



DIE IONENBLITZ-MASCHINE

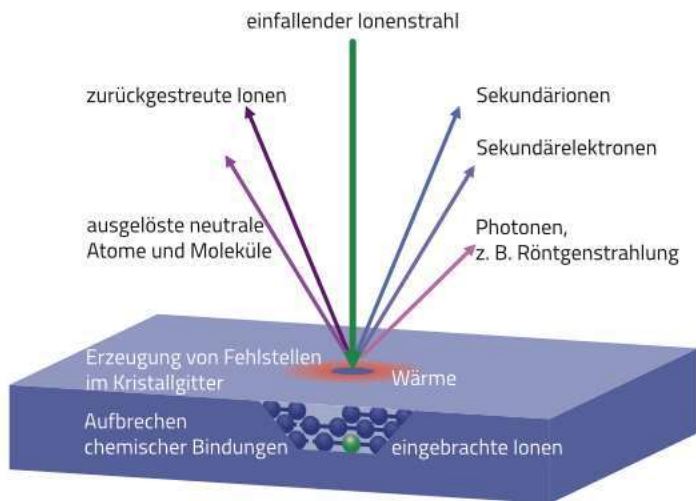
Was passiert, wenn Ionen auf Materie treffen? Auf der mikroskopischen Ebene sind diese Prozesse noch nicht vollständig verstanden – unter anderem, weil sie zu schnell sind, um sich beobachten zu lassen. Ein neues Verfahren erlaubt Anrege-Abfrage-Experimente mit Ionen auf ultrakurzen Zeitskalen.

Ionen – also elektrisch geladene Atome – sind sehr flexibel nutzbar. Sie lassen sich mit elektrischen und magnetischen Feldern ablenken, beschleunigen und abbremsen. Ihre Masse und ihren Ladungszustand kann man labortechnisch gut kontrollieren. Im Gegensatz zu Photonen können Ionen aufgrund ihrer Masse effizient Impuls übertragen und somit Atome wegstoßen – ähnlich wie bei Billardkugeln. Wählt man die Energie passend, kann man so gezielt Fremdatome in ein Material einbringen oder Atome aus einem Material abtragen – und sogar Atome zertrümmern, so wie es z. B. im Teilchenbeschleuniger LHC (Large Hadron Collider) am CERN bei Genf (Schweiz) geschieht.

Ionen, die sich durch ein Medium – einen Festkörper, eine Flüssigkeit oder ein Gas – bewegen, können ihrerseits wieder Ionen erzeugen. Neben dem Impulsübertrag kann also auch eine elektronische Anregung stattfinden. Dies wird beispielsweise in der Materialbearbeitung oder in der Tumorthherapie ausgenutzt. Dieser Mechanismus kann aber auch elektronische Bauteile zerstören – also Effekte haben, die man vermeiden möchte.

GEHEIMNISVOLLE IONEN

Einerseits sind Ionen aufgrund der vielfältigen, mit ihnen und ihren Wechselwirkungen verknüpften Phänomene spannend. Andererseits macht



Treffen Ionen auf Materie, so kann dies viele unterschiedliche Effekte haben. Diese werden zum Beispiel in der Materialbearbeitung oder in der Medizin ausgenutzt.

diese Vielfalt es auch schwierig, die zugrundeliegenden Prozesse zu identifizieren, gegeneinander abzugrenzen und zu verstehen. Obwohl sich bedeutende Physiker:innen, darunter auch die Nobelpreisträger Niels Bohr, Hans Bethe und Max Born, damit befasst haben, ist das aktuelle physikalische Verständnis der Wechselwirkung von Ionen mit Materie verglichen mit dem von Photonen und Elektronen mit Materie deutlich weniger weit fortgeschritten.

Um hier ein tiefergehendes Verständnis zu entwickeln, muss man den untersuchten Parameterraum begrenzen – etwa auf einen bestimmten Energiebereich, auf ein bestimmtes Material oder auf eine bestimmte Ladung. In unserem Teilprojekt beschäftigen wir uns mit einfach geladenen,

langsamen Ionen. In diesem Fall dominieren direkte Stöße (d. h. der Impulsübertrag) zwischen den einfallenden Ionen und den Atomen im Zielmaterial, doch auch die Anregung der Elektronen im Zielmaterial ist nicht zu vernachlässigen.

