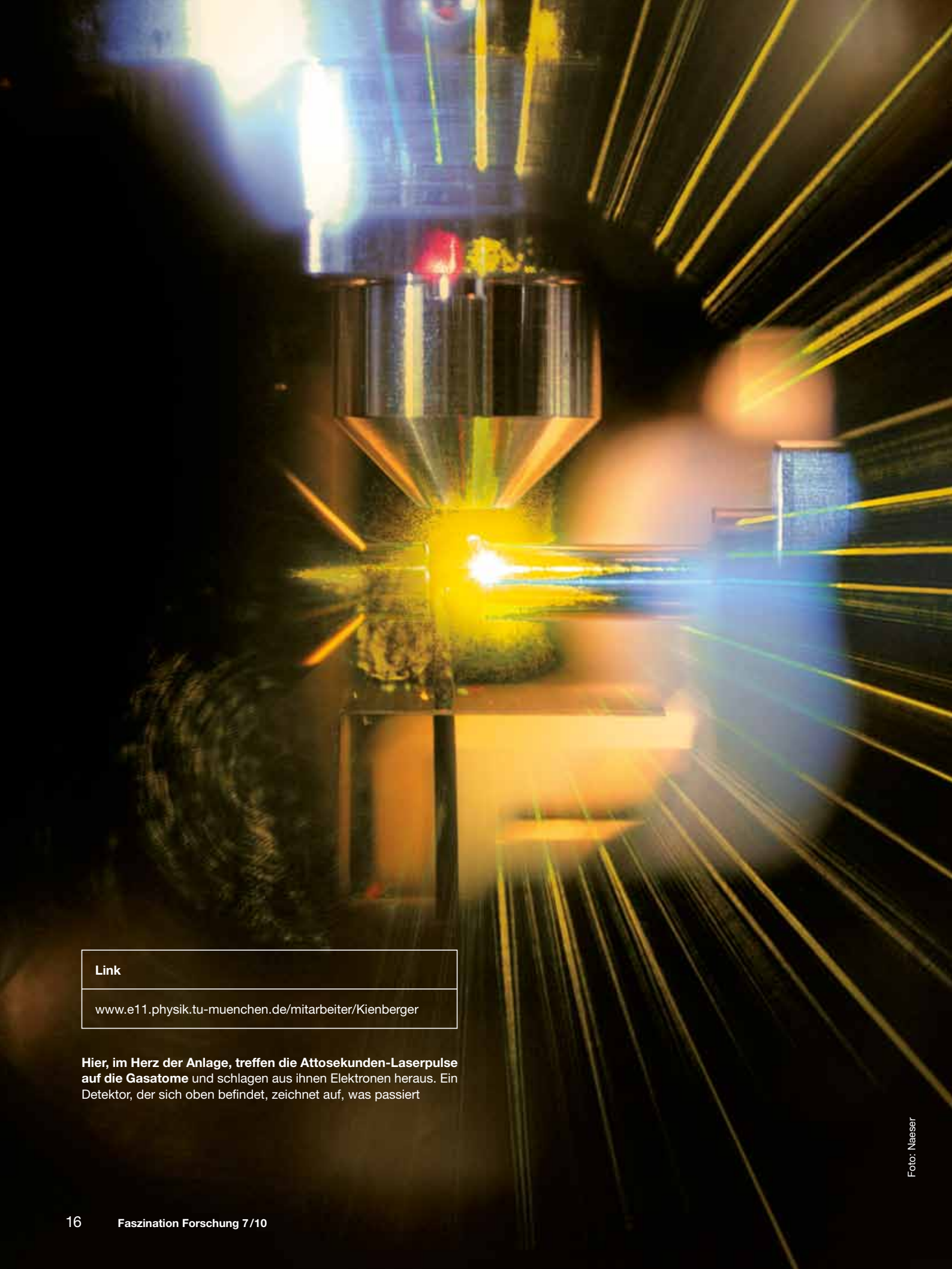


Link
www.e11.physik.tu-muenchen.de/mitarbeiter/Kienberger

Hier, im Herz der Anlage, treffen die Attosekunden-Laserpulse auf die Gasatome und schlagen aus ihnen Elektronen heraus. Ein Detektor, der sich oben befindet, zeichnet auf, was passiert

Foto: Naeser

Kurz, kürzer, atto

Es ist nicht die Jagd nach Rekorden, die Reinhard Kienberger antreibt, immer kürzere Laserimpulse zu entwickeln, sondern die Notwendigkeit, besondere physikalische Instrumente zu erschaffen. Mit ihnen will er neue Erkenntnisse über die Materie gewinnen

