

Einzelelektronenpumpen für die Neudefinition der SI-Basiseinheit Ampere

Hans Werner Schumacher¹

¹Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Bundesallee 100, 38116 Braunschweig, Deutschland

Zusammenfassung

Die Generalkonferenz für Maße und Gewichte wird voraussichtlich 2018 eine umfassende Revision des internationalen SI-Einheitensystems (Système International d'Unités) beschließen. Im Rahmen dieser Revision sollen die Basiseinheiten zukünftig implizit, durch Festlegung der Werte von Naturkonstanten definiert werden. In diesem Artikel werden die geplanten Neudefinitionen kurz umrissen. Basierend darauf werden aktuelle Forschungsarbeiten der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt zu Einzelelektronenpumpen vorgestellt, die in einem Quanten-Stromstandard für die neudefinierte elektrische Basiseinheit Ampere münden sollen

Keywords: SI-System, Basiseinheit Ampere, Einzelelektronentransport, Metrologie

Das SI-Einheitensystem

Der Wert W der Messung einer physikalischen Größe ist das Produkt aus Zahlenwert $\{W\}$ und Einheit $[W]$: $W = \{W\} [W]$. Bei jedem Messvorgang wird das Messergebnis also als Teil oder Vielfaches einer bekannten Referenz, der Einheit, ausgedrückt. Im internationalen SI-Einheitensystem (Système International d'Unités) wird die Festlegung der Einheiten und mögliche Wege zur deren Weitergabe beschrieben.

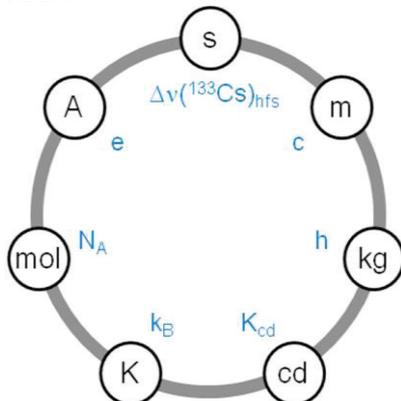


Abb. 1: Die sieben Basiseinheiten des SI: Sekunde (Zeit), Meter (Länge), Kilogramm (Masse), Ampere (Elektrische Stromstärke), Kelvin (Temperatur), Mol (Stoffmenge) und Candela (Lichtintensität). Bei der geplanten Neudefinition werden sie über die Zahlenwerte der jeweiligen angegebenen Naturkonstanten (blau) festgelegt.

Besondere Bedeutung haben dabei die sieben Basiseinheiten: Die Sekunde s , der Meter m , das Kilogramm kg , das Ampere A , das Kelvin K , das Mol mol , und das Candela cd . Mit Hilfe dieser Basiseinheiten können sämtliche abgeleiteten Messgrößen vollständig definiert werden.

Im aktuell gültigen SI [1] kommen unterschiedliche Arten der Definition für die Festlegung der verschiedenen Basiseinheiten zur Anwendung. Die Einheit der Masse, das kg , wird beispielsweise über ein Artefakt, das sogenannte Urkilogramm definiert. Ein kg entspricht dabei per Definition der Masse des Urkilogramms. Im Gegensatz dazu wird die elektrische Basiseinheit Ampere über eine idealisierte Messvorschrift festgelegt. Die aktuelle Definition der Basiseinheit Ampere lautet:

„Das Ampere ist die Stärke eines konstanten elektrischen Stromes, der, durch zwei parallele, geradlinige, unendlich lange und im Vakuum im Abstand von einem Meter voneinander angeordnete Leiter von vernachlässigbar kleinem, kreisförmigem Querschnitt fließend, zwischen diesen Leitern je einem Meter Leiterlänge die Kraft $2 \cdot 10^{-7}$ Newton hervorrufen würde.“

Aus der starken Idealisierung dieser Definition („unendlich lang“, vernachlässigbarer Querschnitt...) ergeben sich aber natürlich verschiedene praktische Schwierigkeiten bei der tatsächlichen Realisierung und Weitergabe der Einheit.

Eine weitere Definitionsmöglichkeit wird für die Festlegung der Einheit der Länge, dem Meter, genutzt. Dabei wird die Einheit durch Festlegung des Zahlenwertes der Naturkonstante der Lichtgeschwindigkeit c definiert.

