STRUCTURES

Kerstin Hoppenhaus im Gespräch mit Anna Wienhard und Manfred Salmhofer

Wie kam dieses sehr umfassende Projekt zustande?

ms: Die Vorgeschichte ist ziemlich lang. Den ersten Gedanken dazu haben wir schon 2015 gefasst, im Laufe der Exzellenzinitiative. In deren Rahmen wurde die enge Zusammenarbeit zwischen Mathematik und Physik hier in Heidelberg, die jetzt auch bei uns eine so große Rolle spielt, nochmals entscheidend gestärkt.

Aber das Projekt wurde auch kritisiert. Es herrschte Skepsis, vor allem aufgrund der thematischen Breite unseres Ansatzes. Und ich nehme an, ein bisschen lag es auch daran, dass das Verbindende, also die Mathematik, für viele Leute sehr abstrakt ist. Und wenn man bestimmte Dinge nicht nachvollziehen kann, dann kann man es wirklich als eine Sammlung von einzelnen Projekten sehen.

Wie einen Bauchladen ...?

ms: Ja, der Begriff fiel manchmal.

aw: Die Kritik hat uns aber auch geholfen, noch besser darzustellen, was wir am Anfang postuliert haben: Es gibt diese verschiedenen Phänomene, die wir untersuchen wollen, die hängen zusammen. Und nur wenn wir dieses weite Spektrum insgesamt betrachten, können wir wirklich etwas Neues und Besseres machen. Auch die Rolle der Mathematik als verbindendes Prinzip ist uns selbst dadurch noch einmal viel klarer geworden. Jeder physikalischen Struktur unterliegt ja eine abstrakte mathematische Struktur.

ms: Es ist ein interdisziplinäres Projekt. Und zwar in einem echten Sinn: die Zusammenarbeit ist nicht oberflächlich, sondern tiefgehend, und sie reicht von der experimentellen Physik zur reinen Mathematik.

Wie wollen Sie den großen Fragen jetzt auf den Grund gehen? Was ist die innere Struktur des Clusters?

ms: Es gibt sieben sogenannte *comprehensive projects*, in denen wichtige Fragen über Strukturen in Physik, Mathematik und Informatik angegangen werden. Die Wahl dieser Fragen basiert natürlich auf dem, was die Leute bei uns können. Wir wissen, wir sind auf diesen Gebieten international konkurrenzfähig. Phänomenologisch decken diese Projekte einen riesigen Bereich von Längenskalen ab.

Und in diesen Projekten bringen wir nun ganz bewusst verschiedene Methoden zusammen – theoretisch-mathematische Methoden mit Simulationen auf digitalen Computern und mit dem sogenannten *physical computing* auf Analogcomputern. Jede Methode für sich hat ihre Grenzen, aber durch die Kombination komplementärer

Methoden haben wir begründete Hoffnung, dass wir wirklich einen guten Schritt weiter kommen.

Können Sie ein Beispiel nennen, wie diese Methoden ineinander greifen könnten?

ms: Wir arbeiten zum Beispiel mit Quantensimulatoren. Das sind Quantensysteme, die man im Labor so gut präparieren kann, dass man quantenmechanische Modelle, die man gerne lösen möchte, aber mit gängigen Mitteln nicht lösen kann, auf diese Laborsysteme abbilden kann. Und die „Rechnung“ geht dann so: die Eingabe besteht darin, einen Anfangszustand zu präparieren, die Rechnung wird ersetzt durch die natürliche zeitliche Dynamik des Systems. Und wenn man genau genug messen kann – und das können unsere Leute! – dann liest man das Ergebnis per Messung aus. Für wichtige Modelle sind solche Rechnungen im interessanten Parameterbereich heute auch mit den besten digitalen Computern und den besten Algorithmen nicht machbar. Jedenfalls nicht mit irgendeiner verlässlichen Genauigkeit.

