

Link

[www.wsi.tum.de](http://www.wsi.tum.de)

# Auf dem Weg in die Nach-Silizium-Ära

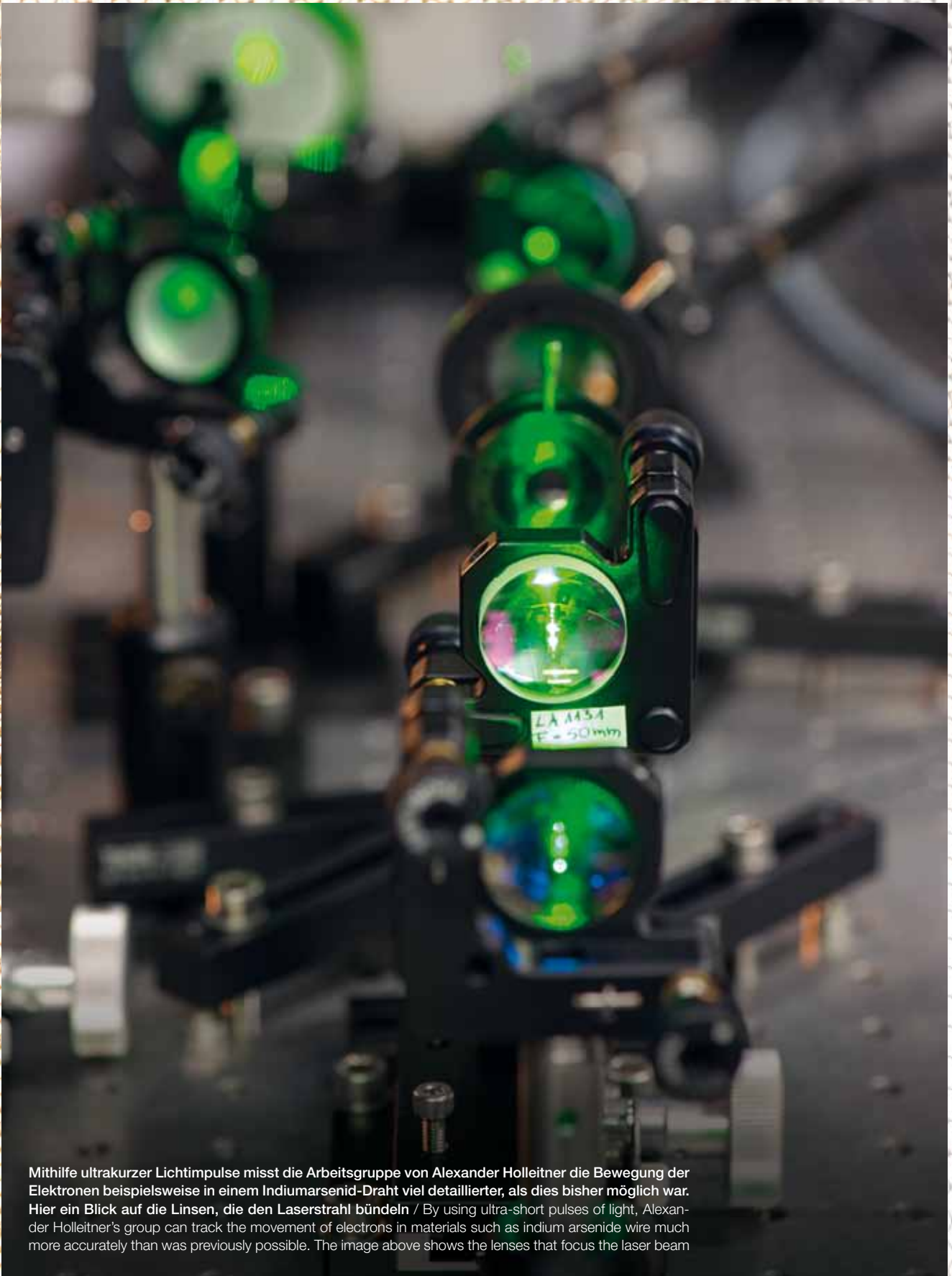
Computerchips von übermorgen werden voraussichtlich mit Strukturen arbeiten, die nur noch wenige Atome umfassen. Das erfordert einerseits neue Materialien und Herstellungsmethoden, andererseits aber auch einen neuen Blick auf die Vorgänge, die im Halbleiter ablaufen. Prof. Alexander Holleitner und sein Team untersuchen diese Prozesse schon heute **Moving into the post-silicon era** Atom-scale chips may sound like science fiction today, but it seems more than likely that the computer chips of the future will be working with structures comprising just a few atoms. To make this leap forward, however, physicists need to develop new materials and production methods, and gain a new understanding of the processes that take place in semiconductors. And this is exactly what Prof. Alexander Holleitner and his team are doing

Alexander Holleitner (ganz links) und sein Team im Seminarraum des Zentrums für Nanotechnologie und Nanomaterialien (ZNN). Im Neubau des Walter Schottky Instituts dominieren klare Sachlichkeit und architektonischer Minimalismus. Konzentrierte Arbeit und Kommunikation finden hier gute Bedingungen / Alexander Holleitner (far left) and his team in the seminar room at the Institute for Nanoscience and Nanotechnology (ZNN). The functional, minimalist design of this new addition to the Walter Schottky Institute provides the ideal environment for concentrated work and productive communication



