

RUBIN

WISSENSCHAFTSMAGAZIN

SONDERAUSGABE

Sonderausgabe

ANGEWANDTE PLASMA- FORSCHUNG

BIOKATALYSE UND
PLASMEN KOMBINIEREN

KLIMAKILLER IN ROHSTOFFE
UMWANDELN

DAS INNERE VON PLASMEN
LIVE ÜBERWACHEN



Foto: dg

EDITORIAL

Plasmen sind aus dem Alltag nicht mehr wegzudenken. Jedes Handy, jeder Computer, jedes Auto, selbst viele Teile des Maschinenbaus sind ohne Plasma nicht herstellbar. Aber es geht noch viel weiter: Inzwischen können Wunden besser geheilt, Abgase effizienter gereinigt und Getränke in PET-Flaschen länger haltbar gemacht werden. Sogar Raketenantriebe sind mit Plasmen möglich! Übrigens: Auch die Sonne ist ein Plasma.

Ein Plasma wird durch elektrische Felder erzeugt, die ein Gas in seine Bestandteile zerlegen und ionisieren – es bildet sich ein Plasma bestehend aus Elektronen, Ionen, neutralen Molekülen, Atomen und Radikalen. Das wesentliche Merkmal dieser Plasmen ist, dass sie einen Nichtgleichgewichtszustand einnehmen können: Während die Elektronen eine Temperatur von mehreren 10.000 Grad Celsius besitzen und damit chemische Reaktionen auslösen können, behalten die schweren Teilchen nahezu Raumtemperatur. So lassen sich empfindliche Oberflächen wie Kunststoffe oder sogar biologisches Gewebe mit Plasmen sehr schonend bearbeiten. Darüber hinaus können diese Plasmen trotz ihrer geringen Temperaturen auch die stabilsten, giftigen Moleküle in Industrieabgasen effizient oxidieren und damit unschädlich machen.

Die Steuerung dieser komplexen Plasmasysteme, vor allem die Aufrechterhaltung des Nichtgleichgewichts, ist allerdings sehr herausfordernd, da wir dafür die Energieeinkopplung, die Reaktionswege und den Teilchentransport in einem Plasmareaktor genau verstehen müssen. Die Aufklärung der Details erfordert eine intensive Zusammenarbeit verschiedener Disziplinen wie der Physik, der Elektrotechnik, der

Materialwissenschaften, der Chemie sowie der Biologie. Die Ruhr-Universität Bochum bietet eine einzigartige Plattform dafür, da die unterschiedlichen Expertisen an einem Standort vereint sind und schon lange miteinander bei der Plasmaforschung kooperieren. So kann dieser Forschungsbereich auf eine umfangreiche Liste an kooperativen Projekten zurückblicken, die bis zur Gründung der RUB zurückreichen. Derzeit bearbeiten wir diese Themen unter anderem im Rahmen zweier Sonderforschungsbereiche: SFB/TR 87 „Gepulste Hochleistungsplasmen zur Synthese nanostrukturierter Funktionsschichten“ (2010–2022) und SFB 1316 „Transiente Atmosphärendruckplasmen: von Plasmen zu Flüssigkeiten zu Festkörpern“ (2018–2022). In unseren Teams erforschen wir grundlegende Fragen zum Einschluss und zur Anregung von Ionen und Molekülen in Plasmen bis hin zu neuen Synthesewegen für neuartige Materialien; auch die Kombination von Plasmen mit der Katalyse und der Elektrolyse für zukünftige flexible Energiesysteme untersuchen wir. Dieses Sonderheft soll Ihnen einen Einblick geben in die vielfältigen interdisziplinären Facetten dieser Forschung und das großartige Potenzial von Plasmen für die Technologien der Zukunft.

Achim von Keudell, Sprecher SFB 1316

Peter Awakowicz, Sprecher SFB/TR 87

i MEHR INFORMATIONEN ZU DEN SFBS:

→ sfbtr87blog.blogspot.com

→ sfb1316.rub.de

INHALT

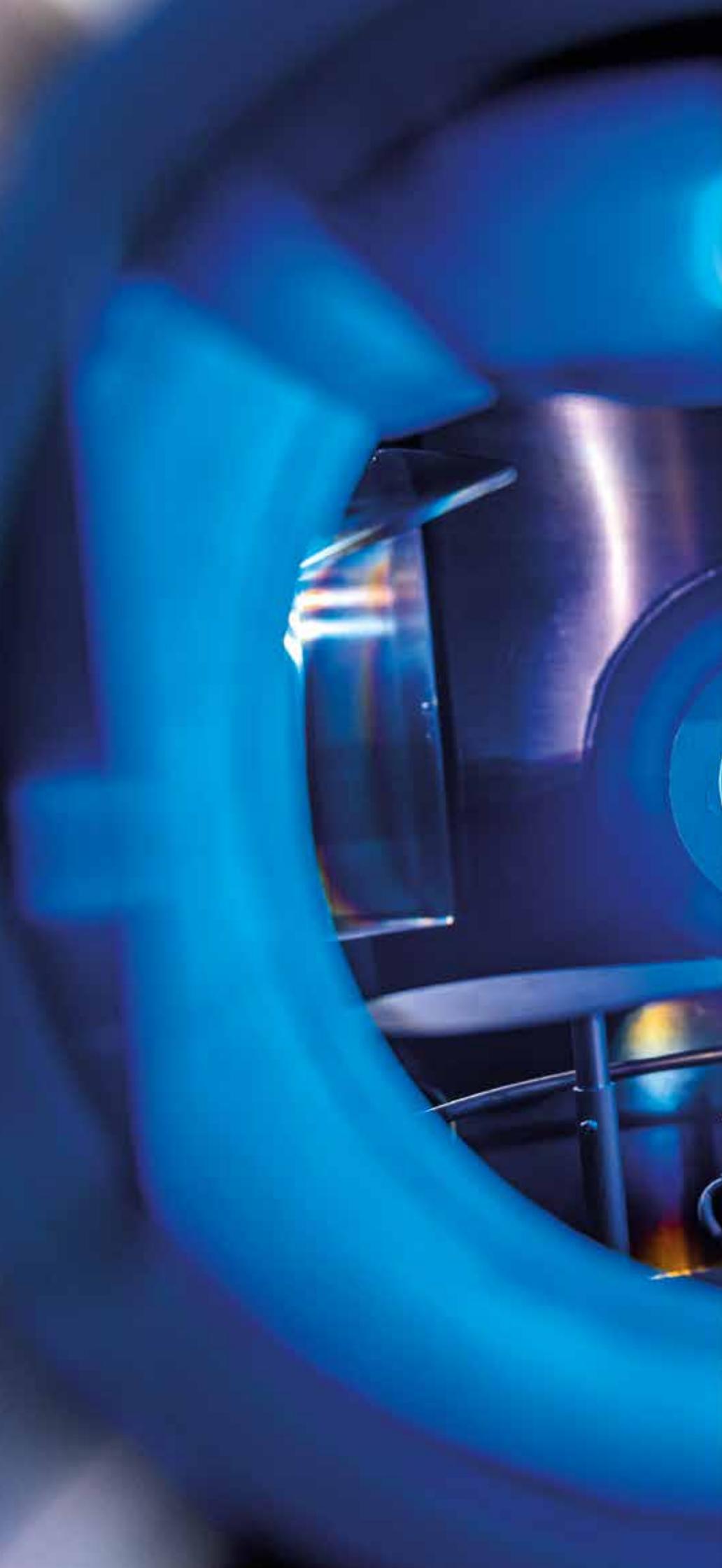
- 03 Editorial
- 04 Inhaltsverzeichnis
- 06 Forschung in Bildern
- 14 *Infografik*
Was ist Plasma?
- 16 *Hochleistungsplasmen*
Plasmastrukturen im Detail analysiert
- 20 *Niedertemperaturplasmen*
Die maßgeschneiderte Welle
- 24 *Plasmadiagnostik*
Eine Kugel, die Elektronen zum Schwingen bringt
- 26 *Plasmadiagnostik - Im Gespräch*
Das Innere von Plasmen live überwachen
- 28 *Plasmaphysik*
Eine Referenzquelle für die Plasmaforschung
- 32 *Prognosen*
Die Zukunft der Plasmaforschung – Teil I