ULTRASCHNELLE WECHSELWIRKUNGEN

Der Impulsübertrag zwischen Ionen und anderen Atomen und Molekülen lässt sich in dem von uns untersuchten Energiebereich mit einem Billardspiel vergleichen. Ob herausgestoßene Teilchen aber als elektrisch neutrale Atome oder als Ionen austreten, hängt von den ultraschnellen Wechselwirkungen im Festkörper ab, die wir untersuchen wollen. Der Ioneneinschlag bringt zunächst die Elektronen innerhalb von wenigen Femtosekunden aus dem Gleichgewicht. Deutlich später, nämlich auf der Pikosekunden-Zeitskala, reagieren die schwereren Atome. Entscheidend für die Frage, ob ein neutrales Atom oder ein Ion aus der Oberfläche des Festkörpers herausgeschleudert wird, ist, ob es eine signifikante zeitliche und räumliche Überlappung der beiden Anregungen von Elektronen und Atomen gibt.

1 Pikosekunde = 1000 Femtosekunden

Deswegen interessiert uns der genaue zeitliche Verlauf und vor allem eine eventueller Überlappung von elektronischer Anregung und Atombewegung. Bislang ist unser Wissen hierüber nur aus Simulationen abgeleitet, für die immer nur der Zustand vor und lange nach der Wechselwirkung überprüft werden kann.

Der Grund für die fehlenden experimentellen Daten: Es gibt keine ausreichend kurzen Ionenpulse. Die übliche Herangehensweise, um zeitliche Abläufe auf solch kurzen Zeitskalen zu messen, ist nämlich das Anrege-Abfrage-Prinzip, bei dem das System erst angeregt und nach einer einstellbaren Zeitspanne eine aussagekräftige physikalische Größe abgefragt wird. Dieses Prinzip funktioniert aber nur, wenn die Anregung deutlich kürzer ist als die Dauer des Prozesses, den man beobachten will. Auch muss der Zeitpunkt der Anregung genau bekannt sein. Wollten wir uns etwa das Atombillard anschauen, dürfte der anregende Ionenpuls nur wenige



Gezielt auf einen Tumor gerichtet, zerstören Ionen Tumorzellen. In der Krebstherapie kommen deshalb neben der klassischen Bestrahlung mit Photonen auch Ionenstrahlen zum Einsatz. Das Bild zeigt einen Behandlungsraum am Marburger Ionenstrahl-Therapiezentrum – neben Heidelberg eines der deutschen Therapiezentren, in denen die Bestrahlung mit Kohlenstoffionen möglich ist.

Pikosekunden kurz sein. Dies ist, anders als bei einem Laserpuls, bei Ionen eine große Herausforderung, da diese üblicherweise mehr oder weniger kontinuierlich in speziellen Quellen (thermisch, durch Elektronenstöße, u. a.) erzeugt und dann mit Hilfe strahlformender Elemente auf das Zielmaterial geführt werden. Würde man beispielsweise den kontinuierlichen Ionenstrahl mechanisch mit einem sogenannten *Chopper* in kurze Pikosekunden-Pakete zerteilen, bräuchte man Drehfrequenzen von einigen 100 Gigahertz. Dafür müssten sich die Ränder des Chopper-Rades fast mit Lichtgeschwindigkeit bewegen. Würde man den Ionen-

strahl elektronisch zerteilen, dann käme man mit den schnellsten elektronischen Schaltern auf eine Pulslänge von einigen zehn Nanosekunden, was immer noch tausendmal zu lang ist.

„To chop“ ist Englisch und heißt so viel wie „hacken“. Ein mechanischer Chopper kann zum Beispiel eine Art Zahnrad sein, bei dem die Lücken den Strahl durchlassen und die Zähne ihn stoppen. Mit der Frequenz der Drehung kann man dann einstellen, wie lang die hindurchtretenden Schnipsel (in unserem Fall die Ionenpakete) sind.

