

## „Vor 140 Jahren entdeckt – der Gleichrichtereffekt“

Pioniere der Halbleitergeschichte – Ferdinand Braun

von Jörg Berkner

Vor 140 Jahren, im November 1874, machte der deutsche Physiker Ferdinand Braun eine merkwürdige Entdeckung: Bei der Messung des Widerstandes von elektrisch leitenden Kristallen stellte er Abweichungen vom Ohm'schen Gesetz fest: Der Widerstand änderte sich mit der Polarität der angelegten Spannung! Damit war ein grundlegendes Gesetz der Physik in Frage gestellt, welches der Lehrer Georg Simon Ohm gut 50 Jahre zuvor entdeckt hatte.



Bild 1: Karl Ferdinand Braun, \* 6. Juni 1850 in Fulda, † 20. April 1918 in New York

Danach verhalten sich bei elektrischen Leitern Strom und Spannung proportional, der Proportionalitätsfaktor wird Widerstand genannt.  $U = R \cdot I$  - so lautet die Formel, die heute jeder Schüler aus dem Physikunterricht als „Ohm'sches Gesetz“ kennt. Dabei ist es unerheblich, in welcher Richtung der Strom den Widerstand durchfließt, also mit welchem Pol der Batterie die beiden Anschlüsse des Widerstandes jeweils verbunden

sind. Ferdinand Braun beobachtete nun aber bei Schwefelmetallen einen je nach Polarität unterschiedlichen Widerstand. In der Zeitschrift „Poggendorfs Annalen“ beschrieb er 1874 diese Entdeckung:

*„Bei einer großen Anzahl natürlicher und künstlicher Schwefelmetalle und sehr verschiedenen Stücken, sowohl Kristallen von so vollkommener Ausbildung, wie ich überhaupt bekommen konnte, als derben Stücken habe ich gefunden, daß der Widerstand derselben verschieden war mit Richtung, Intensität und Dauer des Stromes. Die Unterschiede betragen bis zu 30 pCt. des ganzen Werthes.“<sup>1</sup>*

In **Bild 2** wird das Prinzip von Brauns Versuchsanordnung gezeigt und in **Bild 3** ist eine der Messreihen zu sehen, die er damit aufnahm. Die damals verwendeten Einheiten für Spannung und Strom erscheinen uns heute sehr ungewöhnlich, aber die stromrichtungsabhängigen Messwerte sind klar zu erkennen.

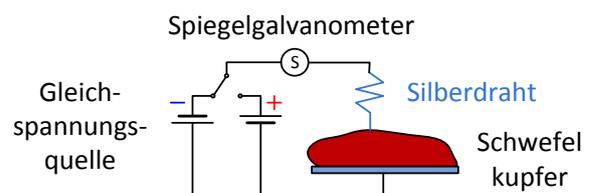


Bild 2: Prinzip von Brauns Versuchsanordnung

Eine schlüssige Erklärung für dieses unsymmetrische Verhalten fand Braun damals nicht. Er vermutete „dünne Gasschichten“ zwischen dem Kristall und dem Kontakt als Ursache. Die Entdeckung des damals 24-Jährigen fand bei den etablierten Physikern kaum Beachtung, zumal sich dafür zunächst keine praktische Anwendung erkennen ließ. Der 27-jährige Franzose Henry Duffet versuchte, die Messungen von Braun nachzuvollziehen, was ihm allerdings nicht gelang. Er zog deshalb 1875 vor

<sup>1</sup> Braun, Über die Stromleitung [2], S.557

der Pariser Akademie der Wissenschaften Brauns Ergebnisse in Zweifel<sup>2</sup>. Werner Siemens hingegen erzielte bei seinen Versuchen ähnliche Ergebnisse.

Tabelle II.

Elektr. Kraft.	Stromrichtung I.		Stromrichtung II.	
	Erster Ausschlag.	Constante Ablenkung.	Erster Ausschlag.	Constante Ablenkung.
—	10,0	7,8	9,0	5,7
—	43,0	32,0	47	38,2
—	61	45 fällt bis 39	63	45 steigt bis 49
—	89	59	105	85
—	155	115 - - 106	204	163 - - 167
1 Bunsen	—	106	—	166
	—	120	—	230

Bild 3: Eine von Brauns Messreihen zur Richtungsabhängigkeit des Widerstandes. Die angelegte Spannung, hier als „elektrische Kraft“ bezeichnet, wurde in 6 Stufen von 1/6 bis 1/1 „Bunsen“ verändert. Diese heute völlig vergessene Spannungseinheit erhielt ihren Namen nach Robert Bunsen, der 1841 die Zink-Kohle-Batterie erfunden hat. 1 Bunsen entspricht dabei etwa 1,5 V. Auch die verwendete Einheit für den Strom ist ungewöhnlich. Die angegebenen Zahlenwerte kennzeichnen einfach nur den stromabhängigen Ausschlag eines Spiegelgalvanometers: je höher der Strom, desto größer der Ausschlag.

