Ballkünstler in der **Quantenarena**

Mit Basketbällen haben Elektronen nicht viel gemeinsam, außer dass sie oft kugelförmig abgebildet werden. **Peter Hommelhoff** spielt mit den einen jedoch genauso geschickt wie mit den anderen. Mit seinen Experimenten am **Max-Planck-Institut für Quantenoptik** in Garching erreicht der Leiter einer Max-Planck-Forschungsgruppe dabei eine neue Dimension der Kontrolle über die Elementarteilchen.

TEXT **ALEXANDER STIRN**

Blocks, Rebounds, Sprungwürfe. Peter Hommelhoff ist ein Mann mit Ballgefühl. Jahrelang stand der Physiker Wochenende für Wochenende auf dem Basketballplatz, hat den eigenen Korb verteidigt, hat Abpraller ergattert und sich durch die gegnerische Verteidigung gewühlt.

Inzwischen leitet der Zwei-Meter-Mann eine Forschungsgruppe am Max-Planck-Institut für Quantenoptik in Garching. Seinen Spaß am Spiel hat er dennoch nicht verloren, im Gegenteil. Statt mit Basketbällen jongliert Hommelhoff nun mit Spielgeräten die, klassisch betrachtet, 50 Billionen Mal kleiner sind: Der 37-Jährige hat sich in den Kopf gesetzt, die Bewegung von Elektronen mithilfe von Laserlicht und Mikrowellen zu manipulieren.

Hommelhoffs Spielfeld ist dabei ein optischer Tisch, vollgepackt mit Linsen, Spiegeln, Strahlteilern. Wasser kühlt die Systeme, Stickstoff vertreibt die letzten Staubpartikel. Sein Wurfarm ist ein Laser. Sein Brett und sein Ring stehen in einer Vakuumkammer. Nur seine Tricks sind noch immer die gleichen: Peter Hommelhoff versucht Elektronen freizuschlagen, zu beschleunigen und auf eine gekrümmte Flugbahn zu zwingen, er lässt sie gezielt abprallen und versenkt die Teilchen genau dort, wo er sie haben will.

PHYSIK PUNKTET ALS FACH MIT LOGISCHER SPRACHE

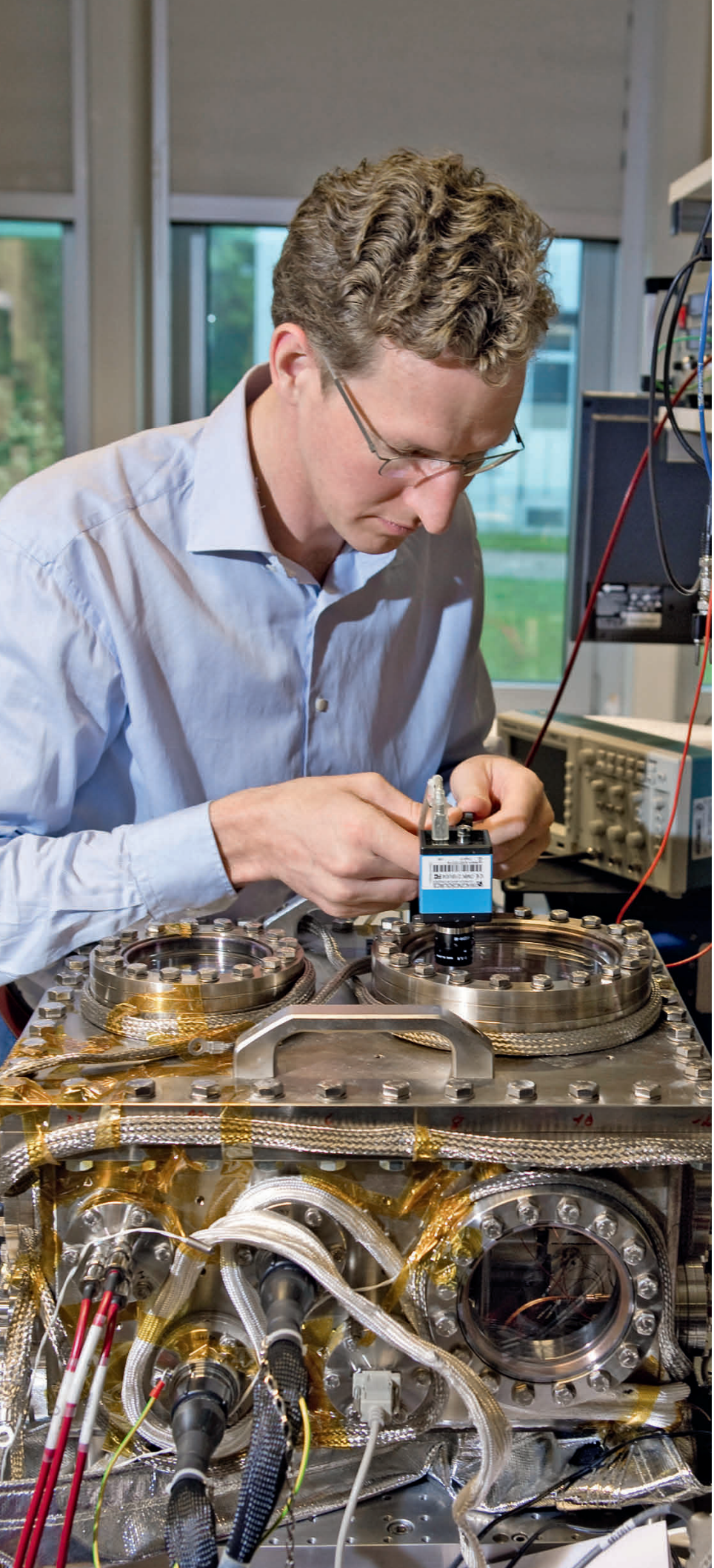
Mehr als 20 Jahre sind vergangen, seit die Grundlage für Hommelhoffs sportliche und wissenschaftliche Karriere gelegt wurde: Sommer 1991. Der Gymnasiast ist gerade mit seiner Familie von Bielefeld nach Heidelberg gezogen. Einer der ersten Wege führt den 16-Jährigen dort zum Basketballtraining des damaligen deutschen Rekordmeisters USC Heidelberg. Lediglich zum Spaß hat der Schlaks zuvor mit den großen orangefarbenen Bällen gespielt – oder zum Aufwärmen für eine seiner vielen anderen Sportarten, ganz besonders fürs Fechten. Jetzt aber, in der Stadt der Profis, soll auch sein Training professioneller ausfallen. „Der absolute Filigrantechniker bin ich dennoch nicht geworden, dafür habe ich wohl einfach zu spät angefangen“, sagt Hommelhoff heute und schmunzelt.

