

W. GLASER

GRUNDLAGEN DER
ELEKTRONENOPTIK

55.1030

GRUNDLAGEN DER ELEKTRONENOPTIK

VON

DR. WALTER GLASER

ORDENTLICHER PROFESSOR AN DER TECHNISCHEN HOCHSCHULE
WIEN

MIT 445 TEXTABBILDUNGEN



WIEN
SPRINGER-VERLAG
1952

ALLE RECHTE, INSBESONDERE DAS DER ÜBERSETZUNG
IN FREMDE SPRACHEN, VORBEHALTEN

COPYRIGHT 1952 BY SPRINGER-VERLAG IN VIENNA

PRINTED IN AUSTRIA

Vorwort.

Das vorliegende Buch beabsichtigt, in lehrbuchmäßiger Darstellung die theoretischen Grundlagen der Elektronenoptik darzulegen. Es sollen insbesondere die *Methoden* der theoretischen Elektronenoptik so ausführlich dargestellt werden, daß der Leser die weitere Spezialliteratur kritisch verfolgen und selbständige Untersuchungen durchführen kann. Dem Techniker soll das Buch vor allem eine Hilfe bei der Lösung von Dimensionierungsfragen bieten.

Besondere Vorkenntnisse werden weder aus der Elektronenphysik noch aus der geometrischen Optik vorausgesetzt. Die Darstellung kann vielmehr auch dem Studenten zur Einführung in diese Fachgebiete dienen, ja im dritten Teil auch einen ersten Zugang zur Wellenmechanik eröffnen. Die Wellenmechanik wurde in möglichst anschaulicher Weise als eine natürliche, durch neue experimentelle Erfahrungen geforderte *Verallgemeinerung der klassischen Mechanik* entwickelt. Da an der jungen Wissenschaft der Elektronenoptik in gleicher Weise der Physiker, Techniker, Optiker und der Vertreter der angewandten Mathematik interessiert sind, das Buch also zwischen verschiedenen Disziplinen eine gewisse Mittlerrolle zu spielen hat, war es nötig, bei der Entwicklung der Grundlagen manchmal etwas weiter auszuholen.

Die Darstellung ist in erster Linie durch *didaktische* und nicht durch systematische Gesichtspunkte bestimmt. Für die einzelnen Abschnitte ist eine gewisse Abgeschlossenheit angestrebt worden. Die dabei unvermeidlichen Wiederholungen schaden dem Anfänger nicht: Er lernt so eine und dieselbe Sache von verschiedenen Gesichtspunkten kennen; dem eiligen Leser aber, insbesondere dem vielbeschäftigten Techniker, der keine Zeit hat, das Buch vom Anfang bis zum Ende systematisch durchzustudieren, nützen sie, indem sie ihm das rasche Zurechtfinden ermöglichen. Eine starke Gliederung durch Unterteilung des Stoffes wurde deshalb vorgenommen. Um den Fluß der Darstellung nicht zu unterbrechen, haben wir die Literaturangaben und ergänzende Bemerkungen in Anmerkungen am Ende des Buches zusammengefaßt. Nummern in eckigen Klammern verweisen auf diese Anmerkungen.

Um zu einem noch handlichen Lehrbuch zu gelangen, mußte der Stoff entsprechend abgegrenzt werden. Wir haben uns dazu auf die eigentlichen *optischen* Probleme, also auf die Führung, Fokussierung und Ablenkung von Elektronenbündeln in makroskopischen Feldern beschränkt. Auch haben wir die engere Theorie der Zylinderlinsen nur kurz gestreift, da diese in den Darstellungen der Massenspektroskopie ausführlich behandelt wird. Ebenso liegt es in der Natur unserer Darstellung, daß wir den technischen Aufbau und konstruktive Details der elektronenoptischen Geräte, insbesondere der Übermikroskope, und die verschiedenen Präparationsmethoden nicht einbezogen haben. Hierüber existieren ausführliche buchmäßige Darstellungen (vgl. das Literaturverzeichnis am Ende des Buches). Vor allem sei hier auf B. v. BORRIES, *Die Übermikroskopie*, Berlin 1949, und auf V. E. COSSLETT, *Practical Electron Microscopy*, London 1951, hingewiesen. Einen ersten Überblick über diese Fragen kann auch das Bändchen *Elektronenmikroskopie* von H. MAHL und E. GÖLZ (Leipzig 1951) vermitteln.

Die Umstände bei der Entstehung dieses Buches waren ziemlich wechselvoll. Ein druckfertiges Manuskript wurde im Herbst 1938 für einen Berliner Verlag fertiggestellt. Die Zeitumstände verhinderten jedoch das Erscheinen des Buches. Frau Dr. CHRISTINE SCHÜRER rettete später den größten Teil der ersten Niederschrift. Nachdem mir meine Kollegen L. FLAMM und H. THIRRING 1947 einen neuen Wirkungskreis in Wien geboten hatten, konnte ich unter Benützung meiner Universitätsvorlesungen über Elektronenoptik das Manuskript neuerlich umarbeiten. Die Reinschrift besorgte Frau M. FRITSCH-KAUDER, wofür ich ihr hier bestens danke. Nachkriegsschwierigkeiten verzögerten jedoch die Herausgabe durch meinen ersten Wiener Verleger um weitere zwei Jahre. Da inzwischen eine Reihe wichtiger Arbeiten in Europa und Übersee erschienen waren, habe ich daher, nunmehr für den Verlag Springer, das Manuskript nochmals umgearbeitet und auf den neuesten Stand gebracht. Die Herstellung dieser letzten Reinschrift besorgte mein Mitarbeiter H. GRÜMM. Insbesondere hat er mit großem Verständnis die Abbildungen gezeichnet und mir auch sonst mit Rat und Tat geholfen, wofür ich ihm auch an dieser Stelle bestens danke.

Ferner möchte ich auch jenen Fachkollegen meinen besten Dank sagen, die mich durch Ratschläge, Übersendung von Sonderdrucken, Bildern usw. unterstützt haben. Beim Lesen der Korrekturen haben mich R. BEER, M. ORTNER, F. PUTZ, H. ROBL und P. SCHISKE, beim Beschaffen der Literatur R. CHORHERR tatkräftig unterstützt, wofür ich ihnen hiermit bestens danke. Vor allem möchte ich dem Springer-Verlag für sein großzügiges Entgegenkommen, das geduldige Eingehen auf viele Wünsche und die bewährte gute Ausstattung des Buches meinen besten Dank sagen.

Wien, im Juli 1952.

W. Glaser.

Inhaltsverzeichnis.