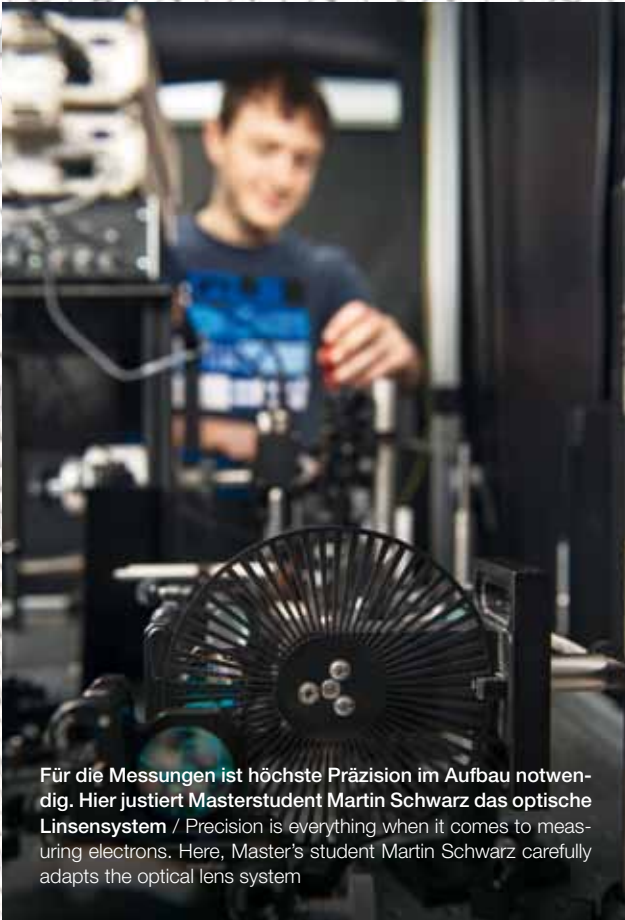


Foto / Picture credit: Eckert/TUM



Mithilfe ultrakurzer Lichtimpulse misst die Arbeitsgruppe von Alexander Holleitner die Bewegung der Elektronen beispielsweise in einem Indiumarsenid-Draht viel detaillierter, als dies bisher möglich war. Hier ein Blick auf die Linsen, die den Laserstrahl bündeln / By using ultra-short pulses of light, Alexander Holleitner's group can track the movement of electrons in materials such as indium arsenide wire much more accurately than was previously possible. The image above shows the lenses that focus the laser beam

Foto / Picture credit: Heddergott/TUM



Für die Messungen ist höchste Präzision im Aufbau notwendig. Hier justiert Masterstudent Martin Schwarz das optische Linsensystem / Precision is everything when it comes to measuring electrons. Here, Master's student Martin Schwarz carefully adapts the optical lens system



Im Reinraum des Instituts fertigen Mitglieder des Teams die filigranen Strukturen selbst an, die sie dann im Experiment untersuchen / Team members first create the delicate structures themselves in the institute's clean room before putting them to the test in various experiments



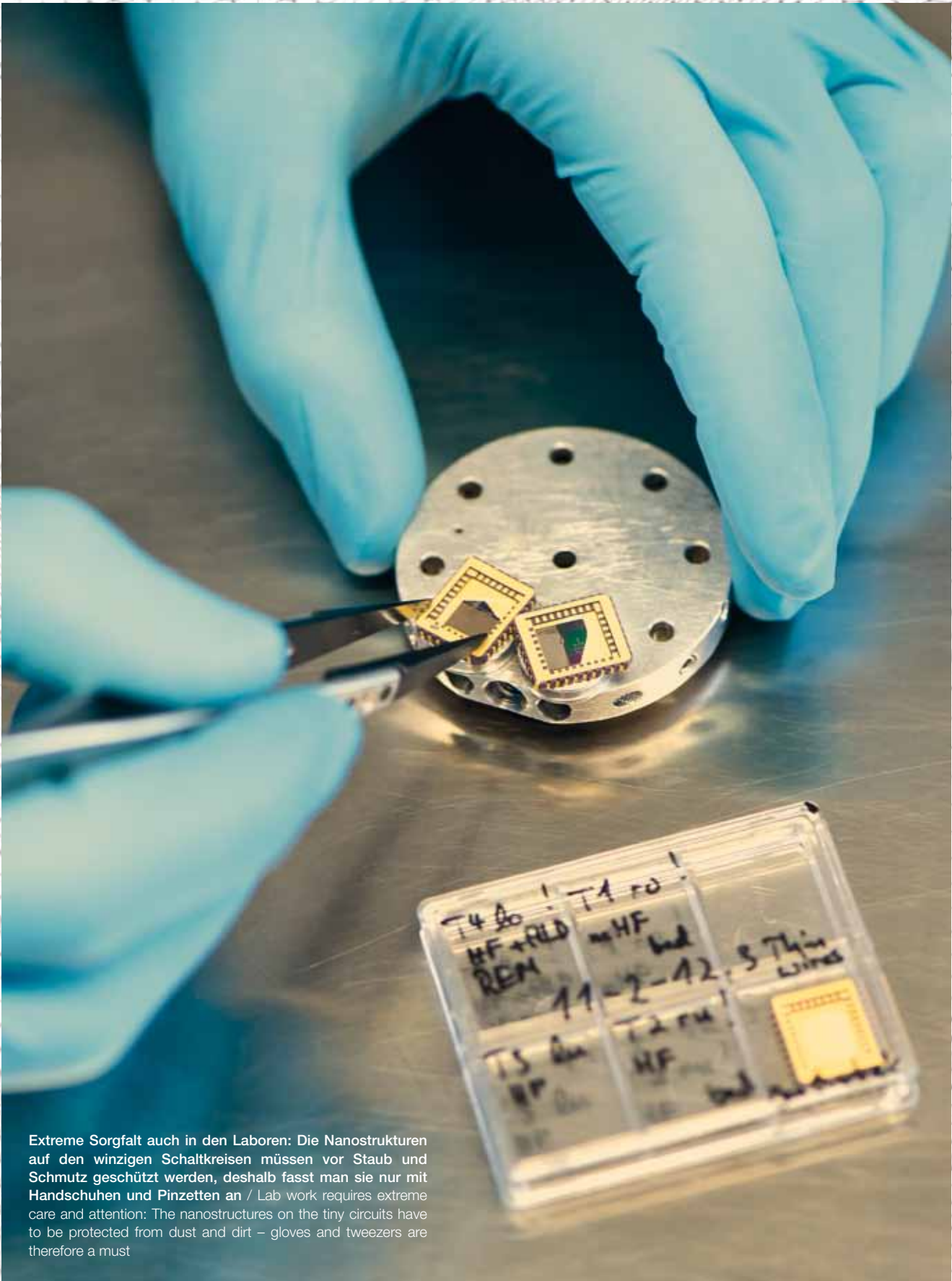
Die im Reinraum hergestellten Chips werden für Messungen mit Femtosekundenlasern genutzt / The chips that have been manufactured in the clean room are used for measurements with a femtosecond laser



Diese sogenannten Terahertz-Streifenleiter sind das Herzstück der Experimente / Terahertz strip conductors are at the heart of these experiments

Fotos oben links, rechts unten, below right: Heidergott/TUM  
Sonstige Bilder/Other pictures: Eckert/TUM



