

Was die Signale der Atome prägt: fundamentale Naturkonstante direkt gemessen/Halbleiter ermöglicht absolute Widerstands-Eichung

Autor(en): **Gerwin, Robert**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizer Ingenieur und Architekt**

Band (Jahr): **99 (1981)**

Heft 27-28

PDF erstellt am: **26.04.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-74524>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Feuerungssektor zu modifizieren. Im Vordergrund stand dabei die Anwendbarkeit für *Gasheizungen*: Wegen den unterschiedlichen Eigenschaften wird Gas nicht nach Kubikmeter, sondern nach «kWh oberer Heizwert» verkauft. Lediglich die Jahresverbrauchsskala der Bemessungsscheibe musste bei sonst gleichbleibenden Grundlagen angepasst werden (Bild 2).

Bei der Bemessung der *Ölbrenner* könnte die Scheibe ebenfalls angewendet werden. Da die Brennerleistungen bestehender Anlagen je länger je mehr durch Verkleinern des Öldurchsatzes gedrosselt werden, steigt dadurch der Feuerungstechnische Wirkungsgrad sowie die Brennerauslastung.

Natürlich kann die *Brennerauslastung* nicht beliebig vermindert werden. Zu beachten ist vor allem die *minimale Abgastemperatur* sowie die *lufthygienische einwandfreie Verbrennung*. Unter Beachtung dieser Randbedingung wäre die Angabe über die minimal notwendige Heizöldurchflussmenge oft wertvoll (Bild 3).

Möglich sind noch *weitere Scheiben-Varianten*: Die maximale jährliche Betriebsstundenzahl bei richtiger Bemessung als Funktion des Klimas und der Raumlufttemperatur könnte beispielsweise zusätzlich auf einer Hilfsskala aufgeführt werden. Damit wäre eine Kontrolle der Anlagen, die mit Betriebsstundenzählern ausgerüstet sind, möglich. Auf weiteren Skalen könnten auch die theoretischen sowie die der Wirklichkeit eher entsprechenden modifizierten Heizgradtage [2] aufgeführt werden. Allerdings ist dann die Genauigkeit kleiner, da das Mikroklima nicht wie bei der Leistungsbemessung vernachlässigt werden darf.

Es wäre ohne weiteres möglich, eine Öl/Gas- Multischiebe mit allen hier aufgeführten und noch einige zusätzlichen Möglichkeiten herzustellen. Vielskalige Berechnungsscheiben sind aber meist unübersichtlich und Ablesefehler häufiger. Eine speziell für jeden Anwendungszweck hergestellte Bemessungsscheibe mit der entsprechenden Anleitung auf der Rückseite bietet diesbezüglich Vorteile.

Literatur

- [1] Weiersmüller, R.: «Abbau der Energieverschwendung: Anpassen der Kesselleistung mit der Bemessungsscheibe». Schweizer Ingenieur und Architekt, Heft 27/28, 1980
 - [2] Empfehlung SIA 380: «Wärmeleistungsbedarf von Gebäuden»
 - [3] Weiersmüller, R.: «Dimensionierungsprobleme bei Heizanlagen in der Stadt Zürich». Schweiz. Bauzeitung Heft 26, 1978
- ferner
«Bauhandbuch '81», Bd. 2, Abschnitt «Energiesparen bei Altbauten», herausgegeben von der Schweizerischen Zentralstelle für Baurationalisierung (CRB) in Zusammenarbeit mit dem BSA, dem SIA und dem SBV, Zürich 1981
- Rüegg, H.: «Energieverluste von Heizungsanlagen und deren Sanierung». Heizung-Klima, 11, 1980
- Keller, A.: «Energiesparmöglichkeiten durch automatische Luftabschlüsse an Gebläsebreunern oder durch motorisierte Rauchgasklappen». Installation, 4, 1978.

Adresse des Verfassers: R. Weiersmüller, dipl. Chemiker, Industriest. 11, 8952 Schlieren.

