

GASELEKTRONIK I

VON

THEODOR WASSERRAB

O. PROFESSOR AN DER RHEIN.-WESTF. TECHNISCHEN HOCHSCHULE
AACHEN



BIBLIOGRAPHISCHES INSTITUT • ZÜRICH

HOCHSCHULTASCHENBÜCHER-VERLAG

INHALTSVERZEICHNIS

<u>EINLEITUNG</u>	21
0.1 Energieelektronik	21
0.1.1 Energie- und Nachrichtenelektronik	21
0.1.2 Gas- und Festkörperelektronik	21
0.1.3 Röhren und Ventile	27
0.2 Die Gasentladungsventile	30
0.2.1 Bauformen	30
0.2.2 Vakuumtechnologie	32
0.2.3 Füllgase	33
a) Permanente Gase	33
b) Metalldfimpfe	34
c) Gasgemische	34
0.2.t Die Werkstoffeigenschaften von Hg	36
0.3 Die Gaselektronik	37
0.3.1 Die physikalische Forschung	37
a) Die historische Entwicklung	37
b) Die gegenwärtige Situation	39
0.3.2 Beschränkung des Gegenstandes.....	41
a) Begrenzung auf nur eine Gasart	44
b) Begrenzung auf nur eine Entladungsform...	44
c) Begrenzung auf elementare Theorie	44
0.3.3 Maßsystem	45
1. <u>DIE ATOMTHEORIE</u>	47
1.0 Vorbemerkungen	47
1.0.1 Historisches	47
1.0.2 Quanten	49
a) Elektron	50
b) Atome	50
c) Photonen	50
1.0.3 Atomare Größen und Größenverhältnisse	50
1.1 Die Struktur der Atomhülle	51
1.1.1 Bohrsches Modell und Schrödinger-Gleichung..	51
1.1.2 Das Termschema	51
1.1.3 Das Quecksilberatom	64
1.2 Die energetischen Austauschvorgänge	60
1.2.1 Übersicht über die Arten des Energieaus-	
tausches	60
1.2.2 Energieaustausch bei elastischen Stößen	71
1.2.3 Quantenhafter Energieaustausch	72
1.3 Die Wirkungsquerschnitte	74
1.3.1 Begriffsbestimmung	75
1.3.2 Wechselwirkung Atom-Atom	76
1.3.3 Wechselwirkung Elektron-Atom	76
1.3.1) Ramsauer-Effekt	79

1.4	Die statistischen Gesetzmäßigkeiten der an- geregten Zustände.....	80
1.4.1	Das Prinzip des detaillierten Oelchge- wichts.....	80
1.4.2	Die Besetzung der Terme.....	82
1.4.3	Spontane und induzierte Emission (Gas-Laser).....	85

2. DIE MOLEKULARE BESCHREIBUNG DER GASFÖRMIGEN

	<u>MEDIEN</u>	90
2.1	Die Grundbegriffe.....	90
2.1.1	Ideale Gase.....	90
2.1.2	Reale Gase und Dämpfe.....	91
	a) Reale Gase.....	91
	b) Sattedampf.....	94
2.1.3	Gasgemische.....	95
	a) Neutralgase.....	95
	b) Teilweise Ionisierte Gase.....	95
	c) Das technische Vakuum.....	96
2.2	Die kinetische Gastheorie.....	98
2.2.1	Die Druckverteilung im Schwerfeld (Barome- ter forraael).....	98
2.2.2	Die Maxwell-Boltzmannschen Verteilungs- funktionen.....	101
	a) Die Geschwindigkeitsverteilung der x-Komponente.....	101
	b) Die kugelsymmetrische Maxwellsche Ge- schwindigkeitsverteilung.....	102
	c) Die Energieverteilung.....	106
2.2.3	Die Anwendung der Verteilungsfunktionen.....	108
2.3	Ungerichtete und gerichtete Bewegungen.....	111
2.3.1	Die mittlere freie Weglänge.....	112
2.3.2	Die Weglängenverteilung.....	117
2.3.3	Die Diffusion.....	118

3. DIE ERZEUGUNG UND VERNICHTUNG VON LADUNGS-

	<u>TRÄGERN</u>	121
3.1	Die Trägererzeugung im Gasraum.....	121
3.1.1	Die Ionisierung durch Elektronenstoß.....	121
	a) Ionisierung durch Elektronen homogener Geschwindigkeit.....	121
	b) Ionisierung durch Elektronen mit Maxwell- scher Geschwindigkeitsverteilung.....	121
	c) Ionisierung Im elektrischen Feld.....	121
3.1.2	Thermische Ionisierung.....	126
3.2	Die Trägerbefreiung an Oberflächen (Elek- tronenemission).....	130
3.2.1	Die Glühemission.....	112
3.2.2	Die Feldemission.....	117
3.2.3	Die Photo-elektrische Emission.....	140