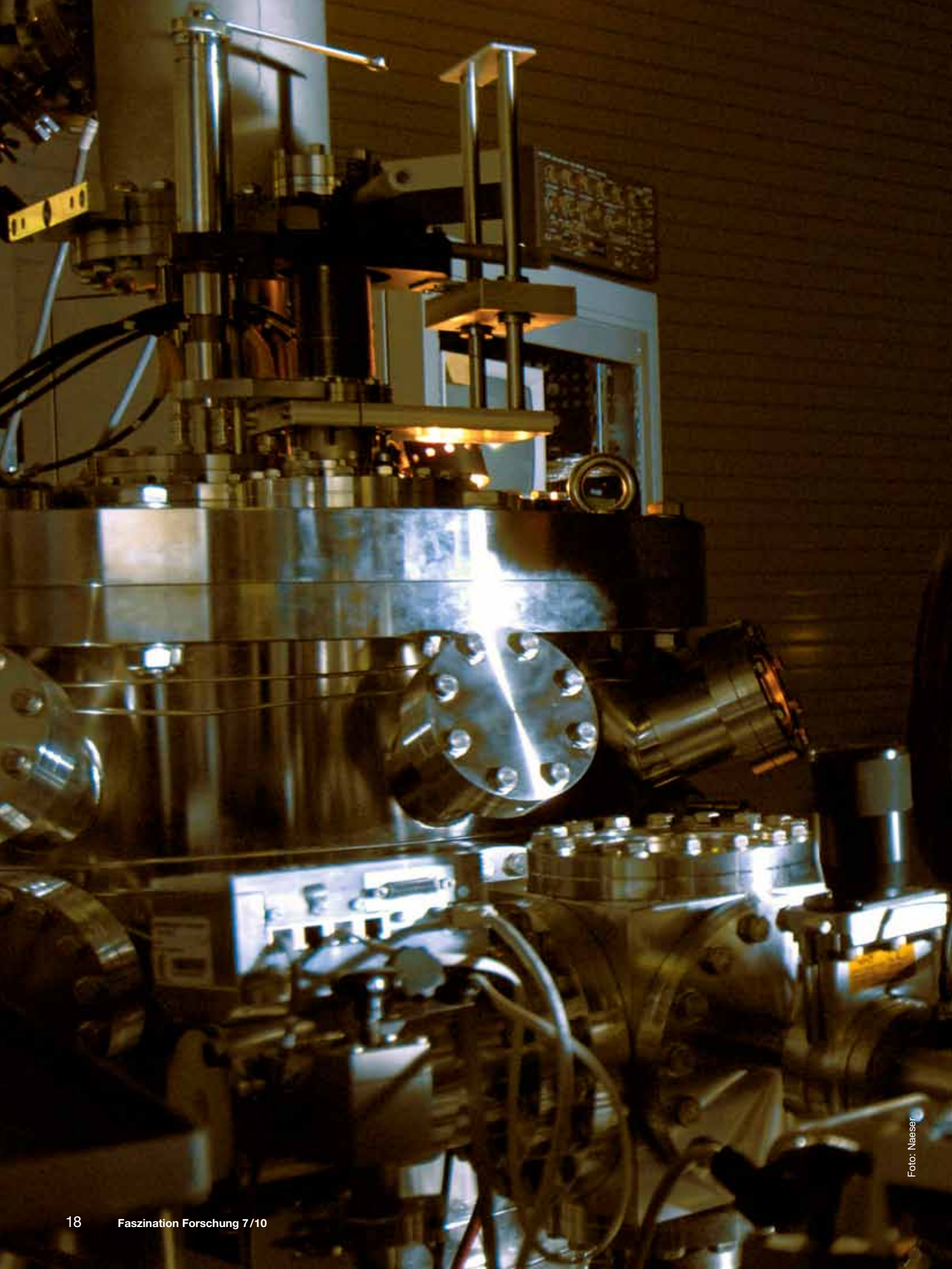
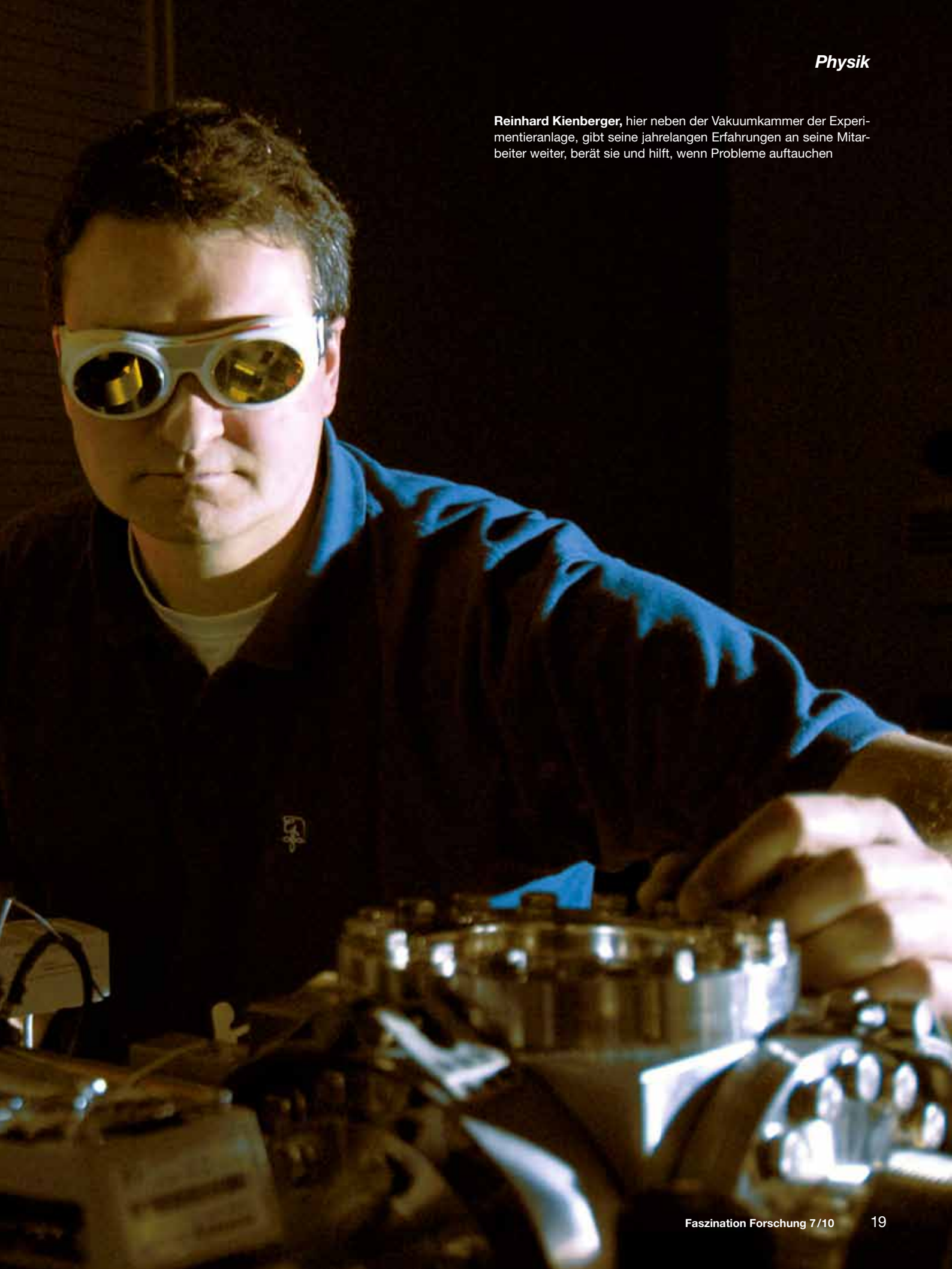
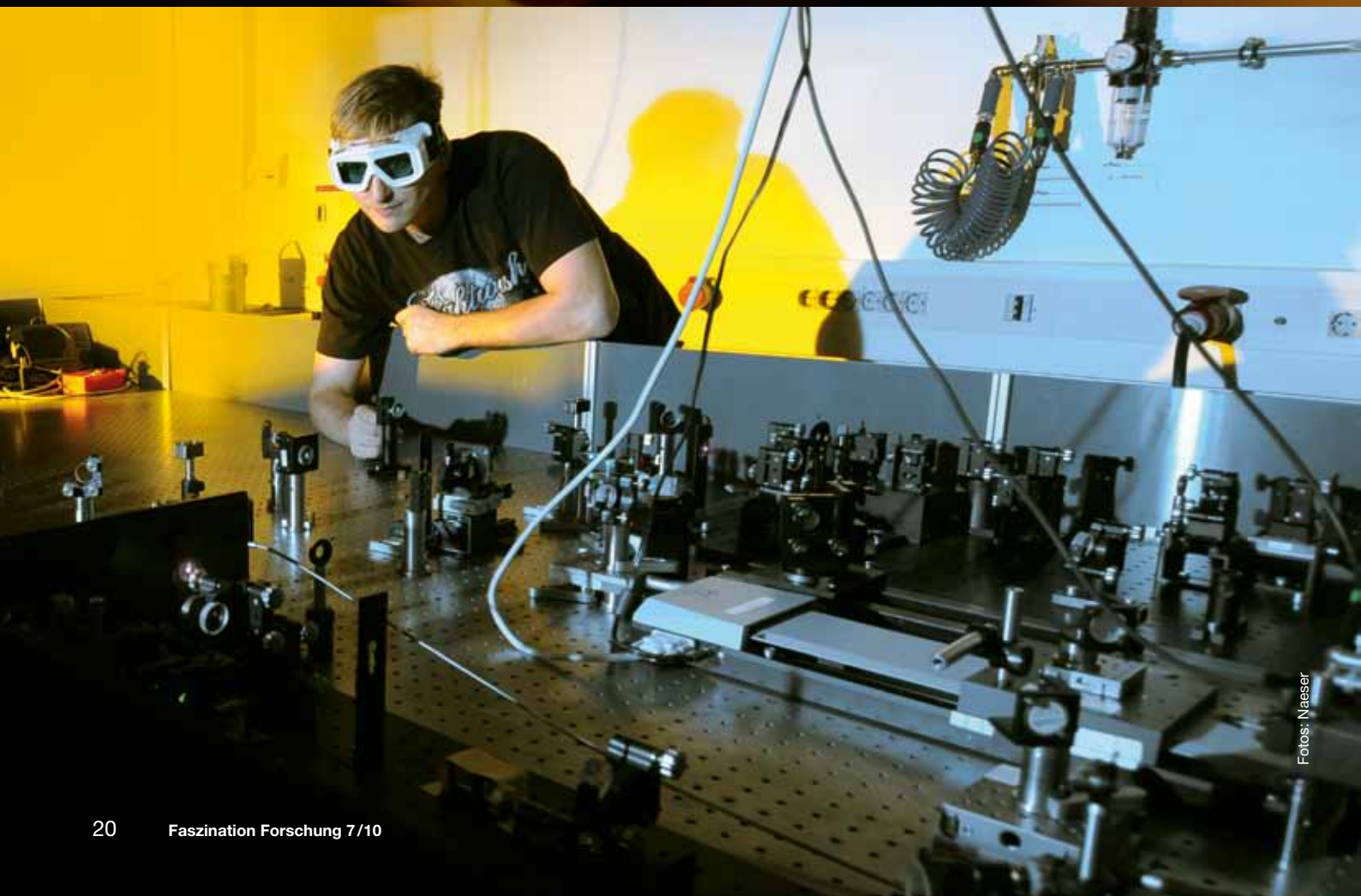