Seite

Einleitung	1
Abbildungsfelder und Gaußsche Dioptrik.	
I. Elektronenbewegung im elektrisch-magnetischen Feld	17
1. Das elektrische Feld und die von ihm auf Elektronen ausgeübten Kräfte	17
2. Kraftwirkung auf Elektronen im magnetischen Feld	19
3. Der Energiesatz	21
4. Dimensionen und Einheiten der elektromagnetischen Größen	22
5. Grundkonstanten des Elektrons	24
6. Elektronenbewegung bei hohen Geschwindigkeiten	24
7. Ablenkondensator und Ablenspule als Beispiele	27
8. Ähnlichkeitssätze der Elektronenbewegung	30
II. Analogie zwischen Lichtstrahlen und Elektronenbahnen in elektrischen Feldern	35
9. Lichtbewegung und mechanische Bahnkurven	35
10. Der Brechungsexponent als Funktion des Potentials	38
11. Krummlinige Lichtstrahlen in inhomogenen optischen Mitteln	39
12. Elektronenbewegung im elektrischen Feld als Brechung an den Potentialflächen	39
13. Herleitung der Differentialgleichungen für die Lichtstrahlen in inhomogenen optischen Mitteln aus dem Brechungsgesetz	41
14. Die Krümmung der Elektronenbahnen	43
15. Begriff des ebenen und des rotationssymmetrischen elektrischen Feldes	44
16. Zeichnerische Bahnermittlung in ebenen und rotationssymmetrischen elektrischen Feldern	46
17. Das Prinzip des kürzesten Lichtweges (Fermatsches Prinzip)	47
Die Hamiltonsche Hauptgleichung	51
18. Anschauliche Herleitung des Prinzips der kleinsten Wirkung	52
III. Optische Abbildung durch symmetrische elektrische Felder	54
19. Begriff der Gaußschen Dioptrik	54
20. Achsennahe Strahlen in ebenen-symmetrischen elektrischen Feldern	55
21. Achsennahe Bahnen in rotationssymmetrischen elektrischen Feldern (Meridianstrahlen)	58
22. Abbildung durch flache achsennahe Elektronenbahnen	60
23. Abbildung durch flache achsennahe Elektronenstrahlen in nichtsymmetrischen ebenen Feldern	61
24. Abbildung durch flache achsennahe Elektronenbahnen in rotationssymmetrischen Feldern mit überlagerter Ablenkung	64
25. Der Einfluß der Raumladung	66
Äußere Raumladung	67
Der Einfluß der Eigenladung des Elektronenstrahlbündels	68
26. Achsennahe Bahnen bei hohen Elektronengeschwindigkeiten (relativistische Massenkorrektur)	74
27. Spiegelung und Brechung von Elektronenstrahlen im homogenen elektrischen Feld	75
IV. Optische Abbildung durch rotationssymmetrische magnetische Felder	83
28. Die „lange“ Magnetspule (homogenes Feld) als abbildendes System	83
29. Abbildungseigenschaften eines rotationssymmetrischen Magnetfeldes	86
V. Berechnung elektrisch-magnetischer Abbildungsfelder	89
30. Über das von einer elektrischen Ladung erzeugte Feld (Gaußscher Satz)	89
31. Abhängigkeit des elektrostatischen Feldes von den Elektrodenspannungen (Green-scher Satz)	92
32. Darstellung des rotationssymmetrischen elektrischen Feldes in Reihenform	94

	Seite
33. Krümmung und Deformation der brechenden Potentialflächen	95
34. Reihendarstellung des ebenen elektrischen Feldes	98
35. Darstellung des allgemeinen elektrostatischen Feldes in Reihenform	99
Darstellung in Zylinderkoordinaten	99
Darstellung in kartesischen Koordinaten	103
36. Das von elektrischen Strömen erzeugte Magnetfeld	106
Das skalare magnetische Potential	107
Das zu einem Magnetfeld gehörende Vektorpotential	107
Das Biot-Savartsche Gesetz	109
37. Darstellung des rotationssymmetrischen magnetischen Feldes in Reihenform ...	114
38. Darstellung des allgemeinen magnetischen Feldes in Reihenform	116
39. Darstellung des allgemeinen, zeitlich veränderlichen, rotationssymmetrischen, elektromagnetischen Feldes	118
40. Geschlossene Ausdrücke für das rotationssymmetrische elektrische und magnetische Feld	122
VI. Elektronenbewegung und Abbildung im allgemeinen rotationssymmetrischen elektrisch-magnetischen Feld.	125
41. Elektronenbewegung im allgemeinen rotationssymmetrischen elektrisch-magnetischen Feld als Strahlenbrechung in einem optischen Mittel	125
Der Larmorsche Satz	127
42. Die allgemeinen Abbildungsgesetze in rotationssymmetrischen elektrisch-magnetischen Feldern (<i>Ausdehnung der Betrachtungen von III, 22 und IV, 29 auf windschiefe Strahlen</i>)	128
Der Lippichsche Satz in der Elektronenoptik	134
Abbildung eines virtuellen Gegenstandes (Projektivvergrößerung)	134
Zusammensetzung zweier elektronenoptischer Abbildungen	137
Abbildung durch Elektronenspiegel	139
43. Einige allgemeine Eigenschaften der achsennahen Elektronenbahnen im überlagerten elektrisch-magnetischen Feld	142
Hohe Elektronengeschwindigkeiten	144
44. Der Helmholtz-Lagrangesche Satz	145
VII. Das begrenzte elektrisch-magnetische Feld als elektronenoptische Linse (Tangentenabbildung)	147
45. Begriff und Bestimmung von Haupt- und Brennpunkten	147
46. Die auf die Hauptpunkte bezogene Abbildungsgleichung. Begriff der Knotenpunkte	152
47. Ersatz eines abbildenden Feldes durch Hauptebenen und Brennpunkte	154
48. Konstruktion des zugeordneten Strahls	155
49. Zusammensetzung zweier optischer Abbildungen zu einer einzigen, gleichwertigen Abbildung	156
VIII. Experimentelle Feldausmessung und Bahnbestimmung.	157
50. Der elektrolytische Trog	157
51. Das Gummimembranmodell	161
52. Feldbestimmung nach der Methode des Widerstandsnetzes (Maschenverfahren) ..	163
Das Maschenverfahren (Relaxationsmethode)	167
53. Bahnbestimmung durch Fallbewegung im Potentialgebirge (Gravitationsmodell) ..	173
54. Mechanische und automatische Elektronenbahnzeichner	178
55. Ausmessung von magnetischen Linsenfeldern	181
IX. Strenge Durchrechnung einer typischen magnetischen Polschublinse	184
56. Typischer Verlauf des Magnetfeldes in Polschuhlinsen	184
57. Strenge Berechnung der Elektronenbahnen im einfachen Glockenfeld	186
58. Die Abbildungsgleichung	189
59. Die Kardinal Elemente des Glockenfeldes	193
Kleinste Brennweite	195
Die obere Grenze für die Vergrößerung eines magnetischen Objektivs	196
Bild drehung als Funktion der Linsenstärke	197
Die Projektivvergrößerung	198
Obere Grenze der Projektivvergrößerung	200
60. Elektronenoptik eines unsymmetrischen Glockenfeldes	201
Die räumliche Feldverteilung des Glockenfeldes	205

