

65.90/II d

**Technische Grundlagen**  
für  
**Übermittlungsgerätemechaniker**

Band II

Gültig ab 1. Januar 1977

65.90/II d

**Technische Grundlagen**  
für  
**Übermittlungsgerätemechaniker**

Band II

Gültig ab 1. Januar 1977

alle Rechte vorbehalten  
Copyright 1973 by Eidg Drucksachen- und Materialzentrale, 3000 Bern

# Inhaltsverzeichnis

<b>J. Halbleiterelemente</b>		<b>Seite</b>
I.	Die Halbleiterdiode	1
	1. Einführung	1
	2. Was wissen Sie schon über Halbleiterdioden?	2
	3. Halbleitergrundlagen	2
	4. Die Halbleiterdiode	10
	5. Die Z-Diode	19
	6. Die Kapazitätsvariationsdiode	25
	7. Die Tuneldiode	29
	8. Spezialdioden	34
	9. Das Wesentliche	35
	10. Repetitionsaufgaben	36
II.	Der Transistor	37
	1. Einführung	37
	2. Was wissen Sie schon über Transistoren?	37
	3. Das Transistorprinzip	38
	4. Der Flächentransistor	41
	5. Der Feldeffekttransistor	55
	6. Der Unijunction-Transistor	65
	7. Der Thyristor	69
	8. Das Wesentliche	73
	9. Repetitionsaufgaben	74
III.	Der Heissleiter	76
	1. Einführung	76
	2. Was wissen Sie schon über Heissleiter?	76
	3. Der Heissleiter	76
	4. Beispiele	79
	5. Das Wesentliche	82
	6. Repetitionsaufgaben	83
IV.	Der Kaltleiter	84
	1. Einführung	84
	2. Was wissen Sie schon über den Kaltleiter?	84
	3. Der Kaltleiter	84
	4. Beispiele	88
	5. Das Wesentliche	90
	6. Repetitionsaufgaben	90
V.	VDR-Widerstände	91
	1. Einführung	91
	2. Was wissen Sie schon über VDR-Widerstände?	91
	3. Der VDR-Widerstand	91
	4. Beispiele	95
	5. Das Wesentliche	97
	6. Repetitionsaufgaben	97

<b>K. Schaltungstechnik</b>	<b>99</b>
I. Gleichrichterschaltungen	99
1. Einführung	99
2. Was wissen Sie schon über Netzgleichrichter?	99
3. Netzgleichrichter	99
4. Beispiele	108
5. Das Wesentliche	110
6. Repetitionsaufgaben	111
II. RC-Verstärker mit Röhren und Transistoren	112
1. Einführung	112
2. Was wissen Sie schon über RC-Verstärker?	112
3. Der RC-Verstärker	112
4. Beispiele	134
5. Messungen an RC-Verstärkern	141
6. Das Wesentliche	147
7. Repetitionsaufgaben	148
III. Der Niederfrequenzleistungsverstärker	153
1. Einführung	153
2. Was wissen Sie schon über Niederfrequenzleistungsverstärker?	153
3. Der Niederfrequenzleistungsverstärker	154
4. Beispiele	165
5. Messungen an Niederfrequenzverstärkern	169
6. Das Wesentliche	173
7. Repetitionsaufgaben	173
IV. Der Hochfrequenzverstärker	177
1. Einführung	177
2. Was wissen Sie schon über Hochfrequenzverstärker?	177
3. Der Hochfrequenzverstärker	177
4. Beispiele	195
5. Messungen an Hochfrequenzverstärkern	201
6. Das Wesentliche	208
7. Repetitionsaufgaben	209
V. Der Hochfrequenzleistungsverstärker	211
1. Einführung	211
2. Was wissen Sie schon über HF-Leistungsverstärker?	211
3. Der C-Verstärker	211
4. Beispiele	216
5. Messungen an C-Verstärkern	221
6. Das Wesentliche	224
7. Repetitionsaufgaben	225

VI.	Oszillatoren	227
	1. Einführung	227
	2. Was wissen Sie schon über Oszillatoren?	227
	3. Oszillatoren	228
	4. Die gebräuchlichsten Oszillatorschaltungen	241
	5. Messungen an Oszillatoren	249
	6. Das Wesentliche	252
	7. Repetitionsaufgaben	253
VII.	Mischstufen	254
	1. Einführung	254
	2. Was wissen Sie schon über Mischstufen?	254
	3. Die Mischung	254
	4. Beispiele von Mischschaltungen	258
	5. Messungen an Mischstufen	262
	6. Das Wesentliche	264
	7. Repetitionsaufgaben	265
VIII.	Demodulatoren	266
	1. Einführung	266
	2. Was wissen Sie schon über Modulationsarten und Demodulatoren?	266
	3. Demodulatoren	267
	4. Messungen an Demodulatoren	300
	5. Das Wesentliche	301
	7. Repetitionsaufgaben	303
IX	Begrenzer	305
	1. Einführung	305
	2. Was wissen Sie schon über den Begrenzer?	305
	3. Der Begrenzer	305
	4. Messungen an Begrenzerstufen	311
	5. Das Wesentliche	315
	6. Repetitionsaufgaben	315
<b>L. Sendetechnik</b>		<b>317</b>
I.	Der amplitudenmodulierte Sender	317
	1. Einführung	317
	2. Was wissen Sie schon über amplitudenmodulierte Sender?	317
	3. Der amplitudenmodulierte Sender	317
	4. Das Wesentliche	325
	5. Repetitionsaufgaben	326
II.	Der Frequenzmodulierte Sender	327
	1. Einführung	327
	2. Was wissen Sie schon über frequenzmodulierte Sender?	327
	3. Der Frequenzmodulierte Sender	327
	4. Das Wesentliche	336
	5. Repetitionsaufgaben	337

III.	Der einseitenbandmodulierte Sender	338
	1. Einführung	338
	2. Was wissen Sie schon über einseitenbandmodulierte Sender?	338
	3. Der einseitenbandmodulierte Sender	339
	4. Das Wesentliche	345
	5. Repetitionsaufgaben	346
IV.	Wellenausbreitung	347
	1. Einführung	347
	2. Was wissen Sie schon über Wellenausbreitung?	347
	3. Die Wellenausbreitung	348
	4. Das Wesentliche	360
	5. Repetitionsaufgaben	361
V.	Antennen	362
	1. Einführung	362
	2. Was wissen Sie schon über Antennen?	362
	3. Antennen	363
	4. Das Wesentliche	410
	5. Repetitionsaufgaben	412
<b>M. Empfangstechnik</b>		<b>415</b>
I.	Der Überlagerungsempfänger	415
	1. Einführung	415
	2. Was wissen Sie schon über den Überlagerungsempfänger?	415
	3. Der Überlagerungsempfänger	415
	4. Beispiele	422
	5. Das Wesentliche	427
	6. Repetitionsaufgaben	428
II.	Empfänger für die verschiedenen Modulationsarten	429
	1. Einführung	429
	2. Was wissen Sie schon über die verschiedenen Empfängertypen?	429
	3. Die Empfängertypen	429
	4. Das Wesentliche	436
	5. Repetitionsaufgaben	437
<b>N. Schlussbestimmungen</b>		<b>511</b>

# Anhang

## Antworten zu den Fragen im Text

1. Was wissen Sie schon über Halbleiterdioden?	439
2. Repetitionsaufgaben zu «I. Die Halbleiterdiode»	440
3. Was wissen Sie schon über Transistoren?	443
4. Repetitionsaufgaben zu «II. Der Transistor»	444
5. Was wissen Sie schon über Heissleiter?	448
6. Repetitionsaufgaben zu «III. Der Heissleiter»	449
7. Was wissen Sie schon über Kaltleiter?	450
8. Repetitionsaufgaben zu «IV. Der Kaltleiter»	450
9. Was wissen Sie schon über VDR-Widerstände?	452
10. Repetitionsaufgaben zu «V. VDR-Widerstände»	453
11. Was wissen Sie schon über Netzgleichrichter?	455
12. Repetitionsaufgaben zu «I. Gleichrichterschaltungen»	456
13. Was wissen Sie schon über RC-Verstärker?	458
14. Repetitionsaufgaben zu «II. RC-Verstärker mit Röhren und Transistoren»	458
15. Was wissen Sie schon über Niederfrequenzleistungsverstärker?	466
16. Repetitionsaufgaben zu «III. Der Niederfrequenzleistungsverstärker»	467
17. Was wissen Sie schon über Hochfrequenzverstärker?	473
18. Repetitionsaufgaben zu «VI. Der Hochfrequenzverstärker»	474
19. Was wissen Sie schon über HF-Leistungsverstärker?	476
20. Repetitionsaufgaben zu «V. Der Hochfrequenzleistungsverstärker»	477
21. Was wissen Sie schon über Oszillatoren?	479
22. Repetitionsaufgaben zu «VI. Oszillatoren»	480
23. Was wissen Sie schon über Mischstufen?	482
24. Repetitionsaufgaben zu «VII. Mischstufen»	483
25. Was wissen Sie schon über Modulationsarten und Demodulatoren?	484
26. Repetitionsaufgaben zu «VIII. Demodulatoren»	485
27. Was wissen Sie schon über den Begrenzer?	489
28. Repetitionsaufgaben zu «IX. Begrenzer»	490
29. Was wissen Sie schon über amplitudenmodulierte Sender?	491
30. Repetitionsaufgaben zu «I. Der amplitudenmodulierte Sender»	492
31. Was wissen Sie schon über frequenzmodulierte Sender?	493
32. Repetitionsaufgaben zu «II. Der frequenzmodulierte Sender»	494
33. Was wissen Sie schon über einseitenbandmodulierte Sender?	496
34. Repetitionsaufgaben zu «III. Der einseitenbandmodulierte Sender»	497
35. Was wissen Sie schon über Wellenausbreitung?	498
36. Repetitionsaufgaben zu «IV. Wellenausbreitung»	499
37. Was wissen Sie schon über Antennen?	500
38. Repetitionsaufgaben zu «V. Antennen»	501
39. Was wissen Sie schon über den Überlagerungsempfänger?	504
40. Repetitionsaufgaben zu «I. Der Überlagerungsempfänger»	505
41. Was wissen Sie schon über die verschiedenen Empfängertypen?	507
42. Repetitionsaufgaben zu «II. Empfänger für verschiedene Modulationsarten»	508

### Sachverzeichnis

# Die technischen Grundlagen für Übermittlungsgerätemechaniker

## Band II

(Vom 16. September 1976)

erlassen gestützt auf Artikel 3 Absatz 2 der Verordnung des Eidgenössischen Militärdepartements vom 24. März 1976 über militärische Vorschriften.

---

## J. Halbleiterelemente

### I. Die Halbleiterdiode

#### 1. Einführung

Halbleiterdioden sind aus der modernen Schaltungstechnik nicht mehr wegzudenken. Sie dienen z. B. als Gleichrichter in Netzteilen und Demodulatoren, als Misch- und Modulationselement oder als Begrenzer. Spezielle Dioden wie Zenerdioden oder Kapazitätsvariationsdioden (Varicap) können zur Stabilisierung von Gleichspannungen oder zur Frequenzmodulation und zum Nachstimmen von Oszillatoren verwendet werden. Die Digitaltechnik schliesslich benützt Dioden zum Aufbau von logischen Toren.

Diese unvollständige Aufzählung von Anwendungsmöglichkeiten für Halbleiterdioden zeigt die weite Verbreitung dieses wichtigen Bauelementes.



## 2. Was wissen Sie schon über Halbleiterdioden? (Lösung Seite 439)

- a) Was ist ein Halbleiter?
- b) Aus welchen Materialien werden hauptsächlich Halbleiterdioden hergestellt?
- c) Welche Vorteile weist die Halbleiterdiode gegenüber der Röhrendiode auf?
- d) Sind Ihnen Nachteile der Halbleiterdiode bekannt?
- e) Sagt Ihnen der Begriff «Defektelektron» etwas?
- f) Was ist ein Valenzelektron?

## 3. Halbleitergrundlagen

### a. Die Stromleitung in Halbleitern

Als Ausgangsmaterial für die Herstellung von Dioden und Transistoren werden Halbleiter verwendet. Die gebräuchlichsten Halbleitermaterialien sind **Germanium** und **Silizium**. Der Leitungsmechanismus im Halbleiter soll an Hand eines Germaniumkristalles gezeigt werden. Germanium ist wie jeder andere Stoff aus Atomen aufgebaut. Im Gegensatz zu Leitermaterialien sind im Germanium beinahe keine freien Elektronen anzutreffen, sein elektrisches Verhalten gleicht deshalb eher einem Nichtleiter als einem Leiter.

Der Aufbau des Germaniumatoms ist aus Bild 1 ersichtlich. Die Elektronen umkreisen den Kern. Sie sind auf sogenannten Schalen angeordnet, die sich durch ihren Abstand vom Kern unterscheiden. Die Elektronen auf der äussersten Schale bestimmen das chemische und elektrische Verhalten des Atoms. Diese Elektronen werden als **Valenzelektronen** bezeichnet. Der Ausdruck «Valenz» kommt aus dem Griechischen und bedeutet «Wertigkeit». Die **Wertigkeit** der Elemente sagt aus, wieviele Valenzelektronen die Atome des betreffenden Elementes aufweisen.

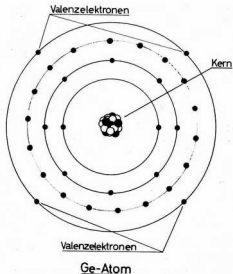


Bild 1

Germanium ist infolge seiner vier Valenzelektronen **vierwertig**. Die Valenzelektronen sind für die Bindung zwischen den Atomen des gleichen Elements oder zwischen Atomen verschiedener Elemente verantwortlich. Valenzelektronen haben die Tendenz, sich mit Valenzelektronen eines Nachbaratoms zu **Elektronenpaaren** zu vereinigen, und die beiden Atomkerne gemeinsam zu umkreisen. Die Elektronen drehen sich auf ihren Bahnen wie Kreisel um die eigene Achse (Spin). Der Drehsinn dieser Kreiselbewegung ist für die beiden Elektronen eines jeden Paares entgegengesetzt, wodurch zwischen ihnen eine magnetische Anziehungskraft wirksam wird, die die zwischen Elektronen wirksame elektrostatische Abstoßung überwindet, so dass das Paar eng verbunden beide Atomkerne umkreist. Jedes Valenzelektron bindet ein weiteres Atom und somit bildet jedes Atom vier kovalente Bindungen mit seinen vier Nachbaratomen. Dreidimensional betrachtet bilden diese vier Germanium-Nachbaratome die geometrische Figur eines regelmäßigen Tetraeders (Kristallgitter). In Bild 2 erkennen wir die Struktur des Germaniums in zwei- und dreidimensionaler Darstellung.

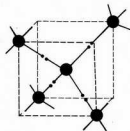
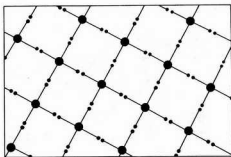


Bild 2

Ein Absolut reiner Germaniumkristall ist beinahe ein Nichtleiter. Alle Elektronen sind an die Atomkerne gebunden. Durch äussere Einwirkung (Licht, Wärme) tritt eine schwache Leitfähigkeit auf. Diese *Eigenleitfähigkeit* kommt durch Elektronen zustande, die aus ihrer Valenzbindung gerissen und frei wurden. Die Elektronen führen zusätzlich zu ihren Bewegungen um den Atomkern unter dem Einfluss der Temperatur Schwirrbewegungen aus. Diese Schwirrbewegungen werden mit steigender Temperatur immer kräftiger; einzelne Elektronen schwingen so stark, dass dabei die Elektronenpaarbindung aufgebrochen wird. Das Elektron wird für eine kurze Zeit frei und bewegt sich unter dem Einfluss einer angelegten Gleichspannung zum positiven Pol der Spannungsquelle. Als Folge des Aufreissens eines Elektronenpaares tritt eine **Elektronenfehlstelle** auf. Eine Elektronenfehlstelle ist demzufolge eine Stelle, an welcher ein Valenzelektron fehlt, sie wird **Defektelektron** oder **Loch** genannt. Das fehlende Elektron wirkt sich wie eine positive Ladung aus, da die Stelle vor dem Aufbruch elektrisch neutral war, und ihr nun eine negative Elementarladung fehlt. Die Defektelektronen oder Löcher im Halbleiter sind wie die herausgebrochenen Elektronen beweglich, indem jedes Loch von einem Elektron ausgefüllt werden kann, und dann dafür das Elektron einem anderen Atom fehlt, was einer Wanderung des Loches gleichkommt. Defektelektronen verhalten sich somit wie positive elektrische Elementarladungen, die unter dem Einfluss einer angelegten Spannung zum negativen Pol der Spannungsquelle wandern.

Im reinen Halbleiter ist die Anzahl der Defektelektronen und der freien Elektronen gleich gross, da beim Freiwerden eines Elektrons gleichzeitig immer ein Loch entsteht; man spricht deshalb von einer **Paarbildung**. Trifft ein freies Elektron zufällig auf ein Loch, so füllt es dieses auf, das Valenzelektronenpaar ist wiederum vereinigt, die freien Ladungsträger sind verschwunden. Dieser Vorgang heisst **Rekombination**. Paarbildung und Rekombination gleichen sich auf die Dauer aus. Die Paarbildung nimmt mit steigender Temperatur zu, was ein Ansteigen der Eigenleitfähigkeit bewirkt.

## b. Störstellenleitung

Um den Halbleiter praktisch verwendbar zu machen, muss seine Leitfähigkeit vergrössert werden. Das bedeutet, dass die Anzahl der freien Ladungsträger im Kristall vergrössert werden muss. Dies kann dadurch geschehen, dass einige der vierwertigen Germaniumatome durch Atome eines dreiwertigen oder eines fünfwertigen Elements ersetzt werden. Der Anteil dieser Störatome muss sehr klein gehalten werden.

Werden fünfwertige Fremdatome (Phosphor, Arsen, Antimon) fest in das Kristallgitter eingebaut, so können nur vier der fünf Valenzelektronen durch die vier benachbarten Germaniumatome gebunden werden. Das fünfte Valenzelektron findet keinen Bindungspartner; es ist überflüssig und man nennt es ein **Überschuss-Elektron**. Der Energieaufwand zur Lösung dieses Elektrons von seinem Atom ist sehr gering, so dass es zum freien Elektron wird, das sich im Kristallgitter bewegen kann. Dem verbliebenen Störatom fehlt ein Elektron, es wird zum **positiv** geladenen Ion, das fest an der Stelle verbleibt, an welcher es in das Kristallgitter eingebaut wurde. Die elektrische Leitfähigkeit eines mit fünfwertigen Atomen verunreinigten Halbleiterkristalles beruht auf der Beweglichkeit seiner überschüssigen Elektronen und wird als **Störstellenleitung** bezeichnet. Diese Art der Leitfähigkeit wird **n-Leitung** genannt, da negative Elementarladungen die Stromleitung ermöglichen. Das Atom, das das Elektron gespendet hat, heisst **Donator** (Geber). Germanium, welches mit Donatoren verunreinigt oder gedopt wurde, trägt demzufolge die Bezeichnung **n-Germanium**. Bild 3 zeigt schematisch den Kristallaufbau von n-Germanium. Das Donatoratom ist ionisiert, es weist nach aussen eine positive Ladung auf, da sein fünftes Elektron unter der Einwirkung der angelegten Spannung nach links zur positiven Elektrode wandert.

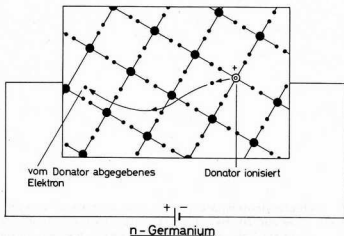


Bild 3

Werden dem Halbleiterkristall anstelle von fünfwertigen Störatomen dreiwertige (Bor, Aluminium, Gallium, Indium) eingebaut, so entsteht eine Bindungslücke. Da Germanium und Silizium vier Valenzelektronen haben, das Störatom dagegen nur drei, fehlt ein Bindungselektron; es entsteht ein Loch. Dieses Loch oder Defektelektron wirkt im Kristall wie eine positive elektrische Elementarladung. Das Defektelektron wandert im Kristall, indem ein Elektron einer benachbarten Bindung das Loch auffüllt und dadurch an seinem ursprünglichen Standort ein Loch hinterlässt. Die elektrische Leitfähigkeit eines mit dreiwertigen Atomen verunreinigten Halbleiters beruht auf der Beweglichkeit seiner Löcher. Diese Art von Leitfähigkeit wird **p-Leitung** genannt, da die Löcher wie eine positive Elementarladung wirken. Das dreiwertige Störatom heisst **Akzeptor** (Aufnehmer), da es ein Elektron aufnehmen kann. Germanium, welches mit Akzeptoren gedopt ist, trägt den Namen **p-Germanium**. In Bild 4 ist schematisch der Kristallaufbau von p-Germanium dargestellt.

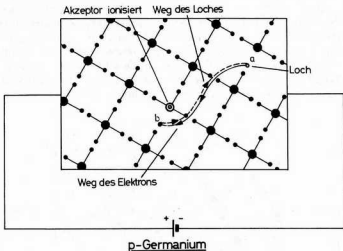


Bild 4

Der Kern des Akzeptoratoms ist wiederum fest im Gitter eingebaut und bildet ein **negatives** Ion, da es zusätzlich ein Elektron aufgenommen hat. Im Bild erkennt man, wie das Loch vom Akzeptoratom b zum Germaniumatom a gewandert ist, indem dieses ein Elektron an das Akzeptoratom abgegeben hat.

