

INTERVIEW

„Ein Höhepunkt in meinem wissenschaftlichen Leben“

Am 20. Mai 2019 tritt eine neue Definition des Internationalen Einheitensystems (SI) in Kraft. Das bedeutet unter anderem den Abschied vom Urkilogramm. Stattdessen basiert das SI nun auf sieben Naturkonstanten, deren Werte festgelegt sind. Auch Klaus von Klitzing begleitete das Thema SI-Einheiten ein Forscherleben lang. Wie und warum es so kam, erzählt der Physik-Nobelpreisträger in diesem Interview.

Physik in unserer Zeit: Herr Professor von Klitzing, am 20. Mai 2019 wird das SI-Einheitensystem offiziell auf sieben Naturkonstanten umgestellt werden (siehe Hefbeilage zum neuen Internationalen Einheiten-System). Das wurde auf der 26. Generalkonferenz für Maß und Gewicht vom 13.–16. November 2018 in Versailles beschlossen, an der Sie teilgenommen haben ...

Klaus von Klitzing: ... inzwischen (17. Dezember 2018) sollen schon zwei Milliarden Menschen informiert worden sein. Das ist unge-

fähr ein Drittel der Weltbevölkerung! Die haben etwas gehört, aber nicht alles verstanden (lacht)! Für die Leser von „Physik in unserer Zeit“ bin ich jedoch gerne bereit, noch einige Zusatzinformationen zu geben.

Das Thema SI-Einheiten begleitet Sie bereits Ihr ganzes Forscherleben lang. Am 25. Januar 1978 haben Sie an der Universität Würzburg Ihre Probevorlesung zur „Erlangung der Lehrbefähigung für das Fach Experimentelle Physik“ gehalten (Abbildung 1). Ihr Thema war damals schon „Die SI Basiseinheiten: Definition, Realisierung und Entwicklung“.

Ja, da ich in Braunschweig studiert habe, habe ich in den Semesterferien regelmäßig in der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) gearbeitet – auch an Präzisionsmessungen von elektrischen Widerständen. Deswegen hatte ich schon Erfahrung, wie man Präzisionsmessungen machen kann und welche Bedeutung die SI-Einheiten haben. Eigentlich war mein ganzes Leben durch die Metrologie bestimmt, denn mein Doktorvater Gottfried Landwehr war Schwiegersohn des PTB-Präsidenten Richard Vieweg. Der hatte ein Präsidiallabor für persönliche Forschungsinteressen, welches er Gottfried Landwehr überlassen hatte, und dort wurde schon damals mit hohen Magnetfeldern gearbeitet. So bin ich in diese Thematik hineingekommen.

Hobe Magnetfelder in Bezug auf Metrologie?

Die hohen Magnetfelder waren wie gesagt ein Hobby des Präsi-

den. An der PTB und der TU Braunschweig wurde mit gepulsten Magnetfeldern gearbeitet, und da war ich schon als Student mit dabei. In der Folge gab es dann in Braunschweig das erste Hochfeld-Magnetlabor in Deutschland, das von der VW-Stiftung eingerichtet wurde.

Wie stark waren die Magnetfelder, 20, 30 Tesla?

Nicht ganz so viel, die hatten bei meinen ersten Messungen nur etwas über 10 Tesla, das waren die Spitzenwerte der relativ kurzen Magnetfeldpulse, die durch die Entladung einer Kondensatorbatterie über einen Kupferdraht erzeugt wurden. Ab und zu explodierte eine Spule. Schon damals vor über fünfzig Jahren habe ich mit den Spulen und den gepulsten Magnetfeldern gearbeitet.

Hat Sie das damals zu Ihrer Forschung inspiriert, bei der Sie dann den Quanten-Hall-Effekt entdeckt haben [1]?

Ja, natürlich. Gottfried Landwehr spielte für mich eine ganz große Rolle. Er war mein Doktorvater, später mein Habilitationsvater. Ich bin mit ihm von Braunschweig nach Würzburg gegangen, ich habe seine Vorlesungen an der TH Braunschweig gehört über Supraleitung, über Festkörperphysik. Insofern bin ich da schon geprägt worden, in die Festkörperphysik zu gehen, und die Metrologie war eigentlich immer ein Ansporn für mich.