Was die Signale der Atome prägt

Fundamentale Naturkonstante direkt gemessen / Halbleiter ermöglicht absolute Widerstands-Eichung

Die für den gesamten Atomaufbau entscheidende Naturkonstante, die Zahl α , lässt sich erstmalig praktisch unmittelbar und mit extrem hoher Genauigkeit messen. Unabhängig von Masseinheiten und Materialeigenschaften «sieht» man, wie bisher bei kaum einem anderen Experiment, die *wesentlichen Eigenschaften des Elektrons*. Ausserdem ermöglicht die neue Methode die *Masseneinheit des elektrischen Widerstands* an eine absolute Messgrösse zu koppeln. Dies gelang Klaus v. Klitzing im *Hochfeld-Magnetlabor* des *Max-Planck-Instituts für Festkörperforschung in Grenoble* (Frankreich).

Die in physikalischen Gesetzen auftretenden Naturkonstanten, etwa die Lichtgeschwindigkeit c oder die elektrische Elementarladung e , besitzen einen besonderen Reiz: Sie sind so etwas wie Fingerabdrücke des Schöpfungsgeschehens, hinter denen sich jeweils noch weiter reichende, elementare Gesetzmässigkeiten vermuten lassen. Insbesondere gilt das für die Naturkonstanten ohne Masseinheiten, die reinen Zahlen wie etwa die bei einem Kreis-

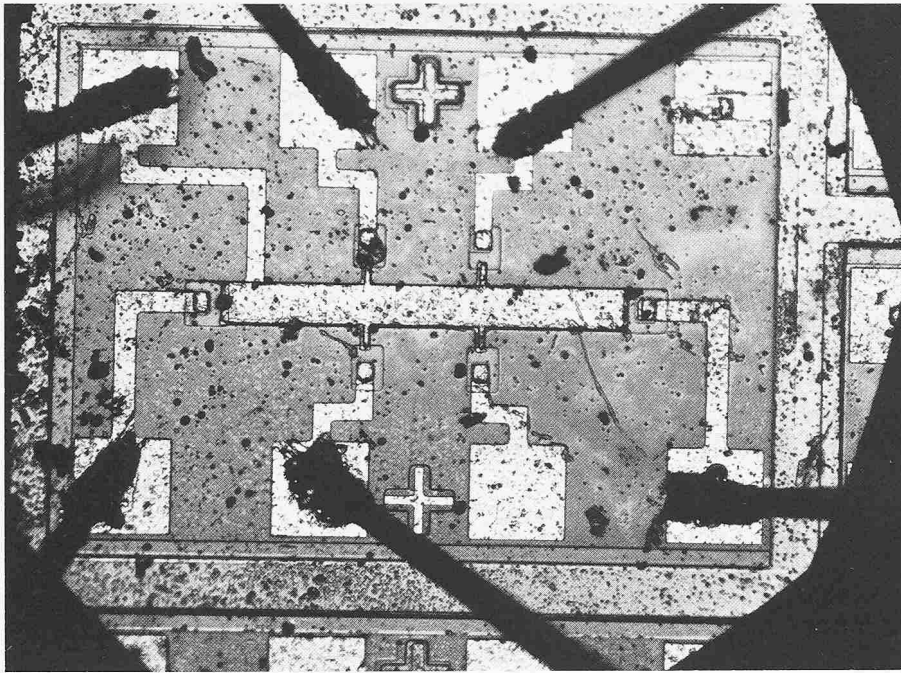
durchmesser und Umfang verbindende Zahl π oder die nach dem Münchener Physiker *Arnold Sommerfeld* benannte *Feinstrukturkonstante* α . Sie verknüpft die Lichtgeschwindigkeit c , die Elementarladung e und das von *Max Planck* zu Beginn dieses Jahrhunderts entdeckte Wirkungsquantum h . Sie bestimmt das gesamte *Wechselspiel von Strahlung und Materie*, tritt also überall dort auf, wo Atome Signale – Licht und sonstige Strahlung – aussenden oder wo umgekehrt solche Signale auf Atome einwirken. Diese Naturkonstante ist wie keine andere prägend für den gesamten Atomaufbau.

