

GLOBE

NR.
3/2021



Quantenwelten

14

Wie Erkenntnisse aus der Quantenwelt
den Weg in die Praxis finden



Mit deiner

Hands-On

Mentalität machst du den Quellcode greifbar.

Paola Bianchi, Data Scientist

#FeelFreeToLearnDeep

Du magst es, Barrieren abzubauen und Neuland zu erkunden? Und mit Kreativität und Können verwandelst du intelligente Ideen in wertvolle Lösungen? Dann bist du bei uns genau richtig. Als internationaler Service-Provider für technologiegetriebene zukunftsweisende Innovationen bieten wir dir die passenden Herausforderungen – und jede Menge Freiräume.

Feel free to Innovate. zuehlke.com/careers

EDITORIAL

MITTEN IN DER 2. QUANTEN- REVOLUTION



GLOBE – Das Magazin der ETH Zürich
und der ETH Alumni

Max Planck, Albert Einstein oder Erwin Schrödinger formulierten vor hundert Jahren Theorien zur geheimnisvollen Quantenwelt und stiessen damit eine erste Revolution an. Seit Ende des 20. Jahrhunderts, als man begann, sich die Quantengesetze für technologische Anwendungen zunutze zu machen, läuft eine zweite Quantenrevolution: Weltweit investieren Regierungen und Technologiefirmen in – quantenbasierte – abhörsichere Kommunikation, in hochsensible Sensoren oder in Quantencomputer. Doch zugegeben: Bis zum voll funktionsfähigen und einsetzbaren Quantencomputer sind noch einige Knacknüsse zu lösen.

Die ETH hat schon früh in die Quantenforschung investiert und nimmt heute in der Ausbildung, Forschung und Entwicklung eine weltweit führende Position ein. Hoffen wir, dass dies auch unter den aktuellen politischen Rahmenbedingungen so bleibt. Wir wollen weiter an der Spitze bleiben in diesem auch für die Schweiz wichtigen Bereich. Das neue Quantum Center von ETH und PSI ist Teil unserer Strategie, ebenso wie das für 2025 geplante neue Laborgebäude HPQ. Und mit dem Masterstudiengang Quantum Engineering sorgen wir dafür, dass dringend benötigte Fachkräfte für die Entwicklung der neuen Technologien ausgebildet werden.

Trotz aller Fortschritte des Wissens ist vieles in der Quantenwelt immer noch rätselhaft. Vieles widerspricht auch unserem Alltagswissen. Doch das macht gleichzeitig auch die Faszination der Quantenwelt aus. Lassen Sie sich von dieser *Globe*-Ausgabe in diese Welt mitnehmen.

Ich wünsche Ihnen eine anregende Lektüre!

Joël Mesot,
Präsident der ETH Zürich

Dare to break new ground with KPMG

**It does not make sense
to hire chess players,
and then treat them like
chess pieces**





NEW + NOTED

- 6 News aus der ETH Zürich
- 8 Eleganz aus dem 3D-Drucker
- 10 **ZUKUNFTSBLOG** Ein Update für den Selbstversorgungsgrad

FOKUS

- 16 **DIE KOMPLEXITÄT REDUZIEREN**
ETH-Forschende wollen robuste Systeme für den Quantencomputer entwickeln.
- 20 **QUANTENCOMPUTER FORDERN DIE INFORMATIK HERAUS** Programmierung, Software und Sicherheit sind gefragt.
- 24 **MEISTERN, WAS ES NOCH NICHT GIBT**
Im Masterstudiengang Quantum Engineering betreten Studierende Neuland.
- 26 **«DIE ENTWICKLUNG HAT ETWAS VON EINEM HIGHTECH-RACE.»** Quantenforschung auf dem Weg in die Praxis
- 30 **DAS GANZE IST DAS WAHRE**
Die Quantenphysik öffnet uns die Augen für eine ganzheitliche Sicht der Wirklichkeit.



COMMUNITY

- 32 Verbunden mit der ETH
- 35 **TRANSFER** Sicherer fahren mit schlauer Technologie
- 36 **«UNSERE FORSCHENDEN DÜRFEN NICHT DIE LEIDTRAGENDEN SEIN.»**
Warum EU-Forschung wichtig ist
- 39 **PERSÖNLICH** Sarah Hofer erforscht Lerntechnologien für MINT-Fächer.

REPORTAGE

- 40 **BAHNSCHOTTER IM BACHTOBEL**
ETH-Geologen suchen nach neuen Quellen für das nützliche Gestein.

PROFIL

- 45 **ZU HÖHEREM BERUFEN** Der passionierte Bergsteiger Manfred Hunziker
- 48 **AGENDA**
- 50 **OUT OF FOKUS**

NEW + NOTED



Illustration: NASA / JPL-Caltech

Künstlerische Darstellung des InSight-Lander der NASA, nachdem er seine Instrumente auf der Marsoberfläche ausgebracht hat.

Mehr Wissen über das Innere von Mars

Von der Erde weiss man, dass sie aus Schalen aufgebaut ist: Auf eine dünne Kruste aus leichtem, festem Gestein folgen der dicke Erdmantel aus schwerem, zähflüssigem Gestein und darunter der Erdkern, der grösstenteils aus Eisen und Nickel besteht. Vom Mars wurde ein ähnlicher Aufbau angenommen. Nun weiss man es genauer. Forscher der ETH Zürich und der Universität Zürich konnten erstmals mit Hilfe seismischer Daten ins Innere des Mars blicken. Marsbeben, aufgezeichnet von der NASA-Sonde InSight, lieferten Informationen über die Struktur von Kruste, Mantel und Kern des Planeten.

Danach hat die Marskruste unter dem Landeplatz der Sonde eine Dicke von 25 bis 45 Kilometern. Darunter folgt der Mantel mit der Lithosphäre aus festem Gestein. Auf dem Mars reicht diese Schicht bis in eine Tiefe von 400 bis 600 Kilometern, auf der Erde nur bis maximal 250 Kilometer. Dies

könnte erklären, warum es auf dem Mars keine Indizien für eine Plattentektonik gibt. Der Planet scheint aus einer einzigen Platte zu bestehen im Gegensatz zur Erde mit ihren sieben grossen Kontinentalplatten. Erstmals gelang es, die Grösse des Marskerns mit Hilfe seismischer Wellen abzuschätzen. Demnach beträgt der Kernradius rund 1840 Kilometer, was etwa der Hälfte des Radius des Erdkerns entspricht. Damit ist der Marskern gut 200 Kilometer grösser, als man vor 15 Jahren bei der Planung der InSight-Mission vermutet hatte. Die Untersuchungen bestätigen jedoch, dass der Kern flüssig ist. Der grosse Kern schliesst aus, dass es auf dem Mars einen unteren Mantel gibt wie auf der Erde. Mineralogisch gesehen ist der Marsmantel eine simplere Version des Erdmantels. Die Seismologie enthüllt auch Unterschiede in der chemischen Zusammensetzung, was darauf hindeutet, dass Mars und Erde aus verschiedenen Bausteinen geformt wurden. ○

Toxizitätstest schützt Embryo

Medikamente sollen im Falle einer Schwangerschaft auch für das ungeborene Kind im Mutterleib sicher sein. Wirkstoffe neuer Medikamente werden daher früh in der Petrischale mit embryonalen Stammzellen aus Zelllinien von Mäusen getestet. Stoffe, die dem Embryo indirekt schaden, zum Beispiel weil sie die Funktion der Plazenta beeinträchtigen oder in dieser Stressreaktionen auslösen, werden jedoch in bisherigen Zellkultur-Standardtests nicht entdeckt.

Forschende am Departement für Biosysteme der ETH Zürich in Basel haben nun einen Labortest entwickelt, der die Rolle der Plazenta bei der Einschätzung der Embryotoxizität miteinbezieht. Julia Boos, Doktorandin in der Gruppe von ETH-Professor Andreas Hierlemann, und ihre Kollegen nutzten dazu einen von ihnen entwickelten Chip mit mehreren Kompartimenten, die durch winzige Kanäle miteinander verbunden sind. Darauf kombinierten die Wissen-

schaftlerinnen und Wissenschaftler jeweils aus Zelllinien gewonnene menschliche Plazentazellen mit kleinen Gewebekügelchen aus embryonalen Stammzellen von Mäusen (Embryoid Bodies), die die frühe Embryonalentwicklung widerspiegeln. Zu testende Substanzen erreichen darauf zunächst eine Schicht Plazentazellen, müssen diese durchdringen und gelangen erst anschliessend zu den Embryonalzellen – ähnlich wie dies auch im Mutterleib der Fall ist.

Ziel ist, einen neuen Test zu entwickeln, den auch die Pharmaindustrie einfach anwenden kann. Indem embryoschädigende Stoffe bei der Entwicklung von Medikamenten frühzeitig erkannt und ausgeschlossen werden können, müssen anschliessend weniger Stoffe in Tierversuchen getestet werden. Dies hilft, die Zahl der Tierversuche zu reduzieren. ○



Illustration: Crafft, Nadja Häftiger



Bild: iStock/ae-photos

Wälder machen Regen.

Aufforstung gegen Dürre in Europa

Klimamodelle zeigen, dass Hitzewellen und Dürreperioden im Sommer auch in Europa zunehmen werden, während gleichzeitig die Niederschläge mit Ausnahme von Skandinavien zurückgehen werden. Klimaforschende haben nun erstmals mit Beobachtungsdaten für Europa nachgewiesen, dass Wälder Niederschläge begünstigen. Würden verfügbare Landwirtschaftsflächen aufgeforstet, könnte die Niederschlagsmenge in Europa zunehmen. Die Forschenden haben dazu Niederschlagsdaten von fünf Regionen in Europa analysiert: Gebiete in und um Grossbritannien, Deutschland, den Niederlanden, Schweden und Finnland. Vergleichspaare von jeweils einer Messstation in einem bewaldeten Gebiet und einer Messstation auf einer landwirtschaftlichen Fläche zeigten: In bewaldeten Gebieten ist der Niederschlag im Durchschnitt deutlich höher als in solchen, die landwirtschaftlich genutzt werden. ○





Eleganz aus 3D-Drucker

STRIATUS ○ Striatus ist eine gewölbte Fussgängerbrücke aus 3D-gedruckten Betonblöcken, die ohne Stahlbewehrung oder Mörtel auskommt. Die additiv gefertigten Blöcke werden durch reinen Druck zusammengehalten – ähnlich wie bei traditionellen Mauerwerksbrücken. In Zusammenarbeit mit Industriepartnern hat die Block Research Group der ETH Zürich ein neues Verfahren für 3D-Betondruck entwickelt, bei dem der Beton nicht wie üblich horizontal, sondern in spezifischen Winkeln aufgetragen wird, um die Druckkräfte der Brücke aufzufangen. Die freitragende und ressourcenschonende Brücke wurde gemeinsam mit Zaha Hadid Architects entworfen und wird bis November an der Architekturausstellung «Time Space Existence» in Venedig gezeigt. Da diese Brücke ohne Mörtel zusammengesetzt ist, kann sie leicht demontiert, andernorts neu zusammengebaut oder am Ende ihres Lebenszyklus einfach recycelt werden. ○

—> block.arch.ethz.ch

Ein Update für den Selbstversorgungsgrad

Ein hoher Selbstversorgungsgrad ist kein Garant für Ernährungssicherheit, meint Umweltwissenschaftler Roman Hüppi.



ROMAN HÜPPI von der Professur für nachhaltige Agrarökosysteme möchte unsere Nahrungsgrundbedürfnisse auf eine nachhaltige Basis zurückführen.

Der Selbstversorgungsgrad gibt an, zu welchem Anteil die Schweiz ihren Bedarf an Nahrungsmitteln aus eigener Produktion decken kann. Ein befürchteter sinkender Selbstversorgungsgrad ist das häufigste Argument gegen eine ökologischere Landwirtschaft. Im Kontext von Klimawandel, Artensterben und ernährungsbedingten Volkskrankheiten ist der Selbstversorgungsgrad aber eine zweifelhafte Referenz. Er muss an heutige Herausforderungen angepasst werden.

Gemäss Bund beträgt der Schweizer Brutto-Selbstversorgungsgrad der letzten Jahre etwa 60 Prozent. Berücksichtigt man, dass rund ein Viertel der Tierproduktion auf importierten Futtermitteln beruht, sinkt der Netto-Wert auf 50 Prozent. Die andere Hälfte importieren wir. Hoch selbstversorgend sind wir bei tierischen Nahrungsmitteln (Milchprodukte 115%, Fleisch 80%). Bei pflanzlichen Produkten ist die Schweiz mit 40 Prozent hingegen eher selbst-unterversorgt. Gerechnet wird in Nahrungsenergie. Diese Metrik entstand in der Not der Weltkriege und ist eindimensional auf die Produktion von Kalorien getrimmt.



Zuckerrüben spielen aufgrund ihres hohen Energiegehalts eine (zu) grosse Rolle im Schweizer Selbstversorgungsgrad.

Aus Sicht der Versorgung ist es sinnvoll, möglichst viele Nahrungsmittel im Inland zu produzieren. Bis heute lässt sich jede weitere Intensivierung der Landwirtschaft mit dem steigenden Selbstversorgungsgrad legitimieren. Doch eine maximale Selbstversorgung ist nicht in jedem Fall erstrebenswert. Je intensiver man produziert, desto grösser werden die Umweltschäden. Damit ist die Versorgung im Kern gefährdet. Gemäss Analysen

von Vision Landwirtschaft sind zudem nicht die zu Normalzeiten produzierten Kalorien entscheidend für eine sichere Versorgung in Krisen, sondern das natürliche Produktionspotenzial und die Fähigkeit, den Agrarbetrieb bei Bedarf rasch anzupassen. Ein hoher Selbstversorgungsgrad ist also kein Garant für Ernährungssicherheit. Das liegt auch daran, dass diese Kennzahl den Input für die erzeugten Nahrungsmittel ignoriert.

IMPORTIERTE ENERGIE Um die hohen Versorgungsgrade zu erreichen, setzen Landwirte zahlreiche Produktionsmittel ein: direkte Energie in Form von Strom, Brenn- und Treibstoffen. Und ein Vielfaches davon an indirekter oder «grauer» Energie – neben Futtermitteln etwa Saatgut, Dünger, Pestizide sowie Werkzeuge, Maschinen und Ställe. Geschätzt braucht unsere Landwirtschaft etwa zwei bis drei Mal so viel Fremdenergie, wie sie in Form von Nahrung erzeugt. Den grössten Teil dieser Fremdenergie importieren wir. Der Selbstversorgungsgrad basiert aber darauf, dass die Produktionsmittel auch in Krisen verfügbar sind.

Um die Versorgungssicherheit zu beurteilen, müsste ein geeigneter Indikator auch die Energiebilanz der Inlandsproduktion berücksichtigen und Energieimporte negativ verbuchen. Ein solcher Ansatz wäre auch für die Klimakrise relevant. Solange die importierte Energie aus fossilen Quellen stammt und Futtermittel auf gerodetem Urwald wachsen, treiben Importe den Klimawandel an und gefährden so die heimischen Erträge.

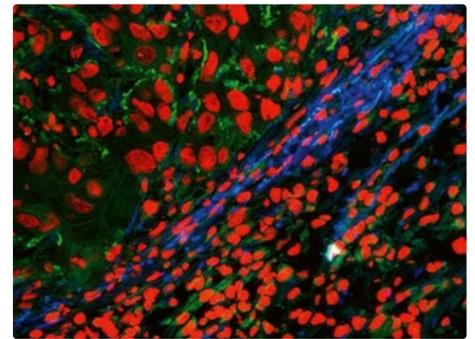
NICHT NUR KALORIEN Auch gesundheitlich ergibt der Selbstversorgungsgrad heute wenig Sinn. Energiearme, aber nährstoffreiche Nahrungsmittel wie Gemüse und Früchte haben wenig Gewicht. Zucker hingegen schlägt mit seinem hohen Energiegehalt stark zu Buche. Im Namen der Selbstversorgung wird die Produktion gefördert, obwohl Zucker in den heute konsumierten Mengen schädlich ist.

Denkbar wäre, den Selbstversorgungsgrad auf eine ausgewogene Ernährung auszurichten. Eine Umstellung von tierischen zu mehr pflanzlichen Lebensmitteln würde auch die Selbstversorgung deutlich stärken. Die Landwirtschaft von morgen muss nachhaltig sein und die Menschen sicher mit gesunden Nahrungsmitteln versorgen. Sie muss auch das Klima und das Kulturland schützen und die Biodiversität bewahren. Wir sollten den Selbstversorgungsgrad für diese multifunktionale Landwirtschaft neu denken. ○

Weitere Blogbeiträge unter:
→ ethz.ch/zukunftsblog



Leuchtfeuer bei Gewebebildung



Der Tumorrand ist mit dem neuen Marker-Molekül blau gefärbt.

