

# Messen

## Ein Bericht aus der Physikforschung

Interview mit Norbert Koch



Norbert Koch ist Professor für Struktur, Dynamik und elektronische Eigenschaften molekularer Systeme am Institut für Physik der Humboldt-Universität zu Berlin und war Principal Investigator am Exzellenzcluster *Bild Wissen Gestaltung*. Die HerausgeberInnen haben ihn im Mai 2018 in seinem Labor in Adlershof besucht, um mit ihm über sein Verständnis und seine Praxis des Experimentierens in der interdisziplinären Entwicklung neuer Materialien zu sprechen.

### **Hrsg.: Können Sie uns den typischen Ablauf eines Experiments beschreiben?**

Norbert Koch: Meistens geht es uns darum, das Verhalten eines neuen Materials oder ein neues Zusammenspiel bekannter Materialien zu verstehen, die eine gewisse Funktion im optoelektronischen<sup>1</sup> Kontext erfüllen sollen. Im Labor versuchen wir eine künstliche Situation herzustellen, die geeignet ist, möglichst alle Parameter des Materials unter Kontrolle zu haben. Dieses Material wird dann mit einer Vielzahl von physikalischen und chemischen Analysemethoden untersucht, wobei es darum geht, dass wir bei jedem Schritt genau sagen können, was wir untersuchen – im Idealfall bis auf die Position jedes einzelnen Atoms genau.

### **Kann man das so genau wissen?**

Man kann das durchaus wissen: für die begrenzten Volumina des Experiments und auch nur für den Moment der Messung. Es ist aber auch vollkommen klar, dass sich im Laufe der Zeit das Material ändert. Diese Dynamik eines natürlichen Materials sehen wir uns im Zeitraffer an.

Wenn wir dann genau wissen, was das Material ausmacht, welche Struktur es hat, dann können wir die Eigenschaften untersuchen, die relevant für Elektronik und Optoelektronik sind. Das sind in erster Linie der Ladungsträgertransport, die Struktur von elektronischen Zuständen und die optoelektronische Funktion,

1 Halbleiterelektronik, die Daten in Licht umwandelt (z. B. in die Pixel in Computerbildschirmen) oder Licht in Daten umwandelt (z. B. in die Informationen des Lichtsensors in einer Digitalkamera).

sprich: Was ist die Wechselwirkung des Materials mit Licht oder mit Licht und Strom gemeinsam?

**Wie stellen Sie sicher, dass Sie wirklich das Material untersuchen, das Sie untersuchen wollen, und nicht vielleicht eine Verunreinigung?**

Zunächst muss das Material sehr kontrolliert hergestellt werden. Moleküle werden zum Beispiel von unseren Kollegen in der organischen Chemie hergestellt. Sie setzen dabei Standardverfahren ein, die genau festlegen, wie das Material aufgereinigt, wie die einzelnen Molekülsorten sortiert werden und wie das Material abgefüllt wird. So erhalten wir ein Material, bei dem wir eine Reinheit von 99 oder 99,99 Prozent messen können, und dann lassen wir unsere Methoden darauf los.

Aber Sie haben vollkommen Recht: Das Wichtigste dabei ist es, eben nicht zu glauben, dass eine Reinheit von 99,99 Prozent bedeutet, dass man die Eigenschaften von hundertprozentigem Material misst. Nein, man misst dann tatsächlich immer die Eigenschaften dieser 99,99 Prozent plus was auch immer die Verunreinigung ist. Und das kann manchmal für die Eigenschaften dominierend sein. Kennen Sie dieses Gerät, das vor uns auf dem Tisch liegt [dort liegt ein digitales Aufnahmegerät]? In jedem Computer befindet sich ein Siliziumchip. Silizium wird mit bestimmten Atomen dotiert und nur das macht die Funktionalität zum Schluss aus. Wir reden hier nicht mehr von 0,01 Prozent Unreinheit, sondern von ein paar Einheiten per Million oder per Trillion. Dennoch dominieren hier diese minimalen Unreinheiten sogar die gewünschten Eigenschaften des Materials.

