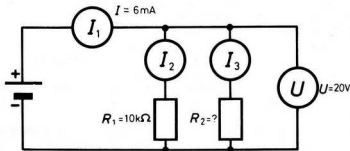


Bild 13

h) Ermitteln Sie in Bild 14 folgende Werte:

- Spannung der Batterie U_b
- Die Widerstände R_1 , R_2 und R_4
- Die Spannung U_4
- Die Leistung, die in den Widerständen R_1 , R_2 , R_3 und R_4 umgesetzt wird.
- Strom I_3

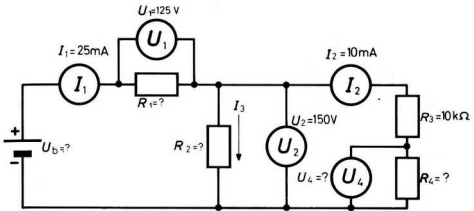


Bild 14

B. Elektrochemische Stromquellen

I. Galvanische Elemente

1. Einführung

Das galvanische Element, auch Primärelement genannt, kommt meistens in Form von Trockenbatterien in den Handel. Im galvanischen Element werden dank chemischen Vorgängen Elektronen frei, deshalb eignet es sich als Stromquelle. Primärelemente spielen in der Funktechnik eine grosse Rolle, werden doch heute noch die meisten Kleinfunkgeräte mit Trockenbatterien gespiesen.

2. Was wissen Sie schon über galvanische Elemente?

(Lösung Seite 421)

- Beschreiben Sie den Aufbau eines galvanischen Elementes.
- Welche Betriebsspannung weist eine Zelle einer handelsüblichen Batterie, bestehend aus galvanischen Elementen, auf?
- Was verstehen Sie unter dem Begriff «Elektromotorische Kraft»?
- Was ist ein Ion?
- Zu welcher Elektrode fliesst das Kation, wenn man in eine leitende Flüssigkeit zwei Elektroden taucht und diese mit einer Gleichspannung verbindet?

3. Das galvanische Element

a. Die chemische Wirkung des elektrischen Stromes

Einige Flüssigkeiten, unter ihnen auch destilliertes Wasser, sind Nichtleiter. Löst man in destilliertem Wasser Kochsalz auf, oder schüttet man etwas Säure dazu, so wird das Wasser leitend. Leitende Flüssigkeiten heissen *Elektrolyte*. Träger des Stromflusses sind die Ionen. Im Elektrolyten werden die Ionen aufgespalten, es bilden sich Anionen und Kationen. Verwendet man beispielsweise als Elektrolyt verdünnte Schwefelsäure, so bilden sich positive Wasserstoffionen, während die aus Schwefel und Sauerstoff bestehenden Moleküle eine negative Ladung aufweisen. Unter dem Einfluss einer an die Elektroden angelegten Gleichspannung wandern die positiven Kationen zur *Katode*, während die negativen Anionen von der *Anode* angezogen werden. Bild 15 zeigt diesen Vorgang. Diejenige Elektrode, welche mit dem negativen Pol der Spannungsquelle verbunden wird, nennt man Katode, während die positive Elektrode Anode genannt wird.

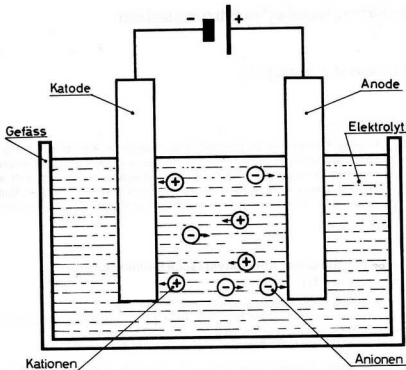


Bild 15

Sobald das Ion die Elektrode, von welcher es angezogen wurde, erreicht, findet ein Ladungsausgleich statt, ein Anion gibt seine überzähligen Elektronen an die Anode ab, während das Kation seine fehlenden Elektronen von der Katode bezieht. Die an die Anode abgegebenen Elektronen wandern durch die Spannungsquelle zur Katode, um dort die ankommenden Kationen zu neutralisieren. Sobald das Ion an der Elektrode neutralisiert ist, wird es nicht mehr von der Kraftwirkung der elektrischen Spannung beeinflusst, da es sich jetzt nach aussen neutral verhält. Handelt es sich beim Ion um ein Gasatom oder um ein Gasmolekül, so wird es ausgeschieden, Metallmoleküle setzen sich auf der Elektrode ab und bilden so einen Metallüberzug. Während jedes elektrolytischen Vorgangs werden Materieteilchen transportiert und oft wird an den Elektroden Materie ausgeschieden.

Der beschriebene Vorgang wird in der Galvanotechnik zur Herstellung von Metallüberzügen praktisch angewendet. Die grundsätzlichen Vorgänge in Elektrolyten helfen uns, die Funktionsweise des Primärelementes und der Akkumulatoren zu verstehen.

b. Das Primärelement

In den galvanischen Elementen wird mit Hilfe der chemischen Vorgänge in Elektrolyten elektrische Energie erzeugt. Bild 16 zeigt den prinzipiellen Aufbau eines Primärelementes.

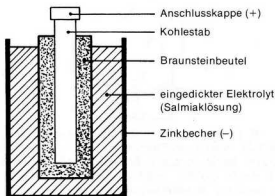


Bild 16

Die Elektroden bestehen aus einem Kohlestab und einem Zinkbecher. Als Elektrolyt dient eine Salmiaklösung, diese wird mit Hilfe eines Pulvers eingedickt. Um den Kohlestab herum wird ein Braunsteinbeutel als Depolarisator angebracht.

Beim chemischen Vorgang, der sich im Primärelement abspielt, werden Elektronen frei. In der Salmiaklösung zerfällt das Salz in Anionen und Kationen. Die Kationen verbinden sich mit der Zinkelektrode und «fressen» diese an. Es werden Elektronen frei, die Zinkelektrode wird zum negativen Pol des Elementes. Die Anionen wandern zum Kohlestab, neutralisieren und scheiden sich als Wasserstoff aus. Durch diese Wasserstoffausscheidungen würde der Kohlestab isoliert und damit würde die Leistungsfähigkeit der Batterie absinken. Der Braunsteinbeutel bindet den Wasserstoff (durch Reduktion des Braunsteins zu Kaliumpermanganat) und verhindert somit diese unerwünschte Gasentwicklung. Der chemische Vorgang setzt ein, sobald die beiden Elektroden über einen Verbraucher miteinander verbunden werden.

c. Das Betriebsverhalten von galvanischen Elementen

Wir unterscheiden beim galvanischen Element zwischen der *Leerlaufspannung* und der Spannung unter Belastung. Unter der Leerlaufspannung versteht man die Spannung, die an den Klemmen des Elementes auftritt, wenn dieses nicht belastet ist. Diese Leerlaufspannung wird auch «*Elektromotorische Kraft*» (E.M.K.) genannt. Wird das Element mit einem Lastwiderstand belastet, so sinkt die *Klemmenspannung* ab. Diese Erscheinung hat ihre Ursache im

Innenwiderstand des Elementes. Man kann für jede Spannungsquelle ein Ersatzschaltbild zeichnen. In diesem Ersatzschaltbild besteht die Spannungsquelle aus einem idealen Element mit einem in Serie geschalteten Innenwiderstand.

Bild 17 zeigt diese Ersatzschaltung.

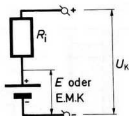


Bild 17: Ersatzschaltbild für eine Spannungsquelle

Im Ersatzschaltbild erzeugt das Element die E.M.K.; wird die Spannungsquelle belastet, so fließt der Strom auch über den Innenwiderstand. Die Spannung, die am Innenwiderstand abfällt, geht für den Verbraucher verloren. Die Klemmenspannung wird um den Betrag des Spannungsabfalles am Innenwiderstand kleiner als die E.M.K. Diese Zusammenhänge können in einer algebraischen Gleichung ausgedrückt werden:

$$U_k = E - I \cdot R_i \quad \begin{array}{l} U_k = \text{Klemmenspannung} \\ I = \text{Belastungsstrom} \\ R_i = \text{Innenwiderstand} \end{array}$$

Die E.M.K. des Zink-Kohle-Salmiak-Elementes beträgt 1,6 V, die mittlere Klemmenspannung im Betrieb liegt bei 1,5 V. Je nach Grösse der Elemente beträgt der Innenwiderstand Bruchteile eines Ohms bis zu einigen Ohm.

4. Beispiele

a. Berechnung der Klemmenspannung

In Bild 18 ist die Klemmenspannung zu bestimmen.

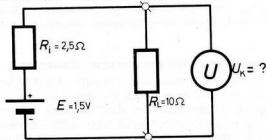


Bild 18

Vorgehen:

- Grundformel anschreiben
- Bestimmungsgleichung für I aufstellen
- Bestimmungsgleichung für I in Grundformel einsetzen und vereinfachen
- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

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

$$I = \frac{E}{R_i + R_L}$$

$$U_K = E \left(1 - \frac{R_i}{R_i + R_L}\right)$$

$$U_K = 1,5 \left(1 - \frac{2,5}{2,5 + 10}\right)$$

$$U_K = 1,2 \text{ V}$$

b. Berechnung der E.M.K.

In Bild 19 ist die E.M.K. zu berechnen.

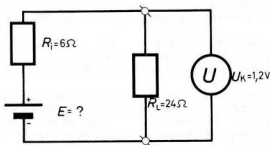


Bild 19

Vorgehen:

- Grundformel anschreiben
- Grundformel nach E umstellen
- Bestimmungsgleichung für I aufstellen
- Bestimmungsgleichung für I in Grundformel einsetzen und vereinfachen
- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

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

$$E = U_K + I \cdot R_i$$

$$I = \frac{U_K}{R_L}$$

$$E = U_K \left(1 + \frac{R_i}{R_L}\right)$$

$$E = 1,2 \left(1 + \frac{6}{24}\right)$$

$$E = 1,5 \text{ V}$$

5. Das Wesentliche

Im Primärelement wird ein chemischer Vorgang dazu ausgenützt, um eine elektrische Spannung zu erzeugen. Das gebräuchlichste galvanische Element besteht aus einer Zinkelektrode und einer Kohlenelektrode; als Elektrolyt wird eine eingedickte Salmiaklösung verwendet.

Jede Spannungsquelle kann durch ein Ersatzschaltbild dargestellt werden, dieses enthält die reine Spannungsquelle mit ihrer E.M.K. und den Innenwiderstand. Wird das Element belastet, so entsteht dank dem Belastungsstrom am Innenwiderstand ein Spannungsabfall. Die Klemmenspannung wird um diesen Spannungsabfall kleiner als die E.M.K.

6. Repetitionsaufgaben (Lösung Seite 422)

- Was ist ein Elektrolyt?
- Welcher Unterschied besteht zwischen der Stromleitung in einem metallischen Leiter und in einem Elektrolyten?
- Nennen Sie die Materialien der beiden Elektroden des gebräuchlichsten Primärelementes.
- Welche Elektrode stellt den positiven Pol des Elementes dar?
- Definieren Sie den Ausdruck «Elektromotorische Kraft»?
- Warum ist bei Belastung eines Elementes die Klemmenspannung geringer als die E.M.K.?
- Hängt die Klemmenspannung von der Grösse der Belastung des Elementes ab?
- Bestimmen Sie in Bild 20 den Innenwiderstand des Elementes. Sie messen mit einem Voltmeter, das einen sehr hohen Innenwiderstand aufweist, eine Leerlaufspannung von 1,5 V. Sobald Sie das Element mit einem Belastungswiderstand von 10 Ohm belasten, fliesst ein Strom von 0,1 A.

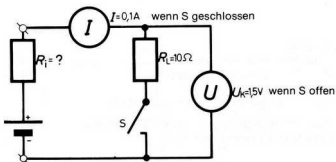


Bild 20

- i) Gemäss Bild 21 belasten Sie ein Element mit zwei verschiedenen Widerständen und messen gleichzeitig die Belastungsströme. Wie gross ist der Innenwiderstand des Elementes?

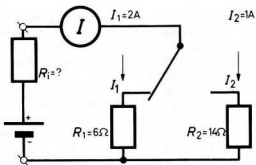


Bild 21

II. Akkumulatoren

1. Einführung

Der Akkumulator, auch Sekundärelement genannt, spielt in der Elektrotechnik und in der Automobiltechnik eine grosse Rolle. In den Motorfahrzeugen finden wir den Bleiakkumulator als Bordspannungsquelle des Anlassers, der Beleuchtung und der Stromversorgung. In tragbaren Radioapparaten, in Kleinfunkgeräten, Rasierapparaten und Elektronenblitzgeräten treffen wir meistens den wartungsfreien Stahllakkumulator an. Im Akkumulator sind die chemischen Umsetzungsvorgänge umkehrbar; der Akkumulator kann praktisch beliebig oft geladen und entladen werden. Wir werden uns in diesem Abschnitt nur mit der grundsätzlichen Wirkungsweise der Akkumulatoren befassen. Die Lebensdauer aller Akkumulatoren hängt sehr von ihrer Behandlung ab. Beachten Sie deshalb beim Gebrauch die Wartungs- und Gebrauchsvorschriften, welche je nach Fabrikat und Verwendungszweck wesentlich ändern können. Die Blei- und die Stahl-Akkus haben ganz andere Charakteristiken und verlangen grundsätzlich eine andere Wartung!

2. Was wissen Sie schon über Akkumulatoren? (Lösung Seite 424)

- a) Beschreiben Sie den Aufbau eines Bleiakkumulators.
- b) Ist die Säuredichte im Bleiakkumulator ein Mass für den Ladezustand der Zellen?
- c) Wie gross ist die mittlere E.M.K. einer Zelle des Bleiakkumulators?
- d) Sagt Ihnen der Begriff «Ampère-Stunde» etwas?
- e) Können einzelne Zellen eines Akkumulators in Serie geschaltet werden?

3. Die Akkumulatoren

a. Aufbau des Bleiakkumulators

Bild 22 zeigt den prinzipiellen Aufbau eines Bleiakkumulators. Vor der Ladung bestehen beide Elektroden aus Bleisulfat, als Elektrolyt findet verdünnte Schwefelsäure Verwendung.

In diesem Zustand weist der Akkumulator keine E.M.K. auf. Zur Ladung des Akkumulators wird eine Gleichspannung an die Zelle gelegt. Während des Ladevorganges wandeln sich die beiden Bleisulfatplatten um. An der positiven Platte bildet sich Bleisuperoxyd, während die negative Platte zu reinem Blei wird. Die chemische Reaktion führt zur Bildung von Schwefelsäure, was zur Folge hat, dass die Säurekonzentration ansteigt. Die Säuredichte ist demzufolge ein Mass für den Ladezustand des Akkumulators. Bei der Entladung kehrt sich der chemische Vorgang um, die Elektroden werden wieder zu Bleisulfat, im Elektrolyt wird Wasser gebildet, die Säurekonzentration sinkt.

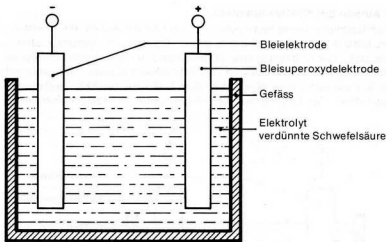


Bild 22: Aufbau eines Bleiakkumulators

b. Das Betriebsverhalten des Bleiakkumulators

Die E.M.K. der Bleiakkumulatorzelle beträgt im Mittel 2 Volt. Der Innenwiderstand ist je nach der Grösse der Elektroden sehr klein, er liegt in der Grössenordnung von Bruchteilen eines Ohms. Der Bleiakkumulator ist deshalb in der Lage, grosse Ströme abzugeben.

Die *Speicherkapazität* eines Akkumulators wird in *Ampère-Stunden* gemessen. Die Abkürzung für die Ampère-Stunde lautet Ah. Diese Speicherkapazität hängt von der Entladestromstärke ab, je kleiner der Entladestrom, desto grösser die Speicherkapazität. Die Kapazität wird deshalb immer für eine bestimmte Entladezeit angegeben.

Da im Akkumulator mittels chemischer Umwandlungsprozesse elektrische Energie gespeichert werden kann, interessiert natürlich auch der *Wirkungsgrad* des Sammlers. Man unterscheidet zwischen dem *Ampère-Stunden-Wirkungsgrad* und dem *Watt-Stunden-Wirkungsgrad*. Beim Ampère-Stunden-Wirkungsgrad bildet man das Verhältnis zwischen der Ampère-Stunden-Zahl des Entladevorganges und der Ampère-Stunden-Zahl des Ladevorganges. Da jedoch die Ladespannung und die Entladespannung während der Ladung und der Entladung nicht konstant bleiben, zeigt der Ampère-Stunden-Wirkungsgrad nicht die wahre Energiebilanz. Der Watt-Stunden-Wirkungsgrad berücksichtigt die Spannungsänderungen und ist deshalb für einen Wirkungsgradvergleich geeigneter. Der Ampère-Stunden-Wirkungsgrad des Bleisammlers beträgt etwa 90%, während der Watt-Stunden-Wirkungsgrad nur ungefähr 75% erreicht.

c. Der Aufbau des Stahllakkumulators

Die grundsätzliche Wirkungsweise des Stahllakkumulators entspricht derjenigen des Bleiakкумуляtors. Während des Ladevorganges findet ein chemischer Prozess statt; dieser bewirkt eine Veränderung des Elektrodenmaterials. Bild 23 zeigt den prinzipiellen Aufbau des Stahllakkumulators. Man unterscheidet bei den Stahllakkumulatoren zwischen dem *Eisen-Nickel-Akku* und dem *Nickel-Kadmium-Akku*. Der Unterschied besteht lediglich im Elektrodenmaterial.

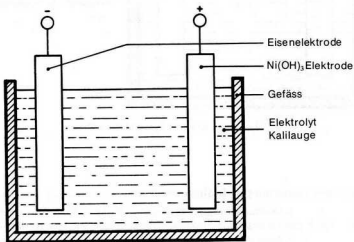


Bild 23: Aufbau eines Eisen-Nickel-Akkumulators

Vor der Ladung besteht die positive Platte aus Nickelhydroxyd und die negative Platte aus Eisenhydroxyd, als Elektrolyt dient verdünnte Kalilauge. Durch den Ladevorgang wird die positive Platte in Ni(OH)_3 umgewandelt, während die negative Platte zu Eisen wird. Die Kalilauge erfährt dabei keine chemische Umwandlung, die Laugendichte ist demzufolge kein Mass für den Ladungszustand. Während des Entladevorganges kehrt sich der chemische Prozess um, die Elektroden nehmen wieder ihre ursprüngliche Zusammensetzung an.

d. Das Betriebsverhalten des Stahllakkumulators

Die E.M.K. des Stahllakkumulators beträgt im Mittel 1,2 V pro Zelle. Der Innenwiderstand hängt wie beim Bleiakкумуляtor von der Grösse der Elektroden ab, er ist jedoch grösser als bei diesem.

Der Wirkungsgrad des Stahlsammlers ist ungünstiger als derjenige des Bleiakкумуляtors. Der Ampère-Stunden-Wirkungsgrad beträgt zirka 70%, der Watt-Stunden-Wirkungsgrad erreicht im Mittel etwa 60%.

e. Wartung

Der Bleiakкумуляtor bedarf einer regelmässigen und gründlichen Pflege; er sollte alle 3 bis 5 Wochen entladen und geladen werden. Die Wartung des Bleiakkus ist nicht ungefährlich, in der Nähe von Akkumulatoren, die geladen werden, darf kein Feuer gemacht werden, da Explosionsgefahr besteht. Der Elektrolyt muss kontrolliert werden; durch Nachfüllen von destilliertem Wasser wird verdunsteter Elektrolyt und das gegen Ende der Ladung in Wasserstoff und Sauerstoff (Knallgas, explosiv) zerlegte Wasser ersetzt.

Der Stahlakku erfordert eine bedeutend geringere Wartung, er nimmt keinen Schaden wenn er längere Zeit ungeladen bleibt. Kleinakkus sind oft wartungsfrei gebaut, sie müssen nur von Zeit zu Zeit nachgeladen werden. Die Lebensdauer der Stahlsammler ist denn auch bedeutend höher als diejenige der Bleiakkumulatoren.

f. Schaltungen von Spannungsquellen

Spannungsquellen lassen sich in verschiedenen Schaltungskombinationen zusammenschalten. Bei der Serieschaltung von Einzelelementen wird immer der Pluspol des vorhergehenden Elementes mit dem Minuspol des folgenden Elementes verbunden. In der Serieschaltung addieren sich die Teilspannungen.

Bei der Parallelschaltung von Spannungsquellen bleibt die Spannung gleich der Spannung eines Einzelelementes. Die zur Verfügung stehende Stromstärke nimmt jedoch mit jedem dazugeschalteten Element zu.

Um eine Zerstörung der Akkus zu vermeiden, dürfen grundsätzlich nur Einzelelemente mit gleicher Spannung und gleichem Innenwiderstand zu Schaltungskombinationen zusammengebaut werden.

4. Beispiele

a. Betriebsverhalten eines Bleiakkumulators

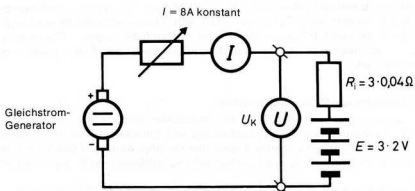
Bild 24 zeigt eine Ladeeinrichtung und die Ladungs- bzw. Entladungscharakteristik eines Bleiakkumulators. Dieser besteht aus drei in Serie geschalteten Zellen. Die Ladeeinrichtung ist so gebaut, dass der Ladestrom durch eine Regeleinrichtung während des gesamten Ladevorganges konstant gehalten wird.

Folgende Werte sind bekannt:

- Innenwiderstand pro Zelle: 0,04 Ohm
- Kapazität: 120 Ah bei einer Entladezeit von 15 h
- Wirkungsgrade: Ah-Wirkungsgrad 90%
Wh-Wirkungsgrad 75%
- Ladestrom: 8 A konstant
- E.M.K. pro Zelle: 2 V
- Aufgenommene Arbeit: 920 Wh

Folgende Werte werden gesucht:

- Erforderliche Ladezeit, wenn der Akku vollständig entladen ist.
- Mittlere Klemmenspannung als Mittelwert für die gesamte Entladedauer von 15 h.
- Kurzschluss-Strom im Falle eines Kurzschlusses bei einer E.M.K. von 2 V pro Zelle.



Akkuladung

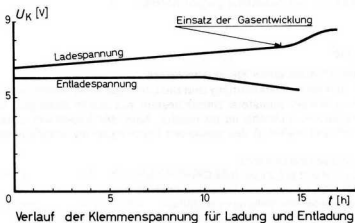


Bild 24

Vorgehen:

1. Schritt: Berechnung der Ladezeit

- Grundformel für den Ah-Wirkungsgrad anschreiben

$$\eta = \frac{\text{abgegebene Ladung}}{\text{aufgenommene Ladung}}$$

$$\eta = \frac{(I \cdot t)_{\text{abg}}}{(I \cdot t)_{\text{auf}}} \cdot 100\%$$

- Grundformel nach «aufgenommene Ladung» umstellen

$$(I \cdot t)_{\text{auf}} = \frac{(I \cdot t)_{\text{abg}} \cdot 100\%}{\eta}$$

- t_{auf} isolieren

$$t_{\text{auf}} = \frac{(I \cdot t)_{\text{abg}} \cdot 100\%}{\eta \cdot I}$$

- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$t_{\text{auf}} = \frac{120 \cdot 100}{90 \cdot 8} \quad \frac{\text{A} \cdot \text{h} \%}{\text{A} \%}$$

$$t_{\text{auf}} = 16,7 \text{ h}$$

2. Schritt: Berechnung der mittleren Klemmenspannung

- Grundformel für den Watt-Stunden-Wirkungsgrad anschreiben

$$\eta = \frac{\text{abgegebene Arbeit}}{\text{aufgenommene Arbeit}}$$

$$\eta = \frac{(P \cdot t)_{\text{abg}}}{(P \cdot t)_{\text{auf}}} \cdot 100\%$$

- Grundformel nach «abgegebene Arbeit» umstellen

$$(P \cdot t)_{\text{abg}} = \frac{\eta \cdot (P \cdot t)_{\text{auf}}}{100\%}$$

- P_{abg} isolieren und nach U umstellen

$$P_{\text{abg}} = \frac{\eta \cdot (P \cdot t)_{\text{auf}}}{t \cdot 100\%}$$

$$U_{\text{abg}} = \frac{\eta \cdot (P \cdot t)_{\text{auf}}}{t \cdot I \cdot 100\%}$$

- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$U_{\text{abg}} = \frac{75 \cdot 920}{15 \cdot 8 \cdot 100} \quad \frac{\% \cdot \text{A} \cdot \text{V} \cdot \text{h}}{\text{h} \cdot \text{A} \cdot \%}$$

$$U_{\text{abg}} = 5,75 \text{ V}$$

3. Schritt: Berechnung des Kurzschluss-Stromes

- Grundformel anschreiben

$$I_k = \frac{E}{R_i}$$

- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$I_k = \frac{3 \cdot 2}{3 \cdot 0,04}$$

$$I_k = 50 \text{ A}$$

b. Das Betriebsverhalten eines Stahllakkumulators

Bild 25a zeigt die Parallelschaltung von zwei gleichen Zellen. Jede Zelle weist eine E.M.K. von 1,2 V und einen Innenwiderstand von 1,4 Ohm auf. Es handelt sich dabei um zwei Stahllakkuzellen mit geringer Kapazität und kleiner Stromabgabe. Solche Zellen finden wir in Geräten, die nur einen geringen Stromverbrauch aufweisen. An Hand dieser Schaltung wollen wir das Betriebsverhalten der Spannungsquelle studieren. Als Belastung verwenden wir einen veränderlichen Widerstand. Wir messen Strom und Spannung für verschiedene Werte des Belastungswiderstandes. Die gemessenen Werte fassen wir in Tabelle 5 zusammen; aus Strom und Spannung bestimmen wir die Leistung und tragen diese ebenfalls in Tabelle 5 ein. Die gemessenen Werte überprüfen wir mit Hilfe des ohmschen Gesetzes.

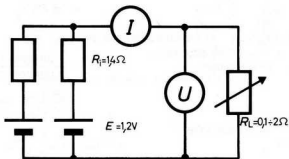


Bild 25a

$R_L [\Omega]$	$I [A]$	$U [V]$	$P [W]$
0,1	1,5	0,15	0,23
0,3	1,2	0,36	0,43
0,5	1,0	0,5	0,5
0,6	0,92	0,55	0,51
0,7	0,86	0,6	0,515
0,8	0,8	0,64	0,51
0,9	0,75	0,67	0,505
1	0,71	0,71	0,50
1,5	0,55	0,83	0,45
2,0	0,44	0,89	0,40

Tabelle 5

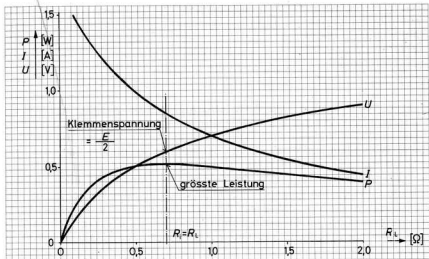


Bild 25b

Für die Berechnungen gehen wir wie folgt vor:

Vorgehen:

1. Schritt: Berechnung des Stromes

- Grundformel für die Stromberechnung anschreiben

Der Innenwiderstand wirkt nur mit dem halben Wert, da beide Innenwiderstände parallel geschaltet sind, und somit jede Zelle die Hälfte des Belastungsstromes aufbringt.

- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen (Im Beispiel führen wir die Rechnung nur für einen Wert des Belastungswiderstandes durch)

$$I = \frac{E}{\frac{R_i}{2} + R_L}$$

$$I = \frac{1,2}{\frac{1,4}{2} + 1,5}$$

$$I = 0,55 \text{ A}$$

2. Schritt: Berechnung der Klemmenspannung

- Grundformel für die Spannung anschreiben
- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$U_K = I \cdot R_L$$

$$U_K = 0,55 \cdot 1,5$$

$$U_K = 0,83 \text{ V}$$

3. Schritt: Berechnung der verbrauchten Leistung

- Grundformel für die Leistung anschreiben
- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$P = U \cdot I$$

$$P = 0,83 \cdot 0,55 \text{ V} \cdot \text{A}$$

$$P = 0,46 \text{ W}$$

Die errechneten Werte für alle Belastungswiderstände gemäss Tabelle 5 sind im Diagramm Bild 25b zusammengefasst. Werte, die in einem Diagramm zu Kurven zusammengefasst sind, lassen sich so besser überblicken als in der Tabelle. Wir wollen nun diese Kurven deuten. Die Stromkurve zeigt uns, dass der Strom mit grösser werdendem Belastungswiderstand immer kleiner wird. Die Spannungskurve zeigt eine der Stromkurve entgegengesetzte Tendenz. Der Verlauf der beiden Kurvenzüge scheint uns eine logische Folge des ohmschen Gesetzes zu sein. Je kleiner der Belastungswiderstand gemacht wird, desto grösser muss der Belastungsstrom ausfallen, da Strom und Widerstand sich zueinander umgekehrt proportional verhalten. Je grösser der Wert des Belastungsstromes ausfällt, desto grösser wird der Spannungsabfall am Innenwiderstand der Spannungsquelle. Dieser Spannungsabfall wird nun, wie wir wissen, von der E.M.K. subtrahiert, um die Grösse der Klemmenspannung zu ermitteln; diese Tatsache erklärt den Verlauf der Spannungskurve. Der wichtigste Kurvenzug ist derjenige für die Leistung. Für kleine Werte des Belastungswiderstandes steigt die Kurve steil an, sie erreicht ihr Maximum bei einem Belastungswiderstand von 0,7 Ohm, das heisst: *Der Batterie wird die grösste Leistung entnommen, wenn der Belastungswiderstand gleich gross gemacht wird wie der Innenwiderstand der Batterie.*

Dieser Satz gilt für alle Spannungsquellen. Wir werden in einem späteren Zeitpunkt sehen, dass er auch auf Röhrenschaltungen und Transistorstufen angewendet werden kann. Der Beweis für die Richtigkeit dieser Aussage ist nicht einfach, man muss unter Zuhilfenahme der höheren Mathematik beweisen, dass die Kurve ihr Maximum immer dann erreicht, wenn Innenwiderstand und Belastungswiderstand gleich gross sind.

5. Das Wesentliche

Im Sekundärelement sind die chemischen Vorgänge umkehrbar. Der Akkumulator kann nach erfolgter Entladung wieder geladen werden.

Die Kapazität eines Sammlers wird in Ampère-Stunden gemessen.

Für die Bestimmung des Wirkungsgrades eines Akkumulators verwenden wir den Ampère-Stunden-Wirkungsgrad oder den Watt-Stunden-Wirkungsgrad.

Der Watt-Stunden-Wirkungsgrad zeigt die wahre Energiebilanz des Sammlers.

Der Bleiakkumulator hat einen kleineren Innenwiderstand als ein entsprechender Stahllakkumulator, dafür ist der Bleiakkumulator in bezug auf die Wartung anspruchsvoller.

Gleiche Spannungsquellen können in Serie- oder Parallelschaltung zu Batterien zusammengebaut werden. Mit der Serieschaltung erhöhen wir die E.M.K. und den Innenwiderstand. Bei der Parallelschaltung bleibt die E.M.K. konstant und der Innenwiderstand sinkt.

Einer Spannungsquelle wird immer dann die grösste Leistung entnommen, wenn der Belastungswiderstand gleich gross ist wie der Innenwiderstand.

6. Repetitionsaufgaben (Lösung Seite 424)

- a) Aus was besteht der Elektrolyt beim Bleiakkumulator?
- b) In welcher Form wird beim Bleiakkumulator verdunsteter Elektrolyt ersetzt?
- c) Welche Vorsichtsmassnahme muss man bei der Ladung eines Bleiakkumulators beachten?
- d) Welches ist die Masseinheit für die Speicherkapazität von Akkumulatoren?
- e) Erklären Sie die beiden Masseinheiten für den Wirkungsgrad eines Sammlers.
- f) Welche der beiden Masseinheiten ergibt ein realistischeres Bild vom Wirkungsgrad?
- g) Welches ist der Hauptvorteil des Stahllakkumulators gegenüber dem Bleiakkumulator?
- h) Welcher Akkumulator weist den besseren Wirkungsgrad auf, der Bleisammler oder der Stahllakku?
- i) Bei welcher Akkusorte erreicht man kleinere Innenwiderstände, beim Bleiakku oder beim Stahllakku?
- k) Ist die Säuredichte ein Mass für den Ladungszustand der Zelle?
- l) Ist die Dichte der Lauge ein Mass für den Ladungszustand der Zelle?
- m) 6 Zellen eines Bleiakkus mit einer E.M.K. von 2 V und einem Innenwiderstand von 0,01 Ohm werden in Serie geschaltet. Bei welchem Belastungswiderstand kann diese Batterie die grösste Leistung abgeben? Wie gross ist die Klemmenspannung für diesen Betriebsfall?
- n) 4 Zellen eines kleinen Stahllakkumulators mit einer E.M.K. von 1,2 V und einem Innenwiderstand von 0,8 Ohm werden parallel geschaltet. Wie gross wird der Strom im Falle eines Kurzschlusses?

C. Der Magnetismus

I. Permanentmagnete

1. Einführung

Magnetismus und Elektrizität sind eng verwandt. Viele elektrische Erscheinungen sind durch magnetische Vorgänge bedingt und umgekehrt. Zum Verständnis vieler elektrischer Vorgänge sind Kenntnisse der Grundgesetze des Magnetismus unerlässlich.

2. Was wissen Sie schon über Permanentmagnete?

(Lösung Seite 425)

- a) Kennen Sie ein Anwendungsbeispiel für die Ausnutzung des Erdmagnetismus?
- b) Wo treten magnetische Feldlinien auf?
- c) Wie können solche Feldlinien sichtbar gemacht werden?
- d) Nennen Sie ein Material, aus welchem sich Permanentmagnete herstellen lassen.

3. Der Permanentmagnet

a. Was ist ein Permanentmagnet?

Ein *Permanentmagnet*, oft auch *Dauermagnet* genannt, besteht aus einem Werkstoff, der magnetisiert wurde und nachher den Magnetismus beibehalten hat. Diese sogenannten ferromagnetisch harten Stoffe sind gehärteter Stahl oder Speziallegierungen, welche meist Stahl oder Nickel als Grundstoff enthalten. Der Magnetismus lässt sich am einfachsten dadurch nachweisen, dass man in die Nähe der Stabenden ein Stück Eisen bringt. Der Dauermagnet übt nun auf dieses Eisen eine bestimmte Kraft aus, er zieht es an. Fahren wir mit dem Eisenstück dem Magnetstab entlang, so stellen wir fest, dass die anziehende Kraft an den Stabenden am stärksten ist, in der Stabmitte finden wir eine neutrale Zone, in welcher das Eisen nicht mehr angezogen wird. Man sagt, der Permanentmagnet weise zwei *Pole* auf.

b. Eigenschaften und Wirkungsweise des Permanentmagneten

Das bekannteste Anwendungsbeispiel des Dauermagneten ist die Magnetnadel des Kompasses. Die Kompassnadel stellt sich unter dem Einfluss des Erdmagnetfeldes immer in Nord-Süd-Richtung ein. Das Verhalten der Kom-

passnadel hat zu der Benennung der Pole von Permanentmagneten geführt. Der Nordpol der Magnetnadel zeigt nach Norden, der Südpol nach Süden. Nord- und Südpole von zwei Dauermagneten üben aufeinander eine Kraft aus. Gleichnamige Pole stoßen sich ab, ungleichnamige Pole ziehen sich an. Demnach ist paradoxerweise der geographische Nordpol der Erde ein magnetischer Südpol! Den Wirkungsbereich eines Magneten, in welchem seine Kräfte wirken, nennt man *magnetisches Feld*.

Ein unmagnetisches Stück Stahl lässt sich in einen Dauermagneten verwandeln, indem man es gleichmässig mit einem Pol eines Dauermagneten in der gleichen Richtung bestreicht. Es hat den Anschein, als ob dieser Vorgang im Inneren des Stahlstabes etwas ausgerichtet habe. Schneiden wir nun den so magnetisierten Stab in der Mitte entzwei, so entstehen zwei neue Magnetstäbe mit zwei neuen Polen. Dieser Teilungsvorgang lässt sich beliebig oft wiederholen, wir erhalten dabei immer wieder neue Dauermagnete. Setzen wir die Teilung beliebig fort, so erhalten wir schlussendlich winzig kleine Magnetstäbchen in der Grössenordnung von Molekülen. Wir nennen diese Magnetchen wegen ihrer Kleinheit *Molekularmagnete*.

Der Stabmagnet besteht aus einer unendlich grossen Anzahl solcher Molekularmagnete. In unmagnetischem Zustand liegen diese Molekularmagnete ungeordnet durcheinander. Wird der Stab magnetisiert, so richten sich die Molekularmagnete alle in der gleichen Richtung aus. Wenn alle ausgerichtet sind, entsteht an den Enden des Stabes die bekannte Magnetwirkung. Im Eisen ist eine vollständige Ordnung der Molekularmagnete möglich, es findet deshalb als Grundstoff zur Herstellung von Magneten Verwendung. Bild 26 zeigt die Teilung eines Stabmagneten.

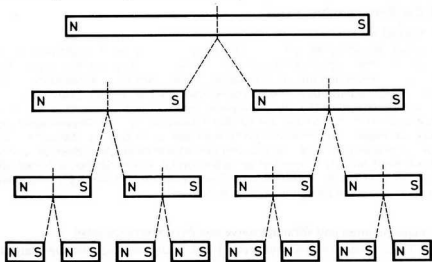
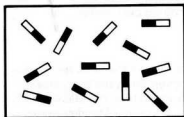
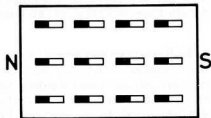


Bild 26

In Bild 27 erkennen wir den unmagnetischen Stahlstab mit den ungeordneten Molekularmagneten und den magnetischen Stahlstab, in welchem die Elementarmagnete alle in einer Richtung ausgerichtet sind.



ungeordnete Molekularmagnete



geordnete Molekularmagnete

Bild 27

Die Molekularmagnete müssen sich innerhalb des Stahlstabes drehen können. Die Beweglichkeit dieser Elementarmagnete ist nicht in allen Stahlsorten gleich. Im weichen Stahl sind die Molekularmagnete weniger starr ausgerichtet (beweglicher), er lässt sich leichter magnetisieren als harter Stahl. Harter Stahl behält dafür den Magnetismus besser als weicher Stahl, weshalb er zur Herstellung von Dauermagneten verwendet wird.

In Bild 28 sehen wir ein klassisches Experiment; magnetische Feldlinien werden mit Hilfe von Eisenpulver sichtbar gemacht. Zu diesem Zweck streuen wir Eisenpulver auf ein Blatt Papier, unter welchem ein Stabmagnet liegt. Wir sehen deutlich, dass die Feldlinien aus den Polen austreten und auch wieder in diese zurückkehren. Innerhalb des Magneten setzen sich dieselben Feldlinien fort, so dass der Kreis der Feldlinien geschlossen ist.

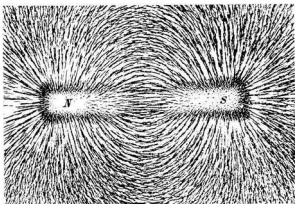


Bild 28

Ähnlich der Stromrichtung, die konventionell festgelegt wurde, hat man auch die Richtung der Feldlinien festgelegt.

Die Regel lautet:

Die Feldlinien verlassen das Eisen am Nordpol und treten am Südpol wieder ein. Diese Richtung wird als positive Feldrichtung bezeichnet.

c. Die Kenndaten des Permanentmagneten

Die Stärke der magnetischen Kraftwirkung des Permanentmagneten muss definiert und gemessen werden. Die Masseinheiten des veralteten absoluten Masssystems werden für Magnetkreise noch oft verwendet. Die Masseinheiten des Giorgi-Systems erlauben eine Definition der Werte von Magnetkreisen mit den vier Grundeinheiten; sie basieren jedoch auf dem Elektromagneten. Wir wollen die beiden Masseinheiten einander gegenüberstellen, wobei uns die Einheiten des Giorgi-Systems vorerst noch recht sonderbar erscheinen mögen. Wir nehmen sie zur Kenntnis, der nächste Abschnitt «Elektro-Magnete» wird uns über die Zusammenhänge aufklären.

Der *magnetische Fluss* ist die Summe aller Feldlinien, die an einem Pol eintreten oder austreten.

Die *magnetische Feldstärke* ist die Anzahl Feldlinien, die auf einen Quadrat-zentimeter entfallen.

Die *magnetische Spannung* entspricht der Feldstärke multipliziert mit der Länge der Feldlinie.

Die *magnetische Induktion* entspricht dem magnetischen Fluss pro Flächeneinheit.

d. Masseinheiten

Grösse	Masseinheit	
	Absolutes Masssystem	Giorgi-System
Magnetischer Fluss Φ	Maxwell (Mx)	Vs = Weber (Wb)
Magnetische Feldstärke H	Oersted (Oe)	A/m
Magnetische Spannung U_m	Gilbert (Gb)	A
Magnetische Induktion B	Gauss (Gs)	Vs/m ² = Tesla (T)

Tabelle 6

Um Werte von einem Masssystem in das andere Masssystem umrechnen zu können, benötigt man Umrechnungsfaktoren:

$$1 \text{ Oe} = \frac{10^3}{4\pi} \text{ A/m} = 79,6 \text{ A/m}$$

$$1 \text{ Mx} = 10^{-8} \text{ Vs}$$

$$1 \text{ Gb} = \frac{10}{4\pi} \text{ A} = 0,796 \text{ A}$$

Wir werden später erkennen, dass die Masseinheiten des Giorgi-Systems für Berechnungsaufgaben bedeutend praktischer sind als die Einheiten im absoluten System. Die magnetische Feldstärke H , sowie die magnetische Induktion B haben an jeder Stelle eine bestimmte Stärke nach Betrag und Richtung. Nachfolgend werden alle Kenngrößen des Magnetismus nur betragsmässig behandelt.

4. Das Wesentliche

Jeder Permanentmagnet weist einen Südpol und einen Nordpol auf; die Pole treten immer paarweise auf.

Den Wirkungsbereich eines Magneten, in welchem seine Kräfte wirksam sind, nennt man magnetisches Feld.

Die Feldlinien treten am Nordpol aus dem Magneten aus und kehren am Südpol in diesen zurück.

Die Wirkung des Permanentmagneten beruht auf der Beweglichkeit der Molekularmagnete, in magnetisiertem Zustand sind diese Molekularmagnete gleichsinnig ausgerichtet, in unmagnetisiertem Zustand sind sie ungeordnet. Die Beweglichkeit der Molekularmagnete ist ein Mass für die magnetischen Eigenschaften eines Stoffes. Bei grosser Beweglichkeit lässt sich ein Stoff gut magnetisieren, er verliert jedoch den Magnetismus leicht wieder.

5. Repetitionsaufgaben (Lösung Seite 426)

- Was ist ein magnetisches Feld?
- Welche Rolle spielen die Molekularmagnete im Dauermagneten?
- Beschreiben Sie den Weg, den magnetische Feldlinien innerhalb und ausserhalb eines Permanentmagneten nehmen.
- Wie können magnetische Feldlinien sichtbar gemacht werden?
- Warum lässt sich Weicheisen besser magnetisieren als harter Stahl?
- Was verstehen Sie unter dem Begriff «Magnetischer Fluss»?
- Wie ist die magnetische Feldstärke definiert?
- Was geschieht, wenn wir einen Stabmagneten in der Mitte in zwei Teile entzweibrechen?

II. Elektromagnetismus

1. Einführung

Elektromagnete spielen in der Praxis eine viel grössere Rolle als Permanentmagnete. Die Vorgänge in elektromagnetischen Kreisen lassen sich in Gesetze kleiden, ähnlich den Erscheinungen im Gleichstromkreis. Der Elektromagnetismus ist eine der Säulen, auf denen die Elektrotechnik ruht. Ohne die genaue Kenntnis der elektromagnetischen Phänomene lassen sich weder Transformatoren noch Drosselspulen oder Schwingkreise wirklich verstehen. Beim Studium des Elektromagnetismus kommt es primär auf das Verständnis der physikalischen Vorgänge in elektromagnetischen Kreisen an, die Berechnungsbeispiele sollen dabei lediglich die Theorie bestätigen und untermauern. Diese Forderung steht im Widerspruch zu früher Gesagtem. Es ist jedoch so, dass der Praktiker sehr oft eine Schaltung überschlagsmässig überprüfen muss. Dazu muss er in der Lage sein, die Werte der Schaltelemente und deren spezifisches Verhalten abzuschätzen. Diese Prüfung setzt voraus, dass man fähig ist, die zu erwartenden Messwerte grob zu berechnen. Um das zu können, muss man die Berechnungsvorgänge beherrschen. Es kommt jedoch praktisch kaum vor, dass Sie einen Magnetkreis nachrechnen müssen. Die einfachen physikalischen Vorgänge in Transformatoren oder Spulen setzen aber voraus, dass Sie die Grundgesetze des Elektromagnetismus kennen. In diesem Sinn wollen wir uns mit diesem Gebiet befassen.

2. Was wissen Sie schon über Elektromagnetismus?

(Lösung Seite 427)

- Nennen Sie ein Anwendungsbeispiel für den Elektromagnetismus.
- Hat ein mit Gleichstrom gespeister Elektromagnet die gleichen Eigenschaften wie ein Permanentmagnet?
- Treten beim Elektromagneten ebenfalls Feldlinien auf?
- Beschreiben Sie den prinzipiellen Aufbau eines Elektromagneten.
- Von welchen Faktoren hängt die Feldstärke eines Elektromagneten ab?

3. Der Elektromagnetismus

a. Was ist ein Elektromagnet?

Eine stromdurchflossene Spule bildet einen Elektromagneten. Durch einen Eisenkern im Innern der Spule werden die magnetischen Eigenschaften erhöht.

b. Magnetfeld und stromdurchflossener Leiter

Bild 29 zeigt einen stromdurchflossenen Leiter, welcher ein Papier durchdringt. Dieses Papier steht senkrecht zum Leiter; streut man nun Eisenpulver darauf, so lassen sich die Feldlinien wie beim Permanentmagneten nachweisen.

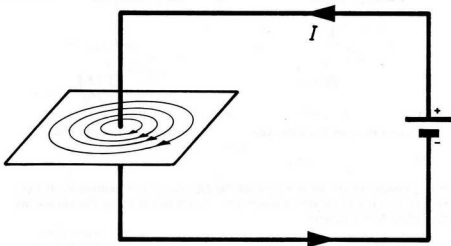


Bild 29

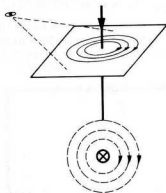
Das Experiment beweist, dass sich um einen stromdurchflossenen Leiter kreisförmige magnetische Feldlinien bilden. Diese konzentrischen Feldlinien sind in sich geschlossen. Beim Permanentmagneten haben wir festgelegt, dass die Kraftlinien beim Nordpol austreten und beim Südpol wieder in den Magneten eintreten. Mit Hilfe der Kompassnadel stellen wir die Richtung des Magnetfeldes um den Leiter fest. Die Nadel muss sich tangential zu den konzentrischen Feldlinien stellen. Wird die Stromrichtung umgepolt, so dreht sich die Magnetonadel um 180° . Die Richtung des Magnetfeldes ist demzufolge von der Stromrichtung abhängig. Die *Korkenzieherregel* diene uns als Gedächtnisstütze, sie erlaubt es uns, die Feldrichtung zu bestimmen:

Drehen wir einen Korkenzieher in Stromrichtung durch die Papierebene, so zeigt die Drehrichtung die Richtung des Flusses. Bild 30 erläutert die Verhältnisse.

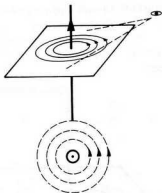
Die Feldstärke wird umso kleiner, je grösser der Abstand zwischen dem stromdurchflossenen Leiter und der Feldlinie ist; je grösser der Radius der Kraftlinie, desto kleiner wird die Feldstärke. Mit zunehmendem Strom nimmt die Feldstärke zu. Eine einfache Formel hält diese Feststellungen fest.

$$H = 0,4\pi \cdot \frac{I}{2\pi \cdot r} = 0,2 \frac{I}{r} \text{ [Oe]} \quad (\text{für betrachteten Feldpunkt})$$

H = Feldstärke
 I = Stromstärke in Ampère
 r = Radius in m



Strom fließt vom Zuschauer weg



Strom fließt auf den Zuschauer zu

Bild 30

In der moderneren Literatur wird die Feldstärke in A/m gemessen. Wir erinnern uns an die Umrechnungsfaktoren und schreiben obige Formel so, dass als Einheit A/m erscheinen.

$$H = \frac{I}{2 \cdot \pi \cdot r} \quad [\text{A/m}]$$

H = Feldstärke

I = Stromstärke in A

r = Radius in m

Anlässlich der Besprechung des Permanentmagneten haben wir den Ausdruck «magnetische Spannung» kennen gelernt. Wir erinnern uns der Definition: Magnetische Spannung ist gleich Feldstärke mal Länge der Feldlinie. Da wir es bei den Feldlinien mit Kreisen zu tun haben, wird die Rechnung einfach. Die Länge einer Feldlinie berechnet sich nach der Kreisformel:

$$\text{Länge} = \text{Kreisumfang} = 2 \cdot \pi \cdot r = l$$

Setzen wir diese Formel in unsere Beziehung für die Berechnung der Feldstärke in Oersted ein, so erhalten wir die folgende Gleichung:

$$U_m = H \cdot l = 0,2 \cdot \frac{I}{r} \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \quad \text{Die Gleichung lässt sich kürzen:}$$

$$U_m = 0,4 \cdot \pi \cdot I \quad [\text{A}]$$

Wir erkennen, dass die Masseinheit für die magnetische Spannung das Ampère ist; gleichzeitig stellen wir fest, dass die magnetische Spannung unabhängig vom Radius der Feldlinienkreise geworden ist, eine Tatsache, die gut verständlich ist, da die Feldstärke in dem Masse abnimmt, wie die Feldlinienlänge zunimmt, und da die magnetische Spannung sich aus dem Produkt von Feldlinienlänge und Feldstärke errechnet, wird das Resultat unabhängig vom Radius.

Wir wollen jetzt versuchen, die gleiche Formel aufzustellen, jedoch mit der Einheit A/m für die Feldstärke:

$$U_m = \frac{I}{2\pi \cdot r} \cdot 2 \cdot r \cdot \pi \quad \text{oder gekürzt:}$$

$$U_m = I \quad [\text{A}]$$

Beide Resultate unterscheiden sich durch den Faktor $0,4 \pi$. Diese Zahl ist eine Konstante des absoluten Masssystems, wir werden ihr noch oft begegnen.

c. Die magnetische Induktion

Die magnetische Induktion B ist der magnetischen Feldstärke H proportional. Der Ausdruck Induktion ist mit dem Verb induzieren verwandt. Die magnetische Induktion verdankt ihren Namen der Tatsache, dass ein Magnetfeld unter bestimmten Bedingungen in einem Leiter eine Spannung induzieren kann. Das Verb «induzieren» lässt sich am besten mit «verursachen» übersetzen. Zum besseren Verständnis des Vorganges wollen wir ein Experiment betrachten. Bild 31a zeigt den Aufbau des Versuches.

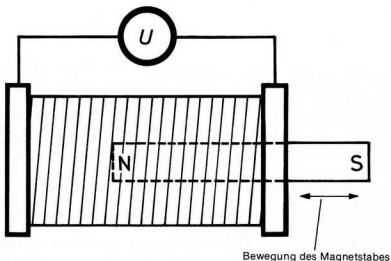


Bild 31a



Bild 31b

Eine Luftspule wird mit einem Voltmeter verbunden. Ein Stabmagnet wird langsam in die Spule geschoben, das Instrument schlägt in einer Richtung aus, es wurde eine Spannung *induziert*. Wenn wir den Magneten wieder aus der Spule herausziehen, so schlägt das Instrument in der entgegengesetzten Richtung aus. Wir wechseln die Spule aus, die neue Spule habe die doppelte Windungszahl, und wir wiederholen das Experiment. Der Zeiger des Instrumentes zeigt jetzt den doppelten Ausschlag. Wird der Magnet rascher in die Spule gestossen, so steigt der Instrumentenausschlag an. Den gleichen Effekt erreichen wir, wenn wir einen stärkeren Magneten verwenden. Das Experiment bringt uns folgende Erkenntnisse:

- Wenn ein Leiter (Spule) von einem bewegten Magnetfeld geschnitten wird, so wird in ihm eine Spannung induziert.
- Die Polarität der induzierten Spannung hängt von der Polarität des Magnetfeldes ab.
- Die induzierte Spannung wird umso grösser, je stärker das Magnetfeld, je rascher die Bewegung des Feldes und je länger der Leiter (Windungszahl der Spule) ist.

Der beschriebene Vorgang heisst *Induktion*. Wir stellten fest, dass die induzierte Spannung proportional der Feldstärke ist. Die Feldliniendichte bezeichnet man deshalb als magnetische Induktion. Bei Luftspulen, das sind Spulen ohne Eisenkern, ist die magnetische Induktion gleich der Feldstärke. Im absoluten Masssystem wird die magnetische Induktion in **Gauss** gemessen. Im modernen Giorgi-System verwendet man für die magnetische Induktion die Einheit Tesla oder **Vs/cm²** (Voltsekunde pro Quadratzentimeter).

In Anlehnung an die Praxis verwenden wir anstelle der Grundeinheit m die kleinere Einheit cm.

Zwischen den beiden Masseinheiten besteht folgender Zusammenhang:

$$1 \text{ Gauss} = 10^{-4} \text{ Tesla} = 10^{-8} \frac{\text{Vs}}{\text{cm}^2}$$

Eine Luftspule, die eine Feldstärke von beispielsweise 40 Oe aufweist, hat eine magnetische Induktion von ebenfalls 40 Gauss. Man darf schreiben:

$B = H$ (magnetische Induktion ist gleich magnetische Feldstärke, da μ für Luft ≈ 1).

Eine Luftspule mit einer Feldstärke von 40 A/cm dagegen besitzt eine magnetische Induktion von:

$$B = 0,4 \pi \cdot 10^{-8} \cdot 40 \frac{\text{Vs}}{\text{cm}^2}$$

$$B = 50,2 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Vs}}{\text{cm}^2}$$

Wir erkennen in dieser Gleichung die Zahl $0,4 \pi$, die Potenz 10^{-8} und die Masseinheit Voltsekunde pro Quadratzentimeter. Damit diese Masseinheit entsteht, muss der Verhältniszahl $0,4 \pi \cdot 10^{-8}$ eine Einheit gegeben werden. Die Feldstärke wird in A/cm angenommen. Um die Einheit Vs/cm² zu erhalten muss demzufolge die Feldstärke mit der Einheit Vs/Acm multipliziert werden. In der folgenden Gleichung sind diese Einheiten berücksichtigt:

$$\begin{aligned} B &= \mu_0 \cdot H & H &= \text{Feldstärke in A/cm} \\ & & \mu_0 &= \text{Induktionskonstante in Vs/Acm} \\ & & &= 0,4 \pi \cdot 10^{-8} \frac{\text{Vs}}{\text{Acm}} \\ & & &= 1,256 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Vs}}{\text{Acm}} \end{aligned}$$

Die Einheitenprobe beweist die Richtigkeit der Masseinheiten:

$$[B] = \frac{\text{Vs}}{\text{Acm}} \cdot \frac{\text{A}}{\text{cm}} = \frac{\text{Vs}}{\text{cm}^2}$$

Die Induktionskonstante wird oft auch magnetische Feldkonstante oder Permeabilität des freien Raumes genannt. Diese Ausdrücke mögen recht verwirrend klingen, in der Praxis handelt es sich bei der Induktionskonstante lediglich um einen *Umrechnungsfaktor*, um aus dem absoluten Masssystem in das Giorgi-System umzurechnen.

Sie werden sich sicher die Frage gestellt haben, warum das Giorgi-System eine dermassen komplizierte Einheit für die magnetische Induktion angibt. Es gibt zwei Gründe: das Giorgi-System will mit den vier Einheiten Meter, Sekunde, Kilogramm und Ampère auskommen, um alle Grössen zu definieren. Das System will auch Berechnungsvorgänge vereinfachen. Das folgende Beispiel zeigt uns, wie einfach sich Berechnungen mit dem Giorgi-System durchführen lassen. Wir wollen die induzierte Spannung in einem Leiter vorausberechnen, der sich in einem bestimmten Magnetfeld mit einer bestimmten Geschwindigkeit bewegt. Bild 32 zeigt das Prinzip des Versuches. Der Leiter wird mit gleichbleibender Geschwindigkeit durch das homogene (gleichmässige) Magnetfeld bewegt. Die Spannung, die für die Dauer der Bewegung des Leiters im Magnetfeld erzeugt wird, soll errechnet werden.

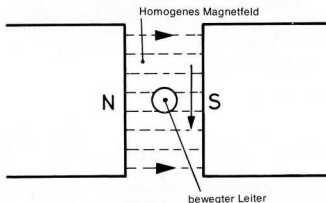


Bild 32

Folgende Angaben sind bekannt:

Magnetische Induktion

$$B = 1 \cdot 10^{-4} \frac{\text{Vs}}{\text{cm}^2}$$

Geschwindigkeit des Leiters

$$v = 400 \frac{\text{cm}}{\text{s}}$$

Länge des Leiters

$$l = 8 \text{ cm}$$

Wir haben früher festgestellt, dass die induzierte Spannung zu der Geschwindigkeit, der magnetischen Induktion und der Leiterlänge proportional ist. Algebraisch ausgedrückt:

$$U_i = B \cdot v \cdot l; [U_i] = \frac{\text{Vs}}{\text{cm}^2} \cdot \frac{\text{cm}}{\text{s}} \cdot \text{cm} = \text{V}$$

$$U_i = 1 \cdot 10^{-4} \cdot 400 \cdot 8$$

$$U_i = 0,32 \text{ V}$$

So einfach lässt sich die Berechnung durchführen, wenn man die Einheiten des Giorgi-Systems verwendet. Wir wollen uns dieses Beispiel merken, wir werden später bei der Behandlung der Induktivität darauf zurückkommen.

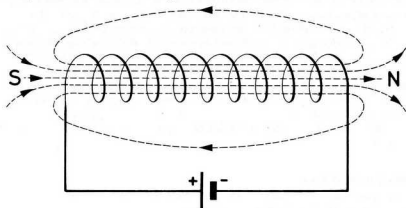


Bild 33

d. Die eisenlose stromdurchflossene Spule

Wird der Leiter auf einen zylinderischen Körper aufgewickelt, so entsteht eine Spule. Schickt man einen Strom durch die Windungen der Spule, so entsteht in der Spule ein gleichmässiges Magnetfeld. Die Magnetfelder der einzelnen Windungen haben sich in der Spule zu einem Gesamtmagnetfeld vereinigt, dessen Form dem Feld eines Stabmagneten ähnlich sieht.

Bild 33 zeigt die stromdurchflossene Zylinderspule.

Zur Bestimmung des Nord- und Südpoles der Spule dienen verschiedene Regeln; bekannt sind die Korkenzieher-Regel, die Rechte-Hand-Regel und die Südpolregel. Alle diese Regeln haben den Nachteil, dass sie auswendig gelernt werden müssen. Auswendiggelerntes kann man jedoch vergessen, oder man erinnert sich nur mangelhaft an den Inhalt. Es ist deshalb weitaus besser, man versucht die Polarität mit Hilfe logischer Überlegung selber zu finden oder man bediene sich einer narrensicheren Gedächtnishilfe. Bild 34 zeigt uns beide Möglichkeiten. Ausgangsbasis für alle Überlegungen ist die einfache Korkenzieherregel. Wir untersuchen zuerst die Polarität einer einzelnen

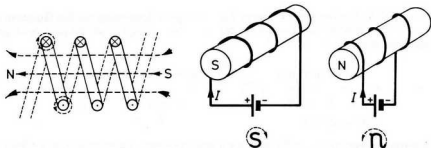


Bild 34

Wicklung, indem wir uns den Feldverlauf um den gestreckten Leiter vergegenwärtigen und diesen Leiter nun zu einer Wicklung biegen. Dann zeichnen wir den Schnitt durch eine Zylinderspule und tragen in die Schnittflächen der einzelnen Windungen die Stromrichtungen ein. Beide Vorgehen führen zur Bestimmung der Pole. Wer gerne mit Gedächtnishilfen arbeitet, der stelle sich die kleinen Buchstaben n und s vor, die Buchstabenenden werden mit Pfeilen verlängert. Die Pfeilrichtung zeigt die Stromrichtung für die entsprechende Polarität, die eine Spule aufweisen muss, wenn man den Blick auf das Spulenende richtet.

Die magnetische Feldstärke in der Spule ist der Windungszahl und dem Strom proportional.

e. Die Durchflutung Θ

Die Durchflutung Θ in der stromdurchflossenen Spule ist das Produkt von Stromstärke mal Windungszahl.

$$\Theta = I \cdot N \quad [\text{A}]$$

Die Masseinheit ist das Ampère, da die Windungszahl dimensionslos ist. Wir erkennen in der Durchflutung unsere magnetische Spannung wieder. In der Spule trägt jede einzelne Windung zur Vergrößerung des Magnetfeldes bei, da sich die Felder der einzelnen Windungen addieren. Aus diesem Grund wird zur Berechnung der magnetischen Spannung in Spulen der Strom mit der Windungszahl multipliziert. In der Praxis spricht man von *Ampèrewindungen* (AW) an Stelle der Durchflutung.

$$U_{\text{mtot}} = \Theta = IN \quad [\text{A}]$$

f. Der magnetische Fluss des Elektromagneten

Der magnetische Fluss des Elektromagneten unterscheidet sich nicht vom Fluss des Dauermagneten. Daraus ersehen wir, dass der Fluss gleich dem Produkt von magnetischer Induktion und Fläche ist.

$$\Phi = B \cdot A \quad (A = \text{Fläche})$$

Die Masseneinheit für den Fluss ist die Voltsekunde (Vs). Setzen wir zu den Grössen der Berechnungsformel für den Fluss die Einheiten, so ersehen wir aus dieser Probe die Zusammenhänge, die zur Masseneinheit Voltsekunde führen.

$$[\Phi] = \frac{\text{Vs}}{\text{cm}^2} \cdot \text{cm}^2 = \text{Vs} \quad (\text{Wb})$$

Verwenden wir für die Induktion Gauss, so erhalten wir:

$$[\Phi] = \text{Gs} \cdot \text{cm}^2 = \text{Mx}$$

g. Die Permeabilität

Wir bringen in eine Zylinderspule einen Eisenkern. Wir machen nun die Feststellung, dass die magnetische Induktion bei gleichbleibender Windungszahl und Stromstärke gegenüber der Luftspule ganz gewaltig zugenommen hat. Das Eisen hat die Eigenschaft, die Kraftlinien zu konzentrieren. Die Wirkung ist beträchtlich, die Feldstärke kann einige tausendmal grösser sein. Der Flusszuwachs hängt vom Eisen und vom Magnetisierungszustand ab. Der Faktor der Feldzunahme wird als *Permeabilität* μ bezeichnet. Zur Unterscheidung von der Induktionskonstante wird er mit dem Index «r» versehen, man spricht von der *relativen Permeabilität* μ_r .

Die relative Permeabilität eines Stoffes sagt aus, um wie viel mal grösser der Magnetfluss eines Elektromagneten wird, wenn der betreffende Stoff als Kernmaterial verwendet wird. Die relative Permeabilität ist eine dimensionslose Grösse.

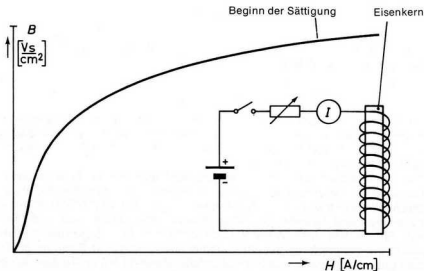


Bild 35a

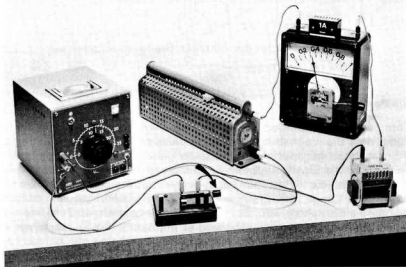


Bild 35b

Das Produkt aus Induktionskonstante und relativer Permeabilität bezeichnet man als *absolute Permeabilität* μ

$$\mu = \mu_0 \cdot \mu_r; [\mu] = \frac{Vs}{Acm}$$

Die Permeabilität des Eisens ist kein konstanter Faktor, sie hängt von der Eisensorte und von der Feldstärke ab. Wir magnetisieren nach Bild 35a einen Eisenkern und zeichnen die Abhängigkeit der magnetischen Induktion von der Feldstärke in ein Diagramm.

Die magnetische Induktion wird gemessen, indem man die Zugkraft des Elektromagneten mit einer Waage feststellt und die erhaltenen Werte umrechnet. Dieses Verfahren ist einfach, da zwischen Zugkraft und Feldstärke ein direkter Zusammenhang besteht. Die Magnetisierungsfeldstärke lässt sich einfach aus Stromstärke und Windungszahl ermitteln. Bei steigender Feldstärke nimmt die magnetische Induktion immer weniger zu, das Eisen ist gesättigt, die Molekularmagnete sind fast vollständig ausgerichtet. Im Bereich der Sättigung ist die relative Permeabilität nur noch klein. Im folgenden Versuch wollen wir das Verhalten des Eisenkernes näher untersuchen. Wir stellen eine Schal-

tung zusammen, die es ermöglicht, das Material in beiden Richtungen zu magnetisieren.

Bild 36 zeigt die verwendete Schaltung und die graphische Darstellung der erhaltenen Werte.

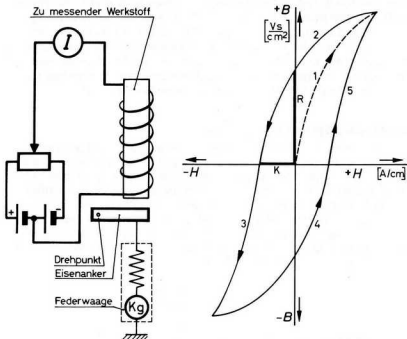


Bild 36

Der Strom wird in positiver Richtung durch die Spule geschickt und kontinuierlich erhöht, die Induktion verläuft nach der gestrichelt gezeichneten Kurve 1. Jetzt wird der Strom langsam auf Null zurück reguliert, die Induktion verläuft nach dem Kurvenstück 2. Lässt man nun den Strom in negativer Richtung langsam bis zu seinem Maximalwert ansteigen, so erhalten wir für die Induktion das Kurvenstück 3.

Das Kurvenstück 4 zeigt den Induktionsverlauf wie wir ihn erhalten, wenn der Strom wieder gegen Null geregelt wird. Das letzte Kurvenstück 5 entsteht, wenn wir den Strom wieder bis zu seinem positiven Maximalwert steigern. Der in sich geschlossene Kurvenzug gibt Auskunft über die magnetischen

Eigenschaften des verwendeten Eisens. Die Kurve wird als *Hysteresisschleife* bezeichnet. Die gestrichelt gezeichnete Kurve wird «Ursprungskurve» genannt, sie entsteht nur beim erstmaligen Magnetisieren. Die Hysteresisschleife enthält zwei Kennwerte des Werkstoffes: *Remanenz* und *Koerzitivkraft*. Unter Remanenz verstehen wir den Restmagnetismus des Werkstoffes, er wird in der Kurve durch die Strecke R dargestellt, diese gibt an, welche magnetische Induktion erhalten bleibt, wenn die magnetisierende Wirkung der Spule Null geworden ist. Die Koerzitivkraft gibt die Feldstärke an, die notwendig ist, um den Restmagnetismus zu beseitigen. Im Diagramm wird sie durch die Strecke K dargestellt. Remanenz und Koerzitivkraft kennzeichnen den magnetischen Werkstoff. Magnetisch hartes Material wie Stahl weist eine grosse Remanenz und eine grosse Koerzitivkraft auf, magnetisch weiches Eisen besitzt nur eine geringe Remanenz und eine kleine Koerzitivkraft.

h. Das ohmsche Gesetz für Magnetismus

Analog dem ohmschen Gesetz für elektrische Stromkreise lässt sich das ohmsche Gesetz für magnetische Kreise aufstellen. Wir kennen bereits die magnetische Spannung und den magnetischen Fluss. Letzterer ist dem Strom im Stromkreis gleichzusetzen. Es fehlt uns noch der *magnetische Widerstand*. Dieser magnetische Widerstand setzt sich aus analogen Komponenten zusammen wie der Widerstand eines elektrischen Leiters. Als Leiter verwendet man für den magnetischen Fluss entweder Luft oder einen magnetischen Werkstoff, in den meisten Fällen eine Eisensorte. Die Bestimmungsgleichung für den magnetischen Widerstand lautet:

$$R_m = \frac{l}{\mu_o \cdot \mu_r \cdot A}$$

l = Länge des Leiters
 A = Querschnitt des Leiters

Die Masseinheit für R_m im Giorgi-System ist $\frac{A}{Vs}$

Im absoluten Masssystem wird die Bestimmungsgleichung einfacher, da dort die Induktionskonstante wegfällt:

$$R_m = \frac{l}{\mu_r \cdot A}$$

Die Masseinheit im absoluten System wird dadurch $\frac{1}{cm}$

Der Aufbau der Gleichungen ist streng logisch: Je länger der Leiter, desto grösser sein Widerstand, je grösser der Querschnitt, desto kleiner der Widerstand.

Die Permeabilität spielt in beiden Gleichungen die Rolle des spezifischen Leitwertes; Permeabilität kann auch als «Durchlässigkeit» aufgefasst werden, je durchlässiger das Leitmaterial, desto geringer der Widerstand.

Im folgenden Beispiel wollen wir einen magnetischen Kreis nach beiden Masssystemen durchrechnen. Bild 37 zeigt den Kreis. Er besteht aus einer Erregerspule und einem Kern, welcher durch einen Luftspalt unterbrochen ist. Aus den Magnetisierungskennlinien lesen wir die relative Permeabilität für das Kernmaterial ab. Gesucht ist die notwendige Stromstärke für eine bestimmte Feldstärke im Luftspalt. Für die Berechnung unterteilen wir den Kreis in zwei Teile. Wir berechnen die notwendige magnetische Spannung für den Fluss im Kern und diejenige für den Fluss im Luftspalt. Die Summe der beiden Spannungen ergibt die Gesamtspannung, aus welcher sich der notwendige Strom errechnen lässt.

Vorgehen:

1. Schritt: Aufstellen des ohmschen Gesetzes für magnetische Kreise

$$U_m = \Phi \cdot R_m$$

2. Schritt: Berechnung der magnetischen Spannung für den Fluss im Luftspalt.

– Grundformel anschreiben

$$U_{mL} = \Phi \frac{l}{\mu_o \cdot A}$$

– Grundformel für Φ anschreiben

$$\Phi = B \cdot A$$

– Grundformel für Φ einsetzen

$$U_{mL} = \frac{B \cdot l}{\mu_o}$$

– Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$U_{mL} = \frac{9 \cdot 10^{-5} \cdot 0,18}{1,256 \cdot 10^{-8}} \frac{\text{Vs} \cdot \text{cm} \cdot \text{A} \cdot \text{cm}}{\text{cm}^2 \text{Vs}}$$

$$U_{mL} = 1290 \text{ A}$$

– Gleiche Rechnung mit den Masseinheiten des absoluten Masssystems

$$U_{mL} = B \cdot l$$

$$U_{mL} = 9 \cdot 10^3 \cdot 0,18 \text{ Gs} \cdot \text{cm} (= \text{Gilbert})$$

$$U_{mL} = 1620 \text{ Gb}$$

3. Schritt: Berechnung der magnetischen Spannung für den Fluss im Eisen.

– Die Endformeln können übernommen werden, der magnetische Widerstand ist lediglich mit dem Reziprokwert der relativen Permeabilität zu multiplizieren, da das Eisen um den Faktor der relativen Permeabilität «durchlässiger» ist als die Luft.

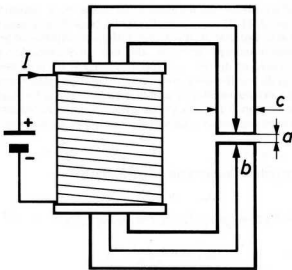
– Ergänzte Endformel anschreiben:

$$U_{mE} = \frac{B \cdot l}{\mu_o \mu_r}$$

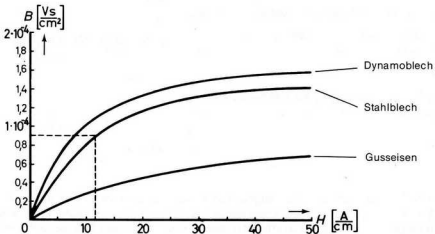
– Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$U_{mE} = \frac{9 \cdot 10^{-5} \cdot 16}{1,256 \cdot 10^{-8} \cdot 650} \frac{\text{Vs} \cdot \text{cm} \cdot \text{A} \cdot \text{cm}}{\text{cm}^2 \text{Vs}}$$

$$U_{mE} = 177 \text{ A}$$



$a = 1,8 \text{ mm}$
 $b = 16 \text{ cm}$
 $c^2 = 8 \text{ cm}^2$
 $N = 10\,000$
 $B = 9 \cdot 10^{-5}$
 $= 9000 \text{ Gs}$
 $I = ?$



$$\mu_r = \frac{B}{H \cdot \mu_0} = \frac{0,9 \cdot 10^{-4}}{11 \cdot 1,256 \cdot 10^{-8}} \quad \frac{\text{Vs} \cdot \text{Acm} \cdot \text{cm}}{\text{cm}^2 \cdot \text{Vs} \cdot \text{A}} \quad \mu_r = 650$$

Bild 37

- Gleiche Rechnung mit den Mass-einheiten des absoluten Masssystems

$$U_{mE} = \frac{B \cdot I}{\mu_r}$$

$$U_{mE} = \frac{9 \cdot 10^3 \cdot 16}{650} \text{Gs} \cdot \text{cm} (= \text{Gb})$$

$$U_{mE} = \mathbf{221 \text{ Gb}}$$

4. Schritt: Berechnung der totalen magnetischen Spannung

- Grundformel anschreiben
- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen
- Gleiche Rechnung mit den Einheiten des absoluten Masssystems

$$\Theta = U_{mL} + U_{mE}$$

$$\Theta = 1290 + 177$$

$$\Theta = 1467 \text{ A}$$

$$\Theta = 1620 + 221$$

$$\Theta = 1841 \text{ Gb}$$

5. Schritt: Berechnung des notwendigen Stromes

- Grundformel anschreiben
- Grundformel nach I umstellen
- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen
- Gleiche Rechnung mit den Einheiten des absoluten Masssystems

$$\Theta = I \cdot N$$

$$I = \frac{\Theta}{N}$$

$$I = \frac{1467}{10\,000}$$

$$I = \mathbf{0,147 \text{ A}}$$

$$\Theta = I \cdot N \cdot \frac{4\pi}{10}$$

$$I = \frac{\Theta \cdot 10}{N \cdot 4 \cdot \pi}$$

$$I = \frac{1841 \cdot 10}{10\,000 \cdot 4 \cdot 3,14}$$

$$I = \mathbf{0,147 \text{ A}}$$

Beide Rechnungen müssen im Endresultat gleich sein. Das Giorgi-System hat den grossen Vorteil, dass es mit den vier Grundeinheiten auskommt. Der Nachteil des absoluten Masssystems liegt auf der Hand, wir müssen mit Einheiten arbeiten, die uns zusätzlich belasten, da für jede Einheit die entsprechende Definition bekannt sein muss. Der Ungeübte mag den Eindruck haben, der magnetische Kreis sei schwierig zu verstehen und noch schwerer zu rechnen. Diese Unsicherheit hat ihre Ursache in der Vielzahl der Einheiten. Die konsequente Anwendung der Einheiten des Giorgi-Systems hilft uns die Übersicht zu gewinnen. Arbeiten Sie nur mit diesen Einheiten, werfen Sie früher Gelerntes über die Masseinheiten des absoluten Systems über Bord, und Sie werden sehen, wie rasch Sie sich in den magnetischen Kreisen zu Hause fühlen.

Tabelle 7 enthält die Grössen der magnetischen Kreise in beiden Masssystemen.

Grösse	Formel- zeichen	Masseinheiten			Zusammenhang mit anderen Grössen
		Im absoluten Masssystem	Im Giorgi- Masssystem	Umrech- nungs- faktor	
Feld- stärke	H	Oersted (Oe)	A/m, A/cm	1 Oe = $\frac{10}{4\pi}$ A/cm	
Spannung, Durch- flutung	U_m Θ	Gilbert (Gb) Ampère- windung (AW)	A A	1 Gb = $\frac{10}{4\pi}$ A	$U_m = H \cdot l$ (l = Länge der Kraftlinien) $\Theta = I \cdot N$ (N = Windungszahl)
Fluss	Φ	Maxwell (Mx)	Vs, Weber	1 Mx = 10^{-8} Vs = 10^{-8} Wb	
Induktion	B	Gauss (Gs)	Vs/m ² , Vs/cm ² , Wb/m ²	1 Gs = 10^{-4} Vs/m ² 1 Gs = $10^{-8} \frac{\text{Vs}}{\text{cm}^2}$ 1 Gs = 10^{-4} Wb/m ² = 10^{-8} Vs/cm ²	$B = \frac{\Phi}{A}$
Induktions- konstante	μ_0		$\frac{\text{Vs}}{\text{Am}}$; $\frac{\text{Vs}}{\text{Acm}}$		$\mu_0 = 0,4\pi \cdot 10^{-8} \text{ Vs/Acm}$ $= 1,256 \cdot 10^{-8} \text{ Vs/Acm}$ $= \text{H/cm}$
Relative Permea- bilität	μ_r	dimen- sions- los	dimen- sions- los		
Absolute Permea- bilität	μ		$\frac{\text{Vs}}{\text{Am}}$; $\frac{\text{Vs}}{\text{Acm}}$		$\mu = \frac{B}{H}$, $\mu = \mu_0 \cdot \mu_r$
Magneti- scher Wider- stand	R_m	$\frac{1}{\text{cm}}$	A/Vs H^{-1}		$R_m = \frac{U_m}{\Phi}$ $R_m = \frac{l}{\mu_r \cdot A}$ absolutes System $R_m = \frac{l}{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot A}$ Giorgi- System l = Länge der Kraftlinie A = Querschnitts- fläche

Tabelle 7

4. Das Wesentliche

Um einen stromdurchflossenen Leiter entsteht ein Magnetfeld in Form von konzentrischen Kreisen. Die magnetische Feldstärke an irgendeinem Punkt um diesen Leiter ist ausschliesslich durch den Strom im Leiter und den Abstand von diesem bestimmt.

Wird ein Leiter in einem Magnetfeld bewegt oder bewegt sich das Magnetfeld zum Leiter, so wird in diesem Leiter eine elektrische Spannung induziert. Die induzierte Spannung ist proportional zur magnetischen Feldstärke, zur Leiterlänge und zur Geschwindigkeit, mit der sich Leiter oder Feld bewegen.

Die Dichte des magnetischen Feldes bezeichnet man mit Induktion. Für die Luftspule sind Induktion und Feldstärke gleichbedeutend.

In der stromdurchflossenen zylinderförmigen Luftspule entsteht ein Magnetfeld, das dem Magnetfeld des Stabmagneten ähnlich sieht. Die Feldstärke im Innern der Luftspule ist homogen, sie ist proportional zur Windungszahl und zum Strom in der Spule.

Das Produkt von Windungszahl und Stromstärke bezeichnet man als Durchflutung oder magnetische Spannung.

Wie beim Permanentmagneten bezeichnen wir die Summe aller Kraftlinien als magnetischen Fluss. In homogenen Magnetfeldern entspricht der Fluss dem Produkt aus Feldstärke und Fläche.

Bringt man in eine Spule einen Eisenkern, so erhöht sich die Feldliniendichte. Das Eisen hat die Eigenschaft die Kraftlinien zu konzentrieren. Diese Eigenschaft heisst Permeabilität. Der Faktor der Feldzunahme wird mit relativer Permeabilität bezeichnet.

Das Giorgi-System kennzeichnet alle magnetischen Grössen mit den vier Einheiten m, s, kg und A. Im Giorgi-System fällt der Induktionskonstante die Rolle eines Umrechnungsfaktors zu. Die Einheit dieser Induktionskonstante ist so gewählt, dass sich bei allen Berechnungen in den Resultaten wieder die Grundeinheiten einstellen.

Um die magnetischen Eigenschaften eines Werkstoffes zu studieren, wird von diesem Stoff die Hysteresisschleife aufgenommen. Diese Kurve gibt Auskunft über Remanenz und Koerzitivkraft, beides Werte, die das Verhalten des Werkstoffes im magnetischen Wechselfeld kennzeichnen.

Mit Hilfe des ohmschen Gesetzes für Magnetismus lässt sich jeder elektromagnetische Kreis bestimmen. Die magnetische Spannung oder Durchflutung hat dabei die gleiche Bedeutung wie die elektrische Spannung im elektrischen Stromkreis. Der magnetische Fluss entspricht dem elektrischen Strom, während der magnetische Widerstand mit dem ohmschen Widerstand vergleichbar ist.

5. Repetitionsaufgaben (Lösung Seite 428)

- a) Beschreiben Sie die Form des magnetischen Feldes, welches um einen gestreckten stromdurchflossenen Leiter entsteht.

- b) Welche Grössen bestimmen dieses Magnetfeld?
- c) Wie kann die Richtung dieses Feldes bestimmt werden?
- d) Welches ist die Einheit für die Feldstärke im Giorgi-System?
- e) Was verstehen Sie unter dem Ausdruck «Magnetische Induktion»?
- f) Welches ist die Masseinheit im Giorgi-System für die magnetische Induktion?
- g) Mit welcher Grösse im elektrischen Stromkreis lässt sich die Durchflutung vergleichen?
- h) Welches ist die Masseinheit für die Durchflutung im Giorgi-System?
- i) Ist die relative Permeabilität eines magnetischen Werkstoffes eine konstante Grösse?
- k) Welches ist die Aufgabe der Induktionskonstante?
- l) In welchem Masssystem verwendet man die absolute Permeabilität und welches ist ihre Bedeutung?
- m) Nennen Sie die beiden charakteristischen Grössen, welche aus der Hysteresisschleife herausgelesen werden können.
- n) Was hat es zu bedeuten, wenn diese beiden Grössen gross sind?
- o) Bei welcher Eisensorte sind die beiden Grössen klein? erklären Sie warum.
- p) Lösen Sie die folgende Aufgabe unter Zuhilfenahme der Tabelle 7

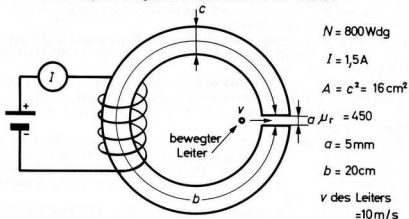


Bild 38

Durch den Luftspalt des gezeichneten Elektromagneten wird ein Leiter mit gleichbleibender Geschwindigkeit bewegt. Geben Sie an, wie gross die im Leiter induzierte Spannung ist, während sich dieser durch das Feld des Elektromagneten bewegt. Die angegebene relative Permeabilität wurde mit Hilfe eines Diagrammes für die Induktion bei dem aufgeführten Strom ermittelt.

D. Die trigonometrischen Grundlagen

I. Die Winkelfunktionen

1. Einführung

Zur Berechnung von Wechselstromkreisen mit Wirk- und Blindwiderständen sind trigonometrische Funktionen unerlässlich. Wir wollen uns im folgenden Abschnitt das notwendige Rüstzeug erarbeiten. Die Trigonometrie umfasst die Berechnung von ebenen Dreiecken aller Art. Aus diesem vielseitigen Gebiet wollen wir uns nur die Materie herausholen, die für uns wichtig ist, und die uns die Möglichkeit gibt, Wechselstromkreise rechnerisch zu erfassen.

Amplitude, Phase und Frequenz sind die wichtigsten Kenngrößen von Wechselspannungen und Wechselströmen. Die Phasenlage einer Wechselstromgröße wird im Winkel- oder Bogenmass angegeben. Die zu jeder Phasenlage gehörende Amplitude entspricht einer Winkelfunktion. Die erwähnten Beispiele liessen sich beliebig erweitern, wir wollen jedoch davon absehen, da den meisten die Begriffe der Wechselstromtechnik noch fremd sein dürften. Aus unserer Aufzählung entnehmen wir jedoch die Tatsache, dass die Lehre von den Winkelfunktionen dasjenige Teilgebiet der Trigonometrie ist, mit welchem wir uns näher zu befassen haben.

2. Was wissen Sie schon über die Winkelfunktionen?

(Lösung Seite 430)

- a) Nennen Sie zwei der vier gebräuchlichsten Winkelfunktionen.
- b) Nennen Sie ein Winkel- und Bogenmass.
- c) Was verstehen Sie unter dem Ausdruck «Einheitskreis»?
- d) Kennen Sie ein Beispiel aus der Elektrotechnik, wo eine Winkelfunktion eine Rolle spielt?
- e) Was muss an einem rechtwinkligen Dreieck bekannt sein, damit eine Winkelfunktion bestimmt werden kann?
- f) Ist es möglich, die Winkelfunktionen für einen Winkel zu bestimmen, der grösser ist als 90° ?

3. Die Winkelfunktionen

a. Der Einheitskreis

Der Einheitskreis ist ein Kreis mit dem Radius Eins. Es kann sich dabei um irgend eine Masseinheit handeln, der Radius kann ein Zentimeter, ein Kilometer oder ein Millimeter lang sein, das spielt keine Rolle, die einzige Bedin-

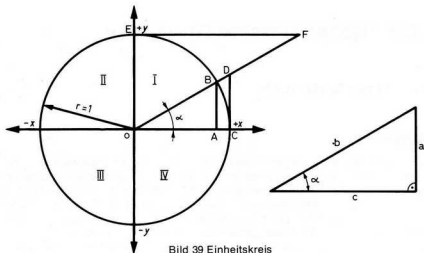


Bild 39 Einheitskreis

gung ist die, dass alle Seiten des rechtwinkligen Dreieckes, welches in diesen Einheitskreis hineingezeichnet wird, mit derselben Masseinheit gemessen werden wie der Radius des Kreises. Bild 39 zeigt uns die Verhältnisse im Einheitskreis.

Durch den Kreismittelpunkt ziehen wir eine horizontale Achse und benennen diese als X-Achse, senkrecht zu dieser X-Achse steht die Y-Achse; die beiden Achsen schneiden sich im Mittelpunkt des Kreises. Im Schnittpunkt liegt für beide Achsen der Nullpunkt. Vom Nullpunkt aus werden die positiven Werte der Achsen nach rechts und nach oben aufgetragen, während die negativen Werte nach links und nach unten aufgetragen sind. Die beiden Achsen bilden ein rechtwinkliges Koordinatensystem. Der Einheitskreis schneidet die Achsen beim Wert Eins. In einem Koordinatensystem unterscheidet man vier Quadranten. Der erste Quadrant wird von der positiven X-Achse und von der positiven Y-Achse begrenzt. Die Zählrichtung für die restlichen Quadranten läuft gegen den Uhrzeigersinn.

b. Die Winkelfunktionen im Einheitskreis

Winkelfunktionen sind bestimmte Seitenverhältnisse im rechtwinkligen Dreieck. Im Einheitskreis nach Bild 39 wird der Wert der *Sinusfunktion* durch die Strecke $\overline{AB}$ dargestellt. Im rechtwinkligen Dreieck nach Bild 39 ergibt das Verhältnis der Dreieckseite a zur Dreieckseite b den Wert der Sinusfunktion für den Winkel α . Die Seite b aus Bild 39 entspricht dem Radius des Einheitskreises. Dies ist der Grund, warum im Einheitskreis die Strecke $\overline{AB}$ mit dem Wert der Sinusfunktion für den Winkel α identisch ist, da der Radius den Wert Eins aufweist. Der *Kosinus* des Winkels α wird im Einheitskreis durch die Strecke $\overline{OA}$ dargestellt. Im rechtwinkligen Dreieck ausserhalb des Einheits-

kreises bestimmt das Verhältnis der Seite c zur Seite b seinen Wert. Der Wert der *Tangensfunktion* wird im Einheitskreis durch die Strecke $\overline{CD}$ dargestellt. Im rechtwinkligen Dreieck ergibt das Verhältnis der Seite a zur Seite c denselben Wert. Die *Kotangensfunktion* wird im Einheitskreis durch die Strecke $\overline{EF}$ bestimmt, während im rechtwinkligen Dreieck das Verhältnis der Seite c zur Seite a deren Wert ergibt. In der Tabelle 8 sehen wir eine Zusammenstellung dieser vier Winkelfunktionen.

Funktion des Winkels α	Bestimmungsstrecke im Einheitskreis	Verhältnis im rechtwinkligen Dreieck
$\sin \alpha$	$\overline{AB}$	$\frac{a}{b}$
$\cos \alpha$	$\overline{OA}$	$\frac{c}{b}$
$\operatorname{tg} \alpha$	$\overline{CD}$	$\frac{a}{c}$
$\operatorname{ctg} \alpha$	$\overline{EF}$	$\frac{c}{a}$

An Stelle von tg und ctg kann auch tan und cot verwendet werden.

Tabelle 8

Aus dem Einheitskreis ersehen wir noch ein Gesetz, das uns später bei der Bestimmung der Winkelfunktionen aus Tabellen oder am Rechenschieber nützlich sein wird:

$$\begin{aligned}\sin \alpha &= \cos (90^\circ - \alpha) \\ \cos \alpha &= \sin (90^\circ - \alpha) \\ \operatorname{tg} \alpha &= \operatorname{ctg} (90^\circ - \alpha) = \frac{1}{\operatorname{ctg} \alpha} \\ \operatorname{ctg} \alpha &= \operatorname{tg} (90^\circ - \alpha) = \frac{1}{\operatorname{tg} \alpha}\end{aligned}$$

Die Werte der verschiedenen Winkelfunktionen ändern ihre Vorzeichen, je nachdem in welchem Quadranten wir uns befinden. Für die Sinus- und die Kosinusfunktion ist die Bestimmung der Vorzeichen einfach, da beide Funktionen entweder auf der X-Achse oder auf der Y-Achse liegen; die Vorzeichen entsprechen dann den Vorzeichen der entsprechenden Achse. Schwieriger gestaltet sich die Vorzeichenbestimmung bei der Tangens- und der Kotangensfunktion, wir müssen dabei die Vorzeichen der beiden Dreiecksseiten, die die Winkelfunktion bestimmen, berücksichtigen. Nachstehende Tabelle gibt einen Überblick über die Vorzeichen der Winkelfunktionen in den vier Quadranten:

Quadrant Funktion	I	II	III	IV
sin	+	+	-	-
cos	+	-	-	+
tg	+	-	+	-
ctg	+	-	+	-

c. Die Winkelmasse

Winkel werden im Gradmass oder im Bogenmass gemessen. Im gebräuchlichsten Gradmass hat der volle Winkel 360° .

Das Bogenmass, gemessen in Radianten (rad), bezieht sich auf den Einheitskreis. Man gibt die zum Radius Eins gehörige Bogenlänge des Winkels an. Der volle Winkel entspricht dem Umfang des Einheitskreises und umfasst 2π rad.

d. Graphische Darstellung der vier Winkelfunktionen

Die Werte der Winkelfunktionen bestimmt man mit Hilfe von Tabellen oder unter Benützung eines Rechenschiebers. Stehen beide Hilfsmittel nicht zur Verfügung, so lassen sich die Funktionswerte auch zeichnerisch ermitteln, indem man einen Einheitskreis mit möglichst grossem Radius zeichnet und in diesem Kreis den gewünschten Winkel einzeichnet, der gesuchte Wert der Winkelfunktion kann dann durch Messen der Länge der entsprechenden Bestimmungsstrecke ermittelt werden; dabei muss natürlich der gewählte Massstab für den Radius berücksichtigt werden.

Bild 40 zeigt die graphische Darstellung der Sinus- und Kosinusfunktion, während Bild 41 die Tangens- und Kotangensfunktion darstellt.

Wir erkennen, dass sich die Sinus- und die Kosinusfunktion lediglich in der Phasenlage unterscheiden, in der Form sind beide Kurven gleich. Der Phasenunterschied beträgt 90° im Gradmass gemessen oder $\pi/2$ im Bogenmass.

Die Tangens- und die Kotangensfunktion sind in der Form ebenfalls gleich, sie verlaufen jedoch spiegelbildlich zueinander. Die Tangensfunktion steigt

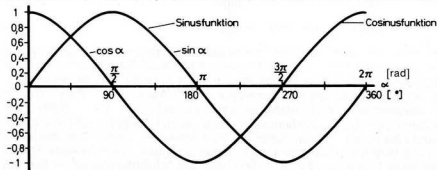


Bild 40

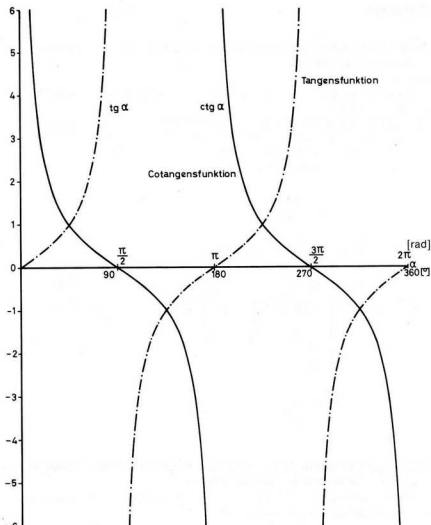


Bild 41

vom Wert Null bis zum Wert plus Unendlich, macht dann einen Sprung und kommt vom Wert minus Unendlich wieder zur Nulllinie zurück. Die Kotangensfunktion verhält sich umgekehrt, sie kommt vom Wert plus Unendlich, geht durch Null, um nach minus Unendlich zu streben. Dort macht sie auch einen Sprung und kommt wieder vom Wert plus Unendlich gegen Null. Dieses Verhalten der beiden Funktionen ist leicht verständlich, stehen doch ihre Werte reziprok zueinander.

4. Beispiele

a. Bestimmung der Sinusfunktion für vier Winkel in den vier Quadranten mit Hilfe des Einheitskreises

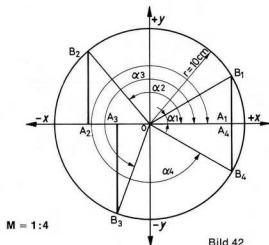
Vorgehen:

Wir zeichnen einen Einheitskreis mit dem Radius von 10 cm und zeichnen folgende Winkel ein: $\alpha_1 = 30^\circ$, $\alpha_2 = 130^\circ$, $\alpha_3 = 250^\circ$, $\alpha_4 = 330^\circ$

Nun konstruieren wir die Bestimmungsstrecken und messen deren Länge. Unter Berücksichtigung der Vorzeichen erhalten wir folgende Werte:

$\sin \alpha_1 = 0,5$, $\sin \alpha_2 = 0,766$, $\sin \alpha_3 = -0,940$, $\sin \alpha_4 = -0,5$

Bild 42 erläutert dieses Vorgehen.



$$\begin{aligned}\sin \alpha_1 &= \overline{A_1B_1} \\ \sin \alpha_2 &= \overline{A_2B_2} \\ \sin \alpha_3 &= \overline{A_3B_3} \\ \sin \alpha_4 &= \overline{A_4B_4}\end{aligned}$$

Bild 42

b. Bestimmung der Sinusfunktionen für vier Winkel in den vier Quadranten mit Hilfe der Tabelle oder des Rechenschiebers

Die vier Winkelfunktionen der Aufgabe a sollen mit Hilfe der Tabelle oder des Rechenschiebers bestimmt werden.

$\alpha_1 = 30^\circ$

Vorgehen:

Wir suchen in der Tabelle oder auf dem Rechenschieber den Wert für die Sinusfunktion:

$$\sin \alpha_1 = 0,5$$

Die Bestimmung der Winkelfunktionen für Winkel im ersten Quadranten ist einfach. Alle Funktionswerte für die Winkel zwischen 0° und 90° lassen sich direkt aus der Tabelle ablesen. Wenn wir versuchen, die Funktionswerte mit

dem Rechenschieber zu bestimmen, so stellen wir fest, dass wir die Sinusfunktion für Winkel, die kleiner als 6° und die Kosinusfunktion für Winkel, die grösser als 84° sind, nicht direkt ablesen können. Auch bei der Bestimmung der Werte der Tangens – und Kotangensfunktion treten Schwierigkeiten auf, indem nur für Winkel bis 45° die Tangensfunktion direkt ablesbar ist, während die Kotangenswerte ab 45° direkt abgelesen werden können. Wir werden in einem späteren Abschnitt lernen, wie man trotzdem alle Funktionswerte mit dem Rechenschieber auffinden kann.

$$\alpha_2 = 130^\circ$$

Vorgehen:

- Bestimmung des Quadranten: α_2 liegt im II. Quadranten
- Bestimmung des Vorzeichens: Das Vorzeichen ist positiv
- Bestimmung des Wertes: $\sin \alpha_2 = 0,766$

Um den Wert zu bestimmen, ist es notwendig, dass man zuerst den Winkel zwischen 0° und 90° sucht, der inbezug auf den Zahlenwert der Funktion dem Winkel von 130° entspricht. Wir führen den Winkel im II. Quadranten in den I. zurück, indem wir α_2 von 180° subtrahieren ($180^\circ - 130^\circ = 50^\circ$).

$$\alpha_3 = 250^\circ$$

Vorgehen:

- Bestimmung des Quadranten: α_3 liegt im III. Quadranten
- Bestimmung des Vorzeichens: Das Vorzeichen ist negativ
- Bestimmung des Wertes: $\sin \alpha_3 = -0,940$

Wir wiederholen die gleichen Überlegungen und suchen denjenigen Winkel zwischen 0° und 90° , der den gleichen Funktionswert aufweist wie der gesuchte Winkel. Anhand der Zeichnung im Einheitskreis sehen wir, dass wir für Winkel, die im dritten Quadranten liegen, anders vorgehen müssen, um den Funktionswert zu ermitteln. Wir ziehen vom gegebenen Winkelwert 180° ab und erhalten dann den Winkel mit dem gleichen Funktionswert im I. Quadranten ($250^\circ - 180^\circ = 70^\circ$). Der Wert des Winkels von 70° stimmt inbezug auf den Betrag mit dem Winkel von 250° überein, die Vorzeichen sind jedoch nicht gleich.

$$\alpha_4 = 330^\circ$$

Vorgehen:

- Bestimmung des Quadranten: α_4 liegt im IV. Quadranten
- Bestimmung des Vorzeichens: Das Vorzeichen ist negativ
- Bestimmung des Wertes: $\sin \alpha_4 = -0,5$

Der Einheitskreis lehrt uns, dass für Winkel im vierten Quadranten die Ergänzung auf 360° gesucht werden muss. Das heisst für unser Beispiel: $360^\circ - 330^\circ = 30^\circ$. Der Winkel von 30° weist einen Funktionswert auf, welcher in bezug auf den Betrag mit demjenigen von 330° übereinstimmt; jedoch mit negativem Vorzeichen.

c. Bestimmung verschiedener Winkelfunktionen in den vier Quadranten

$$\cos \text{ vom } \sphericalangle \alpha = 150^\circ$$

Vorgehen:

- Bestimmung des Quadranten: Der Winkel liegt im II. Quadranten
- Bestimmung des Vorzeichens: Das Vorzeichen ist negativ
- Bestimmung des Wertes: $\cos \alpha = -0,866$

Es gelten die gleichen Überlegungen wie für Aufgabe b.

$$\text{tg vom } \sphericalangle \alpha = 220^\circ$$

Vorgehen:

- Bestimmung des Quadranten: Der Winkel liegt im III. Quadranten
- Bestimmung des Vorzeichens: Das Vorzeichen ist positiv
- Bestimmung des Wertes: $\text{tg } \alpha = 0,839$

Für die Bestimmung des Wertes der Funktion gelten die gleichen Regeln wie für die Sinusfunktion.

In Bild 43 wird gezeigt, wie das Vorzeichen ermittelt wurde. Der Wert des $\text{tg } \alpha$ ist bestimmt durch das Verhältnis $\overline{AB}$ zu $\overline{OA}$. Beide Strecken weisen ein negatives Vorzeichen auf. Die Regeln der Algebra lehren uns, dass die Division eines negativen Wertes durch einen negativen Wert einen positiven Wert ergibt.

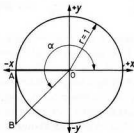


Bild 43

ctg vom $\sphericalangle \alpha = 310^\circ$

Vorgehen:

- Bestimmung des Quadranten: Der Winkel liegt im IV. Quadranten
- Bestimmung des Vorzeichens: Das Vorzeichen ist negativ
- Bestimmung des Wertes: $\text{ctg } \sphericalangle \alpha = -0,839$

Wert der Funktion und Vorzeichen werden nach den gleichen Regeln bestimmt wie bei der vorhergehenden Aufgabe.

tg vom $\sphericalangle \alpha = 130^\circ$

Vorgehen:

- Bestimmung des Quadranten: Der Winkel liegt im II. Quadranten
- Bestimmung des Vorzeichens: Das Vorzeichen ist negativ
- Bestimmung des Wertes: $\text{tg } \alpha = -1,192$

5. Das Wesentliche

In der Wechselstromtechnik arbeitet man mit den Winkelfunktionen, um Ströme und Spannungen mit verschiedenen Phasenlagen darzustellen, und um die entsprechenden Wechselstromkreise zu berechnen.

Den Winkelfunktionen liegt das rechtwinklige Dreieck zugrunde. Jede Winkelfunktion wird durch ein Verhältnis, das von zwei Dreieckseiten gebildet wird, ausgedrückt.

Im Einheitskreis können die Funktionswerte direkt ermittelt werden. Bild 44 zeigt das Verfahren der graphischen Ermittlung der Funktionswerte.

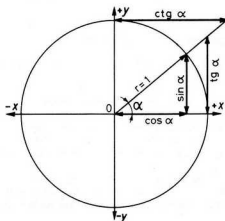


Bild 44

Die Vorzeichen der Funktionswerte ändern sich in den verschiedenen Quadranten. Um den Funktionswert zu ermitteln, projiziert man die eine der bei-

den Katheten des rechtwinkligen Dreiecks auf die X- bzw. Y-Achse des Koordinatensystems.

Bild 45 zeigt hierzu ein Beispiel.

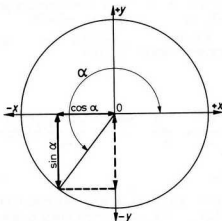


Bild 45

Winkel werden im Bogen- oder Gradmass gemessen. Im Gradmass hat der volle Winkel 360° , im Bogenmass entsprechen dem vollen Winkel 2π .

6. Repetitionsaufgaben (Lösung Seite 431)

- Bestimmen Sie zeichnerisch mit Hilfe des Einheitskreises die vier Winkelfunktionen für die folgenden Winkel:
 $\alpha_1 = 29^\circ$, $\alpha_2 = 127^\circ$, $\alpha_3 = 250^\circ$, $\alpha_4 = 310^\circ$, ($r = 8 \text{ cm}$)
- Überprüfen Sie die gefundenen Werte mit Hilfe der Tabelle oder eines Rechenschiebers.
- Bestimmen Sie zu den folgenden Winkeln das Bogenmass:
 $\alpha_1 = 0^\circ$, $\alpha_2 = 45^\circ$, $\alpha_3 = 90^\circ$, $\alpha_4 = 130^\circ$, $\alpha_5 = 210^\circ$, $\alpha_6 = 345^\circ$
- Bestimmen Sie zu den folgenden Winkelfunktionen die dazugehörigen Winkel im Gradmass:
 $\sin \alpha_1 = 0,643$, $\cos \alpha_2 = 0,574$, $\tan \alpha_3 = -0,577$, $\cot \alpha_4 = 2,145$
- Warum muss der Elektroniker die Winkelfunktionen beherrschen?
- Warum sind in den Tabellen die Funktionswerte nur für Winkel zwischen 0° und 90° aufgeführt?
- Eine elektrische Schaltung weist einen $\cos \varphi$ von 0,9 auf. Wie gross ist der entsprechende Phasenverschiebungswinkel?

II. Die Winkelfunktionen auf dem Rechenschieber

1. Einführung

Dieser Abschnitt wendet sich an solche, die mit dem Rechenschieber vertraut sind. Der vorliegende Stoff soll nicht einen Rechenschieberkurs ersetzen, wir werden uns ganz spezifisch nur mit den Winkelfunktionen auf dem Rechenschieber befassen. Wer keinen Rechenschieber besitzt und auch keinen Rechenschieber handhaben kann, der darf diese Kapitel überspringen. Es sei jedoch jedem geraten, sich einen Schieber oder eine Rechenscheibe zu beschaffen und sich in der Handhabung dieses Gerätes zu üben. Der Schieber hilft sehr viel Zeit und Mühe sparen. Der Elektroniker kommt kaum ohne dieses Hilfsmittel aus.

2. Was wissen Sie schon über die Winkelfunktionen auf dem Rechenschieber? (Lösung Seite 433)

- a) Bestimmen Sie den Sinus für einen Winkel von 25° .
- b) Bestimmen Sie den Kosinus für einen Winkel von 55° .
- c) Welchem Winkel entspricht der Wert der Tangensfunktion $\text{tg } \alpha = 0,6$?
- d) Bestimmen Sie den Kotangens von 30° .
- e) Wie gross ist der Sinus eines Winkels von 3° ?

3. Die Winkelfunktionen auf dem Rechenschieber

a. Die Sinusfunktion

Die Werte zwischen $5,5^\circ$ und 90° lassen sich auf den meisten Schiebern direkt ablesen. Die Sinusfunktion für Winkel, die kleiner als $5,5^\circ$ sind, lässt sich da-

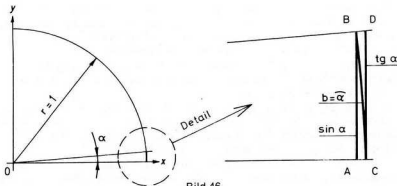


Bild 46

gegen auf den meisten Rechenschiebern nicht direkt ablesen. Eine einfache Methode erlaubt trotzdem die Bestimmung dieser Funktionswerte. Wir wollen das Verfahren mit Hilfe von Bild 46 entwickeln.

Wir betrachten die beiden Strecken $\overline{AB}$ und $\overline{CD}$ im vergrösserten Bildausschnitt und stellen fest, dass sich die Strecken in bezug auf ihre Längen nur ganz geringfügig unterscheiden. Je kleiner der Winkel gewählt wird, desto geringer wird der Längenunterschied. Dasselbe kann über die Länge des Bogens b gesagt werden. Wir dürfen für kleine Winkel folgende Vereinfachung vornehmen:

Für Winkel, die kleiner sind als 7° , sind die Werte der Sinusfunktion, der Tangensfunktion und des Bogens praktisch gleich gross.

Anhand einer Tabelle überprüfen wir diese Aussage, indem wir für einen Winkel α von 7° die genauen Werte einander gegenüberstellen:

$$\sin \alpha^\circ = 0,1219,$$

$$\operatorname{tg} \alpha^\circ = 0,1228$$

$$\widehat{\alpha} = 0,1221 \text{ rad}$$

Wir stellen fest, dass der grösste Fehler kleiner als ein Prozent ist.