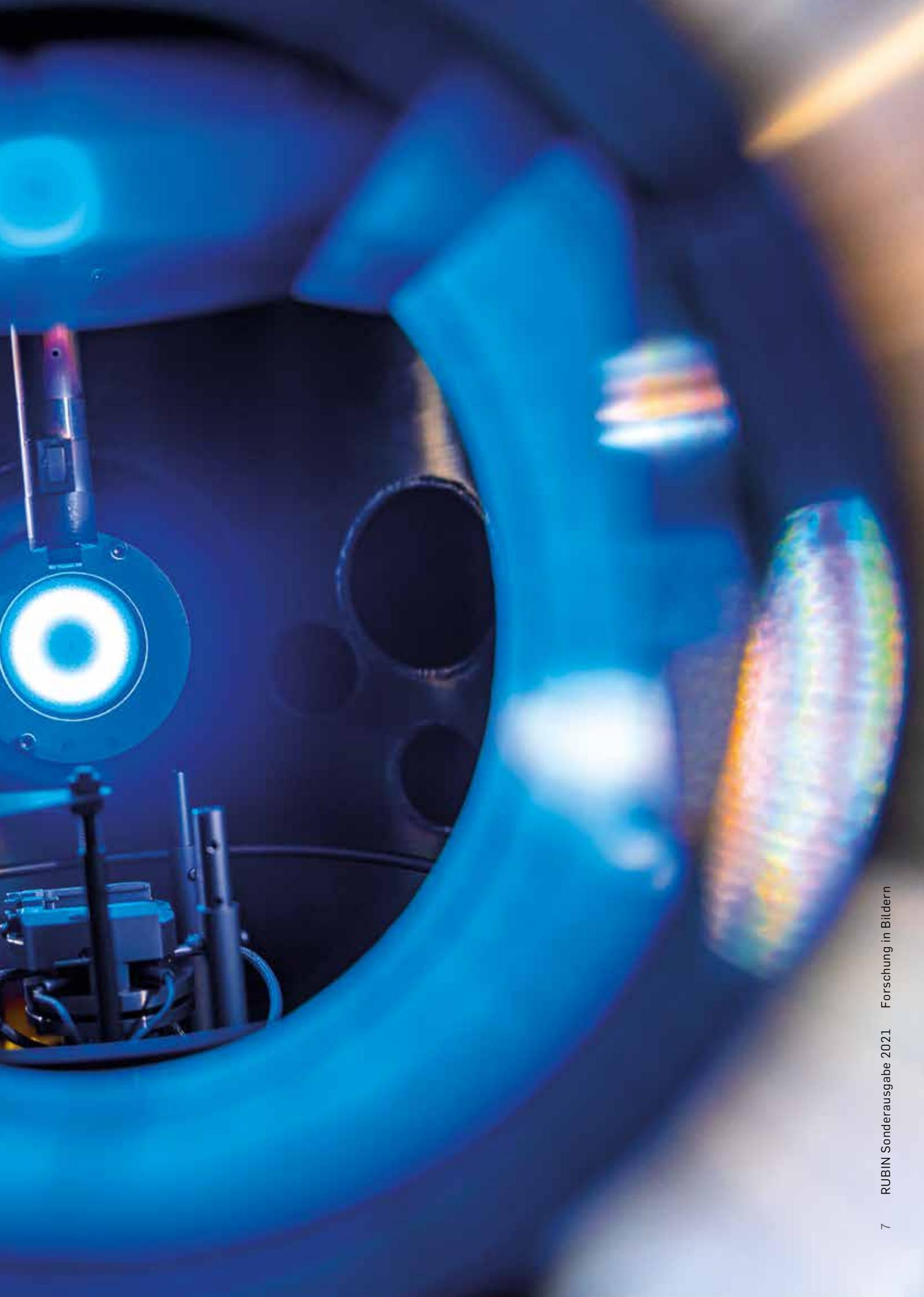
173

16

PLASMASTRUKTUREN

Das Plasma, das hier zu sehen ist, hat die Form eines Torus – zumindest, wenn man es ohne technische Hilfsmittel betrachtet. Schaut man mit Hochgeschwindigkeitskameras genauer hin, stellt sich heraus, dass Plasmen inhomogen sind. Was das bedeutet und wie man die Strukturen von Plasmen analysieren kann ab Seite 16. (Foto: dg)