### c. Das Verhalten der Sperrschicht

Dioden und Transistoren bestehen aus Halbleiterkristallen, die mit Akzeptoren und Donatoren gedopt sind. Das einfachste Halbleiterelement ist die Halbleiterdiode, sie besteht aus einem Halbleiterkristall, der auf der einen Seite mit Donatoren und auf der anderen Seite mit Akzeptoren dotiert ist. Für das Arbeitsverhalten des Halbleiters ist die Grenzzone zwischen dem p- und dem n-Bereich von Bedeutung. Die Vorgänge in dieser Grenzzone sollen näher betrachtet werden. Bild 5 hält den Aufbau einer Halbleiterdiode schematisch fest.

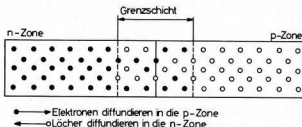


Bild 5

Der Ort, wo die p-Zone in die n-Zone übergeht, heisst **pn-Übergang** («p-n junction»). Die Zone, die beiderseits des pn-Übergangs liegt, wird **Grenzschicht** genannt; infolge ihres Gleichrichterverhaltens bezeichnet man sie auch als **Sperrschicht**. Der n-Bereich und der p-Bereich des Kristalls sind nach aussen hin elektrisch neutral, da pro freies Elektron oder Defektelektron im Kristall ein ionisiertes Störatom vorhanden ist; die Ladungen innerhalb des Kristalls sind ausgeglichen. Infolge der thermischen Schwirrbewegungen der Elektronen und der Löcher gelangen Elektronen in die p-Zone und Löcher in die n-Zone. Der Vorgang heisst **Diffusion**. Jedes Elektron, das in die p-Zone diffundiert, verursacht in der p-Zone eine Zunahme und in der n-Zone eine Abnahme der negativen Ladung. Analog dazu ist die Wirkung der Diffusion von Löchern in die n-Zone. Jedes Loch, das in die n-Zone diffundiert, verringert die positive Ladung der p-Zone und erhöht diejenige der n-Zone. In der Grenzschicht baut sich eine Potentialdifferenz auf. Diese Potentialdifferenz wirkt der Diffusion entgegen, so dass der Austausch von Ladungsträgern aufhört. Bild 6 veranschaulicht die Entstehung der Potentialdifferenz durch Diffusion.

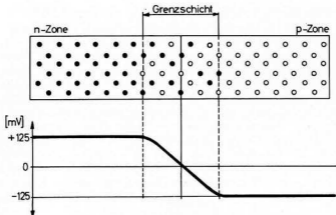


Bild 6

Trotz der Potentialdifferenz in der Grenzschicht fließt im äusseren Kreis kein Strom, wenn man diesen kurzschliesst. Durch den Kurzschluss würden wieder eine p- und eine n-Schicht miteinander verbunden, es entstünde ein zweiter Potentialsprung, der dem ersten entgegengesetzt ist, und diesen aufhebt.

Das Verhalten der Grenzschicht kann durch das Anlegen einer äusseren Spannung beeinflusst werden. Bild 7 zeigt das Verhalten der Sperrschicht, wenn die angelegte Spannung so gepolt wird, dass der Pluspol an der n-Zone und der Minuspole an der p-Zone liegt.

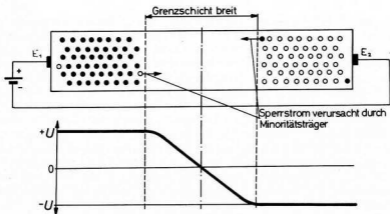


Bild 7

Die freien Elektronen der n-Zone und die Löcher der p-Zone werden von der Grenzschicht weg zu den Elektroden  $E_1$  und  $E_2$  gezogen. Die Grenzschicht verarmt an freien Ladungsträgern und wird gleichzeitig breiter. Durch die Spannungsquelle wird das positive Potential auf der n-Seite und das negative Potential auf der p-Seite noch weiter angehoben, so dass sich in der verbreiterten Grenzschicht keine freien Ladungsträger mehr aufhalten können. Wo keine freien Ladungsträger sind, da kann auch kein Strom fließen, die Grenzschicht sperrt. Wir haben jedoch gesehen, dass im p-Germanium nicht nur Löcher und im n-Germanium nicht nur Elektronen als freie Ladungsträger vorhanden sind, da infolge der Umgebungstemperatur immer Valenzbindungen aufgerissen werden. Die dabei frei werdenden Elektronen und Löcher sind ebenso beweglich wie die Ladungsträger, die durch Störatome entstanden sind. Im p-Germanium sind die durch Akzeptoratome entstandenen Löcher in der überwiegenden Mehrheit, sie werden deshalb **Majoritätsträger** genannt. Im gleichen Kristall existieren jedoch freie Elektronen, die unter dem Einfluss der Temperatur aus den Bindungen an die Atome ausgebrochen sind. Diese Elektronen sind gegenüber den Löchern in der verschwindenden Minderheit und werden deshalb **Minoritätsträger** genannt. Im n-Kristall liegen die Verhältnisse gerade umgekehrt, die Elektronen sind Majoritätsträger und die Löcher Minoritätsträger. Diese Minoritätsträger verhalten sich im Kristall infolge ihrer entgegengesetzten Polarität genau umgekehrt wie die Majoritätsträger. Die Spannung, die die Grenzschicht in Sperrichtung polt, verursacht einen Stromfluss der Minoritätsträger. Der Minoritätsträgerstrom heisst Sperrstrom, da er in Sperrichtung fließt. Die Anzahl der Minoritätsträger steigt mit zunehmender Temperatur; das bedeutet, dass der Sperrstrom ebenfalls mit der Temperatur zunimmt.

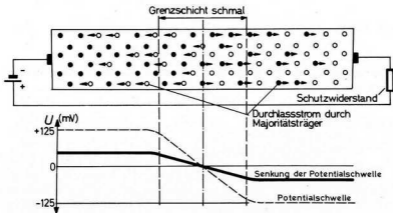
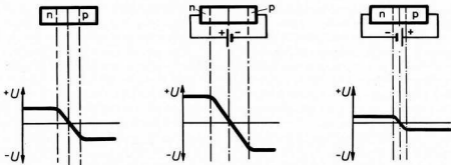


Bild 8



Bild 8 zeigt das Verhalten der Grenzschicht, wenn der Pluspol der angelegten Spannung an der p-Schicht und der Minuspol an der n-Schicht liegt. Die Spannung treibt die Majoritätsträger in die Grenzschicht, diese wird von freien Ladungsträgern überschwemmt. Die Potentialschwelle der Raumladung wird abgebaut, die Grenzschicht wird schmaler und leitend, da sich nun Elektronen und Löcher ungehindert bewegen können. Bild 9 zeigt schematisch die drei möglichen Zustände der Grenzschicht und die dazugehörigen Potentiale.



*Durch Diffusion bildet sich in der Grenzschicht eine Raumladung mit einer entsprechenden Potentialdifferenz.*

*Die Grenzschicht wird verbreitert. Die freien Ladungsträger werden aus ihr abgezogen. Die Schicht sperrt.*

*Die Grenzschicht wird schmaler. Die freien Ladungsträger werden in sie hineingepresst, sie leitet.*

Bild 9

## 4. Die Halbleiterdiode

### a. Definition

Die Halbleiterdiode ist eine Diode, deren stromrichtungsabhängiger Widerstand durch den pn-Übergang in einem Halbleiter gebildet wird.

### b. Symbol

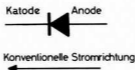


Bild 10

### c. Aufbau

Wir haben grundsätzlich zu unterscheiden zwischen der *Halbleiterspitzen-diode* und der *Halbleiterflächendiode*.

Bild 11 zeigt den Aufbau einer *Germaniumspitzendiode*.

Auf einem Metallsockel ist ein p- oder n-dotierter Germaniumkristall aufgelötet. Eine feine Metallspitze sitzt federnd auf dem Kristall auf. Das ganze System ist in einer Keramikhülse vakuumdicht untergebracht.

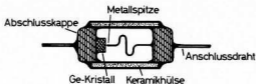


Bild 11

Durch einen kurzzeitigen Stromstoss schmilzt man etwas Germanium an der Berührungsstelle, dadurch bildet sich eine kleine Zone von Germanium des umgekehrten Typs (Formierung). Damit ist ein pn-Übergang entstanden. Die Oberfläche der Sperrschicht ist sehr klein, die Diode damit äusserst kapazitätsarm. Sie eignet sich deshalb gut für den Einsatz in Hochfrequenzschaltungen.

Bild 12 zeigt den Aufbau einer *Flächendiode*.

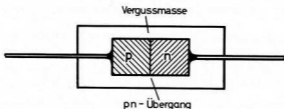


Bild 12

Die Diode besteht aus einem pn-Übergang, welcher von einer Vergussmasse umgeben ist. Die wesentlich grössere Kontaktfläche hat eine erheblich höhere Eigenkapazität zur Folge. Flächendioden sind deshalb für den Einsatz bei hohen Frequenzen ungeeignet. Die grössere Kontaktfläche erlaubt die Verarbeitung grösserer Leistungen.

Flächendioden sind daher oft in Gleichrichterschaltungen anzutreffen.

#### d. Prinzipielle Wirkungsweise

Die Halbleiterdiode nutzt das Verhalten einer Sperrschicht bei unterschiedlicher Polung aus. In Durchlassrichtung gepolt stellt sie einen sehr kleinen, in Sperrrichtung einen sehr grossen Widerstand dar.

#### e. Das Arbeitsverhalten von Halbleiterdioden

Die ideale Gleichrichtercharakteristik, wie sie Bild 13 zeigt, lässt sich mit einer Halbleiterdiode nicht erreichen.

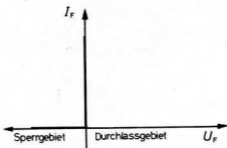


Bild 13

Die Raumladung in der Grenzschicht und der maximale Sperrstrom beeinflussen die Form der Diodencharakteristik. Nahe beim Nulldurchgang steigt die Kurve nur sehr zögernd an, da die durch die Raumladung verursachte Potentialschwelle überwunden werden muss. Für Spannungen über etwa 0,2 V für Ge und über 0,6 V für Si in Durchlassrichtung steigt die Kurve nach einer Exponentialfunktion an.

Die Kennlinie der Germaniumdiode OA 91 wird mit der in Bild 14 und 15 gezeigten Messschaltung aufgenommen.

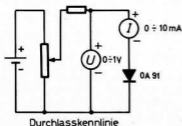


Bild 14

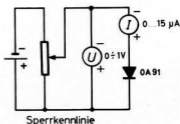


Bild 15

Die gemessenen Werte ergeben in Bild 16 grafisch dargestellt die Diodenkennlinie. (Dabei sind die in Durchlassrichtung und in Sperrichtung unterschiedlichen Massstäbe für die Ströme zu beachten!)

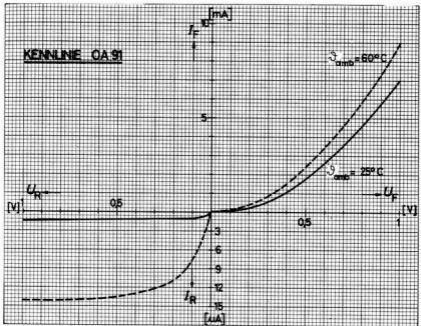


Bild 16

Die ausgezogenen Kennlinien gelten für eine Umgebungstemperatur ( $v_{amb}$ ) von  $25^\circ C$ , die gestrichelten für eine solche von  $60^\circ C$ . Im ersten Quadranten wird die Durchlasskennlinie festgehalten, die Sperrkennlinie erscheint im dritten Quadranten.

Die Durchlasskennlinie zeigt das Verhalten der Diode in Durchlassrichtung. Wir erkennen im Bereich von 0 V bis 0,4 V die ausgeprägte Krümmung der Kurve. Innerhalb dieses besonders stark gekrümmten Bereichs ist der Innenwiderstand der Diode besonders stark vom Arbeitspunkt abhängig. Der Durchlassstrom ist ein Majoritätsträgerstrom.

In Sperrichtung fließt nur ein sehr geringer Sperrstrom. Die kleinen Stromwerte erfordern einen anderen Massstab für die Darstellung der Sperrkennlinie. Innerhalb des Sperrbereiches nimmt der Sperrstrom mit grösser werdender Sperrspannung nur unwesentlich zu. Diese Erscheinung ist darauf zurückzuführen, dass der Sperrstrom ein Minoritätsträgerstrom ist. Minoritätsträger sind nur in

geringer Zahl vorhanden, schon bei relativ kleinen Sperrspannungen sind alle Minoritätsträger am Stromfluss beteiligt; die Sättigung ist erreicht. Wie schon erwähnt, hat besonders die Flächendiode eine relativ grosse Kapazität. Diese kommt vorallem bei der Beanspruchung in Sperrichtung zur Wirkung. Der Grund liegt darin, dass mit zunehmender Sperrspannung die Dicke der Sperschicht wächst, das heisst, dass die Sperschichtkapazität mit der Höhe der Sperrspannung abnimmt. Dioden, die diesen Effekt besonders ausgeprägt aufweisen, heissen Kapazitäts- oder Varactordioden (siehe Seite 26).

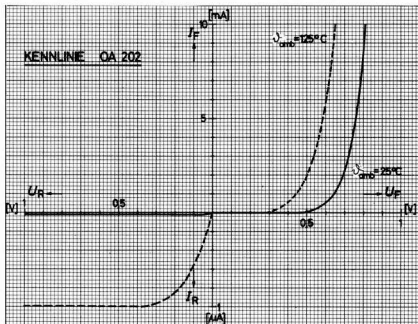


Bild 17

Auffallend ist auch die grosse Temperaturabhängigkeit des Sperrstromes. Die Minoritätsträgerdichte und damit der Sperrstrom verdoppeln sich im Germanium für jede Temperaturzunahme von etwa  $10^\circ\text{C}$ .

Die Kennlinien für die Siliziumdiode OA 202 werden in Bild 17 wiedergegeben. Auffallend ist der Schwellwert von etwa 0,5 V. Für Spannungen unterhalb dieses Wertes wird der Durchlassstrom praktisch Null. Für Spannungen oberhalb des Schwellwertes steigt der Strom steil auf hohe Werte an. Der Sperrstrom von Siliziumdioden ist bedeutend kleiner als jener von Germaniumdioden. Siliziumdioden vertragen zudem bedeutend höhere Temperaturen als Germaniumdioden.

## f. Technische Daten

### Sperrspannung $U_R$

Die Sperrspannung ist die in Sperrrichtung angelegte Spannung. In den technischen Daten wird die maximal zulässige Gleichspannung in Sperrrichtung angegeben. Die maximale Sperrspannung kann je nach Bauart der Diode zwischen 10 V und 10 kV liegen. Wird sie überschritten, so führt dies meistens zur Zerstörung der Diode.

### Durchlassspannung $U_F$

### Spitzenperrspannung $U_{RM}$

Unter Spitzenperrspannung versteht man den Spitzenwert der angelegten Sperrspannung, das heisst, Scheitelwert der Wechsellspannung in Sperrrichtung für eine Betriebsfrequenz  $> 20$  Hz sowohl bei sinusförmiger als auch bei rechteckiger Aussteuerung.

### Durchlassstrom $I_F$

Der Durchlassstrom ist der in Durchlassrichtung fliessende Strom. Für pulsierende Gleichströme gilt der Effektivwert.

### Sperrstrom $I_R$

### Spitzenstrom $I_{FM}$

Der Spitzenstrom entspricht dem Spitzenwert des Durchlassstromes für eine Betriebsfrequenz  $> 20$  Hz sowohl bei sinusförmiger Aussteuerung als auch bei rechteckförmiger Aussteuerung mit einem Tastverhältnis  $< 0,5$ .

### Verlustleistung $P_D$

Unter Verlustleistung versteht man die im Diodensystem in Wärme umgesetzte elektrische Leistung. Die zulässige Verlustleistung ist von der Betriebstemperatur abhängig; sie kann deshalb nur für einen bestimmten Temperaturwert angegeben werden.

### Umgebungstemperatur $v_{amb}$

Als Umgebungstemperatur wird die Medientemperatur um die Diode bezeichnet.

### Sperrschichttemperatur $v_j$

Die Sperrschichttemperatur ist die Temperatur, die die Sperrschicht im Betrieb aufweist.

### Lagertemperatur $v_{stg}$

Die Lagertemperatur ist die Umgebungstemperatur, bis zu welcher die Diode im stromlosen Zustand gelagert werden darf.

## g. Beispiele

Die verschiedenen Diodentypen haben entsprechend ihrem Anwendungszweck unterschiedliche Kenndaten. Man unterscheidet z. B.:

- Hochfrequenzdioden für hochohmige Gleichrichterschaltungen
- Hochfrequenzdioden für niederohmige Gleichrichterschaltungen
- Universaldioden für hohe Sperrspannungen
- Spezialdioden mit extrem niedrigem Durchlasswiderstand
- Schaltdioden mit kleiner Sperrverzögerungszeit usw.

Die elektrischen Eigenschaften der Dioden werden durch statische und dynamische Kenndaten sowie durch Grenzdaten beschrieben.

In der nachfolgenden Tabelle sind die technischen Daten der Germaniumdiode OA 91 und diejenigen der Siliziumdiode OA 202 einander gegenübergestellt.

	OA 91	OA 202
Sperrspannung $U_R$	max. 80 V	max. 100 V
Spitzensperrspannung $U_{RM}$	max. 115 V	max. 150 V
Durchlassstrom $I_F$	max. 50 mA	max. 160 mA
Spitzenstrom $I_{FM}$	max. 150 mA	max. 250 mA
Verlustleistung $P_D$ bei 45°C	75 mW	200 mW
Sperrschichttemperatur $v_j$	max. 75°C	max. 125°C
Lagertemperatur $v_{\text{avg}}$	-55...75°C	-55...125°C

Tabelle 1

*Auffallend ist der grössere Temperaturbereich der Siliziumdiode.*

### Beispiel 1

Halbleiterdioden können bei relativ hohen Temperaturen betrieben werden, sie sind jedoch auf plötzliche Temperaturänderungen sehr empfindlich und ein Zusammenbruch der Kristallstruktur kann dadurch erfolgen.

Bei Gleichrichter- oder im Impulsbetrieb tritt eine **intermittierende periodische Belastung** auf. Zur Bestimmung der Verlustleistung müssen die auf die ganze Wechselstromperiode bezogen **Effektivwerte** des Durchlassstromes und der Durchlassspannung bzw. des Sperrstromes und der Sperrspannung verwendet werden.

Anhand der in Bild 18 dargestellten Einweg-Gleichrichterschaltung soll für die Diode BYY 75 bei abwechslungsweise periodischer Belastung in Durchlass- und Sperr-Richtung die Summe der diesbezüglichen Verlustleistungen errechnet werden.

$$I_F = 28 \text{ A}; U_F = 1,1 \text{ V}; -I_R = 1,8 \text{ mA}; -U_R = 380 \text{ V}$$

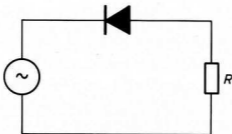


Bild 18

Vorgehen:

1. Schritt: Errechnen der Verlustleistung im Durchlassbereich

– Grundformel anschreiben

$$P_D = I_F \cdot U_F$$

– Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$P_D = 28 \cdot 1,1 \text{ VA}$$

$$P_D = 30,8 \text{ W}$$

2. Schritt: Errechnen der Verlustleistung im Sperrbereich

– Grundformel anschreiben

$$P_D = (-I_R) \cdot (-U_R)$$

– Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$P_D = 380 \cdot 1,8 \cdot 10^{-3} \text{ VA}$$

$$P_D = 0,684 \text{ W}$$

3. Schritt: Addition der beiden Verlustleistungen

$$P_D = 30,8 + 0,684 \text{ W}$$

$$P_D = 31,484 \text{ W}$$

Die nun in Wärme umgesetzte Verlustleistung muss zur Erhaltung des thermischen Gleichgewichtes an die Umgebung abgeführt werden. Zur Verbesserung der Wärmeableitung können Kühlfahnen, Kühlsterne oder spezielle Kühlkörper verwendet werden.

Es ist enorm wichtig, dass bei der Dimensionierung von Schaltungen die **thermischen Aspekte** berücksichtigt werden.

Die weiteren rechnerischen Grundlagen hierzu können jedoch im Rahmen dieses Buches nicht behandelt werden.

## Beispiel 2

Aus dem Kennlinienbild der Diode OA 91 (Bild 19) ist der Wechselstromwiderstand der Diode für eine Durchlassspannung 0,5 V bei einer Betriebstemperatur von 25° C zu bestimmen.



### Vorgehen:

Der Wechselstrominnenwiderstand wird grafisch ermittelt, indem im Arbeitspunkt die Tangente an die Kennlinie gelegt wird. Bild 19 zeigt das Verfahren.