Auch in der Schule bringt Heidelberg Veränderungen mit sich. Zu Hause in Bielefeld hätte Hommelhoff, ohne zu zögern, Latein und Griechisch als Leistungskurse gewählt – zwei klare, schön strukturierte Sprachen mit einer logischen Grammatik. Im Badischen macht der Griechischunterricht allerdings nicht mehr so viel Spaß. Die Wahl fällt deshalb auf ein anderes Fach mit einer ebenfalls klar strukturierten und logischen Sprache: Physik.

Die Naturwissenschaft ist interessant, faszinierend, aber auch die anderen Fächer haben ihren Reiz. Peter Hommelhoff hat keine Ahnung, was er studieren soll. Zum Glück kommt nach dem Abitur die Bundeswehr dazwischen. Hommelhoff geht zur Marine. Er dient auf der Fregatte „Emden“ – trotz

Peter Hommelhoff zielt heute häufiger mit einem Laser auf Elektronen als mit dem Ball auf einen Korb.

Foto: Denise Vernillo



seiner Körpergröße von 2,03 Meter. Er arbeitet dort als Navigator – wegen seiner Fähigkeiten in Mathe und Physik.

Gegen Ende der Bundeswehrzeit wird der Gefreite dazu verdonnert, seinen Resturlaub zu nehmen. Er fliegt eine Woche nach Mallorca. Radfahren. Nachdenken. Hinterher ist Peter Hommelhoff so schlau wie zuvor. Irgendwie entschließt er sich dann doch zum Physikstudium. „Letztlich war es wohl eine bewusste Entscheidung, ganz sicher war es aber die richtige Entscheidung“, sagt er rückblickend.

VOR DEN SPIELEN GAB ES KEINE ABLENKUNG VOM LERNEN

Fürs Studium will Peter Hommelhoff raus aus dem kleinen, netten Heidelberg. Er zieht nach Berlin. Auch sportlich geht es aufwärts. Der OBC Wolmirstedt, ein Basketballverein bei Magdeburg, spricht den Physikstudenten an und offeriert ihm einen Platz in der Regionalliga – damals die vierthöchste deutsche Spielklasse. Wegen seiner Größe wird Hommelhoff als Center eingesetzt. Er spielt eine Art Ausputzer unterm Korb, muss Durchsetzungsvermögen und Körpereinsatz zeigen. „Natürlich hätte ich viel lieber gedribbelt und den Ball nach vorn gebracht“, erzählt Hommelhoff. „Wenn man spielen will, macht man aber das, was der Trainer sagt.“

Immer freitags fährt der Student nach Magdeburg. Er übernachtet in einer leer stehenden Wohnung, die der Clubpräsident für seinen Sohn organi-

Peter Hommelhoff positioniert eine Kamera über einem Fenster in der Vakuumkammer, um die Elektronen zu beobachten, die ein Laser aus einer Nanospitze katapultiert. Die Kammer ist mit einem metallisch glänzenden Heizband umwickelt. Die Kabel dienen zur Steuerung des Experiments und zur Stromversorgung, unter anderem eines Elektronenspektrometers.

Foto: Denise Vernillo

» Beim Mittagessen grübeln die Physiker, was passieren würde, wenn sie einen Laser auf Hommelhoffs extrem spitze Elektronenquellen abfeuern würden – gedacht, getan.