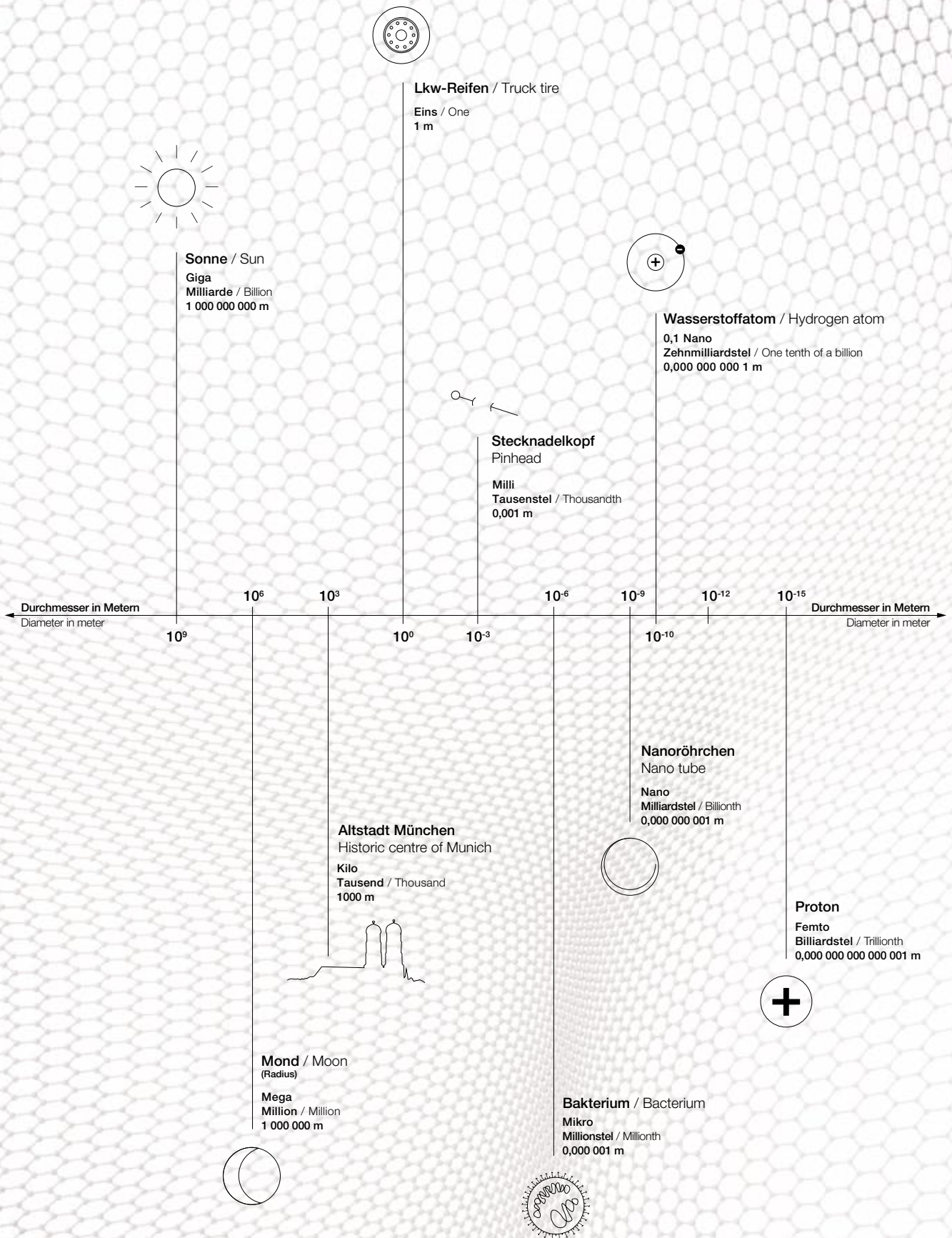


Fotos / Picture credits: Eckert/TUM

Extreme Sorgfalt auch in den Laboren: Die Nanostrukturen auf den winzigen Schaltkreisen müssen vor Staub und Schmutz geschützt werden, deshalb fasst man sie nur mit Handschuhen und Pinzetten an / Lab work requires extreme care and attention: The nanostructures on the tiny circuits have to be protected from dust and dirt – gloves and tweezers are therefore a must



Größenordnungen / Orders of magnitude



**Von Giga bis Femto:** Während die Sonne einen Durchmesser von rund 1.392.700.000 Metern, also 1,3 Gigametern, hat, ist der Mond nur 3476 Kilometer, also 3,4 Megameter, dick. Die Münchner Altstadt bemisst sich im Kilometermaßstab, ein Lkw-Reifen hat einen Durchmesser von etwa einem Meter. In der Welt des Kleinen und Kleinsten dominieren Begriffe wie Milli-, Mikro-, Nano-, Piko- ( $10^{-12}$ ) und Femto-. Die jeweilige Bezeichnung ist in der Grafik eingetragen / From giga to femto: The sun's diameter is around 1,392,700,000 kilometers, or 1.3 gigameters. The moon, however, is approximately 3,476 kilometers, or 3.4 megameters, thick. Munich's historic center can be measured in kilometers, while the wheel of a truck has a diameter of around one meter. When things start to get small, however, terms such as milli, micro, nano, pico ( $10^{-12}$ ) and femto start to appear. These prefixes are shown in the figure opposite

**M**an glaubt kaum, dass hier ein physikalisches Institut heimisch ist, eher würde man ein Museum für moderne Kunst vermuten. Der Eingangsbereich, die Flure, das Treppenhaus – alles ist in leicht gedämpftem Weiß gehalten, minimalistisch und lichtdurchflutet. Lediglich ein Kickertisch stört die Bilderbuchästhetik, an dem in der Mittagspause Studenten lautstark gegeneinander spielen. Hier, im Neubau des Walter Schottky Instituts, dem Zentrum für Nanotechnologie und Nanomaterialien (ZNN), ganz im Norden des Garching Forschungsgeländes, dient das edle Ambiente als zweckmäßige Hülle für eine ganze Reihe von TUM Laboren, die mechanisch, thermisch und elektrisch extrem von der Außenwelt abgeschirmt sind. Denn in ihrem Inneren arbeiten Forscher an Halbleiterstrukturen im Nanobereich. Es ist intensive Grundlagenforschung, die hier vor sich geht, gleichzeitig hat sie aber Bezug zur Praxis: Sie beschäftigt sich letztlich mit der Zukunft der Computer.

