

Jörg Wetterau, Neuberg

„Es gibt immer mehr Fragen als Antworten“

Ein Gespräch mit Physik-Nobelpreisträger Klaus von Klitzing

Er feierte erst kürzlich seinen 75. Geburtstag, ist Physik-Nobelpreisträger, eine „lebende Naturkonstante“ (wie er selbst sagt), arbeitet als Emeritus mit Sonderstatus immer noch bevorzugt nachts (weil es da es weniger Störungen gibt) und ist als Vortragsreisender weltweit gefragt. Der 16. November könnte ein Höhepunkt im Forscherleben von Professor Dr. Klaus von Klitzing vom Max-Planck-Institut für Festkörperforschung in Stuttgart werden. An diesem Tag stimmen die Delegierten der Generalkonferenz für Maß und Gewicht in Versailles über ein neues Einheitensystem ab – und das Urkilogramm soll über die Planck-Konstante – für deren Verständnis wiederum die von Klitzing-Konstante entscheidend ist – als Naturkonstante neu definiert werden und es ersetzen. Am Rande der 130. GDNÄ Versammlung in Saarbrücken stellte sich der hochdekorierter Physiker den Fragen der NR. Ein Gespräch über das Verständnis des elektrischen Widerstands, über die positive Wirkung von Rückschlägen in der Forschung und über Fragen, die man nicht stellen darf.

Herr Professor von Klitzing, Sie haben den Nobelpreis für Physik vor über 30 Jahren erhalten, recht früh für eine Wissenschaftlerkarriere. Sie waren damals 42. Wie hat der Nobelpreis Ihr Forscherleben verändert bzw. beeinflusst?

Ich weiß es noch ganz genau. Als ich den Anruf aus Stockholm bekommen hatte, bekam ich einen Schreck, wie soll ich damit jetzt leben? Der Nobelpreis ist das Höchste, was es in der Wissenschaft zu erreichen gibt. Danach kann es eigentlich nur noch bergab gehen. Es entsteht vor allem von außen ein Erwartungsdruck, der auf einem lastet und den man gar nicht erfüllen kann. Man glaubt, Nobelpreisträger müssten alles wissen und müssten für viele Dinge Verantwortung übernehmen. Das ist schon eine Bürde. Man hat auf einmal eine andere Verantwortung außerhalb seiner Wissenschaft, und alles was man sagt, wird als wichtig eingestuft.

Neben dem Schreck, jetzt ein Nobelpreisträger zu sein, gab es aber doch sicherlich auch viele positive Effekte?

Ja natürlich. Erstens bekommt man jede Menge gute Leute für die Arbeitsgruppe. Da muss man aber schon sehr gut auswählen, denn für viele Bewerber ist es vor allem wichtig, in ihrem Lebenslauf stehen zu haben, dass sie bei einem Nobelpreisträger gearbeitet haben. Und an Forschungsgelder kam ich auch wesentlich leichter. Ich habe die Freiheiten für Grundlagenforschung wirklich ausnutzen können. Ein Programm, das ich koordinierte, nannte sich schlicht „Erzeugung neuen Wissens“ und es wurde zu einem der erfolgreichsten. Da hat mir der

Nobelpreis natürlich sehr viele Türen geöffnet. Und ich bekam für unser Institut am MPI in Stuttgart vom damaligen Ministerpräsidenten Späth sogar ein Gästehaus spendiert, was sehr wichtig für den internationalen Wissenschaftlertausch ist.

Früher wurden zudem alle deutschen Nobelpreisträger der Naturwissenschaften regelmäßig vom Wissenschaftsministerium eingeladen, um von unserer Seite zu hören, was zu verbessern ist. Und das Schöne war, dass sich nach drei oder fünf Jahren tatsächlich etwas geändert hatte. Wir Nobelpreisträger wurden also ernst genommen. Dabei betrieben wir keinen Lobbyismus, sondern vertraten lediglich unsere Überzeugung. Diese Treffen gibt es heute leider nicht mehr.

Was ist die Triebkraft für Ihre Forschung? Was motiviert Sie bzw. hat Sie motiviert, auch nach der höchsten Forscher-ehre noch weiter zu forschen?