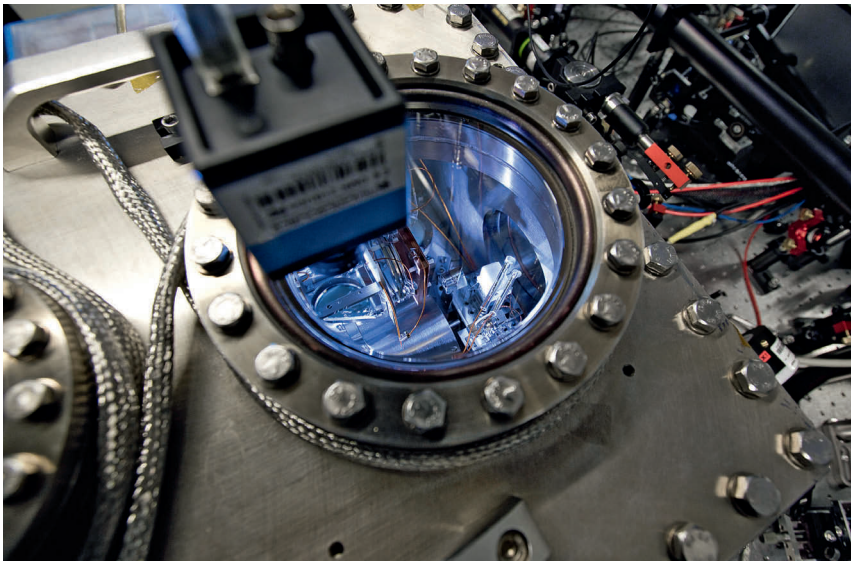
siert hat – falls der Junior eines Tages in Magdeburg studieren sollte. Samstagmorgens büffelt Hommelhoff für sein Studium, nachmittags spielt er vor bis zu 500 Zuschauern in der Regionalliga. „Im Vorfeld der Spiele habe ich immer am besten fürs Vordiplom lernen können, weil da null Ablenkung war", erinnert er sich.

Nach der Zwischenprüfung ist allerdings Schluss mit der Idylle. An den Berliner Hochschulen wird gestreikt, Peter Hommelhoff will weg – am liebsten in die USA, ins Gelobte Land des Basketballs, wie er sagt. Ein Auslandsjahr in einem komplett anderen akademischen System würde sich allerdings mit dem Ziel beißen, das Studium möglichst schnell durchzuziehen. Hommelhoff geht lieber nach Zürich, an die Eidgenössische Technische Hochschule (ETH).

Dort widmet sich der junge Deutsche der Teilchenphysik. Die Kollision von Elektronen und Protonen bei hohen Energien wird Thema seiner Diplomarbeit. Er spielt Basketball im Team der ETH und gewinnt 1999 die Bronzemedaille bei der Schweizer Basketball-Hochschulmeisterschaft. Gold geht ausgerechnet an die Freunde von der Universität Zürich, die mit den Spielern der ETH immer zusammen trainierten.

Viel prägender aber ist ein Vortrag, auf den ein Kommilitone Hommelhoff kurz vor der Diplomprüfung aufmerksam macht: Ein deutscher Quantenoptiker hat sich angekündigt, um beim zentralen Physikkolloquium der beiden Zürcher Fakultäten von seiner Arbeit zu berichten. Sein Name: Theodor Hänsch. Für Peter Hommelhoff ist das kein Unbekannter, bereits zuvor waren ihm in Physikzeitschriften die Arbeiten des Professors aufgefallen.

Überraschend wenige Zuhörer verlieren sich im Hörsaal, darunter Hommelhoff und seine beiden Freunde: „Ganz am Ende schaute Hänsch in Richtung von uns drei Hanseln und sagte sinngemäß: Meine Gruppe ist übrigens auf der Suche nach Doktoranden."



Blick auf eine Quelle einzelner Elektronen. Durch das Bullauge der Vakuumkammer ist die Wolframspitze als feiner heller Strich zu erkennen. Mit der Kamera darüber registrieren die Forscher die räumliche Verteilung der Elektronen.