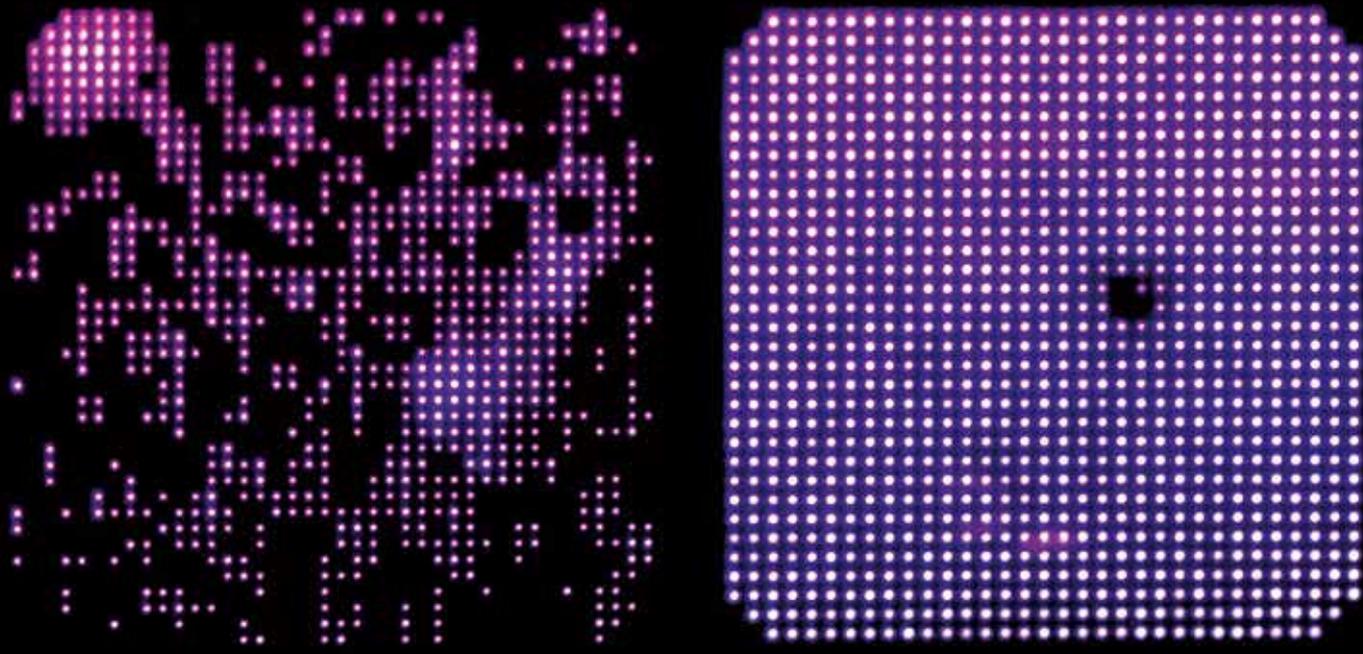


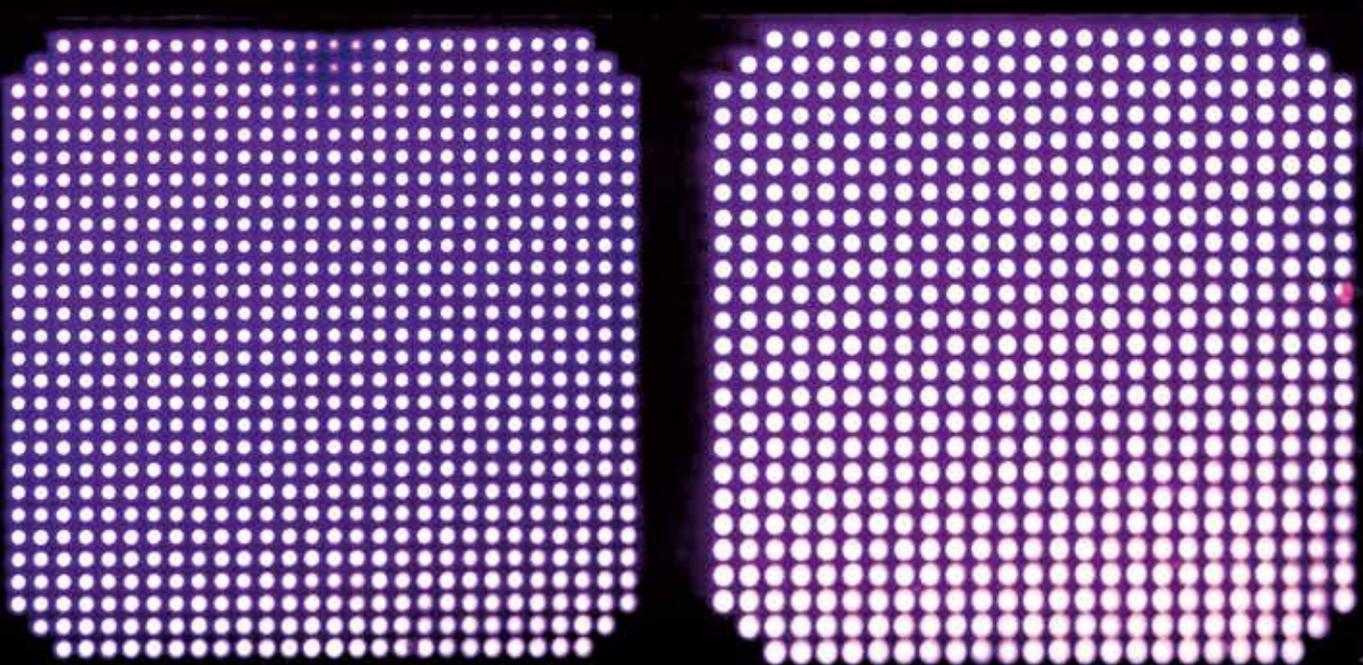
PLASMADIAGNOSTIK

Mithilfe von Lasertechnik können Forschende detaillierte Einblicke in die chemischen Vorgänge in Plasmen gewinnen. Die sogenannte CARS-Methode – kurz für Coherent anti-Stokes Raman Scattering – erlaubt etwa, die Schwingungszustände von Molekülen in Plasmen zu untersuchen. Forschende der RUB, hier Dr. Dirk Luggenhölscher, haben das Verfahren weiterentwickelt. Mehr dazu ab Seite 48. (Bild: dg)