Foto: Naeser



Reinhard Kienberger, hier neben der Vakuumkammer der Experimentieranlage, gibt seine jahrelangen Erfahrungen an seine Mitarbeiter weiter, berät sie und hilft, wenn Probleme auftauchen



Fotos: Naeser

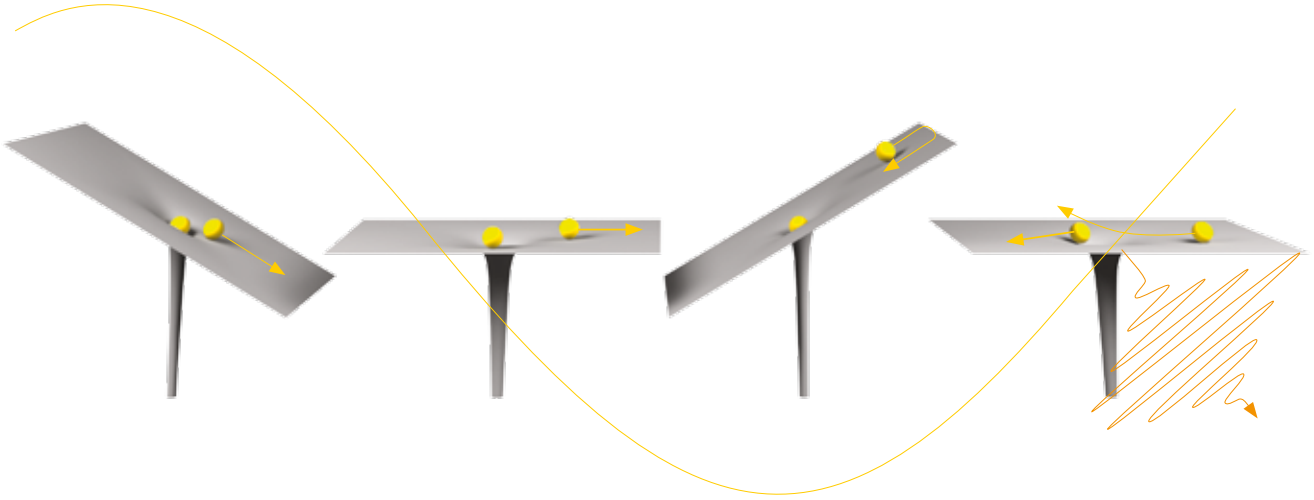
Oben: Ein gasgefülltes Röhrchen ist der Ursprung für die Röntgenstrahlen, aus denen man den Attosekundenpuls formt: Der Laser bohrt ein kleines Loch hinein und trifft auf die Gaselektronen

Unten: In den frisch renovierten Laborräumen an der TUM entstehen die neuen Experimente der Kienberger-Gruppe. Hier ist Doktorand Peter Lang dabei, Komponenten des Laserstrahls zu justieren

Elektronen sind der Motor unserer Welt. Nur wenn die winzigen, elektrisch geladenen Teilchen in Atomen und Molekülen den richtigen Platz einnehmen, wenn sie im passenden Augenblick von einer Zelle zur anderen wandern, Reaktionen anstoßen oder stoppen, funktioniert die Chemie des Lebens. Fließen sie im Überfluss oder fehlen sie am richtigen Ort, entstehen chronische Krankheiten. Aber auch die unbelebte Welt halten sie am Laufen: Sie sorgen dafür, dass es Licht und Wärme gibt, dass Substanzen Strom leiten oder isolieren, dass Informationen fließen. All dies weiß man heute, aber man kennt noch keine Einzelheiten darüber, wie die Partikel sich verhalten: Reagieren sie augenblicklich oder zögern sie, wenn sie angestoßen werden? Nehmen sie immer den direkten Weg oder laufen sie auf Umwegen? Wie schnell durchqueren sie bestimmte Materialien? Hier gibt es noch große weiße Flecken auf der Landkarte des Wissens.
Dass man das Verhalten der Elektronen bisher nur ganz grob beobachten konnte, liegt daran, dass die Vorgänge in diesem Bereich unglaublich schnell ablaufen. Es dauert nur einige Attosekunden, also Milliardstel vom Milliardstel einer Sekunde, wenn ein Elektron beispielsweise aus einem Atom herausspringt. Bisher fehlten die Instrumente, um solch ultrakurze Zeiträume zu untersuchen. Der 39-jährige Physiker Reinhard Kienberger, seit zwei Jahren Professor an der TUM, hat es sich zur Aufgabe gemacht, zu diesem Zweck Laser-Attosekundenpulse zu entwickeln und anzuwenden, und er ist äußerst erfolgreich darin. Nur mit solch extrem kurzen Lichtpulsen kann man in Gasatome oder in einen Festkörper hineinleuchten und die zeitlichen Abläufe im Inneren entschlüsseln.