### Winzige Chipstrukturen

Die Bauelemente der Rechner sind in den letzten 50 Jahren stetig kleiner geworden. Immer bessere und feinere Produktionsmethoden für die Chips haben es möglich gemacht, winzige Strukturen im industriellen Maßstab fehlerfrei und zuverlässig herzustellen. War im Jahr 1970 ein Transistor noch etwa ein hundertstel Millimeter „groß“, schrumpfte er 15 Jahre später schon auf ein Zehntel davon, und heute sind seine Abmessungen erneut hundertmal winziger. Der Preis für ein Bit gespeicherter Information fiel von rund zehn Pfennigen in den 1960er-Jahren auf ein Milliardstel Eurocent heute. Gordon Moore, einer der Gründer der Firma Intel, hat diese Entwicklung 1965 in eine Prognose gefasst, die bis heute Gültigkeit hat: Moores Gesetz sagt aus, dass sich die Anzahl der elektronischen Schaltelemente auf einem Chip alle 18 Monate verdoppelt.

Heute kann man mit kurzwelligem UV-Licht bereits Schaltelemente – man spricht meist von „Knoten“ – herstellen, die nur noch 16 Nanometer groß sind, und der Trend ▶

**With** its minimalist, bright interior in muted white, TUM's Center for Nanotechnology and Nanomaterials (ZNN) does not really look like a scientific institute. In fact, visitors could well be forgiven for thinking that they had stumbled into a modern art museum rather than the newest of the Walter-Schottky Institute's buildings. A table football game is the only incongruous object in these stylish surroundings. The noise of students playing on it during lunch breaks also shatters the museum-like atmosphere. This new physics center is located in the north of the Garching research campus. Behind the sophisticated ambience lie a number of TUM labs, each one mechanically, thermally and electrically insulated from the outside world. They are insulated for good reason – the scientists inside are working with nano-scale semiconductor structures. It is intensive, basic research with a practical twist – after all, their work here will help define the computers of tomorrow.

### Tiny chip structures

Over the past 50 years, computer components have been getting smaller and smaller. Thanks to improved, more sophisticated chip fabrication methods, manufacturers can reliably produce tiny, error-free structures on an industrial scale. A transistor that measured one-hundredth of a millimeter in size in 1970 had shrunk to one tenth of this size within just 15 years. Today's transistors are one hundred times smaller again. The price of one bit of stored information has fallen from around ten pfennigs in the 1960s to one billionth of a euro cent today. Back in 1965, Gordon Moore, one of the founders of the company Intel, predicted this trend in an observation that still holds true today: Moore's Law states that the number of electronic switches integrated on a chip will double every eighteen months.

Today, short-wave UV light can be used to create structural nodes that are just sixteen nanometers in size. And engineers are moving increasingly closer to ten nanometers – about twenty atoms across. "It's incredible that we are approaching atom-scale structures in electronics," enthuses Profes- ▶

geht zu zehn Nanometern. Dies entspricht dann etwa 20 Atomen nebeneinander. „Ich finde das unglaublich“, sagt Prof. Alexander Holleitner. „Man nähert sich in der Elektronik nun Strukturen im atomaren Maßstab.“ Bald wird man nicht mehr mithilfe von optischer Lithografie Schaltkreise auf den Chips definieren, sondern nach neuen Lösungen suchen, wie man die Knoten aufbauen kann. Halbleiter-Nanodrähte, z. B. aus Indiumarsenid, oder Kohlenstoff-Nanoröhrchen – sogenannte nanotubes – sind dabei im Gespräch, aber auch der Wunderwerkstoff Graphen. Diese Modifikation von Kohlenstoff, die erst 2004 entdeckt wurde, wird mittlerweile intensiv erforscht und weckt enorme Hoffnungen. „Bei den großen Chipherstellern existieren bereits Prototypen von Schaltelementen aus Nanomaterialien“, sagt Holleitner. „Eines Tages werden sie hoffentlich auf Chips integriert sein und die Schaltelemente aus Silizium ergänzen oder sogar ersetzen.“

**Licht als Informationsträger**

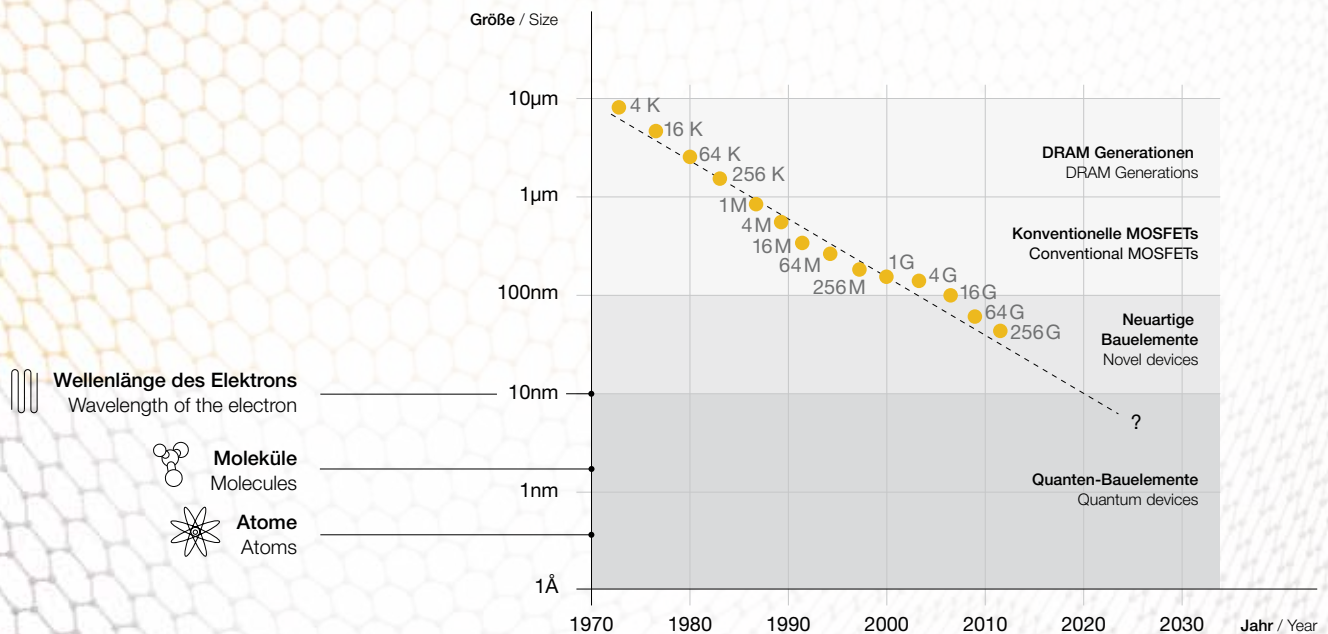
Dabei werden neben Elektronen als klassische Ladungsträger auch Photonen, also Lichtteilchen, als Informationsträger eine immer größere Rolle spielen. Schon heute kann man mit Photonen Chips ein- und ausschalten. In der Glasfaser-Kommunikation sind sie unentbehrlich, und in einem optischen Computer werden sie die Verbindung herstel- ➤

sor Alexander Holleitner. Soon, manufacturers will no longer be using optical lithography to define circuits onto chips. Today, the search is already underway for new ways of building nodes. Semiconductor nanowires comprising indium arsenide and carbon nanotubes are two promising candidates. As is the revolutionary material graphene, a modification of carbon that was only discovered in 2004. Graphene is a subject of intense research and is generating a huge amount of excitement. “The major chip manufacturers have already created prototypes of circuits made of nanomaterials,” says Holleitner. “Hopefully, they’ll be integrated on chips one day, working alongside silicon elements and replacing them eventually.”

