Was sind Halbleiter? Vom Kristalldetektor zum Computerchip

ZWISCHEN METALL UND ISOLATOR

Im Jahr 1833 beschrieb Michael Faraday in London einen Befund, den er selbst einen *extraordinary case* nannte, einen außergewöhnlichen Fall. Silbersulfid, eine Verbindung aus Silber und Schwefel, leitete den Strom umso besser, je wärmer es wurde [1],[2]. Bei Kupfer und anderen Metallen ist es umgekehrt, sie leiten schlechter, wenn sie heiß werden [1]. Faraday hatte, ohne es zu ahnen, als Erster eine typische Eigenschaft eines Halbleiters beschrieben.

Halbleiter leiten den Strom schlechter als Metalle und besser als Isolatoren wie Glas oder Kunststoff. Das allein wäre wenig aufregend. Entscheidend für die Technik ist, dass sich ihre Leitfähigkeit steuern lässt: durch Wärme, durch Licht, durch ein elektrisches Feld und vor allem durch winzige Mengen gezielt eingebauter Fremdatome. Bekannte Beispiele sind Silizium, Germanium, Galliumarsenid, Galliumnitrid und Siliziumkarbid. Aus ihnen bestehen Computerchips, Leuchtdioden, Laserdioden, Solarzellen und die Leistungselektronik in Elektroautos. Warum Halbleiter so funktionieren, kann erst die Quantenphysik erklären.

Ein Kristall, der den Strom nur in eine Richtung lässt

Vierzig Jahre nach Faraday setzte der 24-jährige Ferdinand Braun in Würzburg eine feine Metallspitze auf einen Kristall aus Bleiglanz, also Bleisulfid. Der Strom floss in die eine Richtung gut, in die andere kaum. Braun hatte die erste Halbleiterdiode in der Hand, einen Gleichrichter, und beschrieb den Effekt in einer Arbeit über die Stromleitung durch Schwefelmetalle [3],[4]. Brauchbar wurde die Entdeckung erst Jahrzehnte später: In den frühen Radios diente ein solcher Kristall mit einem feinen Metalldraht als Empfangsdetektor, der sogenannte Kristalldetektor [3].

Verstanden hat damals niemand, was in diesen Kristallen vor sich geht. Mit der klassischen Physik lässt sich weder erklären, warum ein Stoff beim Erwärmen besser leitet, noch, warum ein Kontakt eine Richtung bevorzugt.

Warum Wärme einen Halbleiter leitfähiger macht

Die Erklärung kam mit der Quantenmechanik. Felix Bloch zeigte in einer Arbeit, die 1929 erschien, wie sich Elektronen in einem regelmäßigen Kristallgitter bewegen: Sie dürfen nur Energien in bestimmten Bereichen annehmen, den Bändern [5]. Alan Wilson zog daraus 1931 die Folgerung, die bis heute gilt. Ob ein Stoff ein Metall, ein Isolator oder etwas dazwischen ist, hängt davon ab, wie diese Bänder mit Elektronen gefüllt sind [6].

In einem Halbleiter ist das untere Band, das Valenzband, bei tiefen Temperaturen ganz voll, und darüber liegt nach einer Lücke das leere Leitungsband. Ein volles Band kann keinen Strom tragen, weil kein Elektron einen freien Platz findet, auf den es ausweichen könnte. Erst wenn ein Elektron über die Lücke ins Leitungsband springt, kann es sich bewegen, und das Loch, das es im Valenzband zurücklässt, wandert ebenfalls mit. Bei Silizium ist diese Bandlücke 1,12 Elektronenvolt groß [7]. Ein Bild dazu finden Sie im Artikel über die Fotovoltaik.