Um nun die Sinus- und Tangensfunktionen für *kleine* Winkel zu errechnen, erlauben wir uns folgende Vereinfachung:

$$\operatorname{tg} \alpha \approx \sin \alpha \approx \widehat{\alpha} \text{ (wenn } \alpha \text{ kleiner als } 7^\circ \text{)}$$

Die Berechnung der Bogenlänge, das entspricht im Einheitskreis dem Bogenmass, ergibt als Resultat direkt den Funktionswert für den Sinus oder den Tangens. Diese Überlegung führt zu folgender Berechnungsformel:

$$\text{für } \alpha < 7^\circ \text{ wird } \operatorname{arc} \alpha = \widehat{\alpha} = b = \frac{2\pi}{360^\circ} \cdot \alpha^\circ = \frac{\pi}{180^\circ} \cdot \alpha^\circ \approx \sin \alpha \approx \operatorname{tg} \alpha$$

b. Die Kosinusfunktion

Die Werte zwischen 0° und $84,5^\circ$ lassen sich auf den meisten Schiebern direkt ablesen. Funktionswerte für Winkel, die grösser sind als $84,5^\circ$ lassen sich dagegen meistens nicht direkt ablesen. Bild 47 zeigt uns eine Methode, wie wir die Kosinusfunktionen grosser Winkel berechnen können. Das Grundprinzip unterscheidet sich nicht von demjenigen für die Bestimmung der Sinusfunktionen kleiner Winkel. Wir stellen die gleichen Überlegungen an und nehmen dieselben Vereinfachungen vor.

Die Strecke $\overline{OA}$ im Einheitskreis entspricht dem Wert der Kosinusfunktion. Die Strecke $\overline{GH}$ in der Vergrösserung ist annähernd gleich lang wie $\overline{OA}$, sie stellt deshalb ebenfalls den Wert der Kosinusfunktion dar. $\overline{EF}$ entspricht dem Kotangens. Für grosse Winkel darf vereinfacht werden:

$$\overline{GH} = \overline{EF} \approx 90^\circ - \alpha \approx \cos \alpha \approx \operatorname{ctg} \alpha \text{ (für Winkel zwischen } 83^\circ \text{ und } 90^\circ \text{)}$$

Um die Kosinus- oder Kotangensfunktion für Winkel zwischen 83° und 90° zu

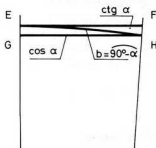
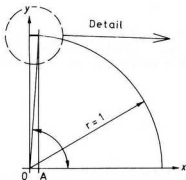


Bild 47

berechnen, haben wir lediglich nach dem bekannten Verfahren das Bogenmass im Einheitskreis für den Winkel α zu bestimmen.

$$\cos \alpha = \frac{2\pi}{360^\circ} \cdot (90^\circ - \alpha^\circ)$$

$$\text{ctg } \alpha = \frac{2\pi}{360^\circ} \cdot (90^\circ - \alpha^\circ)$$

Bessere Rechenschieber haben eine Skala für das Bogenmass für Winkel zwischen $0,55^\circ$ und 6° . Als Einheit wird meistens $\frac{1}{4}$ arc angegeben. Mit dieser Skala lassen sich Sinus- und Tangensfunktionen für kleinere Winkel als 6° und Kosinus- und Kotangensfunktionen für Winkel grösser als 84° direkt ermitteln, da für diese Winkel der Bogen ($\text{arc} = \text{Arcus} = \text{Bogen}$) im Einheitskreis gleich dem Wert der Winkelfunktion ist.

c. Die Tangensfunktion

Die Tangensfunktion wird meistens für Winkel zwischen $5,5^\circ$ und 45° auf einer Skala angegeben.

Spezielle Schieber verfügen auch noch über eine Tangensskala für Winkel von 45° bis $84,5^\circ$; wir werden jedoch bald erkennen, dass diese Skalen überflüssig sind. Wie man den Tangens für kleinere Winkel als $5,5^\circ$ bestimmt, haben wir bereits besprochen. Wie wird nun aber der Tangens für Winkel von mehr als 45° gefunden? Wir wissen, dass die Tangensfunktion den Kehrwert der Kotangensfunktion darstellt; da der Schieber eine zweite Skala für die Kontangensfunktion der Winkel zwischen 45° und $84,5^\circ$ aufweist, fällt es uns nicht schwer, die Tangensfunktion für grössere Winkel als 45° aufzufinden. Wir suchen den Wert der entsprechenden Kotangensfunktion und bestimmen dazu den Reziprokwert. Da die meisten Systeme eine Skala für den Reziprokwert aufweisen, lässt sich der gesuchte Wert der Tangensfunktion direkt ablesen.

$$\text{tg } \alpha = \frac{1}{\text{ctg } \alpha}$$

d. Die Kotangensfunktion

Die Kotangensfunktion für Winkel zwischen $5,5^\circ$ und 45° wird ebenfalls nach der vorhin gezeigten Methode eruiert. Wir suchen den Wert der Tangensfunktion für den betreffenden Winkel und erhalten durch Bildung des Reziprok-wertes die Kotangensfunktion.

$$\operatorname{ctg} \alpha = \frac{1}{\operatorname{tg} \alpha}$$

e. Die $\sqrt{1-x^2}$ -Skala

Die meisten Systeme weisen eine Skala mit der Bezeichnung $\sqrt{1-x^2}$ auf. Unter Zuhilfenahme des Einheitskreises wollen wir die Möglichkeiten dieser Skala untersuchen. Bild 48 zeigt die Verhältnisse im Einheitskreis.

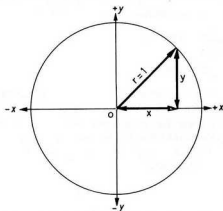


Bild 48

Wir können nach Pythagoras schreiben:

$$1 = \sqrt{x^2 + y^2}; \quad y^2 = 1 - x^2; \quad y = \sqrt{1 - x^2} \text{ und} \\ x^2 = 1 - y^2; \quad x = \sqrt{1 - y^2}$$

Diese sehr nützliche Skala gestattet es uns also zu jeder Sinusfunktion gleichzeitig die Kosinusfunktion des gleichen Winkels abzulesen und umgekehrt. Wir brauchen nur an Stelle der Werte x und y ; $\cos$ und $\sin$ zu setzen, um sofort zu sehen, dass beide Funktionen austauschbar sind.

$$\sin \alpha = \sqrt{1 - \cos^2 \alpha} \\ \cos \alpha = \sqrt{1 - \sin^2 \alpha}$$

Von dieser Tatsache machen wir Gebrauch, wenn wir die Werte für Sinus-funktionen für grosse Winkel oder die Kosinusfunktionen für kleine Winkel mit ausreichender Genauigkeit bestimmen wollen. Auf dem Schieber sind

diese Skalen gegen das rechte Schieberende hin zusammengedrängt, wodurch die Ablesegenauigkeit leidet. Unter Anwendung der $\sqrt{1-x^2}$ -Skala gelangt man jedoch für die Ablesung auf die linke Seite des Schiebers, wo die Genauigkeit besser ist.

4. Beispiele

a) Gesucht: $\sin$ vom $\sphericalangle \alpha = 40^\circ$

Vorgehen:

Auf der Sinusskala wird der Läufer auf 40° gestellt, auf der X-Skala können Sie den Funktionswert direkt ablesen.

$$\sin \alpha = 0,643$$

b) Gesucht $\sin$ vom $\sphericalangle \alpha = 3^\circ$

Vorgehen:

– Formel für kleine Winkel anschreiben:

$$\sin \alpha \approx \frac{2\pi}{360^\circ} \cdot \alpha^\circ$$

Werte einsetzen:

$$\sin \alpha \approx \frac{6,28}{360^\circ} \cdot 3^\circ$$

$$\sin \alpha \approx 0,0524$$

Vorgehen für Schieber mit arc-Skala:

Auf der $\sphericalangle$ arc-Skala Läufer auf 3° stellen, auf der X-Skala ist der Funktionswert direkt ablesbar.

c) Gesucht: $\sin$ vom $\sphericalangle \alpha = 82^\circ$

Vorgehen:

Läufer auf der Sinusskala auf 82° stellen, Wert auf der X-Skala direkt ablesen:

$$\sin \alpha = 0,99$$

Vorgehen für Schieber mit der $\sqrt{1-x^2}$ -Skala:

Läufer auf der Kosinusskala auf 82° stellen, Funktionswert auf der $\sqrt{1-x^2}$ -Skala ablesen.

$$\sin \alpha = 0,9903$$

Dieses Verfahren ergibt ein sehr genaues Resultat.

d) Gesucht: $\cos$ vom $\sphericalangle \alpha = 75^\circ$

Vorgehen:

Läufer auf der Kosinusskala auf 75° stellen, Resultat auf der X-Skala ablesen.

$$\cos \alpha = 0,259$$

e) Gesucht: $\cos$ vom $\sphericalangle \alpha = 86^\circ$

Vorgehen:

- Formel für grosse Winkel anschreiben $\cos \alpha \approx \frac{2\pi}{360^\circ} \cdot (90^\circ - \alpha)$
 - Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen $\cos \alpha \approx \frac{6,28}{360^\circ} \cdot 4^\circ$
- $$\cos \alpha \approx 0,07$$

Vorgehen für Schieber mit $\sphericalangle$ arc-Skala:

- Winkel bestimmen $\cos \alpha = \sin (90^\circ - \alpha)$
 $\cos 86^\circ = \sin 4^\circ$
 - Auf der arc-Skala Läufer auf 4° stellen und auf X-Skala Funktionswert direkt ablesen.
- $$\cos \alpha = 0,07$$

f) Gesucht: $\cos$ vom $\sphericalangle \alpha = 12^\circ$

Vorgehen:

- Läufer auf der Kosinusskala auf 12° stellen, Funktionswert auf der X-Skala ablesen.
- $$\cos \alpha = 0,978$$

Vorgehen für Schieber mit der $\sqrt{1-x^2}$ -Skala:

- Läufer auf der Sinusskala auf 12° stellen, Ergebnis auf der $\sqrt{1-x^2}$ -Skala ablesen.
- $$\cos \alpha = 0,9781$$

Dank der $\sqrt{1-x^2}$ -Skala wird das Resultat sehr genau.

g) Gesucht: tg vom $\sphericalangle \alpha = 35^\circ$

Vorgehen:

- Läufer auf der Tangensskala auf 35° stellen, Funktionswert auf der X-Skala ablesen.
- $$\operatorname{tg} \alpha = 0,7$$

h) Gesucht: tg vom $\sphericalangle \alpha = 2^\circ$

Vorgehen:

- Gleiches Vorgehen wie bei Aufgabe b), da für so kleine Winkel $\operatorname{tg} \alpha \approx \sin \alpha \approx b$.
- $$\operatorname{tg} \alpha \approx 0,0349$$

i) Gesucht: tg vom $\sphericalangle \alpha = 68^\circ$

Vorgehen:

- Läufer auf Kotangensskala auf 68° oder Tangensskala auf 22° stellen, Funktionswert auf der $1/x$ -Skala ablesen.

$$\operatorname{tg} \alpha = 2,475$$

k) Gesucht: $\operatorname{tg} \alpha$ vom $\sphericalangle \alpha = 88^\circ$

Vorgehen:

Bestimmen von $\cot 88^\circ$ nach der Methode von Aufgabe e, da für so grosse Winkel $\cos \alpha \approx \operatorname{ctg} \alpha$

$$\operatorname{ctg} \alpha \approx 0,0349$$

Funktionswert für $\operatorname{tg} \alpha$ auf 1/x-Skala ablesen.

$$\operatorname{tg} \alpha \approx 28,6$$

l) Gesucht: $\operatorname{ctg} \alpha$ vom $\sphericalangle \alpha = 70^\circ$

Vorgehen:

Läufer auf der Kotangensskala auf 70° oder Tangensskala auf 20° stellen, Resultat auf der X-Skala ablesen.

$$\operatorname{ctg} \alpha = 0,364$$

m) Gesucht: $\operatorname{ctg} \alpha$ vom $\sphericalangle \alpha = 87^\circ$

Vorgehen:

Gleiches Vorgehen wie für Aufgabe e), da bei so grossen Winkeln $\cos \alpha \approx \operatorname{ctg} \alpha$

$$\operatorname{ctg} \alpha = 0,0524$$

n) Gesucht: $\operatorname{ctg} \alpha$ vom $\sphericalangle \alpha = 28^\circ$

Vorgehen:

Läufer auf der Tangensskala auf 28° stellen, Funktionswert auf der 1/x-Skala ablesen.

$$\operatorname{ctg} \alpha = 1,88$$

o) Gesucht: $\operatorname{ctg} \alpha$ vom $\sphericalangle \alpha = 1,5^\circ$

Vorgehen:

Bestimmen von $\operatorname{tg} \alpha$ gemäss Aufgabe h)

$$\operatorname{tg} \alpha \approx 0,0262$$

Funktionswert für $\operatorname{tg} \alpha$ auf 1/x-Skala ablesen.

$$\operatorname{ctg} \alpha \approx 38,19$$

5. Das Wesentliche

Die Handhabung eines Rechenschiebers zur Bestimmung der Winkelfunktionen für alle Winkel setzt die absolute Beherrschung der Verhältnisse im Einheitskreis voraus.

Sinus- und Kosinusfunktionen lassen sich mit Ausnahme der kleineren Winkel für die Sinusfunktion und der Winkel nahe bei 90° für die Kosinusfunktion direkt ablesen.

Für die kleineren Winkel der Sinus- und Tangensfunktion und die grossen Winkel der Kosinus- und der Kotangensfunktion lassen sich die Funktionswerte mit Hilfe des Bogenmasses errechnen, da in diesen Bereichen die Bogenlänge praktisch mit den Werten der gesuchten Winkelfunktionen übereinstimmt. Auf einem Rechenschieber mit einer Arcusskala für kleine Winkel lassen sich diese Operationen besonders einfach ausführen.

Die $\sqrt{1-x^2}$ -Skala erlaubt eine genaue Bestimmung der Funktionswerte für Sinus- und Kosinusfunktionen, welche normalerweise auf der rechten Seite der Skalen abgelesen werden müssen. Diese Skala ist sehr wertvoll, da die Ablesegenauigkeit gegen die rechte Schieberseite hin erheblich abnimmt.

Die Skalen für die Tangens- und die Kotangensfunktionen ergänzen sich gegenseitig. Die Tangensfunktionen sind nur für Winkel bis 45° und die Kotangensfunktionen für solche ab 45° direkt ablesbar. Da die Tangensfunktion durch Bildung des Reziprokwertes der Kotangensfunktion errechnet werden kann, lassen sich Tangensfunktionen für grössere Winkel als 45° auf der $1/x$ -Skala direkt ablesen, unter der Voraussetzung, dass der Läufer für die Bestimmung der Tangensfunktion auf den Winkelwert der Kotangensfunktion gestellt wird und umgekehrt.

6. Repetitionsaufgaben (Lösung Seite 433)

Alle Aufgaben sind mit dem Rechenschieber zu lösen.

- Bestimmen Sie den Sinus für einen Winkel von $2,6^\circ = 2^\circ 36'$
- Bestimmen Sie die Kosinusfunktion für einen Winkel von $11,7^\circ = 11^\circ 42'$ möglichst genau.
- Wie gross ist der Wert der Kotangensfunktion für einen Winkel von $86,8^\circ = 86^\circ 48'$?
- Bestimmen Sie den Tangens für einen Winkel von 67° .
- Erklären Sie die Vorteile der $\sqrt{1-x^2}$ -Skala.
- Welche Vorteile bringt die $\angle$ -arc-Skala.
- Welche Vereinfachung ist dank der $1/x$ -Skala möglich?
- Wie bestimmen Sie die Sinusfunktion von Winkeln, die kleiner als 6° sind, wenn der Rechenschieber keine $\angle$ -arc-Skala aufweist?

E. Wechselströme

I. Der einphasige Wechselstrom

1. Einführung

Die Wechselstromtechnik spielt in der Elektronik eine führende Rolle. In allen Geräten der Nachrichtentechnik fallen den Wechselströmen wichtige Aufgaben zu. Es gibt praktisch keine Übermittlungsgeräte, in denen nicht Wechselströme und Wechselspannungen in irgend einer Form erzeugt, verstärkt oder verarbeitet werden. Der folgende Abschnitt wird Ihnen die Grundlagen über Wechselströme und Wechselspannungen vermitteln.

2. Was wissen Sie schon über Wechselströme?

(Lösung Seite 435)

- Was verstehen Sie unter einem Wechselstrom?
- Welche Kurvenform weist der Industriewechselstrom auf?
- Eine Wechselspannung habe eine Frequenz von 50 Hertz; was sagt der Begriff 50 Hz über diese Wechselspannung aus?
- Ein Hochfrequenzwechselstrom hat eine Wellenlänge von 30 m; können Sie sich darunter etwas vorstellen?
- Nennen Sie zwei Anwendungsgebiete von Wechselströmen.
- Welche Art Spannung benötigt ein Lautsprecher zu seinem Betrieb?

3. Der Wechselstrom

a. Der Begriff des Wechselstromes

Der Wechselstrom ändert periodisch seine Richtung und seine Stärke. Sinusförmige Wechselströme verlaufen nach einer Sinusfunktion, sie ändern Richtung und Stärke entsprechend dem Verlauf dieser Funktion. Wechselströme brauchen nicht sinusförmig zu verlaufen. In der Nachrichtentechnik werden wir oft Wechselströme antreffen, die eine ganz andere Form aufweisen.

b. Die Entstehung des sinusförmigen Wechselstromes

Industriewechselströme verlaufen sinusförmig. Sie werden in Generatoren erzeugt. Der Generator funktioniert nach dem Induktionsprinzip. Beim Generator wird eine Leiterschleife in einem gleichmässigen (homogenen) Magnet-

feld mit gleichbleibender Geschwindigkeit gedreht. Der Leiter wird kreisförmig bewegt. Die Anzahl der geschnittenen Kraftlinien hängt von der Stellung der Leiterschleife ab. Die induzierte Spannung ist proportional zu den geschnittenen Kraftlinien. Aus Bild 49 ersehen wir, dass die induzierte Spannung der Sinusfunktion folgen muss, weil bei 90° und 270° am meisten Kraftlinien geschnitten werden, während bei 0° und 180° die Kraftlinien nur noch tangiert werden. Die erzeugte Wechselspannung erreicht bei 90° und 270° ihren Maximalwert, bei 0° und 180° dagegen wird die Spannung Null. Es ist auch ersichtlich, dass die Spannung bei 0° und bei 180° ihre Richtung ändert.

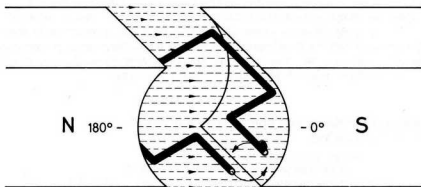


Bild 49

In Bild 50 wird die zeichnerische Ermittlung der induzierten Wechselspannung gezeigt. Diese erscheint in bezug auf Richtung und Grösse als Sinusfunktion des Drehwinkels.

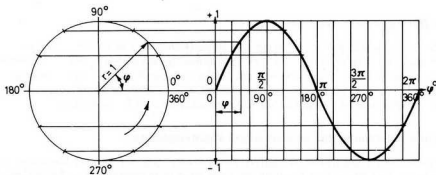


Bild 50

c. Kenndaten für Wechselströme und Wechselspannungen

Bild 51 zeigt einen Wellenzug einer sinusförmigen Wechselspannung mit seinen wichtigsten Kenndaten.

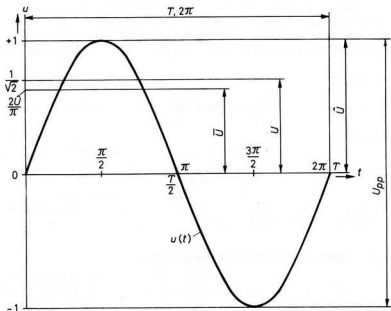


Bild 51

Die Frequenz des Wechselstromes

Die *Frequenz* eines Wechselstromes entspricht der Anzahl Schwingungen pro Sekunde. Die Wechselspannung des Lichtnetzes ändert ihre Grösse und ihre Richtung 100mal in der Sekunde, der Wellenzug nach Bild 51 tritt in der Sekunde 50mal auf, die Spannung hat eine Frequenz von 50 Hertz.

Die Grundeinheit für die Frequenz ist das *Hertz*. $1 \text{ Hz} = 1 \frac{1}{\text{s}} = 1 \text{ s}^{-1}$

In Formeln verwendet man für die Frequenz das Formelzeichen f .

Der in der Praxis verwendete Frequenzbereich ist sehr gross. Zur Bezeichnung von höheren Frequenzen werden deshalb grössere Einheiten verwendet.

1 Kilohertz kHz = 10^3 Hz

1 Megahertz MHz = 10^6 Hz

1 Gigahertz GHz = 10^9 Hz

In der Nachrichtentechnik werden folgende *Frequenzbereiche* belegt:

Tonfrequenz	16 Hz bis 18 kHz	
Ultraschall	18 kHz bis 30 kHz	
Langwellen	30 kHz bis 300 kHz	LW (Wellenlänge 10 km... 1 km)
Mittelwellen	300 kHz bis 3 MHz	MW (Wellenlänge 1 km... 100 m)
Kurzwellen	3 MHz bis 30 MHz	KW (Wellenlänge 100 m... 10 m)
Ultrakurzwellen	30 MHz bis 300 MHz	UKW (Wellenlänge 10 m... 1 m)
Dezimeterwellen	300 MHz bis 3 GHz	UHF (Wellenlänge 1 m... 1 dm)
Centimeterwellen	3 GHz bis 30 GHz	SHE (Wellenlänge 1 dm... 1 cm)

Diese Frequenzbereiche werden hauptsächlich von folgenden Diensten benutzt:

Langwellen (LW)	Verkehr zwischen festen Standorten und Rundfunk
Mittelwellen (MW)	Verkehr zwischen festen Standorten, Rundfunk, Schiffsfunk und Polizeifunk
Kurzwellen (KW)	Rundfunk für grosse Reichweiten, Küstenfunk, Flugfunk, Amateurfunk, Elektromedizin, Industrie-HF-Generatoren, Fernsteuerungen
Ultrakurzwellen (UKW)	Frequenzmodulierter Rundfunk, Küstenfunk, Schiffsfunk, Fernsehen, Flugnavigation
Dezimeterwellen (UHF)	Fernsehen, Flugnavigation, Richtverbindungen
Centimeterwellen (SHF)	Navigationshilfen, Radar

Die Kreisfrequenz oder die Winkelgeschwindigkeit

Das Produkt der Frequenz f mit dem Kreisumfang 2π heisst *Kreisfrequenz*. Die Erzeugung einer Sinusschwingung mit der Frequenz f kann als die Projektion eines mit der Winkelgeschwindigkeit $\omega = 2\pi f$ umlaufenden Vektors aufgefasst werden.

Die Kreisfrequenz hat die gleiche Grundeinheit wie die Frequenz, da der Ausdruck 2π eine dimensionslose Konstante darstellt.

Das Formelzeichen für die Kreisfrequenz lautet ω (kleiner griechischer Buchstabe «Omega»).

Die Kreisfrequenz ist eine sehr wichtige Grösse für die Berechnung von Wechselstromkreisen.

Die Schwingungsdauer

Die *Schwingungsdauer* ist die Zeitspanne, nach deren Ablauf sich die Schwingungsform einer periodischen Schwingung wiederholt. Für die sinusförmige Schwingung bedeutet das die Dauer einer Schwingung.

Die Grundeinheit für die Schwingungsdauer ist die Sekunde s.

In Formeln wird das Formelzeichen T für die Schwingungsdauer verwendet.

Die Schwingungsdauer entspricht dem Reziprokwert der Frequenz.

$$T = \frac{1}{f} \text{ [s]}$$

Die Amplitude

Die höchste Auslenkung der Sinuskurve heisst *Amplitude*.

Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit

Die elektrischen Schwingungen breiten sich im Raum mit *Lichtgeschwindigkeit* aus. Die *Fortpflanzungsgeschwindigkeit* beträgt demzufolge 300 000 km/s.

In elektrischen Leitern und abgeschirmten Kabeln ist die Fortpflanzungsgeschwindigkeit für elektrische Schwingungen immer kleiner als die Lichtgeschwindigkeit.

Die Masseinheit für die Fortpflanzungsgeschwindigkeit ist m/s

Das Formelzeichen für die Fortpflanzungsgeschwindigkeit oder Ausbreitungsgeschwindigkeit lautet c .

Für die Lichtgeschwindigkeit wird c_0 als Formelzeichen verwendet.

Die Wellenlänge

Die Wellenlänge ergibt sich aus dem Quotienten von Fortpflanzungsgeschwindigkeit und Frequenz. Für Hochfrequenzschwingungen im Raum errechnet sich demzufolge die Wellenlänge zu:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad [\lambda] = \frac{\text{m} \cdot \text{s}}{\text{s}} = \text{m}$$

Die Grundeinheit für die Wellenlänge ist Meter (m).

In Formeln wird für die Wellenlänge das Formelzeichen λ (Lambda) verwendet.

Das Formelzeichen für den Momentanwert lautet i oder u .

Der Maximalwert

Der *Maximalwert* einer Spannung oder eines Stromes entspricht der *Amplitude*. Er wird oft auch *Spitzenwert* oder *Scheitelwert* genannt.

Das Formelzeichen für Spitzenwerte lautet $\hat{U}$ oder $\hat{I}$.

Der Effektivwert

Der *Effektivwert* eines Wechselstromes entspricht wertmässig dem Gleichstrom, der die gleiche Leistung hervorbringen würde. Um den Effektivwert einer sinusförmigen Wechselspannung zu erhalten, ist der Maximalwert der Spannung durch die Wurzel aus Zwei zu dividieren.

$$U = \frac{\hat{U}}{\sqrt{2}}$$

Als Formelzeichen verwendet man U oder I .

Diese Formel gilt nur für sinusförmige Spannungen und Ströme, Wechselgrößen mit anderer Kurvenform können damit nicht berechnet werden. Der Umrechnungsfaktor für die Effektivwerte lässt sich mit Hilfe der Leistungskurve erklären. Um die Betrachtungen zu vereinfachen, untersuchen wir die Verhältnisse in einem Wechselstromkreis, dessen ohmscher Verbraucher einen Widerstandswert von einem Ohm aufweist. Mit Hilfe des ohmschen Gesetzes können wir nun sagen, dass die verbrauchte Leistung gleich dem Quadrat aus Strom oder Spannung ist. Zur weiteren Vereinfachung legen wir an diesen Widerstand eine sinusförmige Wechselspannung mit dem Maximalwert von einem Volt. Bild 52 zeigt die Messschaltung.

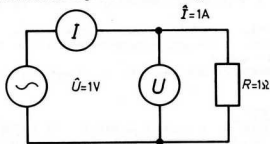


Bild 52

Im Messkreis fließt demzufolge ein Strom mit dem Maximalwert von 1 Ampère. Um die verbrauchte Leistung für irgend einen Zeitpunkt zu bestimmen, haben wir den Spannungswert in diesem Moment festzuhalten und zu quadrieren, da für die Leistung folgende Formel gilt:

$$p = i^2 \cdot R \text{ oder } p = \frac{u^2}{R}$$

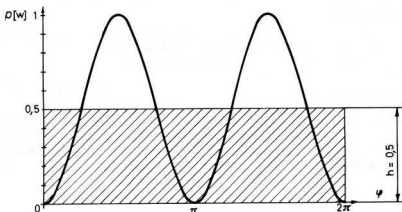


Bild 53

Da wir für den Widerstand den Wert Eins gewählt haben vereinfacht sich die Formel:

$$p = i^2 \text{ oder } p = u^2$$

Wir brauchen also nur die Strom- oder Spannungswerte in einem bestimmten Moment zu quadrieren, um so die Leistung, die in diesem Moment in Wärme umgesetzt wird zu ermitteln. Die Resultate einer solchen Leistungskurve sind in Bild 53 für eine Periode festgehalten. Die Leistungskurve weist nur positive Werte auf, da das Quadrat einer Zahl unabhängig vom Vorzeichen immer positiv ist.

Ableitung : $p = \frac{u^2}{R}$; Vereinfachung: $R = 1$, daher $p = u^2$

Weil die Kurve für $u^2 = \hat{U}^2 \sin^2 \varphi$ auch eine symmetrische Kurve darstellt, wird

$$P = \frac{\hat{P}}{2}; \text{ Daraus } U = \sqrt{P} = \sqrt{\frac{\hat{P}}{2}}. \text{ Da } \sqrt{\hat{P}} \text{ (mit } R = 1) = \hat{U} \text{ ist, folgt } U = \frac{\hat{U}}{\sqrt{2}}$$

Das schraffierte Rechteck ist inhaltsgleich mit der Fläche, welche von der Leistungskurve eingeschlossen wird. Die Höhe des Rechteckes entspricht der mittleren Leistung. Mit Hilfe der höheren Mathematik kann man beweisen, dass die Höhe des flächengleichen Rechteckes genau halb so gross ist, wie der Spitzenwert der Leistungskurve. Zur Berechnung der Spannung haben wir aus der Leistung die Wurzel zu ziehen, das bedeutet für unser Beispiel, dass die Effektivspannung um den $\sqrt{2}$ -fachen Wert kleiner ist als die Spitzenspannung. Die Entwicklung der Formel zeigt Bild 53. Einzig die Tatsache, dass das schraffierte Rechteck halb so hoch ist, wie der Spitzenwert der Leistungskurve wird nicht bewiesen, da der Beweis nur mittels der Integralrechnung erbracht werden kann. Angenähert kann man die Behauptung aber auch

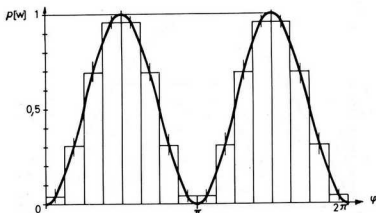


Bild 54

graphisch beweisen, indem man die von der Leistungskurve eingeschlossene Fläche in sehr schmale Rechtecke aufteilt, den Flächeninhalt dieser Rechtecke zusammenzählt und so die Gesamtfläche bildet. Bild 54 zeigt die graphische Methode zur Ermittlung der Fläche der Leistungskurven.

Der Mittelwert

Der Mittelwert eines Wechselstromes entspricht wertmässig dem Gleichstrom, der pro Zeiteinheit die gleiche Anzahl Elektronen durch einen Leiterquerschnitt transportiert. Bei symmetrischem Wechselstrom ist der Mittelwert stets Null, da sich die positive und die negative Halbwelle aufheben. Erst nach einer Gleichrichtung entsteht ein Mittelwert. Er spielt deshalb in der Galvanotechnik und in der Messtechnik eine Rolle. Ein Drehspulinstrument, dessen Zeigerausschlag proportional dem Stromfluss ist, zeigt den Mittelwert des vorher gleichgerichteten Stromes an. Da aber normalerweise Effektivwerte gemessen werden sollen, ist die Skala in Effektivwerten geeicht, verliert dadurch jedoch ihre Linearität, welche sie bei Gleichstrom besitzt. Um den Mittelwert eines sinusförmigen Wechselstromes oder einer sinusförmigen Wechselspannung zu ermitteln, ist der Maximalwert mit dem Faktor Zwei zu multiplizieren und das Resultat durch π zu dividieren.

$$\bar{U} = \frac{2 \cdot \hat{U}}{\pi} = 0,636 \cdot \hat{U}$$

Als Formelzeichen werden $\bar{U}$ oder $\bar{I}$ verwendet.

Diese Formel gilt nur für sinusförmige Spannungen und Ströme. Wechselgrößen mit anderen Kurvenformen können nicht damit berechnet werden.

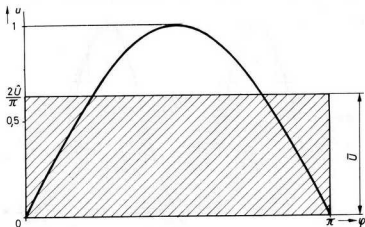


Bild 55

Der Umrechnungsfaktor für Mittelwerte lässt sich unter Zuhilfenahme der Sinuskurve erklären. Da der Mittelwert wertmässig einem äquivalenten (gleichwertigen) Gleichstrom entspricht, und die von der Sinuskurve umschlossene Fläche gleich der geflossenen Ladung ist, (wir erinnern uns, Ladung gleich Strom mal Zeit), so muss die Höhe des flächengleichen Rechteckes gleich dem Mittelwert des Stromes sein. Bild 55 zeigt die Verhältnisse. Die Integralrechnung liefert für die Sinusfunktion eine entsprechende Rechteckshöhe von $2/\pi$ mal Maximalwert. Diese Aussage kann leicht mit der graphischen Methode nachgeprüft werden.

Der Momentanwert

Der Momentanwert einer Spannung oder eines Stromes ist derjenige Wert, der irgend einem Zeitpunkt zugeordnet ist. Für sinusförmige Wechselspannungen und Wechselströme lässt sich der Momentanwert leicht errechnen.

$$u = \hat{U} \cdot \sin \alpha$$

Gibt man den Winkel α im Bogenmass an, so lässt sich die Formel wie folgt erweitern:

$$u = \hat{U} \sin (\omega t)$$

Diese Schreibweise ist viel geläufiger, da der Momentanwert zu irgend einem Zeitpunkt errechnet werden kann, wenn die Zeit und die Kreisfrequenz bekannt sind.

Als Formelzeichen werden u oder i verwendet.

Der Spitze-zu-Spitze-Wert

Der *Spitze-zu-Spitze-Wert* entspricht dem doppelten Maximalwert.

$$U_{pp} = 2 \hat{U}$$

Als Formelzeichen werden U_{pp} und I_{pp} verwendet.

Der Spitze-zu-Spitze-Wert spielt in der Verstärkertechnik eine Rolle, da dort die Extremwerte einer Spannung oder eines Stromes interessieren.

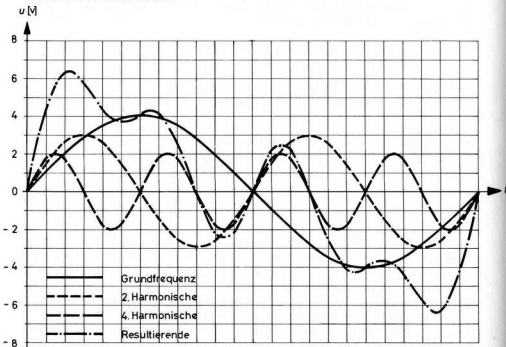
Oberwellen

Oberwellen sind ganzzahlige Vielfache einer Grundwelle. Oberwellen sind immer dann vorhanden, wenn Wechselspannungen oder Wechselströme nicht sinusförmig verlaufen. Oft wird dafür der Ausdruck *Harmonische* verwendet. Diese unterscheiden sich lediglich in der Zählungsart von den Oberwellen. Ist beispielsweise die Grundfrequenz 500 Hz, so entsprechen 1500 Hz der zweiten Oberwelle, jedoch der dritten Harmonischen, da man die Grundfrequenz als die erste Harmonische bezeichnet.

Die höhere Mathematik liefert den Beweis, dass jede periodisch verlaufende, nicht sinusförmige Wechselspannung mit der Frequenz f aus sinusförmigen Teilspannungen mit den Frequenzen $2f$, $3f$, $4f$ usw. besteht. In Bild 56 sehen

wir die Entstehung einer nichtsinusförmigen periodischen Schwingung, die sich aus einer Grundfrequenz mit der Amplitude von 4 V, einer zweiten Harmonischen mit der Amplitude von 3 V und der vierten Harmonischen mit der Amplitude 2 V zusammensetzt. Die graphische Darstellung erlaubt die Konstruktion jeder beliebigen resultierenden Schwingung, wenn die Harmonischen, deren Amplituden und Phasenlage gegeben sind. Man hat dabei lediglich die Momentanwerte aller Harmonischen zu addieren.

Umgekehrt ist es sehr schwierig aus einer gegebenen nichtsinusförmigen Schwingung die Harmonischen zu ermitteln. Der Elektroniker kommt jedoch oft in die Lage, eine auf einem Oszillographen dargestellte, nichtsinusförmige Schwingung zu beurteilen. Es braucht jedoch sehr viel Übung, um bei der Betrachtung einer solchen Schwingung angeben zu können, aus welchen Harmonischen diese besteht. Die höhere Mathematik gibt uns in Form der Fourieranalyse ein Mittel in die Hand, das uns erlaubt eine Schwingung zu analysieren und in ihre Harmonischen zu zerlegen. Der Praktiker muss diese Methode nicht beherrschen, er soll jedoch wissen, dass diese Möglichkeit einer Analyse besteht. Es existieren auch spezielle Messinstrumente, welche mit Hilfe von sehr selektiven Filtern eine «verzerrte» Schwingungsform in ihre Grundkomponenten zerlegen; allerdings werden dabei Phasendifferenzen der Einzelkurven nicht erfasst.



Die Rechteckspannung

Die *Rechteckspannung* ist ein Sonderfall einer periodischen, nicht sinusförmigen Wechselspannung. Rechteckspannungen sind in der Impulstechnik oft anzutreffen. Eine ideale Rechteckspannung enthält eine unendlich grosse Anzahl ungeradzahlgiger Harmonischer.

Bild 57 zeigt eine Rechteckspannung.

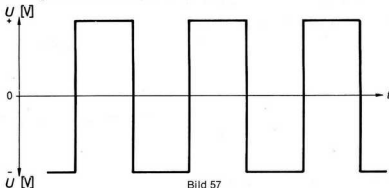


Bild 57

Bei der idealen Rechteckspannung würde der Sprung von der einen Stromrichtung zur anderen ohne Zeitverzug erfolgen. Diese Tatsache spricht dafür, dass in der Rechteckspannung unendlich hohe Frequenzen enthalten sind. In der Praxis erfolgt dieser Sprung nicht zeitlos, es wird dazu etwas Zeit benötigt. Rechteckspannungen werden in der Messtechnik zur Prüfung von Übermittlungsgeräten verwendet.

4. Beispiele

a. Bestimmung der Frequenz einer Wechselspannung

Eine Wechselspannung hat eine Schwingungsdauer von $2 \mu\text{s}$. Bestimmen Sie die Frequenz, die Wellenlänge und die Kreisfrequenz.

Vorgehen:

– Formel für die Schwingungsdauer anschreiben:

$$T = \frac{1}{f}$$

– Formel nach f auflösen:

$$f = \frac{1}{T}$$

– Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen: $f = \frac{1}{2 \cdot 10^{-6}} \quad [f] = \frac{1}{\text{s}} = \text{s}^{-1} = \text{Hz}$

$$f = 500 \text{ kHz}$$

– Formel für die Wellenlänge anschreiben

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

– Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$\lambda = \frac{3 \cdot 10^8}{5 \cdot 10^5} \quad [\lambda] = \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot \text{s}$$

$$\lambda = 600 \text{ m}$$

– Formel für die Kreisfrequenz anschreiben

$$\omega = 2 \pi f$$

– Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen:

$$\omega = 2 \pi \cdot 0,5 \cdot 10^6$$

$$\omega = 3,14 \cdot 10^6 \text{ s}^{-1}$$

b. Bestimmung von Mittelwert und Effektivwert

Die Amplitude einer Wechselspannung beträgt 2,7 V. Bestimmen Sie den Mittelwert und den Effektivwert der Spannung.

Vorgehen:

– Formel für den Mittelwert anschreiben:

$$\bar{U} = \frac{U \cdot 2}{\pi}$$

– Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen:

$$\bar{U} = \frac{2 \cdot 2,7}{3,14} \text{ V}$$

$$\bar{U} = 1,72 \text{ V}$$

– Formel für den Effektivwert anschreiben:

$$U = \frac{\bar{U}}{\sqrt{2}}$$

– Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen:

$$U = \frac{1,72}{1,414} \text{ V}$$

$$U = 1,22 \text{ V}$$

c. Wie gross ist der Spitze-zu-Spitze-Wert der Spannung aus b?

Vorgehen:

– Formel für den Spitze-zu-Spitze-Wert anschreiben:

$$U_{pp} = 2 \cdot \bar{U}$$

– Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen:

$$U_{pp} = 2 \cdot 1,72 \text{ V}$$

$$U_{pp} = 3,44 \text{ V}$$

d. Bestimmung des Momentanwertes

Eine Wechselspannung mit einer Frequenz von 2 MHz hat bei $t = 0$ einen Nulldurchgang von der negativen zur positiven Polarität. Die Amplitude misst 6 V. Wie gross ist der Momentanwert nach $t = 1/3 \mu\text{s}$?

Vorgehen:

- Formel für den Momentanwert anschreiben: $u = \hat{U} \cdot \sin(\omega \cdot t)$
- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen: $u = 6 \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot 2 \cdot 10^{10}}{3 \cdot 10^6}\right) \text{ V} \cdot \frac{\text{s}}{\text{s}}$
 $u = 6 \sin\left(\frac{4}{3} \cdot \pi\right)$
 $u = 6 \sin 240^\circ$
 $u = 6 (-0,867)$
 $u = -5,2 \text{ V}$

5. Das Wesentliche

Wechselströme und Wechselspannungen verlaufen meistens sinusförmig. Periodische nicht sinusförmige Schwingungen lassen sich in sinus- oder kosinusförmige Harmonische zerlegen.

Die Frequenz eines Wechselstromes entspricht der Anzahl Schwingungen pro Sekunde.

Die Kreisfrequenz ist das Produkt aus dem Faktor « 2π » und der Frequenz. Sie ist eine wichtige Grösse für die Berechnung von Wechselstromkreisen.

Die Schwingungsdauer ist die Dauer einer Periode.

Die Amplitude einer Schwingung entspricht deren höchsten Auslenkung.

Wellenlänge, Ausbreitungsgeschwindigkeit und Frequenz stehen zueinander in einer festen Beziehung. Die Wellenlänge ist der Quotient aus Ausbreitungsgeschwindigkeit und Frequenz.

Der Maximalwert oder Spitzenwert eines Stromes entspricht der Amplitude.

Der Effektivwert entspricht wertmässig dem Gleichstrom oder der Gleichspannung, die die gleiche Leistung in einem ohmschen Widerstand erzeugen würden. Für einen sinusförmigen Kurvenverlauf entspricht der Effektivwert dem Quotienten aus Spitzenwert und dem Faktor $\sqrt{2} = 1,414$.

Der Mittelwert eines Stromes entspricht wertmässig dem Gleichstrom, der pro Zeiteinheit die gleiche Anzahl Elektronen durch einen Leiter transportiert. Für sinusförmige Ströme errechnet sich der Mittelwert durch Multiplizieren des Spitzenwertes mit dem Faktor 0,636.

Der Momentanwert einer Spannung oder eines Stromes entspricht demjenigen Wert, der irgend einem Zeitpunkt zugeordnet ist. Er lässt sich mit Hilfe der Sinusfunktion errechnen.

Der Spitze-zu-Spitze-Wert entspricht dem doppelten Maximalwert.

6. Repetitionsaufgaben (Lösung Seite 436)

- Was verstehen Sie unter dem Begriff «Kreisfrequenz»?
- Wie gross ist die Fortpflanzungsgeschwindigkeit elektrischer Wellen im freien Raum?

- c) Die Wellenlänge einer Hochfrequenzschwingung misst 41 m. Welchen Wert hat die Frequenz der Schwingung?
- d) Zeichnen Sie eine ganze Schwingung (Periode) einer Wechselspannung mit der Frequenz 2 kHz. Die Amplitude misst 4,7 V. Wählen Sie für die Achsen folgende Masseneinheiten: X-Achse (ms und rad), Y-Achse (V). Zeichnen Sie folgende Werte ein:
- Schwingungsdauer
 - Maximalwert der Spannung
 - Effektivwert der Spannung
 - Arithmetischer Mittelwert der Spannung
 - Momentanwert der Spannung bei einem Winkel von $\pi/3$ ($= 60^\circ$)
 - Spitze-zu-Spitze-Wert-Spannung
- e) An einem ohmschen Widerstand liegt eine Wechselspannung. Der Widerstand misst 0,5 Ohm. Die Amplitude der Wechselspannung beträgt 2 V. Zeichnen Sie die Strom- und Spannungskurve und ermitteln Sie daraus die Leistungskurve. Berechnen Sie die mittlere Leistung (Effektivwert) und zeichnen Sie den gefundenen Wert im Kurvenblatt ein.
- f) Die neunte Harmonische einer Frequenz beträgt 2,7 MHz. Welche Frequenz hat die 1. Harmonische?
- g) Die 12. Oberwelle einer Frequenz beträgt 39 MHz. Welche Wellenlänge hat die Grundwelle?
- h) Die Frequenz einer Wechselspannung beträgt 20 kHz. Der Spitzenwert der Spannung misst 4 V. Zum Zeitpunkt $t = 0$ geht der Spannungswert durch den Nullpunkt, um in positiver Richtung anzusteigen. Wie gross ist der Momentanwert nach 23 ms?

II. Drehstrom

1. Einführung

Die Versorgung der Industrie und der Haushaltungen mit elektrischer Energie erfolgt mittels Mehrphasensystemen, wobei das Dreiphasensystem heute überall verwendet wird. Die benzinelektrischen Gruppen zur Stromversorgung von grösseren Übermittlungsanlagen der Armee erzeugen ebenfalls dreiphasigen Drehstrom. Der Drehstrom bietet viele Vorteile, insbesondere für den Generatoren- und Motorenbau, auch betriebsmässig ist er dem einfachen Wechselstrom überlegen. Die einfache Schaltungstechnik des Drehstromes muss dem Praktiker geläufig sein, insbesondere dann, wenn er in die Lage kommt Geräte an das Dreiphasennetz anzuschliessen.

2. Was wissen Sie schon über den Drehstrom?

(Lösung Seite 439)

- a) Haushaltapparate und die elektrische Beleuchtung arbeiten in unseren Landesebenen mit einer Spannung von 220 V. Motoren dagegen oft mit 380 V. Kennen Sie den Zusammenhang zwischen diesen beiden Spannungswerten?
- b) Haben Sie schon einmal etwas über Stern- und Dreieckschaltung gehört?
- c) Was ist ein Nulleiter?
- d) Wieviele Phasen weist der gebräuchliche Drehstrom auf?
- e) Kennen Sie Vorteile des Drehstromes?

3. Der Drehstrom

a. Die Entstehung des Drehstromes

Der *Drehstrom* wird in *Drehstromgeneratoren* erzeugt. Im Dreiphasendrehstromgenerator sind drei Statorwicklungen so angebracht, dass sie 120° gegeneinander verschoben sind. Ein rotierender Permanentmagnet induziert in diesen drei Spulen drei Wechselspannungen, die gegeneinander um 120° phasenverschoben sind. Bild 58 zeigt das Prinzip dieses Generators mit dem Vektorbild der Spannungen. Die drei Statorwicklungen weisen die gleichen Windungszahlen auf, so dass die drei Spannungen gleich gross sind. Die Bezeichnung dieser Spannungen, der sogenannten Phasenspannungen, erfolgt analog der Bezeichnung der Drehstromleiter als U_R , U_S und U_T . Die Spulenanschlüsse tragen die Bezeichnungen U, V und W, während die Spulenenden mit X, Y und Z bezeichnet sind. Die Leitungsbezeichnungen sind ebenfalls genormt und tragen die Buchstaben R, S und T.

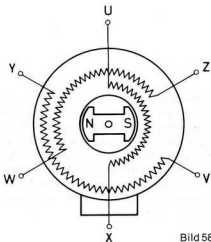
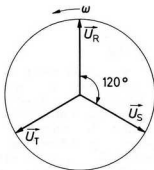


Bild 58



In Bild 59 sehen wir die Benennung der Spulen und Leitungen. Der Generator weist 6 Anschlüsse auf. Wollte man jedes Einphasensystem für sich belasten, so müsste man 6 Leitungen verlegen. Diese Art der Leitungsführung wäre jedoch sehr aufwendig.

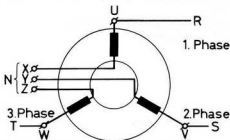


Bild 59

b. Die Sternschaltung

Ein Generator, bei welchem die Anschlüsse X, Y und Z verbunden sind, ist in *Sternschaltung* betrieben. Die Sternschaltung kommt mit einem Vierleitersystem aus. Die Leiter R, S und T werden Polleiter genannt, während der Mittelpunktsteiter als Nulleiter bezeichnet wird. $\star$ stellt das Symbol der Sternschaltung dar. Werden alle drei Phasen gleich belastet, so fließt im Nulleiter kein Strom. In Bild 60 sehen wir das Liniendiagramm für die drei Spannungen und Ströme einer Sternschaltung bei gleicher Belastung aller drei Phasen.

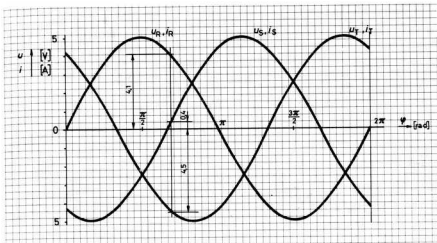


Bild 60

Wir können zu jedem beliebigen Zeitpunkt die Addition der drei Phasenspannungen oder der drei Ströme ausführen, die Summe wird immer Null sein. Der Nulleiter wäre demzufolge überflüssig, da in ihm doch kein Strom fließt. Dies gilt jedoch nur bei gleichmässiger Belastung aller drei Phasen. Sobald die Phasen unterschiedlich belastet werden, fließt über den Nulleiter ein Strom. Dies ist auch der Grund, weshalb der Nulleiter bei Dreiphasensystemen meistens verlegt wird.

c. Die Dreieckschaltung

Bild 61 zeigt einen Verbraucher, für welchen die *Dreieckschaltung* gewählt wurde. Bei dieser Schaltung ist das Ende einer Phase mit dem Anfang der nächsten verbunden. Das Symbol der Dreieckschaltung ist Δ .

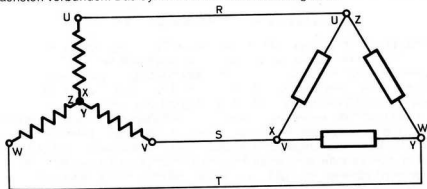


Bild 61

d. Die verkettete Spannung

Der Dreiphasenwechselstrom zur Versorgung der Haushaltungen hat in der Regel eine Phasenspannung von 220 V. Wird der Generator in Sternschaltung betrieben, so bedeutet dies, dass zwischen den drei Polleitern R, S und T und dem Nulleiter je eine Spannung von 220 V gemessen wird. In Bild 62 erkennen wir einen in Sternschaltung betriebenen Generator.

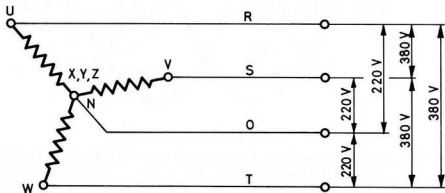


Bild 62

Wenn wir zwischen zwei Polleitern die Spannung messen, dann stellen wir fest, dass diese Spannung 380 V beträgt, man nennt sie *verkettete Spannung*. Diese Spannung hat ihren Namen dem Umstand zu verdanken, dass sie durch Verkettung von zwei Phasenspannungen entstanden ist. Wir haben durch Messungen festgestellt, dass die verkettete Spannung um einen gewissen Faktor höher ist als die Phasenspannung. Wenn wir diesen Faktor näher untersuchen, so stellen wir fest, dass er den Wert $\sqrt{3}$ aufweist.

$$\text{Verkettete Spannung} = \sqrt{3} \cdot \text{Phasenspannung}$$

Wir wollen die Entstehung dieser verketteten Spannung näher untersuchen. In Bild 62 wählen wir hierzu die Spannung zwischen R und S. Die verkettete Spannung setzt sich aus den Phasenspannungen U_R und U_S zusammen. Sie entspricht der Serieschaltung dieser beiden Phasenspannungen. Wir haben lediglich die Momentanwerte der Phasenspannungen zu addieren, um den Momentanwert der verketteten Spannung zu erhalten. Wir müssen jedoch beachten, dass die beiden Phasenspannungen gegeneinander geschaltet sind, da die beiden Wicklungsenden X und Y miteinander verbunden sind. Wir haben deshalb eine der beiden Phasenspannungen mit umgekehrtem Vorzeichen zu addieren. In Bild 63 wurde diese Addition im Liniendiagramm vorgenommen.

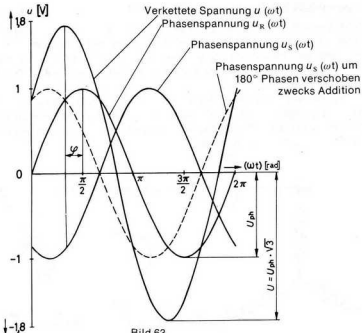


Bild 63

Darstellung von Phasenspannung und verketteter Spannung im Liniendiagramm

Bild 64 zeigt die gleiche Operation jedoch mit Hilfe der Vektordarstellung.

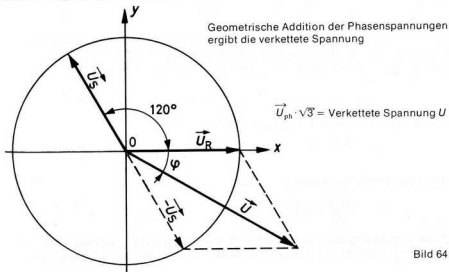


Bild 64

e. Leistungsberechnungen bei Drehstrom

Wenn die drei Phasen ungleichmässig belastet werden, so ist die aufgenommene Leistung für jede Phase getrennt zu berechnen. Dieser Fall trifft oft für Kleinverbraucher zu, wo beispielsweise Beleuchtungen, Haushaltgeräte und Kleinmotoren zwischen dem Nulleiter und den verschiedenen Phasen angeschlossen werden.

In Bild 65 sehen wir ein Beispiel mit gleichmässiger Belastung der drei Phasen. Die aufgenommene Leistung kann dabei direkt ermittelt werden. Wir messen zu diesem Zweck die Spannung U zwischen zwei Aussenleitern und den Strom I in einer Zuleitung.

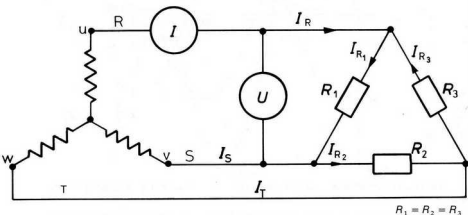


Bild 65

Für die Dreieckschaltung müssen die Ströme vektoriell addiert werden, wie dies für die Spannungen der Sternschaltung geschehen ist. Der Strom im Aussenleiter wird demnach um den Faktor 1,73 grösser als der Strom im einzelnen Verbraucher.

$$\text{Verketteter Strom} = \sqrt{3} \cdot \text{Phasenstrom}$$

Die Leistung pro Phase beträgt demzufolge:

$$P_{\text{ph}} = \frac{U \cdot I}{\sqrt{3}}$$

Die Gesamtleistung ist dreimal grösser:

$$P = 3 \frac{U \cdot I}{\sqrt{3}} = \sqrt{3} \cdot U \cdot I$$

Diese Angaben gelten nur für eine rein ohmsche Last. Das heisst, dass der Belastungswiderstand ein ohmscher Widerstand sein muss. In einem späteren

Abschnitt werden wir sehen, warum diese Einschränkung gemacht werden muss.

f. Die Stern-Dreieck-Umschaltung

Motoren und Umformergruppen, welche mit Drehstrom gespeist werden, sind oft mit einem Stern-Dreieck-Schalter versehen. Werden die Wicklungen des Drehstrommotors in Sternschaltung betrieben, so liegt an der einzelnen Wicklung nur eine Spannung von 220 V, während die gleiche Wicklung in der Dreieckschaltung an 380 V liegt. In der Sternschaltung nimmt der Motor weniger Strom vom Netz auf als in der Dreieckschaltung, er läuft langsam an und wird nach Erreichen einer bestimmten Tourenzahl durch Umschaltung auf Dreieck an die volle Netzspannung gelegt. Dadurch wird verhindert, dass im Einschaltmoment zu hohe Ströme fließen.

g. Die vektorielle Darstellung von Wechselstromgrössen

Wir haben gesehen, dass sich Wechselstromgrössen auf zwei Arten darstellen lassen, im *Liniendiagramm* oder als *Vektoren*. Das Liniendiagramm ist schwierig zu zeichnen und wirkt unübersichtlich. Die Vektordarstellung ist eine elegante Art, um Wechselstromgrössen einfach und übersichtlich darzustellen. Wir wollen uns mit den Grundregeln der Vektorrechnung vertraut machen, da uns diese Darstellungsart während des ganzen Lehrganges begleiten wird.

Wenn wir eine Wechselspannung darstellen wollen, so müssen wir zwei Grössen berücksichtigen, den Wert der Spannung und die Richtung oder Phasenlage derselben. Im Vektor haben wir ein ausgezeichnetes Mittel für die Darstellung von Spannungen und Strömen. Die Länge des Vektors gibt die Grösse der Spannung an und seine *Richtung* die Phasenlage.

Zur Darstellung von Wechselstromgrössen genügen die Vektoren der Ebene, die Physik bedient sich jedoch oft der Vektoren im Raum; unsere Probleme lassen sich aber alle zweidimensional darstellen.

Für die Bezeichnung der Vektoren werden oft die deutschen Buchstaben verwendet. Da diese Buchstaben aber nicht mehr so geläufig sind, verwendet man meistens die folgende Bezeichnung:

$\vec{BC}$

Der Strich mit der Pfeilspitze deutet an, dass es sich um eine gerichtete Grösse handelt.

In Fällen, wo nur der Betrag eine Rolle spielt, wendet man folgende Bezeichnung an:

$|a| = \text{Länge des Vektors } a$

Vektoren, deren Anfangspunkt mit dem Ursprung eines Koordinatensystems zusammenfallen, nennt man Ortsvektoren.

In der Wechselstromtechnik werden oft Vektoren mit der Länge Eins gebraucht, diese Vektoren heissen Einheitsvektor.

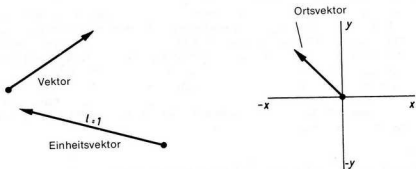


Bild 66

Jeder Vektor der Ebene lässt sich in zwei Komponenten zerlegen. Wir wollen dies an Hand eines Ortsvektors untersuchen.

In Bild 67 sehen wir den Vektor $\vec{U}$ in seine Komponenten $\vec{U}_x$ und $\vec{U}_y$ zerlegt. Zu jedem Vektor existiert eine unendlich grosse Anzahl Komponenten, in welche dieser Vektor zerlegt werden kann.

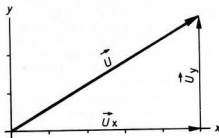
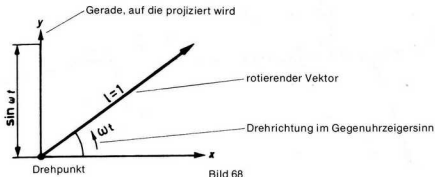


Bild 67

In der Wechselstromtechnik interessiert hauptsächlich die Zerlegung eines Ortsvektors in die Komponenten, die mit der X-Achse oder der Y-Achse zusammenfallen.

Ein für die Wechselstromtechnik wichtiger Sonderfall ist der rotierende Einheitsvektor. In Bild 68 sehen wir einen Einheitsvektor, welcher sich mit kon-



stanter Geschwindigkeit im Gegenuhrzeigersinn um den Drehpunkt dreht. Die Projektion auf der Y-Achse entspricht der Sinusfunktion.

Die Darstellung von Vorgängen in Wechselstromkreisen erfordert oft eine Addition oder Subtraktion verschiedener Vektoren. Überall dort, wo zwei Wechselstromgrößen überlagert werden, ergibt sich als dritte Größe die Addition von zwei Vektoren. Bild 69 zeigt, wie einfach diese Addition vorgenommen wird. Die Vektoren werden parallel verschoben und aneinander gereiht. Der Gesamtvektor ergibt sich aus der Verbindungslinie zwischen dem Anfangspunkt des ersten Vektors und der Spitze des letzten Vektors.

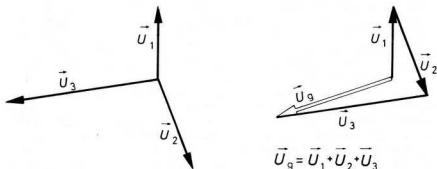


Bild 69

Werden Vektoren voneinander subtrahiert, so wird die Richtung des zu subtrahierenden Vektors um 180° gedreht und der so umgepolte Vektor addiert. Bild 70 zeigt das Beispiel einer Subtraktion.

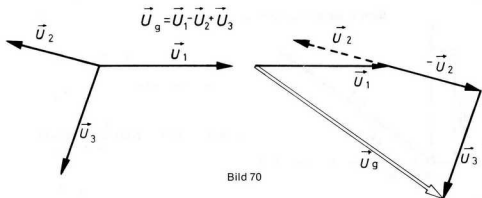


Bild 70

Mehr brauchen Sie im Moment über Vektoren nicht zu wissen. Mit den erworbenen Kenntnissen können Sie die folgenden Probleme leicht lösen.

4. Beispiele

a) Mit Hilfe der Vektordarstellung ist zu beweisen, dass bei einem Verbraucher in Dreieckschaltung der verkettete Strom $\sqrt{3}$ mal grösser ist als der Phasenstrom.

Vorgehen:

- Verbraucherschaltung aufzeichnen
- In der Schaltung Polleiterströme einzeichnen I_R , I_S und I_T
- Phasenströme I_{RS1} , I_{ST2} und I_{TR3} einzeichnen
- Vektordiagramm der Polleiterströme und der Phasenströme zeichnen. Dabei ist zu beachten, dass zwischen den Phasenströmen eine Phasenverschiebung von 120° herrscht. Wir zeichnen den Einfluss der drei Phasenströme auf und vermerken hinter der Bezeichnung, in welchem Polleiter der Strom zufließt. Um 180° gedreht zeichnen wir jetzt den Rückfluss ein und vermerken wiederum, in welchem Polleiter dieser erfolgt. Damit erhalten wir für jeden Polleiter einen hinfließenden und einen rückfließenden Strom. Die vektorielle Addition der Ströme pro Polleiter ergibt den Gesamtstrom für jeden Polleiter. Durch einfaches Ausmessen der Beträge der Vektoren stellen wir fest, dass die Vektoren für die Polleiterströme 1,73 mal länger sind als die Vektoren der Phasenströme. Rechnerischer Beweis: Die Vektorspitzen der Phasenströme liegen auf den Ecken eines regulären Sechsecks, dessen Seitenlänge gleich dem Kreisradius ist, in unserem Fall gleich der Vektorlänge der Phasenströme. Durch den Polvektor wird die Sechseckseite halbiert, diese wiederum halbiert den Polvektor. Nach dem Satz von Pythagoras ist die Länge des halben Polvektors.

$$\frac{I}{2} = \frac{I_{ph}}{2} \sqrt{3}, \text{ die des ganzen Polvektors } I = I_{ph} \cdot \sqrt{3}$$

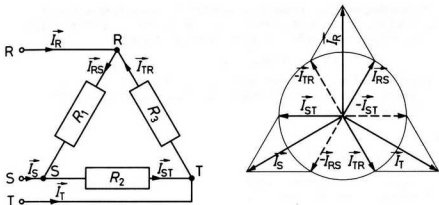


Bild 71

b) Ein Dreiphasennetz mit Nulleiter wird zur Speisung verschiedener ohmscher Verbraucher benutzt. Die einzelnen Phasen werden unterschiedlich belastet. Die Polleiterströme und der Nulleiterstrom sind graphisch zu ermitteln. Bild 72 zeigt die Schaltung.

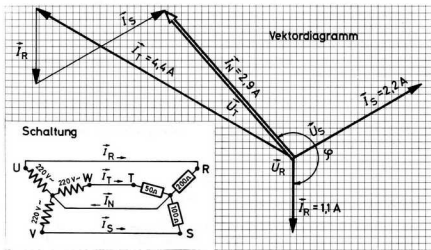


Bild 72

Vorgehen:

- Die Spannungen zwischen Phasen und Nulleiter sind im Vektordiagramm mit einer gegenseitigen Phasenverschiebung von 120° einzutragen.

- Für die Ströme ist ein Massstab zu wählen (im Beispiel pro A zwei cm).
- Die Ströme in jedem Aussenleiter sind zu berechnen und im Diagramm phasengleich mit den Phasenspannungen einzutragen:

$$\vec{I}_R = 1,1 \text{ A}, \vec{I}_S = 2,2 \text{ A}, \vec{I}_T = 4,4 \text{ A}$$

- Der Gesamtstrom $\vec{I}_N$ wird aus dem Diagramm zu 2,9 A herausgelesen, dieser Strom fliesst im Nulleiter. Er weist zum Polleiterstrom $\vec{I}_R$ eine Phasenverschiebung von 221° auf.

5. Das Wesentliche

Beim Dreiphasendrehstrom herrscht zwischen den einzelnen Phasenspannungen eine Phasenverschiebung von 120° .

Bei der Sternschaltung sind die Generatorwicklungen oder die Verbraucherlasten sternförmig geschaltet. Ein Netz in Sternschaltung weist ausser den drei Aussenleitern noch einen Nulleiter auf. Die Spannung zwischen dem Nulleiter und einem Aussenleiter heisst Phasenspannung. Die Spannung zwischen zwei Aussenleitern nennt man verkettete Spannung, sie ist um den Faktor 1,73 mal grösser als die Phasenspannung.

Bei der Dreieckschaltung sind die Generatorwicklungen oder die Verbraucherlasten dreieckförmig geschaltet. Für Dreieckschaltungen gibt es keinen Nulleiter. Ein Verbraucher, der in Dreieckschaltung betrieben wird, und der alle drei Phasen gleichmässig belastet, bezieht über die Polleiter einen Strom, der um den Faktor 1,73 mal grösser ist als der Phasenstrom.

Ein Verbraucher, der ein Dreiphasensystem gleichmässig belastet, bezieht aus diesem System eine Leistung, die dem Produkt von Strom, Spannung und dem Faktor 1,73 entspricht.

Wechselströme und Wechselspannungen lassen sich mit Hilfe von Vektoren darstellen. Ein Vektor zeigt Grösse und Richtung eines Stromes oder einer Spannung an. Vektoren werden einfach addiert, indem man diese parallel verschiebt und aneinanderreihet. Vektoren werden subtrahiert, indem man den einen um 180° dreht und dann addiert.

6. Repetitionsaufgaben (Lösung Seite 440)

- Was verstehen Sie unter dem Ausdruck «verkettete Spannung»?
- Zeichnen Sie das Vektordiagramm für eine verkettete Spannung.
- Wann fliesst im Nulleiter kein Strom?
- Warum ist bei einem Verbraucher, der in Dreieckschaltung betrieben wird, der Polleiterstrom grösser als der Phasenstrom.
- Ein in Dreieckschaltung betriebener Verbraucher belastet die drei Phasen eines 500 V Drehstromnetzes mit je 200 Ohm. Zeichnen Sie das Vektordiagramm für die Phasen- und Polleiterströme.

- f) Ein Generator ist in Sternschaltung geschaltet, die Phasenspannung beträgt 220 V. Er wird durch einen Verbraucher belastet, der Dreieckschaltung aufweist. Eine Phase wird mit 100 Ohm, die zweite mit 80 Ohm und die dritte mit 50 Ohm belastet. Zeichnen Sie das Vektordiagramm für die Leiterströme und geben Sie deren Beträge an.
- g) In einem Nulleiter fließen drei Ströme. Der erste Strom misst 5 A, der zweite Strom misst 7 A und ist gegenüber dem ersten um 50° voreilend, der dritte misst 10 A und ist gegenüber dem zweiten um 170° voreilend. Zeichnen Sie das Vektordiagramm und ermitteln Sie den Gesamtstrom. Welche Phasenlage weist dieser Gesamtstrom gegenüber demjenigen von 5 A auf?
- h) Was ist ein Vektor?

F. Lineare Bauelemente

Unter *linearen* Bauelementen verstehen wir jene, bei denen zwischen Strom und Spannung ein linearer Zusammenhang besteht. Bei den *nichtlinearen* Bauelementen, wie Röhren, Transistoren, Dioden usw., finden wir gekrümmte Kennlinien.

I. Widerstände

1. Einführung

Widerstände gehören zu den Bauelementen der Elektronik, welche in Geräten am häufigsten anzutreffen sind. Ihre Aufgaben sind äusserst vielseitig. Als Vorwiderstände setzen sie zu grosse Spannungen auf den gewünschten Wert herab, oder sie begrenzen Ströme auf bestimmte Grössen. Als Spannungsteiler unterteilen sie Spannungen in bestimmten Verhältnissen. Als Arbeitswiderstände in Röhren- oder Transistorschaltungen helfen sie die verstärkte Spannung zu gewinnen. In Messgeräten werden die Messbereiche mit Hilfe von Widerstandsschaltungen bestimmt. Die Lautstärke in Empfangsgeräten wird durch Potentiometer eingestellt. Die Aufzählung von Anwendungsgebieten für Widerstände liesse sich noch beliebig fortsetzen.

2. Was wissen Sie schon über Widerstände?

(Lösung Seite 444)

- Aus welchem Material sind die meisten kleinen Widerstände hergestellt?
- Welche Widerstände sind in der Regel höher belastbar, Draht- oder Schichtwiderstände?
- Was ist ein Potentiometer?
- Mit welcher Masseinheit werden Widerstände gemessen?

3. Die Widerstände

a. Schichtwiderstände

Beim Schichtwiderstand wird das Widerstandsmaterial in Form einer dünnen Schicht auf einen Körper aus Isoliermaterial aufgetragen. Als Widerstandsmaterialien werden Kohle oder Metalloxyde verwendet. In Bild 73 sehen wir Schichtwiderstände, deren Struktur durch Abkratzen der Lackschicht sichtbar gemacht ist.

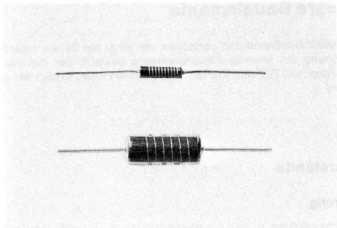


Bild 73

b. Massewiderstände

Der *Massewiderstand* besteht aus einem zylinderförmigen Körper aus gepresster Kohle. Bild 74 zeigt zwei Ausführungen von Massewiderständen, deren Aufbau ebenfalls durch Entfernen der Lackschicht sichtbar gemacht ist.

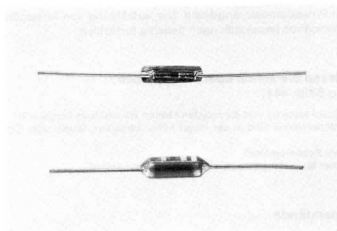


Bild 74

c. Drahtwiderstände

Drahtwiderstände werden für grössere Leistungen verwendet. Das Widerstandsmaterial besteht aus einem schlecht leitenden Draht, welcher auf ein Keramikrohr aufgewickelt wird. Oft werden Drahtwiderstände mit einer ver-

schiebbaren Abgriffschelle versehen. Diese Abgriffschellen ermöglichen die Unterteilung des Widerstandes in zwei Teilwiderstände, das Teilungsverhältnis lässt sich beliebig einstellen. In Bild 75 sehen wir folgende Drahtwiderstände. Drei normale Widerstände mit festem Widerstandswert verschiedener Leistung, links mit Schutzumpressung oder Schutzglasur, rechts mit entfernter Schutzschicht. Ganz rechts ist ein Widerstand mit Abgriffschelle. Drahtwiderstände lassen sich zufolge der Induktivität ihrer Wicklung nur für Gleichstrom oder niederfrequenten Wechselstrom verwenden.

DRAHTWIDERSTÄNDE

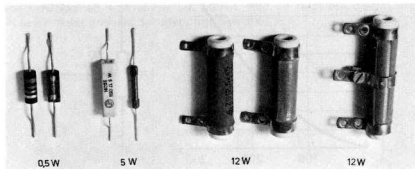


Bild 75

d. Potentiometer

Potentiometer sind Widerstände mit verstellbarem Abgriffschleifer. Sie finden meistens als veränderliche Spannungsteiler Verwendung. Man unterscheidet zwischen *linearen Potentiometern* und *logarithmischen Potentiometern*.

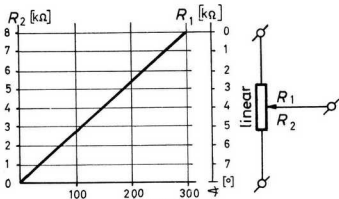
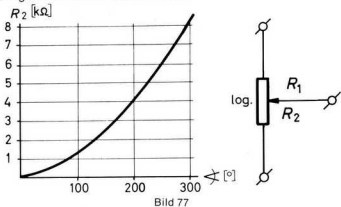


Bild 76

Beim linearen Potentiometer verläuft der Ohmwert eines Teilwiderstandes proportional zum Drehwinkel. Bild 76 zeigt den Verlauf der Potentiometerkurve eines linearen Potentiometers.

Lineare Potentiometer werden oft in Messschaltungen und Messgeräten als variable Spannungsteiler eingesetzt.

Beim logarithmischen Potentiometer verläuft der Ohmwert eines Teilwiderstandes nach einer logarithmischen Kennlinie. Bild 77 zeigt den Kurvenverlauf eines logarithmischen Potentiometers.



Logarithmische Potentiometer werden meistens als Lautstärkeregler und als Tonblenderegler in NF-Verstärkern verwendet. Lineare Regler sind für diesen Zweck ungeeignet, weil sich infolge der logarithmischen Empfindlichkeit des menschlichen Ohres der Regelbereich an einem Ende stark zusammendrängen würde.

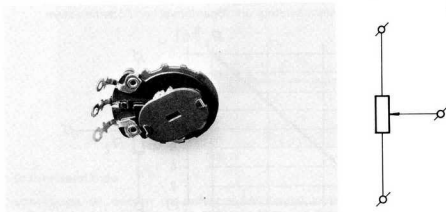


Bild 78

Potentiometer werden in verschiedenen Ausführungsformen auf den Markt gebracht. Am gebräuchlichsten ist das *Kohleschichtpotentiometer*. Es enthält eine kreisförmige Bahn aus Kohle, auf welcher der auf einer Achse montierte Schleifer als verstellbarer Abgriff aufliegt. Kohleschichtpotentiometer werden für Ohmwerte von einigen Ohm bis zu einigen Megohm und für Belastungen bis zu 0,5 Watt hergestellt. In Bild 78 sehen wir ein Kohleschichtpotentiometer und das dazugehörige Symbol.

Das *drahtgewickelte Potentiometer* weist an Stelle der Kohleschicht eine Drahtwicklung auf. Solche Potentiometer können für grosse Leistungen hergestellt werden. Für Messzwecke lassen sich drahtgewickelte Potentiometer mit sehr kleinen Toleranzwerten bauen. Bild 79 zeigt ein drahtgewickelt Potentiometer und das dazugehörige Symbol.

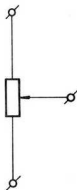
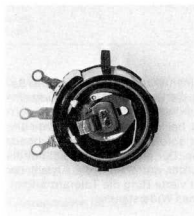


Bild 79

Einstell- oder Trimpotentiometer sind Potentiometer für Einstellzwecke. Sie sind in der Ausführung als Kohlepotentiometer und als Drahtpotentiometer anzutreffen. Sie finden in Schaltungen Anwendung, in welchen Widerstandswerte oder Spannungsteilerverhältnisse abgeglichen werden müssen. Der Unterschied zu einem gewöhnlichen Potentiometer liegt darin, dass die Einstellung meist im Innern eines Gerätes mit Hilfe eines Schraubenziehers anstelle eines allgemein zugänglichen Einstellknopfes vorgenommen werden muss. In Bild 80 sind zwei Trimpotentiometer mit dem dazugehörigen Symbol dargestellt, links in Normalausführung, rechts für Montage auf gedruckte Schaltung.

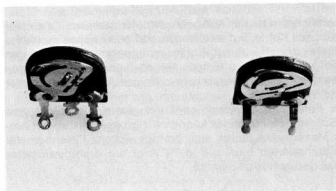
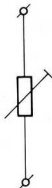


Bild 80



e. Kenndaten von Widerständen

Der Widerstand ist gekennzeichnet durch seinen *Widerstandswert*, seine *Belastbarkeit*, die *Toleranz* des Widerstandswertes und den *Temperaturkoeffizienten*.

Der Widerstandswert und die Toleranz sind bei den meisten Schicht- und Massewiderständen mit Hilfe des Farbcodes sofort ablesbar. Der Farbcodier arbeitet bei Widerständen mit farbigen Ringen. Der erste Ring bezeichnet die erste Zahl, der zweite Ring die zweite Zahl, der dritte Ring die Anzahl der Nullen hinter den beiden Zahlen, während der vierte Ring die Toleranz angibt. Bild 81 zeigt ein Beispiel für die Codierung eines Widerstandes.

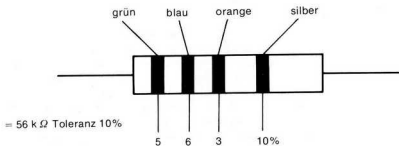


Bild 81

In Tabelle 9 sind alle Angaben über den Farbcode der Widerstände zusammen-
gestellt.

Farbe	1. Ring 1. Zahl	2. Ring 2. Zahl	3. Ring Multiplikator	4. Ring Toleranz $\pm$ %
schwarz	0	0	x1 = 10^0	—
braun	1	1	x10 = 10^1	1
rot	2	2	x100 = 10^2	2
orange	3	3	x1000 = 10^3	—
gelb	4	4	x10000 = 10^4	—
grün	5	5	x100000 = 10^5	—
blau	6	6	x1000000 = 10^6	—
violett	7	7	x10000000 = 10^7	—
grau	8	8	—	—
weiss	9	9	—	—
gold	—	—	x0,1 = 10^{-1}	5
silber	—	—	x0,01 = 10^{-2}	10
fehlt	—	—	—	20

Tabelle 9

Die Widerstandswerte der handelsüblichen Widerstände richten sich nach der *Normreihe*. Die Werte innerhalb der Normreihe sind so gewählt, dass mit den Widerständen der entsprechenden Toleranzgruppe alle Zwischenwerte möglich sind.

Toleranzreihe für 10%:

10, 12, 15, 18, 22, 27, 33, 39, 47, 56, 68, 82

Toleranzreihe für 5%:

10, 11, 12, 13, 15, 16, 18, 20, 22, 24, 27, 30, 33, 36, 39, 43, 47, 51, 56, 62, 68, 75, 82, 91

In Bild 82 erkennen wir die graphische Darstellung der beiden Toleranzreihen. Die senkrechten Striche geben den Platz des entsprechenden Widerstandswertes an.

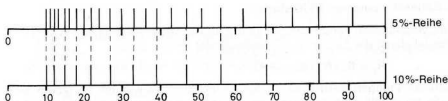


Bild 82

Die *Belastbarkeit* ist durch das Widerstandsmaterial und die geometrischen Abmessungen des Widerstandes bestimmt. Die gebräuchlichsten Belastungsgrenzen für Schicht- und Massewiderstände sind:

$$0,1 - 0,25 - 0,5 - 1 \text{ Watt}$$

Mit drahtgewickelten Widerständen erreicht man jede beliebige Belastbarkeit. Normwerte für drahtgewickelte Widerstände sind:

$$0,5 - 1 - 2 - 3 - 4 - 6 - 12 - 25 - 50 \text{ Watt}$$

Der Temperaturkoeffizient ist eine Verhältniszahl, die angibt um welchen Faktor sich der Wert eines Widerstandes pro °C Temperaturänderung ändert. Die Temperaturkoeffizienten der gebräuchlichsten Metalle sind positiv, Kohle weist einen negativen Beiwert auf. In Tabelle 10 sind die Temperaturkoeffizienten der wichtigsten Materialien zusammengestellt.

Material	Temperaturkoeffizient α_{20° *
Aluminium	0,0039
Eisen	0,0052–0,0062
Kohle	–0,0005
Konstantan	±0,0002
Kupfer	0,00393
Silber	0,0034
Gold	0,0038

Tabelle 10

* Zu beachten ist, dass α selbst temperaturabhängig ist.

Die Berechnung des Warmwiderstandes erfolgt nach der einfachen Beziehung:

$$R_w = R_{20^\circ} [1 + \alpha (\vartheta - 20^\circ)]$$

R_w Warmwiderstand

R_{20° Widerstand bei 20 °C

α Temperaturkoeffizient

ϑ Temperatur des Widerstandes in °C

f. Serieschaltung von Widerständen

Der Gesamtwiderstand einer Schaltung, aus in Serie geschalteten Widerständen ist gleich der Summe der Einzelwiderstände.

$$R_g = R_1 + R_2 + R_3 \dots + R_n$$

Serieschaltungen werden oft als *Spannungsteiler* verwendet. An jedem Teilwiderstand fällt eine Teilspannung ab. Durch entsprechende Wahl der Teilwiderstände, kann jedes beliebige Spannungsteilerverhältnis erreicht werden.

Die Berechnung dieser Spannungsteiler basiert auf dem ohmschen Gesetz. Bild 83 zeigt einen einfachen Spannungsteiler mit der Bestimmungsgleichung für die Teilspannung.

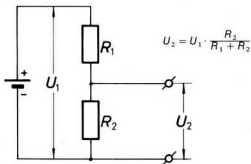


Bild 83

g. Parallelschaltung von Widerständen

Bei der Parallelschaltung liegt an allen Widerständen die gleiche Spannung. Die Summe aller Teilströme ergibt den Gesamtstrom der Schaltung. Bild 84 zeigt die Zusammenhänge.

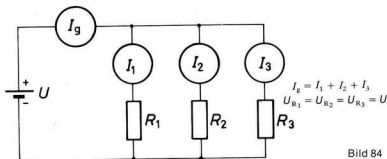


Bild 84

Wir haben als Reziprokwert des Widerstandes den Leitwert kennengelernt. Ströme und Leitwerte verhalten sich zueinander proportional, wir dürfen deshalb sagen:

Bei der Parallelschaltung von Widerständen ergibt die Summe der einzelnen Leitwerte den Gesamtleitwert.

$$G_g = G_1 + G_2 + G_3 + \dots G_n$$

Zur Berechnung des Gesamtwiderstandes einer Parallelschaltung werden die Leitwerte addiert. Zum so erhaltenen Gesamtleitwert wird der Reziprokwert gesucht, dieser entspricht dem Gesamtwiderstand.

$$R_g = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \dots + \frac{1}{R_n}}$$

h. Widerstandswert und Leiter

Zur Vermeidung von unnötigen Wärmeverlusten muss der Widerstandswert einer Leitung möglichst klein gehalten werden. Die Leitungen müssen entsprechend ihrem Verwendungszweck dimensioniert werden. Der Widerstandswert eines Leiters hängt von drei Faktoren ab:

Leiterlänge
Leiterquerschnitt
Leitermaterial

Je länger die Leitung gemacht wird, desto grösser wird ihr Widerstandswert. Der Leitungswiderstand verhält sich zur Leiterlänge proportional. Der Einfluss des Leitungsquerschnittes auf den Leitungswiderstand lässt sich am mechanischen Modell der Wasserleitung studieren. Je grösser der Querschnitt einer Wasserleitung gewählt wird, desto geringer wird der Widerstand, den die betreffende Leitung dem durch sie fliessenden Wasser entgegensetzt. Die elektrische Leitung zeigt ein analoges Verhalten. Der Leitungswiderstand verhält sich umgekehrt proportional zum Leitungsquerschnitt. Die elektrischen Eigenschaften des Materials beeinflussen ebenfalls den Widerstandswert des Leiters. Der Einfluss des Widerstandsmaterials wird mit einer Materialkonstante angegeben. Man verwendet hierzu den *spezifischen Widerstand*.

Der spezifische Widerstand gibt an, wie gross der Widerstandswert eines Leiters aus dem betreffenden Material mit der Länge von einem Meter und dem Querschnitt von einem Quadratmillimeter ist.

Als Formelzeichen wird das ϱ (rho) verwendet.

$$\text{Die Masseinheit lautet: } \frac{\text{V mm}^2}{\text{A m}} \text{ oder } \frac{\Omega \text{ mm}^2}{\text{m}}$$

In der Tabelle 11 sind die Werte für den spezifischen Widerstand verschiedener Leitermaterialien zusammengestellt.

Spezifischer Widerstand einiger Metalle und Legierungen.

Metall/Legierung	$\varrho \left[\frac{\text{V} \cdot \text{mm}^2}{\text{A} \cdot \text{m}} \right]$
Silber	0,0163
Kupfer	0,0177
Gold	0,023
Aluminium	0,0286
Eisen	0,096
Konstantan	0,50

Tabelle 11

Oft arbeitet man mit dem Reziprokwert des spezifischen Widerstandes. Dieser Wert wird mit *Leitfähigkeit* bezeichnet. Die Leitfähigkeit sagt aus, wie gross

der Leitwert eines Leiters mit der Länge von 1 m und dem Querschnitt von 1 mm² ist.

Als Formelzeichen wird das γ (gamma) verwendet.

Die Masseinheit lautet: $\frac{A \cdot m}{V \cdot mm^2}$ oder $\frac{S \cdot m}{mm^2}$

Es ergeben sich folgende Beziehungen:

$$R = \frac{\rho \cdot l}{A}; \quad [R] = \frac{\Omega \cdot mm^2 \cdot m}{m \cdot mm^2} = \Omega \quad l = \text{Leiterlänge, } A = \text{Leiterquerschnitt}$$

wenn mit dem spezifischen Widerstand gerechnet wird.

$$G = \frac{\gamma \cdot A}{l}; \quad [G] = \frac{m \cdot mm^2 \cdot S}{m \cdot mm^2} = S \quad \text{wenn mit der Leitfähigkeit gerechnet wird.}$$

4. Beispiele

a. Zwei Spulen werden in Serie geschaltet. Die eine Spule enthält 600 m Kupferdraht mit einem Durchmesser von 0,3 mm, die andere Spule besteht aus 200 m Kupferdraht mit einem Durchmesser von 0,8 mm. Welchen Widerstand weist die Schaltung bei einer Umgebungstemperatur von 50° auf?

Vorgehen:

1. Schritt: Berechnung der beiden Spulenwiderstände für 20° C

– Grundformel anschreiben:

$$R = \frac{\rho \cdot l}{A}$$

– Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen:

$$R_1 = \frac{0,0177 \cdot 600}{0,15^2 \cdot \pi} \quad \frac{\Omega \cdot mm^2 \cdot m}{m \cdot mm^2}$$

$$R_1 = 150 \, \Omega$$

$$R_2 = \frac{0,0177 \cdot 200}{0,4^2 \cdot \pi}$$

$$R_2 = 7,04 \, \Omega$$

2. Schritt: Berechnung des Gesamtwiderstandes

– Grundformel anschreiben

$$R_g = R_1 + R_2$$

– Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$R_g = 150 \, \Omega + 7,04 \, \Omega$$

$$R_g = 157,04 \, \Omega$$

3. Schritt: Berechnung der Schaltung für eine Widerstandstemperatur von 50° C

– Grundformel anschreiben

$$R_w = R_{20^\circ} [1 + \alpha_{20^\circ} \cdot (\vartheta - 20^\circ)]$$

– Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$R_w = 157,04 [1 + 0,00393 \cdot (50 - 20)]$$

$$R_w = 175,5 \, \Omega$$

b. Berechnen Sie die Schaltung nach Bild 85

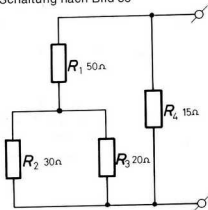


Bild 85

Vorgehen:

1. Schritt: Berechnung der Parallelschaltung $R_2 \parallel R_3$

– Grundformel anschreiben:

$$\frac{1}{R_{g''}} = \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

– Grundformel nach R_g umstellen

$$R_{g''} = \frac{R_2 \cdot R_3}{R_2 + R_3}$$

– Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$R_{g''} = \frac{30 \cdot 20}{50}$$

$$R_{g''} = 12 \, \Omega$$

2. Schritt: Berechnung der Schaltung $R_1 + (R_2 \parallel R_3)$

– Grundformel anschreiben

$$R_{g'} = R_1 + (R_2 \parallel R_3)$$

– Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$R_{g'} = 50 + 12$$

$$R_{g'} = 62 \, \Omega$$

3. Schritt: Berechnung der Gesamtschaltung

– Grundformel anschreiben:

$$R_g = \frac{R_{g'} \cdot R_4}{R_{g'} + R_4}$$

– Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$R_g = \frac{62 \cdot 15}{77}$$

$$R_g = 12,07 \, \Omega$$

5. Das Wesentliche

Wir kennen verschiedene Bauarten von Widerständen. In der Elektronik finden hauptsächlich Schichtwiderstände, Massewiderstände und Drahtwiderstände Verwendung.

Potentiometer sind Widerstände mit verstellbarem Abgriff. Sie werden als Kohleschichtpotentiometer und als drahtgewickelte Potentiometer hergestellt. Die Widerstandswerte sind normiert, gebräuchlich sind die 5%-Normreihe und die 10%-Normreihe. Der Widerstandswert und die Toleranz sind in Form von Farbringen nach einem Farbcode auf den Widerständen festgehalten.

Widerstände weisen einen Temperaturkoeffizienten auf, der angibt, wie sich der Widerstandswert unter dem Einfluss der Temperatur ändert.

Eine Serieschaltung von Widerständen weist einen Gesamtwiderstand auf, der der Summe der Teilwiderstände entspricht.

Bei der Parallelschaltung von Widerständen sind die Leitwerte der einzelnen Widerstände zu addieren, um den Gesamtleitwert der Schaltung zu ermitteln.

Die Widerstandswerte von Leitungen lassen sich errechnen, wenn der spezifische Widerstand oder die Leitfähigkeit des Leitermaterials, die Länge des Leiters und dessen Querschnitt bekannt sind. Der Widerstandswert ist proportional zum spezifischen Widerstand und zur Leiterlänge und umgekehrt proportional zum Leitungsquerschnitt.

6. Repetitionsaufgaben (Lösung Seite 445)

- Nennen Sie drei Arten von Festwiderständen, die Sie kennen.
- Was ist ein Potentiometer?
- Welches ist der Unterschied zwischen einem logarithmischen und einem linearen Potentiometer?
- Geben Sie für beide Arten je ein Anwendungsbeispiel.
- Wo werden Trimpotentiometer gebraucht?
- Nennen Sie für alle Zahlen zwischen 0 und 9 die entsprechende Farbe im Farbcode.
- Wie werden die Toleranzen der Widerstände gekennzeichnet?
- Welche Arten von Normreihen kennen Sie?
- Wie errechnet sich eine Serieschaltung von Widerständen?
- Welche Gesetzmässigkeiten gelten für die Parallelschaltung von Widerständen?
- Von welchen Faktoren hängt der Widerstandswert eines Leiters ab?
- Was verstehen Sie unter dem Ausdruck «spezifischer Widerstand»?
- Zwei Spulen L_1 und L_2 sind in Serie geschaltet, parallel zu dieser Schaltung liegt die Spule L_3 . Die Temperatur in diesen Spulen beträgt 60°C . Sie kennen folgende Spulendaten:
 - L_1 Drahtlänge 500 m, Drahtdurchmesser 0,7 mm, Material des Drahtes: Kupfer
 - L_2 Drahtlänge 210 m, Drahtdurchmesser 0,3 mm, Material des Drahtes: Aluminium
 - L_3 Drahtlänge 50 m, Drahtdurchmesser 0,6 mm, Material des Drahtes: Eisen ($\alpha_{20^\circ} = 0,0055$)Berechnen Sie den Gesamtwiderstand der Schaltung bei 60°C .

II. Kondensatoren

1. Einführung

Eines der wichtigsten Bauelemente der Elektronik, insbesondere der Wechselstromtechnik, ist der Kondensator. Es existieren praktisch keine Schaltungen und Geräte der Nachrichtentechnik, in welchen nicht Kondensatoren in den verschiedensten Ausführungsformen und Grössen verwendet werden. Der Kondensator ist zugleich einer der ältesten Bausteine der Physik, schon im letzten Jahrhundert wurden mit Kondensatoren physikalische Versuche angestellt. Die damaligen Kondensatoren bestanden aus Glasgefässen, welche innen und aussen mit einem leitenden Belag versehen waren. Wegen ihrem gefässartigen Aussehen und ihrer Herkunft wurden sie «Leidener-Flaschen» genannt. Die heutigen Kondensatoren haben mit diesen Leidener-Flaschen nur noch das Funktionsprinzip gemeinsam. Die Ausführungsformen wurden den Bedürfnissen der modernen Technik angepasst.

Kondensatoren finden in Gleichstromkreisen Verwendung als Siebglieder, als Zeitglieder und zur Funkenlöschung. In Niederfrequenzkreisen treffen wir Kondensatoren als Kopplungselemente und als Bestandteile von Filtern an. In Hochfrequenzkreisen werden sie oft als Bausteine von Schwingkreisen verwendet.

2. Was wissen Sie schon über Kondensatoren?

(Lösung Seite 447)

- a) Wie ist der grundsätzliche Aufbau eines Kondensators?
- b) Welche Masseinheit wird für Kondensatoren verwendet?
- c) Sperrt ein Kondensator den Gleichstrom?
- d) Welche Eigenschaften hat der Kondensator im Wechselstromkreis?
- e) Welche Arten von Kondensatoren kennen Sie?
- f) Was ist eine elektrische Feldstärke?

3. Kondensatoren

a. Definition

Der Kondensator ist ein Bauelement, das die Eigenschaft hat, elektrische Ladung zu speichern. In Gleichstromkreisen wirkt der Kondensator wie eine Sperre; er setzt dem Gleichstrom einen unendlich hohen Widerstand entgegen. In Wechselstromkreisen wirkt er wie ein Widerstand; er setzt dem Wechselstrom einen Widerstand entgegen, dessen Grösse vom Wert des Kondensators und der Frequenz abhängt.

b. Prinzip

Ein Kondensator besteht aus zwei Metallplatten, die sich isoliert gegenüberstehen. Als Isolator kann Luft oder ein anderes gutes Isoliermaterial verwendet werden. Das Isoliermaterial wird Dielektrikum genannt. In Bild 86 sehen wir den prinzipiellen Aufbau und das Symbol eines Kondensators.

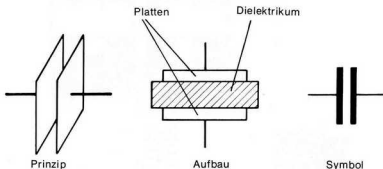


Bild 86

c. Die elektrische Ladung Q

Die elektrische Ladung Q ist mit der Elektrizitätsmenge identisch. Sie kann mit der Wassermenge verglichen werden, die in einem Behälter gespeichert ist.

Versuch:

Wir stellen uns eine Schaltung gemäss Bild 87a zusammen.

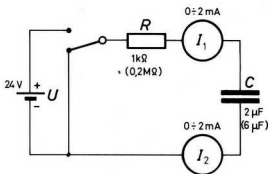


Bild 87a

In Bild 87b erkennen wir den Versuchsaufbau.

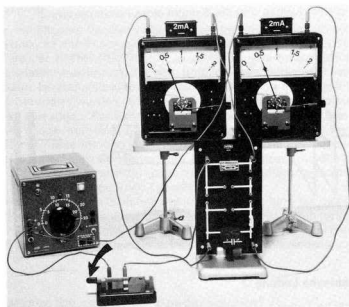


Bild 87b

Versuchsablauf:

Wir schalten den Schalter um auf die Spannungsquelle. Beide Strommesser zeigen einen gleich grossen Stromstoss an. Legen wir den Schalter wieder in die Ruhestellung zurück, zeigen die beiden Strommesser einen gleich grossen Stromstoss wie vorher an, aber entgegengesetzt gerichtet.

Wir wechseln den Widerstand $R = 1\text{ k}\Omega$ gegen einen solchen von $200\text{ k}\Omega$ aus. Der Stromstoss beim Einschalten wie auch beim Ausschalten ist jetzt kleiner, dauert dafür aber länger. Nach einer kurzen Zeit, etwa 2 s, ist im Kreis kein Strom mehr messbar.

Wir ersetzen den Kondensator durch einen mit grösserer Kapazität und wiederholen den Versuch. Die Stromstösse dauern nun länger, was sich – der Trägheit des Messsystems wegen – durch stärkere Zeigerausschläge äussert.

Aus dem Versuch ziehen wir folgende Lehre:

Der Kondensator stellt im Gleichstromkreis einen Unterbruch dar. Im Einschaltmoment fliesst ein Strom, der rasch abnimmt. Die Dauer des Strom-

stosses hängt vom Wert des Vorwiderstandes und von der Kapazität des Kondensators ab. Der Strom, der in den Kondensator hineinfliesst, ist gleich gross wie derjenige, der abfliesst. Der Versuch beweist, dass eine gewisse Elektrizitätsmenge in den Kondensator hineingeflossen ist. Diese Elektrizitätsmenge oder Ladung wird im Kondensator gespeichert. Ein mechanisches Modell hilft uns den Vorgang zu veranschaulichen. Bild 88 zeigt unser Modell.

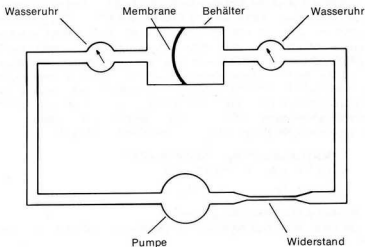


Bild 88

Ein Gefäss ist durch eine Gummimembrane in zwei Hälften geteilt. Jede Kammer ist an ein Wasserleitungssystem angeschlossen, dessen treibende Kraft eine Pumpe ist. Das ganze System ist mit Wasser gefüllt. Die Pumpe drückt das Wasser in eine Kammer, die Membrane dehnt sich aus und drückt die genau gleiche Wassermenge aus der anderen Kammer heraus. Die Wassermenge wird mit zwei Wasseruhren gemessen. Beide Uhren zeigen die gleiche Menge an. Wenn wir nun den Querschnitt der Wasserleitung auf einer gewissen Länge stark verkleinern, wird der Wasserfluss schwächer, dafür dauert er länger. Wenn wir ein grösseres Gefäss verwenden, wird der Wasserfluss von längerer Dauer.

Durch die Membrane ist kein Tropfen Wasser durchgetreten und trotzdem haben wir einen Stromfluss. Genau gleich verhält sich der Kondensator. Kein Strom wird von der einen Platte durch den Isolator zur anderen Platte fliessen,

und trotzdem messen wir im äusseren Kreis einen kurzen Stromstoss. Würden wir die beiden Zuleitungen zum Wassergefäss unterbinden und dieses aus dem Kreis herausnehmen, so würden wir an den Leitungsenden einen gewissen Druck verspüren. Dieser rührt von der gespannten Membrane her. Analog dazu verhält sich der Kondensator. Wenn man ihn aus dem Stromkreis herausnimmt, ist er geladen, er weist eine Spannung auf. Bei unserem Versuch haben wir die Ladung ausgeglichen, indem wir den Kondensator vor der Wiederholung des Versuches kurzgeschlossen haben. Der Funke, der dabei entstand, zeigte den Ladungsausgleich an.

Die Wasseruhren haben die Wassermenge gemessen, während die Instrumente den Strom anzeigten. Wenn wir die *Elektrizitätsmenge* bestimmen wollen, dann haben wir den geflossenen Strom mit der Zeit, während welcher ein Stromfluss stattfand, zu multiplizieren. Wir erinnern uns, dass elektrischer Strom gleich geflossene Elektrizitätsmenge pro Zeiteinheit bedeutet. Ein elektrischer Strom hat die Grösse von einem Ampère, wenn in einem Leiter pro Sekunde $6,26 \cdot 10^{18}$ Elektronen fliessen. Unter elektrischer Ladung verstehen wir die Anzahl Elektronen oder Elementarladungen. Unter Elementarladung versteht man die Ladung eines einzelnen Elektrons. Die Einheit der Ladung ergibt sich demzufolge aus dem Produkt von Strom und Zeit:

Elektrische Ladung = Strom mal Zeit

Ladung = Ampère mal Sekunden

$Q = I \cdot t$ [As oder Coulomb]

Das Formelzeichen für die Ladung ist das Q

Die Masseinheit im Giorgi-System ist die *Ampèresekunde* (As) oder das *Coulomb*. $1 \text{ C} = 1 \text{ As}$.

d. Das elektrische Feld

Sobald an die Platten eines Kondensators eine Spannung angelegt wird, stehen sich positive und negative Ladungen gegenüber. Diese Ladungen üben Kräfte aufeinander aus. Der Bereich, in welchem diese Kräfte wirksam sind, wird *elektrisches Feld* genannt. Man denkt sich analog zum magnetischen Feld Kraftlinien als Träger des Feldes. In Bild 89 sind diese Kraftlinien dargestellt.

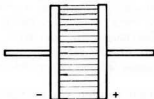


Bild 89

Die Kraftlinien treten bei der positiven Platte aus und bei der negativen Platte ein. Entlang dieser Feldlinien entsteht ein Spannungsgefälle. Die Grösse dieses Spannungsgefälles ist ein Mass für die elektrische Feldstärke. Die elektrische Feldstärke ist die Spannung je Längeneinheit.

Da die Feldstärke eine gerichtete Grösse ist, kann sie als Vektor dargestellt werden. Ihr Formelzeichen ist deshalb $\vec{E}$ oder $\vec{E}$.

Zwecks Vereinfachung wird für die folgenden Betrachtungen ein homogenes Feld vorausgesetzt. Somit werden im weiteren nur noch die Beträge der Vektoren berücksichtigt.

Die Masseinheit für die Feldstärke ist das V/m. Die Ursache des elektrischen Feldes dagegen ist die Ladung. Ohne Ladung kein Feld, je grösser die Ladung desto kräftiger das Feld.

Je kleiner die Plattenoberfläche bei gleichbleibender Ladung gemacht wird, desto dichter wird das Feld. Die *Dichte des elektrischen Feldes* wird als Ladung pro Flächeneinheit angegeben. Sie bezieht sich auf die Ladung pro Quadrat-zentimeter Plattenfläche.

Dichte des elektrischen Feldes = Ladung pro Flächeneinheit

[Dichte] = Ampèresekunden pro Quadratmeter

$$D = \frac{Q}{A} \quad \frac{\text{As}}{\text{m}^2}$$

Für den Begriff der Dichte verwendet man oft die Bezeichnung «dielektrische Verschiebung».

Vom Kondensator wissen wir bis jetzt, dass er in der Lage ist eine elektrische Ladung aufzunehmen. Der geschilderte Versuch hat uns gezeigt, dass die aufgenommene Ladung grösser wird, wenn die Kapazität grösser gemacht wird. Wir haben uns noch nicht mit dem Fassungsvermögen des Kondensators befasst, auch haben wir die Spannung, die am geladenen Kondensator entsteht, noch nicht näher betrachtet. Bevor wir uns diesen beiden Grössen zuwenden, wollen wir den Zusammenhang zwischen Dichte und Feldstärke untersuchen. Wir stellen uns einen aus zwei festen Platten bestehenden Kondensator vor. Weder die Grösse der Platten noch der Plattenabstand seien veränderlich. Der Kondensator weist demzufolge eine bestimmte unveränderliche Kapazität auf. Wir bringen nun eine bestimmte Ladung in den Kondensator, wobei sich eine bestimmte Dichte D einstellt. Das Feld wird nun eine bestimmte Feldstärke E aufweisen. Wir lassen eine zusätzliche Ladung in den Kondensator fliessen. Die Feldstärke sowie die Dichte nehmen zu.

Da wir uns das elektrische Feld aus Feldlinien bestehend vorstellen, und die Ladung die Ursache des Feldes ist, muss zwischen der Dichte und der Feldstärke ein Zusammenhang bestehen.

Dieser wird durch einen Proportionalitätsfaktor ausgedrückt.

$$D = \epsilon \cdot E$$

Der Faktor ϵ (epsilon) heisst *absolute Dielektrizitätskonstante* und setzt sich zusammen aus:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r; \varepsilon_0 = 0,8855 \cdot 10^{-11} \frac{\text{As}}{\text{Vm}}$$

ε_r = relative Dielektrizitätskonstante.

ε_0 = Dielektrizitätskonstante des leeren Raumes.

Beim Studium der magnetischen Erscheinungen sind wir auf den Faktor μ_0 gestossen, dieser Faktor ist eine Naturkonstante und diente als Umrechnungsfaktor von einem Masssystem in das andere. Die gleiche Aufgabe fällt nun ε_0 zu.

Die Masseinheit für ε_0 ergibt sich aus folgender Gleichung:

$$\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r = \frac{D}{E} \quad \text{wir machen die Einheitenprobe:}$$

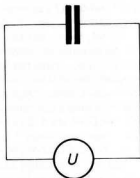
$$[\varepsilon_0] = \frac{\text{As}}{\text{m}^2} \cdot \frac{\text{m}}{\text{V}} = \frac{\text{As}}{\text{Vm}}$$

Die absolute Dielektrizitätskonstante wird später zur Berechnung der Kapazität verwendet.

e. Die Kapazität eines Kondensators

Die *Kapazität* eines Kondensators gibt an, wie gross die aufgenommene Ladung bei einer bestimmten Spannung ist.

Wir wollen die Zusammenhänge an Hand eines Versuches studieren. Bild 90 zeigt uns das Schaltungsprinzip des Versuches.



Elektrostatisches Voltmeter
oder Elektrometer

Bild 90

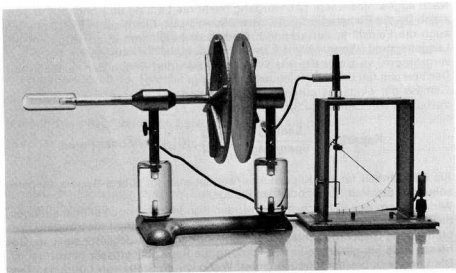


Bild 91

In Bild 91 erkennen wir die Versuchsanordnung. Ein Plattenkondensator wird mit einem geriebenen Hartgummistab aufgeladen. Durch die Reibung des Stabes mit einem Tuch sammelt sich auf dem Isolierstab eine elektrische Ladung an. Diese Ladung wird nun dem Kondensator zugeführt, indem man eine Platte mit dem Stab berührt. Infolge der Ladung entsteht zwischen den beiden Kondensatorplatten ein elektrisches Feld mit einer bestimmten Feldstärke. Die dadurch entstehende Spannung zwischen den Kondensatorplatten wird mit einem *Elektrometer* gemessen. Das Elektrometer hat einen praktisch unendlich hohen Innenwiderstand, es verbraucht keine Leistung. Es arbeitet auf dem Prinzip der Anziehung und Abstossung im elektrischen Feld. Da es als Isolator wirkt, kann die Kondensatorladung nicht über das Instrument abfließen.

Der Kondensator wird mit dem Isolierstab so lange aufgeladen, bis sich ein mittlerer Ausschlag am Elektrometer einstellt. Jetzt wird der Plattenabstand langsam vergrößert, gleichzeitig beginnt der Ausschlag am Elektrometer zu steigen. Wird der Plattenabstand verkleinert, so sinkt die Elektrometerspannung ab. Der Versuch lässt sich mit der gleichen Ladung beliebig oft wiederholen.

Nach abgeschlossenem Ladevorgang bleibt die Ladung im Kondensator konstant. Da die Plattenoberfläche unveränderlich ist, bleibt somit die Dichte wie auch die Feldstärke unverändert. Feldstärke heisst nun aber Spannung pro Längeneinheit. Wenn wir die Länge der Feldlinien bei konstanter Feldstärke vergrössern, so steigt die Spannung zwischen den Enden der Feldlinien an. Der Versuch hat diese Überlegungen bestätigt.

Gemäss der eingangs aufgeführten Definition der Kapazität stellt diese das Verhältnis von Ladung zu Spannung dar.

$$\text{Kapazität} = \frac{\text{Ladung}}{\text{Spannung}}; C = \frac{Q}{U}; [C] = \text{As/V oder Farad}$$

Als Masseinheit für die Kapazität verwendet man im Giorgi-System Ampèresekunden pro Volt (As/V) oder das Farad (F)

Wir erweitern den Versuch, indem wir den Kondensator noch einmal aufladen, die Spannung am Elektrometer beachten und nun zwischen die Kondensatorplatten eine Glasplatte schieben. Die Spannung am Kondensator sinkt ab. Das heisst, dass bei gleichbleibender Ladung die Kapazität grösser geworden ist. Die Lehre aus diesem Versuch lautet: Wenn wir an Stelle von Luft einen besseren Isolator als Dielektrikum verwenden, so steigt die Kapazität des Kondensators an.