Und das geht in dieser Konstellation nur hier?

ms: Experimente an kalten Quantengasen, wie wir sie bei uns gemacht werden, gibt es an einigen Orten, in Deutschland zum Beispiel auch in München und Hamburg. Die Konkurrenz ist stark, aber Heidelberg mischt hier ganz vorne mit. Bei uns kommt als zweites prototypisches System noch die neuromorphe Hardware dazu. Damit werden Teile des Gehirns modelliert, indem man die Spannungscharakteristik von Neuronen mit Hilfe von elektronischen Schaltkreisen nachbaut. Im neuromorphen Computer werden solche künstliche Neuronen verbunden, analog zu den Synapsen im natürlichen System. Es ist noch nicht klar, ob das wirklich alle wichtigen Aspekte der Gehirnaktivität wiedergibt, aber es ist ein wohldefiniertes Modell, mit dessen Hilfe man genau gestellte Fragen auch genau beantworten kann. Solche funktionierenden neuromorphen Computer mit einer annähernd so großen Zahl von Neuronen wie in Heidelberg gibt es momentan nur an zwei weiteren Orten in der Welt, in Manchester und bei IBM in den USA. Die Kombination davon mit den Quantensystemen gibt es meines Wissens nirgends sonst. Dazu kommen bei uns noch die ziemlich hochentwickelte Renormierungsgruppentheorie, ein Markenzeichen für Heidelberg, und Methoden aus Topologie und Geometrie, die einen ganz alternativen Zugang geben. Diese Kombination macht Heidelberg, glaube ich, einmalig.

Ein zentraler Begriff für den Cluster ist die Emergenz. Worum geht es da?

ms: Ich würde mal so sagen ... Von der physikalischen Seite her geht es darum, dass man nicht nur nach immer fundamentalen Naturgesetzen von immer kleineren Teilchen und Bestandteilen sucht, sondern auch versucht zu verstehen, wie sich das Ganze zusammensetzt und zu den Phänomenen führt, die für uns interessant sind. Also Emergenz. Das ist genauso fundamental wie die Suche nach den Bausteinen und Grundgesetzen und eine wesentliche treibende Kraft für diesen ganzen Cluster.

aw: Wobei dieser Aspekt – Emergenz von Strukturen, Entstehen von Strukturen – komplementiert wird durch zwei andere Fragen, die wir stellen, nämlich: Wie findet man Struktur? – und das sowohl in physikalischen Phänomenen, als auch in komplexen Daten. Und, wenn man Struktur hat, wie kann man Struktur nutzen. Zum Beispiel für Computation. Und da ist zum Beispiel die Quantensimulationen, die Manfred beschrieben hat, eine Art, auf nicht-klassische Art Struktur zu nutzen.

Warum war es Ihnen so wichtig, dass der Cluster so breit aufgestellt ist?

ms: Es geht letztlich um ein echtes Verständnis komplexer Systeme. Und da gibt es bei uns zwei wesentliche Ziele, die vielleicht ein bisschen komplementär sind ... Einerseits will man bestimmte Vorgänge in der Natur wirklich verstehen, also zum Beispiel warum gibt es solche Planeten wie die Erde überhaupt oder wie funktionieren neuronale Netze, die dem Gehirn ähnlich sein könnten. Eine quantitative Analyse erfordert Genauigkeit und stellt uns methodisch oft auf eine harte Probe. Und auf der anderen Seite will man nicht nur eine Sammlung von Beispielen haben, sondern auch verstehen, was sie verbindet. Und da ist eben dann die Rolle des Abstrakten, Mathematischen ganz zentral. Wir suchen sozusagen auf der nächsten Ebene nach den 'Strukturen hinter den Strukturen'. Und dazu braucht man eben die Breite und die Tiefe. Und wir denken, das haben wir hier in Heidelberg. Wir haben diese enorme Breite von wirklich guten Bereichen. Und das ist auch eine Chance ... dadurch, dass wir ein ganzes Spektrum haben, das wir untersuchen, können wir dann auch unterscheiden, was ist jetzt speziell für das eine, und was ist wirklich universell.