Die Neugier ist meine Triebkraft. Es gibt so viele Fragen in den experimentellen Naturwissenschaften, die noch zu klären sind. Jede Erkenntnis setzt einen Schwung neuer Fragen in Gang, und das ist die treibende Kraft für mich. Durch logisches Denken neues Wissen aufzubauen, darum geht es. Ich bin jetzt nicht mehr davon getrieben, mit meiner Entdeckung der Raumtemperatursupraleitung die Welt zu erneuern, das klappt sowieso meistens nicht. Aber aus den gewonnenen wissenschaftlichen Erkenntnissen Schlussfolgerungen zu ziehen und etwas, was noch nicht beobachtet wurde, theoretisch vorherzusagen und zu überprüfen: Das fasziniert mich bis heute. Es ist dieser Kampf, die Natur zu verstehen und aus einzelnen Bausteinen

130. GDNÄ Versammlung in Saarbrücken

ein übergeordnetes Gesamtbild und Verständnis zu erzeugen. Und es gibt immer mehr Fragen als Antworten.

Was hat sich nach der Entdeckung des Quanten-Hall-Effekt und der von-Klitzing-Konstante in den letzten 30 Jahren in Ihrem Forschungsgebiet getan?

Wir waren damals noch nicht soweit, dass wir in die Nanowissenschaften reingehen und einzelne Elektronen untersuchen konnten. Wir hatten noch keine Fallen, um in der Festkörperphysik an einzelnen Elektronen arbeiten zu können. Heute haben wir diese Kontrolle und wir können bis in die einzelnen Bausteine der Materie vordringen. Ich finde es faszinierend, wie wir über die sogenannte Epitaxie – also orientiertes Wachstum von Kristallen – heute Materialien aus *einzelnen* Atomlagen aufbauen können. Früher hatten wir nur die aufwendige Molekularstrahlepitaxie. Heute können wir aber Schichten aus unterschiedlichen Atomlagen einfach übereinander stapeln. Ein Beispiel ist die Herstellung von Graphen, ein zweidimensionaler Werkstoff aus reinem Kohlenstoff, der sogar nur aus einer Atomschicht besteht.

Sie haben den Quanten-Hall-Effekt sicher schon unzählige Male erklärt. Wie erklären Sie diese Entdeckung jemandem, der von Quantenphysik wenig versteht?

Jeder hat sicher ein Bild von einem Atom im Kopf. Um das Atom kreisen Elektronen auf sogenannten Quantenbahnen. Wir machen dasselbe beim Elektron, in dem wir daran von außen Magnetfelder anlegen, die lenken dann die Elektronen ab. Wir machen das mit einer dünnen Schicht aus Elektronen und legen ein Magnetfeld so an, dass sich die Elektronen in einer sehr dünnen zweidimensionalen Schicht im Kreis bewegen. Wir zwingen die freien Elektronen auf geschlossene Bahnen, so dass sie sich quasi in den Schwanz beißen, ohne dass sie vorher streuen. Dabei entstehen Quantenbedingungen wie beim Atom mit verschiedenen Energieebenen und wir können neue Quantenphänomene wie den Quanten-Hall-Effekt beobachten. Derartige Quantenbedingungen findet man in modernen mikroelektronischen Bauteilen, wo sich die Elektronen in der Oberfläche eines Halbleiters bewegen. Beim Graphen kann man diesen Effekt ebenfalls sehr gut studieren, denn da können sich die Elektronen auch nur in einer zweidimensionalen Schicht bewegen.

Wo findet man den Quanten-Hall-Effekt sonst noch? Und welche Bedeutung hat er?

Der Effekt hilft uns heute vor allem zu verstehen, was ein elektrischer Widerstand ist. Wir wissen heute, dass das mit Elektronen zu tun hat, die sich normalerweise bewegen und dann reflektiert werden. Diese Reflektion macht den Widerstand. Nun sind Elektronen nicht nur als Teilchen, sondern auch als Welle aufzufassen. Dieser Welle-Teilchendualismus der Elektronen ist durch den QHE, der uns den elektrischen Widerstand besser verstehen lässt, stärker ins Bewusstsein gerückt.