	Seite
X. Numerische Berechnung der achsennahen Elektronenbahnen	207
61. Über die Integration der Differentialgleichung der achsennahen Elektronenbahnen	207
62. Methode der schrittweisen Näherung (Entwicklung nach der Linsenstärke)	208
63. Differenzenmethoden	211
64. Integration durch Teilstücke	212
65. Elektronenoptische Abbildung als Eigenwertproblem	214
XI. Die Elektronenlinsen mit Newtonscher Abbildungsgleichung (Tragweite der Begriffe „Brennpunkt“ und „Brennweite“)	221
66. Existenz von Brennebenen und Kritik des üblichen Brennweitenbegriffes	222
Bedingungen für die Existenz von Brennpunkten und Brennebenen	223
67. Oskulierende Newtonsche Abbildung	225
Oskulierende Newtonsche Abbildung in magnetischen Feldern	226
Hohe Vergrößerung (Grenzbrennweite)	230
Oskulierende Newtonsche Abbildung in elektrischen Abbildungsfeldern	231
68. Die starken Abbildungsfelder mit Newtonscher Abbildungsgleichung	234
Experimentelle Bestimmung der oskulierenden Kardinalpunkte	244
Oskulierende Newtonsche Abbildung höherer Ordnung	246
69. Asymptotische Abbildung	249
70. Die Kardinalpunkte der „schwachen“ und „kurzen“ Elektronenlinsen	251
Quantitative Kennzeichnung des „schwachen“ Glockenfeldes	255
Übersicht über die Anwendbarkeit der verschiedenen Brennweitendefinitionen ..	256
XII. Die Farbabweichung bei Elektronenlinsen	256
71. Das chromatische Zerstreungsscheibchen	257
72. Die Farbabweichung im magnetischen Glockenfeld	262
Untere Grenze des Farbfehlers für das Glockenfeld bei günstigster Wahl des Halbwertsbreite	266
73. Bestimmung des Farbfehlers bei numerisch gegebenen Elektronenbahnen	267
74. Bestimmung von oberen Grenzen für den Farbfehler von Elektronenlinsen	269
XIII. Aperturfragen beim Elektronenmikroskop	272
75. Elektronenstrahler und Brennfleck	272
76. Stromdichteverteilung und „Größe“ des Brennflecks	276
77. Die Apertur der Objektbestrahlung	279
XIV. Feldbestimmung und Kenngrößen bei starken Magnetlinsen	283
78. Das Magnetfeld bei Anwesenheit von ferromagnetischen Stoffen	283
79. Der axiale Feldverlauf in ungesättigten Polschuhlinsen	286
Axialer Feldverlauf in ungesättigten Polschuhlinsen (Rohrlinsen) in Abhängigkeit von den Polschuhdimensionen	290
80. Abhängigkeit des Feldes von Polschuhdimensionen und Durchflutung in gesättigten Polschuhlinsen	293
Darstellung des Feldes gesättigter Polschuhlinsen	296
81. Magnetische Glockenfelder mit steilerem Feldabfall. Darstellung ungesättigter Polschuhlinsen	297
82. Elektronenoptische Abbildung durch die erweiterten Glockenfelder	301
Die oskulierenden Kardinalpunkte für die Felder $\nu = 2$; $3/2$ und $\nu \rightarrow \infty$	304
83. Weitere streng durchrechenbare Magnetlinsen	306
1. Feldabfall nach einer e -Potenz	306
2. Feldmodell für ungesättigte Polschuhe	307
84. Ein Näherungsverfahren für die Durchrechnung starker Magnetlinsen	309
85. Die optischen Kenngrößen von magnetischen Elektronenlinsen in Abhängigkeit von Polschuhabmessungen und Betriebsdaten bei ungesättigten Polschuhen	312
XV. Elektrostatistische Elektronenlinsen	315
86. Ein streng durchrechenbares elektrisches Abbildungsfeld	315
87. Annähernde Darstellung des Feldes der elektrostatistischen Dreielektrodenlinse ..	319
88. Bestimmung der Kardinalpunkte elektrostatistischer Elektronenlinsen durch numerische Bahnintegration	323
Elektronenbahnen bei parabelförmigem Achsenpotential	324
Spiegelwirkung	328
Linsen mit endlicher Elektrodendicke	329
Ausdehnung auf stark geneigte Bahnen	329

