

## Masterclasses in Quantenphysik

Stina Scheer\*, Azadeh Ghanbari<sup>+</sup>, Gunnar Friege\*, Rainer Müller<sup>+</sup>

\*Institut für Didaktik der Mathematik und Physik, AG Physikdidaktik, Leibniz Universität Hannover, Welfengarten 1A, 30167 Hannover, <sup>+</sup>Institut für Fachdidaktik der Naturwissenschaften, Abt. Physik und Physikdidaktik, Technische Universität Braunschweig, Bienroder Weg 82, 38106 Braunschweig  
[a.ghanbari@tu-bs.de](mailto:a.ghanbari@tu-bs.de)  
[scheer@idmp.uni-hannover.de](mailto:scheer@idmp.uni-hannover.de)

### Kurzfassung

Im Rahmen des Exzellenzclusters QuantumFrontiers werden Masterclasses konzipiert, die Themen aus den Forschungsbereichen des Clusters vermitteln. Die Zielgruppe sind dabei vor allem Schülerinnen und Schüler der gymnasialen Oberstufe, aber es werden auch Angebote für Lehrkräfte und ausgesuchte (z.B. Wettbewerbs-) Gruppen konzipiert. Die Lernenden sollen durch eine Kombination aus Workshops, eigenständigem Lernen und Experimentieren, Laborführungen und Kontakt zu Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler an ein konkretes Forschungsthema herangeführt werden.

An den beiden Clusterstandorten Braunschweig und Hannover werden Kurse zu verschiedenen Themen konzipiert in deren Durchführung auch Forschende der beteiligten Institutionen LUH, PTB und TU BS mit einbezogen werden. Somit verfolgen die Masterclasses nicht nur das Ziel die Schülerinnen und Schüler für Physik zu begeistern, sondern bieten ebenfalls eine wertvolle Lehrerfahrung für (Nachwuchs-) Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler.

Die größte inhaltliche Herausforderung dieses Formats ist die Aufarbeitung aktueller Forschungsthemen – thematisch oft gar nicht oder nur teilweise in den Lehrplänen verankert – auf ein angemessenes fachliches Niveau.

### 1. Einführung

Masterclasses sind ein Konzept, welches vor allem in der Musik und anderen künstlerischen Disziplinen verbreitet ist. Dabei lernen Studierende oder Schüler in einem Workshop-Format direkt von einem Experten des jeweiligen Gebiets. Im Bereich der Physikvermittlung sind Masterclasses vor allem durch die vom Netzwerk Teilchenphysik durchgeführten Teilchenphysik-Masterclasses bekannt, welches sich an Schülerinnen und Schüler richten. [1]



Abb. 1: Logo der Masterclasses

Im Rahmen des Exzellenzclusters Quantum Frontiers wird dieses Konzept für den Bereich der Quantenphysik und Metrologie aufgegriffen und weiterentwickelt. Die Masterclasses sind als halb- bis ganztägige Veranstaltungen konzipiert, bei denen die Teilnehmenden in einer authentischen Umgebung (Universität, Forschungseinrichtung) eine Einführung zu einem aktuellen Forschungsthema aus dem Inhaltsbereich des Exzellenzclusters erhalten. Ziel ist dabei neben der Vermittlung von fachlichem Wissen auch die Studien- bzw. Berufsorientierung.

Eine Masterclass enthält neben einer theoretischen Hinführung zum Thema und einer experimentellen Phase immer auch den Austausch mit Forschenden und Physikstudierenden, sowie nach Möglichkeit einen Laborbesuch.

### 2. Bisherige Erfahrungen

In der Pilotphase der Masterclasses mussten Konzepte entwickelt und an die Bedürfnisse der Zielgruppe angepasst werden. Dabei hat sich herausgestellt, dass neben der authentischen forschungsbezogenen Lernumgebung eine enge Bindung an das Kerncurriculum die Akzeptanz des Angebotes fördert. Erste Testsitzungen von je 90 Minuten Dauer wurden in drei Leistungskursen von Gymnasien durchgeführt. Die dabei gewonnenen Erfahrungen flossen in die Ausgestaltung der weiteren Angebote ein.