Das heißt, dass Sie das genaue Messen fasziniert?

Ja, weil, wenn man an der Grenze der Präzision arbeitet, man alle möglichen Korrekturen berücksichtigen muss. Ich war schon bei der PTB an Präzisionsmessungen des Schmelzpunktes von Gold beteiligt. Wie misst man das eigentlich? Da nimmt man die ideale Gasgleichung, aber es gibt kein ideales Gas. Also muss man sich die ganzen Korrekturen überlegen und sich fragen, wie messe ich $P \cdot V = m \cdot R \cdot T$? Welchen Einfluss haben die zeitlich variierenden Gravitationsfelder, wie wichtig ist die Diffusion von Helium durch die Glaswand? Man muss ein ganz breites

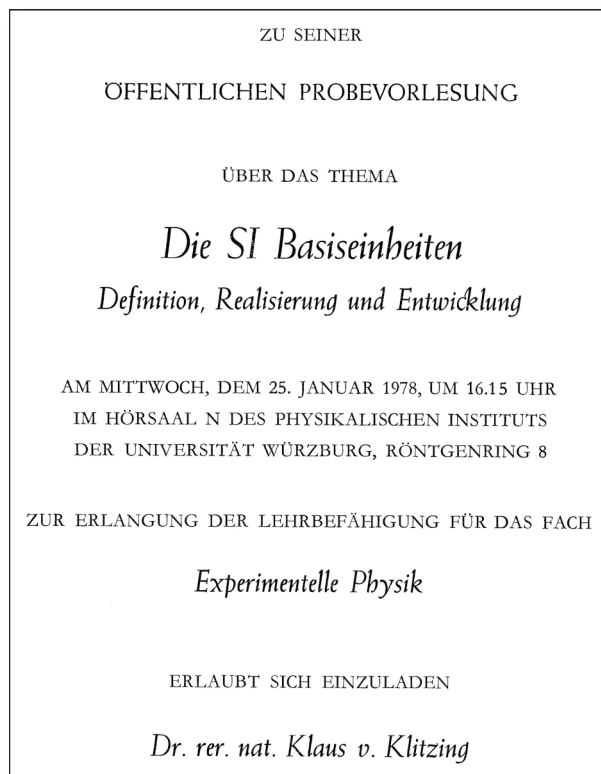


Abb. 1 Einladung zur öffentlichen Probevorlesung, die Klaus von Klitzing im Rahmen seiner Habilitation halten musste.

Spektrum von Wissen haben und ein Fingerspitzengefühl dafür, was wichtig ist und was nicht.

Das heißt, man lernt sein Handwerk?

Metrologie ist die beste Schule für einen Experimentalphysiker, weil man da wirklich alles berücksichtigen muss und überlegen muss, welche Korrekturen in das Experiment hineinmüssen.

Bald nach Ihrer Probevorlesung von 1978 haben Sie den Quanten-Hall-Effekt entdeckt. Mit der Von-Klitzing-Konstanten haben Sie damit eine einfach zu messende Naturkonstante in die Welt gesetzt, was uns zum Thema SI-Einheiten zurückführt. Wie fühlt man sich denn so als lebende Naturkonstante?

Es gibt ja zwei lebende Naturkonstanten, Brian Josephson und mich (lacht)! Brian Josephsons Arbeiten über die Supraleitung waren eigentlich auch die Blaupause für den Quanten-Hall-Effekt, denn ich kannte natürlich die Anwendung des Josephson-Effekts in der Präzisionsmesstechnik für eine elektrische Spannung. Deswegen war ich erfreut, plötzlich einen Widerstand zu sehen, der ganz ähnlich wie der Josephson-Effekt auf Fundamentalkonstanten zurückgeführt werden kann – obwohl zu dem Zeitpunkt damals keiner daran geglaubt hat, dass man bei Forschungsarbeiten an einem Silizium-Feldeffekttransistor so etwas Fundamentales messen kann. Deshalb kam es auch so überraschend, für mich war es ja auch überraschend! Als ich zum ersten Mal die mögliche Beziehung zwischen meinen Messergebnissen und Fundamentalkonstanten erkannte, war ich überzeugt, dass bei Messungen an realen Proben Korrekturen zu erwarten sind. Ich wollte eigentlich nur wissen: Wenn ich Abweichungen von dem theoretisch erwarteten Quantenwiderstand sehe, ob ich dann etwas über die Qualität des Transistors erfahren kann. Wie viele Störungen sind da drin, wie viele sogenannte lokalisierte Zustände?