Welche Rolle spielt die Mathematik innerhalb der Exzellenzclusters?

aw: Es gibt im Cluster diese vier großen Fragen zum Thema Emergenz: Entstehen von Strukturen, Finden von Strukturen, Nutzen von Strukturen – die drei haben wir schon genannt. Und die vierte ist: Welche neuen Beziehungen gibt es zwischen mathematischen Strukturen und physikalischen Strukturen? Und da sind wir der Meinung, dass viele verschiedene Phänomene durchaus mit gemeinsamen Methoden behandelt werden können, weil es eine zugrundeliegende mathematische Struktur gibt, die die physikalische Struktur teilweise bestimmt. Wir haben eine Reihe von Ideen, wie wir neue mathematische Strukturen

und moderne Methoden aus der Mathematik, insbesondere aus der Geometrie und Topologie zur Anwendung bringen wollen.

Das ist das eine. Zum anderen wollen wir aber auch – und das ist für manche Leute erst einmal eine ungewöhnliche Richtung – Anwendungen aus der Physik in die Mathematik übertragen. Es gibt nämlich interessante Anwendungen, bei denen dadurch, dass Physiker in der theoretischen Physik gewisse Strukturen gesehen haben, Mathematiker neue Sachen entdeckt haben. Und das spielt bei uns in einem von den *comprehensive projects*, im siebten, *Quantum Geometry and Topological Methods in Physics: From Spectral Networks to Intersection Homology* eine ganz wichtige Rolle.

Wie muss man sich das vorstellen?

aw: Es gibt dafür sehr viele Beispiele. Eins der bekanntesten sind Spiegelsymmetrien. Wir schauen uns innerhalb des Clusters vor allem einen neuen Zusammenhang zwischen super-symmetrischen Quantenfeldtheorien auf der physikalischen Seite und lokalen Systemen, insbesondere sogenannten höheren Teichmüllerräumen auf der mathematischen Seite an.

ms: Man kann es vielleicht so sagen, dass Physiker zum guten Teil natürlich nicht mit mathematisch strengen Methoden arbeiten, sondern oft an wohlverstandenen Beispielen eine Intuition bilden, die sie dann verallgemeinern. Und manchmal kommen so Ideen raus, die dann für die strenge Mathematik nützlich sind, weil sie Verbindungen ziehen, an die man vorher gar nicht dachte. Wie man das dann beweist, ist eine andere Frage. Das geht oft nicht mit den Argumenten, die die Physiker sich erst mal ausgedacht haben.

aw: Es gibt immer wieder interessante Dualitäten in der Physik, wo die Physiker einfach sagen, das ist dual, das eine muss etwas mit dem anderen zu tun haben. Und auf der mathematischen Seite sind das dann zwei vollkommen unterschiedliche Theorien und man sieht erst einmal überhaupt nicht, warum das eine etwas mit dem anderen zu tun haben sollte. Und das ist dann natürlich spannend. Wenn man durch physikalische Intuition und physikalische Dualitäten von dem einen zum anderen springt, und wenn man dann als Mathematiker davorsteht und sich die zugehörigen mathematische Strukturen anschaut.

Auf welche Entwicklungen in der Mathematik greifen Sie dabei zurück?

aw: Es gibt natürlich klassische Methoden, zum Beispiel partielle Differenzialgleichungen, die Kollegen in der Biologie oder in der Physik sehr erfolgreich anwenden. Aber es gibt eben durchaus auch interessante Strukturen und Objekte, mit denen sich reine Mathematiker beschäftigen, die noch nicht so stark angewendet werden. Die also noch nicht in der Standard-Toolbox sind, aber die durchaus das Potenzial haben.