Extrem kurze Belichtungszeit

Aus der Fotografie weiß man, dass ein Bild eines bewegten Motivs nur dann scharf wird, wenn die Belichtungszeit deutlich kürzer als die Bewegungsdauer ist. Reicht zur scharfen Abbildung eines fliegenden Tennisballes noch eine Belichtungszeit von knapp einer tausendstel Sekunde (10^{-3}), so müssen die Lichtpulse schon eine Billion Mal kürzer sein, um die schnellsten atomaren Bewegungen in Molekülen festzuhalten. Man spricht dann von Femtosekunden (10^{-15} Sekunden). Noch kürzere Blitze sind nötig, um Prozesse in der Elektronenhülle eines Atoms abzulichten, denn hier sausen die Elektronen noch tausend Mal schneller. Sie wechseln aus einem Energiezustand in einen ande- ▷



Die Erzeugung hoher Harmonischer

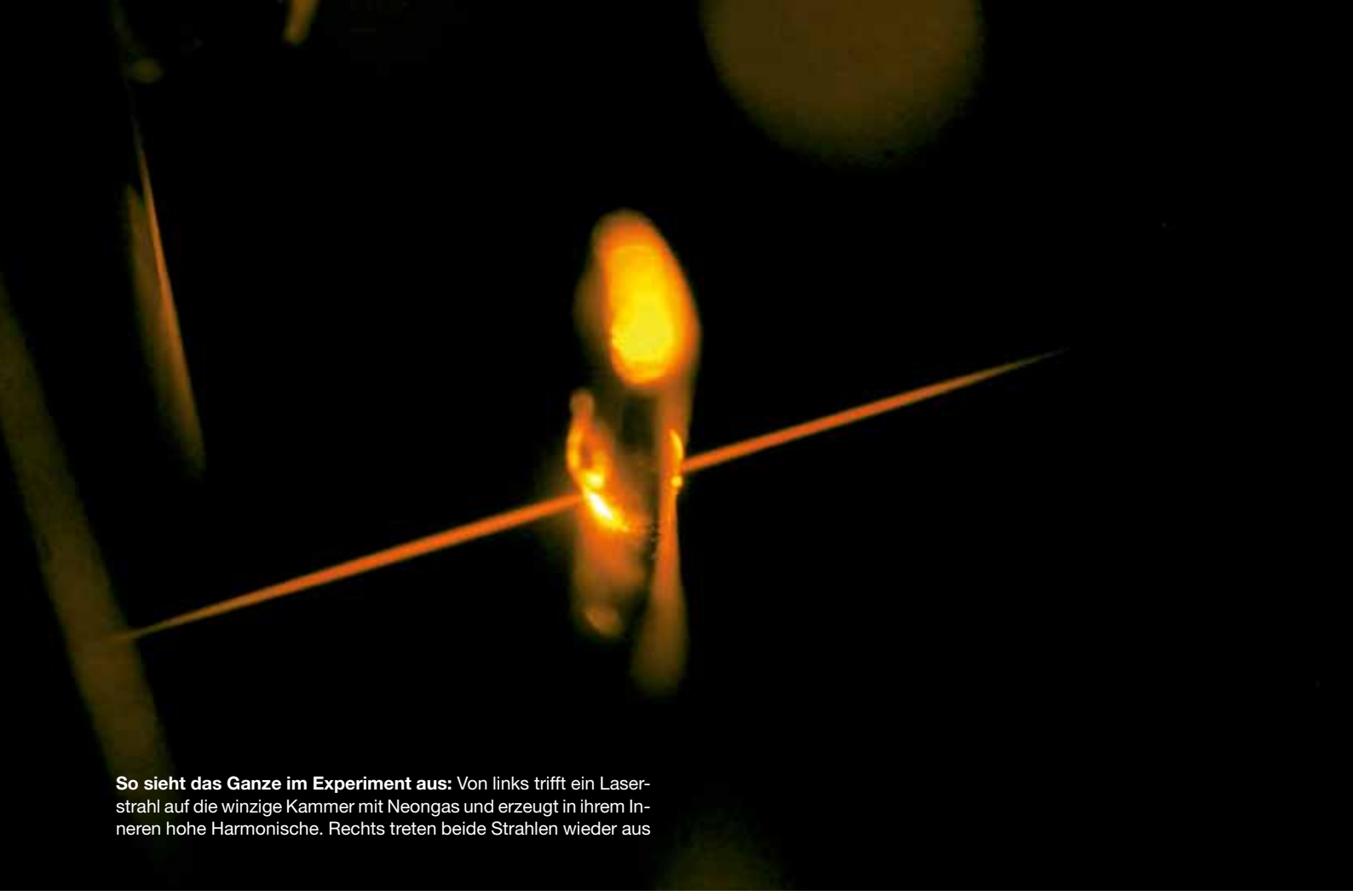
Das Elektron ist im Atom gefangen in einem elektrischen Potenzialtopf, aus dem es normalerweise nicht entweichen kann. Wird dieser Potenzialtopf durch das eingestrahlte Laserlicht (gelb) stark verbogen, so gelingt es einigen Elektronen, daraus „herauszutunneln“. Sie werden dann im elektrischen Feld des Laserlichts beschleunigt, erst in die eine Richtung und, sobald sich das Feld umkehrt, in die entgegengesetzte. So kehrt das Elektron mit höherer Energie als zuvor zum Atom zurück und fällt wieder in den Potenzialtopf. Die überschüssige Energie gibt es als Röntgenlicht (orange) ab.

Grafik: ediundsepp nach TUM; Foto rechts: Naeser

ren typischerweise in zehn bis tausend Attosekunden (10^{-18} Sekunden).
Schon bei seiner Doktorarbeit, die der in Graz geborene Forscher an der Technischen Universität Wien angefertigt hat, stieg er in das Gebiet ein. „Bereits in den 90er-Jahren, noch bevor ich mich damit beschäftigte, hat man versucht, Kurzpuls-Laserquellen zu entwickeln“, erinnert sich Kienberger. „Anfang der 90er-Jahre wurde der Prozess der Erzeugung hoher Harmonischer entdeckt. Es handelt sich dabei um eine Methode, wie man mit einem Laser im sichtbaren Licht extrem hochenergetische Photonen, also Lichtteilchen im Röntgenbereich, produzieren kann. Dass man das gleiche Verfahren auch für die Erzeugung extrem kurzer Pulse benutzen kann, erkannte man allerdings erst ein paar Jahre später.“ Hochenergetisch heißt mit anderen Worten: kurze Wellenlänge und hohe Frequenz.
Warum möglichst kurze Wellenlängen nötig sind, hat seinen Grund in folgendem Umstand: Eine elektromagnetische Welle kann nur dann entstehen und sich ausbreiten, wenn mindestens eine Schwingung vorhanden ist. Dies bedeutet aber, dass eine bestimmte Zeit verstreichen muss, bis die Schwingung vollendet ist. Benutzt man beispielsweise Titan-Saphir, eines der gebräuchlichsten Lasermedien für Kurzpuls-Festkörperlaser im sichtbaren Bereich, so emittiert dieser bei einer Wellenlänge von 750 Nanometern. Daraus ergibt sich eine Schwingungsdauer von 2,5 Femtosekunden. Heute schafft man mit den besten technischen Mitteln Pulse mit einer Dauer von 3,3 Femtosekunden und ist damit ganz knapp an dieser natürlichen Grenze. Will man noch kürzere Pulse erzeugen, benötigt man kürzere Wellenlängen, also Licht im fernen ultravioletten oder gar im Röntgenbereich (siehe Abbildung S. 24).

