

TESLA's X-Ray Vision TESLA's Röntgenblick ... das Licht der Zukunft

TESLA

The Light for the Future



TESLA durchleuchtet die Mikrowelt

Atom für Atom chemische Reaktionen verfolgen, per Röntgenblick zusehen, was im Inneren von Auto-katalysatoren oder lebenden Zellen vor sich geht – TESLA macht es möglich.

Blitzgerät mit atomarer Auflösung

Der Elektronenbeschleuniger von TESLA soll gleich mehrere neuartige Röntgenlaser antreiben. Deren Leuchtdichte ist in ihren Spitzenwerten milliardenfach höher als die modernster Röntgenquellen. Die Blitzdauer beträgt weniger als eine Billionstel Sekunde. Die Wellenlänge der Blitze ist so klein, dass selbst atomare Details erkennbar werden.

Film ab in neue Dimensionen

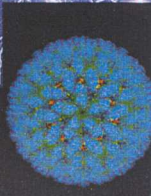
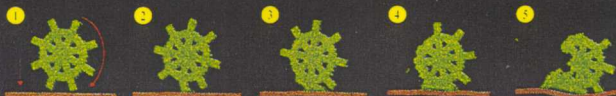
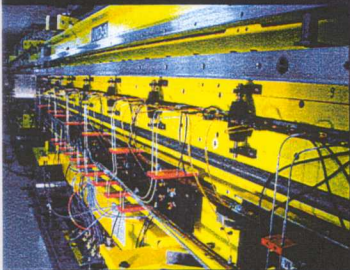
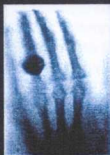
Mit den unvorstellbar kurzen Röntgenpulsen lassen sich regelrechte Filme aus dem Mikrokosmos aufnehmen. Die TESLA-Röntgenlaser eröffnen ungeahnte Perspektiven für Physik, Chemie, Material- und Geoforschung, Biowissenschaften und Medizin. Auch industriellen Anwendern bietet die Strahlung hochinteressante Möglichkeiten.

Materialien maßschneidern

Ein Anwendungsbeispiel ist die Entwicklung von neuen Werkstoffen. Mit den Röntgenpulsen der TESLA-Laser können dynamische Materiezustände untersucht werden – wichtige Grundlagen, um beispielsweise maßgeschneiderte Materialien im Nanobereich, also mit Abmessungen von Milliardstel Metern, zu entwickeln.

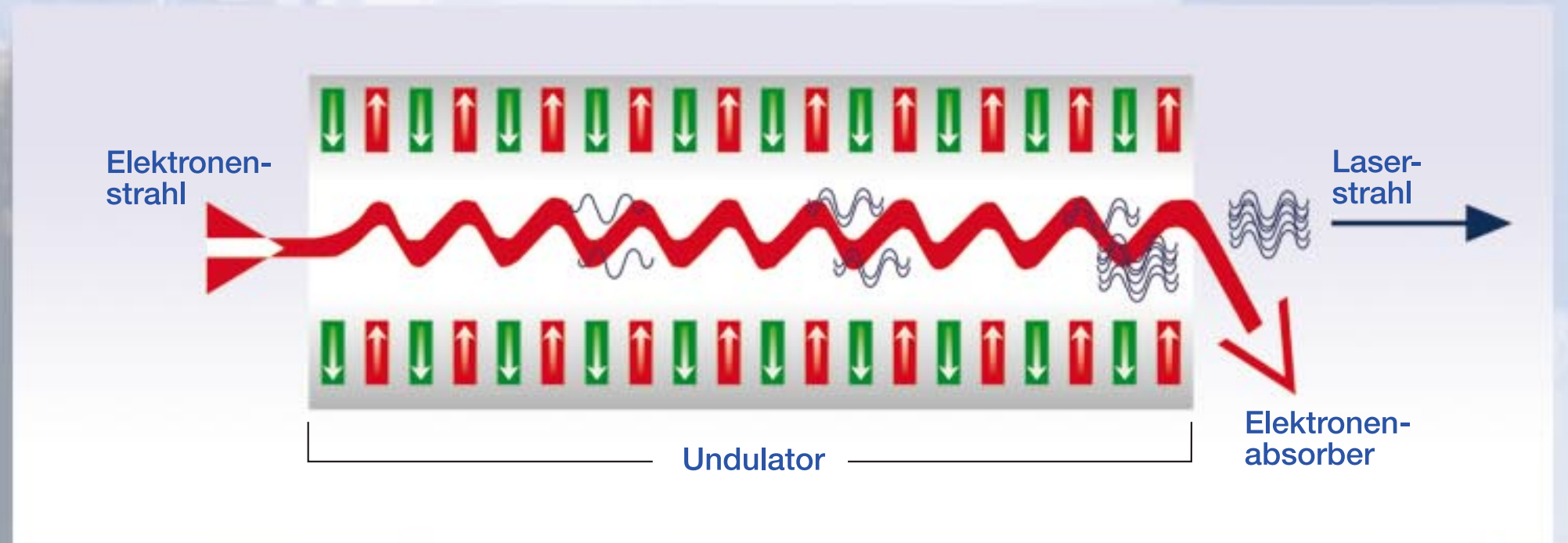
Biomoleküle entschlüsseln

Biologen können Struktur und Bewegungen von großen Molekülkomplexen mit atomarer Auflösung analysieren und dadurch beispielsweise den molekularen Ablauf von Krankheiten besser verstehen – wichtige Grundlagen, um neue Medikamente zu entwickeln.



Die TESLA-Röntgenlaser ... lichtschnelle Elektronen auf Slalomkurs

Electrons Slalom at the Speed of Light



Einzigartiges Licht

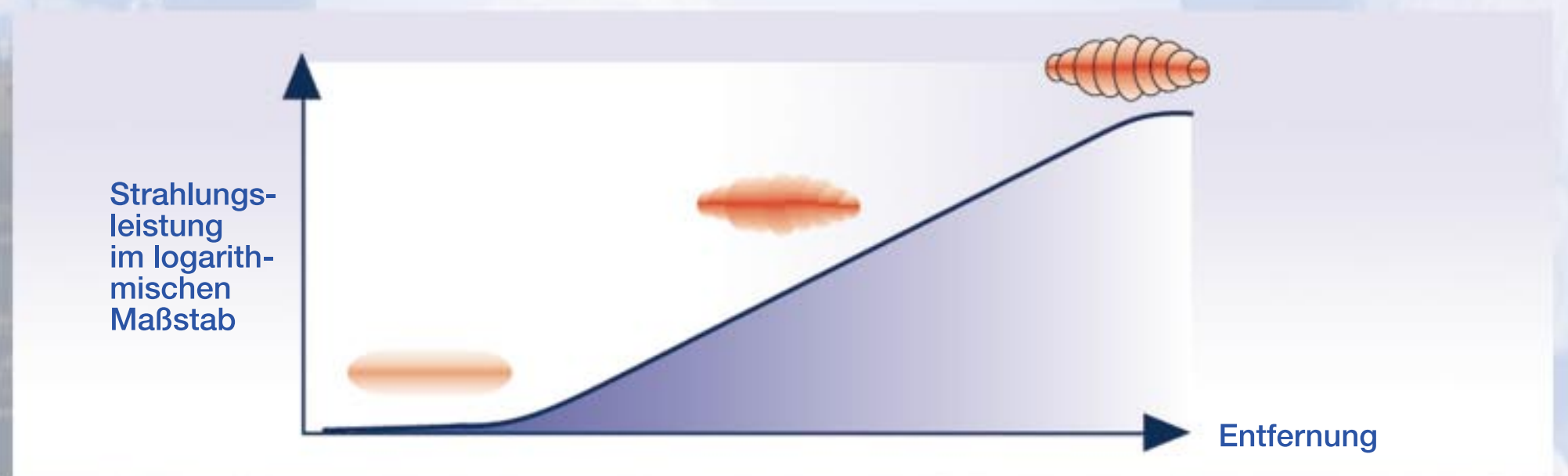
Die Leuchtstärke der TESLA-Röntgenlaser ist in ihren Spitzenwerten milliardenfach höher als die modernster Röntgenquellen. Die Zeitauflösung ist tausendmal höher: Ein Röntgenblitz ist nicht länger als 100 Femtosekunden (Billiardstel Sekunden) – das ist die Zeitdauer, in der sich chemische Bindungen ausbilden und Molekülgruppen ihre Lage ändern. Die Wellenlänge des Röntgenlichts ist so klein, dass selbst atomare Details erkennbar werden. Zudem hat die erzeugte Strahlung die Eigenschaften von Laserlicht.