Die widersprüchlichen Ergebnisse veranlassten Braun zur Fortsetzung der Untersuchungen und zu einer zweiten, ausführlichen Veröffentlichung im Jahre 1877 unter dem Titel „Über Abweichungen vom Ohm'schen Gesetz in metallisch leitenden Körpern“ [3]. Darin hebt er als entscheidende Bedingung hervor, dass einer der beiden Kontakte eine möglichst kleine Fläche haben muss:

„Die anomalen Erscheinungen treten im allgemeinen am leichtesten auf, wenn wenigstens eine Elektrode einen Draht benutzt, welcher durch eine (...) Spiralfeder gegen das Kristall gepresst wurde.“<sup>3</sup>

Dies ist die erste Beschreibung des Grundprinzips eines Kristallgleichrichters: eine Drahtspitze wird auf einen halbleitenden Kristall aufgesetzt, wobei der entstehende Übergang zwischen Metall und Kristall gleichrichtende Eigenschaften zeigt.

Ein Bauelement mit solchen Eigenschaften wird als Gleichrichter, oder allgemeiner, als Diode bezeichnet. Da ein solches Bauelement also den Strom in eine Richtung durchlässt, in die andere Richtung aber sperrt, kann man mit ihm Wechselstrom in Gleichstrom umwandeln (Bild 4).

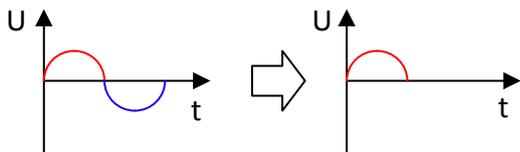


Bild 4: Mit einer Diode kann Wechselstrom zu Gleichstrom umgeformt werden

<sup>2</sup> Kurylo, Ferdinand Braun [6], S.63

<sup>3</sup> Über Abweichungen [3], S.98

## Braunsche Röhre und drahtlose Telegrafie

Nach der Veröffentlichung seiner Ergebnisse im Jahre 1877 wandte sich Ferdinand Braun anderen Themen zu. Ab 1895 befasste er sich mit den Kathodenstrahlen und stellte schon zwei Jahre später der Öffentlichkeit seine bekannteste Erfindung vor, die Kathodenstrahlröhre, nach ihrem Erfinder auch „Braunsche Röhre“ genannt.<sup>4</sup> In den nächsten einhundert Jahren fand diese Erfindung in immer weiter verbesserter Form als Oszillographen-Röhre und besonders als Fernsehbildröhre weltweite Verbreitung. Erst in den letzten zehn Jahren wurde sie in dieser Anwendung von LCD-Bildschirmen abgelöst.

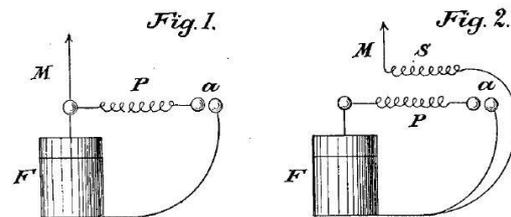


Bild 5: Der von Ferdinand Braun verbesserte Telegrafensender. Er verwendete einen Schwingkreis, bestehend aus einem Kondensator (Leidener Flasche)  $F'$  und einer Spule  $P$ , parallel zur Funkenstrecke  $a$  sowie eine zusätzliche Koppelspule  $S$  zur Transformation des Signals an die Antenne  $M$ . Die Funkenstrecke  $a$  erzeugte bei einem solchen Sender durch einen Funkenüberschlag ein sehr breitbandiges Gemisch von elektromagnetischen Wellen, die zur drahtlosen Übertragung von Signalen verwendet wurden.<sup>5</sup>