In der Pilotphase fanden vor jeder Masterclass mehrere Treffen mit Lehrerinnen oder Lehrern der beteiligten Schulen sowie mit den Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern der gastgebenden Forschungsgruppe statt. Zweck dieser Treffen war die thematische Feinabstimmung der Masterclass bezüglich der Vorkenntnisse und Ziele der jeweiligen Schule. Der erste Workshop über den Masterclass fand im November 2019 zum Thema "Michelson-Interferometer und Gravitationswellendetektion" statt.

## 2.1 Ablauf einer Masterclass

Die Masterclasses an der TU Braunschweig waren bisher 5-6 Stunden lang und folgten dem unten aufgeführten typischen Programm:

- Eine *Einführungsvorlesung*, die die Themen aus dem Kerncurriculaum aufgreift, die für die aktuelle Masterclass erforderlich sind und sie wiederholt (und wenn nötig erweitert)
- Durchgehen der zugehörigen Arbeitsblätter*: Anleitung zur Durchführung des Experiments oder der Messungen
- Durchführung von Experimenten und Messungen*, bei denen die Schülerinnen und Schüler in kleinen Gruppen arbeiten. Jede Gruppe von 5 Schülerinnen und Schüler wird von einem Mentor oder einer Mentorin betreut. Die entsprechenden Arbeitsblätter helfen den Schülerinnen und Schüler bei der Durchführung des Experiments. Insgesamt dauert ein Experiment etwa 120 Minuten, die in drei Teile aufgeteilt sind: 30 Minuten Einführung in die Experimente und Arbeitsblätter, 75 Minuten Experimentieren und 15 Minuten Diskussion der Ergebnisse.
- Ein Vortrag über die Forschungsthemen, zu dem die Schülerinnen und Schüler experimentiert haben
- ein Rundgang durch das Labor, um den Schülern die reale Forschungsumgebung zu zeigen.
- Ein kurzer Rückblick auf den Tag, gefolgt von Fragen und Antworten und dem Bewertungsformular für die Masterclass.

## 2.2 Themen der durchgeführten Masterclasses

Im September 2019 wurde die erste Masterclass zum Thema "Manipulation von Atomen mit Lasern (Quantenbewegungen)" durchgeführt. Das in dieser Masterclass verwendete Projekt "Quantenbewegungen" [2] wurde von Jacob Sherson, Universität Aarhus, Dänemark, entwickelt. Das Vortragsmaterial und die Präsentation wurden von Shaeema Zaman Ahmed (Universität Aarhus) und Franziska Gerke (TU Braunschweig) beigesteuert. Die nächste Masterclass "Michelson-Interferometer und Gravitationswellendetektion" fand im November 2019 statt. Der Versuchsaufbau und die Präsentation waren Beiträge von Stefanie Kroker [3] und Florian Bruns (LENA). "Neudefinition des Kilogramms im SI (Kibble-Waage)" war ein weiteres Thema, zu dem sich ein Bezug zum Kerncurriculum gut herstellen ließ. Die Vorbereitung des Versuchsaufbaus [4] und die Präsentation waren Beiträge von Robert Müller, PTB.

## 3. Vorstellung konkreter Themen

### 3.1 Detektion von Gravitationswellen

Die erste in Hannover stattfindende Masterclass beschäftigt sich mit der Detektion von Gravitationswellen mittels Laserinterferometrie. Der fachliche Teil stützt sich dabei auf zwei Grundpfeiler: Die Einführung der Allgemeinen Relativitätstheorie als mit Hilfe von altersgerechter Mathematik, sowie das praktische Messen kleinster Entfernungen mittels Interferometrie. Letzteres wird durch selbstständiges Experimentieren am Ultraschall-Michelson-Interferometer erreicht.

Die allgemeine Relativitätstheorie stellt für Schülerinnen und Schüler eine gewisse Herausforderung dar, da ihnen die notwendigen mathematischen Werkzeuge fehlen. Dies führt in einer populärwissenschaftlichen Betrachtung häufig dazu, dass lediglich Visualisierungen gezeigt und einige ausgesuchte Effekte und Phänomene aufgezählt werden. Es ist jedoch möglich mit Mitteln der Schulmathematik den mathematischen Kernaspekt der Allgemeinen Relativität, die gekrümmte Raumzeit, plausibel zu machen. Dazu wird das Raumzeitelement als Variante des Satz des Pythagoras eingeführt und entsprechend verschiedener Geometrien modifiziert. Das Konzept stammt aus [5]. Auf diese Weise ist es z.B. möglich einige Effekte von Schwarzen Löchern rechnerisch herzuleiten, ebenso den Effekt von Gravitationswellen auf Testmassen.