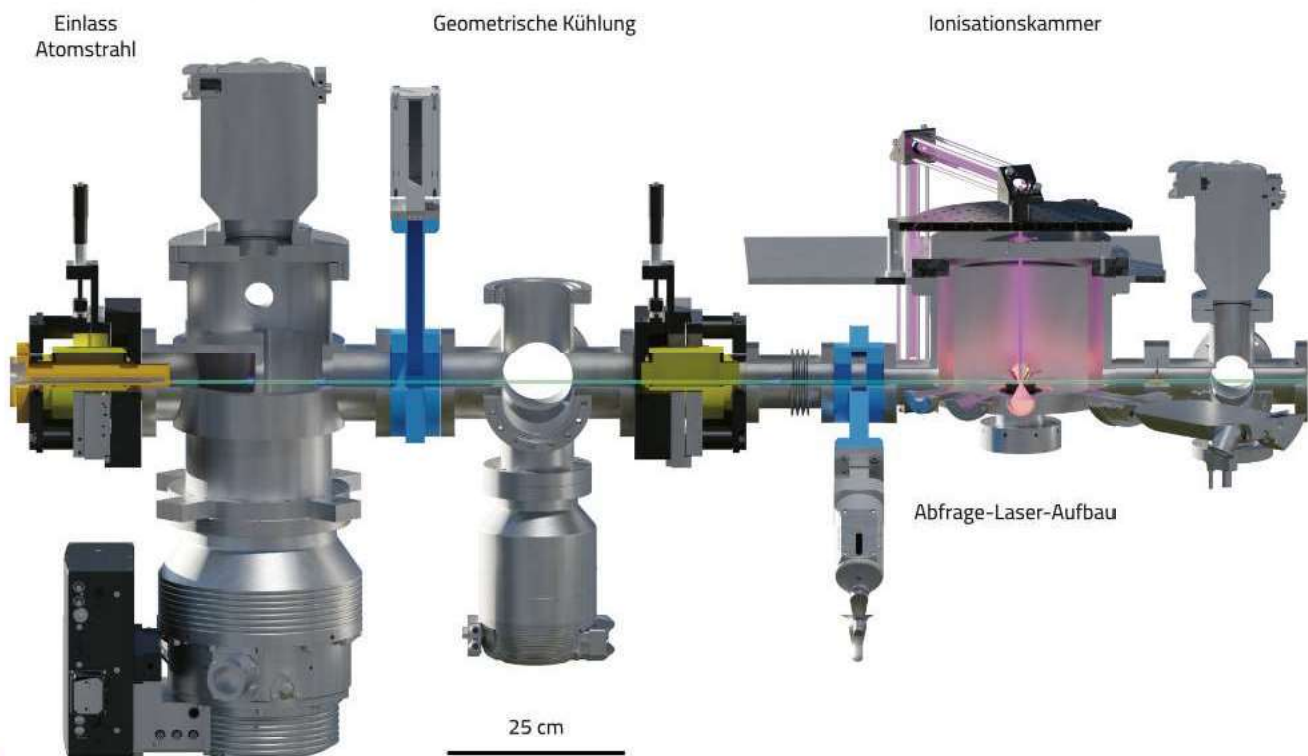
SUPERKURZE IONENPULSE

Innerhalb unseres Teilprojekts konnten wir eine neuartige Ionenquelle konzipieren und aufbauen, die ultrakurze Ionenpulse liefert. Unser Ausgangspunkt ist ein Gas aus elektrisch neutralen Neon-

Atomen. Der Einfachheit halber betrachten wir nur ein einziges Atom in der Gaswolke, das wir ionisieren wollen. Dazu benutzen wir einen ultrakurzen Laserpuls im Femtosekundenbereich, womit der Zeitpunkt der Erzeugung eindeutig festgelegt ist (unser Zeitnullpunkt für die Synchronisation mit dem Abfragepuls). Das Ion beschleunigen wir mithilfe von elektrischen Feldern auf das Zielmaterial. Sind der Ort des Atoms und damit der Startort des Ions sowie seine Geschwindigkeit zum Zeitpunkt der Ionisation exakt bekannt, kann man prinzipiell auf die Pikosekunde genau sagen, wann das Ion auf die Probe trifft.

