

future

Das Forschungsmagazin der Universität Siegen 2022
University of Siegen Research Magazine

Materie und Quantensysteme / Matter and Quantum Systems

Die mysteriöse Welt des Allerkleinsten The Mysterious World of Ultra-Tiny Particles

Zukunft menschlich gestalten
Shaping a Humane Future

 Universität
Siegen



Foto/Photo Sascha Hüttenhain

Schwerpunktthema der vierten Ausgabe unseres Forschungsmagazins ist unser Profilbereich *Materie und Quantensysteme*. Ein Bereich der Physik, der im Wesentlichen in der Grundlagenforschung angesiedelt ist und dessen Gegenstand zunächst nicht den Anschein politisierter Forschung erweckt.

Gerade dieser Gegenstand ist es jedoch, der es ermöglichte, fernab der politischen Bühne einen nicht unerheblichen Beitrag zur Völkerverständigung zu leisten. Das CERN, die Europäische Organisation für Kernforschung, etwa, das den größten Teilchenbeschleuniger der Welt betreibt, war nach dem Zweiten Weltkrieg ein ambitioniertes paneuropäisches Projekt, dessen Herzstück sich baulich über zwei Länder, Frankreich und die Schweiz, erstreckt. Es ist ein Ort, der selbst in den angespanntesten Zeiten des Kalten Krieges Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus den beiden Blöcken zusammenführte. Die Wissenschaft leistete so Tag für Tag einen wesentlichen Beitrag zur Völkerverständigung und für den Frieden – und gerade von dieser Weltoffenheit hat letzten Endes auch die Forschung profitiert.

In Zeiten der neuen Blockbildung und eines Krieges in Europa muss man jedoch konstatieren, dass auch die Grundlagenforschung an einem Scheidepunkt steht, an dem die völlig liberale Sicht auf wissenschaftliche Erkenntnis zum Wohle der Menschheit aus unterschiedlichen Richtungen infrage gestellt wird. Nationalismen greifen um sich, Erkenntnisgewinne werden nicht mehr ohne weiteres geteilt und selbst Forschungsbereiche, die kaum oder gar nicht anwendungsorientiert sind, werden zusehends zum machtpolitischen Instrument.

In diesem Sinne wünsche ich Ihnen heute nicht nur viel Spaß beim Lesen, sondern möchte auch die Gelegenheit nutzen, uns allen ins Bewusstsein zu rufen, dass die uns bisweilen so selbstverständliche Weltoffenheit des akademischen Systems etwas ist, für das wir uns als Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler zunehmend aktiv einsetzen müssen.

Professor Dr. Thomas Mannel
Prorektor für Forschung und wissenschaftlichen Nachwuchts
Prorector for Research and Junior Scientists

The fourth edition of our research magazine focuses primarily on our profile area *Matter and Quantum Systems*. It's an area of physics primarily associated with fundamental research. At first glance, this scientific subject matter does not seem to be the object of politicization.

However, that is exactly what has enabled this field to contribute significantly to international understanding, far removed from politics. Take for example CERN, the European Organisation for Nuclear Research, which operates the world's largest particle accelerator. It was established after the Second World War as an ambitious pan-European project with its core facility straddling two countries, France and Switzerland. It is a place which, even during the tensest times of the Cold War, brought together scientists from both blocs. This is how science on a daily basis contributed to understanding between nations and promoted peace. And ultimately, research itself benefited from this international openness.

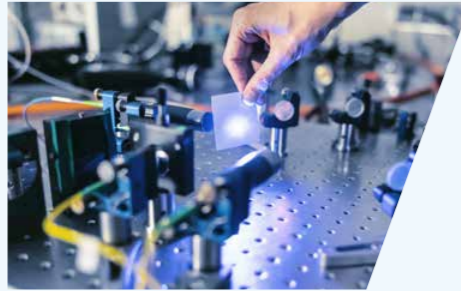
Yet, in today's world where new blocs are forming and a war is raging in Europe, we must recognize that fundamental research is at a turning point. The wholly liberal understanding of scientific knowledge for the good of humankind is being questioned from various sides. Nationalism is spreading, new knowledge is not always shared, and even research fields which are barely or even not at all application-oriented are increasingly being misused as instruments of political power.

With this in mind, I hope you enjoy reading our magazine. But I also want to take the opportunity to alert all of us to the fact that the global freedom of the academic system we have been used to for so long is something we as scientists must increasingly and actively strive to protect.

Materie und Quantensysteme / Matter and Quantum Systems

Die mysteriöse Welt des Allerkleinsten **04**
The Mysterious World of Ultra-Tiny Particles

12



Komplexer rechnen mit Quanten
Complex Computing with Quanta

Die Informationstechnik ist im Umbruch: Künftig sollen Quantencomputer hochkomplexe Rechenoperationen lösen. Information technology (IT) is undergoing a fundamental shift. In the future, quantum computers are intended to perform highly complex computations.

»Es gibt noch viel zu entdecken«
»There's still a whole lot to discover«

In der Welt der Quanten gelten Regeln, die in unserer Alltagswelt nicht plausibel erscheinen. Hier gibt es noch viel Potenzial für neue Entdeckungen.

The quantum world runs on rules that seem impossible in the »normal« world. There is still a lot of potential for new discoveries here.



22

30 EIN Quantum NRW

32



Die Teilchenfänger
The Particle Catchers

Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler versuchen die Widersprüche im Standardmodell der Elementarteilchenphysik aufzuspüren.

Scientists are trying to track down the contradictions in the Standard Model of elementary particle physics.

42



Die dritte Teilchen-Generation
Third-Generation Elementary Particles

Unsere ForscherInnen sind auf der Suche nach Hinweisen auf eine Welt jenseits der bekannten Physik.

Our scientists are looking for indications of a world beyond known physics.

Durch Mathematik die Beschaffenheit der Welt erkunden
Exploring the Nature of the World with Math

Wie forscht eine Elementarteilchenphysikerin? Dr. Rusa Mandal berichtet über ihre Motivation und ihren Forschungsalltag.

What does the research of an elementary particle physicist look like? Dr. Rusa Mandal talks about what drives her, and her daily research work.



51

56 Meine Doktorarbeit in einem Tweet: Auf dem Weg ins Quanteninternet
My PhD in a Tweet: On the Way to the Quantum Internet

Aus den Fakultäten / From the Schools

60 3 Fragen an...: Mit »freudvollen Unruhestiftern« zu mehr Nachhaltigkeit
3 Questions for ...: Achieving More Sustainability with »Pleasurable Troublemakers«

72 Gekommen, um zu bleiben
Here to Stay

64 Faktencheck: »NS-Gedenkstätten eignen sich als außerschulische Lernorte bereits im Grundschulalter«
Fact Check: »National Socialism memorials provide educational opportunities, even for elementary school children«

79 Viren in neuem Licht
Shedding New Light on Viruses

86 Unsere AutorInnen
Our Authors

88 Impressum
Imprint

Die mysteriöse Welt des Allerkleinsten

Autorin/Author Nora Ratmann

The Mysterious World of Ultra-Tiny Particles

GPS, Smartphones, Satelliten, Laser, MRT-Geräte, Supraleiter, Fernseher – nichts davon gäbe es in der heute bekannten Form, wenn die Menschheit die Quantenphysik nicht für sich erschlossen hätte. Auf den ersten Blick scheinen deren Gesetze äußerst mysteriös. Wenn wir versuchen, sie zu verstehen, müssen wir alle altbekannten, rationalen Regeln vergessen. Auf geht's: Lassen Sie uns unser logisches Empfinden komplett ausschalten.

GPS, smartphones, satellites, lasers, MRT devices, superconductors, TV sets – without quantum physics, none of these would be possible as we know them today. To non-experts, the laws behind quantum physics seem beyond our imagination. To understand them, we must throw all the familiar, rational rules overboard. So let's switch off our logical imagination and explore!

Stellen wir uns vor, wir befänden uns im ausgehenden 19. Jahrhundert. Das Atom gilt damals als das kleinste, unteilbare Teilchen. Es scheint, als stünde die Wissenschaft mit ihren seit dem 17. Jahrhundert geltenden Newton'schen Gesetzen der Mechanik und den Maxwell'schen Gleichungen der Elektrodynamik kurz vor der vollständigen Erkenntnis, wie die Welt funktioniert.

Weit gefehlt! Zunächst entdeckt der Physiker Joseph John Thomson 1897, dass Atome aus wiederum kleineren Teilchen bestehen – sie also doch nicht unteilbar sind. Neben der atomaren existiert also auch eine subatomare Welt des Allerkleinsten. 1900 kommt plötzlich der theoretische Physiker Max Planck daher, der mit eben diesen atomaren und subatomaren Teilchen Gedankenexperimente anstellt. Er präsentiert sein Strahlungsgesetz, spricht von einem Wirkungsquantum h – einer Naturkonstante – und von Energiepaketen, sogenannten Quanten. Er erklärt, dass auf atomarer Ebene gewisse Größen nicht jeden beliebigen Wert annehmen können. Das ist vergleichbar mit einem Auto, das entweder 30, 50 oder 100 km/h fahren kann. Alle anderen Geschwindigkeiten dazwischen stünden schlichtweg nicht zur Verfügung – das Auto könnte also z.B. nicht 49 oder 51 km/h fahren. Planck spricht von diskreten Werten, also vorgegebenen, bestimmten Quanten. Der Begriff kommt vom Lateinischen »quantum«, der »so viel« beziehungsweise »so groß« bedeutet. Damit beschreibt Planck Gesetze für die atomare und subatomare Welt, die mit der klassischen Newton'schen Physik nicht zusammenpassen. Er selbst bezeichnet das Phänomen der Quanten als eine »für das Vorstellungsvermögen fast unerträgliche Zumutung«.

Max
Planck

Imagine we're in the late 19th century. The atom is considered the smallest, indivisible particle. It looks like science is on the cusp of fully explaining how the world works, based on Newton's laws of mechanics dating from the 17th century and Maxwell's equations of electrodynamics.

Far from it! First the physicist Joseph John Thomson establishes in 1897 that atoms are made up of even smaller particles, and are therefore divisible. Beyond the atomic level, there is a subatomic realm of the tiniest particles. Suddenly, in 1900, the theoretical physicist Max Planck enters the field. He conducts thought experiments on these atomic and subatomic particles. He then presents his radiation law, posits a quantum of action h – a natural constant – and packets of energy, which he terms quanta. Planck explains that at an atomic level, certain characteristics cannot take on any random value. A useful analogy is a car that can only drive at either 30, 50, or 100 km/h. All other speeds are simply not possible, so the car can't drive at e.g. 49 or 51 km/h. Planck uses the term discrete values, meaning predetermined, absolute quanta. The word comes from the Latin »quantum« for »how much« or »how large«. This is how Planck describes the atomic and subatomic world which cannot be explained by the classical physics of Newton. He himself calls the phenomenon of quanta an »almost unbearable imposition on the imagination.«



Louis de Broglie



Neben dieser Erweiterung der Newton'schen Physik zeigen die Maxwell'schen Gleichungen der Elektrodynamik, dass noch eine weitergehende Ergänzung nötig ist. Die Gleichungen enthalten eine Geschwindigkeit als Naturkonstante, die eine Grenzgeschwindigkeit darstellt, die nicht überschritten werden kann: Das bedeutet, dass nichts sich schneller bewegen kann als das Licht. Dies hat zur Entwicklung der speziellen Relativitätstheorie geführt, neben der Quantenmechanik die zweite große Entdeckung des 20. Jahrhunderts.

Die Regeln der atomaren und subatomaren Welt

Die neuen Erkenntnisse, die auf den ersten Blick völlig absurd scheinen, werden in den Folgejahrzehnten in immer mehr Experimenten und Berechnungen belegt und erklärt. 1924 zum Beispiel bringt das »Doppelspalt-Experiment« die Physikwelt in Aufruhr. Louis de Broglie entdeckt, dass Photonen (also Lichtquanten) sowohl Teilchen als auch Wellen sein können. Das bedeutet, dass sich ein Photon an einem festen Ort aufhalten (als Teilchen), es aber auch ein Impuls ohne feste Ortsbestimmung (als Welle) sein kann. Dieser Welle-Teilchen-Dualismus belegt das Phänomen der Superposition, das besagt, dass sich Zustände überlagern. Und er belegt noch mehr: Die Bindung von Molekülen. Er bildet damit die Basis dafür, dass unsere Welt, ja, das gesamte Universum, überhaupt existiert.

Beyond an expansion into Newtonian physics, Maxwell's equations on electrodynamics have shown that other extensions are necessary as well. The equations posit a certain natural constant as representing an absolute maximum speed: in plain terms, nothing can move faster than light. This idea led to the development of the special theory of relativity, which was the second great discovery of the 20th century, alongside quantum mechanics.

The laws of the atomic and subatomic world

In the subsequent years, these new ideas, which at first seem completely absurd, are proven and explained in more and more experiments and calculations. For example, in 1924, the double-slit experiment causes an uproar in physics. Louis de Broglie discovers that photons (light quanta) can be both particles and waves. In other words, a photon can have a fixed location (as a particle) and it can be a momentum without a fixed location (as a wave). The wave-particle duality confirms the superposition phenomenon which states that characteristics can overlap. More than that, it confirms the binding of molecules, which is the basis for the very existence of the entire universe.

Der Erkenntnisgewinn geht weiter: In der Welt, wie wir sie kennen, können wir die Flugbahn eines Tennisballs exakt berechnen, wenn wir ihn wegschmettern – vorausgesetzt wir kennen alle Ausgangsfaktoren. In der Quantenphysik können wir bei gleichbleibenden Ausgangsfaktoren niemals vorab wissen, wo ein Teilchen landen wird. Und mehr noch: Wir wissen überhaupt nicht, wo es sich gerade befindet – bis wir die Position des Teilchens aktiv messen. Und selbst wenn wir den Ort messen, gibt es über den Ausgang der Messung immer nur eine statistische Aussage. Das Teilchen wird in diesem exakten Moment wahrscheinlich an diesem Ort sein. Das nennt sich Beobachtereffekt, formuliert unter anderem durch den Physiker Werner Heisenberg. Die Eigenschaften eines Teilchens existieren erst, indem wir sie messen. Der Zufall hält Einzug in die Naturwissenschaften.

1927 beschreibt Heisenberg die nach ihm benannte Unschärferelation: Je genauer man den Ort eines Teilchens bestimmt, desto ungenauer wird die Messung des Impulses – und umgekehrt. Das heißt, man kann nie beide Werte gleichzeitig exakt bestimmen. Wer noch einen Schritt weitergehen möchte, kann Erwin Schrödingers Gedankenexperiment »Schrödingers Katze« auf sich wirken lassen, in dem der Physiker fragt, ob eine Katze unter gewissen quantenphysikalischen Bedingungen gleichzeitig tot und lebendig sein kann, bis jemand sie beobachtet.

Yet, this advance is even wider ranging: In the world as we know it, we can exactly calculate the trajectory of a tennis ball when hit, as long as we know all the initial conditions. Yet, according to quantum physics, we can never predict where a particle will land even if the initial conditions are the same. In fact, we don't know the particle's current position until we actively measure it. Quantum theory only makes a statement about the statistical probability of the result of the measurement. At a precise moment, the particle is probably at a certain position. This is called the observer effect, as formulated by the physicist Werner Heisenberg and others. It means the characteristics of a particle only exist once we measure them. Randomness becomes a factor in the natural sciences.

In 1927, Heisenberg describes the uncertainty principle as follows: The more precisely the position of a particle is determined, the less precisely its momentum can be predicted – and vice versa. Therefore, it is impossible to exactly determine the two values simultaneously. If you want to take this concept further, then you might consider Erwin Schrödinger's thought experiment involving a cat. The physicist examines the idea of whether, under certain quantum-physical conditions, a cat can be both dead and alive until somebody observes it.

Independently of each other, Schrödinger and Heisenberg develop two different descriptions of quantum theory. Quantization changes all the components of classical physics – for example, position, momentum, and energy – in such a way that they describe a quantum-physical system. This forms the basis for modern quantum mechanics. A short time later, the quantization of physical fields leads to quantum field theory. This links the special theory of relativity and quantum mechanics, and further extends them by describing both particles and fields. Here, particles are described as quanta of fields, and, therefore, a photon is a quantum of the electromagnetic field. Quantum field theory can also describe the generation of particles from energy, in line with the famous equation $E=mc^2$. This is the basis for modern particle accelerators.

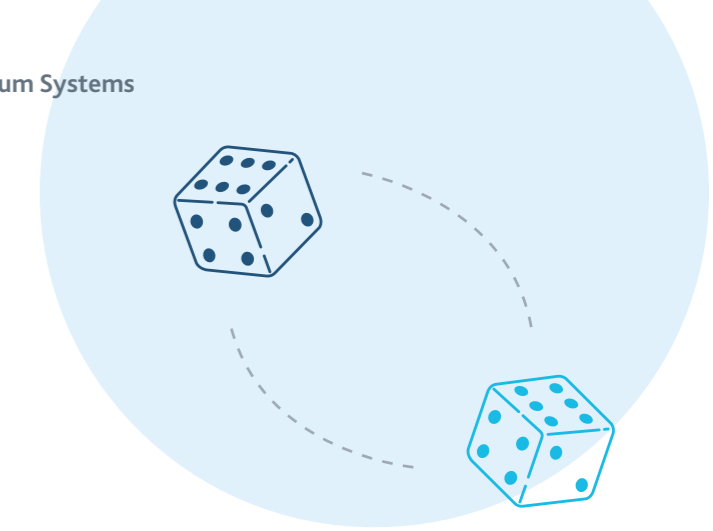
$$E = mc^2$$

Schrödinger und Heisenberg entwickeln unabhängig voneinander zwei verschiedene Beschreibungen der Quantentheorie. Durch eine Quantisierung ändert man alle Komponenten der klassischen Physik – zum Beispiel Ort, Impuls und Energie – so, dass sie ein quantenphysikalisches System beschreiben. Die moderne Quantenmechanik ist damit begründet. Kurze Zeit später entsteht durch die Quantisierung von physikalischen Feldern die Quantenfeldtheorie. Sie verbindet die spezielle Relativitätstheorie und die Quantenmechanik und entwickelt diese weiter, indem sowohl Teilchen als auch Felder beschrieben werden. Teilchen werden hier als Quanten von Feldern beschrieben, so ist das Photon das Quant des elektromagnetischen Feldes. Auch kann die Quantenfeldtheorie die Erzeugung von Teilchen aus Energie beschreiben, gemäß der berühmten Formel $E=mc^2$. Dies ist Grundlage der modernen Teilchenbeschleuniger.

Als wäre das nicht genug, wird es noch mysteriöser. Stellen wir uns zwei Würfel vor. Einer in Deutschland, einer in Japan. Würfelt jemand mit dem Würfel in Deutschland, hat das nicht die geringste Auswirkung auf den Würfel in Japan – zumindest nicht in der Welt, wie wir sie kennen. In der Quantenphysik sind Teilchen miteinander verbunden durch sogenannte Verschränkung. Das wäre so, als würfelte jemand in Deutschland eine Sechs und der Würfel in Japan täte es dem in Deutschland gleich – und zwar zeitgleich. Verschränkung meint, dass zwei oder mehr Teilchen verbunden sind, egal wie weit entfernt sie voneinander sind, und zwar nicht örtlich, sondern in ihrer Eigenschaft.

Quantenphysik finden wir überall im Alltag

Über die vergangenen Jahrzehnte hinweg ist es der Menschheit zumindest in Teilen gelungen, die Regeln der Quantenmechanik und der Quantenfeldtheorie für ihre Zwecke zu entschlüsseln, zu kanalisieren und anzuwenden. Die Grundlagen der modernen Elektronik und der modernen medizinischen Diagnostik fußen genauso auf der Quantenphysik wie unser Verständnis des Lichts. Außerdem fußt die moderne Metrologie – also die Wissenschaft des Messens – auf quantenphysikalischen Messvorschriften. Dadurch sind das »Ur-Meter« und das »Ur-Kilogramm« längst ersetzt worden, auch deshalb, weil die Präzision von Messungen sehr zugenommen hat.



As if that wasn't enough, things now get even stranger. Imagine two dice – one in Europe, one in Japan. If somebody throws the die in Germany, this has no effect whatsoever on the die in Japan – at least not in the world as we know it. But in quantum physics, particles are linked by so-called entanglement. This would mean that if somebody in Germany throws a six, the die in Japan would not only do the same, but do it instantaneously. Entanglement means that two or more particles are linked regardless of the distance between them. They are not linked spatially, but rather in terms of their state.

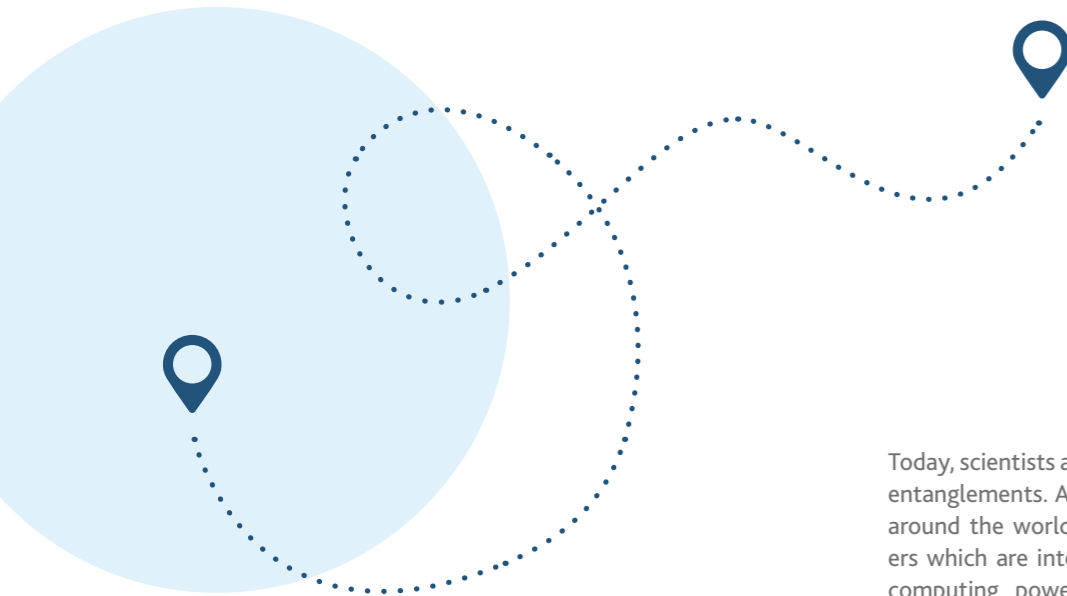
Quantum physics is everywhere

Over the intervening decades, scientists have at least partially deciphered the rules of quantum physics, so that we can use them for our own practical purposes. The foundations of modern electronics and medical diagnostics were built on quantum physics. Furthermore, modern metrology, or the science of measurement, is also based on measurement methods from quantum physics. The »original meter« and the »original kilogram« have long been replaced in light of the vastly improved precision of today's measurements.

And yet, the inventors of quantum theory never even dreamed of such things as GPS, lasers, or television. At the time, their work was pure basic research without any thought of practical application. Meanwhile, many of their followers have received Nobel prizes for their own research in this area. »It takes time and an awful lot of patience to develop real innovations from this pure and curiosity-driven research,« explains Professor Dr. Thomas Mannel, a physicist at the University of Siegen. Of course, this also means that if we were to investigate possible applications before every research project, we would hinder the innovations themselves.



Erwin
Schrödinger



Dabei hat keiner der Erfinder der Quantentheorie damals auch nur im Traum an GPS, Laser oder Fernsehgeräte gedacht. Die Forschung, für die viele ihrer Vertreter in der Zwischenzeit Nobelpreise erhalten haben, war damals absolute Grundlagenforschung, also ohne einen Anwendungsbezug. »Es braucht Zeit und Geduld, damit sich aus dieser »zweckfreien« Forschung echte Innovationen entwickeln«, erklärt Professor Dr. Thomas Mannel, Physiker an der Universität Siegen. Umgekehrt heiÙe das: Wer bei jeder Forschung sofort nach den Anwendungen fragt, erschwert echte Innovationen.

Heutzutage ist es WissenschaftlerInnen möglich, Verschränkung von Teilchen zu kontrollieren und nutzbar zu machen. Mit solchen Methoden entwickeln momentan weltweit ForscherInnen Quantencomputer, die alle bisher gekannten Rechenleistungen aktueller Superrechner bei weitem überbieten sollen. Auch ForscherInnen der Universität Siegen arbeiten daran, die Welt der Informationsverarbeitung zu revolutionieren, zum Beispiel Professor Dr. Christof Wunderlich und Professor Dr. Mario Agio. Mehr dazu lesen Sie im Artikel »Komplexer rechnen mit Quanten« (S.12). Gleichzeitig versuchen Wissenschaftsteams, durch Verschränkung abhörsichere Kommunikation (Kryptographie) zu ermöglichen. Auch in Siegen wird daran geforscht, unter anderem von Professor Dr. Otfried Gühne und Kiara Hansenne (siehe »Es gibt noch viel zu entdecken«, S. 22, und »Meine Doktorarbeit in einem Tweet«, S. 56).

Today, scientists are able to control and utilize particle entanglements. Applying these methods, researchers around the world are developing quantum computers which are intended to massively outperform the computing power of all current supercomputers. Researchers at the University of Siegen are also working on revolutionizing data processing. They include, for example, Professor Dr. Christof Wunderlich and Professor Dr. Mario Agio: Find out more in the article »Complex Computing with Quanta« (p. 12). Teams of scientists are also working on secure communication (cryptography) using entanglement. This is another area of research at the University of Siegen, being investigated by researchers including Professor Dr. Otfried Gühne and Kiara Hansenne (see »There's still a whole lot to discover«, p. 22, and »My PhD-Thesis in a Tweet«, p. 56).

Beyond the boundaries of known physics?

The laws of the smallest particles have been represented since the 1960s and 70s in the Standard Model of Elementary Particles (see also the illustration on page 45). As understood today, the elementary particles are quarks and leptons that interact with each other by means of exchange particles. All known matter is composed of these particles. The most recent groundbreaking fundamental discovery was the Higgs boson. It means that we now have a mathematical, consistent (quantum field) theory that advances our understanding. The Standard Model is the world's most tested theory. So far, it has not been disproved by a single experiment. However, it does have some weaknesses. For example, nobody has yet been able to formulate gravity as a consistent quantum field theory. All attempts to prove the existence of the relevant field quantum, the graviton, have failed.

Jenseits der bekannten Physik?

Die Regeln der aller kleinsten Teilchen sind seit den 1960er und 70er Jahren im Standardmodell der Elementarteilchen zusammengefasst (siehe auch Illustration auf S. 45). Die aus heutiger Sicht elementaren Teilchen sind die Quarks und Leptonen, die mittels Austauschteilchen miteinander wechselwirken. Aus diesen Teilchen setzt sich unsere gesamte bekannte Materie zusammen. Die letzte bahnbrechende, fundamentale Entdeckung war die des Higgs-Bosons 2012. Durch diese Entdeckung haben wir eine mathematisch konsistente (Quantenfeld-)Theorie, die sehr erfolgreich ist. Das Standardmodell der Elementarteilchen ist die am besten überprüfte Theorie der Welt. Bisher hat kein einziges Experiment es endgültig ins Wanken bringen können, aber klar ist: Es hat seine Schwächen. Die Schwerkraft zum Beispiel lässt sich bisher nicht als konsistente Quantenfeldtheorie formulieren, das entsprechende Feldquant, das Graviton, konnte bisher in Experimenten nicht nachgewiesen werden.

Durch Experimente unter immer präziseren Messungen versuchen WissenschaftlerInnen neue Teilchen zu finden beziehungsweise bereits theoretisch vorhergesagte Teilchen in der Praxis nachzuweisen. Der bekannteste Standort für solche Experimente ist das CERN bei Genf. In Teilchenbeschleunigern werden Teilchen auf andere Teilchen oder auf eine Wand gefeuert, um eine Kollision zu verursachen. Über einen Detektor werden alle entstandenen Bruchstücke der Kollision gemessen, um die Eigenschaften der Teilchen immer präziser bestimmen zu können. Professor Dr. Markus Cristinziani von der Universität Siegen zum Beispiel entwickelt mit seinem Team Komponenten für einen noch leistungsfähigeren Pixeldetektor am CERN, damit noch genauer gemessen werden kann. Mehr dazu lesen Sie im Artikel »Die Teilchenfänger« (S. 32).

Weil weiterhin vieles mysteriös bleibt, braucht es Grundlagenforschung. Ziel der ForscherInnen ist es, Widersprüche des Standardmodells der Elementarteilchen aufzulösen, und damit womöglich Hinweise für eine Welt jenseits der bekannten Physik zu entdecken, die noch vollumfänglicher den Kosmos erklären kann – und zum Beispiel die Newton'sche Gravitationstheorie mit der Quantenphysik zusammenbringt. Daran forschen an der Universität Siegen beispielsweise Professor Dr. Alexander Lenz, Prof. Dr. Thomas Mannel, Dr. Rusa Mandal und Prof. Dr. Markus Cristinziani mit ihren Teams. Ihr Ziel ist es, die Entstehung und Zusammensetzung des Universums noch genauer zu entschlüsseln – und damit auch, wie wir Menschen überhaupt existieren, wie die Struktur von Raum und Zeit aussieht und wie die Grundkräfte der Natur wirken. Mehr dazu lesen Sie in den Artikeln »Die dritte Teilchen-Generation« (S. 42), »Durch Mathematik die Beschaffenheit der Welt erkunden« (S. 51) und »Die Teilchenfänger« (S. 32).