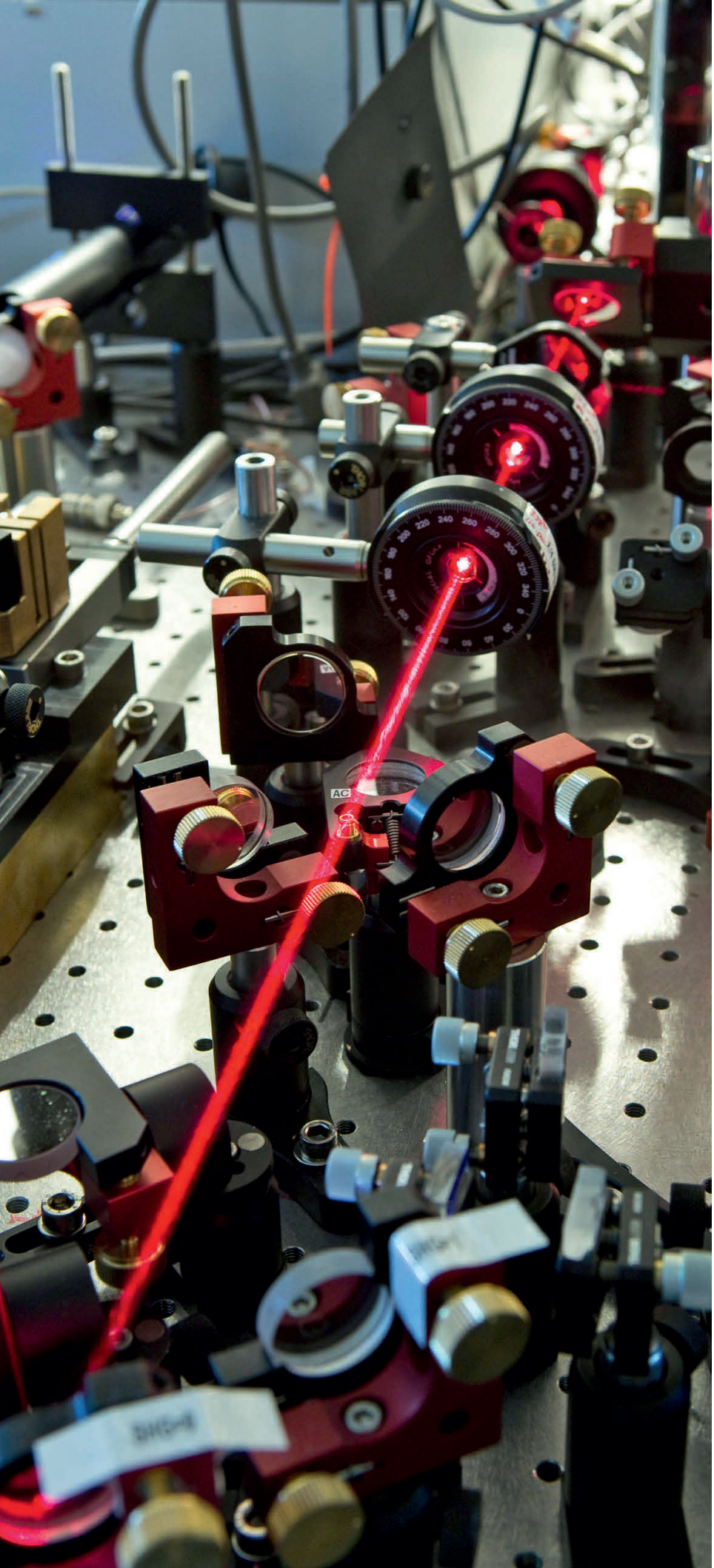
Die beiden unterhalten sich kurz, Hänsch kritzelt seine E-Mail-Adresse in Hommelhoffs Notizbüchlein, ein paar Wochen später fängt der frischgebackene Diplomphysiker in München an – obwohl er im Studium außer einer Pflichtvorlesung in Quantenelektronik keine einzige Optikveranstaltung belegt hat. „Ich fand den Vortrag Theodor Hänschs einfach hochinteressant, er hat mich wirklich begeistert", erinnert sich Peter Hommelhoff. Weitere Promotionsangebote, unter anderem aus Hamburg und Zürich, schlägt der Physiker aus. „Es war die richtige Entscheidung", sagt er heute. Die Quantenoptik wird Peter Hommelhoff nicht mehr loslassen.

Wissenschaftlich geht es aufwärts, sportlich muss der Basketballer dagegen immer weiter zurückstecken. Er spielt – mehr zum Spaß – in der zweiten Mannschaft der München Baskets, eines kleinen oberbayerischen Vereins. Der Traum von den USA treibt Peter Hommelhoff allerdings noch immer um. 2003, nach der Promotion mit summa cum laude bei Theodor Hänsch, erfüllt er ihn sich. „Irgendwann musste es ja sein", sagt er und lacht.

DAS ZIEL: EIN WELLENLEITER FÜR LANGSAME ELEKTRONEN

Es geht nach Stanford, Kalifornien. Für das dortige Hochschulteam, in dem die Stars der nordamerikanischen Profiliga NBA geformt werden, reicht es nicht – allein schon weil Hommelhoff als Graduierter inzwischen viel zu alt ist. Aber

Foto: Denise Vernillo



auch ohne festes Team findet sich immer eine Gruppe für eine spontane Partie. „Dort habe ich vier Jahre lang alles gespielt, was mir Spaß gemacht hat, aber ganz sicher nicht nur Center“, sagt der Zweimetermann.

In seiner Forschung bleibt Hommelhoff dagegen den kleinen Teilchen treu. Er will einen Wellenleiter für langsame Elektronen konstruieren, muss dafür aber zunächst eine punktförmige Quelle für seine Elementarteilchen bauen. Peter Hommelhoff experimentiert mit extrem widerstandsfähigen Wolframdrähten, die er elektrochemisch ätzt und dadurch schärft. Es entstehen Spitzen, die lediglich aus ein paar Dutzend Wolframatomen bestehen. Durch Beschichtung mit Palladium können sie sogar in einem einzigen Atom enden. Ein idealer Spender für Elektronen.