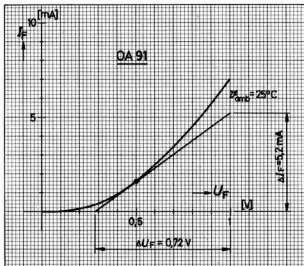


Bild 19

Der Wechselstromwiderstand ergibt sich:

- Grundformel anschreiben  $R_i = \frac{\Delta U_F}{\Delta I_F}$
- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen  $R_i = \frac{7,2 \cdot 10^{-1}}{5,2 \cdot 10^{-3}} \frac{\text{V}}{\text{A}}$   
 $R_i = 138,5 \Omega$

Der Betrag des Wechselstromwiderstandes hängt von der Lage des Arbeitspunktes ab. Je flacher die Tangente verläuft, desto grösser wird der Innenwiderstand. Da die Durchlasskennlinie keinen linearen Teil aufweist – sie verläuft nach einer Exponentialfunktion – ändert der Wechselstromwiderstand mit jedem neuen Arbeitspunkt. Die Widerstandsänderung ist im unteren stark gekrümmten Teil am grössten. Diese Eigenschaft der Diode wird in frequenzmodulierten Kleinfunkgeräten zur Modulation des Senderoszillators ausgenutzt, indem die Diode als steuerbarer Wechselstromwiderstand verwendet wird.

## 5. Die Z-Dioden (ehemals Zenerdioden)

### a. Definition

Z-Dioden sind Siliziumflächendioden, bei welchen der Zener- bzw. Avalanche-Effekt ausgenutzt wird. Dank ihrem Verhalten im Sperrbereich eignen sie sich zur Stabilisierung niedriger Gleichspannungen.

### b. Symbole

Bild 20 zeigt die gebräuchlichsten Symbole.

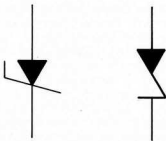


Bild 20

### c. Aufbau

Die Z-Diode besteht aus einem n-dotierten Siliziumkristall, in den ein Aluminiumdraht oder eine Aluminiumpille einlegiert ist. Die einlegierten Aluminiumatome lassen im Silizium eine p-Zone entstehen. Zwischen dem n-Kristall und der p-Zone bildet sich eine Sperrschicht.

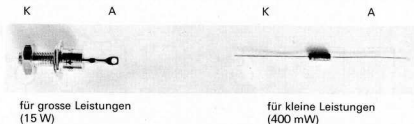


Bild 21

Bild 21 zeigt eine Zenerdiode für kleine Ströme und eine Leistungszennerdiode.

Die Leistungszennerdiode ist mit einem Gewinde versehen, damit sie auf ein Kühlblech montiert werden kann. Durch eine entsprechende Kühlung lässt sich die Verlustleistung erhöhen.

**d. Prinzipielle Wirkungsweise** Für einen bestimmten Wert der Sperrspannung kann die Feldstärke im Kristall so gross werden, dass sie ausreicht, um Elektronen aus ihren Valenzbindungen zu reissen; also eine innere Feldemission in der Sperrschicht stattfindet. Dieser Vorgang heisst **Zener-Effekt** und führt zu einem plötzlichen starken Anstieg des Sperrstromes bei nur kleiner Änderung der Spannung. Dieser Effekt setzt bei einer Sperrspannung (Z-Spannung) von ca. 1-6 V ein. Bei einer Z-Spannung von über ca. 5,7 V können freie Ladungsträger (Minoritätsträger) durch das elektrische Feld so weit beschleunigt werden, dass sie durch Stoss Elektronen aus der Gitterbindung ausschlagen und somit neue Trägerpaare bilden, die ihrerseits wieder beschleunigt werden und durch Stoss wieder neue Paare bilden. Dieser Vorgang heisst **Avalanche-Effekt**.

Es wird somit unterschieden zwischen dem eigentlichen Zenerdurchbruch und dem Avalanchedurchbruch. Beim Zenerdurchbruch tragen nur die durch die hohe Feldstärke aus den Bindungen herausgerissenen zusätzlichen Ladungsträger zur Erhöhung des Sperrstromes bei. Beim Avalanchedurchbruch entsteht eine Ladungsträgermultiplikation, indem die beschleunigten Ladungsträger neue Ladungsträger aus den Atomen heraus schlagen. Der Avalanchedurchbruch weist grosse Ähnlichkeit auf mit den Vorgängen in Gasdioden. Bis zu Durchbruchspannungen von 5,7 V tritt nur der Zenerdurchbruch in Erscheinung, während bei höheren Spannungen der Avalanchedurchbruch überwiegt.

Im Gegensatz zu normalen Dioden arbeiten die Z-Dioden dauernd im Durchbruchgebiet, ohne zerstört zu werden, solange die Verlustleistung in Sperrichtung nicht grösser wird als die maximale Verlustleistung in Durchlassrichtung.

Bei änderndem Zenerstrom bleibt die Spannung über der Diode – die **Zener-Spannung** – annähernd konstant. Die Z-Diode verhält sich ähnlich wie eine Glimmstabilisatorröhre.

### e. Arbeitsverhalten

Das Arbeitsverhalten wird für einen Fall am Versuch nach Bild 22 studiert.

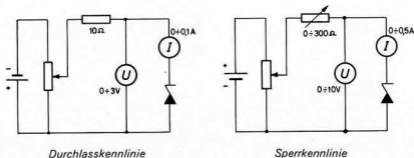


Bild 22

Im Durchlassbereich zeigt die Diode ein normales Verhalten. Im Sperrbereich ist für kleinere Sperrspannungen als 5 V nur ein sehr kleiner Sperrstrom messbar. Wird die Sperrspannung über 5 V hinaus erhöht, so steigt der Sperrstrom sehr steil an und erreicht sofort hohe Werte. Die Spannung über der Diode bleibt unabhängig vom fließenden Sperrstrom annähernd konstant. Diese Zenerspannung beträgt in unserem Fall 5,7 V. Die Messresultate ergeben grafisch ausgewertet die Kennlinie der Zenerdiode nach Bild 23.

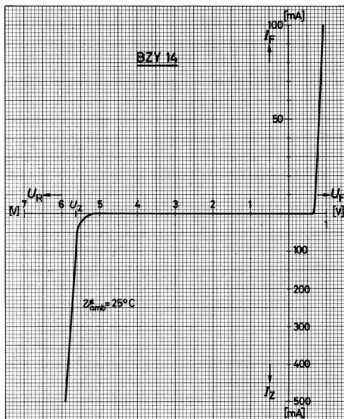


Bild 23

## f. Technische Daten

Es werden nur die Kenndaten aufgeführt, die für die Zenerdiode zusätzlich berücksichtigt werden müssen.

### Zenerstrom $I_Z$

Der Zenerstrom ist gegeben durch den Quotienten von zulässiger Verlustleistung zu Zenerspannung (Gleich- bzw. Mittelwert).

$$I_Z = \frac{P_D}{U_Z}$$

Er entspricht dem Sperrstrom im Zenerbereich der Diode für eine bestimmte Umgebungstemperatur.

### Zenerspitzenstrom $I_{ZM}$

Der Zenerspitzenstrom entspricht dem maximal zulässigen Spitzenwert des Zenerstromes (Scheitelwert).

### Zenerspannung $U_Z$

Die Zenerspannung ist die Spannung, die an der Zenerdiode auftritt, wenn diese im Zenergebiet betrieben wird.

### Zenerwiderstand $r_Z$

Der Zenerwiderstand ist der Wechselstromwiderstand der Zenerdiode im Zenerbereich

### Temperaturkoeffizient $\alpha$

Der Temperaturkoeffizient beschreibt das Temperaturverhalten der Zenerdiode.

## g. Beispiele

In Tabelle 2 sind die technischen Daten einer Leistungszenerdiode und einer Z-Diode für kleine Ströme zusammengestellt. Beide Dioden sollen zur Stabilisierung einer Gleichspannung nach Bild 24 verwendet werden. Mit der Leistungs-Z-Diode wird die Betriebsspannung eines transistorisierten Niederfrequenzverstärkers konstant gehalten. Die kleinere Diode dient zur Stabilisierung der Speisespannung eines transistorisierten Oszillators. Beide Geräte werden für eine maximale Umgebungstemperatur von 45° C dimensioniert. Die Speisung erfolgt für beide Verbraucher aus einer nichtstabilisierten Spannung von 12 V.

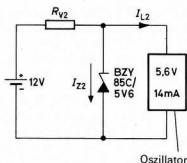
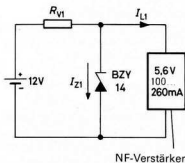


Bild 24

Daten bei 25°C wenn nicht anders vermerkt

	BZY 14	BZY 85/C 5V6
Zenerstrom $I_{Z\max}$	500 mA	49 mA (bei 45°C)
Durchlassstrom $I_F$	300 mA	200 mA
Durchlassspitzenstrom $I_{FM}$	500 mA	300 mA
Verlustleistung $P_D$ für 45°C mit Kühlblech 100 x 100 x 2 mm	0,4 W 3,5 W	0,31 W –
Sperrschichttemperatur $v_j$	150°C	150°C
Zenerspannung $U_Z$	5,6 V	5,6 V
Toleranzbereich für die Zenerspannung	5,0...6,2 V	5,2...6,0 V
Zenerwiderstand $r_z$	2,5...5 $\Omega$	32...60 $\Omega$
Temperaturkoeffizient $\alpha$ für die Zenerspannung	+0,02%/°C	-0,003%/°C

Tabelle 2

### Bemerkungen zu den technischen Daten

Die maximal zulässige Verlustleistung von Halbleiterelementen kann erhöht werden, wenn die erzeugte Wärme abgeführt wird. Dies geschieht bei der Leistungszenerdiode über ein Kühlblech, wodurch die zulässige Verlustleistung von 0,4 auf 3,5 W erhöht wird.

Der Toleranzbereich für die Zenerspannung gibt an, zwischen welchen Grenzen die Zenerspannung des betreffenden Diodentyps liegt. Der Toleranzbereich ist durch die Fabrikationsstreuung bedingt.

## Problemstellung

Die Vorwiderstände  $R_v$  sind für beide Schaltungen nach Bild 24 zu dimensionieren.

### Vorgehen:

#### 1. Schritt: Festlegen des Zenerstromes

Für beide Schaltungen sollte ein möglichst grosser Zenerstrom gewählt werden, da die Speisespannung infolge Alterung oder Entladung der Batterie nur abnehmen kann. Man erreicht damit eine gute Ausnutzung des Stabilisierungsbereiches. Um andererseits die Schaltung nicht kritisch zu dimensionieren, sollten die Dioden nur mit 70% des maximal zulässigen Zenerstromes belastet werden.

- |  |   |        |
|--|---|--------|
| - Grundformel anschreiben              | $I_Z = I_{Z \max} \cdot 0,7$                  |        |
| - Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen | $I_Z = 0,5 \cdot 0,7 \text{ A}$               | BZY 14 |
|  | $I_Z = 350 \text{ mA}$                        |        |
|  | $I_Z = 4,9 \cdot 10^{-2} \cdot 0,7 \text{ A}$ | BZY 85 |
|  | $I_Z = 34,3 \text{ mA}$                       |        |

Mit dieser Sicherheitsmarge wird die Diode unterhalb der Grenzwerte betrieben, was die Lebensdauer und vor allem die Betriebssicherheit des Gerätes erhöht. Die Vorwiderstände könnten natürlich auch für die maximal zulässigen Ströme berechnet werden. Dieses Vorgehen wird jedoch in der Praxis nicht angewendet, da immer eine gewisse Sicherheit miteingerechnet werden muss, nicht zuletzt für eine mögliche Überspannung der nichtstabilisierten Spannungsquelle und die Abweichung der Widerstände vom berechneten Wert.

#### 2. Schritt: Berechnen der Vorwiderstände

- |  |  |        |
|--|--|--------|
| - Grundformel anschreiben              | $R_{v1} = \frac{U_B - U_L}{I_Z + I_L}$                               |        |
| - Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen | $R_{v1} = \frac{12 - 5,6}{0,35 + 0,1}$                               |        |
|  | $R_{v1} = 14,2 \Omega$   | BZY 14 |
|  | $P_{R_{v1}} = 6,4 \text{ V} \cdot 0,45 \text{ A} = 2,88 \text{ W}$   |        |
|  | $R_{v2} = \frac{12 - 5,6}{(34,3 + 14) \cdot 10^{-3}}$                |        |
|  | $R_{v2} = 133 \Omega$  | BZY 85 |
|  | $P_{R_{v2}} = 6,4 \text{ V} \cdot 48,3 \text{ mA} = 0,309 \text{ W}$ |        |

In der Praxis stellt sich nach diesen Berechnungen noch das Problem der Verwendung von Widerständen der Normreihe und der Leistungsabstufungen. Unter Umständen muss von diesen Grössen her wieder zurück gerechnet werden zu den Zenerdioden. In unseren Beispielen dürften sich folgende Werte empfehlen:

Vorwiderstand zu BZY 14:  $15 \Omega \pm 10\%$ , 5 W

Vorwiderstand zu BZY 85:  $150 \Omega \pm 10\%$ , 0,5 W

## 6. Die Kapazitätsvariationsdiode (Varactordiode)

### a. Definition

Die Kapazität einer Diode hängt, wie auf Seite 15 bereits erläutert wurde, von der angelegten Sperrspannung ab. Dioden, die diesen Effekt besonders ausgeprägt zeigen, heissen Kapazitäts- oder Varactordiode.

### b. Symbole

In Bild 25 sind die gebräuchlichsten Symbole dargestellt.

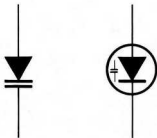


Bild 25

### c. Aufbau

Die Varactordiode ist eine Siliziumflächendiode. Bild 26 zeigt die Ausführung einer Varicap.

Durch besondere Diffusionsprozesse können heute auch Dioden mit hyperabruptem pn-Übergang hergestellt werden, die sich durch sehr grossen nutzbaren Kapazitätshub auszeichnen und sich daher besonders für die Durchstimmung grosser Frequenzbereiche eignen.



K



A

Bild 26

#### d. Prinzipielle Wirkungsweise

Bei der Varactordiode wird eine Kapazitätsvariation durch eine im Sperrbereich der Diode veränderte Vorspannung erzeugt. Die Kapazitätscharakteristik ist durch die festeingebauten Störstellenatome genau festgelegt. Wie schon angedeutet wurde, ändert sich mit der angelegten Sperrspannung die Breite der Sperrschicht. Je höher diese Spannung ist, desto mehr Ladungsträger werden aus der Sperrschicht abgesogen; die Sperrschicht wird breiter und damit die Kapazität kleiner. Bild 27 erläutert den Vorgang.

Als Vergleich kann man den gewöhnlichen Kondensator beiziehen, bei dem sich die Kapazität umgekehrt proportional zu dem Abstand der Beläge verhält.

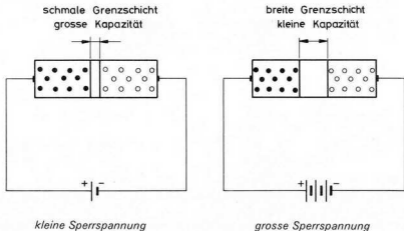


Bild 27

### e. Arbeitsverhalten

Die Kennlinie in Bild 28 zeigt die Diodenkapazität in Abhängigkeit der angelegten Spannung für die Varactordiode BAY 70.

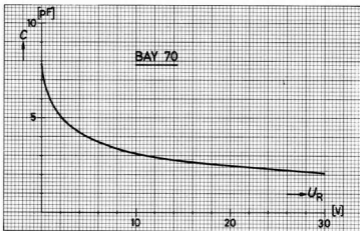


Bild 28

### f. Technische Daten

Es werden nur die spezifischen Daten aufgeführt.

#### Kapazitätsverhältnis

Das Kapazitätsverhältnis entspricht dem Verhältnis der grössten zur kleinsten Diodenkapazität innerhalb des Regelbereiches.

#### Güte

Die Güte der Diode entspricht dem Kehrwert des Verlustfaktors  $\text{tg } \delta$ . Die Diodengüte ist stark frequenz- und spannungsabhängig.

Die Diode BAY 70 weist folgende spezifische Daten auf:

Kapazitätsverhältnis	3,4 : 1	
Güte bei 30 MHz	700	bei einer Sperrspannung von 2 V
bei 200 MHz	100	
bei 500 MHz	42	
bei 30 MHz	1600	bei einer Sperrspannung von 30 V

### g. Beispiel

Bild 29 zeigt eine Kapazitätsvariationsdiode als Nachstimmorgan. Die Sperrspannung für die Diode wird über dem Potentiometer P abgegriffen. Die Drossel  $L_{Dr}$  hält die Hochfrequenz vom Gleichstromkreis fern. Die Varicap D ist über den Kopplungskondensator  $C_K$  dem Schwingkreis  $L_1-C_1$  parallel geschaltet.  $C_K$  verhindert einen Kurzschluss der Sperrspannung über die Kreisspule  $L_1$ . Diese Schaltung erlaubt das Abstimmen des Kreises mit Hilfe eines Potentiometers, welches sich weit abgesetzt vom Schwingkreis befinden kann.

Die Resonanzfrequenz des Kreises ist für eine Sperrspannung von 2 V und eine solche von 20 V zu errechnen.

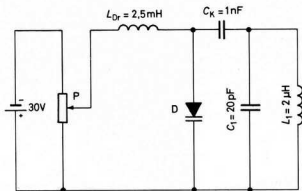


Bild 29

#### Vorgehen:

1. Schritt: Bestimmen der Kapazitätswerte des Varicaps für 2 V und 20 V mit Hilfe der Kennlinie aus Bild 28.

- $C_{D1} = 5 \text{ pF}$  (2 V)
- $C_{D2} = 2,5 \text{ pF}$  (20 V)

2. Schritt: Berechnen der Schwingkreiskapazitäten.

$C_K$  und  $L_{Dr}$  können infolge ihrer hohen Werte im Verhältnis zu  $D$ ,  $C_1$  und  $L_1$  vernachlässigt werden.

- Grundformel anschreiben  $C_{kr} = C_1 + C_D$

- Zahlenwerte einsetzen  
und ausrechnen

$$C_{kr1} = 20 \text{ pF} + 5 \text{ pF} = 25 \text{ pF}$$

$$C_{kr2} = 20 \text{ pF} + 2,5 \text{ pF} = 22,5 \text{ pF}$$

### 3. Schritt: Berechnen der Resonanzfrequenzen des Kreises

– Grundformel anschreiben

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 \cdot C_{kr}}} \quad [f_0] = \frac{1}{\sqrt{\frac{Vs}{A} \frac{As}{V}}} = \frac{1}{s}$$

– Zahlenwerte einsetzen  
und ausrechnen

$$f_{01} = \frac{1}{2\pi\sqrt{2 \cdot 10^{-6} \cdot 25 \cdot 10^{-12}}}$$

$$f_{01} = \mathbf{22,5 \text{ MHz}}$$

$$f_{02} = \frac{1}{2\pi\sqrt{2 \cdot 10^{-6} \cdot 22,5 \cdot 10^{-12}}}$$

$$f_{02} = \mathbf{23,75 \text{ MHz}}$$

## 7. Die Tunneldiode

### a. Definition

Die Tunneldiode ist eine Diode, deren Kennlinie im Bereich der kleinen Anodenspannungen eine Einsattelung aufweist. Dieser Kennlinienverlauf bedingt in einem bestimmten Bereich einen negativen Innenwiderstand. Dieser negative Widerstand erlaubt eine Verwendung der Tunneldiode als aktives Schaltelement in Oszillator- und Verstärkerschaltungen bis in den UHF-Bereich sowie als schnellen Schalter in Digitalschaltungen.

### b. Symbole

Die beiden gebräuchlichsten Symbole für Tunneldioden sind in Bild 30 aufgeführt.

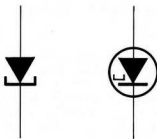


Bild 30

### c. Aufbau

Die Tunneldiode ist eine Flächendiode mit extrem hoher Dotierung der p- und n-Schicht. Diese enthalten etwa 10 000 mal mehr Ladungsträger als die entsprechenden Schichten einer gewöhnlichen Diode.

Die Grenzschicht wird dabei extrem schmal gehalten. Solche sehr schmalen Uebergänge erhält man gerade durch sehr starke Dotierung. Bild 31 zeigt eine Tunnelodiode.



Bild 31

#### d. Prinzipielle Wirkungsweise

Die eigenartige Form der Kennlinie und das Arbeitsverhalten der Tunnelodiode können nicht mit der üblichen Halbleiterttheorie erklärt werden. Das Funktionsprinzip beruht auf dem **Tunneleffekt** - einer Erscheinung, die nur mit Hilfe der Quantentheorie verständlich gemacht werden kann - der der Diode den Namen gab. Wir wollen die komplizierten, unser Vorstellungsvermögen übersteigenden Vorgänge, die sich in der Tunnelodiode abspielen, als Tatsache hinnehmen und uns dem praktischen Einsatz der Diode zuwenden

#### e. Arbeitsverhalten

Die Kennlinie einer Tunnelodiode ist in Bild 32 aufgezeichnet. Die Kurve zeigt nur den interessanten Teil der Kennlinie. Für Spannungen über 400 mV gleicht der Kurvenverlauf demjenigen einer gewöhnlichen Diode. Im Bereich für negative Anoden-Spannungen ( $-U_F$  oder  $U_R$ ) zeigt die Diode keine Sperrwirkung, sie leitet in beiden Stromrichtungen.

#### f. Technische Daten

##### Höckerstrom $I_p$

Der Höckerstrom ist der Stromhöchstwert, der im Arbeitsbereich durchlaufen wird, wenn man die Durchlassspannung von Null aus ansteigen lässt.