**Wie beginnt Ihre Suche nach bestimmten Materialeigenschaften? Gibt es einen konkreten Anwendungsfall oder suchen Sie zum Beispiel einfach nach einem Material, das besser leitet, und finden später den Anwendungsfall dafür?**

Meistens sind wir auf der Suche nach konkreten Eigenschaften, um bekannte Probleme mit Bauelementen, ihrer Anwendung oder ihrer Herstellung zu lösen. Zum Beispiel versuchen wir die Energieeffizienz von Bildschirmen zu erhöhen. Da ist ein riesiges Potenzial vorhanden. Es gibt natürlich auch ein bisschen „Blue-Sky-Research“, bei dem es wirklich nur um grundlegende Eigenschaften von Materie geht. Aber für uns geht es vor allem um eine potenzielle Anwendung, die aber absolut wahnsinnig sein kann, von der man gar nicht weiß, ob sie jemals auf den Markt kommen wird.

**Gibt es einen Unterschied zwischen diesen beiden**

**Experimentalkulturen, zwischen diesen beiden Vorgehen?**

Manchmal im Selbstverständnis der Individuen, aber nicht grundlegend. Die Forscherinnen und Forscher, die es dann ganz richtig machen, die mischen.

**Wie verstehen Sie in Ihrer Forschung das**

**Wechselverhältnis zwischen Experiment und Theorie?**

Ohne Theorie ist unsere Forschung undenkbar. Das ist ganz klar. Die Frage ist jeweils nur, ob wir dominant induktiv oder deduktiv vorgehen.

**Gibt es in Ihrer Forschung eine gewisse kulturelle**

**Präferenz für deduktives oder induktives Vorgehen?**

**Gibt es so etwas wie den richtigen Weg in Ihrer**

**Experimentalkultur?**

Darüber denke ich oft nach. Das ist ja auch ein Henne-Ei-Problem. Man startet nicht bei null, denn es gibt schon sehr viele Theorien. Und was bezeichnet man denn jetzt wirklich als Theorie? Vielleicht sollte man sich zurückziehen auf das, was so gut wie möglich gesichert ist? Ich glaube, zunächst reicht es aus zu wissen, welche Wechselwirkungen wir kennen, denen jeweils eine Theorie zugrunde liegt. Dann kommt oben drauf die Quantenphysik, die sich mit den allermeisten dieser Theorien verbinden lässt – wenn auch nicht vollständig, weil die Gravitation da noch außen vor steht. Damit lässt sich mein Experiment ausreichend gut beschreiben, da ich weiß, dass die Gravitation bei meinen Experimenten so gut wie keine Rolle spielt.

Von diesem Punkt aus starte ich das Experiment und versuche es mit diesen Theorien zu beschreiben, was klappen kann oder eben nicht. Dann stellt sich heraus, wie gut mein Wissen und mein Verständnis der Theorien sind. Das Entwickeln neuer Theorien sehe ich aber nicht als Teil unseres Feldes an. Wir entwickeln neue Methoden zur Anwendung der Theorie. Mit Methoden meine ich: Wie kann ich die doch recht komplexen Theorieformulierungen auf etwas Konkretes anwenden? Wie kann ich diese Formulierungen in der Anwendung numerisch vernünftig lösen – analytisch geht es ja meistens nicht. Das wird oftmals schon auch als Theorie bezeichnet, ist aber nicht notwendigerweise die Weiterentwicklung der Theorie, sondern eine Möglichkeit, die Theorie sinnvoll anzuwenden.

## **Wie würden Sie das Verhältnis zwischen Experiment und Beobachtung beschreiben?**

Aus meiner Sicht ist das zunächst etwas ganz Einfaches: Die Beobachtung ist etwas Passives, das Experiment ist etwas Aktives. Natürlich geht das Hand in Hand. Man kann das eine nicht vom anderen trennen. Denn Beobachtungen sind immer Teile eines Experiments. Aber Beobachtung alleine ist immer etwas Passives. Da bekomme ich nur eine Antwort auf die Frage „Was passiert?“ und nicht auf die Frage „Was passiert, wenn ...?“

Also, Beobachtung ist: Ich greife nicht in etwas ein, sondern ich schaue mir etwas an. Und das kann eine Messung, eine visuelle Beobachtung oder das Erstellen von Statistiken sein. Aber das ist nichts Aktives.