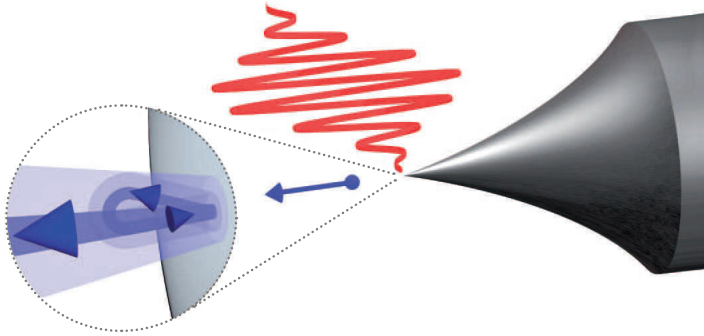
LASERFEUER AUF EINE EXTREM SPITZE ELEKTRONENQUELLE

Nach vier Monaten bekommen Hommelhoff und seine Drähte Gesellschaft. Ein weiterer Postdoktorand zieht im Labor ein und baut seinen Versuch am anderen Ende des vier Meter langen optischen Tisches auf. Er experimentiert mit sogenannten Femtosekundenlasern – Lichtquellen, deren einzelne Pulse wenige billiardstel Sekunden lang sind. Beim Mittagessen grübeln die beiden Physiker, was wohl passieren würde, wenn sie so einen Laser auf Hommelhoffs extrem spitze Elektronenquellen abfeuern würden.

Gedacht, getan. „Das ist sofort interessant geworden und hat uns letztlich ein ganz neues Forschungsfeld eröffnet“, erinnert sich Peter Hommelhoff.

Im Laserlicht verhalten sich die Spitzen ganz ähnlich wie ein Blitzableiter. Dessen scharfes, in den Himmel ge-

Foto: Denise Vernillo



richtetes Stück Metall sammelt die elektrischen Feldlinien und sorgt so dafür, dass der Blitz genau an dieser Stelle einschlägt. Die Wolframspitzen bündeln ebenfalls ein Feld: das des Laserlichts. Sie tun das so wirkungsvoll, dass durch den Laser Elektronen aus dem Metall herausgetrieben werden können.

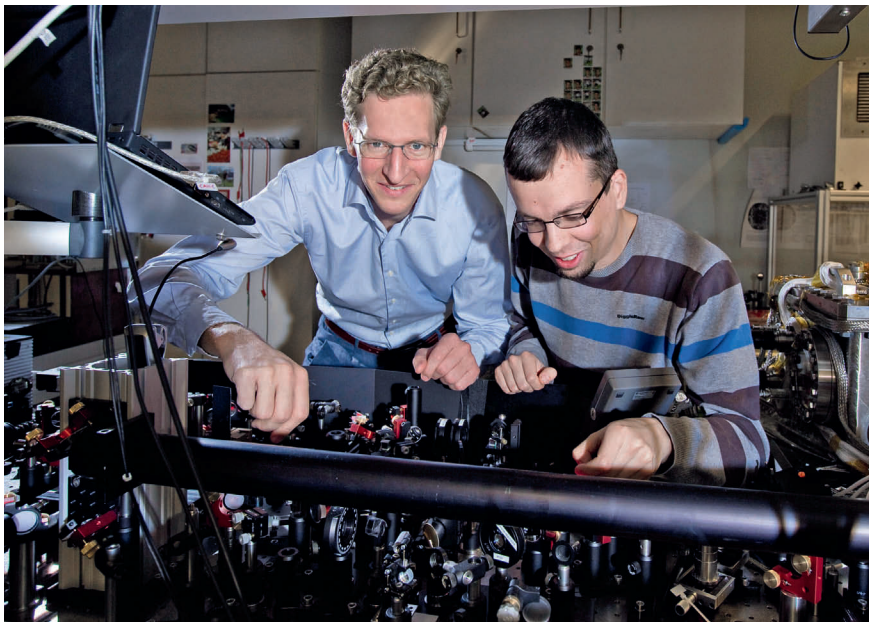
Da es sich bei Licht um eine Welle handelt, die mit hoher Frequenz auf und ab schwingt, ergeht es den freigesetzten Teilchen ähnlich wie einem Blatt auf hoher See: Sie werden zuerst angehoben und von der Spitze weg beschleunigt, die nächste Halbwelle treibt die Elektronen jedoch wieder zurück. Sie sinken ab und knallen auf das Metall. „Das ist beinahe so, als würde man einen Ball gegen die Wand werfen", sagt Peter Hommelhoff.

Wie ein Flummi prallen die Teilchen von der Wolframspitze ab und werden wieder vom Laserlicht erfasst. Dessen Welle ist inzwischen abermals umgeklappt, sodass die Partikel erneut beschleunigt werden und nun endgültig wegfliegen. „Auf diese Weise können wir die Emission von Elektronen mit dem Laser steuern – und dies auf einer extrem schnellen Zeitskala", sagt der Max-Planck-Forscher.

linke Seite: Den roten Laser steuern Peter Hommelhoff und seine Mitarbeiter so präzise, dass sie bestimmen können, wann Wellenberge und -täler der Pulse auf ihre scharfe Spitze treffen. Auf diese Weise kontrollieren sie die Bewegung der Elektronen.

oben: Skizze eines Spitzenexperiments: Der rote Laserpuls wird genau auf die Wolframspitze gerichtet und schlägt dort ein Elektron (blauer Pfeil) heraus, das durch das schwingende elektromagnetische Feld des Lichts erst von der Spitze weg und wieder zurück zu ihr beschleunigt wird, ehe es endgültig fortgeschleudert wird.

unten: Peter Hommelhoff und Michael Krüger justieren die optischen Instrumente des Laseraufbaus.