##### Talstrom $I_V$

Der Talstrom ist der Diodenstrom im Stromminimum der Durchlasskurve.

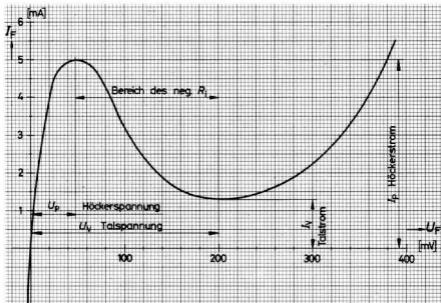


Bild 32

### Höckerspannung $U_p$

Die Höckerspannung ist die Spannung, die zum Höckerstrom der Dioden gehört.

### Talspannung $U_v$

Die Talspannung ist die zum Talstrom gehörende Spannung an der Diode.

### Negativer Widerstand $-R$

Der negative Widerstand ist der Widerstand einer Tunnel diode im steilsten Teil der negativen Kennlinie zwischen dem Höckerstrom  $I_p$  und dem Talstrom  $I_v$ .

Bild 33 erklärt an einem Beispiel die Bestimmung des negativen Widerstandes mit Hilfe einer Tangente im Arbeitspunkt.

$$-\frac{1}{R} = \frac{\Delta I_F}{\Delta U_F}; \quad -R = \frac{\Delta U_F}{\Delta I_F} = \frac{0,092}{3,8 \cdot 10^{-3}} = 24,2 \Omega$$

### Gesamtkapazität $C_D$

Die Gesamtkapazität der Diode setzt sich zusammen aus der Sperrschichtkapazität  $C_j$  und der Gehäusekapazität  $C_G$ .

$$(C_D = C_j + C_G)$$

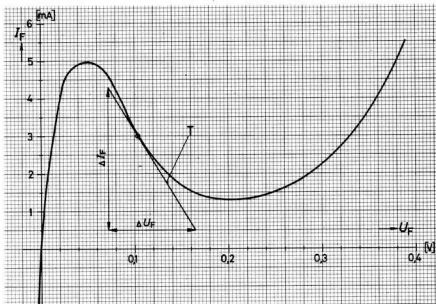


Bild 33

### g. Beispiel

Bild 34 stellt das Schema eines Kleinsenders mit einer Tunneldiode dar.

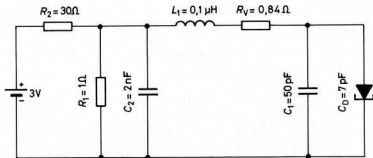


Bild 34

Mit den Widerständen  $R_1$  und  $R_2$  wird der Arbeitspunkt der Diode eingestellt.  $R_1$  muss dabei hochfrequenzmässig mit dem Kondensator  $C_2$  überbrückt werden. Zum Anschwingen muss der negative Widerstand  $-R$  der Diode nun kleiner sein als der Resonanzwiderstand des Kreises  $L_1 - R_V - C_1$ . Der Wert des negativen Widerstandes der Diode, für welchen der Kreis gerade voll entdämpft ist, ist zu bestimmen.

*Vorgehen:*

1. Schritt: Aufstellen der Bedingung:

Für eine Entdämpfung des Kreises muss der negative Widerstand der Diode gleich dem Resonanzwiderstand des Kreises sein, wodurch die Kreisverluste kompensiert werden.

$$-R = Z_0$$

2. Schritt: Aufstellen der Berechnungsformel

- Grundformel anschreiben  $-R = Q \cdot X_L$
- Grundformel für  $Q$  anschreiben  $Q = \frac{\omega L}{R_s} = \frac{1}{\omega C R_s}$  da  $X_L = X_C$
- Formel für  $Q$  in Grundformel einsetzen  $-R = \frac{1}{\omega C \cdot R_s} \cdot \omega L$
- kürzen  $-R = \frac{L}{C \cdot R_s}$
- $[R] = \frac{Vs}{A} \cdot \frac{V}{As} \cdot \frac{A}{V} = \Omega$
- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen  $-R = \frac{1 \cdot 10^{-7}}{57 \cdot 10^{-12} \cdot 1,84}$
- $R = -954 \Omega$

Nimmt der negative Widerstand der Diode kleinere Werte an als  $-954 \Omega$ , so beginnt die Schaltung zu schwingen, da die Dämpfung überkompensiert wird und sich damit in eine Erregung umwandelt. Die Schaltung wirkt dann wie ein Oszillator.

Die negativen Widerstände der gebräuchlichsten Dioden weisen Werte zwischen  $50$  und  $200 \Omega$  auf. Diese Dioden eignen sich deshalb vorzüglich zur Schwingungserzeugung.

Damit sind die Anwendungsmöglichkeiten jedoch noch lange nicht erschöpft. Tunneldioden sind in Computern als schnelle Schalter und Frequenzteiler anzutreffen, in UKW-Empfängern lassen sich die Antennensignale mit Tunneldioden rauscharm verstärken. Auch die Messtechnik nützt die günstigen Eigenschaften der Tunneldioden, indem sich damit Oszillatoren, L-C-Messgeräte und viele andere Schaltungen sehr platzsparend und einfach bauen lassen.



## 8. Spezialdioden

Durch spezielle Fertigungstechniken wurde aus den vorstehend beschriebenen Diodentypen noch eine Vielzahl von Spezialdioden «gezüchtet» die sich für spezifische Verwendungszwecke eignen. Nachstehend seien einige Beispiele hiezu gegeben, wobei die Eigenschaften, Daten und Kennlinien den Datenbüchern zu entnehmen sind.

### a. Metall-Halbleiter-Diode (Hot Carrier Diode)

Wegen ihrer geringen Schaltzeit wird sie hauptsächlich als rauscharmer Mikrowellenmischer und schneller Schalter verwendet.

### b. Speichervariaktoren

Sie werden besonders zur Frequenzvervielfachung eingesetzt.

### c. Multiple Dioden (Vielfachdioden)

Die integrierte Technik ermöglicht es, mehrere Diodensysteme mit gleichwertigen elektronischen Eigenschaften auf kleinster Fläche aufzubauen.

### d. Fotodioden

Fotoelektrische Bauteile finden in der modernen Elektronik immer mehr Verwendung. Anwendungsgebiete sind: Lichtschranken zu Produktionskontrollen, als Schutzvorrichtungen, als Lochstreifen-Abtastung usw.

### e. pin-Diode

Sie eignet sich zur Amplitudenmodulation im Mikrowellengebiet.

### f. Backwarddioden

Backwarddioden sind Tunneldioden, deren Höckerstrom  $I_p$  praktisch genauso gross ist wie der Talstrom  $I_v$ . Diese Dioden können als Gleichrichter, Detektordioden oder als Mischer eingesetzt werden.

### g. Feldeffektdiode (Curristor)

Bei der Feldeffektdiode steigt der Strom bei kleiner Spannung stark an. Bei höherer Spannung bleibt der Strom konstant unabhängig von der angelegten Spannung. Die Feldeffektdiode ist somit als «Konstantstromquelle» verwendbar.

### h. Vierschichtdiode

Sie findet Anwendung in Sägezahngeneratoren.

### i. Triggerdiode (Diac)

Sie eignet sich zur Impulserzeugung, insbesondere zum Zünden von Thyristoren.

## **k. Schottkydiode**

Sie ist besonders geeignet für Mischstufen bis an den UHF-Bereich, für hochwertige Modulatoren und Demulatoren und für extrem schnelle Schaltanwendungen.

## **l. Boosterdiode**

Sie ist besonders für Zeilenendstufen in Fernsehgeräten entwickelt worden.

## **9. Das Wesentliche**

Germanium und Silizium sind die Bausteine für die gebräuchlichsten Halbleiterdioden. Beide Ausgangsmaterialien gehören zu den Halbleitern.

Die Anzahl Valenzelektronen eines Atomes bestimmt dessen Wertigkeit. Ein n-wertiges Atom geht n-Bindungen ein, es hat n-Valenzelektronen, die sich mit den Valenzelektronen von Nachbaratomen verbinden.

Reines Germanium und Silizium verhalten sich beinahe wie ein Isolator; alle Elektronen sind an den Kern gebunden. Mit zunehmender Erwärmung tritt eine schwache Eigenleitung auf; diese entsteht durch Elektronen, die sich unter dem Einfluss der Temperatur vom Atom lösen.

Um die Leitfähigkeit des vierwertigen Halbleitermaterials zu erhöhen, werden Störatome eingebaut. Beim Einbau von fünf-wertigen Störatomen findet ein Valenzelektron des Fremdatoms keinen Bindungspartner. Es ist überflüssig und steht als frei beweglicher Ladungsträger zur Stromleitung zur Verfügung. Da ein negativer Ladungsträger – das Elektron – die Stromleitung verursacht, wird der Vorgang n-Leitung genannt. Werden an Stelle der fünfwertigen Atome dreiwertige eingebaut, entsteht eine Bindungslücke, es fehlt ein Valenzelektron. Diese Fehlstelle – Loch oder Defektelektron – verhält sich im Kristall wie eine bewegliche positive Elementarladung. Die durch Löcher verursachte Leitfähigkeit heisst p-Leitung.

Die Halbleiterdiode besteht aus n- und p-Material. Für das Arbeitsverhalten ist die Grenzschicht verantwortlich. Liegt der positive Pol einer äusseren Spannungsquelle am n-Material und der negative Pol am p-Material, so werden die freien Ladungsträger aus der Grenzschicht abgezogen, die Diode sperrt. Wird nun die Polung der Spannungsquelle vertauscht, so werden die Elektronen und die Löcher in die Grenzschicht hineingepresst; diese wird mit freien Ladungsträger überschwemmt, die Diode leitet.

Es wird vorallem unterschieden zwischen Halbleiterspitzendioden und Flächendioden. Die Spitzendiode ist infolge ihrer geringen Eigenkapazität besonders für Hochfrequenzanwendungen geeignet. Die Flächendiode dagegen ist mehr für grössere Ströme bei tieferen Frequenzen verwendbar.

Dioden sind keine idealen Ventile; in Sperrichtung fliesst immer ein kleiner Sperrstrom, welcher in Siliziumdioden bedeutend kleiner ist als in Germaniumdioden. Diodenkennlinien sind temperaturabhängig. Der Einfluss der Temperatur auf das Arbeitsverhalten ist bei den Siliziumdioden geringer als bei den Germanium-

dioden. Siliziumdioden lassen sich auch bei höheren Temperaturen betreiben als solche aus Germanium.

Die Grenzdaten von Halbleitern dürfen nicht überschritten werden, da dies zur Zerstörung dieser Bauelemente führen würde.

Zenerdioden eignen sich, in Sperrichtung betrieben, als Referenzspannungsquellen. Sobald die Sperrspannung den Wert der Zenerspannung erreicht, wird die Diode in Sperrichtung leitend. Dabei bleibt die Spannung über der Diode weitgehend konstant.

Kapazitätsvariationsdioden werden in Sperrichtung betrieben, wobei die Eigenkapazität der Diode von der angelegten Sperrspannung abhängt.

Die Tunneldiode weist eine N-förmige Kennlinie auf. Im Bereich der fallenden Kennlinie wirkt sie wie ein negativer Widerstand.

## 10. Repetitionsaufgaben (Lösung Seite 440 )

- a) Was ist ein Valenzelektron?
- b) Was verstehen Sie unter Eigenleitfähigkeit?
- c) Definieren Sie den Begriff «Defektelektron».
- d) Was ist ein Störatom?
- e) Erklären Sie die Störstellenleitung im Halbleiter.
- f) Was sind Majoritätsträger?
- g) Wo sind im Halbleiter Minoritätsträger anzutreffen?
- h) Erklären Sie mit wenigen Worten die Vorgänge in der Sperrschicht, wenn diese in Sperrichtung vorgespannt ist.
- i) Erklären Sie das Verhalten der Sperrschicht, wenn diese in Durchlassrichtung gepolt ist.
- k) Welches ist der Unterschied in bezug auf die Anwendungsmöglichkeiten zwischen einer Spitzendiode und einer Flächendiode.
- l) Skizzieren Sie die Durchlasskennlinien für eine Germanium- und Siliziumdiode und erklären Sie den Unterschied zwischen den beiden Kennlinienverläufen.
- m) Welche Vorteile weist die Siliziumdiode gegenüber der Germaniumdiode auf?
- n) Auf was muss beim Betrieb von Halbleitern besonders geachtet werden?
- o) Wie funktioniert eine Zenerdiode?
- p) Welches ist das Hauptanwendungsgebiet der Zenerdiode?
- q) Welches sind die spezifischen Eigenschaften von Kapazitätsvariationsdioden?
- r) Skizzieren Sie die  $I_F$ - $U_F$ -Kennlinie einer Tunneldiode.
- s) Erklären Sie stichwortartig die Funktionsweise eines Oszillators mit einer Tunneldiode.

# II. Der Transistor

## 1. Einführung

Wohl keine Erfindung des zwanzigsten Jahrhunderts – die künstliche Atomspaltung ausgenommen – hat für die Wissenschaft, die Technik und die Wirtschaft so grosse Bedeutung erlangt wie die Entdeckung des Transistors. Täglich kommen neue Geräte auf den Markt, in denen Röhren durch Transistoren ersetzt wurden. Es gibt bald keine Haushaltung mehr, in welcher nicht irgend ein Apparat mit Transistoren in Betrieb ist, sei es ein Radio- oder Fernsehempfänger, ein Niederfrequenzverstärker oder ein Magnetbandgerät. Der Transistor scheint vor nichts Halt zu machen; wir treffen ihn in modernen Fotoapparaten als Verstärker zum Antrieb der automatischen Blendenwahl, in Blitzlichtgeräten hilft er die notwendige Hochspannung zu erzeugen, in Automobilen finden wir ihn in der elektronisch überwachten und gesteuerten Benzineinspritzvorrichtung, der Schwerhörige trägt eine kaum sichtbare transistorbestückte Höranlage, die Uhrenindustrie baut elektronische Uhren mit Transistoren, die elektronischen Datenverarbeitung hätte ohne den Transistor nie eine so steile Entwicklung erlebt, Militärfunkgeräte werden dank Transistoren kleiner, leichter und betriebssicherer. Diese Aufzählung der Anwendungsgebiete des Transistors liesse sich noch beliebig erweitern.

Der Transistor verdankt seinen Siegeszug folgenden Eigenschaften, die gegenüber der Röhre grosse Vorteile bieten:

- Er benötigt keine Heizleistung,
- seine Kleinheit und der geringe Platzbedarf erlauben den Bau leichter, raumsparender Schaltungen,
- er ist praktisch keinem Verschleiss unterworfen und hat somit eine lange Lebensdauer.

Zweifelsohne wird die Bedeutung des Transistors in Zukunft noch zunehmen. Mit der wachsenden Verfeinerung der Fertigungstechnik werden dem Transistor immer neue Anwendungsgebiete erschlossen. Integrierte Schaltungen sind schon häufig in der Unterhaltungselektronik anzutreffen. Sie ermöglichen den Bau billiger und zuverlässiger elektronischer Apparate. Die Röhre wird vom Halbleiter zusehends verdrängt. Ihr Einsatz wird sich immer mehr auf Spezialgebiete beschränken. Wenn man bedenkt, dass 1958 in Amerika 47 Millionen Transistoren gefertigt wurden, und dass diese Produktionsziffer bis 1966 auf jährlich 387 Millionen Stück angewachsen ist, so muss man von einer Eroberung der Elektronik durch den Transistor sprechen. Der weitere Verlauf der Halbleiterentwicklung kann nur geschätzt, nicht aber mit Gewissheit vorausgesagt werden.

## 2. Was wissen Sie schon über Transistoren? (Lösung Seite 443)

- Lassen sich mit dem Transistor Signale verstärken?
- Der Transistor wird oft mit der Triode verglichen. Dieser Vergleich ist nur bedingt richtig. Welches sind die grundsätzlichen Unterschiede zwischen Triode und Transistor in bezug auf die technischen Daten?

- c) Nennen Sie die drei Elektroden des Transistors.
- d) Was verstehen Sie unter einem pnp-Transistor?
- e) Was sagt Ihnen der Ausdruck «Stromverstärkung»?
- f) Was ist beim Einsatz von Leistungstransistoren besonders kritisch?
- g) Was muss bei der Hintereinanderschaltung von Transistoren in Verstärkern besonders beachtet werden?
- h) Welche unangenehme Eigenschaft hat der Transistor mit der Halbleiterdiode gemeinsam?
- i) Was ist ein Feldeffekttransistor?

### 3. Das Transistorprinzip

Die Funktionsweise der meisten Transistoren kann immer aus dem Transistorprinzip abgeleitet werden. Wir wollen uns deshalb mit der grundsätzlichen Wirkungsweise des Transistors auseinandersetzen, bevor wir uns den verschiedenen Transistorarten zuwenden. Wir beschränken uns dabei auf den heute gebräuchlichen **Flächentransistor**.

Der Flächentransistor weist drei sich abwechselnde p- und n-Schichten auf. Die Folge der drei Schichten bestimmt, ob es sich um einen pnp- oder einen npn-Transistor handelt. Beim pnp-Transistor haben wir eine n-Schicht, welche von zwei p-Schichten eingerahmt ist, beim npn-Transistor verhält es sich gerade umgekehrt.

Bild 35 zeigt schematisch den Aufbau eines pnp-Flächentransistors.

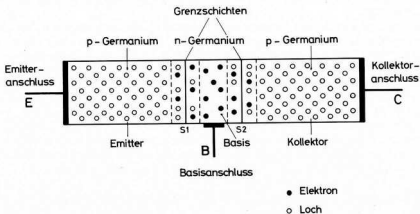


Bild 35

Für die Benennung der Schichten haben sich folgende Bezeichnungen eingeführt: Die mittlere, nur wenige  $\mu$  breite Schicht heisst **Basis**, die linke Schicht wird **Emitter**, die rechte **Kollektor** genannt. Im Raum der pn-Übergänge bilden sich die von der Halbleiterdiode her bekannten Sperrschichten  $s_1$  und  $s_2$ . Der folgende Versuch wird das Verhalten des Transistors zeigen. Zu diesem Zweck wird eine Schaltung nach Bild 36 aufgebaut.

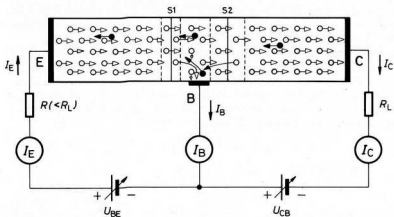


Bild 36

Zuerst legen wir mit der Spannungsquelle  $U_{CB}$  eine Sperrspannung an die Sperrschicht  $s_2$ , der Kollektor wird mit dem Minuspol, die Basis mit dem Pluspol der Batterie verbunden. Über die Sperrschicht  $s_2$  fliesst nur der durch die Minoritätsträger verursachte Sperrstrom. Die Strecke Basis-Kollektor wirkt wie eine gesperrte Diode. Wenn wir jetzt gleichzeitig die Strecke Emitter-Basis in Durchlassrichtung betreiben, indem wir den Pluspol der Spannungsquelle  $U_{BE}$  an den Emitter und den Minuspol an die Basis legen, beginnt im Kollektorkreis – trotz der Vorspannung in Sperrrichtung – der Kollektorstrom  $I_C$  zu fließen. Diese Erscheinung lässt sich wie folgt erklären:

Die Strecke Emitter-Basis ist in Durchlassrichtung vorgespannt; es fließen demzufolge unter dem Einfluss der angelegten Spannung Löcher vom Emitter zur Basis und Elektronen von der Basis zum Emitter. Der Anteil der Elektronen am Gesamtstrom ist gering, da die Basis bedeutend schwächer mit Elektronen dotiert ist als der Emitter mit Löchern. Da nun die Basisschicht sehr dünn ist – eini-

ge  $\mu$ -rekombinieren nur wenige Löcher mit den in der Basis vorhandenen Elektronen. Der weitaus grösste Teil der Löcher diffundiert in die Sperrschicht  $s_2$  und gelangt dort unter den Einfluss der negativen Kollektorspannung. Die Löcher werden im Kollektor abgesogen. Im Kollektor rekombinieren die Löcher mit den Elektronen, welche über den Kollektoranschluss von der Batterie her dem Transistor zugeführt werden. Der Löcherstrom wandelt sich demzufolge am Ende des Kollektors in einen gleich starken Elektronenstrom um. Damit ein möglichst grosser Anteil des vom Emitter emittierten Löcherstromes zum Kollektor gelangen kann, ist die Basis sehr dünn ausgeführt und nur schwach mit Elektronen dotiert. Dadurch wird die Wahrscheinlichkeit, dass Löcher mit Elektronen rekombinieren, gering gehalten. 95% bis über 99% aller Löcher, die den Emitter verlassen, gelangen zum Kollektor. Im Basiskreis erscheint die Differenz von 5% bis weniger als 1% des Emitterstromes als Basisstrom.