Weiterentwicklung der Theorie

Nicht zufällig geriet die Physik in Schwierigkeiten, als sich vor etwa zehn Jahren eine Nichtübereinstimmung des theoretisch errechneten und des praktisch gemessenen α -Werts herausstellte. Erst eine Weiterentwicklung der Theorie brachte schliesslich die Lösung. Dar-

um erscheint die exakte Messung der im Jahre 1916 zunächst zur Erklärung feiner Strukturunterschiede im Wasserstoffspektrum von *Arnold Sommerfeld* in die Atomtheorie eingeführten Feinstrukturkonstanten auch heute weiterhin als wichtig und interessant, insbesondere, da dies jetzt mit Hilfe der von Klaus v. Klitzing entdeckten Methode praktisch direkt möglich ist. Bisher gelang dies nur indirekt durch Kombination einer Reihe anderer, mit entsprechenden Unsicherheiten behafteten Naturkonstanten-Messungen. Klaus v. Klitzing hat jetzt vier solche Messungen auf eine einzige reduziert, die als weitere Naturkonstante nur noch die Lichtgeschwindigkeit enthält. Doch diese ist mit sehr hoher Genauigkeit bekannt.

Ausserdem hat sich gezeigt, dass die bei diesen Experimenten benutzten *Halbleiter-Bauelemente* – sogenannte *Metalloxid-Silizium-Feldeffekt-Transistoren* (MOSFET), die Grundelemente der integrierten Schaltkreise in Mikroprozessoren – auch eine unmittelbare Eichung der elektrischen Widerstandseinheit Ω erlauben. Der mit Hilfe dieser Methode gemessene, sogenannte *Hall-Widerstand* tritt nämlich quantisiert auf, also in fester Abstufung. Unabhängig vom magnetischen Feld, der Temperatur und den geometrischen Dimensionen des benutzten MOSFET-



Die MOSFET-Bauelemente, an denen Dr. v. Klitzing die Quantisierung des Hall-Effekts nachweisen konnte, sind nur 0,4 mm lang und 0,04 mm breit: Die balkenförmige Probe befindet sich in der Mitte des Bildes. Die zur Seite und nach aussen geführten, in rechteckige Kontaktflächen auslaufenden Elektroden dienen dem Anschluss der Proben: links unten «source», rechts unten «drain», links oben «gate» und dazwischen die Elektroden für die Messung der Hall-Spannung. Die Oberfläche des in diesem Mikroskopbild gezeigten MOSFET-Elements ist relativ schmutzig, nachdem damit schon in grosser Anzahl Experimente durchgeführt wurden

Elements, beträgt er für jede Stufe, also jede feste Quantenzahl, immer 6453,198 Ω . Bisher wird der elektrische Widerstand durch eine Drahtwicklung realisiert, ähnlich wie ursprünglich einmal das Meter durch einen Platin-Iridium-Stab festgelegt war. Und wie dort an die Stelle des Stabs eine bestimmte Lichtwellenlänge eines Edelgases getreten ist, also ein unter anderem auch bereits durch die Zahl α geprägtes Atom-Signal, so lässt sich jetzt das Ω unmittelbar an diese Naturkonstante koppeln.

Dass die im atomaren Bereich geltenden Quantenvorschriften hier so in voller Klarheit zutage treten, unabhängig von Massstäben und Materialeigenschaften, hat seinen Grund in einer zweifachen Quantisierung der Elektronen, einerseits durch ein extrem starkes Magnetfeld, andererseits durch die Geometrie des MOSFET-Elements. Sie beschränkt die Bewegung der Elektronen praktisch auf eine Ebene, also nur zwei Dimensionen. Die so gebildete, sehr dünne Ladungsträgerschicht wird bei sehr tiefer Temperatur nur wenige Grade über dem absoluten Nullpunkt einem extrem starken Magnetfeld ausgesetzt. Dadurch können alle Elektronen, die zur Leitfähigkeit des Transistors beitragen, nur ganz bestimmte feste Energiezustände einnehmen. Man erhält, wie der Fachmann sagt, ein *zweidimensionales Elektronengas in quantisiertem Zustand*. Dabei bewirkt die tiefe Temperatur, dass die Elektronen ihre durch das starke Magnetfeld erzwungenen, engen Kreisbahnen auch jeweils

vollenden können, also nur selten mit den Atomen des Siliziumgitters zusammenstossen.