Woher bekommt ein Elektron die Energie für den Sprung? Bei Raumtemperatur aus der Wärmebewegung des Kristalls. Wie viele Elektronen es schaffen, hängt sehr stark von der Temperatur T und der Bandlücke E_g ab. Für die Dichte der freien Elektronen in reinem Material gilt näherungsweise:

$$n_i \propto T^{3/2} \cdot e^{-\frac{E_g}{2kT}} \tag{1}$$

Dabei ist k die Boltzmann-Konstante. Der Exponent macht den Unterschied zum Metall. Erwärmen Sie reines Silizium von 27 auf 77 Grad Celsius, steigt die Zahl der freien Ladungsträger nach dieser Formel etwa um das 28-Fache (eigene Rechnung, ohne die leichte Temperaturabhängigkeit der Bandlücke). Faradays Silbersulfid verhielt sich genauso. Absolut bleibt es trotzdem wenig: Bei 300 Kelvin enthält reines Silizium rund zehn Milliarden freie Elektronen pro Kubikzentimeter [8],[7], während im selben Würfel etwa $5 \cdot 10^{22}$ Siliziumatome sitzen (eigene Rechnung aus der Gitterkonstante [9]). Frei beweglich ist also nur ein Elektron unter rund fünf Billionen Atomen.

Ein Fremdatom unter fünf Millionen

Damit lässt sich noch kein Chip bauen. Den eigentlichen Hebel liefern Fremdatome. Baut man in Silizium Phosphor ein, der ein Außenelektron mehr hat, gibt jedes Phosphoratom schon bei Raumtemperatur ein freies Elektron ab, und es entsteht n-leitendes Silizium. Bor mit einem Außenelektron weniger liefert Löcher und macht das Silizium p-leitend. Man nennt das Dotieren. Schon ein Phosphoratom auf fünf Millionen Siliziumatome, also 10^{16} pro Kubikzentimeter, erhöht die Zahl der freien Elektronen gegenüber reinem Silizium ungefähr um das Millionenfache (eigene

Rechnung). Wie aus einem p- und einem n-Gebiet eine Diode oder eine Solarzelle wird, steht im Artikel über die Fotovoltaik, wie daraus ein Schalter wird, im Artikel Wie funktioniert ein Transistor?

Die Kehrseite: Wenn ein Fremdatom auf Millionen den Charakter des Materials bestimmt, dürfen unerwünschte Verunreinigungen noch viel seltener sein. Wie wenig man darüber lange wusste, zeigt eine Bemerkung von Alan Wilson: Er zählte 1931 Silizium noch zu den Metallen, weil es im reinen Zustand gut leiten sollte [6]. Heute stellt etwa die Wacker Chemie in Burghausen Polysilicium für die Chipindustrie mit einer Reinheit von über 99,9999999999 Prozent her [10], also mit weniger als einem fremden Atom auf eine Billion. Wacker-Chef Christian Hartel nennt es „das reinste vom Menschen gemachte Material“ [10]. So perfekt sind diese Kristalle, dass Kugeln aus Silizium sogar geholfen haben, das Kilogramm neu zu definieren [11]. Wie, erklärt der Artikel über das Plancksche Wirkungsquantum.

Warum Silizium nicht leuchtet und Galliumnitrid schon

Fällt ein Elektron aus dem Leitungsband zurück in ein Loch, wird die Energie der Bandlücke frei. In manchen Halbleitern entsteht dabei ein Lichtteilchen, ein Photon, und seine Wellenlänge folgt direkt aus der Bandlücke:

$$\lambda = \frac{hc}{E_g} \approx \frac{1240}{E_g \,\text{in eV}}\,\text{nm} \tag{2}$$

Hier steckt das Plancksche Wirkungsquantum *h* drin, *c* ist die Lichtgeschwindigkeit. Ob ein Halbleiter tatsächlich leuchtet, hängt aber noch von einer Quanteneigenschaft ab, die man im Bändermodell nicht sieht. Bei einer **direkten** Bandlücke kann das Elektron einfach zurückfallen und ein Photon aussenden. Bei einer **indirekten** Bandlücke muss gleichzeitig eine Gitterschwingung des Kristalls mitwirken, und das drückt die Lichtausbeute stark [12]. Silizium hat eine indirekte Bandlücke. Deshalb sind Computerchips aus Silizium, Leuchtdioden aber aus anderen Materialien (Tabelle und Abb. 1).