Da die Basis in der besprochenen Schaltung die gemeinsame Elektrode für den Eingangskreis – Emitterkreis – und den Ausgangskreis – Kollektorkreis – darstellt, nennt man sie **Basisschaltung**. Wir stellen fest, dass der Transistor in der Basisschaltung keine Stromverstärkung aufweist. Der Ausgangsstrom = Kollektorstrom ist um den Basisstrom kleiner als der Eingangsstrom = Emitterstrom; für das Verhältnis der Ströme gilt daher:

$$I_C = I_E - I_B$$

Der Transistor wirkt in Basisschaltung betrieben dennoch als Verstärker; er ist in der Lage Spannungen und Leistungen zu verstärken. Der Grund hierzu liegt im grossen wertmässigen Unterschied zwischen Eingangs- und Ausgangswiderstand. Da die Emitter-Basisstrecke in Durchlassrichtung betrieben wird, ist der Eingangswiderstand sehr klein, er liegt in der Grössenordnung von weniger als hundert Ohm. Die Kollektor-Basisstrecke dagegen wird in Sperrichtung betrieben, wodurch sich ein Ausgangswiderstand von einigen hundert Kiloohm ergibt. Eine kleine Änderung der Spannung zwischen Emitter und Basis bewirkt eine relativ grosse Änderung des Emitterstromes, was eine beinahe ebenso grosse Änderung des Kollektorstromes zur Folge hat. Diese Kollektorstromänderung bewirkt am Widerstand  $R_L$  eine Spannungsänderung. Dieser Belastungswiderstand  $R_L$  kann infolge des hohen Widerstandes der Kollektor-Basisstrecke recht gross gewählt werden, was bedeutet, dass die Kollektorspannungsänderung einige hundert mal grösser wird als die Eingangsspannungsänderung. Die Spannungsverstärkung wird in der Basisschaltung recht hohe Werte annehmen. Da der Eingangsstrom und der Ausgangsstrom beinahe gleich gross sind, entspricht die Leistungsverstärkung ungefähr der Spannungsverstärkung.

Bild 37 hält die Stromverhältnisse im pnp-Flächentransistor fest.

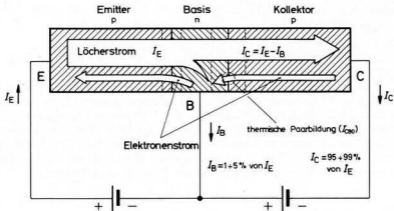


Bild 37

## 4. Der Flächentransistor

### a. Definition

Der Flächentransistor ist ein verstärkendes aktives Halbleiterbauelement mit drei Elektroden. Diese Elektroden werden mit Emittor, Basis und Kollektor bezeichnet. Seine pn-Übergänge sind flächenförmig angeordnet.

### b. Symbole

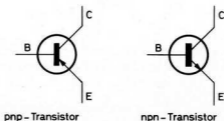


Bild 38



### c. Aufbau

Wir unterscheiden drei Gruppen von Flächentransistoren:

- Legierungstransistoren
- Gezogene Transistoren
- Diffusionstransistoren

Beim **Legierungstransistor** werden Kollektor und Emitter in ein kleines Scheibchen n- oder p-Material einlegiert. Beim pnp-Legierungstransistor werden zu diesem Zweck zwei Tropfen Indium beidseitig des Germaniumscheibchens angebracht und auf einige hundert Grad erwärmt. Die Indiumperlen schmelzen nun in das Scheibchen ein. Nach dem Abkühlen bilden sich zwischen den Indiumperlen und dem n-Germanium p-Germaniumschichten. Diese p-Zonen bilden Emitter und Kollektor. Bild 39 zeigt den Aufbau eines Legierungstransistors.

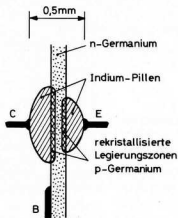


Bild 39

Legierungstransistoren werden hauptsächlich für Niederfrequenzanwendungen gebaut, da die relativ dicke Basisschicht die Betriebsfrequenz nach oben stark beschränkt.

Der **gezogene Transistor** besteht aus einem einzigen Kristallblock. Ein spezielles Fabrikationsverfahren erlaubt das Ziehen von Kristallen, wobei Kristallbarren mit verschiedener Dotierung entstehen. Diese Kristallbarren werden in kleine Stücke zersägt, die das Ausgangsmaterial für den gezogenen Transistor bilden. Bild 40 zeigt den prinzipiellen Aufbau eines gezogenen Transistors.

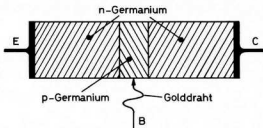


Bild 40

Die Basis wird über einen feinen Golddraht angeschlossen. Auch der gezogene Transistor wird weitgehend in Niederfrequenzschaltungen eingesetzt.

Beim **Diffusionstransistor** wirken die Dotierungsstoffe bei hoher Temperatur auf den Kristall ein. Es wird zwischen verschiedenen Arten von Diffusionstransistoren unterschieden. Beim **Mesa-Transistor** besteht der Kollektor aus einem p-dotierten Halbleiterblock. Auf diesen wird im Diffusionsverfahren eine dünne n-Schicht aufdiffundiert. Mit Hilfe einer Maske werden Gold und Aluminiumplättchen aufgedampft. Der Goldstreifen bildet den Basisanschluss. Unter dem Aluminiumstreifen bildet sich eine dünne p-Schicht, welche als Emitter dient. Bild 41 zeigt den Aufbau eines Mesatransistors im Querschnitt.

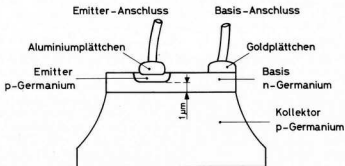


Bild 41

Mesatransistoren eignen sich für Frequenzen bis zu einigen hundert Megahertz.

Beim **Planar-Epitaxialtransistor** wird auf einen hochdotierten p-Kristall eine schwächer dotierte p-Schicht aufdiffundiert. Durch Diffusion werden Basis und Emitter aufgetragen. Bild 42 zeigt den Aufbau eines Planar-Epitaxialtransistors.

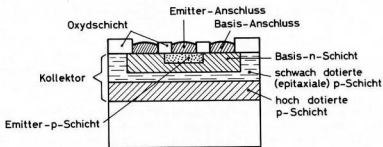


Bild 42

Planar-Epitaxialtransistoren sind dank der schmalen Basisschicht für sehr hohe Frequenzen geeignet.

#### d. Prinzipielle Wirkungsweise

Alle erwähnten Transistortypen funktionieren nach dem Transistorprinzip. Der Kollektorstrom wird durch eine Spannung, welche zwischen Emitter und Basis angelegt wird, gesteuert. Die Steuerung erfolgt nicht leistungslos, da die Emitter-Basisstrecke in Durchlassrichtung betrieben wird und somit einen recht kleinen Widerstand aufweist.

#### e. Arbeitsverhalten

Das Arbeitsverhalten des Transistors wird messtechnisch mit einer Schaltung nach Bild 43 erfasst. Der Versuch gestattet die Aufnahme der Kennlinien des Halbleiters.

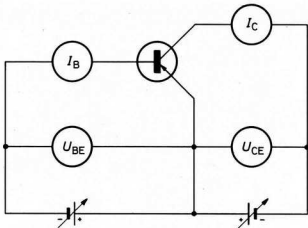


Bild 43

Bild 44 zeigt den Schaltungsaufbau. Die Versuchsschaltung weicht von der Grundsaltung, die wir anlässlich der Besprechung des Transistorprinzips kennen lernten, ab, da der Emittor als gemeinsame Elektrode verwendet wird. Die Schaltung heisst deshalb «Emitterschaltung». Wir erkennen eine gewisse Analogie zur Röhre; der Emittor entspräche der Katode, die Basis dem Steuergitter und der Kollektor der Anode. Wir wollen jedoch davon absehen, Vergleiche zur Röhre zu ziehen, der Transistor soll für uns ein Bauelement sein, das wir von Grund auf verstehen lernen wollen, ohne uns dabei durch unsere Kenntnisse über die Röhren in eine bestimmte Richtung lenken zu lassen. Die Zeit liegt nicht mehr ferne, wo der junge Nachwuchspraktiker im Verlaufe seiner Ausbildung zuerst mit dem Halbleiter Bekanntschaft schliessen wird, während er die Elektronenröhre als Anachronismus noch so nebenbei lernen muss, da man in Spezialfällen ohne sie leider doch nicht auskommen wird.

Der Transistor wird in den meisten Anwendungsfällen in der Emitterschaltung betrieben. Wir legen deshalb unseren Betrachtungen diese Schaltung zugrunde. Mit einer ersten Messreihe wollen wir die **Ausgangskennlinien** des Transistors ermitteln. Uns interessiert die Abhängigkeit des Kollektorstromes von der Kollektorspannung bei konstantem Basisstrom. Für jede Messreihe wird der Wert des Basisstromes beibehalten. Die Kollektorspannung wird schrittweise erhöht, die Messwerte des resultierenden Stromes ergeben die Kennlinien im ersten Quadranten im Bild 45. Die Kennlinienschar ergibt das  $I_C$ - $U_{CE}$ -Diagramm. Bei der

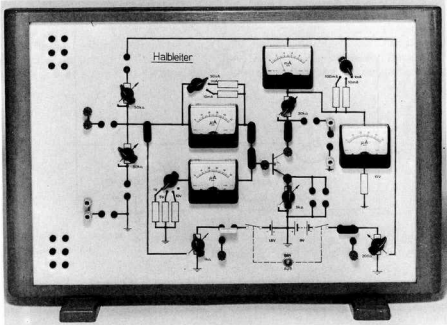


Bild 44

Durchführung der Messung ist zu beachten, dass die maximal zulässige Kollektorverlustleistung nicht überschritten wird.

Die Leistungshyperbel beschränkt das Kennlinienfeld auf die zulässigen Werte. Die Ausgangskennlinien erlauben die Bestimmung des Ausgangswiderstandes des Transistors.

Im weiteren sehen wir, dass nicht genau horizontale Geraden das Kennlinienfeld bestimmen, sondern eine bestimmte Neigung vorhanden ist. Diese Erscheinung heisst **Early-Effekt** und ist darauf zurückzuführen, dass die Basisdicke von der Kollektorspannung abhängig ist, was einen geringen Einfluss auf den Kollektorstrom hat.

**Betrachtung zu  $I_{CBO}$ :** Wir sehen, wenn der Basisstrom  $I_B = 0$  ist, noch immer ein kleiner Rest von Kollektorstrom ( $I_C$ ) fliesst. Dieser Strom wird als sogenannter Reststrom, (oder auch Leckstrom) bezeichnet. Aus dieser Betrachtung sehen wir, dass **der Transistor kein idealer Schalter sein kann.**

Übliche Bezugsrichtungen:



AC 125

$T_{amb} = 25^\circ\text{C}$

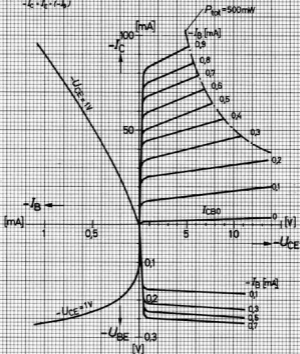


Bild 45

Die nächste Messung soll uns den Zusammenhang zwischen Basisstrom und Kollektorstrom für eine konstante Kollektorspannung zeigen. Diese wird auf ein Volt eingestellt und während der Messung konstant gehalten. Der Basisstrom wird nun schrittweise erhöht und die Zunahme des Kollektorstromes im zweiten Quadranten in Bild 45 eingezeichnet. Die resultierende Kurve gestattet die Bestimmung des Stromverstärkungsfaktors des Transistors. Falls die Ausgangskennlinien vorliegen, kann die **Stromverstärkungskennlinie** auch grafisch ermittelt werden.

Mit Hilfe der nächsten Messung sollen die **Eingangskennlinien** aufgenommen werden. Die Kollektorspannung wird dabei für die ganze Messung auf ein Volt fixiert. Die Basisspannung wird schrittweise erhöht. Zu jedem Spannungswert wird der entsprechende Stromwert abgelesen und im dritten Quadranten des Diagrammes eingezeichnet. Die sich daraus ergebende Kurve erlaubt die Bestimmung des Wechselstromeingangswiderstandes des Transistors.

Die letzte Messung gibt über die Rückwirkung der Kollektorspannung auf die Basisspannung Aufschluss. Der Basisstrom wird dabei konstant gehalten. Verändert man nun die Kollektorspannung, so ändert sich bei konstantem Basisstrom die Basisspannung um einen geringen Betrag. Diese Rückwirkung der Kollektorspannung auf die Basisspannung kommt im vierten Quadranten des Kennlinienbildes durch die schwache Neigung der Kennlinie zum Ausdruck. Die Rückwirkung ist bei vielen Transistoren so gering, dass die Kurven beinahe horizontal verlaufen. Man verzichtet deshalb oft auf eine grafische Darstellung der Spannungsrückwirkung und begnügt sich mit einer Wertangabe in den technischen Daten.

## f. Technische Daten

Die Kennlinien erlauben die grafische Bestimmung der wichtigsten Transistordaten. Man unterscheidet drei Transistorgrundsaltungen. Die Daten weisen für jede Grundsaltung andere Werte auf. Wir befassen uns vorerst mit der Ermittlung der Daten für die gebräuchlichste, die **Emitterschaltung**.

### Kurzschlussstromverstärkung $\beta$ ( $h_{21e}$ , $h_{fe}$ )

Die Kurzschlussstromverstärkung – oft auch Stromverstärkungsfaktor genannt – ist das Verhältnis des Ausgangssignalstromes zum Eingangssignalstrom bei kurzgeschlossenem Ausgang.

$$\beta = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B}$$

Als Formelzeichen für den Stromverstärkungsfaktor werden auch die Symbole  $\beta$ ,  $h_{21e}$  und  $h_{fe}$  verwendet. Die Bezeichnung  $h_{21}$  mit dem Index e hat ihren Ursprung in der **Vierpoldarstellung** des Transistors. e bedeuten immer, dass sich die Werte auf die Emitterschaltung beziehen. Wir werden uns nicht mit der Vierpoldarstellung des Transistors befassen, wir müssen jedoch wissen, dass die rechnerische

Dimensionierung von Schaltungen mit Transistoren immer mit Hilfe der Vierpolgleichungen geschieht. In den Datenblättern sind oft die Vierpolparameter angegeben und der Praktiker muss wissen, was diese Angaben bedeuten. Der Stromverstärkungsfaktor ist eine reine Zahl, er ist dimensionslos. Die Stromverstärkung lässt sich für jeden beliebigen Arbeitspunkt aus der  $I_C$ - $I_B$ -Kennlinie ermitteln. Bild 46 erläutert das grafische Verfahren zur Bestimmung des Stromverstärkungsfaktors im Arbeitspunkt A.

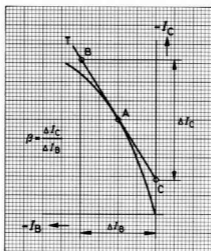


Bild 46

Im Arbeitspunkt A wird die Tangente T an die Kennlinie gelegt. Durch Projektion der Punkte B und C auf die  $I_C$ - und  $I_B$ -Achsen ergeben sich die Werte für  $\Delta I_C$  und  $\Delta I_B$ .

### Ausgangsleitwert ( $h_{22e}$ , $h_{oe}$ )

Der Ausgangsleitwert entspricht dem Verhältnis von Signalstrom zu Signalspannung am Ausgang des Transistors bei offenem Eingang.

$$h_{22e} = \frac{\Delta I_C}{\Delta U_{CE}} \text{ S}$$



Die Masseinheit des Ausgangsleitwertes ist das Siemens.

Der Ausgangsleitwert lässt sich für jeden beliebigen Arbeitspunkt aus dem  $I_C-U_{CE}$ -Kennlinienbild entnehmen. Bild 47 erläutert die grafische Methode zur Bestimmung des Ausgangsleitwertes.

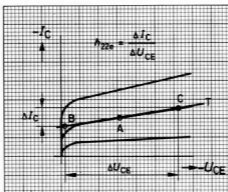


Bild 47

Im Arbeitspunkt A wird die Tangente an die  $I_C-U_{CE}$ -Kennlinie gelegt. Durch Projektion der Punkte B und C auf die  $I_C$ - und  $U_{CE}$ -Achsen ergeben sich die Werte für  $\Delta I_C$  und  $\Delta U_{CE}$ .

### Eingangswiderstand ( $h_{11e}$ , $h_{ie}$ )

Der Eingangswiderstand ist durch das Verhältnis von Eingangsspannung zu Eingangstrom bei kurzgeschlossenem Ausgang gegeben.

$$h_{11e} = \frac{\Delta U_{BE}}{\Delta I_B} \Omega$$

Die Masseinheit ist das Ohm.

Der Eingangswiderstand kann nach Bild 48 grafisch aus dem  $I_B-U_{BE}$ -Kennlinienbild bestimmt werden.

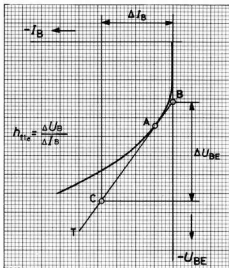


Bild 48

Durch den Arbeitspunkt A wird die Tangente T an die  $I_B$ - $U_{BE}$ -Kennlinie gelegt. Die Werte für  $\Delta I_B$  und  $\Delta U_{BE}$  werden wiederum mittels Projektion der Punkte B und C bestimmt.

### Spannungsrückwirkung ( $h_{12e}$ , $h_{re}$ )

Die Spannungsrückwirkung charakterisiert die Rückwirkung der Ausgangsspannung auf die Eingangsspannung bei offenem Eingang. Sie ist gegeben durch das Verhältnis von Basisspannungsänderung zu Kollektorspannungsänderung.

$$h_{12e} = \frac{\Delta U_{BE}}{\Delta U_{CE}}$$

Die Spannungsrückwirkung ist eine reine Zahl, sie ist dimensionslos. Bild 49 zeigt wie die Spannungsrückwirkung grafisch ermittelt wird.

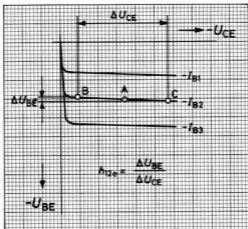


Bild 49

Die Projektion der Punkte B und C ergibt auf der  $U_{BE}$ - und  $U_{CE}$ -Achse Werte für die Bestimmungsgleichung.

Alle grafisch ermittelten Werte gelten streng genommen nur im gewählten Arbeitspunkt. Sie sind auch ausreichend genau, wenn der Transistor nur kleine Signale zu verarbeiten hat. Wird er jedoch mit grösseren Signalen betrieben, so stimmen die Werte infolge der Kennlinienkrümmung nicht mehr. Besonders der Eingangswiderstand ist stark von der Lage des Arbeitspunktes und der Aussteuerung abhängig.

Der nichtlineare Verlauf der meisten Transistorkennlinien lässt auf ein nichtlineares Verhalten des Transistors als Verstärker schliessen. Wir werden später sehen, wie diese Kennlinienkrümmung weitgehend unwirksam gemacht werden kann.

### g. Beispiel

Aus den Kennlinien des Transistors AC 125 sollen die Daten für den Arbeitspunkt  $-U_{CE} = 5V$  und  $-I_B = 0,3 \text{ mA}$  ermittelt werden.

# AC 125

$T_{amb} = 25^{\circ}\text{C}$

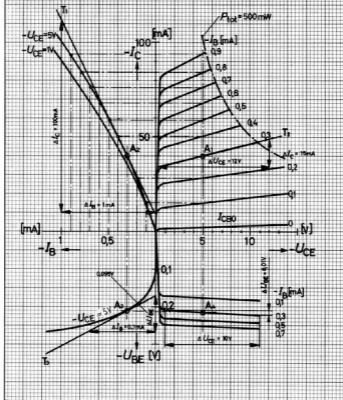


Bild 50

### Vorgehen:

#### 1. Schritt: Ergänzen der Kennlinien

Die  $I_C$ - $I_B$ -Kennlinien liegen nur für einen Parameter von  $-U_{CE} = 1\text{ V}$  vor. Die beiden Kennlinien müssen grafisch mit einem Parameter für  $-U_{CE} = 5\text{ V}$  ergänzt werden. Zu diesem Zweck wird durch die Punkte A1 und A4 eine Senkrechte gezogen. Im  $I_C$ - $I_B$ -Kennlinienfeld ergibt sich die gesuchte Kennlinie aus den Schnittpunkten der horizontalen  $-I_B$ -Projektionslinien mit den vertikalen  $I_B$ -Projektionslinien. Im  $U_{BE}$ - $I_B$ -Kennlinienbild wird die  $-U_{CE}$ -5V-Kurve durch Projektion der Schnittpunkte der  $-I_B$ -Parameter mit der Geraden A1–A4 in horizontaler Richtung und durch Projektion der entsprechenden  $-I_B$ -Werte in vertikaler Richtung bestimmt. Die Schnittpunkte der beiden Projektionsgeraden liegen auf der gesuchten Kurve.