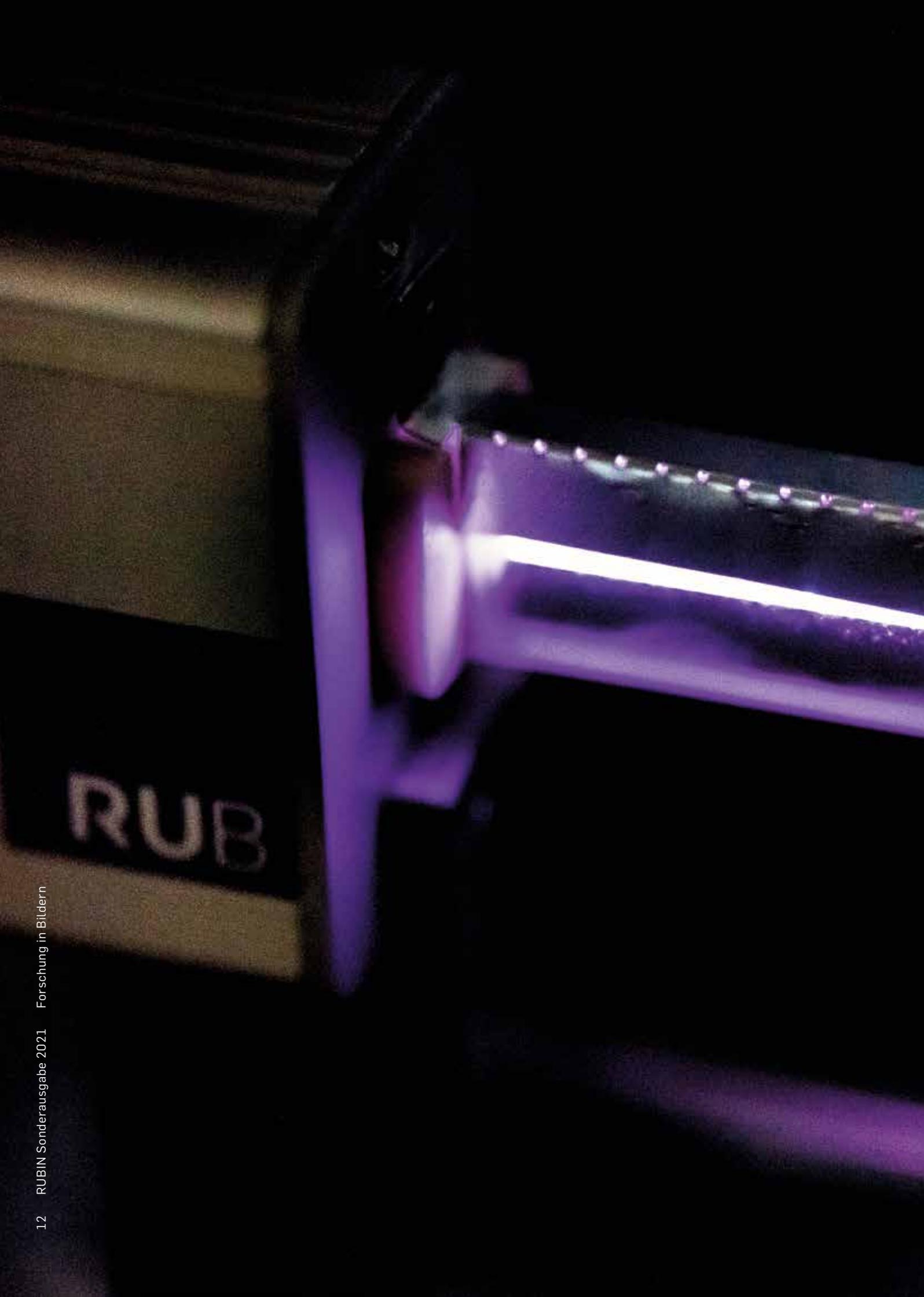






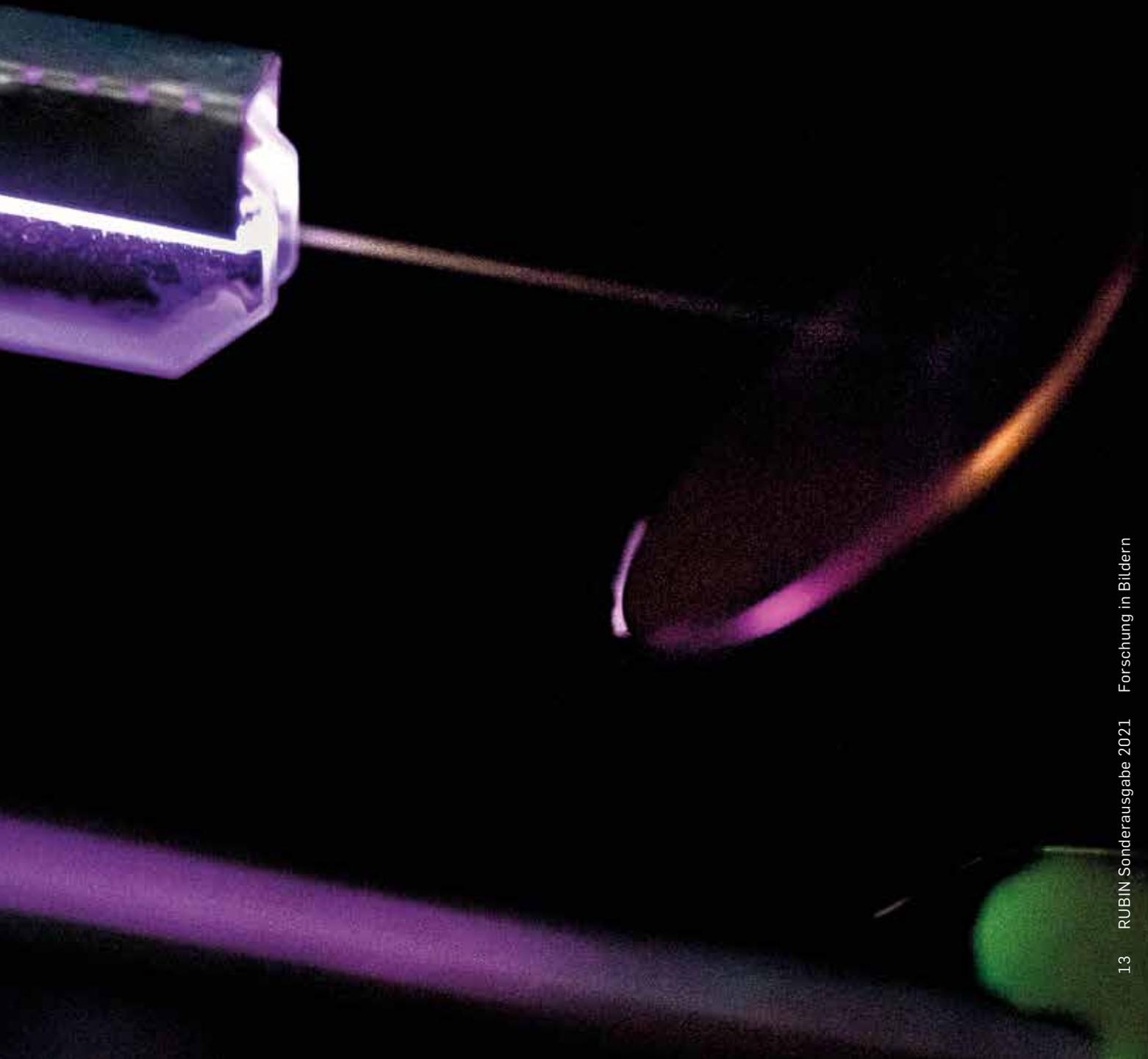
MIKROPLASMA-ARRAY

In jedem kleinen Loch auf diesem Bild befindet sich ein Plasma. Die Größe der Löcher, auch Kavitäten genannt, nimmt von links (50 Mikrometer) nach rechts (200 Mikrometer) zu. Anhand des emittierten Lichts kann das Team des Sonderforschungsbereichs 1316 die Plasmen charakterisieren, etwa ihre elektrischen Felder oder die Temperatur bestimmen. Die große Anzahl der Kavitäten im Messaufbau verstärkt die Signale und wird beispielsweise bei der Plasmakatalyse ausgenutzt. (Foto: dg)



PLASMA-JET

Plasmen können in verschiedenen Formen und Größen daherkommen. Dieses Atmosphärendruck-Plasma hat die Form eines Jets. Es ist hier hell leuchtend in dem transparenten Bauteil zu sehen. In dem Plasma werden viele reaktive Teilchen gebildet. Ein Teil dieser reaktiven Atome und Moleküle – der sogenannte Afterglow – tritt aus dem Bauteil aus. Er kann auf eine Oberfläche geleitet werden, zum Beispiel, um diese zu beschichten oder um biologische Substrate zu behandeln, etwa für eine bessere Wundheilung. (Foto: dg)

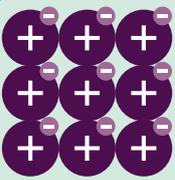


In der Natur sehen wir Plasmen zum Beispiel in der Sonne, in Polarlichtern oder in Form von Blitzen während eines Gewitters.