Die häufigsten Proteine in unserem Körper sind Kollagene. Haut, Sehnen, Knorpel, Knochen und Bindegewebe bestehen daraus. Forschende der ETH Zürich haben ein aus mehreren Komponenten bestehendes Molekül entwickelt, mit dem sichtbar gemacht werden kann, wo sich im Körper Gewebe neu bildet. So können bei Biopsien die Ränder eines Tumors sichtbar gemacht werden. Zu einer verstärkten Neubildung von Kollagenfasern kommt es während der Wundheilung, aber auch beim Wachstum von Tumoren. Dazu ist ein Enzym namens LOX nötig. Es oxidiert bestimmte Stellen in den Kollagenmolekülen. Diese chemisch veränderten Stellen reagieren anschliessend mit ihresgleichen auf anderen Kollagensträngen und verbinden sich mit diesen.

Die Forschenden unter der Leitung von Helma Wennemers, Professorin am Laboratorium für Organische Chemie der ETH Zürich, entwickelten ein Sensormolekül, das zu fluoreszieren beginnt, nachdem es mit dem Enzym LOX reagiert hat. Dieses Molekül verknüpfen die Wissenschaftler mit einem kurzen fadenförmigen Peptid, das Kollagen ähnlich ist. Das Peptid stattdessen sie mit einer sogenannten reaktiven Gruppe aus, die ausschliesslich mit oxidiertem Kollagen reagiert. Das Molekül lagert sich dort in Kollagenfasern ein, wo sich gerade neues Gewebe bildet. Und es fluoresziert dann, wenn die Gewebeneubildung in Gang gebracht und dabei das Enzym LOX gebildet wird. ○

Kryptografen testeten Telegram



Ausschliesslich mit Open-Source-Code und ohne «Angriff» auf die laufenden Systeme von Telegram analysierte ein kleines Team internationaler Forscher die Verschlüsselungsdienste von Telegram. Die Forschenden der ETH Zürich und des Royal Holloway College (Universität von London) deckten dabei mehrere kryptografische Schwachstellen im Protokoll der beliebten Messaging-Plattform auf. Zwar war die un-

mittelbare Gefahr für den Grossteil ihrer 570 Millionen Nutzer und Nutzerinnen gering, doch die Schwachstellen machten deutlich, dass das System von Telegram den Sicherheitsgarantien anderer, oft genutzter Verschlüsselungsprotokolle wie beispielsweise der Transport Layer Security (TLS) unterlegen ist.

Wie es in diesem Forschungsbereich gang und gäbe ist, informierte das Team die Entwicklerinnen und Entwickler von Telegram 90 Tage vor der Veröffentlichung der Ergebnisse. Damit erhielt das Unternehmen Zeit zur Behebung der festgestellten Mängel. Mittlerweile hat Telegram auf die Ergebnisse reagiert und mit Software-Updates die von den Forschenden gefundenen Sicherheitsprobleme behoben.

Die Anregung für diese Arbeit stammte von Forschungen, die die Technologie-nutzung unter den Teilnehmenden grosser Protestaktionen, etwa 2019/2020 in Hongkong, untersuchten. Dabei stellte man fest, dass die Protestierenden ihre Aktivitäten vorwiegend auf Telegram koordinierten, dass Telegram bisher aber nicht von Kryptografen intensiv geprüft wurde. ○

Wasser aus der Luft gewinnen

Forschende der ETH Zürich entwickelten einen Kondensator, mit dem erstmals ohne Energie während des ganzen Tages Wasser aus der Luft gewonnen werden kann, auch bei glühender Sonne. Zentral ist eine speziell beschichtete Glasscheibe, welche einerseits Sonnenstrahlung reflektiert und andererseits die eigene Wärme abstrahlt. Die mit einem Polymer sowie mit Silber beschichtete Scheibe kühlt sich selbst ab – auf bis zu 15 Grad Celsius unter die Umgebungstemperatur. Auf ihrer Unterseite kondensiert Wasserdampf aus der Luft zu Wasser. Ein kegelförmiges Strahlungsschutzschild schirmt die Wärmestrahlung aus der Luft sowie die Sonneneinstrahlung auf die Scheibe weitgehend ab, lässt gleichzeitig aber die erwähnte Wärmeabstrahlung und somit die Kühlung zu. Das System könnte für Länder mit Wasserknappheit nützlich sein. ○



Der Pilot-Kondensator auf einem Gebäude der ETH Zürich



Ich stelle moderne
und leistungsfähige
Informatikdienste
zur Verfügung. Ich
arbeite für die Schweiz.

Francesco
Leiter Betrieb Backend Services

stelle.admin.ch



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Bundesverwaltung

Arbeiten für die Schweiz

Superposition

▶ Wie unsere Katze kann ein Quantensystem mehrere Zustände einnehmen – und das gleichzeitig! Ist ein klassisches Bit entweder 0 oder 1, kann ein Quantenbit (Qubit) hingegen gleichzeitig 0 und 1 sein. Die Überlagerung solcher Zustände nennt man Superposition.

Qubits befinden sich so lange in Superposition, bis der Zustand gemessen wird. Durch die Messung wird ihr Zustand eindeutig und die Superposition kollabiert.



Quanten



Eigene Gesetze

In der Welt der Quanten herrschen Gesetze, die wir aus unserer Alltagserfahrung nicht kennen. Und doch basieren konkrete Anwendungen darauf:

Ohne Quantentechnologie kein Laser, kein MRI, kein Transistor.

FOKUS
Die ETH hat das Potenzial der Quantenwissenschaften früh erkannt und ist heute weltweit führend dabei in Ausbildung und Forschung. Doch längst sind nicht alle Geheimnisse der Quantenwelt gelüftet.

ILLUSTRATIONEN
Gwil

ART DIRECTION
Crafft AG

TEXT
Corinne Johannssen,
Florian Meyer,
George Tudosis

welten

0 oder 1, auf diesem einfachen Prinzip ist – salopp gesagt – unsere digitale Informationsgesellschaft aufgebaut. Doch was ist, wenn es neben diesen beiden Polen noch weitere Möglichkeiten gibt, die gleichzeitig existieren? Und was ist, wenn sich daraus eine regelrechte Welle von unterschiedlichen Zuständen entwickelt, so dass komplexe Informationen viel schneller verarbeitet werden können?

Genau diese Aussicht, die bisherigen Muster der Informationsverarbeitung zu durchbrechen, macht die Quantenphysik zu einem Forschungsgebiet, in das CEOs von Grossfirmen und theoretische Grundlagenforschende gleichermaßen grosse Hoffnungen setzen. Denn würde die Vision tatsächlich Realität, dass Computer den Gesetzmässigkeiten der Quantenmechanik gehorchen, würde sich eine Tür zu völlig neuen Anwendungen öffnen. Zum Beispiel liesse sich mit einer solchen Wundermaschine die Wirkungsweise von Proteinen in massiv kürzerer Zeit berechnen, als dies mit einem herkömmlichen Rechner je möglich sein wird. Und das wiederum würde der Entwicklung von neuen Medikamenten ungeahnten Schub verleihen.

EIN STEINIGER WEG Es sind vielversprechende Aussichten, und es ist nachvollziehbar, dass die Quantenphysik heute gerade deswegen weit über das eigentliche Fachgebiet hinaus fasziniert. Doch der Weg hin zum Quantencomputer, der Alltagsfragen beantworten kann, ist steinig und länger, als

Die Komplexität reduzieren

Lassen sich dank der Quantenphysik dereinst unlösbare Probleme im Nu bewältigen? Im Prinzip ja – wäre da nicht die Fehleranfälligkeit. ETH-Forschende arbeiten mit Hochdruck an robusten Systemen.

TEXT Felix Würsten

die meisten wahrhaben wollen. «Nicht Jahre, sondern eher Jahrzehnte dürften noch ins Land ziehen, bis es so weit ist», meint Jonathan Home, Professor für Experimentelle Quantenoptik und Photonik an der ETH Zürich. Dabei gehört er zu denjenigen, die in einem Bereich arbeiten, in dem die Quantenforschung vergleichsweise weit fortgeschritten ist. Home nutzt einzelne Atome als sogenannte Qubits, Grundträger der Information, mit denen Quantencomputer rechnen. Beryllium- und Calcium-Atome hält er in speziellen elektrischen Fallen gefangen und manipuliert sie dann nach den Gesetzmässigkeiten der Quantenmechanik mit Laserlicht. «Atome sind wunderbare Systeme für die Informationsverarbeitung, weil wir sie sehr gut isolieren können und weil sie – sofern sie isoliert bleiben – Quanteninformationen für einige Sekunden oder sogar Minuten speichern können.»

Die Crux ist: Um die Information weiterverarbeiten zu können, muss man irgendwann die fragilen Quantenobjekte wieder mit der klassischen Alltagswelt verbinden. Und bei diesem Schritt können bereits kleinste Unregelmässigkeiten das ganze System korrumpieren. Wie lässt sich diese Fehleranfälligkeit minimieren und gleichzeitig die Zahl der Qubits, mit denen gerechnet wird, erhöhen?

ROBUSTER UND EINFACHER Ein naheliegender Ansatz ist, die Systeme redundant zu bauen, also mehrere so genannte physikalische Qubits zu einem logischen Qubit zu verknüpfen. Doch das ist eine zweiseitige Lösung: Durch die Redundanz wird das System im Prinzip zwar stabiler. Doch die Komplexität der Anlage steigt gleichzeitig rasant an – und damit wiederum die Fehleranfälligkeit. «Unser Hauptziel ist, Systeme zu bauen, die robuster und einfacher sind», meint Home.

Dazu braucht es nicht nur einen grossen Aufwand an hochkarätiger Technik zur Steuerung und viel Know-how in Ingenieurtechnik, sondern auch ein besseres Verständnis der physikalischen Zusammenhänge. Die Entwicklung von Quantencomputern habe bereits heute einen konkreten Nutzen, auch wenn man mit den heutigen Anlagen noch lange keine Proteinstrukturen untersuchen könne, ist Home überzeugt. «Unsere Experimente sind letztlich ein Härtestest für die physikalischen Theorien. Und wir gewinnen dank ihnen neue Einsichten, wie die Quantenwelt funktioniert.» Eine Stärke der ETH Zürich sei dabei, dass die Forschenden an ganz unterschiedlichen Ansätzen arbeiten. Denn die sogenannten Ionenfallen, mit denen Home arbeitet, sind nur ein möglicher Ansatz, der zum Durchbruch führen könnte. Auch supraleitende Schaltkreise beispielsweise gelten als heisse Kandidaten. «Es ist ziemlich einmalig, dass wir an unserer Hochschule so viele verschiedene Ansätze parallel verfolgen können», findet Home.

«Wir verbringen viel Zeit mit der Technik rund um die eigentlichen Quantensysteme.»

Yiwen Chu

HOCHSPEZIALISIERTE INFRASTRUKTUR Wie auch seine Kolleginnen und Kollegen setzt Home grosse Hoffnungen in das geplante Physikgebäude am Standort Höggerberg, das durch eine Donation von Martin Haefner ermöglicht wurde. In hochspezialisierten Labors, die besonders gut gegen Störungen von aussen geschützt sind, wollen die Quantenwissenschaftler die Grenzen der Forschung weiter verschieben. Dabei werden sie auch Ideen nachgehen, die heute noch in den Kinderschuhen stecken.

Ein möglicher neuer Ansatz sind beispielsweise Halbleitermaterialien, in denen sich die Elektronen ohne Einfluss der Gitterstruktur bewegen können. Dabei sollen die quantenmechanischen Eigenschaften dieser freien Elektronen gezielt zur Informationsverarbeitung ausgenutzt werden. «Allerdings müssen die Halbleiter dafür extrem rein sein», hält Werner Wegscheider fest, der als Professor für Festkörperphysik solche speziellen Materialien herstellt. In seinen Vakuumkammern baut er die Halbleiter massgeschneidert Atom für Atom auf. «Wir stellen die weltweit reinsten Halbleiter her», erklärt er mit Stolz. Dabei stossen die Forschenden mitunter auf völlig neue Effekte: Kühlt man solche Halbleiter auf sehr tiefe Temperaturen ab und setzt sie einem starken Magnetfeld aus, kondensieren die freien Elektronen zu einem Quasiteilchen. Sie verhalten sich dann als Kollektiv wie ein einzelnes Teilchen und lassen sich mathematisch auch so beschreiben. Die Vermutung liegt nahe, dass solche topologischen Quantensysteme störungsresistenter sind als andere Quantenobjekte. Genau das macht sie zu interessanten Kandidaten, um die Fehleranfälligkeit zu reduzieren.

DER AUFWAND IST GERECHTFERTIGT Gerade bei den topologischen Quantensystemen lässt sich schön zeigen, wie sich Theorie und Experiment in der Physik gegenseitig befruchten. Der grund- →

legende Quanten-Hall-Effekt, auf dem diese Systeme basieren, wurde experimentell entdeckt. In einem zweiten Schritt gelang es dann, diesen Effekt theoretisch zu beschreiben. Aus der Theorie heraus liessen sich dann wiederum die topologischen Zustände voraussagen, in die die Forschenden nun so grosse Hoffnungen setzen. Ob diese Zustände in der Praxis tatsächlich so existieren wie von der Theorie vorausgesagt, wurde bisher allerdings noch nicht experimentell verifiziert. Es könnte gut sein, dass die Experimentalphysiker den Ball schon bald wieder zurückspielen werden.

Auch Wegscheider ist überzeugt, dass es noch eine ganze Weile dauern wird, bis ein Quantencomputer nützliche Probleme ausserhalb der Quantenphysik lösen kann. «Vor drei Jahren war ich noch skeptisch, doch inzwischen bin ich ziemlich sicher, dass das gehen wird», meint er. «Wenn man bedenkt, dass man mit solchen Maschinen wirklich grundlegende Probleme lösen kann, ist der ganze Aufwand, der nun weltweit betrieben wird, wirklich gerechtfertigt.»

Welcher Ansatz sich letztlich durchsetzen wird, ist heute noch offen. Vielleicht liegt die Lösung auch darin, verschiedene Ansätze miteinander zu kombinieren, also beispielsweise Halbleiter mit supraleitenden Schaltkreisen zu verbinden. «Wenn man diese beiden Technologien zusammenführt, dann entstehen plötzlich Quasi-Teilchen, so genannte Majorana-Fermionen, die vermutlich ebenfalls weniger fehleranfällig sind», meint Wegscheider. An der Verbindung von unterschiedlichen Quantensystemen arbeitet auch Yiwen Chu, Assistenzprofessorin für hybride Quantensysteme. «Es gibt eine ganze Reihe von Quantenobjekten wie Photonen, Ionen oder eben supraleitende Schaltkreise. Alle haben ihre spezifischen Stärken, aber auch ihre Nachteile», erklärt sie. «Die Frage ist nun: Wie verbinden wir diese Elemente, damit wir ihre Stärken kombinieren können?»

DIE LÜCKE ÜBERBRÜCKEN Als Vorbild dienen ihr die klassischen Computer. Dort werden Informationen beispielsweise von Silizium-Prozessoren verarbeitet und von Glasfasern transportiert. In Quantensystemen könnten supraleitende Schaltkreise die Informationen verarbeiten und Photonen sie übertragen. «Doch leider zeigt sich, dass die beiden Quantenobjekte einander nicht so gut verstehen», sagt Chu. Es braucht einen Vermittler, der die Lücke überbrückt. Ein möglicher Kandidat, den Chu mit ihrer Gruppe näher untersucht, sind kleine Kristalle, die sich als mechanische Objekte über akustische Schwingungen mit beiden Seiten verständigen. Gleichzeitig stellt sich die Frage, ob diese Kristalle selbst nicht auch Quanteninformationen speichern und verarbeiten könnten. «Da die Kristalle mit akustischen Schwingungen arbeiten, die viel lang-

samer sind als Lichtwellen, können wir mit ihnen kleinere Qubits bauen», erläutert die Physikerin. Dabei geht es ihr nicht primär darum, möglichst viele Qubits auf einer bestimmten Fläche unterzubringen. Der Vorteil ist vielmehr, dass die Kristalle sich leichter voneinander isolieren lassen als beispielsweise supraleitende Schaltkreise, was ungewollten Informationsverlust verhindert. Und das wiederum würde helfen, die Fehleranfälligkeit zu reduzieren. Die grösste Herausforderung ist, dass die Systeme technisch immer komplexer werden, je mehr Qubits man miteinander verbindet. «Wir verbringen viel Zeit mit der Technik rund um die eigentlichen Quantensysteme», sagt die Forscherin. Eine reine Ingenieuraufgabe sei die Entwicklung von Quantencomputern dennoch nicht. «Es gibt auch viele ungeklärte physikalische Fragen.» Eine davon ist beispielsweise, ob es zwischen der klassischen Welt und der Quantenwelt einen kontinuierlichen oder einen abrupten Übergang gibt. «Wir wissen die Antwort noch nicht definitiv», meint Chu. «Aber wie auch immer sie lautet: Für uns Physikerinnen und Physiker bleibt die Sache in beiden Fällen sehr spannend.» ○

JONATHAN HOME ist Professor für Experimentelle Quantenoptik und Photonik.
—> tqi.ethz.ch

WERNER WEGSCHEIDER ist Professor für Festkörperphysik.
—> mbe.ethz.ch

YIWEN CHU ist Assistenzprofessorin für hybride Quantensysteme.
—> hyqu.ethz.ch

Teleportation

Verschränkung

Die Zustände von zwei Quantenteilchen können verschränkt sein. Verändert sich der Zustand eines Teilchens, verändert er sich auch beim anderen.



