

#) Diese sind im Internet unter folgender Adresse abrufbar: [www.st-andrews.ac.uk/physics/quvis](http://www.st-andrews.ac.uk/physics/quvis)

+) Vortragsfolien sind unter [www.heisenberg-gesellschaft.de/unterlagen-workshop-2015.html](http://www.heisenberg-gesellschaft.de/unterlagen-workshop-2015.html) einsehbar.

## Quanteninformation

### DPG-Lehrerfortbildung

Rund fünfzig Physiklehrer aus allen Bundesländern hatten sich vom 13. bis 17. Juli 2015 im Physikzentrum in Bad Honnef eingefunden, um sich mit der „Quanteninformation“ und ihrer Einbeziehung in den Schulunterricht auseinanderzusetzen. Im Mittelpunkt vieler Themen stand die Verletzung der Bellschen Ungleichung, die Auswirkungen von nicht vorhandenen verborgenen Parametern und des Spions Eve auf die Nachrichtenübermittlung zwischen Alice und Bob.

Einen Eindruck von der Vielfalt des Themengebietes bekamen die Teilnehmer zu Beginn mit der Vorstellung unmöglicher Maschinen der Quantenmechanik durch Reinhard Werner (Hannover). Wolfgang Dür (Innsbruck) erläuterte die Wesenszüge der Quantenphysik sowie die Bloch-Kugel.

Dass der klassische Trajektorien-Begriff eine Umdeutung erfahren muss, illustrierte Fabian Elster (Paderborn) und Dieter Meschede (Bonn) an Experimenten zu „Quantum Walks“ mit Photonen und einzelnen Atomen. Für den Schulunterricht eignet sich der Mehrteilchen-Versuch mit zwei ununterscheidbaren Photonen, die von verschiedenen Seiten auf einen halbdurchlässigen Spiegel treffen und sich auf einen gemeinsamen Weg einigen.

Die letzten Unklarheiten zum Problem der verborgenen Variablen beseitigte David Gross (Köln), der das Schlüsselexperiment von Aspect (1986) erklärte und schultauglich veranschaulichte. Ebenso eindrucksvoll war der Einblick in den Alltag von Experimentalphysikern durch Harald Weinfurter (München), der mit seiner Gruppe an einem Test der Bellschen Ungleichung mittels Atom-Atom-Verschränkung arbeitet. Zur Quantenmechanik mit Schaltkreisen und Qubits auf supraleitenden Schwingkreisen sprach Andreas Wallraff (Zürich). Grundlagen aus der Quantenkryptographie stellte Dagmar Bruß (Düsseldorf) vor. Dabei wurde deutlich, dass die Sicherheit der Quantenschlüsselverteilung im Gegensatz zur RSA-Verschlüsselung durch quantenphysikalische Gesetze gegeben ist. Sehr zum Verständnis trugen die Simulationen von Antje Kohnle (St. Andrews) bei, mit denen alle Teilnehmer die Protokolle zur Quantenschlüsselverteilung interaktiv durchspielen konnten.<sup>#)</sup>

Neben theoretischen Grundlagen und aktuellen Entwicklungen kamen auch die fachdidaktischen Beiträge mit Gesprächen zu Chancen und Problemen der Quantenphysik im Unterricht nicht zu kurz. So stellte Jan-Peter Meyn (Erlangen) das Erlanger Konzept zur Quantenphysik vor und Stefan Heusler (Münster) Visualisierungen mit Knotenlinien. Für einen sorgfältigen Sprachgebrauch gab Gesche Pospiech (Dresden) hilfreiche Hinweise.

Mit praktischem Bezug und für Demonstrationsversuche zur Quantenoptik relevant war die Vorstellung eines Quantenkoffer-Prototypen durch Henning Weier (qtools GmbH) sowie die Industry Session (Thorlabs GmbH). Zum Schluss der Woche stellte Rainer Müller (Braunschweig) das Münchner Unterrichtskonzept „milq“ vor, das als Leitfaden für eine Unterrichtsreihe die fünf Wesenszüge der Quantenphysik vorschlägt: Statistisches Verhalten, Fähigkeit zur Interferenz, Eindeutigkeit der Messergebnisse, Komplementarität und Verschränkung.

Viele Referenten waren über ihren Vortrag hinaus im Physikzentrum zugegen und haben die Fortbildung sehr bereichert. Durch einen spontanen Vortrag zur „Quantenheilung“ sorgte Reinhard Werner zudem für einen vergnüglichen Abschlussabend.

Alle Teilnehmer profitierten vom abwechslungsreichen Programm, für das den beiden Hauptverantwortlichen Thorsten Franz (Braunschweig) und Christoph Marquardt (Erlangen) gedankt sei.