In experiments with ever more precise measurements, scientists are trying to find new particles or prove the practical existence of particles as yet only posited in theory. The most famous facility for experiments like this is the CERN research center near Geneva. At CERN, particle accelerators are used to accelerate particles and collide them with each other. A detector measures all the fragments resulting from the collision in order to determine the characteristics of the particles ever more precisely. For example, Professor Markus Cristinziani from the University of Siegen and his team are developing components for an even more powerful pixel detector at CERN which will allow even more accurate measurements. Read more in the article »The Particle Catchers« (p. 32).

Many things are still a mystery, which is why we need basic research. The goal of researchers is to resolve the weaknesses in the Standard Model of Elementary Particles. They hope this will provide new ideas about how to discover a world beyond current physics able to explain the universe more fully – and which, for example, combine Newton's Law of Gravity and quantum physics. Research in this field at the University of Siegen is being conducted, for example, by Professor Dr. Alexander Lenz, Prof. Dr. Thomas Mannel, Dr. Rusa Mandal, and Prof. Dr. Markus Cristinziani with their respective teams. They aim to gain an even better understanding of the creation and composition of the universe. This will also help explain how humans can exist at all, what the structure of time and space is, and how the fundamental forces of nature work. Find out more in the articles »Third-Generation Elementary Particles« (p. 42), »Exploring The Nature Of The World With Math« (p. 51) and »The Particle Catchers« (p. 32).



Komplexer rechnen mit Quanten

Autor / Author Tim Schröder

Complex Computing with Quanta

Foto / Photo Sascha Hüttenhain

Die Informationstechnik ist im Umbruch: Künftig sollen Quantencomputer hochkomplexe Rechenoperationen lösen. An der Universität Siegen arbeiten gleich zwei Forschungsteams an Konzepten für den Quantencomputer. Der Experimentalphysiker Professor Dr. Christof Wunderlich stellt seine Technologie künftig über sein Startup-Unternehmen eleQtron zur Verfügung. Der Nano-Optiker Professor Dr. Mario Agio hingegen arbeitet daran, Diamantkristalle in Quantenrechner zu verwandeln.

Information technology (IT) is undergoing a fundamental shift. In the future, quantum computers are intended to perform highly complex calculations. Two research teams at the University of Siegen are working on concepts for quantum computers. The experimental physicist Professor Dr. Christof Wunderlich will in future provide his technology via his startup eleQtron. In turn, the nano-optics scientist Professor Dr. Mario Agio is working on transforming diamond crystals into quantum computing chips.



Foto / Photo Sascha Hüttenhain

»Das, was die Quanten tun, liegt jenseits unserer Vorstellungskraft. Selbst für uns Physiker war das lange ungewöhnlich.«

Prof. Dr. Christof Wunderlich

Wenn man im Kreise von Freunden das Wort »Quanten« ausspricht, blickt man meist in ratlose Gesichter. »Quanten«, das klingt irgendwie nach Einstein, nach Chemie oder Physik, nach theoretischen Dingen, die man noch nie wirklich verstanden hat. Physikerinnen und Physiker erforschen schon seit mehr als 100 Jahren diese seltsamen Phänomene. Anfangs war die Quantenforschung graue Theorie. Vor etwa 40 Jahren gelang es dann erstmals, die Quanteneigenschaften einzelner Atome im Labor zu beobachten. Sie sind so real wie der Mond und die Sterne. Mit dem Begriff »Quant« bezeichnen Fachleute den kleinstmöglichen Wert einer physikalischen Größe. Ein Beispiel sind die Photonen, die winzigen energiereichen Teilchen, aus denen das Licht besteht. Pflanzen fangen sie ein, um deren Energie für die Photosynthese zu nutzen.

»The way quanta act is beyond our imagination. For a long time, even physicists struggled with this.«

Prof. Dr. Christof Wunderlich

Use the word »quanta« in conversation with friends, and you'll likely get blank looks. Quanta evokes vague associations with Einstein, chemistry or physics, and theoretical ideas never really understood. Physicists have been conducting research into these strange phenomena for more than 100 years. At first, quantum research was pure, diffuse theory. But around 40 years ago, scientists succeeded in observing the quantum characteristics of individual atoms in the lab: They are just as real as the moon and the stars. The term quantum refers to the smallest possible value of a physical quantity. One example are photons, energy-carrying particles that make up light. Plants capture them and use their energy for photosynthesis.

What makes quanta so unique is that they behave utterly unlike anything we humans know from normal life. A quantum system can be in different states at the same time. It can simultaneously move in two different directions or be low-energy and high-energy. And it gets even weirder: It's possible to link two quanta together and entangle them, so that, for example, they spin in the same direction. Then, when one quantum system changes its state, the other does the same, even if the two are kilometers apart. »As humans, we're used to certain phenomena, for example that a pencil will fall to the floor if you drop it,« says Prof. Dr. Christof Wunderlich. »But the way quanta act is beyond our imagination. For a long time, even physicists struggled with this.« Christof Wunderlich is an experimental physicist at the University of Siegen. He has been conducting research on quanta for many years. In his lab, he can transform quanta into the strange states that make them so stunning. »Quanta are what they are, and when you work with them on a daily basis, it becomes routine.« Prof. Dr. Mario Agio agrees. In his laboratory for nano-optics at the University of Siegen, he also works on quanta.



Die Quanten sind vor allem deshalb so eigenartig, weil sie sich ganz anders verhalten als Dinge, die wir Menschen aus unserem Alltag kennen. Ein Quant kann gleichzeitig verschiedene Zustände annehmen. Es kann sich gleichzeitig in zwei verschiedene Richtungen bewegen oder gleichzeitig energiearm und energiereich sein. Und es wird noch verrückter: Man kann zwei Quanten miteinander verknüpfen, verschränken, sodass sie zum Beispiel in derselben Richtung rotieren. Verändert ein Quant seine Eigenschaft, tut dies auch das zweite, selbst wenn beide viele Kilometer voneinander entfernt sind. »Wir Menschen sind an bestimmte Phänomene gewöhnt, etwa, dass ein Bleistift zu Boden fällt, wenn man ihn loslässt«, sagt Prof. Dr. Christof Wunderlich. »Das, was die Quanten tun, liegt jenseits unserer Vorstellungskraft. Selbst für uns Physiker war das lange ungewöhnlich.« Christof Wunderlich ist Experimentalphysiker an der Universität Siegen. Er erforscht Quanten seit vielen Jahren und ist in der Lage, Quanten in seinem Labor in die eigenartigen Zustände zu versetzen, die sie so geisterhaft machen. »Quanten sind einfach so, wie sie sind – und wenn man täglich mit ihnen arbeitet, wird das irgendwann zur Routine.« Das sieht auch Prof. Dr. Mario Agio so, der sich an der Universität Siegen in seinem Labor für Nano-Optik mit Quanten beschäftigt.

Both have the same goal. They want to help revolutionize IT. To do this, they are working on quantum computers designed to vastly accelerate computing operations in the future. Moreover, they are applying two different strategies. Mario Agio is using static diamond crystals, while Christof Wunderlich is making individual atoms dance. Wunderlich is cooperating with colleagues from the Heinrich Heine University Düsseldorf and the Leibniz University Hannover, among others. The German Ministry of Research is funding their joint quantum computer project, named MIQRO, to the tune of EUR 15.8 million.

Conventional computers operate using bits that can have the states 0 or 1. The states are created in the computer by switching transistors on or off. Each letter is represented by eight bits, for example A by the sequence 0100 0001. Quantum computers dismiss this on-off principle with zeros and ones. As quanta can adopt different states simultaneously, they can be in a 0 or 1 quantum state at the same time. Even if incorrect from the perspective of physics, one could imagine this like a coin tossed in the air so that you can't tell which side is currently facing up. Due to this superposition of states, quantum computers can solve problems much faster than classical computers. Instead of conventional bits, they work with quantum bits, or qubits. Two qubits can even be entangled and work in parallel, which will make these computers even faster. The challenge is pinning down the quanta and harnessing their unique properties to perform calculations.



Professor Dr. Mario Agio

Foto / Photo Sascha Hüttenhain

Die beiden verfolgen dasselbe Ziel. Sie wollen mit dazu beitragen, die Welt der Informationsverarbeitung zu revolutionieren. Sie arbeiten an Quantencomputern, die Rechenoperationen künftig enorm beschleunigen sollen. Dabei verfolgen sie zwei unterschiedliche Strategien. Mario Agio nutzt feste Diamantkristalle. Christof Wunderlich hingegen lässt einzelne Atome tanzen. Wunderlich kooperiert unter anderem mit Kolleginnen und Kollegen von der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf und der Leibniz Universität Hannover. Das Bundesforschungsministerium fördert ihr gemeinsames Quantencomputer-Projekt MIQRO mit 15,8 Millionen Euro.

Herkömmliche Computer rechnen mit Bits – die den Zustand 0 oder 1 haben können. Realisiert wird das im Computer, indem Transistoren an- oder ausgeschaltet werden. Ein Buchstabe wird im Computer durch acht Bits repräsentiert, der Buchstabe A etwa durch die Folge 0100 0001. Der Quantenrechner löst sich von diesem An-Aus-Prinzip und den Nullen und Einsen. Weil Quanten gleichzeitig verschiedene Zustände annehmen können, können sie gleichzeitig 0 und 1 sein. Sie können sogar verschiedene Zustände dazwischen annehmen. Das gleicht einer Münze, die man in die Luft wirft und bei der man nicht sagen kann, welche Seite gerade nach oben weist. Dank dieser Gleichzeitigkeit von Zuständen können Quantencomputer sehr viel schneller rechnen als klassische Computer. Statt von einem herkömmlichen Bit spricht man von Quantenbits beziehungsweise Qubits. Zwei Qubits lassen sich sogar miteinander verschränken und können parallel arbeiten, was die Rechner noch schneller machen wird. Die Herausforderung besteht darin, die Quanten dingfest und ihr eigenartiges Verhalten für das Rechnen nutzbar zu machen.

Together with his team at the University of Siegen, Christof Wunderlich has developed his own method over the past 15 years. For his qubits, he uses ionized (electrically charged) atoms. He has developed a special microchip that uses electrical fields to capture the ionized atoms as if in a trap. Christof Wunderlich applies magnetic fields and microwaves to control and agitate the qubits and to transform them into various states. Microwave technology is well-established today and used in smartphone antennas and many other hi-tech devices. »The huge advantage is that we can control microwaves very easily and with incredible precision,« emphasizes Wunderlich. Normally, atoms and ions are in constant motion at room temperature. However, the qubits must remain almost motionless within quantum computers so that they can be purposefully manipulated and utilized. Wunderlich's ion traps make this possible.

Kompakte Ultrahochvakuum-Apparatur eines Quantencomputers mit einem Ionenfallenchip im Zentrum (letzterer ist nicht sichtbar)

Compact, ultra-high-vacuum unit of a quantum computer with embedded ion trap chip (the chip is not visible)



Foto / Photo Sascha Hüttenhain



Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler am Labortisch. Von links: Pau Dietz Romero (Doktorand), Omaira Koutit (WHB), Bogdan Okhrimenko (Doktorand), Elham Esteki (Doktorandin)

Scientists at the lab table. Left to right: Pau Dietz Romero (PhD student), Omaira Koutit (graduate assistant), Bogdan Okhrimenko (PhD student), Elham Esteki (PhD student)

Foto / Photo Sascha Hüttenhain

Christof Wunderlich hat zusammen mit seinem Team in mehr als 15 Jahren an der Universität Siegen seine eigene Methode entwickelt. Als Qubits nutzt er ionisierte, also geladene Atome. Er hat dafür einen speziellen Mikrochip entwickelt, der die ionisierten Atome mithilfe elektrischer Felder wie in einer Falle gefangen hält. Um die Qubits zu steuern, anzuregen und in die verschiedenen Zustände zu versetzen, nutzt er Magnetfelder und Mikrowellen. Die Mikrowellentechnik ist heute etabliert und wird in Handy-Antennen und vielen anderen Hightech-Geräten eingesetzt. »Der riesige Vorteil besteht darin, dass sich Mikrowellen sehr leicht und mit ungeheurer Präzision steuern lassen«, betont Wunderlich. Normalerweise bewegen sich Atome und Ionen bei Raumtemperatur ohne Unterlass. Im Quantencomputer aber müssen die Qubits nahezu stillstehen, um sie gezielt manipulieren und nutzen zu können. Mit Wunderlichs Ionenfalle geht das.



Foto / Photo Sascha Hüttenhain

Einzigartige Mikrowellentechnik

Der Physiker ist von seinem Konzept überzeugt. Lange Zeit hatten Experten weltweit versucht, Quanten aus ionisierten Atomen mit Lasern zu steuern. »Wir haben das auch gemacht«, erzählt er. »Irgendwann aber waren wir restlos genervt davon.« Es sei schwierig, das Laserlicht über längere Zeit stabil zu halten, sodass man den Zustand der Qubits für Minuten oder Stunden aufrechterhalten kann, um damit Daten zu speichern. Ende der 1990er-Jahre schwenkte Wunderlich deshalb zu den Mikrowellen um. Im Jahr 2001 veröffentlichte er dann einen Artikel im angesehenen Fachjournal *Physical Review Letters* und beschrieb erstmals den heute in Siegen verwirklichten Ionenfallen-Mikrowellen-Ansatz mit dem Namen Magnetic Gradient Induced Coupling (MAGIC). Wunderlich ist zuversichtlich, dass die MAGIC-Methode auch jenen Quantencomputern überlegen sein wird, die derzeit von Google oder IBM entwickelt werden. Beide Unternehmen nutzen die bewährten, sehr präzisen Computerchip-Technologien, um Qubits einzufangen. Den Chips aus Silizium werden nanometerfeine, magnetisch-elektrische Strukturen aufgeprägt. Als Qubit dienen nicht Atome, sondern schwingende elektromagnetische Felder. Für Christof Wunderlich besteht das Problem darin, dass die Nanostrukturen sich nicht bis ins letzte Detail identisch fertigen lassen. Sie weichen minimal voneinander ab. Das mache es schwierig, Computer mit mehreren Qubits zu bauen, die ausreichend präzise arbeiten. »Wir hingegen nutzen Atome, die von Natur aus alle perfekt gleich sind«, sagt Wunderlich. »Und dass man sie beherrscht, zeigen seit Langem die hochpräzisen Atomuhren.«

Unique microwave technology

The physicist is confident of his concept. Experts around the world have attempted for years to control quanta consisting of ionized atoms using lasers: »We did this as well,« he says. »But at some point we had had enough.« It's difficult to keep many laser beams stable over a longer period of time, but this is necessary in order to maintain the state of the qubits for minutes or hours, and to store data. That's why Wunderlich switched to the microwave method at the end of the 1990s. In 2001, he published an article in the renowned scientific journal *Physical Review Letters*. He described for the first time the ion-trap microwave approach he had developed in Siegen and dubbed Magnetic Gradient Induced Coupling (MAGIC). Wunderlich is confident that the MAGIC method will also beat the quantum computers currently being developed by Google and IBM. Both these companies use established, high-precision computer chip technologies to capture qubits. Magnetic-electrical structures mere nanometers thick are printed onto silicon chips. Instead of atoms, the qubits consist of oscillating electromagnetic fields. The problem identified by Christof Wunderlich is that it's impossible to manufacture the nanostructures so that they are identical in every detail. There are always tiny deviations between them. This makes it difficult to build computers with several qubits that function with enough precision. »Instead we use atoms, which are of course inherently absolutely identical,« says Wunderlich. »And we've known for a long time that we can control them, as proven by precision atomic clocks.«

Foto / Photo Sascha Hüttenhain



Ivan Boldin (Postdoc) und Elham Esteki (Doktorandin) justieren einen Versuchsaufbau für neue Quantencomputerchips.

Ivan Boldin (postdoc) and Elham Esteki (PhD student) adjust a test setup for new quantum computer chips.



Haritha Kambalathmana (Doktorandin) justiert einen nano-optischen Aufbau für die Untersuchung von Farbzentren in Diamant.

Haritha Kambalathmana (PhD student) adjusts a nano-optical setup to investigate color centers in diamond.

Foto / Photo Nazanin Mosahebjarf

»Diamant ist das beste Material, um die Atome von äußeren Einflüssen abzuschirmen.«

Prof. Dr. Mario Agio

Mario Agio geht einen anderen Weg. Er nutzt Diamantkristalle, um darin Qubits zu erzeugen. Die Kunst besteht darin, bestimmte Atome fein säuberlich in das Kristall einzubauen. Diese »Fehlstellen« können dann durch Licht und Mikrowellen angeregt und in Qubits verwandelt werden. Der Vorteil besteht darin, dass das feste Diamantgitter die Qubits gewissermaßen fixiert. Man benötigt daher keine elektromagnetischen Ionenfallen. »Diamant ist das beste Material, um die Atome von äußeren Einflüssen abzuschirmen«, sagt Mario Agio. Das sei perfekt für die empfindlichen Quanten. Noch ist die Technologie aber nicht reif für den Einsatz. »Es wird noch viele Jahre dauern, bis sich Kristalle mit Fehlstellen so präzise fertigen lassen, dass man daraus Quantencomputer mit vielen gleichförmigen Qubits herstellen kann«, sagt Agio.

Mario Agio takes a different approach. He uses diamond crystals to host qubits. The challenge is to integrate certain atoms absolutely cleanly into the crystal. These »defects« can then be excited with light and microwaves to manipulate qubits. The advantage is that the stable diamond lattice fixes the qubits in place, so that there's no need for electromagnetic ion traps. »Diamond is the best material for shielding the atoms from external influences,« says Mario Agio, »and that's perfect for the highly sensitive quanta.« However, the technology isn't yet ready for practical application: »It'll take years before we can produce crystals with flaws precisely enough for quantum computers with a large number of identical qubits,« says Agio.

»Diamond is the best material for shielding the atoms from external influences.«

Prof. Dr. Mario Agio

Die beteiligten Partner

Das Projekt MIQRO wird vom Bundesforschungsministerium mit insgesamt 15,8 Millionen Euro gefördert. Der Siegener Anteil beträgt 7,1 Millionen Euro. Neben der Universität Siegen gehören zu den Partnern das Institut für Quantenoptik der Leibniz Universität Hannover unter Leitung von Prof. Dr. Christian Ospelkaus, die Arbeitsgruppe von Prof. Dr. Martin Kliesch von der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf sowie die Firma QUARTIC, die die elektronischen Kontrollsysteme der MIQRO-Anlagen baut. Das Projekt hat eine Laufzeit von vier Jahren und endet am 30. April 2025. Nähere Information zur Firma eleQtron gibt es unter www.eleqtron.com.

Quantenrechnen als Service

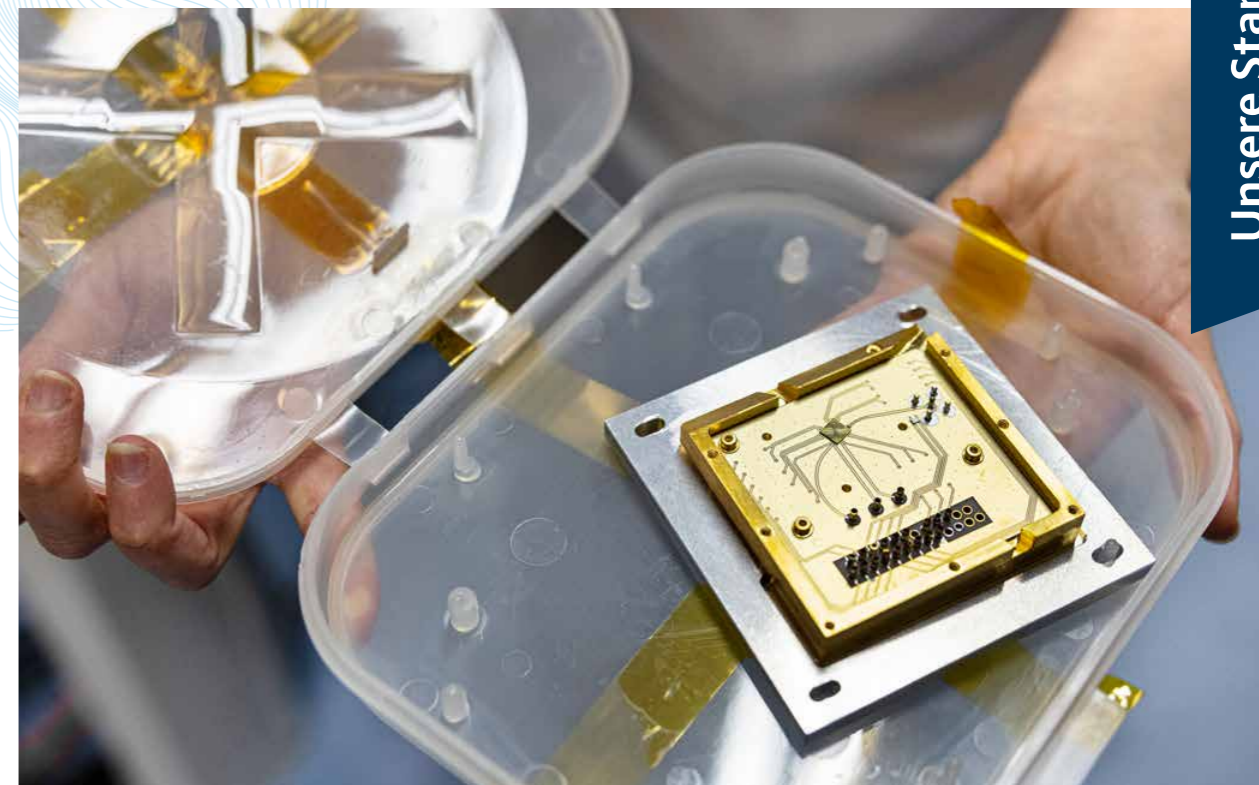
Christof Wunderlich ist schon weiter. Im Jahr 2011 ist es ihm und seinem Team erstmals gelungen, Qubits mithilfe der MAGIC-Technologie zu programmieren. Inzwischen bewältigt ein frei programmierbarer MAGIC-Quantencomputer bis zu acht ionisierte Atome beziehungsweise Qubits auf einmal. Das ist eine Menge, mit der sich bereits interessante Rechenoperationen durchführen lassen. Im Rahmen des Forschungsprojektes MIQRO werde jetzt der Grundstein gelegt, um tausende Qubits »höchster Güte« zu nutzen, sagt Wunderlich. Zusammen mit Kollegen hat er vor kurzem die Firma eleQtron ausgegründet, die künftig Quantencomputer-Berechnungen als Service anbieten wird. Kundinnen und Kunden werden dann online Rechenprobleme an den eleQtron-Computer schicken können. Chemie- und Pharmaunternehmen könnten mit dessen Hilfe zum Beispiel komplexe neue Molekülstrukturen entwickeln und erforschen.

Noch ist das eleQtron-System aber nicht ganz einsatzbereit. Wie in der klassischen Informatik müssen zunächst noch Hardware, Algorithmen und Software-Pakete entwickelt werden, mit denen man die Quantentechnik bedient. So braucht es Software, die Informationen und Steuerbefehle in die Quantentechnik und in Mikrowellensignale übersetzt. Christof Wunderlich geht davon aus, dass es noch etwa zwei bis drei Jahre dauert, bis Kundinnen und Kunden über das Internet den Service von eleQtron nutzen können. Partner, die Interesse haben, erste Anwendungsbeispiele zusammen mit eleQtron zu entwickeln, sind aber schon jetzt willkommen.

Quantum computing on demand

Christof Wunderlich's project is already at a more advanced stage. In 2011, he and his team succeeded for the first time in programming qubits using his MAGIC technology. Today, a freely programmable MAGIC quantum computer can handle up to eight ionized atoms or qubits simultaneously. This is already enough to perform significant computing operations, and a great achievement. The MIQRO research project provides the foundations for the use of thousands of »top-quality« qubits, says Wunderlich. Together with colleagues, he recently founded eleQtron, a company that will offer quantum computing as a service. Customers will be able to submit computing problems to the eleQtron computer online. For example, chemical and pharmaceutical companies could develop and research new molecular structures with the help of the quantum computer.

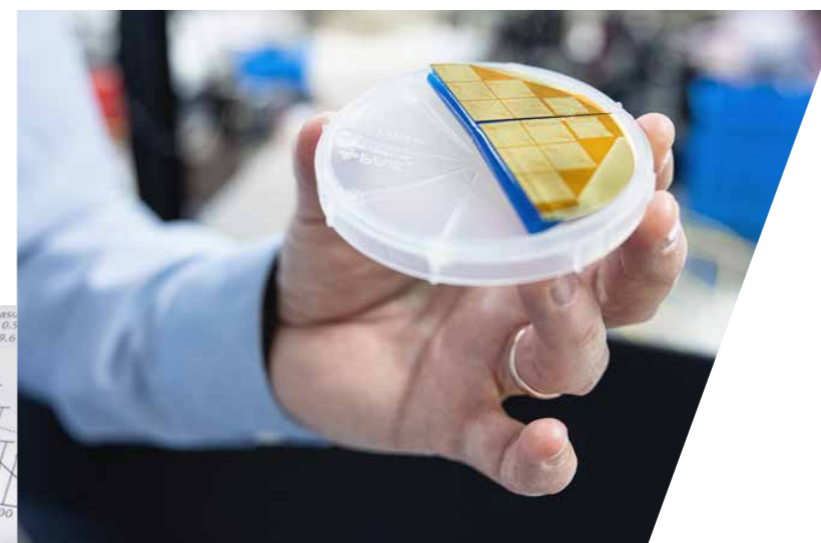
However, the eleQtron system is not yet quite ready to be launched. Just like in conventional IT, hardware, algorithms, and software packages have to be developed before the quantum technology can be applied. The company needs software that translates data and commands into quantum technology and microwave signals. Christof Wunderlich expects it to take about two or three years before customers can use the online eleQtron service. However, partners who would like to develop initial application cases with eleQtron are welcome to come on board now.



Ein neuartiger MAGIC-Ionenfallenchip, montiert auf einem Träger mit Zuleitungen

An innovative MAGIC ion trap chip mounted on a carrier with supply lines

Foto / Photo Sascha Hüttenhain



Die ersten mikrostrukturierten Ionenfallenchips mit MAGIC-Funktionalität (2014)

The first micro-structured ion trap chips with MAGIC functionality (2014)

Foto / Photo Sascha Hüttenhain

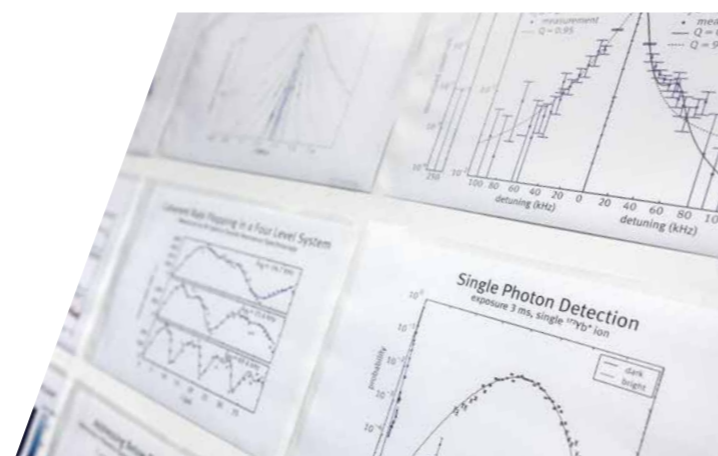


Foto / Photo Sascha Hüttenhain

The partners

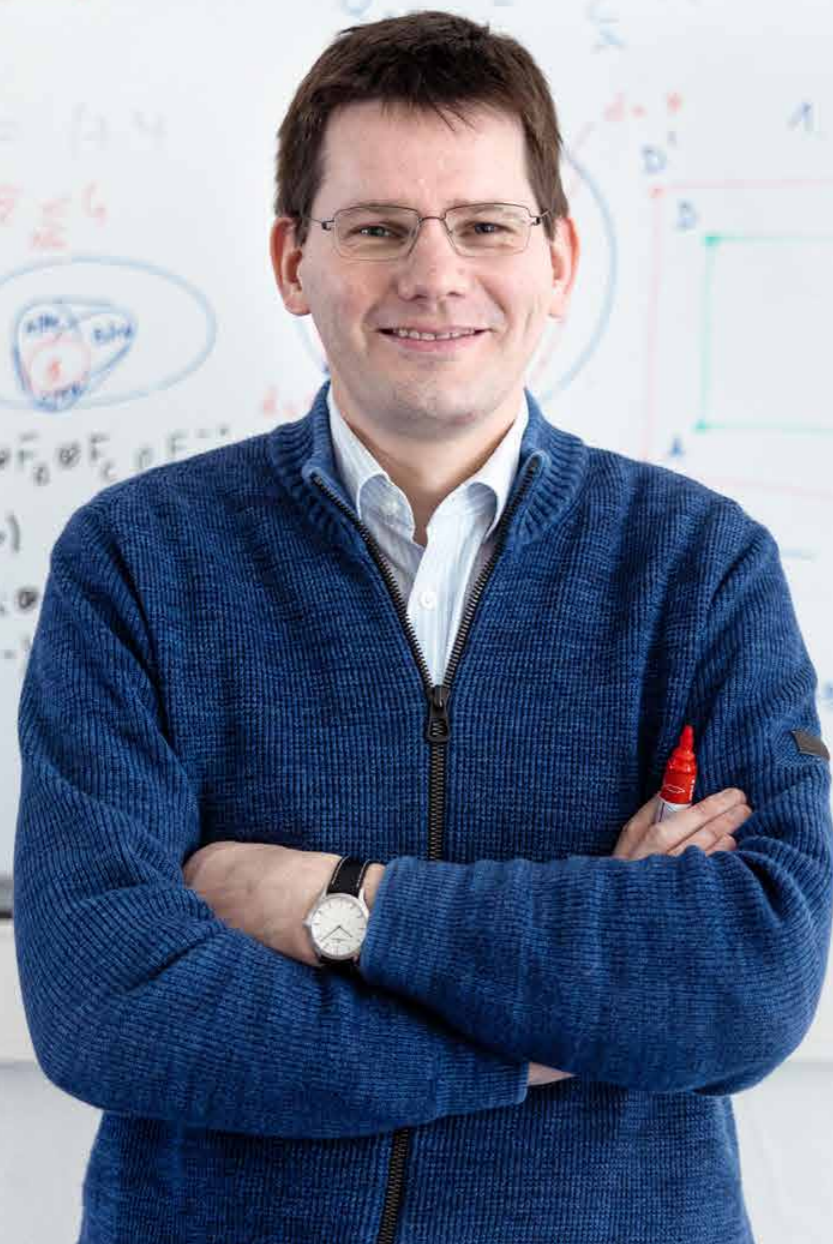
The German Ministry for Research is funding the MIQRO project to the amount of EUR 15.8 million. The partners in Siegen are providing a share of EUR 7.1 million. Other partners are the Institute of Quantum Optics at the Leibniz University Hannover under the leadership of Prof. Dr. Christian Ospelkaus, the research group under Prof. Dr. Martin Kliesch at the Heinrich Heine University Düsseldorf, and QUARTIC, a company which is engineering the electronic controls for the MIQRO systems. The project will run for a four-year period up to April 30, 2025. To find out more about eleQtron, go to www.eleqtron.com.