ALBERT EINSTEIN nannte die Verschränkung «spukhafte Fernwirkung».



Unendlich weit



QUANTEN-COMPUTER



Die Quantenteleportation spielt zum Beispiel bei Quantencomputern eine wichtige Rolle. Materie wird allerdings auch hier nicht teleportiert.

Bei der Quantenteleportation beeinflussen sich verschränkte Quantensysteme gegenseitig – ohne Zeitverzögerung und auch über unendlich weite Distanz.



Damit die Teleportation in der Quantenwelt funktioniert, müssen zunächst zwei Teilchen miteinander verschränkt sein. Verschränkt sich nun eines davon mit einem dritten Teilchen, beeinflusst dessen Zustand gleich beide der ursprünglichen Teilchen.



Quantencomputer fordern die Informatik heraus

Lange prägten Theorie und Hardware die Entwicklung der Quantencomputer. Nun rücken zunehmend Fragen der Programmierung, Software und Sicherheit in den Vordergrund.

TEXT Florian Meyer

Lange Zeit waren Quantencomputer ein Ansinnen von Physikern. Zu Beginn der 1980er-Jahre fragte sich einer ihrer bekanntesten Vertreter, Richard Feynman (1918–1988), ob man die Phänomene der Quantenphysik überhaupt je mit einem klassischen Computer werde effizient berechnen und simulieren können. Die Rechengeschwindigkeit digitaler Computer reiche nicht, um die typischen Quanteneffekte, die innerhalb von Atomen oder Molekülen oder zwischen Elementarteilchen auftraten, innert nützlicher Frist zu berechnen und zu simulieren, stellte er fest.

Als Erster schlug Feynman damals vor, einen Quantencomputer zu bauen, der nicht auf digitaler Codierung beruht, sondern direkt die Quantensysteme nachahmt. Seine Schlüsselidee, die bis heute die Entwicklung von Quantencomputern beflügelt, war, dass sich gewisse Eigenschaften der Quantenmechanik für die Computerberechnungen nutzen

liessen. Das betrifft namentlich die Tatsache, dass sich Quantenzustände von Teilchen überlagern oder verschränken können.

Zum Beispiel nutzen Quantencomputer das Überlagerungsphänomen aus: Anders als digitale Computer rechnen sie nicht mit Binärcodes oder Bits, die Information nur als 0 oder 1 verarbeiten, sondern mit Quantenbits oder Qubits. Der entscheidende Unterschied ist, dass Qubits pro Rechenschritt ausser 0 oder 1 einen dritten Zustand realisieren können, in dem sich die beiden überlagern. Dadurch lassen sich Berechnungen für bestimmte Anwendungen beschleunigen.

Quantencomputer bergen das grosse Versprechen, dass sie in Zukunft bestimmte Probleme effizient lösen werden, die klassische Rechner nicht innert nützlicher Frist berechnen. Man spricht auch von «Quantenüberlegenheit». Abschliessend bewiesen ist die Quantenüberlegenheit noch nicht, in

jüngster Zeit sind jedoch wichtige technische Fortschritte erzielt worden: Google schaffte es 2019, erstmals die Quantenüberlegenheit in einem konkreten Rechenbeispiel umzusetzen. Ihr Quantencomputer benötigte gemäss eigenen Angaben nur 200 Sekunden für eine Berechnung, für die ein herkömmlicher Computer rund 10 000 Jahre gebraucht hätte.

SICHERHEITSSCHLÜSSEL KNACKEN Noch sind die Quantencomputer zu klein und zu fehleranfällig, um die Digitalrechner ernsthaft in Bedrängnis zu bringen. Selbst Googles Quantencomputer bewies seine Überlegenheit erst für ein hochspezielles Problem. Dennoch haben die Quantentechnologien nun einen Stand erreicht, bei dem sich längst nicht nur Physikerinnen und Physiker an ihrer Weiterentwicklung beteiligen. Viele Informatikerinnen und Informatiker seien heute «quantenneugierig», sagt zum Beispiel ETH-Informatikprofessor Kenneth Paterson. Er forscht im Gebiet der Kryptografie und entwickelt Ansätze, wie sich Information sicher verarbeiten, übermitteln und speichern lässt. «In meinem Forschungsgebiet sind wir «quantenbewusst», denn seit zehn Jahren ist Quantenrechnen ein wichtiges Thema der Kryptografie», fährt Paterson fort: «Sobald man einen hinreichend grossen und zuverlässig rechnenden Quantencomputer hat, ist die gesamte gegenwärtig im Internet verwendete Kryptografie nicht mehr sicher, denn mit Quantenrechnen lassen sich Sicherheitscodes knacken.»

Die Verschlüsselungs- und Sicherheitstechniken, die heute im Internet zum Einsatz kommen, wenn sich jemand in sozialen Netzwerken einloggt, in Onlineshops etwas kauft, E-Banking betreibt oder E-Mails verschickt, beruhen auf Verfahren der sogenannten ganzzahligen Faktorisierung und damit zusammenhängenden Problemen. Unter ganzzahliger Faktorisierung versteht man die Zerlegung einer grossen, zusammengesetzten Zahl in einzelne Teiler. Diese Zerlegung ist enorm rechenaufwändig, weshalb es bis heute keinen Algorithmus gibt, also keine Rechenvorschrift, mit der ein digitaler Computer eine Faktorisierung effizient berechnen

kann. Doch 1994 gelang es dem Mathematiker Peter Shor, einen speziell für Quantencomputer verfassten Algorithmus zu formulieren, der die Teiler einer zusammengesetzten Zahl eindeutig schneller findet als klassische Algorithmen. Die Ideen von Shor können verwendet werden, um die anderen Formen der Kryptografie mit öffentlichen Schlüsseln zu knacken, die heute verwendet werden.

Auf den kleinen, fehleranfälligen Quantencomputern von heute ist der Shor-Algorithmus noch nicht umsetzbar. Im Prinzip ist jedoch klar, dass jeder Quantencomputer, der leistungsstark und zuverlässig genug ist, um den Shor-Algorithmus laufen zu lassen, die Faktorisierungen innert nützlicher Frist berechnen kann. Von dem Moment an, in dem das der Fall sein wird, sind Verschlüsselungen mittels Faktorisierung und ähnliche verbreitete Verfahren unsicher. Das betrifft zwar nicht die gesamte Kryptografie. Die Sicherheit von Verfahren, die Information ausschliesslich mit Geheimschlüsseln schützen, wird davon nicht ernsthaft tangiert. Gefährdet sind die Public-Key-Verschlüsselungsverfahren, die Information mit einem öffentlichen Schlüssel schützen. Über 90 Prozent des Internetverkehrs sind damit gesichert.

IDEEN ÜBERSETZEN Um Sicherheitsschlüssel zu knacken, sagt Paterson, bräuchten Quantenrechner jedoch Millionen von Qubits. An der ETH Zürich verfügen die Quantenrechner derzeit über bis zu 17 Qubits, und rein entwicklungsbezogen befindet sich die Forschung an der Schwelle zu einer Phase der mittelgrossen, immer noch fehleranfälligen Quantenrechner mit 50 bis 100 Qubits. «Die heute begrenzte Rechenleistung der Quantencomputer könnte plötzlich sehr schnell überbrückt werden. Ausserdem dauert es mindestens zehn Jahre, um die aktuelle Public-Key-Kryptografie zu verändern. Darum bereiten wir uns jetzt vor», erklärt Paterson, dessen Gruppe einen neuen Quantensicherheitsalgorithmus mitentworfen hat, der in einem laufenden weltweiten Wettbewerb zur Auswahl neuer, quantensicherer Algorithmen geprüft wird. →

«Mit Quantencomputern ist die heute im Internet verwendete Kryptografie nicht mehr sicher.»

Kenneth Paterson

Benjamin Bichsel wird manchmal gefragt, ob seine Forschung vielleicht umsonst war, wenn sich eines Tages herausstellt, dass es grosse und zuverlässige Quantencomputer gar nie geben werde. Bichsel antwortet: «Das ist nicht die Frage. Ich frage mich vielmehr, was wir machen, wenn Quantencomputer wirklich gut funktionieren, wir aber nicht wissen, wie man sie effizient programmiert.» Er arbeitet in der Forschungsgruppe von Martin Vechev, die die erste intuitive, höhere Programmiersprache für Quantencomputer entwickelt hat.

Um das Potenzial der Quantencomputer auszuschöpfen, braucht es eigene Programmiersprachen. «Quantenprogrammiersprachen spielen eine entscheidende Rolle, um Ideen in Anweisungen zu übersetzen, die ein Quantencomputer ausführen kann», schrieben Microsoft-Forschende 2020 in der Wissenschaftszeitschrift *Nature*, unter ihnen auch Bettina Heim und Matthias Troyer, die vormals am ETH-Institut für Theoretische Physik forschten. Heute lehnen sich die Quantenprogrammiersprachen stark an die Hardware an. Solche «Hardwarebeschreibungssprachen» fokussieren auf das Verhalten der Schaltkreise und deren Optimierung. Die Programmiersprache Silq hingegen, die Martin Vechevs Gruppe entwickelt hat, abstrahiert von den technischen Details: «Silq ist die erste höhere Quantenprogrammiersprache, die sich nicht primär an der Bau- und Funktionsweise der Hardware orientiert, sondern an der Denkweise der Programmierenden, die ein Problem lösen wollen», sagt Benjamin Bichsel.

Seit der Lancierung von Silq ist gut ein Jahr vergangen. Neben der Eleganz und inneren Folgerichtigkeit, die Silq als erste höhere Quantenprogrammiersprache auszeichnet, erhielten Martin Vechev und sein Team viel Anerkennung für ihren innovativen Beitrag zur Fehlerreduktion beim Quantenrechnen. In einem weiteren Artikel erwähnte *Nature* explizit, dass in Silq die sogenannte «Uncomputation» automatisch erfolgt, «anstatt die Programmierenden zu zwingen, diese mühsame Arbeit manuell zu erledigen». Jeder Computer be-

rechnet eine Aufgabe in mehreren Zwischenschritten. Dabei entstehen Zwischenergebnisse, sogenannte temporäre Werte. Um den Arbeitsspeicher zu entlasten, werden diese Werte bei klassischen Computern automatisch entfernt. Bei Quantencomputern ist diese Entsorgung wegen der Quantenverschränkung nicht so einfach: Die früheren Rechenwerte können mit den aktuellen in Wechselwirkung treten und die korrekte Berechnung stören. Entsprechend wichtig ist die automatische Entfernung der temporären Werte für das Quantenrechnen.

COMPUTER GANZHEITLICH VERSTEHEN Ob sich Silq gegenüber den Quantenprogrammiersprachen der Technologiekonzerne Microsoft, IBM und Google – Q#, Qiskit und Cirq – behaupten kann, steht noch auf einem unbeschriebenen Blatt. Immerhin ist es Vechevs Team gelungen, die automatische Uncomputation auf Qiskit zu übertragen. «Es ist sehr ermutigend, dass sich zentrale Konzepte von Silq auf andere Sprachen übertragen lassen. Zumal die automatische Uncomputation das Quantenrechnen mit Qiskit effizienter macht», sagt Martin Vechev.

Langfristig betrachtet geht es weniger darum, dass Informatiker Sprachen und Software schreiben für Hardware, die Physiker entwickeln, als vielmehr darum, Programmiersprachen Hand in Hand mit Quantenalgorithmen, Quantenhardware, Quantensoftware, Quantenanwendungen und Workflows zu entwickeln. «Damit Quantenrechnen wirklich Realität wird, müssen wir diesen neuen Rechenansatz in ganze Computersysteme integrieren, in denen viele Komponenten zusammenarbeiten, um bestimmte Probleme effizient zu lösen», schliesst Paterson. Martin Vechev ist überzeugt: «Die ETH Zürich hat hier einen Vorteil, weil sie Quantenphysik, Quantentechnologie und Quanteninformatik unter einem Dach vereint.» ○

KENNETH PATERSON ist Professor für Computer Science am Institut für Informationssicherheit, wo er die Gruppe für Angewandte Kryptografie leitet.
—> appliedcrypto.ethz.ch

MARTIN VECHEV ist Professor am Institut für Programmiersprachen und -systeme und leitet die Forschungsgruppe The Secure, Reliable, and Intelligent Systems Lab (SRI).

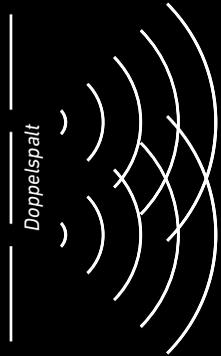
BENJAMIN BICHSEL ist Doktorand in dieser Forschungsgruppe.
—> sri.inf.ethz.ch

Doppelspalt-Experiment

Lichtquelle



Doppelspalt



Muster auf dem Schirm

UNTER BEOBACHTUNG

Direkte Messungen beeinflussen das Quantensystem, weil der Beobachter Teil des Systems ist.

03

Dualismus



▶ Werden Quantenobjekte durch einen Doppelspalt geschossen, treffen sie als einzelne Teilchen hinten auf dem Schirm auf – jeder Treffer ein Zufall. Statt zwei heller Streifen bildet sich ein Interferenzmuster, wie es typisch ist für Wellen.



WELLEN + TEILCHEN

Das Doppelspalt-Experiment zeigt, dass sich Quantenobjekte sowohl wie Wellen als auch wie Teilchen verhalten können – zwei Eigenschaften, die sich in der klassischen Physik ausschließen.



Meistern, was es noch nicht gibt

Vor zwei Jahren startete die ETH Zürich den neuartigen Masterstudiengang Quantum Engineering. Nun steht der erste Jahrgang vor dem Studienabschluss.

TEXT Martina Märki

Derzeit intensivieren Unternehmen und Forschungszentren auf der ganzen Welt ihre Aktivitäten, um das Anwendungspotenzial der Quantenmechanik zu erschliessen. Um das dafür erforderliche Fachpersonal auszubilden, entstand an der ETH Zürich ein Masterstudienprogramm, das in seiner interdisziplinären Ausrichtung auch international viel Beachtung fand.

Der Masterstudiengang Quantum Engineering wurde gemeinsam vom Departement Informationstechnologie und Elektrotechnik und dem Departement Physik der ETH realisiert, um Quantenphysik und Ingenieursdisziplinen zusammenzubringen. «Wir waren wohl nicht die Einzigen, die darüber nachgedacht haben, aber wir gehörten zu den Ersten, die diese Fusion wirklich glaubhaft durchgeführt haben», sagt Lukas Novotny, Programmdirektor des Studiengangs. «Nun werden wir vielerorts als das Modellprogramm betrachtet.»

Novotny ist Professor für Photonik am Departement Informationstechnologie und Elektrotechnik und als Programmdirektor dafür verantwortlich, dass der Studiengang hält, was er verspricht. Und das ist nicht wenig: Quantum Engineering ist ein neues Feld an der Schnittstelle von Quantenphysik, Elektrotechnik und IT. Es nutzt die Gesetze der Quantenphysik, um Technologien zu entwickeln, die klassische Ingenieursansätze übertreffen. Dabei werden Quantentechnologien die klassischen Ingenieurparadigmen in der Computer-, Informationsverarbeitungs- und Messtechnik grundlegend verändern. Entwickeln und anwenden können sollen diese neuen Technologien die zukünftigen Quanteningenieurinnen und Quanteningenieure.

IN BEIDEN PERSPEKTIVEN DENKEN Eine von ihnen ist Anja Ulrich. Sie gehört zum ersten Jahrgang, der vor zwei Jahren das neue Masterstudium begann, und ist mit einem Bachelorabschluss als Elektroingenieurin in den Studiengang eingetreten. Derzeit absolviert sie gerade ein Praktikum bei imec in Belgien, dann will sie ihre Masterarbeit starten. Imec ist ein Forschungsunternehmen auf dem Gebiet der Nano- und Digitaltechnologien und forscht auch an Quantentechnologien. «Die Gruppe, der ich hier angehöre, besteht hauptsächlich aus Physikern», erzählt sie. Die grössten Probleme bei den Quantentechnologien lägen derzeit aber nicht im Bereich der Physik, sondern im Engineering. Entsprechend gefordert ist Ulrich. «Ich musste schon eine steile Lernkurve hinlegen», schmunzelt sie, «aber das ist wohl immer so, wenn man aus dem Studium in die Welt der Praxis kommt.»