Der selbstverstärkende Effekt

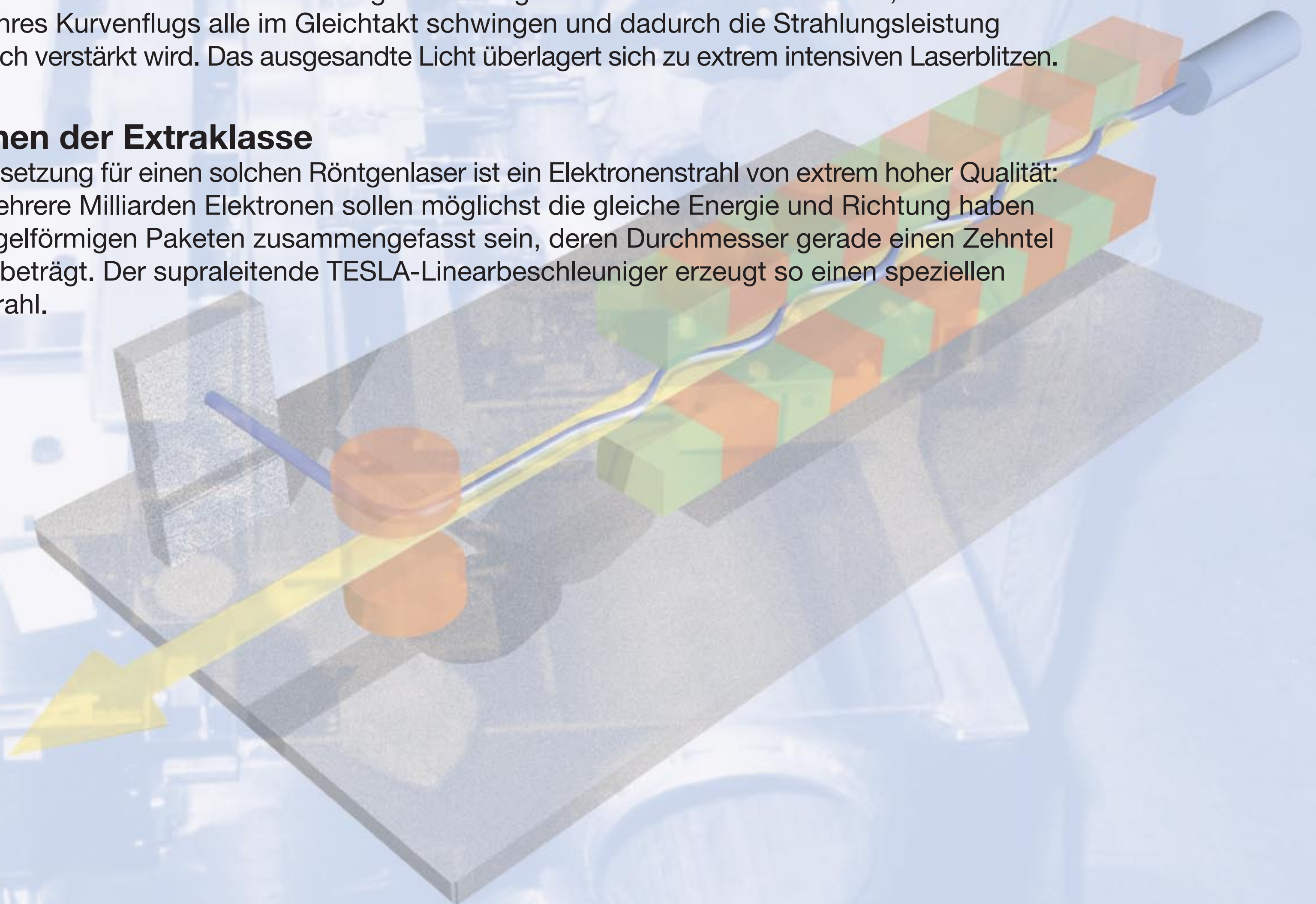
Das Röntgenlaserlicht wird nach einem neuartigen Prinzip erzeugt: Elektronen werden im TESLA-Linearbeschleuniger auf hohe Energien gebracht und fliegen anschließend im Slalomkurs durch eine besondere Magnetanordnung, wobei sie Röntgenblitze aussenden. Der Verstärkertrick: Die Röntgenstrahlung beeinflusst die Elektronen so, dass diese am Ende ihres Kurvenflugs alle im Gleichtakt schwingen und dadurch die Strahlungsleistung millionenfach verstärkt wird. Das ausgesandte Licht überlagert sich zu extrem intensiven Laserblitzen.

Elektronen der Extraklasse

Die Voraussetzung für einen solchen Röntgenlaser ist ein Elektronenstrahl von extrem hoher Qualität: Jeweils mehrere Milliarden Elektronen sollen möglichst die gleiche Energie und Richtung haben und zu kugelförmigen Paketen zusammengefasst sein, deren Durchmesser gerade einen Zehntel Millimeter beträgt. Der supraleitende TESLA-Linearbeschleuniger erzeugt so einen speziellen Teilchenstrahl.



Der selbstverstärkende Effekt: Beim Slalomkurs durch eine periodische Magnetanordnung („Undulator“) strahlen die Elektronenpakete Licht („Photonen“) einer festen Wellenlänge aus. Der Photonenstrahl breitet sich geradlinig aus und überlappt mit dem Elektronenpaket. Er „prägt“ den Elektronen seine regelmäßige „Struktur“ auf, das heißt: Nach einiger Zeit ist aus der anfangs gleichmäßigen Ladungsdichteverteilung eine Aneinanderreihung von einzelnen „Ladungsscheibchen“ geworden, die jeweils eine Lichtwellenlänge voneinander getrennt sind. Nun strahlen alle Elektronenscheibchen im Gleichtakt – das Licht kann sich zu intensiver Laserstrahlung verstärken.



Clusterphysik ... wenn weniger mehr ist

Cluster Physics

When Less Is More



Molekulare Fußbälle

Zwölf Fünf- und 20 Sechsecke: das klassische Design eines Fußballs. Ersetzt man die Lederecken durch Kohlenstoffatome, entsteht ein „Fußballmolekül“, ein „Buckyball“, im Fachjargon: ein Buckminsterfulleren. Molekulare Fußbälle sind eine ganz und gar ungewöhnliche Form des Kohlenstoffs: Sie gehören zur Kategorie der Cluster, winzigen Klümpchen aus Atomen oder Molekülen. Zu klein, um ein Kristall zu sein, zeigt Materie im Clusterzustand völlig neue, teils unerwartete Eigenschaften. Kohlenstoffkugeln und -röhrchen können beispielsweise als Halbleiter fungieren und sind aussichtsreiche Kandidaten für Bauteile der Nanotechnik.

