

# Flächentransistoren

## Eigenschaften und Schaltungstechnik

Von

Dr. rer. nat.  
**Georg Rusche**  
VALVO GMBH

Dipl.-Phys.  
**Karl Wagner**  
VALVO GMBH

Dr. rer. nat.  
**Fritz Weitzsch**  
VALVO GMBH

Mit 237 Abbildungen



**Springer-Verlag**  
Berlin / Göttingen / Heidelberg  
1961

ISBN-13: 978-3-642-92823-9

e-ISBN-13: 978-3-642-92822-2

DOI: 10.1007/978-3-642-92822-2

**Alle Rechte, insbesondere das der Übersetzung in fremde Sprachen, vorbehalten  
Ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages ist es auch nicht gestattet,  
dieses Buch oder Teile daraus auf photomechanischem Wege  
(Photokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen**

**© by Springer-Verlag OHG., Berlin/Göttingen/Heidelberg 1961**

Softcover reprint of the hardcover 1st edition 1961

**Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw.  
in diesem Buche berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der An-  
nahme, daß solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetz-  
gebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften**

## Vorwort

Die immer stärker werdende praktische Ausnutzung naturwissenschaftlicher Entdeckungen hat dazu geführt, daß der Weg von der Naturforschung zur Technik kürzer geworden ist und daß eine viel größere Zahl von Physikern, Chemikern und Ingenieuren an diesem Wege teilhat, als es etwa vor wenigen Jahrzehnten noch der Fall war. Dies trifft in hohem Maße für die Entwicklung des neuen Verstärkerelementes „Transistor“ zu, angefangen von grundlegenden Versuchen an halbleitenden Kristallen und der Entdeckung des Transistorprinzips bis zu den heute serienmäßig gefertigten Flächentransistoren. In fast allen Gebieten der Elektronik wird der Transistor in steigendem Maße verwendet. In Verbindung damit sind in relativ kurzer Zeit über seine Theorie und Anwendung wertvolle Beiträge in großer Zahl erschienen. Andererseits fehlte u. E. bisher in der deutschsprachigen Literatur eine methodische Behandlung der Probleme, die bei der Verwendung von Transistoren in der Praxis auftreten.

Mit dem vorliegenden Buch soll versucht werden, diese Lücke zu schließen. Wir haben uns bemüht, sorgfältig jenes Material auszuwählen und zusammenzustellen, das uns für die Einführung in die Schaltungstechnik des Transistors unerläßlich oder zumindest wichtig erscheint. Dabei haben wir uns im Hinblick auf die rasch fortschreitende Entwicklung auf grundsätzliche Gedankengänge beschränkt, wobei notwendigerweise nicht die Vielfalt der Möglichkeiten des Transistors überhaupt zum Ausdruck kommen kann. Das vorliegende Buch ist daher weniger als Handbuch anzusehen, in welchem das bisher bekannt gewordene Material aufzählend und vollständig zusammengetragen ist, sondern es enthält vielmehr neben einer allgemeinen Einführung eine Auswahl der für die Entwicklung von Transistorgeräten wichtigsten Probleme, die dann an Hand von Einzelbeispielen in angemessener Ausführlichkeit behandelt werden. Das einführende Kapitel ist teilweise etwas umfangreicher gehalten, als es für das Verständnis der Einzelbeispiele unmittelbar erforderlich ist. Es sollte jedoch dem Leser die Möglichkeit geben, sich von Fall zu Fall ein Bild über die physikalischen Hintergründe einiger Effekte zu verschaffen. Die Herleitung von Gleichungen ist im Interesse einer knappen Darstellung auf ein Mindestmaß beschränkt worden. Definitionen, Schreibweisen, längere mathematische Behandlungen u. a. m. sind in einem Anhang zusammengefaßt.

Eine besondere Schwierigkeit bildet heute die Zusammenstellung von Literaturhinweisen. Da es schon ausführliche Literaturverzeichnisse über Transistoren gibt, haben wir uns auf solche Hinweise beschränkt, die uns für die Unterstützung der Herleitungen jeweils gerade geeignet erschienen. Dabei konnte jedoch nicht vermieden werden, eine Vielzahl sonst wertvoller Beiträge zu übergehen. An einigen Stellen haben wir vermerkt, daß in solchen Beiträgen wiederum ausführliche Literaturhinweise zu finden sind.