Aber vielleicht ist das auch ein bisschen überspitzt gesagt, denn durch reines Beobachten kann ich durchaus auch Korrelationen herstellen und damit hätte ich dann die Antwort auf die Frage „Was ist, wenn ...?“. Ich kann aber durch reines Beobachten selten viele Parameter kontrollieren. Ziel des Experiments ist es, eine eindeutige Frage zu beantworten. Das schaffe ich nur, wenn ich möglichst alle Parameter, die mir bekannt sind, kontrollieren kann. Und das kann ich bei der reinen Beobachtung ja selten. So sind für mich die Unterschiede sehr, sehr klar. Da stelle ich mir gar nichts Konkretes vor. Ich rede jetzt von Wissenschaft allgemein.

## **Und wie ist es denn konkret in der Physik? Gibt es da ein spezielles Verständnis von Experiment oder sogar speziell im Fach der molekularen Elektronik?**

Ein solches spezielles Verständnis sehe ich überhaupt nicht, denn das Ziel ist das gleiche. Wozu dient ein Experiment? Eben dazu, unter kontrollierten Bedingungen Antworten auf eine Frage zu generieren. Meistens ist es eine Frage, die am Anfang steht. Die Frage kann ich nur dann haben, wenn ich etwas nicht verstehe. Das entwickelt sich natürlich im Laufe der Zeit, aber immer wieder, egal woran ich arbeite, komme ich an einen Punkt, wo ich etwas nicht verstehe, zum Beispiel getrieben durch Beobachtungen, die andere KollegInnen in ihren Experimenten gemacht haben und die sie auch nicht verstanden haben.

Ich arbeite im Bereich der optoelektronischen Bauelemente und dort stellt man sehr oft fest, dass man durch reines Engineering, also einfach durch Permutation von verschiedenen Parametern, das momentan beste Bauelement findet. Warum es dann so toll funktioniert, kann selten jemand sagen.

Diese Entwicklung geht im Allgemeinen sehr schnell, aber irgendwann steht sie vor einer Mauer, die sich nicht mehr durchdringen lässt. Durch reine Variation der Parameter, die bekannt sind, lässt sich das Bauelement nicht mehr verbessern. An dem Punkt muss man sagen: „Jetzt muss ich wirklich verstehen, warum dieses Bauelement das beste ist.“ Dann können wir beispielsweise probieren, von der atomistischen Struktur kommend aufzuklären, warum dieses Bauelement in der Konfiguration mit diesen Materialien am besten funktioniert. Dann hat man es verstanden und die Mauer überwunden und kann von dort aus weitergehen.

**Ich stelle mir vor, dass diese Mauer oft auch nicht überwunden, sondern als Problem veröffentlicht wird, das dann wiederum von anderen Laboren aufgegriffen wird. Wäre der erste Teil trotzdem als eigenständiges Experiment zu verstehen?**

Ja, durchaus. Das ist schon ein Experiment. Das liefert mir zwar noch nicht die Antwort auf meine Frage und ich muss dann viele weitere Experimente machen, um zur Antwort zu gelangen. Andererseits ist es auch üblich, viele Einzelexperimente als ganzes großes Experiment zu bezeichnen. Das alles lässt das Wort „Experiment“ zu. Aber es kommt wirklich drauf an, ob ich danach schon einen Ausgang gefunden habe und was ich als Teil des Experimentierens verstehe und was nicht. Wie gesagt, ich kann das von sehr klein bis sehr groß fassen.

