

Tunnel des Röntgenlasers „European XFEL“

MARKUS SCHOLZ / DPA

# Die Offenbarung des Exefferl

**Physik** Was geschieht, wenn Quallen leuchten? Wie entstehen Risse? Regnet es Helium auf dem Jupiter? Solche Rätsel soll der neue Röntgenlaser am Hamburger Desy lösen – mit spektakulärer Strahlkraft späht er ins Innerste der Materie.

**M**öge sich niemals ein Stäubchen an diese blitzblanken Spiegel heften! Harald Sinn hätte größte Mühe, den Makel wieder wegzuputzen.

Selbst ein Puschel aus den Nestlingsdaunen eines Entenkükens wäre nicht zart genug für die Reinigung – er würde aberwinzige, gleichwohl nicht akzeptable Schürfspuren hinterlassen.

„Wir haben hier die glattesten Spiegel“, sagt Sinn, „die je gefertigt wurden.“

Der Mann ist Physiker, er arbeitet an einer neuen Riesenmaschine, die sich über ein kilometerlanges Tunnelsystem im Hamburger Untergrund erstreckt. An diesem Ungetüm ist so ziemlich alles von radikaler Präzision.

Bei den Spiegeln – schmal, knapp einen Meter lang – fängt es an: Ein jeder besteht aus einem einzigen Siliziumkristall. Die Endpolitur obliegt einer japanischen Spezialfirma. Sie badet die Spiegel in einer Flüssigkeit, die mit staubfeinen Kunststoffteilchen versetzt ist. Bewegliche Düsen in der Wanne strudeln sachte die letzten Unebenheiten hinweg.

Ein halbes Jahr dauert allein diese Badekur – eine Art Zen-Meditation über das Ebenmaß.

Am Ende erhebt sich aus dem magischen Whirlpool ein Objekt von geradezu unwirklicher Glätte. Nirgends weicht die funkelnde Fläche vom Ideal um mehr als das Millionstel eines Millimeters ab. Es geht um ein paar Atome mehr oder weniger.

Einige dieser Spiegel sind nun in den Hamburger Katakomben installiert. Der Haupttunnel beginnt unter dem Gelände des Forschungszentrums Desy im Stadtteil Bahrenfeld; er verläuft knapp dreieinhalb Kilometer westwärts und verzweigt sich unterwegs in fünf Arme (siehe Grafik Seite 104).

Durch dieses unterirdische Wegenetz rast ein kostbarer Lichtstrahl. Nur für ihn sind die Spiegel da. An manchen Stellen fangen sie ihn auf und lenken ihn ein wenig um, bis er sein Ziel erreicht hat: eine riesige Halle, fast so groß wie ein Fußballfeld, zwölf Meter unter dem schleswig-holsteinischen Städtchen Schenefeld.

Gut 1,2 Milliarden Euro hat die Anlage gekostet. Sie erzeugt nichts anderes als diesen Lichtstrahl. Die wohl teuerste For-

schungsmaschine Deutschlands, könnte man sagen, ist eine Lampe.

Ihr Licht ist allerdings von spektakulärer Güte: ein enorm heller, energiereicher Röntgenstrahl. Er leuchtet so scharf ins Innerste der Materie hinein wie kein Licht zuvor. Selbst einzelne Atome werden sichtbar. Der Strahl kann winzigste Details auflösen, denn seine Wellenlänge ist – mit Bruchteilen von Nanometern – extrem kurz. Ein Nanometer verhält sich zu einem Meter wie eine Haselnuss zum Erdball.

Die Hamburger Maschine gehört zum exklusiven Kreis der Röntgenlaser. Es gibt nur fünf Exemplare auf der Welt, die vergleichbares Licht erzeugen – und der Neue ist mit Abstand der stärkste. Offiziell trägt er den Namen „European XFEL“. Die Forscher nennen ihn traulich den „Exefferl“,

was ein wenig an alttestamentliche Seher erinnert.