»Es gibt noch viel zu entdecken«

»There's still a whole lot to discover«

Autorin/Author Tanja Hoffmann

Fotos/Photos Sascha Hüttenhain



In der Welt der Quanten gelten Regeln, die in unserer Alltagswelt nicht plausibel erscheinen. Die Quantenmechanik ist die physikalische Theorie, die diese Regeln vorgibt. Hundert Jahre nach ihrer Entwicklung bietet sie immer noch ein großes Potenzial für neue Entdeckungen. Für Professor Dr. Otfried Gühne und seine Arbeitsgruppe ein wesentlicher Anreiz, sich mit den Grundlagen der Quantenmechanik zu beschäftigen.

The quantum world runs on rules that seem impossible in the »normal« world. Quantum mechanics is the physical theory that underpins these rules. Even a hundred years after it was developed, quantum mechanics still offers plenty of space for new discoveries. For Professor Dr. Otfried Gühne and his research group, this is a major attraction of their work on the foundations of quantum mechanics.

Eine Sofaecke, eine Espressomühle mit passender Siebträgermaschine, ein langer Tisch. Darüber verteilt: Etliche Zauberwürfel in den verschiedensten Farben und Formen und ein sogenannter »Pentomino«-Kalender. Dabei handelt es sich um einen mathematischen Knobel-Kalender, bei dem man fünf zusammenhängende Quadrate in unterschiedlichen Farben jeden Tag neu auf einer vorgegebenen Fläche anordnen muss – immer genau so, dass das Feld mit dem entsprechenden Tagesdatum frei bleibt.

A comfy couch landscape, an espresso grinder and coffee machine, a long table. Scattered over the top are a bunch of Rubik's Cube in different colors and shapes, plus a »Pentomino« calendar. A Pentomino is a mathematical puzzle calendar. Every day, the goal is to place five conjoined figures in different colors onto a board in such a way that they cover everything except that day's date.

»I want to understand the differences between quantum physics and classical physics. Why is quantum physics different, and what's new about it?«

Prof. Dr. Otfried Ghne

Der Blick in die Kaffeekche der Arbeitsgruppe »Theoretische Quantenoptik« von Prof. Dr. Otfried Gühne verrät bereits einiges darüber, wie hier gearbeitet wird. »Es ist ein weit verbreitetes Vorurteil, dass wir theoretischen Physiker die meiste Zeit vor dem Computer sitzen«, lcht Gühne. »Tatsächlich diskutieren wir sehr viel miteinander. Dabei geht es darum, gemeinsam neue Ideen zu entwickeln – zum Beispiel dazu, wie sich ein bestimmtes Phänomen sauber mathematisch formulieren und letztlich beweisen lässt. Da sind auch schon mal Kreativität oder die Fähigkeit zur Spekulation gefragt.«

Gühne und seine KollegInnen beschäftigen sich mit den Grundlagen der Quantenmechanik – also jener physikalischen Theorie, die das Verhalten der Materie im atomaren und subatomaren Bereich beschreibt. Die Quantenmechanik – oder auch Quantenphysik – unterscheidet sich nicht nur in ihrer mathematischen Struktur grundlegend von der klassischen Physik, sondern auch dadurch, dass sie einigen fundamentalen Prinzipien der klassischen Physik widerspricht. Für Otfried Gühne liegt genau darin eine wesentliche Motivation für seine Forschungsarbeit: »Ich möchte die Unterschiede zwischen der Quantenphysik und der klassischen Physik besser verstehen. Warum ist die Quantenphysik anders und was ist das Neue daran?«

»Ich möchte die Unterschiede zwischen der Quantenphysik und der klassischen Physik besser verstehen. Warum ist die Quantenphysik anders und was ist das Neue daran?«

Prof. Dr. Otfried Gühne



A glance into the coffee kitchen used by Prof. Dr. Otfried Gühne's Theoretical Quantum Optics research group tells you a lot about how they work. »Most people think theoretical physicists are always glued to a computer,« says Ghne with a laugh. »Actually, we spend a lot of time discussing stuff. It's all about developing new ideas together – for example, how a certain phenomenon can be perfectly mathematically formulated and ultimately solved. What you need for this is creativity and a talent for speculation.«

Ghne and his colleagues work on the foundations of quantum mechanics – in other words, the physical theory that describes the behavior of matter at the atomic and subatomic levels. Quantum mechanics – also called quantum physics – not only differs from classical physics in its mathematical structure, but also contradicts some fundamental principles of classical physics. This is a major part of Ghne's fascination with his research topic: »I want to understand the differences between quantum physics and classical physics. Why is quantum physics different, and what's new about it?«



$$\langle p_0 | p_k \rangle = \langle p_0 | p_k \rangle$$



Um das herauszufinden, untersuchen Gühne und sein Team insbesondere einen wesentlichen Effekt der Quantenphysik: Die Quantenverschränkung. Der Begriff »Verschränkung« beschreibt dabei einen besonderen Zustand zwischen zwei Teilchen, die zunächst als Paar auftreten und dann voneinander getrennt werden. Das Besondere ist, dass die Teilchen auch nach dieser räumlichen Trennung miteinander verbunden sind. »Verschränkte Teilchen ergänzen sich in ihren Eigenschaften. Messe ich eins der Teilchen, dann kenne ich automatisch den Zustand des anderen – und zwar unabhängig davon, wie weit die Teilchen zu diesem Zeitpunkt voneinander entfernt sind«, erklärt Gühne. »Obwohl keinerlei Informationen zwischen den Teilchen ausgetauscht werden, ist ihr Zustand voneinander abhängig.«

Mit der klassischen Physik lässt sich das nicht erklären, denn sie geht davon aus, dass es nicht möglich ist, zwischen zwei getrennten Systemen beliebig schnell Signale auszutauschen. Man spricht in diesem Zusammenhang auch vom Prinzip der »Lokalität«. Gleichzeitig geht die klassische Physik davon aus, dass physikalische Eigenschaften unabhängig von einer Messung sind und schon vorher feststehen – dies wird auch als »Realismus« bezeichnet. In der Quantenphysik ist das jedoch anders: Stellt man sich verschränkte Teilchen als Äpfel vor, die entweder rot oder grün sein können, dann stellt man fest, dass diese Quanten-Äpfel ständig zwischen beiden Farben wechseln. Erst wenn man einen der Äpfel betrachtet (oder eine Messung durchfhrt), entscheidet dieser sich für eine bestimmte Farbe – zum Beispiel »rot«. Im selben Moment legt sich auch der andere Apfel fest und wird unverzüglich ebenfalls »rot«.

To find the answers, Gühne and his team are examining a key effect of quantum physics: quantum entanglement. The term describes a special state between two particles that are initially generated as a pair and are then separated from each other. What's special is that even after their spatial separation, the particles remain connected. »Entangled particles complement each other's states. If I measure one of them, I automatically know the state of the other. It doesn't matter how far away from each other they are at this point,« explains Ghne. »Although no communication takes place between the particles, their states depend on each other.«

Classical physics cannot explain this because it assumes that signals can't be shared between two separate systems instantaneously. This principle is known as locality. Furthermore, classical physics states that physical characteristics are independent of measurement, and already fixed before measurement. This assumption is termed realism. Quantum physics turns this on its head. Imagine entangled particles as apples that can be either red or green. Quantum apples constantly change between the two colors. Only when we observe (or measure) one of the apples does it settle on a specific color, e.g. red. At the same instant, the other apple also settles for red.

$$\langle \rho_0 | \rho_k \rangle = \langle \mathcal{U} \rho_0 \mathcal{U}^\dagger | \rho_k \rangle$$

$$\langle \rho_0 | K^\dagger | \rho_0 \rangle$$

$$\downarrow$$

$$e^{-K(\epsilon + Z)}$$

In der Kaffeeküche der Arbeitsgruppe »Theoretische Quantenoptik« werden Probleme häufig im Team diskutiert – hier Kiara Hansenne, Otfried Gühne und Jan Lennart Bönsel (v.l.). Dabei sind Kreativität und die Fähigkeit zur Spekulation ausdrücklich erwünscht.

The members of the Theoretical Quantum Optics research group – here Kiara Hansenne, Otfried Gühne and Jan Lennart Bönsel (left to right) – often discuss problems at the coffee table. Creativity and a talent for speculation are actively encouraged.



Die Quantenverschränkung widerspricht damit der lokal-realistischen Sicht der klassischen Physik. Albert Einstein bezeichnete den Effekt der Verschränkung deshalb auch als »spukhafte Fernwirkung« und vertrat die Ansicht, die Quantenmechanik sei nicht vollständig und müsse durch das Hinzufügen »verborgener Variablen« ergänzt werden, um mit den klassischen Vorstellungen vereinbar zu sein. 1964 zeigte der irische Physiker John Bell jedoch, dass das nicht ohne weiteres möglich ist. Er stellte eine mathematische Ungleichung auf, die unter den oben beschriebenen Annahmen der klassischen Physik gelten muss. »Rechne ich das dann aber in der Quantenmechanik aus, komme ich zu einem anderen Ergebnis«, erklärt Gühne. »Quantenmechanische Experimente bestätigen diesen Widerspruch.«

Zu der Zeit, als John Bell die berühmte »Bellsche Ungleichung« aufstellte, war das allgemeine Interesse an theoretischen Überlegungen zur Quantenmechanik nicht sehr groß. Die meisten Forscher beschäftigten sich mit konkreten Anwendungsmöglichkeiten – zum Beispiel in der Festkörper- oder Teilchenphysik. »Die Quantenmechanik selbst zum Untersuchungsgegenstand zu machen, galt bis in die frühen 80er Jahre als verpönt. In dem Fachjournal »Physical Review« wurden solche Artikel sogar schlicht nicht gedruckt«, sagt Gühne. Geändert habe sich das erst mit der Entwicklung neuer experimenteller Möglichkeiten: Plötzlich war man in der Lage, statt hundert Atomen oder Lichtteilchen (Photonen) auch jeweils ein einzelnes zu untersuchen. Gleichzeitig entstanden die ersten Ideen für konkrete Anwendungen von Quanteneffekten in der Informationsverarbeitung.

This is how entanglement violates classical physics' rules of locality and realism. Moreover, it's why Albert Einstein described entanglement as a »spooky action at a distance«. He believed that quantum mechanics wasn't fully understood, and would need the addition of certain hidden variables to reconcile it with classical ideas. However, the Irish physicist John Bell demonstrated in 1964 that this is not possible without drastic consequences. He presented a mathematical inequality which would have to be true according to the assumptions of classical physics. »If I do the calculation according to quantum mechanics, I get a different result,« explains Gühne. »Quantum-mechanical experiments confirm this contradiction.«

At the time, John Bell derived his famous inequality, there wasn't much general interest in theories of quantum mechanics. Most researchers were occupied with concrete problems, such as applications in solid-state or particle physics. »Up to the early 80s, research on quantum mechanics itself was frowned upon. The journal Physical Review simply refused to print articles about it,« says Gühne. This didn't change until new experimental methods were developed: Suddenly, it was possible to examine single atoms or photons, rather than groups of hundreds. At the same time, the first ideas about concrete applications of quantum effects in IT emerged.

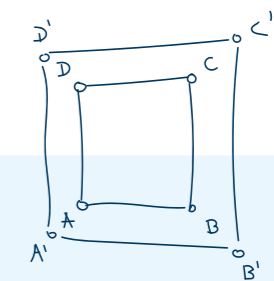
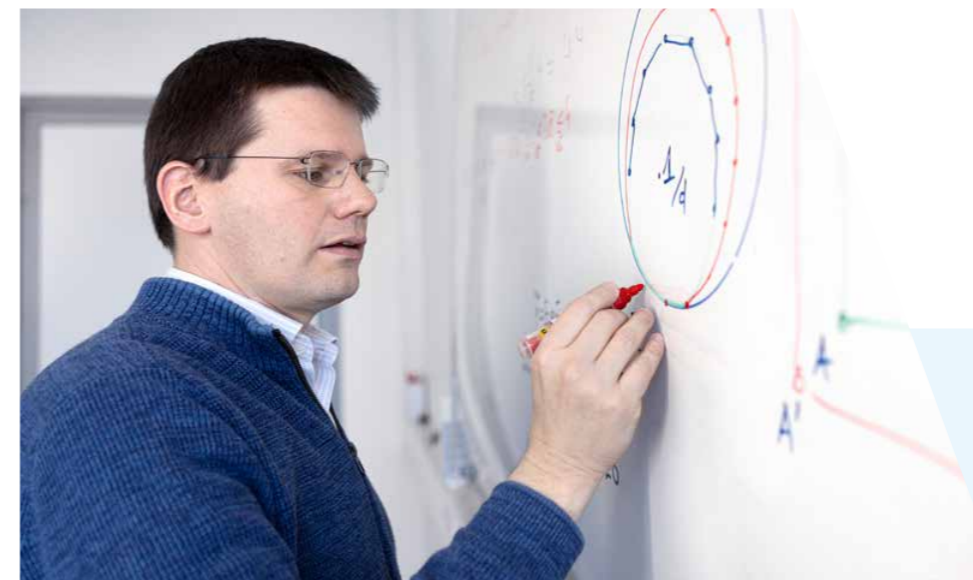
So bilden verschränkte Teilchen unter anderem die Basis für Quantencomputer und die sogenannte Quantenkryptographie. Sie soll in Zukunft eine abhörsichere Kommunikation ermöglichen: Sender und Empfänger besitzen dabei jeweils einen Teil eines verschränkten Paares und können durch Messungen daran einen geheimen Schlüssel erzeugen, der nicht unbemerkt von Dritten abgehört werden kann. »Zwischen zwei Parteien wird das bereits praktiziert. Komplizierter wird es, wenn drei oder noch mehr Parteien mithilfe der Quantenkryptographie Informationen austauschen wollen. Das ist ein Bereich, in dem wir aktuell sehr viel forschen«, sagt Gühne.

Gühne und sein Team betrachten dazu Quantennetzwerke, die aus Knotenpunkten mit Quantenspeichern – zum Beispiel aus einem oder mehreren Atomen – und photonischen Kanälen dazwischen bestehen, also einer Verbindung durch Lichtteilchen.. »Damit die Kommunikation in einem solchen Netzwerk auch über größere Distanzen funktioniert, muss an den richtigen Stellen Verschränkung erzeugt werden«, erklärt Gühne. »In der echten Welt funktioniert das allerdings nie ganz perfekt.« Um Verschränkung zwischen zwei Knotenpunkten herzustellen, werden zunächst zwei verschränkte Photonen erzeugt, die dann über Glasfaserkabel zu den beiden Knoten geleitet werden. Allerdings gehen Photonen gerade auf längeren Distanzen häufig verloren, kommen also nicht am Ziel an. »Tatsächlich funktioniert die Verschränkung zwischen zwei Knoten vielleicht in einem Prozent der Fälle. Klappt es nicht, muss man es mit einem neuen Photonen-Paar versuchen«, erläutert Gühne.

$$S_{ABC} = \sum_{\lambda} P(\lambda) \epsilon_A^{(\lambda)} \otimes \epsilon_B^{(\lambda)} \otimes \epsilon_C^{(\lambda)}$$

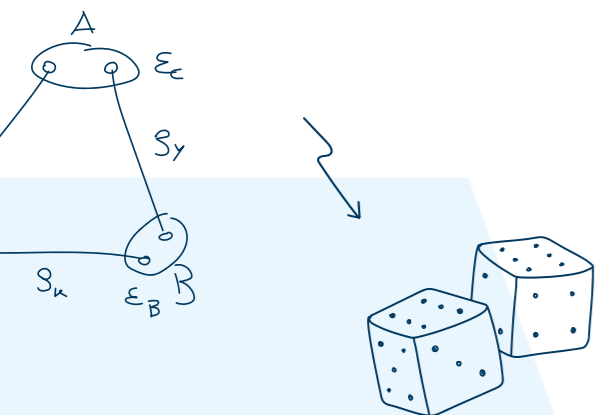
Entangled particles became the basis for quantum computers and quantum cryptography. Researchers envisage that quantum cryptography will enable secure communication in the future. The idea is that the sender and the receiver each have one of an entangled pair. By way of measurement, they can generate a secure key which can't be secretly tapped by third parties. »This is already practiced in communication between two parties. It gets more complicated when three or more parties want to exchange information using quantum cryptography. We're currently doing a lot of research in this area,« says Gühne.

Gühne and his team are examining quantum networks made up of nodes with quantum memories – for example, one or more atoms – linked by photon channels, i.e., a connection via light particles. »For communication in this kind of network to be possible across larger distances, entanglement must be created at the correct points,« explains Gühne, adding: »However, in the real world this never works perfectly.« To create entanglement between two nodes, first two entangled photons are generated, then transmitted via optical fiber cables to the two nodes. The problem is that photons often get lost over long distances so they don't arrive at their destination. »In fact, entanglement between two nodes succeeds maybe in one percent of cases. When it fails, you have to try with a new pair of photons,« explains Gühne.



Doch wie lange dauert es nun typischerweise, bis tatsächlich eine Verbindung zwischen mehreren Knoten hergestellt ist? »Bei wenigen Knoten lässt sich die Wartezeit mit Hilfe der Stochastik noch relativ einfach berechnen. Man kann sich das ein bisschen wie beim Würfeln vorstellen: Wie wahrscheinlich ist es und wie lange muss man warten, bis beispielsweise drei Parteien gleichzeitig eine Sechs Würfeln?«, erklärt Gühne. Schwieriger wird es bei komplexen Netzwerken mit sehr vielen Knoten – hierfür auszurechnen, wie lange es typischerweise dauert, bis eine beliebige Verbindung zwischen zwei Knotenpunkten funktioniert, ist mathematisch kompliziert und eines der Probleme, mit denen sich Gühne und sein Team beschäftigen.

Zusammen mit Partnern anderer Universitäten möchte die Arbeitsgruppe außerdem die Grundlagen dafür erarbeiten, Quantennetzwerke zukünftig noch leistungsfähiger zu machen (siehe dazu auch die Infobox zum Projekt QuKuK). Dazu sollen in den Netzwerken sogenannte »Mehrparteienzustände« zum Einsatz kommen, sagt Gühne. Mehrparteienzustände bestehen nicht, wie bisher in Quantennetzwerken üblich, aus zwei verschränkten Quantenteilchen, sondern können eine Verschränkung zwischen drei oder noch mehr Teilchen herstellen. Ausgangspunkt für die Nutzung von Mehrparteienzuständen in Quantennetzwerken ist eine genaue mathematische Analyse der Netzwerke selbst: Dazu betrachteten die PhysikerInnen zunächst alle möglichen Anordnungen von Verschränkungen und Verbindungen innerhalb eines Netzwerks. »Auf dieser Grundlage arbeiten wir dann daran, das Design der Netzwerke zu verbessern, um sie robuster und schneller zu machen – und um mögliche Fehler im Netzwerk aufspüren zu können«, erklärt Gühne.



So how long does it typically take to create a connection between several nodes? »If there are just a few nodes, we can calculate the waiting time relatively easily using stochastics. It's a bit like throwing dice: How probable is it and how long do you have to try until – let's say – three people simultaneously throw a six?« explains Gühne. The entire process gets even more difficult for complex networks with a lot of nodes. Calculating how long it typically takes until a connection is made between two nodes is mathematically complicated, and one of the problems Gühne and his team are working on.

The QuKuK project (Complex Quantum States for More Powerful Quantum Networks)

- Will receive some EUR 1.7 million in funding from the BMBF (Ministry for Research)
- Started in July 2022, and is scheduled to run for three years
- The partners are the Heinrich Heine University Düsseldorf, the Johannes Gutenberg University Mainz, and the Ludwig-Maximilians-Universität Munich
- The coordinator is Prof. Dr. Otfried Gühne
- The project consists of research into multiparty states for use in quantum networks with the goal of increasing the performance of the networks

Together with partners from other universities, the research group also wants to establish the foundations for boosting the performance of quantum networks (see also the info-box for the QuKuK project). For this, they intend to use »multiparty states«, says Gühne. Usually, quantum networks use two entangled quantum particles. Multiparty states can create an entanglement between three or even more particles. The prerequisite for using multiparty states in quantum networks is an exact mathematical analysis of the networks themselves. For this analysis, the physicists first consider all possible arrangements of entanglements and connections within a network. »Starting from this basis, we'll work on improving the design of the networks to make them more stable and faster. This will allow us to trace any faults in the network,« explains Gühne.

Neben solchen konkreten Überlegungen zu Verschränkung geht es den theoretischen PhysikerInnen aber weiterhin auch darum, grundlegende Strukturen in der Theorie der Quantenmechanik zu identifizieren und diese mathematisch zu beweisen. »Wir schauen uns im Grunde an, in welchen Situationen die Quantenmechanik Vorhersagen macht, die deutlich von der klassischen Physik abweichen«, erklärt Gühne. »Dazu muss man sich zunächst fragen: Was kann die klassische Physik vorhersagen? Und wo ist die Quantenmechanik weit davon entfernt?« Das Ziel: Einen bestimmten Zustand zu präparieren, beziehungsweise eine Messung durchzuführen, die zu einem Ergebnis führt, das sich nicht klassisch erklären lässt. Auf diese Weise hoffen Gühne und sein Team, Quanteneffekte zu finden, die bisher noch nicht bekannt sind. »Mehr als 100 Jahre nach der Entstehung der Quantenmechanik gibt es noch viel zu entdecken.«, sagt Gühne.

Das Projekt QuKuK (Komplexe Quantenzustände für leistungsfähigere Quantennetzwerke)

- wird vom BMBF mit rund 1,7 Mio. Euro gefördert
- Projektstart war im Juli 2022, die Laufzeit beträgt drei Jahre
- Projektpartner sind die Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf, die Johannes Gutenberg-Universität Mainz und die Ludwig-Maximilians-Universität München
- Koordinator ist Prof. Dr. Otfried Gühne
- Ziel des Projektes ist es, Mehrparteienzustände für die Nutzung in Quantennetzwerken zu erforschen, um so die Leistungsfähigkeit der Netzwerke zu steigern

Wenn es darum geht, Phänomene der Quantenmechanik mathematisch zu formulieren und zu beweisen, nutzt Professor Gühne gerne Papier und Bleistift – oder Marker und Whiteboard. Dass theoretische Physiker wie er die meiste Zeit vor dem Computer sitzen, sei ein weitverbreitetes Vorurteil, sagt Gühne.

When mathematically formulating and proving quantum mechanics phenomena, Gühne likes to use pen and paper – or marker and whiteboard. Most people think theoretical physicists spend all their time glued to a computer, says Gühne.



Apart from concrete applications relating to entanglement, the theoretical physicists also seek to identify fundamental structures in quantum mechanics theory, and prove them mathematically. »Basically, we're asking in what situations quantum mechanics makes predictions that deviate significantly from classical physics« explains Gühne. »First you have to ask yourself: What can classical physics predict? And where does quantum physics significantly deviate from this?« The goal is to create a specific state or perform a measurement that leads to a result which can't be explained by classical physics. This is how Gühne and his team hope to find so-far unknown quantum effects. »More than 100 years after the birth of quantum mechanics, there's still a whole lot to discover,« says Gühne.

$$\min \text{Tr}(Y\rho)$$

$$\text{Tr}(Y(\rho \otimes \nu)) - \gamma_i^{T*} \geq 0$$

$$-\gamma_i = 0$$

EIN Quantum NRW

Autorin/Author Nora Ratmann

Das Land

Nordrhein-Westfalen macht sich bereit für das Quantenzeitalter. 13 Universitäten, Forschungseinrichtungen und Wirtschaftsunternehmen kooperieren im 2022 gegründeten Netzwerk »EIN Quantum NRW«. Ziel ist es, die nationale Technologieführerschaft in der Forschung und Entwicklung von Quantentechnologien weiter auszubauen, Fachkräfte für dieses Zukunftsfeld auszubilden und Anwendungen für die Wirtschaft und Großindustrie im Herzen Europas zu erschließen. Für zunächst fünf Jahre ist das Netzwerk mit 20 Millionen Euro ausgestattet – 7,5 Millionen Euro als Eigenleistungen und 12,5 Millionen Euro durch die Landesregierung.

Zu den Gründungspartnern gehören die Universitäten Aachen, Bochum, Bonn, Dortmund, Duisburg-Essen, Düsseldorf, Köln, Münster, Paderborn, Siegen sowie das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), das Forschungszentrum Jülich und die Fraunhofer-Gesellschaft. Die Koordination erfolgt durch Jülich und die Universität Siegen mit Rektor Professor Dr. Holger Burckhart. Mittelfristig wird ein internationales Board aus Wissenschaft und Wirtschaft den Prozess begleiten. »Die Community der Grundlagenforscherinnen und -forscher in NRW, ebenso die zentralen Player der Wirtschaft und der Universitäten und außeruniversitären Forschungseinrichtungen, ziehen hier alle an einem Strang für eine zukunftsfähige Nutzung der immensen Möglichkeiten dieses Forschungsgebietes zum Wohle aller«, erklärt Burckhart.

An der Universität Siegen spielt das Quantencomputer-Projekt MIQRO eine große Rolle. Geleitet wird es durch den Siegener Experimentalphysiker Professor Dr. Christof Wunderlich. Er hat mit Dr. Michael Johanning und erfahrenen Partnern aus der Wirtschaft 2020 außerdem das Start-up eleQtron gegründet, das künftig Quantencomputer-Berechnungen als Service anbieten wird. Ebenfalls an der Universität Siegen arbeitet Nano-Optiker Professor Dr. Mario Agio an der Entwicklung von Quantencomputern (siehe Artikel »Komplexer rechnen mit Quanten«, Seite 12).

The state

of North Rhine-Westphalia is gearing up for the quantum age. 13 universities, research institutes, and companies are cooperating in the »EIN Quantum NRW« network, which was founded in 2022. Their goal is to further expand Germany's technology leadership in research and development of quantum technologies for businesses and major industry in the heart of Europe. Initially for a period of five years, the network draws on a budget of EUR 20 million. This is made up of EUR 7.5 million of the participating organizations' own money and EUR 12.5 million from the state government.

The founding partners include the universities of Aachen, Bochum, Bonn, Dortmund, Duisburg-Essen, Düsseldorf, Cologne, Münster, Paderborn, and Siegen, as well as the German Aerospace Center (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, DLR), plus the research institutes of the Forschungszentrum Jülich and the Fraunhofer Gesellschaft. Responsible for the project coordination are Jülich and the University of Siegen, with its Rector Professor Dr. Holger Burckhart. In the medium term, an international board composed of representatives of science and business will support the process. »The basic researcher community in NRW as well as major industry players, universities, and non-university research centers are all pulling together to create ways of utilizing the vast opportunities of this field that will benefit everybody,« explains Burckhart.

