



QUANTENSPRÜNGE IM GRUNEWALD JENS EISERT

1970 in Ludwigshafen geboren als Deutscher und Schwede. 1991–97 Studium der Physik und Mathematik in Freiburg und an der University of Connecticut, 1998–2001 Promotion über Quanteninformationstheorie in Potsdam, 2001–03 Feodor-Lynen Fellow am Imperial College London, 2003–05 Juniorprofessor an der Universität Potsdam, 2005–08 Lecturer am Imperial College London, 2008–09 W3-Professor für Quantentheorie an der Universität Potsdam. Eiserts wissenschaftliche Arbeit wurde mehrfach ausgezeichnet, etwa durch einen Fulbright-Grant, den Michelson Prize, ein Feodor-Lynen Fellowship und einen European Young Research Investigator Award. Seine Forschungsinteressen liegen in der Quanten-Informationstheorie, der Quanten-Vielteilchentheorie und der Quantenoptik. Bisher entstanden mehr als 100 wissenschaftliche Arbeiten. – Adresse: Institut für Physik und Astronomie, Universität Potsdam, Karl-Liebknecht-Straße 24/25, 14476 Potsdam-Golm. E-mail: jense@qipc.org

Es ist still geworden, längst hat sich die Nacht über den Grunewald gesenkt. Ich sitze in meinem „Turmzimmer“ hoch oben direkt unter dem Dach der „weißen Villa“ – einer Ende des 19. Jahrhunderts gebauten und in den 70ern im Stile der Zeit umgebauten prächtigen Villa. Stapel von Papier sind vor mir aufgetürmt, vollgekritzelt bei dem Versuch, ein schwieriges Problem zu lösen. Dabei gibt es durchaus neue Einsichten: Im Zentrum des Tages stand eine stundenlange enthusiastische Diskussion mit Tobias Osborne, meinem Freund, Kollegen und Büronachbarn in der Villa Jaffé, während der wir aufgewühlt an der Tafel standen oder durch den Raum auf- und abgingen. Manches ist schon

viel klarer geworden, nun alles in Formeln zu fassen, ist das Vorhaben für den Abend; Fortschritt will sich, wie immer, nur langsam einstellen. Es war ein guter Tag.

Wie es viele gute Tage gab. Das Jahr am Wissenschaftskolleg war ein besonderes Jahr, in vielfacher Hinsicht. Natürlich ist das wirklich Besondere, das einen Aufenthalt am Wissenschaftskolleg ausmacht, die Begegnung mit den Fellows, die es für das jeweilige Jahr bevölkern. Kreative und warmherzige Menschen voller Energie und Ideen, die aus aller Welt für ein Jahr nach Berlin kommen, die verschiedensten Vorstellungen mitbringend, aber geeint in dem Bewusstsein, dass sie in ihrem Fach Besonderes leisten wollen. Sie alle haben sich für dieses Jahr viel vorgenommen. Besondere Menschen waren auch meine beiden unmittelbaren Kollegen Tobias Osborne und Ulrich Schollwöck aus der Schwerpunktgruppe „Klassische Simulation quantenmechanischer Systeme: Klassische Informationen versus Quanteninformation“. Etwas Besonderes war auch die freundliche, familiäre Atmosphäre, die die Angestellten am Wissenschaftskolleg schufen, wie etwa – pars pro toto – der energiegeladene und freundliche Reinhart Meyer-Kalkus oder der ideengetriebene und stets den rechten Ton findende Rektor Luca Giuliani.