Ist der Wert einer Naturkonstanten bekannt, so wird durch eine gegebene Einheitsdefinition ihr Zahlenwert festgelegt. Umgekehrt kann man aber natürlich auch durch die Festlegung des Zahlenwertes die Einheit definieren. Für das Beispiel der Lichtgeschwindigkeit gilt $c = \{c\} [c] = 299\,792\,458 \text{ m/s}$. Mit der Definition der Sekunde und dem Zahlenwert für die Lichtgeschwindigkeit ist also die Länge eines Meters festgelegt.

Entsprechend diesem Konzept der Definition der Basiseinheiten über die Festlegung der Werte ausgewählter Naturkonstanten sollen zukünftig alle sieben SI-Basiseinheiten definiert werden.

Die Definitionen der sieben Basiseinheiten im neuen SI

Im Rahmen der Neudefinition des SI sind folgende Festlegungen geplant:

- Die Frequenz $\Delta\nu(133\text{Cs})^{\text{hfs}}$ des Hyperfeinstrukturübergangs des Grundzustands des Cäsiumatoms ist genau gleich $9192631770 \text{ s}^{-1}$.
- Die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum c ist genau gleich $299792458 \text{ m s}^{-1}$.
- Die Planck-Konstante h ist genau gleich $6,62606957 \cdot 10^{-34} \text{ kg m s}^{-2}$.
- Die Elementarladung e ist genau $1,602176565 \cdot 10^{-19} \text{ As}$.
- Die Boltzmann-Konstante k_B ist genau $1,3806488 \cdot 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$.
- Die Avogadro-Konstante N_A ist genau $6,02214129 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$.
- Das photometrische Strahlungsäquivalent einer monochromatischen Strahlung der Frequenz $540 \cdot 10^{12} \text{ Hertz}$ ist genau gleich $683 \text{ Lumen durch Watt, lm W}^{-1}$.

Die Formulierung der Einheiten wurde hier bereits so umgeformt, dass die jeweils zu definierende Einheit direkt ersichtlich ist (z.B. $1 \text{ Coulomb} = 1 \text{ C} = 1 \text{ As}$). Die exakte Festlegung der Zahlenwerte der Konstanten bei Nennung der zu verwendenden Einheiten legt die Einheiten implizit fest. Die oben genannten Zahlenwerte entsprechen dabei dem aktuell besten Messwert dieser Größen. Falls neue experimentelle Werte nahelegen können sich diese Werte aber grundsätzlich bis zum Zeitpunkt der Neudefinition noch verändern [2].

Wege zur Darstellung der Basiseinheit Ampere im neuen SI

Die elektrische Basiseinheit Ampere soll zukünftig also über den festgelegten Wert der Elementarladung e definiert werden. Eine direkte Darstellung der neudefinierten Basiseinheit Ampere ergäbe sich dann aus dieser Definition über das Zählen der Elektronen, die pro Zeiteinheit durch einen Leiter fließen.