Viel wichtiger noch ist die Topologie, also die geometrische Anordnung eines Gebildes. Der Quanten-Hall-Effekt wird heute als Mutter aller topologischen Eigenschaften angesehen, denn

er stellt eine völlig neuartige „topologische“ Form der Materie dar, die sich nicht durch Symmetriebrechung beschreiben lässt. Der QHE ist gewissermaßen der Vorläufer eines topologischen Isolators, der sich dadurch auszeichnet, dass er in seinem Inneren ein elektrischer Isolator ist, aber an der Oberfläche leitet. Es gibt mittlerweile viele Theorien, wie man den Quanten-Hall-Effekt etwa in topologischen Quantencomputern nutzen kann. Insgesamt hat der Effekt also viel zum Verständnis der modernen Nanoelektronik beigetragen. Wir betrachten den QHE zwar als Effekt eines einzelnen Elektrons, aber es sind ja stets unzählige Elektronen, die miteinander wechselwirken. Das spielt in der Supraleitung eine Rolle oder auch beim Magnetismus. Und das ist ein weites Forschungsgebiet, mit dem ich mich aktuell am Max-Planck-Institut noch mit zwei unabhängigen Forschergruppen beschäftige.

Sie sind regelmäßiger Teilnehmer bei der Nobelpreis-trägertagung in Lindau am Bodensee. Wie wichtig ist Ihnen der Austausch mit Nachwuchswissenschaftlern? Welche Ratschläge haben Sie für die junge Generation?

Ich werde von jungen Nachwuchswissenschaftlern oft gefragt, wie man mit Rückschlägen in der Forschung klar kommt. Ich sage immer, jeder Rückschlag ist auch ein Lernprozess und eine neue Erkenntnis. Ich sehe das eher positiv. Wichtig ist natürlich, die richtigen Fragen zu stellen und daraus die richtigen Konsequenzen zu ziehen. Rückschläge haben mich eher motiviert, neue Wege zu gehen. Dazu muss man natürlich auch die Freiheiten an der Forschungsfront haben, in eine andere Richtung zu gehen und auch mal ganz anders denken zu können und zu dürfen.

Ich sage der jungen Generation immer: Ihr müsst Selbstvertrauen haben, Spaß und Begeisterung bei der Forschung entwickeln, nicht zu sehr planen, denn Ihr wisst nicht, was in den nächsten 20 Jahren passiert. Geht in andere Länder, lernt andere Forschercommunities und Kulturen kennen, tauscht euch aus. Heutzutage spielen internationale Verbindungen eine große Rolle. Zeigt anderen, was Ihr könnt, geht zu Tagungen, vergleicht Euch mit anderen Gruppen. Ich bedauere aber sehr, dass der Druck zum Veröffentlichenden heute bei vielen jungen Forschern oder Post-Docs enorm hoch ist. Das war zu meiner Zeit noch nicht so. Heute steht so etwas ja schon in Verträgen – etwa Veröffentlichungen in *Science* oder *Nature* – und bei diesem Druck sehe ich die Gefahr, dass gemogelt wird. Natürlich muss sich jeder selbst kritisch fragen, ob die Ergebnisse Hand und Fuß haben und auch wirklich reproduzierbar sind. Ich sehe meine Aufgabe dann darin, zu korrigieren und die nötige Kritik zu üben. Ich gelte in dieser Hinsicht übrigens oft als destruktiv.

Welche Bedeutung hat der 16. November 2018 für Ihre Forschung und Lebensleistung? An diesem Tag werden die Delegierten der Generalkonferenz für Maß und Gewicht in Versailles über ein neues Einheitensystem abstimmen – und das Urkilogramm soll über die Planck-Konstante – für deren Verständnis wiederum Ihre von-Klitzing-Konstante entscheidend ist – als Naturkonstante neu definiert werden und es ersetzen.