Ungewöhnliche Eigenschaften

In dem intensiven Licht der TESLA-Laser können Cluster eine Vielzahl ihrer ungewöhnlichen Materialeigenschaften zeigen. Die hohe Leuchtstärke ist erforderlich, weil sich viele Cluster nur in Form von hoch verdünnten Gasstrahlen herstellen lassen. Um die wenigen Atom- oder Molekülklümpchen mit Röntgenlicht messtechnisch erfassen zu können, müssen die Physiker sie mit sehr viel Licht bestrahlen – den ultrastarken Laserblitzen von TESLA.

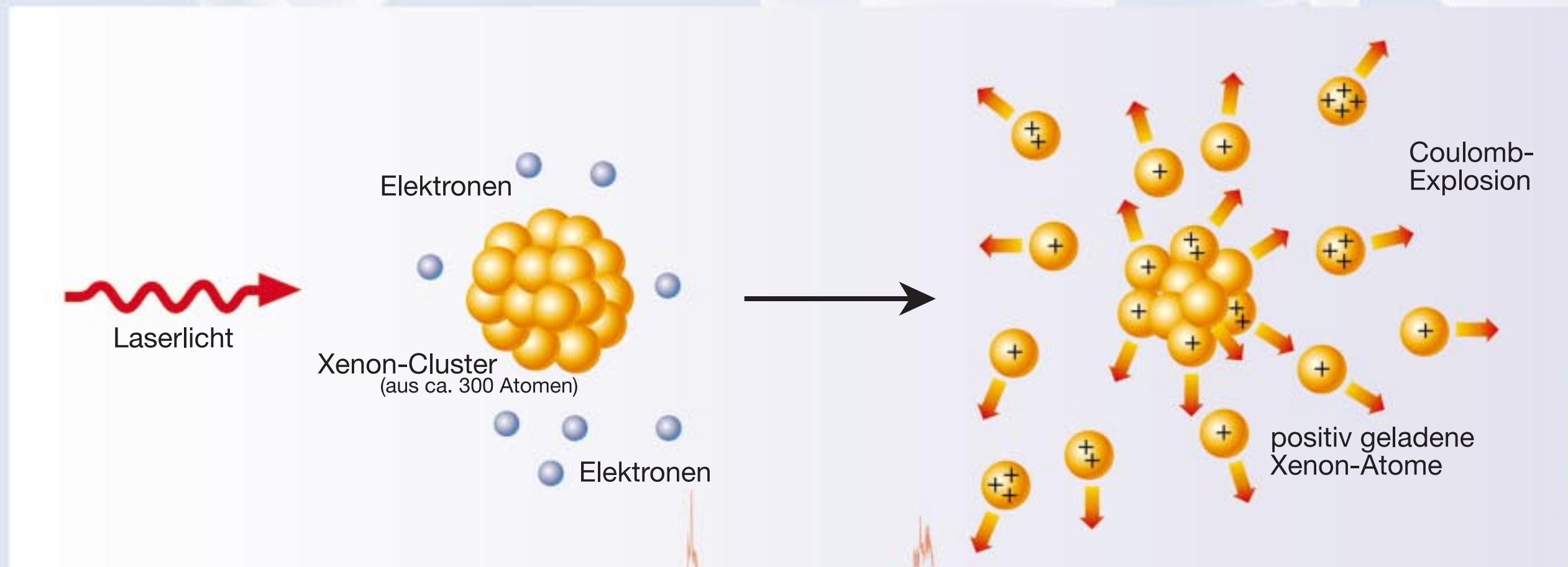
Erkenntnisse in Ultraviolett

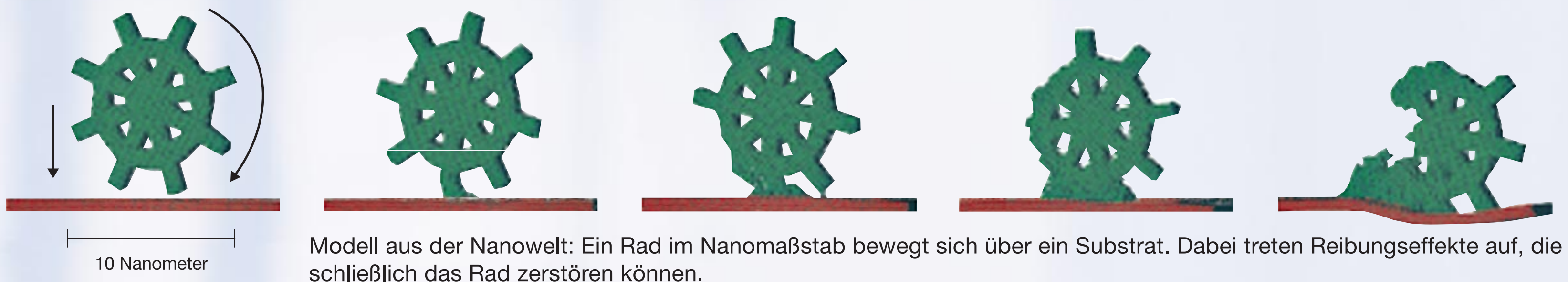
Interessante Experimente an freien Clustern sind bereits an einem neuen Hochleistungslaser für ultraviolettes Licht möglich, der als Testanlage für die TESLA-Röntgenlaser fungiert. Dort untersuchen die Forscher die Cluster unter anderem, um die Wechselwirkung von intensiver Strahlung mit Materie auf extrem kurzen Zeitskalen zu verstehen: Wie viel Zeit bleibt beispielsweise für die Strukturbestimmung von einzelnen Clustern oder Biomolekülen, bevor diese durch die Strahlung zerstört werden? Die neue Lichtquelle erzeugt hochintensive kurzwellige Laserstrahlung und wird ab 2004 Wissenschaftlern aus aller Welt zur Verfügung stehen.

Cluster-Experiment an dem neuen UV-Hochleistungslaser: Cluster aus Edelgasatomen werden mit dem intensiven Laserlicht bestrahlt und geben dabei viele Elektronen ab. Dadurch entstehen zum Teil sogar mehrfach elektrisch positiv geladene Atome, die den Cluster förmlich „explodieren“ lassen, weil sie sich gegenseitig abstoßen. Wie dieses mikroskopische „Feuerwerk“ abläuft, können die Forscher im Detail erkunden.



Blick auf das DESY-Gelände in Hamburg: Im Vordergrund ist die Experimentierhalle für den neuen Hochleistungslaser für ultraviolettes Licht zu sehen. Dahinter schließt sich der dazugehörige Beschleunigertunnel an.