**Light as information carrier**

These new designs will still use electrons as conventional charge carriers. In time, however, photons (light particles) will play an increasingly important role as information carriers. In fact, photons can already be used to activate and deactivate chips today. They are already an indispensable ingredient in fiber-optic communications. In optical computers, they will be used to connect optical and conventional components. In light of these trends, scientists need to develop advanced fabrication processes and also understand the physical inner workings of nano-scale components. This is exactly what Alexander Holleitner and his team are doing. “We focus ➤

Elektronische Bauelemente sind in den letzten 43 Jahren stetig kleiner geworden. Bald ist die Größe eines Moleküls oder gar Atoms nicht mehr weit entfernt. Gordon Moore, einer der Gründer der Firma Intel, hat diese Entwicklung in eine Prognose gefasst, die bis heute Gültigkeit hat: Moores Gesetz sagt aus, dass sich die Anzahl der elektronischen Schaltelemente auf einem Chip alle 18 Monate verdoppelt / Electronic components have been gradually shrinking over the last 43 years. Scientists are already moving toward molecule- and even atom-scale components. Gordon Moore, one of the founders of Intel, predicted this trend in an observation that still holds true today: Moore’s Law states that the number of electronic switches integrated on a chip will double every eighteen months



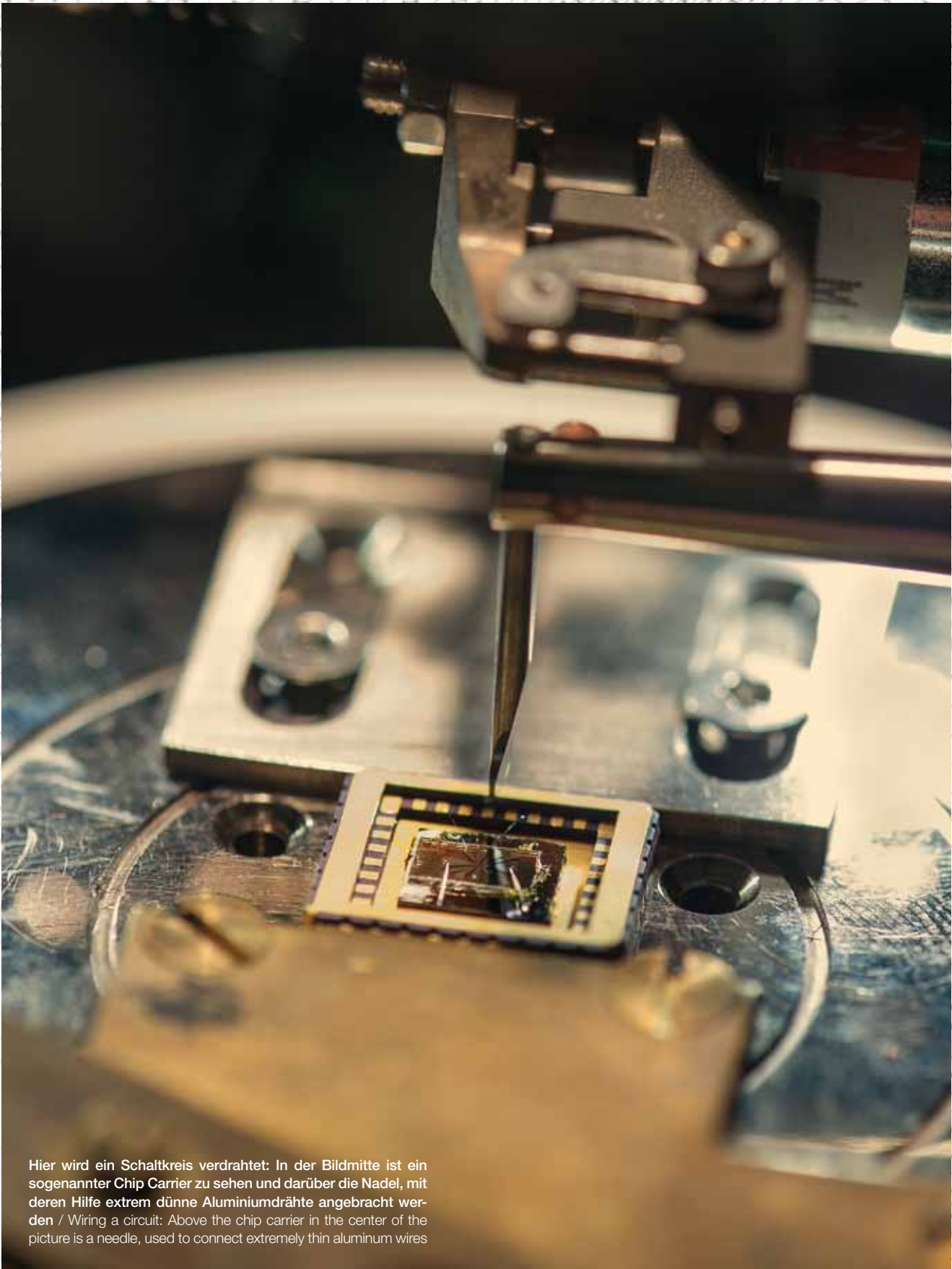
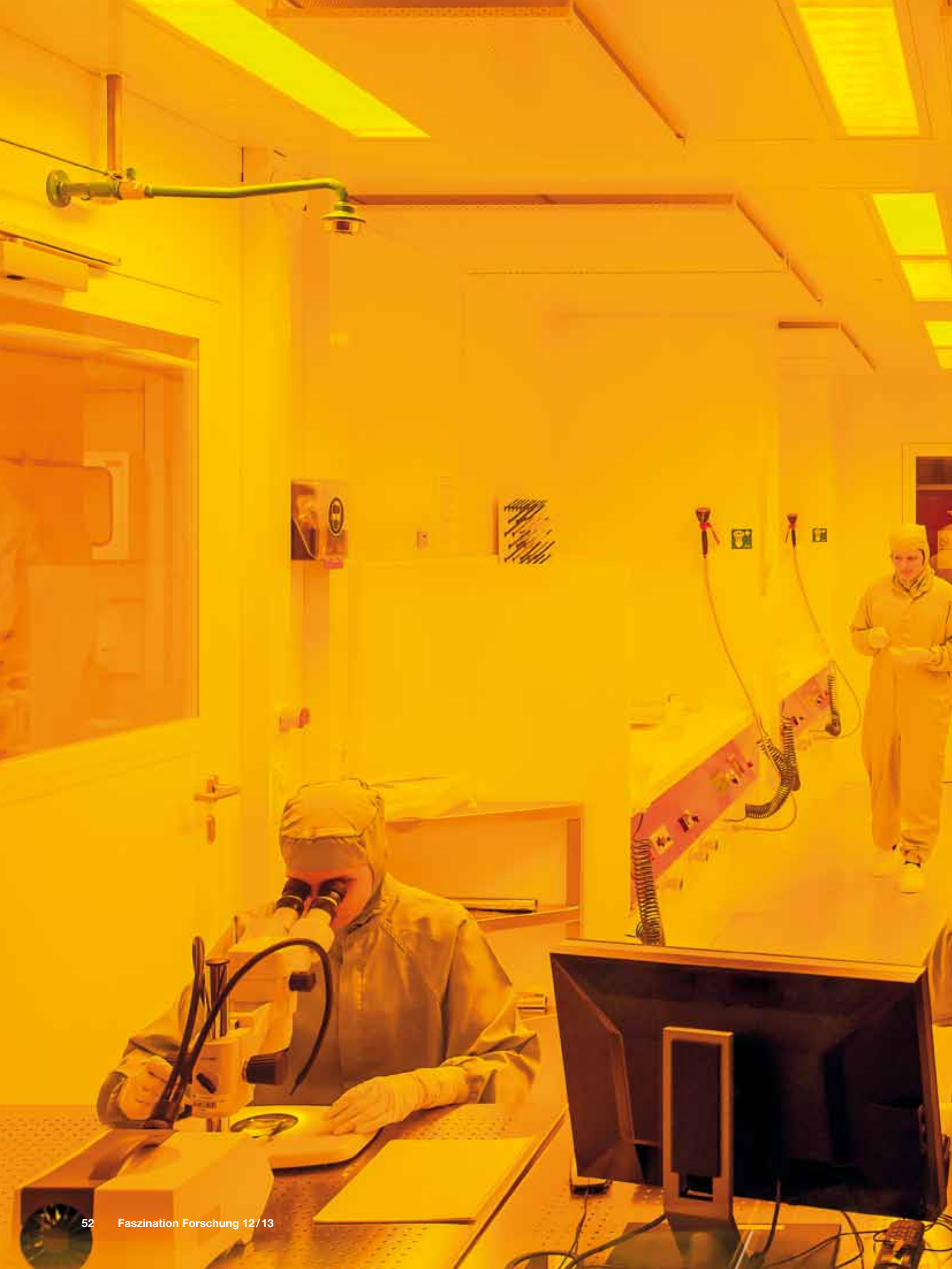