Röntgenlaser sind zu groß

„Das war also nun unsere Aufgabe“, schildert Kienberger das damalige Vorgehen. „Es gibt kein Material, das Röntgenlicht erzeugt, deshalb arbeiten alle Festkörperlaser im Sichtbaren. Überall auf der Welt unternimmt man in der Forschung große Anstrengungen, Röntgenlaser zu bauen, aber die meisten sind riesengroß und für unsere Zwecke deshalb nicht geeignet. Wir wandten eine andere Methode an, um zu Röntgenphotonen zu kommen, nämlich die Erzeugung sogenannter hoher Harmonischer.“
Harmonische Schwingungen bedeuten zum Beispiel bei einer Saite, dass ganzzahlige Vielfache einer



So sieht das Ganze im Experiment aus: Von links trifft ein Laserstrahl auf die winzige Kammer mit Neongas und erzeugt in ihrem Inneren hohe Harmonische. Rechts treten beide Strahlen wieder aus

Schwingung angeregt werden. In der Akustik entstehen so die verschiedenen Intervalle der Harmonielehre. In der Optik gibt es diese Harmonischen ebenfalls, so können manche Kristalle etwa rotes Licht in blaues verwandeln. „Hohe Harmonische“ heißt aber, man erzeugt Schwingungen nicht mit der Hälfte oder einem Drittel der Wellenlänge, sondern mit einem Hundertstel oder Tausendstel. Entsprechend viel höher ist dann auch die Energie des dazugehörigen Photons.

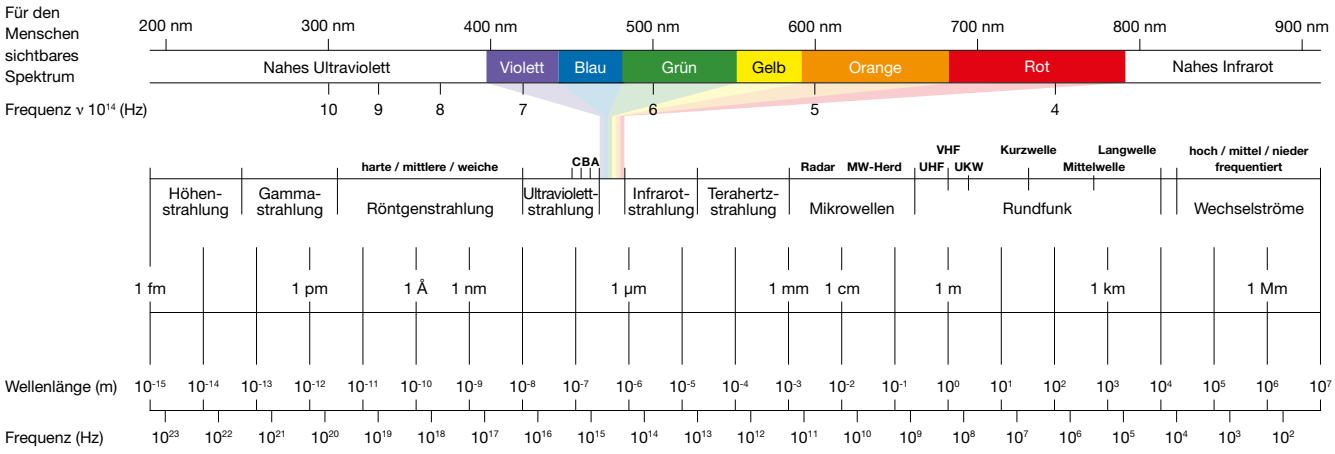
Im Experiment läuft das Ganze so ab: Man beschießt ein Edelgas mit Laserlicht. Unter den richtigen Bedingungen gelingt es, mit dem Laser einige Elektronen aus den Gasatomen herauszulösen und sie im elektromagnetischen Feld des Lichtstrahls stark zu beschleunigen, bevor sie wieder zu ihrem Atom zurückkehren. Die bei diesem Vorgang gewonnene Energie strahlen sie am Ende als Röntgenlicht wieder ab, dessen Photonen ein Vielfaches der Photonenenergie des eingestrahlten Lasers besitzen.

„Dass man damit dieses Verfahren auch dazu benutzen kann, um einzelne Attosekundenpulse zu machen, das haben wir vor neun Jahren geschafft“, sagt Reinhard Kienberger. „Zunächst erzeugten wir damit Impulse im weichen Röntgenbereich. Dann schnitten wir daraus einen einzelnen – jeweils den mit der höchsten Energie – heraus. Das schafften wir mit einem Spiegel, der in einer deutschen Kollaboration entwickelt wurde. Er reflektiert nur ganz bestimmte Wellenlängen, nämlich genau die, die wir herausschneiden wollten. So erzeugten wir Einzelpulse. Das haben wir als Erste und bisher fast Einzige geschafft, weltweit.“

Hoher Leidensdruck

Auch wenn sich das im Rückblick ganz einfach anhört, brachten die letzten 15 Jahre Kienberger neben Fortschritten auch Rückschläge und waren angefüllt mit dem typischen Freud und Leid eines Experimentators im Labor. Gleichwohl macht ihm der Beruf großen Spaß. „Glücklicherweise hatte ich noch nie den Fall, dass irgendetwas überhaupt nicht funktioniert hat. Andererseits hat man die wirklich guten Ergebnisse nur dann, wenn der Leidensdruck entsprechend hoch ist. Man steht oft viele Nächte im Labor und misst umsonst. Aber irgendwann funktioniert es plötzlich. Dann geht man auf ein Bier und feiert.“

Die ersten Attosekundenpulse gelangen dem begabten Experimentator noch in Wien, während seiner Doktorarbeit. „Wir lagen damals bei rund 800 Attosekunden.“ ▷



Von der Höhenstrahlung über sichtbares Licht bis hin zu Radiowellen handelt es sich immer um elektromagnetische Strahlung. Der Unterschied liegt in der Wellenlänge bzw. Frequenz. Je energiereicher die Strahlung, desto kürzer ist ihre Wellenlänge. Laser gibt es heute hauptsächlich im Infraroten und im Sichtbaren. Zur Erzeugung von Attosekundenpulsen benötigt man aber Laser im UV- oder Röntgenbereich

Grafik: ediundsepp

Als Postdoc schaffte Kienberger dann 650 Attosekunden, und jetzt liegt seine Gruppe bei 80: Das ist Weltrekord. Manchmal gingen die Fortschritte langsam voran, manchmal gab es aber auch Riesenschritte. ,,Man hat eine Idee, ändert etwas im Aufbau, und so erzielt man Verbesserungen. So haben wir es beispielsweise geschafft, durch experimentelle Modifikationen auf einen Schlag von 250 auf 80 Attosekunden runterzukommen. Manchmal sind das Änderungen, die ganz am Anfang der Kette stattfinden und sich bis zum Ende auswirken."