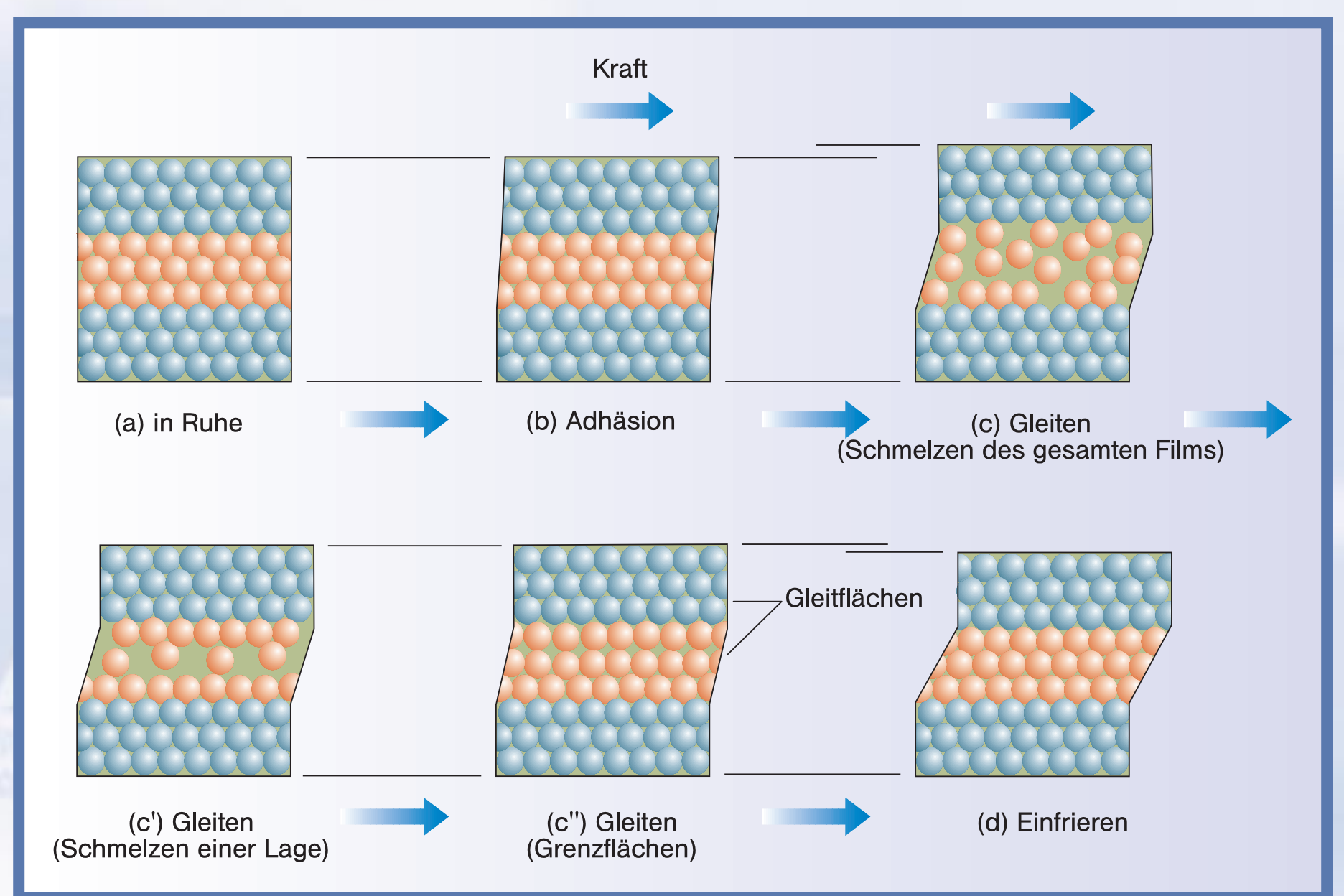




Modell aus der Nanowelt: Ein Rad im Nanomaßstab bewegt sich über ein Substrat. Dabei treten Reibungseffekte auf, die schließlich das Rad zerstören können.

Beispiel Reibung

Beim Bremsen ist Reibung sehr erwünscht – nicht jedoch, wenn Räder rollen und Motoren wie geschmiert laufen sollen. Um Werkstoffe zu verbessern und zu entwickeln, müssen Materialforscher Prozesse wie Reibung und Verschleiß auf atomarer Ebene verstehen. In dünnen Gleitfilmen beispielsweise, die eingesetzt werden, um die Abnutzung von Werkstoffen zu verringern, tritt die „Stick-Slip-Reibung“ auf. Das abwechselnde „Kleben“ und „Rutschen“ wird vermutlich dadurch verursacht, dass der hauchdünne Gleitfilm im Wechsel gefriert und schmilzt. Solche Übergänge von einer Phase in eine andere lassen sich mit Röntgenstrahlung analysieren. Allerdings sind die zu untersuchenden Filme extrem dünn, und die technologisch interessanten Materialien wie Metalle und Keramiken bieten nur auf der Skala von einigen hundert Atomen eine ebene Fläche für die Bildaufnahme.



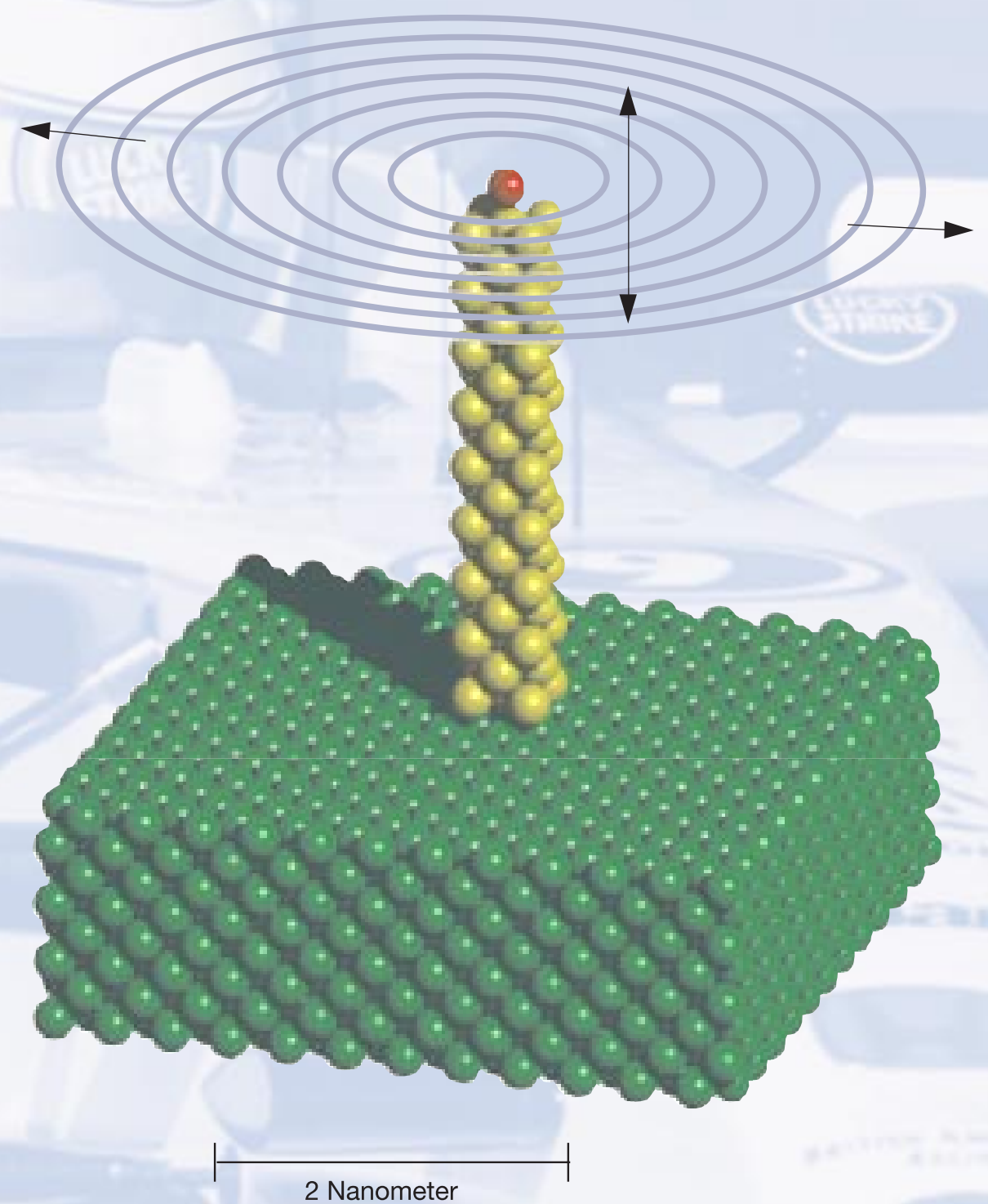
Reibung auf atomarer Ebene: Verschiedene Modelle für die „Stick-Slip-Reibung“, die durch abwechselndes Schmelzen (hervorgerufen durch Scherkräfte) und Gefrieren des Gleitfilms erzeugt wird.