Material	Bandlücke bei Raumtemperatur	Art der Bandlücke	Grenzwellenlänge nach (2)	typische Verwendung
Silizium (Si)	1,12 eV [7]	indirekt	1107 nm (Infrarot)	Computerchips, Solarzellen
Galliumarsenid (GaAs)	1,4 eV [12]	direkt	886 nm (Infrarot)	Infrarot-LEDs, Laserdioden
Galliumphosphid (GaP)	2,2 eV [12]	indirekt	564 nm (gelbgrün)	frühe rote und grüne Anzeige-LEDs
Galliumnitrid (GaN)	3,4 eV [12]	direkt	365 nm (Ultraviolett)	blaue und weiße LEDs, blaue Laserdioden
Siliziumkarbid (SiC)	3,2 bis 3,4 eV [13]	indirekt [12]	unter 390 nm	Leistungselektronik

Einige wichtige Halbleiter. Grenzwellenlänge: eigene Rechnung nach Gleichung (2). Bei Mischkristallen wie InGaN lässt sich die Bandlücke und damit die Farbe einstellen.

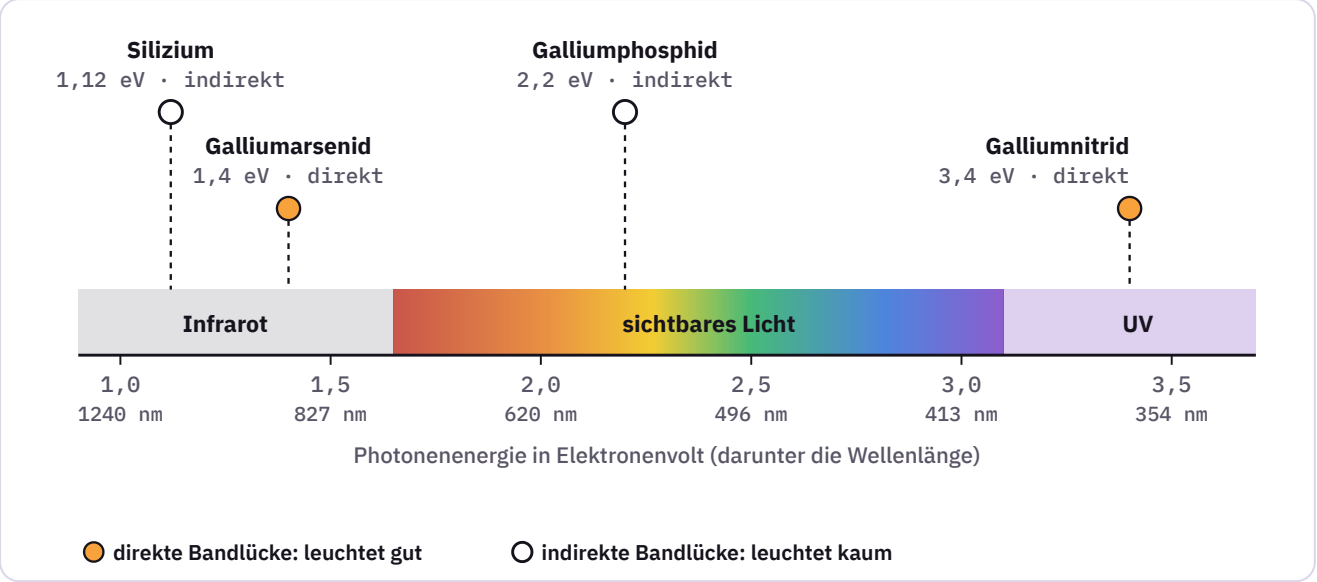


Abb. 1: Bandlücken einiger Halbleiter auf der Energieskala des Lichts. Der sichtbare Bereich reicht ungefähr von 400 bis 750 Nanometern. Eigene Darstellung nach [7],[12], Wellenlängen nach Gleichung (2).