Und dann war es mir schon in der Nacht vom 4. auf den 5. Februar

1980 klar, dass es eigentlich besser funktioniert als erwartet. Das war ein Aha-Erlebnis! Denn meistens läuft es in der Physik ja umgekehrt, nämlich, dass etwas schlechter funktioniert als erwartet, da stört dann irgendein Dreckeffekt. Ich habe daher noch eine Diplomarbeit vergeben, um eventuell nötige Korrekturen an den Hall-Messungen festzustellen – der arme Diplomand hat keine gefunden (lacht). Wir haben in der Ausbildung gelernt: Der Hall-Effekt als solcher ist ja schon so kompliziert! Wenn man den misst, dann soll man froh sein, wenn man aussagefähige Resultate mit einer Genauigkeit von besser als zehn Prozent hat. Aber das funktionierte dort in Grenoble sofort auf vier Stellen hinter dem Komma genau!

Das war natürlich überraschend. Und dann ging es weiter in Zusammenarbeit mit der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt, um diesen Wert, der später Von-Klitzing-Konstante genannt wurde, sehr genau zu bestimmen.

Waren Sie sich eigentlich gleich im Klaren darüber, was Sie da in den Sprüngen im Hall-Widerstand sehen?

Ja, überraschend war nur, dass die experimentellen Fakten so hervorragend mit einer einfachen Theorie übereinstimmten. Ich sollte erwähnen, dass die Japaner sehr stark auf dem Gebiet tätig waren. Sowohl meine Gruppe als auch die japanische Gruppe hatte im selben Jahr 1978 schon Daten für Hall-Effekt-Messungen an solchen Systemen veröffentlicht. Aber keiner hat erkannt, dass irgendetwas Besonderes in diesen Daten versteckt ist.

Wie kamen Sie auf dieses Besondere, den Quanten-Hall-Effekt, das andere nicht erkannten?

Da spielte die Erfahrung eine Rolle. Der Erkenntnisgewinn kam dadurch zustande, dass ich mich erinnerte, dass auch andere Proben bei einem bestimmten Widerstandswert Besonderheiten zeigten. Dadurch habe ich diese Universalität erkannt, dass da etwas eventuell probenunabhängig auftreten kann. Das



Klaus von Klitzing wurde am 28. Juni 1943 in Schroda (heute Środa Wielkopolska, Polen) geboren. Er studierte an der TU Braunschweig Physik und wechselte danach an die Julius-Maximilians-Universität Würzburg zu Gottfried Landwehr. Dort wurde er 1972 promoviert und 1978 habilitiert. Vom 1979 bis 1980 forschte er am Hochfeld-Magnetlabor in Grenoble, wo er am 5. Februar 1980 den Quanten-Hall-Effekt und damit die Von-Klitzing-Konstante entdeckte. Dafür erhielt er 1985 den ungeteilten Nobelpreis für Physik. 1980 übernahm er eine Professur für Festkörperphysik an der TU München. 1985 wechselte er als Direktor an das Max-Planck-Institut für Festkörperforschung in Stuttgart. Er setzt sich leidenschaftlich für die naturwissenschaftliche Lehre an Schulen ein. Seit 2005 vergeben die Carl von Ossietzky-Universität Oldenburg und die EWE-Stiftung gemeinsam den Klaus-von-Klitzing-Preis an besonders engagierte Lehrer naturwissenschaftlicher Fächer (Foto: C.-M. Müller, MPI für Festkörperforschung).

war der Durchbruch! Entscheidend war die langjährige Erfahrung, die ich nach zehn Jahren Messung von Transportphänomenen an zweidimensionalen Elektronengasen schon gehabt hatte. Deswegen machte es plötzlich „Klick“, und man erkannte etwas Neues.