Atome im Fokus

Heutige Röntgenquellen können nicht in derart kleine Dimensionen vorstoßen – die TESLA-Röntgenlaser schon. Außerdem ermöglichen ihre extrem kurzen Lichtblitze Messungen mit so hoher Zeitauflösung, dass sich die Dynamik der „Stick-Slip-Reibung“ wie in einem Film verfolgen lässt.

Technik im Nano-Maßstab

Mit den Röntgenpulsen der TESLA-Laser können dynamische Materiezustände und sehr schnelle Übergänge zwischen verschiedenen Zuständen untersucht werden. Dies ist auch die Grundlage, um maßgeschneiderte Materialien im Nanobereich, also mit Abmessungen von Milliardstel Metern, für die Elektronik der Zukunft zu entwickeln.



Die neue Welt der Nanotechnik: Eine „Nanoantenne“ soll elektromagnetische Strahlung aussenden.

Strukturbiologie ... Lichtblicke ins Biomolekül

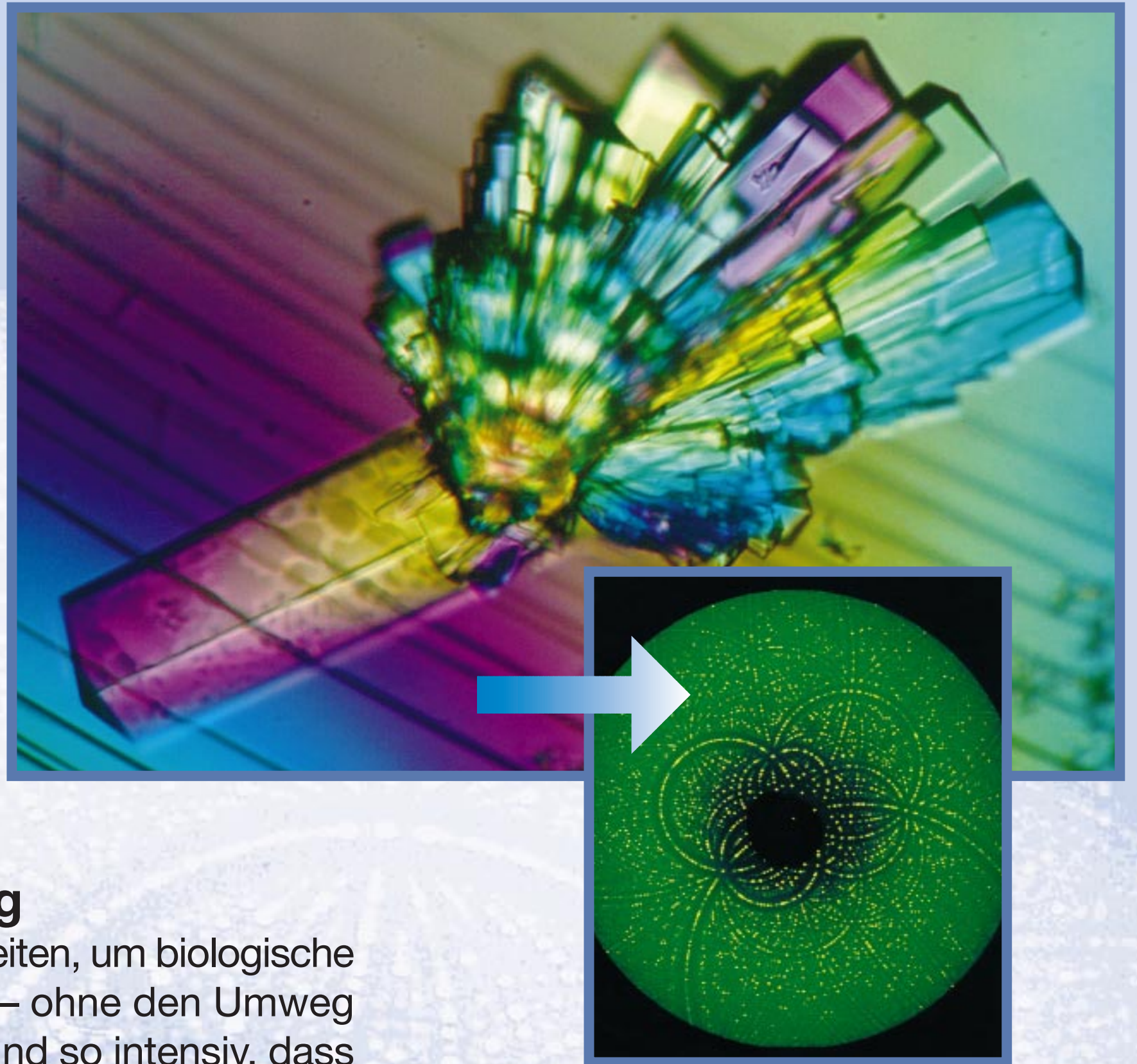
Structural Biology



Shedding Light on Biomolecules

Vom Kristall zum Bild

Mit dem intensiven Röntgenlicht aus Teilchenbeschleunigern lässt sich heute die Struktur von Biomolekülen im Detail analysieren. Die Voraussetzung: Aus möglichst vielen der normalerweise in Wasser gelösten Moleküle muss ein fester Kristall „gezüchtet“ werden, damit sich die einzelnen Signale so verstärken, dass schließlich ein brauchbares Bild entsteht. Das Problem: Die Kristallisation ist sehr mühsam und nur etwa bei der Hälfte aller biologisch relevanten Substanzen überhaupt möglich.