Das dafür nötige Licht erzeugt in Hommelhoffs Labor ein Titan-Saphir-Laser. Dessen Wellen, die im nahen Infrarot ausgesandt werden, schwingen rund 350 Billionen Mal pro Sekunde auf und ab. Jede Welle ist damit rund drei Femtosekunden lang, das sind gerade einmal drei billiardstel Sekunden. Zudem ist der Laser gepulst – das heißt, er wird immer nur für knapp sieben billiardstel Sekunden angeschaltet und erlischt dann wieder für kurze Zeit. Etwa zwei Lichtwellen passen somit in jeden Puls.

Das hat Folgen für das Spiel mit den Elektronen: Je nachdem, wann der Laser eingeschaltet wird, kann das Maximum der Lichtwelle genau in der Mitte des Pulses liegen. Für weitere Wellen ist dann kaum noch Platz. Es kann aber auch passieren, dass sich zwei Wellenberge auf den Anfang und das Ende des Pulses verteilen. Im ersten Fall werden alle Elektronen zum gleichen Zeitpunkt herausgeschlagen, im zweiten Fall können die Physiker kurz hintereinander freigesetzte Elektronenpärchen beobachten.

Wobei „beobachten" übertrieben ist: Die Prozesse sind so schnell und finden auf so engem Raum statt, dass sie sich mit keinem Mikroskop der Welt direkt betrachten lassen. Hommelhoff registriert stattdessen die Energieverteilung der freigeschlagenen und auf einem Detektor gelandeten Elektronen.

AUF DEM WEG ZUM SCHNELLSTEN SCHALTER DER WELT

Dabei zeigen sich interessante Phänomene. In ihrer ganz eigenen Quantenwelt verhalten sich Elementarteilchen nicht nur wie winzige Basketbälle, sie haben auch den Charakter einer Welle. Sobald zwei Elektronen freigeschlagen werden, können sich ihre Wellen über-

Foto: Denise Vernillo, Grafik: MPI für Quantenoptik

lappen und zum Teil gegenseitig auslöschen. Auf dem Detektor taucht ein Streifenmuster auf, die Physiker sprechen von Interferenz. In seinen Experimenten ist es Hommelhoff sogar gelungen, das Aussehen dieses Interferenzmusters gezielt zu verändern – indem er vorgab, wo genau die einzelnen Lichtwellen innerhalb des größeren Laserpulses auftauchen.

Möglich geworden ist diese Feinabstimmung durch ein Gerät namens Frequenzkamm. Theodor Hänsch, Hommelhoffs Doktorvater, hat es entwickelt und dafür 2005 den Physik-Nobelpreis bekommen. „Der Frequenzkamm ist eine sehr mächtige Technik, da erwarten wir noch weitere revolutionäre Anwendungen“, sagt Peter Hommelhoff. Schließlich soll es nicht bei Interferenzmustern auf Detektoren bleiben. Unter anderem arbeitet der Physiker gerade daran, Elektronen mit gezielt manipulierten Laserpulsen von einer Wolframspitze zu einer anderen Elektrode fliegen zu lassen. Sollte das gelingen, würde allein durch Licht ein Stromfluss an- und wieder ausknipst. Es wäre der schnellste Schalter der Welt.

WIE MANIPULIERT MAN DIE ELEKTRONENBEWEGUNG?

Vier Jahre dauert Hommelhoffs Auswärtsspiel in Kalifornien, dann ruft die Heimat. Der Physiker bewirbt sich um die Leitung einer Max-Planck-Forschungsgruppe, bekommt den Zuschlag und steht wieder vor einer Wahl – dieses Mal: Berlin oder München? Fritz-Haber-Institut oder Max-Planck-Institut für Quantenoptik? „Die Berliner hatten einiges zu bieten“, erinnert sich Peter Hommelhoff. Sie punkten mit einem Labor in einer Villa in Dahlem, mit einer neuen Klimaanlage, die für die Experimente unerlässlich ist, mit Parkettboden – und mit der Aussicht, in einigen Jahren als einziger Quantenoptiker am Institut ganz groß herauszukommen. In Garching besteht dagegen die Gefahr, vom Glanz eines frischgebackenen Nobelpreisträgers auf dem Gebiet der Quantenoptik und von vielen renommierten Arbeitsgruppen, die auch in diesem Bereich forschen, verschluckt zu werden.

Peter Hommelhoff entscheidet sich trotzdem für das Max-Planck-Institut für Quantenoptik. „Ich wollte die Sicherheit eines Instituts, an dem bereits viele Laser und viel Know-how vorhanden sind“, sagt er heute.

Die Sicherheit ist trügerisch. Auch in Garching muss Hommelhoff von null starten. Der Aufbau seines neuen Labors zieht sich hin. Eineinhalb Jahre dauert es allein, bis die Klimaanlage funktioniert. Ohne ihre saubere und konstant temperierte Luft lässt sich ein hochpräziser Laser nicht betreiben. Doch die eigens engagierte Klimafirma kommt nicht zu Potte. „Es war der absolute Horror“, sagt Peter Hommelhoff.

Heute, vier Jahre später, läuft alles. Die Arbeitsgruppe ist auf zehn Mann angewachsen, die Bedingungen sind, so Hommelhoff, „blendend“. Zu den freigeschlagenen Elektronen haben sich weitere Versuche gesellt, darunter auch der Wellenleiter, mit dessen Idee in Stanford einst alles angefangen hat.