Der Masterstudiengang Quantum Engineering hat sie darauf vorbereitet, als Ingenieurin auch die Sprache der Physiker zu verstehen: «Man lernt,

in beiden Perspektiven zu denken.» Manchmal hätte sie sich zwar gewünscht, dass die Physik noch etwas praxisnäher vermittelt worden wäre, räumt Ulrich ein. Insgesamt fällt ihr Fazit jedoch positiv aus: «Meine Erwartungen an den Studiengang wurden definitiv erfüllt», sagt Ulrich. «Da ich aus dem Elektroingenieurwesen komme und immer auch ein sehr grosses Interesse an der Physik hatte, war meine Hoffnung, mehr über die Physik zu lernen, ohne den Bezug zum Engineering zu verlieren.» Auch der umgekehrte Fall ist vorgesehen. «Studierende, die vom Engineering herkommen, arbeiten sich im ersten Studienjahr etwas mehr in die Quantenphysik ein, Studierende, die aus der Physik kommen, haben erst mal mehr elektrotechnische Fächer», erläutert Novotny. Am Ende sollen die Studierenden nicht nur die Prinzipien und die Sprache des jeweils anderen Fachgebiets verstehen, sondern daraus auch etwas Neues, Anwendbares schaffen können.

Dabei war bei der Konzeption des Studiengangs allen klar, dass man nicht einfach ein Doppelstudium mit doppeltem Pensum konstruieren kann. «Wir konzentrieren uns sowohl in der Physik wie auch in den Ingenieurfächern auf diejenigen Gebiete, die für das Quantum Engineering wirklich relevant sind», erklärt Novotny. Dennoch sind die Anforderungen an die Studierenden hoch. «Natürlich bewegt man sich aus seiner Komfortzone heraus, wenn man diesen Studiengang wählt,» sagt Ulrich. «Aber das Faszinierende ist doch, dass Quantum Engineering für alle Neuland ist.» Das Gefühl, in einem Gebiet tätig zu sein, das eine technische Revolution auslösen könnte, sei sehr motivierend. Diese Beobachtung macht auch Novotny: «Das Studium fordert sehr viel, aber die Studierenden meistern das. Sie sind ja gewissermassen Pioniere und das beflügelt sie.» Der Zusammenhalt der Studierenden untereinander ist in den Augen von Ulrich ein weiteres grosses Plus. So hat sie sich von Anfang an intensiv im neugegründeten Fachverein eingebracht. Unterstützung bei Prüfungsvorbereitungen, fachlicher Austausch und Kontakte zur Industrie stehen dort ebenso auf dem Programm wie soziale Events.

PIONIERE AUF ERFOLGSKURS Die erste Generation von Quanteningenieurinnen und -ingenieuren steht nun am Ende des Masterstudiums, die dritte Generation nimmt in diesem Herbst ihr Studium auf. Seither hat sich die Zahl derjenigen, die ein Masterstudium Quantum Engineering jeweils in Angriff nehmen, nahezu verdoppelt. Ein deutliches Zeichen dafür, dass der Studiengang auf ein grosses Bedürfnis trifft. «Das ist ein erfreuliches Erfolgszeichen», sagt Novotny. Und eine Herausforderung, vor allem auf der strukturellen und administrativen Ebene. Man müsse jetzt gut überlegen, wie

«Das Faszinierende ist, dass Quantum Engineering für alle Neuland ist.»

Anja Ulrich

man den Studiengang aus der Pionierphase in einen steady state überführen könne. So soll unter anderem auch ein Netzwerk von Industriepartnern zur Unterstützung aufgebaut werden. «Ich möchte, dass Quantum Engineering ein Gebiet mit Bodenhaftung wird», sagt Novotny.

Die Berufsaussichten für die Absolventinnen und Absolventen seien sicherlich gut. Wirklich beurteilen könne man den Erfolg aber erst, wenn die jungen Absolvierenden einige Zeit im Berufsleben verbracht hätten, fügt Novotny vorsichtig hinzu. Anja Ulrich ist jedenfalls optimistisch: «Ich sehe ein breites Betätigungsfeld vor mir. Es gibt zudem noch nicht so viele Leute, die hier wirklich qualifiziert sind.» Und das Potenzial, etwas zu bewegen, etwas zu entdecken oder etwas zu verändern, sei relativ gross. «Man hat vielleicht die Chance, etwas Neues zu implementieren und nicht nur an einem kleinen Rad zu schrauben.» Was könnte begeisternder sein? ○

ANJA ULRICH gehört zur ersten Generation der Studierenden des Masterstudiengangs Quantum Engineering.

LUKAS NOVOTNY ist Programmdirektor des Masterstudiengangs Quantum Engineering und Professor am Departement Informationstechnologie und Elektrotechnik.

Masterstudiengang Quantum Engineering:
—> master-qe.ethz.ch

«Die Entwicklung hat etwas von einem Hightech-Race.»

Wie berechtigt ist die Goldgräberstimmung um die Quantentechnologien? ETH-Vizepräsidentin Vanessa Wood und Quantenforscher Andreas Wallraff erörtern, wo wir heute auf dem Weg in die Praxis stehen.

INTERVIEW Martina Märki und Corinne Johannssen

Kürzlich wurde der ETH-Spin-off Zurich Instruments von der deutschen Unternehmensgruppe Rohde & Schwarz übernommen. Was ist bemerkenswert daran?

VANESSA WOOD: Das war eine grossartige Nachricht! Eine Firma, die mit einem Nischenprodukt begann, ist nun für einen grossen Elektronik-Anbieter interessant geworden. Das zeigt, dass der Bedarf an Instrumenten für Quantentechnologie einen breiteren Markt erreicht hat. Und es bestätigt den Trend, den wir allgemein bei Investitionen in diesen Bereich sehen.

ANDREAS WALLRAFF: Rohde & Schwarz ist ein grosses Unternehmen. Ihre Motivation für den Kauf war sicher, dass sich Zurich Instruments in den

letzten Jahren in der Instrumentierung für Quantentechnologie zunehmend etabliert hat. Rohde & Schwarz haben zwar Produkte, die man im erweiterten Umfeld auch nutzen kann, aber sie hatten dieses Gebiet bisher noch nicht wirklich adressiert. So war es für das Unternehmen eine gute Gelegenheit, durch den Kauf eines ETH-Spin-offs in dieses Feld einzusteigen. Aber auch für uns als Labor ist das eine wichtige Nachricht, weil wir mit Zurich Instruments schon seit acht Jahren gemeinsame Projekte machen.

Kann man an diesem Beispiel eine aktuelle Tendenz für das Feld ablesen?

WOOD: Die Übernahme von Zurich Instruments durch Rohde & Schwarz ist Teil einer Entwicklung, die wir beobachten, bei der gut etablierte Grossunternehmen in der Computerwelt oder im Bereich Elektronik Investitionen in Quantentechnologie tätigen, um sich als Akteur in diesem Bereich zu positionieren.

WALLRAFF: Es gab während den letzten fünf Jahren einen sehr starken Schub mit grossen Investitionen in neue und nicht ganz neue Start-ups in diesem Bereich. Insgesamt hat sich das Feld auch stark verbreitert. So gibt es inzwischen auch viel mehr Gelegenheiten, Jobs im Quantenumfeld zu finden, sowohl bei Firmen in der Schweiz wie auch international.

Sind wir denn heute generell an dem Punkt, wo man sagen kann, dass wir jetzt übergehen von der Quantentheorie in die Anwendung?

WALLRAFF: Es hat ja schon verschiedene Übergänge gegeben. Die Quantenphysik selbst ist schon mehr als 100 Jahre alt. Dinge wie Transistoren, Laser oder MRI wären ohne Quantenphysik gar nicht denkbar. So gesehen hat Quantenphysik auch heute schon viele Anwendungen. In den späten

1980er-Jahren kamen dann theoretische Ideen auf, die Quantenphysik in der Informationstechnologie, für Computer oder für sichere Kommunikation oder für bessere Sensorik zu verwenden. In den späten 1990er-Jahren hat man dann auch mit experimenteller Forschung begonnen, erste Realisierungen von solchen Systemen zu machen. Dann gab es eine Phase des experimentellen Fortschritts und die Erwartungen wurden grösser. Und jetzt sind wir tatsächlich in einer Phase des Übergangs von der Grundlagenphysik zu wirklichen Anwendungen.

Wie eng sind dabei die Beziehungen der ETH zur Industrie?

WOOD: Derzeit laufen viele Zusammenarbeiten auf der Basis von Innosuisse- und EU-Projekten. Mit dem neu gegründeten Quantum Center, das von Andreas Wallraff geleitet wird, bauen wir ein Partnership-Council auf, sodass Industriepartner, ETH-Forschende und Studierende von einer noch engeren Interaktion profitieren können.



ANDREAS WALLRAFF ist Professor für Festkörperphysik und Leiter des Quantum Device Lab an der ETH Zürich. Er ist zudem Gründungsdirektor des neu gegründeten Quantum Center der ETH Zürich und leitet den Bau von supraleitenden Quantencomputern am ETH Zürich – PSI Quantum Computing Hub an. —> qudev.phys.ethz.ch

Welche Industriebereiche haben Sie da besonders im Auge?

WOOD: Wir hoffen, dass die grossen internationalen Technologieunternehmen wie Google, IBM, Microsoft, aber auch Start-up-Unternehmen wie Rigetti Computing und IQM daran interessiert sein werden. Dann gibt es die Bereiche, welche potenzielle Anwender dieser Quantentechnologie sein werden, wie zum Beispiel Internetsicherheit.

WALLRAFF: Ich persönlich finde auch Anwendungen in der Chemie-, Pharma- oder Biotechnologie sehr interessant, wie zum Beispiel die Entwicklung von Katalysatoren, biologisch und chemisch aktiven Substanzen oder Medikamenten. Das sind Dinge, die wie der Quantencomputer selbst vielleicht noch weit in der Zukunft liegen, aber wo Quantencomputer wirklich einen Vorteil bringen könnten. Wenn man zum Beispiel ein kompliziertes Molekül in der Chemie berechnen möchte, dann löst man eigentlich ein Quantenphysikproblem.

Das klingt sehr interdisziplinär. Wie interdisziplinär ist denn das Quantum Center derzeit?

WALLRAFF: Im Moment gibt es 28 Gründungsmitglieder. Die kommen aus den Departementen Physik, Chemie und Angewandte Biowissenschaften, Elektrotechnik und Informationstechnologie, Informatik, Materialwissenschaften, Maschinenbau und Verfahrenstechnik und aus dem Paul Scherrer Institut. Es ist wichtig, den interdisziplinären Aspekt zu fördern, weil in der Tat jetzt der Übergang passiert zwischen Grundlagenforschung – da gibt es immer noch viel zu tun! – zu den Anwendungen von Quantentechnologie. Und diese Anwendungen —>



VANESSA WOOD ist seit 2021 Vizepräsidentin für Wissenstransfer und Wirtschaftsbeziehungen der ETH Zürich. Zudem ist sie Professorin und Institutsleiterin am Institut für Elektronik (IfE) der ETH Zürich. —> ethz.ch/vp-wissenstransfer

«Die ETH hat gezielt in den Quantenbereich investiert.»

Vanessa Wood

passieren eben nicht nur in der Physik, sondern möglicherweise vornehmlich sogar in anderen Bereichen, nämlich in der Chemie, in der Materialwissenschaft, in der Informatik. Deshalb liegt uns viel daran, auch Studierende in Fächern ausserhalb der Physik anzusprechen, beispielsweise mit dem Masterstudiengang Quantum Engineering.

Wie konkurrenzfähig ist die Schweiz im Quantenbereich?

WOOD: Die Schweiz ist extrem konkurrenzfähig. Seit 2011 läuft das nationale Forschungsprogramm Quantum Science & Technology (QSIT), das die Forschenden in der Schweiz auf diesem Gebiet zusammengebracht hat. Der Erfolg der Schweiz zeigt sich ebenfalls an der rekordhohen Zahl an Professoren, die an Horizon-2020-Projekten beteiligt sind, sowie an den vielen Projekten, die durch Drittstaaten, beispielsweise die USA, finanziert werden und bei denen die ETH und andere Schweizer Forschungsgruppen zur Teilnahme eingeladen wurden. Der Abbruch des Rahmenabkommens mit der EU stellt jetzt eine Herausforderung dar. Wir müssen nun Wege finden, um sicherzustellen, dass Schweizer Forschung weiterhin attraktiv bleibt für Partnerschaften in diesen Forschungsprogrammen.

WALLRAFF: Die Schweiz ist ein kleines Land, hat aber trotzdem einen starken Einfluss auf die Entwicklung in den Quantentechnologien. Die Situation um die Quantentechnologie und deren Nutzung hat etwas von einem Hightech-Race. Jetzt müssen wir schauen, wie wir uns in Zukunft positionieren können.

Wo liegen die Gründe für die gute Positionierung der ETH in den Quantenwissenschaften?

WOOD: Es war schon lange ein strategisches Interesse der ETH, sich hier gut zu positionieren. Unser Beitrag hierzu sind Investitionen in Personen wie auch in neueste und modernste Infrastruktur und Ausrüstung. Wir können uns übergänglich

schätzen, an der ETH auf Professoren zählen zu dürfen, die weltweit zu den Topexperten in allen diesen Schlüsseltechnologien für Quantencomputer gezählt werden – zum Beispiel supraleitende Schaltkreise, Photonik, um nur zwei davon zu erwähnen. Die ETH hat die Schaffung eines Masters in Quantum Engineering stark gefördert – das erste solche Programm in ganz Europa. Das ETH+ Programm hat das Quantum Center unterstützt, das auch durch die ETH Foundation gefördert wird, und die ETH hat zusammen mit dem PSI den Quantum Computing Hub gebildet, dessen Ziel es ist, die Herausforderungen der Skalierung von Quantencomputern anzugehen.

WALLRAFF: Als ich 2005 meine Entscheidung treffen durfte, wo es mit meiner Karriere weitergehen würde, war mir wichtig, an einen Ort zu gehen, wo man die Dinge auch realisieren kann. Quantenforschung ist ein Hightech-Gebiet und dafür braucht es eine aufwändige Infrastruktur und die richtigen Ressourcen, um überhaupt Fuss zu fassen. Die ETH hat es geschafft, den Schwung über Jahre hinweg aufrechtzuerhalten und ein kontinuierliches Wachstum hinzulegen, und das zahlt sich aus. Ich bin überzeugt, dass wir diesen Schwung auch weiterhin haben werden. ○

FÖRDERFOKUS QUANTUM CENTER

Um die Spitzenposition der ETH Zürich in der Quantenforschung weiter zu stärken und nutzbar zu machen, baut die ETH gemeinsam mit dem Paul Scherrer Institut (PSI) das neue Quantum Center auf. Die Unterstützung von Donatorinnen und Donatoren ermöglicht die Weiterentwicklung von Technologiegrundlagen für die Herstellung von Quantencomputern, ein Doktoratsprogramm sowie neue Professuren.

—> ethz-foundation.ch/quantum

Weitere Quantenforschende im Video finden Sie unter:

—> ethz.ch/globe-21-03



Videos: Nicole Davidson

Potenzialtopf

Gefangen! Klassische Teilchen können nur nach oben gelangen, wenn ihre Energie dazu gross genug ist.



help

!?



▶ Quantenteilchen können unüberwindbare Barrieren überwinden – als ob sie wie Superhelden durch ein Hindernis tunneln würden. Die Wahrscheinlichkeiten dafür können aber extrem klein sein.



04

Tunneleffekt



Kernfusion Sonne

Protonen stossen sich gegenseitig ab. Der Tunneleffekt ermöglicht es ihnen, diese Abstoßung zu überwinden und zu verschmelzen. Riesige Energiemengen werden dabei freigesetzt.



Das Ganze ist das Wahre

Die Quantenphysik öffnet uns die Augen für eine ganzheitliche Sicht der Wirklichkeit. Nichts lässt sich isoliert betrachten – und es regiert der Zufall. Ein philosophisches Stück.

TEXT Christoph Elhardt

Normalerweise gehen wir davon aus, dass die uns umgebenden Objekte unabhängig von uns oder anderen Objekten existieren. Wir können ein Glas als wohldefiniertes Objekt betrachten und seine chemischen oder physikalischen Eigenschaften im Labor untersuchen. Kennen wir zudem alle Umwelteinflüsse, die auf das Glas einwirken, können wir sein Verhalten für jeden beliebigen Zeitpunkt vorhersagen. Der Wissenschaft steht eine Wirklichkeit gegenüber, die aus klar abgegrenzten Objekten besteht und mit wissenschaftlichen Instrumenten vermessen und letztlich kontrolliert werden kann. Von der Dampfmaschine bis zur Glühbirne beruhen weite Teile des wissenschaftlichen Fortschritts auf dieser Vorstellung. Die klassische Physik mit den Gesetzen der Newton'schen Mechanik, der Elektro- und der Thermodynamik hat sie in überprüfbare Naturgesetze gegossen.