Acht Jahre haben die Bauarbeiten gedauert. Nun ist alles bereit für die Offenbarungen des Exefferl.

Die ersten Wissenschaftler haben in der unterirdischen Halle ihre Behausungen aufgebaut und mit Messapparaten bestückt. Im September beginnt der Forschungsbetrieb. Der Strahl erreicht die Halle als rasende Folge von Röntgenblitzen, bis zu 27 000 sind es pro Sekunde. Das Stakkato ist schnell genug, um den inneren Wandel in Biomolekülen zu filmen. Zudem ist der Strahl so hart, dass er praktisch alles durchdringt, was die Forscher hineinhalten. Extrem dichte Materie ist für ihn kein Hindernis. Selbst Eisen unter gewaltigem Druck, wie er etwa im Erdkern herrscht, wird damit erstmals durchsichtig.

Der Exefferl ist aber auch für praktische Alltagstechnik zu gebrauchen. Er kann zum Beispiel zeigen, wie in diversen Materialien Risse aus dem Nichts entstehen – gut für Dinge, die nicht so schnell kaputtgehen sollen.

Der Röntgenlaser ist, mit einem Wort, eine Vielzweckmaschine. Seine Betreiber hoffen, dass er der Wissenschaft in etlichen Richtungen zugleich voranleuchtet. Noch liegt erstaunlich viel im Dunkeln. Die chemische Reaktion zum Beispiel, an deren Formelreichtum zahlreiche Schüler zweifeln: Ein Chemiker weiß genau, was herauskommt, wenn er Substanzen zusammenrührt, egal ob es knallt, stinkt oder brennt. Aber was geht da genau in den Molekülen vorstatten? Das kann man bisher nur vermuten.

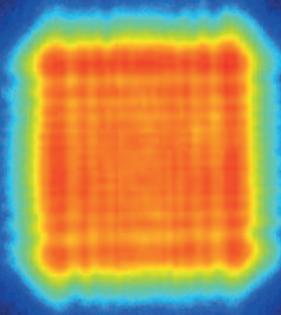
„Das ist wie im Fußball, wenn Sie nur wissen, dass der FC St. Pauli 2:0 gewonnen hat“, sagt Christian Bressler, Physiker am XFEL. „So weit sind wir heute. Nun wollen wir uns aber mal das ganze Spiel anschauen.“ Womöglich lasse sich daraus sogar lernen, wie man den Endstand auf 3:0 erhöht – sprich: den Ablauf von chemischen Reaktionen verbessert.

So könnte der Forscher aus elektrisch geladenen Jodid-Ionen, die in Wasser gelöst sind, die Elektronen herausschießen. Dadurch erzeugt er Jodatome, die sich urplötzlich im massen Element isoliert finden – lauter lokale Katastrophen im

## Röntgenlaser-Anwendungen

Beispiele

- Filmaufnahmen über das molekulare Geschehen bei der Bildung von Rissen
- Analyse magnetischer Oberflächen, z. B. für schnellere Datenspeicher
- 3-D-Aufnahmen von Proteinen oder Zellmembranen – z. B. für neue Ansätze zur Virenbekämpfung
- Einblicke in chemische Umwandlungen auf Molekülebene – für neuartige Katalysatoren, Energie aus künstlicher Fotosynthese u. a.
- Beobachten von Materie unter extremen Druckverhältnissen – etwa zur Erforschung des inneren Aufbaus von Planeten