Wetterau: Ein Gespräch mit Physik-Nobelpreisträger Klaus von Klitzing

Ehrlich gesagt, der 16. November ist ein Höhepunkt in meinem Leben. Ich bin stolz darauf, dass ich eingeladen worden bin, dort den Eröffnungsvortrag zu halten, vor diesem Gremium, das für die ganze Welt das neue Einheitensystem festlegt. Da werde ich auch versuchen, den mehr politisch angehauchten Delegationsvertretern die Begeisterung für Wissenschaft zu vermitteln. Und zu zeigen, wie wichtig Grundlagenforschung ist, denn die hat durch meine Erkenntnisse dazu beigetragen, dass alle SI-Einheiten auf physikalische Konstanten zurückzuführen sind. Ich halte ja viele Vorträge weltweit, aber dieser

Vortrag hat dann noch eine besondere emotionale Note. Denn schließlich bin ich ja gewissermaßen der Schuldige, dass zuerst alle elektrischen Messungen und in der Zukunft auch andere Maßeinheiten auf Naturkonstanten basieren werden.

Die Neudefinition der Masse liegt vor allem darin begründet, dass der Prototyp des Ur-Kilogramms in Paris – ein Zylinder aus den Edelmetallen Platin und Iridium – über die Jahrzehnte geschrumpft ist, wenn auch nur minimal. Aber er ist als Maßeinheit nicht mehr verlässlich, etwa für Kalibrie-

DER GESPRÄCHSPARTNER UND „SEINE“ KONSTANTE

Prof. Dr. **Klaus von Klitzing** wurde 1943 in Schroda (heute Polen) geboren und wuchs nach der Flucht der Familie 1945 in Vechta, Oldenburg und Essen i. O. auf. Nach seinem Abitur 1962 am Artland-Gymnasium in Quakenbrück (Landkreis Oldenburg) studierte er Phy-



sik an der Technischen Universität Braunschweig. Im Anschluss an sein Diplom (1962) war er bis 1980 in der Abteilung von Professor Gottfried Landwehr (Mitinitiator des Max-Planck-Instituts für Festkörperforschung in Stuttgart) an der Julius-Maximilians-Universität Würzburg tätig. 1972 wurde er mit einer Arbeit über *Galvanomagnetische Eigenschaften von Tellur in starken Magnetfeldern* promoviert, 1978 folgte die Habilitation. Forschungen in starken Magnetfeldern standen auch im Mittelpunkt seiner Aufenthalte am Clarendon Laboratory in Oxford (1975–1976) und als Heisenberg-Stipendiat am Hochfeld-Magnetlabor in Grenoble (1979–1980). In Grenoble machte er die Entdeckung, die bereits 1985 mit dem Nobelpreis für Physik gewürdigt wurde. 1980 wurde er auf den Lehrstuhl für Physik der Technischen Universität München berufen, den er bis Ende 1984 innehatte. Von 1985–2018 war er Direktor am Max-Planck-Institut für Festkörperforschung in Stuttgart und Honorarprofessor der Universität Stuttgart. Prof. von Klitzing engagiert sich seit vielen Jahren, Kinder und Jugendliche an Naturwissenschaften heranzuführen: Vor allem in Schulen soll die Neugier für Naturwissenschaft und Technik geweckt werden. Für besonders engagierte Lehrerinnen und Lehrer wird daher seit 2005 einmal jährlich der **Klaus-von-Klitzing-Preis** vergeben, der mit 15 000 Euro dotiert ist.

Der von Klaus von Klitzing entdeckte **Quanten-Hall-Effekt** (QHE) tritt auf, wenn ein zweidimensionales Elektronengas bei sehr tiefen Temperaturen (ca. 2 K) einem starken, senkrecht dazu wirkenden Magnetfeld (ca. 15 Tesla) ausgesetzt ist. In einer nur ein Atom dicken Kristallschicht ändert sich dann der elektrische Widerstand nicht kon-

tinuierlich (wie beim klassischen Hall-Effekt), sondern „quantisiert“. Dabei ist der Hall-Widerstand stets ein ganzzahliger Bruchteil des Naturkonstanten-Quotienten h/e^2 (h = Plancksches Wirkungsquantum, e = Elementarladung), woraus sich eine neue Konstante, die

von-Klitzing-Konstante ergibt; $R_K = 25\,821,807493045\ \Omega$.