Stets geht es in den Experimenten darum, die Bewegung von Elektronen gezielt zu manipulieren. Als die alles dominierende Frage hinter seiner Arbeit will Hommelhoff das dennoch nicht verstehen. „In der Grundlagenforschung ist es unrealistisch, sich ein Ziel zu setzen und dann zu versuchen, es zwanghaft zu erreichen“, sagt er. Der Physiker plädiert vielmehr für eine von Neugier getriebene Forschung, die allerdings nicht beliebig werden darf: „Statt von einer großen Frage lassen wir uns lieber von Erfolg und Misserfolg leiten, schlagen interessant erscheinende Richtungen ein, biegen ab und kommen manchmal über Umwege dann wieder auf das Ausgangsproblem zurück.“

Spielfeld für Physiker: Jakob Hammer (links) testet den Aufbau für Nanolinsen in einer Vakuumkammer, Johannes Hoffrogge (Mitte) betreibt den Wellenreiter für Elektronen, und John Breuer (rechts) versucht, laserbeschleunigte Elektronen zu detektieren. Im Hintergrund: Robert Davies.

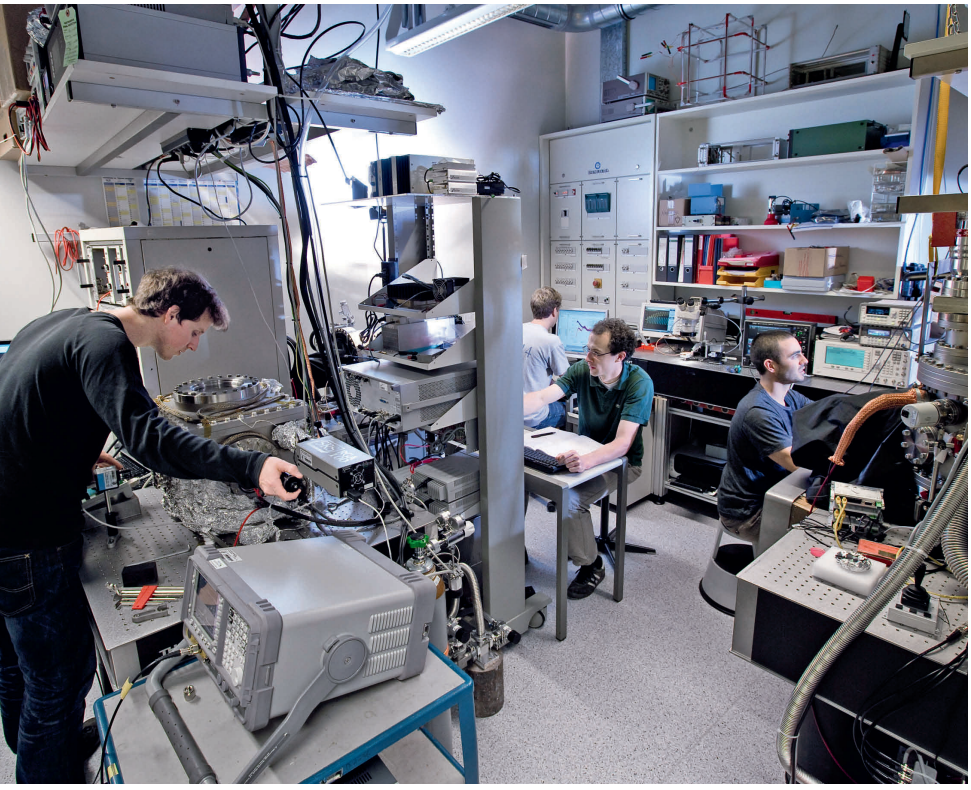
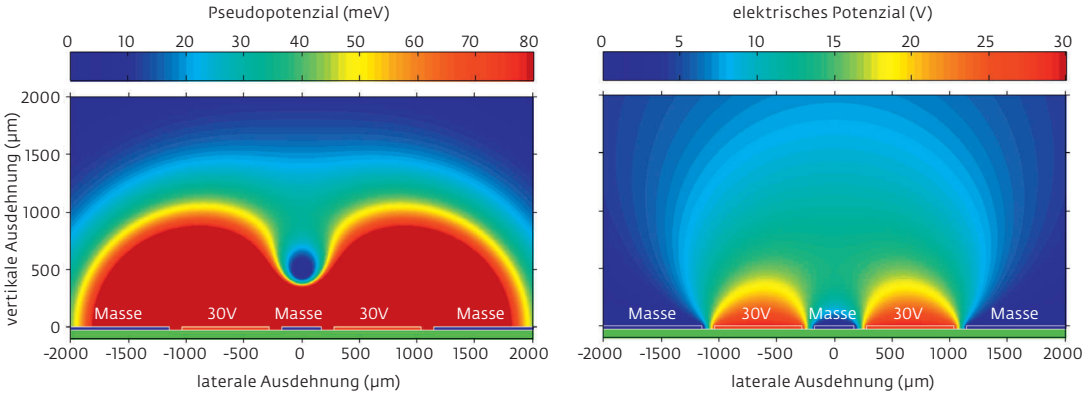


Foto: Denise Vernillo



Ein Kanal für Elektronen, der aus der Bildebene herausführt, entsteht im intensiv blauen Fleck des Pseudopotenzials (links). Dieses wird von einem als Momentaufnahme abgebildeten elektrischen Wechselfeld (rechts) erzeugt.