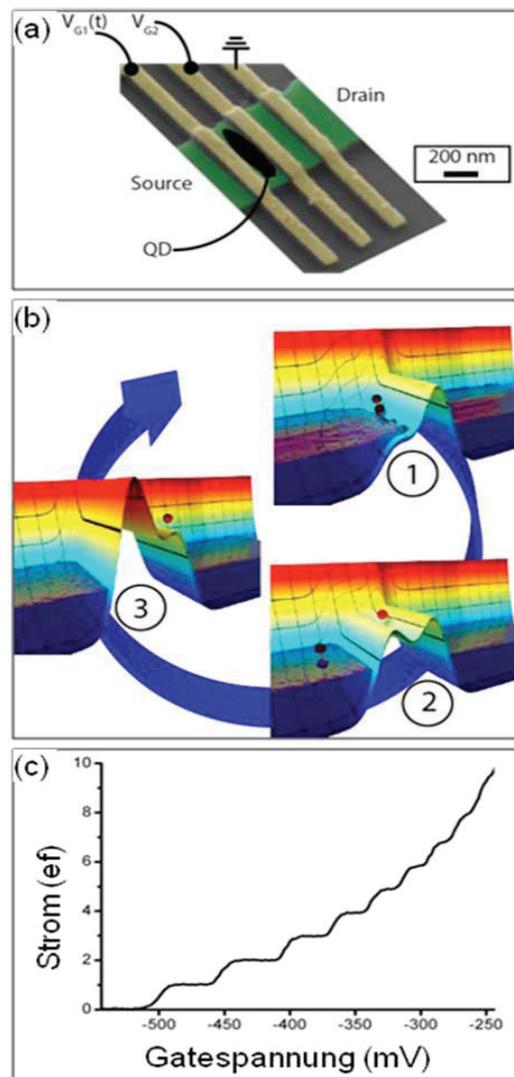


Abb. 2: Einzelelektronenpumpen: (a) Elektronenmikroskop-Aufnahme mit Halbleiterkanal (grün) und Gates (gelb) zwischen denen sich ein Quantenpunkt (QD) bildet. (b) Schnitt durch das elektrische Potential zur Veranschaulichung des Pumpzyklus. Durch zeitliche Variation der Gatespannung zur Source kann ein Elektron (rot) aus Source eingeladen und zur Drain ausgeworfen werden. (c) Erzeugter Strom in Abhängigkeit einer Steuerspannung. Plateaus bei ganzzahligen Vielfachen von ef belegen die Funktion der Einzelelektronenpumpe.

Ein derartiges Abzählen der durch einen Leiter fließenden Elektronenladungen ist heutzutage bei Temperaturen im mK-Bereich im Prinzip möglich. Als Leiter wird dabei eine metallische oder halbleitende Nanostruktur, wie zum Beispiel ein Halbleiter-Quantenpunkt (QD für engl.: Quantum Dot) verwendet.

Als geeignete Einzelladungsdetektoren werden zum Beispiel metallische Einzelelektronentransistoren oder halbleitende Quantenpunktkontakte genutzt, die in unmittelbarer Nähe der Nanostruktur platziert werden. Über die kapazitive Kopplung bewirkt eine einzelne Ladungsänderung in der Nanostruktur eine messbare Änderung des elektrischen Transportverhaltens des Detektors. Zeit aufgelöste Detektion der Ladung des Quantenpunktes ermöglicht es dann die aufeinander folgenden Auf- und Entladevorgänge des Quantenpunktes zu messen und daraus direkt auf den geflossenen Strom in Einheiten der Elementarladung e zu schließen. Die heute zur Verfügung stehenden Einzelladungsdetektoren ermöglichen allerdings nur sehr geringe Detektionsbandbreiten von einigen kHz bis hin zu einigen MHz. Entsprechend sind die mittels Detektion direkt messbaren Einzelelektronenströme nur sehr klein und liegen maximal im Bereich nA bis maximal wenige pA.

Eine andere Möglichkeit der direkten Realisierung der Basiseinheit Ampere ist die Erzeugung eines Stroms durch sogenannte Einzelelektronenpumpen (Abb.2) [4]. Solche Einzelelektronenpumpen basieren wiederum auf metallischen oder halbleitenden Quantenpunkten. Durch zeitliche Variation von Gatespannungen können gezielt einzelne Elektronen aus einer elektrischen Zuleitung (Source) in den Quantenpunkt geladen und in eine andere Zuleitung (Drain) wieder ausgeworfen werden. Durch periodische Wiederholung dieses Transportvorgangs mit der Pumpfrequenz f wird so ein Strom der Stromstärke $I = nef$ erzeugt (mit n der ganzen Zahl der pro Zyklus gepumpten Elektronen), der direkt auf die festgelegte Elementarladung zurückgeführt ist. Als für metrologische Anwendungen besonders geeignet haben sich dabei in den letzten Jahren halbleiterbasierte Einzelelektronenpumpen erwiesen, wie sie in Abb. 2 gezeigt werden [5]. Sie ermöglichen vergleichsweise hohe Pumpfrequenzen bis zu einigen GHz. Dabei sind trotzdem niedrige Fehlerraten im sub-ppm-Bereich möglich.

Die bisher besten kürzlich veröffentlichten Daten sprechen bei Pumpfrequenzen von etwa 500 MHz für Fehlerraten von unter 0.2 ppm [6]. Die Unsicherheit des so erzeugten und direkt auf die Elementarladung zurückgeführten quantisierten Stromes ist damit schon besser als die bisher beste direkte Realisierung des

Ampere entsprechend der noch gültigen Definition über die Kraft zwischen zwei Leitern. Der von einer Einzelelektronenpumpe bei einer Frequenz von einem GHz erzeugte Strom hat eine Stromstärke von etwa 160 pA. Deutlich höhere Pumpfrequenzen führen bei den bislang untersuchten Pumpen meistens zu einer deutlichen Erhöhung der Fehlerrate, was zu einer entsprechenden Begrenzung des erzeugten Stromes führt. Höhere quantisierte Ströme können bei gleichbleibender Pumpfrequenz allerdings durch die Parallelschaltung mehrerer Pumpen auf einem Chip erreicht werden [7].