Wir wollen nun die Zusammenhänge zwischen den geometrischen Abmessungen des Kondensators und der Grösse seiner Kapazität aufspüren. Der eben gezeigte Versuch hat uns bereits zwei kapazitätsbestimmende Faktoren geliefert:

1. Bei zunehmendem Plattenabstand und gleichbleibender Ladung steigt die Spannung am Kondensator an. Ferner haben wir festgehalten, dass die Kapazität das Verhältnis von Ladung zu Spannung ist. Daraus folgt, dass die Kapazität mit zunehmendem Plattenabstand kleiner wird. *Die Kapazität verhält sich umgekehrt proportional zum Plattenabstand.*

2. Im gleichen Versuch haben wir gesehen, dass die Spannung bei gleichbleibender Ladung am Kondensator absinkt, wenn zwischen die Platten ein besserer Isolator als Luft gebracht wird. Daraus haben wir geschlossen, dass die Kapazität angestiegen ist. Der Faktor, um welchen die Kapazität bei Verwendung eines bestimmten Materials als Dielektrikum ansteigt, heisst *relative Dielektrizitätskonstante* ϵ_r . Er ist als Proportionalitätsfaktor dimensionslos.

Die Kapazität verhält sich proportional zur relativen Dielektrizitätskonstante.

3. Aus den vorstehend beschriebenen Experimenten und Überlegungen lässt sich leicht ableiten, dass bei zunehmender Plattenoberfläche und gleichbleibender Ladung die Dichte des elektrischen Feldes abnimmt. Da jedoch Dichte und Feldstärke mit der Dielektrizitätskonstante verknüpft sind und sich beide Grössen zueinander proportional verhalten, nimmt bei zunehmender Plattenoberfläche die Feldstärke ab. Abnehmende Feldstärke bei gleichbleibender Ladung ist aber gleichbedeutend mit Abnahme der Spannung am Kondensator.

sator, was wiederum besagt, dass die Kapazität zugenommen hat. *Kapazität und Plattenoberfläche verhalten sich zueinander proportional.*
Den Einfluss der Dielektrizitätskonstante wollen wir mit Hilfe der Algebra bestimmen. Wir wissen, dass die Dichte des elektrischen Feldes über die Dielektrizitätskonstante mit der Feldstärke verknüpft ist.

$$D = \varepsilon E$$

Für die Dichte setzen wir deren Bestimmungsgleichung:

$$D = \frac{Q}{A}$$

Zwischen der Feldstärke und der Spannung am Kondensator besteht folgender Zusammenhang:

$$E = \frac{U}{d}$$

Wir dürfen deshalb schreiben:

$$\frac{Q}{A} = \frac{\varepsilon \cdot U}{d}; \text{ und damit } Q = U \cdot \frac{\varepsilon \cdot A}{d}$$

Da $C = \frac{Q}{U}$ ergibt sich auch:

$$C = \frac{\varepsilon A}{d}$$

Da sich ε aus ε_0 und ε_r zusammensetzt, lautet die vollständige Formel:

$$C = \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot A}{d}; [C] = \frac{\text{As}}{\text{Vm}} \frac{\text{m}^2}{\text{m}} = \frac{\text{As}}{\text{V}} \text{ oder F}$$

Diese Einheit ist für die üblichen Kondensatoren viel zu gross.
In der Praxis kommen die folgenden Untereinheiten vor:

$$1 \mu\text{F} = 1 \cdot 10^{-6} \text{ F (Mikrofarad)}$$

$$1 \text{ nF} = 1 \cdot 10^{-9} \text{ F (Nanofarad)}$$

$$1 \text{ pF} = 1 \cdot 10^{-12} \text{ F (Picofarad)}$$

f. Ausführungsformen

Der Plattenkondensator

Er besteht aus mehreren parallel geschalteten Platten-Paaren. Als Dielektrikum wird in der Regel Luft verwendet. Plattenkondensatoren werden oft in Senderleistungsstufen eingesetzt. Bild 92 zeigt die Ausführung eines Plattenkondensators.

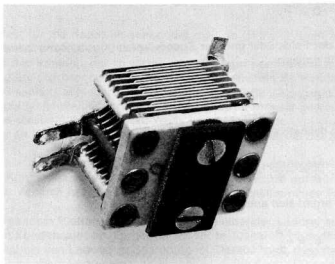


Bild 92

Der Drehkondensator

Er besteht aus zwei Paketen von Platten, wobei das eine Paket drehbar angeordnet ist. Durch Verdrehen des beweglichen Plattenpaketes lässt sich die Kapazität kontinuierlich verändern. Das bewegliche Paket heisst Rotor, die festen Platten bilden den Stator. Drehkondensatoren werden vor allem in Sende- und Empfangsgeräten verwendet; sie dienen dort der Abstimmung der Schwingkreise. Der Schnitt der Platten hat einen Einfluss auf die Teilung der Frequenzskalen der Geräte. Durch geeignete Wahl der Plattenformen ist es möglich, lineare Frequenzskalen zu erhalten. Drehkondensatoren werden als Einzel Exemplare gebaut oder zu Systemen zusammengefügt; man spricht dann von Mehrfachdrehkondensatoren. Beim Mehrfachdrehkondensator sind alle Rotoren auf einer gemeinsamen Achse angeordnet. Die Anzahl der verwendeten Einzelkondensatoren pro System und deren Plattenschnitt hängt vom Verwendungszweck ab. In Bild 93 sehen wir einen Einzeldrehkonden-

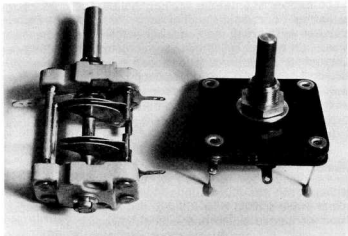


Bild 93

sator und einen Mehrfachdrehkondensator. Die Kapazität von Drehkondensatoren variiert je nach Verwendung zwischen einigen Picofarad und einigen hundert Picofarad.

Rechts der Abbildungen erkennen wir das Symbol für einen Drehkondensator.

Der Trimmerkondensator

Der Trimmerkondensator ist ein Einstellkondensator. Seine Kapazität ist kontinuierlich einstellbar. Der Trimmer dient zum Abgleich von Schaltungen und von Mehrfachdrehkondensatoren. Man unterscheidet verschiedene Ausführ-

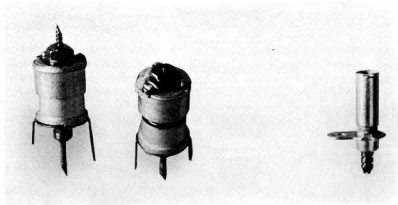


Bild 94

rungsformen. Der Lufttrimmer ist entweder wie ein Miniaturdrehkondensator aufgebaut, oder er hat die Form eines Tauchtrimmers, wie auf dem Foto in Bild 94 links. Eine andere Ausführung des keramischen Trimmers besteht aus zwei Keramikscheiben, auf welche ein Silberbelag aufgebracht ist. Eine der beiden Scheiben ist drehbar angeordnet, so dass sich durch Verdrehen derselben die Kapazität verändern lässt. Eine weitere Bauart des Keramiktrimmers ist rechts auf dem Foto in Bild 94 sichtbar: Eine leitende Spindel wird mehr oder weniger in ein Keramikrohr mit äusserem Silberbelag eingetaucht. Trimmer werden für Kapazitäten bis etwa 100 pF gefertigt. Grössere Kapazitätswerte bilden die Ausnahme.

Der Wickelkondensator

Hier bestehen die Elektroden aus Aluminiumfolienstreifen. Als Dielektrikum wird eine imprägnierte Papierschicht oder Kunststoffolie verwendet. Elektroden und Dielektrikum werden zu einem Rollblock aufgewickelt. Der so entstandene Kondensator wird in einen Blechbecher oder einer Karton- oder Kunststoffhülse eingebaut und mit Kunstharz vergossen. Bild 95 zeigt den prinzipiellen Aufbau eines Wickelkondensators, während uns Bild 96 einige Ausführungen vorstellt. Wickelkondensatoren werden bis zu Kapazitätswerten von einigen μF hergestellt. Sie finden hauptsächlich in Niederfrequenzkreisen Anwendung.

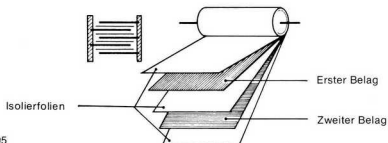


Bild 95

WICKELKONDENSATOREN

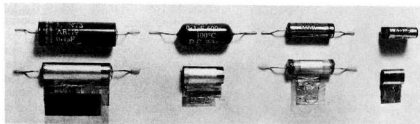


Bild 96

Der Keramikkondensator

Keramikkondensatoren existieren hauptsächlich in zwei Bauformen:

Plättchen- oder Scheibenkondensatoren: Ein dünnes Keramikplättchen weist beidseitig einen eingebrannten Silberbelag auf, auf welchen die Zuführungsdrähte gelötet sind. Ihre Kapazität ist bestimmt durch die Grösse der metallisierten Oberfläche, die Materialdicke und die relative Dielektrizitätskonstante des Materials. Ihre Kapazitätswerte liegen zwischen etwa 1 und 50 pF.

Rohr- oder Halmkondensatoren: Keramikröhrchen mit eingebranntem Silberbelag innen und aussen, mit daran angelöteten Zuführungsdrähten. Bezüglich ihrer Kapazität gilt das oben Gesagte. Sie werden gebaut für Kapazitäten von etwa 10 pF bis zu einigen tausend pF.

Die Keramikkondensatoren sind mit einem Schutzlack überzogen, dessen Farbe im allgemeinen den Temperaturkoeffizienten bezeichnet (je nach Fabrikat verschieden). Bild 97 stellt den prinzipiellen Aufbau eines Halmkondensators im Längsschnitt dar. Bild 98 zeigt einige Ausführungsformen von Keramikkondensatoren. Sie finden hauptsächlich in Hochfrequenzschaltungen Verwendung.

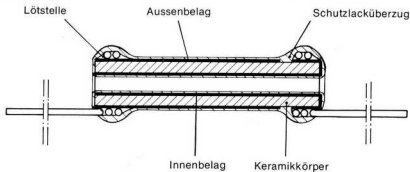


Bild 97

Der Glimmerkondensator

Hier wird Glimmer als Dielektrikum verwendet. Die beiden Plättchenoberflächen sind metallisiert. Zur Vergrösserung der Kapazität werden bei Bedarf mehrere Plättchen aufeinandergelegt mit dazwischengelegten Metallfolien zur Kontaktierung. Sie sind normalerweise in Kunststoff eingepresst und werden verwendet als Präzisionskondensatoren hoher Konstanz in Messinstrumenten und in Hochfrequenzkreisen. Sie existieren für Kapazitätswerte von etwa 30 pF bis zu einigen tausend pF.

Der Metallpapierkondensator MP

Dieser ist ein Spezialfall des Wickelkondensators. Der Baustein für den MP-Kondensator ist das Metallpapier. Metallpapier ist ein Papier mit aufgedampft-

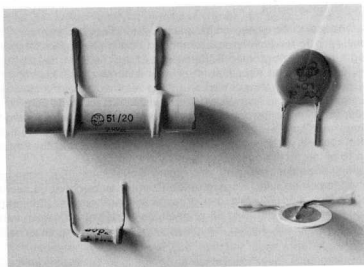


Bild 98

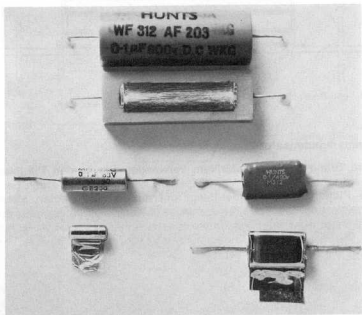


Bild 99

tem, äusserst dünnem Metallbelag. Metallpapierstreifen werden zu Kondensatoren aufgewickelt. Der Vorteil des Metallpapierkondensators liegt in seinen geringen Abmessungen im Verhältnis zu seiner Kapazität. Bei einem Spannungsdurchschlag brennt der Metallbelag weg, der Kondensator ist somit selbstheilend. MP-Kondensatoren werden häufig als Siebmittel in Gleichrichterschaltungen und in Niederfrequenzgeräten angewendet. Sie werden für Kapazitäten bis zu hundert und mehr μF gebaut. Bild 99 zeigt einige Ausführungsformen.

Der Elektrolytkondensator

Hier taucht eine Metallelektrode, deren Oberfläche durch Wellung oder andere Massnahmen vergrössert wurde, in einen Elektrolyten. Die eine Elektrode besteht aus dem Metall, die andere aus dem Elektrolyten. Sobald an den Elektroden eine Gleichspannung richtiger Polarität liegt, überzieht sich die Metalloberfläche mit einer dünnen Oxydschicht, welche als Isolator das Dielektrikum bildet. Da diese Schicht sehr dünn ist – in der Grössenordnung $1 \cdot 10^{-5} \text{ cm}$ – ergibt sich eine grosse Kapazität in einem kleinen Raum. Bei den sogenannten Trockenelektrolyten besteht der Elektrolyt aus einer elektrolytgetränkten Paste. Die Elektrolytkondensatoren verlieren durch Alterung allgemein an Kapazität (Eintrocknen des Elektrolyten) und müssen deshalb in älteren Geräten gelegentlich ersetzt werden. Der Isolationswiderstand der Elektrolytkondensatoren ist nicht so gut wie bei anderen Kondensatorarten. Der Elektrolytkondensator benötigt für die Erhaltung der Oxydschicht einen geringen Strom. Der Strom beträgt etwa $0,01 \text{ mA}$ pro μF . Durch seine speziellen Eigenschaften werden die Verwendungsmöglichkeiten des Elektrolytkondensators stark eingeschränkt. Er kann nur an einer Gleichspannung betrieben werden, der eine nicht zu grosse Wechselspannung überlagert sein darf. Bei allen Schaltungen mit Elektrolytkondensatoren ist die Polarität zu beachten. Wird ein Elektrolytkondensator falsch gepolt, so führt dies innerhalb kurzer Zeit zu dessen Zerstörung. Der Elektrolytkondensator wird deshalb vorwiegend in Gleichrichterschaltungen als Siebkondensator und in Niederfrequenzschaltungen als Glättungskondensator verwendet. Die Transistortechnik hat sein Anwendungsgebiet erheblich vergrössert, trifft man doch in den meisten Niederfrequenzschaltungen der Transistortechnik Elektrolytkondensatoren als Kopplungskondensatoren an. Elektrolytkondensatoren werden für Kapazitätswerte bis zu $1000 \mu\text{F}$ und mehr hergestellt. Grosse Kapazitätswerte sind vor allem bei den sogenannten Niedervoltelektrolyten anzutreffen, das sind Elektrolytkondensatoren für kleine Betriebsspannungen.

Bild 100 zeigt den prinzipiellen Aufbau eines Elektrolytkondensators, während Bild 101 einige Ausführungsformen von Trockenelektrolyten vorstellt.

Hier nicht behandelt sind die *bipolaren* Elektrolytkondensatoren, bei denen für eine gegebene Spannung pro Volumeneinheit nur eine halb so grosse Kapazität untergebracht werden kann, bei denen dafür aber nicht auf die Polarität geachtet werden muss.

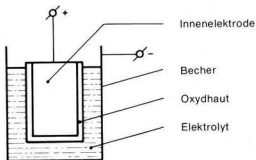


Bild 100

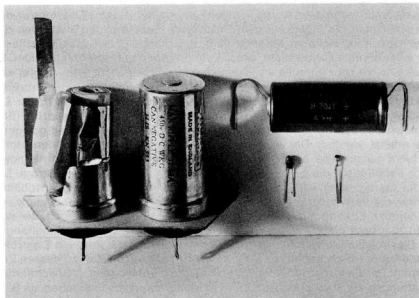


Bild 101

Unten rechts im Bild 101 sind 2 Tantal-Elektrolyt-Kondensatoren dargestellt.

g. Kenndaten

Der Kondensator ist gekennzeichnet durch seinen *Kapazitätswert*, den *Verlustfaktor*, den *Temperaturkoeffizienten*, die *Betriebs-*, die *Prüfspannung* und die *Eigeninduktivität*.

Die relative Dielektrizitätskonstante ϵ_r

Die Kapazität eines Kondensators ist durch seine geometrischen Abmessungen und das Dielektrikum bestimmt. In Tabelle 12 ist die relative Dielektrizitätskonstante der wichtigsten Materialien zusammengestellt.

Material	Relative Dielektrizitätskonstante
Calit	6 6,5
Glas	2 16
Glimmer	4 8
Luft	1,000594
Pertinax	4,8
Plexiglas	3 4,5

Tabelle 12

Der Verlustfaktor $\operatorname{tg} \delta$

Die Verluste in einem Kondensator haben drei Ursachen, die dielektrischen Verluste, die Isolationsverluste und die ohmschen Verluste. Dabei spielen die Verluste im Dielektrikum die Hauptrolle. Unter *dielektrischen Verlusten* verstehen wir diejenige elektrische Leistung, die im Dielektrikum eines Kondensators in Wärme umgesetzt wird, wenn dieser Kondensator an einer Wechselspannung liegt. Die Erwärmung des Dielektrikums hat ihre Ursache in den Bewegungen der Atome und Moleküle, die diese unter dem Einfluss des elektrischen Wechselfeldes ausführen. Die Grösse der Verlustleistung hängt bei gleichbleibender Spannung von den Eigenschaften des Dielektrikums ab. Die Verluste sind frequenzabhängig, je höher die Frequenz, desto grösser die Verluste. Diese Tatsache lässt sich leicht verstehen, wenn man sich vorstellt, dass die Moleküle und Atome des Dielektrikums ihre Bewegungen im Rhythmus der Frequenz der angelegten Wechselspannung ausführen. Die *Isolationsverluste* tragen ebenfalls einen Teil zum Verlustfaktor bei, ihr Anteil ist jedoch bei guten Kondensatoren äusserst gering. Abschliessend sollen noch die *ohmschen Verluste* in den Zuleitungsdrähten und auf den Platten erwähnt werden, obschon auch ihr Beitrag zum Verlustfaktor verschwindend klein ist. Alle diese Verluste denkt man sich in einem Parallel- oder Seriewiderstand vereinigt. Je grösser der Parallelverlustwiderstand wird, desto kleiner sind die Verluste. Beim Serieverlustwiderstand ist der Fall gerade umgekehrt, je grösser der Serieverlustwiderstand, desto grösser sind auch die Verluste. Ob man mit einem Serie- oder mit einem Parallelverlustwiderstand arbeitet, hängt von der Schaltung ab, in welcher der Kondensator betrieben wird. Wir werden später sehen, dass beide Darstellungsarten gleichwertig sind. Wir werden bei vielen Problemen der Wechselstromtechnik das Prinzip antreffen, nach welchem verschiedene Verlustwiderstände in einem Serie- oder Parallelverlustwiderstand zusammengefasst werden.

Bild 102 zeigt die beiden Ersatzschaltbilder für einen verlustbehafteten Kondensator.

Die Verluste im Kondensator werden messtechnisch erfasst. Für jeden Kondensator lässt sich der Verlustfaktor $\operatorname{tg} \delta$ ermitteln. Er ist ein Mass für die Ver-

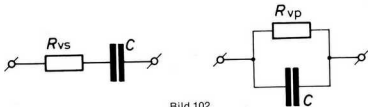


Bild 102

luste und hängt vom verwendeten Dielektrikum ab. Die Kondensatorverluste spielen primär in Wechselstromkreisen eine Rolle. Wir werden in einem späteren Abschnitt erfahren, wie sich der Verlustfaktor eines Kondensators errechnen lässt. In Tabelle 13 sind die Verlustfaktoren einiger Materialien zusammengestellt.

Material	$\operatorname{tg} \delta$	Messfrequenz
Papier	$5,0 \cdot 10^{-3}$	3 kHz
Kunststoffolie	$0,5 \cdot 10^{-3}$	100 kHz
Glimmer	$0,3 \cdot 10^{-3}$	1 MHz
Keramik	$0,4 \cdot 10^{-3}$	1 MHz

Tabelle 13

Der Temperaturkoeffizient (TK_c oder α_c)

Die Kapazität von Kondensatoren ist temperaturabhängig. Diese Temperaturabhängigkeit wird im Temperaturkoeffizienten ausgedrückt, dieser sagt aus, um wieviel sich die Kapazität eines Kondensators bei einer Temperaturänderung von einem Grad Celsius verändert. Die Kapazitätsänderung kann positiv oder negativ verlaufen, je nachdem, was für ein Material als Dielektrikum verwendet wird. In Tabelle 14 ist der Temperaturkoeffizient für einige gebräuchliche Materialien festgehalten.

Der Temperaturkoeffizient von Kondensatoren wirkt sich vor allem in Schaltungen störend aus, in welchen ein Kondensator eine frequenzbestimmende Funktion hat. Durch geeignete Kombination von Kondensatoren mit negativem

Material	$\alpha_c = \frac{\Delta C}{C} / \Delta t \text{ um } 1^\circ \text{ C}$	Temperaturkoeffizient α_c
Calit		+120 +160 · 10 ⁻⁶
Glimmer		+ 60 +100 · 10 ⁻⁶
Tempa S		+ 30 + 50 · 10 ⁻⁶
Tempa N		-20 - 40 · 10 ⁻⁶
Condensa N		-340 -380 · 10 ⁻⁶
Condensa C		-700 -740 · 10 ⁻⁶

Tabelle 14

und positivem Temperaturkoeffizienten lassen sich Kapazitäten zusammensetzen, die eine temperaturunabhängige Kapazität aufweisen.

Die Betriebsspannung

Die *Betriebsspannung* eines Kondensators entspricht demjenigen Spannungswert, der bei normalem Betrieb am Kondensator auftreten darf. *Betriebsspannungen sind in der Regel Gleichspannungswerte*. Es ist deshalb zu beachten, dass in Wechselstromkreisen die Betriebsspannung des Kondensators so hoch gewählt wird, dass der Spitzenwert der angelegten Wechselspannung die Betriebsspannung nicht überschreitet. Wird auch die Betriebs-Wechselspannung angegeben, so ist sie als Effektivwert bei sinusförmiger Spannung zu verstehen.

Oft sind auf den Kondensatoren auch noch die Werte der *Prüfspannung* aufgedruckt. Bei der Prüfspannung handelt es sich um Gleichspannung oder Wechselspannung. Wird zur Prüfung Wechselspannung verwendet, so wird der Effektivwert angegeben.

Die Eigeninduktivität

Die *Eigeninduktivität* wird hervorgerufen durch die Induktivität der Zuleitungsdrähte und der Elektroden. Unter Induktivität versteht man die elektrischen Eigenschaften von Spulen. Jeder Kondensator hat in geringem Ausmass auch noch Spuleneigenschaften. Bei Wickelkondensatoren wirkt der Wickel als Spule, sofern nicht an jeder Stirnseite ein Belag herausgezogen und mit den Zuführungsdrähten zu einem Block verlötet ist. Es entsteht so ein Kondensator nach dem Prinzip des Tauchtrimmers (sogenannte induktionsarme Wickelkondensatoren). Damit wird dieser Anteil an Eigeninduktivität so gering, dass er erst im Ultrakurzwellenbereich eine wesentliche Rolle spielt.

h. Das Arbeitsverhalten von Kondensatoren

Der Kondensator im Gleichstromkreis

Das Gleichstromverhalten des Kondensators soll an Hand eines Versuches studiert werden. Wir bauen uns eine Schaltung gemäss Bild 103 auf.

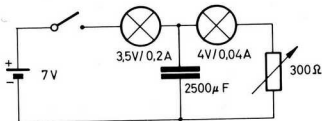


Bild 103

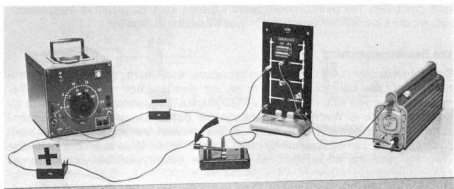


Bild 104

Bild 104 zeigt den Versuchsaufbau.

Der Kondensator wird über das Lämpchen $3,5\text{V}/0,2\text{A}$ aufgeladen. Der Ladestrom wird durch dieses Lämpchen angezeigt. Das Kontrolllämpchen $4\text{V}/0,04\text{A}$ zeigt die Spannung am Kondensator an. Der Schiebewiderstand wird so eingestellt, dass dieses Kontrolllämpchen bei voller Spannung normal aufleuchtet. Zur Spannungsanzeige wurde eine Lampe verwendet, die einen fünfmal kleineren Strom benötigt als die Lampe zur Anzeige des Ladestromes. Mit dieser Massnahme wird verhindert, dass der Strom durch das schwächere Lämpchen in der Ladestromlampe angezeigt wird.

Wird der Hebelschalter umgelegt, so zeigt das $3,5\text{V}/0,2\text{A}$ Lämpchen sofort einen Strom an, während das zweite Lämpchen merklich später aufleuchtet.

Das Experiment zeigt, dass beim Schliessen des Ladestromkreises sofort ein Ladestrom fliesst. Dieser Ladestrom erreicht im Einschaltmoment seinen Maximalwert und sinkt nachher auf Null ab. Die Spannung am Kondensator steigt in der gleichen Zeitspanne vom Nullwert zum Maximalwert an.

Ein Modell aus der Mechanik hilft uns den elektrischen Vorgang zu veranschaulichen. Wir stellen uns eine kleine, leere Gasflasche vor. Um diese kleine Gasflasche zu füllen, stehe uns ein Kompressor mit konstantem Druck zur Verfügung. Die kleine Gasflasche entspricht unserem Kondensator, der Kompressor stellt die Spannungsquelle dar.

Schliessen wir nun die leere Gasflasche an den Kompressor an, so fliesst im ersten Moment ein sehr grosser Gasstrom, dieser nimmt mit der Zeit ab, bis in der Gasflasche der gleiche Druck herrscht wie am Kompressor. Der Druck in der Gasflasche war im Anschaltmoment Null, er stieg so lange an, bis der

Druckausgleich hergestellt war. Wir erkennen im Gasdruck die Spannung am Kondensator und im Gasstrom den elektrischen Strom.

Wir fassen das Versuchsergebnis zusammen:

Beim Anlegen einer Gleichspannung an einen Kondensator sinkt der Ladestrom von einem Maximalwert auf Null ab, die Spannung am Kondensator steigt in dieser Zeit von Null auf ihren Maximalwert.

Der Ladestrom eilt der Spannung am Kondensator voraus.

Die Parallelschaltung von Kondensatoren

Der nächste Versuch zeigt uns das Verhalten von Kondensatoren bei Parallelschaltung. Bild 105 zeigt den Versuchsaufbau.

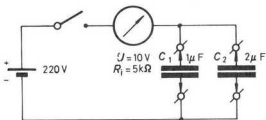


Bild 105

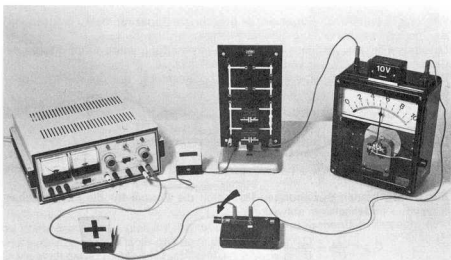


Bild 106

In Bild 106 erkennen wir die Versuchsanordnung.

Die Kondensatoren C_1 und C_2 können wahlweise einzeln oder parallelgeschaltet über das Voltmeter aufgeladen werden. Das Voltmeter hat einen Innenwiderstand von 5 k Ω m. Der Innenwiderstand dient der Strombegrenzung, da der Ladestrom im Einschaltmoment lediglich durch den Innenwiderstand der Spannungsquelle limitiert würde. Der Ausschlag des Voltmeters ist demzufolge ein Hinweis für die Dauer des Stromflusses.

Der Versuch liefert folgende Messresultate:

Die Aufladung des Kondensators C_1 1 μ F ergibt einen bestimmten Ausschlag.

Die Aufladung des Kondensators C_2 2 μ F ergibt einen grösseren Ausschlag.

Die Aufladung der parallelgeschalteten Kondensatoren C_1 und C_2 ergibt den grössten Ausschlag.

Vor jeder Messung wurden die Kondensatoren entladen.

Die Messresultate bilden die Grundlage für die folgenden Überlegungen:

Der Ausschlag ist ein Mass für die Kapazität des Kondensators, da die Quellenspannung für alle Versuche dieselbe bleibt. Die Formel für die Beziehung zwischen Ladung, Spannung und Kapazität lautet:

$$Q = C \cdot U \text{ umgestellt nach } C \text{ ergibt } C = \frac{Q}{U},$$

an Stelle von Q tritt der Ausdruck $I \cdot t$. Das ergibt für C :

$$C = \frac{I \cdot t}{U}$$

Wir folgern aus diesem Ergebnis: Je grösser die Kapazität, desto grösser wird der Instrumentenausschlag bei gleichbleibender Spannung.

Daraus schliessen wir, dass bei der Parallelschaltung von Kondensatoren die Gesamtkapazität grösser wird als jede Teilkapazität.

Da sich bei der Parallelschaltung alle Kondensatoren auf die gleiche Spannung aufladen, dürfen wir schreiben:

$$U_1 = U_2 = U_3 = \dots U_n = U$$

Die Ladungen parallel geschalteter Kondensatoren addieren sich.

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 + \dots Q_n = Q_{\text{tot}}$$

Aus diesen beiden Beziehungen lässt sich die Formel für die Parallelschaltung von Kondensatoren entwickeln:

$$C_{\text{tot}} = \frac{Q_1}{U} + \frac{Q_2}{U} + \frac{Q_3}{U} + \dots \frac{Q_n}{U} = C_1 + C_2 + C_3 + C_n$$

$$C_{\text{tot}} = C_1 + C_2 + C_3 + \dots C_n$$

Wir fassen das Versuchsergebnis zusammen:

Die Gesamtkapazität parallel geschalteter Kondensatoren ist gleich der Summe der Einzelkapazitäten.

Serieschaltung von Kondensatoren

Der folgende Versuch zeigt das Verhalten von Kondensatoren in der Serieschaltung. In Bild 107 sehen wir die Schaltung des Versuchsaufbaues.

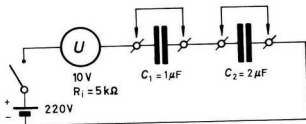


Bild 107

Bild 108 zeigt die Versuchsanordnung.

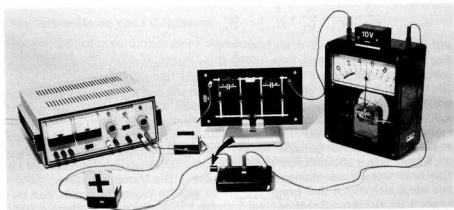


Bild 108

Das Voltmeter hat die gleiche Funktion wie im vorhergehenden Versuch, es dient zur Anzeige der Dauer des Stromflusses.

Der Versuch liefert folgende Messwerte:

Der Kondensator C_1 ($1\mu\text{F}$) verursacht bei seiner Ladung einen bestimmten Instrumentenausschlag.

Der Kondensator C_2 ($2\mu\text{F}$) weist einen stärkeren Ausschlag auf. Die Kondensatoren werden in Serie geschaltet und erneut geladen, der gemessene Ausschlag ist nun am kleinsten. Vor jeder Messung wurden die Kondensatoren entladen. Die Messwerte und einige Überlegungen führen zur Entwicklung der Kapazitätsformel für die Serieschaltung von Kondensatoren. Wir gehen dabei von der Tatsache aus, dass bei in Serie geschalteten Kondensatoren jeder Kondensator die gleiche Ladung erhält, da ja jeder Kondensator während der gleichen Zeit mit dem gleichen Strom aufgeladen wurde. Die Summe der Kondensatorspannungen ergibt die Gesamtspannung. Diese beiden Erkenntnisse können mit Hilfe der Algebra klar formuliert werden:

$$Q = Q_1 = Q_2 = Q_3 = \dots Q_n \text{ und } U_1 + U_2 + U_3 + \dots U_n = U_{\text{tot}}$$

Die beiden Beziehungen lassen sich umformen:

$$U_1 = \frac{Q}{C_1}, U_2 = \frac{Q}{C_2}, U_3 = \frac{Q}{C_3}, U_n = \frac{Q}{C_n}, U_{\text{tot}} = \frac{Q}{C_{\text{tot}}}$$

Durch Umstellen erhalten wir:

$$\frac{Q}{C_{\text{tot}}} = \frac{Q}{C_1} + \frac{Q}{C_2} + \frac{Q}{C_3} + \dots \frac{Q}{C_n}$$

Dividieren wir diese Gleichung durch Q , so erhalten wir:

$$\frac{1}{C_{\text{tot}}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \dots \frac{1}{C_n}$$

Wir fassen zusammen:

Der Reziprokwert der Gesamtkapazität einer Serieschaltung von Kondensatoren ist gleich der Summe der Reziprokwerte der Teilkapazitäten.

Die elektrischen Vorgänge in einer Serieschaltung von Kondensatoren können an Hand eines mechanischen Modelles studiert werden. Das Modell besteht aus zwei in Serie geschalteten Behältern, welche beide durch eine Gummimembrane in zwei gleich grosse Kammern unterteilt sind. Eine Pumpe steht an Stelle der Spannungsquelle, während zwei Durchflussmesser die Funktion der Strommesser übernehmen. Wird die Pumpe in Betrieb gesetzt, so presst sie eine bestimmte Wassermenge in den Behälter I. Die Membrane dieses Behälters biegt sich durch und presst die genau gleiche Wassermenge in den Behälter II. Im kleineren Behälter biegt sich die Membrane entsprechend stärker durch. Die herausgepresste Wassermenge fliesst über den Durchflussmesser I in die Pumpe zurück. Beide Durchflussmesser zeigen die gleiche Menge an. Übertragen auf die Schaltung mit Kondensatoren bedeutet dies, dass beide Kondensatoren unabhängig von ihrer Kapazität die gleiche Ladung aufgenommen haben. Die Membrane im kleineren Gefäss biegt sich stärker durch, sie ist kräftiger gespannt. Den gleichen Effekt stellen wir bei den Kondensatoren fest, wo der kleinere Kondensator immer die grössere Spannung aufweist als der grössere.

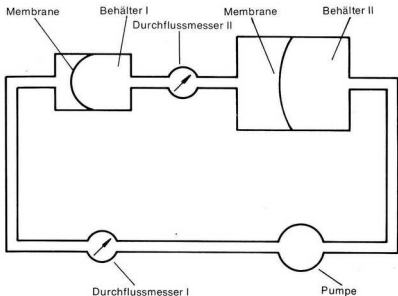


Bild 109

Die Zeitkonstante von RC-Gliedern

Ein Kondensator wird über einen Widerstand nach Bild 110 aufgeladen. Uns interessiert der zeitliche Verlauf von Strom und Spannung vom Einschaltmoment an. Wir wissen bereits, dass im Einschaltmoment der Strom seinen Maximalwert aufweist und die Spannung am Kondensator Null ist. Bild 111 zeigt uns den Verlauf von Strom und Spannung bei der Ladung eines Kondensators.

Die Kurvenform bleibt immer die gleiche, unabhängig von der Grösse des Widerstandes und des Kondensators, lediglich die Massstäbe auf den Achsen ändern sich, wenn die Werte von C und R verändert werden.

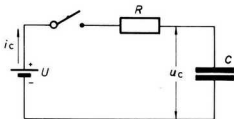


Bild 110

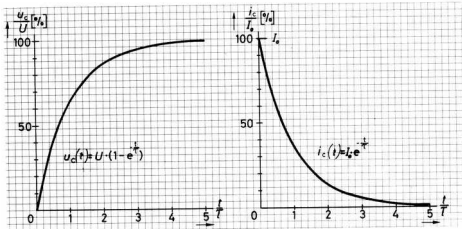


Bild 111

Die aufgezeichneten Kurven folgen einer Exponentialfunktion. Dieser Name stammt aus der Mathematik und bedeutet, dass die abgebildete Kurve zu einer Exponentialgleichung gehört. Von den recht komplizierten Berechnungen, die an einer solchen Kurve vorgenommen werden, interessieren uns nur wenige einfache Tatsachen:

Würde der Ladestrom seine ursprüngliche Stärke beibehalten, dann wäre der Kondensator voll aufgeladen, sobald die Tangente in Bild 112 den 100%-Wert erreicht hat. Der Ladestrom ist proportional der Spannungsdifferenz zwischen der Batteriespannung und der Spannung am Kondensator und wird durch den Widerstand R begrenzt. Mit zunehmender Ladung nimmt der Unterschied zwischen Batteriespannung und Kondensatorspannung ab, was zur Folge hat, dass der Ladestrom ebenfalls abnimmt. Dies sind die Gründe, weshalb Strom und Spannung nicht linear verlaufen.

Ein wichtiger Begriff in Schaltungen mit Kondensatoren ist die Zeitkonstante. Darunter ist jene Zeit zu verstehen, in welcher der Kondensator voll aufgeladen wäre, wenn der Anfangswert des Ladestroms konstant beibehalten würde.

Aus Bild 112 geht hervor, dass der Kondensator nach Ablauf einer Zeitkonstante auf 63% der Batteriespannung aufgeladen ist. Theoretisch erreicht die Spannung am Kondensator nie den Wert der Batteriespannung, für die Praxis dürfen wir jedoch vereinfachen und sagen, dass der Kondensator nach 5 Zeitkonstanten aufgeladen sei.

Die Zeitkonstante entspricht dem Produkt aus Ladewiderstand und Kapazität.

$$\tau = C \cdot R; [\tau] = s = \frac{\text{As}}{\text{V}} \cdot \frac{\text{V}}{\text{A}}$$

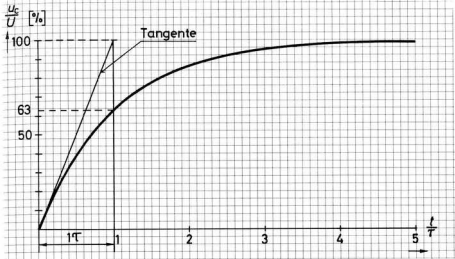


Bild 112

Der Kondensator im Wechselstromkreis

Der folgende Versuch zeigt uns das Verhalten des Kondensators im Wechselstromkreis. Bild 113 zeigt die Schaltung und Bild 114 die Versuchsanordnung.

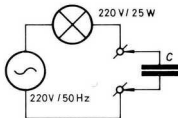


Bild 113

In den Wechselstromkreis werden nacheinander Kapazitäten von $2 \mu\text{F}$, $4 \mu\text{F}$, $6 \mu\text{F}$, $8 \mu\text{F}$ und $10 \mu\text{F}$ geschaltet. Mit zunehmender Kapazität leuchtet die Lampe immer heller auf.

Aus den gemachten Beobachtungen schliessen wir, dass der Kondensator für Wechselstrom einen Widerstand darstellt, und dass dieser Widerstand mit zunehmender Kapazität immer kleiner wird.

Wiederum dient uns ein mechanisches Modell zur Veranschaulichung der elektrischen Vorgänge. In Bild 115 sehen wir einen geschlossenen Wasserkreis. Wir erkennen in der Pumpe unsere Spannungsquelle, der Strom wird mit dem Durchflussmesser gemessen und der Kondensator wird wieder durch ein Gefäß dargestellt, das in der Mitte mit einer Gummimembrane unterteilt ist.

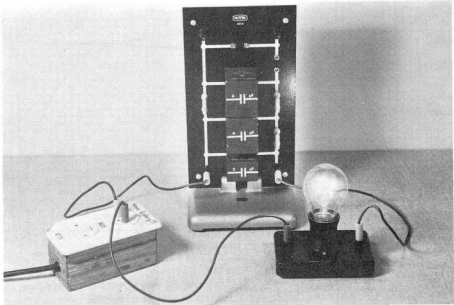


Bild 114

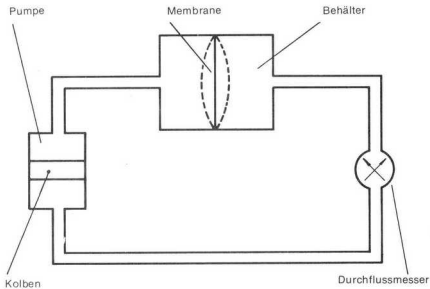


Bild 115

Da die Pumpe in diesem Fall eine Wechselspannungsquelle darstellen soll, drückt sie das Wasser nicht in einer Richtung, sie pumpt das Wasser einmal nach rechts und dann wieder nach links. Stellen wir uns vor, der Kolben werde pro Sekunde 50 mal hin und her bewegt, so entspricht dies einer Frequenz von 50 Hertz. Der Durchflussmesser wird einen «Wechselstrom» anzeigen. In einem früheren Kapitel haben wir festgehalten, dass elektrischer Strom gleichbedeutend ist mit der Anzahl Ladungsträger, die pro Zeiteinheit durch einen Leiter fliesst. Die Wassermenge pro Zeiteinheit entspricht demzufolge der Stromstärke. Es ist nun einleuchtend, dass umso mehr Wasser hin und her fliesst, je grösser der Behälter mit der Membrane ist und je höher die Frequenz der Spannungsquelle gemacht wird. Auf den elektrischen Stromkreis übertragen bedeutet das, dass der Strom mit zunehmender Frequenz und grösser werdender Kapazität ansteigt.

Wir fassen zusammen:

Kondensatoren stellen für Wechselstrom einen Widerstand dar.

Je grösser die Kapazität und je höher die Frequenz, desto kleiner wird dieser Widerstand.

Der Wechselstromwiderstand des Kondensators wird *kapazitiver Blindwiderstand* genannt.

Als Formelzeichen für den kapazitiven Blindwiderstand verwendet man X_c .

Die Masseinheit für kapazitive Blindwiderstände ist das Ohm.

An Stelle des allgemeinen Ausdruckes «Blindwiderstand» wird in der Praxis oft die Bezeichnung «*Reaktanz*» verwendet, für kapazitive Reaktanz speziell der Begriff «*Kapazitätanz*».

Der Blindwiderstand eines Kondensators errechnet sich nach folgender Formel:

$$X_c = \frac{1}{\omega C}$$

Die Einheitenprobe ergibt die Richtigkeit der Formel, wenn man für Farad As/V und für Hertz 1/s setzt:

$$[X_c] = \frac{1}{\frac{1}{s} \cdot \frac{As}{V}} = \frac{V}{A} = \Omega$$

Die vektorielle Darstellung von Strom und Spannung am Kondensator

Wir haben gesehen, dass zuerst ein Ladestrom fliessen muss, bevor am Kondensator eine Spannung auftreten kann. Im Moment des Spannungsmaximums an den Platten ist der Ladestrom gleich Null. Dadurch zeigt sich, dass *der Strom im Kondensator der Spannung um 90° vorauseilt*. Diese *Phasenverschiebung* zwischen Strom und Spannung lässt sich anschaulich in einem Vektordiagramm darstellen. Man verwendet für Strom und Spannung je einen

Zeiger und denkt sich diese Zeiger im *Gegenuhrrzeigersinn* pro Periode einmal umlaufend. Da der Strom gegenüber der Spannung voreilend ist, steht der Stromzeiger in Bild 116 senkrecht und der nacheilende Spannungszeiger waagrecht. Für den Phasenverschiebungswinkel wird der griechische Buchstabe phi (φ) verwendet.

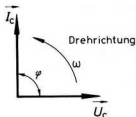


Bild 116

Die Darstellung von Strom und Spannung im Liniendiagramm

Bild 117 zeigt die Darstellung von Strom und Spannung im Liniendiagramm. Diese Kurvenzüge würden sichtbar, wenn man Strom und Spannung auf einem Katodenstrahloszilloskop betrachten würde. Diese Darstellungsart ist jedoch nicht sehr gebräuchlich, da die Vektordarstellung übersichtlicher ist. Mit Vektoren lässt sich einfacher rechnen, da die Gesetze der Trigonometrie dabei angewendet werden können, während sich die Kurvendarstellung für Berechnungen nur schlecht eignet.

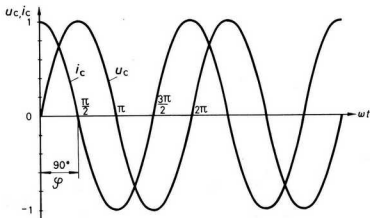


Bild 117

Blindwiderstand eines Kondensators in Abhängigkeit von der Frequenz

Der Blindwiderstand des Kondensators nimmt umgekehrt proportional mit der Frequenz ab. In Bild 118 ist der Verlauf des Blindwiderstandes in Abhängigkeit der Frequenz aufgezeichnet.

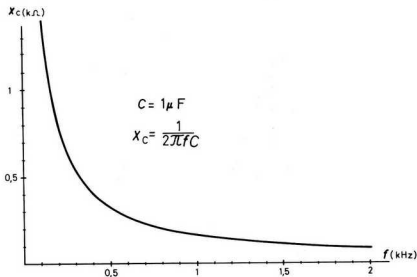


Bild 118

Die Blindleistung

Multipliziert man den Wechselstrom, der durch einen Kondensator fließt, mit der Spannung am Kondensator, so erhält man die **Blindleistung**. Der Name Blindleistung besagt, dass es sich hierbei nicht um eine wirkliche Leistung handeln kann. *Der Kondensator verbraucht* keine Leistung. Er speichert elektrische Energie und gibt diese wieder an das Netz ab. Dieser Vorgang spielt sich pro Periode des Wechselstromes zweimal ab. Bild 119 zeigt die Konstruktion der Blindleistungskurve. Strom und Spannung sind gegeneinander um 90° phasenverschoben. Durch Multiplikation der Momentanwerte von Strom und Spannung erhalten wir die Momentanwerte der Leistung. Die Leistungskurve weist die doppelte Frequenz der Strom- und Spannungskurve auf. Da diese zur Hälfte oberhalb und zur Hälfte unterhalb der Null-Linie verläuft, wird die aufgenommene Leistung über eine Periode Null.

Als Formelzeichen für die Blindleistung werden die Bezeichnungen Q und P_q verwendet. Um nicht die Blindleistung mit der elektrischen Ladung Q zu verwechseln, besitzen wir das Symbol P_q .

Die Einheit der Blindleistung ist das Var (Volt-Ampère reaktiv).

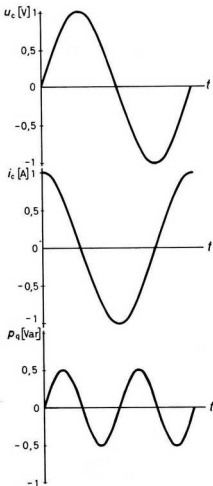


Bild 119

4. Beispiele

a. Berechnung der Kapazität eines einfachen Plattenkondensators

Ein einfacher Plattenkondensator mit Kreisplatten (Durchmesser 12 cm) und einem Plattenabstand von 3 mm mit Luft als Dielektrikum soll berechnet werden.

Vorgehen:

- Formel für C anschreiben
- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$C = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot A}{d}$$

$$C = \frac{0,8855 \cdot 1 \cdot 0,06^2 \cdot \pi}{0,003} \cdot 10^{-11}$$

$$[C] = \frac{\text{As}}{\text{Vm}} \cdot \frac{\text{m}^2}{\text{m}} = \frac{\text{As}}{\text{V}} = \text{F}$$

$$C = 33,4 \text{ pF}$$

b. Berechnung der elektrischen Feldstärke

Der Kondensator nach Aufgabe a. hat eine Ladung von $3 \cdot 10^{-8} \text{ As}$ aufgenommen. Wie gross ist die elektrische Feldstärke?

Vorgehen:

- Grundformel anschreiben
- Nach U umstellen
- U ausrechnen
- Formel für E anschreiben
- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$Q = C \cdot U$$

$$U = \frac{Q}{C}$$

$$U = \frac{3 \cdot 10^{-8}}{33,4 \cdot 10^{-12}} \frac{\text{As} \cdot \text{V}}{\text{As}}$$

$$U = 900 \text{ V}$$

$$E = \frac{U}{d}$$

$$E = \frac{900}{3 \cdot 10^{-3}} \frac{\text{V}}{\text{m}}$$

$$E = 300\,000 \text{ V/m}$$

c. Berechnung der Ladung Q und der Kapazität C

In der Schaltung nach Bild 120 wird ein Kondensator mit einem konstanten Strom aufgeladen. Der veränderliche Widerstand R wird so geregelt, dass die Stromaufnahme konstant bleibt. Nach 5 s beträgt $U_c = 10 \text{ V}$.

Vorgehen:

- Bestimmungsgleichung für Q anschreiben
- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen
- Bestimmungsgleichung für C anschreiben
- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$Q = I \cdot t$$

$$Q = 0,1 \cdot 10^{-3} \cdot 5 \text{ A} \cdot \text{s}$$

$$Q = 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ As}$$

$$C = \frac{Q}{U_c}$$

$$C = \frac{0,5 \cdot 10^{-3}}{10}; [C] = \frac{\text{As}}{\text{V}} = \text{F}$$

$$C = 50 \mu\text{F}$$

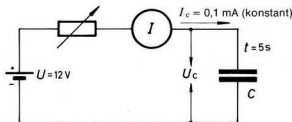


Bild 120

d. Berechnung einer gemischten Schaltung

Die Gesamtkapazität der Serie-Parallelschaltung nach Bild 121 ist bekannt. Der Wert des unbekannten Kondensators C_x ist zu bestimmen.

Vorgehen:

1. Schritt:

- Bestimmen des Wertes C_s der Serieschaltung von C_1 mit C_x

- Berechnungsformel aufstellen

$$C_s = C_{\text{tot}} - C_2$$

- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$C_s = 12 - 8 = 4 \mu\text{F}$$

2. Schritt:

- Bestimmungsgleichung für C_x aufstellen

$$C_s = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_x}} \quad \text{umstellen nach:}$$

$$\frac{1}{C_s} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_x} \quad \text{umstellen nach:}$$

$$\frac{1}{C_x} = \frac{1}{C_s} - \frac{1}{C_1} \quad \text{umstellen nach:}$$

$$C_x = \frac{C_1 \cdot C_s}{C_1 - C_s}$$

- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$C_x = \frac{5 \cdot 4}{5 - 4} \frac{\mu\text{F}^2}{\mu\text{F}}$$

$$C_x = 20 \mu\text{F}$$

Diese Aufgabe lässt sich in einem Schritt lösen. Versuchen Sie es!

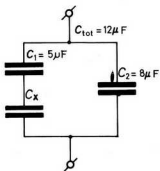


Bild 121

e. Berechnung einer Zeitkonstante

Die Zeitkonstante des RC -Gliedes nach Bild 122 ist zu berechnen.

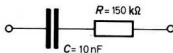


Bild 122

Vorgehen:

- Grundformel anschreiben
- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$\tau = C \cdot R$$

$$\tau = 10 \cdot 10^{-9} \cdot 0,15 \cdot 10^6$$

$$[\tau] = \frac{\text{As} \cdot \text{V}}{\text{V} \cdot \text{A}} = \text{s}$$

$$\tau = 1,5 \text{ ms}$$

f. Berechnung eines Kondensators im Wechselstromkreis

Die Kapazität des Kondensators in Bild 123 soll errechnet werden.

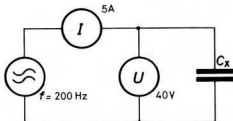


Bild 123

Vorgehen:

1. Schritt:

- Berechnung des Blindwiderstandes
- Bestimmungsgleichung anschreiben
- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$X_c = \frac{U}{I}$$

$$X_c = \frac{40}{5} \frac{\text{V}}{\text{A}}$$

$$X_c = 8 \Omega$$

2. Schritt:

- Berechnung des Kapazitätswertes
- Grundformel anschreiben
- Umformen nach C
- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$X_c = \frac{1}{\omega C}; [X_c] = \text{s} \cdot \frac{\text{V}}{\text{As}} = \frac{\text{V}}{\text{A}} = \Omega$$

$$C = \frac{1}{\omega X_c}; [C] = \frac{1}{\text{s}^{-1} \Omega} = \frac{\text{s A}}{\text{V}} = \text{F}$$

$$C = \frac{1}{2\pi \cdot 0,2 \cdot 10^3 \cdot 8}$$

$$C = 99,5 \mu\text{F}$$

5. Das Wesentliche

Der Kondensator besteht aus zwei Metallplatten, die sich isoliert gegenüberstehen. Das Isoliermaterial zwischen den Platten wird als Dielektrikum bezeichnet.

Der Kondensator kann elektrische Ladung speichern. Je grösser die Kapazität und die angelegte Spannung, desto grösser wird die gespeicherte Ladung. Als Masseinheit für die Ladung wird das Coulomb verwendet. Ein Coulomb entspricht einer Ampèresekunde. Ladung gleich Strom mal Zeit.

Die Kapazität eines Kondensators wird bestimmt durch die Plattenoberfläche, den Plattenabstand und das Dielektrikum. Je grösser die Plattenoberfläche gemacht wird und je kleiner man den Plattenabstand wählt, desto grösser wird die Kapazität. Der Kapazitätswert verhält sich proportional der Dielektrizitätskonstante. Die Kapazität wird in Farad gemessen. Ein Farad entspricht einer Ampèresekunde pro Volt.

Wir kennen Plattenkondensatoren für Hochfrequenzkreise, Drehkondensatoren für variable Hochfrequenzkreise, Trimmerkondensatoren für den Abgleich von Schaltungen, Wickelkondensatoren als Entkopplungskapazitäten und für die Verwendung in Niederfrequenzkreisen, Keramik-kondensatoren für Hochfrequenzkreise, selbstheilende Metallpapierkondensatoren in Niederfrequenz- und Siebkreisen und Elektrolytkondensatoren für Niederfrequenz-, Sieb- und Transistorkreise.

Die Verluste von Kondensatoren treten als ohmsche Serie- oder Parallelverlustwiderstände in Erscheinung, als Masseinheit für Kondensatorverluste kennen wir den Verlustfaktor Tangens δ ; dieser ist frequenzabhängig.

Werden Kondensatoren in frequenzbestimmenden Kreisen verwendet, so muss der Temperaturkoeffizient berücksichtigt werden. Durch geeignete Kombination von Kapazitäten mit positiven und negativen Temperaturkoeffizienten können Kapazitätswerte zusammengestellt werden, die praktisch keinen Temperaturgang mehr aufweisen.

Die Gesamtkapazität parallel geschalteter Kondensatoren ist gleich der Summe der Teilkapazitäten.

Der Reziprokwert der Gesamtkapazität einer Serieschaltung von Kondensatoren ist gleich der Summe der Reziprokwerte der Teilkapazitäten.

Wird ein Kondensator über einen Widerstand aufgeladen, so bezeichnet man die Zeit, die verstreicht, bis der Kondensator 63% seiner Ladespannung erreicht hat, als Zeitkonstante. Die Zeitkonstante entspricht dem Produkt aus Ladewiderstand und Kapazität.

Ein Kondensator trennt Gleichströme ab, im Wechselstromkreis dagegen verhält er sich wie ein Widerstand. Der Wert dieses Wechselstromwiderstandes ist der Frequenz und der Kapazität umgekehrt proportional. Im Kondensator eilt der Strom der Spannung um 90° vor.

Das Produkt aus Kondensatorspannung und Kondensatorstrom bezeichnet man als Blindleistung. Die Masseinheit dafür ist das Var.

6. Repetitionsaufgaben (Lösung Seite 448)

- Definieren Sie die elektrische Ladung Q
- Welches sind die kapazitätsbestimmenden Faktoren eines Kondensators?
- Ein Kondensator von 75 pF mit Luft als Dielektrikum besteht aus zwei Platten mit einem Abstand von 0,1 mm. Wie gross ist die Plattenoberfläche?
- Was versteht man unter dem Begriff «Dielektrizitätskonstante des leeren Raumes»?
- An einem geladenen Kondensator herrscht eine Spannung von 120 V. Wie gross ist dessen Kapazität, wenn die gespeicherte Ladung $0,24 \cdot 10^{-3}$ As beträgt?
- Ein Plattenkondensator von 100 pF mit einer Plattenoberfläche von 100 cm^2 und Luft als Dielektrikum hat eine Ladung von $4 \cdot 10^{-9}$ As aufgenommen. Wie gross ist die Feldstärke zwischen den Platten?
- Definieren Sie den Begriff «Zeitkonstante» für ein RC-Glied.
- Die Zeitkonstante eines RC-Gliedes beträgt 50 ms, der Ladewiderstand misst 330 k Ω . Wie gross ist die Kapazität des Kondensators?
- Ein Kondensator von 5 μF ist mit einem unbekannten Kondensator in Serie geschaltet. Parallel zu dieser Serieschaltung liegen 10 μF . Die Gesamtkapazität der Schaltung beträgt 12 μF . Bestimmen Sie den Wert der unbekannten Kapazität.
- Ein Drehkondensator wurde auf 100 V aufgeladen. Nun wird der Rotor herausgedreht, bis der Kondensator noch die halbe Kapazität aufweist. Welche Spannung herrscht nun am Drehkondensator?
- Sie wollen die Kapazität eines unbekannten Kondensators ermitteln. Zu diesem Zweck schalten Sie diesen über ein Wechselstrommilliampèremeter an eine Netzspannung von 220 V und 50 Hz an. Sie messen einen Strom von 0,207 A. Welchen Wert hat der Kondensator?
- Welchen Vorteil hat der Metallpapierkondensator gegenüber den gewöhnlichen Wickelkondensatoren?
- Auf was ist beim Betrieb eines Elektrolytkondensators zu achten?

III. Spulen

1. Einführung

Wir haben den Kondensator als wesentlichen Baustein der Elektronik kennengelernt. Die Spule steht dem Kondensator an Wichtigkeit nicht nach. Beide Bauteile ergänzen sich in vielen Schaltungen der Nachrichtentechnik. Die Spule ist das Gegenstück zum Kondensator, ihr Verhalten im Gleichstrom- und Wechselstromkreis ist dem Arbeitsverhalten des Kondensators reziprok. In den Geräten sind Spulen von verschiedener Bauart und von verschiedener Grösse anzutreffen.

In Gleichstromkreisen werden Spulen als Bestandteile von Siebgliedern verwendet. In Hochfrequenzkreisen trifft man sie oft als Bestandteil von Schwingkreisen und Bandfiltern an. In Transformatoren werden Spulen zur Transformation von Wechselspannungen herangezogen.

2. Was wissen Sie schon über Spulen?

(Lösung Seite 451)

- a) Aus was besteht eine Spule?
- b) Welche Masseinheit wird für die Induktivität verwendet?
- c) Wie wirkt die Spule im Gleichstromkreis?
- d) Wie verhält sich die Spule im Wechselstromkreis?
- e) Welche Arten von Spulen sind Ihnen bekannt?
- f) Welche Wirkung hat der Eisenkern in der Spule?
- g) Was ist ein magnetisches Feld?

3. Spulen

a. Definition

Die Spule besitzt die Eigenschaft, elektrische Energie in Form eines magnetischen Feldes zu speichern. In Gleichstromkreisen wirkt die Spule, abgesehen vom Moment des Ein- und Ausschaltens, nur als ohmscher Widerstand. Dieser ohmsche Widerstand entspricht dem Widerstand der Wicklung. Im Wechselstromkreis wirkt sie als Reaktanz, deren Wert von der Grösse der Induktivität und von der Frequenz abhängt.

b. Prinzip

Die Spule besteht aus einer gewissen Anzahl Windungen, die freitragend oder auf einem Spulenkörper angebracht sind. Wir unterscheiden zwischen Spulen mit Eisenkern und Spulen ohne Kern. Grösse, Windungszahl, Art des Kernes und Bauform der Spulen hängen vom Verwendungszweck ab und bestimmen deren Eigenschaften.

c. Die Selbstinduktion

Wir wissen, dass in einem Leiter, der sich in einem Magnetfeld bewegt, eine Spannung induziert wird. An Stelle des Leiters kann auch das Magnetfeld bewegt werden, der Effekt ist derselbe. Der Versuch nach Bild 124 demonstriert den Effekt der Induktion.

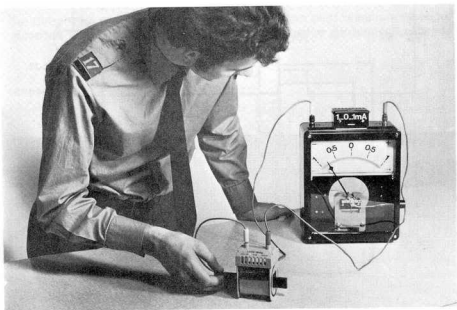


Bild 124

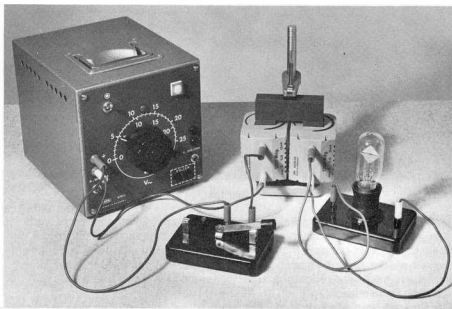
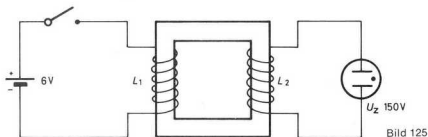
Eine Spule mit 1200 Windungen wird mit einem Milliampèremeter verbunden. Der Zeiger des Instrumentes hat seine Ruhelage in der Skalenmitte. Ein Stabmagnet wird langsam in die Spule geschoben und mit gleicher Geschwindigkeit wieder herausgezogen. Das Instrument schlägt während des Hineinschiebens nach einer Richtung aus, während es beim Herausziehen nach der anderen Seite ausschlägt.

Der Versuch wird wiederholt, die Bewegung mit dem Magneten jedoch rascher ausgeführt. Die Ausschläge am Instrument sind grösser geworden.

Die Spule wird gegen eine solche mit 600 Windungen ausgetauscht. Der Versuch wird mit beiden Geschwindigkeiten wiederholt. Die Ausschläge sind kleiner als mit der Spule zu 1200 Windungen.

Der Versuch hat uns bestätigt, was wir schon wissen. *Die induzierte Spannung wird um so grösser, je grösser die Geschwindigkeit der Änderung des Magnetfeldes ist. Die Spannung nimmt mit zunehmender Windungszahl zu.*

Es ist gleichgültig, ob die Magnetfeldänderung durch Bewegen eines Permanentmagneten oder mit Hilfe eines Elektromagneten erzeugt wird. Der Versuch nach Bild 125 und 126 zeigt die Erzeugung einer Selbstinduktionsspannung mit Hilfe eines Elektromagneten.



Auf einem Eisenkern sind zwei Spulen mit je 1200 Windungen angebracht. Die Spule L_1 wird über einen Schalter an eine Gleichspannungsquelle von einem Volt gelegt. An die Spule L_2 ist eine Glühlampe mit einer Zündspannung von etwa 150 V angeschlossen. Im Eisenkern ist ein Magnetfeld wirksam. Ursache dieses Magnetfeldes ist der Spulenstrom durch L_1 . Der Schalter

wird geöffnet, die Glimmlampe zeigt durch kurzzeitiges Aufleuchten eine induzierte Spannung an. Die Erklärung dieses Effektes ist einfach. Wird der Stromkreis der Spule L_1 unterbrochen, so bricht das Magnetfeld plötzlich auf den Wert Null zusammen. Es findet eine rasche Feldänderung statt. Diese Feldänderung induziert in der Spule L_2 eine Spannung.

Im Versuch nach Bild 127 wird die Schaltung vereinfacht. Es wird nur eine Spule mit 1200 Windungen an die Gleichspannungsquelle angeschlossen. Die Glimmlampe liegt jetzt parallel zu dieser Spule.

Der Stromkreis wird unterbrochen, die Glimmlampe zeigt wiederum einen induzierten Spannungsschoss an. Das beim Ausschalten zusammenbrechende

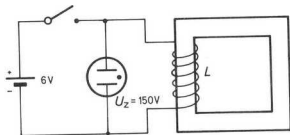


Bild 127

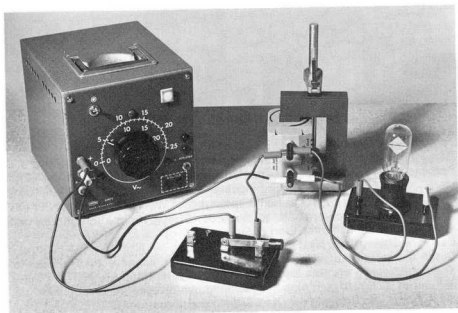


Bild 128

Magnetfeld induziert auch in der Erregerspule eine Spannung. Die Spannung heisst **Selbstinduktionsspannung**. Der gezeigte Vorgang wird **Selbstinduktion** genannt.

Die Richtung des Selbstinduktionsstromes, welcher dank der Selbstinduktionsspannung fliesst, ist für das Arbeitsverhalten von Spulen wichtig. In Bild 129 ist die Schaltung des Versuches nach Bild 130 aufgezeichnet. Dieser Versuch zeigt die Richtung des Selbstinduktionsstromes.

Bild 129

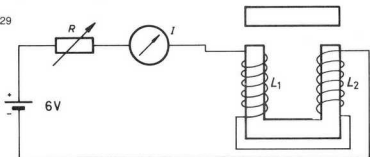
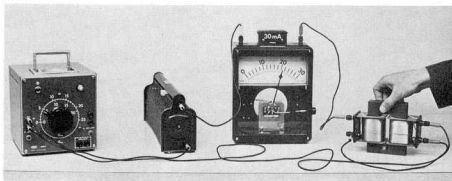


Bild 130



Das Joch über der Spule wird entfernt. Mit dem Schiebewiderstand wird der Spulenstrom so eingestellt, dass am Milliampèremeter der Zeiger in der Mitte steht. Jetzt wird das Joch rasch aufgesetzt. Der Erregerstrom geht ruckartig zurück, um nachher wieder seinen ursprünglichen Wert zu erreichen. Wird das Joch mit einem Ruck entfernt, so steigt der Erregerstrom kurzzeitig an und sinkt nachher auf den alten Wert zurück.

Das Versuchsergebnis lässt folgende Schlüsse zu:

Durch das rasche Aufsetzen des Joches steigt der magnetische Kraftfluss im Kreis sprungartig an. Der Erregerstrom sinkt gleichzeitig ab. In Wirklichkeit handelt es sich nicht um eine Schwächung des Erregerstromes, sondern um die Addition von Erregerstrom und Selbstinduktionsstrom. *Das bedeutet, dass der Selbstinduktionsstrom gegen den Erregerstrom fliesst, wenn der Magnetfluss vergrössert wird.*

Durch das plötzliche Wegnehmen des Joches wird der magnetische Fluss ebenso rasch abgeschwächt. Die Zunahme des Erregerstromes beweist, dass der Selbstinduktionsstrom bei Abschwächung des Magnetflusses in Richtung des Erregerstromes fliesst.

Das Verhalten des Selbstinduktionsstromes in einer Spule lässt sich an einem mechanischen Modell veranschaulichen. Auf einem horizontalen, schnurgeraden Eisenbahngleise rollt ein Güterwagen mit konstanter Geschwindigkeit. Wenn wir die Reibung der Räder und den Luftwiderstand vernachlässigen, rollt der Wagen in alle Ewigkeit mit konstanter Geschwindigkeit weiter. Soll seine Geschwindigkeit erhöht werden, muss er durch eine äussere Kraft in Fahrtrichtung beschleunigt werden. Er setzt dieser Kraft einen kräftigen Widerstand, die Trägheit des Wagens, entgegen. Soll der rollende Wagen abgebremst werden, muss auf ihn eine bremsende Kraft entgegen der Fahrtrichtung einwirken, welche wieder die Trägheit des Wagens überwinden muss. Die Trägheit des Güterwagens lässt sich mit dem Verhalten der Spule vergleichen. Wird der magnetische Kraftfluss vergrössert, dies entspricht der Beschleunigung des Wagens, so muss eine zusätzliche Kraft aufgewendet werden. Der Selbstinduktionsstrom widersetzt sich einer Feldvergrösserung, er muss zuerst überwunden werden. Dieser Effekt entspricht der Trägheit des Wagens, die ebenfalls überwunden werden muss, bis er mit einer grösseren Geschwindigkeit rollt. Wird der Feldfluss verkleinert, so hat der Selbstinduktionsstrom das Bestreben den Fluss aufrechtzuerhalten, genau so möchte die Trägheit des Wagens die Bewegung beibehalten.

Das Versuchsergebnis lässt sich zusammenfassen:

Der Selbstinduktionsstrom wirkt seiner Entstehungsursache entgegen, er ist bestrebt, den bestehenden Zustand beizubehalten.

d. Der Selbstinduktionskoeffizient

Die in einer Spule induzierte Spannung hängt von drei Faktoren ab. Es sind dies die Grösse der Stromänderung, die Geschwindigkeit, mit welcher diese Stromänderung erfolgt und der Selbstinduktionskoeffizient der Spule. Dieser Selbstinduktionskoeffizient, oft auch Induktivität genannt, ist mit der Kapazität des Kondensators vergleichbar. Die Induktivität einer Spule beschreibt deren elektrisches Verhalten. Der Zusammenhang zwischen den drei Faktoren und der induzierten Spannung lässt sich in einer einfachen Gleichung darstellen.

$$-U_i = \frac{\Delta I}{\Delta t} \cdot L$$

U_i = induzierte Spannung. Das Vorzeichen zeigt an, dass die Spannung gegen die Erregerspannung gerichtet ist.

ΔI = Stromänderung

Δt = Zeitänderung

L = Induktivität der Spule

Die Gleichung sagt aus, dass die induzierte Spannung um so grösser wird, je grösser die Stromänderung ist, je kürzer die Zeit ist, in welcher diese Stromänderung erfolgt, und je grösser die Induktivität der Spule gemacht wird. Aus nachstehender Gleichung ist die Masseinheit für die Induktivität im Giorgi-System gegeben.

$$-U_i = \frac{\Delta I}{\Delta t} L \quad [U_i] = V = \frac{A}{s} \cdot \frac{Vs}{A}$$

Anstelle von $\frac{Vs}{A}$ wird im Giorgi-System das Henry verwendet. 1 Henry = 1 Vs/A.

Eine Spule hat dann eine Induktivität von einem Henry oder einer Voltsekunde pro Ampère, wenn bei einer gleichmässigen Stromänderung um ein Ampère während einer Sekunde, eine Spannung von einem Volt induziert wird.

Diese Grösse ist in der Praxis durchaus üblich. Spulen in Siebketten und Niederfrequenzkreisen weisen oft Induktivitäten von mehreren Henry auf.

Folgende Untereinheiten sind gebräuchlich:

$$1 \text{ mH} = 1 \cdot 10^{-3} \text{ H (Millihenry)}$$

$$1 \mu\text{H} = 1 \cdot 10^{-6} \text{ H (Mikrohenry)}$$

Induktivitäten in der Grösse von Millihenry werden in der Hochfrequenztechnik oft als Drosselspulen oder als Schwingkreiselemente für tiefere Frequenzen verwendet. Spulen mit Induktivitäten in der Grössenordnung von Mikrohenry sind in der Hochfrequenztechnik als Schwingkreiselemente für höhere Frequenzen bis in den VHF-Bereich anzutreffen.

e. Die induktivitätsbestimmenden Faktoren

Die Induktivität einer Spule hängt von folgenden Faktoren ab:

- Windungszahl N
- Spulenlänge l (m)
- Wicklungsfläche A (m²)
- Art des Eisenkernes (relative Permeabilität μ_r)

Für lange einlagige Zylinderspulen gilt folgende Dimensionierungsformel:

$$L = \frac{\mu_o \cdot r^2 \cdot \pi \cdot N^2}{l} \quad \frac{Vs}{A}$$

r = Spulenradius

$$\mu_o = \text{Permeabilität des leeren Raumes} = \frac{4 \pi}{10 \cdot 10^6} \quad \frac{Vs}{A \text{ m}}$$

Für kürzere Spulen sind Korrekturfaktoren zu berücksichtigen, Spulen mit Eisenkern werden nach folgender Formel dimensioniert:

$$L = \frac{\mu_o \cdot \mu_r \cdot N^2 \cdot A}{l} \quad \frac{Vs}{A} \quad (l = \text{Eisenweglänge})$$

$$\text{Einheitenprobe: } [L] = \frac{Vs}{A \text{ m}} \cdot \frac{\text{m}^2}{\text{m}} = \frac{Vs}{A}$$

f. Ausführungsformen

Zylinderspule

Die Zylinderspule kann freitragend, oder auf einen Spulenkörper gewickelt werden. Die in Bild 131 gezeigte Art von Zylinderspule wird oft als Schwingkreiselement in Senderleistungsstufen verwendet, auch in Senderantennenabstimmgeräten ist diese Bauart anzutreffen. Bild 132 zeigt die beiden gebräuchlichsten Schaltsymbole.

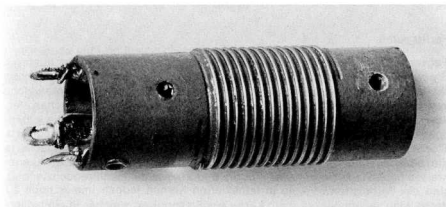


Bild 131

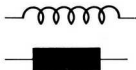
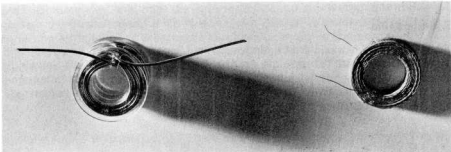


Bild 132

Luftspulen

Luftspulen sind Induktivitäten ohne Eisenkern. Die genannte Zylinderspule ist auch eine Luftspule. Luftspulen gibt es in verschiedenen Grössen und Ausführungen. Sie finden meistens in der Hochfrequenztechnik als Drosselspulen oder Schwingkreiselemente Verwendung. Bild 133 zeigt einige gebräuchliche Arten von Luftspulen.



mit Spulenkörper

freitragend

Bild 133

Ferritspulen

Ferrite sind Magnetwerkstoffe, deren elektrischer Widerstand sehr hoch ist. Sie weisen daher fast keine Wirbelströme auf. Wirbelströme sind Ströme, die in jedem Eisenkern entstehen, der sich in einer Spule befindet, welche von einem Wechselstrom durchflossen wird. Wirbelströme verursachen Verluste, da zu ihrer Erzeugung Energie aufgewendet werden muss. Die schädlichen Wirbelströme können herabgesetzt werden, indem man lamellierte Eisenkerne verwendet. Es sind dies Kerne, welche in viele unter sich isolierte Einzelbleche unterteilt sind. Die meisten Induktivitäten in Niederfrequenzkreisen haben lamellierte Kerne. Für die Bedürfnisse der Hochfrequenztechnik sind die Wirbelstromverluste in lamellierten Kernen jedoch immer noch zu gross. Man verwendete deshalb Kerne aus Eisenpulver, welches in ein Isoliermaterial eingebettet war. Diese Pulverkerne wurden von den Ferriten abgelöst. Dank der Permeabilität dieser Kerne steigt die Induktivität der Spule an. Das hat zur Folge, dass für eine bestimmte Induktivität weniger Windungen benötigt werden. Wir werden später sehen, dass der Wicklungswiderstand als Spulenverlust in Erscheinung tritt; je weniger Windungen eine Spule aufweist, desto geringer wird auch der Wicklungswiderstand.

Ferritspulen werden als Induktivitäten mit Stabkern oder als Spulen mit Topfkern u. s. w. hergestellt. Eine Ferritspule besteht aus einem Spulenkörper mit der Wicklung und einem in der Regel drehbaren Ferritstabkern. Der Kern weist

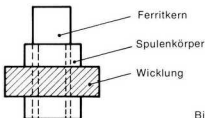
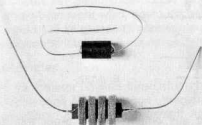


Bild 134



Induktivität fest



Induktivität variabel

Bild 135

ein Gewinde auf und lässt sich mehr oder weniger in die Spule hineinschrauben. Damit lässt sich die Induktivität der Spule in gewissen Grenzen verändern. Bild 134 und 135 zeigen das Prinzip und einige Ausführungsformen. Bei der Ferritspule mit Topfkern umschliesst der Kern die Spule. Dank dem geschlossenen magnetischen Kreis ist die Wirkung des Kernes viel grösser als beim Stabkern. Topfkern mit verstellbarem Luftspalt lassen sich abgleichen, da man die Induktivität durch Verändern des Luftspaltes variieren kann. Bild 136 zeigt einige Topfkern, Bild 137 die dazugehörigen Symbole. Ferritkerne werden für Niederfrequenz- und für Hochfrequenzschaltungen gebaut.

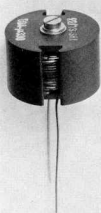


Bild 136

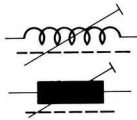


Bild 137

Drosselspule mit Eisenkern

Die Drosselspule mit Eisenkern besteht aus einem Spulenkörper mit der Wicklung und einem Eisenkern aus lamelliertem Material. Sie wird vorwiegend in Niederfrequenzschaltungen und in Siebgliedern verwendet. Oft wird der Eisenkern mit einem festen Luftspalt versehen, um zu starke Vormagnetisierung des Eisenkernes zu vermeiden. Wir wissen, dass die relative Permeabilität eines Eisenkernes keine konstante Grösse ist. Ihr Wert hängt weitgehend von der Magnetisierung ab. Je grösser die magnetische Feldstärke gemacht wird, desto geringer wird die relative Permeabilität. Dieser Effekt hätte zur Folge, dass die Induktivität der Spule vom Erregerstrom abhängig wäre. Der Luftspalt stellt einen grossen magnetischen Widerstand dar, er bestimmt daher weitgehend den magnetischen Fluss. Dadurch wird die Flussänderung klein gehalten. Durch diese Massnahme wird erreicht, dass die In-

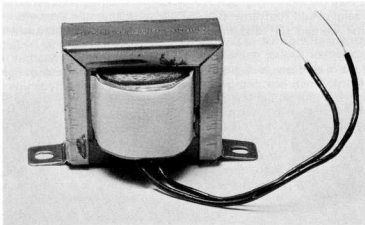


Bild 138

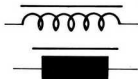


Bild 139

duktivität bei Stromänderungen nur unwesentlich schwankt. Je grösser der Luftspalt gemacht wird, desto kleiner wird der Magnetfluss und die Induktivität. Bild 138 zeigt eine Drosselspule mit Eisenkern. In Bild 139 sind die beiden gebräuchlichsten Symbole dargestellt.

Variometer

Ein Variometer ist eine Einrichtung mit veränderlicher Induktivität. Es werden verschiedene Ausführungen unterschieden. Die einfachste Bauart besteht aus einer *Spule mit kontinuierlichem Abgriff*. Die Spule ist meistens auf einem drehbaren Zylinder angeordnet und besteht aus blankem Draht. Als Abgriff dient ein Schleifer. Dieser wird von der sich drehenden Wicklung geführt und bewegt sich längs der Spule. Dadurch ist es möglich, zwischen Null und der maximalen Windungszahl des Variometers jede beliebige Anzahl Windungen abzugreifen und somit die Induktivität zwischen Null und dem Maximalwert kontinuierlich zu verändern. Diese Art von Variometer wird meistens in Senderendstufen als Schwingkreiselement und in Antennenanpassungsgeräten als einstellbare Induktivität verwendet. Bild 140 zeigt ein Variometer mit kontinuierlichem Abgriff, Bild 141 die gebräuchlichsten Symbole für Variometer mit veränderlicher Induktivität.

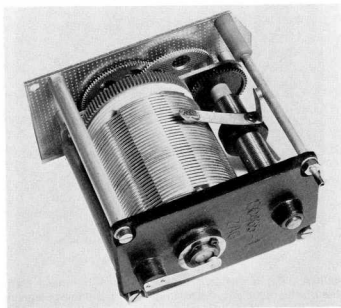


Bild 140

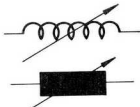


Bild 141

Das *Massenkernvariometer* beruht auf einem anderen Prinzip. In eine Zylinderspule wird ein Ferritkern eingetaucht und damit die Induktivität in einem gewissen Bereich verändert. Diese Art von Variometer wird oft in Sendern und Empfängern als veränderliches Schwingkreiselement eingesetzt. Bild 142 zeigt zwei Massenkernvariometer in der Schaltung eines Kleinfunkgerätes, Bild 143 zwei gebräuchliche Symbole für Massekernvariometer.

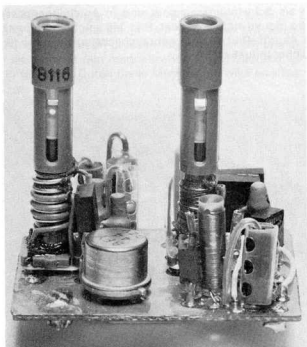


Bild 142

Das *Drehspulenvariometer* besteht aus zwei Spulen. In einer festen Zylinderspule ist eine drehbare kleinere Spule angeordnet. Beide Spulen sind in Serie geschaltet. Die beiden Magnetfelder beeinflussen sich gegenseitig, je nach Stellung der drehbaren Spule wird das Gesamtfeld erhöht oder verkleinert.

Damit ändert sich auch die Induktivität der Einrichtung. Mit dem Drehspulvariometer lässt sich ein relativ grosser Induktivitätsbereich überstreichen. Seine Verwendungsmöglichkeiten sind vielfältig. Es wird überall dort eingesetzt, wo ein möglichst grosser Frequenzbereich kontinuierlich verändert werden soll. Bild 144 zeigt den Aufbau eines Drehspulvariometers. Das Symbol eines Drehspulvariometers ist gleich dem eines Variometers mit Abgriff (Bild 141).

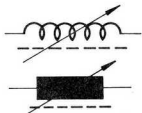


Bild 143

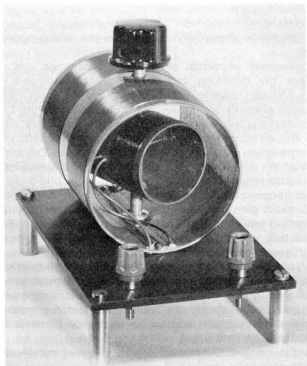


Bild 144

g. Kenndaten

Die Spule ist gekennzeichnet durch ihren *Induktivitätswert*, die *Spulengüte*, die *Eigenkapazität* und den *Temperaturkoeffizienten*.

Die Spulengüte Q_L

Eine reine Induktivität ohne Verlustwiderstände lässt sich nicht herstellen. Die Verlustwiderstände wirken sich aus wie beim Kondensator als ohmsche Widerstände in Serie oder parallel zur Induktivität. Bild 145 zeigt die beiden Ersatzschaltbilder.

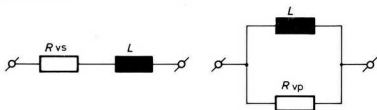


Bild 145

Die Verlustwiderstände setzen sich zusammen aus Wicklungsverlusten und Kernverlusten.

Die *Wicklungsverluste* wiederum setzen sich zusammen aus dem *Gleichstromwiderstand* der Wicklung und den frequenzabhängigen *Wirbelstromverlusten*. Die Wirbelstromverluste haben ihre Ursache darin, dass durch das Wechselfeld des Leiters in diesem selbst und in benachbarten Leitern Wechselströme induziert werden, welche sich im Leiter selbst kurzschließen. Diese sogenannten Wirbelströme sind dem induzierenden Wechselstrom entgegengesetzt und schwächen ihn, was sich auswirkt wie eine Zunahme des ohmschen Widerstandes des Leiters. Mit zunehmender Frequenz heben sich im Leiterinnern induzierender und induzierter Strom mehr und mehr auf, so dass der Nutz-Hochfrequenzstrom praktisch nur noch in der Leiteroberfläche fließt. Der Einfluss dieses Haut- oder *Skineffektes* kann reduziert werden durch Verwendung von Hochfrequenzlitze (feinste, unter sich isolierte parallele Drähte) anstelle festen Drahtes, weil eine Litze bei gleichem Gesamtquerschnitt eine grössere Oberfläche aufweist.

Die *Kernverluste* setzen sich zusammen aus *Wirbelstromverlusten* wie in der Wicklung sowie *Ummagnetisierungsverlusten*. Die Wirbelstromverluste werden klein gehalten durch Unterteilung des Kerns (Lamellierung, Hochfrequenzkern) sowie Herabsetzung der Leitfähigkeit des Kernmaterials (Lamellenmaterial legiert mit Silizium, oder Verwendung von Ferriten, welche praktisch keine Leitfähigkeit aufweisen).

Die Ummagnetisierungsverluste entstehen durch die Umdrehungsarbeit der molekularen Elementarmagnete im Kernmaterial. Sie werden klein gehalten durch Verwendung von magnetisch «weichem» Material.

Zusätzliche Wirbelstromverluste können noch entstehen in allfälligen Abschirmbechern, wenn die Spulen stärkere Streufelder aufweisen (Spulen mit Stabkern).

Die Spulenverluste lassen sich messtechnisch erfassen. Die Spulengüte Q_L ist, wie später gezeigt wird, das Verhältnis von Reaktanz zu Serie-Verlustwiderstand, oder Parallelwiderstand zu Reaktanz:

$$Q_L = \frac{X_L}{R_{vs}} = \frac{R_{vp}}{X_L}$$

X_L = Spulen-Reaktanz
 R_{vs} = Serie-Verlustwiderstand
 R_{vp} = Parallel-Verlustwiderstand

Diese Spulengüte ist in Wechselstromkreisen von Bedeutung. Die Güte der üblichen Spulen für Hochfrequenzkreise schwankt zwischen kleinen Werten in der Grösse von etwa 40 für sehr hohe Frequenzen und Werte um 500 für Frequenzen im Langwellenbereich.

Die Eigenkapazität

Die Eigenkapazität oder Wicklungskapazität der Spule wirkt sich aus, als ob eine Kapazität parallel zur Spule geschaltet wäre. Jede Windung bildet mit der Nachbarwindung eine Kapazität. Die Summe dieser Kapazitäten ergibt die Eigenkapazität. Diese macht sich in Hochfrequenzkreisen störend bemerkbar. Durch spezielle Anordnung der Wicklung kann sie jedoch klein gehalten werden.

Der Temperaturkoeffizient

Der Temperaturkoeffizient von Induktivitäten ist gering. Er bewegt sich je nach Kernmaterial zwischen $2 \dots 16 \cdot 10^{-6}$. In frequenzbestimmenden Schwingkreisen muss darauf geachtet werden, dass der Einfluss des Temperaturkoeffizienten durch Wahl eines entsprechenden Kondensators kompensiert wird.

h. Das Arbeitsverhalten von Spulen

Die Spule im Gleichstromkreis

Der folgende Versuch zeigt das Verhalten der Spule im Gleichstromkreis. In der Schaltung nach Bild 146 wird die Induktivität über ein Glühlämpchen und einen Schalter an eine Gleichspannungsquelle gelegt. Das Glühlämpchen zeigt den Spulenstrom an. Die Gleichspannung wird so einreguliert, dass das Lämpchen im Spulenkreis hell leuchtet. Mit dem Schiebewiderstand wird die Helligkeit des zweiten Lämpchens so einreguliert, dass es gleich stark leuchtet wie dasjenige im Spulenkreis.

Der Schalter wird geöffnet und wieder geschlossen. Das Lämpchen im Spulenkreis leuchtet etwas später auf als dasjenige im Widerstandskreis. Das bedeutet, dass der Spulenstrom gegenüber der Spannung nacheilt. Diese Erscheinung lässt sich mit Hilfe des Selbstinduktionsstromes leicht erklären. Im Einschaltmoment hat der Strom das Bestreben, unendlich rasch vom Wert Null auf den Maximalwert anzusteigen. Das hätte eine unendlich rasche Feld-

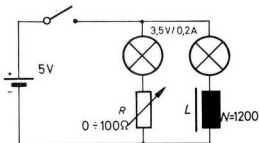


Bild 146

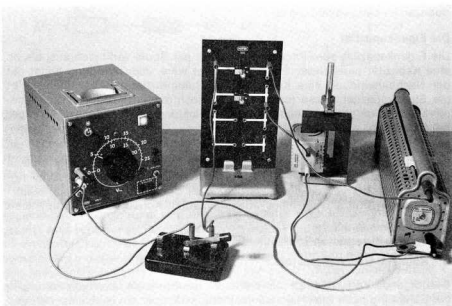


Bild 147

änderung zur Folge, das Feld würde ebenfalls vom Wert Null sofort seinen Höchstwert erreichen. Die induzierte Gegeninduktionsspannung würde unendlich gross. Der vorgängige Versuch hat uns gezeigt, dass der Gegeninduktionsstrom schwächend auf den Erregerstrom wirkt, wenn das Magnetfeld vergrössert wird. Der Erregerstrom kann daher nur langsam ansteigen, da er den Gegeninduktionsstrom überwinden muss. Der Stromanstieg wird um so länger dauern, je grösser der Selbstinduktionskoeffizient der Spule ist. In Bild 147 ist der Versuchsaufbau dargestellt.

Die Serieschaltung von Spulen

In Reihe geschaltete Spulen lassen sich zu einer Gesamtinduktivität zusammenfassen. Dabei ist zu unterscheiden, ob die Spulen magnetisch miteinander gekoppelt sind oder nicht. Gekoppelte Spulen sollen vorerst ausser acht gelassen werden, sie werden später im Zusammenhang mit den Bandfiltern besprochen. Nicht gekoppelte Spulen können sich gegenseitig nicht beeinflussen, sie sind entweder abgeschirmt oder liegen weit auseinander. In Serie geschaltete Spulen verhalten sich genau wie in Serie geschaltete Widerstände. Die Gesamtinduktivität ist gleich der Summe der Teilinduktivitäten.

$$L_{\text{tot}} = L_1 + L_2 + L_3 + \dots L_n$$

Das Resultat der Serieschaltung ist leicht verständlich, wenn man berücksichtigt, dass sich bei der Reihenschaltung die Selbstinduktionsspannungen der Einzelinduktivitäten addieren, und dass die Selbstinduktionsspannung der Induktivität proportional ist.

Die Parallelschaltung von Spulen

Nicht gekoppelte Spulen verhalten sich parallel geschaltet wie parallele Widerstände. Der Reziprokwert der Gesamtinduktivität ist gleich der Summe der Reziprokwerte der Teilinduktivitäten.

$$\frac{1}{L_{\text{tot}}} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \frac{1}{L_3} + \dots \frac{1}{L_n}$$

Die Zeitkonstante von RL-Gliedern

Der Strom durch die reine Induktivität steigt ab dem Einschaltmoment nach einer Exponentialfunktion an und nähert sich seinem Maximalwert. Er zeigt das gleiche Verhalten wie die Spannung am Kondensator. Im Abschaltmoment bricht er nicht zusammen, er klingt nach einer e-Funktion ab. Bild 148 zeigt die Verhältnisse.

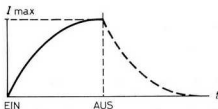
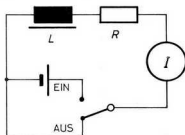


Bild 148

Bild 149 zeigt den Verlauf des Stromes durch die Induktivität. Sie folgt den gleichen mathematischen Gesetzen wie die Kurve der Spannung am Kondensator. Wie beim RC-Glied lässt sich auch für das RL-Glied eine Zeitkonstante

definieren. Würde der Strom mit der Geschwindigkeit anwachsen, die er im Einschaltmoment aufwies, so würde er nach Ablauf von einer Zeitkonstante seinen Maximalwert erreicht haben. Dieser gedachte Verlauf des Stromes wird durch die Tangente in Bild 149 dargestellt.

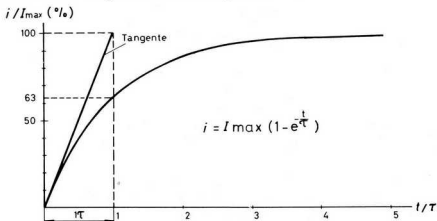


Bild 149

Infolge des exponentiellen Anstieges beträgt der Strom nach einer Zeitkonstante nur 63% seines Maximalwertes. Theoretisch wird es ihm nie gelingen, den Maximalwert, der durch die Summe aller ohmschen Widerstände des Kreises gegeben ist, zu erreichen. Wie beim Kondensator lassen sich die Vorgänge vereinfachen; für die Praxis darf angenommen werden, dass der Strom nach 5 Zeitkonstanten auf den Maximalwert angestiegen sei.

Die Zeitkonstante für ein RL-Glied entspricht dem Quotienten von Induktivität und Widerstand.

$$\tau = \frac{L}{R} \quad [\tau] = \frac{Vs}{A} \frac{A}{V} = s$$

Die Spule im Wechselstromkreis

Der Versuch nach Bild 150 und 151 demonstriert das Verhalten der Spule im Wechselstromkreis. Eine Spule von 1200 Windungen mit geschlossenem Eisenkern wird über ein Ampèremeter an die Netzspannung 220 V/50 Hz angeschlossen. Das Instrument zeigt einen bestimmten Strom an. Das Joch des Kernes wird langsam zurückgeschoben, der Spulenstrom steigt an.

Durch das Verschieben des Joches wurde der magnetische Widerstand des Kernes vergrößert. Das hat zur Folge, dass der magnetische Fluss kleiner geworden ist. Kleinerer Magnetfluss bedeutet kleinere Induktivität. Das Experiment beweist somit, dass der Wechselstromwiderstand der Spule mit kleiner werdender Induktivität abnimmt.

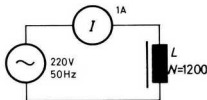


Bild 150

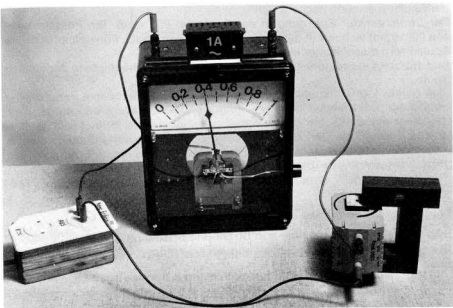


Bild 151

Eine Wechselspannung wirkt sich an der Induktivität ähnlich aus, wie wenn man eine Gleichspannung periodisch umpolen würde. Der Auf- und Abbau des Magnetfeldes wiederholt sich mit der Frequenz der Wechselspannung. Die dabei entstehende Gegeninduktionsspannung ist dauernd wirksam und verhindert ein Ansteigen des Stromes auf den Wert, der sich bei Gleichspannung einstellen würde. Je höher die Frequenz, desto rascher erfolgt die Feldänderung, desto kleiner wird der Strom durch die Spule.

Der Widerstand, den die Spule einem Wechselstrom entgegensetzt, wird *induktiver Blindwiderstand* genannt.

Als Formelzeichen für den induktiven Blindwiderstand wird X_L verwendet.

Die Masseinheit für den induktiven Blindwiderstand ist das Ohm. Analog den Begriffen bei den Kapazitäten spricht man hier von induktiven Reaktanzen oder Induktanzen.

Der induktive Blindwiderstand wird um so grösser, je grösser die Induktivität der Spule und die Frequenz des Wechselstromes gemacht werden.

$$X_L = \omega L \quad [X_L] = \frac{1}{s} \cdot \frac{Vs}{A} = \frac{V}{A} = \Omega$$

Die vektorielle Darstellung von Strom und Spannung in der Spule

Der Erregerstrom durch die Spule muss den Gegeninduktionsstrom überwinden. Der Versuch mit den Glühlämpchen hat gezeigt, dass der Spulenstrom der Spulenspannung nacheilt.

Der Strom eilt der Spannung in der Spule um 90° nach. Ein Phasenwinkel von 90° ergibt sich nur in der verlustfreien, idealen Spule. Für verlustbehaftete Spulen wird dieser immer kleiner als 90° .

Bild 152 zeigt die vektorielle Darstellung der Phasenverhältnisse in der idealen Spule.

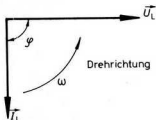


Bild 152

Die Darstellung von Strom und Spannung im Liniendiagramm

Bild 153 zeigt die Darstellung von Strom und Spannung im Liniendiagramm. Vor- und Nachteile dieser Darstellung haben wir im Kapitel über Kondensatoren besprochen.

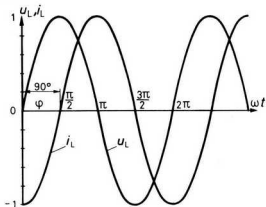


Bild 153

Der Blindwiderstand einer Spule in Abhängigkeit von der Frequenz

Der induktive Blindwiderstand einer Spule nimmt proportional mit der Frequenz zu. Bild 154 hält die Verhältnisse grafisch fest.

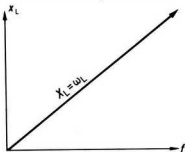


Bild 154

Die Blindleistung

In der reinen Induktivität wird keine Leistung verbraucht. Das Produkt aus Spulenstrom und Spulenspannung ergibt, wie beim Kondensator, die Blindleistung. Ihre Einheit ist, wie beim Kondensator, das Var. Die Spule speichert im Magnetfeld Energie und gibt diese wieder an das Netz ab. Dieser Vorgang spielt sich pro Periode des Wechselstromes zweimal ab. Bild 119 lieferte den zeichnerischen Beweis, dass die Wirkleistung Null wird, wenn zwischen Strom und Spannung eine Phasenverschiebung von 90° besteht.

4. Beispiele

a. Berechnung der Induktivität einer Spule mit Eisenkern

Die Induktivität der Spule mit den nachfolgenden Daten soll ermittelt werden.
Spulendaten: Windungszahl $N = 1200$

Wicklungsfläche $A = 5 \text{ cm}^2 = 5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$

Eisenweglänge: $l = 10 \text{ cm} = 0,1 \text{ m}$

Relative Permeabilität $\mu_r = 80$

(für eine bestimmte Stromstärke)

Vorgehen:

– Grundformel anschreiben

$$L = \frac{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot N^2 \cdot A}{l}$$

– Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$L = \frac{4\pi \cdot 80 \cdot 1,44 \cdot 10^6 \cdot 5 \cdot 10^{-4}}{10 \cdot 10^{-6} \cdot 0,1 \text{ m}}$$

$$[L] = \frac{\text{Vs}}{\text{A m}} \cdot \frac{\text{m}^2}{\text{m}} = \frac{\text{Vs}}{\text{A}} = \text{H}$$

$$L = 0,723 \text{ H}$$

b. Berechnung der induzierten Spannung

Bild 155 zeigt eine Schaltung, die es ermöglicht, den Spulenstrom linear ansteigen zu lassen. Der Widerstand R wird nach einer Exponentialkurve während des Ladevorgangs so verkleinert, dass sich in der Spule ein konstanter Strom ergibt. In unserem Beispiel steige der Strom innerhalb von 2 Sekunden linear von Null auf 6 Ampère an. Die Spuleninduktivität beträgt 3 H. Wie gross ist die induzierte Gegeninduktionsspannung?

Vorgehen:

- Grundformel anschreiben
- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$U = L \cdot \frac{\Delta I}{\Delta t}$$

$$U = 3 \cdot \frac{6}{2} \frac{\text{Vs}}{\text{A}} \cdot \frac{\text{A}}{\text{s}}$$

$$U = 9 \text{ V}$$

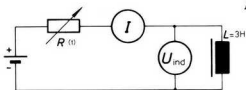
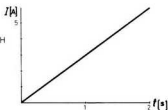


Bild 155



c. Berechnung der Zeitkonstante

Die Zeitkonstante für das RL -Glied in Bild 156 wird gesucht.



Bild 156

Vorgehen:

- Grundformel anschreiben
- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$\tau = \frac{L}{R}$$

$$\tau = \frac{12}{0,7 \cdot 10^3} \frac{\text{Vs}}{\text{A}} \cdot \frac{\text{A}}{\text{V}}$$

$$\tau = 17,15 \text{ ms}$$

d. Bestimmen der Induktivität durch eine Strom- und Spannungsmessung

Eine unbekannte Induktivität wird an einen Hochfrequenzgenerator angeschlossen. Strom und Spannung werden gemessen. Mit Hilfe der Messresultate soll der Wert der Induktivität bestimmt werden. Bild 157 zeigt die Schaltung und die Messwerte.

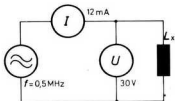


Bild 157

Vorgehen:

1. Schritt: Berechnen des Blindwiderstandes

– Grundformel anschreiben

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

– Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$X_L = \frac{30}{12 \cdot 10^{-3}}$$

$$X_L = 2,5 \text{ k}\Omega$$

2. Schritt: Berechnung der Induktivität

– Grundformel anschreiben

$$X_L = \omega L$$

– nach L umstellen

$$L = \frac{X_L}{\omega}$$

– Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$L = \frac{2,5 \cdot 10^3}{2\pi \cdot 0,5 \cdot 10^6} \quad \frac{\text{V}}{\text{A}} \cdot \text{s}$$

$$L = 0,796 \text{ mH}$$

5. Das Wesentliche

Es wird unterschieden zwischen Spulen mit Eisenkern und Spulen ohne Eisenkern. Der Kern erhöht die Induktivität der Spule. Die Wicklung der Spule kann auf einem Spulenkörper sitzen oder freitragend sein.

Die Selbstinduktion der Spule wird bestimmt durch deren geometrische Abmessungen, die Windungszahl und die relative Permeabilität des Kernes. Die Induktivität steigt mit dem Quadrat der Windungszahl an. Die relative Permeabilität des Kernes ist kein konstanter Wert, sie hängt vom Spulenstrom ab. Zur Herabsetzung des Einflusses des Spulenstromes werden oft Kerne mit Luftspalt verwendet.

Die Induktivität wird in Voltsekunden pro Ampère oder Henry gemessen. Eine Spule weist dann eine Induktivität von einer Voltsekunde pro Ampère oder einem Henry auf, wenn eine gleichmässige Stromänderung von einem Ampère sich während einer Sekunde vollzieht und dabei eine Spannung von einem Volt induziert wird.

In Hochfrequenzkreisen werden Ferritspulen oder Luftspulen verwendet. Ferrit ist ein Kernmaterial mit guten Hochfrequenzeigenschaften, es weist nur sehr geringe Wirbelstromverluste auf. In Senderendstufen und Messgeräten sind oft Variometer anzutreffen. Variometer sind Spulen, deren Induktivität sich kontinuierlich verändern lässt. Spulen mit lamellierten Eisenkernen fin-

den sich in Schaltungen der Niederfrequenztechnik und in Siebketten von Gleichrichtern.

Die Spulenverluste treten als Serie- oder Parallelverlustwiderstände in Erscheinung, diese beeinflussen die Güte der Spule. Als Masseinheit für die Spulengüte dient der Gütefaktor Q . Die Güte ist frequenzabhängig.

Die Serie- und Parallelschaltung von Spulen, welche nicht miteinander gekoppelt sind, berechnen sich nach den gleichen Regeln wie analoge Schaltungen mit Widerständen.

Die Zeitkonstante eines RL -Gliedes errechnet sich aus dem Quotienten von Induktivität und Seriewiderstand. Wird ein Seriegelglied, bestehend aus Induktivität und Widerstand, an eine Gleichspannungsquelle angeschlossen, so steigt der Spulenstrom innerhalb einer Zeitkonstante auf 63% seines Maximalwertes an.

Im Wechselstromkreis verhält sich eine Spule wie ein Widerstand. Der Wert dieses Wechselstromwiderstandes ist der Frequenz und der Induktivität proportional. In der Spule eilt der Strom der Spannung um 90° nach.

Das Produkt aus Spulenstrom und Spulenspannung wird als Blindleistung bezeichnet. Die Masseinheit dafür ist das Var.

6. Repetitionsaufgaben (Lösung Seite 452)

- Von einer langen zylinderförmigen Luftspule sind folgende Daten bekannt:
 Induktivität L 600 mH
 Spulenlänge l 12 cm
 Spulendurchmesser d 4 cm
 Bestimmen Sie die notwendige Windungszahl.
- In einer Spule sinkt der Strom innerhalb von 0,7 s linear von 6 A auf 1 A ab. Während der Dauer dieser Stromänderung wird in der Spule eine Spannung von 50 V induziert. Bestimmen Sie die Induktivität der Spule.
- Ein RL -Glied weist eine Zeitkonstante von 8 ms auf. Der Widerstand misst 200 Ohm. Wie gross ist die Induktivität der Spule?
- Eine Spule wird über ein Ampèremeter an einen Niederfrequenzgenerator angeschlossen. Dieser erzeugt eine Wechselspannung von 500 Hz. Die Spannung an der Spule beträgt 80 V, das Instrument zeigt einen Spulenstrom von 10 mA an. Bestimmen Sie den Wert der Induktivität.
- Bestimmen Sie in der Schaltung nach Bild 158 die Ströme I_2 , I_3 sowie L_2 .

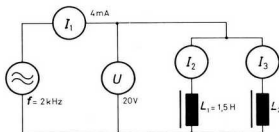


Bild 158

IV. Serieschaltung von Wirk- und Blindwiderständen

1. Einführung

Induktivitäten und Kapazitäten lassen sich nicht verlustfrei herstellen, sie weisen immer einen Verlustwiderstand auf. Kondensatoren und Spulen bestehen deshalb immer aus Blind- und Wirkwiderständen. Die Serieschaltung von Blind- und Wirkwiderständen ist in der Elektrotechnik und der Elektronik häufig anzutreffen. So wirken Motoren, Transformatoren und Antennen als Serieschaltungen von RCL -Gliedern. Die Spulengüte Q_L und der Verlustfaktor $\tan \delta$ lassen sich aus der Serieschaltung von Reaktanzen mit Widerständen ableiten. Der Leistungsfaktor $\cos \varphi$ hat für die Starkstromtechnik eine grosse Bedeutung, er lässt sich mit Hilfe einer Serieschaltung von RL -Gliedern bestimmen. Serieschwingkreise stellen einen Sonderfall der gemischten Serieschaltung dar. Diese Aufzählung liesse sich beliebig erweitern. Wir ersehen daraus, wie wichtig das Verständnis der Serieschaltung ist. Die Regeln der Trigonometrie, insbesondere der Winkelfunktionen, spielen für die Erklärung der Vorgänge in gemischten Schaltungen eine grosse Rolle. Die Darstellung von Wechselstromgrössen gemischter Schaltungen im Vektordiagramm ist die Regel. Die zu besprechenden Probleme werden Ihnen Gelegenheit geben, Ihr bis dahin erworbenes Wissen anzuwenden.

2. Was wissen Sie schon über die Serieschaltung von Blind- und Wirkwiderständen? (Lösung Seite 455)

- Was verstehen Sie unter dem Ausdruck «kapazitiver Blindwiderstand»?
- Was ist ein «induktiver Blindwiderstand»?
- Wie verhalten sich Strom und Spannung im Kondensator?
- Wie verhalten sich Strom und Spannung in der Spule?
- Der Gesamtwiderstand einer Serieschaltung eines ohmschen Widerstandes von 5 Ohm mit einem kapazitiven Blindwiderstand von 8 Ohm soll ermittelt werden. Dürfen die beiden Werte addiert werden?
- Was verstehen Sie unter einer Impedanz?
- Was sagt Ihnen der Ausdruck «Blindleistung»?
- Wo spielt der Leistungsfaktor $\cos \varphi$ eine Rolle?

3. Serieschaltung von Wirk- und Blindwiderständen

a. Serieschaltung von induktivem Blindwiderstand und ohmschem Widerstand

Das Verhalten von Serieschaltungen wird am folgenden Experiment erklärt. Eine Spule von 600 Windungen mit Eisenkern und aufgesetztem Joch wird nach Bild 159 über ein Ampèremeter an das Lichtnetz angeschlossen. Der

Blindwiderstand der Spule wird aus dem Strom- und Spannungswert errechnet.

Für die nächste Messung wird ein bekannter Widerstand zur Spule in Serie geschaltet. Der Wechselstromwiderstand der Schaltung wird erneut aus den Strom- und Spannungswerten ermittelt.

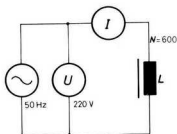


Bild 159

Der Wechselstromwiderstand der Schaltung nach Bild 160 und 161 ist kleiner als die Addition des ohmschen Widerstandes mit dem Blindwiderstand der Spule.