3.2.4	Die Elektronenemission durch Ionenstoß	140
	a) Potentielle Elektronenbefreiung	140
	b) Kinetische Elektronenbefreiung	142
3.3	Die Trägervernichtung	144
3.3.1	Rekombination Im Gasraum	144
3.3.2	Trägerneutralisierung an Oberflächen	145
	a) Leiteroberflächen	145
	b) Isolierte Oberflächen	148
4.	<u>DIE BEWEGUNG VON LADUNGSTRÄGERN</u>	150
4.1	Die Ladungsträgerbewegung im Vakuum	150
4.1.1	Die Ladungsträgerbewegung im elektrischen Feld	150
4.1.2	Die Ladungsträgerbewegung im homogenen magnetischen Feld	151
4.1.3	Die Ladungsträgerbewegung in gekreuzten elektrischen und magnetischen Feldern	153
4.2	Die Ladungsträgerbewegung Im Gasraum	155
4.2.1	Die thermische Bewegung der Ladungsträger...	155
4.2.2	Die Ladungsträgerbewegung im elektrischen Feld	158
4.2.3	Die Diffusion der Ladungsträger	165
	a) Die Diffusion im feldfreien Raum	165
	b) Die Diffusion im elektrischen Bremsfeld..	169
4.2.4	Die ambipolare Diffusion	170
4.2.5	Die Ladungsträgerbewegung im Magnetfeld	174
	a) Die Ladungsträgerbewegung im homogenen Magnetfeld	174
	b) Die unipolare Diffusion Im homogenen Magnetfeld	176
	c) Die ambipolare Diffusion im homogenen Magnetfeld	176
4.3	Die Schwingungen von Ladungsträgern	176
5.	<u>DIE GRUNDFORMEN ELEKTRISCHER ENTLADUNGEN...</u>	179
5.1	Die Fallgebiete	180
5.1.1	Fallgebiete mit vernachlässigbarem Raumladungseinfluß	180
5.1.2	Fallgebiete mit vorherrschendem Raumladungseinfluß	184
	a) Die unipolare Raumladungsströmung	186
	b) Die Kennlinien der Hochvakuumdioden	191
	c) Die bipolare Raumladungsströmung	191
5.2	Die Plasmen	197
5.2.1	Das homogene Plasma	197
5.2.2	Das nichthomogene Plasma	200
	a) Unterscheidung zwischen Plasma und ionisiertem Gas	200
	b) Der Übergang zwischen Plasma und Raumladungsschicht	201
5.2.3	Das vollständige Gleichungssystem eines Plasmas	206

5.3	Die Meßmethoden der Plasmaphysik (Plasma- diagnostik).....	208
5.3.1	Übersicht über die Meßmethoden.....	208
5.3.1A	a) Elektrische Messungen.....	208
	b) Photographische Meßmethoden.....	209
	c) Spektroskopische Methoden.....	209
	d) Weitere optische Methoden.....	210
	e) Mikrowellenmethoden.....	210
	f) Isotopen-Meßverfahren.....	211
5.3.1B	a) Elektrische Sonden.....	211
	b) Magnetische Sonden.....	212
5.3.2	Die Langmuir-Sonde.....	212
6.	<u>DIE PHXNOMENOLOGIE DER NIEDERDRUCKENT-</u> <u>LADUNGEN.</u>	220
6.1	Unselbständige Entladungen.....	220
6.2	Die selbständigen Entladungen.....	221
6.2.1	Einfluß eines Fremdstromes auf die Zünd- spannung.....	22s
6.2.2	Die Glimmentladung.....	227
6.2.3	Die Bogenentladung.....	212
6.3	Simulation und Ähnlichkeitsprinzip.....	234
6.3.1	Die Simulation von Gasentladungen.....	234
6.3.2	Ersatzschaltungen.....	236
6.3.3	Die Ähnlichkeitsgesetze.....	240
7.	<u>DIE STATIONSRE HQ-NIEDERDRUCKENTLADUNG</u>	248
7.1	Das kathodiache Entladungsgebiet.....	249
7.1.1	Die Glühkathoden-Entladung.....	249
	a) Die Struktur des Kathodengebietes einer Glühkathoden-Entladung.....	249
	b) Die Betriebsarten der Glühkathodenent- ladung.....	251
7.1.2	Die Hg-Kathodenentladung.....	252
	a) Die Beschreibung der Vorgänge im Katho- denfleck.....	252
	b) Die Struktur des Kathodengebietes einer Hg-Kathode.....	256
7.2	Die axial homogene Säule.....	261
7.2.1	Der Einfluß des Gasdrucks auf die Säulen- form.....	261
	a) Die Prefallaäule.....	263
	b) Die Diffusionssäule.....	267
	c) Die thermische Säule.....	271
	d) Vergleichende Betrachtung der drei Säü- lenformen.....	271
7.2.2	Die Erweiterungen der Theorie der Diffu- sionssäule.....	280
	a) Die Säule mit beliebigem Säulenquer- schnitt.....	280
	b) Die ringförmige Säule (Die elektroden- lose Entladung).....	281