**Benita von Finckenstein  
und Andreas Wagner**

## Quantenphysik an der Schule

### Zweiter Workshop der Heisenberg-Gesellschaft

Die im Jahre 2012 gegründete Heisenberg-Gesellschaft verfolgt das Ziel, moderne Physik und insbesondere die Quantenmechanik im Schulunterricht weiterführender Schulen so zu verankern, dass auch Schüler, die das Fach Physik frühzeitig abwählen, bleibende Grundkenntnisse mitnehmen. Dazu hat die Gesellschaft in diesem Jahr den 2. Workshop zur „Quantenphysik an der Schule“ vom 17. bis 19. Juli in Schloss Lautrach im Allgäu veranstaltet, der Lehrkräften und Universitätsdozenten aus allen Bundesländern offen stand. Drei Viertel der etwa 60 Teilnehmer aus acht Bundesländern in Ost und West kamen von Schulen, ein Viertel von Universitäten.

Eröffnet wurde der Workshop mit einem fulminanten Vortrag von Immanuel Bloch (München) über das Experimentieren mit den kältesten Objekten des Universums. Mit seinem Brückenschlag von den Grundprinzipien der Quantenmechanik zu aktuellster Grundlagenforschung gelang ihm ein begeisternder Auftakt zu einem Hauptprogramm, das sich auf Quantenphysik in Unterricht und Lehramtsausbildung konzentrierte, aber auch philosophische und historische Themen streifte. Hartmut Wiesner (München) und Bernadette Schorn (Dresden) stellten ein Unterrichtskonzept für die 10. Jahrgangsstufe und dessen Evaluierung in der Praxis vor. Rainer Müller (Braunschweig) präsentierte den Quantenphysik-

sik-Lehrgang „milq“. Gesche Pospiech (Dresden) erörterte die Anforderungen an eine zeitgemäße Vermittlung der Quantenphysik in der Lehramtsausbildung und fachdidaktische Bemühungen zu deren Umsetzung. Peter Schmäser (Hamburg) befasste sich mit neueren Experimenten zur Bestätigung von Prinzipien und Vorhersagen der Quantentheorie. Kurzvorträge über ein Quantenphysikkonzept von Horst Hübner (Würzburg), über das Internetprojekt LEIFIPhysik von Thomas Unkelbach (Köln) und die Begabtenförderung im Physikunterricht am Beispiel des Begabtenstützpunkts Memmingen von Andreas Kellerer rundeten den ersten Tag ab. Am zweiten Tag widmete sich Manfred Stöckler (Bremen) Fragen der Interpretation der Quantentheorie im Hinblick auf den Schulunterricht, während Tobias Jung (München) Einsteins Beiträge zur Quantentheorie und ihren inneren Zusammenhang beleuchtete. In seinem Abschlussvortrag ging Meinard Kuhlmann (Mainz) der Frage nach, wie sich Quantenfeldtheorien zur Beschreibung von Elementarteilchen auf die Wirklichkeit beziehen.<sup>+) Über die Vorträge und intensiven Diskussionen hinaus wurde der Workshop ausgiebig zum Erfahrungsaustausch und Schmieden neuer Kooperationen genutzt. Die Veranstaltung war ein großer Erfolg, was nicht zuletzt der hervorragenden Organisation durch die Tagungsleitung und der großzügigen finanziellen Unterstützung durch die Wilhelm und Else Heraeus-Stiftung zu verdanken ist.</sup>

**Reinhold Rueckl**

## Einstein relativ einfach – 100 Jahre Allgemeine Relativitätstheorie

### DPG-Lehrerfortbildung

Anlässlich des 100. Jahrestags der Veröffentlichung der Allgemeinen Relativitätstheorie (ART) im Jahr 1915 bot die DPG im Juli 2015 eine fünftägige Lehrerfortbildung an. Die Veranstaltung im Physikzentrum Bad Honnef war mit 89 Lehrerinnen und Lehrern restlos ausgebucht. „Wir sind über das große Interesse sehr erfreut“, bemerkte Karl-Heinz Lotze von der Universität Jena, der mit Ute Kraus (U Hildesheim) und Bernd Brüggemann (U Jena) die Lehrerfortbildung organisiert hatte.