	Seite
89. Angenäherte optische Konstanten von Lochblendenlinsen.....	330
90. Ermittlung der Kardinalelemente elektrostatischer Linsen durch angenäherte Lösung eines Eigenwertproblems	335
91. Angenäherte Bestimmung der Kardinalelemente elektrostatischer Linsen mit Hilfe der Bahnen im Glockenfeld	339
92. Experimentelle Ausmessung der Kenngrößen elektrischer Linsen	341
Theorie der geometrischen Aberrationen.	
XVI. Erweiterung der mechanisch-optischen Analogie auf die Elektronenbahnen in Magnetfeldern	346
93. Elektronenbewegung als optisches Problem.....	346
Die Euler-Lagrangeschen Gleichungen	347
Variation der Zeit (Allgemeiner Energiesatz)	350
94. Das Prinzip der kleinsten Wirkung	352
95. Die Hamilton-Jacobische Differentialgleichung.....	353
96. Die Hamiltonsche Fundamentalgleichung	354
97. Die Elektronenbahnen als Extremalen eines Variationsprinzips.....	354
98. Das elektrisch-magnetische Feld als anisotropes optisches Mittel	356
99. Elektronenbahnen und Wirkungsfunktion (Eikonal) im elektrisch-magnetischen Feld	357
Der Jacobische Satz.....	358
100. Entwicklung des Brechungsexponenten in axialsymmetrischen elektrisch-magnetischen Feldern	359
101. Die Gaußsche Abbildung	362
XVII. Theorie der Aberrationen	362
102. Begriff der Korrektur eines optischen Systems	362
103. Die Wirkungsfunktion in axialsymmetrischen Abbildungsfeldern.....	364
104. Berechnung der Bildfehler dritter Ordnung	369
105. Die Aberrationskurven in der Gaußschen Bildebene	372
106. Der Öffnungsfehler	373
Der Öffnungsfehler des einfachen Glockenfeldes	376
Kleinste Öffnungsfehlerkonstante bei günstigster Wahl des Dingorts.....	378
Kleinster Öffnungsfehler bei günstigster Wahl der Feldhalbwertsbreite.....	379
Verlauf des Öffnungsfehlers für andere Feldtypen	380
107. Isotrope und anisotrope Koma (Asymmetriefehler).....	381
108. Astigmatismus eines allgemeinen Strahlenbündels	384
109. Einfluß von Ding- und Bildfeldkrümmung auf die Bildfehler dritter Ordnung ...	388
110. Bildwölbung, isotroper und anisotroper Astigmatismus	390
111. Krümmung des Dingfeldes	395
112. Die isotrope und anisotrope Verzeichnung	396
113. Zusammenfassung über die beiden Arten der Bildfehler	398
114. Die notwendige und hinreichende Bedingung für das Verschwinden von Bild- drehung und Zerdrehungsfehlern im allgemeinen rotationssymmetrischen Mittel ..	399
115. Abhängigkeit der Bildfehler von der Blendenlage und ihre Bedeutung für die Fehlerkorrektur.....	401
Die komafreie Blende und die Fraunhofersche Bedingung	402
116. Das Petzvalsche Theorem	404
117. Über die Korrektur der Bildfehler	405
XVIII. Aberrationskurven im blendenfreien System	408
118. Die achsennahen Bahnen im blendenfreien System	408
119. Die Farbabweichung für das blendenfreie System	410
120. Bildfehlerkoeffizienten und Aberrationskurven für das blendenfreie System	411
XIX. Strenge Berechnung der elektronenoptischen Aberrationskurven des Glocken- feldes	413
121. Bildfehlerkoeffizienten des Glockenfeldes im System mit Blende	413
122. Bildfehlerkoeffizienten des Glockenfeldes im blendenfreien System.....	420
123. Geometrisch-optisches Auflösungsvermögen in Abhängigkeit von Dezentrierungs- winkel und Bündelapertur.....	422
124. Bildfehler der „kurzen“ Elektronenlinsen	423

XX. Die Kaustikfläche der Elektronenlinsen	428
125. Begriff und Berechnung der Kaustik	429
126. Vereinfachung der Gleichungen für das Elektronenbündel	431
127. Die allgemeine Gestalt der Kaustik	434
128. Die Brennfläche eines Abbildungssystems ohne Blende	438
XXI. Elektronenintensität im Bildraum nach der geometrischen Optik	440
129. Die Gleichung der Isophoten im Bildraum der Elektronenlinsen	440
130. Die Isophoten in der Seidelschen Dioptrik	442
131. Zur Ausmessung der Kaustikfläche und der Bildfehler	449
XXII. Elektronenoptische Abbildung bei gestörter Rotationssymmetrie	452
132. Die achsennahen Elektronenbahnen bei gestörter Rotationssymmetrie	452
133. Der axiale Astigmatismus	456
134. Kaustik im System mit gestörter Rotationssymmetrie	463
XXIII. Theorie der Ablenkung von Elektronenstrahlbündeln in elektrischen und magnetischen Ablensystemen	467
135. Problemstellung	467
136. Das elektrische Ablenkkfeld	467
137. Das magnetische Ablenkkfeld	469
138. Entwicklung des Brechungsexponenten im allgemeinen Ablenkkfeld	469
139. Die ideale Strahlablenkung	470
140. Entwicklung des Störungsverfahrens zur Berechnung der Ablenkfehler	473
141. Ablenkfehler und Fleckverzerrungen bei größeren Ablenkungen	478
142. Der Einfluß der Bündelöffnung auf die Fleckverzerrungen	480
143. Das „praktisch homogene“ Ablenkkfeld	484
144. Überlagerte Fokussierung und Ablenkung	486
XXIV. Fokussierung kreisförmiger Elektronenbündel (quasistatische Elektronenbahnen)	489
145. Die Richtungs-Doppelfokussierung	489
146. Eine spezielle Anordnung als Beispiel	493
147. Bedingungen für Felder mit Doppelfokussierung	495

Elektronenoptik und Wellenmechanik.

XXV. Elektronenbewegung als Wellenvorgang	498
148. Korpuskel und Welle	498
149. Die Elektronenströmung im elektrischen Feld	507
XXVI. Die Schrödinger-Gleichung	512
150. Begründung der Schrödinger-Gleichung	512
151. Aufenthaltswahrscheinlichkeit und Dichte des Wahrscheinlichkeitsstromes	515
152. Mittlere Abweichung des Impulsquadrates vom klassischen Wert (Abweichungsrelationen)	517
153. Der wellenmechanische Impulsoperator	522
154. Die Schrödinger-Gleichung für die Elektronenbewegung im elektrisch-magnetischen Feld	526
XXVII. Die kräftefreie Bewegung nach der Schrödinger-Gleichung	528
155. Die Schrödinger-Gleichung für den kräftefreien Fall	528
156. Beugung am Spalt	529
157. Das Huygens-Kirchhoffsche Prinzip	535
158. Fresnelsche Beugungserscheinungen am langen Spalt und an der geradlinigen Schirmkante	541
XXVIII. Die elektronische Abbildung auf Grund der Wellenmechanik	548
159. Die paraxiale Schrödinger-Gleichung im rotationssymmetrischen Feld	548
160. Integration der paraxialen Schrödinger-Gleichung	552
161. Wellenmechanischer Nachweis einer objekttreuen Abbildung	556
162. Abbildung von Rechteck- und Kreislochblende	577