Rote und grüne Leuchtdioden gab es schon in den 1960er-Jahren. Für Blau braucht man eine Bandlücke von knapp drei Elektronenvolt, und daran bissen sich Forscher jahrzehntelang die Zähne aus. Galliumnitrid hatte die passende direkte Bandlücke, ließ sich aber kaum als sauberer Kristall züchten, und vor allem gelang es nicht, es p-leitend zu machen. Ende der 1980er-Jahre bemerkten Hiroshi Amano, Isamu Akasaki und ihre Kollegen in Nagoya, dass mit Magnesium dotiertes Galliumnitrid nach dem Beschuss mit Elektronen p-leitend wurde. Shuji Nakamura bei der kleinen Firma Nichia zeigte wenige Jahre später, dass einfaches Erhitzen genügt, und klärte die Ursache auf: Wasserstoff hatte die Magnesiumatome blockiert [12]. 1994 stellte Nakamura mit seinen Kollegen blaue Leuchtdioden aus Galliumnitrid-Mischkristallen vor, die hell genug für die Praxis waren [14]. Dafür gab es 2014 den Physik-Nobelpreis [15].

Erst die blaue LED machte die weiße möglich: Ein Leuchtstoff wandelt einen Teil des blauen Lichts in Grün und Rot um, zusammen erscheint das als Weiß. Weiße LEDs erreichten 2014 schon mehr als

300 Lumen pro Watt, eine Glühlampe kommt auf etwa 16 [12]. Dass die Elektronen und Löcher dabei auf engem Raum zusammenfinden, verdanken LEDs und Laserdioden den Heterostrukturen, Schichtfolgen aus verschiedenen Halbleitern. Für ihre Entwicklung erhielten Zhores Alferov und Herbert Kroemer im Jahr 2000 den Nobelpreis [16]. Kroemer hatte 1952 in Göttingen promoviert und forschte später in Kalifornien. Er starb im März 2024 [17]. Wie ein Halbleiterlaser arbeitet, beschreibt der Artikel über den Laser.

Siliziumkarbid und Galliumnitrid: Halbleiter für hohe Spannungen

Eine große Bandlücke hilft nicht nur beim Leuchten. Sie macht ein Material auch widerstandsfähiger gegen hohe elektrische Felder und hohe Temperaturen, unter anderem weil Elektronen erst bei viel höherer Energie über die Lücke gerissen werden. Siliziumkarbid, eine Verbindung aus Silizium und Kohlenstoff, hat eine Bandlücke von 3,2 bis 3,4 Elektronenvolt, rund dreimal so viel wie Silizium [13] (Vergleich: eigene Rechnung). Bauteile daraus halten bei gleicher Größe höhere Spannungen aus, werden weniger heiß und können kleiner und leichter gebaut werden [18],[13]. Schon 2015 lief die Serienfertigung von Siliziumkarbid-Dioden und -Transistoren für Spannungen von 600 bis 1700 Volt [19].

Gebraucht werden sie vor allem dort, wo viel Strom umgewandelt wird: in den Wechselrichtern von Elektroautos, die den Gleichstrom der Batterie für den Motor aufbereiten, in Schnellladestationen und in Solaranlagen [18],[13]. Weniger Verlust bedeutet dort mehr Reichweite oder mehr Ertrag [13].

Vom Sand zum Chip

Wirklich groß wurden Halbleiter mit dem Transistor, der 1947 an den Bell Telephone Laboratories in den USA entstand [12]. John Bardeen, Walter Brattain und William Shockley erhielten dafür 1956 den Nobelpreis „für ihre Untersuchungen an Halbleitern und die Entdeckung des Transistoreffekts“ [20]. Wie ein Transistor schaltet, erklärt der Artikel Wie funktioniert ein Transistor? Gebaut werden Chips auf dünnen Scheiben aus einkristallinem Silizium, den Wafern. Die Strukturen werden mit Licht in eine lichtempfindliche Schicht übertragen, ähnlich wie beim Belichten eines Films. Je kürzer die Wellenlänge, desto feiner die Strukturen, und so ist die Industrie bei extremem Ultraviolett angekommen, EUV-Licht mit einer Wellenlänge von 13,5 Nanometern [21].