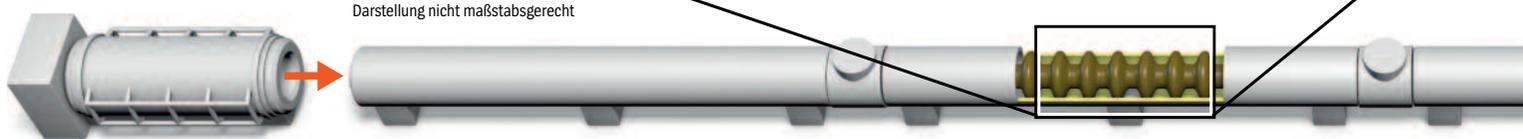
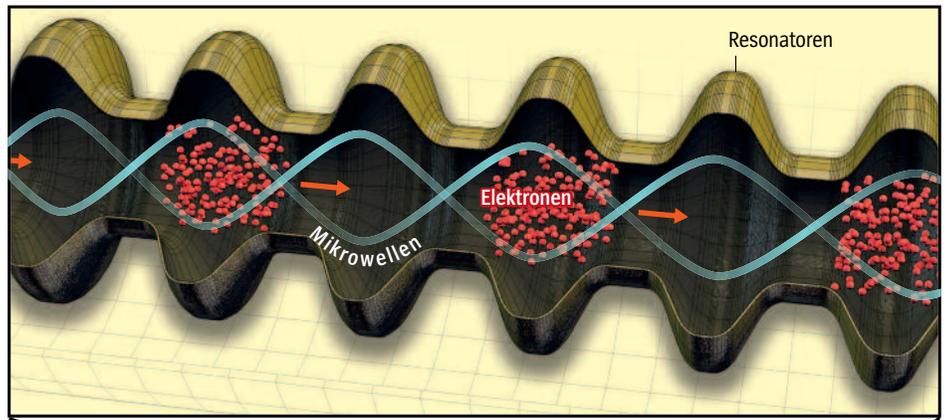
„Beugungsmuster“ (Testaufnahme)

Der Röntgenlaser fotografiert nicht direkt das Innere der Materialprobe. Aufgezeichnet wird die Ablenkung der Lichtteilchen beim Durchdringen.

EUROPEAN XFEL

## Erleuchtung im Tunnel

Funktionsweise des europäischen Röntgenlasers XFEL\*



**1 Injektor.** Eine Laserkanone schießt Elektronen aus einer speziellen Metallschicht. Dadurch entstehen scharf gebündelte Teilchenpakete.

**2 Beschleuniger.** Der Strahl durchläuft Resonatoren, die auf  $-271^\circ\text{C}$  gekühlt werden und deshalb supraleitend sind. Energiereiche Mikrowellen treiben hier die Elektronen bis auf annähernd Lichtgeschwindigkeit voran.

Kleinstmaßstab. Und der Röntgenlaser filmt das Geschehen quasi in Superzeitlupe; seine rasend schnellen Blitzsalven zerhacken es wie ein Stroboskop. Im Film wäre dann erstmals detailliert zu sehen, wie eine Substanz sich in eine andere verwandelt – „der Ursprung der Chemie“, sagt Bressler.

Der Physiker ist für eine der beiden Messstationen in der Halle zuständig, die bereits fertiggestellt sind. Er wird, wie das beim Röntgenlaser üblich ist, nicht nur selbst experimentieren, sondern auch Gastforscher betreuen. Die ersten kommen gleich im September, wenn der XFEL in Betrieb geht. Eine Jury hat sie kürzlich aus einem großen Kreis von Bewerbern ausgewählt.

Einer der Pioniere ist Filipe Maia, Biochemiker an der schwedischen Universität von Uppsala. Er will einen besonderen Typ von Riesenviren in 3-D knipsen. Dafür wird er versuchen, sie mit einer Art Feinzerstäuber in die Bahn des Laserstrahls zu pusten.

Die Probanden werden das nicht überleben. Der Blitz des Lasers ist so hart, dass er sein Zielobjekt sofort zerstört. Aber er ist auch so schnell, dass er zugleich schon dessen Bild gebannt hat – quasi in dem ultrakurzen Moment, da das Virus noch nicht weiß, dass es tot ist.