Foto: Universität Heidelberg

Das Leitungsteam (v. l. n. r): Manfred Salmhofer (Theoretische Physik), Anna Wienhard (Mathematik) und Ralf Klessen (Astrophysik)

ms: Es ist oft ein Problem, dass es immer sehr lange dauert, bis die Leute realisieren, dass auch die reine Mathematik in den Anwendungen nützlich ist. Das wollen wir beschleunigen.

aw: Mich persönlich interessiert sehr stark, mehr Methoden aus der Geometrie und Topologie bis hin zur geometrischen Gruppentheorie anzuwenden. Ganz konkret wollen wir im Rahmen eines explorativen Projekts gerne die Anwendung von modernen Geometrien im Machine Learning angehen. Da gibt es erste Arbeiten aus den letzten Jahren, in denen hyperbolische Geometrie angewendet wird, und wir beschäftigen uns mit symmetrischen Räumen, die im Grunde Verallgemeinerungen von hyperbolischer Geometrie sind, oder auch „Hybridwesen“ zwischen hyperbolischer und euklidischer Geometrie.

Diese Querverbindungen kommen nicht von alleine. Wie sorgen Sie dafür, dass die interdisziplinäre Zusammenarbeit im Cluster funktioniert?

ms: Ganz wichtig ist, dass wir uns verstehen. Also wirklich verstehen. Schon in der gesamten Vorbereitung hatten wir ein regelmäßiges Gruppentreffen einmal in der Woche, wo wir uns gegenseitig erklärt haben, was wir machen. Das war diese Art von Treffen, wo wir alle auch immer

wieder mal sagen konnten: „Moment, jetzt habe ich nichts verstanden, jetzt fang’ nochmal da an und erklär’ mir das bitte.“ Wenn man mal eine Idee davon bekommt, was jemand macht und wozu das vielleicht gut sein könnte, dann ergeben sich Diskussionen auch nachher. Und in den einzelnen Diskussionen, da will man immer genau wissen, wie es funktioniert, nicht nur ungefähr. Und auf diese Weise kommt man dann zu einem Punkt, wo man wirklich gemeinsam etwas tun kann.

aw: Und jetzt, wenn der Cluster tatsächlich seine Arbeit aufnimmt, spielt das *Structures College* eine ganz wichtige Rolle. Das ist im Grunde ein Vehikel, mit dem wir einen gemeinsamen Raum schaffen wollen, in dem wir interagieren und diese interdisziplinäre Wissenschaft betreiben können.

Es wird dort zum einen die Structures Fellows geben, das sind Mitglieder des Clusters, die für eine gewisse Zeit freigestellt werden und im College „residieren“ – statt etwa irgendwoanders ihr Sabbatical zu verbringen – und die sich dann wirklich in der Zeit fokussieren können auf ihre gemeinsame Arbeit und den Austausch auch mit Gastwissenschaftlern und Nachwuchswissenschaftlern. Umgekehrt sollen sie dann auch die Forschung, die sie im College gemacht haben, wieder in die Lehre bringen, indem sie zum Beispiel einen Kurs für fortgeschrittene Studenten geben. Es ist also eine Freistellung mit

einer gewissen Verpflichtung, das auch wieder einzubringen.

Wir haben im Cluster auch die bereits kurz erwähnten *exploratory projects*, in denen wir ganz neue Richtungen erkunden wollen. In einigen dieser Projekte haben wir schon angefangen, Masterarbeiten gemeinsam – über die Disziplinen hinweg – zu betreuen. Eine Masterarbeit ist sozusagen noch ein ‚low-risk environment‘. Die Masterstudenten lernen viele interessante Sachen und dadurch, dass wir sie gemeinsam betreuen, sind wir automatisch miteinander im Gespräch. Wenn das bei einem Thema gut läuft, denke ich, kann man auch über die Betreuung von gemeinsamen Dissertationen nachdenken.