Vollständige Quantisierung

Prof. *Gottfried Landwehr*, der Leiter des zum Max-Planck-Institut für Festkörperforschung gehörenden Hochfeld-Magnetlabors in Grenoble, hielt bereits 1978 einen Vortrag mit dem Titel «MOSFET-Bauelemente als Werkzeuge von überraschend hoher Bedeutung für die Grundlagenforschung in der Festkörperphysik». Er vermutete schon damals, dass die Beweglichkeit eines zweidimensionalen Elektronengases in MOSFET-Elementen bei der Temperatur des flüssigen Heliums ausreichen sollte, um bei starken Magnetfeldern eine vollständige Quantisierung zu erreichen. Landwehrs Schüler, Dr. Klaus v. Klitzing, hatte zu jener Zeit im *Physikalischen Institut der Universität Würzburg* unter Benutzung eines supraleitenden Magneten von 14,6 Tesla Feldstärke bereits ein charakteristisches Verschwinden des elektrischen Widerstands in MOSFET-Elementen als Folge dieses Magnetfeldes zeigen können.

Bei weiterer Erforschung dieses Phänomens – Klaus v. Klitzing arbeitete unterdessen als Heisenberg-Stipendiat im gemeinsamen von der Max-Planck-Gesellschaft und der französischen Forschungsorganisation CNRS in Grenoble betriebenen Hochfeld-Magnetlabor

– erkannte er, dass sich aus dem Verschwinden des elektrischen Widerstands die Feinstruktur-Konstante ermitteln lässt. Klaus v. Klitzing kam zu dem Schluss, dass innerhalb eines bestimmten Energieniveaus jeweils alle freien Elektronen des MOSFET-Elements zum Hall-Effekt beitragen. Dies ist eine innerhalb des Elements auftretende Querspannung, die sich unter dem Einfluss eines Magnetfelds einstellt. Da die Anzahl der voll besetzten Energieniveaus jeweils ganze Werte von 1 bis 10 durchlaufen kann, bedeutete das: Der Hall-Widerstand, aus dem sich die Feinstruktur-Konstante ergibt, ist quantisiert, tritt also jeweils in fester Abstufung auf.

Bestechend einfach

Innerhalb eines Zeitraums von nur zwei Wochen konnte Klaus v. Klitzing in Grenoble seine entscheidenden Messungen durchführen: Sie zeigten Ergebnisse, die nicht zuletzt durch ihre Einfachheit bestechen und die nach ihrer Veröffentlichung in «Physical Review Letters» unter dem Datum vom 11. August 1980 sofort die volle Aufmerksamkeit der Fachkollegen in aller Welt fanden. Insbesondere die für Masse und Eichung verantwortlichen nationalen Laboratorien, in der Bundesrepublik die Physikalisch-Technische Bundesanstalt in Braunschweig, nahmen sich der Sache sofort an. «Für uns ist der v.-Klitzing-Effekt eine Sensation. Bisher mussten wir für die Definition des Widerstands grosse Umwege machen. Jetzt bietet sich eine einfache und direkte Möglichkeit an. Diese Arbeit wird uns durch die Entdeckung von Herrn v. Klitzing sehr erleichtert», bestätigt Prof. *Dieter Kind*, der Präsident der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt. Unterdessen gibt es bereits eine ganze Reihe von weiteren, diese Entdeckung aufgreifenden und weiterführenden Arbeiten.

Eine wesentliche Voraussetzung für den überraschend schnellen Erfolg des Heisenberg-Stipendiaten waren die extrem starken Magnetfelder, die im Grenobler Hochfeld-Magnetlabor zur Verfügung stehen. Mit gut 20 Tesla – beziehungsweise 200 000 Gauss – liegen sie zwar nur um rund 40 Prozent über der Feldstärke des in Würzburg zur Verfügung stehenden supraleitenden Magneten. Doch diese zusätzlichen Tesla waren es, worauf es zunächst ankam. Unterhalb von 10 Tesla tritt der Effekt bei den untersuchten Proben überhaupt nicht auf. Erst bei 20 Tesla waren die Ergebnisse eindeutig. Normalerweise hat der Hall-Widerstand eine Grösse, die neben der