Auch wenn in der Praxis natürlich um viele Größenordnungen höhere Ströme benötigt und auf das SI rückgeführt gemessen werden müssen, wären erzeugbare Ströme von einigen nA für ein primäres Quanten-Strom-Normal für das SI Ampere bereits ausreichend. Derartige Stromstärken lassen sich bereits heute mit geringer Unsicherheit messen und entsprechende Kalibrierketten zur Kalibrierung technischer Ströme mit geringer Unsicherheit wären möglich. Allerdings sind die oben genannten sub-ppm Unsicherheiten des Stromes der heutigen Einzelelektronenpumpen noch deutlich höher als die der anderen bereits verfügbaren elektrischen Quantennormale für elektrischen Spannung und Widerstand. Diese basieren auf dem Josephson-Effekt [8] in supraleitenden Schaltungen beziehungsweise auf dem Quanten-Hall-Effekt [9] in zweidimensionalen Elektronensystemen in hohen Magnetfeldern. Mit ihnen kann das Volt auf den Wert der Josephson-Konstante $K_J = 2e/h$ sowie das Ohm auf den Wert der von-Klitzing-Konstanten $R_K = h/e^2$ zurückgeführt werden. Über die Messung beider Größen lässt sich dann auch indirekt das Ampere im neuen SI darstellen, da die Werte der beiden Naturkonstanten e und h festgelegt werden.

Die selbstreferenzierte Einzelelektronenpumpe

Die Unsicherheit des von einer Einzelelektronenpumpe erzeugten quantisierten Stroms ist durch stochastisch auftretende Pumpfehler grundlegend begrenzt. Sie liegen im quantenmechanischen Tunnelprozess begründet, der ein spontanes Heraustunneln eines Elektrons aus dem QD ermöglicht und damit die Unsicherheit des Quanten-Strom-Normals fundamental limitiert.

An der PTB wurde von Michael Wulf ein Konzept zur Überwindung dieser Begrenzung vorgeschlagen, die sogenannte selbstreferenzierte Einzelelektronenpumpe [10]. Das Konzept basiert auf der Kombination der beiden oben vorgestellten Elemente von Einzelelektronenpumpen und Einzelelektronendetektoren in einer Serienschaltung.

Eine elektronenmikroskopische Aufnahme eines solchen Bauteils ist in Abb.3 gezeigt. Die selbstreferenziert Einzelelektronenpumpe ist eine integrierte Quantenschaltung aus mehreren in Serie geschalteten Einzelelektronenpumpen (P1-P3) und jeweils dazwischen angeordneten leitfähigen Inseln deren Ladungszustände über benachbarte Einzelladungsdetektoren (D1,D2) detektiert werden können. Betreibt man die in Serie geschalteten Pumpen mit gleicher Pumpfrequenz so wird zwischen den Zuleitungen der Strom $I = ef$ erzeugt. Arbeiten alle Pumpen zuverlässig ohne Pumpfehler so sollte sich der Ladungszustand der dazwischenliegenden Inseln nicht ändern.

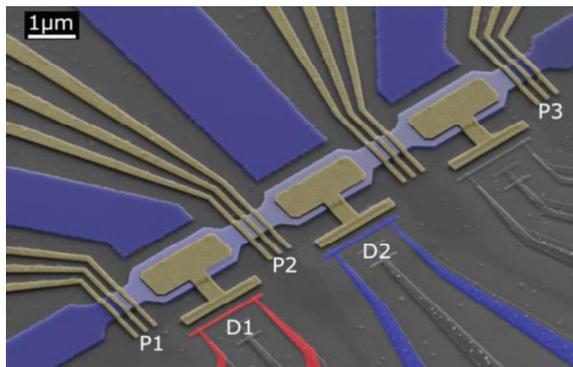


Abb. 3: Selbstreferenzierte Einzelelektronenpumpe. Die integrierte Quantenschaltung besteht aus drei in Serie geschalteten Einzelelektronenpumpen (P1-P3) und zwei Einzelladungsdetektoren (D1,D2). (Je eine weitere Pumpe/Detektor sind sichtbar, aber nicht markiert, da sie im Experiment nicht genutzt wurden). Durch Detektion von Ladungsänderungen auf den leitfähigen Bereichen zwischen den Pumpen können Pumpfehler im Serienbetrieb identifiziert und korrigiert werden.