Neben diesem fachlichen Teil haben die Teilnehmenden beim Format des Speedinformings [6] die Möglichkeit mit Forschenden verschiedener Karrierestufen ins Gespräch zu kommen und Fragen zu stellen.

### 3.2 Kibble-Waage

Im Mai 2019 wurden die SI-Einheiten neu definiert. Seither basiert die Definition der Masseneinheit Kilogramm auf Fundamentalkonstanten. In diesem

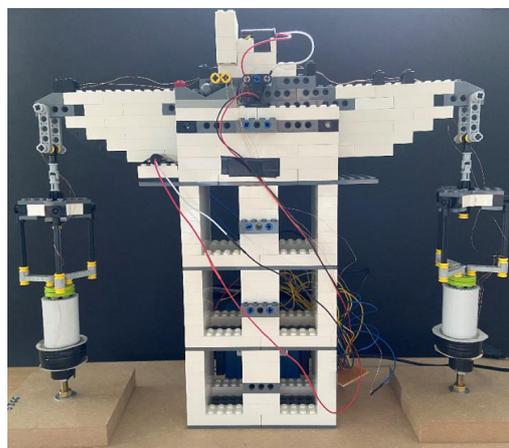
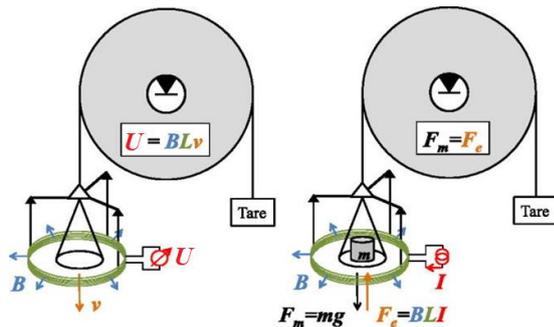


Abb. 2: Lego Kibble-Waage, [7]

Zusammenhang war die Funktionsweise der Kibble-Waage das Thema einer Masterclass, die im November 2019 in Braunschweig stattfand. Zuerst wurde eine Kibble-Waage aus LEGO-Teilen gebaut. Den Schülerinnen und Schülern wurden die Prinzipien der Kibble-Waage (auch als Watt-Waage bekannt) vorgestellt. Die Funktionsweise einer Kibble-Waage ist wissenschaftlich relevant und für Schülerinnen und Schüler leicht verständlich. Das Thema knüpft an die Thematik "Magnetfelder, Lorentz-Kraft und Bewegung von geladenen Teilchen in magnetischen Feldern" des Kerncurriculum der Sekundarstufe II an.



**Abb. 3:** Links: Dynamischer Modus. Die Spule bewegt sich vertikal in einem radialen Magnetfeld und es wird eine Spannung  $U$  induziert. Rechts: Statischer Modus. Die nach oben gerichtete elektromagnetische Kraft, die von der Spule erzeugt wird, wirkt der durch  $m$  ausgeübten Gravitationskraft entgegen. Angepasst aus [7].

**Prinzipien des Kibble-Waage:** Die Kibble-Waage misst Strom und Spannung in zwei getrennten Modi: statischer Modus und dynamischer Modus. Im statischen Modus (Abbildung 3, rechts) wird eine an einer Spule befestigte Testmasse  $m$  an einer Seite einer Waage aufgehängt, während an der anderen Seite eine Ausgleichsmasse aufgehängt ist. In Gegenwart eines konstanten Magnetfeldes  $B$  wird ein Strom  $I$ , der an den Spulendraht angelegt wird, so lange eingestellt, bis die auf den Draht ausgeübte Kraft ( $F = IBL$ ) mit der Gewichtskraft der Prüfmass  $mg$  im Kräftegleichgewicht steht. Dies führt zu:

$$mg = BLI,$$

wobei  $L$  die Länge der Spule und  $g$  die Gravitationskonstante ist. Die genaue Messung von  $B$  und  $L$  ist jedoch eine schwierige Aufgabe. Daher ist der zweite Modus der Kibble-Waage erforderlich. Im dynamischen Modus (Abbildung 2, links) wird die Testmasse entfernt und es fließt kein elektrischer Strom mehr. Dann wird die gleiche Spule (der Länge  $L$ ) mit einer konstanten Geschwindigkeit  $v$  im gleichen Magnetfeldes  $B$  bewegt (Abbildung 3, links). Dadurch wird an der Spule eine Spannung  $U$  induziert, deren Größe

$$U = BLv$$

Das Ersetzen von  $BL = U/v$  in der Gleichung aus dem statischen Modus führt zu

$$m = IU/gv$$

Dieses Experiment gibt dem Experimentator ein Maß für die Masse im Verhältnis zu vier anderen Größen, die man mit hoher Genauigkeit messen kann.  $U$  und  $I$  werden mit Hilfe von quanten-elektrischen Effekten (Josephson-Spannung und Quanten-Hall-Effektes) gemessen. Die Konstante  $g$  wird mit einem hochempfindlichen Gravimeter gemessen. Darüber hinaus wird die Geschwindigkeit der Spule mit Laserinterferometrie gemessen, die auf der Skala der Wellenlänge des Laserlichts arbeitet. Die Konstruktion einer Kibble-Waage aus Lego wurde in [7] beschrieben.

**Hands-on-Sitzung:** Nach einer kurzen Präsentation über die Prinzipien der Konstruktion und ihre Funktion führen die Schülerinnen und Schüler das Experiment durch. In diesem Schritt wird das Gerät kalibriert, und eine Probemasse wird gemessen. Dadurch erhalten die Schülerinnen und Schüler einen Eindruck davon, wie das Gerät funktioniert und wie präzise es ist. Nach dem Experiment wird von einem Mitglied des gastgebenden Instituts erklärt, welche Bedeutung die Neudefinition der Masseneinheit für Industrie und Wissenschaft hat.

#### 4. Ausblick

Zur Zeit entstehen an beiden Standorten weitere Masterclasses, die die Themenvielfalt innerhalb von QuantumFrontiers widerspiegeln sollen. Neben den bereits genannten Themen werden in Hannover zur Zeit Masterclasses zum Fangen und Kühlen von Teilchen und zu Quantencomputern und --kryptographie erarbeitet.

Die erste Durchführung in Hannover fiel den Coronavirusbeschränkungen zum Opfer. Auf Grund der damit verbundenen Situation werden auch in absehbarer Zeit zunächst keine Präsenzveranstaltungen stattfinden können. Wir arbeiten daher an Onlinelösungen. Diese sollen die Masterclasses nicht ersetzen, jedoch als Teaser oder Vorbereitung für zukünftige Veranstaltungen dienen. Aktuelle Entwicklungen sind auf der Internetpräsenz der Masterclasses einsehbar [8]

#### 5. Literatur

- [1] Netzwerk Teilchenwelt: <https://www.teilchenwelt.de> (Stand 05/2020)
- [2] J. Sherson, "Quantum Moves": <https://www.scienceathome.org/games/quantum-moves-2/about-quantum-moves-2/> (Stand 05/2020)
- [3] <https://www.tu-braunschweig.de/mib/lena/nachwuchsgruppen/metrologie-funktionaler-nanosysteme> (Stand 05/2020)

- [4] <https://www.nist.gov/si-redefinition/kilogram/kilogram-present> (Stand 05/2020)
- [5] B. Schutz, "Gravity from the ground up", Cambridge University Press (2003)
- [6] "Stühlerücken für mehr Zukunftschancen": <https://www.mpg.de/speedinforming> (Stand 05/2020)
- [7] L. Chao, S. Schlamminger, P. Newell D., S. Jon, G. Sineriz, F. Seifert, A. Cao, D. Haddad and X. Zhang, "A LEGO Watt Balance: An apparatus to determine a mass based on the new SI," Am. J. Phys., vol. 83, p. 913, 2015.
- [8] QuantumFrontiers Masterclasses: <https://www.quantumfrontiers.de/masterclasses> (Stand 05/2020)

### **Anhang**

Gefördert durch die Deutsche  
Forschungsgemeinschaft (DFG) im Rahmen der  
Exzellenzstrategie des Bundes und der Länder –  
EXC-2123 QuantumFrontiers – 390837967