**Haben Sie bereits Erfahrung mit interdisziplinären Experimenten gemacht? Ich habe auf Ihrer Website gelesen, dass Chemie und Elektronik die Disziplinen sind, mit denen Sie am meisten zusammenarbeiten. Fällt Ihnen da vielleicht ein Experiment ein, das Sie beschreiben könnten?**

Das wäre dann eben ein Experiment, das größer gefasst ist. Gehen wir einmal von einer Idee aus: Welche Art von Bauelement hätte ich gerne? Was soll das können? Dann können wir sagen, welche Eigenschaften das Material haben soll, zum Beispiel einen besonders schnellen Ladungsträgertransport oder besonders starke Lichtemission. Um diese Eigenschaften zu erreichen, setzen sich dann drei Leute aus den Disziplinen Physik, Chemie und Elektrotechnik zusammen und diskutieren das Problem. Der eine sagt: „Das und das brauchen wir, damit das Bauelement gut funktioniert.“ Dann kann ich sagen: „Naja, aus dem, was ich über die grundlegenden Eigenschaften von Materialien weiß, müsste man die und die kombinieren. Dafür bräuchte ich allerdings eine

bestimmte Molekülsorte, die speziell dafür geeignet ist.“ Dann kommt der Chemiker ins Spiel und lacht mich meistens aus und sagt: „Das können wir aber nicht bauen.“

Das iterieren wir so lange, bis die KollegInnen aus der Chemie sagen: „Ja, das können wir wahrscheinlich synthetisieren.“ Und dann startet diese große gemeinsame Aktion, indem ChemikerInnen zunächst mal einen Weg finden, die Synthese dieses Moleküls zu realisieren. Dann kommt das zu uns und wir schauen nach, ob es wirklich die grundlegenden Eigenschaften hat, die wir erwartet haben. Wenn sich das bestätigt, baut die Elektrotechniklerin daraus ein Bauelement und schaut, ob tatsächlich das Ziel erreicht wurde.

**Wird die Fragestellung gemeinsam entwickelt oder gibt es vielleicht eine Disziplin, die sozusagen eine Leitfrage hat, der sich die anderen unterordnen?**

Das passiert im Wechselspiel. Tatsächlich kommt es vor, dass die wichtigste Idee dazu aus der Elektrotechnik kommt. Alles Weitere folgt darauf. Natürlich haben auch ChemikerInnen eine Ahnung von Bauelementen. Und dann kommt – weil man sich ja dauernd unterhält – aus der Chemie so eine Idee: „Achtung, ich hab da eine Idee für ein Molekül, es kann das und das. Könnte man nicht mal schauen, ob sich das sinnvoll als Bauelement umsetzen lässt?“ Oder die Idee kommt aus der Mitte heraus.

**Das heißt, dass etwas komplett gemeinsam entwickelt wird?**

Ideen blitzen einfach auf, hier oder da. Im Gespräch zwischen zweien oder dreien, wenn sie nur lang genug an einem Tisch sitzen. Das kann natürlich nur im direkten und ungezwungenen Austausch erfolgen und das erfordert nun mal körperliche Präsenz. Über alle anderen Kommunikationsmethoden, die wir so kennen, funktioniert das nicht in dieser Intensität. Zumindest für mich nicht. Die besten Ideen hatten wir nur, wenn wir wirklich zusammensaßen, zum guten Teil auch im Gasthaus.

Deshalb ist es auch wichtig, dass bereits im Studium die Leute aus unterschiedlichen Disziplinen viel Zeit zusammen im Labor verbringen und so lernen, sich miteinander zu unterhalten.

Interdisziplinär zu arbeiten ist für mich das Natürlichste der Welt. Man muss aber eine gemeinsame Sprache finden. Das dauert zwar etwas, aber meistens ist das Interesse so groß, dass man es doch tut.



Die Arbeit am Antrag des Exzellenzclusters fand ich mitunter am interessantesten. Denn hier kamen 25 Principal Investigators aus 23 Disziplinen zusammen und jeder brachte seine eigene Sprache mit. Hier eine gemeinsame Sprache zu finden, verlangt von jedem ein Geben und Nehmen – das war das eigentlich Spannende zu der Zeit.

**Waren Sie in Situationen, in denen es schwierig war, sich mit Leuten aus anderen Disziplinen zu verständigen?**

Ich hatte nie ein Problem, mich mit jemandem aus einer anderen Disziplin zu verständigen. Ich denke jetzt spontan an Architektur, Kunstgeschichte und Kulturwissenschaften. Mit denen habe ich im Cluster am meisten interagiert.