At the University of Siegen, the MIQRO quantum computer project is playing a key role. The experimental physicist Professor Dr. Christof Wunderlich is in charge of the project. Together with Dr. Michael Johanning and experienced partners from industry, he also founded the start-up eleQtron in 2020. In future, this company will offer quantum computing calculations as a service. Another scientist developing quantum computers at the University of Siegen is nano-optics researcher Professor Dr. Mario Agio (see the article »Complex Computing with Quanta«, page 12).

Mehr Informationen / Find out more

📍 <http://qt.nrw.de/>



In Siegen forscht außerdem der Mathematiker Professor Dr. Mohamed Barakat daran, klassisches Computing und Quantencomputing in einer vereinheitlichten Sprache – der Kategorientheorie – zu formulieren. Professor Dr. Michael Möller aus der Informatik untersucht intensiv, die Möglichkeiten von Quantencomputern, effizient hochkomplexe Probleme, zum Beispiel im Bereich der Computer-Vision, zu lösen. Gleichzeitig entsteht auf dem Siegener Campus Adolf-Reichwein-Straße gerade das hochmoderne Forschungsgebäude INCYTE, in dem ab voraussichtlich 2024 WissenschaftlerInnen aus den Bereichen Nanoanalytik, Nanochemie und Cyber-physische Sensortechnologien forschen werden. Professor Dr. Peter Haring-Bolívar aus der Elektrotechnik treibt diesen Bau voran.

Quantentechnologien haben unseren Alltag bereits verändert und werden das auch künftig tun. Die fortschreitende Kontrolle einzelner Quantenteilchen rückt zunehmend weitere technologische Möglichkeiten in greifbare Nähe, die lange undenkbar schienen. Quantentechnologien sollen mithelfen, neue Antworten auf große Fragen und Herausforderungen unserer Zeit zu finden: etwa für komplexe Zusammenhänge des Klimawandels, den Schutz der Umwelt, bessere Verkehrsströme oder abhörsichere Kommunikation durch Quantenverschlüsselung, um zum Beispiel Risiken für kritische Infrastrukturen durch Cyber-Angriffe zu reduzieren.

Also in Siegen, the mathematician Professor Dr. Mohamed Barakat is working on formulating a unified language for classical computing and quantum computing. The term for this field is category theory. Computer scientist Professor Dr. Michael Möller is intensively studying the ability of quantum computers to efficiently solve high-complexity problems, e.g. in the field of computer vision. Currently the INCYTE, a state-of-the-art research building, is under construction on the University of Siegen's Adolf-Reichwein-Straße campus. After its completion, which is scheduled for 2024, it will be the research lab for scientists from the fields of nano-analytics, nano-chemistry, and cyber-physical sensor technology. Professor Dr. Peter Haring-Bolívar from the Electrical Engineering department is a driving force behind the construction project.

Quantum technologies have already changed our everyday lives, and they will continue to do so. Our increasing control over individual quantum particles is bringing technological capabilities into our grasp that were unthinkable until recently. We expect quantum technologies to help us find new answers to the big questions and challenges of our times. Just some examples are the complex interactions resulting from climate change, environmental protection, better traffic flows, and secure communication with quantum cryptography that will protect critical infrastructure from cyber attacks.

Jenseits der bekannten Physik?

Beyond the boundaries of
known physics?

Unsere Elementarteilchenphysikerinnen und -physiker erforschen im Center for Particle Physics Siegen (CPPS) die Welt jenseits der bekannten Physik. In den nächsten drei Artikeln stellen wir beispielhaft einige ihrer Forschungsfragen vor.

Our researchers of elementary particles at the Center for Particle Physics Siegen (CPPS) are exploring the world beyond the established boundaries of physics. The following three articles offer a glimpse into the fascinating questions which they are pursuing.



Foto/Photo Sascha Hüttenhain

Die Teilchenfänger

The Particle Catchers

Autor/Author Tim Schröder



Foto/Photo Daniel Dominguez / CERN

Manche Elementarteilchen sind bis heute kaum erforscht, weil man ihrer bislang nicht habhaft werden konnte. Dabei könnten sie helfen, das Standardmodell besser zu verstehen. Der Experimentalphysiker Professor Dr. Markus Cristinziani hat sich auf diese Unbekannten spezialisiert. Zusammen mit einem internationalen Team überarbeitet er derzeit einen großen Detektor am Forschungszentrum CERN in der Schweiz, um sie künftig genauer erforschen zu können.

Some elementary particles have barely been examined because it has so far been impossible to capture them. Yet, they're vital for a better understanding of the Standard Model. The experimental physicist Professor Dr. Markus Cristinziani specializes in these unknown phenomena. Together with an international team, he is currently further upgrading a large detector at the research center CERN in Switzerland so that he can get a firmer grasp on them.



Professor. Dr. Markus Cristinziani

Foto / Photo Sascha Hüttenhain

Hardly any other scientific discipline delves as far into the fundamentals of existence as particle physics. Where do we come from? What are we made of? What are the forces that keep everything together? Mankind has been pondering these fundamental questions for thousands of years. For the last 50 years, physics has provided a clear, although seemingly un spectacular answer. Its name is the Standard Model, and it states that everything in the universe consists of just a few types of elementary particles (see figure on page 45). But the Standard Model has its limits. As of yet, it doesn't fully explain all the phenomena observed in the universe.

»Viele erwarten, dass das Top-Quark aufgrund seiner großen Masse, besonders wichtig sein könnte, um Abweichungen vom Standardmodell aufzuspüren.«

Prof. Dr. Markus Cristinziani

Es gibt wohl kaum eine wissenschaftliche Disziplin, die so weit zu den Grundlagen des Seins vordringt wie die Teilchenphysik. Woher kommen wir? Woraus bestehen wir? Welches sind die Kräfte, die alles zusammenhalten? Diese fundamentalen Fragen stellt sich die Menschheit wohl schon seit tausenden von Jahren. Die Physik hat darauf seit gut 50 Jahren eine klare, wenn auch nüchterne Antwort: das Standardmodell, nach dem sich alles im Universum aus einigen wenigen Sorten von Elementarteilchen zusammensetzt (siehe die Abbildung auf Seite 45). Doch dieses theoretische Standardmodell hat seine klaren Grenzen: Bis heute lassen sich damit nicht alle Phänomene im Kosmos schlüssig erklären.

»Deshalb versuchen viele Fachleute weltweit – so wie wir hier in Siegen – mit Experimenten die korrekte Erweiterung des Standardmodells zu identifizieren«, sagt Prof. Dr. Markus Cristinziani, der die Arbeitsgruppe Experimentelle Teilchenphysik leitet. Manche Elementarteilchen sind bereits gut erforscht – etwa die Elektronen und Photonen. Doch bei ihnen konnten bislang keine Abweichungen zwischen dem Standardmodell und der Realität beobachtet werden. Markus Cristinziani und sein Team beschäftigen sich deshalb mit jenen Teilchen, die bislang weniger gut erforscht sind, weil man ihrer nur schwer habhaft werden kann – vor allem mit den Top-Quarks. »Vom Top-Quark wissen wir, dass es sehr viel Masse besitzt«, sagt Cristinziani. »Viele erwarten, dass das Top-Quark aufgrund seiner großen Masse besonders wichtig sein könnte, um Abweichungen vom Standardmodell aufzuspüren.« Zudem scheint das Top-Quark eng mit dem erst vor kurzer Zeit entdeckten Higgs-Teilchen verbunden zu sein, mit dem sich die Masse aller Elementarteilchen erklären lassen könnte.

»We know that the top quark has a very large mass. This large mass might provide a key to determining deviations from the Standard Model.«

Prof. Dr. Markus Cristinziani



Foto / Photo Sascha Hüttenhain

»That's why researchers around the world – including here in Siegen – are attempting to discover the correct extension of the Model,« says Professor Dr. Markus Cristinziani. He is the head of the experimental particle physics research group. Some elementary particles, such as electrons and photons, are well researched. Scientists have not been able to detect any discrepancies for these between the Standard Model and the real world. So Cristinziani and his team are working on particles that aren't well understood because they are highly elusive. Their main focus is top quarks. »We know that the top quark has a very large mass,« says Cristinziani. »This large mass of the top quark might provide a key to determining deviations from the Standard Model.« What's more, the top quark appears to be closely linked to the recently discovered Higgs particle, which could be used to explain the mass of all elementary particles.



Foto / Photo Maximilien Brice / CERN

Im Teilchenbeschleuniger »Large Hadron Collider« am Forschungszentrum CERN werden Protonen auf extrem hohe Energien beschleunigt, um sie dann wie Schrottschussmunition miteinander kollidieren zu lassen.

The Large Hadron Collider, a particle accelerator at the CERN research center, is used to accelerate extreme-energy protons and then collide them against one another like shotgun pellets.

Eine Lebenszeit von rund 10^{-25} Sekunden

Was die experimentelle Seite angeht, besteht das Problem darin, dass das Top-Quark ein extrem unstetes Wesen ist. Es existiert nur für den unvorstellbar kurzen Zeitraum von 10^{-25} Sekunden. Zudem entsteht es nur bei extremen Energien, die es auf der Erde eigentlich nicht gibt. Allerdings existiert eine Maschine, die in der Lage ist, derart hohe Energien zu erzeugen: der Teilchenbeschleuniger »Large Hadron Collider« am Forschungszentrum CERN in der Nähe von Genf. In ihm werden Protonen auf extrem hohe Energien beschleunigt, um sie dann wie Schrottschussmunition miteinander kollidieren zu lassen. Dabei verschmelzen die Elementarteilchen, aus denen die Protonen bestehen, miteinander; und durch die große freigeordnete Energie entstehen neue, auch sehr schwere Teilchen. Manchmal entstehen dabei für den Bruchteil einer Sekunde auch Top-Quarks, die sofort wieder zu Bottom-Quarks (b-Quarks) zerfallen. »Die b-Quarks sind für uns besonders wichtig, weil wir nur mit ihrer Hilfe die Top-Quarks nachweisen können – die Top-Quarks sind dafür einfach zu kurzlebig.«

A lifetime of 10^{-25} seconds

What makes experiments on the top quark so difficult is its extremely short lifetime. It only exists for an unimaginably brief period of 10^{-25} seconds. And it only occurs at extreme energies which don't naturally occur on Earth. However, there is a machine capable of generating these huge energies. It is the Large Hadron Collider, a particle accelerator at the CERN research center near Geneva. In the collider, protons are accelerated to very high energies and then smashed together like shotgun pellets. During collision, the elementary particles that make up the protons merge, and the massive energy released generates new, also very heavy particles. Sometimes, this produces top quarks for a fraction of a second before they decay into bottom quarks (b quarks). »B quarks are especially important for us because they are the only way we can prove the existence of top quarks. Top quarks are simply too short-lived.«

In 2011, a highly sensitive particle detector named ATLAS went into operation at CERN. It can detect b quarks. The problem is that top quarks only occur extremely rarely. Therefore, experimental physicists have not been able to observe many top quarks and top quark decays so far. »That's why we know so little about them.«

Am CERN wurde bereits vor mehr als zehn Jahren ein sehr empfindlicher Teilchendetektor mit dem Namen ATLAS in Betrieb genommen. Er kann b-Quarks wahrnehmen. Das Problem: Die Top-Quarks treten extrem selten auf. Daher haben die Experimental-Physiker bislang nicht allzu viele Top-Quarks und Top-Quark-Zerfälle beobachten können. »Deshalb wissen wir erst recht wenig über sie.«

Detektormodule aus der Siegener Hightech-Werkstatt

Daher hat das ATLAS-Team, an dem insgesamt rund 3.000 Forscherinnen und Forscher aus 41 Ländern beteiligt sind, vor einigen Jahren beschlossen, den ATLAS-Detektor noch einmal gründlich zu überarbeiten. Die Arbeit ist gewaltig, weil der Detektor ein einzigartiges Hightech-Werkzeug ist, dessen Komponenten extra angefertigt werden müssen. Die Größe des Detektors, der die Teilchen nachweist, ist unglaublich: Er ist 25 Meter hoch und 46 Meter lang. Das ultra-präzise Herzstück ist der Pixeldetektor, der die b-Quarks aufspürt. Dieser Detektor soll jetzt erweitert und verfeinert werden. Künftig wird er ganze 13 Quadratmeter groß sein. Zusammengesetzt wird er wie ein Puzzle aus rund 10.000 kleinen Modulen, auf denen hochempfindliche Pixelsensoren sitzen, die die Spuren der extrem kleinen Elementarteilchen wahrnehmen können.



Foto / Photo Julia Cristinziani

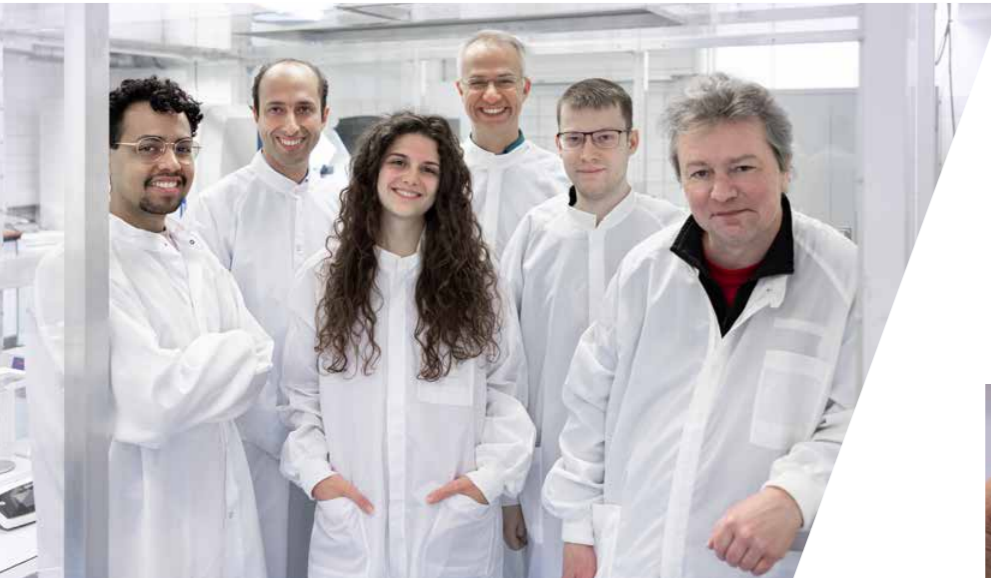
Detector modules from Siegen's hi-tech workshop

For this reason, the ATLAS team, consisting of some 3,000 researchers from 41 countries, decided a few years ago to thoroughly upgrade the ATLAS detector. It's an enormous job because the detector is a unique hi-tech machine with components that need to be manufactured specially for the upgrade. The size of the detector providing evidence of the particles is incredible: It is 25 meters tall and 46 meters long. Its ultra-precise heart is the pixel detector that detects the b quarks. This part of the detector will be expanded and upgraded. After the upgrade, the ATLAS pixel detector will measure a huge 13 square meters. It will be assembled like a jigsaw puzzle from around 10,000 small modules carrying ultra-sensitive pixel sensors capable of detecting the traces of the tiny elementary particles.

The chip technology required for this isn't available off the peg. Instead, the ATLAS partners are sharing development and production work between each other. It will take years to produce the pixel modules, which each measure only about four centimeters square. Cristinziani points out that the University of Siegen is ideally placed for this work, with enthusiastic, talented students and experts as well as a state-of-the-art electronics workshop that supports the assembly and testing of the modules. Not only the chips, but also the read-out electronics that process the signals are of paramount importance. »We'll deliver 200 of these small pixel modules«, he says. At CERN, the modules from all the partners will be assembled to make the large new detector. The first measurements should be possible in 2029. The new detector will be so sensitive that it will be able to detect ten times more top quarks or b quarks emitted when the top quarks decay. »We hope to gain a lot of new information about the properties of top quarks and important insights for elementary particle physics itself,« says Markus Cristinziani.

Professor Markus Cristinziani vor dem ATLAS-Teilchendetektor am CERN. Der Pixeldetektor darin soll jetzt erweitert und verfeinert werden.

Professor Markus Cristinziani standing in front of the ATLAS particle detector at CERN. The pixel detector within ATLAS is now scheduled to be refined and expanded.



Gruppenmitglieder im Reinraum. Von links nach rechts: Gabriel Gomes, Dr. Qader Dorosti, Beatrice Cervato, Prof. Dr. Markus Cristinziani, Nico Malinowski und Dr. Alexey Petrukhin

Group members in the clean-room. From left to right: Gabriel Gomes, Dr. Qader Dorosti, Beatrice Cervato, Prof. Dr. Markus Cristinziani, Nico Malinowski and Dr. Alexey Petrukhin

Foto / Photo Sascha Hüttenhain



Die visuelle Inspektion des ITk-Pixelmoduls unter dem Mikroskop ist ein sehr wichtiger Teil des Montageverfahrens.

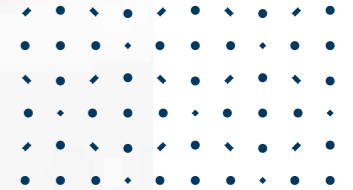
Visual inspection of the ITk pixel module under the microscope is a very important part of the module assembly procedure.

Foto / Photo Sascha Hüttenhain

Die dafür benötigte Chip-Technologie gibt es nicht von der Stange. Vielmehr haben sich die ATLAS-Partner die jahrelange Entwicklung und die Produktion der nur etwa zwei mal zwei Zentimeter großen Pixelmodule aufgeteilt. Hier in Siegen gebe es begeisterte und talentierte Studentinnen und Studenten und Experten und eine erstklassige Elektronik-Werkstatt, die das Zusammenstellen und Testen dieser speziellen Teile unterstützt – neben dem Chip gehöre auch die Auswerteelektronik dazu, die das Signal weiterverarbeite, sagt Markus Cristinziani. »200 dieser kleinen Pixelmodule werden wir liefern.« Am CERN werden die Module aller Partner Stück für Stück zum großen neuen Detektor zusammengesetzt. Im Jahr 2029 sollen dann die ersten Messungen möglich sein. Der neue Detektor wird so empfindlich sein, dass er zehnmal mehr Top-Quarks beziehungsweise b-Quarks nachweisen kann, die beim Zerfall der Top-Quarks frei werden. »Wir versprechen uns davon viele neue Informationen über die Eigenschaften der Top-Quarks und für die Elementarteilchen-Physik insgesamt«, sagt Markus Cristinziani.

Sein Interesse gilt unter anderem dem sogenannten 4-Top-Quark-Zustand. Dabei handelt es sich um das seltene Phänomen, dass bei einer Kollision der Protonen zeitgleich vier Top-Quarks entstehen. Da diese insgesamt sehr schwer sind, könnte die Messung durch neue, noch nicht entdeckte schwere Teilchen oder Kräfte beeinflusst werden – und dazu beitragen, das Standardmodell besser zu verstehen. Diese 4-Top-Quark-Zustände wurden bislang noch nie eindeutig beobachtet, weil der bisherige ATLAS-Detektor dafür zu unempfindlich ist. »Aus dem Standardmodell können wir aber ableiten, dass es 4-Top-Quark-Ereignisse tatsächlich geben muss«, sagt Cristinziani. Ab dem Jahr 2029 sollen sie dann mit dem neuen Detektor nachgewiesen und genau untersucht werden.

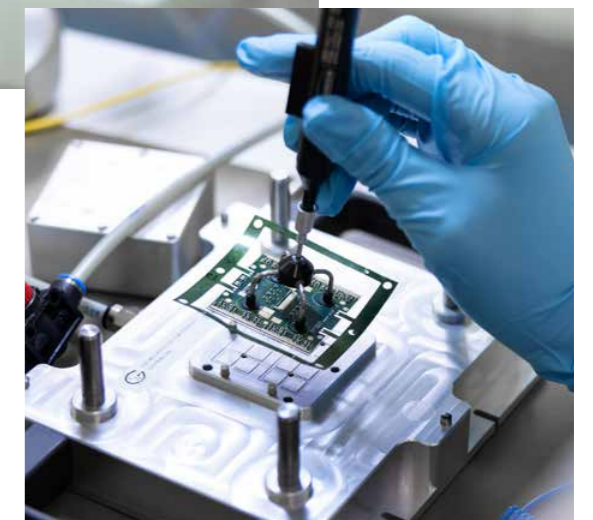
Among other things, he is interested in the four-top-quark final state. This is the rare phenomenon when four top quarks are produced simultaneously from a collision of the protons. Because top quarks are extremely heavy, it is possible that measurements could be influenced by new, as yet unknown heavy particles or forces. This would contribute to a better understanding of the Standard Model. Such four-top-quark states have so far not been unequivocally observed because the current ATLAS detector is not sensitive enough. »But the Standard Model predicts that four-top-quark events must exist,« says Cristinziani. Starting in 2029, scientists hope to use the new detector to provide evidence and study the phenomenon in depth.



Ein ITk-Pixelmodul wird auf dem Montagewerkzeug positioniert. Jedes Pixelmodul besteht aus zwei verschiedenen Teilen: dem Rohmodul und dem Modul-Flex. Im Reinraum fügen die Physikerinnen und Physiker die beiden Teile mit einem speziellen Klebstoff und sonderangefertigte Werkzeugen zusammen.

An ITk pixel module is placed on the assembly tool. Each pixel module is composed of two different parts: the bare-module and the module-flex. In the clean-room, the physicists assemble the two parts using a special glue and sophisticated tools.

Fotos / Photos Sascha Hüttenhain





Ein ITk-Pixelmodul auf dem Koordinatenmessgerät während des Messvorgangs. Die Parameter müssen den Spezifikationen mit einer Genauigkeit im μm -Bereich entsprechen.

An ITk pixel module on the coordinate measuring machine during the metrology procedure. The parameters need to fit to the specifications at the μm precision level.

Foto/Photo Sascha Hüttenhain

Algorithmen für die Quark-Detektion

Voraussetzung dafür ist, dass die Computer, die die Signale der Teilchen auswerten, Zerfalls-Ereignisse überhaupt erkennen können. Darauf muss die Software zunächst mit maschinellen Lernverfahren trainiert werden. Das ist wie bei einem Computer, der zunächst lernen muss, wie Katzen aussehen, um später auf Fotos die Katzen automatisch erkennen zu können. Cristinzianis Doktorandin Katharina Voß arbeitet derzeit daran, aufgrund von theoretischen Überlegungen den 4-Quark-Zustand zu simulieren, um die Algorithmen zu trainieren. Anschließend wird sie den 4-Quark-Zustand genauer analysieren. Spätestens 2029 sollen die Algorithmen dann auch am CERN zum Einsatz kommen, wenn die ersten Elementarteilchen auf den neuen ATLAS-Detektor prasseln.



Katharina Voß ist eine Doktorandin in der Arbeitsgruppe von Prof. Cristinziani und wird durch ein Stipendium des House of Young Talents unterstützt.

Katharina Voß is a doctoral candidate in the working group under Prof. Cristinziani, with financial support through a House of Young Talents grant.

Foto/Photo Sascha Hüttenhain

Algorithms for quark detection

Of course, this requires that the computers evaluating the signals from the particles are capable of recognizing decay events. First, the software must be trained using machine-learning methods. It's like teaching a computer what cats look like before it can automatically recognize cats in photos. Cristinziani's PhD student Katharina Voß is currently working on simulating the four-quark state on the basis of theoretical considerations in order to train the algorithms. Then she will analyze the four-quark state in more depth. The algorithms should be applied at CERN at the latest in 2029, when the first elementary particles hit the new ATLAS detector. Cristinziani hopes that, with these experiments, the international team will be able to improve the Standard Model or maybe even discover a new theory. »Right now, we don't have the technology we need. We've never had the chance to take a closer look at the four-quark state or other related phenomena. I can't wait to explore a whole new field!« In late 2020, Markus Cristinziani transferred from the University of Bonn to Siegen as a Heisenberg Professor. He succeeded Professor Dr. Peter Buchholz, who was involved from the start in the ATLAS detector and who established the hi-tech labs in Siegen. As Cristinziani says, »Now we can take the fantastic work he did to the next level.« The labs will be upgraded for this purpose by the middle of 2023.

Cristinzianis Hoffnung ist, dass das internationale Team am Ende tatsächlich das Standardmodell verbessern oder sogar eine neue Theorie entdecken kann. »Bislang fehlten uns die technischen Mittel. Wir haben noch nie genauer in den 4-Top-Quark-Zustand oder andere Phänomene hineinschauen können. Künftig beackern wir ein ganz neues Feld.« Markus Cristinziani ist erst Ende 2020 als Heisenberg-Professor von der Universität Bonn nach Siegen gekommen, um die Nachfolge von Professor Dr. Peter Buchholz anzutreten, der von Anfang an am ATLAS-Detektor beteiligt war und in Siegen die Hightech-Labore aufgebaut hat. Cristinziani: »An diese großartige Arbeit können wir jetzt anknüpfen.« Dafür werden die Labore bis spätestens Mitte 2023 auf Vordermann gebracht.

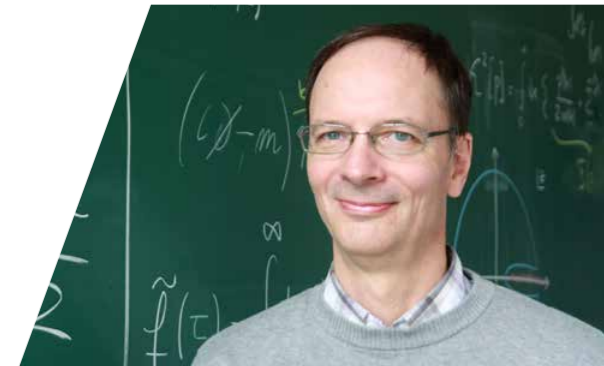
Markus Cristinziani leitet das Center of Particle Physics der Universität Siegen, zu dem etwa 60 Physikerinnen und Physiker gehören, die sich mit experimenteller und theoretischer Physik beschäftigen. Als Experimentalphysiker schätzt er vor allem auch die Nähe zu den theoretischen Teilchenphysikern gleich nebenan, deren Arbeiten seine Forschung sehr gut ergänzen. »Dass wir ein solches Zentrum direkt unter einem Hut an unserem Emmy-Noether-Campus haben, ist schon einzigartig gut.«



Professor Ivor Fleck arbeitet mit Prof. Cristinziani auf dem Gebiet der Top-Quark-Physik und im CPPS eng zusammen. Ein weiterer Forschungsschwerpunkt ist die Entwicklung von Detektoren für Experimente der Teilchenphysik und medizinische Anwendungen.

Professor Ivor Fleck works closely with Prof. Cristinziani in the field of top quark physics and plays an active role at CPPS. Another focus of his research: the development of detectors for particle physics experiments and medical applications.

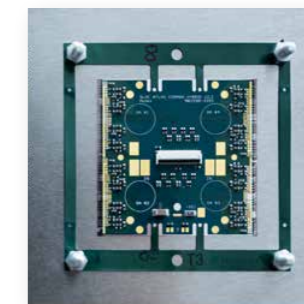
Foto/Photo Sascha Hüttenhain



Professor Markus Risse untersucht kosmische Strahlung bei höchsten Energien und ist am Pierre-Auger-Observatorium (Argentinien) beteiligt.

Professor Markus Risse is exploring extreme-energy cosmic rays and is a contributor at the Pierre Auger Observatory (Argentina).

Foto/Photo privat



ITk-Pixelmodul, wie es im Upgrade 2026 zum Einsatz kommen wird

ITk pixel module of the same type as will be used for the 2026 upgrade

Foto/Photo Sascha Hüttenhain

Markus Cristinziani is Head of the Center of Particle Physics of the University of Siegen. The center brings together some 60 physicists who work on experimental and theoretical physics. As an experimental physicist himself, he appreciates the closeness to the theoretical physicists next door because their work ideally complements his own research. »It's a unique, massive advantage that we have a center like this uniting different researchers on our Emmy-Noether campus.«

Die dritte Teilchen- Generation

Third-
Generation
Elementary
Particles

Autor / Author Frank Frick

Fotos / Photos Sascha Hüttenhain

Es ist die wohl bedeutendste, am besten überprüfte Theorie in der Menschheitsgeschichte und sie beschreibt die grundlegenden Bausteine der Materie sowie die Kräfte zwischen ihnen: das Standardmodell der Elementarteilchenphysik. Siegener Forschende verbessern laufend die Berechnungen, die sich aus diesem Modell ergeben, um so selbst winzige Abweichungen zu experimentellen Daten aufzuspüren. Denn das könnten Hinweise auf eine Welt jenseits der bekannten Physik sein.

It's probably the most important and most tested theory in the history of science, and describes the basic building blocks of matter and the forces between them: the Standard Model of Elementary Particle Physics. Researchers in Siegen are continually improving the calculations that result from the Standard Model in order to identify even the tiniest deviations from experimental data. Why? Because this could provide indications of a world beyond known physics.