Die Salven des Röntgenlasers erzeugen Hunderte solcher Bilder hintereinander. In den verschiedensten Positionen sind da die geblitzten Viren zu erkennen, wie sie kurz zuvor aus der Düse heruntertrudelten. Aus all den Aufnahmen kann Maia dann am Computer ein räumliches Bild zusammensetzen.

Der Forscher interessiert sich vor allem für eine Zusammenballung im Innern dieses Virus, die bislang nur schemenhaft zu erkennen war. Maia vermutet darin ein Genom von erstaunlichem Ausmaß, das eher an höher organisierte Zellen erinnert. Viren haben typischerweise nur winzige, simple Genome. Wenn Maia recht hat, ist sein Riesenvirus mit dem ansehnlichen Erbgutklumpen ein kurioser Ausreißer der Evolution.

Zum Kreis der Erwählten zählt auch die Biophysikerin Ilme Schlichting vom Heidelberger Max-Planck-Institut für medizinische Forschung. Schlichting will ergründen, wie es kommt, dass ein gewisses Protein zu leuchten beginnt. Es hat einen

lichtempfindlichen Schalter eingebaut, der die Fluoreszenz an- oder ausknipsen kann.

Ähnliche Moleküle sind im Spiel, wenn bestimmte Quallen oder Korallen im Dunkel der Ozeane leuchten. Noch ist aber nicht verstanden, wie die Lichtsteuerung bei diesem Protein im Detail funktioniert – was also genau zwischen An und Aus geschieht. Schlichtings Experimente sollen diesen Moment des Übergangs zeigen.

Dafür reizt die Forscherin ihr Protein mit dem Lichtblitz eines gewöhnlichen Lasers zum Umschalten – und kurz darauf wird der Röntgenblitz des XFEL den Schalter in flagranti fotografieren. Schlichting kann den Vorgang mehrmals mit zunehmender Verzögerung blitzen: „Dann sehen wir die Abfolge wie im Daumenkino.“

Bei den ersten Experimenten dürfte der Erkenntnisgewinn noch überschaubar sein, aber das ist durchaus gewollt. Zunächst gelte es, in kleinen Schritten den Umgang mit dem Röntgenlaser zu erproben. „Wir fangen da ganz von vorne an“, sagt Schlichting, „so eine Maschine gab es ja noch nie.“

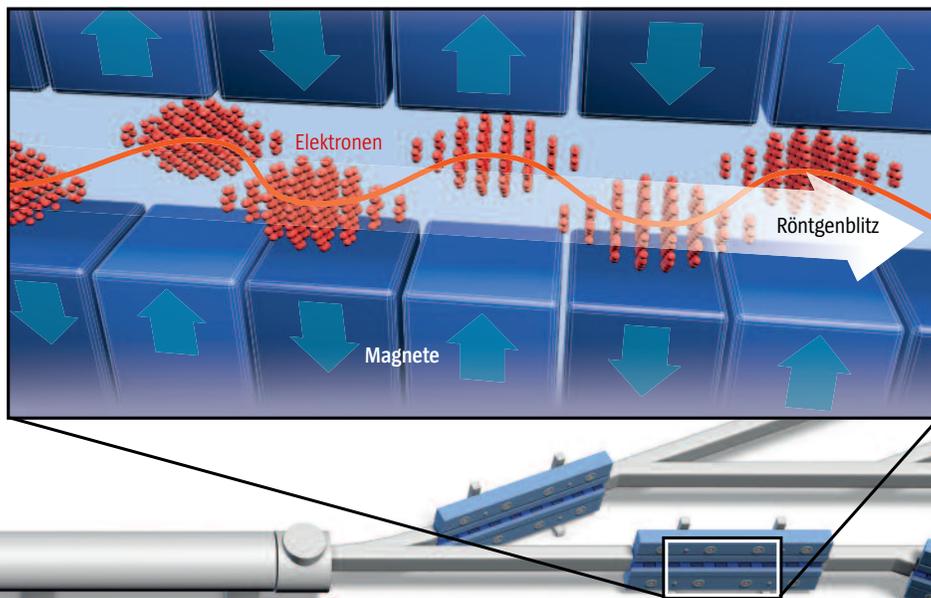
In der Tat bricht der XFEL allerhand Rekorde. Er erhöht nicht nur die maximale Blitzfrequenz von bislang 120 auf 27000 Blitze pro Sekunde. Er kann auch milliardenfach heller strahlen als konventionelle Röntgenquellen.