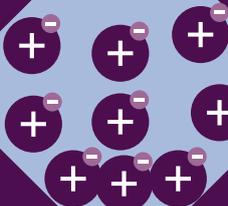
WAS IST PLASMA?

ZUSTÄNDE DER MATERIE

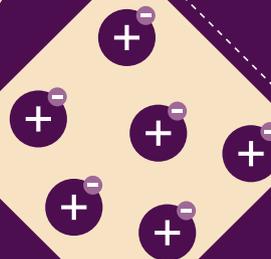
Fest



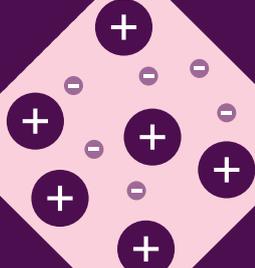
Flüssig



Gasförmig



Plasma



- Molekül/Atom
- Ion
- Elektron

MEHR ALS
99%
DER GESAMTEN
SICHTBAREN MATERIE
IM UNIVERSUM LIEGT
ALS PLASMA VOR.

ANWENDUNGSBEREICHE

LICHT

Beispiele:
Energiesparlampen,
Speziallampen,
Stadionbeleuchtung

ÄTZEN

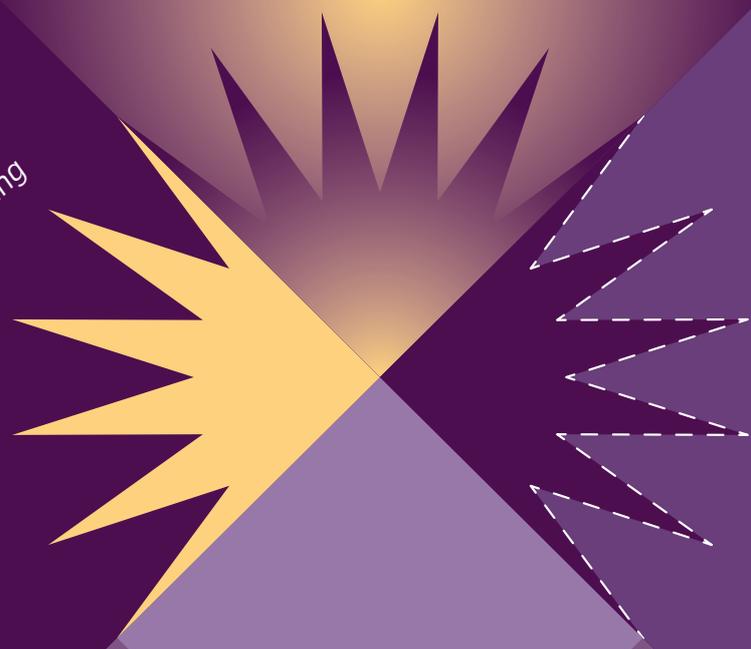
Beispiele:
Mikro- und Nanostrukturierung
von integrierten
Schaltkreisen und
Sensoren