Wer im Internet

ein Geschenk für Physik-Studierende oder Physiklehrer sucht, findet T-Shirts mit einem Aufdruck wie »Niemand ist perfekt. Aber als Physiker ist man verdammt nah dran«. Oder solche, auf denen gut leserlich die Formel des Standardmodells prangt. Es ist verblüffend: Mathematisch lassen sich alle Eigenschaften der fundamentalen Teilchen und ihrer Wechselwirkungen tatsächlich in vier knappe Zeilen fassen. Worte braucht es sehr viel mehr.

Das Standardmodell kennt als fundamentale Teilchen die Quarks. Aber hat man nicht in der Schule gelernt, dass sich unsere stoffliche Welt aus Atomen zusammensetzt? Und dass ein Atom aus einem Atomkern und Elektronen besteht, wobei der Atomkern wiederum aus Neutronen und Protonen aufgebaut ist? Wo bleiben da die Quarks?

If you go online

looking for a gift for a physics student, you'll find T-shirts printed with slogans such as »Nobody's perfect. But physicists come pretty damn close«. Other T-shirts are printed with the formula of the Standard Model. It's incredible that, mathematically, all the characteristics of the fundamental particles and their interactions can be described in four short lines. Putting it into words takes a lot more.

The Standard Model defines quarks as the fundamental particles. But didn't we learn in school that our material world consists of atoms? And that an atom consists of a nucleus and electrons, with the nucleus itself consisting of neutrons and protons? So where are the quarks?

Diese Lücke zwischen Schulwissen und seinem Fach zu schließen, ist Professor Dr. Thomas Mannel, theoretischer Teilchenphysiker der Universität Siegen, gewohnt: »Die Neutronen und die Protonen im Atomkern bestehen aus jeweils drei Quarks: Die Neutronen aus einem Up- und zwei Down-Quarks, die Protonen aus zwei Up- und einem Down-Quark.« Somit scheint die uns bekannte sichtbare Materie aus Up- und Down-Quarks sowie Elektronen zu bestehen.

Die schwersten Quarks im Blick

Doch das ist laut Standardmodell noch längst nicht alles (siehe Schaubild auf der nächsten Seite). Tatsächlich existieren vom Up- und vom Down-Quark sowie vom Elektron, die als Teilchen der ersten Generation bezeichnet werden, für Sekundenbruchteile schwerere Kopien. Und von diesen Teilchen der zweiten Generationen noch einmal schwerere Kopien. »Wir in Siegen beschäftigen uns speziell mit dieser dritten Teilchen-Generation«, sagt Mannel. »Wir versuchen durch immer präzisere Berechnungen herauszufinden, ob das Standardmodell auch für diese Generation streng gültig ist.«

Die zwei Quark-Sorten der dritten Generation tragen die Namen top und bottom. Sie sind genauso wie die Quarks der zweiten Generation instabil und zerfallen in leichtere Quarks. Die Quarks der zweiten und dritten Generation erscheinen zunächst wie unnötige Vervielfältigungen der Natur – von denen niemand genau weiß, warum es sie gibt. Doch das Standardmodell beschreibt ihre Existenz. Und an riesigen Beschleunigern wie dem Large Hadron Collider (LHC) am Forschungszentrum CERN in Genf, in dem Protonen annähernd mit Lichtgeschwindigkeit aufeinanderprallen, konnten sie – meist auf indirekte Weise – als Produkte dieser Crashes nachgewiesen werden. Indirekt deshalb, weil einzelne, freie Quarks nicht existieren. So wie die Up- und Down-Quarks als Teilchen der ersten Generation etwa in den Protonen oder den Neutronen eingesperrt sind, so kommen auch die schwereren Quarks mit Ausnahme des Top-Quarks stets in Bindungszuständen vor. Das Top-Quark und viele andere beim Crash erzeugte Teilchen wiederum zerfallen so schnell, dass die Forschenden deren Eigenschaften anhand der Zerfallsprodukte rekonstruieren müssen.

Professor Dr. Thomas Mannel, a theoretical particle physicist at the University of Siegen, is used to closing this gap between the physics taught in school and his discipline: »Each neutron and proton in the nucleus consists of three quarks. The neutrons have one up quark and two down quarks, and the protons have two up quarks and one down quark.« So the visible matter known to us appears to consist of up quarks and down quarks plus electrons.

A look at the heaviest quarks

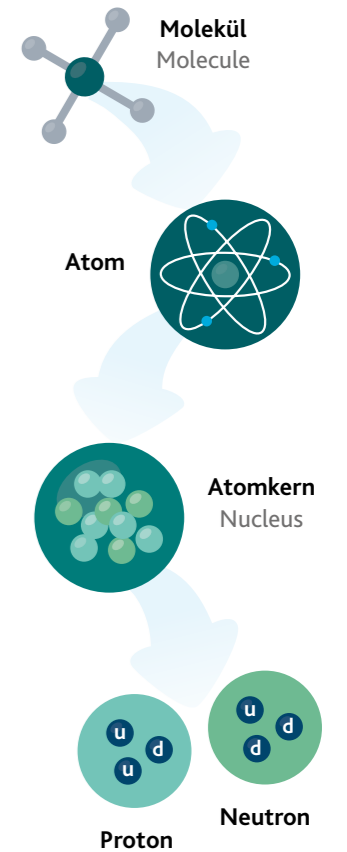
But the Standard Model shows that this isn't all by far (see the model on the next page). In fact, the up quarks, down quarks and electrons, which are termed first-generation particles, have heavier copies that exist for fractions of a second. And even heavier copies of these second-generation particles also exist. »In Siegen, we're specifically studying this third generation,« says Mannel. »With ever more precise calculations, we're trying to find out whether the Standard Model is also absolutely valid for this generation.«



Professor Dr. Thomas Mannel

Das Standardmodell The Standard Model

	I Leicht Light	II Mittel Medium	III Schwer Heavy		
Quarks	u Up	c Charm	t Top	Austauschteilchen Gauge Bosons	
	d Down	s Strange	b Bottom		
	e Electron	μ Muon	τ Tau		Z Z Boson
	Leptonen Leptons	ν _e Electron Neutrino	ν _μ Muon Neutrino		ν _τ Tau Neutrino
			g Gluon	H Higgs	
			γ Photon		



Vor rund 120 Jahren galten Atome noch als unteilbare Bausteine der Materie. Heute weiß man, dass Atome aus Elektronen und Atomkernen bestehen. Diese Kerne enthalten Neutronen und Protonen. Dringt man noch weiter ins Innere der Materie vor, zeigt sich, dass Neutronen und Protonen aus Up- und Down-Quarks aufgebaut sind. Die Elektronen gehören zu der Familie der Leptonen.

Around 120 years ago, atoms were still considered the smallest components of matter. Today we know that atoms consist of electrons and nuclei. The nuclei contain neutrons and protons. If you delve deeper, you find that neutrons and protons consist of up quarks and down quarks. Electrons belong to the lepton family.

Laut Standardmodell gibt es sechs verschiedene Sorten Quarks und ebenso viele Sorten Leptonen. Die Einordnung der Generationen (I, II, III) erfolgt nach der Masse der Teilchen.

The Standard Model states that there are six different types of quarks and an equal amount of types of leptons. The particles are sorted into three generations (I, II, III) according to their mass.

Die Austauschteilchen sind sozusagen der Klebstoff der Natur. Beispielsweise kleben Gluonen die Quarks aneinander und sorgen so dafür, dass sie etwa in einem Proton oder einem Neutron zusammenbleiben.

Gauge bosons are »nature's glue«. For example, gluons bind and keep the quarks together, such as in a proton or a neutron.





Jahrzehntelang stimmten alle theoretischen Berechnungen auf Basis des Standardmodells mit den experimentellen Daten überein. Als Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler 2012 am CERN das sogenannte Higgs-Teilchen nachweisen konnten, war dies ein weiterer Triumph des Modells, denn auf seiner Grundlage hatten Physiker schon in den 1960er Jahren die Existenz dieses Teilchens vorhergesagt. Es gehört zu dem Mechanismus, der die Masse von Elementarteilchen erklärt.

Doch seit rund zehn Jahren findet man Abweichungen zwischen Berechnungen und Experimenten. »Die Spezialisierung hier in Siegen auf die dritte Generation hat etwas damit zu tun, dass deren Teilchen so schwer sind. Deshalb weisen sie die stärkste Kopplung an das masseverleihende Higgs-Teilchen auf und haben ganz spezielle Eigenschaften«, erläutert Mannel. »Tatsächlich treten hier die beobachteten, scheinbaren Abweichungen zwischen theoretischen Berechnungen und Messergebnissen vorzugsweise auf.« Das Thema sei daher »aktuell der Renner in der Teilchenphysik«.

The two types of quark in the third generation are named top and bottom quarks. Just like second-generation quarks, they are unstable and decay into lighter quarks. At first sight, the second- and third-generation quarks appear to be unnecessary copies – and it looks like a mystery what they are for. But the Standard Model describes their existence. And more evidence has been revealed in experiments using the Large Hadron Collider (LHC) at the CERN research center in Geneva. In the LHC, protons are accelerated and collided with each other at near the speed of light, and the heavy quarks have been identified as products of these crashes, although mainly indirectly. The evidence is only indirect because individual, free quarks don't exist. In the same way that first-generation up and down quarks are trapped in the protons and neutrons, the heavier quarks (except the top quark) always occur in bound states. The top quark and many other particles emitted during collisions decay so quickly that researchers have to reconstruct their properties based on the decay products.

For several decades, theoretical calculations based on the Standard Model matched the experimental data. In 2012, when scientists at CERN succeeded in observing the Higgs particle, this was a further triumph of the Standard Model, because physicists back in the 1960s had predicted this particle's existence based on its predictions. It is the central part of the mechanism that explains the masses of elementary particles.

However, over the past ten years, researchers have been finding disparities between calculations and experiments. »One of the reasons we're specializing in Siegen on the third generation is that these particles are so heavy. That's why they display the strongest coupling to the mass-generating Higgs particle and have very special properties,« explains Mannel. »This is where we're most likely to observe apparent deviations between theoretical calculations and measured results. It's what makes this today's hottest topic in particle physics.«

Neue Physik oder unpräzise Berechnung?

»Die Abweichungen sind allerdings nicht groß genug, um definitiv sicher sein zu können, ob wirklich etwas dahintersteckt, das nur mit der Existenz bisher unbekannter Teilchen und Kräfte zu erklären ist«, sagt Mannels Kollege Professor Dr. Alexander Lenz. Denn alle Werte aus den Berechnungen der ElementarteilchenphysikerInnen sind – ebenso wie Messergebnisse – mit einer gewissen Unsicherheit behaftet. WissenschaftlerInnen verwenden dabei den Begriff der Unsicherheit auf eine spezielle Weise: Die Unsicherheit grenzt einen Wertebereich ein, in dem mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit der wahre Wert liegt. Mannel, Lenz und die anderen Theoretiker des Transregio-Sonderforschungsbereich (TTR-SFB) »Phänomenologische Elementarteilchenphysik nach der Higgs-Entdeckung« der Deutschen Forschungsgemeinschaft haben es sich daher zur Aufgabe gemacht, die Unsicherheiten bei den berechneten Werten zu verringern und somit das Vertrauen in die Ergebnisse zu stärken. Neben den Siegener Forschenden gehörten dem TTR-SFB TeilchenphysikerInnen des Karlsruher Instituts für Technologie und der RWTH Aachen an.



Professor Dr. Alexander Lenz

The two largest projects at the Center for Particle Physics Siegen (CPPS)

SFB/TRR 257 »Particle Physics Phenomenology after the Higgs Discovery«

- Funding grant: € 3.80 million
- Duration: 2019-2022
- Partners: Karlsruhe Institute of Technology and RWTH Aachen University

BMBF-Verbundprojekt 05H2021 (ErUM-FSP T02)

- Operating the pixel detector and physics of the heavy quarks at ATLAS (2021-2024)
- Further development of the ATLAS experiments for use at HL-LHC: Development and production of modules for the pixel detector (2021-2024)
- Funding grant: € 2.33 million (sub-project in Siegen within the larger project with the German ATLAS groups)

New physics or calculation errors?

»But the deviations aren't large enough for us to be certain that they indicate something that can only be explained by the existence of particles and forces we don't yet know,« says Mannel's colleague Professor Dr. Alexander Lenz. The picture is clouded because all values from the calculations and all measured results come with a degree of uncertainty. The term 'uncertainty' has a special meaning for scientists: It describes a range of values within which, to a very large degree of certainty, the true value lies. Mannel, Lenz and their colleagues in the transregional DFG collaborative research center (CRC TRR 257) on »Particle Physics Phenomenology after the Higgs Discovery« funded by the Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) are therefore focusing on reducing the uncertainties in the calculated values. This will, in turn, increase confidence in the true nature of these deviations. Also involved in the CRC are particle physicists from the Karlsruhe Institute of Technology and the RWTH Aachen.

For example, Lenz is examining the decay of the B+ and Bd mesons. Mesons consist of a quark and an antiquark. For B+ mesons, this is an anti-bottom quark and an up quark, while Bd mesons are made up of an anti-bottom quark and a down quark. An antiquark has the same mass as the corresponding quark, but exactly the opposite electrical charge.

Die beiden größten Projekte im Center for Particle Physics Siegen (CPPS)

SFB/TRR 257 »Particle Physics Phenomenology after the Higgs Discovery«

- Fördersumme: 3,80 Mio. Euro
- Laufzeit: 2019-2022
- Partner: Karlsruher Institut für Technologie und die RWTH Aachen

BMBF-Verbundprojekt 05H2021 (ErUM-FSP T02)

- Betrieb des Pixeldetektors und Physik schwerer Quarks bei ATLAS (2021-2024)
- Fortentwicklung des ATLAS-Experiments zum Einsatz am HL-LHC: Modulentwicklung und -produktion für den Pixeldetektor (2021-2024)
- Fördersumme: 2,33 Mio. Euro (Teilprojekt in Siegen innerhalb eines Großprojektes mit den deutschen ATLAS-Gruppen)

»Wenn mit dem Standardmodell irgendwas nicht stimmen sollte, dann braucht man etwas anderes. Doch solche Alternativen zu konstruieren ist alles andere als einfach, weil es eben auch jede Menge Daten gibt, die extrem genau mit dem Standardmodell übereinstimmen.«

Prof. Dr. Thomas Mannel

Beispielsweise hat sich Alexander Lenz mit dem Zerfall des B^{+} - und des B_d -Mesons beschäftigt. Mesonen bestehen stets aus einem Quark und einem Antiquark, im Falle des B^{+} -Mesons aus einem Anti-bottom-Quark und einem Up-Quark, im Falle des B_d -Mesons aus einem Anti-bottom-Quark und einem Down-Quark. Ein Antiquark hat die gleiche Masse wie das entsprechende Quark, trägt aber eine genau entgegengesetzte elektrische Ladung.

Lenz hat Methoden aus der sogenannten Quantenfeldtheorie verwendet und errechnet, dass das B^{+} -Meson 1,080-mal länger existiert als das B_d -Meson, bevor es zerfällt. Wobei es um »Lebensdauern« im Bereich von 0,000 000 000 001 Sekunden (Pikosekunden) geht. Aufgrund der Unsicherheit bei der Berechnung könnte der wahre Wert zwischen 1,060 und 1,100 liegen.

Andererseits liefern zahllose Messungen an verschiedenen Beschleunigern eine 1,072- bis 1,080-fach längere Dauer der Existenz. »Der berechnete Wert kommt dem so nahe, dass die Übereinstimmung als imposante Bestätigung des Standardmodells angesehen wird«, so Lenz. »Alternative Theorien, die beispielsweise Werte von 1,200 voraussagen, liegen dagegen so weit außerhalb des experimentell ermittelten Wertintervalls, dass sie falsch sein müssen.«

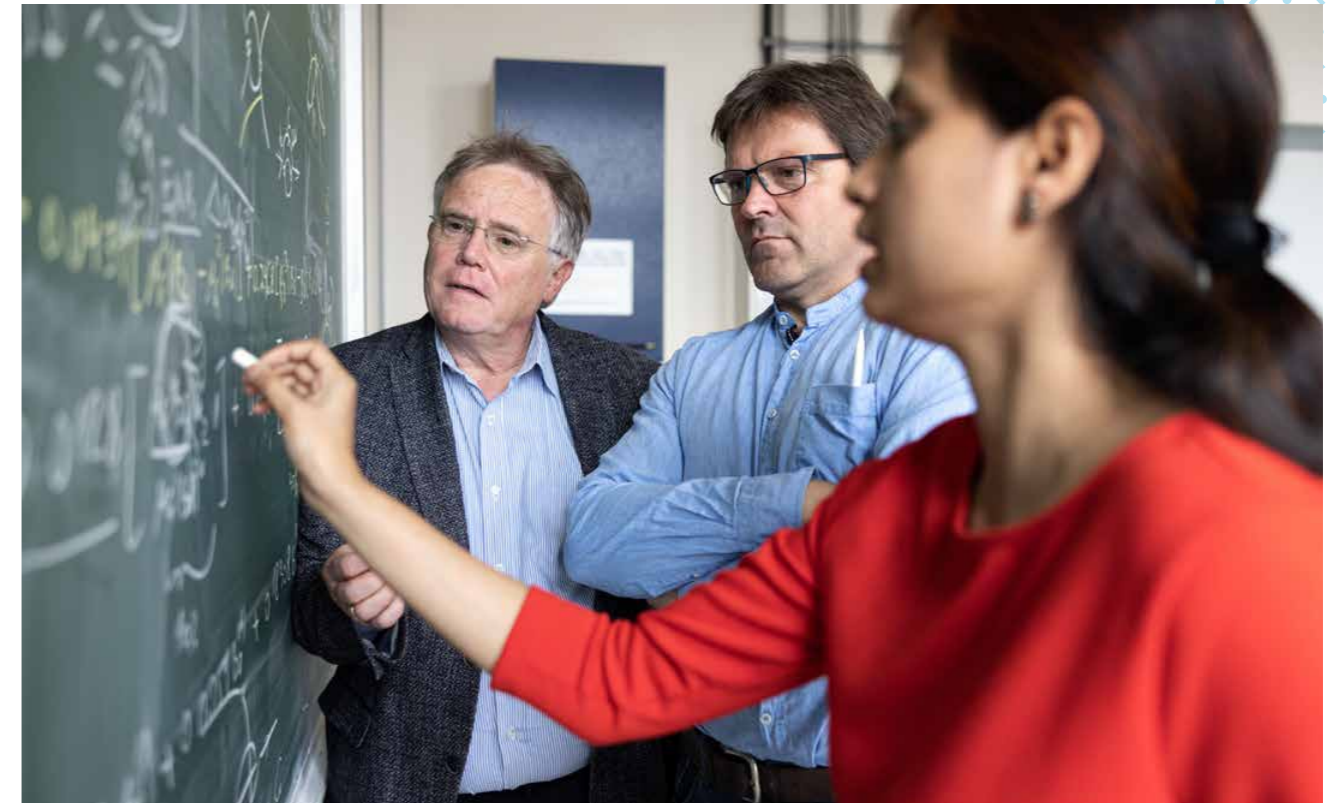
Lenz has applied quantum field theory methods and calculated that the B^{+} meson exists for a period 1,080 times longer than the B_d meson before it decays. However, these »lifetimes« are in the order of 0.000 000 000 001 seconds (picoseconds). Due to the intrinsic uncertainty in the calculation, the true value lies between 1.060 and 1.100.

Numerous measurements at different accelerators indicate lifetimes that are 1.072 to 1.080 times longer. »The calculated value overlaps with that and this is considered an impressive confirmation of the Standard Model« says Lenz. »There are alternative theories that predict values of e.g. 1.200. This is so far out of the value range determined in experiments that they must be wrong.«

Communication between theory and experiment

This example demonstrates that the only way we can finally determine whether and to what extent we need to alter or extend the Standard Model is by reducing the uncertainties via joint efforts by theoretical and experimental physicists. For this reason, the theoretical researchers at the Center of Particle Physics Siegen (CPPS) are in constant communication with their colleagues in experimental physics worldwide.

However, the scientists in Siegen are not only working on ever-preciser calculations, but also seeking to develop alternative models: »If there's something wrong with the Standard Model, we'll need something else. But developing an alternative is incredibly difficult because there's so much data that matches the Standard Model extremely precisely,« says Mannel.



Professor Thomas Mannel und Professor Alexander Lenz mit Nachwuchsgruppenleiterin Dr. Rusa Mandal (v.l.). Sie erforscht die Beschaffenheit des Universums (siehe Interview ab Seite 51).

Professor Thomas Mannel and Professor Alexander Lenz with junior research group leader Dr. Rusa Mandal (left to right). She is researching the nature of the Universe (see interview starting on page 51).

Austausch zwischen Theorie und Experiment

Das Beispiel zeigt, dass nur die Verringerung der Unsicherheit und die gemeinsame Anstrengung von TheoretikerInnen und ExperimentatorInnen letztlich endgültigen Aufschluss darüber geben können, in welchem Ausmaß das Standardmodell verändert oder erweitert werden muss. Die Siegener TheoretikerInnen stehen daher im Center of Particle Physics Siegen (CPPS) in ständigem wissenschaftlichem Austausch mit ihren experimentell arbeitenden KollegInnen.

Die Siegener TheoretikerInnen arbeiten aber nicht nur an immer präziseren Rechnungen, sondern sie gehen bereits einen Schritt weiter: Sie versuchen, alternative Modelle zu entwickeln. »Wenn mit dem Standardmodell irgendwas nicht stimmen sollte, dann braucht man etwas anderes. Doch solche Alternativen zu konstruieren ist alles andere als einfach, weil es eben auch jede Menge Daten gibt, die extrem genau mit dem Standardmodell übereinstimmen«, sagt Mannel.

»If there's something wrong with the Standard Model, we'll need something else. But developing an alternative is incredibly difficult because there's so much data that matches the Standard Model extremely precisely.«

Prof. Dr. Thomas Mannel

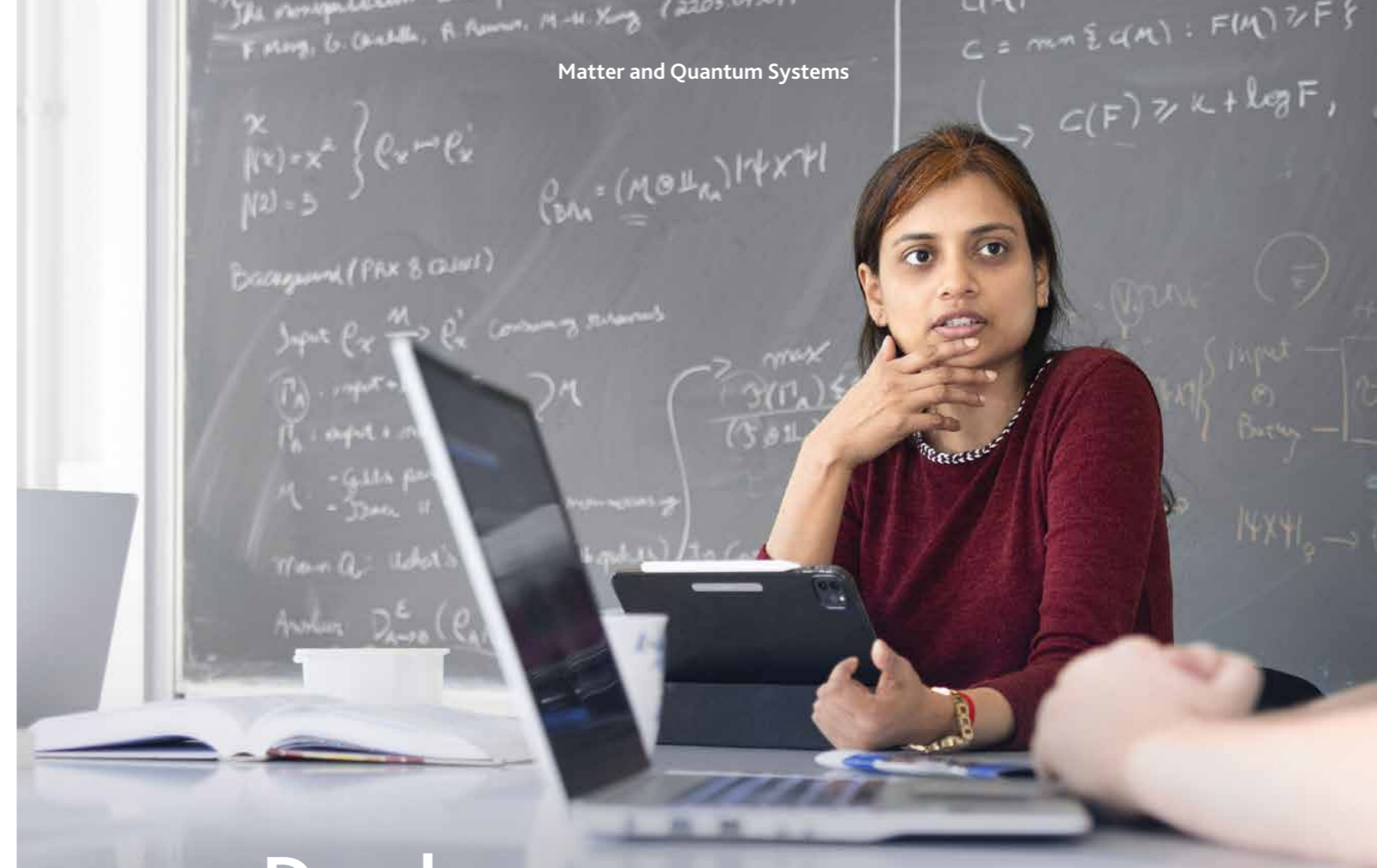


Die ElementarteilchenphysikerInnen weltweit suchen angestrengt nach neuen Modellen, weil das Standardmodell keine Erklärungen für bestimmte Phänomene im Universum liefert. Neben dem Rätsel um die Dunkle Materie (siehe auch »Mit Mathematik die Beschaffenheit der Welt erkunden« ab Seite 51) gehört dazu auch die Schwerkraft. Daher sehen viele Teilchenphysikerinnen und Teilchenphysiker das Standardmodell als eine Theorie an, die im Bereich vergleichsweise niedriger Energien als Grenzfall einer weitreichenderen Theorie funktioniert. So etwas kennt man bereits beispielsweise aus der Mechanik: Die klassische Mechanik, deren Grundsätze Isaac Newton bereits Ende des 17. Jahrhunderts formulierte, beschreibt alle physikalischen Phänomene bei Geschwindigkeiten und Abständen des Alltagslebens korrekt. Heute weiß man aber, dass die klassische Mechanik nur ein Grenzfall umfassenderer Theorien – Relativitätstheorie und Quantenmechanik – ist.

Das Ideal wäre, die größten und kleinsten Phänomene unserer Welt mit einer einzigen Theorie umfassend zu erklären. Bei der globalen Suche nach dieser Weltformel nehmen die Theoretikerinnen und Theoretiker aus Siegen eine bedeutsame Rolle ein. Ein T-Shirt-Aufdruck »Das Standardmodell ist nicht perfekt. Aber Siegener Berechnungen sind ganz nah dran an der Perfektion« wäre treffend. Aber die WissenschaftlerInnen machen lieber durch hervorragende Fachveröffentlichungen auf sich aufmerksam.

Elementary particle physicists all over the world are hard at work searching for new models because the Standard Model doesn't have explanations for certain phenomena in the Universe. Apart from the mystery of dark matter (see also »Exploring the Nature of the World with Math«, from page 51), there is also the issue of gravity. This is why many particle physicists consider the Standard Model to be a theory which works in the range of currently accessible energies as a limiting case within a wider theory. This principle is already familiar in areas such as mechanics: Classical mechanics based on the laws established by Isaac Newton at the end of the 17th century correctly describes all physical phenomena at the velocities and distances that occur in everyday life. However, today we know that classical mechanics is only a limiting case of more fundamental theories, i.e. relativity theory and quantum mechanics.

Ideally, we want to find a single theory that explains our world at smallest as well as at largest distances. The theoretical physicists in Siegen are playing a significant role in the global search for this universal formula. Maybe there should be a T-shirt that states »The Standard Model isn't perfect. But calculations from Siegen come pretty damn close«. But our researchers don't rely on T-shirts to promote their ideas; instead, they publish in international, peer-reviewed scientific journals.



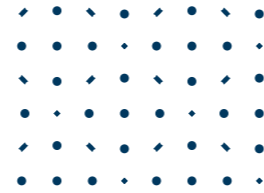
Durch Mathematik die Beschaffenheit der Welt erkunden

Exploring the Nature of the World with Math

Interview Frank Frick



Dr. Rusa Mandal hat an der Visva Bharati Universität in Santiniketan (Indien) studiert, rund 150 Kilometer nördlich von Kalkutta gelegen. Heute leitet sie an der Universität Siegen eine Nachwuchsgruppe auf dem Forschungsgebiet der theoretischen Elementarteilchenphysik. Im Interview spricht sie über ihre Motivation und ihren Forschungsalltag.



Dr. Rusa Mandal studied at Visva Bharati University in Santiniketan (India), which lies some 150 kilometers north of Kolkata. Today she's in charge of a group of junior researchers in the field of particle physics at the University of Siegen. Here she talks about what drives her and her daily research work.