	c) Die Säule endlicher Länge.....	284
	d) Der Einfluß anregender Stöße.....	286
	e) Strömendes Neutralgas.....	289
	f) Der Einfluß eines magnetischen Fremdfeldes.....	290
7.2.3	Der Einfluß der Stromstärke auf die Säulenform.....	291
	a) Die Subnormale Säule.....	291
	b) Die Säule mit Eigenmagnetfeld.....	293
	c) Die Säule bei Berücksichtigung des Elektronenpartialdruckes.....	296
	d) Die Streuwirkung der Ionen (Gvosdover-Effekt).....	297
7.3	Die axial nicht homogene Säule.....	299
7.3.1	Die örtlich fixierte Doppelschicht.....	299
	a) Die Doppelschicht an Verengungen.....	299
	b) Die Doppelschichtspannung.....	301
	c) Der Trägerdruck.....	305
	d) Die Grenzstromdichte von Doppelschichten.....	308
	e) Die Grenzstromdichte.....	310
	f) Der axiale Druckgradient.....	313
7.3.2	Die Doppelschichten an Gittern.....	313
	a) Stromaufteilung an Gittern.....	313
	b) Einschnürungen.....	314
	c) Sekundärplasma.....	314
7.3.3	Schwankungserscheinungen und Schwingungen...	316
	a) Laufende Schichten.....	316
	b) Rauschen.....	317
	c) Elektroakustische Wellen.....	318
7.4	Das anodische Entladungsgebiet.....	319
7.4.1	Der Anodenfall.....	319
7.4.2	Der homogene Anodenfall.....	321
7.4.3	Die Anodenflecken.....	323
7.4.4	Der Einfluß von Gittern.....	325
8.	<u>DIE NICHTSTATIONÄRE NIEPERDRUCKENTLADUNG</u>	327
8.1	Der Zündvorgang.....	327
8.1.1	Die Anoden-Zündung.....	328
	a) Statische Betrachtung.....	328
	b) Dynamische Betrachtung bei Glühkathoden..	330
	c) Dynamische Betrachtung bei Hg-Kathode....	330
8.1.2	Die Gitterzündung.....	333
	a) Statische Betrachtung.....	333
	b) Die dynamische Gitterzündung.....	338
8.1.3	Der Einschaltvorgang von Thyatronen.....	341
8.2	Die Stromänderung.....	346
8.2.1	Die Frequenzgang-Methode (Kleinsignalverhalten).....	347
8.2.2	Die Methode der Übergangsfunktion.....	350
8.2.3	Der Kommutierungsvorgang.....	353
8.3	Der Löschvorgang.....	354
8.3.1	Der Anoden-Nachstrom.....	355
	a) Der "statische" Anoden-Nachstrom.....	355
	b) Der "dynamische" Anoden-Nachstrom.....	359
	c) Der Nachstromverlauf.....	362
8.3.2	Der Gitter-Nachstrom.....	363

9.	<u>DIE TECHNIK DER GASENTLADUNGSVENTILE</u>	368
9.1	Die Betriebseigenschaften und Kenngrößen....	368
9.1.1	Die Betriebsarten von Stromrichterventilen..	368
9.1.2	Die Betriebsfunktionen	371
9.1.3	Die Kenngrößen mit statistischem Verhalten..	375
9.2	Die Ventilfunktionen und deren Störungen....	382
9.2.1	Die Gittersperrung	382
	a) Der Potentialverlauf	382
	b) Der Einfluß von Ladungsträgern	382
	c) Die Steuerglitterbeschaltung	381
9.2.2	Die Zündung	385
	a) Die Gitterzündung	385
	b) Die Kathodenzündung	387
	c) Zündversager	388
9.2.3	Die Stromleitung	389
	a) Die Quecksilberdampfströmungen	389
	Die kathodische Dampfströmung	389
	Die anodische Dampfströmung	392
	Das Spritz-Hg	393
	b) Die Brennspannung	393
	Der lange Bogen im Gleichstrombetrieb....	394
	Messungen an technischen Stromrichter-	
	ventilen im Pulsbetrieb	396
	Die inhomogene Bogenentladung	397
	c) Die Sekundärzündung	400
	d) Die Stromunterbrechung	402
9.2.4	Der Löschvorgang	403
	a) Die Kommutierungs-Rückzündung	401
	b) Die Kommutierungs-Sperrbeanspruchung	405
	c) Die Kommutierungs-Rückzündung bei Hoch-	
	spannung	408
9.2.5	Die Anodensperrung	409
	a) Die Zündspannung technischer Entladungs-	
	strecken	409
	b) Die Nennsperrspannung	411
	c) Die Reihenschaltung von Ventilen	413
9.2.6	Der Sperrspannungswechsel	415
	a) Die Schonzeit	415
	b) Die Freiwerdezeit	416
	c) Die Durchzündung	418
9.3	Meß- und Dämpfungsverfahren	420
9.3.1	Messung des Sperrvermögens	420
9.3.2	Messung weiterer Ventileigenschaften	421
9.3.3	Umschalterschwingungen und deren Bedämpfung... .	421
	Literaturverzeichnis	423
	Sachwortverzeichnis	451