Und das war fundamental. Nun machen wir einen zeitlichen Sprung und kommen auf die jüngste Entwicklung bei den SI-Einheiten zurück. Wir lebten bislang mit einer Art Hybridsystem, wenn es um die metrologische Realisierung der verschie-

denen Einheiten ging. Es gab Einheiten, die schon fundamental realisiert wurden, wie die Sekunde und der Meter. Aber dann gab es noch das berühmte Urkilogramm in Sèvres bei Paris, also einen Metallklotz, der an Massenschwund litt ...

... gut, das Urkilogramm war der größte Schwachpunkt in unserem alten SI-System. Aber auch die Situation bei den elektrischen Einheiten war unbefriedigend. Internationale Abkommen hatten zwar dafür gesorgt, dass der Josephson- und der Quanten-Hall-Effekt seit 1990 weltweit bei Kalibrierungen und Präzisionsmessungen eingesetzt wurden, dieses geschah aber außerhalb des offiziellen SI-Einheitensystems mit seinen sieben Basiseinheiten. Die elektrische Basiseinheit Ampere, die durch die Kraft zwischen zwei stromdurchflossenen Leitern festgelegt war, war nicht konkurrenzfähig mit dem Ampere aus Josephson-Spannung und Quanten-Hall-Widerstand. Wir hatten mit den Quantennormalen eine Parallelwelt bei den elektrischen Einheiten. Das Schöne bei dem neuen SI-Einheitensystem ist nun, dass man diese beiden Welten vereinigt. Dadurch wird das Ampere als Fluss einer bestimmten Anzahl von Elektronen pro Sekunde definiert [2] und nicht wie bisher durch eine Kraft zwischen stromdurchflossenen Leitern.

Das war natürlich eine aus heutiger Sicht absurde Definition des Amperes ...



Abb. 2 Der Präsident der PTB, Joachim Ullrich, übereicht Klaus von Klitzing ein Mol zum 75. Geburtstag.

So absurd war sie gar nicht. Die ursprüngliche Definition des Amperes bedeutete nämlich, dass die magnetische Feldkonstante μ_0 zahlenmäßig festgelegt wurde. Im neuen Einheitensystem muss die magnetische Feldkonstante experimentell bestimmt werden.

Das ist richtig. Aber eine Kraftmessung zwischen zwei unendlich langen parallelen Leitern ist halt etwas praxisfern.

Gut, aber das ist im Prinzip die Methode, die man heute bei der Watt- oder Kibble-Waage einsetzt. Früher hat man die Kraft zwischen den Spulen gemessen, um das Ampere festzulegen. Jetzt kann man die elektrische Kraft, die über Quantennormale geeicht wird, mit der mechanischen Kraft, die durch eine Masse hervorgerufen wird, vergleichen und dadurch eine Beziehung zwischen der Masse und der Planck-Konstanten herstellen. Die ursprüngliche Messtechnik wurde von dem Engländer Bryan Kibble für die Realisierung des Amperes vorangetrieben. Ihm zu Ehren ist nun die Watt-Waage, die man zur Realisierung des Kilogramms verwendet, nach ihm benannt (siehe „Internet“ auf S. 119 und [3]).

Beim Kilogramm gibt es zwei konkurrierende Verfahren, das alternative von der PTB entwickelte Avogadro-Verfahren nutzt nahezu perfekte Siliziumkugeln (Abbildung 2). Aber die Basis ist klar ...

... ja, auf jeden Fall ist der Ausgangspunkt für das neue Kilogramm der festgelegte Wert für die Planck-Konstante. Wenn ich Vorträge halte, sage ich immer: Die meisten Naturwissenschaftler kennen $E = h \cdot \nu$ und $E = m \cdot c^2$, und wenn man den Dreisatz anwendet, dann sieht man, dass zwischen Masse und Planck-Konstante eine Beziehung besteht. Bloß diesen Weg über den Impuls eines Photons kann man nicht direkt umsetzen, um damit die Relation zwischen Masse und Planck-Konstante herzustellen. Und da gibt es eben verschiedene Wege wie die Watt-Waage oder indem man von atomaren Massen zu

makroskopischen Massen über die Avogadro-Zahl, also das Zählen, geht (siehe „Internet“ und [4]). So gibt es heutzutage mehrere Wege, um die Beziehung zwischen Masse und Planck-Konstante zu realisieren.