Foto / Photo freepik.com / Alones



Dr. Rusa Mandal

Foto / Photo Sascha Hüttenhain

Lots of scientists are working on solutions to today's major societal challenges such as climate change. In contrast, particle physicists conduct pure basic research. What fascinates you about your field?

Dr. Rusa Mandal: I enjoy the combination of math and physics. As a child, I loved math. But over time, pure math lost a bit of its fascination for me. That was when I discovered physics, which deals with natural phenomena. Physics is the best way of applying math to the real world. And elementary particle physics tackles the very fundamental questions about our existence, like what is the universe made of? How do the constituents interact?

»Die Frage lautet:
Woraus besteht
Dunkle Materie?«

Dr. Rusa Mandal

»The question is:
what does dark
matter consist of?«

Dr. Rusa Mandal

Foto / Photo freepik.com / Alones

Viele WissenschaftlerInnen arbeiten an Lösungen für die großen gesellschaftlichen Herausforderungen unserer Zeit, wie etwa den Klimawandel. TeilchenphysikerInnen dagegen betreiben pure Grundlagenforschung. Was fasziniert Sie an Ihrem Fachgebiet?

Dr. Rusa Mandal Ich mag, dass man in diesem Wissenschaftsgebiet Mathematik und Physik miteinander kombiniert. In meiner Kindheit habe ich die Mathematik geliebt. Doch später hat die reine Mathematik etwas an Faszination verloren. Zugleich entdeckte ich die Physik, die sich mit Naturphänomenen beschäftigt. Physik ist die beste Möglichkeit, um Mathematik auf unsere Welt zu übertragen. Hinzu kommt, dass sich die Elementarteilchenphysik mit sehr grundlegenden Fragen unserer Existenz beschäftigt: Wie ist die Welt aufgebaut? Warum sieht die Welt so und nicht anders aus?

Inwiefern wissen wir nicht, woraus die Welt aufgebaut ist?

Mandal Bislang verstehen wir nur einen kleinen Bruchteil des Inhalts unseres Universums. Denn ein Großteil des Universums besteht aus Dunkler Materie – etwas, was noch kein Mensch gesehen hat. Dafür gibt es bisher nur astrophysikalische Hinweise. So ist etwa die Rotationsbewegung von Sternen in den Außenbereichen von Galaxien schneller, als es auf Basis der sichtbaren Materie zu erwarten ist. Die Frage lautet: Woraus besteht Dunkle Materie?

Why don't we know the composition of the universe?

Mandal Currently we only know a tiny fraction of what it contains. A large part of it consists of dark matter – something nobody has ever seen directly. So far, we only have astrophysical indications that dark matter exists. One of these is that the rotation of stars inside the galaxies is faster than it should be based on visible matter. The question is: what does dark matter consist of?

Does that mean your research is about solving the mystery of dark matter?

Mandal Yes. The otherwise highly accurate theory which we call the Standard Model of particle physics doesn't explain the existence of dark matter. Our theoretical research aims to extend the Standard Model to include new particles and/or interactions that explain the astrophysical phenomena observed.

If you were to take a guess, when do you think elementary particle physics will be able to present an extended Standard Model?

Mandal Well, it's impossible to say when we'll have a reliable model that goes further. The Standard Model was developed in the 1960s. Despite decades of intensive work since then, no experiment has found particles that can't be explained by it. All we know is that the Standard Model can't be the final explanation.



Foto/Photo freepik.com/Alones

Foto/Photo Sascha Hüttenhain

Ihre Forschungsarbeit kann also möglicherweise helfen, das Rätsel der Dunklen Materie zu lösen?

Mandal Ja. Mit dem ansonsten sehr erfolgreichen Standardmodell der Teilchenphysik lässt sich die Existenz der Dunklen Materie nicht verstehen. Unsere theoretische Forschungsarbeit zielt darauf, das Standardmodell zu erweitern und neue Teilchen einzubeziehen, um damit die astrophysikalischen Beobachtungen zu erklären.

Bitte spekulieren Sie ein bisschen: Wann wird die Elementarteilchenphysik dieses erweiterte Modell präsentieren können?

Mandal Es lässt sich wirklich nicht vorhersagen, wann wir ein schlüssiges Modell haben werden, das über das Standardmodell hinausgeht. Dieses wurde in den 1960er-Jahren entwickelt. Seitdem hat trotz jahrzehntelanger intensiver Suche niemand Teilchen gefunden, die sich nicht mit dem Standardmodell erklären lassen. Das Einzige, was wir wissen, ist: Das Standardmodell kann nicht das endgültige Modell sein.

Wie steht es in Ihrem Heimatland Indien um die Forschung im Bereich Elementarteilchenphysik?

Mandal Es existieren einige Forschergruppen, die experimentell orientiert sind, darunter solche, die den Teilchenbeschleuniger Large Hadron Collider am Europäischen Forschungszentrum CERN nutzen. Doch es gibt auch Elementarteilchenphysiker, die theoretisch arbeiten, etwa in Chennai, wo ich 2018 meinen Dokortitel erworben habe.

Welcome Center

Das Welcome Center bietet internationalen Forschenden (Promovierenden, Postdocs und ProfessorInnen) Beratung, Betreuung und Unterstützung bei allen organisatorischen Fragen zum Aufenthalt in Siegen an.

📍 <https://www.uni-siegen.de/start/international/>

Welcome Center

The Welcome Center offers international researchers (doctoral candidates, postdocs and professors) advice, support and assistance with all organizational questions regarding their stay in Siegen.

📍 <https://www.uni-siegen.de/start/international/>

What is the status of research into elementary particle physics in your home country of India?

Mandal There are research groups that focus on experimental work, including some that use the Large Hadron Collider at the European research center CERN. But there are also elementary particle physicists working on the theory side, for example in Chennai, where I did my PhD in 2018.

How did you get to know the University of Siegen?

Mandal My thesis involved a special field of elementary particle physics known as flavor physics. That's when I found some publications by Professor Mannel. So I knew that Europe's largest and most renowned research group in this particular field was in Siegen. First, I was able to come here as an Alexander von Humboldt researcher, and that led to the opportunity to head a group of young researchers in this field.

Wie kam der Kontakt zur Universität Siegen zustande?

Mandal Während der Doktorarbeit habe ich mich mit einem Spezialgebiet innerhalb der Elementarteilchenphysik beschäftigt, der sogenannten Flavour-Physik. Dabei stieß ich auf Publikationen von Professor Mannel. So wurde ich darauf aufmerksam, dass es für dieses Spezialgebiet in Siegen die größte und bedeutendste Arbeitsgruppe in Europa gibt. Zunächst habe ich mich dann in Siegen erfolgreich als Gastwissenschaftlerin beworben. Daraus hat sich dann die Möglichkeit entwickelt, hier als Nachwuchsgruppenleiterin zu arbeiten.

Wie sieht Ihr Forschungsalltag aus?

Mandal Hauptsächlich führe ich Berechnungen durch. Dabei nutze ich normale Desktop-Computer, benötige also keinen Supercomputer. Ich setze Rechenmethoden ein, die hier in Siegen etabliert sind. Sehr wichtig ist der direkte und unkomplizierte Austausch über physikalische Probleme mit den Kollegen vor Ort. Darüber hinaus stehen die Teilchenphysikerinnen und Teilchenphysiker weltweit in engem Kontakt. Denn sie legen ihre Überlegungen und vorläufigen Ergebnisse auf einem Preprint-Server ab. So können alle darauf zugreifen, Kommentare abgeben oder auf Unstimmigkeiten hinweisen.

Bedauern Sie, dass auf dem Gebiet der Elementarteilchenphysik ganz überwiegend Männer forschen und Frauen die Ausnahme sind?

Mandal Persönlich nehme ich die Situation so an, wie sie ist. Nicht nur in der Elementarteilchenphysik, sondern auch in der Mathematik und allgemein in den Naturwissenschaften sind Frauen unterrepräsentiert. Damit sich das ändert, werden Vorbilder benötigt. Es ist ein schrittweiser und langsamer Prozess. In Europa bemüht man sich darum, den Frauenanteil in der Physik zu erhöhen, in Indien dagegen gar nicht. Ich hatte das Glück, dass mich meine Familie schon seit meiner Kindheit immer unterstützt hat.

Welche Zukunftspläne haben Sie?

Mandal Ich möchte hier in Siegen als Nachwuchsgruppenleiterin meine Forschungskarriere vorantreiben und mich in der wissenschaftlichen Gemeinschaft der theoretischen Teilchenphysikerinnen und -physiker etablieren.

Kooperation, Austausch, Netzwerk

Das Programm Forscher-Alumni fördert internationale Forschungszusammenarbeit an der Universität Siegen. Der akademische Austausch von GastwissenschaftlerInnen und deren GastgeberInnen wird gezielt gestärkt und dauerhafte Vernetzung ermöglicht.

📍 www.research.alumni.uni-siegen.de

Cooperation, exchange, networking

The Research Alumni program supports international research cooperations at the University of Siegen. It strengthens the academic exchange between guest scientists and their hosts, and enables sustained networking.

📍 www.research.alumni.uni-siegen.de/index.html.en

What's a typical day's work for you?

Mandal Mostly I perform calculations. All I use for this is a normal desktop; there's no need for a supercomputer. I use calculation methods that were established in Siegen. I'd say the direct communication about problems in physics with my colleagues here is essential to my work. Of course, particle physicists around the world are also in close contact with each other. They upload their ideas and preliminary findings to a preprint server. We can all access this information, post comments, or point out inconsistencies.

How do you feel about the fact that elementary particle physics is dominated by men, and women are the exception?

Mandal Well, personally I just accept it. Women are underrepresented not only in elementary particle physics, but also generally in math and natural sciences. To change this, we need role models. It's a gradual, slow process. In Europe, there's a drive to increase women's representation in physics, but in India the problem is ignored. I was lucky that my family always supported me, even as a child.

What are your plans for the future?

Mandal Starting from my current position, I want to continue my research career in Siegen and establish myself in the community of theoretical particle physicists.

Meine Doktorarbeit in einem Tweet

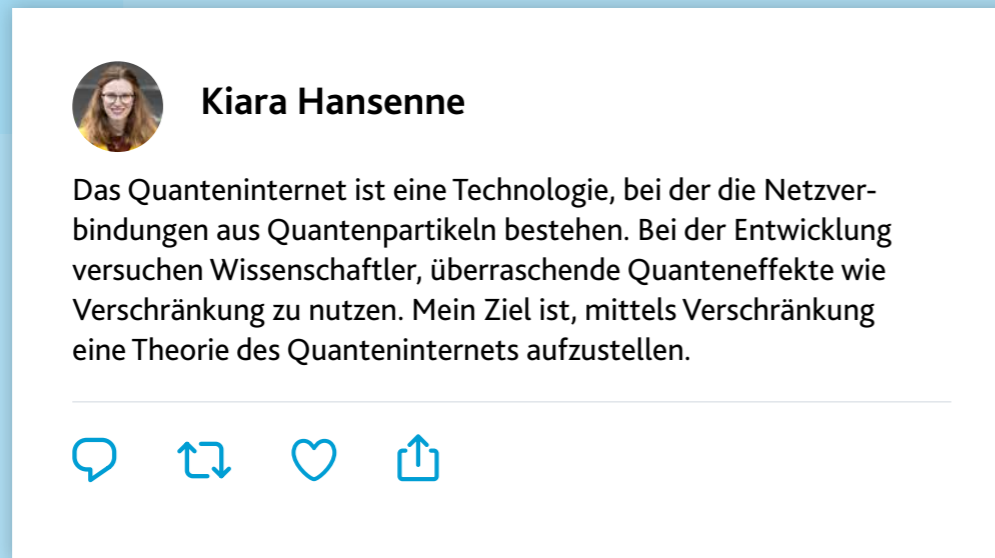


Foto / Photo: Sascha Hüttenhain

Stellen wir uns Internetverbindungen vor, bei denen Datendiebstahl und -manipulation ausgeschlossen sind und über die Regierungen oder Banken absolut abhörsicher Informationen austauschen können. Das so genannte »Quanteninternet« könnte das in Zukunft möglich machen. Der physikalisch sichere Datenaustausch funktioniert dabei über die sogenannte »Quantenverschränkung«. Dabei handelt es sich um einen Effekt der Quantenphysik, der eine besondere Verbindung zwischen zwei Teilchen beschreibt. Verschränkte Lichtteilchen ergänzen sich in ihren Eigenschaften, unabhängig davon, wie weit sie voneinander entfernt sind. Sie können nur gemeinsam beschrieben werden: Misst man eines der Teilchen, so kennt man automatisch den Zustand des anderen. In der Quantenkryptographie wird dieser Umstand für eine sichere Verschlüsselung von Daten genutzt. Sender und Empfänger besitzen jeweils einen Teil eines verschränkten Paares und können einander so verschlüsselte Botschaften zusenden. Versucht eine dritte Partei, die Unterhaltung abzuhören, fällt das sofort auf, weil die Verschränkung dadurch gestört wird.

In ihrem Promotionsprojekt möchte Kiara Hansenne (25) die Natur von Quantennetzwerken genauer untersuchen. Dabei betrachtet sie insbesondere, wo überall Verschränkung möglich ist und berechnet, welche physikalischen Zustände sich darüber in dem Netzwerk herstellen lassen. Aus dieser theoretischen Analyse zieht sie wiederum Rückschlüsse auf die Struktur des Netzwerks – so lässt sich beispielsweise überprüfen, ob bestimmte Verbindungen intakt sind oder nicht.

Kiara Hansenne kommt aus dem belgischen Lüttich und hat dort ihren Bachelor in Physik erworben. Das Masterstudium in Physik absolvierte sie in Lüttich und Genf. Im September 2020 kam sie an die Universität Siegen, um in der Arbeitsgruppe »Theoretische Quantenoptik« von Professor Dr. Otfried Gühne ihre Doktorarbeit zu schreiben. Dabei wird sie durch ein Stipendium des »House of Young Talents« unterstützt.



Kiara Hansenne

The quantum internet is a promising technology where the network links are quantum particles. To build it, scientists are trying to exploit surprising features of quantum physics, such as entanglement. My goal is to use these features to establish a theory of the quantum internet.



My PhD in a Tweet

Imagine internet links where data theft and manipulation are impossible, and governments and banks can send information absolutely securely. The quantum internet could make this possible in the future. The physically secure data communication utilizes the phenomenon of quantum entanglement. This is an effect of quantum physics which describes a special connection between two particles. Entangled light particles are in complementary states irrespective of how far apart they are. They can only be described together: If you measure one of the particles, you automatically know the state of the other. In quantum cryptography, this characteristic is used for secure data encryption. The sender and recipient each have one part of the entangled pair, so they can send each other encrypted messages. If a third party tries to listen in on the conversation, then this is immediately obvious because it disturbs the entanglement.

In her PhD project, Kiara Hansenne (25) wants to examine the nature of quantum networks more thoroughly. She is particularly looking at where entanglement is possible and calculating which physical states can be created in the network through entanglement. From this theoretical analysis, she will gain insights into the structure of the network. For example, this will allow her to analyze whether certain connections are intact or not.

Kiara Hansenne comes from Liège in Belgium, where she gained her Bachelor in Physics. She then gained a Master in Physics in Liège and Geneva. She came to the University of Siegen in September 2020 to write her thesis in the Theoretical Quantum Optics research group of Professor Dr. Otfried Gühne. For her current work, she holds a scholarship from the House of Young Talents.

Aus den Fakultäten

From the Schools

Wir stellen Ihnen eine Auswahl der aktuellen Forschung aus unseren Fakultäten vor.
We present selected projects from the diverse range of research currently going on at our schools.



3

Fragen an ...
questions for ...

Dr. Matthias Laschke



Mit »freudvollen Unruhestiftern« zu mehr Nachhaltigkeit

Achieving More Sustainability with »Pleasurable Troublemakers«

Interview Tanja Hoffmann Fotos/Photos Sascha Hüttenhain

Ihr Ansatz ist, durch Technologie die Handlungsweisen von Menschen zu verändern – zum Beispiel hin zu mehr Nachhaltigkeit und einem sinnvolleren Umgang mit Ressourcen. Wie muss man sich das konkret vorstellen?

Dr. Matthias Laschke Unser alltägliches Handeln ist davon geprägt, dass wir Dinge in unsere Handlungen mit einbeziehen, beziehungsweise durch Dinge handeln. Möchte ich zum Beispiel von A nach B kommen, benutze ich ein Fahrrad oder ein Auto, vorher gucke ich vielleicht bei Google Maps, wo ich hinmuss. Es ist einfach eine typische Praktik des Menschen, dass er Dinge benutzt – und über diese Dinge beziehungsweise Alltagsgegenstände kann ich als Gestalter stark Einfluss darauf nehmen, auf welche Art und Weise Menschen etwas tun. Unser Ziel ist es, Alltagsgegenstände zu entwickeln, die die Nutzerinnen und Nutzer zu einer nachhaltigeren Handlungsweise bewegen. Ein Beispiel ist die »Raupe Immersatt«, ein besonderes Verlängerungskabel in Form einer Raupe. Sie »spürt«, wenn sie mit Stand-By-Strom gefüttert wird und fängt dann an, sich zu winden, als hätte sie Schmerzen.

Your approach is using technology to change the way people live their lives – for more sustainability and a better use of resources. But how exactly?

Dr. Matthias Laschke Our everyday lives depend on using things, or acting through things. Take the way we travel from A to B. I can go by bike or car, and first I might check the route on Google Maps. Typical for humans is that we use tools – and, as a designer, I can determine to a large extent how people act depending on the things they use. Our goal is to develop everyday things that result in more sustainable living by their users. One example is our Raupe Immersatt (never-hungry caterpillar). This is a special extension cable in the shape of a caterpillar. It »feels« when it's receiving standby electricity and starts to twist as if in pain. That reminds users to switch devices off completely. Or the Vergiss-Mein-Nicht (forget-me-not) lamp.

Auf diese Weise animiert uns die Raupe dazu, elektrische Geräte ganz auszuschalten. Oder auch die Leuchte »Vergiss-Mein-Nicht«: Eine Leseleuchte, die Strom wertvoll findet und das Licht nach dem Einschalten selbstständig abdimmt. Nach etwa 30 Minuten ist sie komplett aus – als Nutzer bin ich so gezwungen, darüber nachzudenken, ob ich das Licht und damit die Energie wirklich noch benötige. Wir bezeichnen solche interaktiven Alltagsobjekte, die wir zusammen mit Psychologen, Gestaltern und Ingenieuren entwickeln, auch als »freudvolle Unruhestifter«.

Sicherlich gibt es auch Menschen, die Alltagsgegenstände einfach nur benutzen möchten, um Aufgaben zu erledigen – und zwar ohne, dass diese Gegenstände ein Eigenleben führen und versuchen, uns zu erziehen. Haben Sie keine Sorge, dass Ihre Objekte den Leuten auf die Nerven gehen?

Laschke Es stimmt schon, das ist ein ziemlich schmaler Grat. Wir haben natürlich Studien dazu gemacht, wie die Menschen auf unsere Objekte reagieren. Im Fall der Raupe war das sehr ambivalent: Manche fanden sie niedlich, andere waren von ihr tierisch genervt. Aber selbst bei dieser Gruppe war es so, dass den Leuten gleichzeitig klar war: Es muss auch ein bisschen weh tun. Also es nervt mich zwar – aber die Raupe hat ja recht... und ohne diesen Moment der Reibung würde ich mein Verhalten vermutlich nicht umstellen. Dieses Überwinden des inneren Schweinehundes, das kennt ja eigentlich jeder. Und genau dabei kann Technologie helfen, denn wir wissen inzwischen auch: All die Ermahnungen und Appelle, die uns im Hinblick auf den Klimawandel tagtäglich über die Medien erreichen, reichen nicht aus. Wir nehmen das alles wahr, nehmen uns vielleicht auch vor, uns nachhaltiger zu verhalten, scheitern aber daran, das in unseren Alltag zu implementieren. Verhaltensänderungen sind schwierig und beruhen nicht ausschließlich auf einem rationalen Prozess. Häufig führen eher konkrete Dinge dazu, dass ich mich anders verhalte. Die Unruhestifter stupsen mich kurz von meinem impulsiven in mein reflektives System – ich bin gezwungen, einen Moment darüber nachzudenken, wie ich mich in der konkreten Situation verhalten könnte. Mehr wollen wir mit unseren Objekten auch gar nicht erreichen: Die Wahl, etwas auf diese oder jene Weise zu tun, liegt letztlich immer noch bei jedem Einzelnen.

It's a reading lamp that treats electricity as a valuable resource and automatically dims the light after switching on. After about 30 minutes it switches off altogether, forcing me as the user to think about whether I really still need the light and the energy it consumes. We develop interactive, everyday objects like these together with psychologists, designers, and engineers. We like to call them »pleasurable troublemakers«.

But some people just want to use things for a purpose, and don't want devices to live a life of their own and tell them what to do. Aren't you worried that your objects will get on people's nerves?

Laschke Well, it's true that this is a fine line. Of course we've studied how people react to our objects. The results for the caterpillar were very ambivalent. Some people thought it was cute, others found it really annoying. But even the second group was aware that objects like this have to be a bit of a pain. The feeling was: It gets on my nerves, but the caterpillar is right. And without this moment of friction, I probably wouldn't change my behavior. We all know the problem of having to overcome our own bad habits. And this is where technology can help, because today we also know that the constant warnings and appeals in the media about climate change aren't enough. We're aware of them and might even intend to do something, but daily life gets in the way and nothing changes. It's hard to change our behavior, and rational processes alone aren't enough. But often concrete things can influence how we act. The troublemakers nudge me to stop and think about what I could do in a specific situation. That's all we want to achieve with our objects. Every user still has the choice of doing things one way or another.

Die Forschergruppe um Dr. Matthias Laschke nutzt zur Entwicklung ihrer »freudvollen Unruhestifter« das »Fab Lab« der Universität Siegen – eine Kreativwerkstatt für digitale Fabrikationsmethoden.

The research unit headed by Dr. Matthias Laschke is using the University of Siegen's Fab Lab to develop their »gentle troublemakers«.





Technologie kann die Handlungsweisen von Menschen verändern, ist Dr. Matthias Laschke überzeugt. Mit der besonderen Gestaltung von Alltagsgegenständen möchten er und sein Team NutzerInnen zu mehr Nachhaltigkeit anregen.

Dr. Matthias Laschke is convinced technology can change people's behavior. With appropriate design of day-to-day objects, he and his team aim to nudge people toward more sustainable actions.

Glauben Sie, dass Ihre »freudvollen Unruhestifter« irgendwann Einzug in den Massenmarkt halten?

Laschke Nein, das glaube ich nicht. Was ich aber glaube und mir erhoffe: Dass die Prinzipien, die wir erarbeiten, Einzug halten in Industrieprodukte. Darum geht es auch in meiner aktuellen Nachwuchsforschergruppe »MOVEN«, die energieintensive Alltagspraktiken wie Heizen oder Wäschewaschen adressiert. Nehmen wir zum Beispiel die Waschmaschine – dort gibt es die sogenannten »Eco«-Programme für nachhaltiges Waschen. Unser Kooperationspartner Miele hat herausgefunden, dass nur rund fünf Prozent der Haushalte regelmäßig solche Programme nutzen. Da möchten wir ansetzen und die Anzeigen- und Bediensysteme der Maschinen so gestalten, dass die Wahrscheinlichkeit steigt, ein Eco-Programm zu wählen. Zum Beispiel, weil das Programm prominenter platziert ist. Oder sogar, indem das Programm von der Maschine automatisch ausgewählt wird, wenn man sich nicht aktiv dagegen entscheidet. Unser Ziel ist es, Menschen mit Hilfe unserer Geräte dazu anzuregen, sich auch in anderen Lebensbereichen nachhaltig zu verhalten. In der Forschergruppe werden die Disziplinen Gestaltung, Technik, Ethik und Psychologie vereint, um entsprechende Prototypen zu entwickeln und diese in Haushalten zu testen. Anschließend informieren wir die Wissenschaft, aber natürlich auch die Industrieanwender über die entwickelten Prinzipien und darüber, wie sie von den Verbraucherinnen und Verbrauchern akzeptiert werden.

Do you think your pleasurable troublemakers could be available on the mass market some day?

Laschke No, that's not likely. But what I do believe and hope is that the principles we develop will be applied in industrial products. This is what my current junior researcher group »MOVEN« is all about. We look at the energy-intensive things we do every day such as heating and laundry. Take washing machines. They have »eco« programs for more sustainable washing. Our cooperation partner Miele has found that only about five percent of households regularly use this mode. We want to design the display and control systems of washing machines so that users are more likely to choose the eco program. One way might be to position the program control more prominently. Or even to make the machine automatically select the program unless the user actively overrules it. Our goal is to create devices that encourage people to act sustainably also in other areas of their lives. The research group combines the disciplines design, technology, ethics, and psychology. The aim is to develop prototypes and test these together with households. Then, we'll communicate the principles we've developed, as well as how far users accept them, to the scientific community and naturally to industry.

Infos zum Forschungsprojekt »MOVEN« (Motivationale und Verhaltensändernde Nachhaltigkeitstechnologien)

- wird vom BMBF über 5 Jahre mit insgesamt rund 2,7 Mio. Euro gefördert
- an der Universität Siegen entsteht eine Nachwuchsforschergruppe unter Leitung von Dr. Matthias Laschke
- es werden drei Stellen an der Universität Siegen geschaffen, eine an der LMU München (Kooperationspartner)
- es handelt sich um ein inter- und transdisziplinäres Projekt, an dem die Disziplinen der Mensch-Technik Interaktion (HCI), Technik, Ethik und Wirtschaftspsychologie beteiligt sind
- zu den weiteren Kooperationspartnern zählen die Miele & Cie. KG, die Ergosign GmbH, das Wuppertal Institut und die Verbraucherzentrale NRW
- Es geht darum, dass Technik eine aktive Rolle in der Verhaltensänderung einnimmt und Menschen zu einem ökologischen Alltagsverhalten anhält – bezogen auf energieintensive Alltagspraktiken.



Information on the »MOVEN« (Motivational and Behavior-Changing Sustainability Technologies) research project

- Supported by the BMBF over 5 years by total funding of EUR 2.7 million
- A group of junior researchers at the University of Siegen headed by Dr. Matthias Laschke
- Three jobs created at the University of Siegen and one at the cooperation partner LMU Munich
- Inter- and trans-disciplinary project including the disciplines human-computer interaction (HCI), technology, ethics, and business psychology
- Other cooperation partners include Miele & Cie. KG, Ergosign GmbH, the Wuppertal Institute, and the Consumer Advice Center NRW
- The idea is that technology can play an active role in changing behavior and encouraging sustainable behavior in everyday life with a focus on energy-intensive practices.



Einer der freudvollen Unruhestifter: die »Raup Immersatt«
One of the pleasurable troublemakers: The never-hungry caterpillar

»NS-Gedenkstätten eignen sich als außerschulische Lernorte bereits im Grundschulalter«

Interview Sandro Abbate



»National Socialism memorials provide educational opportunities, even for elementary school children.«

Foto / Photo istockphoto.com / JJFarquitectos



Foto / Photo NS-Dokumentationszentrum / Jörn Neumann

Der Nationalsozialismus ist das dunkelste Kapitel der deutschen Vergangenheit. Wie können Kinder an diesen Teil der Geschichte herangeführt werden? In einer von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderten Studie untersucht Alexandra Flügel, Professorin für Erziehungswissenschaft mit dem Schwerpunkt Schul- und Unterrichtsentwicklung in der Grundschule an der Universität Siegen, gedenkstättenpädagogische Angebote für Kinder im Grundschulalter.

National Socialism is the darkest chapter in Germany's history. How can we make this part of history accessible to children? In a study funded by the German Research Foundation (DFG), Alexandra Flügel is examining educational opportunities for elementary-school children at memorial sites. Dr. Flügel is a Professor of Educational Science at the University of Siegen, specializing in elementary schools and teaching development.



Professorin Dr. Alexandra Flügel

Foto / Photo Sascha Hüttenhain

Frau Prof. Flügel, Sie setzen sich seit längerer Zeit wissenschaftlich damit auseinander, wie Kinder im Grundschulalter an das Thema Nationalsozialismus herangeführt werden können. Haben sich in den vergangenen Jahren neue Schwerpunkte aufgetan?

Prof.'in Dr. Alexandra Flügel Ja, das Thema begleitet mich schon mehrere Jahre. In meiner Arbeit untersuche ich insbesondere die Frage, wie sich Kinder mit dem Nationalsozialismus auseinandersetzen. In den letzten Jahren ist zu bemerken, dass vermehrt NS-Gedenkstätten auch Kinder als BesucherInnen mit ihren Angeboten adressieren. Vor zwanzig Jahren war das kaum denkbar beziehungsweise fand nur vereinzelt statt. Uns interessiert nun, was im Rahmen solcher pädagogischer Angebote in Gedenkstätten konkret passiert, wie Praktiken des Erinnerns mit Kindern stattfinden.

Prof. Flügel, you have been examining how elementary-school children can be introduced to the subject of National Socialism for some time. Have any new aspects emerged over the years?