Stochastische auftretende Fehler der Pumpen führen dann allerdings zu Änderungen des Ladungszustands der Inseln um einzelne Elektronenladungen, die von den Detektoren nachgewiesen werden können. Durch Korrelation der Signale benachbarter Detektoren kann die Pumpe die den Fehler verursacht hat identifiziert werden. Verliert beispielsweise die Pumpe P2 das eingefangene Elektron wieder zur Source-Seite (links) so misst der Detektor D1 eine um ein Elektron erhöhte Ladung wohingegen D2 eine um ein Elektron erniedrigte Ladung detektiert. Analog können auch andere auftretende Fehler der verschiedenen Pumpen zuverlässig detektiert und zugeordnet werden. Dies ermöglicht im Anschluss wiederum die Korrektur des erzeugten Stromes um die detektierten Pumpfehler. Die Unsicherheit des erzeugten Stroms kann auf diese Weise im

Prinzip um mehrere Größenordnungen verringert werden.

Eine erste experimentelle Demonstration dieses Prinzips wurden im Jahr 2014 an der PTB demonstriert [11]. Dabei zeigte sich eine Verringerung der Unsicherheit des erzeugten Strom um den Faktor 50, wenngleich auch noch bei sehr niedrigen Pumpfrequenzen.

Die aktuellen Arbeiten an der PTB zielen nun auf eine Realisierung dieses Konzepts bei deutlich höheren Pumpfrequenzen im GHz-Bereich. Der große Vorteil der selbstreferenzierten Einzelelektronenpumpe ist dabei, dass die begrenzte Detektorbandbreite nicht die gleichen Auswirkungen auf die erreichbaren Stromstärken hat, wie bei der oben diskutierten direkten Strommessung. Da bei optimierten Pumpen die Pumpfehler nur im ppm-Bereich auftreten [6] liegen die Raten der zu detektierenden Ladungsänderungen auf den Inseln um etwa den Faktor 10^6 niedriger als die Pumpfrequenz. Bei einer Pumpfrequenz von einem GHz müssen dann Ladungsänderungen im Bereich einiger kHz sicher detektiert werden, was mit entsprechend optimierten Einzelladungsdetektoren möglich sein sollte.

Mit einer solchen hochfrequenten selbstreferenzierten Einzelelektronenpumpe wäre dann die direkte Realisierung der SI-Basiseinheit Ampere im neuen SI mit niedriger Unsicherheit möglich. Zudem könnte damit ein fundamentaler Konsistenztest der elektrischen Einheiten im neuen SI durchgeführt werden: Die Spannung aus Josephson-Standards, der Widerstand aus einem Quanten-Hall-Element und der quantisierte Strom aus einer Einzelelektronenpumpe sollten das Ohmschen Gesetzes $U = RI$ auf Basis der Naturkonstanten e und h erfüllen. Dieser grundlegende Konsistenztest der elektrischen Quantenmetrologie wird auch als „quantenmetrologisches Dreieck“ bezeichnet, das bislang nur mit einer Unsicherheit von $9 \cdot 10^{-7}$ geschlossen wurde [12].

Danksagung

Die hier vorgestellten Ergebnisse wurden von zahlreicher Kollegen an der PTB erarbeitet, die nicht alle hier aufgezählt werden können. Insbesondere waren Lukas Fricke, Michael Wulf, Frank Hohls, Ralf Dolata, Christoph Leicht, Friederike Stein, und Dietmar Drung für wesentliche Teile der Arbeiten verantwortlich.

Literaturnachweis

- [1] BIPM, Le Système international d'unités – The International System of Units, 8. Ausgabe, 2006.
- [2] J. Stenger, J. H. Ullrich Physik Journal 13, 27-34 (2014).

- [3] L. Fricke, R. Dolata, B. Kästner, F. Hohls, H.W. Schumacher, *Physik in unserer Zeit* 46, 70-76 (2015).
- [4] H. Pothier et al., *Europhysics Letters* 17, 249 (1992).
- [5] B. Kaestner et al., *Physical Review B* 77, 153301 (2008).
- [6] F. Stein et al., *Applied Physics Letters* 107, 103501 (2015).
- [7] P. Mirovsky et al., *Applied Physics Letters* 97, 252104 (2015).
- [8] B. D. Josephson, *Physics Letters* 1, 251 (1962).
- [9] K. v. Klitzing, G. Dorda, M. Pepper, *Physical Review Letters* 45, 494 (1980).
- [10] M. Wulf, *Physical Review B* 87, 035312 (2013).
- [11] L. Fricke et al. *Physical Review Letters* 112, 226803 (2014).
- [11] M. W. Keller, N. M. Zimmerman und A. L. Eichenberger, *Metrologia* 44, 505 (2007).