Foto / Picture credit: Eckert/TUM

Hier wird ein Schaltkreis verdrahtet: In der Bildmitte ist ein sogenannter Chip Carrier zu sehen und darüber die Nadel, mit deren Hilfe extrem dünne Aluminiumdrähte angebracht werden / Wiring a circuit: Above the chip carrier in the center of the picture is a needle, used to connect extremely thin aluminum wires



Dieser Reinraum ist eines der Gemeinschaftslabore des ZNN. Dort arbeiten Studenten und Wissenschaftler daran, Materialien und Strukturen im Nanomaßstab herzustellen. Sie produzieren Chips mithilfe optischer Verfahren, wie sie auch in der Chipindustrie üblich sind. So bietet das Institut gleichzeitig eine fundierte praktische Ausbildung für die Studenten an, die auf diese Weise die industriellen Prozesse kennenlernen. Da einzelne Lithografieschritte durch bestimmte optische Wellenlängen gestört werden könnten, müssen alle Prozesse im Gelblicht durchgeführt werden / This clean room is one of the Institute's shared labs. Students and scientists use it to build nanoscale materials and circuits. The chips are manufactured using optical processes deployed in the semiconductor industry. This gives students hands-on insights into real-world industrial processes as part of their practical training. All work is carried out under yellow light as certain optical wavelengths can disrupt the individual steps in lithography



len zwischen optischen und konventionellen Bauteilen. Angesichts dieser Entwicklungen ist es nicht nur wichtig, fortgeschrittene Herstellungsverfahren zu entwickeln, sondern man muss auch verstehen, was im Inneren der Nanobauteile physikalisch vor sich geht. Alexander Holleitner und sein Team haben sich dieser Fragestellung verschrieben. „Wir beschäftigen uns mit dem Grenzgebiet zwischen Optik und Elektronik“, sagt der 40-jährige Physiker. „Wir untersuchen mit optoelektronischen Methoden, wie schnell sich die Elektronen bewegen, was bei den Schaltprozessen abläuft und wohin die Wärme in den Schaltkreisen abfließt.“

### Angeregter Nanodraht

Alexander Holleitner hat eine Apparatur entwickelt, die rund 100-mal so schnell ist wie andere Messmethoden. Er macht sich dabei die Schnelligkeit heutiger Femto-(oder  $10^{-15}$ -)Sekunden-Laser zunutze, denn „mit rein elektrischen Verfahren kann man die Vorgänge, die hier ablaufen, gar nicht mehr messen, sie sind viel zu langsam.“ Er befestigt beispielsweise einen Nanodraht aus Indiumarsenid zwischen zwei streifenförmigen Leitern aus Gold auf einem Saphirsubstrat und regt ihn mit einem kurzen Laserimpuls an. Dadurch entsteht für einen Augenblick ein winzig kleiner Photostrom, der in den beiden metallischen Streifen ein elektromagnetisches Feld induziert. Dieses rast die Leiter entlang zu einem Photodetektor aus Silizium. Sobald es dort angekommen ist, werden Ladungsträger in dem Siliziumdetektor mit einem zweiten kurzen Laserimpuls angeregt.