Doch zu Beginn des 20. Jahrhunderts geriet dieses deterministische Weltbild zunehmend ins Wanken. Physiker wie Max Planck, Albert Einstein oder Nils Bohr zeigten, dass die klassische Physik bei der Beschreibung von Atomen oder Elementarteilchen versagt. In der Welt des mikroskopisch Kleinen, so schien es, gelten fundamental andere Gesetze.

DAS ENDE DES DETERMINISMUS «Die Quantenphysik bricht mit der Vorstellung einer in Subsysteme zerfallenden, deterministischen Wirklichkeit», erklärt ETH-Professor Hans Christian Öttinger. Er forscht am Departement für Materialwissenschaft zur Quantenfeldtheorie und befasst sich mit den philosophischen und erkenntnistheoretischen Implikationen der Quantentheorie. «In der Welt der subatomaren Teilchen können Dinge nicht mehr isoliert betrachtet werden, da alles miteinander korreliert sein kann», so der Physiker.

Misst oder beobachtet man ein System von Elektronen, Photonen oder anderen kleinsten Teilchen, tritt man unweigerlich mit ihm in Wechselwirkung und wird zu einem Teil eines grösseren Gesamtsystems. In diesem Sinn untersuchen wir keine unabhängige Wirklichkeit, sondern auch jene Veränderungen, die durch Messungen oder andere Interventionen unweigerlich ausgelöst werden. Doch damit nicht genug. Ist vermeintlich zufälliges Verhalten in der klassischen Physik ein Produkt mangelnder Informationen oder fehlerhafter Messungen, wird es in der Quantentheorie zum Prinzip erklärt. «Unser quantenphysikalisches Bild der Welt des Kleinsten zeigt klar, dass es echten Zufall in der Welt gibt», sagt Öttinger.

DER DOPPELSPALTVERSUCH Der sogenannte Doppelspaltversuch illustriert dies eindrücklich. Schiesst man Photonen aus einer Lichtquelle auf einen Detektorschirm, landen diese zufällig über einen weiten Bereich verteilt an unterschiedlichen Punkten, obwohl sie unter gleichen physikalischen Bedingungen abgefeuert wurden. Keinerlei Muster sind erkennbar. Es herrscht Zufall. Schiesst man dagegen mehrere Kugeln unter exakt gleichen Umweltbedingungen aus einer Pistole ab, schlagen diese zuverlässig immer am selben Ort ein. Schiebt man nun eine Trennwand mit zwei parallel angeordneten, gleich grossen Spalten zwischen die Lichtquelle und den Detektorschirm, bildet sich ein streifenförmiges Muster auf dem Schirm. Dieses Interferenzmuster kann mathematisch mit einer Wellenfunktion beschrieben werden, die es Physikern erlaubt, die Wahrscheinlichkeit, mit der Teilchen an gewissen Orten auftreffen, zu bestimmen. In der Welt der Quanten ersetzen probabilistische Aussagen den Determinismus der klassischen Physik. Doch das Experiment hält eine weitere Überraschung bereit: Bringt man an jedem der beiden Spalte zusätzlich einen Detektor an, der misst, durch welchen Spalt sich die Photonen jeweils bewegen, ändert sich das Muster auf dem Schirm erneut.

Für ETH-Professor Öttinger ist dies nicht weiter unerwartet: «Indem wir Trennwand und Detektoren in das Experiment einfügen, verändern wir die Welt, die wir beobachten wollten. Sie interagieren mit den Photonen und beeinflussen ihr Verhalten.» Diese Einsicht gilt auch für andere Elementarteilchen. Weder ganze Atome noch einzelne Elektronen lassen sich messen, ohne sie dabei in einem grösseren Gesamtsystem zu sehen. Doch warum sind dann grosse Objekte wie ein Glas isoliert beobachtbar, wenn alles miteinander korreliert ist? Für theoretische Physiker wie Öttinger sind hier Dekohärenz-Effekte am Werk: «Die wechselseitigen Korrelationen klingen bei grösseren Objekten schnell ab. Dadurch können wir ein Glas oder einen Stein einzeln untersuchen, ohne deren Interaktionen mit der Umwelt berücksichtigen zu müssen.»

KOMPLEMENTARITÄT UND WIDERSPRÜCHE

So plausibel Öttingers Ausführungen zum holistischen Charakter von Quantensystemen und zur Dekohärenz erscheinen mögen, stehen sie doch im Widerspruch zur dominanten, anfangs von Nils Bohr geprägten Lesart der Quantentheorie, der Kopenhagener Interpretation. Nach dieser Interpretation beschreibt die Quantenmechanik nicht die Realität, sondern einen Wissenszustand über die Realität. Bohr nahm an, dass jedes quantenphysikalische Objekt stets sowohl Wellen- als auch Teilcheneigenschaften aufweist. Im Fachjargon ist vom Komplementaritätsprinzip oder vom Welle-Teil-

chen-Dualismus die Rede. Dementsprechend wird das streifenförmige Interferenzmuster aus dem Doppelspaltversuch als Indiz dafür gesehen, dass sich Photonen tatsächlich wie Wellen durch die beiden Spalte bewegen. Misst man nun diese Bewegung mit einem Detektor, kommt es zu einem Kollaps der Wellenfunktion. Die Photonen werden dann als diskrete Teilchen auf dem Schirm sichtbar.

Für Öttinger und andere Physiker wirft diese Lesart mehr Fragen auf, als sie beantwortet. Sollen wir davon ausgehen, dass sich Teilchen wellenartig bewegen? Steht diese Annahme nicht im Widerspruch zur Behauptung des Kollapses? Was genau verstehen wir in der Quantenphysik überhaupt unter einem Teilchen? Und können sich diese wirklich auf Bahnen bewegen?

QUANTENFELDTHEORIE Öttinger zufolge zwingen uns solche Fragen dazu, klassische Begriffe wie Teilchen, Welle oder Bewegung aufzugeben. Er selbst sieht in der Quantenfeldtheorie den vielversprechendsten Ansatz zur grundlegenden Erklärung von Quantenphänomenen, obwohl deren robuste und anschauliche Formulierung grosse Probleme aufwirft. In der Quantenfeldtheorie können jederzeit neue Teilchen entstehen und verschwinden. Anstatt von Teilchen spricht der Physiker lieber von Wolken oder Schwärmen von Teilchen, die erst ab einer gewissen Auflösung als einzelne Teilchen erkennbar sind. Unterhalb dieser Grenze sind sie verschmiert, ähnlich wie bei einem Bild, bei dem die einzelnen Pixel erst beim Hineinzoomen sichtbar werden, wobei die genaue Pixelauflösung für das Gesamtbild gar keine Rolle spielt.

Ob dieses Bild der Quantenwelt letztlich überzeugender ist, wird wohl noch länger Anlass zu Diskussionen geben. Die Anwendungen der Quantentheorie sind dennoch längst Bestandteile unseres Alltags. Nur ganz zu verstehen scheinen wir den zu Grunde liegenden mathematischen Formalismus bis heute nicht. Dazu müssten wir bereit sein, neue Erkenntnisse in unsere Erfahrungswelt zu integrieren. ○

HANS CHRISTIAN ÖTTINGER ist Professor für Polymerphysik am Departement für Materialwissenschaft der ETH Zürich
→ polyphys.mat.ethz.ch

COMMUNITY



ETH-Präsident Joël Mesot unterhält sich mit dem «Digitalen Einstein».

Bild: Nicole Davidson

Mit Einstein im Gespräch

Als sich ETH-Präsident Joël Mesot auf den Lehnstuhl im grössten Hörsaal der ETH sinken lässt, sitzt ihm ein unerwarteter Gast gegenüber. Der Schnurrbart und das zerzauste Haar machen ihn zu einer der bekanntesten Persönlichkeiten des 20. Jahrhunderts. Aber so wie bei der Vergabe des diesjährigen Rösslerpreises hat man ihn noch nie gesehen: als digitalen Charakter, der Fragen stellt, gestikuliert und Mesot gegenüber unumwunden feststellt, dass er sich keinen schlimmeren Job vorstellen könne, als Präsident zu sein. Die Rede ist von keinem Geringeren als Albert Einstein.

Die Idee für den «Digitalen Einstein» stammt von ETH-Professor Markus Gross und seinem Team. «Anlässlich des 100-Jahr-Jubiläums von Einsteins Nobelpreis für Physik wollten wir zeigen, dass wir technologisch in der Lage sind, den berühmtesten Alumnus der ETH als animierten Charakter zum Leben zu erwecken», erklärt Gross.

EINE SPIN-OFF-ENTWICKLUNG Der «Digitalen Einstein» wurde vom ETH-Spin-off Animatico in Zusammenarbeit mit Forschenden der ETH entwickelt. Der Schweizer Komiker Karpi lieh Einstein seine Stimme, erstellte die Inhalte und erarbeitete gemeinsam mit einem digitalen Künstler das Aussehen der animierten 3D-Figur.

«Ein digitaler Charakter wie Einstein, der sein Gegenüber sehen, hören und mit ihm interagieren kann, wird von einem komplexen algorithmischen System angetrieben», sagt Christian Schüller, einer der drei Gründer von Animatico. Die dynamische Visualisierung der Figur und die Sprachverarbeitung sind dabei Schlüsseltechnologien. Damit Einstein potenzielle Gesprächspartner erkennt und ihnen Fragen stellen kann, scannt eine kleine Kamera Bewegungen und Reaktionen. Sobald das Gegenüber zu sprechen beginnt, filtern Mikrofone die Stimme des Gesprächspartners aus den Umgebungsgeräuschen heraus. Das Gesprochene wird anschliessend in Text verwandelt und von einer Sprachverarbeitungssoftware analysiert. Mit Hilfe

maschinellen Lernens erkennt diese die Intention des Gesagten, worauf ein Dialogalgorithmus die angemessenste Antwort sowie Mimik und Gestik aus dem vordefinierten Universum aller möglichen Reaktionen berechnet.

EINSTEIN MUSS NOCH VIEL LERNEN Aktuell müssen alle möglichen Antworten und Reaktionen von Einstein vorab von Entwicklern definiert werden. Dies ermöglicht zwar eine Kontrolle der Inhalte entlang vorgegebener Erzählstränge, schränkt aber gleichzeitig den Gesprächsfluss ein. «In Zukunft werden sicherlich auch offenere Gespräche möglich sein», sagt ETH-Professor Gross. «Dafür müssen digitale Figuren wie Einstein aber Zugriff auf eine Wissensbasis haben und selbstlernend werden. Ferner benötigen sie ein Arbeitsgedächtnis und Emotionen. Die dafür benötigten Anwendungen maschinellen Lernens und der Sprachverarbeitung sind im Moment aber noch zu wenig ausgereift.»

Digitale Charaktere wie Einstein bieten die Chance, die Interaktion von Menschen mit Maschinen intuitiver zu gestalten und auch für technisch

weniger versierte Menschen oder Menschen mit Einschränkungen zugänglicher zu machen. Eingesetzt werden können animierte Figuren zum Beispiel beim Ticketkauf, beim Hotel-Check-in, bei der Produktberatung, aber auch als virtuelle Coaches im Gesundheitsbereich. — Christoph Elhardt ○

Den «Digitalen Einstein» findet man zum Semesterstart ab dem 22.9. im Hauptgebäude der ETH Zürich. Studierende, Mitarbeitende und Besucher der ETH haben dann bis Mitte Oktober Gelegenheit, sich selbst mit Einstein zu unterhalten und mehr über seine Zeit als Student und Professor an der ETH zu erfahren.



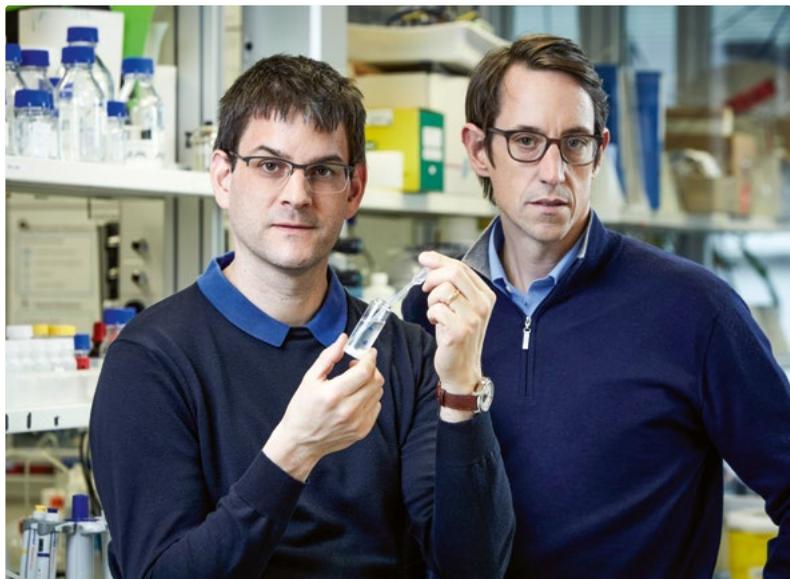
Bild: Florian Meyer

Andreas Krause (links) und Preis-Stifter Max Rössler

Für maschinelles Lernen geehrt

Andreas Krause, Professor am Departement Informatik, zählt zu Europas führenden Forschern für maschinelles Lernen und hat den diesjährigen Rössler-Preis, den höchstdotierten Forschungspreis der ETH Zürich, gewonnen. Der Rössler-Preis 2021, den er am «Thanks Giving»-Anlass der ETH Foundation erhalten hat, honoriert wegweisende Leistungen. «Andreas Krause ist ein exzellenter Forscher, ein engagierter Dozent und hat sich als junger Wissenschaftler bereits etliche Meriten geholt in einer der prägendsten Technologien des 21. Jahrhunderts», sagte ETH-Präsident Joël Mesot in seiner Laudatio.

Der ETH-Alumnus Max Rössler vermachte 2008 der ETH Foundation zehn Millionen Franken. Mit dem Zins aus diesem Vermögen stiftet er einen jährlichen Förderpreis für ETH-Professorinnen und Professoren in der Expansionsphase ihrer Forschungskarriere. Der Preis ist mit 200 000 Franken dotiert. ○



Wendelin Stark (links) und Robert Grass,
Gewinner des Europäischen Erfinderpreises 2021

Europäischer Erfinderpreis

Das Europäische Patentamt hat die ETH-Professoren Robert Grass und Wendelin Stark mit dem Europäischen Erfinderpreis 2021 in der Kategorie Forschung ausgezeichnet. Sie sind Pioniere im Verkapseln von DNA. Ihre Technologie, mit der im genetischen Code gespeicherte Daten in winzigen Glaskugeln eingeschlossen werden, bietet eine neuartige Methode der Informationsspeicherung. Um die enorme Anwendungspalette ihrer neuartigen Technologie zu demonstrieren, codierten die Forscher unter anderem die erste Staffel der Netflix-Serie «Biohackers» in DNA. Das ETH-Spin-off Haelixa vermarktet die Speicherethode mit glasumhüllter DNA kommerziell. Dank der Erfindung können Edelsteine, Gold oder Bio-Baumwolle gekennzeichnet werden und lassen sich so über die Lieferkette hinweg zuverlässig nachverfolgen. ○