Maßgeschneiderte Teile

So etwas läuft nicht von allein, darüber vergehen Monate. „Man muss erst einmal darauf kommen, wo der Grund für eine Einschränkung liegt, dann braucht man eine Idee für die Lösung, anschließend muss man die entsprechenden Teile bestellen oder maßschneidern lassen und sie einbauen", beschreibt der Physiker, der inzwischen natürlich längst nicht mehr ständig im Labor steht, den Forscheralltag. „Und es funktioniert ja nie etwas beim ersten Mal. Dann überlegt man: Was hat man falsch gemacht, was kann man besser machen? Beim zweiten oder dritten Versuch funktioniert es dann vielleicht. Aber so gewinnt man viel Erfahrung." So kompliziert die Entwicklung der Attosekundenpulse ist, der experimentelle Aufbau der Messgeräte für das Auslesen der Ergebnisse der „Durchleuchtung" ist keineswegs einfacher. Auch hier waren geniale Ideen nötig. Die Garchinger Physiker arbeiten nach der „Anrege-Abfrage-Methode", die sie englisch kurz pump-probe nennen: Man regt mit einem Laserpuls erst einen Prozess an und mit einem weiteren fragt man ab, was passiert ist. Kienberger und sein Team arbeiten hier mit einem Trick: Sie verwenden zur Messung denselben Laserpuls, der den Attosekundenpuls ursprünglich erst erzeugte. „Das Fantastische ist, dass die beiden eine genau definierte Zeitbeziehung zueinander haben, weil ja der eine aus dem anderen entstanden ist", freut sich der Forscher. Der Attosekundenpuls wird also zum Herausschlagen des Elektrons benutzt. Dieses spürt dann, je nachdem, wann es „geboren" wurde, das elektrische Feld des ursprünglichen Laserpulses und erhält dadurch einen zusätzlichen Kick. Aus dessen Größe können die Physiker dann den Zeitpunkt des Herausschlagens errechnen, denn wenn Elektronen zu einem bestimmten Zeitpunkt kommen, verlieren sie Energie, wenn sie später kommen, gewinnen sie welche.

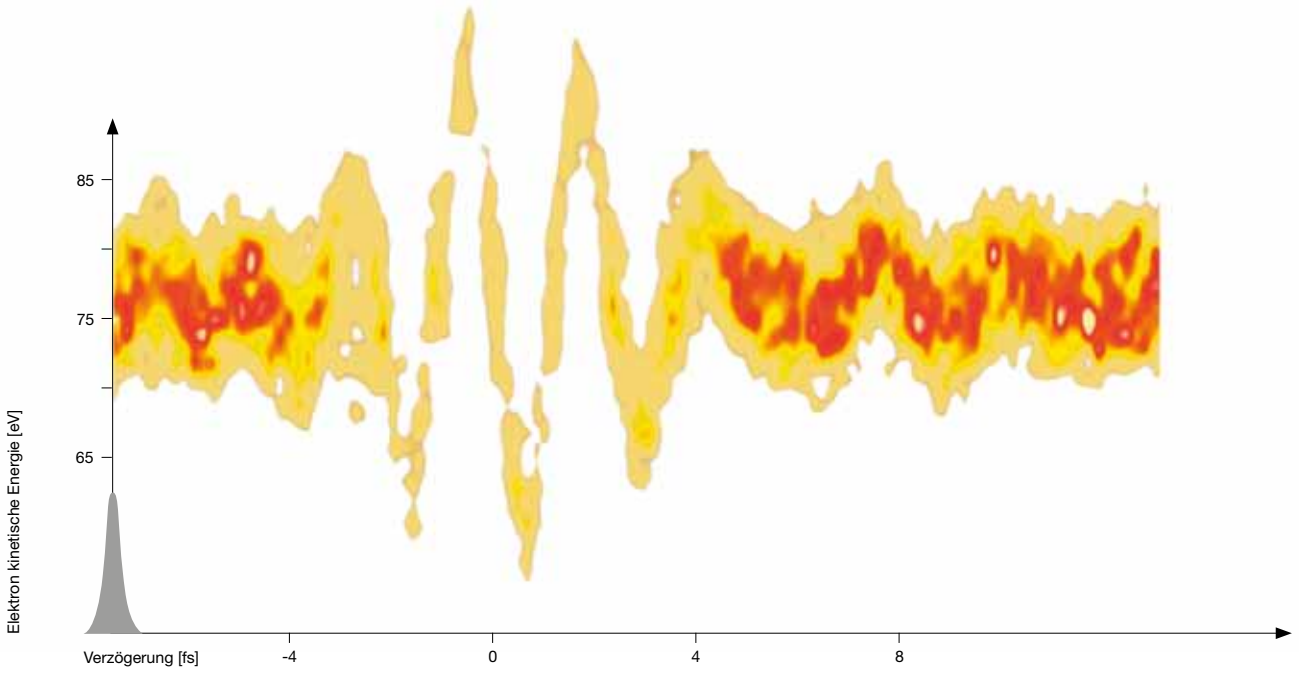


Bild:TUM

Mithilfe der Elektronen, die ein Attosekundenpuls (links unten in Grau) aus Gasatomen herausschlägt, lässt sich auch die Struktur des etwas langsameren Laserpulses vermessen, aus dem die Forscher den Attosekundenpuls ursprünglich erzeugten. Jedes Elektron spürt dessen elektrisches Feld unterschiedlich, je nachdem, wann es herausgeschlagen wurde. Manche verlieren, manche gewinnen Energie