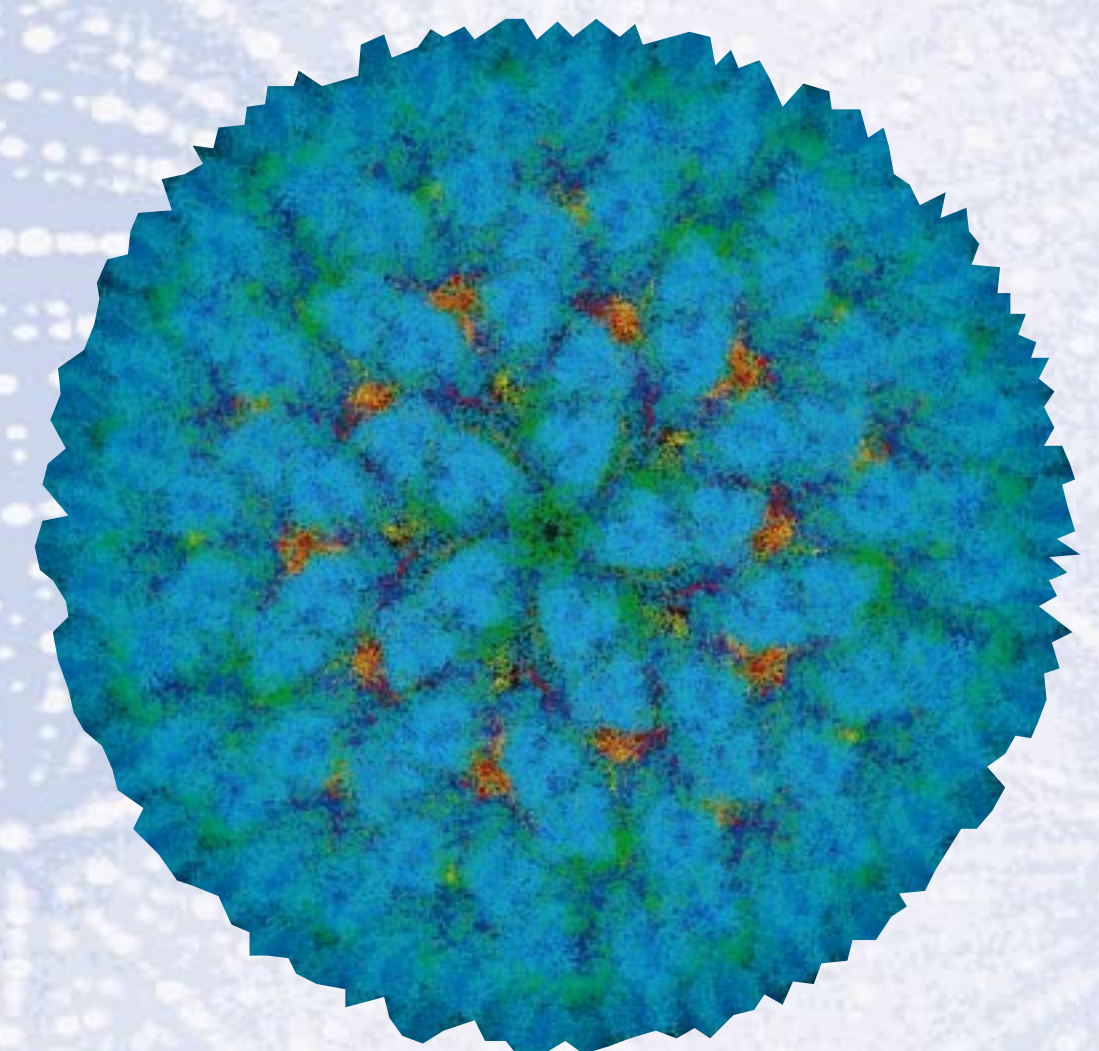
Schnappschuss mit atomarer Auflösung

Die TESLA-Röntgenlaser eröffnen völlig neue Möglichkeiten, um biologische Strukturen mit atomarer Auflösung zu entschlüsseln – ohne den Umweg über die Kristallisation. Denn die Röntgenlaserblitze sind so intensiv, dass sich ein hoch aufgelöstes Bild von einem Molekülkomplex erzeugen lässt. Die Blitzdauer liegt im Bereich von Femtosekunden (Billiardstel Sekunden) und ist kurz genug, um das Bild aufzunehmen, bevor die Probe von der intensiven Röntgenstrahlung zerstört wird.

Wenn ein Kristall aus Eiweißmolekülen mit intensivem Röntgenlicht bestrahlt wird, entsteht ein kompliziertes Beugungsbild, aus dem die dreidimensionale Struktur des Eiweißmoleküls berechnet werden kann.

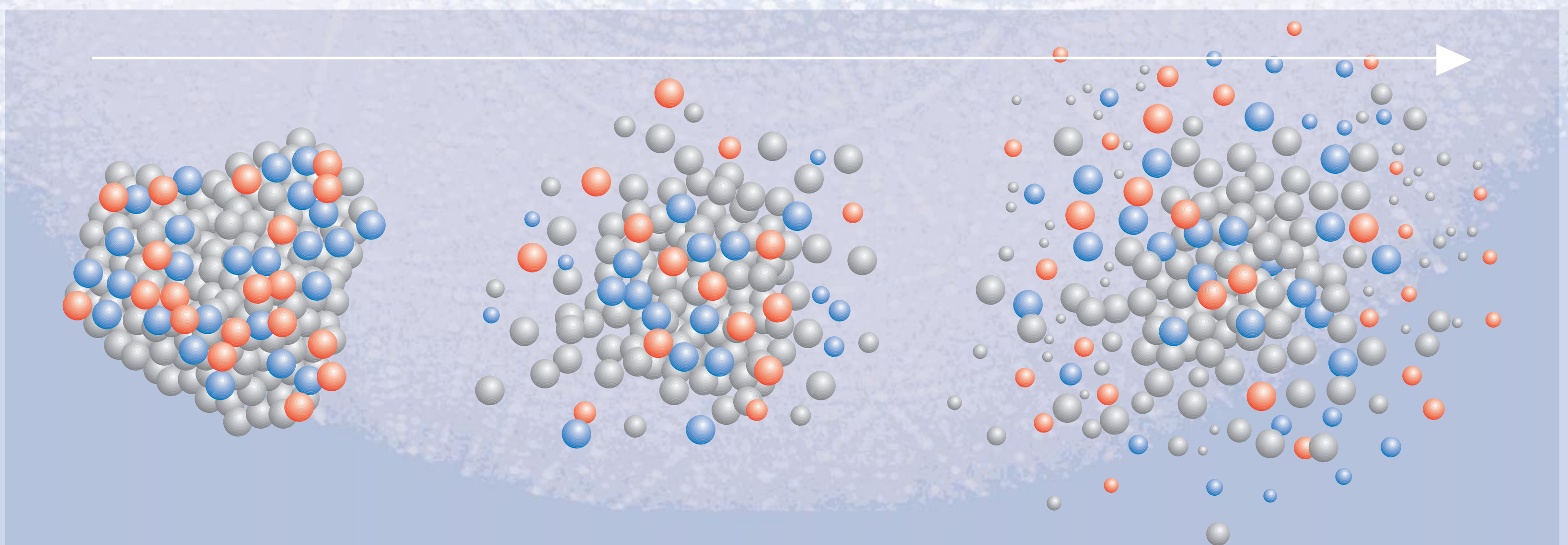
Mit TESLA eine Lücke schließen

Mit heutigen Techniken lassen sich große Molekülkomplexe nur sehr schwer untersuchen. Die TESLA-Röntgenlaser bieten neue Möglichkeiten, größere biologische Strukturen wie einzelne Viruspartikel im atomaren Detail abzubilden. Zudem lassen sich mit den ultrakurzen Röntgenblitzen Bewegungen von Molekülen zeitaufgelöst verfolgen. Solche neuen Einsichten, beispielsweise in den molekularen Ablauf von Infektionen, bilden auch eine wichtige Grundlage, um neue Medikamente zu entwickeln.



Viruspartikel

Biomoleküle werden durch intensive Röntgenstrahlung zerstört, sie „explodieren“. Das Bild zeigt eine Simulation dieses Vorgangs. Um ein brauchbares Bild von dem Biomolekül zu bekommen, muss man es extrem schnell aufnehmen, bevor die Probe zerstört wird.