Man nennt dies die Anrege-Abfrage-Methode oder englisch kurz on-chip pump-probe: Mit einem Laserimpuls regt man erst einen Prozess an, und mit einem weiteren fragt man ab, was passiert ist. Aus der Größe des Abtaststroms im Siliziumdetektor können die Physiker die zeitliche Dynamik der Ladungsträger in den Nanoschaltkreisen auf weniger als eine Pikosekunde, also  $10^{-12}$  Sekunde, genau messen und ihre Schlüsse daraus ziehen.

Mit dieser Methode gelang es Holleitner und seinem Team, die Bewegung der Elektronen im untersuchten Indiumarsenid-Draht erstmals zeit- und orts aufgelöst zu messen und auch nachzuweisen, dass Terahertz-Strahlung erzeugt wird. Einer der zugrunde liegenden Prozesse wurde von dem deutschen Physiker Harry Dember bereits 1931 beschrieben, konnte aber noch nie mit so hoher Genauigkeit in einzelnen Nanoschaltkreisen gemessen werden. Sobald der Femtosekunden-Laserimpuls auf den Draht trifft, baut sich dort aufgrund der unterschiedlichen Geschwindigkeiten von Elektronen und Löchern – dies sind die positiv gelade-

„Es war mein Traum, die beiden Welten Optik und Elektronik zu verbinden“, sagt Alexander Holleitner. Erst kürzlich erhielt er für sein Projekt NanoREAL vom Europäischen Forschungsrat einen Startzuschuss von 1,3 Millionen Euro / “My dream was to bring the two worlds of optics and electronics together,” explains Alexander Holleitner. He recently received EUR 1.3 million in funding from the European Research Council for his NanoREAL project





Foto / Picture credit: Eckert/TUM  
Grafik / Graphics: edlundsepp

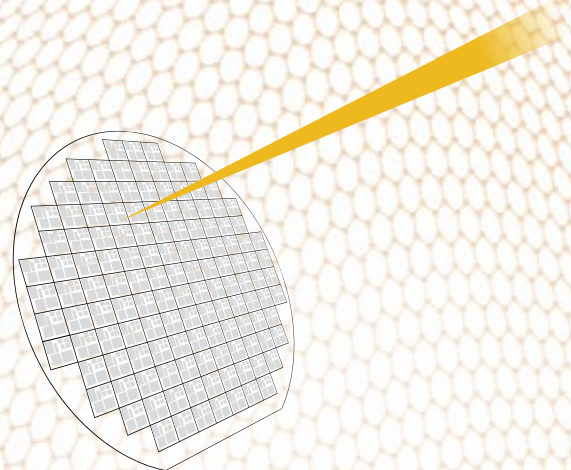
on the interface between optics and electronics,” explains the 40-year-old physicist. “We use optoelectronic methods to investigate how fast electrons move, what happens during switching cycles and how heat dissipates throughout circuits.”

### Excited nanowires

To do this, Holleitner has built a piece of equipment that is around one hundred times faster than other measuring devices. He uses the latest femtosecond ( $10^{-15}$  second) lasers for his measurements because, as he puts it, “pure electrical methods are much too slow to measure the processes at work here.” A typical measurement involves fixing a nanowire of indium arsenide between two gold strips (conductors) on a sapphire substrate and exciting the wire using a short laser pulse. This creates a tiny, momentary photocurrent that induces an electromagnetic field in the two metallic strips. This races along the conductors to a silicon photodetector. Once it arrives here, charge carriers in the silicon detector are excited using a second brief laser pulse.

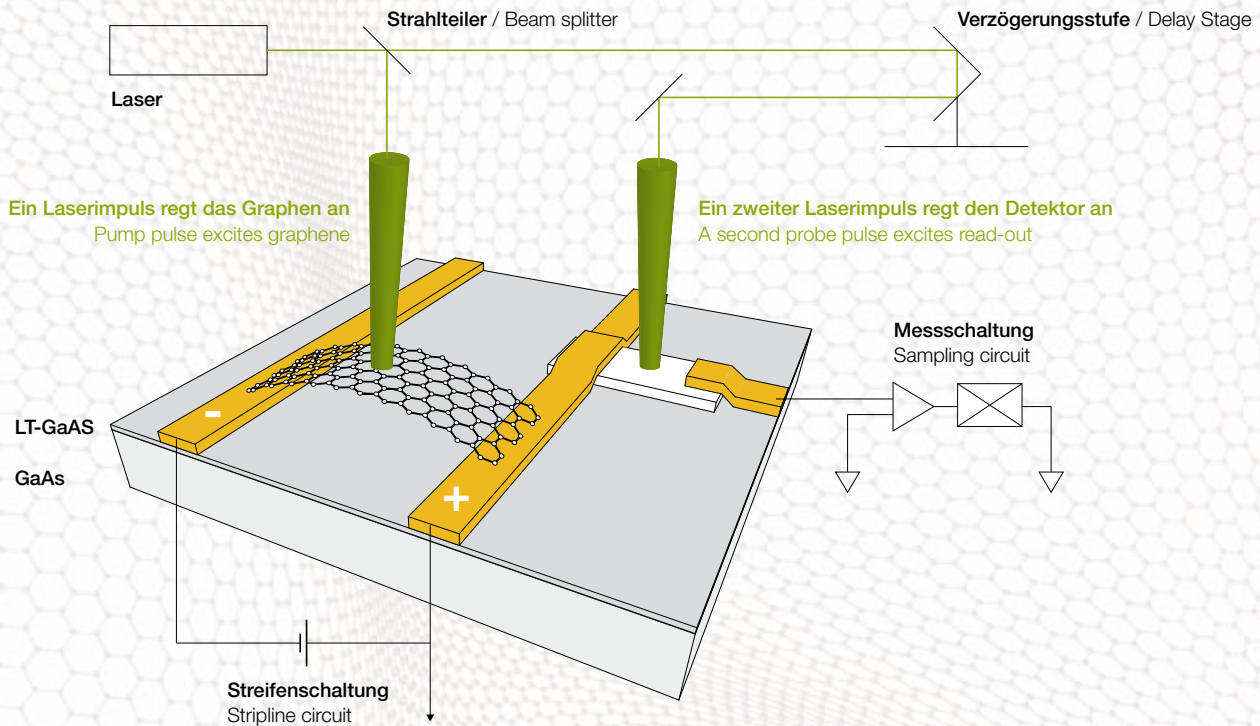
This process is known as the on-chip optoelectronic “pump-probe” method. An initial laser pulse is used to excite a process and a second pulse is used to monitor what happens. Based on the size of the probe current in the silicon detector, physicists can accurately measure the motion of the charge carriers in the nanocircuits with less than picosecond ( $10^{-12}$  second) resolution and use their findings in their research.