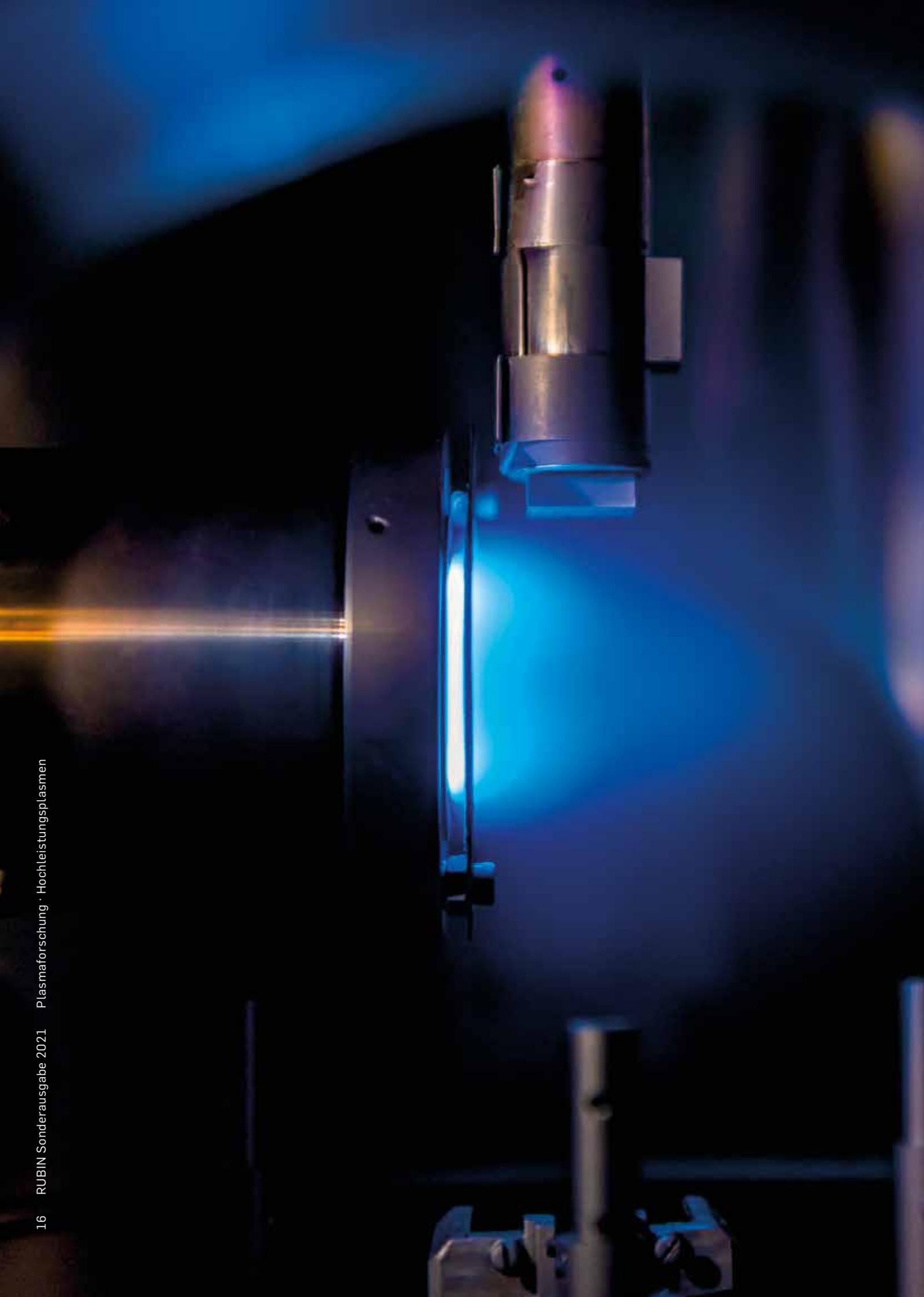
BESCHICHTUNG

Beispiele:
Neue Materialien, Keramiken,
Schutzschichten, Barrieren

KONVERSION

Beispiele:
Plasmachemie, solare Kraftstoffe,
Plasmamedizin, Elektrolyse





PLASMASTRUKTUREN IM DETAIL ANALYSIERT

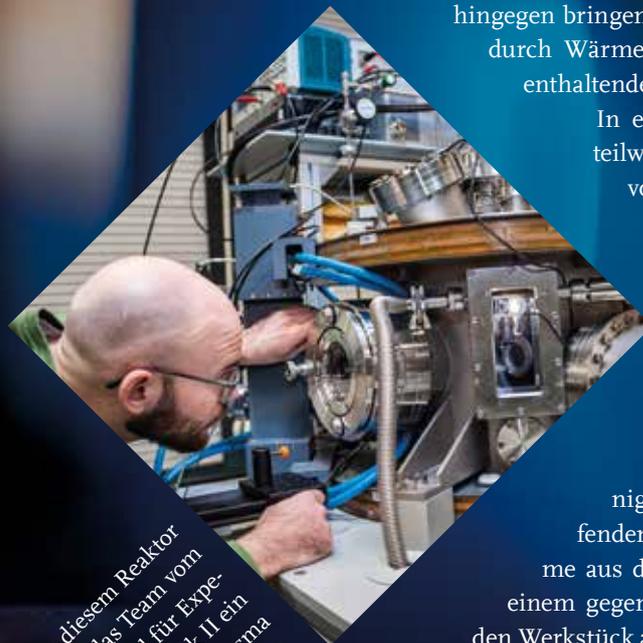
Als auffiel, dass Plasmen inhomogen sind, gefiel das nicht jedem. Dabei bringt diese Eigenschaft Vorteile mit sich, zum Beispiel für die Industrie.

Für das bloße Auge sind sie oft unsichtbar: die hauchdünnen Schichten, die mithilfe von Plasmen auf Oberflächen abgeschieden werden. Zum Beispiel auf Architekturglas, um das Reflexionsvermögen zu steuern, auf Werkzeuge, um sie vor Verschleiß zu schützen, oder auf Kunststoffe, um sie dichter gegen den Durchtritt von Gasen zu machen. Aus der Industrie sind Plasmen nicht mehr wegzudenken. Zwar kann man Oberflächen auch mithilfe von chemischen Prozessen beschichten, aber dafür sind teils so hohe Temperaturen erforderlich, dass die zu beschichtenden Objekte schmelzen würden. Plasmen hingegen bringen die erforderliche Energie nicht durch Wärme auf, sondern durch die darin enthaltenden reaktiven Teilchen.

In einem Plasma liegt die Materie teilweise oder vollständig ionisiert vor. Durch das Anlegen von elektrischen Feldern an Elektroden in einer Plasmakammer kann das eingebrachte Gas, zum Beispiel Argon, ionisiert werden, und die geladenen Teilchen werden in Richtung einer Metallelektrode beschleunigt. Die auf dem Metall auftreffenden Ionen schlagen einzelne Atome aus dem Metall heraus, die sich auf einem gegenüberliegenden zu beschichtenden Werkstück ablagern. Was genau bei solchen

Beschichtungsprozessen in den Plasmen passiert, interessiert das Team des Sonderforschungsbereichs SFB/TR 87. Seit Jahren erforschen die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler die zugrunde liegenden Prozesse.

„Mit dem Sonderforschungsbereich haben wir sowohl den Hype um die Plasmabeschichtung vor gut zehn Jahren als auch das anschließende tiefe Tal der Tränen mitgemacht“, erinnert sich Prof. Dr. Achim von Keudell, der an der RUB die Professur für Experimentalphysik reaktiver Plasmen innehat. Im Jahr 1999 wurde das sogenannte High-power Impulse Magnetron Sputtering etabliert. Das Verfahren nutzt vollständig ionisierte Plasmen mit einer ähnlich hohen Leistungsdichte auf den Oberflächen wie in Raketentriebwerken. Im Gegensatz zu herkömmlichen Plasmen können diese



In diesem Reaktor kann das Team vom Lehrstuhl für Experimentalphysik II ein Hochleistungsplasma erzeugen.



Julian Held (rechts) aus dem Team von Achim von Keudell (links) hat ein Verfahren entwickelt, um die zeitliche Entwicklung von schnellen Strukturen in Plasmen untersuchen zu können.

Hochleistungsplasmen nicht dauerhaft betrieben werden, weil sie die Materialien der Plasmakammer zerstören würden. Daher werden sie immer wieder an- und ausgeschaltet, also gepulst betrieben.

Mit solchen dichten Plasmen lassen sich auch entsprechend dichte und qualitativ hochwertige Schichten herstellen. Daher stieß diese Technik in der Industrie sofort auf Interesse. „Dann kam der Moment der Desillusionierung“, sagt Achim von Keudell. Denn die höhere Qualität der Schichten ging zulasten der Beschichtungsrate, die zum Teil nur noch 30 Prozent so hoch war wie mit konventionellen Verfahren, wenn man die Beschichtungsrate auf die eingesetzte elektrische Leistung bezog.

Während im herkömmlichen Prozess überwiegend mit ungeladenen Atomen, Radikalen oder Molekülen beschichtet wird, entstehen durch die Hochleistungsplasmen vornehmlich Ionen. Da die Teilchen geladen sind, werden sie stark von den äußeren und inneren elektrischen Feldern beeinflusst. Ein Großteil der Ionen, die zur Beschichtung in Richtung der Oberfläche unterwegs sind, kehrt aufgrund der Richtung dieser elektrischen Felder auf halbem Weg einfach wieder um und fliegt zurück. Das Phänomen wird als Return-Effekt bezeichnet und lässt sich nicht umgehen, weil es schlicht in der Eigenschaft der voll ionisierten Plasmen begründet ist. „Zehn Jahre lang hat sich die Plasma-Community die Zähne an dem Versuch ausgebissen, beides hinzubekommen: eine hochqualitative Schicht und eine hohe Wachstumsrate. Es geht nicht, man muss je nach Anwendung entscheiden, was wichtiger ist“, fasst von Keudell zusammen.