Leider sind die beiden oben genannten Bedingungen für ein Gas aus Atomen bei Raumtemperatur eben gerade nicht erfüllt. Die Atome im Gas bewegen sich wild durcheinander und wir kennen weder ihren genauen Startort noch ihre Geschwindigkeit. Unsere Idee war, beides so weit wie möglich einzuschränken, die Atome also abzukühlen, bevor wir sie ionisieren. Dies erreichen wir, indem wir mithilfe einer Einspritzdüse einen Atomstrahl erzeugen und zusätzliche spezielle Lochblenden einsetzen, die einen winzigen, schmalen Teil aus dem Strahl herauschneiden und so herunterkühlen: Atome mit hoher Geschwindigkeit senkrecht zum Strahl werden entfernt und der Strahl so geometrisch gekühlt. Die-

Aufbau zur Erzeugung von ultrakurzen Ionenpulsen. Der neutrale Atomstrahl (grün) wird an der linken Seite in die Ultrahochvakuumanlage mittels einer gepulsten Düse eingelassen. Durch die Skimmer (lila) werden Gasteilchen senkrecht zur Ausbreitungsrichtung regelrecht abgeschält und der Gasstrahl somit geometrisch gekühlt. In der Ionisationskammer werden der kalte Atomstrahl (grün) und der Laser (magenta) zur Photoionisation miteinander gekreuzt und so der Ionenpuls (Anregepuls) erzeugt. Der Abfrage-Laserstrahl (pink) wird mit einem zeitlichen Versatz auf denselben Bereich der Probe wie der ultrakurze Ionenpuls gelenkt.





Nele Junker und Lukas Kalkhoff arbeiten an der Apparatur zur Erzeugung der ultrakurzen Ionenpulse, von der hier nur ein Teil zu sehen ist. Nahe der linken Hand der Studentin befindet sich die Kammer, in der Atom- und Laserstrahl gekreuzt werden. Die dabei entstehenden Ionen werden in Richtung der Probe, also zum unteren Bildrand hin, beschleunigt. Rechts sieht man das schnelle Oszilloskop, mit dem wir die Pulslänge messen.

sen gut präparierten Strahl kalter Atome kreuzen wir mit dem stark fokussierten Laserstrahl. Damit ist das Volumen, in dem die Ionisation stattfindet, minimal (genau bekannter Startort) und nur ein Atom, das keine nennenswerte Geschwindigkeit mehr senkrecht zur Düsenstrahlachse hat (genau bekannte Geschwindigkeit), kommt bis zu der

Stelle, wo der Laser es ionisiert. Unser Puls enthält mit dieser Technik ein Ion, dessen Ankunftszeit an der Probe wir mit Pikosekunden-Genauigkeit kennen.

AKTUELLER WELTREKORD

Die Pulserzeugung wiederholen wir oft, damit wir eine ausreichende Statistik für unser Experiment haben. Wegen der noch bestehenden Restungenauigkeit in Bezug auf Startort und Geschwindigkeit gibt es Laufzeitunterschiede zwischen den einzelnen Pulsen, die momentan im Mittel etwa 18 Pikosekunden betragen – Stand 2023 der aktuelle Weltrekord. Prinzipiell sollte es sogar möglich sein, Pulslängen von wenigen Pikosekunden oder sogar von Sub-Pikosekunden zu erreichen. Ziel der nächsten Jahre wird es also sein, noch kürzere Pulse zu erzeugen und mit unseren Pikosekunden-Pulsen erstmalig der Dynamik im Festkörper nach dem Einschlag eines Ions auf die Spur zu kommen.

Leitung der Projekte: Lars Breuer,
Marika Schleberger, Klaus Sokolowski-Tinten,
Andreas Wucher

Der Blick in die Experimentierkammer zeigt den oberen Teil der Elektrodenanordnung, die den Ionenpuls mittels elektrischer Feder zeitlich komprimiert.