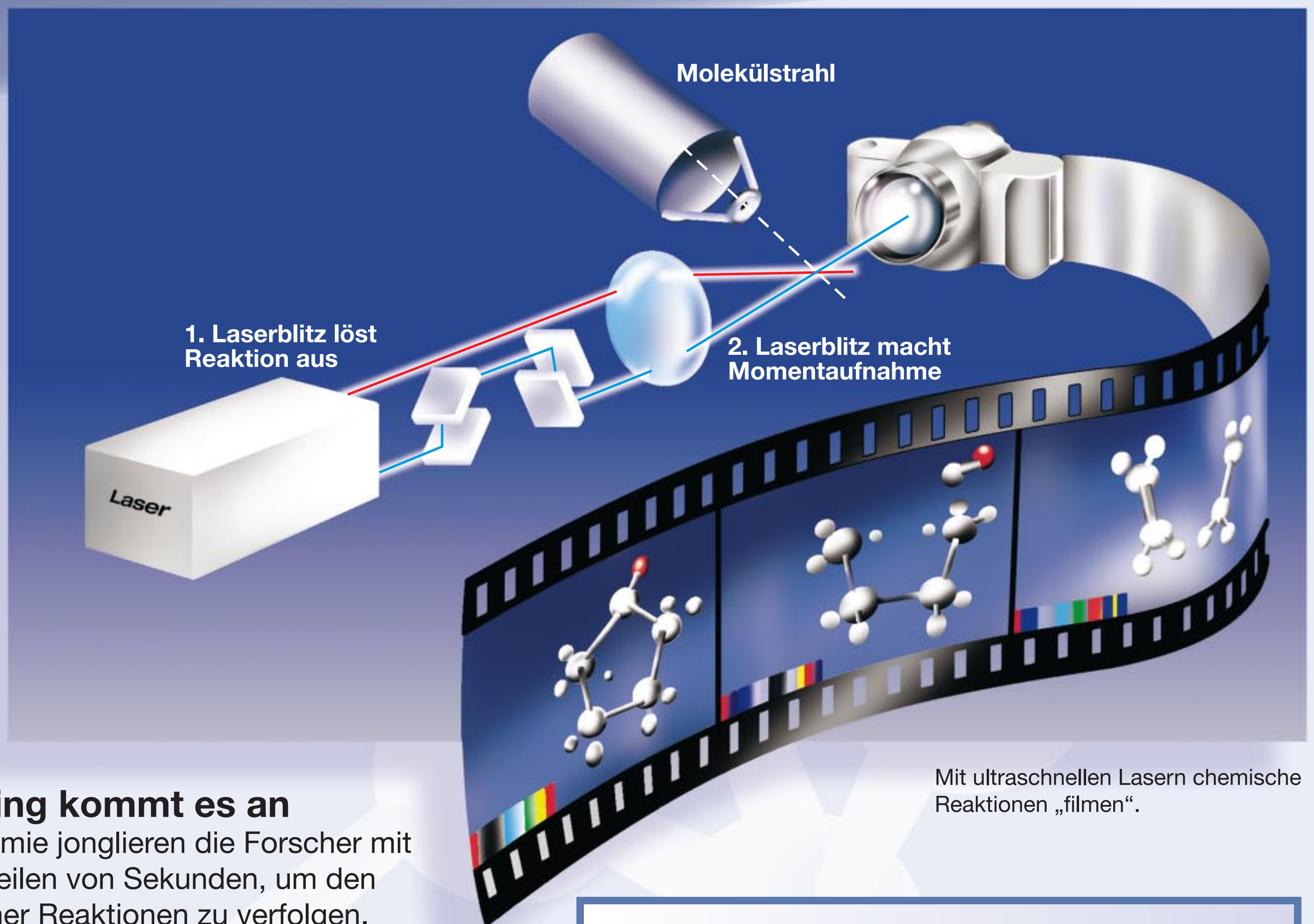


Femtochemie ... chemische Reaktionen filmen

Femtochemistry



Capturing Chemical Reactions on Film



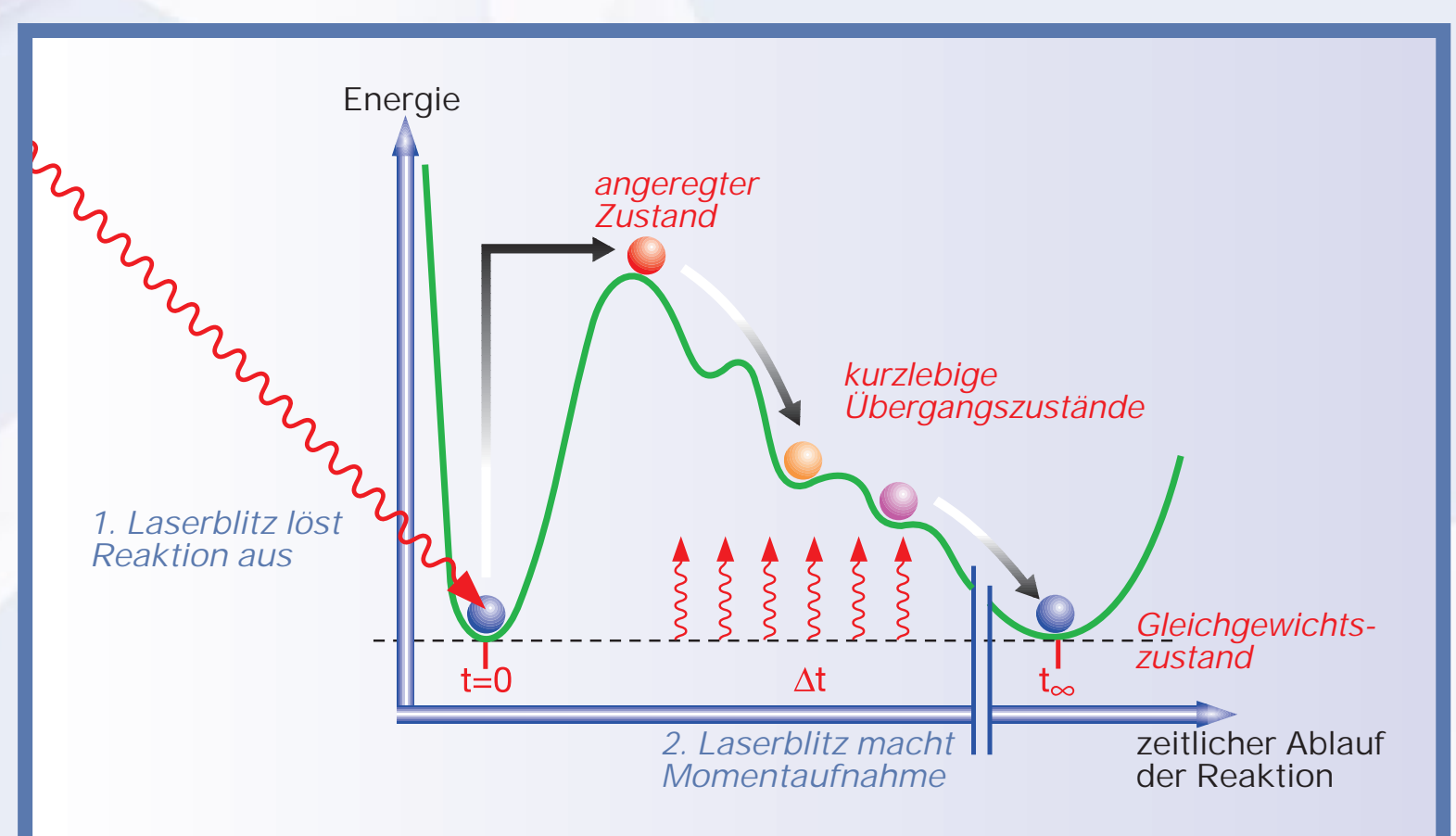
Auf das Timing kommt es an

In der Femtochemie jonglieren die Forscher mit winzigen Bruchteilen von Sekunden, um den Ablauf chemischer Reaktionen zu verfolgen. „Femto“ bedeutet Billionstel, und Femtosekunden sind die Größenordnung, in der Veränderungen auf atomarer Ebene ablaufen, wenn zwei Moleküle miteinander reagieren. Ultraschnelle Laser fungieren als „Kameras“, die Momentaufnahmen von chemischen Reaktionen mit Belichtungszeiten im Bereich von Femtosekunden machen. Das Prinzip: Ein erster Laserblitz löst eine photochemische Reaktion aus, ein zweiter blitzt sie unmittelbar darauf. Der zweite Blitz muss präzise einstellbar sein, um den „Schnappschuss“ jeweils zu einem bestimmten Zeitpunkt auszulösen. Eine Serie solcher Momentaufnahmen mit verschiedenen Zeitabständen zwischen dem ersten und dem zweiten Blitz ergibt einen Film vom Reaktionsablauf.