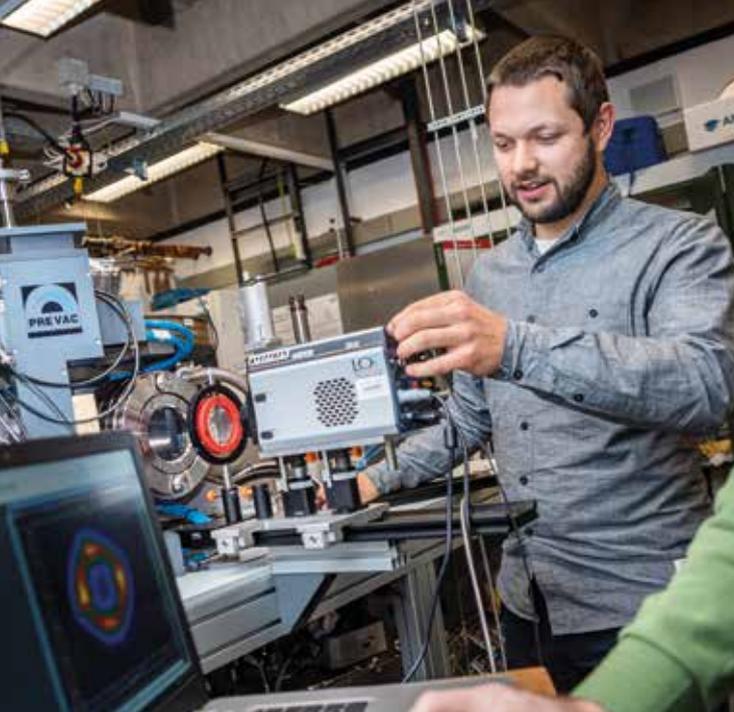
Allerdings schaffen es mehr der ionisierten Teilchen durch die elektrischen Felder auf die andere Seite und setzen sich dort als Schicht ab, als man nach einfachen Plasmamodellen erwarten würde. Das ist einem weiteren Phänomen zu verdanken, das intensiv in Bochum erforscht wurde: Ob-

wohl die Hochleistungsplasmen mit bloßem Auge betrachtet sehr gleichmäßig aussehen, bilden sich in ihnen Strukturen, die den Ionen helfen, auf die andere Seite zu gelangen.

Von oben betrachtet sind die Plasmen torusförmig, sie sehen aus wie ein leuchtender Donut. Dieses Leuchten der angeregten Teilchen bildet Strukturen aus, die sich mit zehn Kilometern pro Sekunde im Kreis bewegen und nur mit sehr schnellen Kameras erfasst werden können. „Eine der ersten Strukturen, die wir damals in einem Aluminium-Plasma beobachtet haben, sah aus wie ein rückwärts fliegender Komet“, beschreibt Achim von Keudell. In weiteren Analysen stellten die Bochumer Forscher fest, dass sich je nach Art des Plasmas unterschiedliche Strukturen formen. In einem Titan-Plasma bildet sich beispielsweise kein einzelner Komet, sondern eher etwas, das aussieht wie ein Croissant. Auch die Anzahl der Strukturen im Torus ändert sich je nach Plasmaleistung. Wegen der Regelmäßigkeit und der Rotation der Strukturen hat sich der Begriff der rotierenden Plasmaspeichen eingebürgert, auf Englisch rotating spokes.

Die Beschreibung dieser Inhomogenitäten in technischen Plasmen sorgte für Wirbel in der Forschungscommunity, vor allem bei den anwendungsnah arbeitenden Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern. Heute ist Achim von Keudell klar: „Es war vermutlich ungeschickt, dass wir Grundlagenforscher von Inhomogenitäten oder Instabilitäten gesprochen haben. Das hört ein Verfahrenstechniker gar nicht gern.“

Dabei stellte sich heraus, dass diese Strukturen zwar durch eine Instabilität am Beginn jedes Plasmapulses entstehen, die endgültige Struktur aber sehr stabil ist. Die Strukturbildung ist eine wesentliche Eigenschaft von Plasmen hoher Leistungsdichte und ist nicht zu verhindern, stellt aber auch kein Problem für die Beschichtung dar. Im Gegenteil, sie hilft sogar, den Return-Effekt abzumildern. Ohne die Inhomogenitäten gäbe es also gar kein effizientes Schichtwachstum in



BESCHICHTEN MIT HILFE VON PLASMEN

Dazu nutzen die Physiker, hier Sascha Thiemann-Monjé, Hochgeschwindigkeitskameras, die offenbaren, dass das torusförmige Plasma eigentlich aus mehreren kometenförmigen Strukturen besteht, wie hier auf dem Monitor sichtbar ist.

voll ionisierten Plasmen, weil viele von den elektrischen Feldern abgelenkten Ionen die Oberfläche nie erreichen würden.

Da die leuchtenden Plasmaspeichen elektrisch geladen sind, laufen sie nicht ineinander; sobald sich die Struktur einmal ausgebildet hat, ist sie stabil. Und da sie sich mit hoher Geschwindigkeit bewegt, beeinträchtigt sie das Beschichtungsergebnis nicht. Nur unter bestimmten Bedingungen können die Strukturen in ihrer Bewegung einfrieren, was tatsächlich zu einer ungleichmäßigen Schicht führen würde. „Mittlerweile haben wir die Plasmen aber so weit verstanden, dass wir wissen, wie wir die Parameter wählen müssen, um so etwas zu verhindern“, sagt Julian Held, Doktorand am Lehrstuhl für Experimentalphysik II. „Wir können im Labor sogar bestimmte Strukturen gezielt züchten.“