Wir danken allen, die zur Fertigstellung des Buches beigetragen haben —, der Geschäftsleitung der Valvo GmbH für manche wohlwollende Unterstützung, besonders auch unseren Mitarbeitern für viele wertvolle Diskussionen und schließlich allen denen, die bei der Anfertigung der Manuskripte und Zeichnungen geholfen haben. Nicht zuletzt gilt unser Dank dem Verlag für die Anregung, dieses Buch zu schreiben, für die gewohnte sorgfältige Ausstattung und auch für manchen freundlichen Rat.

Hamburg, im Herbst 1961

**Die Verfasser**

# Inhaltsverzeichnis

	Seite
<b>I. Einleitung</b> . . . . .	1
<b>II. Physikalische Grundlagen</b> . . . . .	3
1. Elektrische Leitungsvorgänge im Halbleiterkristall . . . . . Eigenleitung S. 4. — Störstellenleitung S. 6.	4
2. Nichtgleichgewichtszustände . . . . . Kontinuität S. 8. — Feld- und Diffusionsstrom S. 9. — Poissonsche Gleichung S. 10.	7
3. p-n-Übergang . . . . . Doppelschicht S. 11. — Randwertaufgabe für die Dichten S. 13. — Stationäre Lösung für eine Diode S. 16.	10
4. Wirkungsweise des Transistors . . . . .	18
<b>III. Eigenschaften des Transistors</b> . . . . .	23
A. Statische Eigenschaften . . . . .	23
1. Grundgleichungen, Ersatzschaltbild und Betriebsbereiche . . . . .	24
2. Aktiver Bereich . . . . .	26
3. Sperrbereich . . . . .	29
4. Übersteuerungsbereich . . . . .	32
B. Einige besondere physikalische Effekte . . . . .	35
1. Verhalten bei hohen Stromdichten . . . . .	35
2. Lawineneffekte, Durchbruchspannung . . . . .	38
3. Emitterflußpotential . . . . .	42
4. EARLY-Effekt, Sperrschichtberührung . . . . .	43
C. Dynamische Eigenschaften . . . . .	45
1. Ersatzschaltbild für kleine sinusförmige Signale . . . . .	46
a) Betrieb bei niedrigen Frequenzen . . . . . Bedeutung des EARLY-Effektes S. 48. — Einfluß des Basisbahn- widerstandes S. 50.	46
b) Betrieb bei hohen Frequenzen . . . . .	54
2. Vierpoldarstellungen . . . . . Betriebsformeln bei gegebenem Generator und gegebener Last S. 68.	65
3. Ersatzschaltbild für Schalteranwendungen . . . . .	70
D. Strom- und Spannungsabhängigkeit der Kennwerte . . . . .	78
E. Temperaturabhängigkeit der Kennwerte . . . . .	80