#### 2. Schritt: Bestimmen der Kurzschlussstromverstärkung $h_{21e}$

- Konstruktion der Tangente T1 durch den Arbeitspunkt A2 an die  $I_C$ - $I_B$ -Kennlinie.
- Bestimmen der Verstärkung aus der Neigung der Tangente

$$h_{21e} = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} \quad \frac{\text{mA}}{\text{mA}}$$

$$h_{21e} = \frac{100}{1}$$

$$h_{21e} = \mathbf{100}$$

#### 3. Schritt: Bestimmen des Ausgangsleitwertes $h_{22e}$

- Tangente T2 durch den Arbeitspunkt A1 an die  $I_C$ - $U_{CE}$ -Kennlinie legen.
- Bestimmung des Ausgangsleitwertes aus der Neigung der Tangente

$$h_{22e} = \frac{\Delta I_C}{\Delta U_C} \quad \frac{\text{A}}{\text{V}}$$

$$h_{22e} = \frac{15 \cdot 10^{-3}}{12} \quad \frac{\text{A}}{\text{V}}$$

$$h_{22e} = \mathbf{1,25 \cdot 10^{-3} \text{ S}}$$

#### 4. Schritt: Bestimmen des Eingangswiderstandes $h_{11e}$

- Tangente T3 durch den Arbeitspunkt A3 an die  $U_{BE}$ - $I_B$ -Kennlinie legen
- Berechnung des Eingangswiderstandes aus der Neigung der Tangente

$$h_{11e} = \frac{\Delta U_{BE}}{\Delta I_B} \quad \frac{\text{V}}{\text{A}}$$

$$h_{11e} = \frac{95 \cdot 10^{-3}}{0,7 \cdot 10^{-3}} \quad \frac{\text{V}}{\text{A}}$$

$$h_{11e} = \mathbf{135,7 \Omega}$$

5. Schritt: Bestimmen der Spannungsrückwirkung  $h_{12e}$
- Steilheit der Kennlinie  $I_B = 0,3 \text{ mA}$  bestimmen.
  - Berechnen der Spannungsrückwirkung aus der Neigung der Kennlinie

$$h_{12e} = \frac{\Delta U_{BE}}{\Delta U_{CE}} \quad \frac{\text{V}}{\text{V}}$$

$$h_{12e} = \frac{0,01}{10}$$

$$h_{12e} = 1 \cdot 10^{-3}$$

## 5. Der Feldeffekttransistor (Fet)

### a. Definition

Der Feldeffekttransistor ist ein Transistor mit sehr hohem Eingangswiderstand. Die Steuerung des Stromes im Transistor erfolgt über ein elektrisches Feld, wodurch das Arbeitsverhalten des Transistors eine grosse Ähnlichkeit mit demjenigen der Röhre erhält.

### b. Symbole



Sperrschicht-Feldeffekttransistor



Oberflächen-Feldeffekttransistor (Mosfet)

### c. Aufbau

Der **Sperrschichtfeldeffekttransistor** wird in np- und pn-Ausführung hergestellt. Bild 52 stellt zwei ähnlich aufgebaute Sperrschichtfeldeffekttransistoren vor.

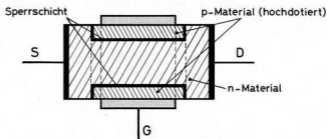
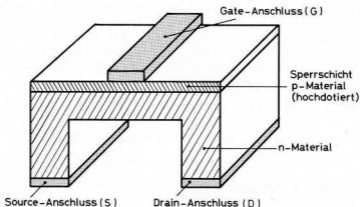


Bild 52

Grundsätzlich besteht der Sperrschichtfeldeffekttransistor aus einem Block aus Halbleitermaterial. Dieser Block weist an seinen Enden die Anschlüsse für Source und Drain auf. Das Gatematerial weist eine sehr hohe Dotierung auf. Zwischen Gate und Halbleiterblock entsteht eine Grenzschicht mit den bekannten Eigenschaften.

Der **Oberflächenfeldeffekttransistor (Mofet)** ist im Prinzip nach Bild 53 aufgebaut.

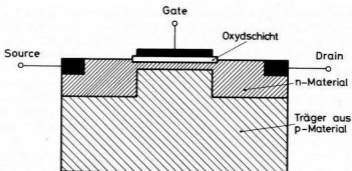


Bild 53

Im Unterschied zum Sperrschichtfeldeffekttransistor ist beim Oberflächenfeldeffekttransistor das Gate durch eine äusserst dünne Oxydschicht vom Halbleiterblock isoliert, es besteht somit zwischen dem Halbleitermaterial und dem Gate keine Sperrschicht.

Es sei noch erwähnt, dass es unter der Kategorie Mosfet auch **selbstsperrende Fets** (Enhancement-Mosfets) gibt, deren Eigenschaft darin besteht, dass sie bei der Spannung  $U_{GS} = 0$  sperren. Auf die Technologie soll hier nicht weiter eingegangen werden. Die notwendigen Angaben und Kennlinien können aus den Datenbüchern entnommen werden.

#### d. Prinzipielle Wirkungsweise

Die Wirkungsweise des Sperrschichtfeldeffekttransistors geht aus Bild 54 hervor.

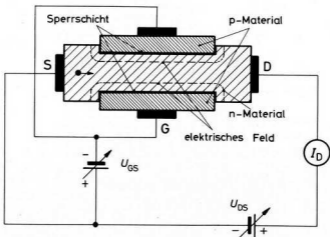


Bild 54



Das hochdotierte p-Material erzeugt im n-Material eine Raumladung, die tief in dieses hineinreicht. Wird nun die aus p-Material bestehende Elektrode – **Gate** genannt – gegenüber der linken Elektrode, welche den Namen **Source** trägt, negativ vorgespannt, so werden die Elektronen gegen die Mitte des n-Materials abgedrängt. Der Spannungsunterschied zwischen Source und der rechten Elektrode mit dem Namen **Drain** bewirkt im Kristall einen Elektronenfluss von Source zu Drain. Je grösser nun die negative Spannung am Gate ist, desto kleiner wird der Querschnitt im Kristall, der für die Leitung des Elektronenstromes verfügbar ist, da infolge des elektrischen Feldes die Elektronen stark zur Kristallmitte gedrängt werden. Daraus folgt, dass der Elektronenstrom im Kristall durch die Spannung am Gate gesteuert werden kann. Der Vorgang hat eine gewisse Ähnlichkeit mit der Steuerung des Katodenstromes in einer Elektronenröhre. Der Eingangswiderstand des Sperrschichtfeldeffekttransistors zwischen Source und Gate wird sehr hochohmig, da die Sperrschicht in Sperrrichtung vorgespannt ist. Die Benennung der Elektroden stammt aus dem Englischen. Sie hat sich im deutschen Sprachgebrauch eingebürgert. Gate heisst soviel wie Tor, Source bedeutet Quelle und Drain kann mit Abfluss übersetzt werden. Die Bezeichnung der Elektroden ist logisch; von der Quelle fließen die Ladungsträger durch das Tor, welches eine Steuerwirkung ausübt, zum Abfluss.

Bild 55 zeigt die Wirkungsweise des Oberflächenfeldeffekttransistors (Mosfet)

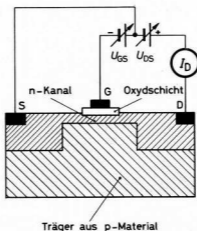


Bild 55

Die Spannung am Gate beeinflusst die Leitfähigkeit des schmalen n-Kanals. Wird die Gatespannung negativer, so drängt das elektrische Feld im n-Kanal die Elektronen des Stromes zur Kanalmitte, der Drainstrom sinkt. Bei positiver Gatespannung wird der nutzbare Querschnitt im n-Kanal grösser, der Drainstrom steigt. Da das Gate durch eine Oxydschicht von den anderen Elektroden isoliert ist, fliesst zwischen Gate und Source lediglich der Isolationsstrom ( $< 10 \text{ pA}$ ), welcher so klein ist, dass sich Eingangswiderstände von einigen hundert Megohm ergeben ( $> 10^8 \Omega$ ).

### e. Arbeitsverhalten

Bild 56 zeigt die Messschaltung, wie sie zur Aufnahme der Kennlinien eines Sperrschichtfeldeffekttransistors Verwendung findet. Die Gatespannung darf wie bei Röhren nur negativ sein, da bei positiver Vorspannung die Sperrschicht leitend würde. Die Kennlinien ähneln denjenigen einer Pentode. Bild 57 zeigt die Kennlinien eines Sperrschichtfeldeffekttransistors.

Eine charakteristische Grösse der Eingangskennlinie ist die Schwellspannung  $U_P$ . Wird sie überschritten, sinkt der Drainstrom auf einen sehr kleinen Reststrom im nA-Gebiet ab. Oberhalb von  $U_{GS} = U_P$  steigt der Drainstrom.

$I_{DS}$  ist der Drainstrom bei der Gate-Source-Spannung  $U_{GS} = 0$ . Zwischen der Kniespannung  $U_K$  und der Schwellspannung  $U_P$  besteht nachstehender Zusammenhang:  $U_K = U_{GS} - U_P$ .

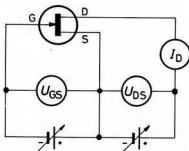
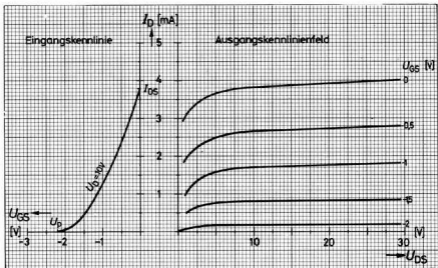


Bild 56



Kennlinien eines Sperrschicht-Feldeffekttransistors

Bild 57

Die Kennlinien des Oberflächenfeldeffekttransistors werden mit einer Schaltung nach Bild 58 aufgenommen.

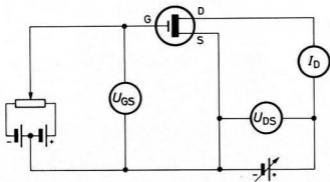


Bild 58

Die Spannung am Gate kann sowohl positive wie auch negative Werte annehmen, da dieses von den übrigen Elektroden isoliert ist. Die Ausgangskennlinien des Oberflächenfeldeffekttransistors weisen ebenfalls Pentodencharakter f. Die Eingangskennlinien lassen deutlich erkennen, dass die Gatespannung negative und positive Werte aufweisen darf. Der Vorteil liegt darin, dass das Gate keine Vorspannung benötigt, es darf direkt mit einem Wechselspannungssignal angesteuert werden.

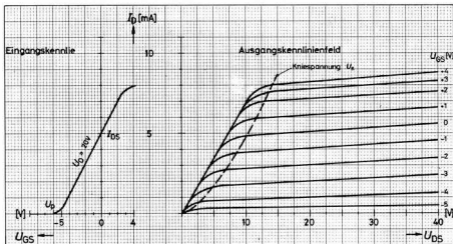


Bild 59

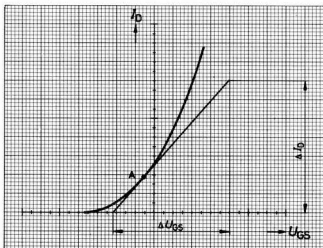
Kennlinien eines Oberflächen-Feldeffekttransistors

## f. Technische Daten

Die Daten der Feldeffekttransistoren können aus den Kennlinien ermittelt werden. An Feldeffekttransistoren interessieren vor allem die Steilheit und der Innenwiderstand für einen Arbeitspunkt. Beide Werte werden nach denselben Methoden ermittelt, wie sie uns von der Röhrentechnik her bekannt sind.

### Steilheit $S$

Die Steilheit ist ein Mass für die Steuerwirkung des Gates auf den Drainstrom. Sie entspricht der Steilheit der Tangente im Arbeitspunkt der  $I_D-U_{GS}$ -Kennlinie



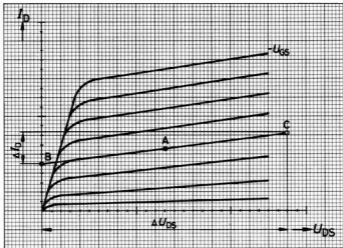
$$S = \frac{\Delta I_D}{\Delta U_{GS}} \text{ mA/V}$$

Bild 60

Die Masseinheit für die Steilheit ist das mA/V

### Innenwiderstand $R_i$

Der Innenwiderstand ist der Wechselstromwiderstand des Transistors. Er lässt sich nach Bild 61 grafisch aus dem  $I_D-U_{DS}$ -Kennlinienbild ermitteln, indem man im Arbeitspunkt an die  $I_D-U_{DS}$ -Kennlinie die Tangente legt.



$$R_i = \frac{\Delta U_{DS}}{\Delta I_D} \text{ k}\Omega$$

$U_{GS} = \text{konstant}$

Bild 61

Die Masseinheit für den Innenwiderstand ist das Kiloohm ( $\text{k}\Omega$ ).  
 Mit diesen Daten ist das Arbeitsverhalten des Feldeffekttransistors weitgehend beschrieben. Die Angabe von Steilheit und Innenwiderstand sowie der Grenzdaten genügt in den meisten Fällen für die Dimensionierung einer Schaltung.

### g. Beispiel

Aus den Kennlinien des Sperrschichtfeldeffekttransistors nach Bild 57 sind Steilheit und Innenwiderstand für den Arbeitspunkt  $U_{GS} = -1 \text{ V}$  und  $U_D = 10 \text{ V}$  zu bestimmen (Bild 62).

*Vorgehen:*

1. Schritt: Festlegen des Arbeitspunktes
  - Der Arbeitspunkt wird im  $I_D - U_{GS}$ -Diagramm und im  $I_D - U_{DS}$ -Diagramm eingetragen.

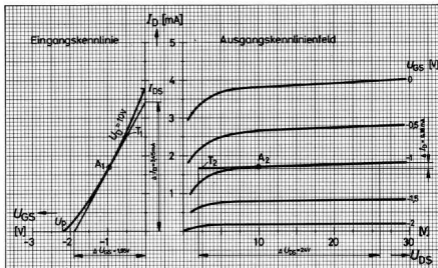


Bild 62

## 2. Schritt: Bestimmen der Steilheit

- Tangente T1 an die Kennlinie durch den Arbeitspunkt A1 ziehen.
- Steilheit aus der Neigung der Tangente T1 bestimmen

$$S = \frac{\Delta I_D}{\Delta U_{GS}} \cdot \frac{\text{mA}}{\text{V}}$$

$$S = \frac{3,45}{1,95}$$

$$S = 1,77 \text{ mA/V}$$

## Bestimmen des Innenwiderstandes

- Tangente T2 an die Kennlinie durch den Arbeitspunkt A2 legen
- Bestimmen des Innenwiderstandes aus der Neigung der Tangente T2

$$R_i = \frac{\Delta U_{DS}}{\Delta I_D} \cdot \frac{\text{V}}{\text{A}} = \Omega$$

$$R_i = \frac{24}{0,18 \cdot 10^{-3}}$$

$$R_i = 133,3 \text{ k}\Omega$$

## 6. Der Unijunction-Transistor

### a. Definition

Der Unijunction-Transistor – im deutschen Sprachgebrauch oft auch als **Doppelbasistransistor** bezeichnet – ist ein Halbleiterbauelement mit negativem differentiellen Widerstand, das sich besonders für Kippschaltungen eignet.

### b. Symbol

Wie Bild 63 zeigt, weist der Doppelbasistransistor zwei Basisanschlüsse und einen Emittor auf.

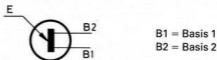


Bild 63

### c. Aufbau

Der Doppelbasistransistor ist kein Transistor im eigentlichen Sinne des Wortes. Er besteht aus einem n-dotierten Siliziumstab mit zwei sperrschichtfreien ohmschen Endkontakten und einem Sperrschichtkontakt mit p-Dotierung. Bild 64 zeigt schematisch den Aufbau eines Unijunctiontransistors.

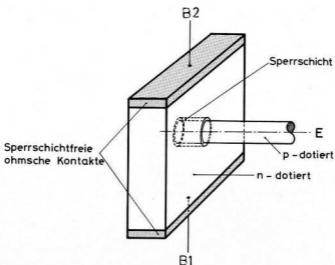


Bild 64



#### d. Prinzipielle Wirkungsweise

Bild 65 stellt ein Ersatzschaltbild für den Unijunctiontransistor dar. Solange über den Emitter kein Strom fliesst, weisen die beiden Widerstände  $R_1$  und  $R_2$  feste Werte auf. Diese Widerstandswerte sind gegeben durch die Leitfähigkeit des n-dotierten Siliziumstabes. Der Basisstrom  $I_{B2}$  nimmt mit der Spannung  $U_{B1B2}$  linear zu. Wird nun eine Spannung an den Emitter gelegt, so fliesst ab einem gewissen positiven Wert ein Emitterstrom, unterhalb dieses Wertes fliesst ein schwacher Sperrstrom. Die positive Emitterspannung, die zum Stromeinsatz im Emitterkreis führt, hängt von der Basisspannung  $U_{B1B2}$  ab. Der Vorgang wird sofort klar, wenn man das Ersatzschaltbild betrachtet.  $R_1$  und  $R_2$  bilden einen Spannungsteiler der bewirkt, dass sich zwischen dem Punkt X und B1 eine positive Spannung einstellt. Zur Auslösung des Emitterstromes muss am Emitter eine positive Spannung liegen, die um die Schliessenspannung der Emittersperrschicht höher liegt als das Potential am Punkt X. Sobald der Emitterstrom einsetzt, sinkt die Spannung zwischen Emitter und Basis 1 ab, gleichzeitig sinkt der Widerstand zwischen Emitter und Basis 1. Der Emitterstrom nimmt lawinenartig zu, er muss durch den Vorwiderstand  $R_E$  begrenzt werden. Der Emitterstrom steigt bei fallender Emitterspannung an, das heisst, dass **der Innenwiderstand zwischen Emitter und Basis negativ wird**. Dank diesem negativen Innenwiderstand des Transistors können wir sehr einfache Generatoren für Impulse und nicht sinusförmige Wellenformen konstruieren.

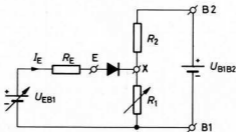


Bild 65

### e. Arbeitsverhalten und technische Daten

Das Arbeitsverhalten des Doppelbasistransistors wird am besten mit zwei Kennlinien dargestellt. Die  $I_E - U_{EB1}$ -Kennlinie zeigt die Spannung zwischen Emitter und Basis 1 in Funktion des Emittersstromes. In Bild 66 erkennen wir deutlich den fallenden Verlauf der Spannungskurve.

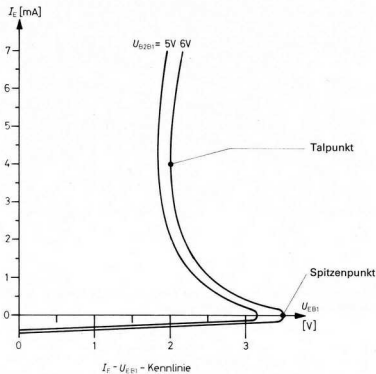


Bild 66

Die  $I_{B2} - U_{B2B1}$ -Kennlinie in Bild 67 zeigt die Abhängigkeit des Basisstromes von der Basis-Spannung für verschiedene Emittersströme.

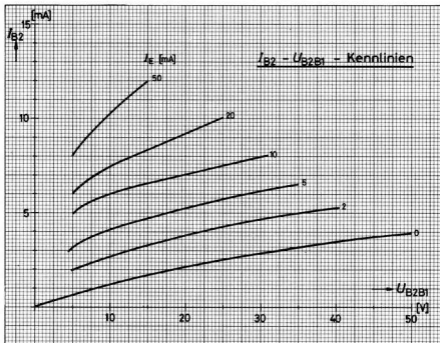


Bild 67

### f. Beispiel

Das Anwendungsbeispiel zeigt die Funktionsweise eines einfachen Impulsgenerators mit einem Unijunctiontransistor.

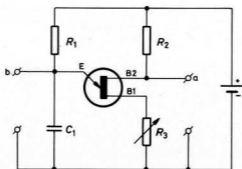


Bild 68

Der Kondensator  $C_1$  wird über den Widerstand  $R_1$  aufgeladen. Sobald die positive Spannung am Kondensator den Wert der Emitterspannung im Spitzenpunkt erreicht, wird die Strecke Emitter zu Basis 1 leitend, der Kondensator entlädt sich über den Emitterkreis. Sobald die Kondensatorspannung unter den Talpunkt absinkt, wird die Emitter-Basis-Strecke gelöscht, der Ladevorgang beginnt von neuem. An den Anschlüssen a und b können die erzeugten Impulse abgenommen werden, wobei die Impulsformen an den beiden Anschlüssen bei gleicher Frequenz verschieden sind.

## 7. Der Thyristor

### a. Definition

Der Thyristor ist ein steuerbarer Gleichrichter (silicon controlled rectifier, SCR). Sein elektrisches Verhalten gleicht demjenigen eines Thyratrons.

### b. Symbol

In Bild 69 sind die gebräuchlichsten Symbole zusammengestellt.

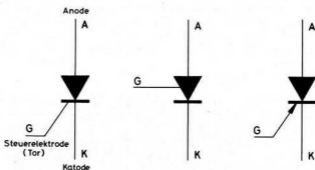


Bild 69

### c. Aufbau

Der Thyristor ist eine pnpn-Diode, wobei an der inneren p-Zone der Starter – auch Tor (Gate) genannt – angeschlossen ist. Bild 70 zeigt den schematischen Aufbau.

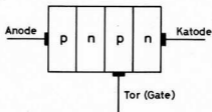


Bild 70

#### d. Prinzipielle Wirkungsweise

Wir betrachten den Thyristor in der Messschaltung nach Bild 71.

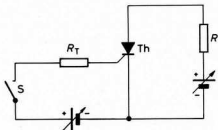


Bild 71

Für die ersten Untersuchungen öffnen wir den Schalter S, das Tor ist abgetrennt. Der Thyristor sperrt in beiden Richtungen für Spannungen, die nicht zu hoch liegen. Es fliesst lediglich ein kleiner Sperrstrom. Wird nun die Spannung in Durchlassrichtung – positives Potential an der äusseren p-Zone – vergrössert, so erreicht sie einen Punkt – den **Schaltpunkt** –, bei welchem die Diode in den Durchlasszustand kippt. Bild 72 zeigt den Verlauf des Stromes in Funktion der angelegten Spannung.