Prof. Dr. Alexandra Flügel That's right, I've been looking at this field for quite a few years. One focus of my work is examining how children deal with the topic of National Socialism (NS). In recent years, more and more NS memorial sites have started offering programs designed for children. Twenty years ago, that was pretty much inconceivable, or at least very rare. What interests us now is what exactly happens when children visit these memorials in a learning context, and how practices of remembrance take place with children.



Foto / Photo NS-Dokumentationszentrum / Jörn Neumann

Ganz grundsätzlich gefragt: Ist das Thema Nationalsozialismus bereits für Kinder im Grundschulalter geeignet?

Flügel Diese Frage ist mir schon oft gestellt worden. Ich glaube, dass wir in der Forschung und zum Teil auch in der Praxis bereits einen Schritt weiter sind. Es wird weniger nach dem »Ob« als vielmehr nach dem »Wie« gefragt. Andersherum formuliert: Stellt sich diese Frage überhaupt, ob man Kinder damit konfrontieren kann? Oder ist das Thema Nationalsozialismus nicht Bestandteil auch ihrer Lebenswelt? Haben Kinder nicht teil am Erinnerungsdiskurs und begegnen sie im Alltag nicht immer wieder erinnerungskulturellem Wissen und Praktiken? Wenn Kinder an Gesellschaft partizipieren und damit auch an Erinnerungspraktiken und Geschichtsnarrativen, ist das eben auch etwas, worüber sie sprechen, was sie versuchen zu verstehen und zu dem sie natürlich auch Fragen haben.

Was bedeutet das für Ihre Forschung?

Flügel Aus erziehungswissenschaftlicher Perspektive stellt sich die Frage: Wie ist damit umzugehen, wenn Kinder Fragen zu ihrer Alltagswelt, ihrer Lebenswelt haben? Wie setzen wir uns im Kontext von Schule oder zum Beispiel Angeboten der historisch-politischen Bildung mit ihren Fragen zum Nationalsozialismus und ihren Vergangenheitsdeutungen auseinander? Eine Antwort ist, diese Fragen und Deutungen ernst zu nehmen. Natürlich bedeutet die Vulnerabilität von Kindern eine spezifische Verantwortung und erfordert eine fortwährende kritische Reflexion, wie eine Auseinandersetzung im Kontext von Bildungsprozessen gestaltet werden kann. Meiner Ansicht nach ist es relevant, sich vor Augen zu führen, dass Teilhabe von Kindern an Gesellschaft auch bedeutet, dass sie einen Anspruch darauf haben, sich mit ihren aktuellen Fragen und Geschichtsdeutungen reflektiert zu beschäftigen, also Reflexionsangebote bekommen, um sich mit den politischen, sozialen und gesellschaftlichen Dimensionen auseinanderzusetzen, die mit dem Nationalsozialismus verbunden sind.

Firstly, a fundamental question: Is it appropriate to educate elementary level school children on the topic of National Socialism?

Flügel Well, I often get asked this question. I think we've moved beyond this in research, and partly also in practice. The question is not so much »whether« the topic is appropriate, but rather »how« it can be made appropriate. One should consider if the question is even relevant. Arguably, the topic of National Socialism is already a part of their living environment. Don't children already participate in the culture of remembrance, and aren't they immersed all the time in knowledge and customs relating to the past? When children participate in society, along with its memories and narratives, they talk about these things, try to understand them, and, of course, they have questions.

What does that mean for your research?

Flügel From an educational sciences perspective, we need to know how to respond when children ask questions about their daily lives and the world they live in. How do we best respond to their questions about National Socialism and the past in the context of school, or, for example, when we teach them about history and politics? It's important to take the children's questions and interpretations seriously. Of course, the vulnerability of children means we have a special responsibility. We must continuously reflect on exactly how we can arrange learning in the context of educational processes. I believe we should be aware that children's participation in society gives them a right to ask the questions that bother them, and think about what events in the past mean. They should have the opportunity to reflect, and to be able to address the political, social, and societal dimensions of National Socialism.



Foto / Photo Jörn Neumann

How exactly are you conducting your study?

Flügel Our study works on an ethnographic basis. We accompany visits by elementary-school children to memorials. We participate in the visits, partly film them, and observe exactly what goes on. We include different program formats offered by various memorials in our study. There are three types of memorials. Firstly, places where the focus is on persecution and the murder of victims, such as former concentration camps, Gestapo offices and prisons. Second, locations of the perpetrators, for example the house in which the Wannsee conference took place, or the Villa ten Hompel. Thirdly, places with special historical and current relevance such as the Old Synagogue Wuppertal or the Holocaust memorial in Berlin. We expect that the different focuses of the memorials will necessitate different approaches to the subject matter in each case.

Will you exclusively observe, or also talk to people?

Flügel We will take both approaches. Before the trips, we will accompany the conversations between the memorial curators and the school personnel so we can find out what preparations are important leading up to the memorial visit. We also intend to interview staff at the memorials and analyze the teaching materials which they use.



Foto / Photo Rheinisches Bildarchiv / Marion Meinnicken

Wie gehen Sie in Ihrer Studie konkret vor?

Flügel Unsere Studie ist ethnografisch angelegt. Wir begleiten Gedenkstättenbesuche von Kindern im Grundschulalter. Wir nehmen an diesen Angeboten teil, teilweise gestützt durch die Videokamera, und beobachten das konkrete Tun, das dort stattfindet. In unserer Studie beziehen wir die Angebote verschiedener Gedenkstätten ein. Bei Gedenkstätten wird unterschieden zwischen Orten, an denen die Verfolgung und Ermordung der Opfer zentral ist, wie zum Beispiel ehemalige Konzentrationslager, ehemalige Gestapo-Sitze und Gefängnisse, oder sogenannte Orte der Täter, wie zum Beispiel das Haus der Wannsee-Konferenz oder die Villa ten Hompel, und Orte mit besonderen historischen und aktuellen Bezügen, wie etwa die Alte Synagoge Wuppertal oder das Holocaust-Mahnmal in Berlin. Wir gehen davon aus, dass die unterschiedlichen Tatbezüge zu einer unterschiedlichen inhaltlichen Ausrichtung des Angebots führen.

Wird ausschließlich beobachtet oder führen Sie auch Gespräche mit den jeweiligen Personen?

Flügel Neben den Besuchen werden wir auch die Vorgespräche, die zwischen Gedenkstätten und beispielsweise den Schulen stattfinden, begleiten, um herausarbeiten zu können, was in der Vorbereitung auf den Gedenkstättenbesuch eine Rolle spielt. Darüber hinaus beziehen wir Interviews mit den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern der Gedenkstätte sowie didaktische Materialien, mit denen in der Gedenkstätte gearbeitet wird, in die Auswertung ein.

Gibt es einen zentralen Punkt, den Sie so herausarbeiten möchten?

Flügel Für die Analyse interessiert uns, wie in den gedenkstättenpädagogischen Angeboten Vergangenheitsdeutungen erzeugt werden, an denen sowohl die Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter, die Kinder im Grundschulalter, die begleitenden Lehrerinnen und Lehrer, die Eltern sowie die materielle Dimension der Gedenkstätte beteiligt sind. Besonders die Fokussierung auf den Einbezug der Materialität hat sich in der Vorstudie als spannend erwiesen. Gedenkstätten als außerschulische Lernorte werden oftmals mit der Begründung aufgesucht, dass dort etwas zu sehen ist. Gedenkstätten sind Orte mit dinglichen Überresten sowie musealen Gestaltungselementen. Aber das, was dort zu sehen ist, und manchmal auch gerade nicht mehr zu sehen ist, ist nicht einfach durch Anschauung verständlich, sondern durchaus erklärungsbedürftig beziehungsweise es setzt Wissen um Vergangenheit und auch Vergangenheitsdeutungen voraus.

Besteht die Gefahr, dass Kinder das Unerträgliche etwa durch eigene Fantasie auffüllen, wenn sie außerhalb von Bildungsangeboten mit dem Nationalsozialismus konfrontiert werden?

Flügel Klar, aber die Gefahr besteht so oder so. Selbst wenn der Nationalsozialismus im Unterricht thematisiert wird, sind die Deutungen von Schülerinnen und Schülern ja nicht deckungsgleich mit dem, was die Lehrkräfte meinen bearbeitet zu haben. Unsere Vorstellungen von der Vergangenheit sind immer Konstruktionen von Vergangenheit, kein Abbild der Vergangenheit. Wir versuchen immer, uns ein Bild zu machen, Bedeutung herzustellen – das machen Kinder, das machen Jugendliche und das machen auch Erwachsene.

Is there a central issue you want to resolve?

Flügel For our analysis, we're interested in finding out how the memorials' educational programs create an understanding of the past for all parties: memorial staff, children, teachers, parents, and the physical memorial itself. In the preliminary study, the focus on including materiality proved to be particularly interesting. The reason often given for visiting a memorial as an out-of-school place of learning opportunity is that there's something for the children to see. Memorials are places with material remains and elements that have the character of a museum design. However, simply looking at what is on display is often not adequate in providing an understanding. Each visual experience requires an explanation or informative context about the history and its meaning. It is also important to provide an adequate explanation of those items which can no longer be shown.

Is there a danger that children could fill in the unbearable details with their own imagination if they are confronted with National Socialism outside educational settings?

Flügel Of course, but this danger exists anyway. Even if you discuss National Socialism in the classroom, how children interpret what they learn is not always the same as what each teacher aims to convey. Our ideas of the past are always constructs, and never exact reflections of the past. We all try to create a picture, to find meaning, whether we're children, adolescents, or adults. But, from the perspective of school education and educational science, it is necessary to offer opportunities to reflect.

Foto / Photo Rheinisches Bildarchiv / Marion Meinnicken



»Interessant für die Studie ist, welche Vorstellungen davon, was kindgerecht ist, in den gedenkstättenpädagogischen Angeboten sichtbar werden.«

Prof.'in Dr. Alexandra Flügel

»What is interesting for the study is which ideas about what is suitable for children will emerge from an examination of existing educational programs offered by memorials.«

Prof. Dr. Alexandra Flügel

Schulpädagogisch oder erziehungswissenschaftlich argumentiert gibt es aber eine Notwendigkeit, Reflexionsanlässe zu bieten, um eben nicht nur eine emotionale oder auch distanzierende Annäherung an Vergangenheit und historische Verkürzungen und verkürzte Deutungen stattfinden zu lassen. Wenn es um die bürokratisch und arbeitsteilig organisierte Verfolgung und Ermordung von fast sechs Millionen europäischen Juden geht, stellen sich Fragen nach gesellschaftlichen Strukturen, nach Ideologie, nach Institutionen, nach Beteiligung: Wie hat der systematische Ausschluss von Menschen inmitten einer Gesellschaft stattgefunden? Welche individuellen und/oder kollektiven Handlungsspielräume und -optionen bestanden für wen?

Unterscheidet sich die Art der Auseinandersetzung bei jüngeren Kindern von der Jugendlicher oder Erwachsener?

Flügel Möglicherweise unterscheiden sich die Prinzipien des Geschichte Lernens in der Arbeit mit Kindern gar nicht grundsätzlich von denen mit Jugendlichen oder Erwachsenen. Interessant für die Studie ist aber, welche Vorstellungen davon, was kindgerecht ist, in den gedenkstättenpädagogischen Angeboten sichtbar werden. Wir wollen die Spezifik der gedenkstättenpädagogischen Arbeit mit Grundschulkindern beschreiben und die damit verbundenen Handlungsanforderungen bestimmen. Auf diese Weise wollen wir eine Grundlage für die Weiterentwicklung des Lernens am außerschulischen Lernort Gedenkstätte bieten.

This is important so that the past is not only seen from an emotional or distanced perspective, but also so that it is not formed within an oversimplified understanding of history. When you consider the bureaucratic, efficiently organized persecution but also murder of almost six million European Jews, questions inevitably arise about societal structures, ideology, institutions, or participation: How were people systematically excluded within a society? What individual and/or collective scope for action and what options were available for whom?

Is there a difference between the way younger children, adolescents, and adults process the information?

Flügel It's possible that the way children learn about history is not that different from the way adolescents and adults deal with it. What is interesting for the study is which ideas about what is suitable for children will emerge from an examination of existing educational programs offered by memorials. We want to describe the specifics of the educational work offered by memorials for elementary-school children and determine the related requirements in process of action. This is how we aim to create a basis for the further educational development of learning at memorials.

Kann eine frühe Auseinandersetzung mit dem Holocaust Antisemitismus entgegenwirken?

Flügel Pauschal scheint es da weder ein Ja noch Nein zu geben. Von bildungspolitischer Seite wird immer wieder eine »Thematisierung des Nationalsozialismus« mit der Hoffnung verbunden, hierdurch einen Beitrag zur Ausbildung demokratischer Haltungen zu leisten. Empirisch lässt sich diese einfache Kausalität so nicht belegen. Auch Gedenkstättenmitarbeiterinnen und -mitarbeiter diskutieren solche Erwartungen, dass ein Gedenkstättenbesuch präventiv gegen antisemitische oder rechtsextreme Haltungen schützen soll, eher kritisch. Wenn es auch wünschenswert wäre, dass eine Auseinandersetzung mit den antidemokratischen Strukturen des Nationalsozialismus, mit Entstehungszusammenhängen und Folgen, zu einer demokratischen Haltung führte, so sind Gedenkstätten kein Bollwerk gegen Fremdenfeindlichkeit, Rechtsextremismus und Antisemitismus. Aber die schulische Auseinandersetzung mit dem Nationalsozialismus und auch ein Gedenkstättenbesuch können einen Beitrag zur Ausbildung eines reflektierten Geschichtsbewusstseins leisten.

Research project / study

Educational Programs for (Elementary-School) Children as Socio-Material Arrangements at National Socialism Memorials
Prof. Dr. Alexandra Flügel and Irina Landrock, Research Assistant
Educational Science with the Specialty: School and Teaching Development in Elementary Schools

Funded over three years by the Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG)
Amount: EUR 214,028
Start in summer 2022

If children learn about the Holocaust at a young age, can this help prevent antisemitism?

Flügel There seems to be no universal yes or no answer to this question. Those involved in educational policy often hope that regularly addressing the topic of National Socialism will support the formation of democratic behavior. Empirically, this simple causality can't be proven. Staff at memorial sites also tend to be more critical about the expectation that visiting a memorial can protect against antisemitic or extreme right-wing views. Even though it is desirable that learning about the antidemocratic structures of National Socialism and how it developed would consequently lead to more democratic attitudes, memorials are not a sure-fire defense against xenophobia, extreme right-wing views, and antisemitism. However, addressing National Socialism in schools and through visiting memorials can certainly contribute towards forming a well-reflected understanding of history.

Forschungsprojekt / Studie

Gedenkstättenpädagogische Angebote für (Grundschul-)Kinder als sozio-materielle Arrangements

Prof.'in Dr. Alexandra Flügel und Irina Landrock
Erziehungswissenschaft mit dem Schwerpunkt Schul- und Unterrichtsentwicklung in der Grundschule

Gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) über drei Jahre
Fördersumme: 214.028 Euro
Start im Sommer 2022



Foto / Photo Rheinisches Bildarchiv / Britta Schlier

Gekommen, um zu bleiben

Autorin/Author Maria Berentzen



Here to Stay

Foto/Photo istockphoto.com / Nikada



Immer mehr hochausgebildete Menschen aus Indien kommen zum Arbeiten nach Deutschland – und viele von ihnen bleiben. Was ist dabei heute anders als früher – und was heißt das für die Zukunft? Das untersucht die Soziologin und STAR-Stipendiatin Dr. Amrita Datta in Siegen.

More and more highly qualified people from India are coming to work in Germany, and many of them stay permanently. So what's different now, and what does it mean for the future? This is the topic which the sociologist and STAR scholarship holder Dr. Amrita Datta is studying in Siegen.





Eine Indische Community

in Deutschland gibt es schon lange, aber sie war nie besonders groß. Seit einigen Jahren allerdings ziehen immer mehr hochausgebildete Menschen aus Indien nach Deutschland, um hier zu arbeiten oder zu studieren. 2020 lebten mehr als 150.000 InderInnen in der Bundesrepublik. Ihre Zahl hat sich in den vergangenen zehn Jahren mehr als verdreifacht. Was zieht sie hierher? Wie leben sie und welche Pläne haben sie für ihre Zukunft? Zu diesen Fragen forscht die Soziologin Dr. Amrita Datta.

Während Menschen aus Indien früher meist zum Arbeiten nach Deutschland kamen und dann zurückkehrten, bleiben nun viele von ihnen langfristig oder sogar für immer. »Sie kaufen zum Beispiel Häuser oder schicken ihre Kinder auf deutsche Schulen.« Früher seien hingegen internationale Schulen gefragt gewesen, weil klar war, dass die Familie irgendwann weiterziehen würde.

»Mich interessiert der Grund für diese Veränderungen«, sagt Datta. Die Postdoktorandin ist Marie-Sklodowska-Curie-Stipendiatin im Fachbereich Soziologie an der Fakultät I der Universität Siegen sowie Stipendiatin des STAR-Programms – und seit sie ihren Lebensmittelpunkt aus Indien nach Deutschland verlegt hat, gehört sie selbst zur Gruppe derer, die sie erforscht.



Dr. Amrita Datta

Foto / Photo Sascha Hüttenhain



Foto / Photo istockphoto.com / Instants



Foto / Photo istockphoto.com / DisobeyArt

There has long been an Indian community in Germany, but it was never very large. However, over the past few years, an increasing number of highly educated people from India have been moving to Germany to work or study. In 2020, there were over 150,000 Indian residents in Germany. Their number has more than tripled over the last ten years. What brings them here? How do they live and what are their plans for the future? These questions underpin the research by the sociologist Dr. Amrita Datta.

Previously, people from India usually came to Germany to work for a period and then returned home. Now many of them stay long-term, or even permanently: »They buy their own houses and send their children to German schools.« In the past, these families chose international schools because they knew they weren't going to stay.

»I want to find out why this has changed,« says Datta. The postdoc holds a Marie-Sklodowska-Curie scholarship in the Department of Sociology at the University of Siegen as well as a scholarship from the STAR program – and, since moving from India to Germany, she herself belongs to the group that's the subject of her research.

Beobachtungen im Alltag und Befragungen

Die Wissenschaftlerin hat mit einer Art Schneeballsystem nach InderInnen gesucht, die in Deutschland leben – zu ihrer Zielgruppe gehören hochqualifizierte Berufstätige und Studierende. Soweit die Corona-Pandemie es ermöglicht, beobachtet Datta sie in ihrem Alltag und befragt sie. Typischerweise geht es dabei darum, was den Ausschlag gegeben hat, nach Deutschland zu ziehen: Gab es bestimmte Gründe, Indien zu verlassen? Hat ein Faktor besonders für Deutschland als Zielland gesprochen?

Die Wissenschaftlerin interessiert außerdem, wie nun der Alltag aussieht: Steht zum Beispiel weiter indisches Essen auf dem Speiseplan? Auf welche Schulen gehen die Kinder? Wie daten indische Frauen und Männer in Deutschland? Wie sehen die Geschlechterrollen aus? Und wie frei fühlen sich indische Frauen in Deutschland – auch im Vergleich zu Indien?

Ihre Beobachtungen und Interviews wertet die 37-Jährige anschließend qualitativ aus. Dabei sucht sie nach Mustern: Sie analysiert zum Beispiel, ob und inwiefern sich Beobachtungen wiederholen und ob bestimmte Aussagen mehrfach getätigt werden. Außerdem nutzt sie Daten des Statistischen Bundesamtes, um ihre Beobachtungen einzuordnen.

Observation and interviews

Through a kind of snowball system, the researcher looked for Indians living in Germany. Her target group consists of highly qualified professionals and students. As far as the Covid-19 pandemic allows, Datta observes them in their daily life and interviews them. She asks them what it was that prompted them to move to Germany. Did they have specific reasons for leaving India? Was there any particular factor that made them choose Germany?

The researcher is also interested in their daily lives. Do they still eat Indian food? What schools do their children attend? How do Indian men and women date in Germany? What about gender roles? And how free do Indian women feel in Germany, also compared to India?

After collating the data, the 37-year-old analyzes it. In particular, she looks for patterns. For example, she analyzes whether and to what extent observations recur, and whether certain statements crop up repeatedly. She also uses data from the Statistisches Bundesamt (Federal Statistical Office) to provide background for her observations.





Aus dem persönlichen Familienalbum der
Forscherin: Dr. Amrita Datta und ihre Mutter

Foto/Photo privat

From the researcher's personal family album:
Dr. Amrita Datta and her mother

A new life in Germany

Datta came to Germany for the first time in 2013. Back then, she held a scholarship from the Hanns-Seidel-Stiftung at the Humboldt-Universität zu Berlin. It was the first time she had ever been outside of India. At the time, her focus was on the extent of social exclusion and inclusion of the Indians in Germany. Her field research involved asking immigrants from India living in Berlin about their experiences.

At the same time, the young researcher discovered a new life for herself in Germany. »Suddenly I felt very free,« she says. »As a woman I was able to go outside at any time of day or night and feel safe. And I could move freely without any harassment.« In India, she had experienced the opposite, especially after a lurch to the right by the government in 2014. After further periods in Germany at the University of Cologne in 2016 and 2017, the sociologist decided to relocate to Germany. She wanted to search intensively for answers to her questions on the ground.

Neue Lebensperspektive in Deutschland

Datta selbst kam 2013 zum ersten Mal nach Deutschland. Damals war sie Stipendiatin der Hanns-Seidel-Stiftung an der Humboldt-Universität zu Berlin – und reiste zum ersten Mal überhaupt aus Indien ins Ausland. Ihr Fokus lag zu dem Zeitpunkt auf der Frage, inwiefern InderInnen in der deutschen Gesellschaft Ausgrenzung erleben. Für ihre Feldforschung befragte sie in Berlin nach Deutschland ausgewanderte InderInnen zu ihren Erfahrungen.

Zugleich entdeckte die Forscherin selbst in Deutschland eine neue Lebensperspektive für sich. »Ich habe mich auf einmal sehr frei gefühlt«, sagt sie. »Ich konnte als Frau zu jeder Tages- und Nachtzeit nach draußen gehen und habe mich immer sicher gefühlt. Und ich konnte mich draußen bewegen, ohne belästigt zu werden.« In Indien habe sie gegenteilige Erfahrungen gemacht – insbesondere seit einem Rechtsruck der Regierung 2014. Nach weiteren Aufenthalten in Deutschland an der Universität zu Köln 2016 und 2017 entschied sich die Soziologin, ihren Lebensmittelpunkt nach Deutschland zu verlegen: Sie wollte intensiv vor Ort nach Antworten auf ihre Fragen suchen.

COFUND-Programm STAR

The COFUND program »STAR: Sensing and Sensibility – Transcending Disciplines for a Responsible Future« at the University of Siegen offers international study and scientific exchange. The postdoc program is a training and mobility program that supports young scientists. It offers them an inspiring and productive environment where they can work on their research, further develop it, and build a global network. The EU program Marie Skłodowska-Curie Actions has been funding STAR at the University of Siegen since 2020. The project is integrated in the university's Research Promotion Division.

For more information, support, and advice, go to:
<https://star.uni-siegen.de/>
<https://forschung.uni-siegen.de/>

COFUND-Programm STAR

Eine internationale Ausbildung und wissenschaftlichen Austausch bietet das COFUND-Programm »STAR: Sensing and Sensibility – Transcending Disciplines for a Responsible Future« an der Universität Siegen. Das Postdoc-Programm ist ein Trainings- und Mobilitätsprogramm und unterstützt Nachwuchswissenschaftlerinnen und -wissenschaftler dabei, ihre Forschungen in einem inspirierenden und produktiven Umfeld umzusetzen, weiterzuentwickeln und global zu vernetzen. STAR wird seit 2020 im Rahmen der Marie Skłodowska-Curie Actions der EU an der Universität Siegen gefördert und ist im Referat Forschungsförderung der Universität Siegen angesiedelt.

Weitere Informationen, Unterstützung und Beratung:

- 👉 <https://star.uni-siegen.de/>
- 👉 <https://forschung.uni-siegen.de/>

Seit dem Herbst 2021 forscht die Postdoktorandin nun an der Universität Siegen. Das ermöglichen ihr ihre beiden Stipendien. »Insbesondere das STAR-Stipendium hat mir sehr weitergeholfen«, sagt sie. Das Stipendienprogramm STAR, kurz für: Sensing and Sensibility – Transcending Disciplines for a Responsible Future, ist ein Trainings- und Mobilitätsprogramm, das von der Europäischen Union gefördert wird. StipendiatInnen können etwa an speziellen Trainings teilnehmen, bekommen Unterstützung beim Aufbau eines Netzwerks oder können ausgedehnte Auslandsaufenthalte organisieren.

»Das Programm ist sehr sinnvoll für mich und meine Forschung«, sagt Datta. »Ich habe die Universität insgesamt als sehr hilfreich erlebt und vor allem das Welcome Center hat mich sehr dabei unterstützt, in Siegen anzukommen.« Das Team des Centers half ihr etwa dabei, eine Wohnung in Siegen zu finden oder die nötigen Formulare für die Ausländerbehörde auszufüllen.

Auch Geschlechterrollen sind ein Aspekt bei der Einwanderung

Für ihre Feldforschung hielt die Wissenschaftlerin sich zunächst jeweils drei Monate in Köln und in Berlin auf. Erste Ergebnisse ihres Projekts gibt es bereits. Datta zufolge hat etwa die Blaue Karte der EU die Einwanderung nach Deutschland stark befördert. Wer als hochqualifizierter Ausländer mit einem überdurchschnittlich hohen Verdienst dieses Zertifikat erhält, kann nicht nur in Deutschland arbeiten, sondern auch nach 33 Monaten eine unbefristete Niederlassungserlaubnis beantragen – mit entsprechenden Deutschkenntnissen sogar schon nach 21 Monaten. »Das ist für viele InderInnen ein attraktives System, um ihre Zukunft zu planen«, sagt Datta.

Since Fall 2021, the postdoc researcher has been conducting research at the University of Siegen. She's supported by her two scholarships. »Especially the STAR scholarship has been a great help,« she says. STAR is short for Sensing and Sensibility – Transcending Disciplines for a Responsible Future. It's a training and mobility program funded by the European Union. Scholarship holders can take part in special training courses, get support building a network and organize extended periods abroad.

»The program is great for me and my research,« says Datta. »I've found the university very helpful, and in particular the Welcome Center really helped me find my feet in Siegen.« That included, for example, helping her find an apartment in Siegen and support with the documents required by the Foreigners Office.

Gender roles also play a part

For her field research, the scientist first spent two periods of three months in Cologne and Berlin. She can already present her initial findings. Datta states that the EU Blue Card significantly boosted immigration to Germany. Anybody who holds this card as a highly qualified foreigner with above-average earnings can not only work in Germany, but after 33 months they can apply for an unlimited residency permit. If they can prove proficiency in German, they can even shorten this time to 21 months. »For lots of Indians, this is an attractive system that allows them to plan their future,« says Datta.



Foto/Photo istockphoto.com / LiudmylaSupynska



»In Indien fehlen ausreichend Jobmöglichkeiten für junge Leute – und umgekehrt benötigt Deutschland dringend Fachkräfte.«

Dr. Amrita Datta

Eine Rolle spielt außerdem die Corona-Pandemie: Nachdem sie die Mobilität zunächst beeinträchtigt hatte, treibt sie die Einwanderung nach Deutschland nun sogar an. »Viele InderInnen haben mir berichtet, dass sie in dieser Zeit das deutsche Gesundheitssystem zu schätzen gelernt haben«, sagt Datta. »Für sie ist es ein Anreiz, sich hier dauerhaft niederzulassen, und, sofern es möglich ist, irgendwann auch ihre alternden Eltern aus Indien nachzuholen, weil sie hier besser versorgt werden können.«

Auffällig ist zudem, dass zwar weiterhin mehr indische Männer als Frauen einwandern, aber die InderInnen aufholen: Ihr Anteil steigt laufend, zuletzt lag er bei rund 36 Prozent. »Vor allem indische Singlefrauen sehen Vorteile darin, in Deutschland zu arbeiten«, sagt Datta. »Sie können hier viel stärker über ihr eigenes Leben entscheiden.« Während es in Indien etwa weiterhin arrangierte Ehen gebe, könnten Frauen in Deutschland frei leben, ohne dass ihr Umfeld sich einmische.

Wenn immer mehr gut ausgebildete InderInnen in Deutschland arbeiten, ihre Kinder auf deutsche Schulen schicken, Häuser kaufen und ihre Familien nachholen, hat das weitreichende Effekte. »Zum einen gehe ich davon aus, dass InderInnen im Gesellschaftsbild immer sichtbarer werden«, sagt Datta. »Zum anderen sehe ich natürlich auch Auswirkungen auf die deutsche Gesellschaft, wenn der Trend sich fortsetzt.« Die Einwanderung junger, hochqualifizierter InderInnen biete viele Chancen für beide Seiten: »In Indien fehlen ausreichend Jobmöglichkeiten für junge Leute – und umgekehrt benötigt Deutschland dringend Fachkräfte.«

The Covid-19 pandemic also played a role. Initially, it restricted mobility, but now it's actually driving immigration to Germany. »Many Indians have told me they learned to appreciate the German healthcare system during the pandemic,« says Datta. »For them it's an incentive to make Germany their permanent home. That's as long as they have the option of at some point bringing their aging parents here, where they'll get better care.«

Another striking development is that, while the majority of Indians coming to Germany are still men, women are catching up. The share of women is rising steadily, and currently stands at around 36 percent. »Above all, single Indian women find lots of advantages of working in Germany,« says Datta. »They have much more freedom to make their own choices.« They point out that arranged marriages are still common in India, while women in Germany can live freely without anybody interfering.