Holleitner and his team used this method to measure electron movement in the indium arsenide wire with a high degree of time and spatial resolution for the first time. They also proved that terahertz radiation is being generated. One of the underlying processes was reported by German physicist Harry ▶



**Die Industrie entwickelt derzeit Lithografieverfahren, die es erlauben, mit einer optischen Wellenlänge im extremen Ultraviolett Schaltkreise in der Größenordnung von etwa 16 Nanometern serienmäßig zu produzieren** / Industry is currently developing lithographic processes that will enable series production of circuits measuring around 16 nanometers using an extreme ultraviolet optical wavelength





Der Aufbau der Messapparatur: Ein Laserimpuls (pump pulse) regt das Graphengitter optisch an. Ein zweiter, zeitverzögerter „Probe“-Laserimpuls liest die elektromagnetischen Impulse auf dem Streifenleiter aus / Diagram of measuring apparatus: A laser pulse (pump pulse) optically excites the graphene grid. This is followed by a second, probe laser pulse, which reads the electromagnetic pulses on the conductive strips

nen Ladungsträger im Halbleiter – ein elektrisches Feld auf. Durch diesen Prozess wird elektromagnetische Strahlung im Terahertz-Frequenzbereich abgestrahlt. Außerdem lässt sich mit der Methode Holleitners auch die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Elektronen und Löcher in dem Nanodraht bestimmen. Darüber hinaus gelang es der Gruppe vor Kurzem erstmals, die Erzeugung von Terahertz-Strahlung in einer Graphenschicht nachzuweisen.

### Optik und Elektronik

Auf die Idee, die photoelektronischen Eigenschaften einer Probe mit den Schalteigenschaften des Siliziums zu koppeln, kam Holleitner nicht von ungefähr, er entwickelte sie Stück für Stück. Zunächst promovierte er über ein Spezialthema zum Einzel-Elektronentransport und lernte dabei, „sehr genaue elektrische Messungen durchzuführen“. Später als Postdoc im kalifornischen Santa Barbara bekam er es mit den optischen Techniken zu tun. „Es war schon damals mein Traum, die Vorteile der beiden Welten Optik und Elektronik zu verbinden“, erinnert sich Holleitner. Nach seiner Rückkehr nach München – zunächst noch an der LMU – begann er, diese Vision zu realisieren. Und er überzeugte die Fachwelt: Erst kürzlich erhielt er für sein Projekt NanoREAL vom Europäischen Forschungsrat (European Research

Council, ERC) einen Startzuschuss von 1,3 Millionen Euro. Es wird zum Teil in die apparative Ausstattung der Labors und Reinräume fließen, in denen das Team die filigranen Strukturen selbst anfertigt. Um dabei in den Nanobereich vorzustoßen, sind teure Spezialgeräte erforderlich, und „um international wettbewerbsfähig zu sein, benötigen wir die besten Maschinen“, sagt Holleitner. Die Gemeinschaftslabore des Zentrums für Nanotechnologie und Nanomaterialien stehen aber auch anderen Instituten des Forschungsgeländes und des Exzellenzclusters Nanosystems Initiative Munich (NIM) offen; derzeit gibt es rund 150 Nutzer.

Zu wissen, was auf atomarer Ebene im Inneren der winzigen Strukturen abläuft, ist nicht nur wichtig zum Verständnis der Physik, die bei diesen Maßstäben häufig schon von Quanteneffekten bestimmt wird. Es ist auch die Voraussetzung dafür, Prozesse beispielsweise in optischen Schaltelementen zu beschleunigen oder natürliche Phänomene nachzuahmen. So untersuchen Holleitner und seine Leute auch organische Moleküle und Proteine, die bei der Photosynthese eine Rolle spielen. Und sie hoffen, dass aufgrund ihrer Arbeit eines Tages nicht nur noch kleinere und schnellere Computer entstehen, sondern vielleicht auch neuartige Solarzellen, die Licht besser in Strom umwandeln als die heutigen Module.

Autorin: Brigitte Röthlein

Dember back in 1931. However, it had never been measured to such a high level of accuracy in individual nanocircuits until now. Once the pulse from the femtosecond laser hits the wire, it creates an electric field due to the different speeds of the electrons and holes (positively charged charge carriers in the semiconductor). This process generates electromagnetic radiation in the terahertz frequency range. On top, Holleitner's method allows measuring the propagation velocity of the electrons and holes in the nanowires. With the same technique, Holleitner's team recently achieved another milestone by demonstrating terahertz generation in a graphene layer.

### Optics and electronics

Holleitner's idea to combine the photoelectronic properties of a sample material with the switching properties of silicon was not a spur-of-the-moment decision but the end result of a gradual process that started back when Holleitner was a PhD student studying a specialist field of single electron transport. During this time, he learnt to "make very accurate electric measurements." Later, he moved on to optical techniques, taking a post-doc position in Santa Barbara (California). "Even back then it was a dream of mine to combine the benefits of optics and electronics," recalls Holleitner. On his return to Munich – initially at LMU – he started to realize

this vision. And he soon caught the attention of the scientific community. The European Research Council (ERC) recently awarded Holleitner a grant of EUR 1.3 million to set up his NanoREAL project. Part of the funds will be used to equip the labs and cleanrooms that the team will be using to fabricate the sophisticated structures. Research into nanotechnology requires expensive, specialist equipment and "to be competitive, we need the best equipment available," explains Holleitner. The labs at the Center for Nanotechnology and Nanomaterials are shared facilities that can also be used by other institutes in the research campus and the Nanosystems Initiative Munich (NIM) excellence cluster. There are currently around 150 users.

Finding out what goes on at atomic level inside these tiny structures is important to furthering our understanding of physics, which at this scale is often determined by quantum effects. This information is also a prerequisite for speeding up processes, for example, in optical switches and for emulating natural phenomena. Which is why Holleitner and his team are also investigating organic molecules and proteins, which play a role in photosynthesis. They hope that their work here will lead to even smaller and faster computers and maybe even solar cells capable of converting light into power more efficiently than today's modules. *Author: Brigitte Rötthlein*

**Holleitner und sein Team untersuchen auch organische Moleküle und deren elektronisches Verhalten. Sie hoffen, dass aufgrund dieser sogenannten Molekularelektronik eines Tages noch kleinere und schnellere Computer entstehen** / Holleitner and his team also investigate organic molecules and their electronic behavior. They hope that molecular electronics will one day lead to even smaller, faster computers