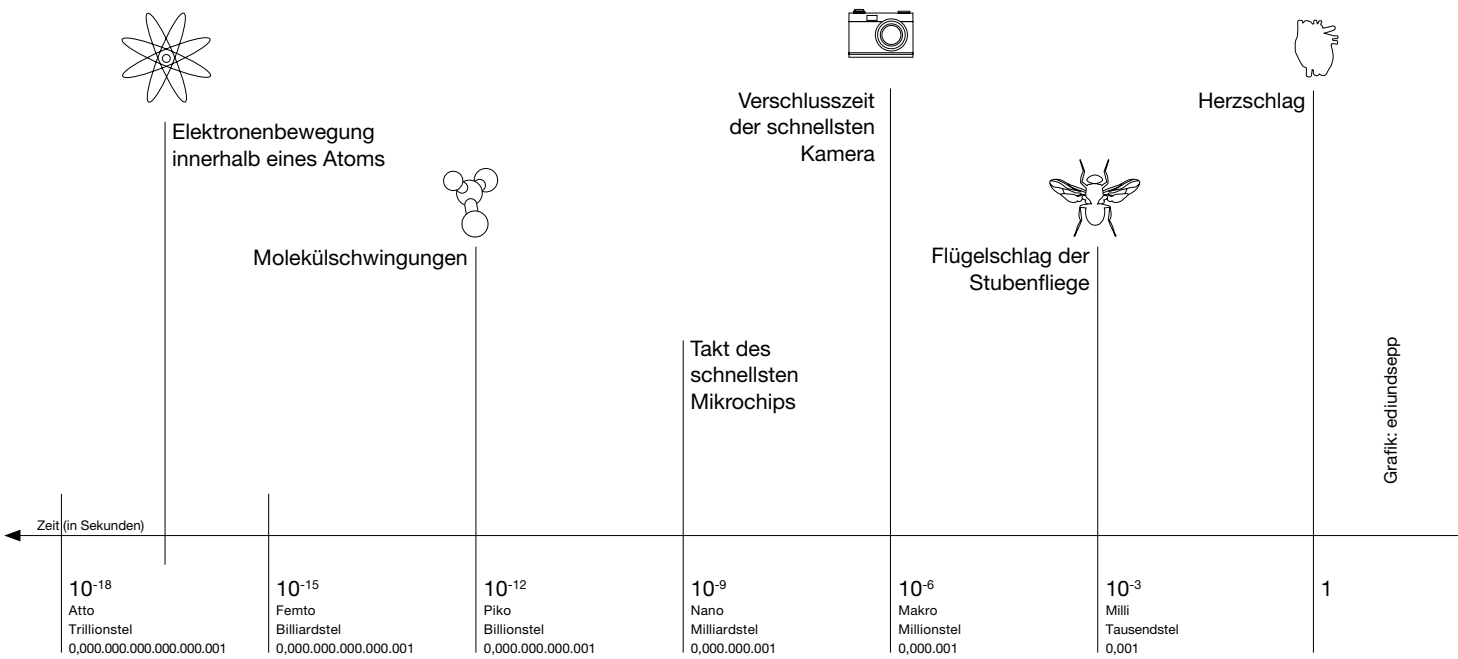
Mit einer einzigen Messung ist es jedoch nicht getan. Trotz aller technischer Kniffe sind die Attosekunden-Laserimpulse recht schwach, das heißt, sie bestehen nur aus wenigen Photonen, rund einer Million pro Schuss. Deshalb wiederholen die Forscher jede Messung zigtausend Mal, um die Statistik zu verbessern. Denn von der Million Photonen treffen vielleicht nur 100 auf ein Atom und schlagen ein Elektron heraus. Diese fliegen aber in alle Richtungen davon, nicht nur in Richtung Messgerät. Dort kommt also im Durchschnitt nur ein Elektron pro Messung an, und das erlaubt noch keine zuverlässige Aussage. Deshalb lässt man das automatisierte Experiment ein paar Sekunden lang laufen und zeichnet etwa 80.000 Schüsse auf. „Damit habe ich 80.000 Treffer und kann sagen: So sieht es in diesem Augenblick aus“, erklärt Kienberger. „Das Gleiche machen wir dann für jeden späteren Zeitpunkt. Das heißt, jedes einzelne Bild besteht aus 80.000 Treffern, und aus diesen Bildern machen wir dann einen Film.“

Aufgrund seiner großartigen Erfolge erhält Kienberger nun den ICO-Preis der International Commission for Optics und wird mit der Ernst-Abbe-Medaille der Carl-Zeiss-Stiftung ausgezeichnet. Der Preis wird einmal im Jahr vergeben an einen Forscher unter 40 Jahren, der bemerkenswerte Beiträge zur Optik geleistet hat. „Das ist eine große Ehre für mich“, sagt er, „bisher haben nur drei deutsche Forscher und noch kein Österreicher diese Auszeichnung erhalten.“

Neues Laserlabor an der TUM

Natürlich spielten bei den Erfolgen Kienbergers auch die besonders guten experimentellen Bedingungen am Max-Planck-Institut für Quantenoptik in Garching eine Rolle, wo er nach einem USA-Aufenthalt in Stanford die letzten Jahre arbeitete. Nun aber hat er ein eigenes Laserlabor an der TUM aufgebaut, das vor Kurzem seinen Betrieb aufnahm. Denn während an großen Forschungszentren wie dem CERN in Genf Milliarden Euro verbraucht werden, um ins Innere der Materie zu schauen, kommen die Laserforscher mit wenigen Millionen Euro aus. Das kann sich auch eine Universität noch leisten.

Hier, im ersten Stock des TU-Physik-Departments, ist alles noch fabrikneu und blitzblank. Und hier sollen auch völlig neuartige Untersuchungen laufen, das Team steht gewissermaßen schon in den Startlöchern. „Das meiste, was wir hier betreiben, ist wirklich Hardcore-Grundlagenforschung, dafür hat man heute noch ▷