Der Quanten-Hall-Effekt ist seit 1990 empfohlene Grundlage für die Einheit Ohm im Internationalen Einheitensystem (SI). Darüber hinaus soll er zur Neudefinition des Kilogramms herangezogen werden. Der QHE bzw. die von-Klitzing-Konstante kommt ins Spiel, um eine hochgenaue Bestimmung des Plancksche Wirkungsquantums h vornehmen zu können. Diese hat die Dimension $J \cdot s$ (Energie mal Zeit, also $s^{-1} \cdot m^2 \cdot kg$) und ist damit direkt mit dem Kilogramm gekoppelt. Eine hochgenaue Bestimmung von h kann mit Hilfe des Quanten-Hall-Effekts und eines weiteren quantenphysikalischen Effekts, der Josephson-Spannung, mit der Kibble-Waage vorgenommen werden. Diese ermöglicht einen äußerst präzisen Vergleich von mechanischer und elektrischer Leistung (daher auch Watt-Waage genannt).

Parallel – und in Ergänzung zu Messungen mit der Kibble-Waage – wird auch mit dem Avogadro-Projekt das Ziel verfolgt, den Internationalen Kilogrammprototyp abzulösen. Hierfür soll durch Herstellung einer Kugel aus isotoopenreinem Silicium-28 die Verknüpfung zwischen atomaren Massen und dem Kilogramm hergestellt werden. Sowohl mit



Messungen über die Kibble-Waage als auch über die Herstellung hochreiner Siliciumkugeln wird es möglich sein, den Internationalen Prototyp als Referenz abzulösen. Entscheidend für die Neudefinition des Kilogramms ist, dass in mehreren Laboratorien nachweislich geeignete Mess- bzw. Herstellungsbedingungen vorliegen, um geeignete Referenzmassen in hoher Präzision herstellen zu können.

130. GDNÄ Versammlung in Saarbrücken

rungen. Daher soll neben den Basis-Einheiten Länge, Zeit, Stromstärke, Temperatur, Lichtstärke und Stoffmenge nun auch die Masse über eine Naturkonstante festgelegt werden. Welche der favorisierten Messmethoden dürfte am Ende die Nase vorn haben: Die Kibble-Waage oder das Avogadro-Projekt?

In Deutschland wird aktuell das Avogadro-Projekt durch die Physikalisch-Technische Bundesanstalt in Braunschweig vorangetrieben. Hier geht es um die atomare Masse von Silicium. Man zählt im Prinzip bei dieser Methode Atome hochreiner Silicium-Kugeln. Das Projekt verknüpft die makroskopische Masse mit der mikroskopischen Masse. Dabei spielt letztlich auch die Planck-Konstante eine Rolle, denn die ermöglicht erst die Festlegung mikroskopischer Massen bzw. der Masse von Elektronen. Und über diesen Weg kommt man dann auch zur Masse eines Siliciumatoms. Die Planck-Konstante wird nun über einen konkreten, festen Zahlenwert festgelegt, darüber definiert sich dann die Elektronenmasse und letztlich über den Weg der Atommasse von Silicium kann man dann das Kilogramm bestimmen. Vielleicht ist am Ende das Avogadro-Projekt für Anwender einfacher als die Kibble-Waage.

Die Kibble-Waage, die früher auch Watt-Waage genannt wurde, wird allerdings schon weltweit von verschiedenen Instituten genutzt. Und es ist eine Grundbedingung in der Metrologie, dass es mindestens drei unabhängige Gruppen gibt, die damit arbeiten. Dies ist beim Avogadro-Projekt noch nicht der Fall. Es gibt noch nicht so viele Gruppen, die das unabhängig voneinander betreiben. Zudem gibt es beim isopenreinen Silicium nicht so viele Quellen, da haben die Russen ein Monopol. Unabhängig davon liefern aber beide Verfahren sehr genaue Werte für die Planck-Konstante.

Mein Herz schlägt naturgemäß mehr für die Kibble-Waage, die einen elektrischen Zugang zum Kilogramm ermöglicht, denn dabei wird der Quanten-Hall-Effekt genutzt. Aber ich finde es schön, dass unterschiedliche Experimente zum selben Ergebnis kommen. Und entscheidend ist, dass nun endlich Naturkonstanten als die stabilsten Größen, die wir kennen, das Fundament für alle Messungen bilden werden und dass der quantisierte Hallwiderstand ein Bestandteil unseres Einheitensystems wird.