	Seite
XXIX. Die geometrische Elektronenoptik als Näherung der Wellenmechanik.....	590
163. Herleitung des Fermatschen Prinzips der geometrischen Elektronenoptik aus der Schrödinger-Gleichung	590
164. Grenzen der geometrischen Elektronenoptik.....	596
165. Der Begriff der de Broglieschen Wellenlänge und die Grenze für seine Anwendbarkeit	599
166. Die Bewegung der Wellengruppe längs der Elektronenbahn	602
167. Wellenvorstellung und Prinzip der kleinsten Wirkung.....	606
XXX. Die Wellenfunktion eines abbildenden Elektronenbündels im feldfreien Bildraum	607
168. Die Wellengleichung im feldfreien Bildraum.....	607
169. Bestimmung der Wellenflächen aus der Wirkungsfunktion.....	608
170. Die Debyesche Lösung der Wellengleichung für ein Strahlenbündel	609
171. Einführung der Strahlungscharakteristik	611
172. Die Wellenfunktion für ein „Seidelsches“ Elektronenbündel als Funktion der Strahlrichtungen im Bildraum	614
173. Abweichung von der Sinusbedingung	620
174. Der allgemeine Helmholtzsche Satz und der Zusammenhang zwischen den Bündelöffnungen in Ding- und Bildraum.....	621
175. Wellenmäßige Abbildung eines Achsenpunktes.....	625
XXXI. Das Auflösungsvermögen des Elektronenmikroskops.....	627
176. Auflösungsvermögen bei verschwindendem Öffnungsfehler und einer Flächenhelligkeit nach dem Lambertschen Gesetz	627
177. Der Einfluß des Öffnungsfehlers auf das Auflösungsvermögen.....	633
178. Auflösungsvermögen für „Gaußsche Strahlungscharakteristik“.....	636
XXXII. Darstellung der Wellenfunktion im felderfüllten Raum. Erweiterung der Kirchhoffschen Formel auf die Schrödinger-Gleichung im elektrisch-magnetischen Feld.....	648
179. Bestimmung der Wellenfunktion aus ihren Werten in einer vorgegebenen Ebene	648
180. Aufstellung der Greenschen Funktion	652
181. Die Wellenfunktion im Seidelschen Gebiet	656
Anmerkungen und Literatur	660
Abbildungsnachweis	689
Namenverzeichnis.....	691
Sachverzeichnis	694

Einleitung.

Die ungeahnte Bedeutung, welche die Elektronenphysik in unserer Zeit erlangt hat, steht mit einer Reihe von Eigenschaften des Elektrons im Zusammenhang, die gerade dieses Teilchen für viele wissenschaftliche und technische Anwendungen besonders geeignet machen. Das Elektron ist der kleinste stabile und geladene Elementarbaustein der Materie. Es ist das am häufigsten vorkommende Elementarteilchen und kann am leichtesten aus der Materie befreit werden. Seine Masse, d. h. seine *Trägheit* ist die *kleinste* unter allen geladenen Elementarteilchen.

Da der Einfluß eines elektrisch-magnetischen Feldes auf ein geladenes Teilchen der Ladung direkt und der Masse verkehrt proportional ist, erfährt das Elektron in gegebenen Feldern unter allen Teilchen die *größte Beschleunigung*. Bereits relativ schwache Felder bringen Elektronen in kürzester Zeit auf enorm hohe Geschwindigkeiten¹, und die Ablenkung, die diese durch transversale Felder erfahren, folgt fast trägeitslos dem ablenkenden Feld. Man kann so *materielle Wirkungen praktisch trägeitslos* erzielen. Dadurch ist der Elektronenstrahl, d. h. ein Schwarm von rasch dahinfliegenden Elektronen, das gegebene Konstruktionselement für trägeitslose Schalt- und Steuerorgane. Bildlich gesprochen, kann man sagen: Mechanik, Thermodynamik und Elektrotechnik haben in Gestalt von mechanischen Konstruktionen das *Knochengeriüst*, bzw. in Gestalt von Motoren die *Muskeln* unserer technischen Maschinen und physikalischen Apparate geschaffen. Die Elektronenphysik liefert in ihren außerordentlich empfindlichen und schnell reagierenden Schalt- und Steuerorganen das *Nervensystem* dazu. Sie hat aber nicht nur die „motorischen Nerven“ zur Steuerung der Energien geschaffen, sondern auch künstliche Sinnesorgane, wie Photozellen usw. Schließlich übernehmen die modernen elektronischen Rechenmaschinen bereits die Funktionen des Zentralnervensystems, sind also eine Art künstliches Gehirn. Alle diese erstaunlichen Leistungen beruhen letzten Endes auf der praktisch trägeitslosen Steuerbarkeit von Elektronen, die es ermöglicht, komplizierte Umschaltungen in kürzester Zeit mit geringstem Energieaufwand vorzunehmen.

Begriff der Elektronenoptik.

Eine der Hauptaufgaben bei der Konstruktion von Elektronengeräten ist die *Führung, Fokussierung und Ablenkung* von Elektronenbündeln in elektrisch-magnetischen Feldern. Gerade mit diesen Problemen befaßt sich die Elektronenoptik, die somit ein Kernstück der ganzen Elektronenphysik darstellt. Zum Unterschied von der Mechanik, die sich für die Gestalt der *Einzelbahn* und den Bewegungsablauf auf ihr interessiert, bilden *Bahngesamtheiten* und deren Eigenschaften das Objekt der Elektronenoptik. Man kann kurz sagen, daß sich die Elektronenoptik mit der Struktur von *Elektronenbündeln* befaßt. Wichtige Eigenschaften von Bahngesamtheiten (Bündeigenschaften) sind z. B.: die

¹ Elektronen, welche eine Spannung von nur 100 V durchfallen haben, legen in einer Sekunde eine Strecke zurück, die ungefähr dem Erdradius gleichkommt. Bei 100 kV durchfliegen die Elektronen die üblichen Elektronengeräte etwa in einer hundertmillionstel Sekunde.

Wiedervereinigung der Bahnen in Brennpunkten, auf Brennnlinien und Brennflächen; die Führung von Elektronenbündeln längs bestimmter Kurven; Änderungen von Bündelquerschnitten und -intensitäten usw. Eigenschaften solcher „Strahlsysteme“ nennt man allgemein *optische* Eigenschaften. Die Untersuchung der *optischen* Eigenschaften von Elektronenbündeln bildet also den Gegenstand der Elektronenoptik.

Die verschiedenen Methoden zur *Erzeugung* von Elektronenstrahlen rechnen wir dagegen nicht zur eigentlichen Elektronenoptik. Es soll darüber an dieser Stelle nur das Notwendigste gesagt werden. In den meisten Fällen werden die Elektronen aus Metallen (Kathode) ausgelöst. Das Elektron ist bekanntlich ein Bestandteil der Atomhüllen. Jedes der mikroskopisch kleinen Kriställchen, welche ein Metall aufbauen, stellt ein regelmäßiges Atomgitter dar, in dem die äußeren Hüllenelektronen nicht mehr an individuelle Gitteratome gebunden sind. Da sich die auf Elektronen im Innern des Metalls von den Gitterionen ausgeübten Kräfte gegenseitig kompensieren, können wir diese Elektronen im Innern als *frei* beweglich auffassen. Sie bilden eine Art von *Elektronengas*. Nähert sich ein Elektron der Metalloberfläche, so werden die Kraftwirkungen unsymmetrisch und die einseitig nach innen gerichteten Zugkräfte der Gitterionen verhindern das Elektron daran, die Metalloberfläche zu verlassen. Eine ähnliche Erscheinung ist die Oberflächenspannung bei einer Flüssigkeit. Wir können die Elektronen durch entsprechende Energiezufuhr zum „Verdampfen“, d. h. zum Austritt aus der Metalloberfläche bringen. Die zum Elektronenaustritt notwendige Energie kann den Elektronen in verschiedenen Formen zugeführt werden, z. B. als *Wärme*, *Licht*, *Stoßenergie* und *elektrische Energie*.