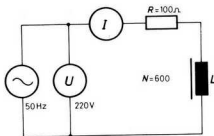


Bild 160

Das Versuchsergebnis wird sofort klar, wenn man die Phasenlage der Spannungen über dem Widerstand und der Spule betrachtet. Die Spannung über der Induktivität eilt gegenüber der Spannung am Widerstand um 90° vor. Die Werte der beiden Teilspannungen dürfen nicht einfach addiert werden. Die Gesamtspannung über der Serieschaltung entspricht der geometrischen Addition der Teilspannungen. Graphisch werden die Verhältnisse im **Vektordiagramm** (Zeigerdiagramm) dargestellt.

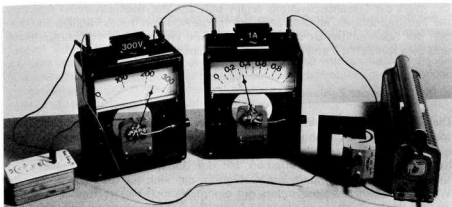


Bild 161

b. Das rechtwinklige kartesische Koordinatensystem

Wechselstromgrößen werden oft im kartesischen Koordinatensystem dargestellt. Das rechtwinklige kartesische Koordinatensystem besteht aus der horizontalen x - oder Abszissenachse und der vertikalen y - oder Ordinatenachse. Die Achsen stehen senkrecht aufeinander. Der Schnittpunkt der Achsen heisst Nullpunkt oder Ursprung. Reelle Werte werden auf der positiven x -Achse aufgetragen, Reaktanzen je nach Phasenlage auf der negativen oder positiven y -Achse. In Bild 162 ist die Spannung am Wirkwiderstand nach rechts auf der x -Achse aufgetragen. Die Länge des Pfeiles entspricht dem Wert der Spannung. Im gleichen Massstab wurde die Spannung über der Induktivität nach oben eingezeichnet. Winkel werden im Gegenuhrzeigersinn gemessen, deshalb hat die um 90° voreilende Spannung über der Induktivität ihren Platz auf der positiven y -Achse.

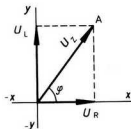


Bild 162

Der Wert der Gesamtspannung ergibt sich aus der geometrischen Addition der Teilspannungen. Im Diagramm erfolgt die Addition durch Parallelverschieben der Spannungen U_L und U_R . Die Gerade zwischen dem Schnittpunkt A und dem Nullpunkt 0 entspricht der Gesamtspannung U_z .

c. Die Gaussche Zahlenebene

Die Darstellung von Wechselstromgrößen im kartesischen Koordinatensystem ist für die graphische Lösung von Wechselstromproblemen gut geeignet. Die Elektrotechnik fordert jedoch eine grafische *und* rechnerische Behandlung der gestellten Aufgaben. Mit der Gausschen Zahlenebene steht uns ein Koordinatensystem zur Verfügung, das sich für die Darstellung von Wechselstromgrößen besonders gut eignet, da sich die zeichnerisch dargestellten Werte algebraisch direkt als komplexe Zahl anschreiben lassen.

Die Kenntnis der Rechenregeln für komplexe Zahlen ist für das Verständnis der Elektrotechnik nicht unbedingt erforderlich. In den meisten Fachaufsätzen werden jedoch Wechselgrößen komplex dargestellt, so dass die Grundkenntnisse dieser Rechnungsart das Verständnis erleichtern. Der folgende Text soll die einfachen Grundbegriffe vermitteln, ohne dass dabei auf die Rechenregeln eingegangen wird. Der Schüler soll über die Darstellung in der Gausschen Zahlenebene so viel wissen, dass er in der Lage ist, ein Zeigerdiagramm zu lesen.

In der Algebra unterscheidet man zwischen *reellen Zahlen* und *imaginären Zahlen*.

Reelle Zahlen sind Zahlen, deren Quadrate positiv sind.

Beispiele für reelle Zahlen:

5 weil $5^2 = 25$, -7 weil $-7^2 = 49$, $0,2$ weil $0,2^2 = 0,04$, $-0,3$ weil $-0,3^2 = 0,09$.

Imaginäre Zahlen sind Zahlen, deren Quadrate negativ sind.

Beispiele für imaginäre Zahlen:

$\sqrt{-9}$ weil $(\sqrt{-9})^2 = -9$, $\sqrt{-0,16}$ weil $(\sqrt{-0,16})^2 = -0,16$

Aus einer negativen Zahl lässt sich nur dann die zweite Wurzel ziehen, wenn man eine Hilfsgrösse einführt. Diese Hilfsgrösse heisst *imaginäre Einheit* und hat den Wert $\sqrt{-1}$. Als Symbol für die imaginäre Einheit wird der Buchstabe j verwendet.

$$\sqrt{-1} = j; j^2 = -1$$

Beispiel:

Der Wurzelausdruck $\sqrt{-25}$ soll berechnet werden. Mit den Regeln der Wurzelrechnung ist diese Aufgabe nicht lösbar. Wir können jedoch den Wurzelausdruck mit j erweitern, unter der Bedingung, dass das Resultat ebenfalls mit j erweitert wird.

$$\sqrt{-25} = \sqrt{(-1) \cdot 25} = \sqrt{-1} \cdot \sqrt{25} = \sqrt{-1} \cdot 5 = 5j$$

Die Gauss'sche Zahlenebene verwendet rechtwinklige Koordinaten. An Stelle der x -Achse tritt die reelle Achse. Auf der reellen Achse werden rechts vom Nullpunkt die positiven reellen Zahlen aufgetragen, während die negativen reellen Zahlen ihren Platz links vom Nullpunkt haben. An Stelle der y -Achse tritt die imaginäre Achse. Auf der imaginären Achse werden nach oben die positiven imaginären Zahlen und nach unten die negativen imaginären Zahlen aufzeichnet.

In Bild 163 ist die Gauss'sche Zahlenebene dargestellt.

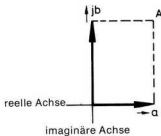


Bild 163

Jeder Punkt in jedem der vier Quadranten kann durch die Angabe einer reellen und einer imaginären Komponente dargestellt werden. Der Punkt A in Bild 163 ist bestimmt durch die Komponenten $a + jb$. Die Addition oder Subtraktion einer reellen und einer imaginären Zahl ergibt eine *komplexe Zahl*.

Für die Darstellung von Wechselstromgrößen in der Gauss'schen Zahlenebene gelten folgende Regeln:

- Wirkwiderstände, Wirkanteile von Spannungen und Wirkanteile von Strömen werden immer auf der reellen Achse aufgetragen.
- Blindwiderstände, Blindanteile von Spannungen und Blindanteile von Strömen werden immer auf der imaginären Achse aufgetragen.
- Induktive Blindwiderstände werden auf der positiven imaginären Achse, kapazitive Blindwiderstände auf der negativen imaginären Achse dargestellt.

Für die algebraische Darstellung von Wechselstromgrößen in der Gauss'schen Zahlenebene gelten folgende Regeln:

- Komplexe Wechselstromwerte werden in der Komponentenform dargestellt (Bild 163a)

$$\underline{Z} = R + j\omega L$$

Der Strich unter dem Z bedeutet, dass Z eine komplexe Grösse ist. Durch diese Schreibweise ist die Impedanz in der Gauss'schen Zahlenebene festgelegt. Die Serieschaltung von einem kapazitiven mit einem reellen Widerstand ergibt folgende Darstellung:

$$\underline{Z} = R + \frac{1}{j\omega C}$$

Der Faktor j gibt die Richtung des Blindwiderstandes an. Diese Form ist eine *Darstellungsart*. Wenn der Wert (Betrag) der Impedanz errechnet werden soll, so müssen der reelle Wert und der imaginäre Wert geometrisch addiert werden. Das Resultat ergibt die Länge des Pfeiles Z , diese entspricht dem Wert der Impedanz.

- Der Faktor j kommt immer vor das Symbol der Kreisfrequenz zu stehen.

$$jX_L = j\omega L$$

$$jX_C = \frac{1}{j\omega C} = -j\frac{1}{\omega C}$$

- Der Faktor j beeinflusst den Betrag des Wertes, mit dem er multipliziert wird, nicht.
- Die Multiplikation eines Faktors mit j bedeutet das Vordrehen um 90° .
- Die Multiplikation eines Faktors mit $-j$ bedeutet ein Zurückdrehen um 90° .
- Die zweifache Multiplikation mit j ergibt den Faktor -1 (da $\sqrt{-1} \cdot \sqrt{-1} = -1$).

$\frac{1}{j} = -j$ Beweis: Der Ausdruck kann mit j erweitert werden

$$\frac{1}{j} = \frac{j}{j \cdot j} = \frac{\sqrt{-1}}{\sqrt{-1} \cdot \sqrt{-1}} = \frac{\sqrt{-1}}{-1} = -\sqrt{-1} = -j$$

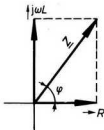


Bild 163a

Beispiele:

Darstellung eines kapazitiven Blindwiderstandes Bild 163b



Bild 163b

Der kapazitive Blindwiderstand wird nach den Regeln auf der negativen imaginären Achse aufgetragen. Die algebraische Schreibweise trägt dem Rechnung. Da nach der Regel der Faktor j vor das Symbol der Kreisfrequenz zu stehen kommt, ergibt sich eine Multiplikation des Blindwiderstandes mit dem Faktor $-j$, weil j unter dem Bruchstrich stand. Eine Multiplikation mit $-j$ bedeutet eine Zurückdrehung um 90° .

Darstellung eines induktiven Blindwiderstandes Bild 163c

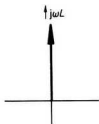


Bild 163c

Der induktive Blindwiderstand wird nach den Regeln auf der positiven imaginären Achse aufgetragen. Algebraisch kommt diese Vorwärtsdrehung um 90° durch den Faktor j vor dem Symbol der Kreisfrequenz zum Ausdruck.

Darstellung der Serieschaltung eines Wirkwiderstandes mit einem induktiven Blindwiderstand (Bild 163d).

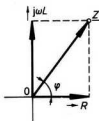


Bild 163d

Wirk- und Blindwiderstand werden nach den Regeln eingezeichnet und durch Parallelverschiebung erfolgt die Konstruktion der Impedanz. Die Darstellung in der Komponentenform lautet:

$$\underline{Z} = R + j\omega L$$

Als Betrag oder Absolutwert der komplexen Impedanz $\underline{Z}$ bezeichnet man die Länge des Pfeiles $\underline{Z}$, d. h. den Abstand des Punktes $\underline{Z}$ vom Nullpunkt:

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

Die beiden senkrechten Striche, die das Symbol für die Impedanz einrahmen, machen darauf aufmerksam, dass es sich um den Betrag, das heisst den Absolutwert der Impedanz handelt. Das Symbol ohne diese Striche wird für die Komponentendarstellung verwendet.

Zusammenfassung:

Die Gausssche Zahlenebene dient zur graphischen Darstellung von Wechselstromgrössen. Blindwerte werden auf der imaginären Achse aufgetragen, Wirkwerte auf der reellen Achse.

Die Komponentenform ist eine algebraische *Darstellungsform* der Werte in der Gausschen Zahlenebene.

Zur Berechnung der *Beträge* wird nach den Regeln der Trigonometrie vorgegangen.

Die Rechenregeln für komplexe Zahlen werden hier nicht erläutert. Wir nehmen zur Kenntnis, dass die Darstellung der komplexen Zahlen in der Komponentenform oder in anderen Formen für die mathematische Behandlung gebraucht werden. Für den Praktiker ist die Komponentenform insofern interessant, als er daraus die Richtung der Blindanteile für die graphische Darstellung erkennen kann.

d. Wechselstromgrössen in der Gausschen Zahlenebene

Die Serieschaltung in Bild 164 soll graphisch in der Gausschen Zahlenebene dargestellt werden. Wirkwiderstand und induktiver Blindwiderstand werden nach den gezeigten Regeln eingezeichnet. Die Impedanz $\underline{Z}$ wird durch Parallelverschieben von X_L zeichnerisch ermittelt. Der Winkel zwischen dem Wirkwiderstand R und der Impedanz $\underline{Z}$ heisst *Phasenwinkel* φ .

Das Produkt aus Strom und Gesamtspannung heisst *Scheinleistung*. Es ist dies die Leistung, die von der Impedanz scheinbar verbraucht wird.

Die gebräuchlichsten Symbole für die Scheinleistung sind S und P_s .

Die Masseinheit ist VA (Voltampère)

$$P_s = U \cdot I \text{ (Effektivwerte)}$$

Die *Wirkleistung* ist die Leistung, die in der Impedanz wirklich in eine andere Energieform umgesetzt wird. Sie entspricht der Leistung, die von den Wirkwiderständen aufgenommen wird.

Das Symbol für die Wirkleistung ist P

Die Masseinheit ist W (Watt)

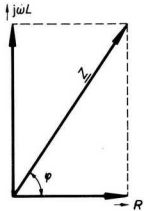
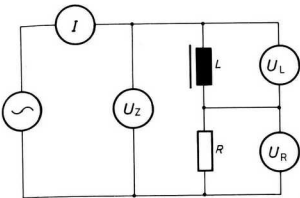


Bild 164

Die Wirkleistung lässt sich mit Hilfe des Zeigerdiagrammes leicht errechnen. Sie entspricht dem Produkt von Strom und Spannung am Wirkwiderstand.

$$P = I \cdot U_R \text{ (Effektivwerte)}$$

Widerstände und Spannungen verhalten sich in der Serieschaltung proportional zueinander. Das Verhältnis der Spannung am Wirkwiderstand U_R zur Gesamtspannung U_Z entspricht damit dem Verhältnis des Wirkwiderstandes R zur Impedanz $|Z|$. Dieser Quotient ist gleich dem Kosinus des Phasenwinkels φ . Damit erhalten wir die Wirkleistung:

$$P = U \cdot I \cdot \cos \varphi \text{ (Effektivwerte)}$$

Der *Leistungsfaktor* $\cos \varphi$ dient der Errechnung der Wirkleistung, die in Impedanzen verbraucht wird.

Für die Serieschaltung errechnet er sich nach:

$$\cos \varphi = \frac{R}{|Z|}$$

Die *Blindleistung* ist die Leistung, die scheinbar in Reaktanzen verbraucht wird. Sie ist eine rein formale Grösse ohne wirkliche physikalische Bedeutung. Man kann sie aber für Rechenzwecke oft gut verwenden.

Die gebräuchlichsten Symbole für die Blindleistung sind Q und P_q (vergleiche mit Seite 165).

Die Masseinheit ist das Var (Voltampère reaktiv)

Auch die Blindleistung lässt sich aus dem Zeigerdiagramm errechnen. Das Verhältnis der Spannung U_L zur Gesamtspannung U_Z entspricht dem Verhältnis des induktiven Blindwiderstandes X_L zur Impedanz $|Z|$. Dieser Quotient ist gleich dem Sinus des Phasenwinkels φ . Daraus ergibt sich die Blindleistung:

$$P_q = U \cdot I \cdot \sin \varphi$$

Der Blindleistungsfaktor $\sin \varphi$ dient zur Berechnung der Blindleistung, die von Impedanzen aufgenommen wird.

Für die Serieschaltung errechnet er sich nach:

$$\sin \varphi = \frac{X_L}{|Z|}$$

Die Spulengüte Q_L ist ein Mass für die Güte einer Spule. Alle Spulenverluste werden in einem Serieverlustwiderstand zusammengefasst. Das Verhältnis von Blindwiderstand zu Wirkwiderstand ergibt die Spulengüte.

$$Q_L = \frac{X_L}{R}$$

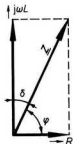


Bild 165

Bild 165 zeigt das Zeigerdiagramm für eine Spule mit Verlusten.

$$Q_L = \frac{\omega L}{R_v} = \tan \varphi = \frac{1}{\tan \delta} \quad [Q_L] = \frac{Vs \cdot A}{s \cdot A \cdot V} = \text{dimensionslos}$$

Der *Verlustwinkel* δ ist der Komplementärwinkel zum Phasenwinkel φ . Für die reine Induktivität wird er zu Null, da der Phasenwinkel 90° wird; der Tangens wird damit ebenfalls Null, was bedeutet, dass die Spulengüte unendlich würde. Diese Schlussfolgerung ist richtig, da die reine Induktivität keinen Verlustwiderstand aufweist.

e. Serieschaltung von kapazitivem Blindwiderstand und ohmschem Widerstand

Der folgende Versuch zeigt das Verhalten eines RC -Gliedes. Vorerst wird der Blindwiderstand eines Kondensators nach Bild 166 messtechnisch ermittelt. Zu diesem Blindwiderstand wird nach Bild 167 und 168 ein Wirkwiderstand in Serie geschaltet. Die Impedanz wird aus den Strom- und Spannungswerten errechnet. Das Resultat zeigt für die Impedanz einen kleineren Wert, als die Addition von Wirk- und Blindwiderstand ergeben würden. Die Verhältnisse liegen gleich wie beim RL -Glied. Infolge der Phasenverschiebung um 90°

zwischen Strom und Spannung im Blindwiderstand müssen die Widerstandswerte geometrisch addiert werden. Da die Spannung am Kondensator gegenüber der Spannung am Widerstand nacheilt, wird der kapazitive Blindwiderstand auf dem neg. Teil der imaginären Achse aufgetragen. Bild 169 zeigt die graphische Darstellung im Zeigerdiagramm in der Gaußsschen Zahlenebene.

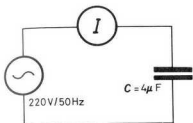


Bild 166

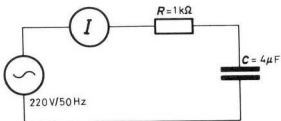


Bild 167

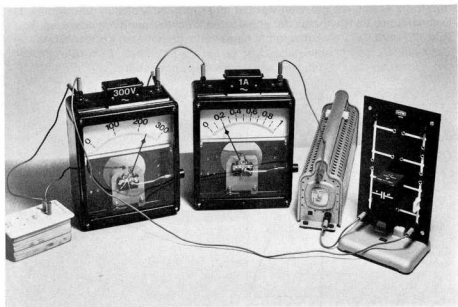


Bild 168

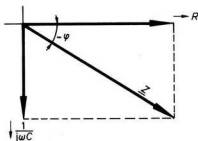
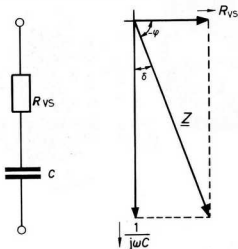


Bild 169

Die Regeln für das RL -Serieglied zur Berechnung der Wirk-, Blind- und Scheinleistung gelten auch für das RC -Serieglied.

Die Verluste im Kondensator werden durch den *Verlustfaktor* $\operatorname{tg} \delta$ ausgedrückt. Alle Kondensatorverluste werden in einem Serieverlustwiderstand zusammengefasst. Je kleiner der Serieverlustwiderstand ist, desto geringer sind die Verluste. Der Tangens des Verlustwinkels δ entspricht dem Verlustfaktor. Analog zur Spule weist eine reine Kapazität keine Verluste auf, der Tangens des Verlustwinkels wird Null. Der Verlustfaktor ist keine konstante Grösse, er ist frequenzabhängig. Der Serieverlustwiderstand ist demnach ebenfalls frequenzabhängig, denn der grösste Anteil der ohmschen Verluste ist auf Verluste im Dielektrikum zurückzuführen. Diese dielektrischen Verluste entstehen durch die Arbeit, die geleistet werden muss, um die Moleküle und Atome des Dielektrikums im Rhythmus der angelegten Wechselspannung auszurichten. Bild 170 zeigt das Zeigerdiagramm eines verlustbehafteten Kondensators. Der Verlustfaktor ist eine reine Zahl, er hat keine Einheit. Er wird in Prozenten, Promillen oder negativen Zehnerpotenzen angegeben.



$$\operatorname{tg} \delta = \frac{R_{vs}}{X_c} = \frac{R_{vs}}{\frac{1}{\omega C}}$$

$$\operatorname{tg} \delta = R_{vs} \cdot \omega C \quad \left[\frac{V}{A} \cdot \frac{1}{s} \cdot \frac{As}{V} = 1 \right]$$

Bild 170

f. Serieschaltung von induktivem und kapazitivem Blindwiderstand mit ohmschem Widerstand

Die Wirk- und Blindwiderstände des Versuches nach Bild 171 und 172 wurden durch eine Strom-Spannungsmessung bestimmt. Strom und Spannung an der Schaltung ergeben einen Wert für die Impedanz, der bedeutend unter

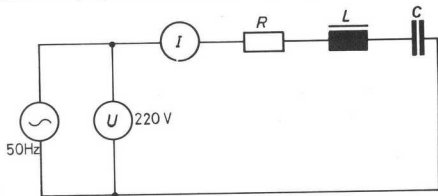


Bild 171

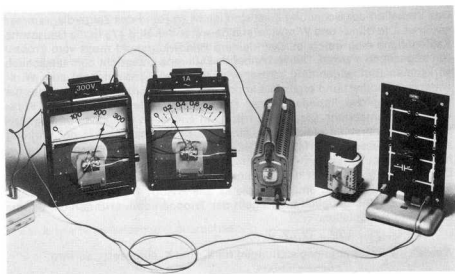
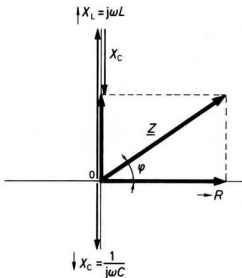


Bild 172



$$\underline{Z} = R + j\omega L + \frac{1}{j\omega C}$$

$$\underline{Z} = R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)$$

$$|\underline{Z}| = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}$$

Bild 173

dem Wert der Summe der Einzelwiderstände liegt. Das Joch über der Spule wird verschoben und damit der Wert der Induktivität verändert, gleichzeitig ändert sich der Strom durch die Impedanz. Für eine bestimmte Stellung des Joches erreicht der Strom seinen Maximalwert.

Das Verhalten der Schaltung lässt sich leicht an Hand des Zeigerdiagrammes erklären. Die Blind- und Wirkwiderstände werden in Bild 173 in die Gaussche Zahlenebene eingezeichnet. Der kleinere Blindwiderstand muss vom grösseren abgezogen werden. Die verbleibende Differenz entspricht dem tatsächlich wirksamen Blindwiderstand, dieser wird vektoriell (geometrisch) zum Wirkwiderstand addiert und ergibt die Impedanz. Es ist leicht einzusehen, dass die kleinste mögliche Impedanz einer gemischten Serieschaltung dem Wirkwiderstand entspricht. Dieser Fall tritt dann ein, wenn induktiver und kapazitiver Blindwiderstand gleich gross sind und sich demzufolge in der Wirkung aufheben. Dieser Sonderfall wird später als Resonanzfall des Schwingkreises besprochen.

Die Zeigerdiagramme der drei möglichen Fälle für eine Serieschaltung lassen sich in eine Gleichung umsetzen, die es uns erlaubt, die Impedanzen zu berechnen. Es sind lediglich die Regeln der Trigonometrie erforderlich, um die Gleichung aufzustellen.

$$|\underline{Z}| = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$$

Werden die Bestimmungsgleichungen für X_L und X_C eingesetzt, so wird:

$$|\underline{Z}| = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}$$

Diese Gleichung gilt für alle Serieschaltungen von R , L und C , wobei ein eventuell fehlendes Element in der Formel einfach weggelassen wird. Es spielt auch keine Rolle, welcher der beiden Blindwiderstände grösser ist. Ergibt sich in der Klammer ein negativer Wert, so fällt das Minusvorzeichen durch das Quadrieren des Ausdruckes wieder weg.

4. Beispiele

Allgemeines Vorgehen:

- Wir stellen zuerst die Gleichungen in Komponentenform auf.
- Da wir aber für die nachfolgenden Rechnungen einen Phasenwinkel φ zwischen Strom und Spannung von $+90^\circ$ bzw. -90° für induktive bzw. kapazitive Widerstände annehmen, ersetzen wir die komplexen Zeiger sofort durch ihre Beträge (Effektivwerte) und lassen die Richtung unberücksichtigt.

a) Zur Schaltung nach Bild 174 sollen folgende Grössen bestimmt werden:

- Strom I durch die Impedanz
- Scheinleistung P_s
- Blindleistung P_q
- Zeigerdiagramm für die Widerstände
- Wirkleistung P
- Zeigerdiagramm für die Spannungen

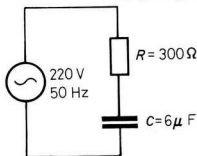


Bild 174

Vorgehen:

1. Schritt: Berechnen des kapazitiven Blindwiderstandes X_C

- Komponentenform
- Grundformel anschreiben
- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

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

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

$$X_C = \frac{1}{2\pi \cdot 50 \cdot 6 \cdot 10^{-6}}$$

$$[X_C] = s \cdot \frac{V}{As} = \frac{V}{A} = \Omega$$

$$X_C = 530 \Omega$$

2. Schritt: Zeichnen des Vektordiagrammes für die Widerstände

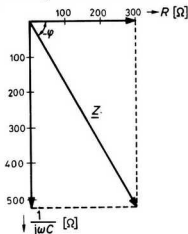


Bild 175

3. Schritt: Berechnen der Impedanz Z

– Komponentenform:

$$\underline{Z} = R + \frac{1}{j\omega C} = R - j\frac{1}{\omega C}$$

– Grundformel anschreiben:

$$|\underline{Z}| = \sqrt{R^2 + \left(-\frac{1}{\omega C}\right)^2}$$

– Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$|\underline{Z}| = \sqrt{300^2 + 530^2}$$

$$Z = |\underline{Z}| = 609 \Omega$$

4. Schritt: Berechnen des Stromes I

– Grundformel anschreiben (Effektivwerte)

$$I = \frac{U}{Z}$$

– Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$I = \frac{220}{609} \frac{\text{V}}{\Omega}$$

$$I = 0,362 \text{ A}$$

5. Schritt: Berechnen des $\text{tg} \varphi$

– Grundformel anschreiben

$$\text{tg} \varphi = \frac{-\frac{1}{\omega C}}{R} = -\frac{1}{\omega C R}$$

– Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$\text{tg} \varphi = -\frac{530 \Omega}{300 \Omega}$$

$$\text{tg} \varphi = -1,77$$

- Phasenwinkel $\varphi = -60^\circ 30'$, d. h. die Spannung an der Impedanz Z eilt dem Strom um $60^\circ 30'$ nach.
- Für die Phasenverschiebung ist also das Verhältnis vom kapazitiven bzw. induktiven Widerstand zum Wirkwiderstand massgebend.

6. Schritt: Berechnen der Spannungen U_C und U_R

- Grundformel anschreiben

$$U_C = I \cdot X_C; \quad U_R = I \cdot R$$

- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$U_C = 0,362 \cdot 530$$

$$U_C = 192 \text{ V}$$

$$U_R = 0,362 \cdot 300$$

$$U_R = 108,5 \text{ V}$$

7. Schritt: Zeichnen des Zeigerdiagrammes für die Spannungen

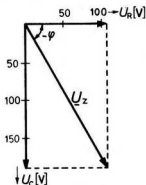


Bild 176

8. Schritt: Berechnen der Leistungen

- Grundformel für $\sin \varphi$ und $\cos \varphi$ anschreiben

$$\sin \varphi = \frac{X_C}{Z}; \quad \cos \varphi = \frac{R}{Z}$$

- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$\sin \varphi = \frac{530}{609}; \quad \cos \varphi = \frac{300}{609}$$

$$\sin \varphi = 0,870; \quad \cos \varphi = 0,493$$

- Grundformeln für die Leistungen anschreiben

$$P_S = U \cdot I$$

$$P_q = P_S \cdot \sin \varphi$$

$$P = P_S \cdot \cos \varphi$$

$$P_S = 220 \cdot 0,362$$

$$P_S = 79,5 \text{ VA}$$

$$P_q = 79,5 \cdot 0,870$$

$$P_q = 69,5 \text{ Var}$$

$$P = 79,5 \cdot 0,493$$

$$P = 39,2 \text{ W}$$

- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

9. Schritt: Kontrolle, P und P_q können auch mit I und U_R sowie U_C bestimmt werden, da Wirkleistung gleichbedeutend ist mit Strom mal Spannung am ohmschen Widerstand und Blindleistung mit Strom mal Spannung am Kondensator. Wenn die Resultate dieser Rechnung gleiche Werte ergeben, dann stimmen die restlichen Berechnungen ebenfalls.

– Formel für die Leistungen anschreiben

$$P = U_R \cdot I$$

$$P_q = U_C \cdot I$$

– Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$P = 108,5 \cdot 0,362$$

$$P = 39,2 \text{ W}$$

$$P_q = 192 \cdot 0,362$$

$$P_q = 69,5 \text{ Var}$$

10. Schritt: Resultate zusammenstellen

$$I = 0,362 \text{ A}$$

$$P = 39,2 \text{ W}$$

$$\tan \varphi = -1,77$$

$$P_s = 79,5 \text{ VA}$$

$$Z = 608 \Omega$$

$$P_q = 69,5 \text{ Var}$$

b) Zur Schaltung nach Bild 177 sollen folgende Werte bestimmt werden:

- Impedanz Z
- Strom I durch die Impedanz
- Wirkleistung P
- Blindleistung P_q
- Scheinleistung P_s
- Zeigerdiagramm für die Widerstände
- Zeigerdiagramm für die Spannungen

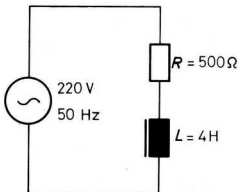


Bild 177

Diese Aufgabe weist den gleichen Lösungsgang auf wie Aufgabe a. Es wird gezeigt wie sich die Aufgabe in weniger Schritten lösen lässt, indem man einzelne Berechnungsvorgänge zusammenfasst.

Vorgehen:

1. Schritt: Berechnung von Impedanz und Strom in einem Rechnungsgang.

– Komponentenform:	$\underline{I} = \frac{\underline{U}}{R + j\omega L}$
– Formel für I anschreiben	$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}}$
– Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen	$I = \frac{220}{\sqrt{500^2 + (2\pi \cdot 50 \cdot 4)^2}} \quad \frac{\text{V}}{\Omega}$
	$I = \frac{220}{1352} \quad \frac{\text{V}}{\Omega}$
	$I = \mathbf{0,1625 \text{ A}}$
	$Z \equiv \underline{Z} = \mathbf{1352 \Omega}$

2. Schritt: Berechnung von $\sin \varphi$ und Blindwiderstand in einem Rechnungsgang

– Formel für $\sin \varphi$ anschreiben	$\sin \varphi = \frac{\omega L}{Z}$
– Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen	$\sin \varphi = \frac{2\pi \cdot 50 \cdot 4}{1352} = \frac{1256}{1352}$
	$\sin \varphi' = 0,93$
	$X_L = 1256 \Omega$

3. Schritt: Berechnen des Leistungsfaktors $\cos \varphi$

– Grundformel für $\cos \varphi$ anschreiben	$\cos \varphi = \frac{R}{Z}$
– Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen	$\cos \varphi = \frac{500}{1352}$
	$\cos \varphi = 0,37$

4. Schritt: Berechnen der Leistungen

– Grundformel für die Leistungen anschreiben	$P_s = U \cdot I$
	$P = P_s \cdot \cos \varphi$
	$P_q = P_s \cdot \sin \varphi$
– Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen	$P_s = 220 \cdot 0,1625$
	$P_s = \mathbf{35,7 \text{ VA}}$
	$P = 35,7 \cdot 0,37$
	$P = \mathbf{13,20 \text{ W}}$
	$P_q = 35,7 \cdot 0,93$
	$P_q = \mathbf{33,2 \text{ Var}}$

5. Schritt: Berechnen der Spannungen U_L und U_R verbunden mit gleichzeitiger Kontrolle der übrigen Berechnungen.

– Grundformel für Spannungen und Leistungen anschreiben

$$U_L = I \cdot X_L$$

$$P_q = U_L \cdot I = I^2 \cdot X_L$$

$$U_R = I \cdot R$$

$$P = U_R \cdot I = I^2 \cdot R$$

$$U_L = 0,1625 \cdot 1256$$

$$P_q = 0,1625 \cdot 204$$

$$U_L = \mathbf{204 \text{ V}}$$

$$P_q = 33,2 \text{ Var}$$

$$\text{oder } P_q = 0,1625^2 \cdot 1256 = 33,2 \text{ Var}$$

$$U_R = 0,1625 \cdot 500$$

$$P = 0,1625 \cdot 81,25$$

$$U_R = \mathbf{81,25 \text{ V}}$$

$$P = 13,20 \text{ W}$$

$$\text{oder } P = 0,1625^2 \cdot 500 = 13,20 \text{ W}$$

6. Schritt: Zusammenstellen der Resultate

$$Z = \mathbf{1352 \Omega}$$

$$I = \mathbf{0,1625 \text{ A}}$$

$$P_s = \mathbf{35,7 \text{ VA}}$$

$$P = \mathbf{13,20 \text{ W}}$$

$$P_q = \mathbf{33,2 \text{ Var}}$$

7. Schritt: Aufzeichnen der Diagramme

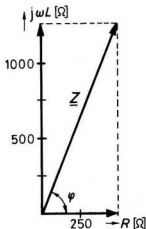


Bild 178

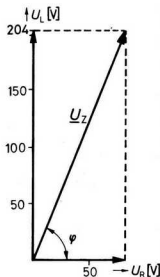


Bild 179

c) Der Serieverlustwiderstand des Kondensators nach Bild 180 ist zu bestimmen.

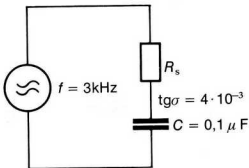


Bild 180

Vorgehen:

- Grundformel für $\text{tg } \delta$ anschreiben (siehe Seite 208)
- Formel nach R_s umstellen
- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$\text{tg } \delta = R_s \cdot \omega \cdot C$$

$$R_s = \frac{\text{tg } \delta}{\omega C}$$

$$R_s = \frac{4 \cdot 10^{-3}}{2\pi \cdot 3 \cdot 10^3 \cdot 0,1 \cdot 10^{-6}}$$

$$R_s = \mathbf{2,12 \Omega}$$

d) Die Spulengüte der verlustbehafteten Spule nach Bild 181 soll bestimmt werden.

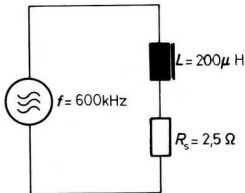


Bild 181

Vorgehen:

- Grundformel für Spulengüte anschreiben (siehe Seite 206)
- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$Q_L = \frac{\omega L}{R_s}$$

$$Q_L = \frac{2\pi \cdot 0,6 \cdot 10^6 \cdot 2 \cdot 10^{-4}}{2,5}$$

$$Q_L = \mathbf{302}$$

e) Für die Schaltung nach Bild 182 sollen folgende Werte ermittelt werden:

- Impedanz Z und Phasenwinkel φ
- Wirkleistung P
- Scheinleistung P_s
- Blindleistung P_q
- Vektordiagramm für die Widerstände

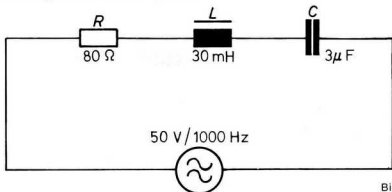


Bild 182

Vorgehen:

1. Schritt: Berechnung von Z

– Komponentenform

$$|\underline{Z}| = R + j\omega L + \frac{1}{j\omega C}$$

– Berechnungsformel anschreiben

$$|\underline{Z}| = \sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2}$$

– Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$|\underline{Z}| = \sqrt{80^2 + (2\pi \cdot 1 \cdot 10^3 \cdot 30 \cdot 10^{-3} - \frac{1}{2\pi \cdot 1 \cdot 10^3 \cdot 3 \cdot 10^{-6}})^2}$$

$$Z = |\underline{Z}| = 157,3 \, \Omega$$

$$\varphi = \arctg \varphi = \arctg \frac{X}{R} = 59,4^\circ$$

2. Schritt: Ermitteln von $\cos \varphi$ und $\sin \varphi$

– Berechnungsformel für $\cos \varphi$ anschreiben

$$\cos \varphi = \frac{R}{Z}$$

– Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$\cos \varphi = \frac{80}{157,3}$$

$$\cos \varphi = 0,508$$

- Berechnungsformel für $\sin \varphi$ anschreiben

$$\sin \varphi = \frac{(\omega L - \frac{1}{\omega C})}{Z}$$

- Zahlenwerte gekürzt einsetzen und ausrechnen

$$\sin \varphi = \frac{(2\pi \cdot 30 - \frac{1}{2\pi \cdot 3 \cdot 10^{-3}})}{157,3}$$

$$\sin \varphi = 0,86$$

3. Schritt: Berechnen der Leistungen

- Berechnungsformel für die Leistungen anschreiben

$$P_s = \frac{U^2}{Z}$$

$$P = P_s \cdot \cos \varphi$$

$$P_q = P_s \cdot \sin \varphi$$

- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$P_s = \frac{50^2}{157,3}$$

$$P_s = \mathbf{15,88 \text{ VA}}$$

$$P = 15,88 \cdot 0,508$$

$$P = \mathbf{8,07 \text{ W}}$$

$$P_q = 15,88 \cdot 0,86$$

$$P_q = \mathbf{13,65 \text{ Var}}$$

4. Schritt: Berechnung der Widerstände und Kontrolle der übrigen Berechnungen

- Komponentenform
- Grundformel für die Blindwiderstände anschreiben

$$|X_L| = j\omega L; |X_C| = \frac{1}{j\omega C}$$

$$X_L \equiv |X_L| = \omega L \quad X_C \equiv |X_C| = \frac{1}{\omega C}$$

- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$X_L = 2\pi \cdot 1 \cdot 10^3 \cdot 30 \cdot 10^{-3}$$

$$|X_L| = \frac{1}{s} \cdot \frac{Vs}{A} = \frac{V}{A} = \Omega$$

$$X_L = 188,5 \Omega$$

$$X_C = \frac{1}{2\pi \cdot 1 \cdot 10^3 \cdot 3 \cdot 10^{-6}}$$

$$|X_C| = s \cdot \frac{V}{As} = \frac{V}{A} = \Omega$$

$$X_C = 53,1 \Omega$$

- Kontrolle der Leistungen
- Grundformel für die Leistungen anschreiben

$$P = I^2 \cdot R \quad I = \frac{U}{Z}$$

$$P_q = I^2 \cdot (X_L - X_C)$$

- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$I = \frac{50}{157,3}$$

$$I = 0,318 \text{ A}$$

$$\begin{aligned}
 P &= 0,318^2 \cdot 80 \\
 P &= 8,07 \text{ W} \\
 P_q &= 0,318^2 \cdot 135,4 \\
 P_q &= 13,65 \text{ Var}
 \end{aligned}$$

5. Schritt: Resultate zusammenstellen und Zeigerdiagramm aufzeichnen

$$\begin{aligned}
 Z &= 157,3 \text{ Ohm} \\
 \varphi &= 59,4^\circ
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \cos \varphi &= 0,508 \\
 \sin \varphi &= 0,86
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 P &= 8,07 \text{ W} \\
 P_s &= 15,88 \text{ VA} \\
 P_q &= 13,65 \text{ Var}
 \end{aligned}$$

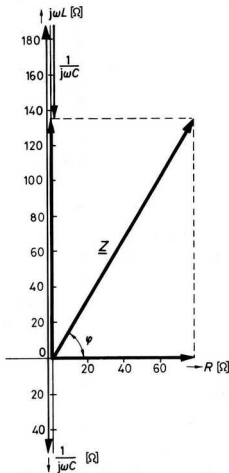


Bild 183

f) In der Schaltung nach Bild 184 soll die Spannung über dem Widerstand errechnet werden. Die Rechnung soll mit Hilfe des Zeigerdiagrammes überprüft werden.

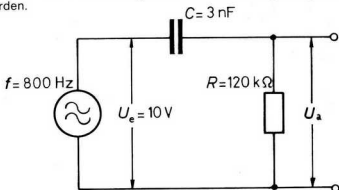


Bild 184

Vorgehen:

1. Schritt: Bestimmen von X_C und Z

Komponentenform

– Grundformel für X_C anschreiben

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

– Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

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

$$X_C = \frac{1}{2\pi \cdot 0,8 \cdot 10^3 \cdot 3 \cdot 10^{-9}}$$

$$|X_C| = \frac{sV}{As} = \frac{V}{A}$$

$$X_C = 66,3 \text{ k}\Omega$$

– Grundformel für Z anschreiben

– Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$\begin{aligned} |Z| &= \sqrt{R^2 + X_C^2} \\ |Z| &= \sqrt{(66,3 \cdot 10^3)^2 + (120 \cdot 10^3)^2} \\ Z &\equiv |Z| = 137,1 \text{ k}\Omega \end{aligned}$$

2. Schritt: Bestimmen der Spannung an R

– Grundformel für U_a anschreiben

$$U_a = \frac{U_z}{Z} R$$

– Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$U_a = \frac{10 \cdot 120 \cdot 10^3}{137,1 \cdot 10^3} \frac{V \Omega}{\Omega}$$

$$U_a = 8,75 \text{ V}$$

3. Schritt: Kontrolle der Rechnung mit Hilfe des Zeigerdiagrammes

– Zeigerdiagramm für die Widerstände aufzeichnen (1 cm = 20 kΩ)

– Z-Achse verlängern auf 10 cm, damit entspricht 1 cm auf dieser Achse 1 V

– Verlängerte Z-Achse auf R-Achse und X_C -Achse projizieren. U_a auf R-Achse abmessen.

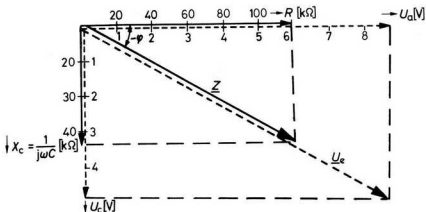


Bild 185

5. Das Wesentliche

Wechselstromgrößen werden in der Gaußschen Zahlenebene dargestellt. Auf der horizontalen reellen Achse werden Wirkwiderstände, Wirkleitwerte sowie Spannungen und Ströme über Wirkwiderständen aufgetragen. Auf der imaginären Achse werden Blindwiderstände, Blindleitwerte sowie Spannungen und Ströme zu Blindwiderständen dargestellt. Die Drehrichtung für die Darstellung von Phasenverschiebungen läuft gegen den Uhrzeigersinn.

Die Teilspannungen über den einzelnen Elementen einer Serieschaltung von Wirk- und Blindwiderständen werden geometrisch addiert.

Wirk- und Blindwiderstände von Serieschaltungen werden rechnerisch gleich behandelt wie die Teilspannungen der Schaltung.

Der Wechselstromwiderstand einer Schaltung mit Wirk- und Blindwiderständen heisst Impedanz.

Im Wechselstromkreis unterscheiden wir drei Arten von Leistungen: Die Wirkleistung entspricht der Leistung, die in den Wirkwiderständen in eine andere Energieform umgesetzt wird. Die Blindleistung ist das Produkt von Strom und Spannung über dem wirksamen Blindanteil der Schaltung. Unter Scheinleistung versteht man die von der Impedanz scheinbar aufgenommene Leistung. Diese entspricht dem Produkt von Strom und Spannung an der Impedanz.

Der Kosinus des Phasenverschiebungswinkels φ erlaubt eine einfache Berechnung der Wirkleistung. Multipliziert man die Scheinleistung mit dem Leistungsfaktor $\cos \varphi$, so erhält man die Wirkleistung.

Der Sinus des Phasenverschiebungswinkels φ heisst Blindleistungsfaktor. Wird die Scheinleistung damit multipliziert, so ergibt sich die Blindleistung der Schaltung.

Die Spulengüte Q_L ist ein Mass für die Güte einer Spule. Die gesamten Spulenverluste werden in einem Serienverlustwiderstand zusammengefasst. Das Verhältnis von Blindwiderstand zu Verlustwiderstand ergibt die Spulengüte. Der Verlustfaktor $\tan \delta$ ist ein Mass für die Verluste in einem Kondensator. Alle Kondensatorverluste werden in einem Serienverlustwiderstand zusammengefasst. Der Tangens des Verlustwinkels δ bringt diese Verluste zum Ausdruck. Der Verlustwinkel δ ist der Komplementärwinkel zum Phasenverschiebungswinkel φ .

6. Repetitionsaufgaben (Lösung Seite 457)

- Welche Bedeutung hat der Leistungsfaktor $\cos \varphi$?
- Zu was dient der Sinus des Phasenwinkels φ ?
- Erklären Sie die Ausdrücke «Scheinleistung», «Blindleistung» und «Wirkleistung» und nennen Sie die Einheiten, in welchen sie gemessen werden.
- Was sagt die Spulengüte Q_L aus?
- Mit welcher Masseinheit werden Kondensatorverluste gemessen?
- Die Güte einer Spule wird bei 10 MHz gemessen. Bei einer Induktivität von $2 \mu\text{H}$ ergibt sich ein Gütewert von 80. Wie gross ist der Serienverlustwiderstand?
- Ein mit genügend hoher Gleichspannung vorgespannter Elektrolytkondensator von $32 \mu\text{F}$ weist bei 50 Hz einen Serienverlustwiderstand von 5 Ohm auf. Wie gross ist der $\tan \delta$ des Kondensators?
- Bestimmen Sie für die Schaltung nach Bild 186 die Impedanz, den Leistungsfaktor, den Blindleistungsfaktor, Blind-, Wirk- und Scheinleistung, den Phasenwinkel und das Zeigerdiagramm.

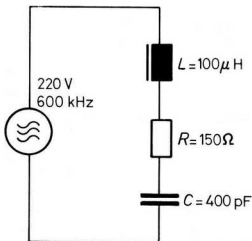


Bild 186

V. Parallelschaltung von Wirk- und Blindwiderständen

1. Einführung

Parallelschaltungen von Wirk- und Blindwiderständen sind in der Praxis ebenso oft anzutreffen wie Serieschaltungen. Für die Berechnung der Parallelschaltung von Reaktanzen und reellen Widerständen gelten die gleichen Regeln wie für die Parallelschaltung von Widerständen; die Leitwerte werden addiert und ergeben den Gesamtleitwert. Diese Addition wird jedoch unter Berücksichtigung der Phasenlage der Ströme durch die einzelnen Reaktanzen und Widerstände vorgenommen. Dies führt zur vektoriellen Addition der Leitwerte.

2. Was wissen Sie schon über die Parallelschaltung von Wirk- und Blindwiderständen?

(Lösung Seite 461)

- Welche Bedeutung hat der $\cos \varphi$ in der Parallelschaltung von Reaktanzen mit reellen Widerständen, verglichen mit deren Serieschaltung?
- Welches ist der grundsätzliche Unterschied zwischen der rechnerischen Behandlung der Serieschaltung und der Parallelschaltung von Reaktanzen mit reellen Widerständen?
- Was verstehen Sie unter dem Ausdruck «Leitwert»?
- Welche Begriffe müssen bei der Parallelschaltung eines Kondensators mit einem Widerstand bekannt sein, damit die aufgenommene Blindleistung ermittelt werden kann?
- Ist es möglich, den Gütefaktor Q_L einer Spule zu bestimmen, wenn diese durch einen Parallelwiderstand bedämpft wird?
- Wie verhalten sich in der Gaußschen Zahlenebene die Richtungen der Leitwerte und der zugehörigen Widerstände?

3. Die Parallelschaltung von Wirk- und Blindwiderständen

a) Parallelschaltung von induktivem Blindwiderstand mit ohmschem Widerstand

Das Arbeitsverhalten der Parallelschaltung wird am folgenden Versuch gezeigt. Die Versuchsschaltung ist in Bild 187 dargestellt, während Bild 188 den Aufbau zeigt.

Zuerst wird die Spule allein an das Netz angeschlossen und der Strom gemessen. Daraufhin wird die gleiche Messung mit dem Widerstand allein wiederholt. Für die nächste Messung werden Spule und Widerstand parallel geschaltet. *Der gemessene Strom ist kleiner als die algebraische Summe der Ströme durch Spule und Widerstand.*

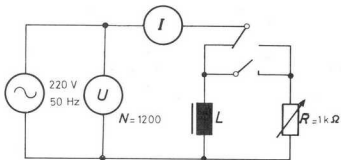


Bild 187

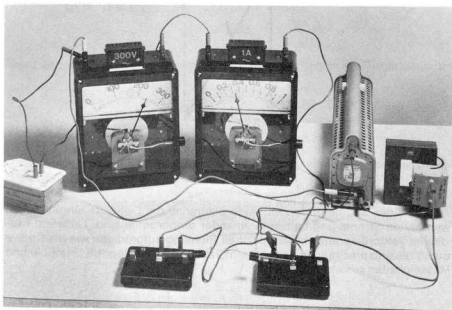


Bild 188

Das bedeutet, dass der Gesamtwiderstand der Parallelschaltung von Wirk- und Blindwiderstand grösser ist, als der Gesamtwiderstand einer entsprechenden Parallelschaltung von zwei Wirkwiderständen. Die Ursache dieser Erscheinung liegt in der Phasenverschiebung zwischen dem Spulenstrom und dem Strom im Wirkwiderstand. Für die Parallelschal-

tung liegt an beiden Elementen die gleiche Spannung. Die Ströme durch diese sind in bezug auf Betrag und Phase verschieden. Der Gesamtstrom lässt sich graphisch im Vektordiagramm ermitteln; rechnerisch wird er durch geometrische Addition der beiden Ströme bestimmt. Der Strom durch den reellen Widerstand wird auf der positiven reellen Achse aufgetragen, der Strom durch die Induktivität auf der negativen imaginären Achse, da der Spulenstrom dem Strom durch den Wirkwiderstand um 90° nachhinkt. In Bild 189 wird das zeichnerische Verfahren zur Bestimmung des Gesamtstromes gezeigt.

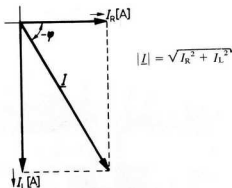


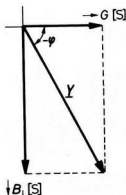
Bild 189

An Stelle der Ströme dürfen im Vektordiagramm die Leitwerte eingezeichnet werden, da Ströme und Leitwerte einander proportional sind. Leitwerte werden im Vektordiagramm in der gleichen Richtung aufgetragen wie die Ströme durch die entsprechenden Leitwerte. In Tabelle 15 sind Begriffe, Symbole und Masseinheiten zusammengestellt.

Begriff:	Symbol:	Masseinheit:
Wirkleitwert	G	Siemens (S)
Blindleitwert	B_L oder B_C	Siemens (S)
Scheinleitwert oder Admittanz	Y	Siemens (S)

Tabelle 15

Bild 190 zeigt das Vektordiagramm einer Parallelschaltung von Induktivität und Widerstand.



$$|Y| = \sqrt{\left(\frac{1}{R}\right)^2 + \left(\frac{1}{\omega L}\right)^2}$$

$$|Y| = \sqrt{G^2 + B^2}$$

Bild 190

Der Leistungsfaktor $\cos \varphi$ errechnet sich nach den Regeln der Trigonometrie:

$$\cos \varphi = \frac{G}{|Y|} \quad \text{oder:} \quad \cos \varphi = \frac{|Z|}{R} \quad \left(G = \frac{1}{R}; \quad |Y| = \frac{1}{|Z|} \right)$$

b) Parallelschaltung von kapazitivem Blindwiderstand und ohmschem Widerstand

Das Arbeitsverhalten dieser Parallelschaltung soll an einem Versuch gezeigt werden. In Bild 191 erkennen wir die Schaltung der Versuchsanordnung.

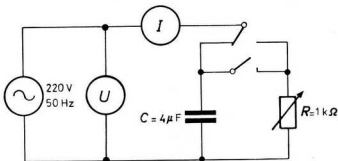


Bild 191

Bild 192 zeigt den Versuchsaufbau.

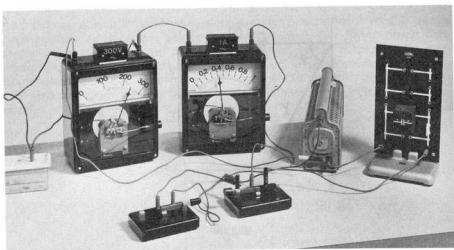


Bild 192

Das Vorgehen ist das gleiche wie beim vorhergehenden Versuch. Die Ströme durch C und R werden einzeln gemessen. Der Gesamtstrom ist wiederum kleiner als die Summe der beiden Einzelströme. Die Schaltung verhält sich analog zur Schaltung mit Spule und Widerstand. Die graphische und rechnerische Behandlung des Problems erfolgt nach denselben Regeln, es ist lediglich zu beachten, dass der Strom durch den Kondensator gegenüber dem Strom durch den Widerstand um 90° voreilt. Bild 193 zeigt das Vektordiagramm der Ströme.

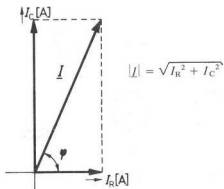
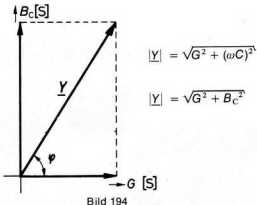


Bild 193

In Bild 194 sind die Leitwerte im Vektordiagramm festgehalten.



Der Leistungsfaktor $\cos \varphi$ lässt sich aus dem Vektorbild bestimmen.

$$\cos \varphi = \frac{G}{|\underline{Y}|}$$

c) Parallelschaltung von induktivem und kapazitivem Blindwiderstand mit einem ohmschen Widerstand

Der Versuch nach Bild 195 zeigt uns das Verhalten einer Parallelschaltung von Kondensator, Spule und ohmschem Widerstand.

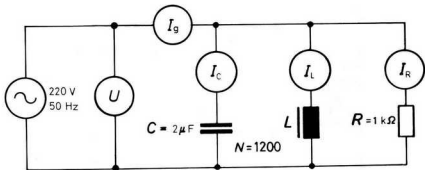


Bild 195

In Bild 196 ist der Versuchsaufbau dargestellt.

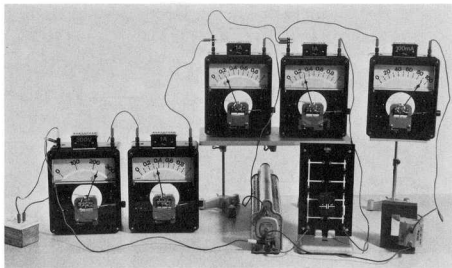
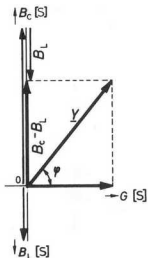


Bild 196

Der Versuch beweist, dass der Gesamtstrom wesentlich kleiner ist, als die Summe der Teilströme. Das Versuchsergebnis wird verständlich, wenn man bedenkt, dass die beiden Blindströme I_L und I_C gegeneinander um 180° phasenverschoben sind. Vektoriell betrachtet heisst das, dass sich diese ent-



$$|Y| = \sqrt{G^2 + \left(\omega C - \frac{1}{\omega L}\right)^2}$$

$$|Y| = \sqrt{G^2 + (B_C - B_L)^2}$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{B}{G}$$

Bild 197

gegenwirken; nur die Differenz der beiden Ströme bleibt wirksam. Dieser wirksame Blindstrom wird zum Wirkstrom geometrisch addiert und ergibt den Gesamtstrom. Je nachdem, welcher der Blindströme überwiegt, wirkt die Schaltung als RC - oder RL -Glieder. Ein Sonderfall tritt ein, wenn beide Blindströme gleich gross sind, die Schaltung wirkt dann als ohmscher Widerstand. Bild 197 zeigt, wie der Gesamtleitwert der besprochenen Schaltung vektoriell ermittelt wird. Da der kapazitive Blindleitwert bei dieser Frequenz überwiegt, wirkt die Schaltung als RC -Glieder.

4. Beispiele

a) Berechnung einer Parallelschaltung bestehend aus Induktivität und ohmschem Widerstand

Die Schaltung nach Bild 198 ist zu berechnen. Die Rechnung soll mit Hilfe des Vektordiagrammes überprüft werden.

Gesucht:

$Z, I_g, I_L, I_R, P, P_s, P_q,$

$\cos \varphi, \sin \varphi, \angle \varphi$

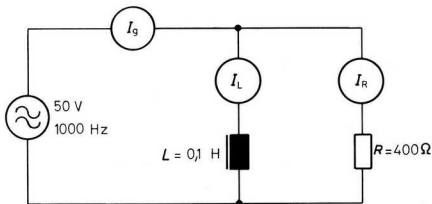


Bild 198

Vorgehen:

1. Schritt: Berechnen der Leitwerte

– Komponentenform

– Formeln anschreiben

$$G = \frac{1}{R}$$

$$B_L = \frac{1}{j\omega L} = \frac{1}{jX_L} = -j\frac{1}{X_L}$$

$$B_L \equiv |B_L| = \frac{1}{X_L}$$

– Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen $G = \frac{1}{400}$
 $= 2,5 \text{ mS}$

$$B_L = \frac{1}{2\pi \cdot 1 \cdot 10^3 \cdot 0,1} \frac{\text{s A}}{\text{V s}}$$

$$B_L = 1,592 \text{ mS}$$

2. Schritt: Berechnen des Scheinleitwertes

– Grundformel anschreiben

– Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen $|Y| = \sqrt{G^2 + B_L^2}$
 $Y \equiv |Y| = \sqrt{(2,5 \cdot 10^{-3})^2 + (1,592 \cdot 10^{-3})^2}$
 $Y = 2,96 \text{ mS}$

3. Schritt: Berechnen von Z

– Grundformel anschreiben:

$$Z = \frac{1}{Y}$$

– Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen $Z = \frac{1}{2,96 \cdot 10^{-3}}$
 $Z = 338 \Omega$

4. Schritt: Berechnen der Ströme

– Grundformel anschreiben

$$I_g = \frac{U}{Z}$$

$$I_L = U \cdot B_L$$

$$I_R = U \cdot G$$

– Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen $I_g = \frac{50}{338}$
 $I_g = 0,148 \text{ A}$

$$I_L = U \cdot B_L$$

$$= 50 \cdot 1,592 \cdot 10^{-3}$$

$$I_L = 79,6 \text{ mA}$$

$$I_R = U \cdot G$$

$$= 50 \cdot 2,5 \cdot 10^{-3}$$

$$I_R = 125 \text{ mA}$$

5. Schritt: Berechnung von $\sin \varphi$, $\cos \varphi$ und φ

– Grundformel anschreiben

$$\cos \varphi = \frac{Z}{R}; \quad \sin \varphi = \frac{Z}{X_L} = Z \cdot B_L$$

– Zahlenwerte einsetzen
und ausrechnen

$$\cos \varphi = \frac{338}{400}; \quad \sin \varphi = 338 \cdot 1,592 \cdot 10^{-3}$$

$$\cos \varphi = 0,845; \quad \sin \varphi = 0,538$$

$$\sin \varphi = 0,538$$

– Der Winkel φ wird aus der Tabelle abgelesen:

$$\varphi = 32,5^\circ$$

6. Schritt: Berechnen der Leistungen

- Grundformeln anschreiben
- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$P_s = U \cdot I$$

$$P_s = 50 \cdot 0,148$$

$$P_s = 7,4 \text{ VA}$$

$$P = P_s \cdot \cos \varphi$$

$$P = 7,4 \cdot 0,845$$

$$P = 6,25 \text{ W}$$

$$P_q = P_s \cdot \sin \varphi$$

$$P_q = 7,4 \cdot 0,538$$

$$P_q = 3,98 \text{ Var}$$

Kontrollen:

$$P = U \cdot I_R$$

$$P = 50 \cdot 0,125$$

$$P = 6,25 \text{ W}$$

$$P_q = U \cdot I_L$$

$$P_q = 50 \cdot 0,0796$$

$$P_q = 3,98 \text{ Var}$$

7. Schritt: Überprüfung der Resultate mit dem Vektordiagramm

In Bild 199 sind der Blind- und der Wirkleitwert aufgetragen. Der Gesamtleitwert wird graphisch ermittelt und mit dem errechneten Wert verglichen. Der Phasenwinkel φ wird mit dem Transporteur gemessen und dem errechneten Wert gegenübergestellt.

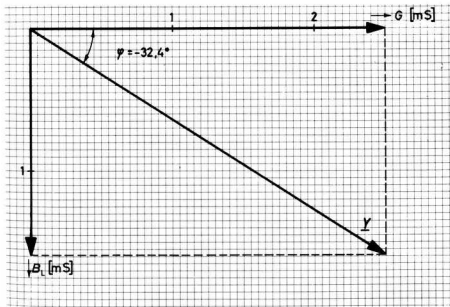


Bild 199

b) Berechnung einer Parallelschaltung bestehend aus einer Kapazität und einem ohmschen Widerstand

Die Schaltung nach Bild 200 ist zu berechnen. Die Rechnung ist mit Hilfe des Vektordiagrammes zu überprüfen.

Gesucht:

$$Z, I_g, I_C, I_R, \cos \varphi, \sin \varphi, \varphi$$

$$P, P_s, P_q$$

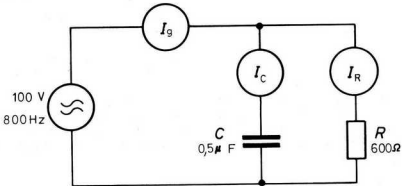


Bild 200

Vorgehen:

1. Schritt: Berechnen der Leitwerte

– Grundformel anschreiben

$$G = \frac{1}{R}$$

– Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$G = \frac{1}{600}$$

$$G = 1,667 \text{ mS}$$

– Komponentenform

$$B_C = j\omega C$$

$$B_C = |B_C| = \omega C; \quad |B_C| = \frac{\text{As}}{\text{s} \cdot \text{V}} = \text{S}$$

$$B_C = 2\pi \cdot 0,8 \cdot 10^3 \cdot 0,5 \cdot 10^{-6}$$

$$B_C = 2,513 \text{ mS}$$

2. Schritt: Berechnen des Scheinleitwertes

– Grundformel anschreiben

$$|Y| = \sqrt{G^2 + B^2}$$

– Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$Y = |Y| = \sqrt{1,667^2 \cdot 10^{-6} + 2,513^2 \cdot 10^{-6}}$$

$$Y = 3,015 \text{ mS}$$

3. Schritt: Berechnen der Impedanz Z

– Grundformel anschreiben

$$Z = \frac{1}{Y}$$

– Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$Z = \frac{1}{3,015 \cdot 10^{-3}}$$

$$Z = 332 \, \Omega$$

4. Schritt: Berechnen der Ströme

– Grundformel anschreiben

$$I_g = \frac{U}{Z}$$

– Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$I_g = \frac{100}{332}$$

$$I_g = 0,3015 \, \text{A}$$

$$I_R = \frac{U}{R}$$

$$I_R = \frac{100}{600}$$

$$I_R = 0,1667 \, \text{A}$$

$$I_C = U \cdot B_C$$

$$I_C = 100 \cdot 2,513 \cdot 10^{-3} \quad \frac{\text{V As}}{\text{sV}}$$

$$I_C = 0,2513 \, \text{A}$$

5. Schritt: Berechnung von $\cos \varphi$, $\sin \varphi$ und $\angle \varphi$

– Grundformeln anschreiben

$$\cos \varphi = \frac{Z}{R}$$

– Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$\cos \varphi = \frac{332}{600}$$

$$\cos \varphi = 0,553$$

$$\sin \varphi = Z \cdot B_C$$

$$\sin \varphi = 332 \cdot 2,513 \cdot 10^{-3}$$

$$\sin \varphi = 0,834$$

– Der Winkel φ wird aus der Tabelle abgelesen.

$$\varphi = 56,44^\circ$$

6. Schritt: Berechnen der Leistungen

– Grundformeln anschreiben

$$P_s = U \cdot I_g$$

– Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$P_s = 100 \cdot 0,3015$$

$$P_s = \mathbf{30,15 \text{ VA}}$$

$$P = P_s \cdot \cos \varphi$$

$$P = 30,15 \cdot 0,55$$

$$P = \mathbf{16,67 \text{ W}}$$

$$P_q = P_s \cdot \sin \varphi$$

$$P_q = 30,15 \cdot 0,834$$

$$P_q = \mathbf{25,13 \text{ Var}}$$

Kontrollen:

$$P = U \cdot I_R$$

$$P = 100 \cdot 0,1667$$

$$P = 16,67 \text{ W}$$

$$P_q = U \cdot I_C$$

$$P_q = 100 \cdot 0,2513$$

$$P_q = 25,13 \text{ Var}$$

7. Schritt: Überprüfung der Resultate mit dem Vektordiagramm

In Bild 201 sind der Blind- und der Wirkleitwert aufgetragen. Der Gesamtleitwert wird graphisch ermittelt und mit dem errechneten Wert verglichen. Der

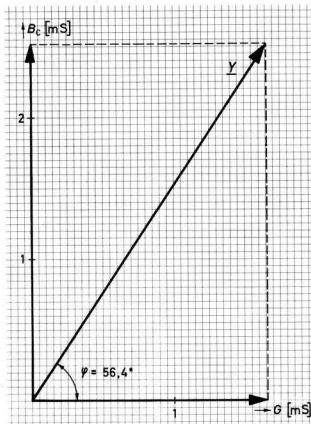


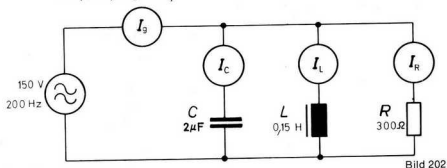
Bild 201

Phasenwinkel φ wird mit dem Winkelmesser gemessen und dem errechneten Wert gegenübergestellt.

c) Berechnung einer Parallelschaltung von Kapazität, Induktivität und ohmschem Widerstand

Die Schaltung nach Bild 202 ist zu berechnen. Die Rechnung soll an Hand des Vektordiagrammes überprüft werden.

Gesucht: $Z, I_g, I_L, I_C, I_R, \cos \varphi,$
 $\sin \varphi, \varphi, P_s, P, P_q$



Vorgehen:

1. Schritt: Berechnung der Leitwerte

– Grundformel anschreiben:

$$G = \frac{1}{R}$$

– Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$G = \frac{1}{300}$$

$$= 3,33 \text{ mS}$$

– Komponentenform

$$B_C = j\omega \cdot C; B_L = -j \frac{1}{\omega L}$$

$$B_C \equiv |B_C| = \omega C$$

$$B_C = 2\pi \cdot 0,2 \cdot 10^3 \cdot 2 \cdot 10^{-6} \quad \frac{\text{As}}{\text{s} \cdot \text{V}}$$

$$B_C = 2,513 \text{ mS}$$

$$B_L \equiv |B_L| = \frac{1}{\omega L}$$

$$B_L = \frac{1}{2\pi \cdot 0,2 \cdot 10^3 \cdot 0,15} \quad \frac{\text{s} \cdot \text{A}}{\text{Vs}}$$

$$B_L = 5,31 \text{ mS}$$

2. Schritt: Berechnung des Scheinleitwertes

– Grundformel anschreiben:

$$|Y| = \sqrt{G^2 + (B_L - B_C)^2}$$

– Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$Y \equiv |Y| = \sqrt{3,33^2 \cdot 10^{-6} + 2,8^2 \cdot 10^{-6}}$$

$$Y = 4,35 \text{ mS}$$

3. Schritt: Berechnung der Impedanz

– Grundformel anschreiben:

$$Z = \frac{1}{Y}$$

– Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$Z = \frac{1}{4,35 \cdot 10^{-3}}$$

$$Z = \mathbf{230 \, \Omega}$$

4. Schritt: Berechnung der Ströme

– Grundformeln anschreiben:

$$I_B = \frac{U}{Z}$$

– Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$I_B = \frac{150}{230}$$

$$I_B = \mathbf{0,652 \, A}$$

$$I_R = \frac{U}{R}$$

$$I_R = \frac{150}{300}$$

$$I_R = \mathbf{0,5 \, A}$$

$$I_L = U \cdot B_L$$

$$I_L = 150 \cdot 5,31 \cdot 10^{-3}$$

$$I_L = \mathbf{0,796 \, A}$$

$$V \cdot \frac{\text{sA}}{\text{Vs}}$$

$$I_C = U \cdot B_C$$

$$I_C = 150 \cdot 2,51 \cdot 10^{-3}$$

$$I_C = \mathbf{0,376 \, A}$$

$$V \cdot \frac{\text{As}}{\text{Vs}}$$

5. Schritt: Berechnung von $\sin \varphi$, $\cos \varphi$ und φ

– Grundformeln anschreiben:

$$\cos \varphi = \frac{Z}{R}$$

$$\cos \varphi = \frac{230}{300}$$

$$\cos \varphi = \mathbf{0,767}$$

$$\sin \varphi = \frac{B_L - B_C}{Y} = B \cdot Z$$

$$\sin \varphi = 2,8 \cdot 10^{-3} \cdot 230$$

$$\sin \varphi = \mathbf{0,643}$$

– Der Phasenwinkel φ wird aus der Tabelle abgelesen

$$\varphi = \mathbf{-40^\circ}$$

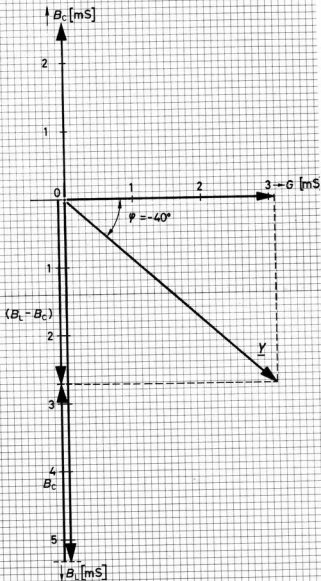


Bild 203

6. Schritt: Berechnen der Leistungen

– Grundformeln anschreiben:

$$P_S = U \cdot I_g$$

$$P_S = 150 \cdot 0,652$$

$$P_S = \mathbf{97,8 \text{ VA}}$$

Kontrollen:

$$P = |U| \cdot I_R$$

$$P = 150 \cdot 0,5$$

$$P = 75 \text{ W}$$

– Grundformeln anschreiben:

$$P = P_S \cdot \cos \varphi$$

$$P = 97,8 \cdot 0,767$$

$$P = \mathbf{75 \text{ W}}$$

$$P_q = P_S \cdot \sin \varphi$$

$$P_q = 97,8 \cdot 0,643$$

$$P_q = \mathbf{62,8 \text{ Var}}$$

$$P_q = U \cdot (I_L - I_C)$$

$$P_q = 150 \cdot 0,42$$

$$P_q = 63 \text{ Var}$$

– Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

– Die kleinen Differenzen zwischen dem Resultat und dem Kontrollresultat entstehen durch die Ungenauigkeit des Rechenschiebers. Diese Ungenauigkeiten dürfen toleriert werden, da die Rechnung trotzdem noch genauer ist als in Wirklichkeit. In der Elektronik werden in der Regel Bauteile mit einer Toleranz von 5% verwendet. Elemente mit einer Genauigkeit von 1% werden in Messgeräten eingesetzt. Die Ablesgenauigkeit von guten Instrumenten liegt bei 1 bis 2%.

7. Schritt: Überprüfung der Resultate mit dem Vektordiagramm

Die Blindleitwerte und der Wirkleitwert werden im Vektordiagramm nach Bild 203 aufgetragen. Aus der Differenz der Blindleitwerte und dem Wirkleitwert erfolgt die graphische Ermittlung des Gesamtleitwertes. Sein Wert wird mit demjenigen der Rechnung verglichen. Der Wert des Phasenwinkels φ wird mit dem Winkelmesser gemessen und mit dem Wert der Rechnung verglichen.

5. Das Wesentliche

Bei der Parallelschaltung bestimmen die Ströme, die durch die einzelnen Zweige fließen, das Verhalten der Schaltung. Die Spannung ist in bezug auf Betrag und Phase für alle Elemente gleich.

Im Vektordiagramm wird die Parallelschaltung durch die Leitwerte dargestellt.

Die Richtung der Vektoren für die Leitwerte im Vektordiagramm ist durch die Richtung des Stromes im betreffenden Leitwert bestimmt.

Für die Berechnung einer Parallelschaltung ist es von Vorteil, wenn zuerst die Leitwerte berechnet und in einem Vektordiagramm aufgezeichnet werden. Die Ermittlung des Gesamtleitwertes und des Phasenwinkels erfolgt dann im Diagramm nach den Regeln der Trigonometrie. Die zeichnerische Lösung des Problems erlaubt eine sofortige und einfache Überprüfung der Rechnung.

Für die graphische Lösung jeder gemischten Parallelschaltung sind die folgenden einfachen Regeln zu beachten:

- Ohmsche Leitwerte werden auf der positiven reellen Achse aufgetragen.
- Kapazitive Leitwerte sind der positiven imaginären Achse zugeordnet.

- Induktive Leitwerte stehen auf der negativen imaginären Achse.
- In Schaltungen mit induktiven und kapazitiven Leitwerten wird die Differenz zwischen den Leitwerten gebildet. Die Richtung des Differenzleitwertes bestimmt, ob sich die Schaltung induktiv oder kapazitiv verhält.

6. Repetitionsaufgaben (Lösung Seite 463)

- Wie wird die Richtung eines Blindleitwertvektors im Vektordiagramm einer Parallelschaltung bestimmt?
- Besteht ein Unterschied zwischen dem Leistungsfaktor $\cos \varphi$ einer Serieschaltung und demjenigen einer Parallelschaltung?
- Definieren Sie den Ausdruck «Induktiver Blindleitwert».
- Definieren Sie den Ausdruck «Kapazitiver Blindleitwert».
- Eine Induktivität von 6 H wird mit einem Widerstand von 900 Ohm parallel geschaltet. Berechnen Sie die Impedanz Z und den Leistungsfaktor $\cos \varphi$ für eine Frequenz von 50 Hz.
Überprüfen Sie die rechnerische Lösung mit dem Vektordiagramm.
- Zur Schaltung der Aufgabe e wird ein Kondensator parallel geschaltet. Wie gross muss seine Kapazität gewählt werden, damit der induktive Blindanteil kompensiert wird, und sich die Schaltung wie ein ohmscher Widerstand verhält?
Überprüfen Sie die Rechnung mit dem Vektordiagramm.
- Berechnen Sie die Schaltung nach Bild 204 und überprüfen Sie die Rechnung mit Hilfe des Vektordiagrammes.

Gesucht:

$Z, P_s, P, P_q, \cos \varphi, \sin \varphi, \varphi$

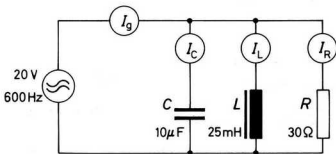


Bild 204

VI. Der Transformator

1. Einführung

Der Transformator ist aus der Elektrotechnik nicht mehr wegzudenken. Die Starkstromtechnik bedient sich der Grosstransformatoren für Elektrizitätswerke, in elektrischen Apparaten werden die benötigten Speisespannungen aus Netztransformatoren gewonnen, während in Niederfrequenzgeräten Transformatoren als Tonfrequenzübertrager eingesetzt sind. Der Transformator ist ein Bauelement, ohne das die meisten Schaltungen und Geräte undenkbar wären. Wir werden dem Transformator vorwiegend in Speisegeräten und Niederfrequenzschaltungen begegnen. Er dient der Übertragung elektrischer Wechselstrom- oder Impulsleistung.

2. Was wissen Sie schon über den Transformator?

(Lösung Seite 469)

- Aus welchen Teilen besteht ein Transformator für Niederfrequenzspannungen?
- Welches ist die Aufgabe von Netztransformatoren?
- Welche Grösse bestimmt das Übersetzungsverhältnis zwischen Primärspannung und Sekundärspannung?
- Warum ist der Eisenkern des Transformators lamelliert?
- Welches ist die Aufgabe des Eisenkernes?
- Gibt es Transformatoren ohne Eisenkern?

3. Der Transformator

a) Der Kopplungsfaktor k

Der Kopplungsfaktor k ist ein Mass für die Kopplung von Spulen. Bild 205 zeigt gekoppelte Spulen im Schnitt.

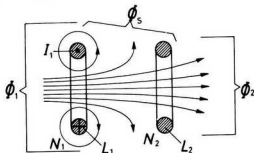


Bild 205

Wird die Primärspule L_1 von einem Wechselstrom durchflossen, so baut sich ein magnetisches Wechselfeld auf. Der gesamte Fluss dieses Feldes wird mit Φ_1 bezeichnet. Ein Teil des Primärflusses Φ_1 schneidet die Windungen der Sekundärspule L_2 . Dieser Flussanteil wird Φ_2 genannt. Ein Teil des Primärflusses beeinflusst die Sekundärwicklungen nicht, er geht für die Sekundärspule verloren. Dieser *Streufluss* trägt die Bezeichnung Φ_s .

Der Kopplungsfaktor der Spule L_1 mit der Spule L_2 gibt an, wie eng die Spulen miteinander gekoppelt sind. Er wird ausgedrückt durch das Verhältnis des Flusses, der die Sekundärwicklungen schneidet, zum gesamten Primärfluss.

$$k = \frac{\Phi_2}{\Phi_1}$$

Als Symbol für den Kopplungsfaktor dient der Buchstabe k .

Der Kopplungsfaktor hat keine Dimension, er ist ein reiner Zahlenwert, der im günstigsten Fall, das heisst bei maximaler Kopplung der Spulen, Eins wird.

Wird durch die Spule L_2 ein Wechselstrom geschickt, so beeinflusst ein Teil des Flusses Φ_2 die Spule L_1 . Der Kopplungsfaktor der Spule L_2 mit der Spule L_1 ergibt sich dann aus dem Verhältnis vom Fluss Φ_1 zum Fluss Φ_2 .

b) Der Streufaktor σ

Der Streufaktor σ ist ein Mass für die Streuung, die zwischen zwei gekoppelten Spulen auftritt.

Der Streufaktor der Spule L_1 zur Spule L_2 wird durch das Verhältnis des Streuflusses zum gesamten Primärfluss ausgedrückt.

$$\sigma = \frac{\Phi_s}{\Phi_1}$$

Als Symbol dient der griechische Buchstabe σ (sigma)

Der Streufaktor hat keine Dimension, er ist ein reiner Zahlenwert, der im günstigsten Fall, das heisst bei maximaler Kopplung der Spulen, Null wird.

Der Streufaktor der Spule L_2 zur Spule L_1 wird durch das Verhältnis des Streuflusses zum Fluss in L_2 ausgedrückt.

c) Die Gegeninduktivität M

Die Gegeninduktivität M ist ein Mass für die Beeinflussung zweier gekoppelter Spulen über den gemeinsamen Anteil des magnetischen Feldes.

Die Gegeninduktivität ergibt sich aus dem Produkt aus Windungszahl und dem magnetischen Leitwert des gemeinsamen Feldanteiles.

$$M = \frac{\Phi_2}{i_1} \cdot N_2 ; [M] = \frac{Vs}{A} = H \quad (\mu r = \text{konstant})$$

Als Symbol wird der Buchstabe M verwendet.

Die Masseinheit ist das Henry oder die Voltsekunde pro Ampère.

Bild 206 zeigt den Zusammenhang zwischen Gegeninduktivität und induzierter Spannung.

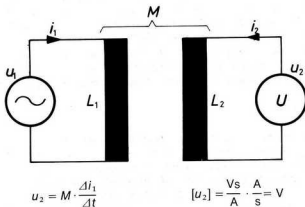


Bild 206

Eine Feldänderung, hervorgerufen durch eine Stromänderung in der Spule L_1 , erzeugt in der Spule L_2 eine Gegeninduktionsspannung. Die Grösse dieser induzierten Spannung ist von der Feldänderung und der Gegeninduktivität abhängig.

Wir erinnern uns, dass die Selbstinduktionsspannung in einer einzelnen Spule durch die Stromänderung pro Zeiteinheit und die Induktivität der Spule bestimmt wird.

$$u = \frac{\Delta i}{\Delta t} \cdot L; [u] = \frac{A}{s} \cdot \frac{Vs}{A} = V$$

Die Gleichung in Bild 206 lässt erkennen, dass bei grösser werdender Gegeninduktivität die induzierte Spannung an Spule L_2 ansteigt. Wenn der Kopplungsfaktor so eng gemacht wird, dass L_2 vom gesamten Fluss der Spule L_1 durchflossen wird ($k = 1$) und die Windungszahlen der Spulen gleich sind, so erreicht die Gegeninduktivität den Wert der Primärinduktivität. Für diesen Fall entspricht die in L_2 induzierte Spannung der Spannung an L_1 .

d) Zusammenhang zwischen Kopplungsfaktor, Gegeninduktivität und Streufaktor

Der Kopplungsfaktor zwischen der Spule L_1 und der Spule L_2 bildet mit dem Kopplungsfaktor der Spule L_2 zur Spule L_1 den Gesamtkopplungsfaktor. Dieser ergibt sich aus dem geometrischen Mittel der beiden Kopplungsfaktoren.

$$k = \sqrt{k_{12} \cdot k_{21}}$$

- k = Gesamtkopplungsfaktor
- k_{12} = Kopplungsfaktor zwischen der Spule L_1 und der Spule L_2
- k_{21} = Kopplungsfaktor zwischen der Spule L_2 und der Spule L_1

Der Zusammenhang zwischen Streu- und Kopplungsfaktor lautet:

$$\sigma = 1 - k^2$$

- σ = Streufaktor
- k = Gesamtkopplungsfaktor

Die Gegeninduktivität zwischen den Spulen L_1 und L_2 entspricht dem Produkt aus Gesamtkopplungsfaktor mal geometrisches Mittel aus den beiden Induktivitäten.

$$M = k \cdot \sqrt{L_1 \cdot L_2}$$

- M = Gegeninduktivität
- k = Gesamtkopplungsfaktor
- L_1 = Induktivität der Spule L_1
- L_2 = Induktivität der Spule L_2

Die Begriffe Kopplungsfaktor, Gegeninduktivität und Streuung werden uns noch oft begegnen. Es geht nicht darum, dass die Formeln, die diese Begriffe umschreiben, auswendig gelernt werden. Wesentlich ist vielmehr, dass die Begriffe in ihrer Bedeutung verstanden werden.

Der Kopplungsfaktor wird bei Transformatoren möglichst hoch gemacht, um die Streuung möglichst klein zu halten. Streuung bedeutet für den Transformator Herabsetzung des Wirkungsgrades.

e) Definition des Transformators

Der Transformator besteht aus induktiv gekoppelten Spulen. Er wird zum Transformieren von Wechselspannungen und Wechselströmen, zur Impedanzanpassung und zur Erzeugung von Impulsen verwendet.

f) Symbole für Transformatoren

In Bild 207 sind die gebräuchlichsten Transformatorsymbole zusammengestellt.



Bild 207a Transformator mit Eisenkern



Bild 207b Transformator mit Ferritkern



Bild 207c Lufttransformator

g) Funktionsprinzip

Der Versuch nach der in Bild 208 gezeigten Schaltung zeigt das Funktionsprinzip des Transformators. Bild 209 hält den Versuchsaufbau fest.

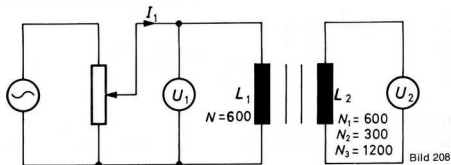


Bild 208

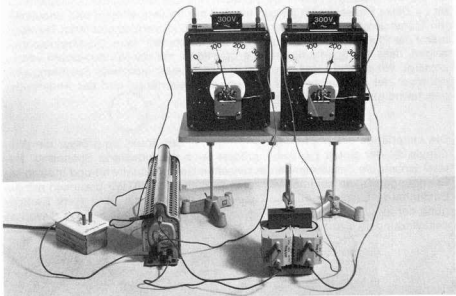


Bild 209

Die Spannung an der Spule L_1 wird zu Beginn des Versuches mit dem Schiebewiderstand R auf Null gestellt. Die Spulen L_1 und L_2 haben beide 600 Windungen. Der geschlossene Eisenkern sorgt für eine enge magnetische Kopplung. Der Kopplungsfaktor ist gross, sein Wert liegt nahe bei Eins. Der Wert der Gegeninduktivität erreicht deshalb beinahe den Wert der Induktivität der Spule L_1 , da beide Spulen die gleiche Windungszahl aufweisen.

Die Spannung an L_1 wird schrittweise erhöht und dabei gleichzeitig die Spannung an L_2 beobachtet. Beide Spannungen sind gleich gross.

Für die folgende Messreihe wird die Spule L_2 ausgetauscht. Die neue Spule L_2 hat 300 Windungen. Die Spannung an L_2 beträgt jetzt für jede Messung die Hälfte der Spannung an L_1 .

Für eine dritte Messreihe wird als L_2 eine Spule mit 1200 Windungen verwendet. Die Spannung an L_2 ist nunmehr für alle Messungen doppelt so gross wie die Spannung an L_1 .

Die Erklärung der Resultate der Messreihen führt uns zum Begriff der Selbstinduktion zurück. Der Strom I_1 erzeugt in der Spule L_1 ein magnetisches Wechselfeld. Dieses Feld verursacht eine Selbstinduktionsspannung, welche gegen die Gegeninduktionsspannung gerichtet ist. Das gleiche Feld induziert in der Spule L_2 eine Spannung. Bei gleichem Wicklungssinn der Spulen ist die Spannung an L_2 gegenüber der Netzspannung um 180° phasenverschoben,

da sie die gleiche Phasenlage aufweist wie die Selbstinduktionsspannung an L_1 . Diese Phasenbedingungen werden nur im verlustfreien und unbelasteten Transformator erfüllt. Unter Belastung wird im verlustbehafteten Transformator die Phasenverschiebung immer kleiner als 180° sein. Die Messresultate zeigen, dass die Spannung an L_2 proportional mit der Windungszahl von L_2 ansteigt. Wir erinnern uns, dass die in einem Leiter induzierte Spannung proportional der magnetischen Induktion, der Leiterlänge und der Änderungsgeschwindigkeit des Magnetfeldes ist.

$$U = B \cdot l \cdot v; [U] = \frac{Vs}{m^2} \cdot m \cdot \frac{m}{s} = V$$

Die Leiterlänge entspricht der Windungszahl der Spule. Je grösser die Windungszahl der Spule L_2 , desto grösser wird die induzierte Spannung. Betrachten wir die Zusammenhänge zwischen Gegeninduktivität und induzierter Spannung in L_2 , so kommen wir zum gleichen Resultat. Wir brauchen nur die Bestimmungsgleichung für die Gegeninduktivität in die Formel zur Berechnung der induzierten Spannung einzusetzen, um festzustellen, dass diese von der Windungszahl abhängt.

$$\text{Gegeninduktivität } M = \frac{\Delta \Phi_2}{\Delta i_1} \cdot N_2$$

$$\text{Induzierte Spannung } u \text{ in } N_2 \quad u = M \frac{\Delta i_1}{\Delta t}$$

$$\begin{aligned} \text{daraus folgt: } u_2 &= \frac{\Delta \Phi_2}{\Delta i_1} \cdot N_2 \frac{\Delta i_1}{\Delta t} \\ &= \frac{\Delta \Phi_2}{\Delta t} \cdot N_2; [u_2] = \frac{Vs}{s} = V \end{aligned}$$

Diese Gleichung zeigt deutlich, dass die Grösse der in L_2 induzierten Spannung proportional der Windungszahl und der Gegeninduktivität ist.

Die Spule L_1 wird *Primärspule* genannt, die Spule L_2 *Sekundärspule*. Man spricht deshalb von *Primärspannung* für U_1 und von *Sekundärspannung* für U_2 .

Das Verhältnis von N_1 zu N_2 heisst *Übersetzungsverhältnis*.

$$\bar{u} = \frac{N_1}{N_2}$$

Wir fassen zusammen:

- Im unbelasteten, verlustfreien Transformator herrscht zwischen Primärspannung und Sekundärspannung eine Phasenverschiebung von 180° .
- Die Spannungen an den Wicklungen verhalten sich proportional zu den Windungszahlen.

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} = \bar{u}$$

Der folgende Versuch erbringt den Beweis, dass auch zwischen Primärstrom und Sekundärstrom eine Phasenverschiebung von 180° herrscht. Bild 210 zeigt die Schaltung des Experimentes. Bild 211 stellt den Versuchsaufbau vor.

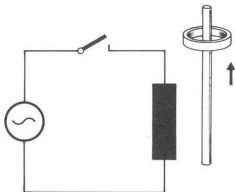


Bild 210

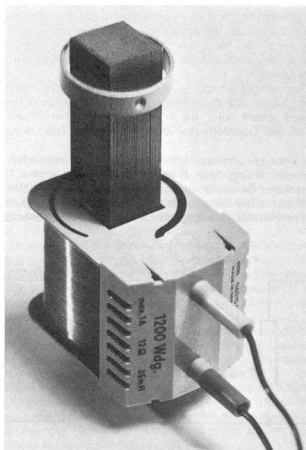


Bild 211

Sobald der Stromkreis der Primärspule geschlossen wird, springt der Aluminiumring nach oben und verbleibt in schwebendem Zustand. Will man den Ring nach unten drücken, so muss dazu eine gewisse Kraft aufgewendet werden. Wird er losgelassen, so springt er in die Schwebelage zurück. Das Verhalten des Ringes lässt sich wie folgt erklären:

Der Ring wirkt als kurzgeschlossene Sekundärwicklung mit extrem kleinem ohmschem Widerstand. Der induktive Blindwiderstand ist bedeutend grösser als der reelle Widerstand. Der Ring wirkt wie ein beinahe idealer induktiver Verbraucher. Der Ringstrom eilt der Ringspannung um fast 90° nach. Das vom Primärstrom erzeugte magnetische Wechselfeld induziert im Ring eine Spannung, die zur Primärspannung um 180° phasenverschoben ist. Da die Phasenverschiebung zwischen Primärstrom und Primärspannung ebenfalls fast 90° beträgt, besteht zwischen Primärstrom und Sekundärstrom eine Phasenverschiebung von annähernd 180° . Der Sekundärstrom erzeugt im Ring ein Magnetfeld, das dem Magnetfeld des Primärstromes entgegengesetzt ist. Die beiden Magnetfelder üben aufeinander eine abstossende Wirkung aus. Als Folge davon wird der Ring von der Primärspule weggedrängt. In der Schwebelage ist die abstossende Kraft des Magnetfeldes mit der Schwerkraft im Gleichgewicht.

Infolge der Transformatorverluste wird die Phasenverschiebung zwischen Primärstrom und Sekundärstrom immer kleiner als 180° sein. Die Phasenlage der Ströme wird zudem durch die Art der Belastung beeinflusst. Es ist nicht gleichgültig, ob der Transformator kapazitiv, induktiv oder rein reell belastet wird.

Der folgende Versuch untersucht das Verhalten des belasteten Transformators. Die Messanordnung nach Bild 212 besteht aus einem Transformator mit auswechselbarer Sekundärspule. Für die verschiedenen Messungen werden Sekundärspulen mit 300, 600 und 1200 Windungen verwendet. Die Belastung des Transformators erfolgt durch zwei parallel geschaltete Glühlampen.

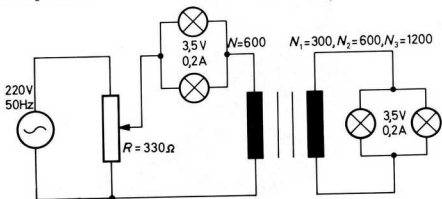


Bild 212

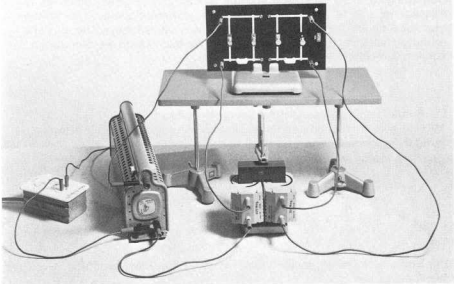


Bild 213

pen $3,5\text{V}/0,2\text{A}$. Der Primärstrom wird durch zwei parallel geschaltete Glühlampen mit denselben elektrischen Daten angezeigt. Bild 213 zeigt den Versuchsaufbau.

Für die erste Messung wird die Sekundärspule mit 300 Windungen verwendet. Die Primärspule mit 600 Windungen bleibt für alle Messungen dieselbe.

Die Primärspannung wird soweit erhöht, bis die beiden Lämpchen im Sekundärkreis normal hell brennen. Die Lämpchen im Primärkreis brennen mit halber Helligkeit; wird eines davon ausgedreht, so brennt das andere mit normaler Intensität.

Für die folgende Messung wird die Windungszahl der Sekundärspule auf 600 erhöht. Die Primärspannung wird wiederum so weit erhöht, bis die Indikatorlampen im Sekundärkreis normal brennen. Diejenigen im Primärkreis brennen mit gleicher Helligkeit wie diejenigen im Sekundärkreis.

Die nächste Messung wird mit einer Sekundärspule von 1200 Windungen vorgenommen. Die Primärspannung wird so lange vergrößert, bis die Lämpchen im Primärkreis normal hell brennen. Die Lämpchen des Sekundärkreises erzeugen dabei nur die halbe Helligkeit. Wird eines davon ausgedreht, so brennt das andere mit normaler Stärke.

Die Messreihe beweist, dass beim Transformator das Produkt aus Strom und Spannung für die Primärseite und die Sekundärseite gleich gross ist. Diese Aussage ist nur für den verlustfreien Transformator genau. Der Wirkungsgrad der meisten grösseren Transformatoren ist jedoch so hoch, dass für grundsätzliche Überlegungen die Verluste vernachlässigt werden dürfen. Wir können schreiben:

$$U_1 \cdot I_1 = U_2 \cdot I_2$$

Die Primärleistung entspricht der Sekundärleistung.

Mit Hilfe einer einfachen Umformung lassen sich die Ströme in eine Beziehung zum Übersetzungsverhältnis bringen.

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}, U_1 \cdot I_1 = U_2 \cdot I_2 \text{ daraus: } \frac{U_1 \cdot I_1}{I_2} = U_2 \text{ daraus:}$$

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{U_2}{U_1} = \frac{N_2}{N_1} \text{ daraus: } \frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{\bar{u}}$$

Die Ströme im Transformator verhalten sich umgekehrt proportional zu den Windungszahlen

Der Einfluss des Eisenkernes wird im folgenden Versuch gezeigt. In der Versuchsanordnung nach Bild 214 und 215 wird die Sekundärspannung gemessen.

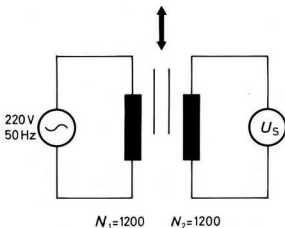


Bild 214

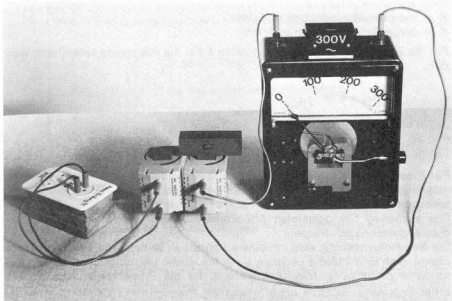


Bild 215

Für die erste Messung wird das Joch entfernt, der Kern ist nicht geschlossen. Nun wird das Joch aufgelegt und die Sekundärspannung mit derjenigen der ersten Messung verglichen. Die zweite Messung ergibt einen bedeutend höheren Wert für die Sekundärspannung als die erste. Zieht man das Joch langsam weg, so kann ein Absinken der Spannung beobachtet werden. Der Versuch zeigt, dass die Beschaffenheit des Eisenkernes für den Transformator von grosser Bedeutung ist. Je besser der Kern geschlossen wird, desto höher wird die magnetische Induktion und damit auch die induzierte Spannung. Der Kern bewirkt einen besseren Wirkungsgrad, kleinere Verluste und kleinere Abmessungen des Transformators. Die Grösse des Kernes hängt primär von der zu übertragenden Leistung, von der magnetischen Induktion und von der Frequenz ab. Die genaue Berechnungsformel für den Querschnitt des Kernes lautet:

$$A_{Fe} = \sqrt{\frac{P k_{Cu/Fe}}{f \cdot B \cdot J}}; [A_{Fe}] = \sqrt{\frac{VA \cdot s \cdot cm^2 \cdot cm^2}{Vs \cdot A}} = cm^2$$

A_{Fe} = Eisenquerschnitt in cm^2

P = zu übertragende Leistung in VA

$k_{Cu/Fe}$ = Verhältnis von Kupfer- zu Eisengewicht (1 bis 1,5)

f = Frequenz in Hz

B = magnetische Induktion in Vs/cm²

J = Stromdichte im Leiter in A/cm²

Für die üblichen Dimensionierungsarten kann die Gleichung vereinfacht werden.

$$A_{Fe} \approx 5 \cdot \sqrt{\frac{P}{f}}$$

A_{Fe} in cm²

P in VA

f in Hz

Für diese vereinfachte Formel wurde die Stromdichte zu 3 A/mm² und die magnetische Induktion zu $12 \cdot 10^{-5}$ Vs/cm² angenommen. Diese Werte entsprechen den Durchschnittsdaten für Transformatoren.

Das Verhalten des *belasteten Transformators* kann *vereinfacht* folgendermassen beschrieben werden:

Die Sekundärwicklung wird mit einem ohmschen Widerstand belastet. Dieser nimmt nach Bild 216 die Leistung $U_2 \cdot I_2$ auf. Diese Leistung muss dem Transformator primärseitig zugeführt werden. Da die Primärspannung U_1 auch unter Belastung konstant bleibt, muss der Primärstrom I_1 entsprechend zunehmen. Diese Stromzunahme wird durch das Magnetfeld des Sekundärstromes verursacht. Dieser erzeugt in den Sekundärwicklungen den Fluss Φ_2 . Da die beiden Ströme in Gegenphase sind, ist auch der Primärfluss Φ_1 gegen den Sekundärfluss Φ_2 gerichtet. Die Differenz zwischen diesen beiden Flüssen muss dem Fluss im unbelasteten Zustand entsprechen. Die Primärwicklung wird gegenüber dem Betrieb im Leerlauf genau soviel Strom mehr aufnehmen, als zur Kompensierung des, den Primärfluss schwächenden, Sekundärflusses notwendig ist. Der sekundäre Belastungswiderstand wird in seiner Auswirkung auf die Primärseite transformiert.

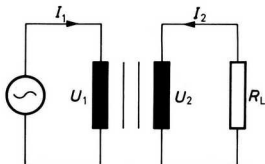


Bild 216

Die Regeln für diese Widerstandstransformation sind einfach und lassen sich aus dem Strom- und Spannungsübersetzungsverhältnis ableiten:

$$\ddot{u} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1}, \text{ daraus folgt: } U_2 = \frac{U_1}{\ddot{u}} \text{ und } I_2 = \ddot{u} \cdot I_1$$

daraus lässt sich die Sekundärimpedanz errechnen:

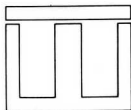
$$Z_2 = \frac{U_2}{I_2} = \frac{U_1}{\ddot{u} \cdot \ddot{u} \cdot I_1} = \frac{U_1}{\ddot{u}^2 \cdot I_1} = \frac{Z_1}{\ddot{u}^2} \text{ daraus } \frac{Z_1}{Z_2} = \ddot{u}^2$$

Impedanzen werden mit dem Quadrat des Übersetzungsverhältnisses transformiert.

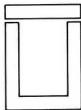
h) Ausführungsformen von Transformatoren

Netztransformatoren

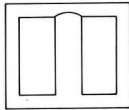
In Geräten dienen *Netztransformatoren* der Erzeugung der Speisespannung. Die Grösse des Transformators ist durch die Leistung bestimmt, die die Sekundärseite aufzubringen hat. Der mittlere Wirkungsgrad für Netztransformatoren liegt zwischen 80 und 90%. Als Eisenkerne werden meistens die genormten E/I-, M-, oder U/I-Schnitte verwendet. Bild 217 zeigt die Blechformen für die erwähnten Schnitte.



E/I-Schnitt



U/I-Schnitt



M-Schnitt

Bild 217

Für Röhrengeräte besteht in der Regel die Sekundärseite aus einer Wicklung für die Anodenspannungen und einer oder zwei Wicklungen für die Heizspannungen. Für transistorisierte Geräte werden meistens recht niedere Sekundärspannungen benötigt. Bild 218 zeigt einen Netztransformator.

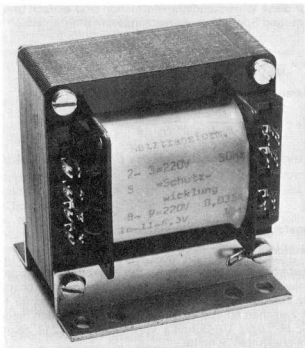


Bild 218

Regeltransformator

Regeltransformatoren erlauben die stufenlose Einstellung der Sekundärspannung. Sie bestehen oft nur aus einer einlagigen Wicklung, welche auf einem Ringkern angebracht ist. Mit einem drehbaren Schleifer kann eine beliebige Anzahl Windungen abgegriffen werden. Das Symbol für den Regeltransformator hält Bild 219 fest.

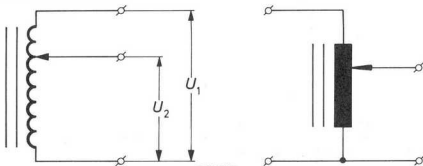


Bild 219

Regeltransformatoren werden überall dort verwendet, wo die Betriebsspannungen genau eingestellt werden müssen.

Niederfrequenztransformatoren (Übertrager)

Niederfrequenztransformatoren (im deutschen Sprachgebrauch oft Übertrager genannt) müssen je nach Verwendungszweck in einem Bereich von etwa 30 Hz bis 20 kHz linear arbeiten. Die tiefste zu übertragende Frequenz bestimmt die Primärinduktivität des Transformators. Die obere Frequenzgrenze ist durch die Wicklungskapazität und die Streuung gegeben. Die Wicklungskapazitäten verursachen zusammen mit den Induktivitäten eine Eigenresonanz des Transformators. Diese Resonanzerscheinung wird oft zur Anhebung der oberen Frequenzgrenze ausgenutzt. Es wird zwischen zwei Arten von Niederfrequenztransformatoren unterschieden:

- Eingangstransformatoren, die sekundärseitig praktisch im Leerlauf arbeiten (zum Beispiel Trafos im Eingang eines Röhrenverstärkers),
- Transformatoren, die sekundärseitig belastet sind (beispielsweise Ausgangsübertrager oder Kopplungstransformatoren zwischen Transistorstufen).

Transformatoren, welche im Leerlauf arbeiten, übertragen praktisch keine Leistung und können deshalb sehr klein gebaut werden. Bild 220a zeigt die Aufnahme eines Eingangsübertragers.

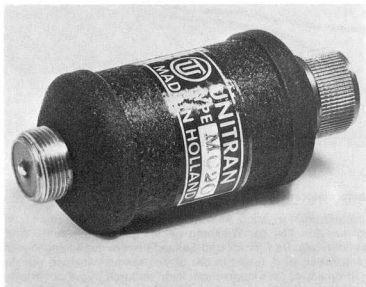


Bild 220a

Ausgangstransformatoren übertragen die Niederfrequenz Ausgangsleistung eines Verstärkers auf das Lautsprechersystem. Sie dienen zugleich der Anpassung des niederohmigen Lautsprechers an die Endröhre oder den Endtransistor. Infolge des Anoden- oder Kollektorgleichstromes, der durch die Primärwicklung des Übertragers fließt, wird dieser vormagnetisiert. Die dadurch entstehenden Verzerrungen werden verringert, indem man durch Anbringen eines Luftspaltes im Kern den Einfluss der Vormagnetisierung herabsetzt. Ein Ausgangsübertrager für 5 Watt Leistung wird in Bild 220b gezeigt.

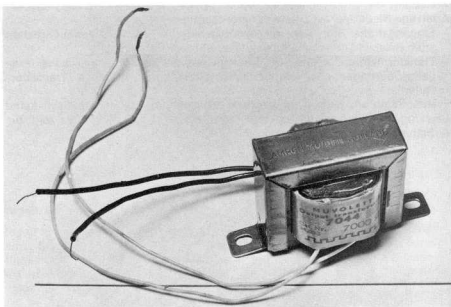


Bild 220b

Spartransformatoren

Der *Spartransformator*, auch Autotransformator genannt, kommt mit einer Wicklung aus. Ein Teil der Wicklung gehört gleichzeitig zum Primär- und zum Sekundärkreis. Da Primär- und Sekundärstrom gegeneinander um 180° phasenverschoben sind, fließt in der gemeinsamen Wicklung nur die Differenz der Ströme. Der Drahtquerschnitt kann dadurch in diesem Wicklungsteil kleiner gehalten werden. Die galvanische Kopplung mit dem Netz hat aber den Nachteil, dass keine Spannung an Masse gelegt werden darf wegen

Kurzschlussgefahr in «genullten» Netzen und Gefährdung des die Geräte berührenden Personals. Die Schaltung eines Autotransformators ist in Bild 221 zu erkennen.

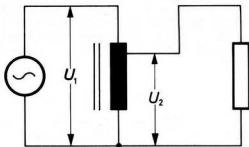


Bild 221

Impulstransformatoren

Der *Impulstransformator* dient der Erzeugung von Impulsspitzen aus einer sinusförmigen Spannung. Er wird oft zur Steuerung von Thyratrons eingesetzt. Der Impulstransformator besteht im wesentlichen aus einer Primär- und einer Sekundärwicklung, welche auf einem zweiteiligen Eisenkern angebracht sind. Für den Teil 1 des Kernes nach Bild 222 wird gewöhnliches Transformatorblech verwendet, während für das Joch 2 hochpermeables Spezialblech gewählt wird. Die Magnetisierungskurve dieses Bleches geht abrupt in die Sättigung über.

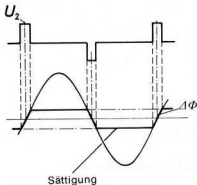
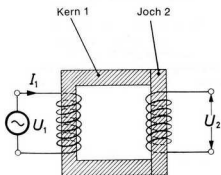


Bild 222

Das Joch ist so dimensioniert, dass der Magnetfluss schon bald nach dem Nulldurchgang des Stromes gesättigt ist. Im Sättigungsgebiet bleibt der Magnetfluss konstant, es wird in der Sekundärspule keine Spannung induziert. Während der Flussänderung dagegen erfolgt die Induktion eines kräftigen Spannungsimpulses. Die Richtung dieses Impulses hängt von der Richtung der Flussänderung ab. Die erzeugten Impulse fallen mit dem Nulldurchgang des Primärstromes zusammen. Das Diagramm in Bild 222 zeigt die Zusammenhänge zwischen Magnetfluss im Joch und induzierter Spannung in der Sekundärwicklung.

i) Kenndaten

Transformatoren werden durch folgende Kenndaten beschrieben:

- *Nennspannungen* sind die Primär- und Sekundärspannungen für welche der Transformator dimensioniert ist.
- *Nennleistung* ist die Leistung, die den Sekundärwicklungen gesamthaft entnommen werden kann.
- Der *Frequenzbereich* ist derjenige Bereich innerhalb eines Frequenzbandes, für welchen der Transformator gebaut wurde. Die tiefste Betriebsfrequenz ist massgebend für den Eisenquerschnitt und somit für das Gewicht des Transformators.
- Der *Wirkungsgrad* ist das Verhältnis von abgegebener Leistung zu aufgenommener Leistung.

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + P_d}$$

P_1 = aufgenommene Leistung, P_2 = abgegebene Leistung

P_d = Leistung, die im Transformator in Wärme umgesetzt wird

Der Wirkungsgrad von Hochleistungstransformatoren ist sehr hoch, er liegt zwischen 97 und über 99%. Kleinere Transformatoren weisen einen entsprechend schlechteren Wirkungsgrad auf. Die Verluste im Transformator setzen sich zusammen aus Eisenverlusten (Hysteresisverluste und Wirbelstromverluste) und aus Kupferverlusten (Gleichstrom-Widerstand der Wicklungen und Wirbelstromverluste).