Neben der Kathodenstrahlröhre befasste sich Ferdinand Braun mit der drahtlosen Telegrafie. Er verbesserte den von Heinrich Hertz zur Erzeugung von elektromagnetischen Wellen verwendeten Funkensender durch einen Schwingkreis, bestehend aus Kondensator und Spule, sowie durch eine induktive Ankopplung der Antenne (Bild 5). Mit einem solchen Sender konnte er deutlich größere Reichweiten erzielen, als der auf dem gleichen Gebiet arbeitende Italiener Guglielmo Marconi.<sup>6</sup>

## Radioempfang mit dem Kristall-Gleichrichter

Nicht nur auf der Senderseite, auch auf der Empfängerseite bestand Verbesserungsbedarf. Marconi hatte noch ein recht primitives Bauelement, einen sogenannten Kohärer als Empfänger benutzt. Das war ein mit Eisenfeilspänen gefülltes kleines Glasrohr. Wenn die mit der Antenne empfangenen Radiowellen durch den Kohärer geleitet wurden, „klebten“ die

<sup>4</sup> Jäger, Kurt: Lexikon der Elektrotechniker [1], S.57-58

<sup>5</sup> Zeichnung aus Patent CH18577

<sup>6</sup> Guglielmo Marconi (1874-1937), italienischer Radiopionier, ihm gelang 1896 die erste drahtlose Signalübertragung über 3 km. [1], S.239

Feilspäne zusammen, der Widerstand verringerte sich und das Bauelement wurde leitend. Es musste aber nach jedem empfangenen Signal durch ein mechanisches Schütteln wieder in den nichtleitenden Zustand zurückgesetzt werden. Der Kohärer eignete sich also nur zur Anzeige von Radiowellen, nicht aber zur Rückgewinnung eines darin enthaltenen Tonsignals.

Braun erinnerte sich an seine Erfahrungen aus dem Jahr 1874 bei der Messung des Widerstandes von Schwefelmetallen und entwickelte nun einen Kristall-Gleichrichter für Radiowellen. In seiner Patentschrift von 1906 bezeichnete er ihn noch als „Wellenempfindliche[n] Kontakt“<sup>7</sup> Später bürgerte sich für diese Art von Hochfrequenzgleichrichtern die Bezeichnung Kristall-Detektor ein.

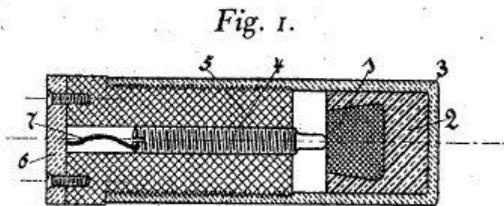


Bild 6: Der Kristalldetektor von Ferdinand Braun: 1 bezeichnet ein Stück Psilomelan (ein halbleitender Kristall), 4 ist die Metallelektrode. Der gleichrichtende Kontakt entstand zwischen diesen beiden Materialien.

Als halbleitendes Material eigneten sich nach Braun Manganverbindungen, wie Psilomelan, Pyrolusit, Manganit und Braunit sowie Bleiglanz, Kupferkies und Schwefelkies.

Solche Kristall-Detektoren wurden in den 1920er Jahren zum bevorzugten Bauelement für Radiobastler, denn sie erlaubten die Rückgewinnung des Tonsignals aus den Radiowellen (Demodulation). Mit nur wenigen zusätzlichen Bauelementen konnte man damit einen einfachen Radioempfänger bauen. In Deutschland hatte die erste Radiosendung im Dezember 1920 stattgefunden<sup>8</sup>, und der Bedarf an kostengünstigen Empfangsgeräten stieg bald an. Um mit solch einem Detektorempfänger Radiosendungen zu empfangen, brauchte man allerdings Geduld und Fingerspitzengefühl, denn der Radioamateur musste mit der Drahtspitze vorsichtig die Oberfläche des Kristalls abtasten, um eine Stelle mit guter Gleichrichterwirkung zu finden. In der zweiten Hälfte der 20er Jahre wurden die einfachen Detektorempfänger dann zunehmend durch Röhrengeräte verdrängt, die viel bessere Empfangsleistungen erbrachten.