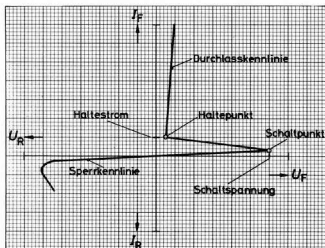


Bild 72

Die Spannung an der Diode bricht in leitendem Zustand auf einen kleinen Wert zusammen. Die eigentliche Durchlasskennlinie beginnt im **Haltepunkt**. Der Strom wird durch den Widerstand  $R$  beschränkt, da er sonst den zulässigen Maximalwert überschreiten würde. Wird durch äussere Einflüsse der zum Haltepunkt gehörende **Haltestrom** unterschritten, so kippt der Thyristor in den Sperrzustand zurück.

Dieses Kippverhalten wird durch die mittlere Sperrschicht verursacht. Sie ist für die angelegte Spannung in Sperrichtung gepolt. Wird die angelegte Spannung genügend gross gemacht, so findet in der mittleren Sperrschicht ein Durchbruch – ähnlich demjenigen in einer Zenerdiode – statt. Die Diode wird leitend, die Spannung an der Diode sinkt auf einen kleinen Wert ab. Der Schaltpunkt lässt sich beeinflussen, indem man an das Tor eine positive Spannung legt. Diese Spannung verursacht einen Torstrom, da die Sperrschicht Tor–Kathode in Durchlassrichtung gepolt ist. Der Torstrom muss deshalb durch den Widerstand  $R_T$  begrenzt werden. Die Steuerwirkung des Torstromes auf den Schaltpunkt geht aus Bild 73 hervor. Mit dem Torstrom lässt sich der Schaltpunkt einstellen. Der Thyristor verhält sich in dieser Hinsicht ähnlich wie ein Thyatron. Sobald der Thyristor in den leitenden Zustand gesteuert worden ist, hat der Torstrom keinen Einfluss mehr auf den Anodenstrom. Soll der Thyristor wieder in den gesperrten Zustand versetzt werden, muss die Anodenspannung soweit abgesenkt werden, dass dabei der Haltestrom unterschritten wird.

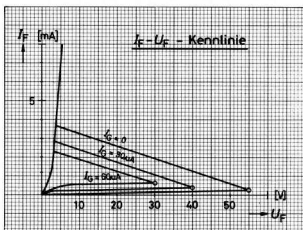


Bild 73

## e. Arbeitsverhalten

Das Arbeitsverhalten geht aus den Bildern 72 und 73 hervor.

## f. Technische Daten

Für den Thyristor gelten zum Teil die gleichen technischen Daten wie für Dioden. Es werden im folgenden Abschnitt nur Daten zusammengestellt, die für den Thyristor typisch sind.

### Scheitelwert des höchst zulässigen Durchlassstromes einer Halbwelle $I_{FSM}$ :

Der Scheitelwert einer Stromhalbwellen wird bei 50 Hz gemessen und entspricht dem höchst zulässigen Spitzenwert des sinusförmigen Durchlassstromes.

### Höchst zulässiger Effektivwert des Durchlassstromes $I_{PRMS}$ :

Der Effektivwert des Durchlassstromes entspricht bei sinusförmigem Verlauf demjenigen Gleichstromwert, der die gleiche Leistung erbringt wie der nicht sinusförmige Strom.

### Mittelwert des Durchlassstromes $I_{FAV}$ :

Der Mittelwert des Durchlassstromes entspricht bei sinusförmigem Verlauf des Stromes dem Mittelwert und bei nicht sinusförmigem Verlauf dem Gleichstrom, der pro Zeiteinheit die gleiche Ladungsmenge fließen lässt.

### Grenzlastintegral $\int i^2 dt$ (Masseinheit $A^2s$ )

Das Grenzlastintegral erlaubt die Berechnung der zulässigen Überströme, die kurzzeitig auftreten dürfen. Da der Thyristor bei Überstrom durch die im Halbleiter erzeugte Wärme zerstört werden kann, und die produzierte Wärme annähernd dem Quadrat des Stromes und der Stromdauer proportional ist, gibt der  $i^2 dt$ -Wert die Belastungsgrenze an. Je kürzer der Stromstoss dauert, desto grösser darf die Amplitude des Stromes werden. Es ist dabei lediglich zu beachten, dass der höchst zulässige Spitzenstrom nicht überschritten wird.

### Zündspannung $U_{GKT}$

Die Zündspannung ist diejenige Spannung am Tor, die zur Zündung des Thyristors erforderlich ist.

### Zündstrom $I_{GKT}$

Der Zündstrom ist der Strom, der zur Zündung des Thyristors fließen muss.

### Haltestrom $I_H$

Der Haltestrom ist der Strom, der durch den Thyristor fließen muss, damit der Stromfluss nach erfolgter Zündung aufrecht erhalten bleibt. Sobald der Strom unterhalb den Wert des Haltestromes absinkt, blockiert der Thyristor.

### g. Beispiel

Das folgende Beispiel zeigt in Bild 74 eine Schaltung, welche Thyristoren als kontaktlose Schalter im Wechselstromkreis verwendet.

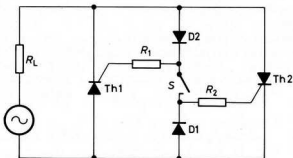


Bild 74

Der Lastwiderstand  $R_L$  wird über die beiden Thyristoren Th 1 und Th 2 – die antiparallel geschaltet sind – an den Generator gelegt, sobald der Schalter S geschlossen wird. Bei geschlossenem Schalter S fließt während der einen Halbwelle durch die Diode D1 über den Widerstand  $R_1$  der Torstrom für den Thyristor Th 1. Analog dazu wird der Thyristor Th 2 für die andere Halbwelle über die Diode D2 und den Widerstand  $R_2$  gesteuert. Bei geöffnetem Schalter werden beide Thyristoren gesperrt, da kein Torstrom fließen kann und der Haltestrom beim Nulldurchgang des Wechselstromes unterschritten wird.

## 8. Das Wesentliche

Die Funktionsweise aller Transistoren beruht auf dem Transistorprinzip. Dieses erklärt das Verhalten des Transistors, wenn die Basis-Emitterstrecke in Durchlassrichtung und die Basis-Kollektorstrecke in Sperrichtung vorgespannt werden. Die Basis dient dabei beiden Stromkreisen als gemeinsame Elektrode. Im Basis-Emitterkreis fließt ein Strom. Infolge der geringen Dicke der Basis rekombinieren in dieser nur wenige Ladungsträger. Demzufolge bleibt der Basisstrom gering. Das Gros des Emitterstromes fließt über den Kollektor ab, da die Ladungsträger der Emitterschicht von der Kollektorspannung angezogen werden. Der Kollektorstrom entspricht der Differenz zwischen Emitterstrom und Basisstrom. Das bedeutet, dass die Stromverstärkung kleiner als Eins ist. Trotzdem wirkt der so geschaltete Transistor (Basisschaltung) als Verstärker, da infolge der gewähl-



ten Polarität der Vorspannungen die Basis-Emitterschicht niederohmig wirkt (Durchlassrichtung) und die Basis-Kollektorstrecke einen grossen Widerstand aufweist (Sperrichtung).

Wir unterscheiden je nach Herstellungsverfahren verschiedene Typen von Flächentransistoren. Legierungstransistoren und gezogene Transistoren werden hauptsächlich im Niederfrequenzbereich betrieben. Der Diffusionstransistor eignet sich infolge seiner schmalen Basisschicht besonders zur Verstärkung hoher und höchster Frequenzen.

Das Arbeitsverhalten von Transistoren wird in Form von vier Kennlinien dargestellt. Im ersten Quadranten werden die Ausgangskennlinien aufgezeichnet. Die Stromverstärkung ist aus der Kurve des zweiten Quadranten ersichtlich, während die Eingangseigenschaften im dritten Quadranten festgehalten werden. Die Neigung der Kennlinien im vierten Quadranten bezeichnet die Spannungsrückwirkung.

Die wichtigsten Kenndaten des Transistors sind:

- **Kurzschlussstromverstärkung**, sie entspricht dem Verhältnis von Ausgangsstrom zu Eingangsstrom bei kurzgeschlossenem Ausgang.
- **Ausgangsleitwert**, er errechnet sich aus dem Verhältnis von Signalstrom zu Signalspannung am Ausgang bei offenem Eingang.
- **Eingangswiderstand**, er ist durch den Quotienten aus Eingangsspannung zu Eingangsstrom bei kurzgeschlossenem Ausgang gegeben. Infolge der starken Krümmung der Eingangskennlinie ist sein Wert stark vom gewählten Arbeitspunkt abhängig.
- **Spannungsrückwirkung**, sie charakterisiert die Rückwirkung der Ausgangsspannung auf die Eingangsspannung. Sie ist bestimmt durch das Verhältnis von Basisspannungsänderung zu Kollektorspannungsänderung bei offenem Eingang.

Der Feldeffekttransistor weist in seinem Verhalten grosse Ähnlichkeit mit der Röhre auf. Er lässt sich durch ein elektrisches Feld praktisch leistungslos steuern. Wir unterscheiden zwischen dem Sperrschichtfeldeffekttransistor und dem Oberflächenfeldeffekttransistor. Der Sperrschichtfeldeffekttransistor benötigt wie die Röhre eine Vorspannung an der Steuerelektrode, während der Oberflächenfeldeffekttransistor ohne diese Vorspannung auskommt, da die Steuerelektrode von den anderen Elektroden isoliert ist.

Der Unijunctiontransistor wird dank seinem negativen Innenwiderstand oft in Kippschaltungen verwendet.

Der Thyristor zeigt in seinem Verhalten ähnliche Eigenschaften wie das Thyatron. Er ist als steuerbare Vierschichtdiode aufgebaut.

## 9. Repetitionsaufgaben (Lösung Seite 444)

- Skizzieren Sie den Aufbau eines pnp-Flächentransistors. Zeichnen Sie sein Symbol und benennen Sie die Elektroden.
- Erklären Sie in knappen Worten das Transistorprinzip.
- In welchem Frequenzbereich wird der Legierungstransistor vorwiegend betrieben?

- d) Welche Transistoren kommen hauptsächlich für Hochfrequenzschaltungen in Frage?
- e) Nennen Sie die vier Kenndaten, die das Verhalten des Transistors bestimmen.
- f) Definieren Sie die Kurzschlussstromverstärkung.
- g) Ermitteln Sie aus den Kennlinien des Transistors AC 125 die Kurzschlussstromverstärkung und den Eingangswiderstand für den Arbeitspunkt  $-U_{CE} = 1 \text{ V}$ ,  $-I_B = 0,2 \text{ mA}$ .
- h) Welches ist der grosse Vorteil, den der Feldeffekttransistor gegenüber dem gewöhnlichen Transistor aufweist?
- i) Erklären Sie den Unterschied zwischen einem Sperrschichtfeldeffekttransistor und einem Oberflächenfeldeffekttransistor.
- k) Wie geschieht die Steuerung des Transistorstromes beim Feldeffekttransistor?
- l) Bestimmen Sie die Steilheit des Sperrschichtfeldeffekttransistors gemäss Bild 57 für den Arbeitspunkt  $U_{DS} = 10 \text{ V}$ ,  $U_{GS} = 1 \text{ V}$ .
- m) Zeichnen Sie das Symbol für den Oberflächen- und den Sperrschichtfeldeffekttransistor. Benennen Sie die Elektroden.
- n) Zeichnen Sie das Symbol für den Unijunctiontransistor und bezeichnen Sie die Elektroden.
- o) Welches sind die elektrischen Eigenschaften des Unijunctiontransistors?
- p) Wo wird der Unijunctiontransistor hauptsächlich eingesetzt?
- q) Skizzieren Sie den Verlauf der  $U_{EB1}-I_E$ -Kennlinie eines Unijunctiontransistors
- r) Zeichnen Sie das Symbol eines Thyristors und benennen Sie seine Elektroden.
- s) Was ist ein Thyristor?
- t) Was verstehen Sie unter dem Ausdruck «Haltestrom» eines Thyristors?
- u) Zeichnen Sie die  $I_F-U_F$ - Kennlinien eines Thyristors für einen angenommenen Torstrom innerhalb des Arbeitsbereiches.

# III. Der Heissleiter

## 1. Einführung

Heissleiter leiten in warmem Zustand besser als in kaltem. Im Heissleiter verfügt die Technik über ein Bauelement, das zur Stabilisierung von Betriebszuständen in vielen Schaltungen gute Dienste leistet. Der gewöhnliche Widerstand weist meistens einen leicht positiven Temperaturkoeffizienten auf. Eine Ausnahme bildet der Kohlewiderstand; sein Temperaturgang ist leicht negativ. Bei Widerständen mit positivem Temperaturkoeffizient nimmt der Widerstandswert mit zunehmender Temperatur zu. Der Heissleiter verhält sich gerade umgekehrt, je höher seine Betriebstemperatur wird, desto kleiner ist sein Widerstand.

## 2. Was wissen Sie schon über Heissleiter? (Lösung Seite 448)

- Was verstehen Sie unter dem Ausdruck «Temperaturkoeffizient  $\alpha$ »?
- Was ist ein Halbleiter?
- Kennen Sie Anwendungsbeispiele für Heissleiter?
- Aus welchen Materialien besteht ein Heissleiter?

## 3. Der Heissleiter

### a. Definition

Der Heissleiter ist ein Halbleiterbauelement, dessen Leitfähigkeit mit steigender Temperatur zunimmt.

### b. Symbol

Bild 75 zeigt die gebräuchlichsten Symbole für den Heissleiter.

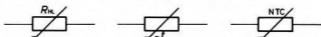


Bild 75

### c. Aufbau

Der Heissleiter – oft auch *Thermistor* genannt – besteht aus Mischoxyden. Meistens werden Magnesiumoxyd und Titanoxyd oder Magnesium-Nickeloxye verwendet. Die gesinterten Oxyde ergeben das Ausgangsmaterial für den Heissleiter. Bild 76 zeigt zwei Ausführungsformen.

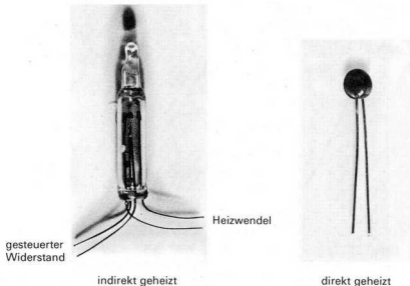


Bild 76

### d. Funktionsweise

Das Arbeitsverhalten des Heissleiters beruht auf dem Halbleitereffekt. Sie zeigen wesentlich grössere Widerstandsänderungen mit der Temperatur als Metalle. Während diese bei den höchsten Betriebstemperaturen einen um den Faktor 3 bis 12 höheren Widerstand haben als bei Zimmertemperatur, sinkt der Heissleiterwiderstand bei den höchstzulässigen Temperaturen um den Faktor 15 bis 2000 gegenüber den Werten bei Zimmertemperatur ab. Daraus folgt, dass je höher die Temperatur des Heissleitermaterials wird, desto mehr Elektronen zur Stromleitung frei werden. Als Folge davon nimmt der Widerstand mit zunehmender Erwärmung ab. Es wird zwischen Heissleitern unterschieden, die durch den Strom, der sie durchfließt, erwärmt werden und solchen, die die Wärmeenergie aus der Umgebung beziehen. Bei den letzteren wird der Strom durch den Heissleiter so gering gehalten, dass er nicht wesentlich zur Erwärmung des Elementes beiträgt.

### e. Arbeitsverhalten

Der negative Temperaturkoeffizient liegt für Heissleiter in der Grössenordnung von  $-3\%$  bis  $-6\%$ . Bild 77 zeigt den Widerstandsverlauf eines Heissleiters in Abhängigkeit von der Temperatur.

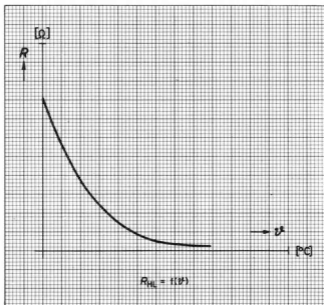


Bild 77

Die Kurve des Widerstandsverlaufes weist Exponentialcharakter auf. Sie verläuft nach der Gleichung:

$$R_{\theta} = R_{\infty} \cdot e^{\frac{b}{T}}$$

$R_{\infty}$  Heissleiterwiderstand bei unendlich hoher Temperatur

$T$  ist die absolute Temperatur in °Kelvin ( $T = \theta + 273$ )

Die Kelvinskala beginnt bei der Temperatur im absoluten Nullpunkt. Null Grad Celsius entspricht demzufolge  $273^{\circ}$  Kelvin.

$b$  ist eine Materialkonstante zur Bestimmung der Temperaturabhängigkeit bei Heissleitern. Wird auch als Reglerfaktor ( $^{\circ}$  K) bezeichnet.

In Bild 78 ist der Spannungsabfall über einem Heissleiter in Funktion des Stromes dargestellt.

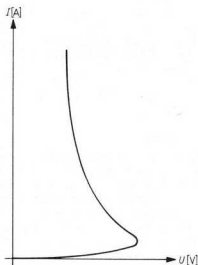


Bild 78

## 4. Beispiele

### a. Stromstabilisierung

Die bekannteste Anwendung des Heissleiters ist die Stromstabilisierung in Heizkreisen von Allstromempfängern. Ein Allstromempfänger ist ein Gerät, welches für Gleich- und Wechselstromspeisung verwendbar ist. Solche Apparate weisen keinen Netztransformator auf. Die Heizungen der Röhren und die Skalalämpchen sind in Serie geschaltet und liegen direkt am Lichtnetz. Der Kaltwiderstand der Röhren ist so klein, dass im Einschaltmoment der Strom einen Wert annimmt, der zur Zerstörung der Heizfäden führt. Schaltet man zu einem solchen Kreis einen Heissleiter in Serie, so gleicht dieser mit seinem hohen Kaltwiderstand den geringen Kaltwiderstand der Röhrenheizungen aus. Der Strom stellt sich nach dem Einschalten rasch auf seinen Sollwert ein. Bild 79 zeigt ein Schaltbeispiel.

## Röhrenheizung

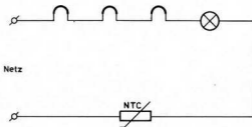


Bild 79

### b. Arbeitspunktstabilisierung

Oft werden Heissleiter zur Arbeitspunktstabilisierung eingesetzt. Wir wissen, dass Transistoren sehr temperaturempfindlich sind. Ihr Arbeitspunkt verschiebt sich unter dem Einfluss der Temperatur. Wird ein Heissleiter kombiniert mit ohmschen Widerständen in die Schaltung eingebaut, so kann das unerwünschte Temperaturverhalten des Transistors weitgehend kompensiert werden. Die Schaltung wird so dimensioniert, dass durch den Heissleiter keine grossen Ströme fliessen, damit keine Eigenerwärmung auftritt. Der Thermistor wird wärmeleitend mit dem Gerät verbunden, so dass sein Widerstand durch die Gerätetemperatur bestimmt wird. Bild 80 zeigt die Arbeitspunktstabilisierung eines Transistors mit Hilfe eines Heissleiters.

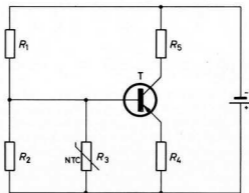


Bild 80

Die Basisvorspannung wird über dem Spannungsteiler  $R_1$ , ( $R_2 \parallel R_3$ ) abgegriffen. Bei zunehmender Gerätetemperatur hat der Kollektorstrom die Tendenz anzusteigen. Da jedoch mit zunehmender Temperatur der Widerstand des Heissleiters kleiner wird, verringert sich die Basisvorspannung und wirkt dadurch dem Stromanstieg entgegen. Die Berechnung des richtigen Verhältnisses zwischen den drei Spannungsteilerwiderständen erweist sich als recht kompliziert. In der Praxis werden deshalb die Werte oft durch Versuche ermittelt.

### c. Relaisanzugsverzögerung

Bild 81 zeigt eine Schaltung, bei welcher mit einem Heissleiter der Anzug eines Relais verzögert wird. Der Anzugsstrom des Relais wird erst erreicht, wenn sich der Heissleiter auf eine gewisse Temperatur erwärmt hat.

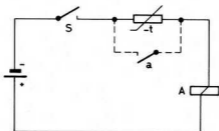


Bild 81

### d. Temperaturmessung

Zur Temperaturmessung benötigt man Heissleiter mit besonders geringer Trägheit. Bild 82 zeigt eine einfache Schaltung eines Thermometers mit einem Thermistor. Das Milliampèremeter ist direkt in ° Celsius geeicht. Die Zenerdiode sorgt für eine stabile Speisespannung.

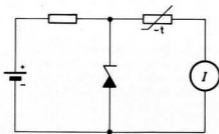


Bild 82



Das eigentliche Heissleitermaterial befindet sich im Innern eines Glaskolbens. Dieser ist mit einem Gas gefüllt, welches die Wärme besonders gut leitet, wodurch die Trägheit der Anzeige stark herabgesetzt wird. Bei andern Bauarten ist der Heissleiter direkt in eine Glasperle eingeschmolzen.