4. Beispiele

a) Der Kopplungsfaktor

Die Spulen L_1 und L_2 in Bild 223 sind induktiv gekoppelt. Der Fluss durch die Sekundärspule ist zu bestimmen.

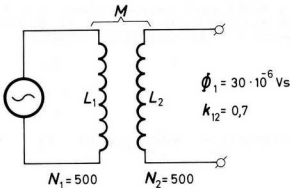


Bild 223

Vorgehen:

- Grundformel für den Kopplungsfaktor anschreiben $k = \frac{\Phi_2}{\Phi_1}$
- nach Φ_2 umformen $\Phi_2 = \Phi_1 \cdot k$
- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen $\Phi_2 = 0,7 \cdot 30 \cdot 10^{-6}$
 $\Phi_2 = 21 \cdot 10^{-6} \text{ Vs}$

b) Streufaktor

Der Streufaktor von L_1 zu L_2 aus Aufgabe a soll ermittelt werden.

Vorgehen:

- Grundformel anschreiben: $\sigma = \frac{\Phi_s}{\Phi_1}$
- Gleichung für Φ_s anschreiben $\Phi_s = \Phi_1 - \Phi_2$
- Grundformel ergänzen: $\sigma = \frac{\Phi_1 - \Phi_2}{\Phi_1}$
- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen $\sigma = \frac{30 \cdot 10^{-6} - 21 \cdot 10^{-6}}{30 \cdot 10^{-6}}$
 $\sigma = 0,3$

c) Gegeninduktivität

Die Induktivitäten der Spule L_1 und L_2 sowie die Gegeninduktivität des Transformators aus Aufgabe a sind zu berechnen ($I_1 = 0,2 \text{ A}$).

Vorgehen:

1. Schritt: Berechnen der Induktivitäten L_1 und L_2

- Grundformel anschreiben $L_1 = L_2 = \frac{\Phi_1}{I_1} \cdot N$; (μr konstant)

Diese Formel für die Induktivität kann aus den Regeln für den Elektromagnetismus leicht abgeleitet werden. Wir schlagen im Kapitel «Elektromagnetismus» (Seite 64) nach und finden für den Fluss folgende Formel:

– für B gilt:

$$\Phi = B \cdot A$$

– für H gilt:

$$B = \mu_o \cdot \mu_r \cdot H$$

$$H = \frac{I \cdot N}{l}$$

– in die Grundformel für Φ eingesetzt ergibt sich folgende Bestimmungs-gleichung

$$\Phi = \frac{\mu_o \cdot \mu_r \cdot I \cdot N}{l} \cdot A$$

$$\frac{\Phi}{I} = \frac{\mu_o \cdot \mu_r \cdot N}{l} \cdot A$$

$$\frac{\Phi}{I} \cdot N = \frac{\mu_o \cdot \mu_r \cdot N^2}{l} \cdot A$$

I wird zum Ausdruck links genommen:

beide Seiten mit N erweitert ergibt:

der rechte Ausdruck entspricht der Berechnungsformel für die Induktivität

Der Praktiker braucht diese Ableitungen natürlich nicht auswendig zu wissen. Es geht lediglich darum, zu zeigen, wo diese neue Formel für die Induktivität herkommt.

Wir fahren mit der Lösung unseres Beispiels fort:

– Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$L_1 = L_2 = \frac{30 \cdot 10^{-6} \cdot 0,5 \cdot 10^3}{0,2} \frac{\text{Vs}}{\text{A}}$$

$$L_1 = L_2 = 75 \text{ mH}$$

2. Schritt: Berechnen der Gegeninduktivität

– Grundformel anschreiben

$$M = \frac{\Phi_2}{I_1} \cdot N_2$$

– Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$M = \frac{21 \cdot 10^{-6} \cdot 0,5 \cdot 10^3}{0,2} \frac{\text{Vs}}{\text{A}}$$

$$M = 52,5 \text{ mH}$$

– Kontrolle:

– Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$M = k \cdot \sqrt{L_1 \cdot L_2}$$

$$M = 0,7 \cdot 75 \cdot 10^{-3}$$

$$M = 52,5 \text{ mH}$$

d) Transformator

Der Ausgangsübertrager in Bild 224 dient der Anpassung des niederohmigen Lautsprechers an die hochohmige Endstufe.

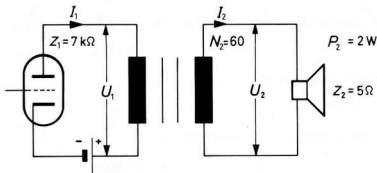


Bild 224

Unter den vereinfachenden Annahmen – Kopplungsfaktor = 1, keine Trafoverluste – sind folgende Werte zu ermitteln:

$$N_1, U_2, U_1, I_2, I_1$$

Vorgehen:

1. Schritt: Bestimmen des Übersetzungsverhältnisses

– Grundformel anschreiben

$$\bar{u} = \sqrt{\frac{Z_1}{Z_2}}$$

– Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$\bar{u} = \sqrt{\frac{7 \cdot 10^3}{5}}$$

$$\bar{u} = 37,42$$

2. Schritt: Bestimmen der Primärwindungszahl

– Grundformel anschreiben

$$\bar{u} = \frac{N_1}{N_2}$$

– nach N_1 umformen

$$N_1 = \bar{u} \cdot N_2$$

– Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$N_1 = 37,4 \cdot 60$$

$$N_1 = \mathbf{2245}$$

3. Schritt: Berechnen von Sekundärspannung und Sekundärstrom

- Grundformel anschreiben $P_2 = \frac{U_2^2}{Z_2}$
- nach U_2 umstellen $U_2 = \sqrt{Z_2 \cdot P_2}$
- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen $U_2 = \sqrt{5 \cdot 2}; [U_2] = \sqrt{\frac{V}{A} \cdot VA} = V$
 $U_2 = 3,162 \text{ V}$
- Grundformel anschreiben $P_2 = I_2^2 \cdot Z_2$
- nach I_2 umstellen $I_2 = \sqrt{\frac{P_2}{Z_2}}$
- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen $I_2 = \sqrt{\frac{2}{5}}; [I_2] = \sqrt{\frac{VA \cdot A}{V}} = A$
 $I_2 = 0,6325 \text{ A}$
- Kontrolle $P_2 = U_2 \cdot I_2$
 $P_2 = 3,162 \cdot 0,6325$
 $P_2 = 2 \text{ W}$

4. Schritt: Berechnung von Primärstrom und Primärspannung

- Grundformel anschreiben $\ddot{U} = \frac{U_1}{U_2}$
- nach U_1 umstellen $U_1 = \ddot{U} \cdot U_2$
- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen $U_1 = 37,42 \cdot 3,162$
 $U_1 = 118,3 \text{ V}$
- Grundformel anschreiben $\ddot{U} = \frac{I_2}{I_1}$
- nach I_1 umstellen $I_1 = \frac{I_2}{\ddot{U}}$
- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen $I_1 = \frac{0,6325}{37,42}$
 $I_1 = 16,9 \text{ mA}$

Kontrolle: $I_1 \cdot U_1$ müssen 2 Watt ergeben

- Formel anschreiben $I_1 \cdot U_1 = 2 \text{ W}$
- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen $16,9 \cdot 10^{-3} \text{ A} \cdot 118,3 \text{ V} = 2 \text{ W}$

5. Das Wesentliche

Der Transformator überträgt nur Wechselströme und -spannungen.

Der *Kopplungsfaktor* k ist das Mass für den Grad der Kopplung zweier Spulen. Er wird ausgedrückt durch das Verhältnis des Flusses der die Sekundärspule schneidet, zum Gesamtfluss der in der Primärspule erzeugt wird.

Der *Streu­faktor* σ ist ein Mass für die Streuung, die zwischen zwei gekoppelten Spulen auftritt. Er entspricht dem Verhältnis von Streufluss zu Gesamtfluss.

Die *Gegeninduktivität* M ist ein Mass für die Beeinflussung zweier benachbarter Spulen über den gemeinsamen Anteil des magnetischen Feldes.

Als *Übersetzungsverhältnis* $\bar{u}$ wird das Verhältnis der Primärwindungszahl zur Sekundärwindungszahl bezeichnet. Spannungen werden im Transformator proportional zum Übersetzungsverhältnis, Ströme umgekehrt proportional dazu, transformiert. Impedanzen werden mit dem Quadrat des Übersetzungsverhältnisses übertragen.

Im unbelasteten Transformator herrscht zwischen Primärspannung und Sekundärspannung eine Phasenverschiebung von 180° . Die Phasenverschiebung zwischen Primärstrom und Sekundärstrom wird im Transformator, welcher mit einem ohmschen Widerstand belastet ist, kleiner als 180° .

Der *Eisenkern* erhöht den Wirkungsgrad des Transformators. Sein Querschnitt nimmt mit der Quadratwurzel der übertragenen Leistung zu und mit der Quadratwurzel der Betriebsfrequenz ab.

Zur Speisung elektrischer Geräte werden *Netztransformatoren* verwendet. *Regeltransformatoren* ermöglichen die stufenlose Regelung der Sekundärspannung. *Niederfrequenzübertrager* dienen der Übertragung von Niederfrequenzsignalen und zur Impedanzanpassung. Der *Spar-* oder *Autotransformator* hat nur eine Wicklung. Ein Teil der Wicklung wird für die Primärspannung und die Sekundärspannung gemeinsam verwendet. Durch diese Massnahme werden Eisen- und Drahtquerschnitt kleiner als beim Trafo mit Primär- und Sekundärwicklung. Der *Impulstransformator* erzeugt während des Nulldurchganges des Primärstromes sekundärseitig einen Spannungsimpuls, welcher zu Steuerzwecken verwendet wird.

6. Repetitionsaufgaben (Lösung Seite 469)

- Der Kopplungsfaktor von der Primärspule zur Sekundärspule eines Transformators beträgt 95%. Was bedeutet das inbezug auf das Verhältnis zwischen Primärfluss und Sekundärfluss?
- Der Gesamtkopplungsfaktor eines Transformators wurde zu 92% ermittelt. Wie gross ist der Gesamtstreu­faktor des Übertragers?
- Die Induktivitäten $L_1 = 5 \text{ H}$ und $L_2 = 3 \text{ H}$ sind miteinander gekoppelt. Der Gesamtkopplungsfaktor beträgt 0,6. Berechnen Sie die Gegeninduktivität der Anordnung.
- Nennen Sie zwei Faktoren, die den Eisenquerschnitt eines Übertragers bestimmen.

- e) Erklären Sie, warum beim unbelasteten Transformator die Phasenverschiebung zwischen Primärspannung und Sekundärspannung 180° beträgt.
- f) Nennen Sie die Vor- und Nachteile des Spartransformators.
- g) Der Ausgangsübertrager nach Bild 225 soll den Belastungswiderstand des Lautsprechers an den Arbeitswiderstand der Endröhre anpassen. Bestimmen Sie folgende Größen:
- Primärimpedanz Z_1
 - Übersetzungsverhältnis $\bar{u}$

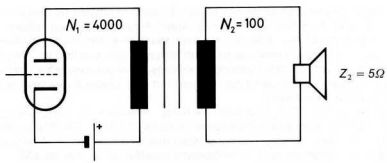


Bild 225

VII. Der Serieschwingkreis

1. Einführung

Schwingkreise spielen in der Nachrichtentechnik und in der Elektronik eine grosse Rolle. Es sind keine Funkgeräte denkbar, die nicht eine beträchtliche Anzahl Schwingkreise benötigen. Moderne Mehrfachtelefonie- und Telegrafianlagen basieren auf dem Zusammenspiel komplizierter Kombinations-schaltungen, deren Grundbausteine Schwingkreise sind. Sogar der einfachste aller Empfänger, der «Detektor» kommt nicht ohne einen Schwingkreis aus. Die Wichtigkeit der Schwingkreise basiert auf ihrer Eigenschaft, aus einem Frequenzspektrum eine ganz bestimmte Frequenz herauszulesen zu können. Wenn wir an einem Rundfunkgerät eine bestimmte Frequenz wählen, verstellen wir mit Hilfe eines Drehkondensators einen Schwingkreis so lange, bis die gewünschte Frequenz empfangen wird. Drücken wir am Fernsehapparat den Kanalwählschalter, um ein bestimmtes Programm zu sehen, so stimmen wir Schwingkreise auf die Frequenz des gewünschten Senders ab. Der Funker, der an einem Funkgerät einen bestimmten Kanal einstellt, stimmt mit einer Bewegung eine ganze Reihe von Schwingkreisen auf die befohlene Frequenz ab. Der Operateur, der eine Grossfunkstation auf eine vorgeschriebene Frequenz einstellt, stimmt verschiedene Schwingkreise auf die entsprechende Wellenlänge ab.

Schwingkreise lassen sich mit dem Farbfilter aus der Optik vergleichen. Ein Rotfilter lässt vom gesamten Lichtspektrum nur die der roten Farbe zugeordnete Wellenlänge passieren. Ein Grünfilter verhält sich gleich für die Wellenlänge des grünen Lichtes.

Die aus der Aufzählung hervorgehende Bedeutung der Schwingkreise lässt vermuten, dass es sich dabei um recht komplizierte Gebilde handeln müsse. Dem ist jedoch nicht so, die gebräuchlichsten Schwingkreise bestehen lediglich aus der Serie- oder Parallelschaltung von Kapazitäten und Induktivitäten.

Schwingkreise stellen nur einen Sonderfall der bereits behandelten Serie- und Parallelschaltung von Wirk- und Blindwiderständen dar.

2. Was wissen Sie schon über Serieschwingkreise?

(Lösung Seite 471)

- Aus welchen Elementen bestehen Serieschwingkreise?
- Was bedeutet der Ausdruck «Resonanzfrequenz»?
- Spielt die Spulengüte für das Verhalten des Schwingkreises eine Rolle?
- Warum ist der Verlustfaktor $\tan \delta$ des Kondensators für die meisten Schwingkreise ohne Bedeutung?
- Kennen Sie ein Anwendungsbeispiel für den Serieschwingkreis?

- f) In der Einführung wurde erwähnt, Schwingkreise seien nur Sonderfälle der Parallel- oder Serieschaltung von Wirk- und Blindwiderständen. Können Sie sagen, in was der Sonderfall besteht?

3. Der Serieschwingkreis

a) Der Aufbau des Schwingkreises

Der *Serieschwingkreis* besteht aus der Serieschaltung von Spule und Kondensator. Da Spulen und Kondensatoren nicht als reine Blindwiderstände vorkommen, sondern immer mit Verlusten behaftet sind, fasst man die Spulen und Kondensatorverluste in einem gemeinsamen *Serieverlustwiderstand* zusammen. In der Praxis können die Kondensatorverluste meistens vernachlässigt werden, da sie viel kleiner sind als die Spulenverluste. Bild 226 zeigt einen Serieschwingkreis.

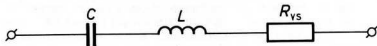


Bild 226

b) Das Arbeitsverhalten des Serieschwingkreises

Wir wollen das Arbeitsverhalten des Serieschwingkreises an einem Versuch studieren. Bild 227 zeigt die Schaltung und Bild 228 den Versuchsaufbau.

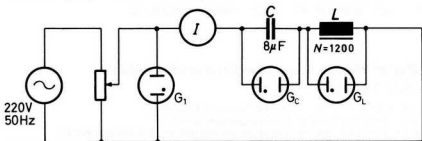


Bild 227

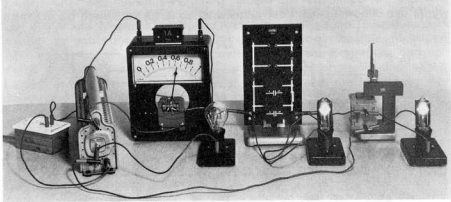


Bild 228

Zu Beginn des Versuches werden die Zündspannungen der Glimmlampen ermittelt, indem jede Glimmlampe an eine veränderliche Gleichspannung gelegt wird. Diese Gleichspannung wird nun so lange erhöht, bis die Lampe zündet. Die Zündspannungen liegen bei ungefähr 130 Volt.

In der Schaltung nach Bild 227 wird die Spannung am Spannungsteiler so eingestellt, dass die Glimmlampe G 1 *nicht* leuchtet. Nun wird das Joch über der Spule unter gleichzeitiger Beobachtung des Ampèremeters ganz langsam verschoben. Der Strom nimmt langsam zu, erreicht einen Maximalwert und sinkt wieder ab. Sobald der Strom in den Bereich des Maximalwertes gelangt, zünden die Glimmlampen über der Spule und über dem Kondensator. Die Glimmlampe G 1 über dem Spannungsteiler bleibt dunkel. Wir stellen fest:

- Durch Verschieben des Joches über der Spule wird der Wert der Induktivität verändert. Für einen ganz bestimmten Wert der Spuleninduktivität erreicht der Kreisstrom seinen Maximalwert.
- Die Spannung über dem Kreis bleibt während der Dauer des Versuches unterhalb der Zündspannung der Glimmlampe G 1.
- Beim Strommaximum steigen die Spannungen über der Spule und der Kapazität beträchtlich an, sie überschreiten die Zündspannung der Glimmlampen G_L und G_C .
- *Die Spannung über Spule und Kondensator ist grösser als die Spannung über dem ganzen Kreis.*

Diese auf den ersten Anblick sonderbaren Messresultate lassen sich mit Hilfe des Vektordiagrammes sehr einfach erklären. Der Serieschwingkreis soll vorerst als eine einfache Serieschaltung von Spule, Kondensator und Widerstand betrachtet werden. In der Versuchsschaltung tritt der Seriewiderstand in Form der Spulenverluste auf.

Bild 229 gibt den Serienschaltkreis wieder. Durch Verschieben des Spulenjoches wurde der Blindwiderstand der Induktivität so lange verändert, bis er gleich

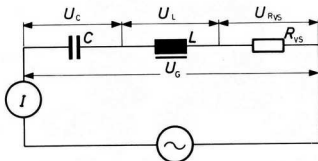


Bild 229

gross wurde wie derjenige des Kondensators. Das Vektordiagramm in Bild 230 zeigt, dass sich die beiden Blindwiderstände in ihrer Wirkung aufheben. Die Impedanz erreicht somit ihren kleinsten Wert und wirkt als rein ohmscher

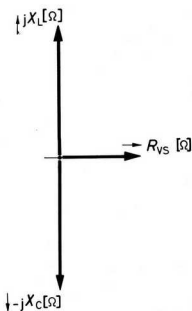


Bild 230

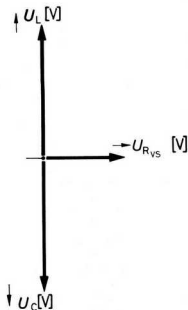


Bild 231

Widerstand. Dadurch erreicht der Strom im Kreis seinen grössten Wert. Die Spannungen am Serienschwingkreis sind in Bild 231 festgehalten. Das Bild erklärt uns, warum die Gesamtspannung am Kreis kleiner ist als die Teilspannungen über Spule und Kondensator. Weil die beiden Blindwiderstände denselben Wert aufweisen, sind auch die Spannungen über der Induktivität und der Kapazität gleich gross. Da aber diese Spannungen gegenphasig sind, heben sie sich in ihrer Wirkung gegenseitig auf. Als wirksame Kreisspannung verbleibt nur der Spannungsabfall über dem ohmschen Widerstand.

c) Die Resonanzbedingung

Die Frequenz, für welche der Serieschwingkreis seine kleinste Impedanz erreicht, heisst *Resonanzfrequenz*. Der Schwingkreis befindet sich in *Resonanz*. Die *Resonanzbedingung* lautet:

Wenn im Serieschwingkreis der kapazitive und der induktive Blindwiderstand gleich gross sind, befindet sich der Kreis in Resonanz.

d) Die Thomsonsche Schwingkreisformel

Aus der Resonanzbedingung lässt sich die *Thomsonsche Schwingkreisformel* ableiten. Diese Formel erlaubt die Berechnung der Resonanzfrequenz von Schwingkreisen. Für die Ableitung dieser Formel wird von der Resonanzbedingung ausgegangen:

– Resonanzbedingung

$$X_L = X_C$$

$$\omega_o L = \frac{1}{\omega_o C}$$

– Kreisfrequenz nach links schaffen

$$\omega_o^2 L = \frac{1}{C}$$

– Kreisfrequenz isolieren

$$\omega_o^2 = \frac{1}{L \cdot C}$$

– Quadratwurzel ziehen

$$\omega_o = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}} = 2\pi f_o$$

– f_o isolieren

$$f_o = \frac{1}{2\pi \sqrt{L \cdot C}}$$

e) Die Resonanzkurve

Die Eigenschaften des Schwingkreises werden graphisch in *Resonanzkurven* festgehalten. Für den Serienschwingkreis zeigt die Resonanzkurve den Verlauf der Impedanz oder des Stromes in Abhängigkeit der Frequenz. Im folgenden Versuch wird gezeigt, wie die Resonanzkurve messtechnisch ermittelt wird. Bild

232 zeigt die Versuchsschaltung und Bild 233 den Aufbau der Messanordnung.

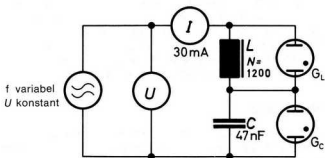


Bild 232

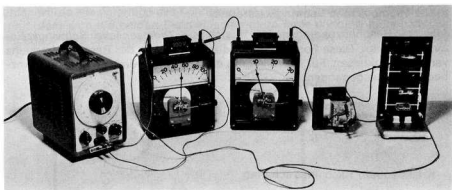


Bild 233

Zuerst wird die Frequenz verändert, bis sich ein Strommaximum einstellt, was den Resonanzfall anzeigt. Hierauf wird die Spannung des NF-Generators verändert, bis ein Strom von 30 mA fließt. Nun werden Frequenz und Spannung nochmals nachreguliert, bis bei der Resonanzfrequenz tatsächlich 30 mA fließen. Für die weiteren Messungen wird der so gefundene Spannungswert konstant gehalten. Nun wird die Frequenz in kleinen Beträgen von der Resonanzfrequenz weg verschoben und für jede Messung der Stromwert in einem Diagramm aufgetragen. Analog dazu wird eine Messreihe für tiefere Frequenzen als die Resonanzfrequenz aufgenommen. Das Diagramm liefert die Stromresonanzkurve. In Bild 234 ist eine Stromresonanzkurve und die dazugehörige Impedanzkurve dargestellt. Diese weist ihr Minimum beim Strommaximum auf.

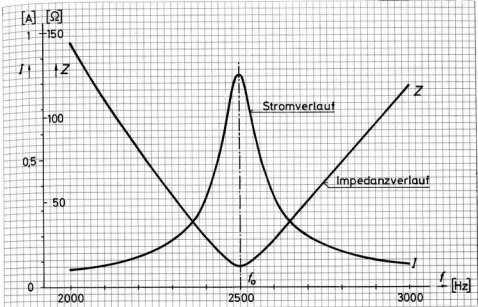


Bild 234

f) Die Kreisküte Q

Die Güte des Schwingkreises wird durch den *Gütefaktor* ausgedrückt. Bei den weitaus meisten Schwingkreisen wird dieser Gütefaktor durch die Induktivität bestimmt, da die Spulenverluste sehr viel grösser sind als die Verluste im Kondensator. In diesem Fall ist die Spulengüte Q_L der Induktivität mit der *Kreisküte* Q identisch. Wir dürfen demzufolge schreiben:

$$Q = \frac{X_L}{R_{vs}} \quad R_{vs} = \text{Verlustwiderstand der Spule}$$

Für den Serieschwingkreis drückt die Kreisküte Q folgende Zusammenhänge aus:

- Im Resonanzfall sind die Teilspannung an der Spule und die Teilspannung am Kondensator Q mal grösser als die Spannung über dem Kreis.
- Im Resonanzfall sind der kapazitive und der induktive Blindwiderstand Q mal grösser als der Resonanzwiderstand des Kreises.

Der Reziprokwert der Kreisküte ergibt den *Dämpfungsfaktor* d .

$$d = \frac{1}{Q}$$

g) Die Bandbreite b

Die *Bandbreite* b des Serieschwingkreises ist die Durchlassbreite der Filterkurve, gemessen zwischen zwei Punkten der Kurve, für welche der Strom auf den $1/\sqrt{2}$ -fachen Wert des Resonanzstromes abgesunken ist. Die Bandbreite ist durch die Resonanzfrequenz und die Kreisgüte bestimmt. Je besser die Güte eines Kreises ist, desto kleiner wird die Bandbreite. Der Zusammenhang zwischen Bandbreite und Kreisgüte ist in folgender Gleichung festgehalten:

$$b = \frac{f_o}{Q}$$

Bild 235 zeigt die graphische Ermittlung der Bandbreite für den Serieschwingkreis.

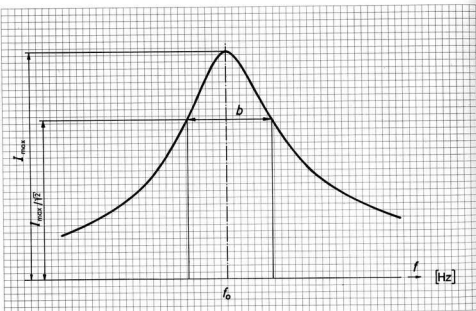


Bild 235

4. Beispiele

a) Berechnen eines Seriekreises

Die Resonanzfrequenz, die Kreisgüte und die Bandbreite des Serieschwingkreises nach Bild 236 sind zu errechnen.

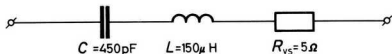


Bild 236

Vorgehen:

1. Schritt: Berechnen der Resonanzfrequenz

- Grundformel anschreiben
$$f_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}; [f_o] = \frac{1}{\sqrt{\text{As/V Vs/A}}} = \frac{1}{\text{s}}$$
- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen
$$f_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{0,15 \cdot 10^{-3} \cdot 45 \cdot 10^{-11}}}$$
$$f_o = 613 \text{ kHz}$$

2. Schritt: Berechnung der Kreisgüte Q

- Grundformel anschreiben
$$Q = \frac{\omega_o L}{R}; [Q] = \frac{\text{Vs} \cdot \text{A}}{\text{s} \cdot \text{A} \cdot \text{V}} = 1$$
- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen
$$Q = \frac{2 \cdot \pi \cdot 0,613 \cdot 10^6 \cdot 0,15 \cdot 10^{-3}}{5}$$
$$Q = 116$$

3. Schritt: Berechnen der Bandbreite b

- Grundformel anschreiben
$$b = \frac{f_o}{Q}$$
- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen
$$b = \frac{613 \cdot 10^3}{116}$$
$$b = 5,28 \text{ kHz}$$

b) Berechnen und Aufzeichnen der Resonanzkurve

Der Serieschwingkreis der Messschaltung nach Bild 237 soll berechnet werden. Die Messresultate sind in Form einer Resonanzkurve graphisch darzustellen.

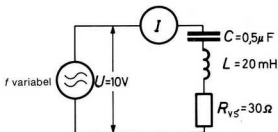


Bild 237

Vorgehen:

1. Schritt: Berechnen der Resonanzfrequenz

– Grundformel anschreiben

$$f_o = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{LC}}$$

– Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$f_o = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{20 \cdot 10^{-3} \cdot 5 \cdot 10^{-6}}}$$

$$f_o = 1591 \text{ Hz}$$

2. Schritt: Berechnen der Resonanzkurve

Es ist eine Tabelle mit folgenden Werten aufzunehmen:

- Kapazitiver Blindwiderstand
- Induktiver Blindwiderstand
- Wirksamer Gesamtblindwiderstand
- Kreisimpedanz
- Kreisstrom

Die Berechnung hat einen Frequenzbereich von 1100 Hz bis 2100 Hz zu umfassen. Die Werte sind für Frequenzschritte von 100 Hz zu ermitteln.

- Grundformel für X_L anschreiben
- Zahlenwerte einsetzen
und ausrechnen ($f = 1100 \text{ Hz}$)

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

$$X_L = 2 \cdot \pi \cdot 1,1 \cdot 10^3 \cdot 20 \cdot 10^{-3}$$

$$[X_L] = \frac{1}{s} \cdot \frac{Vs}{A} = \frac{V}{A}$$

$$X_L = \mathbf{138,2 \, \Omega}$$

- Grundformel für X_C anschreiben
- Zahlenwerte einsetzen
und ausrechnen ($f = 1100 \text{ Hz}$)

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

$$X_C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 1,1 \cdot 10^3 \cdot 5 \cdot 10^{-7}}$$

$$[X_C] = s \cdot \frac{V}{As} = \frac{V}{A}$$

$$X_C = \mathbf{289,4 \, \Omega}$$

- Grundformel für Kreisimpedanz anschreiben
- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$$

$$Z = \sqrt{30^2 + 151,2^2}$$

$$Z = \mathbf{154,2 \, \Omega}$$

Diese Rechnungen werden für alle geforderten Frequenzwerte des Spektrums durchgeführt. Um möglichst rationell zu rechnen, werden zuerst alle induktiven Blindwiderstände, dann alle kapazitiven Blindwiderstände, daraufhin alle Differenzblindwerte und am Schluss alle Impedanzwerte ermittelt. In Tabelle 16 sind die Resultate zusammengefasst.

$f \text{ (Hz)}$	$X_L(\Omega)$	$X_C(\Omega)$	$X_L - X_C$ (Ω)	$X_C - X_L$ (Ω)	$Z \text{ (}\Omega\text{)}$	$I \text{ (mA)}$
1100	138,2	289,4		151,2	154,2	64,8
1200	150,8	265,3		114,5	118,4	84,4
1300	163,4	244,9		81,5	86,8	115,2
1400	175,9	227,4		51,5	59,6	167,8
1500	188,5	212,2		23,7	38,2	262,3
1600	201,1	198,9	2,2		30,1	332,5
1700	213,6	187,2	26,4		40,0	250,0
1800	226,5	176,8	49,7		58,0	172,5
1900	238,8	167,5	71,3		77,4	129,2
2000	251,3	159,2	92,1		96,9	103,5
2100	263,9	151,6	112,3		116,2	86,1

Tabelle 16

3. Schritt: Aufzeichnen der Blindwiderstände in Abhängigkeit der Frequenz

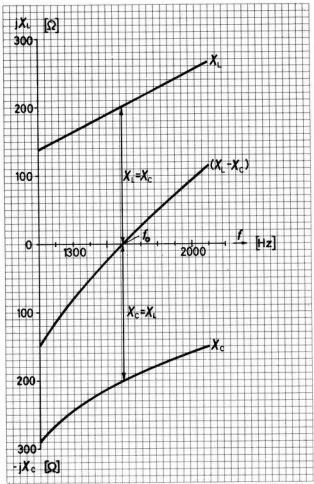


Bild 238

4. Schritt: Aufzeichnen der Resonanzkurve, Bestimmen der Bandbreite

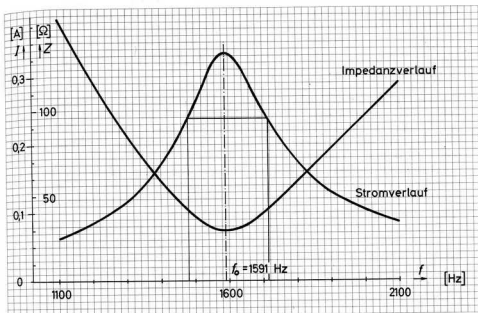


Bild 239

Kontrolle der Bandbreite durch Rechnung:

- Grundformel für Q anschreiben
- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen
- Formel für b anschreiben
- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$Q = \frac{\omega_0 L}{R_{vs}}$$

$$Q = \frac{2 \cdot \pi \cdot 1591 \cdot 20 \cdot 10^{-3}}{30}$$

$$Q = 6,66$$

$$b = \frac{f_0}{Q}$$

$$b = \frac{1591}{6,66}$$

$$b = 238,8 \text{ Hz}$$

Die Impedanz- und Stromkurven verlaufen nicht symmetrisch zur Resonanzfrequenz. Diese Asymmetrie hat ihre Ursache im ungleichen Verlauf der Blindwiderstände von Spule und Kondensator in Abhängigkeit der Frequenz. Für

Hochfrequenzkreise kann diese Unsymmetrie vernachlässigt werden, da die viel höheren Kreisgüten bedeutend kleinere Bandbreiten zur Folge haben. Die Kurve des Blindwiderstandes des Kondensators darf im interessierenden kleinen Bereich als linear angenommen werden, dadurch erhält die Resonanzkurve einen symmetrischen Verlauf.

5. Das Wesentliche

Der Serieschwingkreis besteht aus einer Serieschaltung von Kapazität und Induktivität. Die gesamten Schwingkreisverluste werden für die Berechnung des Kreises in einem Serieverlustwiderstand zusammengefasst.

Die Frequenz, für welche der kapazitive und der induktive Blindwiderstand gleich gross sind, heisst Resonanzfrequenz.

Die Resonanzfrequenz lässt sich mit Hilfe der Thomsonschen Schwingkreisformel errechnen. Diese Formel enthält die algebraische Fassung der Resonanzbedingung, die fordert, dass für den Resonanzfall der kapazitive und der induktive Blindwiderstand gleich gross sein müssen.

Im Resonanzfall wirkt der Seriekreis wie ein rein ohmscher Widerstand, dessen Wert dem Serieverlustwiderstand entspricht. Oberhalb der Resonanzfrequenz wirkt der Kreis induktiv, unterhalb davon kapazitiv.

Das Arbeitsverhalten des Kreises wird in der Resonanzkurve dargestellt.

Die Kreisgüte entspricht in der Praxis der Spulengüte, da die Verluste des Kondensators vernachlässigbar klein sind.

Die Durchlassbreite des Kreises wird Bandbreite genannt. Diese wird zwischen den zwei Punkten der Resonanzkurve gemessen, für welche der Schwingkreisstrom um den Faktor $\sqrt{2}$ abgesunken ist.

Die Bandbreite hängt von der Kreisgüte und der Resonanzfrequenz ab. Der Quotient aus Resonanzfrequenz und Kreisgüte ergibt den Wert der Bandbreite.

6. Repetitionsaufgaben (Lösung Seite 471)

- Erklären Sie, warum der Schwingkreis im Resonanzfall als ohmscher Widerstand wirkt.
- Leiten Sie aus der Resonanzbedingung die Thomsonsche Schwingkreisformel ab.
- Berechnen Sie für den Kreis nach Bild 240 die Kapazität, die Kreisgüte und die Bandbreite.

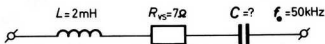


Bild 240

- d) Die Bandbreite eines Schwingkreises beträgt 2 kHz, die Kreisgüte misst 100, der Serieverlustwiderstand hat einen Wert von 4 Ohm. Bestimmen Sie die Schwingkreis-kapazität.
- e) Zeichnen Sie das Vektordiagramm für den Resonanzfall eines Serieschwingkreises mit einem Q von 5 in den richtigen Proportionen.
- f) Warum ist die Kreisgüte praktisch mit der Spulengüte identisch?
- g) Sagt die Bandbreite etwas über die Güte des Kreises aus?

VIII. Der Parallelschwingkreis

1. Einführung

Der Parallelschwingkreis unterscheidet sich in der Schaltungsart und im Arbeitsverhalten vom Serieschwingkreis. Er besteht jedoch aus den gleichen Bauelementen; aus Spule und Kondensator. Der Parallelkreis ist weitaus häufiger anzutreffen, als der Seriekreis. Im Parallelkreis steht uns ein typisches Selektionsmittel zur Verfügung. Mit seiner Hilfe werden aus einem Frequenzspektrum ganz bestimmte Frequenzen herausgesiebt. Da der Seriekreis im Resonanzfall einen sehr kleinen ohmschen Widerstand darstellt, wird er oft zur Unterdrückung unerwünschter Frequenzen verwendet. Der Parallelkreis verhält sich genau umgekehrt, für seine Resonanzfrequenz stellt er einen sehr hohen ohmschen Widerstand dar. Die Resonanzbedingung dagegen ist für beide Schwingkreisarten dieselbe.

2. Was wissen Sie schon über den Parallelschwingkreis?

(Lösung Seite 474)

- a) Wie ist ein Parallelschwingkreis aufgebaut?
- b) Spielt die Spulengüte für die Qualität des Parallelschwingkreises eine Rolle?
- c) Gilt die Thomsonsche Schwingkreisformel des Seriekreises auch für den Parallelkreis?
- d) Kennen Sie ein Anwendungsgebiet für den Parallelkreis?
- e) Beeinflusst die Spulengüte im Parallelkreis die Bandbreite des Kreises?

3. Der Parallelschwingkreis

a) Der Aufbau des Parallelschwingkreises

Der *Parallelschwingkreis* besteht aus der Parallelschaltung von Spule und Kondensator. Alle Kreisverluste werden in einem *Parallelverlustwiderstand* zusammengefasst. Dieser Parallelverlustwiderstand ist durch die Umwandlung einer Serieschaltung in eine Parallelschaltung entstanden, da die Verluste der Spule physikalisch gesehen immer als Serieverlustwiderstand auftreten. Die zur Umwandlung eines Serieverlustwiderstandes in einen Parallelverlustwiderstand notwendigen mathematischen Ableitungen würden den Rahmen dieses Lehrganges sprengen. Die grundsätzlichen Überlegungen, die zu dieser Umwandlung führen, sollen jedoch kurz dargelegt werden:

- Spulenverluste sind ihrem Wesen nach *Serieverluste*, diese erscheinen als Seriewiderstand zu einer Induktivität nach Bild 241 linke Hälfte.
- Für die rechnerische Behandlung des Parallelschwingkreises sollten die Kreisverluste in Form eines *Parallelverlustwiderstandes* erfassbar sein, da dadurch die Rechnung wie die graphische Darstellung stark vereinfacht werden.

- Es geht nun darum, eine Induktivität mit Serieverlusten in eine Induktivität mit Parallelverlusten umzuwandeln. Die beiden Schaltungen in Bild 241 müssen gleichwertig sein.

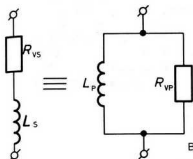


Bild 241

Es gilt folgende Umrechnung:

$$R_{VP} = \frac{R_{VS}^2 + (\omega L_S)^2}{R_{VS}} = R_{VS} \left[1 + \left(\frac{\omega L_S}{R_{VS}} \right)^2 \right]$$

$$\omega L_P = \frac{R_{VS}^2 + (\omega L_S)^2}{\omega L_S} = L_S \left[1 + \left(\frac{R_{VS}}{\omega L_S} \right)^2 \right]$$

- Die Parallelschaltung muss die gleiche Impedanz und den gleichen Phasenwinkel mit umgekehrtem Vorzeichen ($\frac{1}{j} = -j$) aufweisen wie die Serienschaltung. Diese Forderung kann nur erfüllt werden, wenn die Induktivität und der Verlustwiderstand der Parallelschaltung gegenüber der Serienschaltung verändert werden.
- Im praktischen Bereich für Spulengüten über 20 ist die Änderung der Induktivität so gering, dass sie vernachlässigt werden darf.
- Wir merken uns folgendes:
Je kleiner der Serieverlustwiderstand einer Spule, desto grösser wird der Parallelverlustwiderstand.
- Die Spulengüte für die Parallelschaltung ergibt sich zu

$$Q_L = \frac{R_{VP}}{X_{LP}} \quad (R_{VP} = \text{Parallelverlustwiderstand})$$

Für die folgenden Betrachtungen verwenden wir den Parallelschwingkreis mit Parallelverlustwiderstand, wie Bild 242 zeigt.

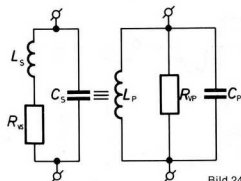


Bild 242

Für die Resonanzfrequenz gilt folgende Umrechnung:

$$f_o = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{L_S C_S} - \left(\frac{R_{VS}}{L_S} \right)^2}$$

$$L_P \approx L_S$$

$$C_P = C_S$$

$$R_{VP} \gg R_{VS}$$

$$Q = \frac{X_{LS}}{R_{VS}} = \frac{R_{VP}}{X_{LP}}$$

b) Die gedämpfte Schwingung

Eine *gedämpfte Schwingung* ist eine Schwingung, deren Amplitude ausklingt. Ein angestossenes Pendel schwingt infolge der Reibungsverluste mit abnehmender Schwingungsweite, es erzeugt eine gedämpfte Schwingung.

Ein angeregter Schwingkreis erzeugt ebenfalls eine gedämpfte Schwingung. Der folgende Vorgang zeigt die Entstehung einer gedämpften Schwingung:

- Der Kondensator in Bild 243 ist mit Hilfe der Gleichspannungsquelle B aufgeladen worden. Beim Umschalten des Schalters S fließt die im elektrischen Feld des Kondensators aufgespeicherte Ladung als Strom durch die

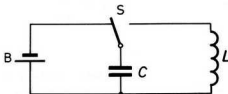


Bild 243

Spule und erzeugt in dieser ein magnetisches Feld. Während der Entladung des Kondensators baut sich das elektrische Feld in diesem ab und sinkt auf den Wert Null. Die im Kondensator gespeicherte elektrische Energie hat sich in magnetische Energie der Spule umgewandelt. Da infolge des Abbaues des elektrischen Feldes im Kondensator der Stromfluss zusammengebrochen ist, fällt auch das magnetische Feld der Spule zusammen, in den Windungen der Spule wird eine Spannung induziert, welche den Kondensator mit umgekehrter Polarität wieder auflädt. Die magnetische

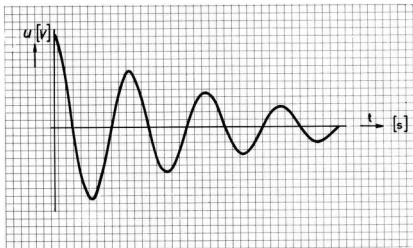


Bild 244

Energie der Spule wurde in elektrische Energie des Kondensators umgesetzt. In einem verlustfreien Schwingkreis würde sich dieser Energiewechsel dauernd wiederholen, der Kreis würde ewig schwingen. Ein solcher Kreis wäre mit einem Pendel vergleichbar, das keine Reibungsverluste aufweist. Das Pendel würde, einmal angestoßen, immerwährend schwingen. Da nun aber in jedem Schwingkreis Verluste in Form eines ohmschen Widerstandes auftreten, wird beim Energiewechsel dauernd Leistung in Wärme umgesetzt, da der Strom durch den Verlustwiderstand fließt. Die Schwingungen klingen demzufolge ab und wir erhalten eine gedämpfte Schwingung, wie sie in Bild 244 gezeigt wird.

Die Energieumwandlung im Kreis beansprucht eine gewisse Zeit. Je grösser Kondensator und Spule gemacht werden, desto langsamer läuft der Schwingungsvorgang ab. Diese Feststellung deckt sich mit der Thomsonschen Schwingkreisformel, die auch für die Parallelschaltung Gültigkeit hat. Der folgende Versuch zeigt die Entstehung einer gedämpften Schwingung. Die Schaltung erkennen wir in Bild 245, während Bild 246 den Versuchsaufbau zeigt.

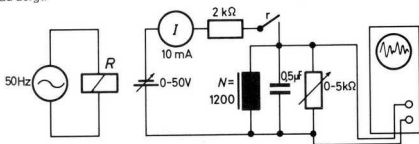


Bild 245

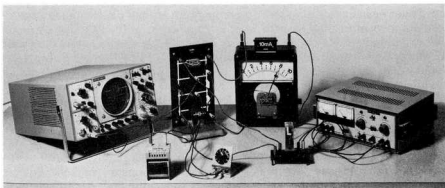


Bild 246

Der Messkreis wird von der Gleichspannungsquelle über den Relaiskontakt r periodisch angeregt. Die Kreislänge wird mit dem $5\text{ k}\Omega$ Potentiometer verändert. Auf dem Oszillografen erscheint die gedämpfte Schwingung des Kreises. Der Einfluss der Kreislänge auf den Schwingungsverlauf wird durch Verstellen des Potentiometers sichtbar gemacht. Der Vorgang im Schwingkreis lässt sich an Hand eines mechanischen Modells veranschaulichen. In Bild 247 ist die Anordnung skizziert.

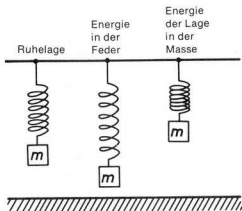


Bild 247

Eine Spiralfeder ist an der Zimmerdecke befestigt. Diese Feder trägt als Masse einen Bleiklotz. Die Länge der Feder ist so bemessen, dass sich die Masse im Ruhezustand auf halber Zimmerhöhe befindet. Der Bleiklotz wird jetzt auf den Boden gedrückt, die Feder wird dadurch gespannt. Die durch das Herunterdrücken der Masse geleistete Arbeit ist nun als Energie in der gespannten Feder gespeichert. Die Feder übernimmt im Modell die Rolle des geladenen Kondensators. Sobald die Masse losgelassen wird, schnellte sie nach oben. Im Moment, da die Masse den höchsten Punkt erreicht, wird die Feder vollkommen entspannt. Die ganze Energie befindet sich jetzt als Energie der Lage in der Masse. Die Induktivität wird durch die Masse dargestellt, die im Magnetfeld gespeicherte Energie entspricht der Energie der Lage in der Masse. Die Masse wird jetzt in Richtung zum Boden fallen, die Feder wird wiederum gespannt, die Energie der Lage wandelt sich während des Falles in Energie der Feder um. Ohne die unvermeidlichen Reibungsverluste würde der Schwingungsvorgang ewig dauern. Je grösser die Reibungsverluste werden, desto rascher klingen die Schwingungen ab. Die durch Reibung verursachten Verluste lassen sich mit den ohmschen Verlusten im Schwingkreis vergleichen, beide Verlustarten verursachen eine Dämpfung der Schwingungen.

c) Das Arbeitsverhalten des Parallelschwingkreises

Das Arbeitsverhalten soll am folgenden Versuch studiert werden. Die Schaltung ist in Bild 248 festgehalten, den dazugehörigen Versuchsaufbau erkennen wir in Bild 249.

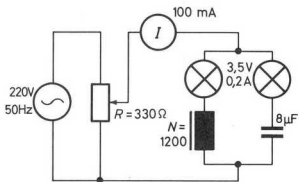


Bild 248

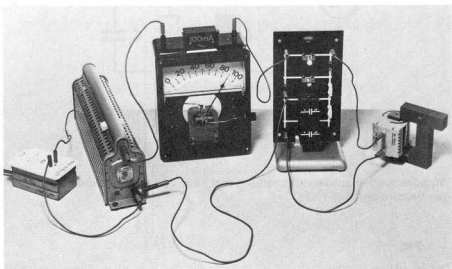


Bild 249

Die Spuleninduktivität wird auf ihren Maximalwert gebracht, indem das Joch genau in die Mitte geschoben wird. Die dem Kreis zugeführte Spannung wird am Schiebewiderstand so lange erhöht, bis sich ein Strom von 100 mA einstellt. Gleichzeitig beginnt das Lämpchen im Zweig des Kondensators zu leuchten, dasjenige im Kreis der Spule bleibt dunkel. Die Induktivität der Spule wird nun langsam verkleinert, indem das Joch weggeschoben wird. Das Lämpchen im Spulenkreis beginnt nun ebenfalls zu leuchten. Für eine bestimmte Stellung des Joches leuchten beide Lämpchen gleich hell, gleichzeitig sinkt der in den Kreis fließende Strom auf seinen kleinsten Wert. Wird die Induktivität weiter verkleinert, so steigt der Kreisstrom wieder an. Das Versuchsergebnis soll mit Hilfe des Vektordiagrammes überlegt werden. Zu diesem Zweck wird die Ersatzschaltung des Kreises aufgezeichnet. Alle Verluste werden in einem Parallelverlustwiderstand zusammengefasst. Grundsätzlich handelt es sich dabei um die bereits bekannte Parallelschaltung von Blind- und Wirkwiderständen. Bild 250 zeigt die Ersatzschaltung.

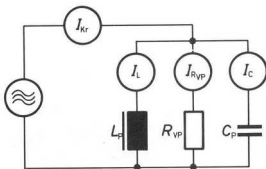


Bild 250

Wir untersuchen an dieser Schaltung drei Fälle und zeichnen die dazugehörigen Vektordiagramme auf.

– 1. Fall

Der induktive Blindwiderstand ist grösser als der kapazitive. Diese Situation entspricht der Ausgangslage unseres Versuches. Der Kreis wirkt kapazitiv.

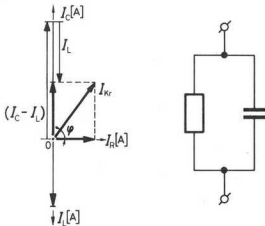


Bild 251

– 2. Fall

Der induktive Blindwiderstand ist *kleiner* als der kapazitive. Dieser Fall entspricht der Endlage unseres Versuches. Der Kreis wirkt induktiv.

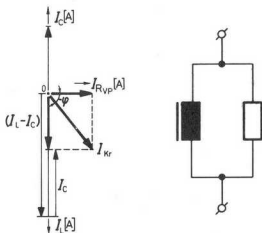


Bild 252

– 3. Fall

Der kapazitive und der induktive Blindwiderstand sind *gleich gross*. Dieser Fall entspricht jener Phase des Versuches, wo beide Lämpchen gleich hell aufleuchteten und der Kreisstrom auf seinen Minimalwert absank. Der Kreis wirkt wie ein ohmscher Widerstand.

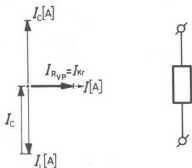


Bild 253

Der kapazitive und der induktive Blindstrom sind gegenphasig, sie heben sich demzufolge gegenseitig auf. Damit die beiden Blindströme gleiche Werte annehmen, müssen die Werte der Blindwiderstände ebenfalls gleich gross werden. In diesem Fall ist nur noch der Parallelverlustwiderstand wirksam. Der folgende Versuch wird die gemachten Beobachtungen bestätigen. Er zeigt das Arbeitsverhalten eines Kreises, der mit einer veränderlichen Frequenz gespeist wird. Die Schaltung zeigt Bild 254, der Versuchsaufbau ist in Bild 255 zu erkennen.

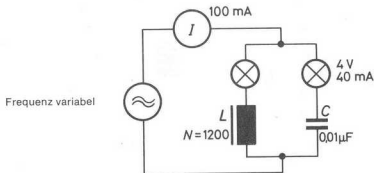


Bild 254

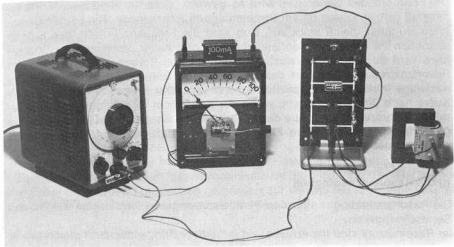


Bild 255

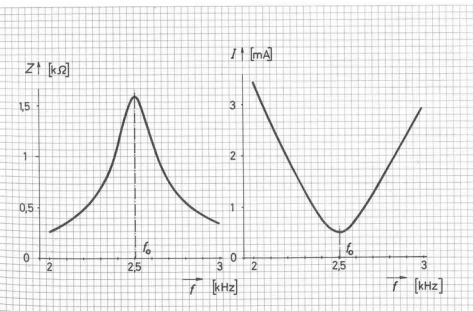


Bild 256

Die Frequenz des Generators wird so gewählt, dass für den Kreis der Resonanzfall eintritt. Dieser ist am Stromminimum zu erkennen. Die beiden Lämpchen leuchten gleich stark auf. Nun wird die Frequenz erhöht, das Signallämpchen im Kreis des Kondensators leuchtet heller, dasjenige im Spulenkreis wird dunkler: Der Kreisstrom steigt an. Bei Frequenzen unterhalb der Resonanzfrequenz leuchtet das Lämpchen im Spulenkreis heller, während dasjenige im Kreis der Kapazität dunkler wird: Der Kreisstrom steigt an. Die Kurve nach Bild 256 entsteht, wenn der Kreisstrom in Abhängigkeit der Frequenz aufgetragen wird. Aus dieser Stromkurve lässt sich die Impedanzkurve gewinnen, indem zu jedem Frequenzwert die dazugehörige Kreisimpedanz ausgerechnet wird.

d) Die Resonanzbedingung

Die Resonanzbedingung für den Parallelschwingkreis ist dieselbe wie für den Serieschwingkreis.

Im Resonanzfall sind kapazitiver und induktiver Blindwiderstand gleich gross.

$$X_L = X_C$$

$$\omega L = \frac{1}{\omega C}$$

Die Thomsonsche Schwingkreisformel gilt demzufolge auch für den Parallelschwingkreis.

Streng genommen gilt diese Feststellung jedoch nur für Kreise mit einer Güte über etwa 20. Bei kleineren Kreislängen müsste der Einfluss des Verlustwiderstandes berücksichtigt werden. Die Kreise für den praktischen Gebrauch weisen jedoch alle Güten auf, für welche die Thomsonsche Formel verwendet werden darf.

e) Die Resonanzkurve

Die graphische Auswertung des letzten Versuches ergibt wiederum die Resonanzkurve. Für die praktische Arbeit ist vor allem der Verlauf der Impedanzkurve von Bedeutung. Die linke Kurve in Bild 256 zeigt den Impedanzverlauf eines Parallelschwingkreises.

Der Kurvenverlauf hängt von den Schwingkreiseigenschaften ab. Im Gegensatz zum Serienschwingkreis weist der Parallelschwingkreis im Resonanzfall den grössten Impedanzwert auf. Für die Resonanzfrequenz stellt auch der Parallelschwingkreis einen rein ohmschen Widerstand dar. Der Parallelschwingkreis wird überall dort eingesetzt, wo es darum geht, *aus einem Frequenzspektrum eine bestimmte Frequenz herauszuheben*. Er verhält sich wie ein Farbfilter für fotografische Zwecke, ein Rotfilter beispielsweise lässt aus dem gesamten Lichtspektrum nur rotes Licht passieren, das heisst, dass Licht mit der Wellenlänge Rot herausfiltert wird.

f) Die Kreisgüte Q

Die Kreisgüte des Parallelkreises hat die gleiche Bedeutung wie die Güte des Seriekreises. Es ist jedoch zu beachten, dass zur Berechnung der Güte der Parallelverlustwiderstand herangezogen wird.

$$Q = \frac{R_{vp}}{\omega_0 L_p} \quad d = \frac{1}{Q} \quad R_{vp} = \text{Parallelverlustwiderstand}$$

g) Die Bandbreite b

Die Bandbreite b hat für den Parallelkreis die gleiche Bedeutung wie für den Seriekreis. Bild 257 zeigt die Verhältnisse am Parallelkreis. Die Bandbreite wird bei den beiden Frequenzen gemessen, für welche die Kreisimpedanz auf den $1/\sqrt{2}$ -fachen Wert der Impedanz im Resonanzfall abgesunken ist.

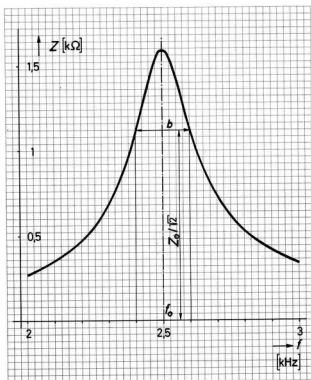


Bild 257

4. Beispiele

a) Bestimmen der Frequenz, der Kreisgüte und der Bandbreite

Der Schwingkreis nach Bild 258 ist zu berechnen. Folgende Werte sind bekannt:

- $L = 150 \mu\text{H}$
- $C = 300 \text{ pF}$
- $R = 120 \text{ k}\Omega$

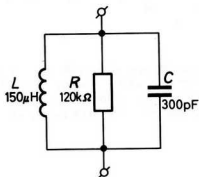


Bild 258

Vorgehen:

1. Schritt: Berechnen der Resonanzfrequenz f_o .

- Grundformel anschreiben

$$f_o = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L \cdot C}}$$
$$[f_o] = \frac{1}{\sqrt{\frac{\text{Vs}}{\text{A}} \cdot \frac{\text{As}}{\text{V}}}} = \frac{1}{\text{s}} = \text{Hz}$$

- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$f_o = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{150 \cdot 10^{-6} \cdot 300 \cdot 10^{-12}}}$$
$$f_o = 750,3 \text{ kHz}$$

2. Schritt: Berechnen der Kreisgüte

- Grundformel anschreiben

$$Q = \frac{R_{\text{vp}}}{X_L}; [Q] = \frac{\text{V}}{\text{A}} \cdot \text{s} \cdot \frac{\text{A}}{\text{Vs}} = 1$$

- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$Q = \frac{120 \cdot 10^3}{2 \cdot \pi \cdot 0,7503 \cdot 10^6 \cdot 150 \cdot 10^{-6}}$$
$$Q = 169,7$$

3. Schritt: Berechnen der Bandbreite

- Grundformel anschreiben

$$b = \frac{f_o}{Q}$$

- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$b = \frac{750,3 \cdot 10^3}{169,7}$$

$$b = 4,42 \text{ kHz}$$

b) Berechnen und Aufzeichnen der Resonanzkurven

Der Parallelschwingkreis nach Bild 259 soll berechnet werden unter der Voraussetzung, dass die Kreiskgüte $Q = 6,66$ beträgt. Die Resonanzkurve ist aufzeichnen.

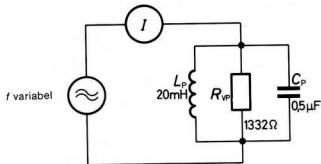


Bild 259

Vorgehen:

1. Schritt: Berechnen der Resonanzfrequenz

- Grundformel anschreiben

$$f_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{L \cdot C}}$$

- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$f_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{20 \cdot 10^{-3} \cdot 5 \cdot 10^{-7}}}$$

$$f_o = 1591 \text{ Hz}$$

2. Schritt: Berechnen der Resonanzkurve

Es ist eine Tabelle mit folgenden Werten aufzunehmen.

- Induktiver Blindleitwert
- Kapazitiver Blindleitwert
- Wirksamer Blindleitwert
- Kreisimpedanz

Die Berechnung hat einen Frequenzbereich von 1100 Hz bis 2100 Hz zu umfassen. Die Werte sind für Frequenzschritte von 100 Hz zu ermitteln.

- Grundformeln für den gesamten Rechnungsgang anschreiben:

$$B_L = \frac{1}{\omega L}$$

$$B_C = \omega C$$

$$G = \frac{1}{R_{vp}}$$

$$Z = \frac{1}{\sqrt{G^2 + (B_L - B_C)^2}}$$

- Zahlenwerte einsetzen und für alle Frequenzwerte ausrechnen (Es wird nur das Beispiel mit dem ersten Frequenzwert gezeigt)

$$B_L = \frac{1}{2\pi \cdot 1100 \cdot 20 \cdot 10^{-3}}$$

$$B_L = 7,23 \cdot 10^{-3} \text{ S}$$

$$B_C = 2\pi \cdot 1,1 \cdot 10^3 \cdot 5 \cdot 10^{-7}$$

$$B_C = 3,45 \cdot 10^{-3} \text{ S}$$

$$G = \frac{1}{1332}$$

$$G = 0,751 \cdot 10^{-3} \text{ S}$$

$$Z = \frac{1}{\sqrt{0,751^2 \cdot 10^{-6} + 3,78^2 \cdot 10^{-6}}}$$

$$Z = 259 \Omega$$

$f \text{ (Hz)}$	B_L (10^{-3} S)	B_C (10^{-3} S)	$B_L - B_C$ (10^{-3} S)	$B_C - B_L$ (10^{-3} S)	$Z \text{ (}\Omega\text{)}$
1100	7,23	3,45	3,78		259
1200	6,63	3,77	2,86		338
1300	6,12	4,08	2,04		461
1400	5,68	4,40	1,28		674
1500	5,30	4,71	0,59		1047
1600	4,97	5,03		0,05	1328
1700	4,68	5,34		0,66	1000
1800	4,41	5,65		1,24	690
1900	4,19	5,97		1,78	517
2000	3,98	6,28		2,30	413
2100	3,79	6,59		2,80	344

Tabelle 17

3. Schritt: Aufzeichnen der Resonanzkurve

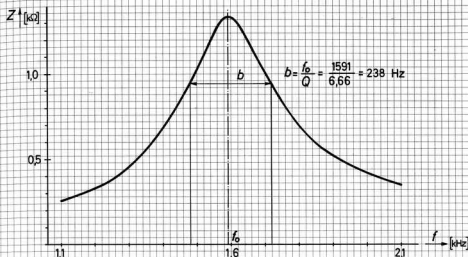


Bild 260

Die Unsymmetrie der Resonanzkurve ist auf die gleichen Ursachen zurückzuführen wie diejenige des Serienschaltkreises (siehe Seite 279).

c) Berechnung der Kreisimpedanz, der Bandbreite und der Kreisströme eines Parallelresonanzkreises

Folgende Daten der Schaltung nach Bild 261 sind für eine Kreisgüte $Q = 120$ zu berechnen:

Impedanz im Resonanzfall Z_0 , Bandbreite b , die Ströme I_R , I_C und I_L für den Resonanzfall.

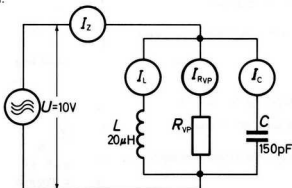


Bild 261

Vorgehen:

1. Berechnen der Resonanzfrequenz

- Grundformel anschreiben

$$f_o = \frac{1}{2 \cdot \pi \sqrt{LC}}$$

$$[f_o] = \frac{1}{\sqrt{\frac{V_s}{A} \cdot \frac{As}{V}}} = \frac{1}{s} = \text{Hz}$$

- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$f_o = \frac{1}{2 \cdot \pi \sqrt{20 \cdot 10^{-6} \cdot 150 \cdot 10^{-12}}}$$

$$f_o = 2,9 \text{ MHz}$$

2. Schritt: Berechnung von X_L und X_C

- Grundformel für die Resonanzbedingung anschreiben
- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$X_L = X_C = \omega_o L$$

$$X_L = 2 \cdot \pi \cdot 2,9 \cdot 10^6 \cdot 20 \cdot 10^{-6}$$

$$X_L = 365 \, \Omega$$

3. Schritt: Berechnung von Z_o

- Grundformel für Q anschreiben
- nach R_{vp} umstellen
- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$Q = \frac{R_{vp}}{X_L}$$

$$R_{vp} = Q \cdot X_L$$

$$R_{vp} = 120 \cdot 365$$

$$R_{vp} = Z_o = \mathbf{43,8 \text{ k}\Omega}$$

4. Schritt: Berechnung der Bandbreite b

- Grundformel anschreiben
- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$b = \frac{f_o}{Q}$$

$$b = \frac{2,9 \cdot 10^6}{120}$$

$$b = \mathbf{24,22 \text{ kHz}}$$

5. Schritt: Berechnung der Ströme

- Grundformel für I_R anschreiben
- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$I_R = \frac{U}{Z_o}$$

$$I_R = \frac{10}{43,8 \cdot 10^3}$$

$$I_R = \mathbf{0,228 \text{ mA}}$$

- Grundformel für I_C und I_L anschreiben
- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$I_L = I_C = \frac{U}{X_L}$$

$$I_L = \frac{10}{365}$$

$$I_L = 27,4 \text{ mA}$$

Kontrolle: Der Blindstrom durch C und L muss im Resonanzfall Q mal grösser sein als der Wirkstrom.

$$I_R \cdot Q = I_C = I_L$$

$$0,228 \cdot 10^{-3} \cdot 120 = 27,4 \cdot 10^{-3} \text{ A}$$

Das Beispiel lässt folgende Schlussfolgerungen zu:

- Im Resonanzfall ist die Impedanz des Parallelschwingkreises Q mal grösser als der kapazitive und der induktive Blindwiderstand.
- Für den Resonanzfall ist im Parallelschwingkreis der Kreisstrom Q mal kleiner als der Blindstrom durch den Kondensator und durch die Spule.

d) Zusammenstellung der wichtigsten Schwingkreisformeln

	Seriekreis	Parallelkreis*
Thomsonsche Schwingkreisformel	$f_o = \frac{1}{2 \cdot \pi \sqrt{LC}}$	$f_o = \frac{1}{2 \cdot \pi \sqrt{LC}}$
Kreisgüte	$Q = \frac{\omega_o L}{R_{vs}}$	$Q = \frac{R_{vp}}{\omega_o L}$
Dämpfung	$d = \frac{1}{Q}$	$d = \frac{1}{Q}$
Bandbreite	$b = \frac{f_o}{Q}$	$b = \frac{f_o}{Q}$
Impedanz für den Resonanzfall	$Z_o = R_{vs} = \frac{\omega_o L}{Q}$	$Z_r = R_{vp} = Q \omega_o L$
Spannungsüberhöhung im Resonanzfall	$U_C = U_L = Q \cdot U_{kr}$ (U_{kr} = Kreisspannung)	–
Stromüberhöhung im Resonanzfall		$I_C = I_L = Q \cdot I_{kr}$ (I_{kr} = Kreisstrom)

* Wenn die Induktivität als Seriwert eingesetzt wird, muss Q grösser als 20 sein, sonst sind die Umrechnungsformeln Seite 283 zu verwenden.

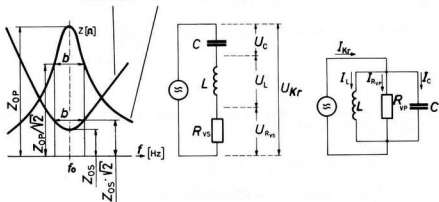


Bild 262

5. Das Wesentliche

Der Parallelschwingkreis besteht aus der Parallelschaltung von Kapazität und Induktivität. Die gesamten Schwingkreisverluste werden in einem Parallelverlustwiderstand zusammengefasst.

Die Frequenz, für welche der kapazitive und der induktive Blindwiderstand gleich gross sind, heisst Resonanzfrequenz.

Die Resonanzfrequenz des Parallelkreises lässt sich mit Hilfe der Thomson'schen Schwingkreisformel errechnen.

Im Resonanzfall wirkt der Parallelkreis wie ein rein ohmscher Widerstand, dessen Wert dem Parallelverlustwiderstand des Kreises entspricht. Oberhalb der Resonanzfrequenz wirkt der Kreis kapazitiv, unterhalb davon induktiv.

Für die Kreisgüte Q ist die Güte der Schwingkreisspule massgebend.

Die Kreisgüte entspricht dem Quotienten aus Parallelverlustwiderstand und induktivem Blindwiderstand im Resonanzfall.

Die Bandbreite wird zwischen den zwei Punkten der Resonanzkurve gemessen, für welche die Kreisimpedanz auf den $1/\sqrt{2}$ -fachen Wert der Impedanz im Resonanzfall abgesunken ist.

Die Kreisimpedanz ist im Resonanzfall um den Faktor Q grösser als der kapazitive oder induktive Blindwiderstand.

Parallelschwingkreise werden überall dort verwendet, wo aus einem Frequenzspektrum eine bestimmte Frequenz herausgefiltert werden soll.

6. Repetitionsaufgaben (Lösung Seite 474)

- Welcher Unterschied besteht im Arbeitsverhalten zwischen einem Serie- und einem Parallelschwingkreis?
- Definieren Sie die Güte des Parallelkreises.
- Zeichnen Sie im richtigen Massstab das Vektordiagramm der Leitwerte eines Parallelkreises für den Resonanzfall. Die Kreisgüte beträgt 10.
- Welches Verhältnis gilt für die Blindströme zum Wirkstrom des Parallelkreises für die Resonanzfrequenz?
- Ein Parallelkreis wird mit seiner Resonanzfrequenz gespeist. Die beiden Blindwiderstände X_C und X_L betragen 1200 Ohm. Die Kreisgüte misst 230. Berechnen Sie den Wert des Resonanzwiderstandes.
- Ein Parallelschwingkreis wird oberhalb seiner Resonanzfrequenz betrieben. Zeichnen Sie das Ersatzschaltbild für diesen Betriebsfall.
- Die Resonanzfrequenz eines Parallelkreises wird zu 600 kHz ermittelt. Der Kreis hat eine Güte von 250. Bestimmen Sie die Bandbreite des Kreises.
- Der Schwingkreis nach Bild 263 soll durch entsprechende Wahl des Kondensators auf eine Resonanzfrequenz von 2,8 MHz gebracht werden.

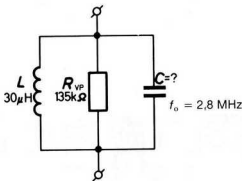


Bild 263

Wie gross muss der Wert des Kondensators gemacht werden?

IX. Die Bandfilter

1. Einführung

Wir haben gesehen, dass man mit Hilfe von Parallelschwingkreisen aus einem Frequenzspektrum eine bestimmte Frequenz, die Resonanzfrequenz des Kreises, herausziehen kann. Wir wissen auch, dass der Schwingkreis eine bestimmte Resonanzkurve mit einer bestimmten Bandbreite aufweist. Jede Nachrichtenübermittlung, gleichgültig ob diese über Draht oder Funk erfolgt, benötigt eine bestimmte Bandbreite im Frequenzspektrum. Diese Bandbreite hängt von der Modulationsart, vom Frequenzumfang der übertragenen Sendung und von der Geschwindigkeit der Zeichenübermittlung ab. Im Empfänger werden die einzelnen Sender mit Schwingkreisen herausfiltriert. Bild 264 zeigt schematisch die Verteilung der Sender in einem Band.

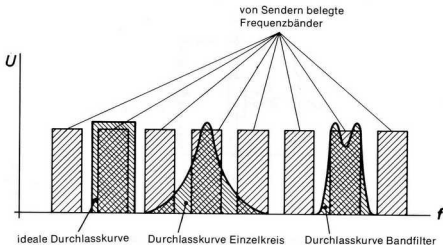


Bild 264

Die Schwingkreise haben nun die Aufgabe, das Frequenzpaket, das die gesamte Information des Senders enthält, aus dem Spektrum herauszuholen. Wir sehen sofort ein, dass ein gewöhnlicher Schwingkreis dieser Aufgabe nicht gerecht werden kann, da seine Resonanzkurve hierzu eine zu ungünstige Form aufweist. Da die Flanken zu wenig steil sind, wird ein Teil der Nachbarsender mitempfangen. Um die einzelnen Sender voneinander sauber trennen zu können, ist ein Selektionsmittel mit viel steileren Flanken not-

wendig. Am idealsten wäre ein Bauelement mit rechteckförmiger Durchlasskurve. Diese Idealkurve erreicht man mit den heutigen Mitteln nicht. Doch bringt bereits ein einfaches Bandfilter eine merkliche Verbesserung gegenüber dem Einzelkreis.

Bandfilter werden überall dort verwendet, wo die Durchlasskurve des Einzelkreises nicht genügt, so beispielsweise in Rundfunkempfängern, in Fernsehgeräten, in Funkgeräten, in Fernschreibanlagen, in Mehrkanaltelefoniegeräten und in der Messtechnik. Das einfachste Bandfilter besteht aus zwei gekoppelten Einzelkreisen.

2. Was wissen Sie schon über Bandfilter?

(Lösung Seite 476)

- a) Welchen Vorteil weist das Bandfilter gegenüber dem Einzelkreis auf?
- b) Welche Faktoren bestimmen die Bandbreite des Einzelkreises?
- c) Nennen Sie eine Kopplungsart für Bandfilter.
- d) Gibt es Bandfilter, die aus mehr als zwei Einzelkreisen bestehen?
- e) Was verstehen Sie unter dem Begriff «induktive Kopplung»?

3. Die Bandfilter

a) Grundsätzliches zum Bandfilter

Das *Bandfilter* besteht aus wenigstens zwei gekoppelten Schwingkreisen. Die *Kopplung* erfolgt durch ein beiden Kreisen gemeinsames Element. In der Regel wird eine *induktive* oder *kapazitive Kopplung* angewendet. Die *galvanische Kopplung* über einen gemeinsamen Widerstand ist nur in Ausnahmefällen anzutreffen. Die Kopplung zwischen den Einzelkreisen kann von sehr lose bis sehr eng eingestellt werden, daraus ergeben sich verschiedene Kopplungsgrade. Man unterscheidet zwischen *unterkritischer*, *kritischer* und *überkritischer Kopplung*. Der Kopplungsgrad beeinflusst die Durchlasskurve des Filters. Durch Kombination verschiedener Einzelkreise und Wahl der notwendigen Kopplungsgrade lassen sich Durchlasskurven mit sehr steilen Flanken verwirklichen.

b) Kopplungsarten

Die induktive Kopplung

Bei der *induktiven Kopplung* von Bandfiltern wird die Energie durch das gemeinsame Magnetfeld übertragen. Die Kopplung wird fester, je enger die Kreisinduktivitäten miteinander gekoppelt sind. In Bild 265 ist das Prinzip der induktiven Kopplung dargestellt.

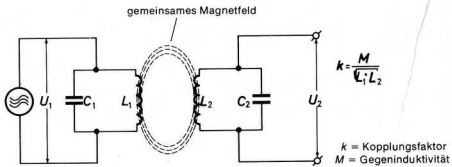


Bild 265

In induktiv gekoppelten Bandfiltern wird die elektrische Energie auf die gleiche Art übertragen wie beim Transformator. Der Unterschied besteht lediglich im Kopplungsgrad. Beim Transformator wird ein Kopplungsfaktor von 100% angestrebt, während beim Bandfilter je nach Kreislage und erwünschter Bandbreite Kopplungsfaktoren von weniger als einem Prozent bis zu einigen Prozenten üblich sind.

Der folgende Versuch zeigt das Arbeitsverhalten eines induktiv gekoppelten Bandfilters. Die Versuchsanordnung ist nach Bild 266 geschaltet, Bild 267 zeigt den Versuchsaufbau.

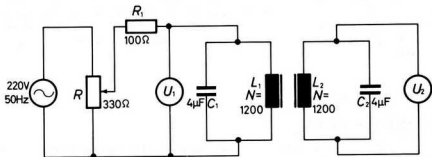


Bild 266

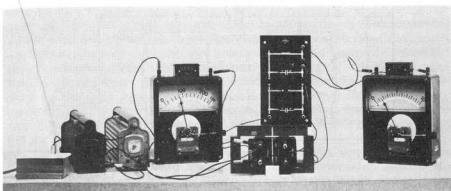


Bild 267

Dem Primärkreis wird über den Spannungsteiler eine Wechselspannung mit einer Frequenz von 50 Hz zugeführt. Durch Verschieben des Joches wird dieser abgestimmt. Die Resonanzlage zeigt sich durch ein Maximum der Primärspannung an. Der Vorwiderstand R_1 entkoppelt den Primärkreis vom Netz. Der Sekundärkreis wird nun ebenfalls in Resonanz gebracht, indem das Joch so lange verschoben wird, bis die Spannung am Sekundärkreis ebenfalls ihren Maximalwert erreicht hat.

Da die beiden Kreise über das gemeinsame Magnetfeld gekoppelt sind, beeinflussen sie sich gegenseitig. Der Sekundärkreis entzieht dem Primärkreis Energie. Durch Vergrössern der Distanz von Primärkreis zu Sekundärkreis kann die Kopplung loser gemacht werden, die Spannung über dem Sekundärkreis nimmt mit loser werdender Kopplung ab.

Diese Art der Kopplung von Bandfiltern ist in der Praxis sehr oft anzutreffen. Oft werden die Filter so aufgebaut, dass sich eine Spule bewegen lässt, wodurch der Kopplungsgrad und somit die Form der Durchlasskurve verändert werden kann.

Die kapazitive Kopplung

Bei kapazitiv gekoppelten Kreisen wird die elektrische Energie über einen Kondensator vom Primärkreis zum Sekundärkreis übertragen. Die Kopplung wird umso enger, je grösser die Kapazität des Kopplungskondensators ist. Bild 268 zeigt die Prinzipschaltung.

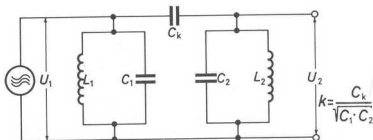


Bild 268

Der folgende Versuch gibt uns Gelegenheit, das Arbeitsverhalten eines kapazitiv gekoppelten Bandfilters zu studieren. Der Versuch ist nach Bild 269 und 270 geschaltet und aufgebaut.

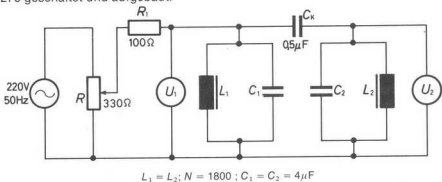


Bild 269

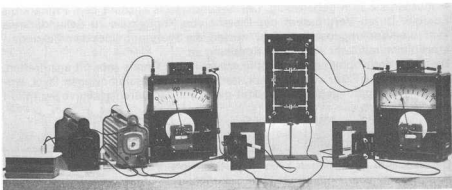


Bild 270

Dem Primärkreis wird über den Spannungsteiler und den Entkopplungswiderstand R_1 eine Wechselspannung (mit 50 Hz) zugeführt. Durch Verschieben des Joches wird der Primärkreis in die Resonanzlage gebracht, diese wird durch ein Spannungsmaximum über dem Kreis angezeigt. Nun wird der Sekundärkreis ebenfalls auf die Resonanzfrequenz abgestimmt, das Voltmeter zeigt die Resonanzlage an. Der Kopplungskondensator von $0,5 \mu\text{F}$ wird durch einen solchen von $1 \mu\text{F}$ ersetzt, die Spannung am Sekundärkreis steigt an, die Kopplung ist enger geworden. Durch die Kopplung über den gemeinsamen Kopplungskondensator beeinflussen sich die Kreise gegenseitig, der Sekundärkreis entzieht dem Primärkreis Energie.

Die kapazitive Kopplung erlaubt auf eine einfache Art eine Änderung des Kopplungsgrades. Verwendet man als Kopplungskondensator einen Drehkondensator, dann lässt sich der Kopplungsgrad kontinuierlich ändern. Konstruktiv muss dafür gesorgt werden, dass sich die Kreise induktiv nicht beeinflussen können, da sonst zusätzlich eine Energieübertragung auf induktivem Wege zustande kommt. Diese unerwünschte induktive Kopplung wird am einfachsten dadurch vermieden, indem die beiden Kreise in Abschirmbecher untergebracht werden.

Die galvanische Kopplung

In galvanisch gekoppelten Kreisen erfolgt die Energieübertragung vom Primärkreis auf den Sekundärkreis über einen ohmschen Widerstand. Diese Kopplungsart ist mit Verlusten verbunden. Sie ist in der Praxis recht selten anzutreffen.

c) Der Kopplungsfaktor k

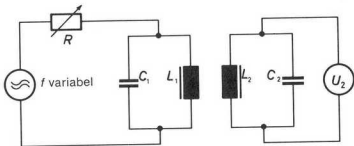
Der *Kopplungsfaktor k* ist ein Mass für die Kopplung. Bei induktiv gekoppelten Kreisen gelten die gleichen Gesetze wie beim Transformator. (Siehe Bild 205 im Kapitel VI «Der Transformator»). Wird alle Energie vom Primärkreis auf den Sekundärkreis übertragen, so erreicht der Kopplungsfaktor den Wert Eins. Der Kopplungsfaktor von HF-Bandfiltern liegt in der Grössenordnung von Bruchteilen von Prozenten bis einige Prozent.

Die Form der Durchlasskurve wird durch die Kreisgüten und den Kopplungsfaktor bestimmt. Wird der Kopplungsfaktor eines Bandfilters veränderlich gemacht, so kann damit die Filterkurve und mit ihr die Bandbreite variiert werden.

d) Die Übertragungseigenschaften

Die Feststellung, dass Kopplungsfaktor und Kreisgüte die Form der Durchlasskurve eines Bandfilters bestimmen, soll im nachfolgenden Versuch überprüft werden. Die Versuchsanordnung wird nach Bild 271 und 272 aufgebaut. Die induktive Kopplung wird dadurch veränderlich gemacht, indem der Ab-

stand zwischen den beiden Spulen vergrößert oder verkleinert wird. Der Widerstand R dient der Entkopplung des Primärkreises vom Niederfrequenz-generator. Die beiden Kerne werden in einem Abstand von etwa 2 cm voneinander aufgestellt. Die Frequenz des Niederfrequenzgenerators wird so lange verändert, bis das Voltmeter über dem Sekundärkreis das Spannungsmaximum anzeigt. Nun werden beide Kreise durch Verschieben des Joches auf die Resonanzfrequenz abgestimmt. Der Sekundärkreis wird jetzt dem Primärkreis langsam genähert, die Spannung über dem Sekundärkreis steigt langsam an. Sobald der Abstand zwischen den Kernen kleiner als 1 cm wird, sinkt die Sekundärspannung wieder langsam ab. Wir halten den Abstand zwischen den Kernen fest, für welchen die Sekundärspannung ihren Maximalwert erreicht.



f = Tonfrequenz, variabel
 $C_1 = C_2 = 0,1 \mu\text{F}$
 $L_1 = L_2; N = 300$

Bild 271

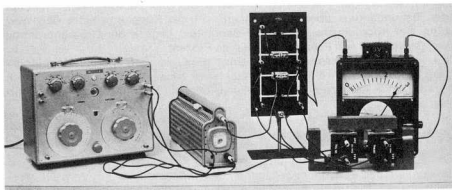


Bild 272

Für diese Kopplung soll nun die Durchlasskurve des Filters aufgenommen werden, indem der Wert der Sekundärspannung in Abhängigkeit der Frequenz festgehalten wird. Die resultierende Kurvenform ist in Bild 273 festgehalten.

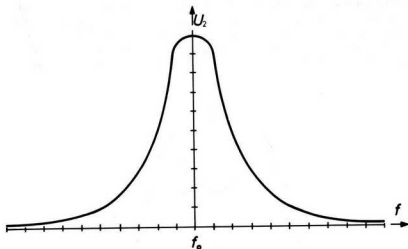


Bild 273

Die durchgeführte Messung ergibt die Durchlasskurve für ein *kritisch gekoppeltes* Bandfilter. *Kritische Kopplung* tritt dann ein, wenn der Kopplungsgrad so eng gemacht wird, dass am Sekundärkreis für die Resonanzfrequenz die grösste Spannung auftritt.

Für die nächste Messung wird der Abstand zwischen den Spulen so weit vergrössert, bis die Sekundärspannung auf etwa die Hälfte des Wertes bei kritischer Kopplung abgesunken ist. Der Messvorgang wird wiederholt und ergibt graphisch festgehalten die Durchlasskurve nach Bild 274.

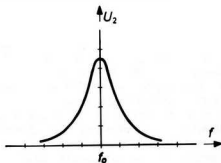


Bild 274

Die durchgeführte Messreihe zeigt den Kopplungsgrad für die *unterkritische Kopplung*, oft auch *lose Kopplung* genannt. Die *unterkritische Kopplung* umfasst den gesamten Bereich aller Kopplungsgrade unterhalb der kritischen Kopplung.

Die nächste Messung wird mit einem Kopplungsgrad durchgeführt, der enger ist als derjenige für die kritische Kopplung. Zu diesem Zweck wird der Abstand zwischen Primärkreis und Sekundärkreis soweit verringert, dass die Sekundärspannung für die Resonanzfrequenz unter den Maximalwert absinkt. Bild 275 hält die Bandfilterkurve für diesen Kopplungsgrad fest.

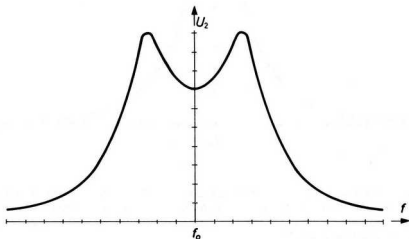


Bild 275

Die Durchlasskurve weist für diese Frequenz eine Einsattelung auf; symmetrisch dazu treten zwei Höcker auf. Kopplungsgrade, für welche eine Einsattelung der Durchlasskurve für die Resonanzfrequenz entsteht, nennt man *überkritisch*. Die *überkritische Kopplung* umfasst den gesamten Bereich aller Kopplungsgrade oberhalb der kritischen Kopplung.

Die sehr enge Kopplung wirkt sich auf den Primärkreis so aus, als ob er durch den Sekundärkreis verstimmt würde. Den gleichen Effekt verursacht der Primärkreis im Sekundärkreis. Dadurch werden die Resonanzfrequenzen der beiden Kreise gegeneinander verschoben, was die Höckerbildung verursacht.

e) Die Bedingungen für die verschiedenen Kopplungsgrade

Kritische Kopplung

Kritische Kopplung tritt dann auf, wenn das Produkt aus Kopplungsfaktor und Kreislüte gleich Eins wird.

$$k \cdot Q = 1$$

k = Kopplungsfaktor

Q = Güte des Filters

$$Q = \sqrt{Q_1 \cdot Q_2}$$

für Filter, bei welchen die Güte des Primärkreises Q_1 und die Güte des Sekundärkreises Q_2 nicht gleich gross sind

Für die kritische Kopplung wird die Bandbreite um den Faktor $\sqrt{2}$ mal grösser als die Bandbreite eines Einzelkreises mit gleicher Güte.

Überkritische Kopplung

Überkritische Kopplung tritt dann auf, wenn das Produkt aus Kopplungsfaktor und Kreislüte grösser als Eins wird.

$$k \cdot Q > 1$$

Der Wert sollte 2,41 nicht überschreiten, da sonst die Sekundärspannung für die Resonanzfrequenz unter den $1/\sqrt{2}$ fachen Wert der Maximalspannung absinkt. Eine so tiefe Einsattelung hätte erhebliche Verzerrungen des übertragenen Signals zur Folge. Für diese maximal zulässige Kopplung wird die Bandbreite um den Faktor 3,1mal grösser als diejenige eines Einzelkreises mit gleicher Güte.

Unterkritische Kopplung

Unterkritische Kopplung tritt dann auf, wenn das Produkt aus Kreislüte und Kopplungsfaktor kleiner als Eins ist.

$$k \cdot Q < 1$$

Für einen Wert von 0,67 weist das Bandfilter die gleiche Bandbreite auf wie ein Einzelkreis gleicher Güte.

f) Phasenlage zwischen Primärspannung und Sekundärspannung im Bandfilter

Die Phasenlage zwischen Primär- und Sekundärspannung am Bandfilter ist dann von Bedeutung, wenn es als Bestandteil eines Diskriminators verwendet

wird. Wir werden später sehen, dass die meisten modernen Empfänger Diskriminatoren für die Demodulation frequenzmodulierter Signale verwenden. Vor-erst wollen wir uns lediglich mit den Phasenlagen im Bandfilter befassen. Der folgende Versuch soll uns helfen, die Phasenverhältnisse im Filter messtechnisch zu erfassen. Schaltung und Versuchsaufbau sind in Bild 276 und 277 festgehalten.

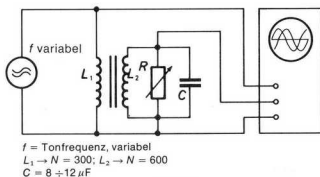


Bild 276

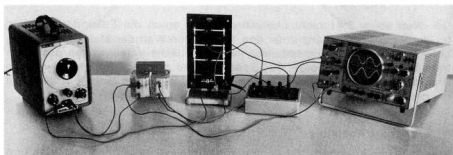


Bild 277

Der Primärkreis braucht nicht abgestimmt zu werden, da Strom und Spannung an der Primärinduktivität in bezug auf die Phasenlage das gleiche Verhalten zeigen wie beim abgestimmten Kreis. Die Generatorfrequenz wird so lange verstellt, bis das System den Resonanzfall anzeigt, was durch sprunghaftes Ansteigen des Signals auf dem Oszillografen festgestellt werden kann. Der Zweistrahloszillograf erlaubt das gleichzeitige Sichtbarmachen der Spannung am Primärkreis und derjenigen des Sekundärkreises. Ein Bild gibt die Spannung am Primärkreis, das andere diejenige am Sekundärkreis wieder. Für die Resonanzfrequenz wird eine Phasenverschiebung von 90° zwischen

Primärspannung und Sekundärspannung sichtbar. Für die nächste Messung wird die Generatorfrequenz höher als die Resonanzfrequenz gewählt. Die Phasenverschiebung wird grösser als 90° . Für eine Generatorfrequenz unterhalb der Resonanzfrequenz wird die Phasenverschiebung kleiner als 90° . Die Erläuterung der Gründe, die zu dieser Phasenverschiebung führen, würde den Rahmen des Lehrganges sprengen. Wir wollen diese Phasenbedingungen zur Kenntnis nehmen, ohne den mathematischen Beweis zu erbringen.

4. Beispiel

In einem Empfänger wird ein Bandfilter mit veränderlicher Kopplung verwendet. Es handelt sich dabei um ein symmetrisches Filter mit einer Güte von 200. Die Resonanzfrequenz beträgt 455 kHz.

Folgende Werte sind zu ermitteln:

- Für kritische Kopplung: Bandbreite und Kopplungsfaktor
- Für überkritische Kopplung: Bandbreite und Kopplungsfaktor für die maximal zulässige Kopplung.
- Für unterkritische Kopplung: Kopplungsfaktor für eine Bandbreite, welche derjenigen eines gleichwertigen Einzelkreises entspricht.

Vorgehen:

1. Schritt: Berechnung von Bandbreite und Kopplungsfaktor für kritische Kopplung.

- Grundformel anschreiben:

$$b = \frac{f_o}{Q} \cdot \sqrt{2}$$

- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$b = \frac{455 \cdot 10^3}{200} \cdot \sqrt{2}$$

$$b = 3,22 \text{ kHz}$$

- Grundformel anschreiben

$$k \cdot Q = 1$$

- nach k umstellen

$$k = \frac{1}{Q}$$

- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$k = \frac{1}{200} \cdot 100\%$$

$$k = 0,5\%$$

2. Schritt: Berechnung von Bandbreite und Kopplungsfaktor für maximal zulässige überkritische Kopplung

- Grundformel anschreiben

$$b = \frac{f_o}{Q} \cdot 3,1$$

- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$b = \frac{455}{200} \cdot 3,1 \cdot 10^3$$

$$b = 7,05 \text{ kHz}$$

- Grundformel anschreiben
- nach k umstellen
- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

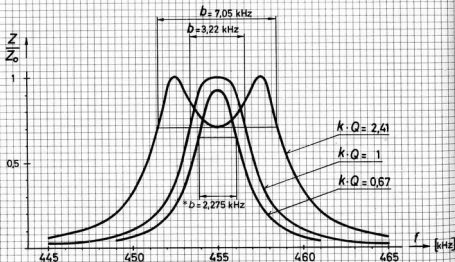
$$\begin{aligned}
 k \cdot Q &= 2,41 \\
 k &= \frac{2,41}{Q} \\
 k &= \frac{2,41}{200} \cdot 100\% \\
 k &= 1,205\%
 \end{aligned}$$

3. Schritt: Kopplungsfaktor für gerade noch zulässige unterkritische Kopp-
lung berechnen

- Grundformel anschreiben
- nach k umstellen
- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$\begin{aligned}
 k \cdot Q &= 0,67 \\
 k &= \frac{0,67}{Q} \\
 k &= \frac{0,67}{200} \cdot 100\% \\
 k &= 0,335\%
 \end{aligned}$$

Die Durchlasskurven dieses Beispiels wurden errechnet und in Bild 278 auf-
gezeichnet.



$$*b = \frac{455 \cdot 10^3}{200}$$

Bild 278

5. Das Wesentliche

Das Bandfilter besteht aus mindestens zwei gekoppelten Schwingkreisen. Bei den meisten Filtern erfolgt die Kopplung induktiv oder kapazitiv.

Das Bandfilter weist steilere Flanken auf als der Einzelkreis, es ermöglicht daher bessere Trennschärfe bei ausreichender Bandbreite.

Die Form der Durchlasskurve wird durch den Kopplungsfaktor und die Kreisgüte bestimmt. Bei loser (unterkritischer) Kopplung ähnelt die Durchlasskurve derjenigen des Einzelkreises. Bei kritischer Kopplung entsteht am Sekundärkreis die grösste Spannung, die Flanken werden steil und die Bandbreite wird grösser als beim Einzelkreis mit gleicher Güte. Bei überkritischer Kopplung wächst die Bandbreite weiter an, für die Resonanzfrequenz entsteht in der Durchlasskurve eine Einsattelung.

Für den Resonanzfall besteht zwischen der Primärspannung und der Sekundärspannung am Bandfilter eine Phasenverschiebung von 90° . Für Frequenzen, die von der Resonanzfrequenz abweichen, wird diese Phasenverschiebung grösser oder kleiner als 90° .

6. Repetitionsaufgaben (Lösung Seite 477)

- Welche Vorteile zeichnet das Bandfilter gegenüber dem Einzelkreis aus?
- Wo werden Bandfilter hauptsächlich eingesetzt?
- Welche Kopplungsarten kennen Sie?
- Welche Faktoren beeinflussen die Durchlasskurve eines Bandfilters?
- Wie lautet die Bedingung für die kritische Kopplung?
- Bei welchem Kopplungsgrad tritt die Höckerbildung auf?
- Zeichnen Sie die Durchlasskurven für ein Filter bei unterkritischer, kritischer und überkritischer Kopplung.
- Wie lässt sich beim induktiv gekoppelten Filter der Kopplungsgrad am einfachsten verändern?

G. Elektronenröhren

I. Diode

1. Einführung

Als Edison im Kolben einer Glühlampe ein Blech anbrachte und den Kolben leer pumpte, stellte er fest, dass zwischen dem Blech und dem Glühfaden ein Strom floss, sobald der Glühfaden erwärmt wurde. Bild 279 gibt den Versuch von Edison wieder.

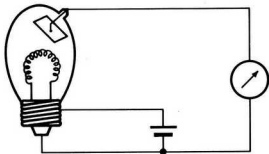


Bild 279

Mit diesem Experiment begann der Siegeszug der Elektronenröhre. Moderne Röhrendioden sind wohl etwas komplizierter aufgebaut, als die Edison-Diode, das Funktionsprinzip ist jedoch dasselbe geblieben.

Dioden werden in der Nachrichtentechnik vielseitig eingesetzt. Wir treffen sie in Demodulatoren zur Gleichrichtung von Signalen, in Netzgeräten als Gleichrichter für die Netzspannung und in vielen Schaltschaltungen und Messgeräten als Ventile an.

2. Was wissen Sie schon über Dioden? (Lösung Seite 479)

- Beschreiben Sie den Aufbau einer Diode und benennen Sie die Elektroden.
- Warum sind die Elektroden einer Diode im Kolben unter Vakuum?
- Warum verlassen die Elektronen die Katode?
- Durch welche Massnahmen kann der Anodenstrom in der Diode gesteigert werden?
- Was verstehen Sie unter einer «indirekt geheizten Katode»?
- Erklären Sie den Ausdruck «Raumladung».

3. Die Diode

a) Stromleitung im Vakuum

Der elektrische Strom wird durch bewegte Ladungsträger hervorgerufen. Die Stromleitung durch das Vakuum kommt durch die freien Elektronen, die sich von der Katode zur Anode bewegen, zustande. Im Vakuum befinden sich praktisch keine Gasmoleküle mehr; die Elektronen können sich ungehindert bewegen, sie riskieren keine Zusammenstöße mit Gasmolekülen. Unter dem Einfluss eines elektrischen Feldes können diese freien Elektronen im Vakuum beschleunigt werden. Ihre Geschwindigkeit hängt von der Stärke des angelegten Feldes ab. In Bild 280 erkennen wir die *Katode* als Elektronenspender und die ihr gegenüberstehende *Anode*, die den emittierten Elektronenschwarm wieder auffängt. Zwischen diesen beiden Elektroden wird durch die angelegte *Anodenspannung* ein elektrisches Feld aufgebaut. Die positive Anode zieht die negativen Elektronen an. Je höher die Anodenspannung gewählt wird, desto grösser wird die Geschwindigkeit, mit welcher die Elektronen der Anode zufliegen. Die konventionelle Richtung des elektrischen Stromes wird vom Plus- zum Minuspol der Spannungsquelle angenommen. Diese Annahme stammt aus einer Zeit, die noch nicht viel vom Wesen der Elektrizität kannte. Wir wissen heute, dass sich die Elektronen vom Minuspol zum Pluspol der Spannungsquelle bewegen, trotzdem wird die ursprüngliche – die konventionelle – Stromrichtung beibehalten. *Die konventionelle Richtung des Anodenstromes ist der Bewegungsrichtung des Elektronenstromes entgegengesetzt.*

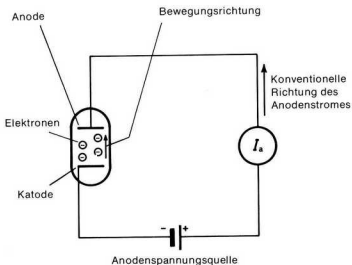


Bild 280

Die Elektronen benötigen eine gewisse Zeit, um von der Katode zur Anode zu gelangen. Die anodenspannungsabhängige Auftreffgeschwindigkeit beträgt im Durchschnitt etwa 10 000 km/s.

b) Die Elektronenemission

Damit Elektronen einen Leiter verlassen können, müssen sie eine gewisse Geschwindigkeit aufweisen, um die im Leiter wirksamen Anziehungskräfte zu überwinden. Die notwendige Geschwindigkeit wird den Elektronen in der Katode durch Zufuhr von Wärmeenergie erteilt. Wird die Katode erwärmt, dann steigt die mittlere Geschwindigkeit der freien Elektronen an. Ein Teil der Elektronen erreicht dabei die kritische Geschwindigkeit, die notwendig ist, um die Katode zu verlassen. Diese Elektronen verlassen die Katode und fliegen unter dem Einfluss der Anodenspannung zur Anode. Grundsätzlich ist es gleichgültig, wie die Katode erwärmt wird. Die Heizung erfolgt bei den Elektronenröhren elektrisch. Da diese Elektronenemission durch *Erwärmung* der Katode verursacht wird, heisst sie *Thermoemission*.

c) Die Raumladung

In einem Leiter ist der Strom und damit die bewegte Ladung proportional der angelegten Spannung. Elektronenbewegungen in einem Vakuum dagegen verhalten sich anders. Die Elektronen, die sich unter der Einwirkung der Anodenspannung bewegen, weisen eine nach der Anode hin zunehmende Geschwindigkeit auf. Im Leiter bewegen sich die Elektronen mit gleichbleibender Geschwindigkeit. Nicht alle Elektronen, die die Katode verlassen, gelangen zur Anode, ein Teil verbleibt in der Nähe der Katode. Es bildet sich um die Katode eine «Elektronenwolke». Diese Elektronenwolke wirkt wie eine elektrische Ladung, sie wird deshalb als *Raumladung* bezeichnet. Infolge ihrer negativen Polarität wirkt sie bremsend auf die aus der Katode austretenden Elektronen. Mit zunehmendem Anodenstrom wird die Dichte der Raumladung immer geringer, damit schwindet auch ihr Einfluss. Ab einer bestimmten Anodenspannung gelangen alle emittierten Elektronen zur Anode, die Raumladung ist verschwunden. Wird die Anodenspannung weiter erhöht, so steigt der Anodenstrom nicht mehr weiter an, die Diode arbeitet im Sättigungsgebiet. Der maximale Anodenstrom heisst: *Sättigungsstrom*.

d) Der Anlaufstrom

Edison stellte mit seinem Versuch fest, dass ein kleiner Anodenstrom auch dann fliesst, wenn keine Anodenspannung vorhanden ist, oder wenn diese leicht negativ wird. Dieser Strom wird *Anlaufstrom* genannt. Er entsteht dank der Eigengeschwindigkeit eines Teils der Elektronen, die aus der Katode ausgetreten sind. Die Austrittsgeschwindigkeit dieser Elektronen ist so gross, dass sie die Anode anzulaufen vermögen, ohne dass ein elektrisches Feld

sie beschleunigt. Elektronen mit einer grossen Austrittsgeschwindigkeit gelangen sogar trotz einer kleinen negativen Anodenspannung zur Anode. Der Anlaufstrom spielt für die Dioden und Verstärkerröhren eine wesentliche Rolle.

e) Die Katode

Die Katode hat die Aufgabe, Elektronen zu emittieren. Bei einigen Stoffen ist die Fähigkeit Elektronen auszusenden besonders ausgeprägt. Belegt man den Glühfaden einer Diode mit einem dieser Materialien – Bariumoxyd wird häufig verwendet – so erhält man eine direkt geheizte Katode. Bild 281 zeigt Aufbau und Symbol der *direkt geheizten Katode*.

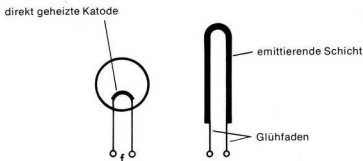


Bild 281

Röhren mit direkt geheizten Katoden werden vor allem in batteriegespeisten Geräten verwendet. Für Geräte mit Wechselstromheizung sind sie nicht geeignet, da der Heizfaden thermisch zu wenig träge ist. Der emittierte Elektronenstrom schwankt im Rhythmus der Frequenz des Heizstromes. Für Wechselstromspeisung werden Röhren mit *indirekt geheizter Katode* benötigt. Die indirekt geheizte Katode besteht aus einem Heizwendel, welcher im Innern eines Röhrchens isoliert angebracht ist. Das Röhrchen dient als Träger für die emittierende Schicht. Durch diese Massnahme wird die Wärmeträgheit der Katode vergrössert, die Frequenz des Heizstromes kann den Katodenstrom nicht mehr beeinflussen. Die elektrische Trennung des Heizkreises von der Katode bringt zudem schaltungstechnisch grosse Vorteile. Den prinzipiellen Aufbau einer indirekt geheizten Katode erkennen wir in Bild 282.

indirekt geheizte Katode

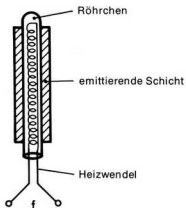
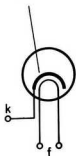


Bild 282

f) Die Anode

Die Anode besteht aus Nickel- oder Stahlblech. Sie ist meistens zylindrisch oder oval um die Katode angeordnet. Bild 283 zeigt den prinzipiellen Aufbau einer Diode, während auf Bild 284 einige Ausführungsformen zu sehen sind.

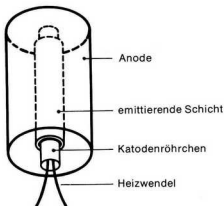


Bild 283

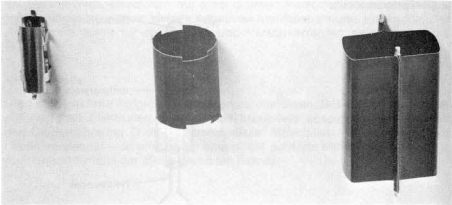


Bild 284

Die Elektronen, die auf die Anode aufprallen, besitzen eine beträchtliche Bewegungsenergie. Beim Eintritt in die Anode werden die Elektronen plötzlich gebremst, ihre Bewegungsenergie wandelt sich um in thermische Energie, welche an das Anodenblech abgegeben wird und dieses so erwärmt. Diese Erwärmung wird umso intensiver, je mehr Elektronen auf die Anode auftreffen, und je grösser die Geschwindigkeit dieser Elektronen ist. Sie nimmt mit steigendem Anodenstrom und grösser werdender Anodenspannung zu. Die maximal zulässige Anodenbelastung wird durch die *Anodenverlustleistung* ausgedrückt. *Die Anodenverlustleistung ist diejenige Leistung, die im Anodenblech in Wärme umgesetzt wird.* Wenn an der Anode *nur* eine Gleichspannung liegt, lässt sich die Anodenverlustleistung leicht messen. Sie entspricht dem Produkt aus Anodenstrom und Anodenspannung.

$$P_{ad} = I_a \cdot U_a$$

Die Wärmeabfuhr kann im Vakuum nur durch Strahlung erfolgen, weshalb die Anodenbleche zur Verbesserung der Wärmeabstrahlung meistens geschwärzt werden.

g) Definition der Diode

Die *Diode* ist die einfachste Form einer Elektronenröhre. Sie besitzt zwei Elektroden: Katode und Anode. Die Katode emittiert den Elektronenstrom, der von der Anode aufgenommen wird. Die Diode wirkt als elektrisches «Ventil», da der Strom nur in einer Richtung fließen kann.

h) Symbol

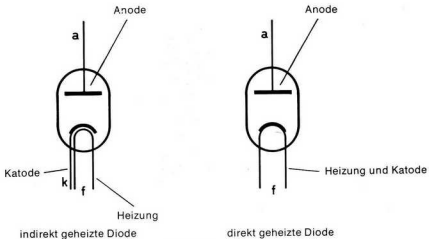


Bild 285

i) Aufbau

Der prinzipielle Aufbau der Diode ist in Bild 286 festgehalten. In Bild 287 ist eine Doppeldiode zu sehen.

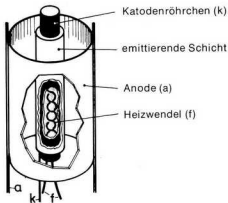


Bild 286

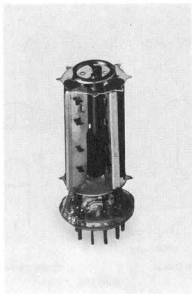


Bild 287

k) Wirkungsweise

Der folgende Versuch untersucht die Wirkungsweise der Diode. Die Versuchsschaltung und der Aufbau sind aus den Bildern 288 und 289 ersichtlich. (Bild 289 entspricht nicht genau dem Schema von Bild 288, indem die Stromquelle für negative Anodenspannung umgesteckt werden muss.)

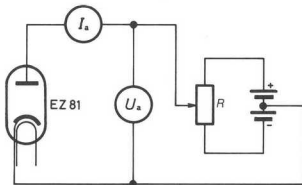


Bild 288

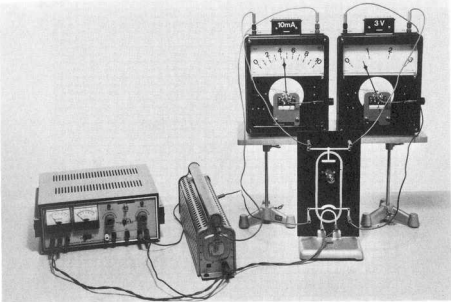


Bild 289

Die Anodenspannung U_a wird auf Null eingestellt. Das Ampèremeter misst einen schwachen Anodenstrom I_a . Dieser Anodenstrom sinkt auf Null ab, wenn die Anodenspannung etwa 2 Volt negativ gemacht wird. Für positive Anodenspannungen steigt der Strom durch die Röhre rapid an. Die Messwerte werden in das Anodenspannungs-Anodenstrom-Diagramm nach Bild 290 eingetragen.

Wird die Anodenspannung noch weiter erhöht, bleibt der Anodenstrom von einer bestimmten Spannung hinweg konstant. Der Anodenstrom steigt nicht mehr weiter an, da die Katode keine weiteren Elektronen emittieren kann.*

* Dieser Versuch darf aber, zwecks Schonung der Röhre EZ 81, nicht ausgeführt werden. Durch eine zu grosse Stromdichte auf der Katode könnten Teile der emittierenden Schicht weggerissen werden.

EZ 81

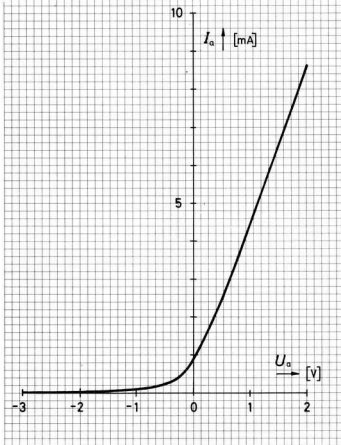


Bild 290

Die zugeführte Heizleistung kann keine weiteren Elektronen mehr mit der notwendigen Austrittsenergie versorgen. Bild 291 zeigt die Kennlinie einer Diode, bei welcher auch eine höhere Anodenspannung keinen höheren Anodenstrom bewirkt.