Konzentration der Elektronen auch von der Dicke des Halbleiterelements und der Stärke des Magnetfelds abhängt, somit also nicht auf universelle Konstanten beschränkt ist. Bei einem MOSFET-Element ist das jedoch anders: Der zu steuernde, von aussen angelegte Strom fliesst in einer sehr dünnen Oberflächenschicht des Siliziums von der einen Seite zur anderen, zwischen «source» und «drain» (Quelle und Senke). Die dazu benötigten Elektronen werden durch eine Kondensator-Anordnung erzeugt, bei der das Oxid des Siliziums die Trennschicht des Kondensators bildet. Die eine Elektrode des Kondensators ist die Silizium-Basis, die andere eine parallel zur Oberfläche aufgebraute Metallschicht, die als «gate» (Tor) bezeichnet wird und die Funktion einer Steuerelektrode hat. Mit Hilfe einer positiven Spannung an dieser Elektrode setzt man die Elektronen für den Stromfluss in der dazwischenliegenden Oberflächenschicht des Siliziums frei.

Querverschiebung der Elektronen

Nun treibt ein diese Oberflächenschicht senkrecht durchsetzendes Magnetfeld die Elektronen zur Seite, also quer zu ihrer normalen Bewegungsrichtung. Dies ist der bereits vor 100 Jahren von dem amerikanischen Physiker Edwin Herbert Hall entdeckte und nach ihm benannte Effekt, die Querspannung. Bei entsprechender Stärke des Magnetfelds hängt dieser Effekt jedoch ausschliesslich von der Anzahl der jeweils besetzten Energieniveaus ab. Diese aber lassen sich bei MOSFET-Elementen durch Veränderung der Spannung am Gate einstellen. Dabei liegt die Dicke der leitenden Oberflächenschicht je nach Kondensatorspannung zwischen



Im physikalischen Institut der Universität Würzburg stand ein Supraleitungsmagnet zur Verfügung, der bei wesentlich kleineren Abmessungen ein Feld von maximal 16,6 Tesla liefert. Im Bild links das Vorratsgefäss mit flüssigem Helium zur Kühlung des Magneten und des MOSFET-Bauelements, in der Mitte der Supraleitungsmagnet und rechts das Pumpsystem zur Abkühlung des MOSFET auf Temperaturen unterhalb des Siedepunkts des Heliums, 4,2 Grad über dem absoluten Nullpunkt

2 und 10 millionstel Millimeter (Nanometer). Nur noch innerhalb dieser dünnen Schicht können sich die Elektronen bewegen. Dabei wird auch ein sich in charakteristischer Weise ändernder Widerstand zwischen Quelle und Senke gemessen, der quantisierte Hall-Widerstand. Die Feinstruktur-Konstante ergibt sich aus dem Verhältnis des gemessenen Hall-Widerstands zum Wellenwiderstand des Vakuums.

* * *

Das von den grossen Forschungsorganisationen der Bundesrepublik wie der Max-Planck-Gesellschaft initiierte und von der Deutschen Forschungsgemeinschaft betreute *Heisenberg-Programm* bietet mit angemessenen Stipendien jungen Wissenschaftlern die Möglichkeit, sich – frei von anderen Verpflichtungen – für einige Jahre der Forschung

in ihrem speziellen Interessengebiet zu widmen. Das Programm will einerseits den Fortschritt in der Forschung bewirken, andererseits aber auch ein ausgewähltes Nachwuchspotential aufrechterhalten für die Zeit, in der für qualifizierte Wissenschaftler wieder mehr Stellen verfügbar sind.

Im übrigen haben diese Forschungsergebnisse wieder einmal gezeigt, dass die Festkörperphysik – obgleich mitunter in die Nähe von Ingenieurwissenschaften gerückt – nach wie vor sehr fundierte Beiträge zu den elementaren Fragen der Physik und unseres Weltbilds leisten kann. Aus MOSFET-Elementen kann man nicht nur immer anspruchsvollere Mikroprozessoren bauen, man kann mit ihnen auch bis zu den Wurzeln unserer Vorstellungen vom Aufbau und Funktionieren der Welt vordringen.

Robert Gerwin, München