### e. Hochfrequenzmessung

Hochfrequenzströme werden oft mit einem indirekt geheizten Heissleiter gemessen. Der Heissleiter befindet sich im Innern eines Glaskolbens. Eine Heizwendel heizt ihn auf und bestimmt damit seinen Widerstand. Der Widerstandswert ist ein direktes Mass für den Wechselstrom, der durch die Heizwendel fliesst. Die Widerstandsmessung des Thermistors erfolgt dabei unter möglichst kleiner Strombelastung, damit nicht das Messresultat durch Eigenerwärmung verfälscht wird. Bild 83 zeigt das Schaltungsprinzip.

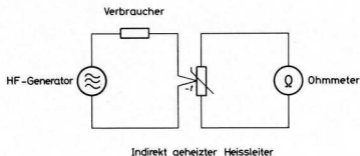


Bild 83

## 5. Das Wesentliche

Der Heissleiter ist ein Halbleiterbauelement mit stark negativem Temperaturkoeffizienten. Dieser bewegt sich zwischen  $-3\%$  und  $-6\%$ .

Sein Arbeitsverhalten ist durch den Halbleitereffekt bestimmt.

Die Hauptanwendungsgebiete des Heissleiters sind:

- Stromstabilisierung
- Stabilisierung von Arbeitspunkten
- Anzugverzögerung von Relais
- Temperaturmessungen
- Messungen von Hochfrequenzströmen

## 6. Repetitionsaufgaben (Lösung Seite 449)

- a) Skizzieren Sie den Widerstandsverlauf eines Heissleiters in Funktion der Temperatur.
- b) Welche Art von Heissleiter wird zur Messung von Hochfrequenzströmen verwendet?
- c) Welches ist der grundsätzliche Unterschied zwischen einem Heissleiter, der als Strombegrenzer arbeitet, und einem, der zur Arbeitspunktstabilisierung einer Transistorstufe eingesetzt wird?
- d) Welche Eigenschaften müssen in der Regel Heissleiter aufweisen, die zur Temperaturmessung eingesetzt werden?
- e) Nennen Sie ein Material, aus welchem Heissleiter hergestellt werden.

# IV. Der Kaltleiter

## 1. Einführung

Der Kaltleiter stellt in bezug auf seine Anwendung und sein Arbeitsverhalten das Gegenstück zum Heissleiter dar. Er findet in zahlreichen Schaltungen der Nachrichtentechnik Anwendung. Im Gegensatz zu Heissleiter besitzt er einen ausgeprägt positiven Temperaturkoeffizienten. Sein Widerstand ist in kaltem Zustand am kleinsten.

## 2. Was wissen Sie schon über den Kaltleiter? (Lösung Seite 450)

- Woraus besteht ein Kaltleiter?
- Kennen Sie Anwendungsgebiete von Kaltleitern?
- Wozu dient der Eisenwasserstoffwiderstand?
- Warum steigt beim Kaltleiter mit zunehmender Temperatur der Widerstandswert an?

## 3. Der Kaltleiter

### a. Definition

Der Kaltleiter ist ein Widerstand mit stark positivem Temperaturkoeffizienten. Sein Widerstand hängt vom durchfliessenden Strom ab. In kaltem Zustand ist sein Widerstand am kleinsten.

### b. Symbole

Meistens wird das Symbol der Glühlampe mit dem Zusatz  $R_K$  verwendet. Neuerdings ist oft auch das allgemeine Symbol des geregelten Widerstandes mit der Bezeichnung  $R_K$  anzutreffen.

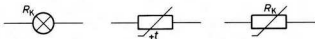


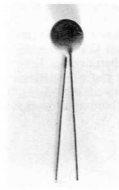
Bild 84

### c. Aufbau

Der Kaltleiter ist ähnlich aufgebaut wie eine kleine Glühlampe. Im Glaskolben befindet sich ein sehr dünner Wolframdraht. Es werden auch Kaltleiter aus Halbleitermaterialien gefertigt. Diese sind aus Barium-Titanat hergestellt, welches mit Metalloxyden und Metallsalzen gesintert wird. Bild 85 zeigt einen Kaltleiter aus Halbleitermaterial und einen solchen mit Glühfaden.



mit Glühfaden



aus Halbleitermaterial

Bild 85

#### d. Funktionsprinzip

Der Kaltwiderstand des Kaltleiters weist je nach Typ einen Wert zwischen einigen Ohm und einigen hundert Ohm auf. Der Strom, der durch den Kaltleiter fließt, erwärmt diesen, was ein Ansteigen des Widerstandes zur Folge hat. Bild 86 zeigt die Abhängigkeit des Widerstandswertes vom Strom durch den Kaltleiter.

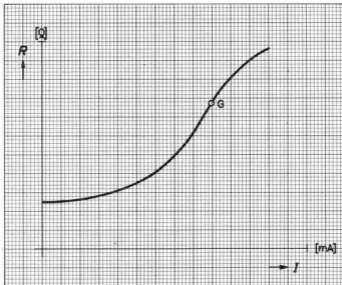


Bild 86

Der Punkt G auf der Kennlinie wird Glühpunkt genannt. Er entspricht der Stromstärke, die notwendig ist, um den Wendel zu einem schwachen Glühen anzuregen. Die Widerstandsänderung pro Stromschritt ist unterhalb des Glühpunktes am grössten. Der Kaltleiter wird deshalb vorteilhaft im steilsten Abschnitt der Kennlinie betrieben.

Bild 87 zeigt das Arbeitsverhalten eines Kaltleiters aus Halbleitermaterial. Die Kennlinie zeigt, dass hier der positive Temperaturkoeffizient erst ab einer bestimmten Temperatur wirksam wird.

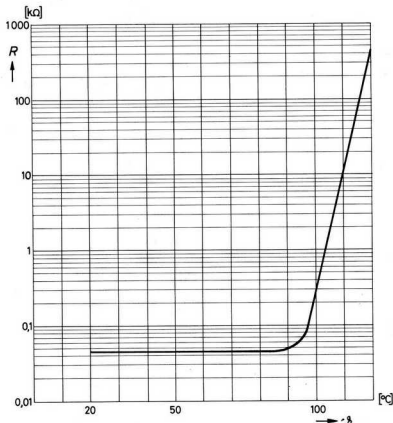


Bild 87

Ein spezieller Kaltleiter, der oft in batteriegespeisten Röhrengeräten zur Stabilisierung des Heizstromes verwendet wird, ist der Eisenwasserstoffwiderstand. Er besteht aus einem Eisendraht, der in einem mit verdünntem Wasserstoff gefüllten Glaskolben befestigt ist. Wird dieser bis zur Rotglut erwärmt, so ändert sich zufolge Umkristallisierungsarbeit in den Eisenkristallen sein Widerstandswert stark. In diesem Bereich ist die Widerstandszunahme so gross, dass der Strom von der angelegten Spannung beinahe unabhängig wird. Die Kennlinie eines Eisenwasserstoffwiderstandes ist in Bild 88 festgehalten.

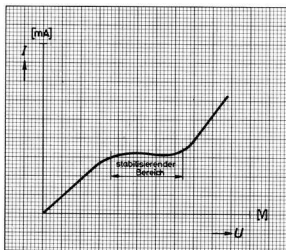


Bild 88

Bild 89 zeigt einen Eisenwasserstoffwiderstand, wie er in Funkgeräten Verwendung findet.

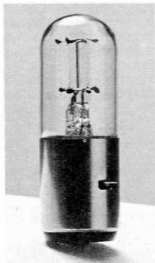


Bild 89

#### 4. Beispiele

Ein einfaches Beispiel zeigt den Einsatz eines Kaltleiters zur **Dynamikkompresion** eines Verstärkers. Unter **Dynamik** versteht man das Verhältnis vom grössten zum kleinsten Pegel einer übertragenen Darbietung. Wird nun nach Bild 90 in Serie zum Lautsprecher ein Kaltleiter geschaltet, so wird die Dynamik eingeeengt, indem der Kaltleiter bei grösseren Niederfrequenzleistungen erwärmt wird und somit sein Widerstand ansteigt, was ein Absinken der dem Lautsprecher zugeführten Leistung zur Folge hat. Die Trägheit des Kaltleiters verhindert ein Ansprechen auf Impulse kurzer Dauer.

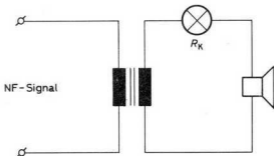


Bild 90

In der Hochfrequenzmesstechnik werden Kaltleiter zur Messung von kleinen Hochfrequenzströmen herangezogen. Bild 91 zeigt das Messprinzip.

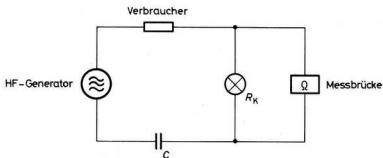


Bild 91

Der Hochfrequenzstrom erwärmt den Kaltleiter, die resultierende Widerstandserhöhung wird mit einer empfindlichen Messbrücke gemessen. Diese Messbrücke ist so gebaut, dass sie den Kaltleiter praktisch nicht belastet, wodurch keine zusätzliche Erwärmung durch den Messstrom auftreten kann. Mit dieser Einrichtung lassen sich sehr kleine HF-Ströme messen.

Ein Anwendungsbeispiel für Eisenwasserstoffwiderstände zeigt Bild 92. Die Schaltung ist so bemessen, dass bei Absinken der Batteriespannung infolge Alterung der Widerstandswert des Eisenwasserstoffwiderstandes ebenfalls zurückgeht, wodurch der Strom im Kreis konstant gehalten wird.

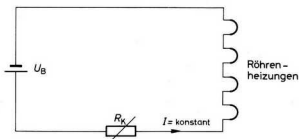


Bild 92



## 5. Das Wesentliche

Der Kaltleiter hat einen stark positiven Temperaturkoeffizienten. Er weist in kaltem Zustand den geringsten Widerstand auf.

Der Kaltleiter mit Glühdraht wird unterhalb des Glühpunktes betrieben, da dort die Widerstandsänderung pro Stromschritt am grössten ist.

Bei Kaltleitern aus Halbleitermaterial wird der positive Temperaturkoeffizient erst ab einer gewissen Temperatur wirksam.

Der Eisenwasserstoffwiderstand ist ein Sonderfall, er wird bei Rotglut betrieben, da er in diesem Bereich stromstabilisierend wirkt.

Kaltleiter werden zu Messzwecken und in der Regeltechnik eingesetzt. Der Eisenwasserstoffwiderstand wird meistens zur Stabilisierung kleiner Ströme herangezogen.

## 6. Repetitionsaufgaben (Lösung Seite 450)

- Welches ist das Hauptmerkmal des Kaltleiters?
- Skizzieren Sie den Widerstandsverlauf eines Kaltleiters in Abhängigkeit des Stromes.
- Erklären Sie den Aufbau eines Kaltleiters.
- Zeichnen Sie den Stromverlauf im Eisenwasserstoffwiderstand in Abhängigkeit von der angelegten Spannung.
- In welchem Gebiet der Kennlinie wird der Eisenwasserstoffwiderstand betrieben?
- Warum werden Kaltleiter meistens unterhalb des Glühpunktes betrieben?
- Nennen Sie das Hauptanwendungsgebiet des Eisenwasserstoffwiderstandes.

# V. VDR-Widerstände

## 1. Einführung

Der VDR-Widerstand – **V**oltage **D**ependent **R**esistor – weist eine starke Spannungsabhängigkeit auf. Er gehört zur Gruppe der Halbleiterwiderstände. Mit zunehmender Spannung wird sein Widerstandswert immer kleiner. Der VDR-Widerstand – oft auch Varistor genannt – findet in der Nachrichtentechnik eine manifoldige Verwendung. So sind Varistoren in Regelschaltungen, in Einrichtungen zur Spannungstabilisierung und in Schaltungen zur Funkenlöschung anzutreffen.

## 2. Was wissen Sie schon über VDR-Widerstände? (Lösung Seite 452)

- Warum eignen sich Varistoren zur Funkenlöschung?
- Aus welchen Materialien werden VDR-Widerstände hergestellt?
- Skizzieren Sie den Verlauf der Spannungs-Stromkurve eines Varistors.
- Kennen Sie weitere Anwendungsgebiete für Varistoren?

## 3. Der VDR-Widerstand

### a. Definition

Der VDR-Widerstand, oder **Varistor** – ist ein Widerstand, dessen Wert mit zunehmender Spannung abnimmt.

### b. Symbole

Bild 93 zeigt die gebräuchlichsten Symbole



Bild 93

### c. Aufbau

Der Varistor besteht aus Siliziumkarbid-Körnern, die mit einem Bindemittel zusammengesintert sind. Sie werden meistens in Form von Scheiben nach Bild 94 hergestellt.

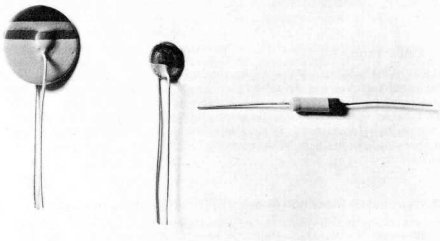


Bild 94

#### d. Prinzipielle Wirkungsweise

Die einzelnen Siliziumkarbidkörner berühren einander. Da der Varistor aus einer sehr grossen Anzahl solcher Körner besteht, entstehen entsprechend viele Berührungsstellen. An jeder Berührungsfläche baut sich eine Sperrschicht auf. Man darf sich deshalb den Varistor als ein Element vorstellen, das aus der Serie- und Parallelschaltung von sehr vielen Sperrschichten besteht. Bild 95 zeigt den schematischen Aufbau eines Varistors.

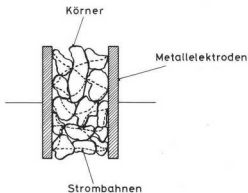


Bild 95

Die Summe aller dieser Sparschichten ergibt die Leitfähigkeit des Varistors. Diese Sperrschichten haben die Eigenschaft, dass ihr Durchlasswiderstand spannungsabhängig ist. Dieses Verhalten lässt sich folgendermassen erklären: Der Stromfluss zwischen zwei Siliziumkarbidkörnchen erfolgt an der Berührungsstelle, wie dies in Bild 96 schematisch dargestellt wird.

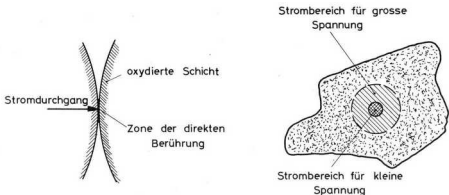


Bild 96

Der Übergangswiderstand im Berührungspunkt hängt von der Grösse der Berührungsfläche ab; je kleiner diese ist, desto grösser wird der Übergangswiderstand. Innerhalb dieser Berührungsfläche erfolgt der Stromfluss im Zentrum. Wird nun die Spannung erhöht, so weitet sich innerhalb der Berührungsfläche der Bereich für den Stromfluss aus, der Übergangswiderstand sinkt ab.

Der Strom steigt demzufolge bei zunehmender Spannung rascher an, als dies bei einem gewöhnlichen Widerstand nach dem ohmschen Gesetz der Fall ist. Die Kennlinien aller Varistoren lassen sich durch eine einfache Formel darstellen:

$$U = C \cdot I^\beta$$

$C$  = Formkonstante  
 $\beta$  = Materialkonstante  
 $U$  = Spannung am Widerstand  
 $I$  = durch den Widerstand fliessender Strom

Durch ihren Aufbau sind sie erst für Spannungen über 50 V einsetzbar.

## e. Technische Daten

Bild 97 zeigt die Kennlinie eines VDR-Widerstandes.

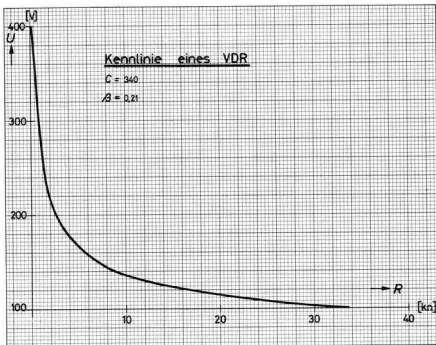


Bild 97

### Form- und Materialkonstante $C, \beta$

Der Wert für die Konstante  $C$  liegt je nach Typ zwischen 15 und 1000.  
Die Werte für die Konstante  $\beta$  liegen je nach Typ zwischen 0,1 und 0,4

### Zulässige Belastung $P_0$

Die handelsüblichen Varistoren werden für folgende Belastungen dimensioniert:  
0,5/0,8/1/2/3 W

### Temperaturkoeffizient $\alpha$

Der Temperaturkoeffizient  $\alpha$  ist negativ. Er nimmt Werte zwischen 0,001 und 0,008 an.

## 4. Beispiele

### a. Varistor als Stabilisator bei Schwankungen der Eingangsspannung

Das Prinzipschaltbild zur Stabilisierung einer Spannung ist aus Bild 98 ersichtlich.

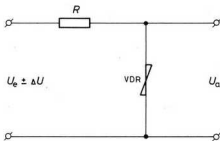


Bild 98

Wenn die Eingangsspannung um einen gewissen Betrag schwankt, wirkt die Kennlinie des Varistors dieser Spannungsänderung entgegen. Bei grösser werdender Eingangsspannung sinkt der Widerstand des Varistors, das Spannungsteilverhältnis zwischen  $R$  und dem VDR ändert sich und kompensiert teilweise die Spannungsschwankung. Wird die Eingangsspannung kleiner, so bewirkt dies ein Ansteigen des Widerstandswertes des VDR, was wiederum einen teilweisen Ausgleich der Spannungsänderung zur Folge hat. Die kompensierende Wirkung des Varistors ist bei unbelastetem Spannungsteiler am grössten.

### b. Varistor als Stabilisator bei Belastungsänderungen

Die Prinzipschaltung zur Spannungstabilisierung bei schwankender Last zeigt Bild 99

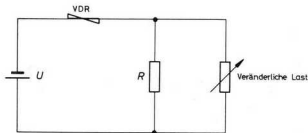


Bild 99

Soll die Spannung an einem Verbraucher unabhängig von der Belastung sein, dann schaltet man einen Varistor in Serie zum Verbraucher. Sinkt der Widerstand des Verbrauchers, so steigt die Spannung am VDR an, was ein Absinken seines Widerstandes zur Folge hat, wodurch die Auswirkung der Belastungsschwankung teilweise ausgeglichen wird.

Mit dieser Schaltung können beispielsweise Röhrenspannungen stabilisiert werden. Schirmgitterspannungen, die über einen VDR an die Röhre gelegt werden, erfahren dadurch eine Stabilisierung.

### c. Funkenlöschung mit VDR-Widerständen

Bild 100 zeigt zwei Schaltungen zur Unterdrückung von Spannungsspitzen, wie sie beim Ausschalten induktiv belasteter Stromkreise entstehen.

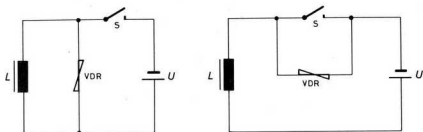


Bild 100

Varistoren sollen nur in solchen Schaltungen zur Funkenlöschung eingesetzt werden, wo die Spannungsspitzen mindestens den doppelten Wert der Betriebsspannung aufweisen, da sonst die Verluste, verursacht durch die Varistoren, zu hoch werden. Die Schaltung links in Bild 100 wird vorwiegend für kleinere Betriebsspannungen gewählt. Kreise mit höheren Betriebsspannungen werden nach der Schaltung rechts in Bild 100 geschaltet.

### d. Weitere Anwendungsmöglichkeiten

VDR-Widerstände finden eine vielseitige Anwendung. Ausser den bereits erwähnten Beispielen lassen sich folgende Aufgaben mit Varistoren lösen:

- **Automatische Dynamikregelung** in NF-Verstärkern. Der Varistor erlaubt den Bau eines elektronisch steuerbaren Spannungsteilers für die NF-Spannung. Dabei wird mit Hilfe einer Regelspannung das Spannungsteilerverhältnis der Eingangsschaltung verändert, was einer Steuerung der erreichbaren Verstärkung gleichkommt.
- **Erhöhung der Spannungsempfindlichkeit** von Relais.
- **Messbereicherweiterung** von Strom- und Spannungsmessgeräten. Mit VDR-Widerständen erreicht man nichtlineare Skalen, die für bestimmte Bereiche gedehnt sind.
- **Oberwellenerzeugung** infolge der gekrümmten Kennlinie.

## 5. Das Wesentliche

Der Varistor weist einen spannungsabhängigen Widerstandswert auf. Mit zunehmender Spannung wird der Widerstand kleiner.

Der Temperaturkoeffizient des Varistors ist negativ.

VDR-Widerstände werden zur Funkenlöschung, zur Spannungsstabilisierung, in Regelschaltungen und in der Messtechnik verwendet.

## 6. Repetitionsaufgaben (Lösung Seite 453)

- Zeichnen Sie die  $U/R$ -Charakteristik eines Varitors.
- Zeichnen Sie das Prinzipschaltbild eines einfachen Spannungsstabilisators zur Kompensation der schwankenden Eingangsspannung.
- Zeichnen Sie die Skala des Spannungsmessers nach Bild 101

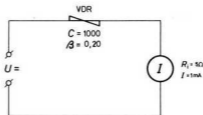


Bild 101

Das Milliampèremeter misst bei Vollausschlag 1 mA, sein Innenwiderstand beträgt 5 Ohm, die Skala ist linear. Der VDR weist folgende Form- und Materialkonstante auf:  $C = 1000$ ,  $\beta = 0,20$ .