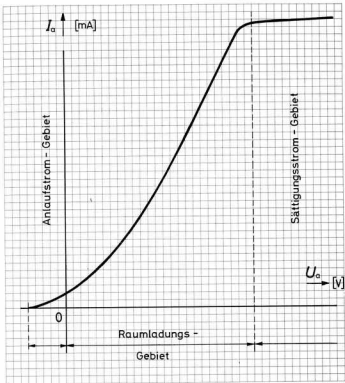


Bild 291

Die Kennlinie der Diode wird in drei Gebiete unterteilt:

- Im **Anlaufstromgebiet** entsteht der Anodenstrom durch die Eigengeschwindigkeit der Elektronen, die die Katode verlassen haben.
- Im **Raumladungsgebiet** wird der Anodenstrom von der Raumladung und der Anodenspannung beeinflusst.
- Im **Sättigungsstromgebiet** gelangen alle Elektronen, die die Katode emittierte, zur Anode. Die Raumladung ist verschwunden. Eine Erhöhung der Anodenspannung bringt keine Zunahme des Anodenstromes mehr, da die Emissionsfähigkeit der Katode voll beansprucht wird.

Moderne Dioden werden weit ausserhalb des Sättigungsgebietes betrieben. Die höchst zulässige Anodenspannung liegt unterhalb der Sättigungsspannung.

I. Technische Daten

– Der Gleichstrominnenwiderstand

Der Gleichstrominnenwiderstand der Diode ist gegeben durch den Quotienten aus Anodengleichspannung zu Anodengleichstrom. Dieser Gleichstrominnenwiderstand spielt bei Gleichrichterschaltungen eine Rolle, da er wie ein zur Gleichrichterstrecke in Serie geschalteter ohmscher Widerstand wirkt. Bei Belastungsschwankungen ändert sich der Spannungsabfall über der Röhre und damit die Klemmenspannung des Gleichrichters. Der Gleichstrominnenwiderstand kann nach Bild 292 graphisch aus den Kennlinien ermittelt werden, indem man für den Arbeitspunkt die Anodengleichspannung und den Anodengleichstrom abliest.

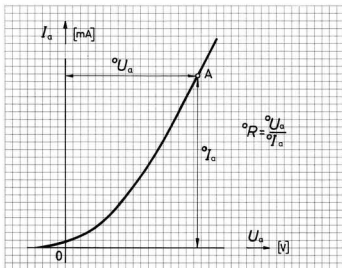


Bild 292

– Der Wechselstrominnenwiderstand R_i

Der Wechselstrominnenwiderstand der Diode interessiert vor allem dann, wenn die Diode als veränderlicher Wechselstromwiderstand geschaltet wird. Diese Art der Verwendung ist bei älteren frequenzmodulierten Kleinsendern häufig anzutreffen. Der Wechselstrominnenwiderstand R_i ist derjenige Widerstand, den die Diode einer Spannungsänderung entgegensetzt. Er wird messtechnisch ermittelt, indem man die Anodenspannung um einen kleinen Betrag ändert und dabei die Anodenstromänderung beobachtet. Der Wechselstrominnenwiderstand errechnet sich dann zu

$$R_i = \frac{\Delta U_a}{\Delta I_a}$$

Das Zeichen Δ (Delta) zeigt eine Veränderung der nachfolgenden Grösse an. Der Innenwiderstand kann auch graphisch ermittelt werden, indem man an den Arbeitspunkt die Tangente legt. Diese gibt die Steigung der Kurve im Arbeitspunkt an. Die Tangentensteigung drückt den Innenwiderstand der Diode für den Arbeitspunkt aus. Bild 293 zeigt das graphische Verfahren.

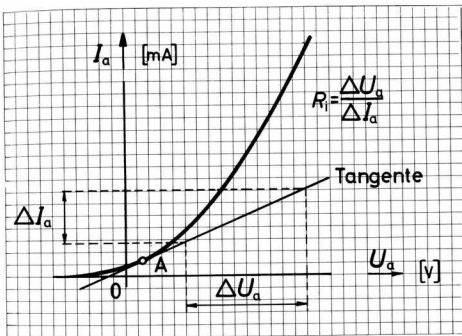


Bild 293

Als *Arbeitspunkt* bezeichnet man den Ort auf der Kennlinie, der durch die angelegte Anodenspannung und den dazugehörigen Anodenstrom bestimmt ist. Auf jeder gekrümmten Kennlinie hängt der Innenwiderstand von der Lage des Arbeitspunktes ab, da die Neigung der Kennlinie für jeden Arbeitspunkt eine andere ist.

4. Beispiele

a) Bestimmen des Gleichstrominnenwiderstandes

Der Gleichstrominnenwiderstand der Röhre EZ 81 ist aus der Kennlinie nach Bild 294 für den Arbeitspunkt A_3 zu ermitteln.

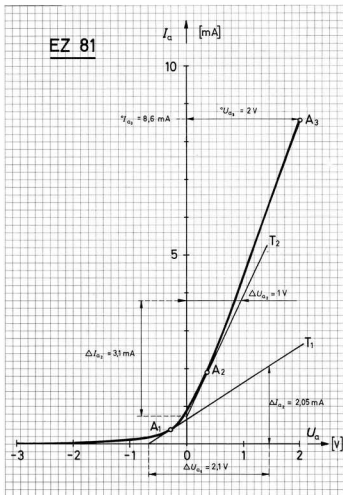


Bild 294

Vorgehen:

- Die zum Arbeitspunkt A_3 gehörende Anodenspannung und der daraus resultierende Anodenstrom sind aus dem Diagramm herauszulesen.
- Formel für den Gleichstrominnenwiderstand anschreiben

$$^{\circ}R = \frac{^{\circ}U_a}{^{\circ}I_a}$$

- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$^{\circ}R = \frac{2}{8,6 \cdot 10^{-3}}$$

$$^{\circ}R = 232,558 \, \Omega$$

b) Bestimmen des Wechselstrominnenwiderstandes

Der Wechselstrominnenwiderstand der Röhre EZ 81 nach Bild 294 soll für die beiden Arbeitspunkte A_1 und A_2 bestimmt werden.

Vorgehen

- Die Tangenten T_1 und T_2 sind durch die Arbeitspunkte A_1 und A_2 an die Kennlinie zu legen.
- Die Anodenspannungs- und Anodenstromänderungen für die beiden Arbeitspunkte sind mit Hilfe der Tangenten zu ermitteln.

- Grundformel für Wechselstrominnenwiderstand anschreiben

$$R_i = \frac{\Delta U_a}{\Delta I_a}$$

- Zahlenwerte für beide Fälle einsetzen und ausrechnen

$$R_{i2} = \frac{1}{3,1 \cdot 10^{-3}}$$

$$R_{i2} = 323 \, \Omega$$

$$R_{i1} = \frac{2,1}{2,05 \cdot 10^{-3}}$$

$$R_{i1} = 1024,39 \, \Omega$$

Das Beispiel hat an Hand der Kennlinie einer Gleichrichterröhre sehr schön bewiesen, dass der *Wechselstrominnenwiderstand* einer Diode vom Arbeitspunkt abhängt. Je flacher die Tangente verläuft, desto grösser wird der Innenwiderstand. Gleichzeitig konnten wir feststellen, dass der *Gleichstrominnenwiderstand* der Röhre mit dem Wechselstrominnenwiderstand *nichts* gemeinsam hat. Wir halten nochmals fest:

Der Wechselstrominnenwiderstand einer Diode ist derjenige Widerstand, den die Röhre einer Spannungsänderung entgegensetzt. Er ergibt sich aus dem Quotienten aus Anodenspannungsänderung zu Anodenstromänderung.

5. Das Wesentliche

Im Vakuum ist eine Stromleitung darum möglich, weil den Elektronen keine Hindernisse in Form von Molekülen oder Atomen entgegentreten.

Als Elektronenquelle in Röhren dient die Katode. Sie wird geheizt und emittiert Elektronen. Die Elektronenemission kommt durch die Erwärmung der Katode zustande. Unter dem Einfluss einer positiven Anodenspannung werden die Elektronen beschleunigt und von der Anode aufgefangen.

Bei negativer Anodenspannung fließt kein praktisch verwendbarer Anodenstrom; die Diode ist gesperrt.

Dioden wirken als elektrische «Ventile», sie lassen den Strom nur in einer Richtung fließen.

Im Anlaufstromgebiet fließt infolge der Eigengeschwindigkeit der Elektronen ein kleiner Anlaufstrom. Dieser Anlaufstrom kommt auch bei einer schwachen negativen Anodenspannung zum Fließen.

Im Raumladungsgebiet wird die Katode von einer Raumladewolke umgeben. Sie bremst die austretenden Elektronen und ist für die Nichtlinearität der Kennlinie verantwortlich.

Im Sättigungsstromgebiet fließen alle emittierten Elektronen zur Anode.

Es wird unterschieden zwischen direkt und indirekt geheizten Katen.

Die Anodenverlustleistung ist die Leistung, die im Anodenblech in Wärme umgesetzt wird; sie entspricht dem Produkt aus Anodenspannung und Anodenstrom unter der Bedingung, dass keine Wechselspannung zusätzlich an der Röhre liegt. Der Maximalwert der Anodenverlustleistung darf nicht überschritten werden, da sonst die Röhre zerstört wird.

Der Gleichstrominnenwiderstand der Röhre errechnet sich aus dem Quotienten von Anodenspannung zu Anodenstrom.

Der Wechselstrominnenwiderstand ist der Widerstand, der einer Anodenspannungsänderung entgegengesetzt wird. Er lässt sich graphisch aus der Kennlinie ermitteln, indem die Tangente am Arbeitspunkt an die Kurve gelegt wird. Die Neigung der Tangente ist ein Mass für die Grösse des Wechselstrominnenwiderstandes.

6. Repetitionsaufgaben (Lösung Seite 480)

- Warum ist im Vakuum ein Stromfluss möglich?
- Unter welcher Bedingung ist die Katode in der Lage, Elektronen zu emittieren?
- Wie wirkt sich die Raumladung auf den Anodenstrom aus?
- Zeichnen Sie eine Diodenkennlinie und unterteilen Sie diese in ihre drei Teilgebiete.
- Welche Faktoren bestimmen die Anodenverlustleistung der Diode?
- Welches ist die Ursache des Anlaufstromes?
- Definieren Sie die Anodenverlustleistung.
- Ermitteln Sie den Wechselstrominnenwiderstand der Diode nach Bild 295 für den eingezeichneten Arbeitspunkt.

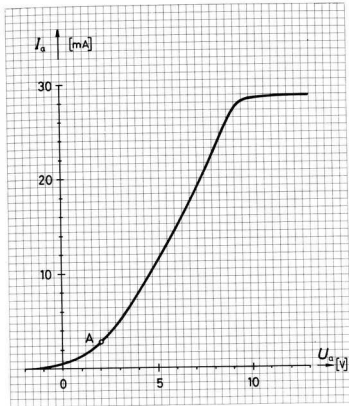


Bild 295

- i) Wie wird der Gleichstrominnenwiderstand der Diode für einen bestimmten Arbeitspunkt ermittelt?
- k) Nennen Sie ein Anwendungsgebiet, wo der Wechselstrominnenwiderstand der Diode eine Rolle spielt.

II. Die Triode

1. Einführung

Mit der Erfindung der Triode wurde erstmals ein aktives Bauelement geschaffen, welches die Verstärkung von Signalen und die Erzeugung elektrischer Schwingungen ermöglichte. Die Triode blieb über längere Zeit das einzige verstärkende Element. Später wurden Röhrentypen gebaut mit Eigenschaften, welche sie für viele Anwendungen den Trioden überlegen machten. Das Anwendungsgebiet der Triode beschränkt sich heute hauptsächlich auf die Verstärkung von Niederfrequenzsignalen, die Erzeugung von elektrischen Schwingungen und den Einsatz in Messgeräten. Als Hochfrequenzverstärker wird sie nur noch in Spezialschaltungen verwendet.

2. Was wissen Sie schon über Trioden?

(Lösung Seite 482)

- a) Wieviele Elektroden weist eine Triode auf?
- b) Wie heissen diese Elektroden?
- c) Mit welcher Elektrode wird der Anodenstrom gesteuert?
- d) Sagt Ihnen der Ausdruck «Steilheit» etwas?
- e) Lässt sich eine Triode leistungslos steuern?
- f) Kann eine Triode auch als Leistungsverstärker verwendet werden?

3. Die Triode

a) Definition

Die *Triode* ist die einfachste Form einer Verstärkerröhre. Sie weist drei Elektroden auf. Die Katode emittiert den Elektronenstrom, über die Anode verlässt dieser die Röhre, während mit einer Spannung am *Gitter* der Anodenstrom gesteuert werden kann.

b) Symbol

Bild 296 zeigt die Symbole für eine direkt geheizte und eine indirekt geheizte Triode.

c) Aufbau

Die Triode besteht aus drei Elektroden, welche in einem Glaskolben unter Vakuum stehen. Zwischen Katode und Anode ist das *Steuergitter* angeordnet. Das Steuergitter besteht aus einer zylinderförmigen Drahtspirale oder einem

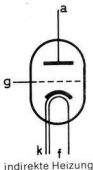
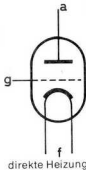


Bild 296

indirekte Heizung



direkte Heizung

a = Anode
g = Gitter
k = Katode
f = Heizung

rechteckigen Drahtrahmen. Die Form des Gitters ist durch die Form der Anode bestimmt. Bild 297 zeigt schematisch den Aufbau einer Triode.

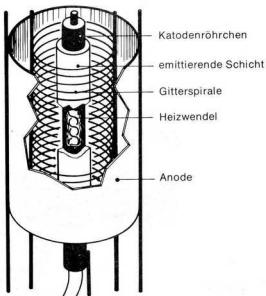


Bild 297

d) Wirkungsweise

Eine negative Spannung am Steuergitter bremst den Emissionsstrom der Katode. Er lässt sich mit einer Spannung am Steuergitter steuern. Im Bereich der negativen Gitterspannungswerte ist die Diodenstrecke Katode-Gitter gesperrt. Mit Ausnahme des Anlaufstromes fließt über das Gitter kein Strom. Um die Röhre leistungslos auszusteuern, wählt man Steuerspannungen, die

so negativ sind, dass über das Gitter kein Strom fließt. Das Verhalten der Triode wird mit der Schaltung nach Bild 298 untersucht. Bild 299 zeigt den Versuchsaufbau. Für die erste Messung beträgt die Gittervorspannung 0 Volt. Die Anodenspannung wird langsam von 0 Volt gegen 200 Volt erhöht. Der Anodenstrom steigt mit zunehmender Anodenspannung an, die Röhre verhält sich wie eine Diode.

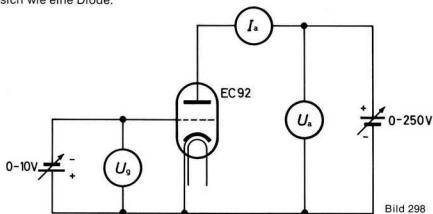


Bild 298

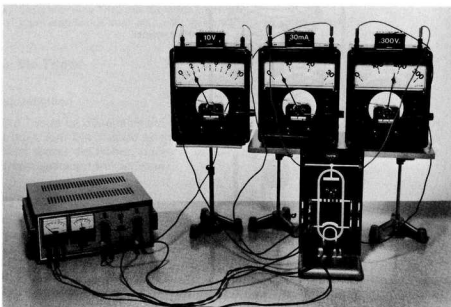


Bild 299

Für die zweite Messung wird die Anodenspannung auf 200 V fixiert und die Gittervorspannung kontinuierlich von 0 Volt auf -10 Volt erhöht. Der Anodenstrom sinkt ab und erreicht für eine Gittervorspannung von -6 Volt bereits den Wert Null. Der Versuch bleibt auf negative Gitterspannungen beschränkt. Da für positive Spannungen am Gitter ein Gitterstrom fließen würde – die Strecke Katode Gitter verhält sich wie eine Diode – interessiert der positive Bereich nicht, weil in diesem Bereich eine leistungslose Steuerung nicht mehr möglich ist.

Das Verhalten der Röhre soll nun messtechnisch erfasst und graphisch festgehalten werden. Zu diesem Zweck wird für feste Anodenspannungen (100, 150, 200, 250 V) die Abhängigkeit des Anodenstromes von der Gitterspannung aufgezeichnet. Wir erhalten das $I_a - U_g$ -Kennlinienfeld. Die zweite Messreihe wird mit verschiedenen festen Gitterspannungen (0, -1, -2, -3, -4 V) durchgeführt. Für diese Gitterspannungen wird die Abhängigkeit des Anodenstromes von der Anodenspannung untersucht. Die Messresultate werden im $I_a - U_a$ -Kennlinienfeld festgehalten. Bild 300 hält die Messresultate in Form von Röhrenkennlinien fest. Die Röhrendaten lassen sich aus diesen Kennlinien graphisch ermitteln.

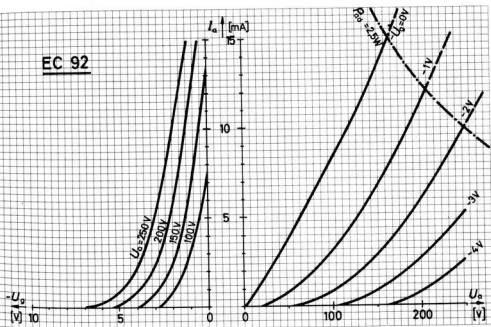


Bild 300

e) Röhrendaten

Die Steilheit S

Die *Steilheit* S ist ein Mass für die Steuerwirkung des Gitters und seiner Spannung auf den Anodenstrom. Sie ist bestimmt durch das Verhältnis von Anodenstromänderung zu Gitterspannungsänderung. Messtechnisch kann sie ermittelt werden, indem die Gitterspannung um den Wert ΔU_g verändert wird, und die dadurch verursachte Anodenstromänderung ΔI_a gemessen wird. Die Steilheit ergibt sich aus dem Quotienten der beiden Werte.

$$S = \frac{\Delta I_a}{\Delta U_g}; [S] = \text{mA/V} \quad U_a = \text{konstant}$$

Die gebräuchliche Masseinheit für die Steilheit ist das Milliampère pro Volt. Für jeden Arbeitspunkt auf der $I_a - U_g$ -Kennlinie ergibt sich die Röhrensteilheit aus der Steilheit der Tangente für diesen Punkt. Die Steilheit wird mei-

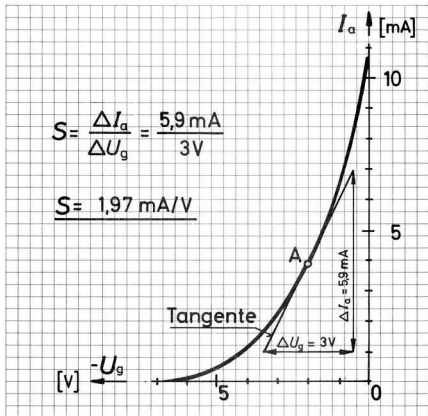


Bild 301

stens graphisch ermittelt, indem man durch den interessierenden Arbeitspunkt die Tangente an die Kennlinie legt. Bild 301 zeigt die graphische Bestimmung der Steilheit für den Arbeitspunkt A.

Die Steilheit ist ein wichtiger Röhrenwert, sie beeinflusst die mit der Röhre erreichbare Verstärkung.

Der Durchgriff D

Der Anodenstrom ist von der Anodenspannung und der Gitterspannung abhängig. Der *Durchgriff D* gibt an, wieviel mal kleiner die Steuerwirkung der Anodenspannung auf den Anodenstrom ist als jene der Gitterspannung. Messtechnisch wird der Durchgriff ermittelt, indem für eine konstante Gitterspannung die Anodenspannung um einen gewissen Betrag verändert wird.

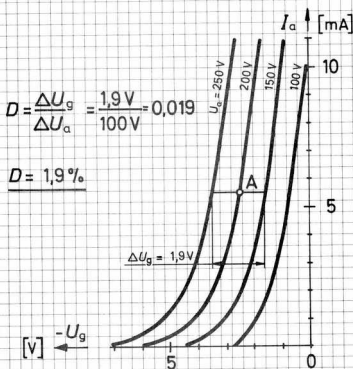


Bild 302

Die dabei auftretende Änderung des Anodenstromes wird durch Verändern der Gitterspannung rückgängig gemacht. Das Verhältnis von Gitterspannungsänderung zu Anodenspannungsänderung ergibt den Durchgriff.

$$D = \frac{\Delta U_g}{\Delta U_a} \cdot 100 \quad [D] = \% \quad I_a = \text{konstant}$$

Der Durchgriff lässt sich aus der I_a-U_g -Kennlinienschar graphisch ermitteln. Soll der Durchgriff für eine bestimmte Gitter- und Anodenspannung bestimmt werden, so zieht man durch den gewählten Arbeitspunkt auf der I_a-U_g -Kennlinie eine Waagrechte, die die benachbarten Kennlinien schneidet. Die Waagrechte bedeutet, dass der Anodenstrom konstant gehalten wird. Anoden- und Gitterspannungsänderungen können direkt aus den Kennlinien abgelesen werden. Bild 302 zeigt an einem Beispiel die graphische Bestimmung des Durchgriffes.

Der Durchgriff wird in Prozenten angegeben.

Der Verstärkungsfaktor μ , auch Leerlaufverstärkungsfaktor genannt.

Der Verstärkungsfaktor μ entspricht dem Reziprokwert des Durchgriffes. Er gibt die Leerlaufverstärkung der Röhre an.

$$\mu = \frac{\Delta U_a}{\Delta U_g} \quad I_a = \text{konstant}$$

Das Produkt von Gitterwechselspannung und Verstärkungsfaktor ergibt die E.M.K. der Röhre. Diese E.M.K. verhält sich genau gleich wie die E.M.K. einer Batterie, sobald sie mit einem Widerstand belastet wird, sinkt sie auf den Wert der Klemmenspannung ab.

Der Verstärkungsfaktor ist ein reiner Zahlenwert, er hat keine Dimension.

Der Innenwiderstand R_i

Wird bei konstanter Gitterspannung die Anodenspannung verändert, so resultiert daraus eine Anodenstromänderung. Der Quotient von Anodenspannungsänderung zu Anodenstromänderung ergibt wie für die Diode den Innenwiderstand R_i der Röhre. Dieser Widerstand charakterisiert den Wechselstrominnenwiderstand. Er ist nicht zu verwechseln mit dem Gleichstromwiderstand der Triode, der wie für die Diode durch den Quotienten von Anodenspannung zu Anodenstrom für einen bestimmten Arbeitspunkt gegeben ist. Zur messtechnischen Erfassung des Innenwiderstandes wird bei fester Gittervorspannung die Anodenspannung um den Betrag ΔU_a verändert. Die resultierende Anodenstromänderung ΔI_a ergibt zusammen mit der Anodenspannungsänderung den Wert des Innenwiderstandes.

$$R_i = \frac{\Delta U_a}{\Delta I_a}; [R_i] = \frac{V}{A} = \Omega \quad U_g = \text{konstant}$$

Die Masseinheit für den Innenwiderstand ist das Ohm. Der Innenwiderstand wird graphisch im $I_a - U_a$ -Kennlinienfeld bestimmt. Durch den Arbeitspunkt wird die Tangente an die Kennlinie gelegt. Die Neigung der Tangente ergibt den Wert des Innenwiderstandes. Aus Bild 303 geht die graphische Bestimmung des Innenwiderstandes hervor.

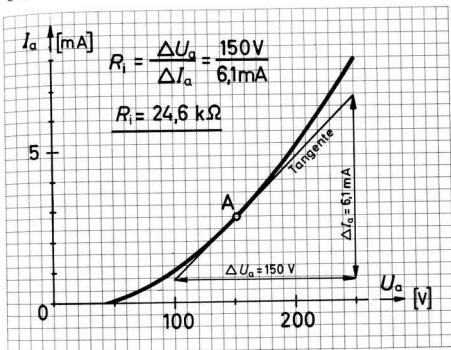


Bild 303

Die Röhrgleichung von Barkhausen

Die Röhrgleichung von Barkhausen zeigt den Zusammenhang der Röhrendaten.

$$S \cdot D \cdot R_i = 1$$

Diese Gleichung ist nur dann erfüllt, wenn sich alle Röhrendaten auf den gleichen Arbeitspunkt der Röhre beziehen. Unter Arbeitspunkt versteht man jenen Betriebspunkt der Triode, der durch Anoden- und Gitterspannung bestimmt ist.

Die Richtigkeit der Barkhausengleichung lässt sich leicht beweisen, indem für S , D und R_i die Bestimmungswerte eingesetzt werden

4. Beispiel

Aus den Kennlinien der Röhre EC 92 sollen für einen bestimmten Arbeitspunkt die statischen Daten ermittelt werden.

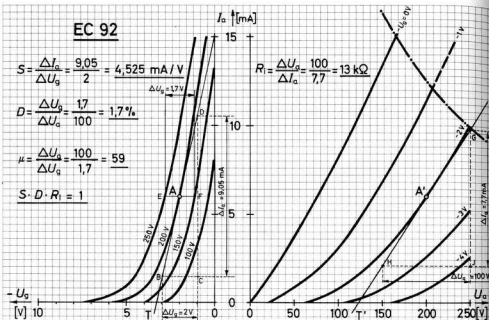


Bild 304

Vorgehen:

- Schritt: Festlegen des Arbeitspunktes
 - Der Arbeitspunkt soll möglichst auf dem linearen Teil der $I_a - U_g$ -Kennlinie liegen.
 - Der Arbeitspunkt $U_a = 200 \text{ V}$, $U_g = -2 \text{ V}$ erfüllt diese Bedingung. Durch Projektion auf die $I_a - U_a$ -Kennlinie ($U_g = -2 \text{ V}$) wird A' festgelegt.
- Schritt: Ermitteln der Steilheit S
 - Durch den Arbeitspunkt A wird an die $I_a - U_g$ -Kennlinie von 200 Volt die Tangente gelegt.
 - Von der U_g -Achse werden durch die Werte -3 Volt und -1 Volt senkrechte Projektionsgeraden bis zu den Schnittpunkten B und D auf der Tangente T nach oben gezogen. Die Strecke BC entspricht der Gitterspannungsänderung, die Strecke CD stellt die Anodenstromänderung dar.

– Werte ablesen:

$$\Delta U_g = 2 \text{ V}$$

$$\Delta I_a = 9,05 \text{ mA}$$

– Grundformel für S anschreiben

$$S = \frac{\Delta I_a}{\Delta U_g}$$

– Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$S = \frac{9,05}{2} \quad \frac{\text{mA}}{\text{V}}$$

$$S = 4,525 \text{ mA/V}$$

3. Schritt: Bestimmen des Durchgriffes D

– Waagrechte durch den Arbeitspunkt A ziehen. Die Strecke $\overline{EF}$ entspricht der Gitterspannungsänderung. Die Anodenspannungsänderung ergibt sich aus der Differenz zwischen den beiden Anodenspannungskennlinien für 150 V und 250 V.

– Werte ablesen

$$\Delta U_g = 1,7 \text{ V}$$

$$\Delta U_a = 100 \text{ V}$$

– Grundformel für D anschreiben

$$D = \frac{\Delta U_g}{\Delta U_a} \cdot 100$$

– Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$D = \frac{1,7}{100} \cdot 100 \quad \frac{\text{V}}{\text{V}} \cdot \%$$

$$D = 1,7\%$$

4. Schritt: Berechnung des Verstärkungsfaktors μ

– Grundformel für μ anschreiben

$$\mu = \frac{\Delta U_a}{\Delta U_g}$$

– Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$\mu = \frac{100}{1,7} \quad \frac{\text{V}}{\text{V}}$$

$$\mu = 59$$

5. Schritt: Bestimmen des Innenwiderstandes R_i

– Tangente T' durch den Arbeitspunkt A' an die $I_a - U_a$ -Kennlinie legen.
– Von der U_a -Achse aus werden durch die Werte 150 V und 250 V zwei senkrechte Projektionsgeraden bis zu den Schnittpunkten G und H auf der Tangente T' gezogen. Durch den Schnittpunkt H wird eine Waagrechte gelegt. Die Strecke $\overline{HJ}$ entspricht der Anodenspannungsänderung, die Strecke $\overline{JG}$ ergibt die dazugehörige Anodenstromänderung.

– Werte herauslesen

$$\Delta U_a = 100 \text{ V}$$

$$\Delta I_a = 7,7 \text{ mA}$$

– Grundformel für R_i anschreiben

$$R_i = \frac{\Delta U_a}{\Delta I_a}$$

– Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$R_i = \frac{100}{7,7 \cdot 10^{-3}} \quad \frac{\text{V}}{\text{A}}$$

$$R_i = 13 \text{ k}\Omega$$

6. Schritt: Kontrolle der Resultate mit der Röhrenformel von Barkhausen.

- Barkhausenformel anschreiben $|S \cdot D \cdot R_i = 1$
 - Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen $|4,525 \cdot 10^{-3} \cdot 1,7 \cdot 10^{-2} \cdot 13 \cdot 10^3 = 1$
- $$[SDR_i] = \frac{A}{V} \cdot \frac{V}{V} \cdot \frac{V}{A} = 1$$

5. Das Wesentliche

Das Elektrodensystem der Triode besteht aus Katode, Gitter und Anode. Der Anodenstrom lässt sich durch die Spannung am Gitter leistungslos steuern.

Die Steuerwirkung des Gitters wird graphisch mit der $I_a - U_g$ -Kennlinienschar dargestellt. Jede $I_a - U_g$ -Kennlinie gilt für einen bestimmten konstanten Wert der Anodenspannung.

Der Einfluss der Anodenspannung ist aus der $I_a - U_a$ -Kennlinie ersichtlich. Jeder $I_a - U_a$ -Kennlinie ist eine bestimmte Gitterspannung zugeordnet.

Aus den Kennlinien lassen sich die Röhrendaten graphisch ermitteln.

Die Steilheit der Röhre ist ein Mass für die Steuerwirkung des Gitters auf den Anodenstrom. Sie entspricht der Steilheit der Tangente durch den Arbeitspunkt auf der $I_a - U_g$ -Kennlinie. Die Steilheit errechnet sich aus dem Quotienten von Anodenstromänderung zu Gitterspannungsänderung.

Der Durchgriff gibt an, wieviel mal kleiner die Steuerwirkung der Anodenspannung auf den Anodenstrom ist als jene der Gitterspannung. Je näher die $I_a - U_g$ -Kennlinien beieinander liegen, desto geringer ist der Durchgriff. Er errechnet sich aus dem Quotienten von Gitterspannungsänderung zu Anodenspannungsänderung für gleichbleibenden Anodenstrom.

Der Verstärkungsfaktor gibt die Leerlaufverstärkung der Röhre an. Er entspricht dem Reziprokwert des Durchgriffes.

Der Innenwiderstand ist der Wechselstromwiderstand der Röhre. Sein Wert ist durch die Steilheit der Tangente im Arbeitspunkt auf der $I_a - U_a$ -Kennlinie bestimmt. Er errechnet sich aus dem Quotienten von Anodenspannungsänderung zu Anodenstromänderung.

Die Röhrengleichung von Barkhausen zeigt uns, dass das Produkt aus Steilheit, Innenwiderstand und Durchgriff einer Röhre für einen Arbeitspunkt immer Eins ergibt.

6. Repetitionsaufgaben (Lösungen Seite 483)

- Warum wird bei Trioden nur der negative Teil der $I_a - U_g$ -Kennlinie zur Steuerung des Anodenstromes verwendet?
- Ermitteln Sie die Steilheit der Triode nach Bild 305 für eine Gittervorspannung von -1 V.

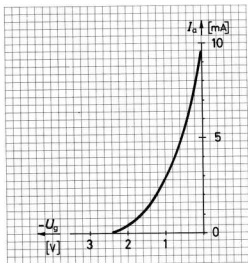


Bild 305

- c) Definieren Sie den Begriff der «Steilheit».
- d) Bestimmen Sie den Durchgriff der Röhre nach Bild 306 für eine Gittervorspannung von -2 V auf der 150 V-Kennlinie.

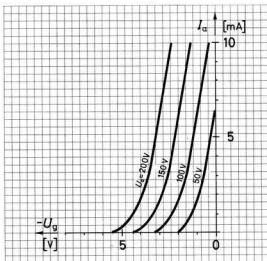


Bild 306

- e) Wie gross ist der Verstärkungsfaktor der Röhre aus Aufgabe d)?
 f) Ermitteln Sie aus der Kennlinie nach Bild 307 den Innenwiderstand der Röhre für eine Anodenspannung von 150 V.

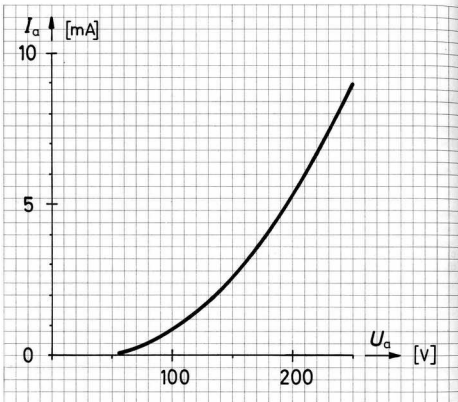


Bild 307

- g) Der Verstärkungsfaktor einer Triode beträgt 40, der Innenwiderstand misst 15 k Ω . Wie gross ist die Steilheit der Röhre?
 h) Beweisen Sie die Richtigkeit der Röhrgleichung von Barkhausen.
 i) Nennen Sie die Hauptanwendungsgebiete von Trioden.

III. Die Pentode

1. Einführung

Die Triode weist einige Nachteile auf. So wirkt sich vor allem der grosse Einfluss der Anodenspannung auf den Anodenstrom in Verstärkerschaltungen ungünstig aus. Die grosse Kapazität zwischen Anode und Gitter führt in Hochfrequenzverstärkern oft zur Entstehung unerwünschter Schwingungen. Mit der *Tetrode* wurde ein Röhrentyp entwickelt, der einen bedeutend kleineren Durchgriff, einen grösseren Innenwiderstand und eine viel kleinere Gitter-Anodenkapazität aufweist. Die Tetrode ist eine Röhre, bei welcher zwischen dem Steuergitter und der Anode ein weiteres Gitter angebracht wurde. Dieses *Schirmgitter* wird an eine positive Spannung gelegt, wodurch der Einfluss der Anodenspannung auf den Anodenstrom stark verringert wird. Die Tetrode weist jedoch im $I_a - U_a$ -Kennlinienbild eine Einsattelung auf; innerhalb eines bestimmten Bereiches nimmt trotz steigender Anodenspannung der Anodenstrom ab. Es ergibt sich die Kennlinie nach Bild 308.

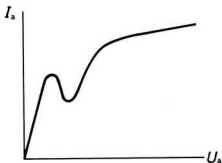


Bild 308

Dieser unerwünschte Kennlinienknick wurde bei der *Pentode* durch Einbau eines dritten Gitters zwischen Schirmgitter und Anode behoben. Dieses *Bremsgitter* – früher auch als *Fanggitter* bezeichnet – liegt meistens am gleichen Potential wie die Katode.

Die Pentode ist die am häufigsten verwendete Verstärkerröhre. Dank ihren guten Verstärkereigenschaften wird sie zur Verstärkung von Nieder- und Hochfrequenzsignalen verwendet.

In Spezialgeräten ist die Pentode als Impulserzeuger, Impulsverstärker und Gleichspannungsverstärker anzutreffen. Ihre Eigenschaften erlauben auch den Einsatz in Mischstufen.

2. Was wissen Sie schon über die Pentode?

(Lösung Seite 486)

- a) Wieviele Elektroden hat die Pentode?
- b) Welche Röhrendaten weichen bei der Pentode wesentlich von denjenigen der Triode ab?
- c) Welche Folgen zeigt der wesentlich kleinere Durchgriff der Pentode in bezug auf die Verstärkung?
- d) Wie muss das $I_a - U_a$ -Kennlinienbild aussehen, da der Innenwiderstand der Pentode wesentlich grösser ist als derjenige der Triode?
- e) Wie beeinflusst der erheblich kleinere Durchgriff der Pentode die $I_a - U_g$ -Kennlinienschar?

3. Die Pentode

a) Definition

Die *Pentode* ist eine Mehrgitterröhre. Sie hat fünf Elektroden: Katode, Steuergitter (g_1), Schirmgitter (g_2) Bremsgitter (g_3) und Anode. Dank dem kleinen Anodendurchgriff und dem grossen Innenwiderstand weist die Pentode sehr gute Verstärkereigenschaften auf.

b) Symbol

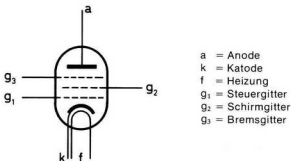


Bild 309

c) Aufbau

Der Unterschied zwischen dem Aufbau der Triode und demjenigen der Pentode besteht darin, dass bei der Pentode zwischen dem Steuergitter und der Anode noch das Schirmgitter und das Bremsgitter angebracht sind. Bild 310 zeigt die Anordnung der Elektroden einer Pentode.

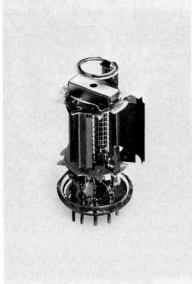


Bild 310

d) Wirkungsweise

Wird zwischen das Steuergitter und die Anode einer Triode ein weiteres Gitter – das Schirmgitter – eingefügt, so entsteht ein neuer Röhrentyp, die *Tetrode*. Das Schirmgitter wird an ein konstantes positives Potential gelegt. Diese Massnahme vermindert die Rückwirkung der Anodenspannung auf den Anodenstrom beträchtlich. Das Schirmgitter übernimmt für den Katodenstrom eine ähnliche Funktion wie die Anode, es beschleunigt die Elektronen. Ein Teil der Elektronen des Katodenstromes prallen auf die Maschen des Schirmgitters und verursachen den Schirmgitterstrom. Der weitaus grösste Teil fliegt jedoch zwischen den Schirmgittermaschen hindurch und landet auf der Anode, er wird als Anodenstrom wirksam. Die Anodenspannung kann in weiten Grenzen verändert werden, ohne dass sich dabei der Anodenstrom merklich ändert. Das heisst in der Formelsprache, dass gegenüber der Triode der Anodendurchgriff wesentlich herabgesetzt und der Innenwiderstand beträchtlich erhöht ist. Gleichzeitig verringert sich die Gitter-Anodenkapazität, da das Schirmgitter das Steuergitter von den elektrischen Feldlinien der Anode abschirmt.

Die $I_a - U_a$ -Kennlinie der Tetrode weist den unerwünschten Knick auf. Dieser wird durch den *Sekundärelektroneneffekt* verursacht. Bei genügender Anodenspannung ist die Energie der Elektronen, die auf die Anode auftreffen, so gross, dass sie aus dem Anodenblech weitere Elektronen – die sogenann-

ten *Sekundärelektronen* – ausschlagen. Ist nun die Schirmgitterspannung höher als die Anodenspannung, so werden diese Sekundärelektronen vom Schirmgitter angezogen, und fließen über dieses ab. Der Anodenstrom wird um diesen *Sekundärelektronenstrom* kleiner, er sinkt trotz steigender Anodenspannung ab. Im Bereich des Kennlinienknicks wirkt die Röhre zwischen Katode und Anode als *negativer Widerstand*.

Dieser unerwünschte Effekt kann durch Einbau eines Gitters zwischen Schirmgitter und Anode behoben werden. Dieses *Bremsgitter* wird in vielen Röhren direkt mit der Katode verbunden. Wo dies nicht der Fall ist, muss es auf Nullpotential gelegt werden. Die Sekundärelektronen werden dank dem negativen Potential, das das Bremsgitter gegenüber der Anode aufweist, gebremst und zur Anode zurückgedrängt, was ein Verschwinden des Kennlinienknicks bewirkt. Durch die abschirmende Wirkung des Bremsgitters wird die Gitter-Anodenkapazität der Pentode noch kleiner als diejenige der Tetrode, gleichzeitig sinkt der Anodendurchgriff noch weiter ab. Die Pentode besitzt beinahe ideale Verstärkereigenschaften. Die technischen Daten einer Pentode werden mit einer Schaltung nach Bild 311 aufgenommen. Bild 312 zeigt die Versuchsanordnung.

Die erste Messung zeigt den Einfluss der Anodenspannung auf den Anodenstrom. Die Schirmgitterspannung wird auf 200 V konstant gehalten, die Gittervorspannung wird so gewählt, dass sich für eine Anodenspannung von 200 V ein Anodenstrom von 5 mA ergibt. Die Anodenspannung wird nun kontinuierlich verändert, wobei der Anodenstrom beobachtet wird. Im Bereich von 100 V bis 350 V Anodenspannung ändert sich der Anodenstrom praktisch nicht. Für Anodenspannungen unter 100 V sinkt er langsam ab, für Spannungen unter

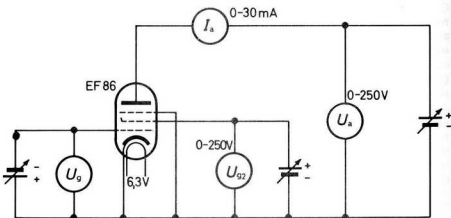


Bild 311

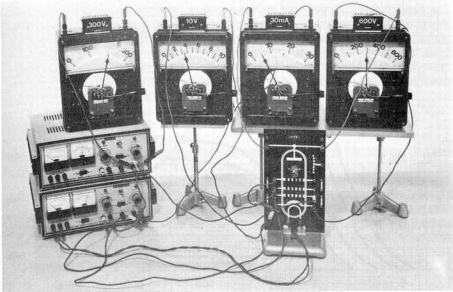


Bild 312

50 V ist die Stromabnahme ausgeprägter. Wir stellen fest, dass der Einfluss der Anodenspannung auf den Anodenstrom innerhalb eines grossen Bereiches unbedeutend ist.

Mit einer zweiten Messung soll der Einfluss der Schirmgitterspannung auf den Anodenstrom untersucht werden. Die Anodenspannung wird auf 250 V einreguliert. Die Schirmgitterspannung beträgt zu Beginn der Messung 140 V, die Gitterspannung wird so gewählt, dass sich wiederum ein Anodenstrom von 5 mA einstellt. Wird nun die Schirmgitterspannung vergrössert und verkleinert, so folgt der Anodenstrom dieser Spannungsänderung. *Der Einfluss der Schirmgitterspannung auf den Anodenstrom ist gross.*

Die dritte Messung dient der Aufnahme der $I_a - U_g$ -Kennlinien. Die Anodenspannung wird für die ganze Messreihe konstant gehalten. Es werden die Kurven für verschiedene Schirmgitterspannungen aufgenommen. Die Messresultate sind in Bild 313 graphisch festgehalten.

Die vierte Messreihe ergibt die $I_a - U_a$ -Kennlinien bei fester Schirmgitterspannung für verschiedene Gittervorspannungen. Die Messwerte sind ebenfalls in Bild 313 dargestellt.

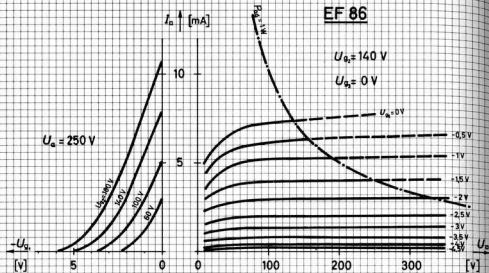


Bild 313

e) Beurteilung der Kennlinienbilder

Das $I_a - U_g$ -Kennlinienbild ähnelt demjenigen der Triode, mit dem Unterschied, dass als Parameter die Schirmgitterspannung gewählt wurde. Als *Parameter* bezeichnet man eine veränderliche Grösse, die vorübergehend konstant gehalten wird. Wollte man diese Kennlinien für verschiedene Anodenspannungen aufnehmen, so würden sich die Kurven beinahe decken, da der Einfluss der Anodenspannung auf den Anodenstrom sehr gering ist. Die Kennlinien zeigen die grosse Beeinflussung des Anodenstromes durch die Schirmgitterspannung. Die Schirmgitterspannung von Pentoden wird deshalb im praktischen Einsatz der Röhre möglichst konstant gehalten. Der Arbeitspunkt ist durch die Werte der Gittervorspannung, der Schirmgitterspannung und – in beschränktem Mass – der Anodenspannung bestimmt.

Im $I_a - U_a$ -Kennlinienbild fällt der flache Verlauf der Kurven auf. Je flacher diese Kennlinien liegen, desto grösser ist der Innenwiderstand der Röhre.

f) Kennwerte der Pentode

Von einer Pentode interessieren für einen bestimmten Arbeitspunkt nur die Steilheit und der Innenwiderstand. Der Durchgriff wird meistens nicht ange-

geben, da er sehr klein ist und das Verhalten der Röhre durch Steilheit und Innenwiderstand ausreichend gekennzeichnet ist. Der Durchgriff lässt sich aber ohne weiteres aus der Röhrengleichung, die auch für die Pentode gilt, berechnen. Die Bestimmung der Röhrendaten mit Hilfe der Kennlinien erfolgt nach den gleichen Methoden wie für die Triode. Die Barkhausenformel zeigt, dass ein grosser Innenwiderstand bei kleinem Durchgriff eine grosse Verstärkung ergeben muss. Die mit Pentoden erreichbaren Verstärkungen liegen weit über denjenigen der Triode.

g) Die Regelpentode

Die Lautstärke eines Empfängers soll unabhängig von der Feldstärke des einfallenden Signals sein. Die Verstärkung des Gerätes muss sich automatisch dem Eingangssignal anpassen. Bei starkem Empfangssignal muss die Verstärkung kleiner sein, als beim Empfang schwacher Stationen. Die Verstärkung der einzelnen Stufen des Empfängers muss elektronisch regelbar sein. Zu diesem Zweck wurde die Regelpentode entwickelt. Bei unregelmässiger Ganghöhe der Windungen des Steuergitters nach Bild 314 erhält man eine $I_a - U_g$ -Kennlinie wie sie ebenfalls auf Bild 314 gezeigt ist.

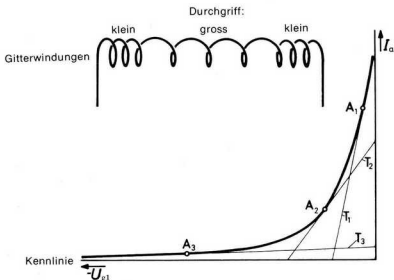


Bild 314

Die erzielbare Verstärkung wird abhängig von der Lage des Arbeitspunktes und somit von der Gittervorspannung. Für eine kleine Gittervorspannung wird dank der grösseren Steilheit die erreichbare Stufenverstärkung grösser als für eine grosse Vorspannung, da für höhere Werte der Gitterspannung die

Steilheit kleiner wird. In der Praxis werden Steilheitsänderungen von 1:100 erreicht, mit Spezialröhren lässt sich dieses Verhältnis noch wesentlich erhöhen. Die Regelung eines Verstärkers mit Regelröhren erfolgt durch Zuführen einer vom Eingangssignal abhängigen veränderlichen negativen Regelspannung auf das Steuergitter.

4. Beispiel

Aus den Kennlinien der Röhre EF 86 (NF-Pentode) sollen für einen bestimmten Arbeitspunkt die Steilheit und der Innenwiderstand ermittelt werden.

Vorgehen:

1. Schritt: Festlegen des Arbeitspunktes (Bild 315).

Der Arbeitspunkt wird auf der I_a-U_{g1} -Kennlinie für eine Schirmgitterspannung von 140 V und eine Anodenspannung von 250 V bei einer Gittervorspannung von -2 V eingezeichnet. Durch Projektion auf die I_a-U_a -Kennlinie für eine Vorspannung von -2 V ergibt sich der Arbeitspunkt A' im I_a-U_a -Kennlinienfeld.

2. Schritt: Ermitteln der Steilheit.

– Durch den Arbeitspunkt A wird an die I_a-U_{g1} -Kennlinie die Tangente T gelegt. Diese wird bis zu den Schnittpunkten B und D auf der I_a - und U_{g1} -Achse in das Diagramm eingezeichnet. Die Strecke $\overline{BC}$ entspricht der Gitterspannungsänderung, die Strecke $\overline{CD}$ gibt die Anodenstromänderung wieder.

– Werte herauslesen:

$$\Delta U_{g1} = 3,5 \text{ V}; \Delta I_a = 7 \text{ mA}$$

– Werte in die Formel für die Steilheit einsetzen und ausrechnen

$$S = \frac{\Delta I_a}{\Delta U_{g1}} \frac{U_a}{U_{g2,3}} = \text{konstant}$$

$$S = \frac{7}{3,5} \frac{\text{mA}}{\text{V}}$$

$$S = 2 \text{ mA/V}$$

3. Schritt: Bestimmen des Innenwiderstandes

– Durch den Arbeitspunkt A' wird die Tangente T' an die I_a-U_a -Kennlinie für $U_{g1} = 2 \text{ V}$ gelegt. Diese wird bis zum Schnittpunkte G auf der I_a -Achse und zum Schnittpunkt auf der Projektionsgeraden durch den Anodenspannungswert 300 V verlängert.

– Horizontale durch den Punkt F bis zum Schnittpunkt E auf der I_a -Achse ziehen.

– Die Strecke $\overline{EF}$ entspricht der Anodenspannungsänderung, während die Strecke $\overline{EG}$ die Anodenstromänderung darstellt.

– Werte herauslesen:

$$\Delta I_a' = 0,12 \text{ mA}, \Delta U_a = 300 \text{ V}$$

– Werte in die Formel für den Innenwiderstand einsetzen und ausrechnen.

$$R_i = \frac{\Delta U_a}{\Delta I_a'} \quad U_{g1,2,3} = \text{konstant}$$

$$R_i = \frac{300}{0,12} \quad \frac{\text{V}}{\text{mA}}$$

$$R_i = 2500 \text{ k}\Omega$$

$$R_i = 2,5 \text{ M}\Omega$$

$$S = \frac{\Delta I_a}{\Delta U_g} = \frac{7 \text{ mA}}{3,5 \text{ V}}$$

$$S = 2 \text{ mA/V}$$

EF 86

$$U_{g2} = 140 \text{ V}$$

$$U_{g3} = 0 \text{ V}$$

$$R_i = \frac{\Delta U_g}{\Delta I_a} = \frac{300 \text{ V}}{0,12 \text{ mA}} = 2,5 \text{ M}\Omega$$

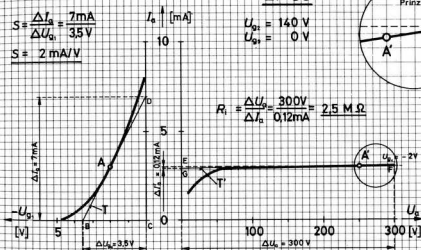
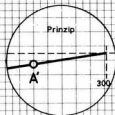


Bild 315

5. Das Wesentliche

Die Pentode weist 5 Elektroden auf: Katode, Steuergitter, Schirmgitter, Bremsgitter und Anode.

Das Schirmgitter setzt den Einfluss der Anodenspannung auf den Anodenstrom stark herab, wodurch der Durchgriff gegenüber der Triode wesentlich

kleiner wird und der Innenwiderstand gleichzeitig stark ansteigt. Der Einfluss der Schirmgitterspannung auf den Anodenstrom ist gross. Die Schirmgitterspannung wird deshalb im Betrieb konstant gehalten.

Das Bremsgitter bremst die Sekundärelektronen der Anode ab und zwingt sie zur Rückkehr zur Anode.

Regelpentoden weisen eine stark gekrümmte I_a-U_g -Kennlinie auf. Die Steilheit ist ausgeprägt von der Lage des Arbeitspunktes abhängig. Durch Änderung der Gittervorspannung wird die Steilheit und mit ihr die Verstärkung der Röhre geregelt.

Der kleine Durchgriff und der hohe Innenwiderstand machen die Pentode zum idealen Verstärkerelement.

Schirmgitter und Bremsgitter bewirken eine starke Reduktion der schädlichen Kapazität zwischen Gitter und Anode. Diese wird für die Pentode so klein, dass sie in den meisten Fällen vernachlässigt werden kann.

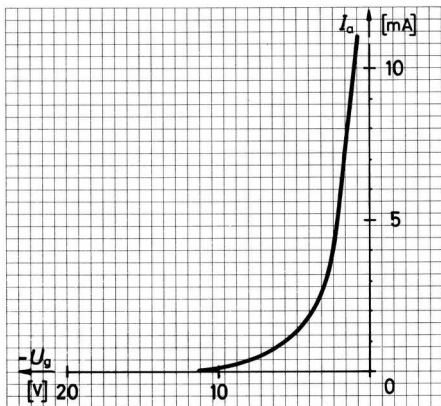


Bild 316

6. Repetitionsaufgaben (Lösung Seite 487)

- a) Welche Vorteile weist die Pentode gegenüber der Triode auf?
- b) Warum muss im Betrieb die Schirmgitterspannung der Pentode konstant gehalten werden?
- c) Warum ist der Einfluss der Anodenspannung auf den Anodenstrom bei der Pentode gering?
- d) Auf welchem Potential liegt normalerweise das Bremsgitter?
- e) Welches ist die Aufgabe des Bremsgitters?
- f) Skizzieren Sie die I_a-U_g -Kennlinie einer Regelpentode und erklären Sie stichwortartig die Funktionsweise dieser Röhre.
- g) Wo werden Regelpentoden hauptsächlich eingesetzt?
- h) Warum ist die Pentode als Verstärkerröhre besonders gut geeignet?
- i) Bestimmen Sie für die Regelpentode, deren I_a-U_g -Kennlinie Bild 316 zeigt, für die Gittervorspannungen -2 V und -8 V die Steilheit S_1 und S_2 .
- k) Skizzieren Sie den Verlauf der I_a-U_a -Kennlinienschar einer Pentode und erläutern Sie deren Einfluss auf die Röhrendaten.

IV. Die Leistungspentode

1. Einführung

Die Leistungspentode wird oft in Niederfrequenzverstärkern eingesetzt. Der Niederfrequenzverstärker hat eine bestimmte Niederfrequenzleistung abzugeben. Als Endröhre in einem Hochfrequenzverstärker eines Senders erzeugt die Leistungspentode die geforderte Senderleistung. Um eine Wechselstromleistung erzeugen zu können, benötigt eine Endröhre ausser einer genügend hohen Anodenspannung auch einen entsprechenden Anodenstrom. Die abzugebende Leistung bestimmt deshalb die Grösse der Röhre. Je höher Anodenspannung und Anodenstrom gewählt werden, desto grösser müssen Katode und Anode gebaut sein. Die prinzipielle Funktionsweise einer Leistungspentode entspricht derjenigen einer gewöhnlichen Pentode, einzig die Röhrendaten weisen andere Werte auf.

2. Was wissen Sie schon über Leistungspentoden?

(Lösung Seite 489)

- a) Worin unterscheiden sich die Röhrendaten der Leistungspentoden von den Daten einer gewöhnlichen Pentode?
- b) Besteht zwischen dem Verlauf der I_a-U_a -Kennlinien der Leistungspentode und denjenigen der normalen Pentode ein Unterschied?
- c) Was verstehen Sie unter dem Ausdruck «Anodenverlustleistung»?
- d) Warum benötigen Endröhren eine grössere Heizleistung als gewöhnliche Verstärkeröhren?
- e) Warum werden praktisch keine Trioden mehr als Endröhren verwendet?
- f) Warum spielt der Begriff der Anodenverlustleistung für die Endröhre eine besonders wichtige Rolle?

3. Die Leistungspentode

a) Definition

Die *Leistungspentode* ist eine Verstärkeröhre, welche als letzte Röhre in einem Verstärker zur Leistungsverstärkung benützt wird. Infolge der höheren Anodenspannung und der grösseren Anodenströme unterscheidet sie sich konstruktiv von Spannungsverstärkeröhren.

b) Symbol

Das Symbol der Leistungsverstärkeröhre unterscheidet sich nicht von demjenigen der Spannungsverstärkeröhre. In Schaltbildern wird die Unterscheidung zwischen Leistungs- und Spannungsverstärkeröhre mit der Typenbezeichnung vorgenommen.

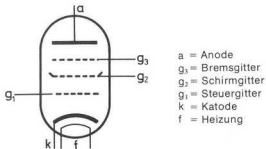


Bild 317

c) Aufbau

Die Leistungspentode ist im Prinzip gleich aufgebaut wie die gewöhnliche Pentode. Die Grösse der Elektroden wird durch die Anodenverlustleistung der Röhre bestimmt. Je höher diese gewählt wird, desto grösser müssen die Elektroden gebaut werden. Bild 318 zeigt den Aufbau einer Leistungspentode für Niederfrequenzendstufen, Bild 319 denjenigen einer Endröhre für einen Sender mittlerer Leistung.

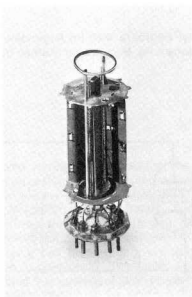


Bild 318

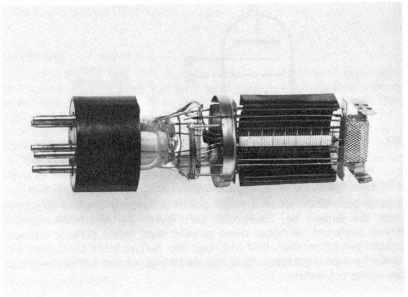


Bild 319

d) Wirkungsweise

Das Arbeitsverhalten der Endröhre wird im folgenden Versuch gezeigt. Bild 320 zeigt die Versuchsschaltung, Bild 321 den Aufbau des Versuches.

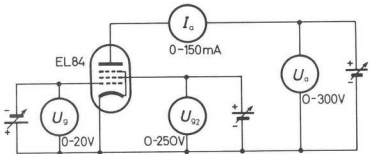


Bild 320

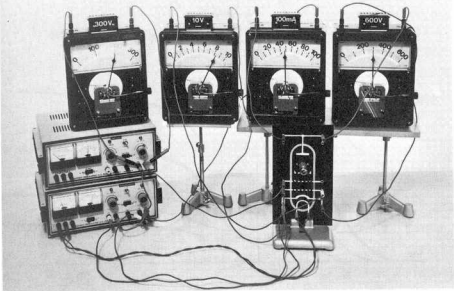


Bild 321

Mit der ersten Messreihe werden die Kennlinien des I_a-U_a -Kennlinienfeldes für verschiedene Gittervorspannungen bei einer festen Schirmgitterspannung von 250 V ermittelt. Der Verlauf der Kennlinien nach Bild 322 ist demjenigen einer gewöhnlichen Verstärkerpentode ähnlich. Der flache Kurvenverlauf lässt auf einen grossen Innenwiderstand schliessen; die Anodenspannung hat nur einen geringen Einfluss auf den Anodenstrom. Mit der zweiten Messreihe werden die Steuerwirkung des Steuergitters und der Einfluss der Schirmgitterspannung auf den Anodenstrom untersucht. Auch diese Messresultate ergeben einen ähnlichen Kurvenverlauf wie für die Spannungsverstärkerröhre. Die Kennlinien lassen auch hier den grossen Einfluss der Schirmgitterspannung auf den Anodenstrom erkennen.

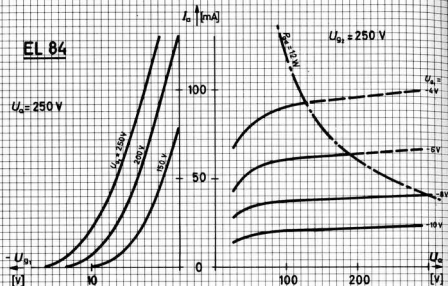


Bild 322

e) Kenndaten der Leistungspentode

Steilheit und Innenwiderstand sind auch für die Leistungspentode zwei wichtige Größen, zusätzlich interessiert die höchstzulässige Anodenverlustleistung, da die abgegebene Wechselstromleistung durch diese Anodenverlustleistung bestimmt wird.

4. Beispiel

Aus den Kennlinien der Endpentode EL 84 sollen für einen bestimmten Arbeitspunkt Steilheit und Innenwiderstand ermittelt werden.

Vorgehen:

1. Schritt: Festlegen des Arbeitspunktes

Der Arbeitspunkt muss sich unterhalb der *Leistungshyperbel* befinden, damit die Anodenverlustleistung nicht überschritten wird. Um eine möglichst hohe

EL 84

$$U_a = 250 \text{ V}$$

$$U_{g1} = 250 \text{ V}$$

$$S = \frac{\Delta I_a}{\Delta U_{gs}} = \frac{94 \mu A}{8 V}$$

$$S = 11,75 \text{ mA/V}$$

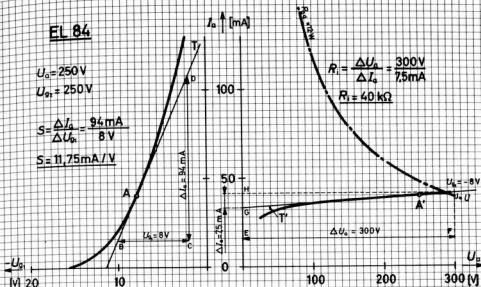


Bild 323

Wechselstromleistung zu erhalten, muss die Anodenverlustleistung bis an die Grenze beansprucht werden. Für unser Beispiel sind Anoden- und Schirmgitterspannung mit je 250 V vorgegeben. Wir wählen den Arbeitspunkt bei einer Gittervorspannung von -8 V und bleiben somit leicht unter der Leistungshyperbel.

2. Schritt: Ermitteln der Steilheit S

Die Steilheit S im Arbeitspunkt A wird graphisch mit Hilfe der Tangentenkonstruktion bestimmt. Die Strecke $\overline{BC}$ entspricht der Gitterspannungsänderung, die Anodenstromänderung wird durch die Strecke $\overline{CD}$ dargestellt.

$$S = \frac{\Delta I_a}{\Delta U_g}$$

$$S = \frac{94}{8} \quad \frac{\text{mA}}{\text{V}}$$

$$S = 11,75 \text{ mA/V}$$

3. Schritt: Bestimmen des Innenwiderstandes R_i

Der Innenwiderstand im Arbeitspunkt A' ist durch die Neigung der Tangente T' gegeben. Er entspricht dem Reziprokwert der Tangentensteilheit. Die Anodenspannungsänderung lässt sich aus der Strecke $\overline{EF}$ und die Anodenstromänderung aus der Strecke $\overline{GH}$ ablesen.

$$R_i = \frac{\Delta U_a}{\Delta I_a} \quad U_{g1,2,3} = \text{konstant}$$

$$R_i = \frac{300}{7,5 \cdot 10^{-3}} \quad \frac{\text{V}}{\text{A}}$$

$$R_i = 40 \text{ k}\Omega$$

5. Das Wesentliche

Leistungsendröhren unterscheiden sich äusserlich von den Spannungsverstärkerendröhren durch ihre Grösse. Katode und Anode müssen grössere Oberflächen aufweisen, um die geforderten höheren Anodenströme und Anodenspannungen zu verarbeiten.

Der Kennlinienverlauf der Leistungsendpentode weist die gleiche Form auf wie derjenige der Spannungsverstärkerpentode.

Die grösseren Anodenströme bedingen einen kleineren Innenwiderstand.

Die Leistungsendpentode kann eine Wechselstromleistung abgeben, deren Grösse von der zulässigen Anodenverlustleistung und somit von den Dimensionen der Röhre abhängt.

Bei Leistungspentoden ist das Einhalten der maximal zulässigen Anodenverlustleistung besonders wichtig, da Überlastungen zu einer raschen Zerstörung der Röhre führen können.

6. Repetitionsaufgaben (Lösung Seite 490)

- Warum ist der Innenwiderstand von Leistungspentoden bedeutend kleiner als derjenige von Spannungsverstärkerpentoden?
- Warum muss für die Leistungsendröhre der Arbeitspunkt unterhalb oder höchstens auf der Leistungshyperbel gewählt werden?
- Wie wird die Leistungshyperbel zeichnerisch ermittelt?
- Definieren Sie den Ausdruck «Anodenverlustleistung».
- Welches ist die Hauptaufgabe der Leistungspentode?
- Nennen Sie zwei Anwendungsgebiete für Leistungspentoden.

V. Die Mischröhre

1. Einführung

In Sende- und Empfangsschaltungen müssen oft zwei verschiedene Frequenzen miteinander gemischt werden. Eine Mischung kann nur an einem nicht-linearen Element erfolgen. Da Röhrenkennlinien gekrümmt verlaufen, eignen sich Röhren als Mischstufen. In den gebräuchlichsten Schaltungen sind deshalb Röhren oder Transistoren als Mischer anzutreffen. Als Mischröhren werden meistens Mehrgitterröhren verwendet.

2. Was wissen Sie schon über Mischröhren?

(Lösung Seite 491)

- a) Kann eine Triode auch als Mischröhre verwendet werden?
- b) Kennen Sie ausser der Tetrode und der Pentode andere Mehrgitterröhren?
- c) Was verstehen Sie unter dem Ausdruck «Verbundröhre»?
- d) Welche Möglichkeiten bietet eine Röhre mit mehreren Steuergittern?
- e) Kennen Sie das Funktionsprinzip einer Mischstufe?

3. Grundsätzliches über Mischstufen

a) Allgemeines

Das Verständnis der Funktionsweise von Mischröhren setzt die Kenntnis der Grundlagen über die Mischung voraus. Die vielseitigen Probleme der Mischung werden in einem späteren Kapitel eingehend behandelt. Es sollen hier nur die unbedingt notwendigen Grundlagen vermittelt werden. Zu diesem Zweck wird der Mischvorgang isoliert und losgelöst von der Schaltungstechnik behandelt.

b) Der Mischvorgang

Werden zwei Signale mit verschiedenen Frequenzen an ein Element mit *nicht-linearer Kennlinie* gelegt, so erfolgt eine *Mischung* dieser Signale. Es entstehen in grosser Anzahl Wechselspannungen mit neuen Frequenzen. Von diesen Mischprodukten treten die beiden zugeführten Frequenzen sowie die Summe und die Differenz dieser beiden Signale besonders stark in Erscheinung. Bild 324 zeigt rein schematisch den Mischvorgang.

(Gelangt zwei Signale auf ein Element mit *linearer Kennlinie*, so entstehen keine neuen Frequenzen, sondern die Signale überlagern sich in Form einer *Schwebung*.)

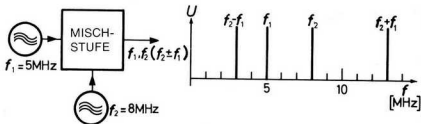


Bild 324

Unter Zuhilfenahme geeigneter Filter lässt sich die Summe oder die Differenz der beiden zugeführten Frequenzen am Ausgang der Mischstufe herausziehen. Die Amplitudenverhältnisse am Ausgang der Mischstufe sind stark von der Art der verwendeten Mischstufe abhängig. Mehrgitterröhren eignen sich besonders gut als Mischstufen, da jedes Eingangssignal auf ein separates Gitter geführt werden kann. Die Mischung kommt an der nichtlinearen Röhrenkennlinie zustande.

c) Die Mischstufe im Empfänger

Das Funktionsprinzip des *Überlagerungsempfängers* wird in einem späteren Kapitel behandelt. Wir werden uns kurz mit der Mischstufe befassen, da die Kenntnis des Grundprinzips für das Verständnis der Mischröhre erforderlich ist. Die Mischstufe ist ein Teil des Überlagerungsempfängers, sie ist auch im einfachsten Empfängertyp anzutreffen. Fast alle Empfänger arbeiten heute nach dem Überlagerungsprinzip, so dass sich in jedem Empfangsgerät eine oder mehrere Mischstufen befinden.

Im Überlagerungsempfänger wird das ankommende Empfangssignal mit einem *Oszillatorsignal* gemischt. Das Oszillatorsignal wird im *Oszillator* erzeugt. Die Frequenz des Oszillatorsignals wird so gewählt, dass das Mischprodukt – die sogenannte *Zwischenfrequenz* – immer den gleichen Frequenzwert aufweist. Der Oszillator ist ein kleiner Sender. Er besteht aus einer Röhre oder einem Transistor, der als Generator geschaltet ist. Bild 325 zeigt blockschaltbildmässig die Baugruppen eines Überlagerungsempfängers, die am Mischvorgang beteiligt sind.

Das Eingangssignal f_e kommt direkt von der Antenne oder von einem vorgeschalteten Hochfrequenzverstärker auf den Eingang der Mischstufe. Der Oszillator erzeugt das Oszillatorsignal f_o und speist damit den zweiten Eingang der Mischstufe, an deren Ausgang die bekannten Mischprodukte entstehen. Aus diesen wird die Differenz zwischen Oszillatorfrequenz und Empfangsfrequenz mittels eines Bandfilters herausgefiltert und als Zwischenfrequenz f_z im nachfolgenden *Zwischenfrequenzverstärker* weiterverstärkt.

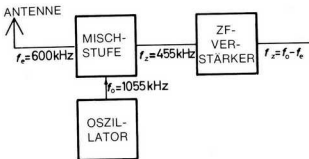


Bild 325

d) Daten der Mischröhren

Die Mischteilheit S_c

In Mehrgitterröhren wird der Anodenstrom durch zwei Gitter gesteuert. Für jedes Gitter kann die Steilheit angegeben werden. Diese Steilheitsangaben sind jedoch nicht interessant, es interessiert die Steilheit der Stufe als Ganzes. Diese Steilheit heisst *Mischsteilheit* S_c . Sie entspricht dem Quotienten aus der Amplitude des Zwischenfrequenzstromes zur Amplitude der Hochfrequenzeingangsspannung.

$$S_c = \frac{I_z}{U_{g1}} \quad \begin{array}{l} S_c = \text{Mischsteilheit} \\ I_z = \text{Zwischenfrequenzstrom} \\ U_{g1} = \text{Wechselspannung am ersten Steuergitter} \end{array}$$

Die Mischverstärkung v_c

Die Verstärkung der Mischstufe wird als *Mischverstärkung* v_c definiert. Sie entspricht dem Quotienten aus der Amplitude der Zwischenfrequenzspannung zur Amplitude der Hochfrequenzspannung am Eingang der Stufe.

$$v_c = \frac{U_z}{U_{g1}} \quad \begin{array}{l} v_c = \text{Mischverstärkung} \\ U_z = \text{Amplitude der Zwischenfrequenzspannung} \\ U_{g1} = \text{Amplitude der Wechselspannung am ersten Steuergitter} \end{array}$$

Mischsteilheit und Mischverstärkung sind von der Gittervorspannung am Gitter 1 und von der Amplitude des Oszillatorsignals abhängig.

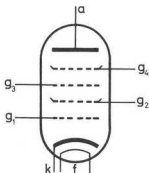
4. Die Mischröhren

a) Die Hexode

– Definition

Die Hexode ist eine Röhre mit sechs Elektroden, vier davon sind Gitter. Sie wird als Mischröhre oder als Regelröhre verwendet.

– Symbol



a = Anode
g₄ = 2. Schirmgitter
g₃ = 2. Steuergitter
g₂ = 1. Schirmgitter
g₁ = 1. Steuergitter
k = Katode
f = Heizung

Bild 326

– Aufbau

Das Elektrodensystem der Hexode besteht aus einer Katode, vier Gittern und einer Anode. Zwei Gitter sind als Steuergitter ausgeführt, die beiden anderen dienen als Schirmgitter. Bild 327 zeigt den Aufbau einer Hexode.

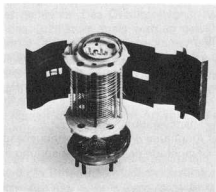


Bild 327

– Wirkungsweise

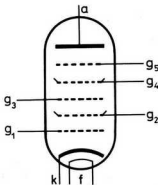
Die Hexode bietet die Möglichkeit, den Anodenstrom durch zwei verschiedene, gegeneinander abgeschirmte Gitter zu steuern. Gitter 1 und Gitter 3 dienen als Steuergitter; der Anodenstrom lässt sich durch die angelegten Spannungen beider Gitter beeinflussen. Gitter 2 und Gitter 4 wirken als Schirmgitter; sie liegen gegenüber der Katode an einem positiven Potential. Die beiden Steuergitter 1 und 3 werden durch das Schirmgitter 2 gegenseitig entkoppelt. Der gesamte Katodenstrom wird von der Spannung am ersten Steuergitter beeinflusst. Das zweite Steuergitter g_3 reguliert den Strom, der zur Anode fliesst. Wird g_3 stark negativ gemacht, so fliesst nur ein kleiner Teil des Katodenstromes zur Anode, der grössere Teil fliesst über g_2 als Schirmgitterstrom ab. Wird die negative Vorspannung an g_3 geringer, so wächst der Anodenstrom und der Strom über g_2 nimmt ab. *Das zweite Steuergitter g_3 verteilt den Katodenstrom auf die Anode und das erste Schirmgitter g_2 .* Der Vorgang heisst deshalb *Verteilungssteuerung*. Das zweite Steuergitter g_3 trägt den Namen *Verteilungsgitter*.

b) Die Heptode

– Definition

Die *Heptode* ist eine Röhre mit 7 Elektroden, wovon 5 Gitter sind. Sie wird als Mischröhre, als Regelröhre oder als Konverterröhre verwendet. Als Konverterröhre übt sie eine Doppelfunktion aus, sie erzeugt eine elektrische Schwingung – d. h. sie wirkt als Oszillator – und gleichzeitig dient sie als Mischstufe.

– Symbol



- a = Anode
- g_5 = Bremsgitter
- g_4 = 2. Schirmgitter
- g_3 = 2. Steuergitter
- g_2 = 1. Schirmgitter
- g_1 = 1. Steuergitter
- k = Katode
- f = Heizung

Bild 328

– Aufbau

Die Heptode ist gleich aufgebaut wie die Hexode. Sie verfügt jedoch im Gegensatz zu dieser zusätzlich über ein Bremsgitter, welches zwischen dem zweiten Schirmgitter und der Anode angebracht ist. Bild 329 zeigt eine Heptode.

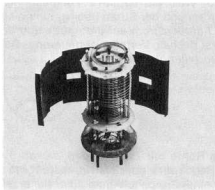


Bild 329

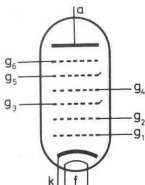
– Wirkungsweise

Als Misch- oder Verstärkerröhre funktioniert die Heptode gleich wie die Hexode. Dank dem Bremsgitter werden die Sekundärelektronen zur Anode zurückgedrängt; das Röhrenrauschen wird dadurch herabgesetzt.

c) Die Oktode

– Definition

Die Oktode ist eine Röhre mit acht Elektroden, sechs davon sind Gitter. Sie wird als Misch- und Oszillatordröhre verwendet. Sie erfüllt die gleiche Funktion wie die Heptode als Konverter; sie erzeugt als Generator das Oszillatorsignal und wirkt gleichzeitig als Mischstufe.



- a = Anode
- g_6 = Bremsgitter
- g_5 = 2. Schirmgitter
- g_4 = Steuergitter
- g_3 = 1. Schirmgitter
- g_2 = Oszillatoranode
- g_1 = Oszillatorgitter
- k = Katode
- f = Heizung

Bild 330

– Aufbau

Die Oktode ist ähnlich aufgebaut wie die Heptode. Zusätzlich wurde zwischen dem ersten Steuergitter und dem ersten Schirmgitter ein weiteres Gitter angebracht. Dieses Gitter dient als Hilfsanode und wird zur Erzeugung des Oszillatorsignals verwendet. Bild 331 zeigt eine Oktode.

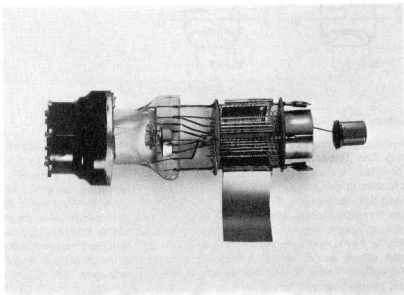


Bild 331

– Wirkungsweise

Das erste und das zweite Gitter wirken wie eine Triode. Sie dienen zur Erzeugung des Oszillatorsignals. Die Gitter drei bis sechs wirken zusammen mit der Anode wie eine Heptode, sie werden zur Mischung verwendet.

d) Verbundröhren

– Definition

Verbundröhren sind eine besondere Art von Mischröhren. Eine gemeinsame Katode versorgt zwei Röhrensysteme. Für Mischstufen werden *Trioden-Hexoden* oder *Trioden-Heptoden* gebaut. Im Triodenteil wird die Oszillatorspannung erzeugt, der Hexoden- oder Heptodenteil arbeitet als Mischstufe.

– Symbol

Bild 332 zeigt die Symbole für eine Triode-Hexode und eine Triode-Heptode.

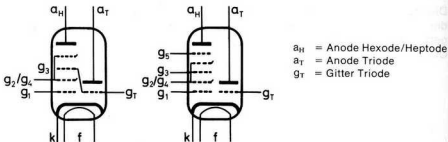


Bild 332

– Aufbau

Über einer gemeinsamen Katode sind zwei verschiedene Röhrensysteme aufgebaut. Das Triodensystem arbeitet als Oszillator, es erzeugt das Oszillatorsignal. Das Hexoden- oder Heptodensystem übernimmt die Funktion der Mischstufe. In der Triode-Hexode ist das Triodengitter direkt mit dem zweiten Steuergitter der Hexode verbunden. Die Oszillatorspannung wird somit direkt in das Hexodensystem eingekoppelt. Für die Triode-Heptode wird meistens auf diese interne Verbindung verzichtet, wodurch beide Röhrensysteme für getrennte Funktionen verwendet werden können. Solche Trioden-Heptoden werden oft in einer Doppelfunktion eingesetzt; der Heptodenteil dient als Hochfrequenz- oder Zwischenfrequenzverstärker, während der Triodenteil oft als Niederfrequenzverstärker geschaltet wird. Bild 333 zeigt eine Triode-Hexode und eine Triode-Heptode.

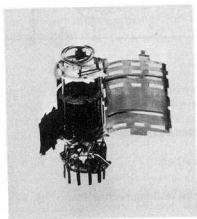
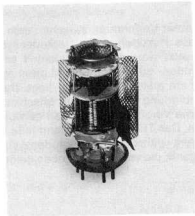


Bild 333

– Wirkungsweise

Verbundröhren mit interner Verbindung zwischen dem Triodengitter und dem zweiten Steuergitter des Hexoden- oder Heptodensystems können nur als Konverterstufen eingesetzt werden. Im Triodenteil wird die Oszillatorspannung erzeugt, der Hexoden- oder Heptodenteil arbeitet als Mischstufe, wobei die Empfangsfrequenz am ersten Steuergitter liegt. Das Oszillatorsignal wird durch die interne Verbindung direkt in die Mischstufe eingekoppelt. Verbundröhren ohne interne Verbindung zwischen den beiden Systemen lassen sich getrennt einsetzen. Das Triodensystem kann jede Funktion übernehmen, die eine Triode erfordert, während das Heptodensystem unabhängig davon jede Aufgabe erfüllen kann, die von einer Heptode gelöst werden muss.

5. Beispiel

Der Mischstufe nach Bild 334 wird eine Hochfrequenzspannung von 15 mV zugeführt. Der Effektivwert des Zwischenfrequenzstromes beträgt $16,5 \mu\text{A}$. Die Mischsteilheit und die Mischverstärkung sind zu bestimmen.

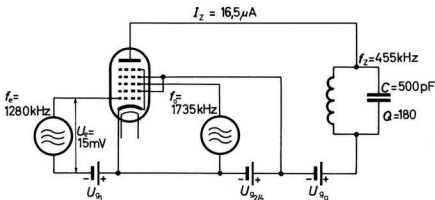


Bild 334

Vorgehen:

1. Schritt: Bestimmen der Mischsteilheit

– Grundformel anschreiben

$$S_c = \frac{I_z}{U_{g1}}$$

– Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$S_c = \frac{16,5 \cdot 10^{-6}}{15 \cdot 10^{-3}} \quad \frac{\text{A}}{\text{V}}$$

$$S_c = 1,1 \text{ mA/V}$$

2. Schritt: Bestimmen der Mischverstärkung

- Grundformel anschreiben
$$v_c = \frac{U_z}{U_{g1}}$$
- Formel für U_z anschreiben
$$U_z = I_z \cdot Z_o \quad (Z_o = \text{Kreisimpedanz für den Resonanzfall})$$
- Grundformel für Z_o anschreiben
$$Z_o = Q \cdot X_c = \frac{Q}{\omega C}$$
- Formel für I_z und Z_o in Grundformel für v_c einsetzen
$$v_c = \frac{I_z \cdot Q}{\omega \cdot C \cdot U_{g1}}; [V_c] = \frac{A \cdot s \cdot V}{As \cdot V} = 1$$
- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen
$$v_c = \frac{16,5 \cdot 10^{-6} \cdot 180}{2 \cdot \pi \cdot 455 \cdot 10^3 \cdot 5 \cdot 10^{-10} \cdot 15 \cdot 10^{-3}}$$

$$v_c = 138,5$$

6. Das Wesentliche

Moderne Sende- und Empfangsgeräte arbeiten mit Mischstufen. In einer Mischstufe werden zwei Frequenzen miteinander gemischt. Das Mischprodukt besteht aus einer Vielzahl von Frequenzen, wobei die Summe und die Differenz der beiden Eingangsfrequenzen amplitudenmässig besonders stark in Erscheinung treten. Im Überlagerungsempfänger wird die zu empfangende Frequenz mit einer in der Mischstufe erzeugten Oszillatorfrequenz gemischt. Die Differenzfrequenz wird mit Bandfiltern herausgesiebt und als Zwischenfrequenz weiterverstärkt. Die Mischung erfolgt in Mischröhren. Damit eine Mischung erfolgen kann, muss die Mischstufe eine nichtlineare Kennlinie aufweisen. Es eignen sich daher grundsätzlich alle Röhren zur Mischung. In Sonderfällen wird in Dioden und Trioden gemischt. Die Standardschaltungen arbeiten jedoch fast durchwegs mit Mischröhren. Wir kennen folgende Arten von Mischröhren:

- Die Hexode

Sie hat sechs Elektroden, vier davon sind Gitter. Zwei haben die Funktion von Schirmgittern, während zwei Gitter als Steuergitter wirken. Der Anodenstrom lässt sich über zwei Gitter steuern. Jedes dieser Steuergitter wird mit einem Signal angesteuert. An der Anode lassen sich die Mischprodukte abnehmen.

- Die Heptode

Sie hat sieben Elektroden, wovon fünf Gitter. Das eingebaute Bremsgitter verbessert die Rauscheigenschaften der Röhre. Mit der Heptode lassen sich Konverterstufen bauen, das sind Mischstufen, die das zur Mischung notwendige Oszillatorsignal mit dem Elektrodensystem der Mischröhre erzeugen.

– Die Oktode

Sie hat acht Elektroden, wovon sechs Gitter. Sie wird fast immer als Konverter geschaltet.

– Die Verbundröhren

Verbundröhren bestehen aus zwei Röhrensystemen mit gemeinsamer Katode. In Mischstufen trifft man meistens die Kombination Triode-Hexode oder Triode-Heptode an. Die Triode dient zur Erzeugung des Oszillatorsignals, die Heptode oder die Hexode arbeiten als Mischstufe. Trioden-Heptoden lassen sich auch für getrennte Funktionen einsetzen, falls intern zwischen der Triode und der Heptode keine Verbindung besteht.

Die Mischsteilheit entspricht dem Quotienten aus der Amplitude des Zwischenfrequenzstromes zur Amplitude der Hochfrequenzeingangsspannung. Die Mischverstärkung entspricht dem Quotienten aus der Amplitude der Zwischenfrequenzspannung zur Amplitude der Hochfrequenzeingangsspannung.

7. Repetitionsaufgaben (Lösung Seite 492)

- Was bedeutet der Ausdruck «Mischung» im Zusammenhang mit einem Überlagerungsempfänger?
- Welche Charakteristik muss die Mischstufe aufweisen, damit eine Mischung zwischen zwei zugeführten Signalen zustandekommt?
- Ein Empfänger wird auf eine Eingangsfrequenz von 1400 kHz eingestellt. Der Oszillator erzeugt ein Signal mit einer Frequenz von 1870 kHz. Wie gross ist die Zwischenfrequenz des Empfängers?
- Welches Steuergitter bestimmt in der Hexode weitgehend den Katodenstrom?

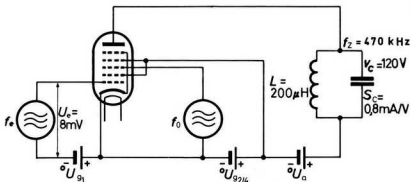


Bild 335

- e) Welches ist die Funktion des zweiten Steuergitters der Hexode?
- f) Worin besteht der Unterschied zwischen einer Hexode und einer Heptode?
- g) Welches sind die hauptsächlichsten Anwendungen der Heptode?
- h) Was ist ein Konverter?
- i) In welcher Funktion wird die Oktode verwendet?
- k) Was ist eine Verbundröhre?
- l) Definieren Sie die Mischsteilheit.
- m) Geben Sie die Definition für die Mischverstärkung.
- n) Bestimmen Sie die Kreisgüte des Anodenschwingkreises der Schaltung nach Bild 335.

VI. Gasgefüllte Röhren

1. Einführung

Gasgefüllte Röhren werden bei der Fabrikation zuerst leer gepumpt und anschliessend mit einem Gas unter geringem Druck gefüllt. In gasgefüllten Röhren werden im Gegensatz zu den Vakuumröhren nicht nur Elektronen, sondern auch Ionen zur Stromleitung herangezogen. Gasgefüllte Röhren werden deshalb oft auch Ionenröhren genannt. Es wird unterschieden zwischen Ionenröhren mit kalter und solchen mit geheizter Katode. Das Anwendungsgebiet dieser Röhrenart ist sehr vielseitig. Glimmröhren werden zur Spannungsstabilisierung oder zur Signalerzeugung herangezogen, während Relaisröhren Schaltfunktionen ausüben und Thyratrons oder Ignitrons zur Steuerung von Motoren und Maschinen eingesetzt werden. Leistungsgleichrichter werden oft mit gasgefüllten Gleichrichterröhren bestückt.

2. Was wissen Sie schon über gasgefüllte Röhren?

(Lösung Seite 494)

- a) Was ist ein Ion?
- b) Zu welcher Elektrode wandern die Anionen?
- c) Welche Elektrode wird die Kationen anziehen?
- d) Was verstehen Sie unter dem Begriff «Ionisation»?
- e) Erklären Sie den Aufbau einer Glimmröhre.
- f) Lässt sich die Zündung eines Thyratrons von aussen steuern?
- g) Kann die erfolgte Zündung eines Thyratrons mit Hilfe der Zündelektrode wieder rückgängig gemacht werden?

3. Gasgefüllte Röhren

a) Glimmröhren

– Definition

Die *Glimmröhre* ist die einfachste *Ionenröhre*. Sie besteht aus zwei in einem Glaskolben eingeschmolzenen Elektroden. Der Kolben ist mit einem Gas gefüllt. Der Gasdruck beträgt $1/100$ bis $1/10$ des normalen Luftdruckes. Die Katode der Röhre wird nicht geheizt.

In früheren Schaltbildern wurde die Gasfüllung durch Schraffur dargestellt. Die Schraffur deutet in neueren Schemas den leitenden Zustand der Röhre an. In neueren Zeichnungen wird die Gasfüllung durch einen Punkt dargestellt.

– Symbol

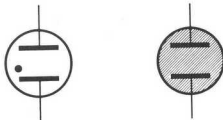


Bild 336

– Aufbau

Die beiden Elektroden der Glimmröhre haben je nach Verwendungszweck verschiedene Formen. Im einfachsten Fall bestehen Katode und Anode aus einfachen Blechen. Als Gasfüllung werden vorwiegend Edelgase wie Neon, Argon oder Xenon verwendet. Bild 337 zeigt eine Glimmröhre.

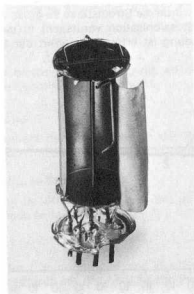


Bild 337

– Wirkungsweise

Die Moleküle der Gasfüllung sind ständig in Bewegung; Zusammenstösse sind deshalb häufig. Solche Zusammenstösse können dazu führen, dass einzelne Moleküle ein Elektron der Hülle verlieren oder ein freies Elektron einfangen. Diese Moleküle sind zu Ionen geworden. Liegt eine Gleichspannung an den Elektroden, so werden die positiven Ionen von der Katode und die negativen Ionen sowie die Elektronen von der Anode angezogen. Die Geschwindigkeit dieser Ladungsträger wird umso grösser sein, je höher die angelegte Spannung ist. Trotz des geringen Gasdruckes in der Röhre ist die Anzahl der Gasmoleküle noch gross. Entspricht der Gasdruck 1/100 des normalen Luftdruckes, so sind pro Kubikmillimeter noch 300 Billionen Gasmoleküle vorhanden. Zusammenstösse zwischen den bewegten Ladungsträgern und den Molekülen sind deshalb unvermeidlich. Falls die Geschwindigkeit des Ladungsträgers genügend gross ist, verfügt er über eine kinetische Energie (Energie der Bewegung), die ausreicht, um dem Gasmolekül ein Elektron zu entreissen. Das Molekül wird zum positiven Ion und als solches von der Katode angezogen. Das frei gewordene Elektron wird durch die angelegte Spannung zur Anode hin beschleunigt. Der Vorgang heisst *Ionisation*. Für einen bestimmten Wert der angelegten Spannung werden durch Ionisation mehr Ladungsträger frei, als durch Rekombination (Wiedervereinigung von positiven Ionen mit Elektronen) und Verluste verloren gehen. Der Strom in der Röhre steigt lawinenartig an. Der Vorgang heisst *Stossionisation*. Der Strom muss durch einen Widerstand im Anodenkreis begrenzt werden. Ohne Begrenzerwiderstand würde die Stromstärke so gross werden, dass die Röhre zerstört würde. Die Stossionisation verursacht in der Röhre eine Leuchterscheinung; die Zündung ist erfolgt. Der Wert der Spannung, der für das

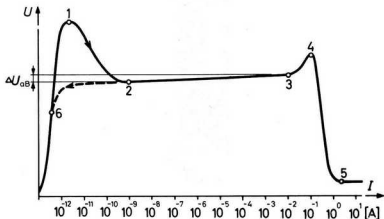


Bild 338

Zünden der Röhre erforderlich ist, ist abhängig vom verwendeten Gas und vom Gasdruck. Bild 338 zeigt den Zusammenhang zwischen angelegter Spannung und Anodenstrom. Die *Zündspannung* (1) liegt etwas höher als die *Brennspannung* (2–3), da zum Auslösen der Elektronenlawine eine verhältnismässig hohe Elektronengeschwindigkeit erforderlich ist. Diese Geschwindigkeit wird den Elektronen durch eine entsprechend hohe Anodenspannung erteilt. Sobald der Zündvorgang einmal eingeleitet ist, kann die Ionisation mit einer geringeren Spannung aufrechterhalten werden.

Die hierzu notwendige Spannung heisst *Brennspannung*; sie liegt immer unterhalb der Zündspannung. Die Spannung, bei der die Ionisation aufhört, heisst *Löschspannung* (6); sie liegt tiefer als die Brennspannung. Innerhalb des Bereiches 2–3 der Kennlinie bleibt die Spannung über der Röhre fast unabhängig vom Strom. Dieser Kennlinienbereich wird zur Spannungsstabilisierung ausgenutzt.

Wird der Strom über den Punkt 3 hinaus erhöht, so steigt die Brennspannung an, bis im Punkt 4 die Lichtbogenbildung einsetzt. Die Katode wird dabei durch den Emissionsstrom soweit erhitzt, dass sie thermisch emittiert. Die Spannung bricht dabei auf den Wert der *Bogenspannung* (5) zusammen. In diesem Betriebszustand wird die Röhre zerstört.

– Röhrendaten

Zündspannung U_z

Die Zündspannung ist diejenige Spannung, die zur Zündung der Röhre erforderlich ist.

Brennspannung U_B

Die *Brennspannung* ist diejenige Spannung, die an der Röhre liegt, wenn diese im Bereich 2–3 der Kennlinie betrieben wird.

Strombereich $I_{a \min} \dots I_{a \max}$

Der *Strombereich* entspricht dem Regelbereich der Röhre als Spannungsstabilisator. Er ist identisch mit der Strecke 2–3 im Diagramm.

Spannungsänderung ΔU_{ab} im Strombereich

Die Spannungsänderung im Strombereich gibt an, um welchen Betrag die Spannung im Strombereich ändert.

Innenwiderstand

Der *Innenwiderstand* der Glimmröhre ist der Wechselstromwiderstand im Strombereich. Er wird graphisch aus der I_a-U_a -Kennlinie ermittelt, indem man das Verhältnis von Spannungsänderung zu Stromänderung bestimmt. Bild 339 zeigt das Vorgehen.

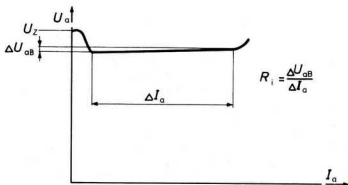


Bild 339

– Beispiel

Die Stabilisatorröhre STV 108/30 soll zur Stabilisierung der Anodenspannung eines Oszillators verwendet werden. Die Röhre hat folgende Daten:

STV 108/30

- Brennspannung U_B 106 ... 111 V
- Zündspannung U_z 127 V
- Strombereich $I_{a \max} \dots I_{a \min}$ 30 ... 5 mA
- Innenwiderstand R_i 100 Ohm
- Spannungsänderung ΔU_{aB} im Strombereich 3,5 V

Der Oszillator benötigt eine Anodenspannung von etwa 110 V, der Stromverbrauch beträgt 12 mA. Als Spannungsquelle steht eine Anodenspannung von 200 V zur Verfügung. Diese Anodenspannung soll ± 20 V schwanken dürfen. Der Vorwiderstand nach Bild 340 ist zu bestimmen. Nach erfolgter Wahl des Vorwiderstandes ist zu untersuchen, in welchem Bereich die Spannung U_a schwanken darf, ohne dass dabei das richtige Funktionieren des Stabilisators beeinträchtigt wird.

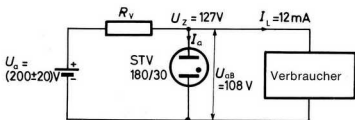


Bild 340

Vorgehen:

1. Schritt: Bestimmen des Vorwiderstandes

Der Vorwiderstand muss die Differenz zwischen Anodenspannung und Brennspannung aufnehmen. Um den Regelbereich maximal auszunutzen, wählen wir den Arbeitspunkt für den Stabilisator in der Mitte des Strombereiches. Nach Bild 341 fließt im Arbeitspunkt ein Strom von 17,5 mA. Durch den Vorwiderstand fließt die Summe der Ströme I_a (Strom durch den Stabilisator) und I_L (Strom durch die Last).

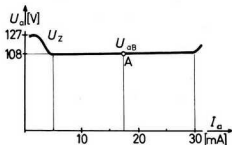


Bild 341

- Formel für R_v anschreiben

$$R_v = \frac{U_a - U_{ab}}{I_a + I_L}$$

- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$R_v = \frac{200 - 108}{(17,5 + 12) \cdot 10^{-3}} \frac{\text{V}}{\text{A}}$$

$$R_v = 3,12 \text{ k}\Omega$$

2. Schritt: Kontrolle, ob die Zündung der Röhre (bei normaler Anodenspannung) noch sichergestellt ist.

Der Vorwiderstand bildet mit dem Belastungswiderstand einen Spannungsteiler. Die Spannung am Belastungswiderstand muss im Einschaltmoment grösser sein als die Zündspannung.

- Formel für R_L anschreiben

$$R_L = \frac{U_{ab}}{I_L}$$

- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$R_L = \frac{108}{12 \cdot 10^{-3}} \frac{\text{V}}{\text{A}}$$

$$R_L = 9 \text{ k}\Omega$$

- Spannungsteilerformel anschreiben

$$U_{ab_{\text{on}}} = \frac{U_a \cdot R_L}{R_v + R_L}$$

– Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen
$$U_{ab_0} = \frac{200 \cdot 9 \cdot 10^3}{(3,12 + 9) \cdot 10^{-3}} \cdot \frac{V \cdot V \cdot A}{A \cdot V}$$

$$U_{ab_0} = 148,5 \text{ V} > U_z$$

Die notwendige Zündspannung beträgt 127 V, die Zündung ist somit sichergestellt.

3. Schritt: Kontrolle des Regelbereiches

Der Regelbereich des Stabilisators ist durch den Strombereich der Röhre begrenzt. Die gesamte zulässige Abweichung der Anodenspannung ist durch das Produkt von Vorwiderstand und Strombereich gegeben.

– Grundformel anschreiben
$$\Delta U_a = R_v \cdot \Delta I_a$$

– Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen
$$\Delta U_a = 3,12 \cdot 10^3 \cdot (30 - 5) \cdot 10^{-3} \cdot \frac{V}{A}$$

$$\Delta U_a = 78 \text{ V}$$

Da der geforderte Regelbereich $\pm 20 \text{ V}$ beträgt, ist auch diese Bedingung erfüllt.

4. Schritt: Kontrolle, ob für die minimale Anodenspannung die Zündung noch sichergestellt ist.

– Spannungsteilerformel anschreiben
$$U_{ab_0 \min} = \frac{U_{a \min} \cdot R_L}{R_v + R_L}$$

– Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen
$$U_{ab_0 \min} = \frac{180 \cdot 9 \cdot 10^3}{(3,12 + 9) \cdot 10^{-3}}$$

$$U_{ab_0} = 133,5 \text{ V} > U_z$$

Die notwendige Zündspannung beträgt 127 V, die Zündung ist somit auch für die untere Grenze des Regelbereiches sichergestellt.

b) Die Relaisröhre

– Definition

Die *Relaisröhre* ist eine Kaltkatodenröhre; die Katode benötigt keine Heizleistung. Das Röhrensystem – bestehend aus Katode, Anode und Starteranode – befindet sich in einem Glaskolben mit Gasfüllung.

Einige Typen enthalten zusätzlich noch eine Hilfsanode. Die Relaisröhre kennt nur zwei Betriebszustände: Leitend oder gesperrt.

– Symbol

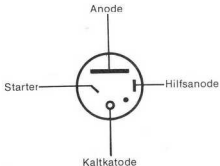
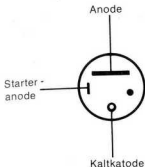


Bild 342

– Aufbau

Die Katode besteht aus besonders präpariertem Barium oder Molybdän. Diese Materialien sind in der Lage, bereits unter normalen Temperaturverhältnissen Elektronen zu emittieren. Der Starter oder die *Starteranode* liegt bedeutend näher bei der Katode als die Anode, damit wird erreicht, dass die Röhre über den Starter mit Spannungen gezündet werden kann, die unterhalb der Zündspannung der Röhre liegen. Bild 343 zeigt eine Relaisröhre.



Bild 343

– Wirkungsweise

Der Ionisationsvorgang vollzieht sich nach den gleichen Gesetzen wie in der Glimmröhre. Das bedeutet, dass die Relaisröhre bei genügend hoher Anodenspannung ohne Spannung am Starter wie eine gewöhnliche Glimmröhre zündet. Da der Starter näher bei der Katode liegt als die Anode, kann die Röhre mit einer Spannung am Starter gezündet werden, die unterhalb der Zündspannung der Röhre liegt. Die Zündspannung am Starter löst den Ionisationsvorgang aus, welcher zur Hauptentladung der Strecke Katode-Anode führt.

– Röhrendaten

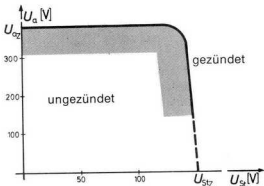


Bild 344

Zündkennlinie

Die **Zündkennlinie** (Bild 344) gibt Auskunft über die Zündeigenschaften der Röhre. Sie zeigt den Zusammenhang zwischen Anodenspannung und benötigter Starterzündspannung. Erreicht die Starterspannung den Wert U_{stz} , so zündet die Röhre auf jeden Fall, auch wenn die Anodenspannung niedrig ist. Unterhalb der Starterzündspannung zündet die Röhre nur mit einer relativ hohen Anodenspannung U_{az} .

Anodenzündspannung U_{az}

Die **Anodenzündspannung** entspricht der Anodenspannung, bei welcher die Röhre zündet, ohne dass am Starter eine Spannung liegt.

Starterzündspannung U_{stz}

Die **Starterzündspannung** entspricht der Starterspannung, bei welcher der Zündvorgang ausgelöst wird.

Anodenbrennspannung U_{ab}

Die *Anodenbrennspannung* ist diejenige Spannung, welche im Betrieb zwischen Katode und Anode auftritt.

Starterbrennspannung U_{stB}

Die *Starterbrennspannung* ist diejenige Spannung, welche im Betrieb am Starter liegt.

Entionisierungszeit t_d

Die *Entionisierungszeit* ist diejenige Zeit, die nach dem Löschen der Röhre vergehen muss, damit alle Ladungsträger neutralisiert sind. Wird der Röhre vor Ablauf der Entionisierungszeit wieder eine positive Anodenspannung grösser als die Brennspannung zugeführt, so bleibt diese nicht gelöscht; sie zündet sofort wieder.

Anodenspitzenstrom I_{asp}

Der *Anodenspitzenstrom* ist der kurzzeitig maximal zulässige Anodenstrom.

Maximaler Anodenstrom I_{amax}

Der *maximale Anodenstrom* ist der höchst zulässige Anodenstrom im Dauerbetrieb.

Minimaler Anodenstrom I_{amin}

Der *minimale Anodenstrom* entspricht dem kleinsten Anodenstrom, für welchen die Entladung noch sicher aufrechterhalten bleibt.

Maximaler Starterstrom I_{stsp}

Der *maximale Starterstrom* entspricht dem höchst zulässigen Strom zwischen Starter und Katode.

Integrationszeit τ_{max}

Die *Integrationszeit* spielt für den Impulsbetrieb der Röhre eine Rolle. Sie gibt die Höchstzeit an, während welcher der maximale Anodenstrom überschritten werden darf. Ein Beispiel soll diese Aussage erläutern:

Die Relaisröhre 5823 weist folgende Daten auf:

- Anodenspitzenstrom I_{asp} 100 mA
- Maximaler Anodenstrom I_{amax} 25 mA
- Integrationszeit τ_{max} 5 s

Das Produkt aus maximalem Anodenstrom und Integrationszeit beträgt $25 \text{ mA} \cdot 5 \text{ s} = 125 \text{ mAs}$. Der Anodenspitzenstrom darf auch im Impulsbetrieb nicht überschritten werden. Man darf demzufolge die Röhre beispielsweise wäh-

rend 1,25 s mit 100 mA oder während 2 s mit 62,5 mA belasten. Das Produkt $I_a \cdot t$ darf nie grösser werden als $I_{a\max} \cdot t_{\max}$, wobei I_a den Wert I_{asp} nie überschreiten darf.

– Beispiel

Die Relaisröhre 5823A hat folgende Daten:

U_{aZ}	350 V	$t_{\max}$	5 s
U_{aIZ}	70 ... 90 V	I_{asp}	100 mA
U_{aB}	65 V	$I_{a\max}$	25 mA
U_{stB}	60 V	I_{amin}	5 mA
t_d	1 ms	I_{stsp}	0,5 mA

Bild 345 zeigt eine Schaltung, die zur elektronischen Steuerung einer Punkt-Schweissmaschine mit Hilfe der Relaisröhre 5823 A dient. Die Schweissung soll jeweils durch einen Kommandoimpuls beliebiger Länge (Tastendruck) ausgelöst und nach 50 ms automatisch unterbrochen werden. Durch eine

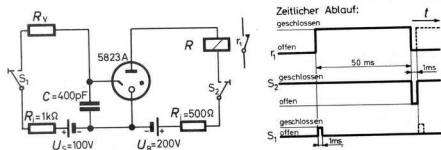


Bild 345

Impulsformer- und Verzögerungsschaltung (in Bild 345 nicht gezeichnet) schliesst bei Beginn des Tastendrucks der Kontakt S_1 während 1 ms und löst damit den Zündvorgang der Relaisröhre aus. Der in Bereitschaftsstellung geschlossene Kontakt S_2 öffnet durch die Verzögerungsschaltung 50 ms nach Beginn der Schweissung. Er unterbricht damit den Anodenstrom in der Relaisröhre und damit die Schweissung. Der Relaiskontakt r_1 steuert den Strom in der Primärwicklung des Schweissttransformators.

Folgende Werte für die Steuerung der Relaisröhre sind zu bestimmen:

- Der minimale ohmsche Widerstand des Relais R
- Der Vorwiderstand R_v für einen Steuerstrom von 25% des Spitzensteuerstromes
- Die Zeit Δt , die verstreichen muss, bis S_2 wieder schliessen darf. Im Extremfall kann mit dem Schliessen von S_2 der nächste Steuerimpuls zusammenfallen.
- Die Zeitkonstante des Gliedes $R_v - C$

Vorgehen:

1. Schritt: Bestimmen des minimalen ohmschen Widerstandes der Relaiswicklung.

Bedingung: Der minimale Wicklungswiderstand muss so gross sein, dass der Spannungsabfall am Relais für den maximal zulässigen Anodenstrom der Differenz zwischen Brenn- und Klemmenspannung der Batterie entspricht.

- Bedingung in Formel kleiden: $(I_{a_{\max}} \cdot R_r) = U_B - (U_{aB} + I_{a_{\max}} \cdot R_i)$
- nach R_r umstellen
$$R_r = \frac{U_B - (U_{aB} + I_{a_{\max}} \cdot R_i)}{I_{a_{\max}}}$$
- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen
$$R_r = \frac{200 - 65 - (25 \cdot 10^{-3} \cdot 500)}{25 \cdot 10^{-3}}$$
$$R_r = 4,9 \text{ k}\Omega$$

2. Schritt: Bestimmen des Vorwiderstandes R_v

Bedingung: Ein Viertel des Steuerspitzenstromes muss an R_v einen Spannungsabfall verursachen, der der Differenz von Batteriespannung und Starterbrenns spannung entspricht.

- Bedingung in Formel kleiden $(R_v \cdot I_{st_{sp}} \cdot 0,25) = U_s - (U_{stB} + R_{i_s} \cdot I_{st_{sp}} \cdot 0,25)$
- nach R_v umstellen
$$R_v = \frac{U_s - (U_{stB} + R_{i_s} \cdot I_{st_{sp}} \cdot 0,25)}{I_{st_{sp}} \cdot 0,25}$$
- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen
$$R_v = \frac{100 - (60 + 1 \cdot 10^3 \cdot 0,5 \cdot 10^{-3} \cdot 0,25)}{0,5 \cdot 10^{-3} \cdot 0,25}$$
$$R_v = 319 \text{ k}\Omega$$

3. Schritt: Bestimmen von Δt

t entspricht der Entionisierungszeit t_d .

$$\Delta t = t_d = 1 \text{ ms}$$

Würde S_2 vor Ablauf von t_d wieder geschlossen, dann würde die Röhre zünden, ohne dass eine Zündspannung am Starter vorhanden wäre.

4. Schritt: Bestimmen der Zeitkonstante von $R_v - C$

- Grundformel anschreiben $\tau = R_v C \quad \frac{VAs}{AV}$
- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen
$$\tau = 319 \cdot 10^3 \cdot 4 \cdot 10^{-10}$$
$$\tau = 0,128 \text{ ms}$$

c) Das Thyatron

– Definition

Das *Thyatron* ist eine gasgefüllte Dreipolröhre. Das Elektrodensystem besteht aus einer geheizten Katode, einem Steuergitter und einer Anode. Das Thyatron kennt wie die Relaisröhre nur zwei Schaltzustände; leitend oder gesperrt.

– Symbol

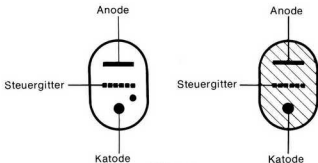


Bild 346

– Aufbau

Die Katode weist eine sehr grosse Oberfläche auf, da in Thyatrons hohe Ströme fließen. Die meisten Typen werden indirekt geheizt. Das Gitter ist meistens als Lochblende ausgeführt. Die Anode besteht aus einer Scheibe.