EUV-Belichtungsmaschinen baut weltweit nur eine einzige Firma, ASML in den Niederlanden. Zwei ihrer wichtigsten Bauteile kommen aus Deutschland: die Spiegel von Zeiss, die das Licht führen, und der nach Firmenangaben stärkste gepulste Industrielaser der Welt von Trumpf, mit dem das Licht erzeugt wird [22]. Peter Kürz von Zeiss, Michael Kösters von Trumpf und Sergiy Yulin vom Fraunhofer-Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik in Jena erhielten dafür 2020 den

Deutschen Zukunftspreis [22]. Die Spiegel bestehen aus vielen Nanometer dünnen Schichten. Ein Fraunhofer-Team in Dresden erreichte damit 2015 einen Rekord von 70,8 Prozent Reflexion bei 13,5 Nanometern [21].

Neue Fabriken in Dresden

In Dresden entstehen derzeit zwei große Chipfabriken, eine davon ist schon in Betrieb. Im Juli 2026 eröffnete Infineon dort nach eigenen Angaben die weltweit größte Fabrik für Leistungshalbleiter und analoge Mischsignal-Chips, mit einer Investition von fünf Milliarden Euro und 1000 neuen Arbeitsplätzen [23]. Nebenan baut ESMC, ein Gemeinschaftsunternehmen des taiwanischen Chipherstellers TSMC mit Bosch, Infineon und NXP. Am 14. September 2026 feierte ESMC Richtfest, gut zwei Jahre nach dem Spatenstich. Laut ESMC liegt der Bau im Zeit- und Kostenplan, die ersten Fertigungsanlagen sollen in der zweiten Jahreshälfte 2027 eingebaut werden [24]. Beides sind Angaben der Unternehmen.

Wo die Quanten im Halbleiter sichtbar werden

Bänder, Löcher und direkte Bandlücken sind schon Quantenphysik. Noch deutlicher wird sie, wenn Halbleiterschichten so dünn werden, dass Elektronen hindurchtunneln. Leo Esaki beobachtete das 1958 an sehr schmalen pn-Übergängen in Germanium [25] und erhielt dafür 1973 den Nobelpreis [26]. Was beim Tunneln passiert, erklärt der Artikel über den Tunneleffekt. Macht man einen Halbleiterkristall nur wenige Nanometer klein, bestimmt seine Größe die Farbe, in der er leuchtet. Mehr dazu unter Quantenpunkte. Faradays außergewöhnlicher Fall ist fast 200 Jahre später zur Grundlage fast aller Elektronik geworden.

Quellen

1. Computer History Museum: *1833: First Semiconductor Effect is Recorded.* The Silicon Engine, computerhistory.org.
2. M. Faraday: *Experimental Researches in Electricity. Fourth Series.* In: Philosophical Transactions of the Royal Society of London (1833), S. 507–522, doi:10.1098/rstl.1833.0022.
3. Computer History Museum: *1874: Semiconductor Point-Contact Rectifier Effect is Discovered.* The Silicon Engine, computerhistory.org.
4. F. Braun: *Ueber die Stromleitung durch Schwefelmetalle.* In: Annalen der Physik 229 (1875), S. 556–563, doi:10.1002/andp.18752291207.
5. F. Bloch: *Über die Quantenmechanik der Elektronen in Kristallgittern.* In: Zeitschrift für Physik 52 (1929), S. 555–600, doi:10.1007/BF01339455.