In den 30er Jahren erfuhren die Kristalldetektoren erneute Aufmerksamkeit, als für die militärisch bedeutsame Radartechnologie Gleichrichter für sehr hohe Frequenzen gesucht wurden, denn die

<sup>7</sup> Patent DRP 178871 vom 18.2.1906

<sup>8</sup> wikipedia, Geschichte des Hörfunks, [http://de.wikipedia.org/wiki/Geschichte\\_des\\_H%C3%B6rfunks](http://de.wikipedia.org/wiki/Geschichte_des_H%C3%B6rfunks)

damals verfügbaren Elektronenröhren waren dafür zu langsam.

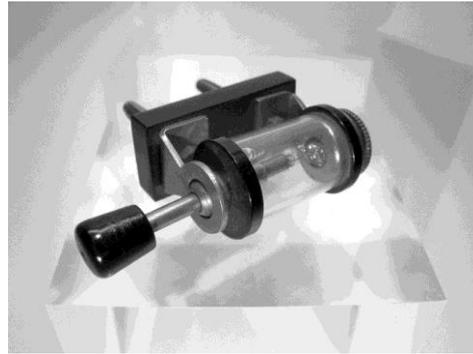


Bild 7: Detektor aus einem Radio-Bausatz. Mit dem linken Hebel konnte im Glasröhrchen eine Drahtspitze auf den rechts befindlichen Kristall aufgesetzt werden. Durch geduldiges Abtasten des Kristalls musste der Radiohörer nun eine Stelle auf dem Kristall finden, die gute gleichrichtende Eigenschaften hatte und daher einen guten Empfang erlaubte.<sup>9</sup>

Zu dieser Zeit waren schon rund 60 Jahre seit Brauns Entdeckung vergangen - die physikalischen Vorgänge in einem Metall-Halbleiter-Kontakt wurden jedoch immer noch nicht verstanden. Die Halbleiter blieben bis Ende der 30er Jahre für die Physiker ein ziemlich ominöses Material. Bekannt ist folgendes Bonmot des Physikers Wolfgang Pauli aus dem Jahre 1931:

„Über Halbleiter sollte man nicht arbeiten, das ist eine Schweinerei, wer weiß ob es überhaupt Halbleiter gibt.“<sup>10</sup>

Erst Walter Schottky konnte 1938 mit seiner Randschicht-Theorie die Vorgänge in einem Metall-Halbleiter-Kontakt zufriedenstellend erklären. Während des Zweiten Weltkrieges forschten in Deutschland Heinrich Welker und Herbert Matare an Hochfrequenzgleichrichtern für die Radartechnik auf der Basis von Halbleitern. Ab 1943 wurden von Siemens etwa 10.000 dieser nun als „Richtleiter“ bezeichneten Detektoren hergestellt.<sup>11</sup>

### Leistungs-Gleichrichter

Bisher haben wir die Entwicklungsetappen des Gleichrichters in seiner Anwendung beim Radioempfang verfolgt. Dabei ging es um hohe Frequenzen, nicht aber um hohe Spannungen und Ströme. Eine zweite bedeutende Anwendung hat der Gleichrichter auch in der Leistungselektronik gefunden. Hierbei geht es zum Beispiel darum, den in Kraftwerken durch Generatoren erzeugten Wechselstrom in Gleichstrom umzuwandeln, weil sich dieser verlustärmer über lange Strecken

<sup>9</sup> Dieses Exponat wurde dem Historischen Archiv durch Herrn Othmar Ritschel gespendet.

<sup>10</sup> Brief an Peierls, 29.9.1931, Wolfgang Pauli – Wissenschaftlicher Briefwechsel mit Bohr, Einstein, Heisenberg u.a. Bd. II: 1930–1939, Springer, 1985, p. 94

<sup>11</sup> vgl. dazu Scriptum Sept. 2012

übertragen lässt. Dabei sind die beiden wichtigsten Kenngrößen eines Leistungsgleichrichters der maximale Strom in Durchlassrichtung und die maximale Spannung in Sperrrichtung. Während in den 20er Jahren des vorigen Jahrhunderts für solche Aufgaben Quecksilberdampfgleichrichter mit beeindruckenden Abmessungen verwendet wurden, führte die Einführung von Halbleiterdioden auf diesem Gebiet zu enormen Verbesserungen der elektrischen Eigenschaften. Allerdings konnte hier das Prinzip des Kristallgleichrichters – Drahtspitze auf Kristall – wegen der geforderten hohen Ströme nicht beibehalten werden. Der gleichrichtende Übergang wurde nun vielmehr von der Oberfläche in das Innere des Halbleitermaterials verlegt; anfangs durch ein Legierung genanntes Verfahren, später durch Diffusion und Implantation.