Zum achten Mal in Folge in Top Ten

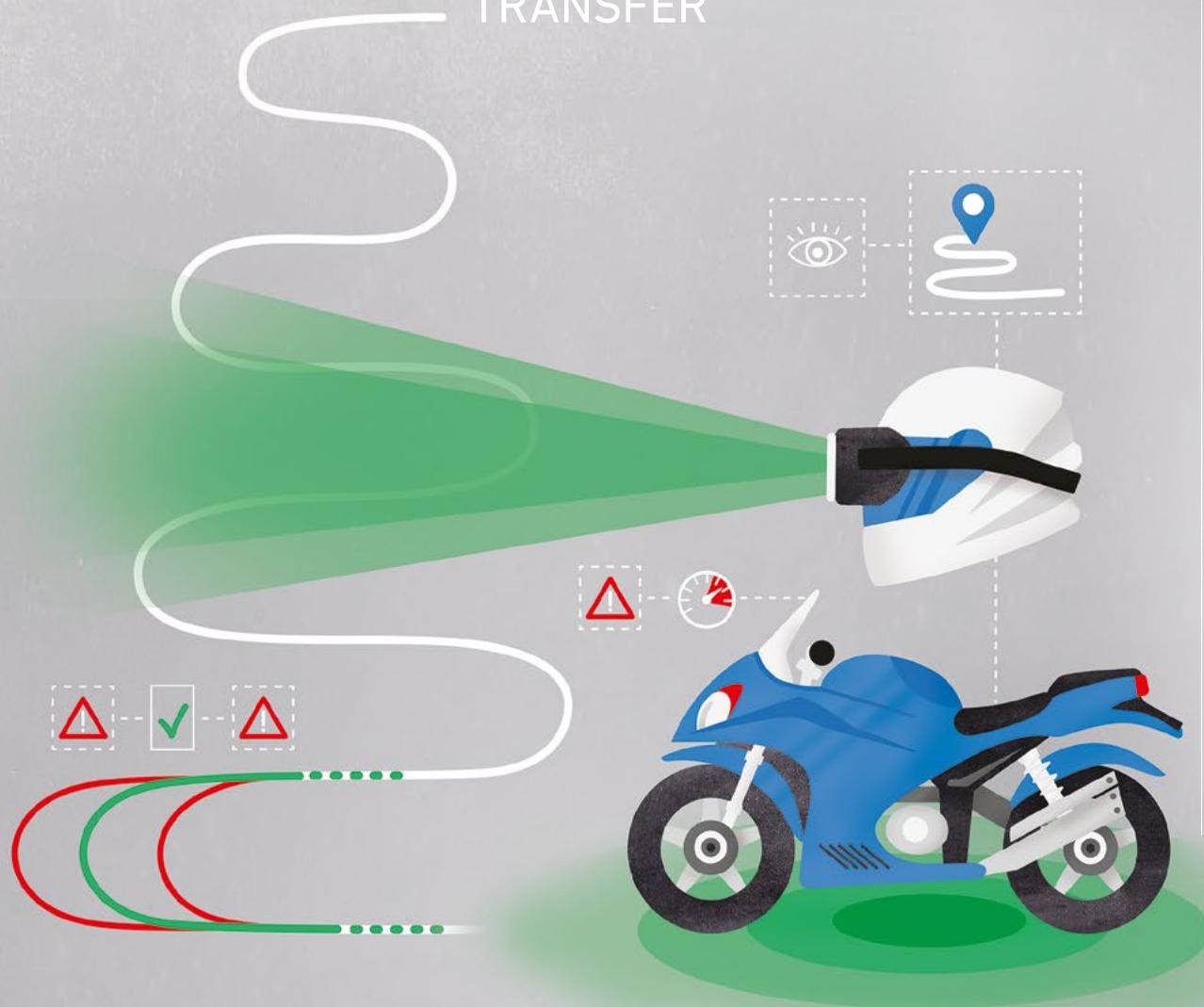
Unter mehr als 1650 Hochschulen weltweit erreicht die ETH Zürich im QS World University Ranking für 2022 den achten Platz. Laut QS gehört die ETH Zürich damit zum achten Mal hintereinander zu den zehn besten Hochschulen der Welt. Während die Hochschule ihre Gesamtpunktzahl im Vergleich zum Vorjahr von 95 auf 95,4 Punkte (von maximal 100) steigern konnte, verlor die ETH Zürich aufgrund der starken Konkurrenz in der Rangliste zwei Plätze. Sie wurde von der University of Cambridge und dem Imperial College überholt und teilt sich nun den achten Rang mit dem University College London. Die ETH Zürich bleibt zum vierzehnten Mal in Folge die beste Hochschule Kontinentaleuropas. ○

Alumni Neugründungen

Die ETH Alumni Vereinigung hat eine weitere Mitgliederorganisation in China: Claire Zhang und Hanyu Qin gründeten das Chapter Shenzhen Alumni. Claire Zhang absolvierte ihren Master in Energy Science and Technology, Hanyu Qin doktorierte im Departement für Biosysteme. Beide leben in Shenzhen, Chinas Zentrum für Technologie und Innovation.

Caya Gharibian, Alessandra Pfister und Leonie Perren gehören zu den ersten ETH-Absolventinnen des Bachelors in Humanmedizin. Sie führen aktuell ihr Studium in Basel, Lugano respektive Zürich weiter, um als Ärztinnen abzuschliessen. Sie gründeten die Humanmedizin Alumni, um eine gemeinsame Plattform für alle ETH-Absolventinnen und -Absolventen des Bachelors Humanmedizin zu bieten. ○

TRANSFER



Sicherer fahren mit schlauer Technologie

Motorradfahrende haben ein vielfach höheres Risiko, einen tödlichen Unfall zu erleiden, als Autofahrende. Besonders gefährlich sind Kurven. ETH-Forschende um Simon Hecker, Pioneerfellow 2019, möchten die Situation mit intelligenter Sicherheitstechnologie verbessern.

Aegis Rider Technology kombiniert die jüngsten Fortschritte in den Bereichen Computer Vision, Mapping und Steuerungstheorie, um die Sicherheit beim Manövrieren durch Kurven zu verbessern. Kameras, maschinelles Lernen und Kartografie-Techniken helfen, die sicherste Bahn durch eine Kurve zu berechnen. Diese wird auf eine im Motorradhelm integrierte Augmented-Reality-Brille übertragen. So wird der Lenker oder die Lenkerin auf dem opti-

malen Weg durch die Kurve geführt. Lenkende werden zudem gewarnt, wenn ihre Geschwindigkeit zu hoch ist. Und sie erhalten Hinweise, um die richtige Neigung und die richtige Position im Kurvenverlauf zu finden.

Aktuell wird das Produkt im Rahmen eines Start-ups weiterentwickelt und auf den Markt gebracht. ○

Aegis Rider Technology: Start-up
Gegründet: 2020
Produkt: Sicherheitstechnologie für Motorräder

→ aegisrider.com

«Unsere Forschenden dürfen nicht die Leidtragenden sein.»



Bild: Markus Bertschi

Detlef Günther, Vizepräsident
für Forschung an der ETH Zürich

Der Abbruch des Rahmenabkommens hat Folgen. Die EU behandelt die Schweiz bei den Eingaben von Forschungsprojekten für Horizon Europe und damit verbundenen Programmen nun als nicht assoziierten Drittstaat.

Als Teilnehmer aus einem nicht assoziierten Drittstaat können sich Forschende und Innovatoren in der Schweiz zwar weiterhin auf Ausschreibungen für Verbundprojekte bewerben, bei denen Drittstaaten teilnahmeberechtigt sind. Finanziert werden diese dann nicht durch die Europäische Kommission, sondern direkt vom Staatssekretariat für Bildung, Forschung und Innovation (SBFI). Allerdings können Teilnehmende aus nicht assoziierten Drittstaaten keine Koordinationsaufgaben in Verbundprojekten übernehmen. Die Teilnahme an Einzelprojekten ist für Forschende eines nicht assoziierten Drittstaats prinzipiell nicht möglich. Für die 2021er-Ausschreibungen der ERC Starting Grants und der ERC Consolidator Grants gilt eine Ausnahmeregelung: Forschende mit einem erfolgreich evaluierten ERC Starting oder Consolidator Grant erhalten eine Direktfinanzierung vom SBFI. Doch Forschungsgelder sind nur ein Aspekt der aktuellen Situation. Sorgen bereitet Detlef Günther, Vizepräsident für Forschung der ETH Zürich, vor allem auch die zukünftige Stellung der Schweiz in der internationalen Forschergemeinschaft.

Detlef Günther, die Schweiz wird bei Horizon Europe aktuell als nicht assoziierter Drittstaat behandelt. Was bedeutet das für die ETH Zürich?

Für die ETH Zürich ist die vollasoziierte Teilnahme der Schweiz am grössten Forschungsförderprogramm der Welt von zentraler Bedeutung. Seit 2007 haben ETH-Forschende insgesamt über 500 Millionen Franken vom Europäischen Forschungsrat (ERC) erhalten, um ihre Projekte voranzutreiben. Dass wir als ETH von einem grossen Teil dieser Förderprogramme ausgeschlossen sind, ist für mich unfassbar. Ich bedauere diese Entwicklung wirklich sehr.

Fehlt der ETH nun Geld für Forschung?

Die Finanzen sind nur ein Aspekt. Da sind wir jetzt auf eine zusätzliche Unterstützung des Bundes angewiesen. Viel wichtiger bei Horizon Europe sind aber die internationale Zusammenarbeit und der Wettbewerb unter den besten Hochschulen Europas. Diesem Wettbewerb können sich unsere Forschenden nun nur noch sehr beschränkt stellen. Damit verliert die Schweiz als Arbeitsort für Spitzenforschende an Attraktivität. Oder vereinfacht gesagt: Wir dürfen nicht mehr in der Champions League mitspielen und müssen uns mit der Schweizer Liga zufriedengeben.

Im Fussball würden in diesem Fall wohl einige Spieler den Club wechseln ...

Und genau das droht nun auch in der Forschung: Dass die klügsten Köpfe nicht mehr in die Schweiz kommen oder die Schweiz sogar verlassen, wenn wir längerfristig nur ein bisschen mitspielen dürfen und keine Führungsposition übernehmen können. Dadurch geht wichtiges Know-how verloren und natürlich würde auch die Schweizer Wirtschaft darunter leiden.

Welchen Einfluss hat der Entscheid auf die internationalen Forschungs Kooperationen?

Momentan findet bei uns rund die Hälfte aller internationalen Kooperationen mit Ländern der EU statt. Und auch für die anderen Schweizer Hochschulen ist Europa der wichtigste internationale Partner. Die Zusammenarbeit mit anderen europäischen Universitäten wird nun aber zur Herkulesaufgabe – Verträge müssten jeweils einzeln ausgearbeitet werden, was Zeit kosten, den Forschungsbetrieb verlangsamen und die Attraktivität der Schweizer Hochschulen als Forschungspartner bedeutend schmälern wird.

Was erwarten Sie in Zukunft?

Kurzfristig helfen uns die Überbrückungsmassnahmen durch das SBFJ. Unsere Forschenden dürfen nicht die Leidtragenden der politischen Verhandlungen mit der EU sein. Längerfristig ist es für den Forschungsstandort Schweiz zentral, dass die Entscheidungsträger die Verhandlungen mit der Europäischen Union mit allen Kräften vorantreiben und wieder eine vollassozierte Teilnahme der Schweiz an Horizon Europe ermöglichen. Ich bin überzeugt, dass es nicht nur im Interesse der Schweizer Hochschulen, sondern auch im Interesse aller europäischer Universitäten ist, dass die Schweiz mit ihrer Spitzenforschung wieder voll vertreten ist. Denn in Zeiten von massiven globalen Herausforderungen und bei einem zunehmenden Wettbewerbsdruck durch internationale Player ist es wichtiger denn je, dass Europa seine Kräfte in der Forschung bündelt. ○

PHILANTHROPIE

VON
Donald Tillman



Generationensolidarität aus Genf

Die Solidarität zwischen den Generationen wurde in jüngster Zeit viel diskutiert. Gerne teile ich ein leuchtendes Beispiel für diese vielbeschworene Solidarität mit Ihnen: Die ETH Foundation wurde unlängst von ETH-Alumnus Edwin Zurkirch kontaktiert, dem langjährigen Präsidenten der GEP Ortsgruppe Genf, einer 1910 gegründeten Alumni-Gruppierung. Weil deren Mitglieder in die Jahre gekommen sind, löst sich die Gruppe auf und wird sich neu formieren. Herr Zurkirch und seine Kollegen hatten die Idee, die verbleibenden Mittel aus der Vereinskasse für Stipendien für ETH-Studierende einzusetzen, die ursprünglich aus der Romandie stammen. Eine Absicht, die bei der ETH auf einen grossen Bedarf trifft, erhält doch jedes Jahr eine Vielzahl Studierender aus der Romandie aus schwierigen finanziellen Verhältnissen ein Stipendium. Das philanthropische Engagement der Genfer Gruppe ermöglicht, dass junge Menschen, die alle nötigen Voraussetzungen für ein ETH-Studium mitbringen, es sich ohne Unterstützung aber schlicht nicht finanzieren können, Zugang zur ETH erhalten. Generationensolidarität, wie sie sich schöner nicht zeigen könnte!

—> ethz-foundation.ch/sozialstipendien



Online
Informationsanlass
30. September 2021
mas-mtec.ethz.ch/info

Sind Ingenieure die besseren Manager? Davon sind wir überzeugt.

Absolventinnen und Absolventen der ETH Zürich zählen zu den gefragtesten Führungskräften in der Schweiz. Machen Sie den nächsten Schritt in Ihrer Karriere mit dem Master of Advanced Studies ETH in Management, Technology, and Economics – kurz MAS ETH MTEC.



**«Ich empfinde es als
meine Verantwortung,
etwas zurückzugeben.»**

**Christian Buess, Unternehmer
ETH Alumnus und Gönner ETH Foundation**

Die ETH hat sein Leben geprägt. Deshalb berücksichtigt Christian Buess die ETH Foundation in seinem Testament. Erfahren Sie mehr und bestellen Sie unsere Informationsbroschüre rund um das Thema Nachlässe:

www.ethz-foundation.ch/nachlass

PERSÖNLICH



SARAH HOFER
befasst sich mit
Lerntechnologien in
MINT-Domänen. Sie
untersucht, wie
Intelligenz, Vorwissen
oder Geschlecht
mit Lernerfolg und
Lehrmethoden
interagieren.

TEXT Karin Köchle

SARAH HOFER ist Assistenzprofessorin für Lernen und Technologie am Departement Geistes-, Sozial- und Staatswissenschaften.

→ gess.ethz.ch

Was ist die Herausforderung beim Vermitteln mathematisch-naturwissenschaftlicher Inhalte?

Viele dieser Inhalte sind sehr abstrakt. Darum braucht es anschauliche Modelle, die etwas sichtbar machen, das normalerweise nicht zu sehen ist. Manchmal erschweren auch Alltagserfahrungen das Verständnis: So widerspricht etwa das Trägheitsprinzip unseren Erfahrungen mit bewegten Objekten. Umso wichtiger ist es, eine Brücke von Alltagserfahrungen hin zu den wissenschaftlich korrekten Konzepten zu bauen.

Wie kann man die Chancengleichheit der Geschlechter in der Bildung erhöhen?

Eine Sensibilisierung für das Thema und Selbstmonitoring helfen Lehrenden, ihr – zum Teil unbewusst – voreingenommenes Verhalten gegenüber Lernenden unterschiedlichen Geschlechts zu überwachen und zu korrigieren. Bei der Bewertung von Leistungen tragen standardisierte Prozesse oder Anonymisierung dazu bei, einen möglichst objektiven Blick zu bewahren. Generell gilt: In einem Unterricht, der auf individuelle Voraussetzungen und Interessen eingeht, haben Studierende eher die Chance, ihr Potenzial zu entwickeln – unabhängig vom Geschlecht.

Was hat Sie bewogen, Psychologie zu studieren?

In meiner Facharbeit am Gymnasium habe ich das Verhalten und Erleben der Protagonisten in zwei dystopischen Romanen analysiert. Das hat mir unglaublich viel Spass gemacht und ich wollte noch mehr über menschliches Denken, Lernen, Fühlen und Handeln erfahren – wie es zustande kommt und welche Rolle die Umwelt und der Kontext dabei spielen.

Welche Lernerfahrungen prägten Sie auf Ihrem Karriereweg?

Ein wichtiger Schritt für mich war die Einsicht, dass ich mich nicht von dem grossen Druck auf junge Forschende mitreissen lassen darf. Man kommt sonst schnell in ein Hamsterrad, in dem man leicht vergisst, um was es eigentlich gehen sollte: um qualitativ hochwertige, sinnvolle Forschung und um kreative Ideen, was beides meist Zeit braucht und nicht am Reissbrett entsteht.

Was werden Sie an der ETH als Erstes in Angriff nehmen?

In einem Projekt werden wir Augmented Reality im Physikunterricht einsetzen. Wir möchten herausfinden, ob zusätzlich eingeblendete Hilfestellungen zu einem tieferen Verständnis beitragen können. ○



BAHNSCHOTTER IM BACHTOBEL

TEXT Felix Würsten
BILDER Daniel Winkler

REPORTAGE | In der Schweiz gibt es vielleicht bald einen Mangel an Hartschotter. Die Suche nach neuen Quellen führt die ETH-Geologen in weit abgelegene Gebiete.

Nach einem steilen Abstieg durch den Wald sind wir beim Fluss. Nahe beim wilden Chessiloch im hinteren Entlebuch stehen wir mitten im Feldgebiet von Maira Coray. Die Geologiestudentin der ETH Zürich nimmt in diesem Bachbett für ihre Bachelorarbeit ein Profil der Gesteinsabfolge auf und wird über eine Distanz von einigen hundert Metern alle Schichten im Detail erfassen. Maira ist heute zum dritten Mal hier. Sie wird von ihren Betreuern Lukas Nibourel und Stefan Heuberger von der Fachgruppe Georessourcen Schweiz am Departement Erdwissenschaften begleitet. Auch Stephan Wohlwend, wissenschaftlicher Mitarbeiter bei der Gruppe Klimageologie, der Maira bei der Auswertung der Proben berät, ist mitgekommen. Die drei erfahrenen Geologen unterstützen sie nicht nur fachlich, sondern helfen ihr heute auch, Proben für die Laboranalysen zu sammeln.

Für Maira ist die Arbeit der erste Schritt in die eigenständige geologische Tätigkeit. Sie lernt in dieser Arbeit, wie man im Gelände Gesteine untersucht und Messungen dokumentiert. Dabei merkt sie schnell: Die Aufnahme eines Profils in der Theorie und die praktische Feldarbeit sind zwei Paar Schuhe.