Die Anlage, die das leistet, verdankt sich einem kontinentalen Kraftakt. Deutschland trug 58 Prozent der Kosten, Russland 27 Prozent. Neun weitere europäische Staaten beteiligten sich mit kleineren Beträgen.



Gasplanet Jupiter

Röntgenblick in eine Welt der Extreme



**3 Undulatoren.** Eine Serie wechselnd gepolter Magnete zwingt die vorbeisenden Elektronen auf einen wellenförmigen Kurs. In jeder Kurve strahlen die Teilchen Röntgenlicht aus. Während des Slalomflugs ordnen sie sich wie von selbst zu scheibenförmigen Einheiten, die bald gemeinsam im Gleichtakt blitzen.

Den ersten Teil der Tunnelstrecke nimmt, auf knapp zwei Kilometern, ein Teilchenbeschleuniger ein. Er sorgt für den Antrieb: Unablässig bringt er Elektronen auf Tempo – die Teilchen fliegen durch eine Kaskade von 98 Modulen, von denen sie mittels Mikrowellen vorangepeitscht werden. Schließlich huschen sie annähernd mit Lichtgeschwindigkeit durch die Röhre.

Es folgt der entscheidende Akt. Ungefähr auf halber Strecke warten eine Reihe starker Magnete. Sie zwingen die vorbeifliegenden Elektronen auf einen engen Wellenkurs, indem sie die geladenen Teilchen wechselweise nach rechts und links ablenken.

Genau dadurch entsteht das Röntgenlicht: In jeder Kurve geben die schlingern den Elektronen Lichtteilchen ab, die nun gemeinsam mit ihnen voranrasen – allerdings auf schnurgerader Bahn und damit geringfügig schneller.

Die überholten Elektronen werden teils abgebremst, teils beschleunigt. Mit der Zeit ordnen sie sich in dünnen Scheibchen an, die dicht aufeinanderfolgen, während die Wechselwirkung sich weiter aufschaukelt. Am Ende blitzen die Elektronen im Gleichtakt: Der Laser strahlt mit voller Kraft.

Es ist freilich ein Abenteuer, den Strahl über den Schleuderslalom hinweg auf Kurs zu halten. Die Flugbahnen von Elektronen und Lichtteilchen dürfen keinesfalls auseinanderdriften. Dann bräche die Wechselwirkung zusammen, die das Stakkato der Blitze erzeugt.

Für die Steuerung des Strahls ist der XFEL-Physiker Harald Sinn zuständig. „Die Photonen fliegen von selber geradeaus“, sagt er. „Aber die Elektronen lassen sich leicht ablenken.“ Selbst das Magnet-

feld der Erde hat Einfluss auf ihre Bahn. Außerdem ist das unterirdische Tunnelsystem unmerklich in Bewegung. Schon ein Versatz von einem Millimeter wirft heikle Probleme auf.

Dann gilt es, die beiden Strahlen wieder in Deckung zu bringen. Das erfordert Erfahrung und Feingefühl – vergleichbar dem Stimmen eines Konzertflügels. Nur wenige Spezialisten weltweit verstehen sich darauf. In der Regel müssen sie tagelang an vielerlei Knöpfen drehen, bis der Röntgenlaser wieder perfekt das macht, was er machen soll.