Ultrastarke Laserblitze

Die TESLA-Röntgenlaser können solche Filme aus dem Mikrokosmos mit bislang unerreichter Detailtreue aufnehmen. Sie erzeugen extrem intensive Röntgenstrahlung und sind hervorragend fokussierbar. Ein einziger Laserblitz hat eine so hohe Leuchtstärke, dass er die reagierenden Moleküle mit atomarer Auflösung abbilden kann. Die Blitzdauer beträgt bei TESLA etwa 100 Femtosekunden – das ist die Zeitspanne, in der die Veränderungen während der Molekülreaktionen ablaufen. Der Zeitabstand zwischen zwei Laserblitzen – also zwischen dem Auslösen der Reaktion und der Bildaufnahme – kann systematisch und auf eine Billionstel Sekunde genau verändert werden. Die TESLA-Laserblitze ermöglichen es, den genauen Verlauf einer chemischen Reaktion zu verfolgen und zu verstehen – Reaktionen, die beispielsweise in Optoelektronik, Photovoltaik, Brennstoff- oder Solarzellen ihre Anwendung finden.

Mit ultraschnellen Lasern chemische Reaktionen „filmen“.



Durch einen Laserblitz wird eine chemische Reaktion ausgelöst – Moleküle werden in einen energiereicheren (angeregten) Zustand gebracht. Anschließend „fallen“ sie wieder in ihren energieärmeren Gleichgewichtszustand zurück. Ein zweiter Laserblitz macht – jeweils zu verschiedenen Zeitpunkten (t) – Momentaufnahmen von den dabei ablaufenden Molekülveränderungen.

Plasmaphysik ... der etwas andere Zustand

Plasma Physics



A Different State of Matter

Heiße Phase

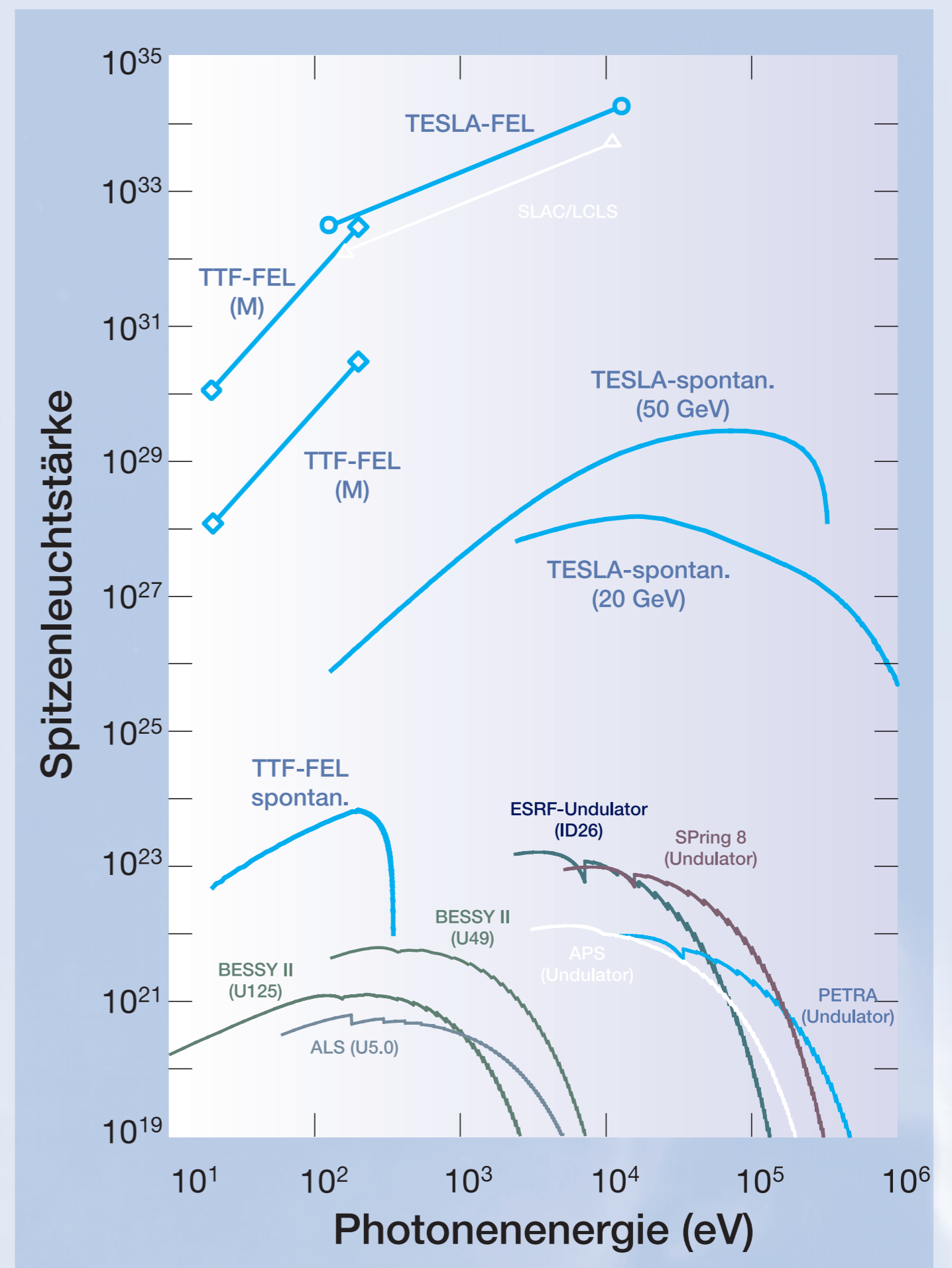
Wasser ist flüssig, Eis ist fest, und Wasserdampf gasförmig – Zustände, wie sie jeder kennt. Im festen Zustand sind Atome oder Moleküle in regelmäßigen Kristallgittern angeordnet, im flüssigen Zustand sind ihre Bindungen weitaus lockerer, und im gasförmigen Zustand können sie sich weit gehend frei bewegen. Doch es gibt noch einen vierten Zustand der Materie, der weitaus exotischer anmutet: das Plasma, ein ionisiertes, heißes Gas. Bei unseren normalen Umgebungstemperaturen ist es ein Ausnahmezustand. Steigen die Werte jedoch auf einige tausend Grad, werden Atome ionisiert – Elektronen werden aus der Atomhülle abgespalten. Das heiße Gas wird dadurch elektrisch leitend, ein Plasma entsteht.

Vielseitige Anwendungen

In der Technik spielen Plasmen eine große Rolle. Computerchips beispielsweise können mit Plasmaverfahren geätzt werden, flache Bildschirme benutzen Plasmadisplays, neue Werkstoffe werden mit Plasmabrennern erzeugt. Eine besondere Herausforderung der Plasmaphysik ist es, die kontrollierte Kernfusion zu realisieren – also die Energieerzeugung nachzuahmen, die im Inneren von Sternen wie unserer Sonne abläuft. In Sternen existiert die Materie im Plasmazustand.

Plasmen im Labor

Die TESLA-Röntgenlaser bieten ganz neue Möglichkeiten, um Eigenschaften und Prozesse in Plasmen zu untersuchen: Ihre extrem hohe Strahlungsintensität ermöglicht es, mit einem einzigen ultrakurzen Röntgenstrahlungsblitz heißes Plasma zu erzeugen und zugleich – mit einem zweiten unmittelbar darauf folgenden Blitz – eine hoch auflösende Momentaufnahme des exotischen Materiezustands zu machen.



Der Vergleich mit heutigen Synchrotronstrahlungsquellen weltweit zeigt den riesigen Sprung in der Leuchtstärke, den das TESLA-Projekt bietet. Bereits der Freie-Elektronen-Laser, der an der Pilotanlage für TESLA entsteht (TTF-FEL), wird die bisherigen Strahlungsquellen im gleichen Energiebereich um Größenordnungen übertreffen. Die in den TESLA-Linearbeschleuniger integrierten Freie-Elektronen-Laser werden Röntgenlicht höchster Leuchtstärke erzeugen.

(ALS, APS, SLAC/LCLS: Vereinigte Staaten; BESSY-II, PETRA: Deutschland; ESRF: Frankreich; SPring 8: Japan)