Warum ist es so wichtig für die jungen Leute, sich mit den interdisziplinären Fragen auseinanderzusetzen?

aw: Es ist auch nicht so, dass wir nur noch interdisziplinäre Masterarbeiten betreuen werden. Aber es gibt durchaus eine ganze Reihe von Studenten, die finden das sehr spannend. Gerade weil wir in Heidelberg zum Beispiel sehr viele Studenten aus der Physik haben, die sehr großes Interesse auch an der Mathematik haben und den entsprechenden Background mitbringen.

ms: Wenn man nur an seinem Thema arbeitet, dann fährt man sich leichter mal fest und sieht vielleicht auch die Umgebung nicht so, gerade wenn man noch nicht so viel kennt. Aber wenn man in einer Gruppe ist und wenn man zwei Betreuer hat, die einem vielleicht auch noch leicht widersprüchliche Dinge erzählen, dann kann das ziemlich anregend sein, finde ich. Es gibt Themen, da muss man einfach tief bohren und sich spezialisieren, aber es gibt

auch Lösungen, die man erst findet, wenn man eine etwas größere Perspektive einnimmt.

aw: Ich würde gerne nochmal auf einen anderen Punkt eingehen. Es birgt meiner Meinung nach eine große Chance für Studenten und auch Doktoranden und Nachwuchswissenschaftler, wirklich in den Cluster integriert zu sein. Denn natürlich ist es in so einem großen Projekt so, dass selbst ich als Professorin, wenn ich mich mit einem Kollegen unterhalte, der aus einem ganz anderen Fachgebiet ist, wie ein Student bin und frage ... Dadurch entsteht eine Atmosphäre des wissenschaftlichen Austauschs, wo man auch ‚dumme‘ Fragen stellen darf und die auch beantwortet werden – oder sich herausstellt, dass man die Antwort gar nicht wirklich weiß. Dadurch verringert sich auch die Distanz zwischen Professor und Student, weil man sehr schnell auf die gleiche Ebene geworfen wird.

Und dadurch, dass die Nachwuchswissenschaftler direkt in so einem interdisziplinären Umfeld aufwachsen, werden Dinge, die für uns mit ‚effort‘ verbunden sind, für die Studenten ganz natürlich. Ich habe das in einem mathematischen Netzwerk, das verschiedene Bereiche der Mathematik zusammenbrachte, erlebt, und das ist einfach toll zu sehen. Darum haben wir auch im Rahmen des Structures College ein sehr konkretes Projekt zur Förderung der jungen Wissenschaftler mit dem Namen STEPS eingerichtet.

Wie genau werden denn die Nachwuchswissenschaftler in STEPS gefördert?

aw: Das Ganze zielt darauf ab, dass wir die Leute, die bei uns die Karriereleiter hinaufklettern, möglichst gut

Das STRUCTURES College

In STRUCTURES spielt der Austausch zwischen Wissenschaftlern aus sehr verschiedenen Fachgebieten eine entscheidende Rolle. Eine der – wissenschaftlich und strukturell – wichtigsten Maßnahmen des Clusters ist es, das STRUCTURES College als neue akademische Einheit innerhalb der Universität Heidelberg aufzubauen. Der Zweck des College ist es, Zeit, Raum und eine Umgebung zu bieten, die den interdisziplinären Austausch zu STRUCTURES-Themen in folgender Weise besonders fördert:

- Mitglieder des Clusters haben als STRUCTURES Fellows Gelegenheit, für einen Zeitraum bis zu einem Jahr am College zu sein und sich dort ganz ihren Projekten und der Zusammenarbeit innerhalb des Clusters zu widmen.
- Das College hat ein ausgedehntes Gästeprogramm, in dessen Rahmen Kurz- und Langzeitbesucher dort

sein werden, Vorträge und Vorlesungen geben bzw. an Konferenzen teilnehmen.

- Das College bietet den Studierenden ab dem fortgeschrittenen Bachelorniveau ein forschungsorientiertes Lehrprogramm, das die Themen aus der STRUCTURES-Forschung abbildet, und sich auf diese Weise fächerverbindend in das Lehrprogramm der beteiligten Fakultäten einordnet. Die Fellows tragen unmittelbar nach ihrer Zeit am College zu diesem Lehrprogramm bei.
- Vom College gehen durch Vorträge, Seminare und Transferaktivitäten Impulse aus, in die gesamte Universität und darüber hinaus in die Öffentlichkeit.