Das bringt uns zu der 26. Generalkonferenz für Maß und Gewicht vom 13.–16. November 2018 in Versailles, an der Sie einen Keynote-Vortrag mit dem Titel „The quantum Hall effect and the revised SI“ gehalten haben. Auf dieser Konferenz wurde wie gesagt beschlossen, das SI-Einheitensystem komplett auf die Basis von sieben Naturkonstanten umzustellen. Wie haben Sie diese Tagung erlebt?

Das war natürlich ein Höhepunkt in meinem wissenschaftlichen Leben. Ich habe schon viele Vorträge gehalten, aber noch nie bei einer Tagung mit Repräsentanten aus über hundert Ländern. Außerdem ist die Generalkonferenz für Maß und Gewicht eine der ältesten wissenschaftlichen Tagungen. Seit 1889 wird diese Tagung alle vier bis sechs Jahre in Paris abgehalten, um zu diskutieren, was die besten Realisierungen für ein weltweites Einheitensystem sind. Und auf der 26. Tagung im November 2018 stand eben auf dem Plan, die Empfehlung umzusetzen, dass wir jetzt Naturkonstanten als Basis für unser Einheitensystem nehmen (Abbildung 3). Beim Meter und der Sekunde hatte man ja praktisch schon Beziehungen zu Naturgrößen hergestellt, aber nun war man in der Lage, auch die anderen Einheiten über Naturkonstanten zu definieren. Man sagt übrigens offiziell nicht Naturkonstanten sondern Constants of Nature, weil nicht alle festgelegten Werte Naturkonstanten sind.

Diese Tagung war also für Sie die Erfüllung eines lange gehegten Traums?

Ja, weil ich gesehen habe, dass ganz unerwartet meine Entdeckung diese Diskussion doch beschleunigt hat. Und die Kombination aus Josephson-Effekt und Quanten-Hall-Effekt, mit der man alle elektrischen Einheiten auf solche Naturkonstan-

ten zurückführen kann, hat dann eben dazu geführt, jetzt eine Vereinheitlichung des SI-Systems zu erreichen. Dass jetzt das Kilogramm mit diesen elektrischen Größen verbunden werden kann, ist natürlich für die Öffentlichkeit ein besonders sichtbares Ergebnis. Obwohl man sagen muss: Die Integration der elektrischen Einheiten in das neue SI-System ist der Hauptgrund, dass wir dieses neue Einheitensystem nun haben.

Also das, was man bei den elektrischen Einheiten eigentlich schon gehabt hat ...

... ja, aber noch konventionell! Deswegen gibt es jetzt auch Sprünge. Zum Beispiel bei der Eichung vom Ohm und vom Volt gibt es ab dem 20. Mai 2019 einen kleinen Sprung. Zuvor hat man konventionelle Einheiten verwendet, die man 1990 eingeführt hat, damit man eine gemeinsame Bezugsgröße hatte. Aber nun hat man diese echten Bezugsgrößen h und e eingeführt, und da muss man jetzt justieren. Das ist zum Glück noch so gering, dass man das im Alltag nicht spürt. Aber die Eichämter und die Hersteller von Präzisions-Messgeräten müssen das jetzt wirklich berücksichtigen.

Deswegen war jetzt auch der richtige Zeitpunkt da, weil die Geräte immer besser werden. Bei einer technischen Weiterentwicklung wäre dieser Sprung, diese Diskontinuität, immer negativer in Erscheinung getreten. Die oft gestellte Frage, ob die jetzt festgelegten Werte für die Naturkonstanten möglicherweise nicht korrekt sind, ist nicht zulässig. Die neuen Einheiten für Kilogramm, Ampere, Kelvin usw. haben sich danach zu richten, dass der festgelegte Wert für die Konstanten herauskommt. Da Naturkonstanten nach unserem heutigen Kenntnisstand zeitlich stabil sind, werden auch unsere Maßeinheiten absolut stabil bleiben.

Beim Urkilogramm hatte man das Problem, dass es einen Massenschwund hatte, das waren Differenzen von einem halben Mikrogramm zwischen den Messungen ...