Haben Sie schon von dem neuen IRIS-Forschungsbau gehört? Das ist tatsächlich als Experiment angelegt gewesen. Die Fragestellung dabei war: Wie muss ein Forschungsbau für die interdisziplinäre Zusammenarbeit von Physik und Chemie und Elektrotechnik untereinander und mit Angehörigen anderer Disziplinen aussehen, damit die Arbeit möglichst produktiv ist bzw. möglichst viel Spaß macht? Für mich ist das synonym. Also haben sich Leute aus der Architektur, Kunstgeschichte, Kulturwissenschaften, Physik und Chemie zusammengefunden und beschlossen, ein Experiment daraus zu machen. Die Hypothese war: Es gibt oder es gibt nicht Richtlinien, wie man einen Bau gestalten muss, damit es möglichst produktiv wird. Dann realisieren wir diesen Bau nach diesen Maßgaben – wenn es sie gibt – und schauen uns an, ob die Arbeit wirklich produktiver geworden ist im Vergleich zu dem, wie wir sie vorher kannten. Das wäre für mich ein Experiment.

Also haben wir uns gemeinsam auf den Weg gemacht und uns angeschaut, wie verschiedene Laborbauten der Welt, die an interdisziplinären Forschungsthemen arbeiten, gestaltet sind. Wie sehen diese Bauten aus? Wie agieren die Leute darin und welche Wünsche oder Probleme haben sie? Idealerweise wurden diese Befragungen unabhängig von Alter und kulturellem Hintergrund durchgeführt. Tatsächlich wurden daraus einige Richtlinien abgeleitet, die in dem von Charlott Klonk herausgegebenen Buch *New Laboratories. Historical and Critical Perspectives on Contemporary Developments* zu finden sind.

Von diesem Set von Richtlinien, die beschreiben, wie so ein Bau aussehen sollte, haben wir die ArchitektInnen, die diesen Bau dann geplant haben, überzeugen können. Ich fand es spektakulär, dass sie gleich eingestiegen sind. Und dann kam das große Problem, weil aus Kostengründen wieder einige Konzepte rausgestrichen werden mussten.

Ja, das ist dann das Problem der Realisierung. Am Schluss haben wir nur noch einige von diesen Richtlinien in der baulichen Gestaltung wirklich verankern können. Ein paar finden sich wieder, aber bei weitem eben nicht alle. Das finde ich extrem schade. Wenn der Bau einige Jahre in Betrieb war, wird man aber trotzdem Beobachtungen und Befragungen machen können: „Hat sich denn etwas geändert im Vergleich zu dem, wie ihr es aus anderen Bauten kennt? Was?“ Und natürlich auch eine subjektive Zufriedenheitsbefragung derer, die vielleicht gar kein anderes Labor kennen.

### **Wie wichtig ist es, dass in Ihren Experimenten übertragbares Wissen entsteht?**

Das ist extrem wichtig. Das Erste ist: Alles muss so dokumentiert sein, dass ein Experiment in jedem beliebigen Labor der Welt nachgemacht werden kann und dieselben Resultate erzielt werden. Wenn das nicht funktioniert, gibt's ein Problem. Andere Leute wollen darauf aufbauen und versuchen zunächst einmal das publizierte Experiment zu wiederholen. Wenn mehrere Labore weltweit dieses Experiment dann nicht reproduzieren können, wird es ernst für diejenigen, die publiziert haben. Meistens stellt sich heraus, dass schlampig gearbeitet oder gar fehlerhaft publiziert wurde. Diesen Scientific Misconduct gibt es natürlich. Das macht die Dokumentation besonders wichtig.

Wobei man auch ein anderes, wenig beachtetes Problem einmal ansprechen muss: Wir machen auch viele Experimente mit einem *vermeintlichen* Negativbefund als Ergebnis. Wenn wir auf der Suche nach Materialien sind, die bestimmte Eigenschaften aufweisen sollen, finden wir auch viele Moleküle, die diese Eigenschaften eben nicht haben. Das wird sehr selten publiziert, geradezu gar nicht. Dadurch geht wirklich sehr viel Wissen den Bach runter. Das ist ein Problem, da viele Labore dieser Welt dieselben (Negativ-) Ergebnisse produzieren, die aber nicht veröffentlichen. Insofern sollte man immer überlegen, ob das Ende eines Experiments wirklich das Ende ist.