Das College soll langfristig in Heidelberg am Philosophenweg im Kontext des dort entstehenden Theoriezentrums der Universität Heidelberg untergebracht werden.

Das *STRUCTURES Training and Education Program for Success*, kurz STEPS, bringt die besonderen Maßnahmen zur Nachwuchsförderung sowie zur Chancengleichheit zusammen. Es beinhaltet ein Mentoring Programm für Nachwuchswissenschaftler, das sein Augenmerk besonders auf *transition points* richtet, und frühe Selbstständigkeit fördert.

auf den jeweils nächsten Schritt vorbereiten und ihnen damit zu einer wissenschaftlichen oder auch zu einer Karriere außerhalb des akademischen Bereichs verhelfen wollen. Wir tun das, indem wir ihnen einerseits sehr viel Unabhängigkeit geben, eben auch dadurch, dass wir diese hierarchien-nivellierende interdisziplinäre Atmosphäre haben, und auf der anderen Seite durch ein sehr konkretes Mentoring-Programm.

ms: Außerdem werden wir vier von den acht neuen Professorenstellen, die es im Cluster geben wird, als tenure track-Stellen einrichten, so dass wir jungen Leuten eine klare Perspektive geben können.

Wir haben also wissenschaftlichen Ziele und strukturelle Ziele. Die wissenschaftlichen Ziele sind einerseits ganz konkrete schwierige Fragen, die natürliche Vorgänge betreffen, zu beantworten – wirklich zu verstehen. Und darüber hinaus gehend eben vereinheitlichende Prinzipien der Emergenz zu testen und neue zu finden. Die strukturellen Ziele liegen darin, dass diese ganze interdisziplinäre Zusammenarbeit, die wir gerade besprochen haben, institutionalisiert wird, sodass es ein Umfeld gibt, in dem sie nicht mehr etwas Besonderes ist, das stark an einzelnen Personen hängt, sondern für ganze Generationen von jungen Leuten zur Selbstverständlichkeit wird, weil sie in diesem Umfeld aufwachsen.

Kerstin Hoppenhaus
hoppenhaus@hgmedien.com

Anna Wienhard ist Professorin am Mathematischen Institut der Universität Heidelberg und Gruppenleiterin am Heidelberg Institut für Theoretische Studien. Ihr Forschungsschwerpunkt liegt im Bereich der Geometrie und Topologie. Sie beschäftigt sich insbesondere mit Darstellungsvarietäten und geometrischen Strukturen auf Mannigfaltigkeiten. Anna Wienhard verbrachte ihre Postdoc-Zeit am Institut for Advanced Study und der University of Chicago und war Assistenzprofessorin an der Princeton University. Sie ist Fellow der American Mathematical Society und erhielt 2014 einen ERC Consolidator Grant.

Manfred Salmhofer geboren 1964 in Graz. Studium der Physik und Mathematik in Graz, Doktorat am MPI für Physik und Astrophysik in München, Promotion 1991. Nach Postdocaufenthalt in Vancouver, Princeton und Leiden ab 1995 Assistenzprofessor am Departement Mathematik der ETH Zürich. Ab 2001 Professor für Physik an der Universität Leipzig, seit 2008 an der Universität Heidelberg. Forschungsschwerpunkt mathematische Physik und Physik komplexer Systeme.

Kerstin Hoppenhaus ist freie Wissenschaftsjournalistin und Regisseurin in Berlin. Sie arbeitet für verschiedene Print- und Online-Medien, unter anderem für die Zeit, Süddeutsche Zeitung und BBC Future. Im Jahr 2018 war sie für sechs Monate als Journalist in Residence am Heidelberger Institut für Theoretische Studien (HITS).