	Seite
F. Thermisch-elektrische Wechselwirkungen . . . . .	84
1. Sperrschichttemperatur, Wärmewiderstand und Verlustleistung . . . . .	86
Stationärer Fall S. 87. — Instationäre Fälle S. 89.	
2. Wanderung des Arbeitspunktes und thermische Instabilität . . . . .	97
Arbeitspunktverschiebungen S. 99. — Thermische Instabilität S. 102.	
G. Rauschen . . . . .	110
<b>IV. Schaltungstechnik . . . . .</b>	<b>117</b>
A. Allgemeine Überlegungen . . . . .	118
B. Einstellung des Arbeitspunktes . . . . .	121
1. Einfluß der Transistorkennwerte . . . . .	122
2. Stabilisierungsschaltungen mit konstanten Widerständen . . . . .	125
a) Unstabilisierte Schaltung . . . . .	126
b) Stabilisierungsschaltung mit einem Widerstand zwischen Kollektor und Basis . . . . .	127
c) Schaltung mit Hilfsbatterie im Basiskreis . . . . .	129
d) Schaltung mit Gegenkopplung durch einen Widerstand in der Emitterzuleitung . . . . .	131
e) Stabilisierung durch gemischte Gegenkopplung . . . . .	134
f) Gemeinsame Stabilisierung mehrerer Transistorstufen . . . . .	135
3. Stabilisierungsschaltungen mit temperaturabhängigen und nicht- linearen Widerständen . . . . .	136
a) Stabilisierung mit temperaturabhängigen Widerständen . . . . .	137
b) Stabilisierung mit nichtlinearen Widerständen . . . . .	139
C. Niederfrequenzverstärker . . . . .	141
1. Verstärker für kleine Signale . . . . .	142
a) Wahl der Grundsaltung . . . . .	142
b) Verstärkerschaltungen . . . . .	148
RC-Kopplung S. 148. — Transformatorkopplung. S. 156.	
c) Verzerrungen . . . . .	158
d) Gegenkopplung . . . . .	161
2. Verstärker für große Signale . . . . .	167
a) Klasse A-Betrieb . . . . .	168
b) Gegentakt-Klasse B-Betrieb . . . . .	175
D. Hochfrequenzverstärker . . . . .	182
1. Neutralisierte Verstärker . . . . .	187
a) Kopplung mit Einzelkreisen . . . . .	189
b) Kopplung mit Bandfiltern . . . . .	194
2. Verstärker mit Rückwirkung . . . . .	201
a) Schwingsicherheit einer Transistorstufe . . . . .	202
b) Veränderungen der Durchlaßkurve . . . . .	207
c) Verstärkung . . . . .	211
3. Mischstufen . . . . .	214
a) Mischstufen mit fremdem Oszillator . . . . .	215

## Inhaltsverzeichnis

VII

	Seite
b) Selbstschwingende Mischstufen . . . . .	224
Selbstschwingende Mischstufe für den Mittelwellenbereich S. 225. —	
Selbstschwingende Mischstufe für Kurzwellen S. 232. — Selbst-	
schwingende Mischstufe für 100 MHz S. 236.	
4. Verhalten bei großen Signalen . . . . .	240
a) Verstärkungsregelung und Kreuzmodulation . . . . .	240
b) Störerscheinungen bei großen Kollektorwechselspannungen . . . . .	244
<b>E. Impuls- und Schalterbetrieb . . . . .</b>	<b>248</b>
1. Statische Einstellung und Stabilisierung des Arbeitspunktes . . . . .	249
a) Übersteuerungsbereich . . . . .	250
b) Sperrbereich . . . . .	254
c) Durchbruchgebiet . . . . .	256
2. Schaltverhalten des Transistors . . . . .	258
a) Widerstandslast . . . . .	260
Zeitkonstanten im aktiven Bereich S. 260. — Emitterschaltung	
S. 270. — Kollektorschaltung S. 282.	
b) Kapazitive Last . . . . .	287
Emitterschaltung S. 288. — Kollektorschaltung S. 295.	
c) Induktive Last . . . . .	301
Erreichen des Durchbruchgebietes S. 306. — Schaltungen zur	
Spannungsbegrenzung S. 307.	
3. Belastungsfragen . . . . .	310
4. Schaltungsbeispiele . . . . .	316
a) Impulsverstärker . . . . .	316
Statische Einstellung S. 316. — Dynamisches Schaltverhalten S. 321.	
— Spezielle Impulsverstärkerschaltungen S. 336.	
b) Bistabiler Multivibrator . . . . .	346
Statische Einstellung S. 347. — Dynamisches Schaltverhalten	
S. 354.	
<b>Anhang . . . . .</b>	<b>366</b>
A. 1 Formelzeichen, Definitionen und Schreibweisen . . . . .	366
A. 2 Einige Vierpolgleichungen und ihre Transformationen . . . . .	373
A. 3 Herleitung einiger Gleichungen für den inneren Transistor. . . . .	376
A. 4 Sperrschichtkapazität und Sperrschichtdicke . . . . .	380
A. 5 Herleitung von Formeln für den Schalterbetrieb bei Widerstandslast	382
A. 6 Ersatzwerte für die Sperrschichtkapazitäten . . . . .	390
A. 7 Kenndatenübersicht eines HF-Schalt-Transistors . . . . .	392
<b>Literaturverzeichnis . . . . .</b>	<b>394</b>
<b>Sachverzeichnis . . . . .</b>	<b>400</b>