Dieses Jahr war eine Herausforderung, nicht zuletzt deswegen, weil wohl die meisten Fellows eine homogenere akademische Umwelt gewohnt sind. Mir ging das kaum anders: Es werden plötzlich Methoden in Frage gestellt, verschiedene Vorstellungen erörtert, legitime Schlussweisen neu interpretiert. Welches sind die Methoden, die sinnhaft zur Klärung einer Frage beitragen können? Dinge, die sonst selbstverständlich waren, sind es nun nicht mehr. Zuweilen sind wir drei Quantenphysiker Exoten, die etwas tun, das rätselhaft, kurios und fremd erscheint. Behauptungen über die Verbindung der Quantenmechanik mit unsichtbaren rosa Elefanten kommen auf. Es wird gelacht, herausgefordert, eine These vertreten, wieder gelacht. Zuweilen blitzt die Idee auf, es könnte wirklich die „Zwei Kulturen“ geben, die die Geistes- und Naturwissenschaften trennt, wie sie Snow einst sah; und dann sitzt man wieder gemeinsam am Tisch und findet viele Gemeinsamkeiten. Vor allem auch an den langen entspannten und doch geistreichen Gesprächen an den Donnerstagabenden: Nie verließ ich den Tisch ohne einen neuen Gedanken. Eine intellektuelle Herausforderung war das Jahr aber vor allem durch meine beiden Kollegen aus der Schwerpunktgruppe.

Vor meiner Berufung als Fellow ans Wissenschaftskollegs arbeitete ich am Imperial College in London. Noch bevor ich mein Fellowship in Berlin antrat, nahm ich ironischerweise eine Professur im Berliner Raum, nämlich an der Universität Potsdam, an. Es ist nicht zu leugnen, dass mein Jahr dadurch reichlich durcheinandergebracht wurde.

Durch die räumliche Nähe war ich am Wissenschaftskolleg für meine Kollegen am Potsdamer Institut sichtbar wie in einem Glaskolben und ganz und gar nicht abgeschottet von den alltäglichen universitären Pflichten, wie meine Co-Fellows. Das war auf eine Art großartig, denn so konnte ich mit meinen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern an der Universität weiterhin zusammenarbeiten. Aber manchmal führte dies eben auch zu einer gewissen Zerrissenheit.

Berlin war für mich keine fremde Stadt, die es zu erkunden galt, sondern eher eine bekannte und geschätzte Nachbarstadt, die vom Inselleben in Grunewald aus gesehen so nah und doch zuweilen so fern zu liegen schien. Manche erlebten Berlin nur entlang der Streckenführung des M19-Busses; „Mein Berlin“ lag auch in Berlin-Mitte, wo sich meine reguläre Wohnung befand (und immer noch befindet).

Inhaltlich war das Jahr ein sehr kreatives, obwohl sich vieles in eine andere Richtung entwickelte als geplant. Projekte, die wir uns vorgenommen hatten, verliefen im Sande, andere stellten sich als schwieriger heraus als gedacht. Wieder andere entstanden ganz neu. Ein zentraler Gedanke, der sich durch die Arbeit am Wissenschaftskolleg zog, ist der, gewissermaßen den Ort des Konfigurationsraumes zu finden und zu identifizieren, in dem sich komplexe Quanten-Vielteilchensysteme tatsächlich aufhalten. Dieses Ziel schien zunächst unerreichbar zu sein. Im Formalismus der Quantenmechanik werden Zustände physikalischer Systeme – also Systeme der Festkörperphysik oder auch einzelne Atome und Ionen – im sogenannten Hilbertraum beschrieben, einem formalen mathematischen Raum, der die kuriose Eigenschaft besitzt, dass seine Dimension immens schnell mit der Anzahl der involvierten Freiheitsgrade skaliert. Genauer gesagt, sie wächst exponentiell, also in einer Weise, die eine detaillierte Beschreibung schon von moderat großen Systemen von vornherein völlig unmöglich macht. Zum Beispiel ist die Dimension des Konfigurationsraums eines einzelnen Spins – also gewissermaßen eines quantenmechanischen Kreisels – zwei, die von zwei Spins vier, und die von 100 Spins, was immer noch ein winziges System darstellt, schon mehr als

12676506002282290000000000000000,

eine astronomisch große Zahl. Natürlich kann man auch solche Systeme naiv nicht mehr auf Rechnern modellieren, alleine deshalb weil sich so viele Zahlen nicht speichern und verarbeiten lassen.