HOHER BEDARF Dass Lukas und Stefan Maira für diese Arbeit in dieses unwegsame Tobel schicken, hat einen handfesten Grund: Der Schweiz droht in den nächsten Jahren ein Engpass bei der Versorgung mit Hartschottern, jenen Gesteinen also, die den Gleisen der Eisenbahnen den notwendigen Halt geben. Obwohl die Schweiz viele harte Gesteine hat, erfüllen nur wenige die strengen Anforderungen. Hartschotter muss nicht nur hart und witterungsbeständig sein, er sollte auch unregelmässig, kantig brechen, damit sich die Steine im Gleisbett gut ineinander verkeilen. Ein Granit aus dem Aarmassiv erfüllt diese Kriterien nicht, Jurakalk auch nicht und die plattigen Gneise aus der Südschweiz schon gar nicht. Dabei ist der Bedarf hoch: Etwa alle dreissig Jahre wird der Bahnschotter erneuert, nach einem ausgeklügelten Schema, damit der dichte Fahrplan der Züge nicht aus den Fugen gerät. Ein grosser Teil des alten Schotters kann nochmals verwendet werden; der Rest findet zum Teil als Splitt für den Strassenbau weitere Verwendung. Ohne neue Gesteine wird es also schwierig. Doch an den heute bekannten Standorten lassen sich diese nicht in beliebigen Mengen gewinnen. Denn der Abbau kollidiert an vielen Orten mit anderen Interessen. Landschafts- und Naturschutz schränken die abbaubaren Mengen ein, auch der Siedlungsbau oder touristische Nutzungen – ein Problem, das sich übrigens auch beim Abbau von Kies und Zementrohstoffen stellt.

Hier beim Chessiloch wollen die Geologen eine Gesteinsformation untersuchen, die bisher noch nicht genutzt wird. «Die meisten Hartschotter stammen aus Kieselkalk», erklärt Lukas. «Doch vielleicht eignet sich dafür auch der Hohgant-Sandstein, den wir hier im Bachbett antreffen.» Dass in diesem Tobel dereinst ein Steinbruch stehen wird, daran ist allerdings nicht zu denken: Der Standort im Biosphärenreservat ist geschützt – und abgelegen. Weit und breit keine Strasse und keine Bahngleise, über die das Gestein abtransportiert werden könnte. Dennoch ist just diese Stelle für die Geologen von Interesse: «Hier können wir die gesamte Formation ohne Unterbruch erfassen», erläutert Stefan. «Dadurch sehen wir exemplarisch, in welchen Bereichen sich an anderen Orten, wo dieser Sandstein auch vorkommt, die abbauwürdigen Zonen befinden.»

DIE MÜHEN DER PRAXIS Bevor die eigentliche Feldarbeit beginnt, geht es nochmals ein Stück hinunter. Nun stehen wir am Fuss eines etwa zehn Meter hohen Wasserfalls. Der Hohgant-Sandstein bildet an dieser Stelle eine mächtige, leicht überhängende Felsbank. Maira zückt ihr Tablet und macht sich ein paar Notizen. Das Gerät nutzt sie auch, um die Ausrichtung der Gesteine zu messen. Die Messdaten zeichnet sie gleich auf der hinterlegten →

Karte ein. «Für gewisse Notizen ist das herkömmliche Feldbuch aber immer noch besser», erklärt sie. Stefan und Lukas machen sich derweil an die Arbeit: Mit grossen Hämmern dreschen sie auf den harten Fels ein, um Probestücke zu gewinnen. Eigentlich würde Maira gerne auch aus den höheren Bereichen der Felsbank eine Probe nehmen. Aber selbst für die Geologen, die sich flink durch das unwegsame Gelände bewegen, hängen diese Früchte zu hoch. Inzwischen kommt Stephan von unten hochgekraxelt. «Dort gibt es grosse Fossilien», erzählt er mit Freude. «Aber ich bin nicht sicher, ob ich die Basis gefunden habe.»

Tatsächlich ist den Forschern noch nicht ganz klar, wo sich die Grenze zur darunterliegenden Gesteinsschicht befindet. Wir machen uns auf den Weg, kämpfen uns nochmals durch unwegsames Gelände. Der Bach hat an dieser Stelle die harten Gesteine glatt poliert, die grossen Fossilien, die Stephan entdeckt hat, sind nun gut zu erkennen. «Hier könnte die Grenze sein», sinniert er mit Maira. Oder vielleicht doch nicht?

Ein Stück weiter unten werden wir fündig: Gleich bei der nächsten Felstreppe entdeckt Lukas die Grenze zwischen den braunen sandigen Gesteinen, zu denen auch der Hohgant-Sandstein gehört, und dem hellgrauen Schratzenkalk. Ein kleines Band von ein, zwei Zentimetern markiert den Übergang. «Hier fehlen bis 80 Millionen Jahre», meint Lukas lachend. «Der Schratzenkalk wurde vor etwa 125 Millionen Jahren abgelagert, die darüberliegenden sandigen Gesteine vor rund 45 Millionen Jahren.» Die Stelle, wo heute der rauschende Bach vorbeizieht, befand sich vor 45 Millionen Jahren also bereits einmal an der Erdoberfläche, bevor sie vom Meer überflutet wurde. Aus dem Hinterland führten derweil die Flüsse grosse Mengen an Quarzsand her, aus dem später der Hohgant-Sandstein entstand. Doch von woher kam dieser Sand? Vom nahe gelegenen Aarmassiv wohl kaum, denn dieses war damals noch von kalkhaltigen Sedimenten bedeckt. Vielleicht aus dem Schwarzwald? Doch bei einer so grossen Distanz müssten die kantigen Körner im Sandstein stärker abgerundet sein.

IM AUFTRAG VON SWISSTOPO Eigentlich wäre das eine spannende Forschungsfrage. Doch der Projektauftrag lässt kaum Spielraum, ihr nachzugehen, wie Lukas erklärt, der als Projektleiter die Fäden zusammenhält. «Das Bundesamt für Landestopografie swisstopo, das uns den Auftrag für diese Studie gab, ist im Rahmen dieses Projekts primär daran interessiert, wo es potenziell abbaubare Hartschotter gibt.» Eigentlich würde man erwarten, dass man in einem gut untersuchten Land wie der Schweiz inzwischen genau weiss, wo wie viel dieser besonders harten Gesteine abgebaut werden kann. Doch die vorliegenden Daten sind



teilweise lückenhaft. Angesichts der drohenden Knappheit gab die Landestopografie deshalb der Fachgruppe Georessourcen Schweiz den Auftrag, alle potenziellen Vorkommen systematisch zu erfassen.

In der Mittagspause erklärt Stefan die besondere Stellung der Fachgruppe, die er seit rund vier Jahren leitet. Diese wurde 2018 als Nachfolgerin der früheren Schweizerischen Geotechnischen Kommission ins Leben gerufen, die bereits seit Jahrzehnten an der ETH Zürich ihre Geschäftsstelle hatte. «Wir bekommen eine Grundfinanzierung von der swisstopo und der ETH Zürich, müssen einen Teil des Budgets aber durch Aufträge selber organisieren», erklärt Stefan. Die Gruppe friste eher ein Nischendasein: «Die Schweizer Geologie steht für die akademische Forschung an der ETH nicht mehr im Vordergrund», bedauert Stefan. «Dennoch ist es wichtig, dass dieser Bereich weiterhin gepflegt wird.» Die Fachgruppe führt nicht nur Projekte für Bundesämter und Fachstellen durch, sondern beteiligt sich mit Lehrveranstaltungen und Exkursionen auch an der Ausbildung der Studierenden. «Maira ist unsere erste Bachelorstudentin», hält

Stefan fest. «Es ist nicht ganz einfach, passende Untersuchungsgebiete zu finden. Denn die Studierenden haben nur wenig Zeit für diese Arbeit und wenn das Wetter so wie in diesem Frühjahr nicht mitspielt, wird es schnell einmal eng.»

SCHWERE FRACHT Beim Wiederaufstieg kehren wir zum Ausgangspunkt zurück. Hier, im mittleren Bereich des Profils, möchte Maira ebenfalls Proben entnehmen, auch wenn der Hohgant-Sandstein in diesem Bereich sich für einen Abbau sicher nicht eignen würde. Er besteht nun nur noch aus dünnen Bänken, die von tonigen Lagen unterbrochen werden. Während Stefan und Lukas sich wieder ans

1
Stefan Heuberger untersucht die Gesteine bereits im Feld akribisch auf ihre Zusammensetzung hin.

2
So praktisch elektronische Geräte sind: Maira Coray führt auch ein herkömmliches Feldbuch.

Hämmern machen, packt Maira einen Rückprallhammer aus dem Rucksack. Mit diesem Gerät wird üblicherweise der Zustand von Beton überprüft, aber man kann damit auch die Härte von Gesteinen im Feld bestimmen. Rund zehn Messungen in je zwei Richtungen muss Maira an verschiedenen Orten machen, damit sie ein einigermaßen zuverlässiges Bild bekommt.

Nachdem Stefan und Lukas die neuen Proben im Rucksack verstaut haben, geht es nochmals zwei Felsstufen weiter nach oben, denn Maira benötigt aus dem obersten Bereich, wo der Hohgant-Sandstein wieder aus dickeren Bänken besteht, auch noch Proben. Auch hier zeigt sich: Es ist im Feld gar nicht so einfach, Messungen vorschriftsgemäss durchzuführen. Denn im Gegensatz zu einer senkrechten Betonwand sind die Oberflächen der Gesteine nicht eben und ohne Weiteres zugänglich. «So sind eben die Bedingungen im Feld», meint Lukas lakonisch.

Etwa zwei Dutzend grosse Steine haben Maira und ihre Betreuer inzwischen eingepackt. Für die Studentin war es ein ergiebiger Tag, ist sie doch mit ihrer Feldarbeit ein gutes Stück weitergekommen. Nun geht es mit der schweren Fracht wieder den Hang hoch zurück zum Wanderweg und von dort zum Auto. Ist der Hohgant-Sandstein nun hart genug für die Bahn? Das lässt sich im Moment noch nicht sagen. Deshalb wird Maira die Proben an der ETH noch weiter untersuchen – unter klar definierten Bedingungen. ○



2



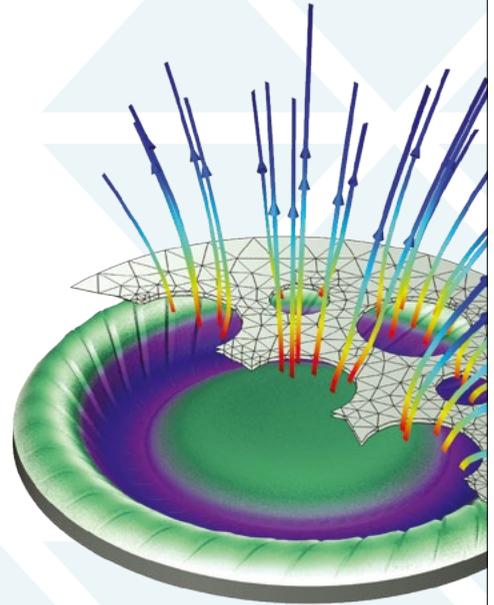
Was bringt **Multiphysik-Simulation** im Entwicklungsalltag?

Erfahren Sie gemeinsam mit anderen Ingenieuren und Simulationsspezialisten online, wie COMSOL Multiphysics® heute im Entwicklungsalltag Innovationen voran bringt.

KOSTENLOSE ANMELDUNG UNTER: comsol.ch/comsol-days

THEMEN UMFASSEN U. A..

- Umwelttechnik
- Flüssigkeiten und Wärme
- Mikro- und Nanotechnologien
- Korrosion und Elektroabscheidung
- Umwandlung und Speicherung Erneuerbarer Energie
- Hochspannung und Energiesysteme
- Und viele weitere!

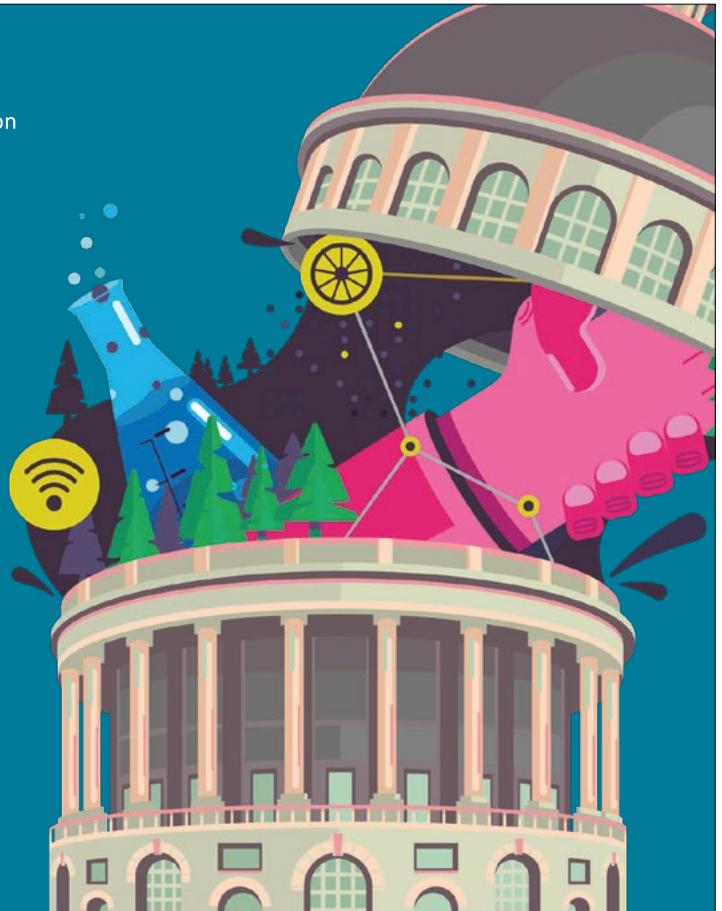


ETH zürich | School for Continuing Education

Inspired by the best

Weiterbildung für akademisch gebildete Fach- und Führungskräfte

MAS, DAS, CAS und Weiterbildungskurse auf www.sce.ethz.ch



ZU HÖHEREM BERUFEN

TEXT Leo Herrmann
FOTOGRAFIE Daniel Winkler

Manfred Hunziker trieb es stets in ganz verschiedene Richtungen, am beständigsten aber nach oben. Der ETH-Elektroingenieur hat weit über sechseinhalbtausend Berggipfel bezwungen. Der Aufstieg der Computertechnik zeichnete zugleich seine berufliche Laufbahn vor.

Der entscheidende Moment in seinem Leben, erzählt Manfred Hunziker, habe sich vor 58 Jahren ereignet, an einem Donnerstag im Winter 1963, kurz vor 16 Uhr. Eine Exkursion des ETH-Fachvereins AMIV hatte den damals 23-jährigen Elektrotechnikstudenten ans Europäische Forschungszentrum der IBM in Rüschlikon geführt. Die Führung durch das neu eröffnete Zentrum und besonders der Computer im Untergeschoss beeindruckten ihn. Folgenreich wurde der Ausflug beim Kaffee, als ein Teamleiter der Firma ein Praktikumsangebot als Programmierer erwähnte. Hunziker bewarb sich und erhielt die Stelle. In den folgenden Monaten sammelte er nicht nur wichtige Erfahrungen in der Welt der Rechenmaschinen, sondern auch mit dem Arbeitgeber, dem er bis zu seiner Pensionierung im Jahr 2000 treu bleiben sollte – obwohl Hunziker das damals noch nicht ahnte.

IN FREMDEN WELTEN Nach dem ETH-Diplom als Elektroingenieur zog es ihn, der im thurgauischen Märwil aufgewachsen war, nämlich zunächst über den Atlantik. «Der Ingenieur hat stets ein Ziel vor Augen», stellt Hunziker klar. In diesem Fall: ein «Master of Science in Electrical Engineering» am Georgia Tech, der ihm durch ein Stipendium ermöglicht wurde. Wie schon an der ETH zeigte Hunziker sich auch in Atlanta sehr engagiert, was sich in seinen Noten niederschlug und sich auch beim Besuch der Recruiter aus der Industrie gegen Ende des Schuljahrs positiv auswirkte. Die rare und darum begehrte Computererfahrung in seinem Lebenslauf tat ihr Übriges: Hunziker wurde von verschiedenen Firmen in den USA zu Vorstellungsgesprächen eingeladen, auch von der IBM. Deren Recruiter sandte seine Unterlagen wiederum an die Schweizer Niederlassung der Firma. «Bald kam ein interessantes Stellenangebot in der Kundenbetreuung, und etwas Heimweh hatte ich auch», erinnert sich Hunziker. Der nächste Schritt war vorgezeichnet.