Bild 8: Silizium-Leistungsdioden von Siemens (1975)

Auf diesem Gebiet wurden bei Siemens im Bereich Halbleiter wichtige Pionierleistungen erbracht. 1946 gründete Eberhard Spenke, der in den 30er Jahren eng mit Walter Schottky zusammen gearbeitet hatte, in dem kleinen fränkischen Ort Pretzfeld das erste Siemens-Halbleiterlabor. Dort wurde das erste industrielle Verfahren zur Herstellung von Halbleiter-Silizium entwickelt, welches heute noch angewendet wird. Die damals weit verbreiteten Gleichrichter aus dem Halbleitermaterial Selen erreichten nur Sperrspannungen von etwa 25 V. Die ersten Silizium-Gleichrichter aus Pretzfeld hingegen zeigten sensationelle Werte: 200V Sperrspannung wurden auf Anhieb erreicht!<sup>12</sup>

Heute bietet Infineon ein umfangreiches Spektrum von Leistungsbaulementen an, vom OptiMOS-Transistor über den lichtgezündeten Thyristor bis zu den IGBT-Modulen. Aber auch die Diode hat längst noch nicht ausgedient: Infineons Silizium-Karbid-Leistungsdioden (SiC) sind besonders für Schaltnetzteile und Motorantriebe geeignet. Infineon hat diese Bauelemente als weltweit erster Hersteller im Jahr 2001 auf den Markt gebracht.

<sup>12</sup> vgl. dazu Berkner: „Vom Wernerwerk zum Campeon. Sternstunden von Siemens Halbleiter und Infineon“, Eigenverlag, 2014, S.30-34

Heute wird schon die fünfte Generation dieser Dioden hergestellt.<sup>13</sup>



Bild 9: Silizium-Karbid-Bauelemente von Infineon

### Quellen

- [1] Jäger, Kurt: „Lexikon der Elektrotechniker“, 1996
- [2] Braun, Ferdinand: „Über die Stromleitung durch Schwefelmetalle“, Annalen der Physik und Chemie, Herausgegeben zu Berlin von J. C. Poggendorf, Leipzig, 1874, S.556-S.563
- [3] Braun, Ferdinand: „Über Abweichungen vom Ohm'schen Gesetz in metallisch leitenden Körpern“, Annalen der Physik und Chemie, Herausgegeben zu Berlin von J. C. Poggendorf, Leipzig, 1877, S.95-S.110
- [4] Ohm, Georg Simon: „Die galvanische Kette, mathematisch bearbeitet“, Riemeier, Berlin, 1827
- [5] Neue Deutsche Biographie, Bd.2 Behaim-Bürkel, Berlin 1955, S.554-555
- [6] Kurylo, Friedrich: „Ferdinand Braun. Leben und Wirken des Erfinders der Braunschen Röhre.“, Moos, München, 1965
- [7] Hofmeister, Ernst: „Hundert Jahre Kristallgleichrichter“, Deutsche Physikalische Gesellschaft, Herbsttagung, Nürnberg, 27.9.1974

### Impressum

Scriptum ist eine Veröffentlichung des Historischen Archivs der Infineon Technologies AG am Standort München Campeon

Redaktion: Jörg Berkner, Michael Zahnbrecher

Bilder: Nobel foundation, public domain (1), HA (2), Patentschrift (2), Infineon (1)

**Ausgabe** Nov 2014, Version: d 2014-11-21b

**Copyright** Alle Rechte bei der Infineon Technologies AG. Die Rechte des Autors auf weitere Verwertung bleiben unberührt. Der Leser ist berechtigt, persönliche Kopien für wissenschaftliche und nicht-kommerzielle Zwecke anzufertigen. Jede darüber hinausgehende Nutzung bedarf der ausdrücklichen schriftlichen Zustimmung der Infineon Technologies AG.

Vorsitzender des Aufsichtsrats: Wolfgang Mayrhuber

Vorstand: Dr. Reinhard Ploss (Vorsitzender), Dominik Asam, Arunjai Mittal, Sitz der Gesellschaft: Neubiberg.

Registergericht: München HRB 126492.

Bei Anmerkungen und Ergänzungen schreiben Sie bitte an [j.berkner@infineon.com](mailto:j.berkner@infineon.com).

<sup>13</sup> Infineon Pressemitteilungen v. 16.2.2009, 26.9.2012