Die zentrale neue Einsicht bestand nun darin, diesen eigentlichen Konfigurationsraum der Natur als Fiktion anzuerkennen: Die Natur lebt gar nicht in ihm, sondern in einem viel kleineren Unterraum, der zu beliebig genauer Approximation die physikalische Situation schon richtig darstellt. Besser noch: Diese Unterräume lassen sich mathematisch gut fassen – durch sogenannte Tensornetzwerke – und effizient beschreiben. Wenn man diesen Gedanken weiterführt, heißt dies: Um Grundzustände oder andere wichtige physikalische Zustände zu finden, muss man die Nadel nicht mehr in einem absurd großen Heuhaufen suchen, den zu fassen sich durch die obigen großen Zahlen über Dimensionen verbietet, sondern man kann in einem winzigen Teil dieses Haufens suchen, von dem man weiß, dass sich die Nadel dort sicher befindet. Das war durchaus ein „Quantensprung“ einer Einsicht.

Diese Idee – krude wie sie zunächst zu sein scheint – ist in nicht-perturbativen Theorien recht neu: Die ersten Ansätze gehen auf Arbeiten in den frühen 90er-Jahren zurück. Erst in den letzten Jahren wurden aber all die Implikationen gesehen, die schließlich zu fundamentalen Einsichten führten. Dies war der Kern unserer Arbeit: Was haben die „effektiven Freiheitsgrade“ mit Verschränkung, also echt quantenmechanischen Korrelationen zu tun? Wie ist die Struktur von Korrelationen in komplexen Quantensystemen? Was kann man aus Sicht der Informatik darüber sagen, wie schwierig eine Beschreibung etwa von ungeordneten Systemen ist? Andererseits ergeben sich so neue mächtige Simulationsalgorithmen, um numerisch komplexe Systeme zu beschreiben, wie etwa fermionische Systeme. Hier konnten wir in dem Jahr viele Fortschritte machen. Ideen, wie man Quantenfelder in einem solchen Sinne regularisieren kann und neue Simulationsverfahren finden kann, standen im Zentrum vor allem in der Arbeit mit Tobias Osborne. Alte Fragen der Quantenfeldtheorie konnten wir auf diese Weise frisch angehen und neue Antworten auf alte, zum Teil ungelöste Fragen finden.

In der jüngsten Literatur wurde viel darüber geschrieben, wie schwierig es sein kann, Grundzustände zu finden. Die obigen Ideen ernst nehmend und auf ihnen aufbauend, fanden wir eine neue Klasse von Modellen, die man exakt lösen kann. Dies ist ein wichtiges Hilfsmittel, um die genaue Grenze zwischen „einfach“ und „unlösbar schwierig“ (in der Sprache der theoretischen Informatik) auf der Landkarte der physikalischen Systeme ziehen zu können.

Mit Ulrich Schollwöck standen ähnliche Fragen im Vordergrund, vor allem motiviert durch Fragen des Nichtgleichgewichts. Hier ist die zentrale Motivation, zwei große fundamentale Theorien, die Quantenmechanik und die statistische Mechanik, zusammen-

zubringen. In vielerlei Hinsicht befinden sich diese bisher bloß in einer Art friedlicher Koexistenz, weil die eigentliche Frage, wie man auf der Basis dynamischer Gesetze und einer mikroskopischen Theorie die Ensembles der statistischen Mechanik erhält, nicht zufriedenstellend beantwortet war. Arbeiten, die Ulrich Schollwöck und ich zusammen mit Experimentalphysikern in München durchführen konnten, gehen in Richtung einer Klärung und diskutieren auch erstmals experimentelle Befunde von kalten Atomen im Nichtgleichgewicht, für die starke Korrelationen eine Rolle spielen. Die elementare Frage, „warum die Natur aussieht, wie sie aussieht“, stand und steht also auch hier im Vordergrund. Eine für unsere Ideen wichtige Arbeit konnten wir am Wissenschaftskolleg fast abschließen, und die endgültige Fertigstellung wird in nächster Zeit erfolgen.