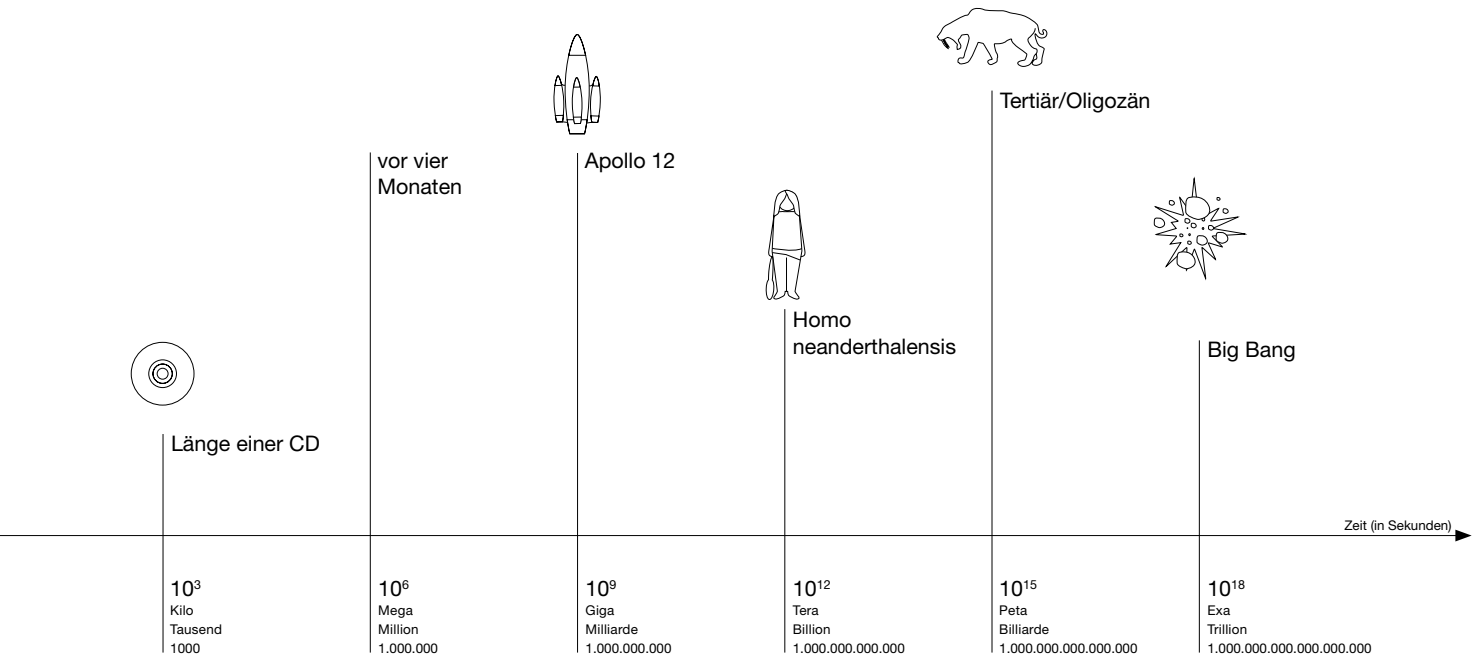


keine praktischen Anwendungen“, betont Kienberger. Dennoch gibt es auch jetzt schon ein paar sehr praxisrelevante Fragestellungen, etwa zur molekularen Elektronik. Dieses zurzeit stark boomende Fach beschäftigt sich damit, aus Molekülen elektronische Bauelemente zusammenzusetzen. Dazu muss man natürlich wissen, wie im Inneren die elektrischen Abläufe sind. Man will wissen, welches Elektron wann wo angeregt wird oder vom Zustand A nach B hüpft. Attosekundenpulse wären hier sehr hilfreich. „Das Erste, was wir untersuchen werden, ist Ozon, weil das einen sehr hohen Wirkungsquerschnitt im Ultravioletten hat“, sagt der Physiker. „Wir wollen uns mal ansehen, welche Elektronendynamik im Ozon stattfindet.“

Ursachen herauskitzeln

In der Regel wirft jedes Ergebnis gleich die nächste Frage auf, die man beantworten will. Zum Beispiel: Wenn man die Elektronendynamik in einem ganz einfachen Atom betrachtet hat, will man als Nächstes natürlich wissen, wie es in einem Molekül aussieht. Solche Fragen drängen sich automatisch auf. Auch der Schritt zu Festkörpern. Die Forscher haben schon viele Dinge systematisch in der Gasphase untersucht, weil ein Edelgasatom am einfachsten gebaut ist. Aber die wirkliche Welt besteht eben aus festen Stoffen, und so fragt man dann, wie es dort läuft.

Auch aus Festkörpern schlägt ein Laserpuls verschiedene Elektronen heraus. Kienberger und sein Team haben das an Wolfram gemessen. Die Elektronen wandern an die Oberfläche, und zwar unterschiedlich schnell. „Wir wissen zwar noch nicht, warum es dabei Verzögerungen gibt, aber wir wissen, dass es passiert“, so das vorläufige Fazit. Hier sind nun die Theoretiker gefragt, Modelle zu finden, die das Verhalten der Teilchen erklären können. „Wenn es keine Übereinstimmung mit den Theorien gibt, so wie das bei uns momentan der Fall ist, dann muss man sich überlegen, wie kann ich experimentell herauskitzeln, was die Ursache ist“, fordert Kienberger. Die Forscher bringen nun beispielsweise eine Einzellage anderer Atome auf den Kristall auf und untersuchen, um wie viel später ein Elektron ankommt, wenn es noch durch diese zusätzliche Schicht hindurchmuss. Als Nächstes bringen sie eine zweite Schicht darüber usw. So kann man schon Hinweise finden, was die Ursache der Verzögerung sein könnte. Auch in Bezug auf Solarzellen gibt es Fragen, die mit der Bewegung der Elektronen zu tun haben: Manche



Zeitmaßstäbe in der Natur: Die hochgestellten Zahlen geben – wenn sie positiv sind – die Anzahl der Nullen an, also etwa 10^3 = 1000. Hochgestellte Zahlen mit einem Minuszeichen geben die Anzahl der Stellen hinter dem Komma an, etwa 10^{-3} = 0,001. Der Einfachheit halber hat aber jede Größenordnung auch noch einen eigenen Namen

Solarzellen beruhen auf Titandioxid, darauf sind Molekül-Metallkombinationen aufgebracht. Diese absorbieren das Sonnenlicht und geben ein Elektron weiter, was dann letztlich zum Erzeugen einer elektrischen Spannung führt. Man weiß aber noch nicht, was mit dem Elektron im Einzelnen passiert. Wie schnell wandert es beispielsweise vom Metall zum Molekül? „Wir wollen das herausfinden“, sagt Kienberger. „Wir wollen wissen: Wie schnell geht das und in welchen Schritten? Wenn man das weiß, kann man das System optimieren. Erst wenn man den Prozess verstanden hat, kann man überlegen, wie man die Effizienz erhöhen kann. Auf dieser fundamentalen Ebene hat das vor uns noch niemand gemacht.“

Gesucht: hohe Frustrationsresistenz

Nachwuchssorgen für sein Team hat der Forscher keine. „Fast jede Woche bewirbt sich ein Physikstudent um eine Stelle oder ein Praktikum“, sagt er. Bestimmte Charaktereigenschaften sind allerdings nötig, wenn man Erfolg haben will in der Spitzenforschung. „Man braucht einen langen Atem und viel Geduld. Man muss auch frustrationsresistent sein. Der Schlüssel zum Erfolg ist, dass man Niederlagen wegsteckt und sagt: Ich werfe nicht alles hin, sondern versuche, daraus zu lernen, und mache weiter. Ich glaube, dass man auch aus Misserfolgen sehr viel lernen kann, wie überall im Leben. Das muss man dann umsetzen und weitermachen.“ Wichtig ist auch, dass man teamfähig ist. Wirklich gute Forscher sind meist keine Einzelgänger. Man muss gemeinsam Ideen verwirklichen, denn die Wissenschaft ist heute schon viel zu komplex für den einzelnen Forscher.

So stellt sich Reinhard Kienberger sein Team zusammen, und es finden sich nicht nur Laserspezialisten darin. Mehr und mehr wird man auch interdisziplinär arbeiten, denn der Laser an sich ist für die Garchinger kein Selbstzweck. Auch nicht die kürzesten Attosekundenpulse. Die Forscher entwickeln diese nur, um damit Prozesse in der Natur zu untersuchen. „Wir dringen sehr weit auf Neuland vor, weil es diese Werkzeuge nicht kommerziell gibt“, betont Kienberger. „Es ist eine große Befriedigung, wenn man sagen kann: Ich habe die kürzesten Attosekundenpulse entwickelt, ich habe eine Messmethode entwickelt, wie man sie messen kann usw. Das freut einen, wenn man es geschafft hat. Der Antrieb war jedoch immer, dass wir elektronische Vorgänge messen wollten.“ *Brigitte Röthlein*