»Jobs for young people are scarce in India, and Germany urgently needs qualified employees.«

Dr. Amrita Datta

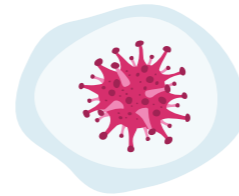
As more and more well-educated Indians can work in Germany, send their children to German schools, buy their own houses, and bring their families over, that is likely to have far-reaching consequences. »Firstly, I expect that Indians will become even more visible in German public and personal spaces,« says Datta. »And secondly, it will of course also impact German society if the trend continues.« The immigration of young, highly qualified Indians offers great opportunities for both sides: »Jobs for young people are scarce in India, and Germany urgently needs qualified employees.«

Viren in neuem Licht

Autor / Author
Frank Frick

Shedding New Light on Viruses

Die Biochemikerin Professorin Dr. Charlotte Uetrecht erforscht, wie Proteine und Proteinkomplexe von Corona- und Noroviren aufgebaut sind – und wie sie sich im Laufe des viralen Lebenszyklus verändern. Um möglichst viele Informationen über kurzzeitig existierende Zustände dieser viralen Bausteine zu erfassen, entwickelt sie eine neue Methode. Die resultierende Detailkenntnis der stofflichen Umwandlungen, die in den Viren stattfinden, weist möglicherweise den Weg zu neuen Angriffspunkten für antivirale Medikamente.



Professor Dr. Charlotte Uetrecht is studying the structures of proteins and protein complexes in coronaviruses and noroviruses, and how they change over the viral lifecycle. She is developing a new method to obtain as much information as possible about states of these viral building blocks which only exist briefly. The resulting in-depth knowledge of the material conversions taking place in the viruses may lead to a new method of attack for antiviral drugs.

Vor der COVID-19-Pandemie erläuterte Prof.'in Dr. Charlotte Uetrecht manchmal ausführlich, wofür es wichtig ist, dass sie den Aufbau von Coronaviren erforscht. Heute besteht eher bei ihrem zweiten Forschungsobjekt, den Noroviren, Erklärungsbedarf: »Noroviren sind hochansteckend und verursachen Brechdurchfall. Was häufig als Magen-Darm-Grippe bezeichnet wird, bringt vor allem Gefahren für Menschen mit sich, deren Immunsystem geschwächt ist«, sagt die Siegener Professorin. Sie weist außerdem auf die wirtschaftlichen Einbußen hin, die mit Arbeitsausfällen durch vermeintlich harmlose Infektionskrankheiten einhergehen.

Um Einblicke in den Aufbau von Viren zu erhalten, nutzt Uetrecht eine hochmoderne Variante der Massenspektrometrie, die als native Massenspektrometrie bezeichnet wird. In ihrer etablierten Form ist die Massenspektrometrie schon seit rund 100 Jahren bekannt: In einem Analysegerät werden die Moleküle von Stoffen in elektrisch geladene Teilchen – Ionen – umgewandelt, also ionisiert. Das Gerät trennt anschließend die entstandenen Ionen gemäß deren Verhältnis von Masse zu elektrischer Ladung und registriert sie.

Before the COVID-19 pandemic, Prof. Dr. Charlotte Uetrecht sometimes had to explain at length why it's important to study the structure of coronaviruses. Today, explanations are necessary above all for her second research subject, noroviruses. »Noroviruses are highly contagious and cause diarrhea with vomiting. The sickness, often called stomach flu, is a risk above all for people with a weak immune system,« says the professor. She also points out the economic costs of sick leave caused by what many people think of as harmless infections.

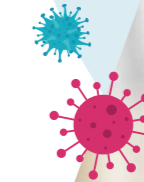
To take a closer look at the structure of viruses, Uetrecht uses a state-of-the-art type of mass spectrometry termed native mass spectrometry. The established form of mass spectrometry has been around for about 100 years. It involves ionizing molecules of substances into electrically charged particles, in other words converting them into ions. Then the analysis device separates the ions according to their mass-to-charge ratio and registers them.



Für die Untersuchung von Proteinen und Proteinkomplexen – Zusammenlagerungen von Proteinen –, die in Medizin und Biologie wesentlich sind, war die Massenspektrometrie lange Zeit nicht geeignet. Denn zum einen ließen sich diese riesigen und schweren Moleküle nicht ionisieren. Zum anderen löste man die Substanzen, die analysiert werden sollten, in flüssigen Lösemitteln auf, in denen Proteine ihre ursprüngliche Gestalt verlieren, also ihre Struktur verändern. Doch in den späten 1990er Jahren entwickelten Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler die Geräte und die Ionisierungsmethode so weiter, dass sich unbeschädigte Proteine und Proteinkomplexe in ihrem biologischen Zustand untersuchen ließen: Die native Massenspektrometrie ging an den Start.

Einblicke in die virale Vervielfältigung

Uetrecht und ihr Team haben mit der Methode Details zu Vorgängen aufgeklärt, die während der Bildung des Replikations- und Transkriptionskomplexes (RTC) von Coronaviren ablaufen. Bei diesem Komplex handelt es sich um eine Art virale Maschinerie, die für die Vervielfältigung des Erbguts, also der viralen RNA, zuständig ist. »Ein möglicher Ansatzpunkt für antivirale Medikamente besteht darin, in die Abläufe einzugreifen, an denen der RTC beteiligt ist«, so Uetrecht. Solche Medikamente könnten zielgerichtet die Bildung viraler Nachkommen unterdrücken.



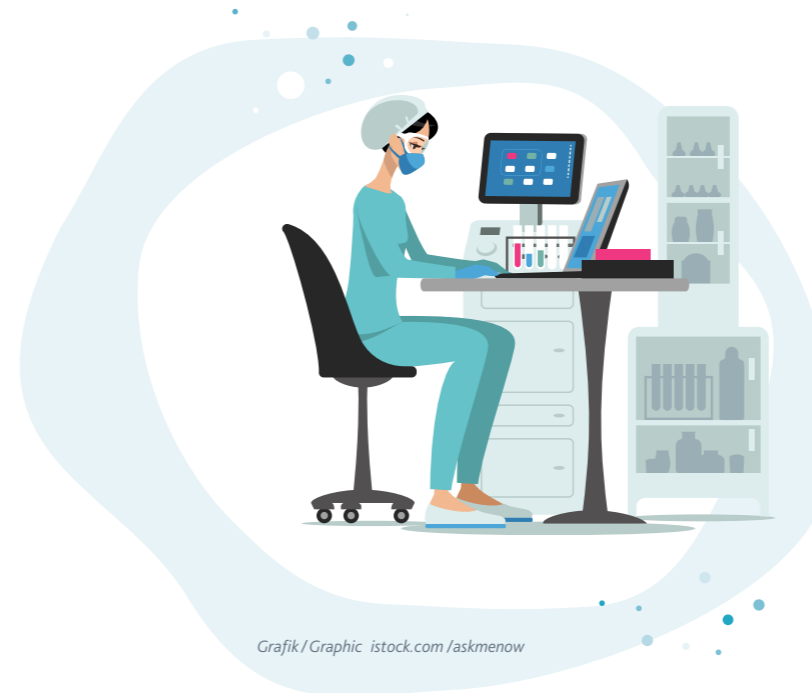
Professorin Dr. Charlotte Uetrecht

Foto / Photo Sascha Hüttenhain

For a long time, mass spectrometry was not suitable for analyzing proteins and protein complexes (assemblies of proteins) which are important in medicine and biology. It wasn't possible to ionize these very large, heavy molecules. The other problem was that the analysis substances were dissolved in liquid solvents, but this destroys the structure of proteins. In the late 1990s, scientists further developed the technology and ionization method so that it became possible to examine undamaged proteins and protein complexes in their original biological state. This was the start of native mass spectrometry.

Insights into viral replication

Using this method, Uetrecht and her team have explained details of processes taking place during formation of the replication and transcription complex (RTC) of coronaviruses. This complex is part of a viral mechanism that is responsible for the replication of the genome, or the RNA of the virus. »A possible approach for antiviral medicines is attacking the processes the RTC is involved in,« says Uetrecht. Medicines like this could be targeted to suppress the formation of viral offspring.



Grafik / Graphic istock.com / askmenow

Im Mittelpunkt der Untersuchungen standen die Proteine nsp7 und nsp8 und ihre zwischenzeitliche Zusammenlagerung zu Komplexen. Diese Proteine regulieren verschiedene Enzyme im RTC, darunter die RNA-Polymerase, die am Aufbau des RNA-Stranges aus ihren Grundbausteinen mitwirkt. Die Forschenden um Uetrecht analysierten die nsp7+8-Komplexe sieben verschiedener Coronaviren-Stämme. Darunter waren die Erreger der Atemwegserkrankungen SARS und MERS, der Auslöser der COVID-19-Pandemie und der Erreger der Katzenkrankheit FIP – für die betroffenen Tiere oft tödlich.

Dabei fanden die Forschenden heraus, dass sich die nsp7+8-Proteinkomplexe der verschiedenen Virenstämme unterscheiden: Bei manchen, etwa bei SARS-CoV-2, besteht er aus zwei nsp7- und zwei nsp8-Einheiten, während er unter anderem beim FIP-Virus aus zwei nsp7- und nur einem nsp8-Protein besteht. Eine dritte Virengruppe bildet Komplexe sowohl aus insgesamt vier als auch aus drei Einheiten. »Wir konnten aufgrund unserer Ergebnisse ein Modell vorschlagen, das die Zusammensetzung der unterschiedlichen nsp7+8-Komplexe erklärt. Die Ergebnisse helfen, die genaue Funktion und Rolle von nsp7 und nsp8 im Replikations- und Transkriptionskomplex und damit die Vervielfältigung von Coronaviren besser zu verstehen«, sagt Uetrecht.

Virenhüllen als Transporter

Bei den Noroviren interessiert sich die Siegener Professorin vor allem für den Aufbau der Hülle. Diese ist wesentlich dafür, dass sich Noroviren an menschliche Zellen anheften und anschließend in sie eindringen können, also für die Vorgänge bei der Infektion. Zudem erkennt das menschliche Immunsystem Viren an ihren Hüllproteinen. Damit ist die Kenntnis des Hüllenaufbaus auch für die Impfstoff-Forschung bedeutsam. Kommerzielle Impfstoffe gegen Noroviren gibt es bislang nicht.

The study focused on the proteins nsp7 and nsp8 and their temporary aggregation into complexes. These proteins regulate various enzymes in the RTC, including the RNA polymerase, which plays a role in the formation of the RNA strand from its basic building blocks. The team of researchers headed by Uetrecht analyzed the nsp7+8 complexes of seven different coronavirus strains. These strains included the pathogens of the respiratory diseases SARS and MERS, the cause of the COVID-19 pandemic, and the pathogens of the cat disease FIP, which is often fatal for these animals.

The researchers discovered that there are differences between the nsp7+8 protein complexes of the different virus strains. Some of them, e.g. for SARS-CoV-2, consist of two nsp7 and two nsp8 units, while the complex for the FIP virus consists of two nsp7 and only one nsp8 protein. A third virus group forms complexes of both four and three units. »Based on our findings, we proposed a model that explains the composition of the different nsp7+8 complexes. The findings help us to better understand the exact function and role of nsp7 and nsp8 in the replication and transcription complex. This also allows us to better understand the replication of coronaviruses,« says Uetrecht.

Virus shells as transporters

In the case of noroviruses, Uetrecht is interested above all in the structure of the protein shell. This outer shell is key to enabling the virus to connect with and penetrate human cells, or, in other words, to cause infection. Another significant factor is that the human immune system recognizes viruses by their surface proteins. Therefore, knowledge of the shell structure is also important for vaccine research. So far, we don't have any commercial vaccines against noroviruses.

»Virusähnliche Partikel sind technologisch als Impfstoffe interessant oder weil sie dazu dienen könnten, in ihrem Inneren Medikamente an ihren Wirkort im Körper zu transportieren.«

Prof.'in Dr. Charlotte Uetrecht

»Virus-like particles are technologically interesting as vaccines or vehicles to deliver therapeutic drugs to the target site in the body.«

Prof. Dr. Charlotte Uetrecht



Grafik / Graphic istock.com / Anastasia Usenko

Weil sich intakte humane Noroviren in menschlichen Zellkulturen nur äußerst schlecht züchten lassen, nutzen die Forschenden um Uetrecht Insektenzellen. Sie lassen diese das Protein VP1 produzieren, aus dem sich dann von selbst leere Virenhüllen zusammenbauen. An den entstandenen Gebilden, den virusähnlichen Partikeln, lassen sich die Eigenschaften der Hüllen gut untersuchen. Uetrecht und ihr Team haben nachgewiesen, dass die Hüllen verschiedener Noroviren-Stämme unterschiedlich stabil sind.

»Virusähnliche Partikel sind technologisch als Impfstoffe interessant oder weil sie dazu dienen könnten, in ihrem Inneren Medikamente an ihren Wirkort im Körper zu transportieren«, erläutert Uetrecht. Noroviren-Hülle enthalten üblicherweise 180 Einheiten des Proteins VP1. Doch bei den virusähnlichen Partikeln treten auch welche auf, die beispielsweise aus 60 Einheiten bestehen. Die Forschenden um Uetrecht haben massenspektrometrisch herausgefunden, unter welchen Bedingungen sich welche Partikelgrößen bilden. Die Größe einheitlich einstellen zu können, ist wesentlich, damit die Partikel als verlässliche Transporter von Medikamenten oder als Impfstoffe infrage kommen.

As it's extremely difficult to cultivate intact human noroviruses in human cell cultures, Uetrecht and her team use insect cells. They allow these cells to produce the VP1 protein which then self-assembles empty virus particles. The structures created are particles similar to virus-like particles, and ideal for studying the properties of the shells. Uetrecht and her team have shown that the shells of various norovirus strains display different degrees of stability.

»Virus-like particles are technologically interesting as vaccines or vehicles to deliver therapeutic drugs to the target site in the body,« explains Uetrecht. Usually, norovirus shells contain 180 units of the VP1 protein. However, some virus-like particles consist, for example, of 60 units. In mass-spectrometry studies, the researchers have found out what conditions are necessary for the formation of different particle sizes. It's crucial to be able to create uniform sizes so that the particles are suitable as reliable vaccines or transporters of drugs.

Natives Massenspektrometer
am Röntgenlaser FLASH

Native mass spectrometer
on the FLASH X-ray laser



Foto / Photo Franziska Ahnert

Foto / Photo Charlotte Uetrecht



Although the analysis of viruses using native mass spectrometry is successful and extremely complex, Uetrecht calls this part of her activities »bread-and-butter work«. What she means is that it gives her findings she can publish and that prove her status as a competent researcher. The other part of her work consists of stubbornly pursuing an idea she had in 2010, but that takes a lot of time and work to implement.

Filtering molecules for X-rays

Back then, she was writing her doctoral thesis in the Netherlands. She read an article by Swedish colleagues because they had cited one of her publications. The introduction to the article mentioned a method of taking snapshots of proteins and protein complexes with short lifetimes using ultrashort pulses of laser light in the X-ray range. Compared to native mass spectrometry, these snapshots reveal much more information about the structure of the giant molecules. However, Uetrecht realized immediately that the evaluation of this single-particle imaging would be more difficult the more different proteins, and giant molecules were present in the sample. She also knew that the existence of long-lived molecules alongside the short-lived molecules would cause problems. »Then I had the idea of using native mass spectrometry to filter out co-existing, short-lived protein states according to mass and then channeling them directly into the X-ray laser beam,« says Uetrecht.

Obwohl die Analyse von Viren mittels nativer Massenspektrometrie erfolgreich und sehr anspruchsvoll ist, spricht Uetrecht von diesem Teil ihrer Arbeit als »Brot- und Butter-Geschäft«. Soll heißen, damit erzielt sie im Alltag des Wissenschaftsbetriebs Ergebnisse, die sie veröffentlichen kann und die sie als fähige Forscherin ausweisen. Der andere Teil ihrer Arbeit besteht darin, hartnäckig eine Idee zu verfolgen, die sie schon 2010 hatte, deren Umsetzung aber langwierig ist.

Sortieren für den Röntgenblitz

Damals las sie während ihrer Doktorarbeit in den Niederlanden einen Fachartikel schwedischer Kollegen, weil diese eine ihrer Publikationen zitiert hatten. In der Einleitung des Artikels wurde über eine Methode berichtet, mit Hilfe von ultrakurzen Laserlichtblitzen im Röntgenbereich Momentaufnahmen von kurzzeitig existierenden Proteinen und Proteinkomplexen zu machen – Momentaufnahmen, die gegenüber der nativen Massenspektrometrie viele zusätzliche Informationen über den Aufbau der Riesenmoleküle offenbaren. Allerdings war für Uetrecht sofort klar, dass die Auswertung bei dieser Einzelpartikel-Bildgebung umso schwieriger wird, je mehr unterschiedliche Proteine und Riesenmoleküle gleichzeitig erfasst werden. Und dass die Existenz langlebiger Moleküle neben kurzlebigen Molekülen ebenfalls zu Problemen führt. »Daher kam mir die Idee, dass man koexistierende, kurzlebige Proteine mit der nativen Massenspektrometrie nach der Masse sortiert herausfiltern und direkt in den Röntgenlaser leiten könnte«, sagt Uetrecht.



Grafik / Graphic istock.com / Anastasia Usenko

2010 war ein Röntgenlaser noch weitgehend Zukunftsmusik. Erst 2017 nahm die erste europäische Anlage dieser Art in Schenefeld bei Hamburg den Betrieb auf: der European XFEL (X-Ray Free-Electron Laser). Um die Röntgenblitze zu erzeugen, werden Elektronen in einem 1,7 Kilometer langen, unterirdischen Beschleuniger zunächst in Paketen auf hohe Energien und Geschwindigkeiten gebracht. Spezielle Magnetanordnungen bringen die rasenden Elektronen dann auf einen engen Slalomkurs. Dabei sendet jedes einzelne Elektron Röntgenlicht aus, das sich immer mehr verstärkt. 1,2 Milliarden Euro – bezogen auf das Preisniveau 2005 – hat die 3,4 Kilometer lange Anlage gekostet.

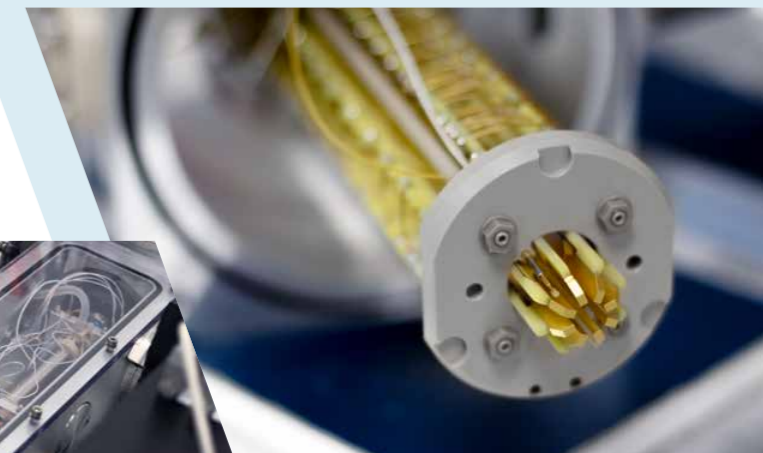
Schon während des Baus des European XFEL arbeitete Uetrecht ihre Idee der Kombination von nativer Massenspektrometrie und Einzelpartikel-Bildgebung zu einem Konzept aus. Zugleich suchte sie nach Fördergebern. Inzwischen ist sie Koordinatorin des EU-Projekts MS SPIDOC, das die Praxistauglichkeit des Konzepts belegen soll. Sie und ihre MitarbeiterInnen haben ihre Büros und Labore im Centre for Structural Systems Biology (CSSB) ganz in der Nähe des European XFEL, sind aber bei der Universität Siegen angestellt. Anfang 2023 soll das kombinierte Massenspektrometrie-Röntgenlaser-System am European XFEL von einzelnen Hüllproteinen der Noroviren erste Aufnahmen liefern, aus denen sich dann in kurzer Zeit und Atom für Atom der Aufbau des jeweiligen Proteins rekonstruieren lässt. Damit wäre das Ziel, den Gegner, das Norovirus, genau zu kennen, um ihn optimal bekämpfen zu können, in greifbare Nähe gerückt.

In 2010, X-ray laser technology was still largely theory. It was only in 2017 that the first European system of this kind was commissioned in Schenefeld near Hamburg. This was the European XFEL (X-Ray Free-Electron Laser). To generate the X-ray pulses, electrons, initially in packages, are accelerated in a 1.7-kilometer underground accelerator to high energies and speeds. Then, special magnetic structures channel the speeding electrons into a narrow, wave-like course. Each individual electron emits X-ray light which is increasingly amplified. The 3.4-kilometer facility cost EUR 1.2 billion (at 2005 prices).

During the construction of the European XFEL, Uetrecht already developed her idea of the combination of native mass spectrometry and individual particle imaging into a single concept. At the same time, she searched for funding. Today, she is the coordinator of the EU project MS SPIDOC, which aims to prove the practicability of the concept. She and her colleagues have their offices and laboratories in the Centre for Structural Systems Biology (CSSB) very near the European XFEL, although they work for the University of Siegen. Uetrecht hopes that, at the beginning of 2023, the combined mass spectrometry X-ray laser system at the European XFEL is supposed to deliver the first images of assembled shell/capsid proteins. Based on these images, it should be possible to later reconstruct the structure of each protein atom-by-atom in just a short time. Then, Uetrecht and her team will be within touching distance of their goal of precisely analyzing the norovirus in order to effectively combat it.

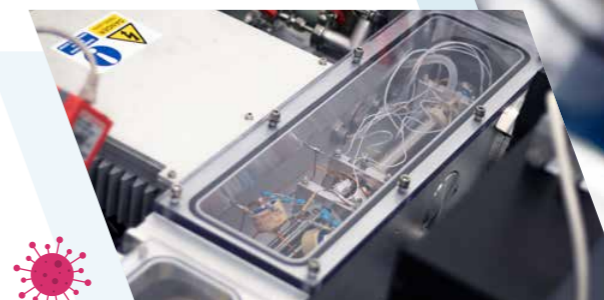
Ionenoptik am Einlass des Massenspektrometers

Ion optics at the entry point for the mass spectrometer



Blick ins Massenspektrometer

A glimpse into the mass spectrometer



Fotos / Photos AG Uetrecht, CSSB/LIV



Tanja Hoffmann

ist Redakteurin in der Pressestelle der Universität Siegen und stellvertretende Pressesprecherin. Vorher hat sie unter anderem als Redakteurin bei Radio Siegen und Radio Bielefeld gearbeitet.

is an editor and deputy press spokeswoman at the Press Office of the University of Siegen. Before that she worked as an editor for Radio Siegen and Radio Bielefeld.

Foto/Photo Dirk Manderbach



Frank Frick

lebt als freier Wissenschaftsjournalist und Redakteur in Bornheim bei Bonn. Der promovierte Chemiker schreibt als freier Autor für das Forschungsmagazin der Universität Siegen und außerdem für Zeitschriften wie »bild der wissenschaft«, Forschungseinrichtungen und Unternehmen.

holds a PhD in Chemistry and writes for the research magazine of the University of Siegen and for magazines such as »bild der wissenschaft«, as well as for research institutions and businesses.

Foto/Photo Dirk Manderbach



Nora Ratmann

ist Chefredakteurin des Forschungsmagazins *future*. Sie arbeitet als Online-Redakteurin in der Pressestelle der Universität Siegen. Vorher war sie unter anderem als Wissenschaftsredakteurin in der Pressestelle der Universität Bielefeld und als Pressesprecherin beim Fußballbundesligisten Sport-Club Freiburg tätig.

is editor-in-chief of the research magazine *future*. She works as an online editor at the Press Office of the University of Siegen. Previously, she worked as a science editor at the Press Office of Bielefeld University and as a press spokeswoman for the first division football club Sport-Club Freiburg.

Foto/Photo Dirk Manderbach



Sandro Abbate

ist Redakteur in der Pressestelle der Universität Siegen. Er hat Kulturwissenschaften studiert und war langjährig als freier Journalist und Autor tätig.

is an editor in the Press Office of the University of Siegen. He studied cultural sciences, and worked for many years as a freelance journalist and author.

Foto/Photo Lisa Stockhammer



Maria Berentzen

aus Leer (Ostfriesland) ist Wissenschaftsjournalistin und arbeitet als freie Autorin für *future*. Daneben veröffentlicht sie unter anderem für das Wissenschaftsressort der dpa und für Spiegel Online.

from Leer (Eastern Frisia) is a science journalist and freelance author for *future*. She also writes for the science department of dpa and publications such as Spiegel Online.

Foto/Photo Dirk Manderbach



Sascha Hüttenhain

ist als freischaffender Fotograf mit Fotostudios in Frankfurt und Siegen tätig und bedient nationale und internationale Kunden. Der Fokus seiner Arbeit liegt vor allem in den Bereichen Lifestyle, Werbung, People und Mode, welche er on Location oder im Studio umsetzt.

is a freelance photographer with studios in Frankfurt and Siegen. He works for national and international clients. He specializes in lifestyle, advertising, people, and fashion, creating his work either on location or in the studio.

Foto/Photo Sascha Hüttenhain



Tim Schröder

arbeitet als Wissenschaftsjournalist in Oldenburg. Der Biologe schreibt seit vielen Jahren für die Süddeutsche Zeitung und Magazine wie Mare oder GEO. Außerdem textet er für Firmen und Forschungseinrichtungen wie die Fraunhofer-Gesellschaft und die Max-Planck-Gesellschaft.

works as a scientific journalist in Oldenburg. He has a degree in Biology, and has been a contributor to the Süddeutsche Zeitung and magazines such as Mare and GEO for many years. He also writes copy for companies and research institutes such as the Fraunhofer Gesellschaft and the Max Planck Society.

Foto/Photo Heiner Manderbach

Herausgeber / Publisher

Universität Siegen
Adolf-Reichwein-Straße 2a
57076 Siegen

Die Universität Siegen ist eine vom Land Nordrhein-Westfalen getragene, rechtsfähige Körperschaft des öffentlichen Rechts, vertreten durch den Rektor Univ.-Prof. Dr. Holger Burckhart.

The University of Siegen is a corporation constituted under public law as an organization of the Federal State of North Rhine-Westphalia and is represented by the Rector, Prof. Dr. Holger Burckhart.

Redaktionsleitung / Editor-in-chief

Nora Ratmann
V.i.S.d.P. / responsible according to German press law:
André Zeppenfeld

Adresse / Address

Adolf-Reichwein-Straße 2a
57076 Siegen
T +49 271 4860
presse@uni-siegen.de

Layout und Illustrationen / Layout and illustrations

STEILAUFWAERTS GmbH & Co. KG
Design- und Digitalagentur, Siegen
steilaufwaerts.de

Fotografie / Photographs

SASCHA HÜTTENHAIN
Siegen & Frankfurt
huettenhain.com

Bei der Produktion dieses Magazins wurden die Hygiene-richtlinien des Robert Koch-Instituts zu jeder Zeit eingehalten. Bitte beachten Sie, dass einige Fotos vor der Corona-Pandemie entstanden sind.

We produced this magazine in conformity with the hygiene instructions of the Robert Koch Institute. Please note that some photos were taken before the COVID pandemic.

Übersetzungen / Translations

dialog translations, Oldenburg

Korrektur / Proofreading

Textfriseur UG, Frankfurt am Main

Druck / Printed by

Buch- und Offsetdruckerei
H. Heenemann GmbH & Co. KG, Berlin

Designkonzept / Design concept

NORDSONNE IDENTITY GmbH, Berlin
nordsonne.de

Auflage / No. of copies

4.000 / 4,000

Papier / Paper

Magno matt



Zuständige Aufsichtsbehörde /
Responsible supervisory authority

**Ministerium für Kultur und Wissenschaft
des Landes Nordrhein-Westfalen**

Ministry of Culture and Science of the State
of North Rhine-Westphalia

Umsatzsteuer-Identifikationsnummer gemäß
§ 27 a Umsatzsteuergesetz / VAT-ID in accordance
with § 27 a German VAT Act (UStG)

DE 154854171

© 2022 Universität Siegen / University of Siegen
publikationen.uni-siegen.de/future

Social Media

facebook.com/unisiegen

instagram.com/unisiegen

twitter.com/uniSiegen

youtube.com/UniversitaetSiegen

linkedin.com/school/unisiegen

Anfragen für ein kostenfreies Abo
Requests for a free subscription

future@presse.uni-siegen.de

future

publikationen.uni-siegen.de/future