Bei der *Glühkathode* wird ein Metalldraht in der Regel durch elektrische Aufheizung zum Glühen gebracht, so daß die Elektronen in den umgebenden Raum verdampfen. Bei der *Photokathode* werden die Elektronen durch Licht ausgelöst, das auf die Kathodenoberfläche auffällt. Stoßenergie, zur Auslösung von Metallelektronen kann entweder durch aufprallende Ionen geliefert werden („*kalte Kathode*“), oder durch aufprallende Primärelektronen (*Sekundärelektronenemission*). Schließlich ist es auch möglich, Elektronen mit Hilfe von sehr starken elektrostatischen Feldern aus dem Metall herauszuziehen (*Feldemission*.)

Diese sehr kursorischen Bemerkungen über die Elektronenbefreiung, ein umfangreiches Kapitel der Elektronenphysik [1], mögen für unsere Zwecke genügen. Die mit verhältnismäßig geringen Geschwindigkeiten aus der Kathode austretenden Elektronen bilden zunächst in der Umgebung der Kathode eine negative Raumladungswolke. Wir erhalten Elektronenstrahlen, wenn wir die Kathode in ein gut evakuiertes Glasgefäß einbauen und ihr in einiger Entfernung eine „positiv geladene Platte“ (Anode) gegenüberstellen (Abb. 1). Durch das

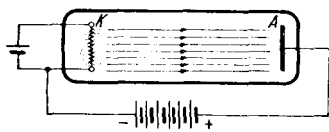


Abb. 1. Erzeugung von Kathodenstrahlen in einem hochevakuierten Kathodenstrahlrohr mit Glühkathode.

zwischen Kathode und Anode bestehende Feld werden die Elektronen von der Kathode abgesaugt und beschleunigt. Diesen Schwarm von rasch dahinfliegenden Elektronen nennen wir einen Kathoden- oder Elektronenstrahl. Das Hochvakuum ist nötig, um Zusammenstöße der Elektronen mit Gasteilchen auszuschalten, die die Elektronen abbremsten würden.

Der Elektronenstrahl als solcher ist unsichtbar. Er bringt aber bestimmte Stoffe (Zinksulfid usw.) zum Aufleuchten. Diese Tatsache wird beim Fluoreszenzschirm ausgenützt. Der Elektronenstrahl vermag auch photographische Schichten zu schwärzen. Auch mit den hiehergehörigen Fragen, die wir nicht zur eigentlichen Elektronenoptik rechnen wollen, werden wir

uns in diesem Buch nicht befassen und verweisen auf die Spezialliteratur [2].

Bei fast allen Geräten der technischen und wissenschaftlichen Elektronik treten elektronenoptische Fragestellungen auf. Gewöhnlich denkt man bei dem Wort Elektronenoptik nur an einen speziellen und besonders wichtigen Fall, nämlich an die *Abbildung* durch Elektronenstrahlen. Aber auch bei Geräten, die nicht der Abbildung dienen, spielen elektronenoptische Fragen in dem oben dargelegten Sinn eine wichtige Rolle. Wir wollen uns im folgenden die Aufgaben der geometrischen Elektronenoptik an einigen typischen Beispielen von Elektronengeräten klarmachen.

Eines der ältesten Elektronengeräte, an dem sich die geometrische Elektronenoptik entwickelt hat, ist die Braunsche Röhre. Sie dient entweder als Kathodenstrahloszillograph zur Aufzeichnung rasch veränderlicher Strom- und Spannungsverläufe, oder als Empfangsröhre beim Fernsehen.

Braunsche Röhre.

Abb. 2 zeigt die wesentlichen Teile einer Braunschen Röhre. Von der Glühkathode K , einem Wolframdraht, gehen Elektronen aus, die durch die Spannung zwischen Kathode und erster Anode A_1 beschleunigt werden. Zwischen dem ersten und dem zweiten Anodenzyylinder A_2 liegt eine weitere Spannung, welche im Spalt zwischen beiden Zylindern ein elektrisches Feld erzeugt, das auf das hindurchtretende Elektronenbündel fokussierend wirkt (Elektronenlinse). Auf diese Weise wird auf dem Leuchtschirm S ein scharfer, intensiv leuchtender Fleck erzeugt. Die Intensität des Bündels kann durch die am Steuerzylinder W

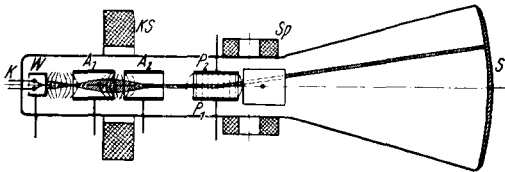


Abb. 2. Schema einer Braunschen Röhre mit elektrischer bzw. magnetischer Konzentrier- und Ablenkeinrichtung.

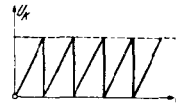


Abb. 3. Kippspannung.

(Wehnelt-Zylinder) liegende Spannung geregelt werden. In der Braunschen Röhre befinden sich außerdem die beiden Platten P_1 und P_2 des „Ablenkkondensators“. Legen wir an diesen Kondensator eine Spannung, so wird der Elektronenstrahl durch das im Kondensator entstehende Feld in vertikaler Richtung abgelenkt. Die Auslenkung ist dabei in gewissen Grenzen der Ablenkspannung proportional. Auf diese Weise kann die Braunsche Röhre zur Spannungsmessung benützt werden. Legt man an den Ablenkkondensator eine Wechselspannung, so beschreibt der praktisch trägheitslose Elektronenstrahl auf dem Schirm eine dazu synchrone Bewegung. Ein zweiter, zum ersten senkrecht stehender Ablenkkondensator ermöglicht eine Ablenkung des Elektronenstrahls in horizontaler Richtung. Legen wir an den zweiten Kondensator eine mit der Zeit linear wachsende, immer wieder auf Null zurückfallende „Kippspannung“ nach Abb. 3, so wird der Leuchtpunkt auf dem Schirm mit konstanter Geschwindigkeit eine „Zeile“ beschreiben, daraufhin momentan an den Bildschirmrand zurückschnellen, und der Vorgang wird sich ständig wiederholen. Legen wir an das erste Plattenpaar die zeitabhängige Meßspannung, an das zweite die Kippspannung, deren Betrag proportional mit der Zeit wächst, so beschreibt der Leuchtpunkt auf dem Schirm eine Kurve, welche den Zeitablauf der Meßspannung wiedergibt. Handelt es sich speziell um die Aufzeichnung