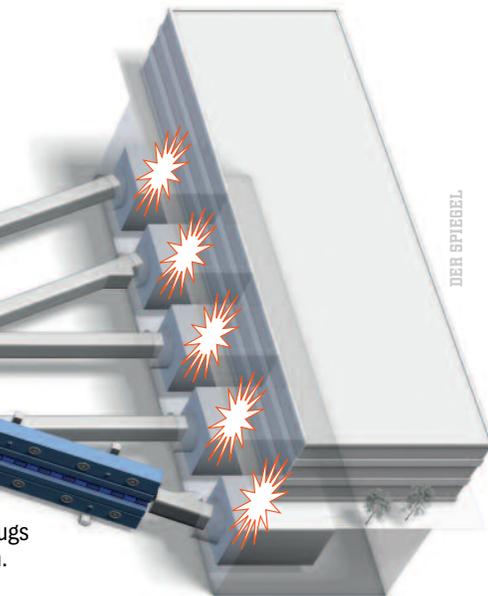
In der unterirdischen Experimentierhalle warten unterdessen die Forscher. Am Anfang sind allerdings nur zwei von den geplanten sechs Großinstrumenten in Betrieb. Später könnte die Zahl bis auf 10 oder gar 15 steigen.

Eine weitere Experimentierstation wird bereits aufgebaut. Hier waltet der Physiker Ulf Zastrau. Sein Metier ist die Materie im Extremzustand: Hitze, Dichte, Druck. All das gibt es reichlich im Inneren von Planeten, doch diese Welt ist der direkten Beobachtung entzogen. Wie es da zugeht, will Zastrau mithilfe des Röntgenlasers herausfinden.

Dafür bekommt der Forscher eine mächtige Laserkanone, die punktfeine Strahlen aus gewöhnlichem Licht verschießt. Wenn er sie auf eine Materialprobe richtet, entfesselt er dort ein winziges Inferno: Wo der Strahl auftrifft, steigt die Temperatur auf bis zu 100 000 Grad Celsius – das ist dreimal so heiß wie ein Blitz. Explosionsartig verdampft dabei dann die äußere Schicht der Probe.

„So können wir Schockwellen in die Materie treiben“, sagt Zastrau. Für kurze Zeit

**4 Experimentierhalle.** Die Röntgenblitze – bis zu 27 000 pro Sekunde – werden über fünf Zweigstrecken in Messinstrumente geleitet. Dort durchleuchten sie Materialproben verschiedenster Art.



baut sich dort ein enormer Druck auf, wie er beispielsweise tief im Erdkern herrscht. Im selben Moment ist die Probe auch schon zerstört – aber in der Nanosekunde zuvor rast ein Röntgenblitz hindurch. So bekommt Zastrau eine detaillierte Aufnahme vom Geschehen.

Bislang war es nicht möglich, in derart hochverdichtetem Material zu fotografieren. Nun aber kommen große Fragen in Reichweite. Wie entstehen Planeten? Was geschieht, wenn sie nach ihrer infernalisches heißen Geburt allmählich abkühlen? Wie zähflüssig ist ihr glühender Kern? Wie steht es dort drunten um Kristallbildung und elektrische Leitfähigkeit?

Auch die Verhältnisse auf den fernen Gasplaneten Uranus, Neptun oder Jupiter könnten näher rücken. Ihre Hülle besteht vor allem aus Wasserstoff und Helium. In tieferen Regionen werden beide Gase wegen des zunehmenden Drucks flüssig. „Aber niemand weiß, was in der Übergangszone geschieht“, sagt Zastrau. „Gut möglich, dass das Helium allmählich kondensiert und Tropfen bildet.“

Der Röntgenlaser kann den Vorgang womöglich sichtbar machen. Das wäre dann auch noch eine Spitzenleistung in Sachen Vielseitigkeit: Ein und dieselbe Maschine ergründet das Leuchten der Quallen – und die Frage, ob es auf dem Jupiter Helium regnet.

Manfred Dworschak

Mail: manfred.dworschak@spiegel.de



**360°-Foto:**  
**Im Tunnel**

spiegel.de/sp322017desy  
oder in der App DER SPIEGEL