... ja, fünfzig Mikrogramm auf hundert Jahre beim Vergleich zwischen dem Urkilogramm und den nationalen Eichstandards ...

... und deshalb musste man ab und zu die Werte der Naturkonstanten ändern, was aus Sicht der Physik besonders absurd ist ...

... das Schlimmste war, dass man gar keinen festen Bezugspunkt hatte. Wir wussten gar nicht, wie das Urkilogramm nun relativ gesehen driftet. Bei den elektrischen Drahtwiderständen, die bis 1990 als Eichwiderstände eingesetzt wurden, konnte diese Frage durch die Entdeckung des Quanten-Hall-Effektes beantwortet werden. Verschiedene Eichämter waren somit in der Lage, die zeitliche Variation ihrer Eichnormale absolut zu bestimmen. Die Amerikaner hatten eine Negativdrift, die Franzosen eine positive Drift. Sie wussten, dass sie unterschiedliche Widerstände hatten, weil sie sich in Paris trafen, um ihre Ohms zu vergleichen, aber es fehlte noch der Bezugspunkt in Form eines „Natur-ohms“.

Allerdings sind die Eichämter heute mit ihren Watt-Waagen oder der Avogadro-Methode noch nicht in der Lage, die absolute Variation des Urkilogramms zu messen. Wir sind jetzt gerade an der Grenze, die alte Methode mit dem Urkilogramm und die neuen Methoden halten sich in der Genauigkeit ungefähr das Gleichgewicht. Das heißt, dass wir zurzeit noch nicht den Vorteil ausspielen können, dass wir jetzt ein auf Naturkonstanten beruhendes Kilogramm haben. Aber langfristig wird das die bessere, weil genauere Methode sein.

Die Welt wäre auch nicht untergegangen, wenn man es noch um vier Jahre verschoben hätte. Aber man war der Meinung, dass wir diese Entwicklung auf jeden Fall gehen werden. Die elektrischen Einheiten waren ein Grund dafür, dass man nun diesen Weg gegangen ist, denn man möchte jetzt schon feste Bezugsgrößen haben für Eichungen von Spannungen usw.

Zumal man es da wirklich gut machen kann!

Ja, wir wissen, dass die auf zehn Nachkommastellen weltweit die Gleichungen sind.

Da haben Sie über den Quanten-Hall-Effekt mitgeholfen, sozusagen einen Nagel im Einheitensystem einzuschlagen.

Ja (lacht), das ist ein zusätzlicher Beitrag.

Das ist das „Natur-ohm“, von dem Sie immer Schülern erzählen, wie ich gelernt habe, die hier ans Institut zum Praktikum kommen.

Ja, aber die Lichtgeschwindigkeit ist ja als Naturkonstante viel bekannter. Da hat man akzeptiert, dass es sozusagen eine Naturgeschwindigkeit gibt. Aber es gibt eben auch diesen Naturwiderstand.

*Das Interview führte
Roland Wengenmayr am
17. Dezember 2018
am Max-Planck-Institut für
Festkörperforschung in Stuttgart.*

Literatur

- [1] K. von Klitzing, G. Dorda, M. Pepper, Phys. Rev. Lett. **1980**, 45, 494.
- [2] L. Fricke et al., Phys. Unserer Zeit **2015**, 46(2), 70.
- [3] E. O. Göbel, Phys. Bl. **2001**, 57(1), 35.
- [4] P. Becker, M. Gläser, Phys. Unserer Zeit **2001**, 32(6), 254.



Abb. 3 Diese Grafik symbolisiert die Verknüpfung der sieben Basiseinheiten des neuen SI mit den jeweiligen Naturkonstanten. Allerdings bildet K_{cd} für Candela (Cd) eine Ausnahme, diese Konstante ist rein technisch definiert.

INTERNET

Erklärung der Watt- oder Kibble-Waage mit Animation
www.nist.gov/si-redefinition/kilogram-kibble-balance
 Avogadro-Projekt für Kilogramm und Mol mit Video
<http://t1p.de/64qo>
 Informationsseite der PTB zum neuen SI
<http://t1p.de/twl5>