eines periodischen Spannungsablaufes, so kann man die Periode der Kipp-schwingung τ_k gleich der des zu messenden Vorganges wählen. Ist die Periode kürzer als die Nachwirkungszeit auf der Netzhaut (zirka $\frac{1}{20}$ sec), so ist der Zeitablauf der Meßspannung als stehende Kurve am Bildschirm dauernd sichtbar. Da fast jeder physikalische Vorgang in eine entsprechende variable elektrische Spannung umgesetzt werden kann, stellt die Braunsche Röhre als Kathodenstrahloszillograph ein äußerst wirksames Hilfsmittel zur genauen zeitlichen Analyse sehr rasch veränderlicher Vorgänge (z. B. Druckverlauf in Explosionsmotoren usw.) dar.

Man kann das Fokussierungsfeld zwischen den beiden Anodenzylindern A_1 und A_2 auch durch das Magnetfeld einer stromdurchflossenen Konzentrierspule KS ersetzen. Ebenso kann der Ablenkkondensator durch ein Paar von Ablenkspulen Sp ersetzt werden.

Das elektronenoptische Problem bei der Braunschen Röhre besteht zunächst in der Erzeugung eines möglichst kleinen intensiven Schreibleckes auf dem Schirm, der ein verkleinertes Bild der Anodenblende, oder der in Anodennähe entstehenden engsten Strahleinschnürung darstellt. Bereits um die Jahrhundertwende wurde die konzentrierende Wirkung einer stromdurchflossenen Spule entdeckt und zu diesem Zweck ausgenutzt [3]. Es war gerade die Arbeit „Über die Wirkungsweise der Konzentrierspule in Braunschen Röhren“ von H. BUSCH aus dem Jahre 1926, welche einen entscheidenden Impuls zur Entwicklung der Elektronenoptik gab [4]. Dort zeigte H. BUSCH, daß die Elektronen, welche von einem Achsenpunkt ausgehen, durch die Wirkung des rotationssymmetrischen Feldes wieder in einem Achsenpunkt vereinigt werden und ferner, daß das als unendlich dünn aufgefaßte Feld der Magnetspule auf den Strahlengang der Elektronen ebenso einwirkt wie eine dünne Glaslinse auf den Strahlengang des Lichtes. Zwischen den Entfernungen Kathode—Spule und Spule—Schirm besteht also bei scharfem Leuchtfleck die gewöhnliche Linsengleichung. Auf diese Weise hatte man einen ersten Anhaltspunkt dafür, an welcher Stelle die Konzentrierspule am zweckmäßigsten anzuordnen ist usw. Wenn auch im Anschluß an die erwähnte Publikation noch ein großes Stück experimenteller und theoretischer Arbeit zu leisten war, bis man wirklich berechtigt war, von einer geometrischen Elektronenoptik zu sprechen, so kann man doch mit gutem Grunde das Erscheinungsjahr dieser Arbeit als das Geburtsjahr der Elektronenoptik betrachten.

Außer bei der *Fokussierung* des Elektronenbündels, treten elektronenoptische Fragestellungen auch bei der *Ablenkung* des Strahls auf. Man will ja, daß der im nichtabgelenkten Zustand punktförmige Schreibleck auch bei der Ablenkung punktförmig bleibt und ferner, daß die Größe der Ablenkung stets der angelegten Ablenkspannung oder dem Ablenkstrom proportional ist. Schließlich können die Ablenkungs- und Fokussierungsfelder ineinandergreifen und sich gegenseitig beeinflussen.

Fernsehröhre.

Beim Fernsehen spielt die Braunsche Röhre auf der Empfängerseite als *Fernsehröhre* eine entscheidende Rolle. Im Prinzip wird sie auch auf der Senderseite bei dem von V. K. ZWORYKIN entwickelten *Ikonskop* verwendet [5]. Abb. 4 zeigt schematisch den Aufbau. Es handelt sich dabei um eine der Braunschen Röhre ähnliche Anordnung. An Stelle des Fluoreszenzschirmes tritt hier die „Mosaikplatte“ M . Sie besteht aus einer Glimmerplatte,

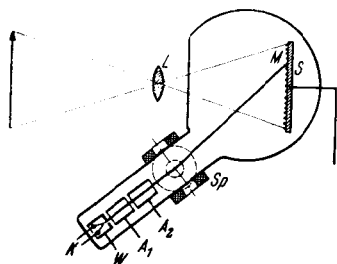


Abb. 4. Schema eines Ikonskops.

die auf der Hinterseite mit einem leitenden Belag versehen ist (Signalplatte S). Auf der Vorderseite trägt sie ein ungemein feines Mosaik diskreter Silbertröpfchen (einige μ Durchmesser), welche mit Cäsium photoelektrisch besonders empfindlich gemacht sind. Die Platte M stellt also ein Mosaik von zahlreichen winzigen Photozellen dar. Zusammen mit der Signalplatte bildet jedes Silbertröpfchen einen Miniaturkondensator.

Wird nun durch eine Glasoptik L das Bild eines Gegenstandes auf die Mosaikplatte projiziert, so laden sich die einzelnen Kondensatoren entsprechend der auf sie auffallenden Lichtintensität mehr oder weniger stark auf. Auf diese Weise wird das Lichtbild in ein Mosaik elektrischer Ladungen umgesetzt. Führt man jetzt einen Elektronenstrahl zeilenweise über das Ladungsmosaik, so entlädt er der Reihe nach die Miniaturkondensatoren, und dies ergibt eine Folge entsprechender Stromimpulse zwischen Signalplatte und Kathode. Damit wurde das *Nebeneinander* des Ladungsmosaiks in ein *Hintereinander* von Stromimpulsen verwandelt. Nach entsprechender Verstärkung können diese Fernsignale einem Ultrakurzwellensender (Meterwellen) zugeführt und ausgesendet werden.