Rückblickend war mein Jahr am Wissenschaftskolleg eine kreative Zeit, voller neuer Fragen und Ideen. Im Mittelpunkt der Woche standen nicht zuletzt auch die Dienstagskolloquien, die fast immer inspirierend waren. Auch das eigene Kolloquium zu halten – im Turmzimmer tagelang vorbereitet – war durchaus ein bemerkenswertes Erlebnis. Es beeindruckte mich nachhaltig, wie viele scharfsinnig und präzise formulierte Fragen nach der Rolle des absoluten Zufalls in der Natur in der nachfolgenden Diskussionsrunde gestellt wurden.

Dürfte ich noch einmal am Wissenschaftskolleg sein, würde ich die Zeit vielleicht besser planen und sicherstellen, dass ich in noch konzentrierterer Weise dort sein kann. Aber ich will die Zeit, wie sie war, ganz sicher nicht missen. Es war ein wichtiges Jahr. Vielen herzlichen Dank dafür.

Publikationen, die am Wissenschaftskolleg entstanden:

- Harrison, S. K., N. Schuch, T. J. Osborne und J. Eisert. „Information propagation for interacting particle systems.“ arXiv:1009.3051.
- de Beaudrap, N., T. J. Osborne und J. Eisert. „Ground states of unfrustrated spin Hamiltonians satisfy an area law.“ *New J. Phys.* 12, 095007 (2010).
- Gogolin, C., M. P. Mueller und J. Eisert. „Absence of thermalization in non-integrable systems.“ arXiv:1009.1108.
- Caruso, F., J. Eisert, V. Giovannetti und A. S. Holevo. „The optimal unitary dilation for bosonic Gaussian channels.“ arXiv:1007.4797.
- Lemr, K., A. Cernoch, J. Soubusta, K. Kieling, J. Eisert und M. Dusek. „Experimental implementation of the optimal linear-optical controlled phase gate.“ arXiv:1006.4651.

- DiGuglielmo, J., A. Samblowski, B. Hage, C. Pineda, J. Eisert und R. Schnabel. „Preparing the bound instance of entanglement.“ arXiv:1005.3781.
- de Beaudrap, N., M. Ohliger, T. J. Osborne und J. Eisert. „Solving frustration-free spin systems.“ *Phys. Rev. Lett.* 105, 060504 (2010).
- Mari, A., K. Kieling, B. Melholt Nielsen, E. S. Polzik und J. Eisert. „Directly estimating non-classicality.“ arXiv:1005.1268.
- Osborne, T. J., J. Eisert und F. Verstraete. „Holographic quantum states.“ arXiv:1005.0005.
- Cubitt, T. S., J. Eisert und M. M. Wolf. „Determining dynamical equations is hard.“ arXiv:1004.0081.
- Ohliger, M., K. Kieling und J. Eisert. „Limitations of quantum computing with Gaussian cluster states.“ *Phys. Rev. A* 82, 042336 (2010).
- Mueller, M., D. Gross und J. Eisert. „Concentration of measure for quantum states with a fixed expectation value.“ *Commun. Math. Phys.* (2010).
- Barthel, T., M. Kliesch und J. Eisert. „Real-space renormalization yields finite correlations.“ *Phys. Rev. Lett.* 105, 010502 (2010).
- Gross, D. und J. Eisert. „Quantum computational webs.“ *Phys. Rev. A* 82, 040303(R) (2010).
- Puentes, G., A. Datta, A. Feito, J. Eisert, M. B. Plenio und I. A. Walmsley. „Entanglement quantification from incomplete measurements: Applications using photon-number-resolving weak homodyne detectors.“ *New J. Phys.* 12, 033042 (2010).
- Cramer, M. und J. Eisert. „A quantum central limit theorem for non-equilibrium systems: Exact local relaxation of correlated states.“ *New J. Phys.* 12, 055020 (2010).
- Mari, A. und J. Eisert. „Gently modulating opto-mechanical systems.“ *Phys. Rev. Lett.* 103, 213603 (2009).
- Trotzky, S., Y.-A. Chen, A. Flesch, I. McCulloch, U. Schollwöck, J. Eisert und I. Bloch. „Probing non-equilibrium dynamics of strongly correlated bosons.“ (2010), in Vorbereitung.