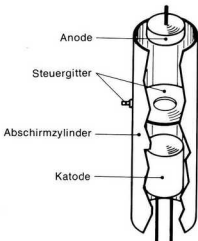


Bild 347

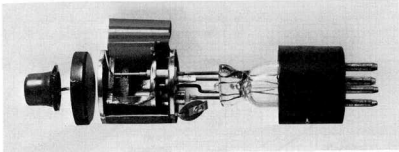


Bild 348

Diese ist oft direkt mit einem Kolbenkontakt verbunden, um die hohen Sperrspannungen überschlagsicher zuzuführen. Die Gasfüllung besteht aus einem Edelgas oder aus Quecksilberdampf. Bild 347 zeigt schematisch den Aufbau und Bild 348 die Ausführung eines Thyratrons.

– Wirkungsweise

Die Kennlinie des Thyratrons wird mit der Schaltung nach Bild 349 aufgenommen.

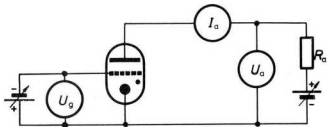


Bild 349

Beim Thyatron interessiert das Verhältnis von Anodenspannung zu Gitterspannung, bei welchem die Röhre zündet. Zur Aufnahme dieser *Steuerkennlinie* wird für verschiedene Werte der Gittervorspannung die Anodenspannung so lange verändert, bis die Röhre zündet. Die gemessenen Werte werden im U_a-U_g -Diagramm eingetragen. Die Messwerte für ein und denselben Typ weisen relativ grosse Streuungen auf. Die Toleranzen sind grösser als für

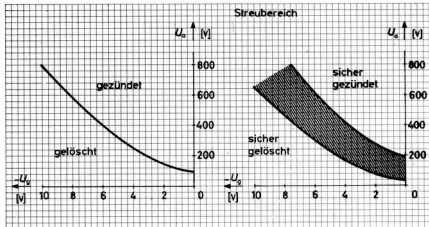


Bild 350

Vakuumröhren. Zudem wird der Zündvorgang durch die Temperatur der Röhre stark beeinflusst.

Bild 350 zeigt links die gemessene Steuerkennlinie einer Röhre. Rechts erkennen wir die Kennlinie für den gleichen Röhrentyp unter Berücksichtigung der Datenstreuung. Die schraffierte Fläche stellt den Streubereich dar, links davon ist die Röhre sicher gesperrt, rechts davon sicher leitend. Der Ionisationsvorgang ist derselbe wie bei allen gasgefüllten Röhren. Die Anodenspannung wird der Röhre über den Anodenwiderstand R_a zugeführt. Er dient der Strombegrenzung. Ohne diesen Begrenzungswiderstand würde der Anodenstrom so hohe Werte annehmen, dass die Röhre zerstört würde. Das negative Potential am Gitter bremst die von der Katode emittierten Elektronen stark ab, ihre Geschwindigkeit reicht dadurch nicht aus, um eine Stossionisation auszulösen. Wird nun entweder die Anodenspannung erhöht, oder die Gittervorspannung verkleinert, so setzt schlagartig die Ionisation des Gases in der Röhre ein, sie hat gezündet. Der Anodenstrom ist praktisch nur durch den Begrenzungswiderstand und den Innenwiderstand der Spannungsquelle begrenzt. Die Spannung an der Anode sinkt auf die *Bogenspannung* U_{arc} ab.

In der gezündeten Röhre ist die Konzentration von Gasionen so gross, dass die Wirkung des negativen Gitters neutralisiert wird. Die Röhre kann nur gelöscht werden, indem die Anodenspannung unter den Wert der Bogenspannung abgesenkt wird.

– Technische Daten

Steuerkennlinie

Die *Steuerkennlinie* gibt Auskunft über das Verhältnis von Anodenspannung zu Gitterspannung, bei welchem die Röhre zündet.

Sperrspannung U_{Sperr}

Die *Sperrspannung* ist die an der Anode auftretende negative Spannung, wenn die Röhre als Gleichrichter betrieben wird.

Bogenspannung U_{arc}

Die *Bogenspannung* ist die Spannung zwischen Anode und Katode des Thyratrons in leitendem Zustand.

Maximaler Anodenstrom I_{amax}

Der *maximale Anodenstrom* entspricht dem maximal zulässigen Anodenstrom im Dauerbetrieb.

Anodenspitzenstrom I_{asp}

Der *Anodenspitzenstrom* entspricht dem kurzzeitig zulässigen höchsten Stromwert.

Entionisierungszeit t_d

Die *Entionisierungszeit* hat die gleiche Bedeutung wie für die Relaisröhre.

Ionisierungszeit t_i

Die *Ionisierungszeit* ist die Zeit vom Anlegen der Anodenspannung bis zur tatsächlichen Zündung der Röhre. Sie liegt in der Größenordnung von μs .

Integrationszeit τ_{max}

Die *Integrationszeit* hat die gleiche Bedeutung wie für die Relaisröhre.

– Beispiel

Die Helligkeit der Projektionslampe eines Vergrößerungsapparates soll mit Hilfe eines Kleinthyratrons kontinuierlich geregelt werden. Bild 351 zeigt die Schaltung und die Steuerkennlinie.

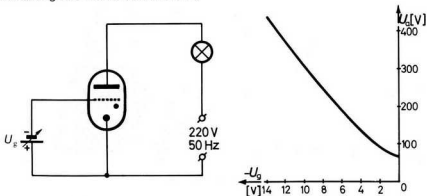


Bild 351

Die Form des durch die Lampe fließenden Stromes ist für die maximale und die minimale Helligkeit aus der Steuerkennlinie graphisch zu ermitteln. Die erforderlichen Gittervorspannungswerte sind zu bestimmen.

Vorgehen (Bild 352):

- Konstruktion der positiven Anodenspannungshalbwellen für 220 V.
- Ermittlung des Zündwinkels φ_1 für $U_g = 0$ V
- Ermittlung des Zündwinkels φ_2 und der dazugehörigen Gittervorspannung für den Scheitelwert der positiven Anodenspannungshalbwellen.
- Abgrenzen des Flächenanteils für die beiden Zündwinkel.
- Die Kurvenform der ermittelten Flächenanteile entspricht der Form der Stromimpulse durch den ohmschen Verbraucher.
- Die Gittervorspannung für die geringste Helligkeit kann im Diagramm zu 10 V abgelesen werden.

In der Praxis kann nicht der ganze Regelbereich ausgenützt werden, da eine Zündung bei maximaler Gittervorspannung im Scheitel der positiven Anodenspannung infolge der Temperaturabhängigkeit der Kennlinie nicht in allen Fällen sicher gewährleistet wäre.

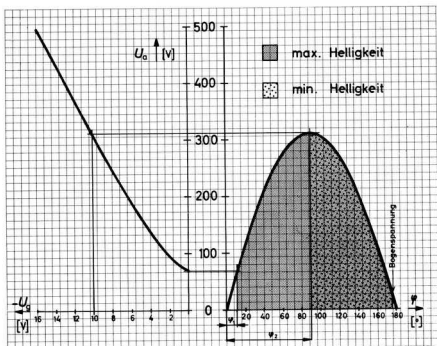


Bild 352

Man wird deshalb eine etwas kleinere maximale Gittervorspannung wählen, wodurch der Zündwinkel leicht verringert wird. Der Nachteil dieser Schaltung ist die schlechte Ausnützung des Regelbereiches. Die Röhre muss in der ersten Hälfte der Spannungsamplitude gezündet werden, der Zündwinkel wird daher immer kleiner als 90° sein. Soll der Zündwinkel grösser als 90° gemacht werden, so muss das Gitter des Thyatron mit einer phasenverschobenen Wechselspannung angesteuert werden. Diese Art der Steuerung wird in der Praxis oft angewendet.

d) Das Ignitron

– Definition

Das *Ignitron* ist eine gasgefüllte Dreipolröhre. Das Elektrodensystem besteht aus einer nicht geheizten Katode, einem Zündstift und einer Anode. Das Ignitron ist in der Lage, sehr hohe Ströme zu schalten. Ein doppelwandiger, wassergekühlter Metallkolben sorgt für die Wärmeabfuhr. Das Ignitron kennt wie das Thyatron nur zwei Zustände; leitend oder gesperrt.

– Symbol

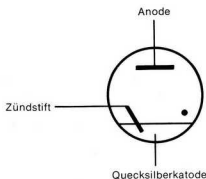


Bild 353

– Aufbau

Die Katode besteht aus Quecksilber. Für die Herstellung des Zündstiftes wurde ein Halbleitermaterial mit sehr hoher Temperaturbeständigkeit verwendet. Er taucht ständig in das Quecksilberbad der Katode ein. Die Graphitanode ist für hohe Anodenströme dimensioniert. Das ganze Elektrodensystem ist in einem doppelwandigen Metallkolben untergebracht. Bild 354 zeigt schematisch den prinzipiellen Aufbau eines Ignitrons.

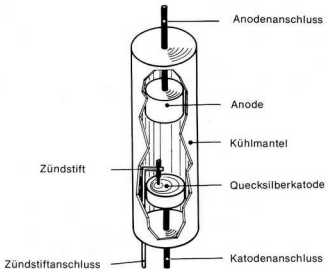


Bild 354

– Wirkungsweise

Das Ignitron wird durch kurzzeitiges Anlegen einer Zündspannung an den Zündstift gezündet. Der Strom über den Zündstift ist relativ hoch (etwa 40 A), wodurch sich zwischen Quecksilber und Zündelektrode ein kleiner Lichtbogen bildet. Dieser Vorgang führt zur Verdampfung und Ionisation von Quecksilber. Die Entladung greift sofort auf die Katoden-Anodenstrecke über, sofern an der Anode eine positive Spannung liegt. Die positiven Ionen des verdampften Quecksilbers prallen mit grosser Geschwindigkeit auf die Katode und erzeugen dort einen Brennfleck von hoher Temperatur. Dieser Brennfleck erlischt, sobald die Anodenspannung unterhalb die Bogenspannung von etwa 16 V absinkt. Die Quecksilberkatode kann Anodenstrommittelwerte zwischen 50 und 200 A emittieren. Die erforderliche Zündspannung liegt um 150 V. Trotz der niederen Bogenspannung erzeugen die hohen Anodenströme eine beträchtliche Wärmeleistung, welche über ein Kühlsystem abgeführt werden muss. Die Kühlung erfolgt meistens mit Wasser. Ignitrons finden als gesteuerte Gleichrichter für hohe Ströme und zur Steuerung von Schweißmaschinen Verwendung.

– Technische Daten

Mit Ausnahme der Zündspannung und des Zündstromes gelten für Ignitrons die gleichen Definitionen für die einzelnen technischen Daten wie für Thyratrons.

Typische Daten für ein Ignitron:

Bogenspannung U_{arc}	13 V
Entionisierungszeit t_d	1 ms
maximale Anodenspannung U_{anmax}	500 V
Sperrspannung U_{sperr}	500 V
Spannung an der Züdelektrode	200 V
Anodenspitzenstrom I_{ap}	700 A
mittlerer Anodenstrom I_a	40 A
Temperaturgrenzen	10 ... 40 °C

Die Temperaturgrenzen müssen innegehalten werden, da sonst das einwandfreie Funktionieren des Ignitrons nicht gewährleistet ist.

– Beispiel

Bild 355 zeigt das Prinzip eines elektronischen Schweißgerätes für hohe Ströme. Das Ignitron übernimmt die Funktion des Schalters. Wird der Schalter S geschlossen, so entsteht während der positiven Halbwelle an der Katode der Diode D eine positive Spannung. Erreicht diese Spannung den Mindestwert, der für die Zündung erforderlich ist, so zündet die Röhre. Sobald die Anodenspannung unter den Wert der Bogenspannung abfällt, löscht das Ignitron. Der Zündvorgang wiederholt sich während jeder positiven Halbwelle der Anodenwechselspannung, solange der Schalter S geschlossen bleibt. In der Primärwicklung des Schweißstromtransformators fließt ein pulsierender Gleichstrom.

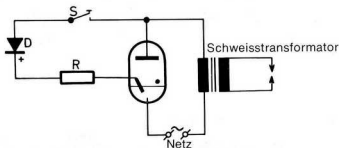


Bild 355

Das Ignitron ist viel dauerhafter als ein mechanischer Schalter, dessen Kontakte bei den hohen Schaltströmen einem grossen Verschleiss ausgesetzt wären.

In der Praxis werden zwei Ignitrons in Antiparallelschaltung verwendet, um auch die zweite Halbwelle der Anodenwechselspannung auszunützen.

e) Gasgefüllte Gleichrichterröhren

– Definition

Gasdioden sind Gleichrichterröhren mit geheizter Katode. Als Gasfüllung wird Quecksilberdampf oder Edelgas verwendet.

– Symbole

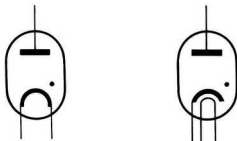


Bild 356

Direkt geheizte Gasdiode

Indirekt geheizte Gasdiode

– Aufbau

Die meisten Gasdioden arbeiten mit einer direkt geheizten Katode. Diese besteht aus einem Heizwendel, welcher mit einem emittierenden Belag versehen ist. Die Katode ist einem intensiven Ionenbeschuss ausgesetzt. Alle positiven Gasionen werden von der negativen Katode angezogen. Diese Ionen würden mit einer grossen Geschwindigkeit auf die Katode prallen, die dabei frei werdende Energie würde die emittierende Schicht der Katode zerstören. Die Katode wird deshalb mit einer Abschirmung versehen, welche die Ionen abhält. Die emittierten Elektronen umgehen diese Abschirmung. In Bild 357 ist der Aufbau einer Gasdiode zu erkennen.

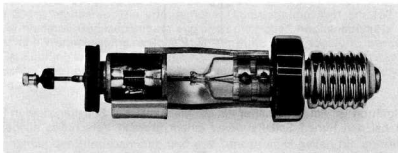


Bild 357

– Wirkungsweise

Die Katode wird geheizt und emittiert Elektronen. Überschreitet die angelegte Spannung die Zündspannung, so setzt die Stossionisation ein. Solange die Anodenspannung unterhalb der Zündspannung bleibt, fliesst in der Röhre nur ein sehr kleiner, unwesentlicher Elektronenstrom, da die emittierten Elektronen dauernd auf Gasmoleküle stossen und dadurch stark abgebremst werden. Erst bei Erreichen der Zündspannung wird die Elektronengeschwindigkeit so gross, dass die Ionisierung des Gases eingeleitet wird. Die von der Katode angezogenen positiven Ionen verhindern die Entstehung einer Raumladung, deshalb steigt der Anodenstrom der Gasdiode im Gegensatz zur Vakuumdiode bei Erreichen der Zündspannung schlagartig an.

Bild 358 zeigt den Unterschied zwischen den Kennlinien einer Gasdiode und einer Vakuumdiode.

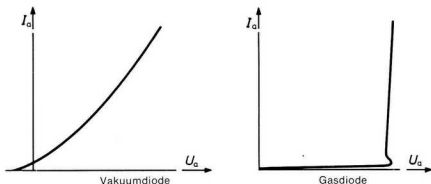


Bild 358

Da an der Stromleitung ausser den Elektronen auch noch Ionen beteiligt sind, ergibt sich ein sehr kleiner Innenwiderstand, wodurch eine Strombegrenzung notwendig wird. Im Anodenkreis der Gasdiode befindet sich deshalb immer ein ohmscher oder ein induktiver Widerstand. Über der Röhre fällt die Bogenspannung ab, diese beträgt bei Quecksilberdampf röhren etwa 15 V.

Das Arbeitsverhalten von Quecksilberdampf röhren wird stark vom Gasdruck in der Röhre beeinflusst. Die Röhrentemperatur wiederum ist mitbestimmend für den Gasdruck. Röhren für grössere Leistungen müssen deshalb vorgewärmt werden. Zu diesem Zweck wird die Heizspannung vor der Anodenspannung an die Röhre gelegt. Die Vorwärmung dauert einige Minuten. Oft wird die Anodenspannung über ein Relais verzögert eingeschaltet.

– Beispiel

Eine Gasdiode wird als Gleichrichterröhre zur Ladung von Akkumulatoren eingesetzt. Bild 359 zeigt die Prinzipschaltung.

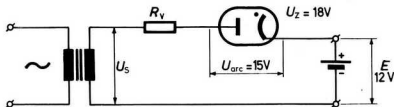


Bild 359

Die Anlage ist für 12 V dimensioniert. Die Zündspannung der Röhre beträgt 18 V, die Brennspannung 15 V. Der Transformator ist so zu dimensionieren, dass die Röhre sicher zündet. Die Sekundärspannung des Transformators ist zu bestimmen. Es ist zu untersuchen, während welcher Zeitdauer innerhalb der positiven Spannungskurve die Röhre Strom liefert und wie gross die Sperrspannung über der Röhre wird.

Vorgehen:

1. Schritt: Bestimmen der notwendigen Sekundärspannung

– Bedingung: Die Sekundär-Spitzenspannung muss grösser sein als die Summe von Zündspannung der Röhre und E.M.K. der Batterie.

– Bedingung in eine Formel kleiden

$$U_s > U_z + E$$

Zur sicheren Zündung wählen wir einen Sicherheitsfaktor von 1,2. Dieser wird in die Formel einbezogen:

$$U_s = 1,2 (U_z + E)$$

– Formel für den Effektivwert auslegen:

$$U_s = \frac{1,2 (U_z + E)}{\sqrt{2}}$$

– Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$U_s = \frac{1,2 (18 + 12)}{\sqrt{2}}$$

$$U_s = 25,46 \text{ V}$$

2. Schritt: Bestimmen der Stromflussdauer
 – Die Ermittlung erfolgt graphisch nach Bild 360:

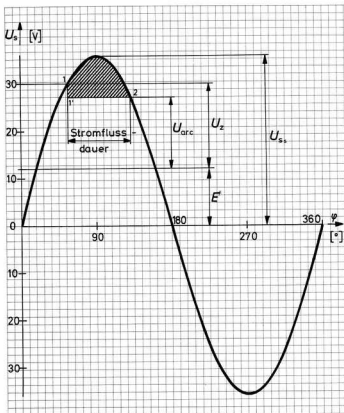


Bild 360

- Aufzeichnen der Sekundärspannung des Transformators
- Einzeichnen der E.M.K. E der Batterie
- Addition von Zündspannung und E.M.K. im Diagramm
- Addition von Brennspannung und E.M.K. im Diagramm
- Konstruktion der Fläche, welche dem Stromfluss entspricht.

Im Zündmoment Punkt 1 fällt die Spannung über der Röhre auf die Brennspannung ab (Punkt 1'). Sinkt die angelegte Spannung unter den Wert der Brennspannung ab, so erlischt die Röhre (Punkt 2). Da die E.M.K. der Batterie während der positiven Halbwelle gegen die Transformatorspannung

gerichtet ist, werden in der graphischen Darstellung Zünd- und Brennspannung um den Betrag der E.M.K. nach oben verschoben. Die Zeichnung zeigt, dass nur während einer kurzen Zeit ein Strom fließt. Die schraffierte Fläche ist klein im Verhältnis zur positiven Halbwelle, sie deutet auf einen geringen Stromfluss hin. Will man den Ladestrom vergrößern, so muss man die Sekundärspannung des Transformators erhöhen.

3. Schritt: Ermitteln der Sperrspannung

- Bedingung: Während der negativen Halbwelle liegt an der Röhre die Sperrspannung. Diese setzt sich aus der E.M.K. der Batterie und dem Spitzenwert der negativen Halbwelle zusammen.
- Bedingung in eine Formel kleiden:
- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$U_{\text{sperr}} = U_{\text{ss}} + E$$

$$U_{\text{sperr}} = 25,5 \cdot \sqrt{2} + 12$$

$$U_{\text{sperr}} = 48 \text{ V}$$

Das Zustandekommen der Sperrspannung ist aus Bild 361 ersichtlich.

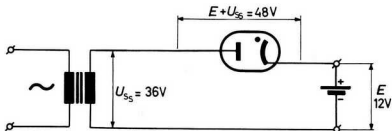


Bild 361

4. Das Wesentliche

Die *Glimmröhre* ist die einfachste Ionenröhre, sie besteht aus zwei Elektroden die sich in einem gasgefüllten Glaskolben gegenüberstehen. Die Zündspannung löst die Stossionisation aus, die Röhre wird leitend. Über der gezündeten Röhre stellt sich die Brennspannung ein, sie ist sehr stabil und vom Röhrenstrom praktisch unabhängig. Die Röhre eignet sich deshalb als Spannungsstabilisator. Der Wechselstrominnenwiderstand der Röhre ist sehr klein. Glimmröhren eignen sich für Gleich- und Wechselstrombetrieb. Sie müssen immer mit einem Vorwiderstand zur Strombegrenzung betrieben werden.

Die *Relaisröhre* benötigt keine Heizung, sie arbeitet mit kalter Katode. Das aus Katode, Anode und Starteranode bestehende Elektrodensystem befindet sich in einem gasgefüllten Glaskolben. Die Zündung der Röhre wird über den Starter eingeleitet. Zur Löschung muss der Anodenstromkreis unter-

brochen werden. Zwischen der Löschung der Röhre und der nächsten Zündung muss eine Zeitspanne liegen, die mindestens der Entionisierungszeit entspricht. Relaisröhren sind wartungsfrei und eignen sich deshalb besonders für Überwachungsanlagen.

Das *Thyratron* ist eine gasgefüllte Röhre, bestehend aus geheizter Katode, Steuergitter und Anode. Die Zündung der Röhre wird durch das Steuergitter eingeleitet. Zur Löschung muss die Anodenspannung unter die Bogenspannung abgesenkt werden. Das zur Zündung notwendige Verhältnis von Anodenspannung zu Gitterspannung ergibt graphisch dargestellt die Steuerkennlinie. Thyratrons werden als gesteuerte Gleichrichter bei der Drehzahlregelung von Gleichstrommotoren usw. verwendet.

Das *Ignitron* ist für sehr hohe Ströme geeignet. Das Elektrodenystem besteht aus einer Quecksilberkatode, dem Zündstift und einer Anode. Die Zündung kann nur erfolgen, wenn etwas Quecksilber verdampft wird. Zu diesem Zweck wird ein Spannungsimpuls an den Zündstift gelegt, der kurzzeitig fließende grosse Strom leitet die Ionisation ein. Das Ignitron kann nur gelöscht werden, indem man die Anodenspannung unter den Wert der Bogenspannung absinken lässt. Ignitrons werden überall dort eingesetzt, wo sehr hohe Ströme geschaltet werden müssen.

Die *Gasdiode* ist eine Quecksilberdampfgleichrichterröhre mit geheizter Katode. Bei Erreichen der Zündspannung setzt die Ionisation ein. Gasdioden haben einen besseren Wirkungsgrad als Vakuumdioden, auch sind die erreichbaren Stromwerte bedeutend grösser.

5. Repetitionsaufgaben (Lösung Seite 494)

- Was verstehen Sie unter dem Begriff «Stossionisation»?
- Erklären Sie den Unterschied zwischen Zündspannung und Brenns spannung einer Ionenröhre.
- Was hat die Löschspannung für eine Bedeutung?
- Zeichnen Sie das *U-I*-Diagramm für eine Glimmröhre auf. Bezeichnen Sie darin die charakteristischen Strom- und Spannungswerte.
- Zeichnen Sie das Prinzipschaltbild eines einfachen Gleichspannungsstabilisators mit einer Glimmröhre.
- Beschreiben Sie den Unterschied zwischen einer Relaisröhre und einem Thyatron.
- Zeichnen Sie die Steuerkennlinien für ein Thyatron unter Berücksichtigung der auftretenden Streuungen.
- Die Integrationszeit eines Thyratrons wird mit 3 s angegeben. Der Anodenspitzenstrom beträgt 25 A. Der maximale mittlere Anodenstrom darf 6 A nicht überschreiten. Das Thyatron wird periodisch alle 5 s für die Dauer von 2 s gezündet. Wie gross ist der zulässige Anodenstrom während diesen 2 s Brenndauer.
- Welche Bedeutung hat die Entionisierungszeit eines Thyratrons in bezug auf die Bemessung einer Schaltung?
- Erklären Sie den Zündvorgang des Ignitrons.
- Wo werden Ignitronen hauptsächlich verwendet?
- Welche Vorteile weisen Gasdioden gegenüber Vakuumdioden auf?

VII. Die Katodenstrahlröhre

1. Einführung

Die Katodenstrahlröhre – oft auch Elektronenstrahlröhre genannt – ermöglicht das Sichtbarmachen elektrischer Vorgänge. Ein Elektronenstrahl zeichnet elektrische Spannungsänderungen auf einem Bildschirm praktisch trägeheitslos nach. Elektronenstrahlröhren sind deshalb hauptsächlich in Messgeräten anzutreffen. Im Elektronenstrahloszillograf erlaubt sie die Aufzeichnung elektrischer Vorgänge aller Art. Radargeräte wären ohne Katodenstrahlröhre undenkbar, da die Röhre das überwachte Gebiet auf dem Bildschirm festhält. Grössere Übermittlungsanlagen sind oft mit Katodenstrahlröhren zur Betriebsüberwachung ausgerüstet. Das Herz eines jeden Fernsehgerätes ist eine Katodenstrahlröhre, auf welcher das Bild erscheint. Diese Aufzählung zeigt, dass die Katodenstrahlröhre unter den Bauteilen der Elektronik einen wichtigen Platz einnimmt.

2. Was wissen Sie schon über Katodenstrahlröhren?

(Lösung Seite 497)

- a) Welches sind die wichtigsten Elemente im Elektroden-system der Katodenstrahlröhre?
- b) Was ist eine Bildröhre mit statischem Ablensystem?
- c) Wie arbeitet eine Röhre mit magnetischer Strahlablenkung?
- d) Welches häufig verwendete Messgerät der Elektrotechnik arbeitet mit einer Katodenstrahlröhre?

3. Die Katodenstrahlröhre

a) Definition

Die *Katodenstrahlröhre* ist eine Elektronenröhre, die mit ihrem Elektroden-system einen scharf gebündelten Strahl erzeugt, welcher auf einem Bildschirm als Punkt abgebildet wird. Die Lage dieses Bildpunktes kann durch elektrostatische oder elektromagnetische Ablenkung des Strahles verändert werden. Der Strahl kann zusätzlich durch eine Spannung in seiner Helligkeit gesteuert werden.

b) Symbol

Bild 362 zeigt das Symbol einer einfachen Katodenstrahlröhre.

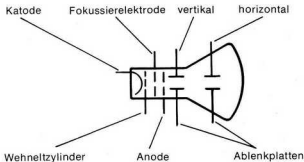


Bild 362

c) Aufbau

In Bild 363 erkennen wir den Aufbau einer Elektronenstrahlröhre.

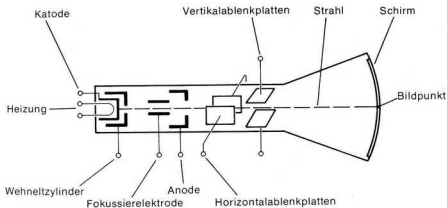


Bild 363

Die Elektronenstrahlröhre besteht aus einem Elektrodensystem, das einen scharf gebündelten Strahl erzeugt, einem Elektrodensystem oder Ablenkspulen zur Ablenkung des Strahles und dem Bildschirm, auf welchem der Strahl sichtbar gemacht wird. Das System zur Strahlerzeugung – die sogenannte *Elektronenkanone* – besteht aus einer indirekt geheizten Katode, einem zylinderförmigen Steuergitter und einer *Elektronenoptik*. Die Katode wird aus einem Nickelröhrchen gebildet, das an der Stirnseite die emittierende Schicht trägt. Die Katode ist von einem zylinderförmigen Steuergitter

umgeben. An der Stirnseite dieses Zylinders – *Wehneltzylinder* genannt – befindet sich ein kleines Loch, aus welchem der Strahl austreten kann. Am Wehneltzylinder liegt eine einstellbare negative Spannung, die es ermöglicht, den Elektronenstrom in seiner Intensität zu steuern, und damit die Helligkeit des Bildpunktes zu regeln. Der aus dem Wehneltzylinder kommende Strahl hat infolge der abstossenden Wirkung, die die Elektronen aufeinander ausüben, die unerwünschte Tendenz zur Streuung. Ein Elektronenstrahl kann, wie ein Lichtstrahl in der Optik, gebündelt und abgelenkt werden. An Stelle von Linsen treten magnetische und elektrische Felder. Katodenstrahlröhren, wie sie in der Messtechnik verwendet werden, arbeiten meistens mit elektrischen Feldern zur Ablenkung und Bündelung des Strahles. Die *Elektronenoptik* besteht aus zwei zylinder- oder ringförmigen Elektroden. Die erste Elektrode liegt an einer positiven veränderlichen Spannung. Sie dient der Fokussierung – das heisst der Scharfeinstellung – des Bildpunktes. Sie wird deshalb *Fokussierelektrode* genannt. Die zweite Elektrode übernimmt die Funktion einer Anode, sie liegt an einem hohen positiven Potential und dient unter anderem der Beschleunigung des Elektronenstrahls. Die Potentialunterschiede zwischen Fokussierelektrode und Anode verursachen elektrostatische Felder, diese wirken auf den Elektronenstrahl wie Linsen auf den Lichtstrahl. Die Fokussierelektrode wirkt zusammen mit der Anode wie ein Brennglas, das das Sonnenlicht auf einen Punkt konzentriert. Der Elektronenstrahl wird auf den Bildschirm fokussiert. Die Bildschärfe wird mit Hilfe der Spannung an der Fokussierelektrode eingestellt.

Der gebündelte Strahl durchläuft den Ablenkraum, bevor er auf den Bildschirm auftrifft. Im Ablenkraum wirkt das elektrische Feld zwischen zwei Ablenkplattenpaaren auf den Strahl ein. Ein Plattenpaar lenkt den Strahl in horizontaler Richtung ab, das andere bewirkt die Ablenkung in vertikaler Richtung. Legt man an eine Platte ein positives Potential, so wird der Strahl nach dieser Seite hin ausgelenkt. Mit einer variablen Gleichspannungsquelle an jedem Plattenpaar lässt sich der Bildpunkt in jede beliebige Lage auf dem Bildschirm bringen. Bild 364 zeigt diese Möglichkeiten.

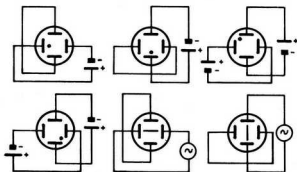


Bild 364

Der Elektronenstrahl trifft mit so grosser Geschwindigkeit auf das Schichtmaterial des Bildschirms auf, dass dieses aufleuchtet. Die Farbe der Aufzeichnung wird durch die Eigenschaften des Leuchtmaterials bestimmt.

d) Wirkungsweise

Das Funktionsprinzip der Katode weicht grundsätzlich nicht von demjenigen einer gewöhnlichen indirekt geheizten Katode ab. Die aktive Schicht der Katode der Katodenstrahlröhre ist nur auf der Stirnseite des zylinderförmigen Katodenröhrchens angebracht. Dank dieser Massnahme kann der Katodenstrahl nur nach vorne austreten. Der Wehneltzylinder lässt sich in seiner Wirkung auf den Katodenstrahl mit dem Steuergitter einer Verstärkerröhre vergleichen. Das negative Potential am Wehneltzylinder erlaubt eine Veränderung der Bildhelligkeit, indem damit die Intensität des Strahls gesteuert wird. Die fokussierende Wirkung der Elektronenoptik beruht auf dem Einfluss, den elektrische Feldlinien auf einen Elektronenstrahl ausüben. Der Strahl wird durch ein elektrisches Feld abgelenkt. Die Strahlablenkung durch die Elektronenoptik wird in Bild 365 gezeigt.

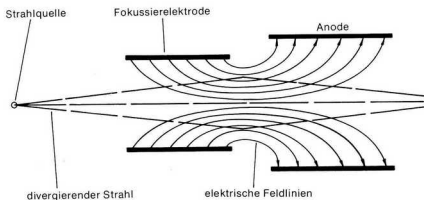


Bild 365

Durch den Potentialunterschied zwischen der Fokussierelektrode und der Anode entsteht ein elektrostatisches Feld, dessen Kraftlinien in Bild 365 angedeutet sind. Diese Kraftlinien verursachen die gewünschte Bündelung des divergierenden Katodenstrahles. Die Form des Kraftlinienverlaufes hängt vom Potentialunterschied zwischen den beiden Elektroden ab. Ändert man die Spannung an der Fokussierelektrode, so ändert sich der Verlauf der Kraftlinien und damit der Grad der Strahlablenkung. Die Spannung an der Fokussierelektrode wird so gewählt, dass die Elektronen des Strahles alle im gleichen Punkt auf dem Bildschirm auftreffen.

Den *Ablenkplatten* fällt die Aufgabe zu, den Strahl in der horizontalen und in der vertikalen Richtung abzulenken. Bild 366 zeigt den Ablenkvorgang.

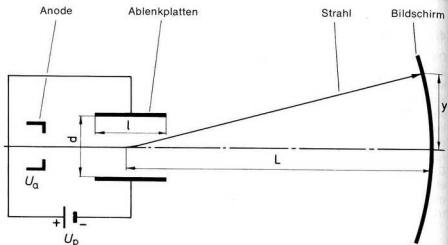


Bild 366

Die Strahlablenkung Y hängt von den geometrischen Abmessungen des Elektrodensystems, von der Anodenspannung und von der Spannung an der Ablenkplatte ab. Die Strahlablenkung erfolgt *proportional* zur Spannung an den Ablenkplatten.

$$Y = \frac{1 \cdot L \cdot U_p}{2d \cdot U_a}$$

e) Technische Daten

Ablenkempfindlichkeit A_E

Die *Ablenkempfindlichkeit* entspricht dem Quotienten aus Ablenkung und Spannung an den Ablenkplatten.

$$A_E = \frac{Y}{U_p}; [A_E] = \frac{\text{cm}}{\text{V}}$$

Y = Ablenkung

U_p = Spannung an den Ablenkplatten

Ablenkfaktor A_F

Der *Ablenkfaktor* ist der Reziprokwert der Ablenkempfindlichkeit.

$$A_F = \frac{U_p}{Y}; [A_F] = \frac{\text{V}}{\text{cm}}$$

In der Praxis ist es üblich, mit dem Ablenkfaktor zu arbeiten. Dieser ist nicht für beide Plattenpaare gleich gross. Das Plattenpaar, das näher bei der Katode liegt, weist einen kleineren Ablenkfaktor auf. In Tabelle 18 sind die technischen Daten einer typischen Katodenstrahlröhre für Messzwecke zusammengestellt.

Typ : DG 7 – 12c

Heizspannung U_f	6,3	V
Heizstrom I_f	0,3	A
Anodenspannung U_a	2000	V
Spannung an der Fokussierelektrode	150 ... 250	V
Spannung am Wehneltzylinder U_{g_1}	-40 ... -75	V
Ablenkfaktor für die katodenseitigen Platten $A_{F_{pk}}$	65 ... 92	V/cm
Ablenkfaktor für schirmseitige Platten $A_{F_{ps}}$	82 ... 125	V/cm
Ausnutzbare Auslenkung	65	mm

Tabelle 18

4. Beispiel

Die Oszillografenröhre DG 7-12c aus Tabelle 18 wird in einem Oszillografen zur Sichtbarmachung von Wechselspannungen verwendet. Mit den angelegten Speisespannungen ergeben sich folgende Ablenkfaktoren:

- $A_{F_{pk}} = 80 \text{ V/cm}$
- $A_{F_{ps}} = 110 \text{ V/cm}$

Dem schirmseitigen horizontalen Ablenkplattenpaar wird eine Sägezahnspannung nach Bild 367 zugeführt.

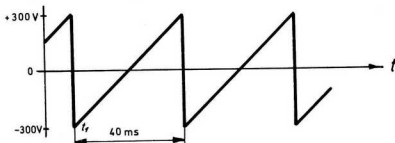


Bild 367

An das katodenseitige Plattenpaar wird eine sinusförmige Wechselspannung von 50 Hz, $120 \text{ V}_{\text{eff}}$ gelegt. Das Bild auf der Oszillografenröhre ist im Massstab 1:1 zu zeichnen für den Fall, dass t_1 mit dem Beginn der Sinusschwingung zusammenfällt.

Vorgehen:

1. Schritt: Kreis mit dem Durchmesser der ausnutzbaren Auslenkung zeichnen.

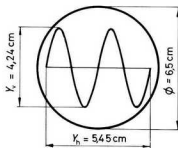


Bild 368

2. Schritt: Horizontalauslenkung berechnen.

– Formel anschreiben

$$A_{I_{ps}} = \frac{U_p}{Y_h}$$

– nach Y_h umstellen

$$Y_h = \frac{U_p}{A_{I_{ps}}}$$

– Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$Y_h = \frac{600}{110} \frac{\text{V}}{\text{V/cm}}$$

$$Y_h = \mathbf{5,45 \text{ cm}}$$

– Ablenkung in Bild 368 einzeichnen

3. Schritt: Vertikalauslenkung berechnen

– Formel anschreiben

$$A_{I_{ps}} = \frac{U_p}{Y_v}$$

– nach Y_v umstellen

$$Y_v = \frac{U_p}{A_{I_{ps}}}$$

– Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$Y_v = \frac{120 \cdot 2 \cdot \sqrt{2}}{80} \frac{\text{V}}{\text{V/cm}}$$

$$Y_v = \mathbf{4,24 \text{ cm}}$$

– Auslenkung in Bild 368 einzeichnen

4. Schritt: Konstruktion des Bildes auf dem Oszillografen

Da die Zeit für die Horizontalauslenkung 40 ms beträgt und eine Periode der 50 Hz-Sinusspannung 20 ms dauert, werden zwei volle Schwingungen dargestellt.

5. Das Wesentliche

Katodenstrahlröhren dienen zur Sichtbarmachung elektrischer Vorgänge. Das Elektrodensystem der Röhre besteht aus einer Katode als Elektronenquelle, einem Wehneltzylinder zur Einstellung der Intensität des Strahles, einer Elektronenoptik zur Strahlfokussierung, je einem Plattenpaar für die Vertikal- und Horizontalablenkung und einem Bildschirm zur Sichtbarmachung des Strahles.

Die Helligkeit (Strahlintensität) lässt sich durch Verändern der negativen Spannung am Wehneltzylinder auf den gewünschten Wert einstellen.

Die Scharfeinstellung (Fokussierung) des Bildes erfolgt mit Hilfe einer regelbaren Spannung an der Elektronenoptik. In Katodenstrahloszillografen lassen sich diese Spannungswerte über Bedienungspotentiometer einstellen.

Der Strahl wird in Röhren mit elektrostatischer Ablenkung in horizontaler und vertikaler Richtung durch je ein Ablenkplattenpaar abgelenkt.

Der Ablenkfaktor entspricht dem Verhältnis von Ablenkspannung zu Strahlablenkung, er wird in Volt pro Zentimeter angegeben. Die für eine bestimmte Strahlablenkung notwendige Ablenkspannung wird durch den Ablenkfaktor bestimmt.

6. Repetitionsaufgaben (Lösung Seite 497)

- Die Bildhelligkeit von Elektronenstrahlröhren kann variiert werden. Erklären Sie den Vorgang.
- Erklären Sie die Einrichtung, die die Fokussierung des Strahles ermöglicht.
- An das horizontale Ablenkplattenpaar einer Bildröhre wird eine Gleichspannung von 250 V gelegt. Der Leuchtpunkt wird von der Mitte aus 4 cm nach rechts abgelenkt. Welche Polarität der Spannungsquelle lag an der rechten Platte? Bestimmen Sie den Ablenkfaktor der Röhre.
- Sie betrachten auf einer Bildröhre die Figur nach Bild 369.

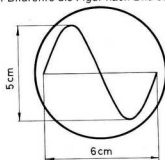


Bild 369

Der Ablenkfaktor für das horizontale Plattenpaar beträgt 70 V/cm, derjenige für die Vertikalablenkplatten 60 V/cm. Die Frequenz des Signals an den Vertikalplatten beträgt 150 kHz. Zeichnen Sie im Liniendiagramm die Spannungen an den horizontalen und an den vertikalen Ablenkplatten. Geben Sie die dazugehörigen Amplituden- und Zeitwerte an.

VIII. Röhrenbezeichnungen

1. Einführung

In Europa werden die Elektronenröhren einheitlich bezeichnet. Die Typenbezeichnung einer Röhre gibt Auskunft über die Heizung und das Röhrensystem.

Der Schlüssel für die Röhrenbezeichnungen ist in Tabelle 19 zusammengestellt.

2. Schlüssel für die Typenbezeichnung von Vakuumröhren

1. Buchstabe: Heizung		Weitere Buchstaben: Elektrodensystem	
A	4 V	A	Diode (Hochfrequenzgleichrichter)
B	180 mA	B	Doppeldiode (Hochfrequenzgleichrichter)
C	200 mA	C	Triode (Spannungsverstärker)
D	1,2 V	D	Triode (Leistungsverstärker)
E	6,3 V	E	Tetrode (Spannungsverstärker)
F	12,6 V	F	Pentode (Spannungsverstärker)
H	150 mA	H	Hexode, Heptode
K	2 V	K	Oktode
L	—	L	Pentode, Tetrode (Leistungsverstärker)
M	2,4 .. 2,8 V	M	Leuchtschirmröhre (Magisches Auge)
P	300 mA	P	—
U	100 mA	U	—
V	50 mA	V	—
X	600 mA	X	Gasgefüllte Doppelweggleichrichterröhre
Y	450 mA	Y	Einweg-Netzgleichrichter
Z	Kaltkatode	Z	Zweiweg-Netzgleichrichter

Tabelle 19

3. Beispiele

ECH 21 = Triode-Hexode mit 6,3 V Heizspannung, die Zahl 21 bezeichnet eine bestimmte Serie mit einem bestimmten Röhrensockel

PCC 88 = Doppeltriode für Spannungsverstärkung mit 300 mA Heizstrom

UF 85 = Pentode für Spannungsverstärkung mit 100 mA Heizstrom

PL 82 = Pentode für Leistungsverstärkung mit 300 mA Heizstrom

(Antworten zu den Fragen im Text)

1. Was wissen Sie schon über die Materie?

Antworten zu den Fragen a bis f (Seite 11)

- a) Die Ladung eines Elektrons ist negativ.
- b) Protonen kommen hauptsächlich in Atomkernen vor.
- c) Ja, im Atomkern sind auch Neutronen anzutreffen.
- d) Das Atom ist die kleinste Einheit eines chemischen Elementes.
- e) Ja, die Ionen ermöglichen erst den Stromfluss durch die Gasentladungsröhren.
- f) Ja, Sauerstoff ist ein chemisches Element (O = Oxygenium). Sauerstoff ist das am meisten verbreitete Element, ist gasförmig und bildet einen wesentlichen Bestandteil der Luft, die unseren Erdball umgibt.

Bewertung:

5 oder 6 richtige Antworten:	Sie wissen schon gut Bescheid über den Aufbau der Materie. Das Studium des gebotenen Stoffes wird Ihr Wissen festigen.
3 oder 4 richtige Antworten:	Der gebotene Stoff wird Ihnen sicher nicht fremd sein, dank Ihrem Wissen werden Sie diesen spielend verarbeiten.
1 oder 2 richtige Antworten:	Sie haben schon etwas über den Aufbau der Materie gehört, es wird Sie sicher interessieren, Ihr Wissen zu vervollständigen. Studieren Sie die folgenden Kapitel gründlich.
Keine richtige Antwort:	Sie betreten Neuland. Lesen Sie den Stoff mehrmals durch, sicher wird in Ihnen das Interesse wach. Sie brauchen grundsätzlich keine Vorkenntnisse, um das gebotene Wissen zu verarbeiten. Arbeiten Sie sich langsam und gründlich in das neue Gebiet ein. Sie werden bald feststellen, dass Sie in der Lage sind, den Stoff zu verarbeiten. Der Gewinn an Wissen wird Ihnen Freude bereiten.

2. Repetitionsaufgaben zu «I. Das Wesen der Materie»

Antworten zu den Fragen a bis I (Seite 15)

- a) Das Molekül ist das kleinstmögliche selbständige Gebilde eines Stoffes

b)

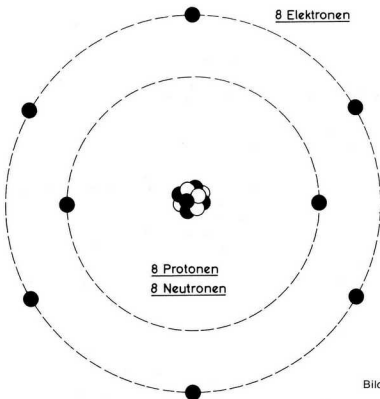


Bild zu 2 b

- c) Ein chemisches Element ist ein Grundstoff. Dieser Grundstoff setzt sich aus gleich aufgebauten Atomen zusammen.
- d) Es gibt etwas über hundert chemische Elemente.
- e) Die drei wichtigsten Elementarteilchen sind:
Elektron, negativ geladen, etwa zweitausendmal leichter als das Proton.
Proton, gleich grosse Ladung wie das Elektron, die Ladung ist positiv.
Neutron, ungefähr gleich schwer wie das Proton, keine Ladung.
- f) Wenn das Ladungsgleichgewicht zwischen der Kernladung und der Ladung der Elektronen, die diesen Kern umkreisen, gestört ist, entstehen Ionen.
- g) Anionen sind negativ geladene Ionen, das Atom weist einen Elektronenüberschuss auf.
Kationen sind positiv geladene Ionen, das Atom weist einen Mangel an Elektronen auf.

- h) Die Ionen spielen in der Elektrotechnik hauptsächlich bei der Elektrolyse und den gasgefüllten Röhren eine Rolle.
- i) Die positiv geladenen Protonen werden durch Kernkräfte zusammengehalten. Diese Kernkräfte sind weitaus wirksamer als die elektrischen Abstosungskräfte.
- k) Auf die kreisenden Elektronen wirken zwei Kräfte. Es sind dies die elektrischen Anziehungskräfte der Protonen des Kerns und die Fliehkraft. Beide Kräfte sind gleich gross, wirken entgegengesetzt und heben sich dadurch auf.
- l) Ja, es sind bis heute ca. zehn Elementarteilchen bekannt.

Falls Sie auf alle elf Fragen die richtige Antwort gegeben haben, können Sie mit dem Studium des nächsten Abschnittes beginnen.

Sollten Sie jedoch in der Beantwortung Fehler gemacht haben, so lesen Sie den betreffenden Stoff noch einmal langsam durch. Sie dürfen sich erst dann den nächsten Seiten zuwenden, wenn Sie alle Fragen beantworten können. Denken Sie jedoch daran, dass auswendig gelernte Antworten keinen grossen Wert aufweisen und wieder vergessen werden. Sie müssen den Stoff wirklich begriffen haben. Wer weiterliest, ohne das gebotene Wissen verarbeitet zu haben, der baut auf Sand. Sie erarbeiten sich in den ersten Abschnitten die Grundlagen!

3. Was wissen Sie schon über die Elektrizität?

Antworten zu den Fragen a bis f (Seite 16)

- a) Ja, Kupfer ist ein guter elektrischer Leiter.
- b) Ein Isolator leitet den elektrischen Strom nicht.
- c) Im metallischen Leiter sind die Elektronen die Träger des elektrischen Stromes.
- d) Im elektrischen Stromkreis sind die Spannungsquellen die Ursache des Stromflusses. Die häufigsten Spannungsquellen sind die Trockenbatterie, der Akkumulator und der Generator.
- e) Ein elektrischer Stromfluss in Gasen ist möglich. Am Stromfluss können sowohl Elektronen wie Ionen beteiligt sein. Als praktisches Beispiel sei die Neonröhre erwähnt.
- f) Die bekanntesten Beispiele für den Stromfluss in Flüssigkeiten finden wir beim Akkumulator und in der Galvanotechnik beim Galvanisieren.

Bewertung:

5 oder 6

richtige Antworten:

3 oder 4

richtige Antworten:

Sehr gut, lesen Sie trotzdem den Stoff gründlich durch, man hat nie ausgelernt.

Sie verfügen über die notwendigen Vorkenntnisse, um den neuen Stoff zu verstehen und zu verarbeiten.

Weniger als 3
richtige Antworten:

Lesen Sie den Stoff über das Wesen der Materie noch einmal gründlich durch, er gibt Ihnen die Antwort auf 3 der gestellten Fragen. Denken Sie daran, wer kein Fundament hat, der wird sich nie ein solides Wissen erwerben.

4. Repetitionsfragen zu «II. Elektrizität»

Antworten zu den Fragen a bis h (Seite 18)

- a) Unter Elektronengas versteht man die Gesamtheit der in einem Leiter vorhandenen, sich frei bewegenden Elektronen.
- b) Ein Leiter weist eine Vielzahl freier Elektronen auf, er leitet den elektrischen Strom gut, ein Nichtleiter dagegen verfügt über keine freien Elektronen, er leitet deshalb den elektrischen Strom nicht.
- c) Aus Halbleitermaterialien werden Transistoren und Halbleiterdioden hergestellt. Diese Bauteile haben der Elektronik ungeahnte Entwicklungsmöglichkeiten gegeben.
- d) Damit ein elektrischer Strom fließen kann, muss eine Potentialdifferenz vorhanden sein, die beiden verschiedenen Potentiale müssen über einen Leiter miteinander verbunden werden.
- e) Die Träger des elektrischen Stromes sind Elektronen und Ionen.
- f) In festen Körpern wird der elektrische Strom durch einen Elektronenfluss dargestellt, in Flüssigkeiten dagegen durch wandernde Ionen.
- g) In einem guten Leiter pflanzt sich die Wirkung des elektrischen Stromes annähernd mit Lichtgeschwindigkeit fort.
- h) Elektrische Potentialdifferenzen werden vorwiegend in Trockenbatterien, Akkumulatoren und Generatoren erzeugt.

Acht richtige Antworten geben Ihnen «grünes Licht» für das Studium des nächsten Abschnittes.

Wer nicht alle Fragen sinngemäss richtig beantwortet hat, der sollte den Stoff noch einmal durcharbeiten. Was zu Beginn des Studiums verloren geht, das lässt sich später nur schwer nachholen.

5. Was wissen Sie schon über den elektrischen Stromkreis?

Antworten zu den Fragen a bis g (Seite 19)

- a) Wenn sich in einem Leiter Elektronen oder Ionen in einer gemeinsamen Richtung bewegen, so sprechen wir von einem elektrischen Strom.
- b) Damit ein elektrischer Strom fließen kann, muss eine Potentialdifferenz vorhanden sein und der Stromkreis muss geschlossen sein.
- c) Die Potentialdifferenz ist die eigentliche Ursache für das Fließen eines elektrischen Stromes.

- d) Die elektrische Spannung wird mit der Einheit «Volt» gemessen.
- e) Das ohmsche Gesetz gibt Auskunft über den Zusammenhang von Spannung, Strom und Widerstand im geschlossenen Stromkreis. Die Grundformel lautet $U = I \cdot R$
- f) Die Einheit für den elektrischen Widerstand ist das «Ohm».
- g) Sie brennt dann durch, wenn ein Strom fliesst, der grösser ist als der Nennstrom der Sicherung. Sie schützt damit Leitungen und Bauelemente vor Überstrom.

Bewertung:

- | | |
|---------------------|---|
| 6 oder 7 | Sehr gut, Sie wissen gut Bescheid. Die Rechenbeispiele werden Ihr Wissen noch festigen. |
| richtige Antworten: | |
| 4 oder 5 | Sie haben gute Vorkenntnisse, der neue Stoff wird Sie sicher interessieren: Arbeiten Sie vor allem die Rechnungsbeispiele gründlich durch. Einiges dürfte für Sie ganz neu sein, gehen Sie mit Schwung an die Verarbeitung des neuen Abschnittes. |
| richtige Antworten: | |
| Weniger als 3 | Halt, Sie dürfen nicht weiterlesen. Sie haben den Stoff über «II. Die Elektrizität» noch nicht verarbeitet. Lesen Sie den vorhergehenden Abschnitt nochmals gründlich durch, dann werden Sie in der Lage sein, die ersten drei Fragen richtig zu beantworten. |
| richtige Antworten: | |

6. Repetitionsaufgaben zu «III. Der elektrische Stromkreis»

Antworten zu den Fragen a bis h (Seite 30)

- a) Die vier Einheiten für die Bedürfnisse der Elektronik im Giorgi-System sind: Meter, Sekunde, Kilogramm und Ampère.
- b) $1 \mu\text{A} = 1 \cdot 10^{-6} \text{ A}$ $1 \mu\text{V} = 1 \cdot 10^{-6} \text{ V}$
 $1 \text{ mA} = 1 \cdot 10^{-3} \text{ A}$ $1 \text{ mV} = 1 \cdot 10^{-3} \text{ V}$
 $1 \text{ kA} = 1 \cdot 10^3 \text{ A}$ $1 \text{ kV} = 1 \cdot 10^3 \text{ V}$
 $1 \text{ MA} = 1 \cdot 10^6 \text{ A}$ $1 \text{ MV} = 1 \cdot 10^6 \text{ V}$
- c) Der Leitwert ist der Kehrwert des Widerstandswertes. Er wird in «Siemens» gemessen.
- d) Die elektrische Leistung wird in «Watt» gemessen. Ein Watt entspricht 1 Volt mal 1 Ampère.
- e) Die Spannung entspricht dem Druck des Wasserkreislaufes, sie wird in «Volt» gemessen. Der Strom entspricht der geflossenen Wassermenge pro Zeiteinheit, er wird in «Ampère» gemessen. Der Widerstand entspricht dem Reibungswiderstand der Wasserleitung, seine Masseinheit ist das «Ohm».

f) Vorgehen:

1. Schritt: Ermitteln der Spannung U

– Grundformel anschreiben

$$U = I \cdot R$$

– Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$U = 20 \cdot 10^{-3} \cdot 12 \cdot 10^3$$

$$U = 240 \text{ V}$$

$$\frac{\text{A} \cdot \text{V}}{\text{A}}$$

2. Schritt: Ermittlung der Leistung P

- Grundformel anschreiben
- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$P = U \cdot I$$

$$P = 240 \cdot 20 \cdot 10^{-3} \text{ VA}$$

$$P = 4,8 \text{ W}$$

3. Schritt: Berechnung der Arbeit

- Grundformel anschreiben
- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$W = P \cdot t$$

$$W = 4,8 \cdot \frac{25}{60} \text{ Wh}$$

$$W = 2,0 \text{ Wh}$$

4. Schritt: Berechnung des Leitwertes

- Grundformel anschreiben
- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$G = \frac{1}{R}$$

$$G = \frac{1}{12 \cdot 10^3} \text{ S}$$

$$G = 0,083 \cdot 10^{-3} \text{ S}$$

$$G = 83,3 \mu\text{S}$$

g) Vorgehen:

1. Schritt: Berechnung der Leistung in R_1

- Grundformel anschreiben
- Ohmsches Gesetz nach I aufgelöst anschreiben
- Ausdruck für I in Grundformel einsetzen
- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$P = U \cdot I$$

$$I = \frac{U}{R}$$

$$P = \frac{U^2}{R}$$

$$P = \frac{20 \cdot 20}{10 \cdot 10^3} \frac{\text{V} \cdot \text{V} \cdot \text{A}}{\text{V}}$$

$$P = 40 \cdot 10^{-3} \text{ W}$$

$$P = 40 \text{ mW}$$

2. Schritt: Berechnung des Stromes I_2

- Grundformel anschreiben
- Grundformel nach I umstellen
- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$U = I \cdot R$$

$$I_2 = \frac{U}{R_1}$$

$$I_2 = \frac{20}{10 \cdot 10^3} \frac{\text{VA}}{\text{V}}$$

$$I_2 = 2 \cdot 10^{-3} \text{ A}$$

$$I_2 = 2 \text{ mA}$$

3. Schritt: Berechnung des Stromes I_3
- Grundformel anschreiben
 - Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$I_3 = I_1 - I_2$$

$$I_3 = 6 - 2 \text{ mA}$$

$$I_3 = 4 \text{ mA}$$

4. Schritt: Berechnung von R_2
- Grundformel anschreiben
 - Grundformel nach R umstellen
 - Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$U = I \cdot R$$

$$R_2 = \frac{U}{I_3}$$

$$R_2 = \frac{20}{4 \cdot 10^{-3}} \quad \frac{\text{V}}{\text{A}}$$

$$R_2 = 5 \cdot 10^3 \Omega$$

$$R_2 = 5 \text{ k}\Omega$$

5. Schritt: Berechnung der Leistung in R_2
- Grundformel anschreiben
 - Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$P = U \cdot I$$

$$P = 20 \cdot 4 \cdot 10^{-3} \text{ VA}$$

$$P = 80 \cdot 10^{-3} \text{ W}$$

$$P = 80 \text{ mW}$$

h) Vorgehen:

1. Schritt: Berechnung von R_1
- Grundformel anschreiben
 - Grundformel nach R umstellen
 - Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$U = I \cdot R$$

$$R_1 = \frac{U_1}{I_1}$$

$$R_1 = \frac{125}{25 \cdot 10^{-3}} \quad \frac{\text{V}}{\text{A}}$$

$$R_1 = 5 \cdot 10^3 \Omega$$

$$R_1 = 5 \text{ k}\Omega$$

2. Schritt: Berechnung des Stromes I_3
- Grundformel anschreiben
 - Grundformel nach I_3 umstellen
 - Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$I_1 = I_2 + I_3$$

$$I_3 = I_1 - I_2$$

$$I_3 = 25 - 10 \text{ mA}$$

$$I_3 = 15 \text{ mA}$$

3. Schritt: Berechnung von R_2
- Grundformel anschreiben
 - Grundformel nach R umstellen
 - Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$U = I \cdot R$$

$$R_2 = \frac{U_2}{I_3}$$

$$R_2 = \frac{150}{15 \cdot 10^{-3}} \quad \frac{\text{V}}{\text{A}}$$

$$R_2 = 10 \cdot 10^3 \Omega$$

$$R_2 = 10 \text{ k}\Omega$$

4. Schritt: Berechnung der Spannung an R_3

- Grundformel anschreiben
- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$U = I \cdot R$$

$$U_{R_3} = I_2 \cdot R_3$$

$$U_{R_3} = 10 \cdot 10^{-3} \cdot 10 \cdot 10^3 \text{ A}\Omega$$

$$U_{R_3} = \mathbf{100 \text{ V}}$$

5. Schritt: Berechnung der Spannung U_4

- Grundformel anschreiben
- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$U_4 = U_2 - U_{R_3}$$

$$U_4 = 150 - 100 \text{ V}$$

$$U_4 = \mathbf{50 \text{ V}}$$

6. Schritt: Berechnung von R_4

- Grundformel anschreiben
- Grundformel nach R umstellen
- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$U = I \cdot R$$

$$R_4 = \frac{U_4}{I_2}$$

$$R_4 = \frac{50}{10 \cdot 10^{-3}} \quad \frac{\text{V}}{\text{A}}$$

$$R_4 = 5 \cdot 10^3 \Omega$$

$$R_4 = \mathbf{5 \text{ k}\Omega}$$

7. Schritt: Berechnung der Batteriespannung

- Grundformel anschreiben
- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$U_b = U_1 + U_2$$

$$U_b = 125 + 150 \text{ V}$$

$$U_b = \mathbf{275 \text{ V}}$$

8. Schritt: Berechnung der Leistungen in R_1 , R_2 , R_3 und R_4

- Anschreiben der Grundformel
- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$P = U \cdot I$$

$$P_{R_1} = U_1 \cdot I_1$$

$$P_{R_1} = 125 \cdot 25 \cdot 10^{-3} \text{ VA}$$

$$P_{R_1} = \mathbf{3,125 \text{ W}}$$

$$P_{R_2} = U_2 \cdot I_3$$

$$P_{R_2} = 150 \cdot 15 \cdot 10^{-3} \text{ VA}$$

$$P_{R_2} = \mathbf{2,25 \text{ W}}$$

$$P_{R_3} = U_{R_3} \cdot I_2$$

$$P_{R_3} = 100 \cdot 10 \cdot 10^{-3} \text{ VA}$$

$$P_{R_3} = \mathbf{1 \text{ W}}$$

$$P_{R_4} = U_4 \cdot I_2$$

$$P_{R_4} = 50 \cdot 10 \cdot 10^{-3} \text{ VA}$$

$$P_{R_4} = 500 \cdot 10^{-3} \text{ W}$$

$$P_{R_4} = \mathbf{500 \text{ mW}}$$

Falls Sie alle 8 Aufgaben richtig gelöst haben, so verdienen Sie Anerkennung für sehr gute Arbeit.

Die Rechnungsaufgaben bieten erfahrungsgemäss die grössten Schwierigkeiten. Das Durcharbeiten dieser Aufgaben ist jedoch für das Verständnis der Materie sehr wichtig. Nur wer in der Lage ist, einen Stromkreis zu berechnen, hat die Vorgänge richtig begriffen. Für das Lösen von Aufgaben sollte man immer nach dem gleichen Grundschema vorgehen:

1. Teilen Sie grössere Aufgaben in Teilprobleme auf.
2. Lösen Sie die einfachsten Teilprobleme zuerst.
3. Suchen Sie für die Lösung eines Teilproblems die Grundformel und stellen Sie diese nach dem gesuchten Wert um.
4. Setzen Sie die Zahlen in die umgestellte Formel ein, rechnen Sie den gesuchten Wert aus.
5. Machen Sie zu jeder Rechnung die Einheitenprobe, indem Sie rechts von der Zahlenrechnung die Einheiten anschreiben.

Um die Zahlenrechnungen zu vereinfachen, ist es zweckmässig, mit Zehnerpotenzen zu rechnen. Anstelle einer Anzahl Nullen schreibt man die Zahl ZEHN mit dem Exponenten, der der Anzahl Nullen entspricht.

Beispiel: $1000 = 1 \cdot 10^3$, $3700 = 37 \cdot 10^2$, $5670000 = 567 \cdot 10^4$

Für Zahlen, die kleiner sind als EINS, gilt eine ähnliche Regel, an Stelle einer Anzahl Nullen hinter dem Komma schreibt man die betreffende Zahl multipliziert mit der Zahl ZEHN, die mit einem negativen Exponenten versehen ist. Der Wert des negativen Exponenten entspricht der Stelle des Zahlenwertes hinter dem Komma.

Beispiele: $0,0001 = 1 \cdot 10^{-4}$, $0,0023 = 2,3 \cdot 10^{-3}$ oder $23 \cdot 10^{-4}$

Das Rechnen mit diesen Zehnerpotenzen ist zeitsparend, da sich diese in Brüchen kürzen lassen. Wir merken uns für das Rechnen mit Brüchen folgende Regel:

Zehnerpotenzen mit positivem Exponent im Zähler erscheinen im Nenner mit negativem Exponent. Zehnerpotenzen mit positivem Exponent im Nenner, erscheinen im Zähler mit negativem Exponent.

Beispiele: $\frac{5 \cdot 10^3}{7} = \frac{5}{7 \cdot 10^{-3}}$; $\frac{47 \cdot 10^{-2}}{36} = \frac{47}{36 \cdot 10^2}$

$$\frac{5 \cdot 10^{-4} \cdot 7 \cdot 10^3}{3 \cdot 10^{-5}} = \frac{5 \cdot 7 \cdot 10^{-1}}{3 \cdot 10^{-5}} = \frac{5 \cdot 7}{3 \cdot 10^{-4}} = \frac{5 \cdot 7 \cdot 10^4}{3}$$

Mit diesen einfachen Regeln können Sie die meisten Rechnungen lösen. Gewöhnen Sie sich diese Rechnungsart an, Sie sparen sehr viel Zeit damit.

7. Was wissen Sie schon über galvanische Elemente?

Antworten zu den Fragen a bis e (Seite 33)

- a) Ein galvanisches Element besteht aus zwei Elektroden und einem Elektrolyten. Bei den gebräuchlichsten Elementen bestehen die Elektroden

aus Kohle und Zink, wobei um die Kohlenelektrode ein Beutel mit Braunstein angebracht ist.

Der Braunstein hat die Aufgabe, durch chemische Bindung die Ausscheidung von gasförmigem Wasserstoff zu verhindern. Der Wasserstoff als Isolator würde den Stromfluss hindern, d. h. der Innenwiderstand des Elementes würde damit zu gross.

- b) Die Betriebsspannung von handelsüblichen galvanischen Elementen beträgt pro Zelle 1,5 V.
- c) Unter «Elektromotorischer Kraft» verstehen wir bei Spannungsquellen deren Leerlaufspannung, das heisst die Spannung, die an den Klemmen auftritt, wenn die Spannungsquelle nicht belastet ist.
- d) Ein Ion ist ein Atomteil oder ein Molekülteil, welcher nach aussen eine elektrische Ladung aufweist.
- e) Das Kation fliesst zur Katode, das heisst zu derjenigen Elektrode, die mit dem negativen Pol der Spannungsquelle verbunden ist.

Bewertung:

5 richtige

Antworten:

Sehr gut, Sie haben gute Vorkenntnisse, diese werden es Ihnen erlauben, den Stoff mühelos aufzunehmen.

4 oder 3

richtige Antworten:

Ihre Vorkenntnisse sind gut, denken Sie jedoch daran, dass die Vorgänge in Elektrolyten im allgemeinen zu wenig bekannt sind. Es lohnt sich, diesen Abschnitt gründlich zu studieren, das erworbene Wissen werden Sie später brauchen.

Weniger als 3

richtige Antworten:

Sie haben den Stoff aus dem Abschnitt über das Wesen der Elektrizität noch nicht verarbeitet. Die Antworten auf die Fragen d und e sollten Ihnen keine Mühe bereiten. Lesen Sie den entsprechenden Abschnitt noch einmal durch.

8. Repetitionsaufgaben zu «I. Galvanische Elemente»

Antworten zu den Fragen a bis i (Seite 38)

- a) Ein Elektrolyt ist eine Flüssigkeit, die den elektrischen Strom leitet. Diese Flüssigkeit kann auch mit Hilfe von Pulver eingedickt werden.
- b) Im metallischen Leiter werden nur Elektronen, im Elektrolyten zusätzlich noch Materie-Teilchen transportiert.
- c) Die Elektroden des gebräuchlichsten Primärelementes bestehen aus Kohle und aus Zink.
- d) Die Elektrode aus Kohle stellt den positiven Pol des Elementes dar.
- e) Die «Elektromotorische Kraft» einer Spannungsquelle ist deren Leerlaufspannung, das heisst die Spannung, die an den Klemmen auftritt, wenn die Spannungsquelle nicht belastet ist.

- f) Am Innenwiderstand der Spannungsquelle tritt ein Spannungsabfall auf. Dieser Spannungsabfall wird durch den Belastungsstrom hervorgerufen. Die Betriebsspannung der Spannungsquelle ist um diesen Spannungsabfall kleiner als die E.M.K.
- g) Ja, da die Klemmenspannung um den Spannungsabfall am Innenwiderstand der Spannungsquelle kleiner ist als die E.M.K., und der Spannungsabfall am R_i seinerseits vom Belastungsstrom abhängt, ist die Klemmenspannung belastungsabhängig.

h) Vorgehen:

1. Schritt: Berechnung der Klemmenspannung

- Grundformel anschreiben

$$U_K = I \cdot R_L \quad \frac{AV}{A}$$

- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$U_K = 0,1 \cdot 10$$

$$U_K = 1 \text{ V}$$

2. Schritt: Berechnung von R_i

- Grundformel anschreiben

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

- Grundformel nach R_i umstellen

$$R_i = \frac{E - U_K}{I}$$

- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$R_i = \frac{1,5 - 1}{0,1} \quad \frac{V}{A}$$

$$R_i = 5 \Omega$$

i) Vorgehen:

1. Schritt: Grundformeln für beide Messungen anschreiben und gleichsetzen.

- Grundformel für 1. Messung anschreiben

$$E = I_1 \cdot (R_1 + R_i)$$

- Grundformel für 2. Messung anschreiben

$$E = I_2 \cdot (R_2 + R_i)$$

- Beide Formeln einander gleichsetzen

$$I_2 \cdot (R_2 + R_i) = I_1 \cdot (R_1 + R_i)$$

- Klammerausdrücke ausrechnen

$$I_2 \cdot R_2 + I_2 \cdot R_i = I_1 \cdot R_1 + I_1 \cdot R_i$$

- Glieder mit R_i auf die linke Seite schaffen

$$I_2 \cdot R_2 - I_1 \cdot R_i = I_1 \cdot R_1 - I_2 \cdot R_2$$

- R_i ausklammern

$$R_i \cdot (I_2 - I_1) = I_1 \cdot R_1 - I_2 \cdot R_2$$

- R_i isolieren

$$R_i = \frac{I_1 \cdot R_1 - I_2 \cdot R_2}{I_2 - I_1}$$

- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$R_i = \frac{2 \cdot 6 - 1 \cdot 14}{1 - 2}$$

$$R_i = 2 \Omega$$

Haben Sie für alle neun Aufgaben die richtige Antwort gefunden? Wenn ja, dürfen Sie sich mit dem nächsten Abschnitt befassen.

Wenn Ihnen die letzte Aufgabe Schwierigkeiten bereitet hat, so dürfen Sie sich deshalb nicht entmutigen lassen. Die Aufgabenstellung war absichtlich etwas schwierig gewählt. Die Aufgabe sollte Ihnen zeigen, wie man durch logisches Überlegen und durch richtiges Einsetzen bekannter Werte den unbekannten Wert, in unserem Fall den Innenwiderstand, findet. Die Fähigkeit logisch zu überlegen und mit Hilfe von Bekanntem das Unbekannte zu finden

und ein Problem zu lösen, muss systematisch geschult werden. Sie werden diese Fähigkeit auf dem Gebiet der angewandten Elektronik gut gebrauchen können.

Wenn Sie ausser der letzten Aufgabe alle Fragen richtig beantwortet haben, dann dürfen Sie weiterfahren. Sollten Sie in der Beantwortung jedoch noch Fehler gemacht haben, dann müssen Sie den Stoff noch einmal ansehen.

9. Was wissen Sie schon über Akkumulatoren?

Antworten zu den Fragen a bis e (Seite 40)

- a) Der ungeladene Bleiakkumulator besteht aus zwei Bleisulfatelektroden, welche in verdünnte Schwefelsäure getaucht sind. Während des Ladevorganges wird die positive Platte zu Bleisuperoxyd und die negative Platte zu Blei, die Säuredichte des Elektrolyten steigt dabei an.
- b) Ja, die Säuredichte im Bleiakkumulator ist ein Mass für den Ladezustand, da diese während des Ladevorganges ansteigt.
- c) Die mittlere E.M.K. einer Zelle eines Bleiakkumulators beträgt 2 V.
- d) Die «Ampère-Stunde» ist das Mass für die Kapazität von Akkumulatoren. Die Entladezeit wird mit dem mittleren Entladestrom multipliziert und ergibt die Kapazität des Sammlers.
- e) Ja, einzelne Zellen eines Akkumulators können in Serie geschaltet werden; dabei summieren sich die E.M.K. und die Innenwiderstände der einzelnen Zellen.

Bewertung:

5 oder 4

richtige Antworten:

Sehr gut, Sie wissen schon einiges über Akkumulatoren, der folgende Abschnitt wird Ihre diesbezüglichen Kenntnisse bereichern.

3 bis 1

richtige Antwort:

Sie haben schon etwas über Sammler gehört, Ihre Kenntnisse sind jedoch noch bescheiden, erweitern Sie diese beim Studium des folgenden Abschnittes.

Keine

richtige Antwort:

Akkumulatoren sind für Sie etwas Unbekanntes. Diese Tatsache darf Sie aber nicht enttäuschen, der folgende Abschnitt wurde geschrieben, um Ihnen die Sammler näher zu bringen.

10. Repetitionsaufgaben zu «II. Akkumulatoren»

Antworten zu den Fragen a bis n (Seite 49)

- a) Der Elektrolyt des Bleiakkumulators besteht aus verdünnter Schwefelsäure.
- b) Verdunsteter Elektrolyt wird im Bleiakkumulator durch Nachfüllen von destilliertem Wasser ersetzt.

- c) Während des Ladevorganges darf man sich einem Bleisammler nicht mit einer offenen Flamme nähern; es besteht Explosionsgefahr, da in der letzten Phase der Ladung Gasentwicklung einsetzt.
- d) Die Speicherkapazität von Akkumulatoren wird in Ampère-Stunden (Ah) gemessen.
- e) Der Wirkungsgrad eines Sammlers wird in Prozenten gemessen, man bedient sich dabei des Ampère-Stunden-Wirkungsgrades und des Watt-Stunden-Wirkungsgrades.
- f) Der Watt-Stunden-Wirkungsgrad ergibt bessere Vergleichswerte, da hierbei Arbeitseinheiten verglichen werden.
- g) Die Wartungsfreiheit oder bei einzelnen Typen der geringe Wartungsaufwand stellen den Hauptvorteil des Stahlakkus gegenüber dem Bleiakku dar.
- h) Der Bleisammler weist einen besseren Wirkungsgrad auf als der Stahl-sammler.
- i) Der Bleiakku erlaubt kleinere Innenwiderstände als der Stahlakku.
- k) Ja, die Säuredichte ist ein Mass für den Ladezustand der Zelle des Blei-akkus, da die Säuredichte mit zunehmender Ladung ansteigt.
- l) Nein, die Dichte der Lauge ist kein Mass für den Ladezustand des Stahl-akkus, da sich die Lauge während dem Lade- und Entladevorgang nicht verändert.
- m) Die Innenwiderstände addieren sich bei der Serieschaltung von Zellen, ebenso die Werte der E.M.K. Der Akku wird demzufolge eine E.M.K. von 12 V und einen Innenwiderstand von 0,06 Ohm aufweisen. Wird ein Belastungswiderstand vom Wert des Innenwiderstandes gewählt, so wird der Batterie die grösste Leistung entnommen. In unserem Fall tritt dies bei einem R_L von 0,06 Ohm ein. Die Klemmenspannung sinkt dabei auf die Hälfte der E.M.K., in unserem Fall auf 6 V.
- n) Der Kurzschlussstrom ist nur durch den Innenwiderstand bestimmt. Bei der Parallelschaltung von 4 Zellen sinkt der Innenwiderstand auf einen Viertel, die E.M.K. bleibt erhalten. Der Kurzschlussstrom errechnet sich nach dem ohmschen Gesetz zu 6 A.

Diese Repetitionsaufgaben waren einfach, sie enthielten das, was Sie über Akkumulatoren und deren Schaltungen wissen müssen. Sollten Sie bei der Beantwortung Fehler gemacht haben, so ist dies ein Hinweis, dass Sie die Materie noch nicht verarbeitet haben. In diesem Falle dürfen Sie sich noch nicht dem nächsten Abschnitt zuwenden; Sie müssen vorerst den Akkumulator Ihrer Kenntnisse über Akkumulatoren aufladen!

11. Was wissen Sie schon über Permanentmagnete?

Antworten zu den Fragen a bis d (Seite 51)

- a) Der Kompass nutzt den Erdmagnetismus aus. Die Kompassnadel orientiert sich nach dem Erdmagnetfeld. Der Nordpol der Kompassnadel zeigt angenähert nach dem geographischen Nordpol.

- b) Magnetische Feldlinien treten überall zwischen magnetischen Polen auf.
- c) Magnetische Feldlinien können mit Hilfe von Eisenfeilspänen sichtbar gemacht werden, indem man diese auf ein Blatt Papier streut und darunter einen Dauer- oder Elektromagneten anbringt.
- d) Das gebräuchlichste Material für die Herstellung von Dauermagneten war früher gehärteter Stahl, in neuerer Zeit jedoch sind es vorwiegend Legierungen.

Bewertung:

- | | |
|---------------------|--|
| 4 richtige | Sehr gut, Sie haben sicher schon einiges über den Magnetismus gehört. |
| Antworten: | |
| 3 oder 2 | Sie wissen so viel über den Magnetismus, wie man normalerweise vom technisch interessierten Menschen erwarten darf. Der folgende Abschnitt wird Sie tiefer in die Materie einführen. |
| richtige Antworten: | |
| 1 oder keine | Magnetismus bedeutet für Sie ein neues Wissensgebiet. Der Mechanismus der magnetischen Kraftwirkung ist jedoch nicht besonders schwer zu verstehen. |
| richtige Antwort: | |

12. Repetitionsaufgaben zu «I. Permanentmagnete»

Antworten zu den Fragen a bis h (Seite 55)

- a) Ein magnetisches Feld ist der Wirkungsbereich eines Magneten, in welchem seine Kräfte wirksam sind.
- b) Die Molekularmagnete sind die Ursache der magnetischen Wirkung des Dauermagneten. Wenn alle Molekularmagnete gleichsinnig ausgerichtet sind, wirkt der betreffende Körper als Permanentmagnet.
- c) Die magnetischen Feldlinien verlassen am Nordpol den Magneten, um am Südpol in diesen zurückzukehren. So ist der Verlauf der Feldlinien geschlossen.
- d) Magnetische Feldlinien können mit Hilfe von Eisenfeilspänen sichtbar gemacht werden.
- e) Im magnetisch weichen Eisen ist die Beweglichkeit der Molekularmagnete grösser als in magnetisch hartem Stahl, deshalb richten sich diese müheloser aus; ausgerichtete Molekularmagnete sind die Ursache für die magnetischen Eigenschaften von Dauermagneten.
- f) Der magnetische Fluss ist die Summe aller Feldlinien, die an einem Magnetpol ein- oder austreten.
- g) Die magnetische Feldstärke ist die Anzahl Kraftlinien, die senkrecht durch einen Quadratzentimeter durchtreten.
- h) Wird ein Stabmagnet in der Mitte entzweigebrochen, so entstehen zwei unabhängige Stabmagnete.

Mit Hilfe der Repetitionsaufgaben sind Sie in der Lage, zu prüfen, ob Sie bereit sind, den folgenden Abschnitt zu bearbeiten. Im Kapitel über den Elektromagnetismus werden die Grundlagen über Permanentmagnete vorausgesetzt.

13. Was wissen Sie schon über den Elektromagnetismus?

Antworten zu den Fragen a bis e (Seite 56)

- a) Der Elektromagnetismus wird unter anderem beispielsweise in Relais, bei Elektromotoren, in Transformatoren und in Lautsprechern praktisch angewandt.
- b) Ja, ein mit Gleichstrom gespeister Elektromagnet hat die gleichen Eigenschaften wie ein Dauermagnet.
- c) Ja, beim Elektromagnet treten die gleichen Feldlinien auf wie beim Dauermagnet.
- d) Ein Elektromagnet besteht aus einer stromdurchflossenen Spule, die in den meisten Fällen einen Eisenkern aufweist, da das Eisen die magnetischen Kraftlinien konzentriert.
- e) Die Feldstärke eines Elektromagneten hängt von der Windungszahl, der Stromstärke, von der Länge der Kraftlinien und vom Kern-Werkstoff ab.

Bewertung:

5 richtige

Antworten:

Sehr gut, Sie haben die elementarsten Grundbegriffe über den Elektromagnetismus bereits zu ihrem geistigen Eigentum gemacht.

Diese guten Grundlagen werden es Ihnen ermöglichen, den umfangreichen Stoff zu verstehen.

3 bis 4

richtige Antworten:

Gut, die Grundprinzipien des Elektromagnetismus sind Ihnen bekannt. Sicher sind Sie bestrebt, mehr darüber zu erfahren.

Der folgende Abschnitt wird Sie tiefer in diese Materie einführen.

2 bis keine

richtige Antwort:

Die Erscheinungen des Elektromagnetismus sind neu für Sie. Lesen Sie den Stoff über die Permanentmagnete nochmals durch. Die dort gebotenen Grundlagen werden Sie für Ihr weiteres Studium nötig haben. Lassen Sie sich vom komplexen und umfangreichen Stoff nicht entmutigen. Der Elektromagnetismus ist eines der schwierigsten Kapitel.

Wenn Sie jedoch langsam Schritt für Schritt jeden Unterabschnitt gründlich durchdenken, werden Sie mit diesem Thema bald gut vertraut sein.

14. Repetitionsaufgaben zu «II. Elektromagnetismus»

Antworten zu den Fragen a bis p (Seite 73)

- a) Das magnetische Feld um einen gestreckten stromdurchflossenen Leiter besteht aus konzentrischen, kreisförmigen Feldlinien.
- b) Das Magnetfeld ist durch die Stromstärke im Leiter bestimmt.
- c) Die Korkenzieherregel hilft uns, die Richtung dieses Feldes zu bestimmen. Sie lautet: Drehen wir einen Korkenzieher in Stromrichtung durch die Papierebene, so zeigt die Drehrichtung in die Richtung des Flusses.
- d) Im Giorgi-System wird die magnetische Feldstärke in A/m oder A/cm gemessen.
- e) Die magnetische Induktion gibt die Feldliniendichte in magnetischen Kreisen an; in der Luftspule entspricht sie der Feldstärke.
- f) Im Giorgi-System wird die magnetische Induktion in Vs/m² (Tesla) gemessen.
- g) Die Durchflutung oder magnetische Spannung des magnetischen Kreises lässt sich mit der elektrischen Spannung im elektrischen Kreis vergleichen.
- h) Die Masseinheit für die Durchflutung im Giorgi-System ist das Ampère, in Spulen die Ampère-Windung ($I \cdot N$).
- i) Nein, die relative Permeabilität eines Werkstoffes hängt von der Magnetisierungsfeldstärke ab.
- k) Die Induktionskonstante ist eine Naturkonstante und dient zur Umrechnung von magnetischen Grössen des absoluten Systems in das Giorgi-System.
- l) Die absolute Permeabilität ist im Giorgi-System anzutreffen. Sie wird gebildet aus dem Produkt aus relativer Permeabilität mal Induktionskonstante. ($\mu = \mu_0 \cdot \mu_r$)
- m) Die Hysteresisschleife gibt Auskunft über die Grösse der Remanenz und der Koerzitivkraft.
- n) Grosse Remanenz und grosse Koerzitivkraft sind das Zeichen eines harten magnetischen Werkstoffes. Dieser Werkstoff eignet sich zur Herstellung von Dauermagneten.
- o) Bei magnetisch weichem Material, beispielsweise bei Weicheisen, sind Remanenz und Koerzitivkraft klein. Die Elementarmagnetchen sind relativ leicht beweglich. Dieses Material behält den Magnetismus schlecht; Restmagnetismus lässt sich mit geringem Aufwand beseitigen.

p) *Vorgehen:*

1. Schritt: Berechnung der magnetischen Induktion im Luftspalt.

– Grundformel anschreiben

$$U_m = \Phi \cdot R_m$$

– Umstellen nach Φ

$$\Phi = \frac{U_m}{R_m}$$

– Φ ersetzen durch $B \cdot A$ und auflösen nach B

$$B = \frac{U_m}{R_m \cdot A}$$

– Formel für R_m anschreiben

$$R_m = \frac{l_L}{\mu_o \cdot A} + \frac{l_E}{\mu_o \cdot \mu_r \cdot A}$$

l_L, l_E = magnetische Weglänge
in Luft bzw. Eisen

– Formel zusammenziehen

$$R_m = \frac{\mu_r \cdot l_L + l_E}{\mu_o \cdot \mu_r \cdot A}$$

– Formel für R_m
in Formel für B einsetzen

$$B = \frac{U_m}{A \cdot R_m} = \frac{U_m \cdot \mu_o \cdot \mu_r \cdot A}{(\mu_r \cdot l_L + l_E) A}$$

– Kürzen

$$B = \frac{U_m \cdot \mu_o}{l_L + \frac{l_E}{\mu_r}}$$

– Zahlenwerte einsetzen

$$B = \frac{1,5 \cdot 800 \cdot 1,256 \cdot 10^{-8}}{0,5 + 20} \frac{A \cdot Vs}{A \cdot cm \cdot cm}$$

$$B = 2,77 \cdot 10^{-5} Vs/cm^2$$

2. Schritt: Berechnung der induzierten Spannung im Leiter

– Grundformel anschreiben

$$U_i = B \cdot l \cdot v$$

– Zahlenwerte einsetzen

$$U_i = 2,77 \cdot 10^{-5} \cdot 4 \cdot 1 \cdot 10^3 \frac{Vs \cdot cm \cdot cm}{cm^2 s}$$

$$U_i = 0,111 V$$

Bemerkungen zum Lösungsvorgang:

Der magnetische Widerstand zerfällt in zwei Teile; den Widerstand im Eisenkern und den Widerstand im Luftspalt, beide Widerstände sind analog den ohmschen Widerständen im elektrischen Stromkreis in Serie zu geschaltet und demzufolge zu addieren.

Die Leiterlänge des bewegten Leiters ist gegeben durch die Breite des Luftspaltes, da nur in dem Teilstück eine Spannung induziert wird, das sich im Magnetfeld bewegt.

Die Repetitionsaufgaben geben Ihnen Auskunft über den Stand Ihres Wissens über den Magnetismus. Erfahrungsgemäss treten bei vielen von Ihnen Schwierigkeiten auf. Schuld daran sind die vielen Einheiten des absoluten Masssystems und der Umfang des Stoffes. Zudem kommt der oberflächliche Praktiker ohne viel Wissen über den Magnetismus aus. Wer jedoch bestrebt ist, die Vorgänge in elektronischen Geräten wirklich zu verstehen, der darf nicht auf ein gründliches Studium der Grundgesetze des Magnetismus verzichten. Falls es Ihnen nicht gelungen ist, alle Aufgaben zu lösen, arbeiten

Sie den Stoff noch einmal durch; es wird sich im Verlaufe Ihrer Ausbildung bezahlt machen.

15. Was wissen Sie schon über die Winkelfunktionen?

Antworten zu den Fragen a bis f (Seite 75)

- a) Die vier gebräuchlichsten Winkelfunktionen sind: Die Sinusfunktion, die Kosinusfunktion, die Tangensfunktion und die Kotangensfunktion.
- b) Die beiden gebräuchlichsten Winkelmasse sind: Das Bogenmass (der volle Winkel entspricht dem Wert 2π) und das Gradmass (der volle Winkel entspricht dem Wert 360°).
- c) Der Einheitskreis ist ein Kreis mit dem Radius «EINS». Man verwendet ihn zur graphischen Bestimmung der Winkelfunktionen und zur Veranschaulichung der Entstehung der Winkelfunktionen.
- d) Bei den meisten Wechselstromproblemen, bei denen eine Phasenverschiebung auftritt, spielen die Winkelfunktionen eine Rolle. Einige Beispiele: $\cos \varphi$ dient der Berechnung von Wirkleistungen, $\sin \varphi$ dient zur Bestimmung der Blindleistung, $\tan \delta$ ist ein Mass für die Güte von Schwingkreiselementen usw.
- e) Von einem rechtwinkligen Dreieck müssen zwei Seiten bekannt sein.
- f) Ja, die Winkelfunktionen können für alle Winkel bestimmt werden.

Bewertung:

5 oder 6 richtige Antworten:	Sehr gut, die Trigonometrie ist für Sie kein neues Fach. Sicher wird Ihnen der neue Stoff keine Schwierigkeiten bieten.
3 oder 4 richtige Antworten:	Gut, Sie haben gewisse Vorkenntnisse, die Ihnen das Studium erleichtern werden. Durch ein gründliches Verarbeiten des Stoffes werden Sie Ihr Wissen noch erheblich bereichern.
1 oder 2 richtige Antworten:	Die Trigonometrie ist Ihnen eher fremd. Sie haben schon etwas über Winkelfunktionen gehört, ohne dass Ihr Wissen sehr fundiert ist. Winkelfunktionen sind jedoch nicht schwer zu verstehen. Der Inhalt des nächsten Kapitels wird Ihnen diese näher bringen.
Keine richtige Antwort:	Sie werden beim nächsten Kapitel länger verweilen müssen. Der Stoff ist so dosiert, dass auch Schüler ohne Vorkenntnisse folgen können. Lesen Sie diesen Abschnitt mehrmals durch und stellen Sie sich selbst zusätzliche Aufgaben, indem Sie möglichst viele Winkelfunktionen in allen vier Quadranten bestimmen und mit Hilfe des Einheitskreises überprüfen. Durch wiederholtes Üben werden Sie sich in die Materie einarbeiten und diese beherrschen lernen.

16. Repetitionsaufgaben zu «I. Die Winkelfunktionen»

Antworten zu den Fragen a bis g (Seite 84)

a)

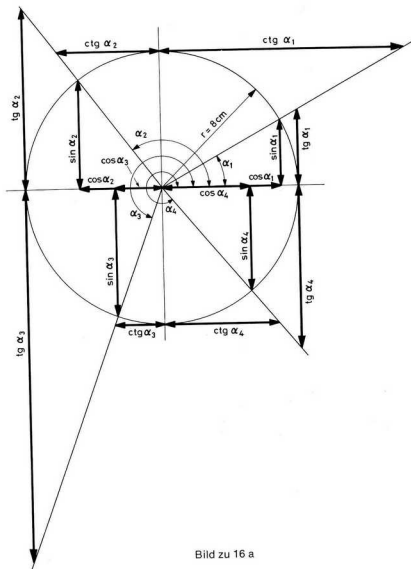


Bild zu 16 a

b)

α	$\sin \alpha$	$\cos \alpha$	$\operatorname{tg} \alpha$	$\operatorname{ctg} \alpha$
$\alpha_1 29^\circ$	0,4848	0,8746	0,5543	1,804
$\alpha_2 127^\circ$	0,7986	-0,6018	-1,327	-0,7536
$\alpha_3 250^\circ$	-0,9397	-0,3420	2,747	0,3640
$\alpha_4 310^\circ$	-0,7660	0,6428	-1,192	-0,8391

c) **Bogenmass** = $\frac{2\pi}{360^\circ} \cdot \alpha [^\circ]$

$$0^\circ = 0, \quad 45^\circ = 0,785, \quad 90^\circ = 1,571, \quad 130^\circ = 2,269, \quad 210^\circ = 3,665, \\ 345^\circ = 6,021$$

d) $\alpha_1 = 40^\circ, \alpha_2 = 55^\circ, \alpha_3 = -30^\circ, \\ \alpha_4 = 25^\circ$

e) Die Winkelfunktionen sind in der Elektrotechnik unentbehrlich, da alle Wechselstromprobleme, bei welchen Phasenverschiebungen auftreten, nur mit Hilfe von trigonometrischen Funktionen oder graphisch gelöst werden können.

f) Funktionswerte für Winkel, die grösser sind als 90° , können immer auf einen Winkelwert zwischen 0° und 90° zurückgeführt werden. Die graphische Darstellung zeigt, dass sich die Funktionswerte für Winkel zwischen 0° und 90° periodisch wiederholen.

g) **Vorgehen:**

In der Tabelle oder auf dem Rechenschieber ist der Winkelwert für den Kosinus 0,9 aufzusuchen.

Die Phasenverschiebung beträgt **$25^\circ 50'$**

Mit Hilfe der Repetitionsaufgaben können Sie feststellen, ob Sie die Grundlagen über die Winkelfunktionen wirklich verstanden haben. Erfahrungsgemäss bereiten dem Schüler die Winkel zwischen 0° und 90° keine Schwierigkeiten. Es fällt dem Anfänger jedoch oft recht schwer Werte und Vorzeichen für Winkelfunktionen in den drei verbleibenden Quadranten zu bestimmen. Hier hilft nur die Übung; wer sich nicht sicher fühlt, der sollte sich selber einige Aufgaben stellen und diese lösen. Die Kontrolle geschieht am besten anhand der Bilder 40 und 41. Zeichnen Sie sich diese Bilder sehr genau auf Millimeterpapier, kleben Sie zwei Bogen A4 zusammen, damit die Ablesegenauigkeit steigt, indem Sie dann die Kurven recht gross zeichnen können. Die Bilder erlauben es Ihnen, den Funktionswert und das Vorzeichen der selbstgewählten Aufgaben zu überprüfen.

Nur wer den Stoff absolut beherrscht, darf mit dem Studium weiterfahren; die trigonometrischen Grundlagen sind für das Verständnis der Wechselstromtechnik unerlässlich.

17. Was wissen Sie schon über die Winkelfunktionen auf dem Rechenschieber?

Antworten zu den Fragen a bis e (Seite 85)

- a) $\sin 25^\circ = 0,423$
- b) $\cos 55^\circ = 0,574$
- c) $0,6 = \tan 30,96^\circ$ oder $30^\circ 58'$
- d) $\operatorname{ctg} 30^\circ = 1,73$
- e) $\sin 3^\circ = 0,0523$

Bewertung:

4 oder 5 richtige Lösungen:	Sehr gut, Sie kennen Ihren Rechenschieber. Der folgende Abschnitt wird Ihnen zeigen, wie Sie Ihren Schieber noch besser ausnutzen können.
3 richtige Lösungen:	Sie beherrschen die Grundregeln für das Rechnen mit dem Rechenschieber. Die Feinheiten, die es Ihnen erlauben werden, diesen voll auszunutzen, sind Ihnen noch fremd. Dank Ihren Kenntnissen wird es Ihnen jedoch nicht schwerfallen, die zusätzlichen Rechenoperationen zu begreifen und zu erlernen.
Weniger als 3 richtige Lösungen:	Sie haben wahrscheinlich Ihren Schieber noch nicht viel verwendet. Bevor Sie mit dem Studium des nächsten Abschnittes beginnen, wird es sich lohnen, wenn Sie die Bedienungsanleitung zu Ihrem Schieber noch einmal gründlich durcharbeiten. Sie werden bald erfahren, wie leicht die Handhabung des Rechenschiebers ist, und welchen Vorteil man aus dieser Fähigkeit zieht.

18. Repetitionsaufgaben zu «II. Die Winkelfunktionen auf dem Rechenschieber

Antworten zu den Fragen a bis h (Seite 92)

- a) $\sin 2,6^\circ = 0,0454$

Vorgehen:

– Formel für kleine Winkel anschreiben

$$\sin \alpha \approx \frac{2\pi}{360^\circ} \cdot \alpha [^\circ]$$

– Zahlen einsetzen und ausrechnen

$$\sin \alpha \approx \frac{6,28}{360} \cdot 2,6$$

$$\sin \alpha \approx 0,0454$$

– Auf einem Schieber mit $\curvearrowright$ arc-Skala lässt sich der Funktionswert direkt ablesen

b) **$\cos 11,7^\circ = 0,9792$**

Vorgehen:

Läufer auf der Sinusskala auf $11,7^\circ$ stellen, Funktionswert auf der $\sqrt{1-x^2}$ -Skala ablesen.

c) **$\text{ctg } 86,8^\circ = 0,0559$**

Vorgehen:

– Formel für grosse Winkel anschreiben

$$\text{ctg } \alpha \approx \frac{2\pi}{360^\circ} \cdot (90^\circ - \alpha^\circ)$$

– Zahlen einsetzen und ausrechnen

$$\text{ctg } \alpha \approx \frac{6,28}{360} \cdot 3,2$$

$$\text{ctg } \approx 0,0559$$

– Auf einem Schieber mit der $\curvearrowright$ arc-Skala lässt sich der Funktionswert direkt ablesen.

d) **$\text{tg } 67^\circ = 2,356$**

Vorgehen:

Läufer auf der Kotangensskala auf 67° oder auf der Tangensskala auf 23° stellen, Funktionswert auf der $1/x$ -Skala ablesen.

e) Mit Hilfe dieser Skala lässt sich zu jeder Sinusfunktion die Kosinusfunktion und zu jeder Kosinusfunktion die Sinusfunktion für den gleichen Winkel direkt ablesen. Da die Ablesegenauigkeit des Rechenschiebers gegen sein rechtes Ende hin abnimmt, lassen sich Sinusfunktionen für grosse Winkel und Kosinusfunktionen für kleine Winkel bequem auf der bedeutend genaueren linken Skalenhälfte des Rechenschiebers ablesen.

f) Mit Hilfe der $\curvearrowright$ arc-Skala lassen sich die Sinus- und Tangensfunktionen für Winkel unter 6° und die Kosinus- und Kotangensfunktionen für Winkel über 84° direkt ablesen.

g) Der Reziprokwert einer Funktion kann auf der $1/x$ -Skala direkt abgelesen werden. Zur Bestimmung von Tangensfunktionen für grössere Winkel als 45° und von Kotangensfunktionen für kleinere Winkel als 45° macht man von dieser Möglichkeit Gebrauch.

- h) Zur Berechnung der Funktionswerte solcher Winkel wird die Länge des Bogens im Einheitskreis berechnet. Bogenlänge und Winkelfunktion sind für diese kleinen Winkel praktisch identisch.

$$\sin \alpha \approx \frac{2\pi}{360^\circ} \cdot \alpha [^\circ] \quad (\text{für Winkel} < 6^\circ)$$

Anhand der Repetitionsaufgaben konnten Sie feststellen, wie weit Sie die Spezialfälle der Winkelfunktionsberechnungen auf dem Rechenschieber beherrschen. Falls Sie bei der Lösung der Repetitionsaufgaben auf Schwierigkeiten gestossen sind, so bedeutet das, dass Sie noch zu wenig geübt haben. Nehmen Sie in diesem Fall eine Tabelle mit den Winkelfunktionen zur Hand und bestimmen Sie eine gewisse Anzahl Winkel, deren Berechnung mit dem Rechenschieber zu den Spezialfällen gehört. Suchen Sie nun die Funktionswerte auf dem Schieber und vergleichen Sie die Resultate mit denjenigen der Tabelle. Nur durch Übung lernt man seinen Rechenschieber voll ausnutzen. Wer seinen Schieber vollständig beherrscht, der spart sich viel Zeit und Mühe, denn ein Schieber hat in jeder Rocktasche Platz, eine Logarithmentafel trägt man jedoch nicht dauernd mit sich herum. Der Praktiker dürfte kaum ohne Rechenschieber auskommen; die meisten Berufsleute kennen jedoch nicht alle Möglichkeiten, die ihnen dieses Hilfsmittel bietet. Wer die Spezialfälle beherrscht, der ist den anderen überlegen.

19. Was wissen Sie schon über Wechselströme?

Antworten zu den Fragen a bis f (Seite 93)

- Ein Wechselstrom ist ein Strom, der periodisch seine Richtung und seine Grösse ändert.
- Der Industriewechselstrom ist sinusförmig.
- Eine Wechselspannung von 50 Hz erzeugt pro Sekunde 50 Schwingungen oder Perioden.
- Da sich die Elektrizität und damit auch ein Wechselstromsignal mit Lichtgeschwindigkeit fortbewegt, berechnet man, wie oft die Wellenlänge von 30 m in dem pro Sekunde zurückgelegten Weg von 300 000 km enthalten ist:

$$f = \frac{c}{\lambda} = \frac{300\,000\,000 \text{ m/s}}{30 \text{ m}} = 10^7 \text{ Hz} = \mathbf{10 \text{ MHz}}$$

- Wechselströme sind in folgenden hauptsächlichen Erscheinungsformen anzutreffen:
 - Industriewechselstrom zur Versorgung der Industrie und der Haushaltungen mit elektrischer Energie

- Niederfrequenzwechselströme in der Nachrichtentechnik in der Form von sinusförmigen Strömen oder als Sprechwechselstrom mit nicht-sinusförmigem Verlauf
 - Hochfrequenzwechselströme in der Form von Radiowellen, als Radarsignale und als Hochfrequenzstrom für medizinische und industrielle Zwecke.
- f) Ein Lautsprecher wird mit Wechselspannungen gespeist. Es handelt sich dabei um zusammengesetzte Sprach- und Musiksignale.

Bewertung:

5 oder 6 richtige Antworten:	Gut, Sie haben sich offenbar schon recht eingehend mit Wechselströmen befasst. Der folgende Abschnitt wird Sie noch vollends mit den Eigenschaften von Wechselströmen und Wechselspannungen vertraut machen.
3 oder 4 richtige Antworten:	Die elementaren Grundlagen über Wechselströme und Wechselspannungen scheinen Sie zu kennen. Der neue Stoff wird Sie gründlich in das Wesen dieser Wechselgrößen einführen.
Weniger als 3 richtige Antworten:	Wechselspannungen und Wechselströme sind Ihnen noch wenig vertraut. Dies ist kein Hindernis, da der folgende Abschnitt alles Wissenswerte über diesen neuen Stoff enthält. Die Kenntnisse über Wechselstromgrößen zählen zu den wichtigsten Grundlagen der Elektronik, Sie werden in allen späteren Lektionen immer wieder mit diesen konfrontiert. Es ist deshalb wichtig, dass Sie den folgenden Abschnitt gründlich studieren.

20. Repetitionsaufgaben zu «I. Der Wechselstrom»

Antworten zu den Fragen a bis h (Seite 105)

- a) Die Kreisfrequenz ist das Produkt der Frequenz mit dem Faktor 2π
- b) Im freien Raum pflanzen sich elektrische Wellen mit Lichtgeschwindigkeit fort. Die Lichtgeschwindigkeit beträgt 300 000 km/s
- c) *Vorgehen:*

- Grundformel anschreiben:

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

– Formel nach f umstellen:

$$f = \frac{c}{\lambda}$$

– Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen: $f = \frac{300 \cdot 10^6}{41}$; $[f] = \frac{\text{m/s}}{\text{m}} = \text{s}^{-1} = \text{Hz}$

$$f = 7,32 \text{ MHz}$$

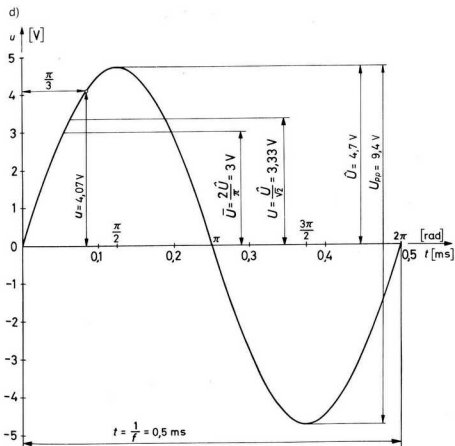
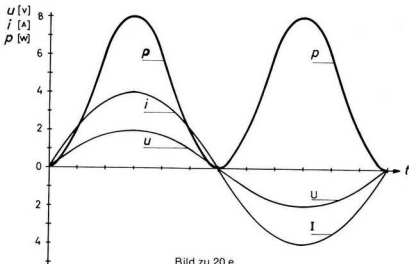


Bild zu 20 d

e)



Berechnung der mittleren Leistung:

Vorgehen:

- Grundformel anschreiben:
- Berechnungsformeln für U und I
- Zahlenwerte einsetzen

$$P = U \cdot I$$

$$P = \frac{\hat{U}}{\sqrt{2}} \cdot \frac{\hat{I}}{\sqrt{2}} = \frac{\hat{U} \cdot \hat{I}}{2}$$

$$P = \frac{2 \text{ V} \cdot 4 \text{ A}}{2} = 4 \text{ Watt}$$

f) *Vorgehen:*

Um die Frequenz der Grundwelle zu errechnen, ist die Frequenz der neunten Harmonischen durch 9 zu dividieren.

$$f_o = \frac{9. \text{ Harmonische}}{9}$$

$$f_o = \frac{2,7 \text{ MHz}}{9}$$

$$f_o = 300 \text{ kHz}$$

g) *Vorgehen:*

- Formel anschreiben

$$f_o = \frac{12. \text{ Oberwelle}}{12 + 1}$$

- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen
- Formel zur Berechnung der Wellenlänge anschreiben:
- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen:

$$f_o = \frac{39 \text{ MHz}}{13}$$

$$f_o = 3 \text{ MHz}$$

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

$$\lambda = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}}{3 \cdot 10^6 \text{ s}^{-1}}$$

$$\lambda = 100 \text{ m}$$

h) *Vorgehen:*

- Formel anschreiben:
- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen:

$$u = \hat{U} \cdot \sin(\omega t)$$

$$u = 4 \cdot \sin(2\pi \cdot 20 \cdot 10^3 \cdot 23 \cdot 10^{-3})$$

$$u = 4 \cdot \sin(920\pi) \text{ V} \frac{1}{\text{s}}$$

$$u = 0 \text{ V}$$

Wem die Rechnung etwas abstrakt erscheint, der kann das Resultat mit einer einfachen Überlegung nachprüfen. Die Schwingungsdauer der Frequenz beträgt $50 \mu\text{s}$, der Momentanwert wird bei einer vollen ms gesucht, das heisst, dass die Schwingung zu diesem Zeitpunkt neu beginnen muss, da pro ms 20 Perioden untergebracht werden.

Die Lösungen haben Ihnen gezeigt, wie weit Sie den Stoff verarbeitet haben. Erfahrungsgemäss bereitet die Ermittlung des Momentanwertes am meisten Schwierigkeiten. Diese können am besten dadurch überwunden werden, dass man von einer Wechselspannung eine Zeichnung über etwa 5 Perioden anfertigt und auf der x-Achse die Zeit und das Bogenmass anschreibt und nun für verschiedene Zeiten den Momentanwert ermittelt. Diese Methode zeigt am besten den Zusammenhang zwischen dem Vorgang und der Berechnungsformel.

Sobald Ihnen diese Zusammenhänge klar sind, dürfen Sie zum nächsten Abschnitt übergehen.

21. Was wissen Sie schon über Drehstrom?

Antworten zu den Fragen a bis e (Seite 107)

- Im Dreiphasensystem wird zwischen dem Nulleiter und den Aussenleitern die Phasenspannung abgegriffen, zwischen den Aussenleitern dagegen die verkettete Spannung. Die verkettete Spannung ist im Dreiphasensystem immer um den Faktor $\sqrt{3}$ grösser als die Phasenspannung. 220 V mal $1,73$ ergibt 380 V .
- In Dreiphasensystemen können Generatoren und Verbraucher sternförmig oder dreieckförmig geschaltet werden. Bei der Sternschaltung ergibt sich dadurch ein Sternmittelpunkt, an welchem der Nulleiter angeschlossen wird, und drei Phasenanschlüsse. Bei der Dreieckschaltung ergeben sich

nur drei Phasenanschlüsse. Generatoren werden meistens in Sternschaltung betrieben, während Verbraucher in beiden Varianten vorkommen.

- c) Der Nulleiter ist der Anschluss des Sternmittelpunktes bei einem Generator. Bei gleichmässiger Belastung der drei Phasen führt er keinen Strom.
- d) Der gebräuchliche Drehstrom weist drei Phasen auf.
- e) Drehstromgeneratoren lassen sich vorteilhafter bauen als gewöhnliche Wechselstromgeneratoren. Auch die Tatsache, dass für drei Phasen nur vier Leiter gezogen werden müssen, ist ein Vorteil.

Bewertung:

4 oder 5

richtige Antworten:

2 oder 3

richtige Antworten:

1 oder keine

richtige Antwort:

Sehr gut, Sie haben sich schon mit Drehstrom befasst. Trotzdem dürfte Ihnen der folgende Abschnitt einige Neuheiten bringen, werden doch darin die Grundlagen der Vektorrechnung erklärt.

Sie haben sich schon mit Drehstrom befasst. Im folgenden Abschnitt werden Sie Ihr Wissen erweitern können; sicher wird Ihnen am Ende der Lektion der Drehstrom keine Probleme mehr aufgeben.

Sie scheinen noch nicht mit Drehstrom in Berührung gekommen zu sein. Der nächste Abschnitt wird Sie in dieses Gebiet der Starkstromtechnik einführen. Wenn Sie die Lektion über den Wechselstrom verarbeitet haben, wird Ihnen der Drehstrom keine Schwierigkeiten bereiten.

22. Repetitionsaufgaben zu «II. Drehstrom»

Antworten zu den Fragen a bis h (Seite 118)

- a) Die verkettete Spannung eines Dreiphasensystems ist die Spannung, die zwischen zwei Aussenleitern eines Generators gemessen wird, wenn der Generator in Sternschaltung arbeitet. Sie setzt sich zusammen aus zwei Phasenspannungen, die gegeneinander um 120° phasenverschoben sind.