Max Planck und Sie sind quasi für die Nachwelt untrennbar nicht nur als Nobelpreisträger sondern auch physikalisch über die jeweiligen Konstanten miteinander verbunden. Und letztlich schließt sich durch die Festlegung eines neuen internationalen Einheitensystems der Kreis. Schon Planck hatte ja die Idee gehabt, zeitlich und örtlich stabile Maßeinheiten über Naturkonstanten zu definieren. Bei Ihrem Nobelvortrag auf der 130. GDNÄ-Versammlung haben Sie nicht nur den Weg dieser Idee bis zur Umsetzung gezeigt, sondern Herrn Planck zum 100. Jahrestag seines Nobelpreises per E-Mail

symbolisch den exakten Wert für seine Planck-Konstante ($h = 6,62607015 \cdot 10^{-34}$ Js) übermittelt. Diese Aktion kam beim Publikum sehr gut an.

Ja, Max Planck war begeistert von den Konstanten. Er hat anfänglich nicht wirklich an die Quantentheorie geglaubt, aber die Fundamentalkonstanten, die haben ihn geprägt und darauf hat er sich konzentriert. Zu seinem damaligen 80. Geburtstag hatte Planck von seinen Kollegen in einer nicht ernst gemeinten Theateraufführung einen sehr genauen Wert von h erhalten, der jedoch wegen der Heisenbergschen Unschärferbeziehung noch Fehler enthielt. Erst dank moderner Quantentechnologie können wir heute den genauen Wert des Planckschen Wirkungsquantums festlegen.

Aber es ist schon so eine Sache mit den Konstanten, denn die können einen auch schon mal an den Rand der Verzweigung und zum Nachdenken bringen. Nehmen wir mal die Feinstrukturkonstante, eine dimensionslose Naturkonstante die neben h , die Lichtgeschwindigkeit c und der Elementarladung e beinhaltet und ungefähr den Wert $1/137$ hat. Wenn diese Konstante nur um 4% abweichen würde, dann gäbe es kein Leben auf der Welt, weil es dann vielleicht nie, sagen wir, zur Bildung von Kohlenstoff gekommen wäre. Wer hat diese Konstanten geschaffen? Gibt es Paralleluniversen mit anderen Konstanten? Weswegen haben diese Konstanten die Werte, die sie haben? Daran sind viele Wissenschaftler schon verzweifelt. Und auf diese Frage habe ich auch keine Antwort.

Das ist also ungefähr so, wie die Frage, was war vor dem Urknall?

Nein, diese Frage ist sinnlos. Es gibt Fragen, die man nicht stellen darf. Dürfen Sie am Nordpol fragen, wo ist der Südpol? Der kann in jeder Richtung liegen. Es gibt Fragen, die wir gar nicht stellen können, weil wir eine Antwort immer mit Zeit und Ort separieren. Und bei der Frage, was war davor, da haben wir schon wieder die Zeitskala im Blick. Das ist dann schon nicht erlaubt. Und wie sollen wir eine Antwort finden auf eine Frage, die nicht erlaubt ist?

Die Fragen stellte Dr. Jörg Wetterau am 16. September 2018 in Saarbrücken.



Dr. **Jörg Wetterau** (geb. 1966) studierte Chemie an der Justus-Liebig-Universität in Gießen und war bis zu seiner Promotion 1998 als Fachjournalist tätig (Stipendiat für Wissenschaftsjournalismus des VCI). Danach wechselte er als Pressereferent zum Industriegase-Hersteller Messer Griesheim nach Krefeld. Bis September 2018 betreute er beim Technologiekonzern Heraeus in Hanau die Technologiekommunikation; er ist freiberuflich als Kommunikator und Fachjournalist für Technologie, Innovation und Wissenschaft aktiv.

Im Unterfeld 3a, 63543 Neuberg, E-Mail: joerg.wetterau@gmail.com