Beim jüngsten Experiment der Garchinger Gruppe geht es beispielsweise darum, Elektronen mit Lasern zu beschleunigen. Bislang werden dafür etwa in einem Synchrotronring oder einem Freie-Elektronen-Laser, die mit beschleunigten Elektronen sehr intensives, brillantes Licht erzeugen, elektrische Felder eingesetzt. Eine Beschleunigung mit Licht ist eigentlich nicht möglich: Wie das Blatt auf dem wogenden Meer werden auch die geladenen Teilchen vom Wechselfeld einer Lichtwelle lediglich hin- und hergeworfen.

Mit einem geschickten Kniff wollen Hommelhoff und sein Team das ändern: Die Physiker haben sich ein ausrangiertes Elektronenmikroskop besorgt, dessen Strahl sie in geringem Abstand über eine Glasplatte schicken. In das Glas haben sie zuvor winzige Rippen geätzt, die senkrecht zur Flugrichtung der Elektronen verlaufen und lediglich einige Hundert Nanometer – ein Nanometer ist ein millionstel Millimeter – breit und tief sind.

TECHNIK FÜR EFFIZIENTERE ELEKTRONENBESCHLEUNIGER

Während die Elektronen über die Platte flitzen, schicken die Forscher von unten Laserlicht durch ihre Glaskonstruktion. Da die Geschwindigkeit des Lichtes im Glas etwas geringer ist als im Vakuum, ist die Welle oberhalb der geriffelten Platte gestört: Ein Elektron, das dort unterwegs ist, wird über der Lücke im Gitter zunächst beschleunigt. Über der nächsten Rippe wird es allerdings nicht wieder abgebremst, sondern durch die verzögerte Wellenfront ebenfalls beschleunigt. Auf diese Weise gewinnt es stetig an Energie. „Wir passen den Abstand und die Breite der Rippen im Grunde an die Geschwindigkeit des Elektrons und die Laserwellenlänge an, sodass das Elektron immer nur die beschleunigende Komponente des Feldes sieht“, sagt Peter Hommelhoff.

Bereits in der ersten Ausbaustufe müsste sich theoretisch die gleiche Leistung erreichen lassen wie in konventionellen Teilchenbeschleunigern. Später, so die Hoffnung, sollte die Technik deutlich kleinere und effizientere Beschleuniger möglich machen. Das Experiment ist im Garchinger bereits einsatzbereit. Die ersten gezielten Schüsse stehen allerdings noch aus.

„Um einen Effekt zu erzielen, müssen die Elektronen im Abstand von hundert Nanometern an dem Glas vorbeifliegen. Das ist sehr anspruchsvoll“, sagt Peter Hommelhoff. Anspruchsvoll, aber machbar. Zum Basketballspielen ist der 37-Jährige zuletzt zwar kaum noch gekommen – aber auch für das Spiel in der Quantenarena braucht er Zielgenauigkeit und eine besondere Art von Ballgefühl. ◂

GLOSSAR

Frequenzkamm: Ein optisches Instrument, das im Kern aus einem Femtosekundenlaser besteht, der Licht in extrem kurzen regelmäßigen Pulsen abstrahlt. Nach einem vom französischen Mathematiker und Physiker Joseph Fourier entdeckten Zusammenhang spiegelt sich die regelmäßige Abfolge der Pulse im Frequenzspektrum des Lichts wider. Das ist nämlich nicht mehr kontinuierlich, sondern weist ähnlich den Zinken eines Kamms sehr scharfe Linien in einem festen Abstand auf. Theodor W. Hänsch fand eine Möglichkeit, die Lage einer Frequenzlinie des Kamms und damit die Lage aller Linien genau zu bestimmen, und schuf damit ein extrem präzises Messinstrument für optische Frequenzen.

Quantenoptik befasst sich mit der Wechselwirkung von Licht und Materie und fokussiert dabei auf deren Quanteneigenschaften. Zu diesen zählt der Welle-Teilchen-Dualismus. Demzufolge ist Licht nicht nur als Welle, sondern auch als Teilchen (Photon) zu betrachten. Die Teilcheneigenschaften machen sich etwa bemerkbar, wenn Elektronen aus einer feinen Metallspitze herausgeschlagen werden. Wenn sie jedoch danach zurück zur Spitze und wieder fort von ihr beschleunigt werden, bekommen sie den Wellencharakter des Lichts zu spüren.

Wellenleiter: Ein Medium, in dem sich Wellen, insbesondere elektromagnetische Wellen, gezielt in einer Richtung fortpflanzen. Ein Wellenleiter für Elektronen unterscheidet sich von einem elektrischen Leiter wie einem Metalldraht dadurch, dass die Elektronen in ihm mit elektrischen Feldern durch ein Vakuum geführt werden und ihre Welleneigenschaften zeigen. Letzteres konnten Physiker bislang noch nicht beobachten.

Grafik: MPI für Quantenoptik (2)