Einstein war bereit, die klassische Definition von Raum und Zeit infrage zu stellen. „Zeit ist kein metaphysisches Konzept, sondern einfach das, was eine Uhr misst“, so wurde Einstein zitiert und weiter: „Raum und Zeit sind variabel, da die Lichtgeschwindigkeit immer konstant ist.“ Der Titel der Fortbildung „Einstein relativ einfach – 100 Jahre Allgemeine Relativitätstheorie“ war allerdings etwas irreführend, weil der erste Vortrag von Domenico Giulini (U Hannover) den

**Benita von Finckenstein, Bonn;  
Andreas Wagner,  
Tholey**

**Prof. Dr. Reinhold Rueckl, U Würzburg**

meisten Teilnehmenden alles Wissen und volle Konzentration abverlangte. Doch bei einer einwöchigen Fortbildung muss auch Raum für „Forderung und Förderung“ sein. Deutlich schulnäher und praktischer waren die Tutorien, in denen die Kolleginnen und Kollegen rechnen oder basteln konnten. Heiß diskutiert wurden mögliche Denkmodelle, die man aus den Randbedingungen der ART ableiten kann. Während Schwarze Löcher noch sehr wahrscheinlich seien, so Reinhard Meinel, seien Zeitreisen, Warpantrieb oder auch Wurmlöcher nur schwerlich vorstellbar, aber mathematisch und durch die ART nicht ganz auszuschließen, wie Markus Pössel vom „Haus der Astronomie“ in Heidelberg in seinem Vortrag diskutierte. Besonders beeindruckt zeigten sich die Lehrerinnen und Lehrer von den Anwendungsmöglichkeiten der Speziellen Relativitätstheorie (SRT) und der ART in der aktuellen Technik und Astronomie. Claus Lämmerzahl (ZARM, Bremen) berichtete von der praktischen Anwendung der ART in der Metrologie, bei der Positionierung und der Geodäsie. Besonders die Vielfalt der 14 doppelstündigen Vorträge gefielen den Teilnehmern. Man konnte etwas über Gravitationslinsen, Pulsare, Gravitationswellen, kosmische Hintergrundstrahlung, Dunkle Materie, Symmetrie, ART-Geschichte, Paradoxien und „einparkende Autos in Garagen“ erfahren, alles immer im Zusammenhang mit SRT oder ART. Häufiger stand der direkte Schulbezug der Vorträge eher im Hintergrund, doch das schmälerte nicht im Geringsten die Begeisterung der Kollegen. „Die Woche war sehr erhellend“, so zwei Kollegen aus Köln. Großer Dank ging am Schluss an alle Dozenten, die honorarfrei alle Vorträge gehalten hatten.<sup>8)</sup>

Ralf Kießwetter

## Autonomous Spacecraft Navigation

### 593. WE-Heraeus-Seminar

Vom 8. – 11. Juni fand im Physikzentrum Bad Honnef das Seminar mit dem Untertitel „New Concepts, Technologies and Applications for the 21st Century“ statt. Ein wesentliches Ziel war es, die verschiedenen internationalen Gruppen, die sich mit neuen Methoden der Satellitennavigation beschäftigen, zusammenzubringen, um über Status und Fortschritte ihrer Forschung zu berichten, weitere Schritte abzustimmen und eine Zusammenarbeit der einzelnen Gruppen anzuregen.

Die Navigation von Raumfahrzeugen bildet eines der Schlüsselemente der Raumfahrt. Die heute übliche Navigationsmethode ist das Radartracking (Delta Doppler One-Way Ranging). Sie funktioniert aber nur von der Erde aus und liefert naturgemäß mit steigender Entfernung

zum Raumfahrzeug ungenauere Ergebnisse. Die heutigen Aufgabenstellungen bei interplanetaren Missionen erfordern aber eine zunehmend hohe Genauigkeit in der Lage-, Positions- und Geschwindigkeitsbestimmung der Raumfahrzeuge, die zudem am besten noch autonom in einem Selbstregelungssystem an Bord des Raumfahrzeugs ermittelt werden soll. Auch wenn die Antriebstechnologie für interstellare Raumflüge noch nicht zur Verfügung steht, ist doch bereits heute klar, dass dies aufgrund der großen Entfernungen zur Erde ebenfalls eine autonome Navigation erfordert. Seit einigen Jahren gibt es hierfür vielversprechende Ansätze, die während dieses Seminars in zahlreichen Übersichtsvorträgen im Detail vorgestellt wurden. Neben der optischen Beobachtung von Asteroiden und Kometen (OPTONAV) für die autonome Navigation im interplanetaren Bereich oder der relativistischen Positionsbestimmung von Satelliten (z. B. LiAISON), ist insbesondere die pulsarbasierte Navigation (XNAV) zu nennen.

Pulsare sind einige tausend Lichtjahre weit entfernte Quellen periodisch pulsender Radio- und Röntgenstrahlung. Da die zeitliche Stabilität, mit der sich die Pulse beobachten lassen, mit der Genauigkeit von Atomuhren vergleichbar ist, können ihre charakteristischen Signale zur Positionsbestimmung dienen. Die während des Seminars vorgestellten Untersuchungen zeigen, dass mit dieser Methode mittels Röntgenpulsaren die Position einer Raumsonde bis auf wenige Kilometer genau zu bestimmen ist – überall im Sonnensystem und weit darüber hinaus. Beobachtet man die Pulsare dagegen im Radioband bei z. B. 500 MHz, so lässt sich die Genauigkeit der autonomen Positionsbestimmung bis auf Werte von ca. 30 – 300 Metern verbessern. Die Einfachheit der pulsarbasierten Navigation macht bereits heute klar, dass dies die zukünftig verwendete Navigationsmethode sein wird. Aktuelle Forschungen konzentrieren sich zurzeit auf die technische Umsetzung und den Bau eines leichtgewichtigen Pulsarnavigators.