- b) Verkettete Spannung

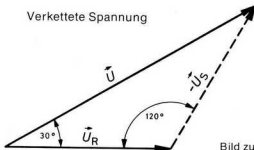
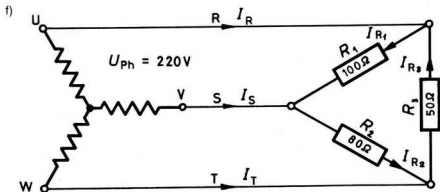
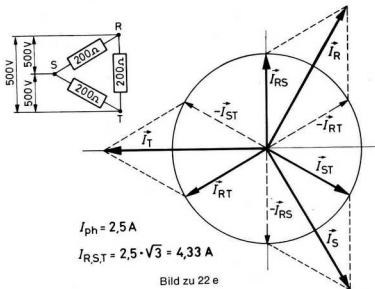


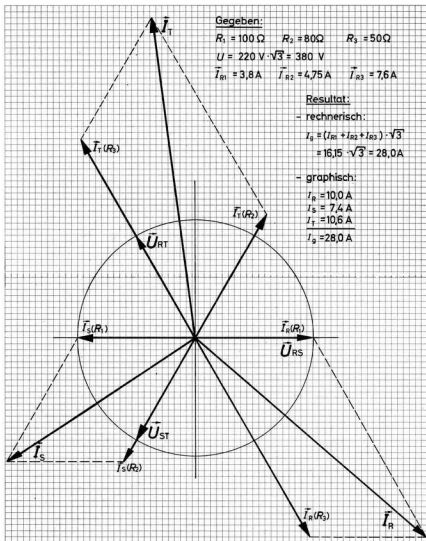
Bild zu 22 b

- c) Im Nulleiter fließt kein Strom, wenn alle drei Phasen gleichmässig belastet werden.
- d) In jedem Polleiter fließen in der Dreieckschaltung zwei Ströme, es sind dies die Belastungsströme von je einer Phase. Dadurch wird der Polleiterstrom grösser als der Phasenstrom. Die beiden Ströme werden vektoriell addiert und ergeben so den Polleiterstrom.

e) Schaltung Vektordiagramm



Schaltbild zu 22 f



Vektordiagramm zu 22 f

g)

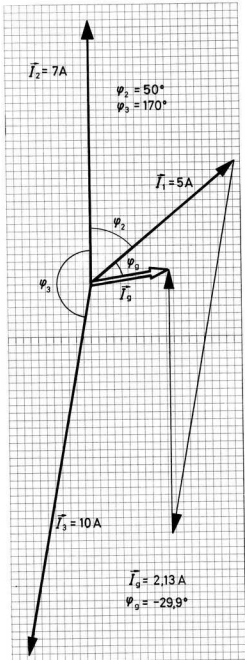


Bild zu 22 g

Der Gesamtstrom beträgt
2,13 A

Der Gesamtstrom ist zu I_1
um $29,9^\circ$ phasenverschoben
(nacheilend).

- h) Ein Vektor stellt eine Grösse dar, die durch einen Betrag und eine Richtung gekennzeichnet ist.

Das Schwergewicht dieser Lektion lag auf der graphischen Darstellung von Wechselstromgrössen mit Hilfe von Vektoren. Die Theorie des Dreiphasensystems ist an und für sich einfach. Sobald Sie die Vektorthorie begriffen haben und damit praktisch arbeiten können, werden Ihnen Dreiphasennetze keine Schwierigkeiten mehr bereiten. Falls Sie bei der Lösung der Repetitionsaufgaben Fehler gemacht haben, dürfen Sie nicht zum nächsten Abschnitt übergehen, Sie müssen vorher alle Unklarheiten aus dem Weg räumen. Sollte Ihnen der Umgang mit Vektoren noch Mühe machen, ist dies ein Zeichen dafür, dass Sie noch nicht genügend geübt haben. In diesem Fall konstruieren Sie sich Aufgaben nach dem Muster von Aufgabe f. Wählen Sie ein Dreiphasennetz und belasten Sie die drei Phasen in Stern- und Dreieckschaltung ungleich. Ermitteln Sie nun die Polleiter und Phasenströme in der Dreieckschaltung und die Polleiter- und Nulleiterströme in der Sternschaltung mittels Vektordiagrammen.

Die Vektordarstellung ist die einzige Möglichkeit, um kompliziertere Systeme rasch zu überblicken. Wer in der Trigonometrie gut zu Hause ist, der soll versuchen, die Aufgabe f rechnerisch zu lösen, er wird bald feststellen, dass der Rechenaufwand viel grösser ist als der zeichnerische. Die Grundregeln der Vektorrechnung gehören deshalb zum Rüstzeug eines jeden, der sich ernsthaft mit der Elektronik befassen will.

23. Was wissen Sie schon über Widerstände?

Antworten zu den Fragen a bis d (Seite 121)

- a) Die meisten Kleinwiderstände sind aus Kohle hergestellt.
- b) Drahtwiderstände sind in der Regel höher belastbar als Schichtwiderstände.
- c) Potentiometer sind Widerstände mit verstellbarem Abgriff.
- d) Der Widerstandswert wird in Ohm gemessen.

Bewertung:

4 richtige

Antworten:

Sehr gut, Widerstände sind für Sie keine fremden Bausteine mehr. Der folgende Abschnitt wird Ihnen alles Wissenswerte über Widerstände und deren Verhalten bieten.

2 oder 3

richtige Antworten:

Sie kennen dem Wesen nach die Widerstände. Obwohl der Widerstand eines der einfachsten Elemente der Elektronik ist, bietet er doch einige Besonderheiten, die man kennen muss. Das Studium

des folgenden Abschnittes wird Sie mit diesen Besonderheiten vertraut machen. Sie werden dank Ihrer Vorkenntnisse den Stoff leicht verarbeiten können.

1 richtige
Antwort:

Sie wissen genau so viel, wie Sie aufgrund des gebotenen Stoffes wissen müssen. Es dürfte Ihnen nicht schwer fallen, den Stoff des folgenden Abschnittes zu verarbeiten, da die Widerstände an und für sich keine besonderen Probleme aufwerfen.

Keine
richtige Antwort:

Sie dürfen nicht weiterlesen, da Sie die Anwendung des ohmschen Gesetzes noch nicht verstanden haben. Lesen Sie zuerst das dort Geschriebene noch einmal durch.

24. Repetitionsaufgaben zu «I. Widerstände»

Antworten zu den Fragen a bis n (Seite 133)

- Man unterscheidet zwischen folgenden Festwiderständen: Schichtwiderstände, Massewiderstände, Drahtwiderstände.
- Ein Potentiometer ist ein Widerstand mit einem verstellbaren Abgriff.
- Ein logarithmisches Potentiometer weist eine logarithmische Widerstandskennlinie auf. Der Ohmwert eines Teilwiderstandes steigt logarithmisch, beim linearen Potentiometer dagegen linear zum Drehwinkel an.
- Lineare Potentiometer werden oft in Messschaltungen als variable Spannungsteiler verwendet, logarithmische Potentiometer dagegen trifft man fast ausschliesslich in Niederfrequenzschaltungen als Lautstärke- oder Tonblenderegler.
- Trimpotentiometer werden in Schaltungen verwendet, wo es darauf ankommt, Spannungsteiler oder Widerstandswerte abzugleichen.
- Diese Lösung können Sie in Tabelle 9 (Seite 127) nachkontrollieren.
- Auch auf diese Frage gibt Tabelle 9 (Seite 127) Auskunft.
- Am gebräuchlichsten sind die Normreihen für Toleranzen von 10% und 5%.
- Bei der Serieschaltung von Widerständen werden die Widerstandswerte der Teilwiderstände addiert.
- Bei der Parallelschaltung von Widerständen werden die Leitwerte addiert, der Reziprokwert des Gesamtleitwertes ergibt dann den Gesamtwiderstand.
- Der Widerstandswert eines Leiters hängt von folgenden Faktoren ab:
 - Leiterlänge
 - Leiterquerschnitt
 - Leitermaterial
 - Leitertemperatur

m) Der spezifische Widerstand gibt an, wie gross der Widerstandswert eines Leiters aus einem bestimmten Material mit der Länge von einem Meter und dem Querschnitt von einem Quadratmillimeter ist.

n) *Vorgehen:*

1. Schritt: Berechnung der Kaltwiderstände der drei Spulen

- Grundformel anschreiben
- Zahlenwerte für die drei Spulen L_1 , L_2 , L_3 einsetzen und ausrechnen

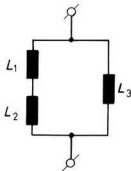


Bild zu 24 n

$$R = \frac{\rho \cdot l}{A}$$

$$R_{L1} = \frac{0,0177 \cdot 500}{0,35^2 \cdot \pi} \frac{\Omega \text{ mm}^2 \cdot \text{m}}{\text{m} \cdot \text{mm}^2}$$

$$R_{L1} = 23 \Omega$$

$$R_{L2} = \frac{0,0286 \cdot 210}{0,15^2 \cdot \pi}$$

$$R_{L2} = 85 \Omega$$

$$R_{L3} = \frac{0,096 \cdot 50}{0,3^2 \cdot \pi}$$

$$R_{L3} = 17 \Omega$$

2. Schritt: Berechnung der Widerstände der drei Spulen für eine Umgebungstemperatur von 60°

- Grundformel anschreiben
- Zahlenwerte für die drei Spulen einsetzen und ausrechnen

$$R_w = R_{20^\circ} [1 + \alpha_{20} (\vartheta - 20^\circ)]$$

$$R_{wL1} = 23 (1 + 0,00393 \cdot 40)$$

$$R_{wL1} = 26,6 \Omega$$

$$R_{wL2} = 85 (1 + 0,0039 \cdot 40)$$

$$R_{wL2} = 98,3 \Omega$$

$$R_{wL3} = 17 (1 + 0,0055 \cdot 40)$$

$$R_{wL3} = 20,7 \Omega$$

3. Schritt: Aufzeichnen der Schaltung und Berechnung des Gesamtwiderstandes

- Grundformel anschreiben
- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$R_g = \frac{(R_{wL1} + R_{wL2}) R_{wL3}}{R_{wL1} + R_{wL2} + R_{wL3}}$$

$$R_g = \frac{(26,6 + 98,3) 20,7}{26,6 + 98,3 + 20,7}$$

$$R_g = 17,75 \Omega$$

25. Was wissen Sie schon über Kondensatoren?

Antworten zu den Fragen a bis f (Seite 134)

- a) Ein Kondensator besteht aus zwei leitenden Platten oder Belägen, die einander isoliert gegenüberstehen.
- b) Die Masseinheit für die Kapazität von Kondensatoren ist das Farad oder Ampèresekunde pro Volt.
- c) Ja, ein Kondensator sperrt den Gleichstrom.
- d) Im Wechselstromkreis verhält sich der Kondensator wie ein Widerstand.
- e) Wir kennen Plattenkondensatoren, Drehkondensatoren, Trimmerkondensatoren, Keramikkondensatoren, Wickelkondensatoren mit Papier oder Kunststoffen als Isolator (Dielektrikum), Metallpapierkondensatoren und Elektrolytkondensatoren.
- f) Unter elektrischer Feldstärke versteht man eine elektrische Spannung pro Längeneinheit, was gleichbedeutend ist mit einem elektrischen Spannungsgefälle. Wenn zwischen zwei Platten, die sich in einem Abstand von 2 cm gegenüberstehen, eine elektrische Spannung von 100 V herrscht, besteht zwischen den Platten eine elektrische Feldstärke von 5000 V pro m.

Bewertung:

6 oder 5

richtige Antworten:

3 oder 4

richtige Antworten:

1 oder 2

richtige Antworten:

Keine

richtige Antwort:

Sehr gut, der Kondensator, seine Eigenschaften und sein Aufbau sind Ihnen schon recht gut geläufig. Ihre Vorkenntnisse werden es Ihnen erlauben, den gebotenen Stoff mit Leichtigkeit zu verarbeiten. Der Kondensator bedeutet für Sie kein Neuland mehr. Der folgende Abschnitt wird Sie noch tiefer in die Materie einführen.

Sie haben vom Wesen des Kondensators schon eine gewisse Vorstellung. Das folgende Kapitel bringt Ihnen viel Neues. Arbeiten Sie dieses gründlich durch; der Kondensator ist eines der wichtigsten Bauelemente der Elektronik. Die Kenntnisse seiner Verhaltensweise und seiner Funktionen sind für das Verständnis der Grundsaltungen der Elektrotechnik unerlässlich.

Mit dem Kondensator lernen Sie einen Bauteil der Elektronik kennen, von dem Sie noch nicht viel wissen. Diese Tatsache darf Sie nicht entmutigen. Der Stoff ist so gegliedert, dass man diesen absolut ohne Vorkenntnisse verstehen und aufnehmen kann. Sie haben sich bis jetzt schon recht viele Kenntnisse auf dem Gebiet der Elektrotechnik angeeignet. Das Studium des Kondensators führt Sie einen grossen Schritt weiter, handelt es sich doch bei ihm um einen der wichtigsten Bausteine der modernen Technik.

26. Repetitionsaufgaben zu «II. Kondensatoren»

Antworten zu den Fragen a bis n (Seite 171)

a) Die elektrische Ladung Q ist identisch mit der Elektrizitätsmenge. Die Ladung errechnet sich aus Strom mal Zeit. Die Masseinheit ist demzufolge die Ampèresekunde.

b) Die Kapazität eines Kondensators wird durch folgende Faktoren bestimmt:

- Plattenoberfläche
- Abstand der Platten
- Dielektrizitätskonstante des Isoliermaterials (Dielektrikum)

c) *Vorgehen:*

– Grundformel für die Kapazität anschreiben $C = \frac{A \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r}{d}$

– Grundformel nach A umstellen $A = \frac{C \cdot d}{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r}$

– Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen $A = \frac{75 \cdot 10^{-12} \cdot 1 \cdot 10^{-4}}{0,8855 \cdot 10^{-11}} \quad \frac{\text{F} \cdot \text{m} \cdot \text{m}}{\text{F}}$

$$A = 8,47 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$A = 8,47 \text{ cm}^2$$

d) Die Dielektrizitätskonstante des leeren Raumes ist eine Naturkonstante. Sie dient der Umrechnung in das Giorgi-System.

e) *Vorgehen:*

– Grundformel für die Ladung anschreiben $Q = C \cdot U$

– Formel nach C umstellen $C = \frac{Q}{U}$

– Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen $C = \frac{0,24 \cdot 10^{-3}}{120} \quad \frac{\text{As}}{\text{V}}$

$$C = 2 \mu\text{F}$$

f) *Vorgehen:*

– Grundformel für die Kapazität anschreiben $C = \frac{A \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r}{d}$

– Formel nach d umstellen $d = \frac{A \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r}{C}$

– Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen $d = \frac{10^{-2} \cdot 0,8855 \cdot 10^{-11} \cdot 1}{100 \cdot 10^{-12}} \quad \frac{\text{m}^2 \text{ F}}{\text{m F}}$

$$d = 8,855 \cdot 10^{-4} \text{ m}$$

– Grundformel für die Spannung anschreiben

$$U = \frac{Q}{C}$$

– Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$U = \frac{4 \cdot 10^{-9}}{1 \cdot 10^{-10}} \frac{\text{As}}{\text{As}}$$

$$U = 40 \text{ V}$$

– Grundformel für die Feldstärke anschreiben

$$E = \frac{U}{d}$$

– Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$E = \frac{40}{8,855 \cdot 10^{-4}} \frac{\text{V}}{\text{m}}$$

$$E = 45172 \text{ V/m}$$

g) Die Zeitkonstante eines RC-Gliedes ist das Produkt aus Widerstand und Kapazität. Sie gibt die Zeit an, die verstreicht, bis die Spannung am Kondensator 63% der Ladespannung erreicht hat.

h) Vorgehen:

– Grundformel für die Zeitkonstante anschreiben

$$\tau = C \cdot R$$

– Formel nach C umstellen

$$C = \frac{\tau}{R}$$

– Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$C = \frac{50 \cdot 10^{-3}}{330 \cdot 10^3} \frac{\text{As}}{\text{V}}$$

$$C = 0,1515 \mu\text{F}$$

i) Vorgehen:

– Schaltbild aufzeichnen

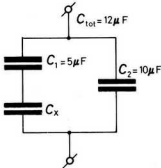


Bild zu 26 i

1. Schritt: Berechnung des Serienzweiges C_s

– Formel anschreiben

– Zahlenwerte einsetzen

$$C_s = C_{\text{tot}} - C_2$$

$$C_s = 12 - 10 = 2 \mu\text{F}$$

2. Schritt: Berechnung der unbekannten Kapazität

– Formel für die Serieschaltung anschreiben

$$C_s = \frac{C_x \cdot C_1}{C_x + C_1}$$

– Formel nach C_x umstellen

$$C_x = \frac{C_s \cdot C_1}{C_1 - C_s}$$

– Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$C_x = \frac{2 \cdot 5}{5 - 2}$$

$$C_x = 3,33 \mu\text{F}$$

k) Vorgehen:

– Grundformel für U anschreiben

$$U = \frac{Q}{C}$$

– Schlussfolgerung ziehen:

Wenn bei gleichbleibender Ladung die Kapazität halbiert wird, muss die Spannung am Kondensator auf den doppelten Wert ansteigen.

Die Spannung steigt auf 200 V an.

l) Vorgehen:

– Schaltbild aufzeichnen.

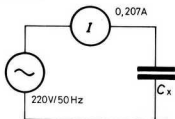


Bild zu 26 I

– Grundformel für kapazitiven Blindwiderstand anschreiben

$$X_c = \frac{1}{\omega C}$$

– Formel nach C umstellen

$$C = \frac{1}{\omega X_c}$$

- Formel für X_c anschreiben

$$X_c = \frac{U}{I}$$

- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$X_c = \frac{220}{0,207}$$

$$X_c = 1063 \, \Omega$$

- Blindwiderstandswert in Formel für C einsetzen und ausrechnen

$$C = \frac{1}{2\pi \cdot 50 \cdot 1063}$$

$$C = 3 \, \mu F$$

- m) Der Metallpapierkondensator ist selbstheilend. Ein Spannungsdurchschlag vermag ihn nicht zu zerstören, die Durchschlagsstelle regeneriert sich selbst. Bei gleichen elektrischen Daten sind seine Abmessungen kleiner.
- n) Elektrolytkondensatoren dürfen nur an Gleichspannung betrieben werden, wobei die Polarität und die Welligkeit dieser Spannung zu beachten sind.

Die Prüfungsaufgaben haben Ihnen gezeigt, wie gut Sie über den Kondensator Bescheid wissen. Sie haben ein Bauelement kennen gelernt, das in der gesamten Technik eine entscheidende Rolle spielt. Die Kenntnisse über Aufbau und Arbeitsverhalten von Kapazitäten gehören zum elementaren Rüstzeug des Fachmannes. Beschäftigen Sie sich auf gar keinen Fall mit dem folgenden Kapitel, wenn Sie mit der Lösung der Repetitionsaufgaben Mühe hatten. Arbeiten Sie den Stoff so lange durch, bis Ihnen alle Zusammenhänge klar sind. Wenn Sie sich jetzt mit Halbwissen zufrieden geben, werden Sie später den Anschluss an den Stoff verpassen.

27. Was wissen Sie schon über Spulen?

Antworten zu den Fragen a bis g (Seite 172)

- a) Im einfachsten Fall besteht eine Spule aus einer freitragenden Wicklung; meistens sind die Wicklungen jedoch auf einem Spulenkörper angebracht. Hochfrequenzspulen haben oft einen Ferritkern, während Niederfrequenzspulen einen Kern aus lamelliertem Eisen aufweisen.
- b) Die Induktivität von Spulen wird in Henry gemessen. ($H = Vs A^{-1}$)
- c) Im Gleichstromkreis wirkt, vom Einschaltmoment abgesehen, nur der ohmsche Widerstand der Spulenwicklung.
- d) Im Wechselstromkreis wirkt die Spule wie ein Widerstand, dessen Wert mit der Frequenz und der Induktivität proportional ansteigt.
- e) Wir unterscheiden zwischen Luftspulen und Spulen mit (meist) ferromagnetischem Kern. Luftspulen werden vorzugsweise in Hochfrequenzkreisen als Schwingkreiselement oder als Drosselspule verwendet. Spulen mit ferro-

magnetischem Kern sind sowohl in der Hochfrequenz- wie in der Niederfrequenztechnik anzutreffen: Ferritkerne (je nach Qualität) in der Hochfrequenz bis zu Tonfrequenz, lamellierte Eisenkerne bei Niederfrequenz oder in Siebkreisen.

Variometer sind Spulen mit kontinuierlich einstellbarer Induktivität.

- f) Der Eisenkern erhöht die Induktivität der Spule.
- g) Ein magnetisches Feld ist der Wirkungsbereich magnetischer Kraftlinien.

Bewertung:

7 oder 6

richtige Antworten:

Sehr gut. Sie wissen schon recht viel über Induktivitäten. Der folgende Stoff dürfte Ihnen keine Schwierigkeiten bereiten.

5 oder 4

richtige Antworten:

Sie haben schon recht gute Vorkenntnisse. Der Inhalt des folgenden Abschnittes wird Ihnen helfen, Ihre Kenntnisse zu vertiefen.

3 richtige

Antworten:

Sie verfügen über eine gewisse Grundlage. Arbeiten Sie den folgenden Abschnitt schrittweise gründlich durch. Die Spule ist nebst dem Kondensator eines der wichtigsten Elemente der modernen Nachrichtentechnik und der Elektronik. Fundierte Kenntnisse über deren Aufbau und Arbeitsverhalten sind für das Verständnis der Schaltungstechnik unerlässlich.

2 bis 0

richtige Antworten:

Die Fragen a, f und g müssen Sie richtig beantworten können, wenn Sie den Inhalt des Kapitels über den Magnetismus richtig verarbeitet haben. Das Verhalten der Spule im Gleich- und Wechselstromkreis kann nur verstanden werden, wenn die Grundlagen über den Magnetismus als Basis vorhanden sind. Studieren Sie die entsprechenden Unterlagen noch einmal, bevor Sie weiterfahren.

28. Repetitionsaufgaben zu «III. Spulen»

Antworten zu den Fragen a bis e (Seite 196)

a) *Vorgehen:*

- Dimensionierungsformel für Luftspulen anschreiben:

$$L = \frac{\mu_0 \cdot \pi \cdot r^2 \cdot N^2}{l}$$

- Formel nach N^2 umstellen

$$N^2 = \frac{L \cdot l}{\mu_0 \cdot \pi \cdot r^2}$$

- Gleichung radizieren

$$N = \sqrt{\frac{L \cdot l}{\mu_0 \cdot \pi \cdot r^2}}$$

- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$N = \sqrt{\frac{0,6 \cdot 0,12}{1,256 \cdot 10^{-6} \cdot 3,14 \cdot 4 \cdot 10^{-4}}}$$

$$[N] = \frac{Vs \cdot m \cdot A \cdot m}{A \cdot Vs \cdot m^2} = 1$$

$$N = 6754 \text{ Wdg}$$

b) Vorgehen:

- Grundformel für die induzierte Spannung anschreiben:

$$U = \frac{\Delta I}{\Delta t} \cdot L$$

- Gleichung nach L umstellen

$$L = \frac{U}{\frac{\Delta I}{\Delta t}} = \frac{U \cdot \Delta t}{\Delta I}$$

- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$L = \frac{50 \cdot 0,7}{5}$$

$$[L] = \frac{Vs}{A} = H$$

$$L = 7 H$$

c) Vorgehen:

- Schaltung zeichnen



Bild zu 28 c

- Grundformel für Zeitkonstante anschreiben

$$\tau = \frac{L}{R}$$

- Formel nach L umstellen

$$L = \tau \cdot R$$

- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$L = 8 \cdot 10^{-3} \cdot 0,2 \cdot 10^3 \text{ s} \cdot \frac{V}{A}$$

$$L = 1,6 H$$

d) *Vorgehen:*

- Schaltbild zeichnen:

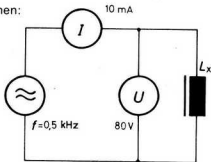


Bild zu 28d

1. Schritt: Berechnen des Blindwiderstandes

- Grundformel anschreiben:

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

- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$X_L = \frac{80}{10 \cdot 10^{-3}} \frac{\text{V}}{\text{A}}$$

$$X_L = 8 \text{ k}\Omega$$

2. Schritt: Bestimmen der Induktivität L

- Grundformel anschreiben

$$X_L = \omega \cdot L$$

- nach L umstellen

$$L = \frac{X_L}{\omega}$$

- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$L = \frac{8 \cdot 10^3}{6,28 \cdot 500} \frac{\text{V}}{\text{A} \cdot \text{s}}$$

$$L = 2,546 \text{ H}$$

e) *Vorgehen:*

1. Schritt: Berechnen des Blindwiderstandes der Spule L_1

- Grundformel anschreiben

$$X_{L1} = \omega \cdot L_1$$

- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$X_L = 6,28 \cdot 2 \cdot 10^3 \cdot 1,5 \frac{1}{\text{s}} \cdot \frac{\text{Vs}}{\text{A}}$$

$$X_L = 18,84 \text{ k}\Omega$$

2. Schritt: Berechnung von I_2

- Grundformel anschreiben

$$I_2 = \frac{U}{X_{L1}}$$

- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$I_2 = \frac{20}{18,84 \cdot 10^3}$$

$$I_2 = 1,062 \text{ mA}$$

3. Schritt: Berechnung von I_3

- Grundformel anschreiben
- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$I_3 = I_1 - I_2$$

$$I_3 = 4 \cdot 10^{-3} - 1,062 \cdot 10^{-3}$$

$$I_3 = \mathbf{2,938 \text{ mA}}$$

4. Schritt: Berechnen von X_{L_2}

- Grundformel anschreiben
- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$X_{L_2} = \frac{U}{I_3}$$

$$X_{L_2} = \frac{20}{2,938 \cdot 10^{-3}}$$

$$X_{L_2} = \mathbf{6,81 \text{ k}\Omega}$$

5. Schritt: Berechnung von L_2

- Grundformel anschreiben
- nach L_2 umstellen
- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$X_{L_2} = \omega L_2$$

$$L_2 = \frac{X_{L_2}}{\omega}$$

$$L_2 = \frac{6,81 \cdot 10^3}{6,28 \cdot 2 \cdot 10^3} \frac{\text{Vs}}{\text{A}}$$

$$L_2 = \mathbf{0,542 \text{ H}}$$

Haben Sie die Prüfungsaufgaben fehlerfrei gelöst? Wenn Ihnen die Lösung der Aufgaben gelungen ist, dann haben Sie das Rüstzeug, um mit gutem Gewissen den folgenden Stoff in Angriff zu nehmen. Wir werden uns im Rahmen der nächsten Kapitel mit Serie- und Parallelschaltung von Blind- und Wirkwiderständen befassen.

29. Was wissen Sie schon über die Serieschaltung von Blind- und Wirkwiderständen?

Antworten zu den Fragen a bis h (Seite 197)

- a) Der Wechselstromwiderstand eines verlustfreien Kondensators wird als «kapazitiver Blindwiderstand» bezeichnet.
- b) Der Wechselstromwiderstand einer verlustfreien Induktivität wird als «induktiver Blindwiderstand» bezeichnet.
- c) Im Kondensator eilt der Strom der Spannung um 90° voraus.
- d) In der Spule eilt der Strom der Spannung um 90° nach.
- e) Nein. Wirk- und Blindwiderstände einer Serieschaltung müssen geometrisch addiert werden.
- f) Der Wechselstromwiderstand einer Schaltung, die aus Wirk- und Blindwiderständen besteht, heisst «Impedanz».
- g) Blindleistung ist das Produkt aus Strom und Spannung, die an einem Blindwiderstand gemessen werden. Blindleistung leistet keine Arbeit, es wird keine Energie verbraucht.
- h) Der Leistungsfaktor $\cos \varphi$ dient der Berechnung der Wirkleistung einer Impedanz. Die Wirkleistung entspricht dem Produkt aus Scheinleistung und Leistungsfaktor. Unter Scheinleistung versteht man die von der Impedanz scheinbar aufgenommene Leistung d.h. das Produkt von Strom und Spannung.

Bewertung:

7 bis 8

richtige Antworten:

Sehr gut. Sie haben sich schon mit den Problemen der Schaltungen von Wechselstromkreisen befasst. Legen Sie beim Studium des folgenden Stoffes das Schwergewicht auf die Darstellung in der Gaußschen Zahlenebene und lösen Sie eigene Beispiele, um sich in dieser Darstellungsart zu schulen.

6 richtige

Antworten:

Sie haben sich schon mit gemischten Schaltungen in Wechselstromkreisen beschäftigt. Diese Vorbildung wird Ihnen beim Studium der folgenden Materie von Nutzen sein. Bedenken Sie jedoch, dass es sich hierbei um grundlegende Probleme handelt. Diese werden Ihnen in gleicher oder ähnlicher Form immer wieder entgegentreten. Sie müssen sich über die Vorgänge in Wechselstromkreisen ein klares Bild machen. Unsicherheiten haben Sie durch mehrmaliges gründliches Durcharbeiten des Stoffes zu beseitigen.

Sie schaffen sich jetzt die Grundlagen für das Verständnis der Technik des Wechselstromes.

0 bis 5

richtige Antworten:

Ihnen fehlen die sauberen Grundlagen für das Studium des folgenden Abschnittes. Die Fragen a, b, c,

d und g müssen Sie beantworten können, diese Probleme wurden in früheren Abschnitten behandelt. Die Frage e sollten Sie auf Grund logischer Überlegungen richtig lösen können. Es lohnt sich nicht, das Studium fortzusetzen, wenn elementare Grundlagen fehlen. Eignen Sie sich vorerst das fehlende Wissen an, indem Sie den bis dahin behandelten Stoff noch einmal überarbeiten.

30. Repetitionsaufgaben zu «IV. Serieschaltung von Wirk- und Blindwiderständen».

Antworten zu den Fragen a bis h (Seite 223)

- a) Der Leistungsfaktor $\cos \varphi$ erlaubt die Berechnung der Wirkleistung einer Impedanz, wenn die Scheinleistung bekannt ist. Die Wirkleistung ergibt sich aus dem Produkt von Scheinleistung und Leistungsfaktor $\cos \varphi$.
- b) Der Sinus des Phasenwinkels φ wird Blindleistungsfaktor genannt. Er erlaubt die Berechnung der Blindleistung einer Impedanz, wenn die Scheinleistung bekannt ist. Die Blindleistung entspricht dem Produkt aus Scheinleistung und Blindleistungsfaktor $\sin \varphi$.

c) *Scheinleistung*

Die Scheinleistung ist die Leistung, die von einer Impedanz scheinbar aufgenommen wird. Sie ist das Produkt aus Strom und Spannung. Masseneinheit $[S] = VA = \text{Volt} \times \text{Ampère}$.

Wirkleistung

Die Wirkleistung ist die Leistung, die in einer Impedanz von den Widerständen verbraucht wird. Sie ist das Produkt aus Scheinleistung und Leistungsfaktor $\cos \varphi$. Masseinheit $[P] = \text{Watt}$

Blindleistung

Die Blindleistung ist die Leistung, die scheinbar von den Blindwiderständen aufgenommen wird. Infolge der Phasenverschiebung in den Blindwiderständen wird diese Leistung jedoch nicht verbraucht, sie leistet keine Arbeit. Sie ist das Produkt aus Scheinleistung und Blindleistungsfaktor $\sin \varphi$. Masseinheit $[P_q] = \text{Var} = \text{Volt} \cdot \text{Ampère reaktiv}$.

- d) Die Spulengüte Q_L ist ein Mass für die Güte von Spulen. Die Spulengüte ist ein reiner Zahlenwert und entspricht dem Verhältnis von Blindwiderstand und Serieverlustwiderstand, sie ist demzufolge frequenzabhängig.
- e) Kondensatorverluste werden mit dem Verlustfaktor $\text{tg } \delta$ definiert. Er entspricht dem Tangens des Verlustwinkels δ ; dieser ist der Komplementärwinkel zum Phasenwinkel φ .

f) *Vorgehen:*

- Ersatzschaltbild zeichnen

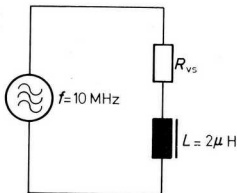


Bild zu 30 f

- Grundformel für Q_L anschreiben
- Formel nach R_{vs} umstellen
- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$Q_L = \frac{X_L}{R_{vs}}$$

$$R_{vs} = \frac{X_L}{Q_L}$$

$$R_{vs} = \frac{2\pi \cdot 10 \cdot 10^6 \cdot 2 \cdot 10^{-6}}{80}$$

$$|R_{vs}| = \frac{V_s}{A_s} = \frac{V}{A} = \Omega$$

$$R_{vs} = 1,57 \Omega$$

g) *Vorgehen:*

- Ersatzschaltbild zeichnen

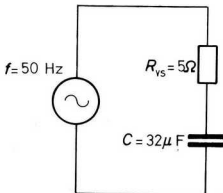


Bild zu 30 g

- Grundformel für $\operatorname{tg} \delta$ anschreiben
- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$\operatorname{tg} \delta = \omega \cdot C \cdot R$$

$$\operatorname{tg} \delta = 2\pi \cdot 50 \cdot 32 \cdot 10^{-6} \cdot 5$$

$$[\operatorname{tg} \delta] = \frac{1}{s} \cdot \frac{As}{V} \cdot \frac{V}{A} = 1$$

$$\operatorname{tg} \delta = 5,03 \cdot 10^{-2}$$

h) Vorgehen:

- 1. Schritt: Berechnen der Blindwiderstände
- Grundformel für die Blindwiderstände anschreiben

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

$$X_L = \omega L$$

- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$X_C = \frac{1}{2\pi \cdot 0,6 \cdot 10^6 \cdot 4 \cdot 10^{-10}}$$

$$[X_C] = \frac{s \cdot V}{As} = \frac{V}{A} = \Omega$$

$$X_C = 663 \Omega$$

$$X_L = 2\pi \cdot 0,6 \cdot 10^6 \cdot 0,1 \cdot 10^{-3}$$

$$[X_L] = \frac{1}{s} \cdot \frac{Vs}{A} = \frac{V}{A} = \Omega$$

$$X_L = 377 \Omega$$

2. Schritt: Berechnen der Impedanz

- Grundformel für die Impedanz anschreiben
- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$|Z| = \sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2}$$

$$|Z| = \sqrt{150^2 + (377 - 663)^2}$$

$$Z = 323 \Omega$$

3. Schritt: Berechnen der Leistungsfaktoren

- Grundformel für $\cos \varphi$ anschreiben
- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$\cos \varphi = \frac{R}{Z}$$

$$\cos \varphi = \frac{150}{323}$$

$$\cos \varphi = 0,464$$

- Grundformel für $\sin \varphi$ anschreiben
- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen
- Phasenwinkel aus Tabelle

$$\sin \varphi = \frac{X_C - X_L}{Z}$$

$$\sin \varphi = \frac{663 - 377}{323}$$

$$\sin \varphi = \mathbf{0,885}$$

$$\varphi = \mathbf{-62^\circ}$$

- 4. Schritt: Berechnen der Leistungen
- Grundformel für die Leistungen anschreiben

$$S = \frac{U^2}{Z}$$

$$P = S \cdot \cos \varphi$$

$$P_q = S \cdot \sin \varphi$$

- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$S = \frac{220^2}{323} \text{ [S]} = \frac{V^2 A}{V} = \mathbf{VA}$$

$$S = \mathbf{149,8 \text{ VA}}$$

$$P = 149,8 \cdot 0,464$$

$$P = \mathbf{69,5 \text{ W}}$$

$$P_q = 149,8 \cdot 0,885$$

$$P_q = \mathbf{132,6 \text{ Var}}$$

- 5. Schritt: Kontrolle der Resultate durch Berechnung der Leistung mit Hilfe des Stromes

- Formel für I anschreiben

$$I = \frac{U}{Z}$$

- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$I = \frac{220 \text{ V}}{323 \text{ } \Omega}$$

$$I = 0,681 \text{ A}$$

$$I^2 = 0,464 \text{ A}^2$$

- Formeln für die Leistungen anschreiben

$$P = I^2 \cdot R$$

$$P_q = I^2 \cdot (X_C - X_L)$$

- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$P = 0,464 \cdot 150 \frac{\text{A}^2 \text{ V}}{\text{A}}$$

$$P = 69,5 \text{ W}$$

$$P_q = 0,464 \cdot 286$$

$$P_q = 132,6 \text{ Var}$$

– 6. Schritt: Aufzeichnen des Vektordiagrammes

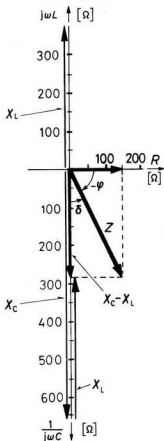


Bild zu 30 h

31. Was wissen Sie schon über die Parallelschaltung von Wirk- und Blindwiderständen?

Antworten zu den Fragen a–f (Seite 224)

a) Der $\cos \varphi$ hat in der Serie- und in der Parallelschaltung die gleiche Bedeutung. Seine Berechnung unterscheidet sich jedoch:

Serieschaltung: $\cos \varphi = \frac{\text{Serie-Wirkwiderstand}}{\text{Impedanz}}$

Parallelschaltung: $\cos \varphi = \frac{\text{Impedanz}}{\text{Parallel-Wirkwiderstand}}$

- b) Die Berechnung von Serieschaltungen basiert entweder auf den Spannungen über den einzelnen Elementen oder auf den Widerstandswerten dieser Elemente. Die Bestimmung der Parallelschaltung dagegen erfolgt über die Ströme, die durch die einzelnen Widerstände fließen oder über die Leitwerte dieser Widerstände.
- c) Ein Leitwert ist der Reziprokwert eines Widerstandes. Seine Masseinheit ist das «Siemens».
- d) Zur Berechnung der Blindleistung dieser Schaltung müssen entweder der Blindleistungsfaktor $\sin \varphi$ und die Scheinleistung oder die Spannung an der Schaltung und der Blindstrom bekannt sein.
- e) Ja, der Gütefaktor einer Spule entspricht dem $\cos$ des Phasenwinkels φ . Die Spulengüte kann deshalb für eine Seriedämpfung und für eine Paralleldämpfung definiert werden.
- f) Die Richtung von Leitwert und Widerstand ist bei reinen Widerständen gleich, wenn auch ihre Längen ungleich sind, da sie zueinander reziprok sind.

Die Richtung des Leitwertes von reinen Reaktanzen ist umgekehrt der Richtung der eigentlichen Reaktanz (Pfeil um 180° gedreht). Auch hier sind die Längen von Reaktanz und Leitwert, da reziprok, ungleich. Da die Impedanzen sich vektoriell zusammensetzen wie auch die resultierenden Leitwerte, zeigen die Leitwerte und ihre entsprechenden Impedanzen in unterschiedliche Richtungen.

Bewertung:

5 bis 6
richtige Antworten: Sehr gut, Sie verfügen über gute Vorkenntnisse. Sollten Sie jedoch die richtigen Antworten durch logisches Überlegen gefunden haben, so dürfen Sie sich darüber freuen, weil Sie gelernt haben, von Bekanntem auf Unbekanntes zu schliessen und richtig zu kombinieren.

Weniger als 4
richtige Antworten: Die Fragen b und f stellten höhere Anforderungen an die Kenntnisse oder an die Fähigkeit, logisch zu denken. Die übrigen Fragen sollten Sie mit dem bis dahin erworbenen Wissen beantworten können. Die Fragen a und c müssen Sie beantworten können, sie wurden bereits behandelt. Die Antwort auf die Fragen d und e sollten Sie finden, wenn Sie in der Lage sind, logisch zu denken und bereits angeeignetes Wissen richtig einzusetzen. Prüfen Sie die gemachten Fehler und überarbeiten Sie den Stoff der Ihnen Schwierigkeiten bereitet nochmals, bevor Sie das neue Kapitel in Angriff nehmen.

32. Repetitionsaufgaben zu «V. Parallelschaltung von Wirk- und Blindwiderständen.

Antworten zu den Fragen a bis g (Seite 241)

- a) Die Richtung des Blindleitwertvektors wird durch die Richtung des entsprechenden Stromes bestimmt.
- b) Siehe Aufgabe a der Einführungsfragen. (Seite 461)
- c) Der induktive Blindleitwert entspricht dem Reziprokwert des induktiven Blindwiderstandes.
- d) Der kapazitive Blindleitwert entspricht dem Reziprokwert des kapazitiven Blindwiderstandes.
- e) *Vorgehen:*
 - Aufzeichnen der Schaltung

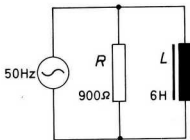


Bild zu 32 e

1. Schritt: Berechnen der Leitwerte

- Grundformel anschreiben

$$G = \frac{1}{R}$$

$$B_L = \frac{1}{\omega \cdot L}$$

- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$G = \frac{1}{900}$$

$$G = 1,11 \text{ mS}$$

$$B_L = \frac{1}{2\pi \cdot 50 \cdot 6}$$

$$B_L = 0,531 \text{ mS}$$

2. Schritt: Zeichnen des Vektordiagrammes

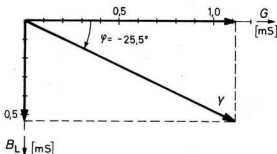


Diagramm zu 32 e

3. Schritt: Berechnen der Impedanz

- Grundformel anschreiben

$$Y = \sqrt{G^2 + B_L^2}$$

$$Z = \frac{1}{\sqrt{G^2 + B_L^2}}$$

- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$Z = \frac{1}{\sqrt{1,11^2 \cdot 10^{-6} + 0,531 \cdot 10^{-6}}}$$

$$Z = \mathbf{812 \, \Omega}$$

4. Schritt: Berechnung des Leistungsfaktors $\cos \varphi$

- Grundformel anschreiben

$$\cos \varphi = \frac{Z}{R}$$

- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$\cos \varphi = \frac{812}{900}$$

$$\cos \varphi = \mathbf{0,902}$$

5. Schritt: Zusammenstellung der Resultate und Überprüfung mit Hilfe des Vektordiagramms

$$Z = \mathbf{812 \, \Omega}$$

$$\cos \varphi = \mathbf{0,902}$$

Das Zeigerdiagramm ergibt einen Phasenwinkel von $25,5^\circ$, die Kontrolle mit dem Rechenschieber ergibt für diesen Winkel einen $\cos$ von 0,902. Damit hat die graphische Darstellung die rechnerische Lösung bestätigt.

f) Vorgehen:

– Aufzeichnen der Schaltung

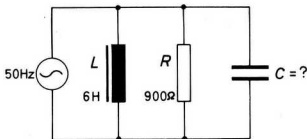


Bild zu 32 f

1. Schritt: Aufstellen der Bedingung für die Lösung

– Bedingung: Um den Einfluss des induktiven Blindwiderstandes zu kompensieren, muss der kapazitive Blindwiderstand den gleichen Wert aufweisen.

– Bedingungsformel anschreiben:

$$X_C = X_L \text{ daraus folgt } B_C = B_L$$

– Bestimmungsgleichungen für B_C einsetzen

$$\omega C = 0,531 \cdot 10^{-3} \text{ S}$$

– nach C umstellen

$$C = \frac{0,531 \cdot 10^{-3}}{\omega}$$

– Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$C = \frac{0,531 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot \pi \cdot 50}$$

$$C = 1,69 \mu\text{F}$$

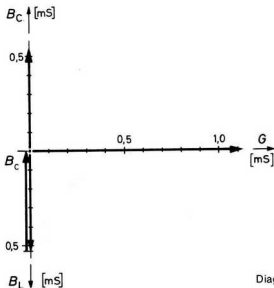


Diagramm zu 32 f

g) Vorgehen:

1. Schritt: Berechnen der Leitwerte

– Grundformeln anschreiben

$$G = \frac{1}{R}$$

– Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen $G = \frac{1}{30}$

$$G = 33,3 \text{ mS}$$

$$B_L = \frac{1}{\omega L} [B_L] = \frac{\text{sA}}{\text{Vs}} = \text{S}$$

$$B_L = \frac{1}{2\pi \cdot 0,6 \cdot 10^{-3} \cdot 25 \cdot 10^{-3}}$$

$$B_L = 10,61 \text{ mS}$$

$$B_C = \omega C [B_C] = \frac{\text{As}}{\text{Vs}} = \text{S}$$

$$B_C = 2\pi \cdot 0,6 \cdot 10^{-5}$$

$$B_C = 37,7 \text{ mS}$$

2. Schritt: Berechnen der Impedanz

– Grundformel anschreiben

$$|Z| = \frac{1}{\sqrt{G^2 + (B_C - B_L)^2}}$$

– Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$|Z| = \frac{1}{\sqrt{33,3^2 \cdot 10^{-6} + (37,7 \cdot 10^{-3} - 10,61 \cdot 10^{-3})^2}}$$

$$|Z| = \mathbf{23,3 \, \Omega}$$

3. Schritt: Berechnung des Leistungsfaktors und des Blindleistungsfaktors

– Grundformeln anschreiben

$$\cos \varphi = \frac{Z}{R}$$

– Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen $\cos \varphi = \frac{23,3}{30}$

$$\cos \varphi = \mathbf{0,777}$$

$$\sin \varphi = Z \cdot (B_C - B_L)$$

$$\sin \varphi = 23,3 \cdot (37,7 \cdot 10^{-3} - 10,61 \cdot 10^{-3})$$

$$\sin \varphi = \mathbf{0,631}$$

4. Schritt: Berechnen der Leistungen

– Grundformeln anschreiben

$$S = \frac{U^2}{Z}$$

– Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$S = \frac{20^2}{23,3} \text{ [S]} = \frac{V \cdot V \cdot A}{V} = VA$$

$$S = 17,18 \text{ VA}$$

– Grundformel anschreiben

$$P_q = S \cdot \sin \varphi$$

Kontrollen:

$$P_q = U^2 \cdot (B_C - B_L)$$

– Zahlenwerte einsetzen
und ausrechnen

$$P_q = 17,18 \cdot 0,631$$

$$P_q = 20^2 (37,7 - 10,61) \cdot 10^{-3}$$

$$P_q = 10,84 \text{ Var}$$

$$P_q = 10,84 \text{ Var}$$

$$P = S \cdot \cos \varphi$$

$$P = \frac{U^2}{R}$$

$$P = 17,18 \cdot 0,777$$

$$P = \frac{20^2}{30}$$

$$P = 13,35 \text{ W}$$

$$P = 13,33 \text{ W}$$

5. Schritt: Zusammenstellen der Resultate und Überprüfung mit Hilfe des Vektordiagramms

$$Z = 23,3 \text{ Ohm}$$

$$S = 17,18 \text{ VA}$$

$$P = 13,35 \text{ W}$$

$$P_q = 10,84 \text{ Var}$$

$$\cos \varphi = 0,777$$

$$\sin \varphi = 0,631$$

Das Vektordiagramm ergibt einen Phasenwinkel von 39° . Dieser Winkel stimmt mit den errechneten cos- und sin-Werten überein. Die Richtigkeit der Impedanzberechnung ist dadurch mit Hilfe der graphischen Darstellung bestätigt worden.

Die Prüfungsaufgaben dienen Ihrer Selbstkontrolle. Sie beweisen Ihnen, wie gut Sie die Materie begriffen haben. Der Stoff wird immer anspruchsvoller. Gehen Sie erst zum nächsten Abschnitt über, wenn Ihnen die Prüfungsaufgaben keine Schwierigkeiten bereiten.

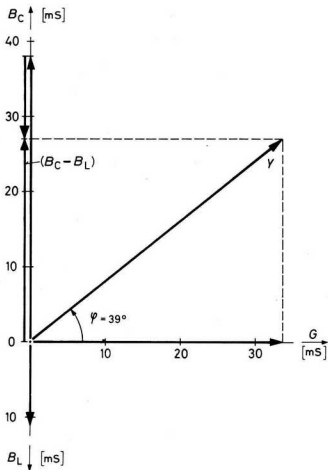


Bild zu 32 g

33. Was wissen Sie schon über den Transformator?

Antworten zu den Fragen a bis f (Seite 242)

- a) Ein Niederfrequenztransformator besteht aus einem lamellierten Eisenkern, einer Sekundär- und einer Primärwicklung.
- b) Der Netztransformator hat in elektrischen Geräten die Speisespannungen aus der meist anderen Netzspannung zu gewinnen.
- c) Das Spannungsübersetzungsverhältnis des Transformators wird durch das Verhältnis der Windungszahlen bestimmt. Dieses wird Übersetzungsverhältnis genannt und ist dem Spannungsübersetzungsverhältnis proportional.
- d) Die Lamellierung des Transformatkernes hält die Wirbelstromverluste gering.
- e) Der Eisenkern erhöht die Induktivität der Wicklungen. Er sorgt für eine enge Kopplung und erhöht den Wirkungsgrad des Übertragers.
- f) Hochfrequenztransformatoren werden oft ohne Eisenkern gebaut. Die notwendige Spuleninduktivität und die erforderliche Kopplung lassen sich ohne Eisenkern erreichen.

Bewertung

5 bis 6

richtige Antworten:

Sehr gut, Sie haben schon einiges über Transformatoren gehört. Übertrager sind für Sie keine unbekannten Bauelemente mehr. Der folgende Stoff wird Sie tiefer in das Wesen der Transformatoren einführen.

3 bis 4

richtige Antworten:

Sie verfügen über recht gute Vorkenntnisse. Diese werden Ihnen das Durcharbeiten des folgenden Stoffes erleichtern.

Weniger als 3

richtige Antworten:

Frage d sollten Sie beantworten können, da dieses Problem bereits im Kapitel über Induktivitäten behandelt wurde. Frage e sollten Sie aufgrund Ihrer Kenntnisse über Induktivitäten und durch logisches Überlegen lösen können. Überarbeiten Sie den Abschnitt über Induktivitäten nochmals gründlich, sein Inhalt wird für das richtige Verständnis des Transformators vorausgesetzt.

34. Repetitionsaufgaben zu «VI. Der Transformator»

Antworten zu den Fragen a bis g (Seite 265)

- a) Bei diesem Transformator sind 95% des Primärflusses in der Sekundärwicklung wirksam.

b) *Vorgehen:*

– Grundformel anschreiben:

$$\sigma = 1 - k^2$$

– Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$\sigma = 1 - 0,92^2$$

$$\sigma = 0,1536$$

c) *Vorgehen:*

– Grundformel anschreiben

$$M = k \cdot \sqrt{L_1 \cdot L_2}$$

– Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$M = 0,6 \cdot \sqrt{5 \cdot 3}$$

$$M = 2,323 \text{ H}$$

d) Der Eisenquerschnitt des Transformators wird für einen bestimmten Fluss durch die zu übertragende Leistung und die Frequenz bestimmt. Zur Berechnung des notwendigen Querschnittes müssen ausser der Leistung und der Frequenz noch die magnetische Induktion, die Stromdichte im Leiter und das Verhältnis von Kupfer zu Eisengewicht bekannt sein. Diese zusätzlichen Daten sind jedoch für die meisten Transformatoren gegeben, so dass der Querschnitt nur noch durch die Leistung und die Frequenz bestimmt wird.

e) Die Sekundärspannung entspricht inbezug auf die Phasenlage der Gegeninduktionsspannung; diese ist der Erregerspannung – beim Transformator also der Primärspannung – immer entgegengesetzt.

f) Die Vorteile des Spartransformators sind die geringeren Eisen- und Drahtquerschnitte bei gleicher Leistung gegenüber dem Trafo mit Sekundärwicklung. Der grosse Nachteil des Autotransformators ist die fehlende galvanische Trennung zwischen Primär- und Sekundärspannung.

g) *Vorgehen:*

– Grundformel für das Übersetzungsverhältnis anschreiben

$$\bar{u} = \sqrt{\frac{Z_1}{Z_2}} = \frac{N_1}{N_2}$$

– nach Z_1 umstellen

$$Z_1 = \frac{N_1^2}{N_2^2} \cdot Z_2$$

– Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$Z_1 = \left(\frac{4000^2}{100^2} \right) \cdot 5$$

$$Z_1 = 8 \text{ k}\Omega$$

$$\bar{u} = 40$$

Vergessen Sie nicht, dass die Repetitionsaufgaben einen doppelten Zweck erfüllen. Sie dienen dem Schüler einerseits als Repetition des Stoffes, andererseits geben sie ihm Auskunft über den Stand seines Wissens.

35. Was wissen Sie schon über den Serieschwingkreis?

Antworten zu den Fragen a bis f (Seite 267)

- a) Der Serieschwingkreis besteht aus einem Kondensator und einer Spule.
- b) Die Resonanzfrequenz ist diejenige Betriebsfrequenz eines Schwingkreises, für welche der kapazitive und der induktive Blindwiderstand gleich gross sind. Der Schwingkreis wirkt im Resonanzfall wie ein ohmscher Widerstand.
- c) Die Spulengüte ist für das Verhalten des Schwingkreises wesentlich. Je grösser ihr Wert, desto kleiner wird die Bandbreite.
- d) Die Kondensatorverluste sind sehr viel kleiner als die Spulenverluste, sie fallen deshalb für die Bestimmung der Kreisverluste meist nicht in Betracht.
- e) Serieschwingkreise werden überall dort verwendet, wo es darum geht, eine unerwünschte Frequenz kurzzuschliessen. Werden Seriekreise als Koppellemente zwischen zwei Baugruppen verwendet, so übertragen sie nur die Resonanzfrequenz. Jede Antenne lässt sich als Seriekreis darstellen.
- f) Schwingkreise weisen ihre typischen Eigenschaften in der Umgebung der Resonanzfrequenz auf. Der Sonderfall der Resonanz besteht darin, dass für die Resonanzfrequenz der induktive und der kapazitive Blindwiderstand der Schaltung gleich gross sind.

Bewertung

5 bis 6

richtige Antworten:

Sehr gut, der Schwingkreis ist für Sie kein Neuling mehr. Sie verfügen über gute Grundlagen, die es Ihnen erlauben, ohne Schwierigkeiten tiefer in das Wesen des Schwingkreises einzudringen.

3 bis 4

richtige Antworten:

Gut, Sie haben den Stoff über die Serie- und Parallelschaltung gut verarbeitet. Der folgende Teil über Schwingkreise dürfte Ihnen keine Mühe bereiten.

weniger als 3

richtige Antworten:

Die Fragen a, c und d sollten Sie richtig beantworten können. Die Probleme wurden anlässlich der Behandlung der Serie- und Parallelschaltung von Blind- und Wirkwiderständen gestreift. Sie dürfen nur mit dem Studium der Schwingkreise beginnen, wenn Ihnen die Vorgänge in Parallel- und Serieschaltung von Wirk- und Blindwiderständen geläufig sind.

36. Repetitionsaufgaben zu «VII. der Serieschwingkreis»

Antworten zu den Fragen a bis g (Seite 280)

- a) Im Resonanzfall heben sich der kapazitive und der induktive Blindwiderstand infolge der Phasenverschiebung von 180° zwischen ihnen gegenseitig auf. Wirksam bleibt nur noch der ohmsche Serieverlustwiderstand.

b) *Vorgehen:*

- Resonanzbedingung anschreiben
- Werte einsetzen
- ω_o isolieren
- Quadratwurzel ziehen
- f_o isolieren

$$X_L = X_C$$

$$\omega_o L = \frac{1}{\omega_o C}$$

$$\omega_o^2 = \frac{1}{LC}$$

$$\omega_o = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

$$f_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

c) *Vorgehen:*

1. Schritt: Berechnen der Kapazität

- Schwingkreisformel anschreiben
- $\sqrt{LC}$ isolieren
- Gleichung quadrieren
- C isolieren
- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$f_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

$$\frac{1}{2\pi f_o} = \sqrt{LC}$$

$$\frac{1}{4\pi^2 f_o^2} = LC$$

$$C = \frac{1}{4\pi^2 \cdot f_o^2 \cdot L} \quad [C] = \frac{s^2 A}{Vs} = \frac{As}{V}$$

$$C = \frac{1}{4\pi^2 \cdot 25 \cdot 10^8 \cdot 2 \cdot 10^{-3}}$$

$$C = 5,06 \text{ nF}$$

2. Schritt: Berechnen der Kreisgüte

- Grundformel für Q anschreiben
- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$Q = \frac{\omega_o L}{R_v}$$

$$Q = \frac{2 \cdot \pi \cdot 5 \cdot 10^4 \cdot 2 \cdot 10^{-3}}{7} \frac{Vs A}{As V}$$

$$Q = 89,7$$

3. Schritt: Berechnen der Bandbreite

- Grundformel für b anschreiben
- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$b = \frac{f_o}{Q}$$

$$b = \frac{50 \cdot 10^3}{89,7}$$

$$b = 557 \text{ Hz}$$

d) *Vorgehen:*

1. Schritt: Berechnen der Resonanzfrequenz

– Grundformel für b anschreiben

$$b = \frac{f_o}{Q}$$

– nach f_o umstellen

$$f_o = b \cdot Q$$

– Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$f_o = 2 \cdot 10^3 \cdot 100$$

$$f_o = 200 \text{ kHz}$$

2. Schritt: Berechnen der Blindwiderstände für den Resonanzfall

– Resonanzbedingung anschreiben

$$X_L = X_C$$

– Grundformel für X_C anschreiben

$$X_C = X_L = QR_v$$

– Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$X_C = 100 \cdot 4$$

$$X_C = 400 \Omega$$

3. Schritt: Berechnen der Kreiskapazität

– Grundformel für X_C anschreiben

$$X_C = \frac{1}{\omega_o C}$$

– C isolieren

$$C = \frac{1}{\omega_o X_C}$$

– Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 0,2 \cdot 10^6 \cdot 400}$$

$$C = 1,99 \text{ nF}$$

e)



Bild zu 36 e

- f) Die Kreisgüte entspricht praktisch der Spulengüte, weil die kapazitiven Verluste gegenüber den Spulenverlusten vernachlässigt werden können. (In der Regel sind sie wesentlich mehr als eine Größenordnung kleiner!)
- g) Die Bandbreite ist ein Qualitätsmerkmal des Schwingkreises. Je kleiner die Bandbreite bei gleichbleibender Resonanzfrequenz sein soll, desto höher muss die Güte des Kreises sein. Die Kreisgüte wird ausgedrückt durch den Quotienten aus Resonanzfrequenz und Bandbreite.

Falls Ihnen die Lösung der Repetitionsaufgaben keine Schwierigkeiten gemacht hat, dürfen Sie sich dem folgenden Abschnitt zuwenden. Sollte Ihnen die Bearbeitung der gestellten Probleme jedoch etwelche Mühe bereitet haben, so dürfen Sie nicht weiterlesen, bevor nicht alle Unklarheiten aus dem Wege geräumt sind.

37. Was wissen Sie schon über den Parallelschwingkreis?

Antworten zu den Fragen a bis e (Seite 282)

- a) Der Parallelschwingkreis besteht aus einer Spule und einem Kondensator, die parallel geschaltet sind.
- b) Ja, die Güte spielt für die Qualität des Parallelschwingkreises eine Rolle.
- c) Ja, die Thomsonsche Schwingkreisformel gilt auch für den Parallelschwingkreis. Für Kreise mit sehr schlechter Güte stimmt die mit der Thomson-Formel errechnete Frequenz jedoch nicht ganz genau. Für die in der Praxis vorkommenden Kreise ist der Fehler jedoch so gering, dass er vernachlässigt werden kann.
- d) Parallelkreise dienen zum Herausfiltern einer bestimmten Frequenz aus einem Frequenzspektrum. Sie können aber auch zum Sperren einer bestimmten Frequenz verwendet werden, in diesem Fall spricht man von einem Sperrkreis. In Sendern werden Parallelschwingkreise als frequenzbestimmende Elemente gebraucht, ähnlich der Stimmgabel in einem Stimmgabelgenerator.
- e) Ja, die Spulengüte hat für den Parallelkreis dieselbe Bedeutung wie für den Seriemarkreis. Je besser die Spulengüte, desto geringer die Bandbreite.

Bewertung:

Sie sollten in der Lage sein, zu jeder Frage dem Sinn nach die richtige Antwort zu geben. Der Parallelschwingkreis hat so viel Gemeinsames mit dem Serieschwingkreis, dass wenigstens eine teilweise Beantwortung der Fragen nicht schwer fallen dürfte. Wir wollen deshalb von einer eigentlichen Bewertung absehen.

38. Repetitionsaufgaben zu «VIII. Der Parallelschwingkreis»

Antworten zu den Fragen a bis h (Seite 301)

- a) Der Parallelschwingkreis weist im Resonanzfall seine höchste Impedanz auf, der Seriemarkreis dagegen seine tiefste.

b) Die Güte des Parallelkreises entspricht dem Quotienten aus Parallelverlustwiderstand und induktivem Blindwiderstand im Resonanzfall.

c)

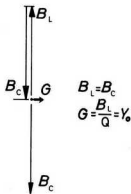


Bild zu 38 c

d) Im Resonanzfall sind die Blindströme im Kreis Q mal grösser als der Wirkstrom.

e) Vorgehen:

- Grundformel für Q anschreiben
- nach R_{vp} umstellen
- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$Q = \frac{R_{vp}}{X_L}$$

$$R_{vp} = Q \cdot X_L$$

$$R_{vp} = 230 \cdot 1200$$

$$R_{vp} = \mathbf{276 \text{ k}\Omega}$$

f) Der Parallelkreis wirkt kapazitiv. Das Ersatzschaltbild besteht somit aus einer Kapazität mit parallel geschaltetem Verlustwiderstand.

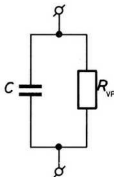


Bild zu 38 f

g) Vorgehen:

- Grundformel für b anschreiben
- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$b = \frac{f_o}{Q}$$
$$b = \frac{600}{250}$$
$$b = 2,4 \text{ kHz}$$

h) Vorgehen:

- Grundformel für die Frequenz anschreiben
- C isolieren
- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$f_o = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{LC}}$$
$$\frac{1}{f_o} = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{LC} \text{ daraus } \frac{1}{2\pi f_o} = \sqrt{LC} \text{ daraus}$$
$$\frac{1}{4\pi^2 f_o^2} = LC \text{ daraus } C = \frac{1}{4\pi^2 f_o^2 L}$$
$$C = \frac{1}{4\pi^2 \cdot 2,8^2 \cdot 10^{12} \cdot 30 \cdot 10^{-6}}$$
$$C = 107,7 \text{ pF}$$

Bewertung:

Die Repetitionsaufgaben haben Ihnen nochmals den Unterschied zwischen dem Arbeitsverhalten des Parallel- und des Serienschwingkreises vor Augen geführt. Der Schwingkreis ist eines der wichtigsten Elemente der Nachrichtentechnik. Nur wer seine Funktionsweise einwandfrei verstanden hat, kann sich in einem späteren Zeitpunkt eine richtige Vorstellung von der Wirkungsweise der einzelnen Gerätestufen machen. Wer für die Beantwortung der Repetitionsaufgaben in Schwierigkeiten geraten ist, muss unbedingt den Stoff über den Serie- und den Parallelschwingkreis noch einmal durcharbeiten. Die im folgenden Abschnitt erläuterten Bandfilter setzen das Verständnis der Schwingkreise voraus.

39. Was wissen Sie schon über Bandfilter?

Antworten zu den Fragen a bis e (Seite 303)

- a) Das Bandfilter weist eine grössere Flankensteilheit auf als der Einzelkreis. Seine Bandbreite lässt sich durch Verändern des Kopplungsgrades variieren.

- b) Die Bandbreite des Einzelkreises wird durch die Resonanzfrequenz und die Kreisgüte bestimmt, sie entspricht dem Quotienten aus Resonanzfrequenz und Güte.

$$b = \frac{f_o}{Q}$$

- c) Man unterscheidet für Bandfilter drei Kopplungsarten:
- Induktive Kopplung
 - Kapazitive Kopplung
 - Galvanische Kopplung
- d) Werden an die Durchlasskurven von Bandfiltern grössere Anforderungen gestellt, so genügen zweikreisige Filter nicht mehr, es werden dann mehrkreisige Filter gebaut.
- e) Induktive Kopplung ist eine Kopplungsart, bei welcher die Energieübertragung vom Primärkreis auf den Sekundärkreis über ein gemeinsames Magnetfeld oder über eine Kopplungsspule erfolgt.

Bewertung:

Die Frage b müssen Sie einwandfrei selbständig beantworten können. Von der Frage e sollte Ihnen vom Transformator her die Kopplung über das gemeinsame Magnetfeld geläufig sein.

Alle übrigen Fragen, die Sie zusätzlich richtig beantwortet haben, zeigen Ihnen, dass Sie über Bandfilter bereits wertvolle Vorkenntnisse besitzen.

40. Repetitionsaufgaben zu «IX. Bandfilter»

Antworten zu den Fragen a bis h (Seite 315)

- a) Das Bandfilter weist grössere Flankensteilheit auf als der Einzelkreis, man erreicht daher eine bessere Trennschärfe. Die Bandbreite kann auf einfache Art veränderlich gemacht werden. Durch Kombination mehrerer Schwingkreise zu einem Bandfilter lassen sich annähernd rechteckförmige Durchlasskurven erzielen.
- b) Bandfilter werden überall dort eingesetzt, wo es darauf ankommt, aus einem Frequenzspektrum ein Signal mit einer bestimmten Bandbreite möglichst trennscharf herauszufiltern. Die häufigsten Beispiele aus der Nachrichtentechnik sind
- Zwischenfrequenzverstärker in Empfängern
 - Filter zur Erzeugung von Einseitenbandmodulation in Sendern
 - Niederfrequenzfilter in Mehrfachtelefonieanlagen.
- c) Bandfilter können induktiv, kapazitiv oder galvanisch gekoppelt werden.
- d) Die Durchlasskurve von Bandfiltern wird durch die Kreisgüte und den Kopplungsfaktor beeinflusst.
- e) Für die kritische Kopplung wird das Produkt aus Kreisgüte und Kopplungsfaktor gleich Eins. $k \cdot Q = 1$
- f) Höckerbildung tritt bei allen überkritischen Kopplungen auf.

g)

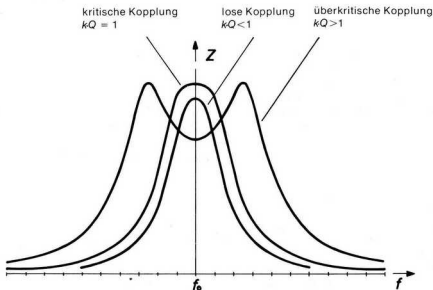


Bild zu 40 g

h) Bei induktiv gekoppelten Filtern kann der Kopplungsfaktor durch Schwenken einer Kreisspule einfach verändert werden.

Bewertung:

Sie sollten in der Lage sein, alle gestellten Fragen richtig zu beantworten. Die Fragen prüften nur die wesentlichsten Kenntnisse über Bandfilter, welche der Praktiker haben muss. Wir verlassen bis auf weiteres die Wechselstromtechnik und wenden uns anderen Bauelementen der Elektronik zu.

Der Neuling möge folgenden Rat beherzigen:

Die Erfahrung lehrt uns, dass jeder neue Stoff mehrmals zu repetieren ist, will man nicht sein ganzes Wissen wieder verlieren. Versuche haben gezeigt, dass der Rhythmus des Repetierens einen wesentlichen Einfluss auf den Wirkungsgrad des Lernens ausübt. Die besten Ergebnisse werden erzielt, wenn man den neuen Stoff nach zwei Tagen, nach zwei Wochen und nach einigen Monaten wiederholt. Die Stoffvermittlung in diesem Lehrgang ist so, dass jeder diesen nach Belieben ohne fremde Hilfe anhand der Beispiele repetieren kann. Nutzen Sie diesen Vorteil, Sie werden alles, was Ihnen bis dahin beigebracht wurde, in der Praxis nötig haben.

41. Was wissen Sie schon über Dioden?

Antworten zu den Fragen a bis f (Seite 317)

- a) Die Diode besteht aus zwei Elektroden. Die Elektroden befinden sich in einem Glas- oder Metallkolben im Vakuum. Eine Elektrode – die Katode – wird geheizt und emittiert demzufolge Elektronen. Die andere Elektrode – die Anode – besteht aus einem Blechzylinder, der konzentrisch um die Katode angeordnet ist. Der Anode fällt die Aufgabe zu, die von der Katode emittierten Elektronen aufzufangen.
- b) Das Elektrodensystem der Diode befindet sich im Vakuum, damit ein Stromfluss zwischen Katode und Anode stattfinden kann. Im Vakuum befinden sich fast keine Gasmoleküle und Atome, welche die Elektronen auf ihrem Weg von der Katode zur Anode behindern könnten.
- c) Elektronen können die Katode verlassen, sobald ihre Energie der Bewegung grösser wird als die elektrostatischen Anziehungskräfte. Diese Energie der Bewegung wird den Elektronen in Form von Wärme zugeführt. Die Elektronen in einem erwärmten Leiter führen kräftigere Schwirrbewegungen aus, als solche in einem kalten Medium.
- d) Der Anodenstrom der Diode kann durch Erhöhung der Heizspannung und durch Vergrößerung der Anodenspannung gesteigert werden. In der Praxis kommt nur die Einflussnahme über die Anodenspannung in Frage, da die Heizspannung für die verschiedenen Röhrentypen konstant gehalten werden muss.
- e) Eine indirekt geheizte Katode besteht aus einem Metallröhrchen mit einer die Emission erleichternden Schicht. Die Heizung besteht aus einem zentralen Heizwendel im Innern des Röhrchens, elektrisch isoliert von diesem.
- f) Die aus der Katode austretenden Elektronen gelangen nicht alle zur Anode, ein Teil bildet um die Katode eine Elektronenwolke. Diese Elektronenwolke wird Raumladung genannt. Bei Röhren, die mit so grosser Anodenspannung betrieben werden, dass alle Elektronen zur Anode fließen, verschwindet die Raumladung.

Bewertung:

Wer sich noch nie mit Elektronenröhren beschäftigt hat, der wird Mühe haben, eine der Fragen richtig zu beantworten. Wenn es Ihnen nicht gelungen ist, eine richtige Antwort zu finden, so bedeutet dies, dass ein neuer, interessanter Stoff auf Sie wartet. Sie brauchen keine Vorkenntnisse, um sich in die Röhrentechnik einzuarbeiten. Die Grundlagen, die Sie sich bis dahin erworben haben, genügen voll und ganz, um die neue Materie zu verstehen. Sollten Sie sich schon mit Elektronenröhren befasst haben, so hat Ihnen der kleine Test gezeigt, was Sie noch über die Diode wissen.

42. Repetitionsaufgaben zu «I. Die Diode»

Antworten zu den Fragen a bis k (Seite 332)

- a) Im Vakuum können sich die Elektronen frei bewegen. Die Wahrscheinlichkeit eines Zusammenstoßes mit noch vorhandenen Gasmolekülen ist gering. Sobald eine Elektronenquelle (Katode) vorhanden ist, und die Elektronen ein positives Potential (Anode) anlaufen können, findet ein Stromfluss statt.
- b) Sobald die Katode auf eine gewisse Temperatur erhitzt wird, werden die Eigenbewegungen der Elektronen infolge der zugeführten Wärmeenergie dermassen kräftig, dass ihre Bewegungsenergie ausreicht, um die im molekularen Gefüge vorhandenen Anziehungskräfte zu überwinden und die Katode zu verlassen.
- c) Die Raumladung wirkt bremsend auf die aus der Katode austretenden Elektronen und verhindert damit, dass der Anodenstrom proportional zur Anodenspannung ansteigt. Die Kennlinie wird aus diesem Grund gekrümmt.
- d)

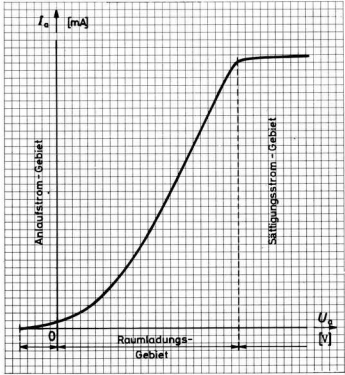


Bild zu 42 d

- e) Unter der Bedingung, dass an der Diode nur eine Gleichspannung liegt, ist die Anodenverlustleistung durch Anodenspannung und Anodenstrom bestimmt.

$$P_{ad} = U_a I_a$$

- f) Der Anlaufstrom entsteht durch die Elektronen, die eine so grosse Austrittsgeschwindigkeit aufweisen, dass sie eine Anode mit Nullpotential oder leicht negativer Vorspannung anlaufen können.
- g) Die Anodenverlustleistung ist die Leistung, die im Anodenblech in Wärme umgesetzt wird.
- h)

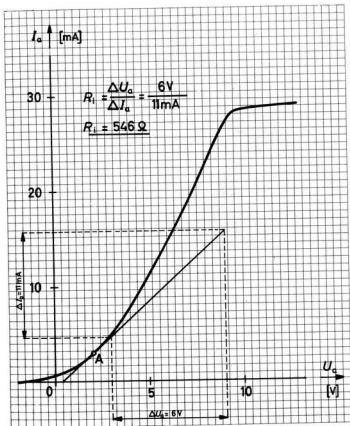


Bild zu 42 h

- i) Der Gleichstrominnenwiderstand einer Diode ist bestimmt durch den Quotienten aus Anodenspannung und Anodenstrom für einen bestimmten Arbeitspunkt.

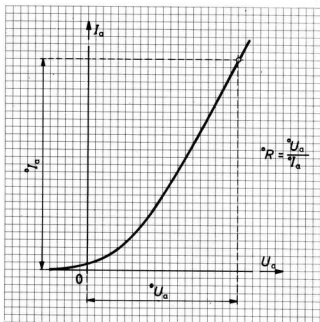


Bild zu 42 i

- k) Der Wechselstrominnenwiderstand der Diode ist für alle Schaltungen von Bedeutung, wo dieser Widerstand als gesteuerte, veränderliche Grösse benutzt wird. Solche Schaltungen sind oft in älteren frequenzmodulierten Kleinsendern anzutreffen. Der steuerbare Wechselstromwiderstand wird dort zur Erzeugung der Frequenzmodulation gebraucht.

Bewertung:

Es sollte Ihnen nicht schwer gefallen sein, alle Fragen richtig zu beantworten. Wenn Ihnen der Test jedoch Schwierigkeiten bereitet hat, bedeutet dies, dass Sie den Stoff zuwenig gründlich verarbeitet haben.

43. Was wissen Sie schon über die Triode?

Antworten zu den Fragen a bis f (Seite 334)

- Das Elektrodensystem einer Triode besteht aus drei Elektroden.
- Die Elektroden der Triode heissen Katode, Gitter und Anode.
- Der Anodenstrom der Triode wird mit dem Gitter gesteuert.

- d) Die Steilheit ist ein Mass für die Steuerwirkung des Gitters auf den Anodenstrom. Sie wird ausgedrückt durch das Verhältnis von Anodenstromänderung zu Gitterspannungsänderung.
- e) Ja, im negativen Bereich der Gitterspannung erfolgt die Aussteuerung leistunglos.
- f) Ja, Trioden, die entsprechend dimensioniert sind, können als Leistungsverstärker verwendet werden.

Bewertung:

Ist es Ihnen gelungen, einige Fragen richtig zu beantworten? Jede richtige Antwort dürfen Sie als Pluspunkt buchen, sie zeigt Ihnen, dass Sie einige Vorkenntnisse mitbringen, die Ihnen das Studium des folgenden, interessanten Stoffes erleichtern werden.

44. Repetitionsaufgaben zu «II. Die Triode»

Antworten zu den Fragen a bis i (Seite 344)

- a) Ein positiv vorgespanntes Gitter verhält sich wie eine Anode mit positiver Anodenspannung; es fliesst ein Strom, der Gitterstrom. Dieser Gitterstrom belastet die Signalquelle, die Röhre lässt sich nicht mehr leistunglos ansteuern, zudem sind die Verzerrungen für diese Arbeitspunkteinstellung zu gross, so dass eine Verstärkung von Niederfrequenzsignalen im positiven Gitterbereich sinnlos wird.
- b)

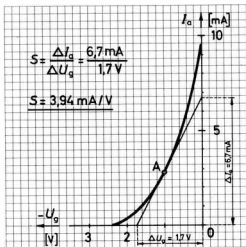


Bild zu 44 b

- c) Die Steilheit ist ein Mass für die Steuerwirkung des Gitters auf den Anodenstrom. Sie entspricht dem Quotienten von Anodenstromänderung zu Gitterspannungsänderung. Die Masseinheit für die Steilheit ist das Milliampère pro Volt.
- d)

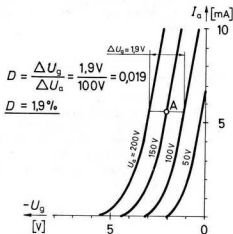


Bild zu 44 d

- e) Der Verstärkungsfaktor entspricht dem Reziprokwert des Durchgriffes.

$$\mu = \frac{1}{D}$$

$$\mu = \frac{1}{1,9 \cdot 10^{-2}}$$

$$\mu = \mathbf{52,7}$$

f)

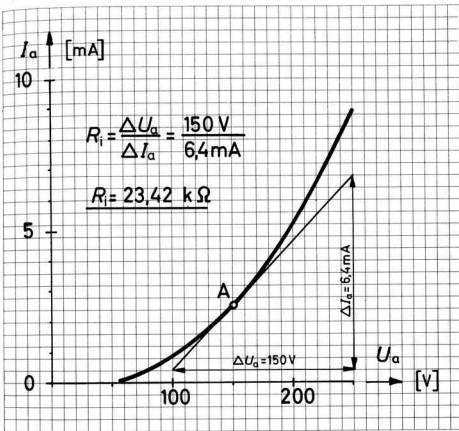


Bild zu 44 f

- g) Sind von den drei die Röhreneigenschaften bestimmenden Daten zwei bekannt, so lässt sich die fehlende Angabe mit Hilfe der Barkhausengleichung errechnen.

Vorgehen:

- Barkhausenformel anschreiben
- D durch μ ersetzen
- nach S umstellen

$$S \cdot D \cdot R_i = 1$$

$$\frac{S R_i}{\mu} = 1$$

$$S = \frac{\mu}{R_i} \text{ [S]} = \frac{1}{V/A} = \frac{A}{V}$$

– Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$S = \frac{40}{15 \cdot 10^{-3}}$$

h) Vorgehen:

$$S = 2,67 \text{ mA/V}$$

– Barkhausenformel anschreiben

$$\dot{S} \cdot D \cdot R_i = 1$$

– An Stelle der Symbole für S , D und R_i deren Bestimmungsgleichungen einsetzen

$$\frac{\Delta I_a}{\Delta U_g} \cdot \frac{\Delta U_g}{\Delta U_a} \cdot \frac{\Delta U_a}{\Delta I_a} = 1$$

Zähler und Nenner lassen sich gegenseitig kürzen, es verbleibt der Wert Eins, womit die Richtigkeit der Gleichung bestätigt ist.

i) Die Hauptanwendungsgebiete für Trioden sind:

- Niederfrequenzverstärkung
- Schwingungserzeugung (Oszillatoren)
- Messtechnik
- In Spezialfällen Hochfrequenzverstärkung sehr hoher Frequenzen

Bewertung:

Sie haben in diesem Kapitel gelernt, wie die wichtigsten Röhrendaten bestimmt werden und wie diese graphisch aus den Kennlinien ermittelt werden können. Diese Daten sind für alle noch zu behandelnden Röhrentypen dieselben, ihre Bedeutung bleibt die gleiche. Mit diesen Daten rechnet der Praktiker, wenn er überschlagsmässig die Verstärkung einer Stufe überprüfen will. Die Kenntnis der Röhrendaten und deren Bedeutung bilden die Basis für das Verständnis aller Schaltungen mit Röhren, in abgewandelter Form werden wir sie bei den Halbleitern wieder antreffen. Es ist deshalb wichtig, dass Sie den Stoff ganz verstanden haben; es dürfen keine Unklarheiten mehr zurückbleiben. Sollten Ihnen bei der Lösung der Repetitionsaufgaben Fehler unterlaufen sein, so müssen Sie diese vorerst ausmerzen, bevor Sie sich weiter mit Röhren befassen.

45. Was wissen Sie schon über die Pentode?

Antworten zu den Fragen a bis e (Seite 348)

- a) Die Pentode hat 5 Elektroden: Katode, Steuergitter, Schirmgitter, Bremsgitter und Anode.
- b) Die Pentode weist gegenüber der Triode einen erheblich grösseren Innenwiderstand und einen bedeutend kleineren Durchgriff auf.
- c) Der kleine Durchgriff der Pentode hat einen entsprechend hohen Verstärkungsfaktor zur Folge, da die beiden Grössen reziprok zueinander stehen.
- d) Der grössere Innenwiderstand der Pentode muss in einem bedeutend flacheren Verlauf der I_a - U_a -Kennlinien sichtbar werden.
- e) Der kleinere Durchgriff der Pentode verursacht eine Verringerung des Abstandes zwischen den Kennlinien im I_a - U_g -Kennlinienfeld. Die einzelnen Kurven liegen so nahe beieinander, dass sie sich beinahe decken. Im I_a - U_g -Kennlinienbild wird deshalb meistens die Schirmgitterspannung

als Parameter gewählt, da ihr Einfluss auf den Anodenstrom viel grösser ist als derjenige der Anodenspannung. Der Durchgriff wird meistens in den Röhrendaten überhaupt nicht erwähnt, da die Pentode mit Steilheit und Innenwiderstand ausreichend beschrieben ist.

Bewertung:

Die Fragen c, d und e müssen Sie richtig beantworten können. Frage c setzt lediglich die Kenntnis der Barkhausengleichung voraus. Die Fragen d und e zeigen Ihnen, ob Sie den Zusammenhang zwischen Röhrendaten und Kennlinien verstanden haben. Falls Ihnen die Beantwortung dieser drei Fragen Schwierigkeiten bereitet hat, ist dies ein Zeichen, dass Sie den Stoff über die Triode noch nicht so gründlich verarbeitet haben, wie dies für das Verständnis der Pentode vorausgesetzt werden muss.

46. Repetitionsaufgaben zu «III. Die Pentode»

Antworten zu den Aufgaben a bis k (Seite 357)

- Die Vorteile der Pentode gegenüber der Triode sind folgende:
 - Grösserer Innenwiderstand
 - Kleinerer Durchgriff
 - Kleinere Gitter-Anodenkapazität
- Der Einfluss der Schirmgitterspannung ist gross. Das Schirmgitter soll jedoch den Anodenstrom nicht steuern, seine Betriebsspannung muss deshalb konstant gehalten werden. Eine Ausnahme bilden die geregelten Verstärkerstufen, wo auch die Steuerung des Anodenstromes über das Schirmgitter ausgenutzt wird.
- Das Schirmgitter schirmt das Steuergitter vom elektrischen Feld der Anode ab, wodurch der Einfluss der Anodenspannung auf den Anodenstrom stark herabgesetzt wird.
- In der Regel wird das Bremsgitter mit der Katode verbunden, oder es wird an Masse gelegt.
- Das Bremsgitter dient zur Bremsung der Sekundärelektronen der Anode. Es zwingt diese, wieder zur Anode zurückzukehren.

f)

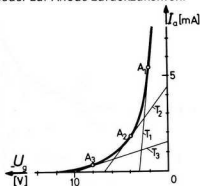


Bild zu 46 f

Die I_a-U_g -Kennlinie ist stark gekrümmt. Die Krümmung verläuft so, dass die Steilheit für negativere Gittervorspannungen immer kleiner wird. Die Steilheit im Arbeitspunkt A_2 ist kleiner als diejenige im Arbeitspunkt A_1 , in A_3 ist sie noch kleiner als in A_2 . Kleinere Steilheit ist gleichbedeutend mit kleinerer Verstärkung. Die Verstärkung einer Regelröhre hängt demzufolge von der Wahl des Arbeitspunktes und somit von der Grösse der Vorspannung am Steuergitter ab.

- g) Regelpentoden werden vorwiegend im Empfängerbau und in Messgeräten eingesetzt.
- h) Der kleine Durchgriff der Pentode ergibt einen hohen Verstärkungsfaktor. Der grosse Innenwiderstand trägt ebenfalls zu einer höheren Verstärkung bei, während die kleine Gitter-Anodenkapazität die Erzeugung unerwünschter Schwingungen vermeidet.

i)

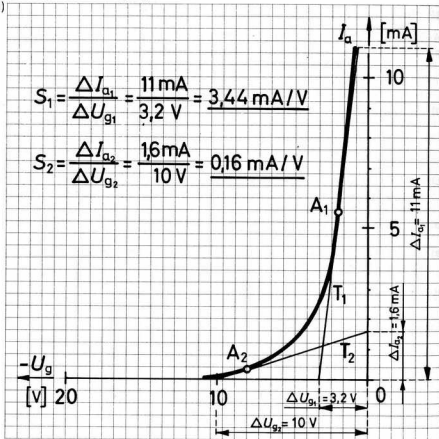


Bild zu 46 i

k)

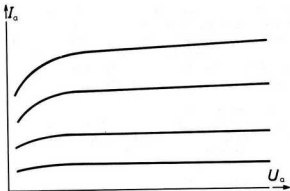


Bild zu 46 k

Der flache Verlauf der Kennlinien zeigt den geringen Einfluss der Anodenspannung auf den Anodenstrom. Die Anodenspannung kann in einem grossen Bereich verändert werden, ohne dass sich dabei der Anodenstrom merklich ändert. Dieses Verhalten der Röhre bewirkt einen grossen Innenwiderstand. Die Tangente zur Bestimmung des Innenwiderstandes verläuft für alle Arbeitspunkte innerhalb weiter Grenzen sehr flach. Geringe Neigung der Tangente bedeutet grossen Innenwiderstand.

Bewertung:

Die Beschreibung der Pentode basierte auf dem Funktionsprinzip der Triode. Viele Begriffe wurden repetiert. Die Grundlagen der Röhrentechnik sollten Ihnen jetzt keine Schwierigkeiten mehr bereiten.

47. Was wissen Sie schon über die Leistungspentode?

Antworten zu den Fragen a bis f (Seite 358)

- Der Innenwiderstand einer Leistungspentode ist bedeutend kleiner als derjenige der Spannungsverstärkerpentode. Da die Steilheit der Leistungsröhre nicht in dem Masse zunimmt, wie der Innenwiderstand kleiner wird, ergibt sich eine Vergrösserung des Durchgriffes. Mit dem grösseren Durchgriff sind auch die Röhrenkapazitäten zwischen den einzelnen Elektroden angestiegen.
- Nein, der Kennlinienverlauf im I_a-U_a -Kennlinienbild ist der Form nach für eine Leistungspentode und eine Spannungsverstärkerpentode der gleiche. Der kleinere Innenwiderstand kommt im grösseren Massstab der Anodenstromachse zum Ausdruck.

- c) Anodenverlustleistung ist die Leistung, die in der Anode in Wärme umgesetzt wird. Für Endverstärker entspricht sie der Differenz von zugeführter Anodengleichstromleistung zu abgegebener Wechselstromleistung.
- d) Die Grösse des Anodenstromes hängt von der Emissionsfähigkeit der Katode ab. Grössere Katoden können grössere Anodenströme emittieren, erfordern aber eine grössere Heizleistung.
- e) Leistungspentoden haben einen besseren Wirkungsgrad und benötigen weniger Steuerspannung als Leistungstrioden.
- f) Die Anodenverlustleistung begrenzt die abgegebene Wechselstromleistung. Je grösser die zulässige Anodenverlustleistung ist, desto höher wird die verfügbare Wechselstromleistung. Die in den Röhrendaten vermerkte maximale Anodenverlustleistung darf nicht überschritten werden, da sonst die Röhre zerstört wird.

Bewertung:

Die Frage c müssen Sie beantworten können, der Begriff der Anodenverlustleistung wurde schon früher definiert. Neu ist lediglich der Zusatz, dass die Anodenverlustleistung für Endverstärker der Differenz von zugeführter Anodengleichstromleistung und abgegebener Wechselstromleistung entspricht. Die Frage d sollten Sie beantworten können, wenn Sie das Problem logisch durchdenken. Die richtige Antwort auf die Frage f sollten Sie auf Grund Ihrer Kenntnisse ebenfalls finden.

48. Repetitionsaufgaben zu «IV. Die Leistungspentode»

Antworten zu den Fragen a bis f (Seite 364)

- a) Die Leistungspentode arbeitet mit wesentlich höheren Anodenströmen als die Spannungsverstärkerröhre; diese hohen Anodenströme bedingen einen bedeutend kleineren Innenwiderstand, da die Anodenstromänderungen entsprechend grösser ausfallen.
- b) Das Gebiet unterhalb der Leistungshyperbel im I_a - U_a -Kennlinienfeld ist unkritisch in bezug auf Überlastung der Röhre, da dort die maximal zulässige Anodenverlustleistung nie überschritten wird.
- c) Zu jedem Anodenspannungswert wird der Stromwert gesucht, der mit dem betreffenden Spannungswert multipliziert die Anodenverlustleistung ergibt. Der Schnittpunkt von Anodenstrom- und Anodenspannungswert liegt auf der Leistungshyperbel.
- d) Anodenverlustleistung ist die Leistung, die in der Anode in Wärme umgesetzt wird. In Verstärkerröhren entspricht sie der Differenz zwischen aufgenommener Gleichstromanodenleistung und abgegebener Wechselstromleistung. Wenn die Röhre nicht angesteuert wird, ist die Anodenverlustleistung mit der aufgenommenen Anodengleichstromleistung identisch.
- e) Die Leistungspentode hat eine Wechselstromleistung abzugeben.

- f) Die Hauptanwendungsgebiete für Leistungspentoden sind:
- Endstufe in Niederfrequenzleistungsverstärkern
 - Endstufe in Sendern (Hochfrequenzleistungsverstärkung)
- Oft werden Leistungsröhren auch anderweitig verwendet, so beispielsweise in geregelten Netzgeräten, zur Steuerung von Relais und kleineren Motoren oder in den Hochfrequenztherapiegeräten als Oszillatoren.

Bewertung:

In diesem Kapitel ging es darum, den Unterschied zwischen einer Verstärkerpentode und der Leistungspentode herauszuschälen. Die Testfragen haben Ihnen gezeigt, ob Sie die wesentlichen Punkte erfasst haben.

49. Was wissen Sie schon über Mischröhren?

Antworten zu den Fragen a bis e (Seite 365)

- a) Ja, die Triode eignet sich für die additive Mischung. Bei der additiven Mischung werden die zu mischenden Signale beide an dieselbe Elektrode gelegt.
- b) Weitere Mehrgitterröhren sind:
- Hexode = Katode, Anode und vier Gitter
 - Heptode = Katode, Anode und fünf Gitter
 - Oktode = Katode, Anode und sechs Gitter
- c) Eine Verbundröhre ist eine Röhre mit mehreren, meistens zwei Systemen im gleichen Kolben. Unter den Mischröhren sind die Triode-Hexode und die Triode-Heptode die gebräuchlichsten Verbundröhren.
- d) Röhren mit mehreren Steuergittern erlauben eine Doppelsteuerung des Anodenstromes. Man versteht darunter die Steuerung des Stromes durch verschiedene, voneinander unabhängige Faktoren.
- e) Eine Mischstufe dient der Mischung von zwei Signalen, die sich in der Frequenz unterscheiden. Am Ausgang der Mischstufe entsteht eine Vielzahl von Frequenzen. Besonders ausgeprägt erscheinen die Summe und die Differenz der Eingangsfrequenzen. Mit Hilfe von Bandfiltern wird die Summen- oder Differenzfrequenz herausgefiltert.

Bewertung:

Die Aufgabe d müssen Sie richtig beantworten können. Die Kenntnisse, die Sie sich bis jetzt erworben haben, sollten es Ihnen erlauben, die richtige Lösung zu finden. Wohl ist der Vorgang der Doppelsteuerung neu für Sie, das Wissen um die Vorgänge in Elektronenröhren sollte Sie jedoch befähigen, die treffenden Schlüsse zu ziehen.

Die restlichen Fragen können ohne entsprechende Vorkenntnisse nicht beantwortet werden. Jede richtige Antwort zeigt Ihnen, dass der folgende Stoff für Sie nicht mehr absolut neu ist.

50. Repetitionsaufgaben zu «V. Die Mischröhren»

Antworten zu den Fragen a bis n (Seite 376)

- a) In Empfängerschaltungen wird in der Mischstufe die Eingangsfrequenz mit der Oszillatorfrequenz gemischt. Die Oszillatorfrequenz wird im Oszillator erzeugt. Die Differenzfrequenz wird als Zwischenfrequenz im folgenden Zwischenfrequenzverstärker verstärkt.
- b) Voraussetzung für die Mischung von zwei Frequenzen ist eine nicht-lineare Kennlinie der Mischstufe.
- c) Die Zwischenfrequenz ergibt sich aus der Differenz von Oszillatorfrequenz und Eingangsfrequenz.

$$f_z = f_o - f_e$$

$$f_z = 1870 - 1400 \text{ kHz}$$

$$f_z = 470 \text{ kHz}$$

- d) In der Hexode wird der Katodenstrom weitgehend durch das erste Steuergitter bestimmt.
- e) Das zweite Steuergitter der Hexode wirkt als Verteilungsgitter. Es teilt den Röhrenstrom auf Schirmgitter und Anode auf. Je negativer seine Vorspannung gewählt wird, desto grösser wird der Schirmgitterstrom, was eine Abnahme des Anodenstromes bewirkt.
- f) Die Heptode weist ein Gitter mehr auf als die Hexode. Dieses zusätzliche Bremsgitter verbessert die Rauscheigenschaften der Röhre.
- g) Die Heptode wird meistens als Mischröhre oder als Konverter verwendet.
- h) Ein Konverter ist eine Mischstufe, die als Mischröhre und als Oszillator gleichzeitig arbeitet.
- i) Die Oktode wird fast ausschliesslich als Konverter eingesetzt.
- k) Eine Verbundröhre enthält mehrere Röhrensysteme im gleichen Kolben. Für Mischstufen werden hauptsächlich Trioden-Hexoden und Trioden-Heptoden gebaut.
- l) Die Mischsteilheit wird durch das Verhältnis von Zwischenfrequenzstrom zu Hochfrequenzeingangsspannung ausgedrückt.

$$S_c = \frac{I_z}{U_{g1}}$$

- m) Die Mischverstärkung entspricht dem Verhältnis von Zwischenfrequenzspannung zu Hochfrequenzeingangsspannung.

$$v_c = \frac{U_z}{U_{g1}}$$

- n) Vorgehen:

1. Schritt: Bestimmen der Zwischenfrequenzspannung am Schwingkreis

– Grundformel anschreiben

$$v_c = \frac{U_z}{U_{g1}}$$

– nach U_z umstellen

$$U_z = v_c \cdot U_{g1}$$

- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$U_z = 8 \cdot 10^{-3} \cdot 120 \text{ V}$$

$$U_z = 0,96 \text{ V}$$

2. Schritt: Bestimmen des Zwischenfrequenzstromes

- Grundformel anschreiben

$$S_c = \frac{I_z}{U_{g1}}$$

- nach I_z umstellen

$$I_z = S_c \cdot U_{g1}$$

- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$I_z = 0,8 \cdot 10^{-3} \cdot 8 \cdot 10^{-3} \frac{\text{A}}{\text{V}} \cdot \text{V}$$

$$I_z = 6,4 \mu\text{A}$$

3. Schritt: Bestimmen der Kreisimpedanz

- Grundformel anschreiben

$$Z_o = \frac{U_z}{I_z}$$

- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$Z_o = \frac{0,96}{6,4 \cdot 10^{-6}} \frac{\text{V}}{\text{A}}$$

$$Z_o = 150 \text{ k}\Omega$$

4. Schritt: Bestimmen der Kreisgüte

- Grundformel für Q anschreiben

$$Q = \frac{Z_o}{X_L}$$

- Grundformel für X_L anschreiben

$$X_L = \omega L$$

- in Formel für Q einsetzen

$$Q = \frac{Z_o}{\omega \cdot L}$$

- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$Q = \frac{150 \cdot 10^3}{2\pi 470 \cdot 10^3 \cdot 2 \cdot 10^{-4}} \frac{\text{VsA}}{\text{AVs}}$$

$$Q = 254$$

Bewertung:

Das Kapitel über Mischröhren brachte viel neuen Stoff. Vor allem war es notwendig, einige Prinzipien des Überlagerungsempfängers zu erklären, ob schon die Funktionsweise dieses Empfängers erst später behandelt wird. Damit der Schüler die Mischröhre in ihrem Aufbau und in ihrer Arbeitsweise verstehen kann, müssen ihm die Grundlagen über die Mischung bekannt sein. Die Aufgabe n) hat Ihnen gezeigt, wie einzelne Bauelemente – Röhre und Schwingkreis – zusammenwirken. Mit dieser Aufgabe konnten Sie überprüfen, ob Ihre Kenntnisse über Schwingkreise noch frisch sind. Die restlichen Testfragen dienten der Überprüfung Ihres Wissens über Mischröhren. Diese Selbstkontrolle sollten Sie gewissenhaft ausüben.

51. Was wissen Sie schon über gasgefüllte Röhren

Antworten zu den Fragen a bis g (Seite 378)

- a) Ein Ion ist ein Atom, das elektrisch nicht neutral ist. Positiven Ionen fehlen Elektronen, die Ladung des positiven Kerns überwiegt (Kation). Negative Ionen weisen mehr Elektronen auf, als zur Erzeugung des Ladungsgleichgewichtes des Atoms notwendig wären (Anion).
- b) Infolge ihrer negativen Ladung werden Anionen von der Anode angezogen.
- c) Die positiv geladenen Kationen begeben sich zur negativ vorgespannten Katode.
- d) Trifft ein Elektron mit grosser Geschwindigkeit auf ein Atom oder ein Molekül, so kann es diesem ein AussenElektron entreissen und es damit ionisieren. Der Vorgang heisst Ionisation.
- e) Die Glimmröhre besteht aus zwei Elektroden, welche sich in einem mit Gas gefüllten Kolben befinden.
- f) Ja, die Zündung von Thyratrons kann über eine spezielle Zündelektrode beeinflusst werden.
- g) Nein, eine erfolgte Zündung eines Thyratrons kann nur durch Unterbrechung des Anodenstromes oder durch Absenken der Anodenspannung unter die Bogenspannung rückgängig gemacht werden.

Bewertung:

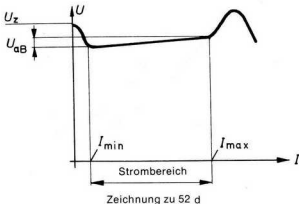
Die Fragen a bis c müssen Sie beantworten können, das Wesen der Ionen wurde zu Beginn des Kurses behandelt. Die restlichen Fragen zeigen Ihnen, ob sie schon etwas über Ionenröhren wissen.

52. Repetitionsaufgaben zu «VI. Gasgefüllte Röhren»

Antworten zu den Fragen a bis m (Seite 403)

- a) Unter Stossionisation versteht man das lawinenartige Anwachsen der Ladungsträger in einer Ionenröhre. Die Stossionisation leitet die Zündung der Röhre ein.
- b) Die Zündspannung ist jene Spannung, die an die Röhre gelegt werden muss, damit diese zündet. Die Brennspeisung entspricht jener Spannung, die sich während des Betriebes an der gezündeten Röhre einstellt.
- c) Die Löschspannung ist die Spannung, bei welcher die Ionisation zusammenbricht und die Röhre erlischt. Sie liegt etwas unterhalb der Brennspeisung.

d)



e)

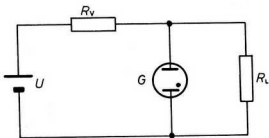


Bild zu 52 e

- f) Die Relaisröhre arbeitet mit kalter Katode, das Thyatron dagegen benötigt eine geheizte Katode.

Die Relaisröhre zündet, sobald die Spannung am Starter die Zündspannung erreicht. Die Anodenspannung hat dabei keinen Einfluss, wenn sie einen gewissen Minimalwert aufweist. Beim Thyatron ist zur Auslösung der Zündung zu jeder Steuerspannung am Gitter eine bestimmte Anodenspannung erforderlich.

In gezündetem Zustand liegt an der Relaisröhre eine relativ hohe Brennspannung, während über dem Thyatron nur die viel kleinere Bogenspannung auftritt.

Thyatronen sind für grössere Ströme brauchbar.

Die Zündung von Thyatronen lässt sich mit Spannungen von wenigen Volt am Steuergitter auslösen, die Relaisröhre dagegen benötigt zur Zündung eine beträchtliche Starterspannung.

g)

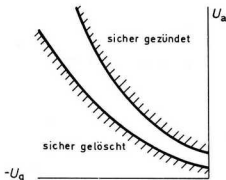


Bild zu 52 g

h) Vorgehen:

- Strom-Zeit-Produkt bilden
- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$Q = \tau_{\text{max}} \cdot I_{a_{\text{max}}}$$

$$Q = 3 \cdot 6 \text{ sA}$$

$$Q = 18 \text{ As}$$

- Formel für zulässigen Impulsstrom anschreiben

$$I_{a_{\text{imp}}} = \frac{Q}{t_i} \quad (t_i = \text{Impulsdauer})$$

- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$I_{a_{\text{imp}}} = \frac{18}{2} \frac{\text{As}}{\text{s}}$$

$$I_{a_{\text{imp}}} = 9 \text{ A}$$

- Kontrolle, ob der errechnete Strom den Wert für den Anodenspitzenstrom nicht überschreitet. Dieser liegt mit 9 A weit unter dem Maximalwert von 25 A.
- i) Durch das Wegnehmen der Anodenspannung wird die Röhre gelöscht. Die Anodenspannung darf der Röhre erst wieder zugeführt werden, wenn die Entionisierungszeit verstrichen ist. Erhält die Anode vor Ablauf von t_d erneut Spannung, dann zündet die Röhre, gleichgültig, ob am Steuergritter eine Spannung liegt oder nicht. Die Entionisierungszeit setzt der Betriebsfrequenz einer Schaltung Grenzen.
- k) Das Ignitron wird mit Hilfe einer Zündspannung, welche dem Zündstift zugeführt wird, gezündet. Der Zündstift ragt in das Quecksilber der Kathode hinein. Der kurzzeitig über den Zündstift fließende grosse Zündstrom verdampft etwas Quecksilber, wodurch die Stossionisation eingeleitet wird.
- l) Ignitrons werden überall dort verwendet, wo grosse Ströme kontaktlos geschaltet werden müssen. Auch werden Ignitrons in gesteuerten Gleichrichtern hoher Leistung eingesetzt.

- m) Gasdioden haben einen besseren Wirkungsgrad als Vakuumröhren, da die Bogenspannung bedeutend kleiner ist als der Spannungsabfall über der Vakuumdiode. Gasdioden verarbeiten zudem viel höhere Ströme als Vakuumdioden.

Bewertung:

Die Testaufgaben prüfen Wissen und weniger Können. Können wird an Aufgaben und Problemen gemessen, Wissen mit Hilfe von Fragen überprüft. Es liegt an Ihnen, festzustellen, ob Ihr Wissen ausreicht, die Testaufgaben sollen Ihnen dabei behilflich sein.

53. Was wissen Sie schon über Katodenstrahlröhren?

Antworten zu den Fragen a bis d (Seite 404)

- a) Die wichtigsten Elemente im Elektrodensystem der Katodenstrahlröhre sind:
- Elektronenquelle
 - Fokussiereinrichtung (Elektronenoptik)
 - Ablenkeinrichtung
 - Bildschirm
- b) Bildröhren mit statischem Ablensystem sind Röhren, in welchen der Elektronenstrahl durch ein veränderliches elektrisches Feld ausgelenkt wird.
- c) Der Elektronenstrahl einer Röhre mit magnetischer Strahlablenkung wird durch magnetische Wechselfelder abgelenkt.
- d) Der Katodenstrahloszillograf ist ein universell verwendbares Messgerät mit einer Katodenstrahlröhre.

Bewertung:

Die Einführungsfragen haben Ihnen gezeigt, ob Sie schon gewisse Vorkenntnisse über Elektronenstrahlröhren haben. Sollte die Katodenstrahlröhre für Sie neu sein, so sind Sie deshalb nicht benachteiligt, denn die Kenntnisse, die Sie sich bis jetzt erworben haben, werden es Ihnen erlauben, dem Stoff ohne Schwierigkeiten zu folgen.

54. Repetitionsaufgaben zu «VII. Die Katodenstrahlröhre»

Antworten zu den Fragen a bis d (Seite 411)

- a) Die Spannung am Wehneltzylinder beeinflusst die Intensität des Strahles und somit die Bildhelligkeit. Diese negative Vorspannung – sie kann mit der Gittervorspannung einer Verstärkerröhre verglichen werden – wird der Bildröhre über ein Bedienungspotentiometer zugeführt, womit die Bildhelligkeit von der Stellung des Potentiometers abhängig wird.

- b) Die Fokussierung des Strahles erfolgt in der Elektronenoptik. Diese besteht im einfachsten Fall aus einer Fokussierelektrode und einer Anode, wobei die Anode eine höhere Spannung aufweist als die Fokussierelektrode. Der Strahl wird durch das zwischen den beiden Elektroden herrschende elektrische Feld fokussiert. Die Spannung an der Fokussierelektrode wird über ein Bedienungspotentiometer einstellbar gemacht. Da der Strahl durch das Feld der Elektronenoptik beeinflusst wird, kann die Bildschärfe an diesem Potentiometer eingestellt werden.
- c) An der rechten Platte liegt der positive Pol der Ablenkspannung. Durch die anziehende Wirkung, die das elektrische Feld auf den Strahl ausübt, wird der Strahl nach rechts abgelenkt. Der Ablenkfaktor entspricht dem Quotienten aus Ablenkspannung und Strahlablenkung.

$$A_F = \frac{250 \text{ V}}{4 \text{ cm}}$$

$$A_F = 62,5 \text{ V/cm}$$

d) *Vorgehen:*

1. Schritt: Aufzeichnen der Spannung an den Vertikalablenkplatten.

- Bestimmen der Amplitude
- Grundformel anschreiben
- nach U_p umformen
- Zahlen einsetzen und ausrechnen

$$A_{F_v} = \frac{U_p}{Y}$$

$$U_p = A_{F_v} \cdot Y$$

$$U_p = 60 \cdot 5 \frac{\text{V}}{\text{cm}} \cdot \text{cm}$$

$$U_p = 300 \text{ V}_{pp}$$

- Bestimmen der Periodendauer
- Grundformel anschreiben
- nach T umformen
- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$f = \frac{1}{T}$$

$$T = \frac{1}{f}$$

$$T = \frac{1}{150 \cdot 10^3} \frac{1}{\text{s}}$$

$$T = 6,67 \mu\text{s}$$

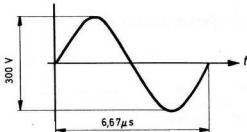


Bild 1 zu 54 d

2. Schritt: Aufzeichnen der Spannung an den Horizontalablenkplatten

- Bestimmen der Amplitude

- Grundformel anschreiben

$$A_{F_h} = \frac{U_p}{Y}$$

- nach U_p umstellen

$$U_p = A_{F_h} \cdot Y$$

- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$U_p = 70 \cdot 6 \frac{\text{V}}{\text{cm}} \cdot \text{cm}$$

$$U_p = 420 \text{ V}_{pp}$$

- Die Periodendauer stimmt mit derjenigen der Vertikalspannung überein, da ein stehendes Bild einer vollen Schwingung sichtbar ist.

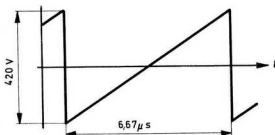


Bild 2 zu 54 d

Bewertung:

Die Repetitionsaufgaben haben Ihnen gezeigt, ob Sie den Aufbau und die Funktionsweise der Elektronenstrahlröhre verstanden haben. Ihre neu erworbenen Kenntnisse sollten Sie in die Lage versetzen, die Entstehung eines Bildes auf dem Oszillografen zu verstehen. Sie werden im weiteren Verlauf Ihrer Ausbildung den Katodenstrahloszillografen und seine Möglichkeiten kennen lernen. Die Grundlage zum Verständnis dieses vielseitigen Messgerätes ist die Kenntnis der Oszillografenröhre.

H. Schlussbestimmungen

¹ Das vorliegende Reglement tritt am 1. Oktober 1974 in Kraft.

² Mit Inkrafttreten dieses Reglementes wird das Reglement 65.8 «Allgemeine Elektrotechnik I», Ausgabe 1954, ausser Kraft gesetzt.

Der Ausbildungschef:

Oberstkorpskommandant Hirschy