Darauf angesprochen, was er aus der Studienzeit mitgenommen habe, nimmt Hunziker den Fokus weg vom Fachlichen: Er, ein «Hinterwäldler»,

sei an der ETH erstmals unter die Leute gekommen, habe gelernt, sich in fremden Welten zu bewegen. Damit spricht er das freitägliche Biertrinken an der Bahnhofstrasse an, aber auch sein Engagement als Verlagsleiter im Fachverein, wo er mitunter gar zum Aktivisten wurde. Als der Studierendenverband von den ETH-Studierenden eine Gebühr von sechs Franken für die Finanzierung eines Berghauses in Klosters einführen wollte, stellten Hunziker und sein Fachverein sich quer: Mit einem von ihm verfassten Flugblatt mit dem Titel «Dein Geld – wohin?» sowie einer Unterschriftensammlung konnte die drohende Zwangsabgabe verhindert werden. Einige der Kommilitonen, die mit von der Partie waren und ihn teilweise zu solchen Aktionen angestachelt hätten, wie er schmunzelnd sagt, sieht er heute, mit 81 Jahren, noch regelmässig. Zweimal im Jahr trifft man sich im gemütlichen Rahmen zu einem ausgedehnten Imbiss. Die Gruppe dünne sich altersbedingt leider langsam aus, meint Hunziker, aber ein gutes Dutzend komme meistens noch zusammen, um sich «immer wieder die alten Geschichten» zu erzählen. Die ETH, die ihm damals zu einem Stipendium für seinen Master in den USA verhalf, unterstützt Hunziker heute via ETH Foundation finanziell mit einem Beitrag an die Exzellenzstipendien.

AUSGLEICH IN DER HÖHE Obwohl die Stelle bei IBM ihm bis zur Pensionierung Freude machte, nahm sie Hunziker doch nie vollständig ein. Sein Ehrgeiz trieb ihn stets in verschiedene Richtungen. Inspiriert durch einen Werkstudenten in seinem Team, reifte bei ihm mit Anfang dreissig der Gedan-

MANFRED HUNZIKER Der ETH-Elektroingenieur und Jurist arbeitete bis zu seiner Pensionierung bei IBM Schweiz in der Kundenbetreuung. Er ist leidenschaftlicher Bergsteiger, hat über 6500 Gipfel bezwungen und rund 250 Bergtouren geführt. Er ist aufgewachsen in Märwil (TG) und lebt heute in Zürich.

ke, das Arbeitspensum zur Hälfte zu reduzieren und daneben eine zweite Ausbildung anzufangen. Seine Wahl fiel auf die Rechtswissenschaft. «Ein Anwalt oder Richter geht im Prinzip ähnlich vor wie ein Ingenieur. Ihm wird ein Fall präsentiert, den es nach klaren Regeln zu lösen gilt», sagt Hunziker. Der Vorsprung auf seine Mitstudierenden in punkto Studien- wie auch Lebenserfahrung sei ihm dabei zugute gekommen. Die vertiefte Beschäftigung mit der Jurisprudenz gefiel ihm so gut, dass er dem Abschluss noch eine Dissertation zum Urheberrecht folgen liess. Das erworbene Wissen nutzte Hunziker unter anderem bei seiner Arbeit für die Zeitschrift «UFITA», für die er gegen hundert wissenschaftliche Werke zum Urheberrecht besprach.

In der Freizeit, die ihm neben Beruf und Studium blieb, suchte Hunziker den Ausgleich nicht in der Entspannung, sondern in der Herausforderung. Seine grösste Leidenschaft gilt dem Bergsteigen. Getreu seinem Leitspruch durfte auch hier ein klares Ziel nicht fehlen: Hunziker ist ein Gipfelsammler. Angefangen hatte alles mit dem Buch «Die Berge der Schweiz» von Herbert Maeder. Hunziker setzte sich mit 28 Jahren in den Kopf, alle der rund 2400 im Buch aufgeführten Gipfel zu besteigen. «Der Ingenieur rechnet aus», erklärt er: «60 Berge pro Jahr, 40 Jahre lang – das müsste klappen.» Hunziker war schneller als berechnet. Mit 65 Jahren fehlten nur noch 97 meist unbedeutende Gipfel, die ihn nicht mehr reizten. Ein neues Ziel musste

her. Die Schweiz war für Hunzikers Sammelwut zu klein geworden, das erweiterte Lebensprojekt reichte nun von Nizza bis Triest, über den jeweils höchsten Gipfel aller Berggebiete im gesamten Alpenkranz. Auch dieses Projekt hat er abgeschlossen. Die wenigen Gipfel, die übrig sind, waren ihm nicht attraktiv genug – oder zu schwierig. Hunziker ist ehrgeizig, aber vernünftig. Er erzählt von einem Gipfel in den Dolomiten, von dem er nur noch 50 Meter entfernt war, als er umkehrte. Allein und ungesichert schien ihm das letzte Stück zu gefährlich: «Da fällt man schnell locker tausend Meter hinunter.» Das Klettern sei ohnehin nie seine Stärke gewesen, führt er aus. Er wählte grundsätzlich die einfachsten Routen, absolvierte anspruchsvollere meist mit Bergführer. Heute zählt die Gipfelsammlung weit über 6500 Exponate.

HOCHHAUSTREPPE ALS TROCKENÜBUNG Den riesigen Erfahrungsschatz, den Hunziker in den Bergen sammelte, liess er auch in sein Engagement beim Schweizer Alpen-Club einfließen. Auf über 250 von ihm geführten Bergtouren im In- und Ausland konnte er seine Leidenschaft mit weniger erfahrenen Berggängerinnen und Berggängern teilen. Der kritische Geist, der schon zu Studienzeiten aufgeblitzt war, fiel auch im Vereinsgeschehen auf. Seine Einwände hätten ihm «nicht immer Wohlwollen, aber stets Respekt» eingetragen, resümiert Hunziker, und ihn nach kurzer Zeit in den Vorstand der Zürcher Sektion Uto geführt. Er belies es denn auch nie beim Kritisieren, sondern handelte und verbesserte – etwa indem er an sieben SAC-Clubführern mitarbeitete. An Gipfeln, die er noch besteigen müsste, bleibe jetzt eigentlich nichts mehr, sagt er. Bergtouren macht er natürlich trotzdem noch. Das Bergsteigen sei zum Glück ein Sport, den man lange betreiben könne: «Auch heute noch überhole ich beim Aufstieg manche andere», erzählt er. Das Höhenfieber hat sich auch auf die Wahl seines Wohnorts ausgewirkt: Er residiert in Altstetten im 22. Stock eines Hochhauses, für die Stadt Zürich also schon fast hochalpin. Durch die grossen Fenster sieht er über die ganze Stadt, auf den Uetliberg und bei schönem Wetter auch auf die Alpen. Den Lift benutzt er übrigens dem Autor zuliebe. Sonst führt der Heimweg häufig über die Treppe. Gut 60 Höhenmeter – für einen wie ihn eine leichte Übung. ○



AGENDA

ENTDECKEN

○ 7.–17. Oktober 2021

Wo Zukunft entsteht



Besucherinnen und Besucher der Schweizer Landwirtschafts- und Ernährungsmesse OLMA erfahren, wie smarte Roboter, Drohnen und digitale Techniken zu mehr Nachhaltigkeit verhelfen. Die ETH Zürich gewährt mit ihrem Beitrag vor Ort einen spielerischen Einblick in die modernen Agrarwissenschaften.

Infos unter:

—> olma.ch

○ Monatlich, 19–22.30 Uhr

Nachtaktiv

Unter dem Titel «Nachtaktiv» lädt das CreativeLabZ mit einem monatlichen Abendprogramm junge Leute von 16 bis 26 Jahren in verschiedene Schweizer Museen zu Scientainment ein, also Unterhaltung gepaart mit Musik und Wissenschaft. Im September geht's ins FIFA-Museum zum eFootball, im Oktober unter dem Motto «Future Food» ins Zürcher Mühlerama.

Weitere Informationen und Anmeldung unter:

—> nachtaktiv.live

Corona-bedingt können Veranstaltungen kurzfristig entfallen oder verschoben werden. Bitte informieren Sie sich auf der Website der Veranstalter.

focusTerra

○ Bis 5. März 2023

Wellen – Tauch ein!

Sie malen den Regenbogen in den Himmel, lassen unser Lieblingslied erklingen und wärmen uns an kalten Tagen: Wellen! Wir sind ständig und überall von ihnen umgeben, auch wenn wir nur einige von ihnen wahrnehmen können: Wasserwellen, Schallwellen, Erdbebenwellen, Licht. Wellen sind in unserem Leben aber nicht nur allgegenwärtig, sondern werden auch für vielfältige Anwendungen genutzt – sei es in der Medizin, für die Kommunikation, beim Blick in die Erde oder in der Navigation.

Zum Eintauchen: Die interdisziplinäre Ausstellung von *focusTerra* zeigt mit Beispielen aus Natur, Alltag, Forschung und Kunst die zahlreichen Phänomene und Anwendungen von Wellen.

ETH Zürich Zentrum, Sonneggstrasse 5

—> focusterra.ethz.ch/wellen



Bild: Federico Respini

Bild: Oculus Illustration

HÖREN

Podcast-Reihe

Faszination Weltraum

Die Podcast-Dreierreihe beschreibt den Wunsch, Astronautin zu werden, nach Sternen zu greifen und Marsbeben zu untersuchen. Und auch, wie es sich anfühlt, nach der Entdeckung eines neuen Planeten Nobelpreisträger zu werden.

Diese und weitere Podcasts auf allen bekannten Plattformen sowie auf:
—> ethz.ch/podcast

○ 14. Oktober 2021, 19.30 Uhr

Klavierabend mit Emanuil Ivanov



Bild: E. Ivanov / musicaldiscovery.ch

Der internationale Klavierwettbewerb Ferruccio Busoni in Bozen zählt zu den bedeutendsten weltweit. Wir präsentieren den Preisträger Emanuil Ivanov. Freuen Sie sich auf einen Klavierabend mit einem Talent, das sich in die Reihe grosser Interpreten wie Martha Argerich oder Jörg Demus einreihen darf.

Aula der Universität Zürich

Informationen und Tickets unter:
—> musicaldiscovery.ch

LESEN

Draussen ist es anders

**Auf neuen Wegen zu einer
Wissenschaft für den Wandel**

Wir stehen am Scheideweg. Tiefgreifender gesellschaftlicher Wandel ist nötig, um ein gutes Leben für alle zu ermöglichen – heute und in Zukunft. Wissenschaft kann diesen Wandel anstossen und beschleunigen, wenn sie stärker als bisher mit Politik, Zivilgesellschaft und Wirtschaft zusammenarbeitet. Das ist der Anspruch einer transformativen Wissenschaft, deren Akteure Wandel nicht nur analysieren, sondern aktiv, informiert und auf Augenhöhe mitgestalten. Dies kann allerdings nur gelingen, wenn die Wissenschaft auch ihre eigenen Praktiken in Wissenschaftsförderung, Hochschulpolitik und im täglichen Handeln der Wissenschaftler und Wissenschaftlerinnen kritisch hinterfragt.



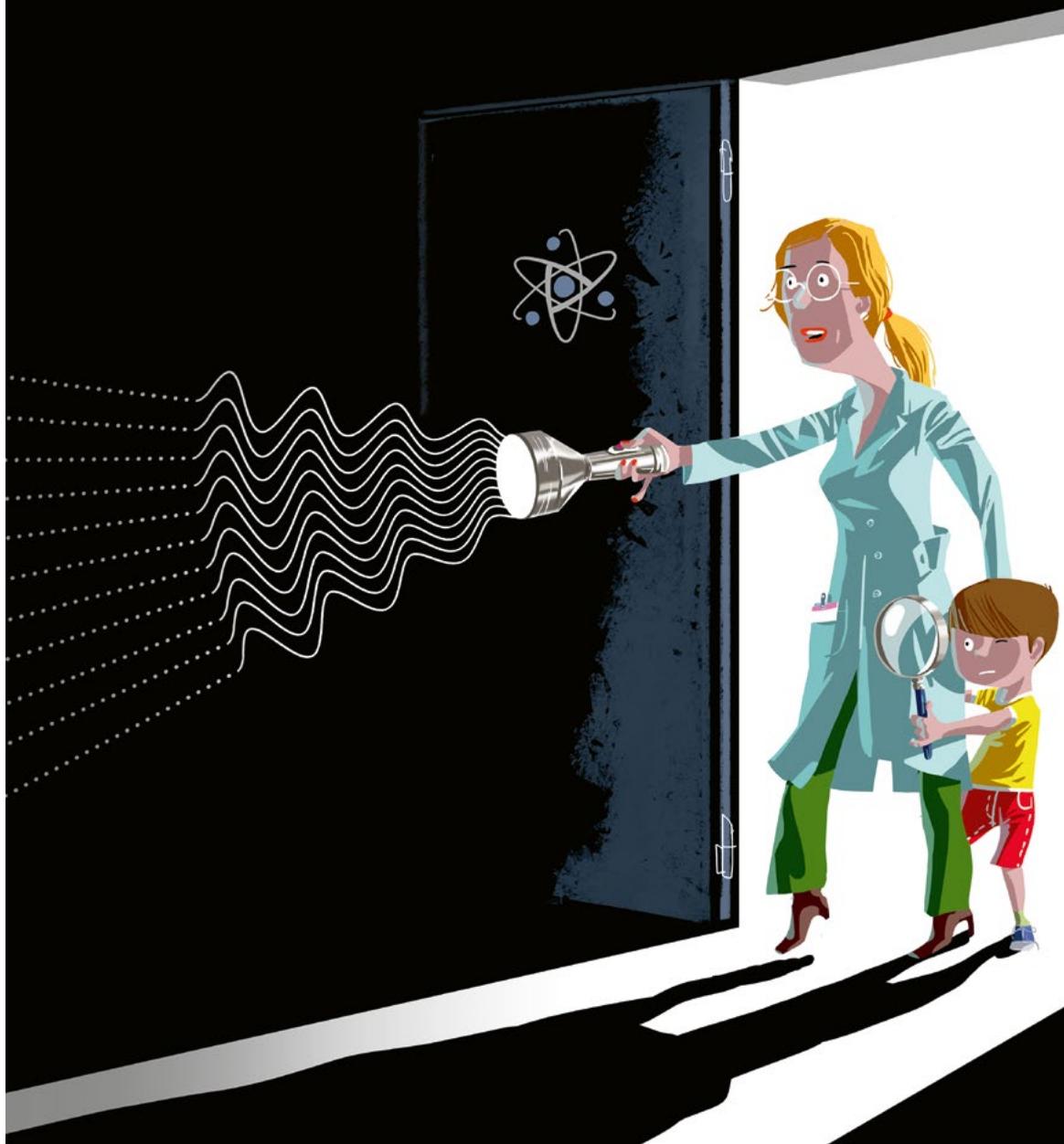
Bild: oekom Verlag

Dieses Buch von ETH-Doktorand Jan Freihardt stellt Ansätze und konkrete Beispiele vor, die schon heute die Wissenschaft der Zukunft erproben. «Draussen ist es anders» ist eine ehrliche und ermutigende Einladung für all diejenigen, die mit Neugier und Gestaltungswillen studieren, forschen und lehren oder es in Zukunft möchten.

oekom Verlag
ISBN: 978-3-96238-296-4

OUT OF FOKUS

Illustration: Michael Meister



Licht in der Quantenwelt: gesehen von Michael Meister

IMPRESSUM Herausgeber: ETH Alumni / ETH Zürich, ISSN 2235-7289 Redaktion: Martina Märki (Leitung), Nicole Davidson, Christoph Elhardt, Leo Herrmann, Corinne Johannssen, Nicol Klenk, Karin Köchle, Florian Meyer, Felix Würsten
Mitarbeit: George Tudosie

Inseratverwaltung: ETH Alumni, globe@alumni.ethz.ch, +41 44 632 51 24 Insetmanagement: Fachmedien, Zürichsee Werbe AG, Stäfa, info@fachmedien.ch, +41 44 928 56 53 Gestaltung: Crafft AG, Zürich Druck und Korrektorat: Neidhart + Schön AG, Zürich Übersetzung: trawo-Übersetzungen; Clare Bourne, Gena Olson Auflage: 38 600 deutsch, 10 800 englisch, viermal jährlich Abonnement: CHF 20.– im Jahr (vier Ausgaben); in der Vollmitgliedschaft bei ETH Alumni enthalten Newsletter: ethz.ch/news-abonnieren Bestellungen und Adressänderungen: globe@hk.ethz.ch bzw. für ETH Alumni alumni.ethz.ch/myalumni Kontakt: ethz.ch/globe, globe@hk.ethz.ch, +41 44 632 42 52



ClimatePartner®
klimaneutral

Druck | ID: 53232-1502-1013

+GF+

+GF+

Passion for Innovation+

www.georgfischer.com





Entdecke unser Young Engineers Program

maxon unterstützt mit dem Young Engineers Program (YEP) innovative Projekte mit vergünstigten Antriebssystemen und technischer Beratung. Erfahre mehr: www.drive.tech