Auf der Empfängerseite werden die von der Antenne aufgefundenen Signale verstärkt und dem Wehnelt-Zylinder einer Braunschen Röhre zugeführt. Wenn wir nun den Schreibfleck dieser Röhre vollkommen synchron zum Abtastfleck der Senderöhre zeilenweise über den Fluoreszenzschirm führen, so entspricht sein Helligkeitswert punktweise dem Ladungswert auf der Mosaikplatte und damit dem Helligkeitswert des ferngesendeten Objekts.

Die Synchronisierung von Sende- und Empfängeröhre wird dadurch erreicht, daß die Kippspannungen beider Röhren vom gleichen Signalgenerator auf der Sendeseite gesteuert werden, wie aus dem Schema Abb 5 hervorgeht. Auch beim Fernsehen wird so wie beim Film die Trägheit der Netzhaut zur Übertragung von bewegten Bildern ausgenützt. Vom Grundgedanken des Zworykinschen Ikonoskops ausgehend, wurden eine Reihe von modernen Bildfängerröhren entwickelt [6].

Die elektronenoptischen Probleme sind sowohl beim Ikonoskop wie auch bei der Fernröhre die gleichen und decken sich mit den Problemen, welche wir bei der Braunschen Röhre erwähnt haben.

Bildwandler.

Bei den vorhergehenden Elektronengeräten hat es sich lediglich um die möglichst scharfe, verkleinerte Abbildung eines *einigen* Objektpunktes gehandelt. Bei der nun zu besprechenden Anordnung, dem Bildwandler, besteht die Aufgabe in der elektronenoptischen Abbildung eines *endlichen* Bildes. Bildwandler verwendet man zur Umsetzung eines lichtoptischen Bildes in ein Elektronenbild. Abb. 6 zeigt das Schema eines Bildwandlers. Durch das optische System L wird das Bild eines Gegenstandes auf die durchsichtige Photokathode K des Bildwandlers entworfen. Die Photokathode hat die Eigenschaft, daß auf der rechten Seite durch das von links her einfallende Licht Elektronen ausgelöst werden, wobei die von einem bestimmten Flächenelement ausgehende Elektronenzahl der auf dieses Element auffallenden Lichtmenge proportional ist. Um ein Elektronenbild zu erzeugen, müssen die von den einzelnen Flächen-

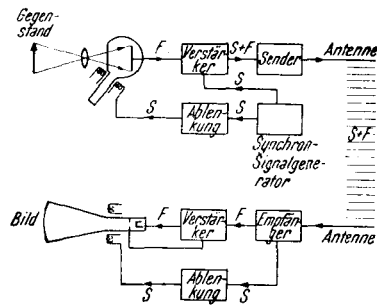


Abb. 5. Schema einer Fernsehübertragung.

elementen der Photokathode ausgehenden Elektronen wieder in entsprechenden Flächenelementen des Leuchtschirms S vereinigt werden. Dazu dient das elektronenoptische Abbildungssystem, bestehend aus einer elektrischen oder magnetischen Linse. Der Leuchtschirm setzt das Elektronenbild wiederum in ein Lichtbild um. Die Bedeutung des Bildwandlers liegt in folgendem: Man kann Photokathoden herstellen, die auch auf unsichtbare Bereiche des Spektrums

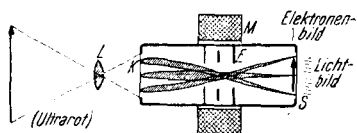


Abb. 6. Schema eines Bildwandlers.

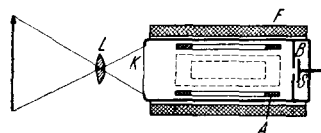


Abb. 7. Bildfeldzerleger.

ansprechen, z. B. auf Ultrarot (Wärmestrahlen). Mit Hilfe des Bildwandlers kann man auf diese Weise im Dunkeln „sehen“. Man kann den Vorgang so auffassen, daß Licht aus dem *unsichtbaren* Frequenzbereich in den *sichtbaren* transformiert wird. Deshalb spricht man auch von einem „Frequenzwandler“. Der u. a. gebräuchliche Name „Elektronenteleskop“ rührt daher, daß der Bildwandler auf die in der Atmosphäre weniger stark absorbierten ultraroten Strahlen anspricht und es ermöglicht, auch bei Nebel und ungünstigen Sichtverhältnissen auf größere Entfernung zu sehen. Da man den Elektronen im elektrischen Abbildungssystem des Bildwandlers auch Energie zuführen kann, ist auf diese Weise eine „Lichtverstärkung“ möglich. Die erste und einfachste Anordnung zur Lichtverstärkung wurde von G. HOLST angegeben [7]. Bei dieser steht die Photoplatte bzw. der Fluoreszenzschirm in geringem Abstand der Photokathode unmittelbar gegenüber. Zwischen der Kathode und dem Fluoreszenzschirm, der gleichzeitig die Anode darstellt, liegt eine Spannung von einigen tausend Volt, welche die an der Kathode ausgelösten Elektronen stark beschleunigt. Infolge ihrer hohen Aufprallgeschwindigkeit auf dem Fluoreszenzschirm (bzw. auf der Photoplatte) bewirken sie hier ein intensives Aufleuchten (bzw. eine starke Schwärzung der Platte). Elektronenoptische Gesichtspunkte spielen bei dieser einfachsten Anordnung noch keine Rolle, da es sich hier um keine eigentliche Abbildung handelt, sondern um das Analogon zur Herstellung einer Kontaktkopie von einer Photoplatte.

In der modernen Fernsehtechnik hat der Bildwandler vielfache Anwendung gefunden. Eine der frühesten darauf beruhenden Anordnungen ist der Bildfeldzerleger nach DIECKMANN-FARNSWORTH [8]. Er macht sich die leichte Ablenkbarkeit der Elektronenstrahlen zunutze und besteht im wesentlichen aus einem Bildwandler mit Ablenkensystem, Abb. 7. Das Fokussierungssystem besteht aus einer langen Magnetspule F , welche die Photokathode im Verhältnis $1:1$ auf die Bildebene B abbildet. In der Bildfläche befindet sich ein kleines Loch und dahinter die Signalplatte S . Durch ein Paar von Ablenkspulen A kann das Elektronenbild zeilenweise vor dem Abtastloch vorbeibewegt werden, so daß die Impulse, welche die Signalplatte jeweils erhält, zu der Intensität der entsprechenden Stelle des Elektronenbildes proportional sind.

Das elektronenoptische Problem beim Bildwandler besteht darin, durch ein elektrisches oder magnetisches Abbildungssystem von einer endlichen Bildfläche ein optisch einwandfreies (d. h. scharfes und unverzerrtes) *Elektronenbild* zu erzeugen.