6. A. H. Wilson: *The theory of electronic semi-conductors.* In: Proceedings of the Royal Society A 133 (1931), S. 458–491, doi:10.1098/rspa.1931.0162.
7. Ioffe-Institut, St. Petersburg: *NSM Archive, Silicon (Si): Band structure and carrier concentration.* ioffe.ru (abgerufen am 28. Oktober 2026).
8. P. P. Altermatt, A. Schenk, F. Geelhaar, G. Heiser: *Reassessment of the intrinsic carrier density in crystalline silicon in view of band-gap narrowing.* In: Journal of Applied Physics 93 (2003), S. 1598–1604, doi:10.1063/1.1529297.
9. P. J. Mohr, D. B. Newell, B. N. Taylor, E. Tiesinga: *CODATA recommended values of the fundamental physical constants: 2022.* In: Reviews of Modern Physics 97 (2025), 025002, doi:10.1103/RevModPhys.97.025002.
10. chemie.de: *WACKER nimmt neue Fertigungslinie für Halbleiter-Polysilicium am Standort Burghausen in Betrieb.* Meldung vom 21. Juli 2025, chemie.de.
11. Bureau International des Poids et Mesures (BIPM), Consultative Committee for Mass: *Mise en pratique for the definition of the kilogram in the SI.* SI-Broschüre, 9. Auflage, Anhang 2, Fassung vom 7. Juli 2021, bipm.org.
12. Königlich Schwedische Akademie der Wissenschaften, Klasse für Physik: *Efficient blue light-emitting diodes leading to bright and energy-saving white light sources.* Scientific Background on the Nobel Prize in Physics 2014, 7. Oktober 2014, nobelprize.org.
13. D. Hautmann: *Semiconductor: How silicon carbide gets a boost.* heise online, 2. Februar 2023, heise.de.
14. S. Nakamura, T. Mukai, M. Senoh: *Candela-class high-brightness InGaN/AlGaN double-heterostructure blue-light-emitting diodes.* In: Applied Physics Letters 64 (1994), S. 1687–1689, doi:10.1063/1.111832.
15. Nobel Prize Outreach: *The Nobel Prize in Physics 2014.* nobelprize.org.
16. Nobel Prize Outreach: *The Nobel Prize in Physics 2000.* nobelprize.org.
17. University of California, Santa Barbara, Office of the Chancellor: *Sad news: Professor Emeritus Herbert Kroemer.* Mitteilung vom 12. März 2024, ucsb.edu.
18. Technische Universität Wien: *CD-Labor für Nachhaltige Siliciumcarbid Technologie.* tuwien.at (abgerufen am 28. Oktober 2026).
19. T. Kimoto: *Material science and device physics in SiC technology for high-voltage power devices.* In: Japanese Journal of Applied Physics 54 (2015), 040103, doi:10.7567/JJAP.54.040103.
20. Nobel Prize Outreach: *The Nobel Prize in Physics 1956.* nobelprize.org.
21. Fraunhofer-Institut für Werkstoff- und Strahltechnik IWS: *Review on the award of the German Future Prize 2020 to Trumpf, Zeiss and Fraunhofer.* Meldung vom 24. November 2020, iws.fraunhofer.de.
22. ZEISS Semiconductor Manufacturing Technology: *ZEISS, TRUMPF and Fraunhofer research team awarded the Deutscher Zukunftspreis.* Pressemitteilung vom 25. November 2020, zeiss.com.
23. Infineon Technologies: *Infineon opens the world's largest fab for power semiconductors and analog/mixed-signal technologies in Dresden.* Pressemitteilung vom 2. Juli 2026, aap.com.au.
24. Focus Taiwan (CNA): *Construction of TSMC fab in Germany on track: ESMC president.* Meldung vom 15. September 2026, focustaiwan.tw.
25. L. Esaki: *New Phenomenon in Narrow Germanium p–n Junctions.* In: Physical Review 109 (1958), S. 603–604, doi:10.1103/PhysRev.109.603.
26. Nobel Prize Outreach: *The Nobel Prize in Physics 1973.* nobelprize.org.

Zitiervorschlag

quanten.de: *Was sind Halbleiter? Vom Kristalldetektor zum Computerchip.* Stand: November 2026. URL: https://quanten.de/halbleiter.html

Texte und Abbildungen © 2026 quanten.de. Nutzung mit Quellenangabe und Link gern, kommerzielle Nutzung nach Absprache: info@quanten.de

Weiterlesen: Fotovoltaik · Transistor · Laser · Tunneleffekt