Insgesamt empfanden alle Teilnehmer das WE-Heraeus-Seminar, das als erstes internationales Meeting zu diesem Themenkomplex stattfand, als sehr erfolgreich. Die Seminarstruktur, die viele Möglichkeiten zum wechselseitigen Austausch bot, sowie die freundliche Atmosphäre im Physikzentrum und die Exkursion zum Drachenfels trugen auf jeden Fall mit zum Erfolg bei. Letztlich möchten die Seminar-Organisatoren sich im Namen aller Teilnehmer bei den Mitarbeitern des Physikzentrums für den reibungslosen und freundlichen Betrieb sowie bei der WE-Heraeus Stiftung für die Unterstützung und die Möglichkeit der Durchführung auf das herzlichste bedanken.

Werner Becker und Axel Jessner

## Science Applications for Exascale Computing – Exploring New Avenues towards Scalability and Fault-Tolerance

### 596. WE-Heraeus-Seminar

Die meisten naturwissenschaftlichen Anwendungen erfordern erhebliche Rechenressourcen, benutzen aber Programme und Softwarebibliotheken, die während der letzten Dekaden entwickelt wurden. Konsequenterweise eignen sich diese Programme nicht mehr für moderne und zukünftige HPC-Systeme, die Millionen von Prozessorkernen, Spezialprozessoren (GPGPU, Many-Core) und neuartige Speichertechnologien implementieren. Dieses Seminar, das vom 7. bis 9. September 2015 im Physikzentrum Bad Honnef stattfand, fokussierte sich auf Anwendungen und deren Lösungsansätze, die große Anforderungen an HPC-Systeme haben. Diskutiert wurden wissenschaftliche Problemstellungen und deren algorithmische Formulierung und effiziente Implementierung auf Höchstleistungsrechnern, unter Berücksichtigung der erwarteten Entwicklungen der nächsten Jahre. Von besonderer Bedeutung war es, disziplinenübergreifende Probleme und Lösungsansätze zu identifizieren. Die ausgewählten Anwendungen reichten von der Realzeit-Online-Analyse über „Capability Computing“ auf hunderttausenden von Prozessorkernen bis zum datengetriebenen „High Throughput Computing“. Die vertretenen Felder beinhalteten Hochleistungsrechnerarchitektur, Algorithmus-Engineering, Hochenergiephysik, Gitter-Eichtheorie, Astronomie, Klimaforschung und Neurowissenschaften. Im Anschluss an die Vorträge wurde ausführlich und lebhaft diskutiert, was sich oft bis in die Abendstunden fortsetzte.

Im Rahmen des Seminars ergaben sich viele gemeinsame Interessen und Anknüpfungspunkte. Die Portabilität von HPC-Software hat größte Bedeutung, was auch im Kontext der zunehmenden Nutzung von Spezialprozessoren zu sehen ist. In vielen Bereichen ist die Unterstützung zum (Neu)Entwickeln effizienter Software immer noch viel zu gering. Ein Lösungsansatz wäre die Einrichtung von Kompetenzzentren, die ganze Forschungsbereiche unterstützen könnten. Energieeffizienz wird im Kontext des steigenden Energiebedarfs und deren Kosten immer bedeutsamer und geht mit der Programmeffizienz einher.

Wir danken der Wilhelm und Else Heraeus-Stiftung für die exzellente Organisation und die finanzielle Unterstützung.

Volker Lindenstruth, Thomas Lippert und Alexander Reinefeld

<sup>8)</sup> Linktipps zur Fortbildung: [www.physik.uni-jena.de/didaktik\\_download\\_SRT.html](http://www.physik.uni-jena.de/didaktik_download_SRT.html), [www.thphys.uni-heidelberg.de/~wolschin/grav-wave.html](http://www.thphys.uni-heidelberg.de/~wolschin/grav-wave.html), <http://planck.cf.ac.uk/education/model>

Ralf Kießwetter, Städtisches Gymnasium Wermelskirchen

Prof. Dr. Werner Becker; LMU München; Dr. Axel Jessner, MPI für Radioastronomie, Bonn

Prof. Dr. Volker Lindenstruth, Universität Frankfurt; Prof. Dr. Thomas Lippert, FZ Jülich; Prof. Dr. Alexander Reinefeld, Zuse-Institut Berlin