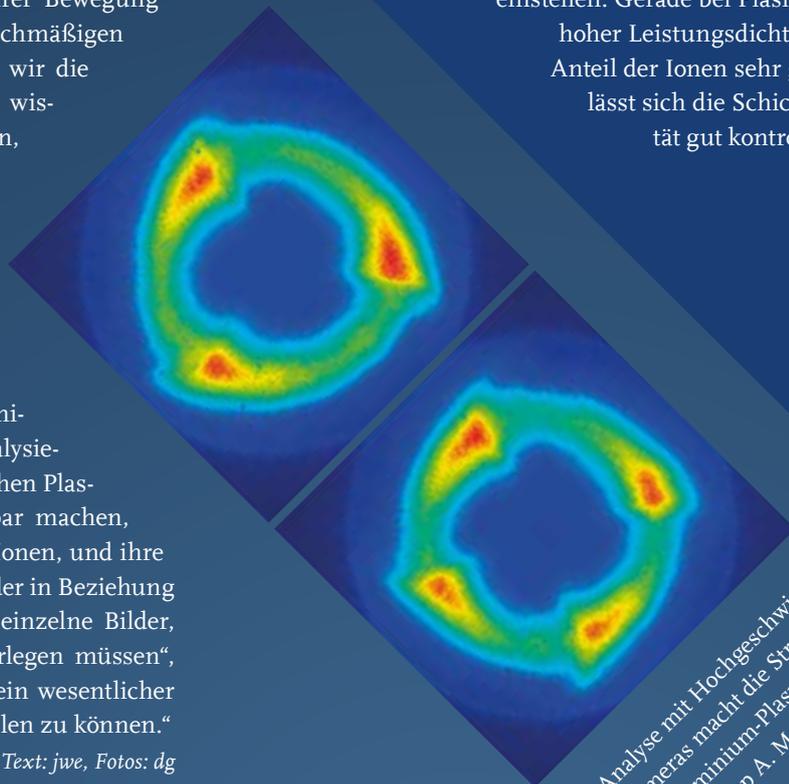
Julian Held perfektionierte die Methode. Er entwickelte ein Verfahren, mit dem er Strukturen in einem Plasma synchronisiert mit Hochgeschwindigkeitskameras analysieren kann. So kann er auch die unterschiedlichen Plasma-Bestandteile separat voneinander sichtbar machen, etwa das Leuchten bestimmter Atome oder Ionen, und ihre Bewegungen zeitlich und räumlich zueinander in Beziehung setzen. „Jahrelang hatten wir tonnenweise einzelne Bilder, aber wussten nie, wie wir sie übereinanderlegen müssen“, erinnert sich Held. „Diese Arbeiten waren ein wesentlicher Schritt, um detaillierte Plasmamodelle erstellen zu können.“

Text: jwe, Fotos: dg

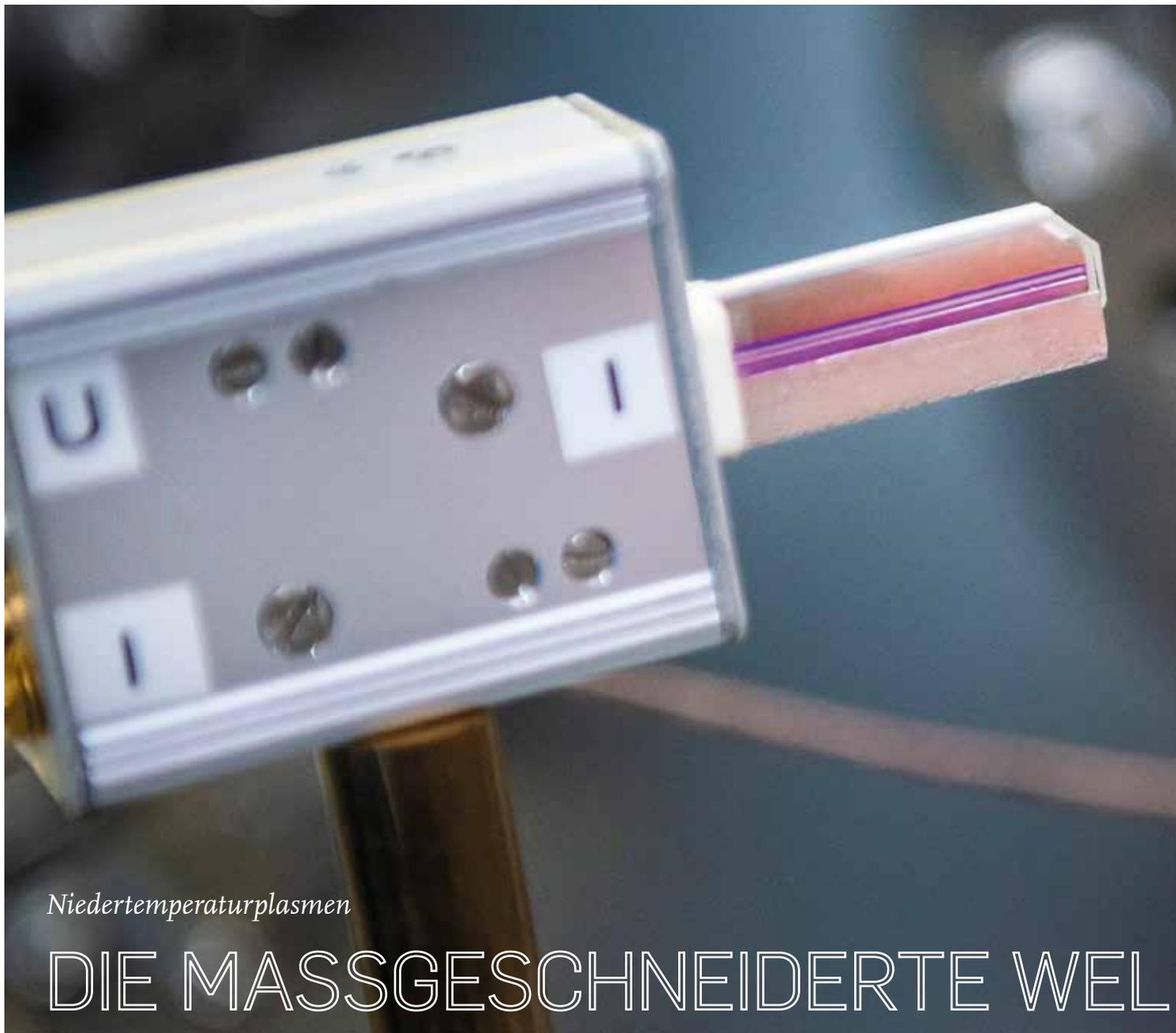
In der Materialforschung, auch an der RUB, werden neue Schichtmaterialien entwickelt, die mithilfe von Plasmen auf unterschiedliche Objekte aufgetragen werden können. Metallische Werkzeuge können beispielsweise durch keramische Schichten vor Verschleiß geschützt werden. Wie gut die Qualität einer Schicht ist, hängt mit der Energie der Ionen und

Atome zusammen, die auf der Oberfläche des zu beschichtenden Objekts auftreffen. Die Energie der Ionen ist dabei 100- bis 1.000-mal höher als die der Atome. Mit Hochleistungsplasmen, die einen hohen Ionenanteil besitzen, können metastabile Schichten aus zwei oder drei verschiedenen Elementen aufgetragen werden, die in einem gewöhnlichen Schmelztiegel – also ohne Plasmaunterstützung – nicht möglich wären.

Die Qualität einer Schicht lässt sich vor allem über die Energie der Teilchen steuern, die in die Schicht eingebaut werden. Diese wiederum lässt sich durch die Energie der Ionen im Plasma einstellen. Gerade bei Plasmen mit hoher Leistungsdichte ist der Anteil der Ionen sehr groß; so lässt sich die Schichtqualität gut kontrollieren.



Die Analyse mit Hochgeschwindigkeitskameras macht die Strukturen in einem Aluminium-Plasma sichtbar. (Bilder: Philipp A. Maaß)



Niedertemperaturplasmen

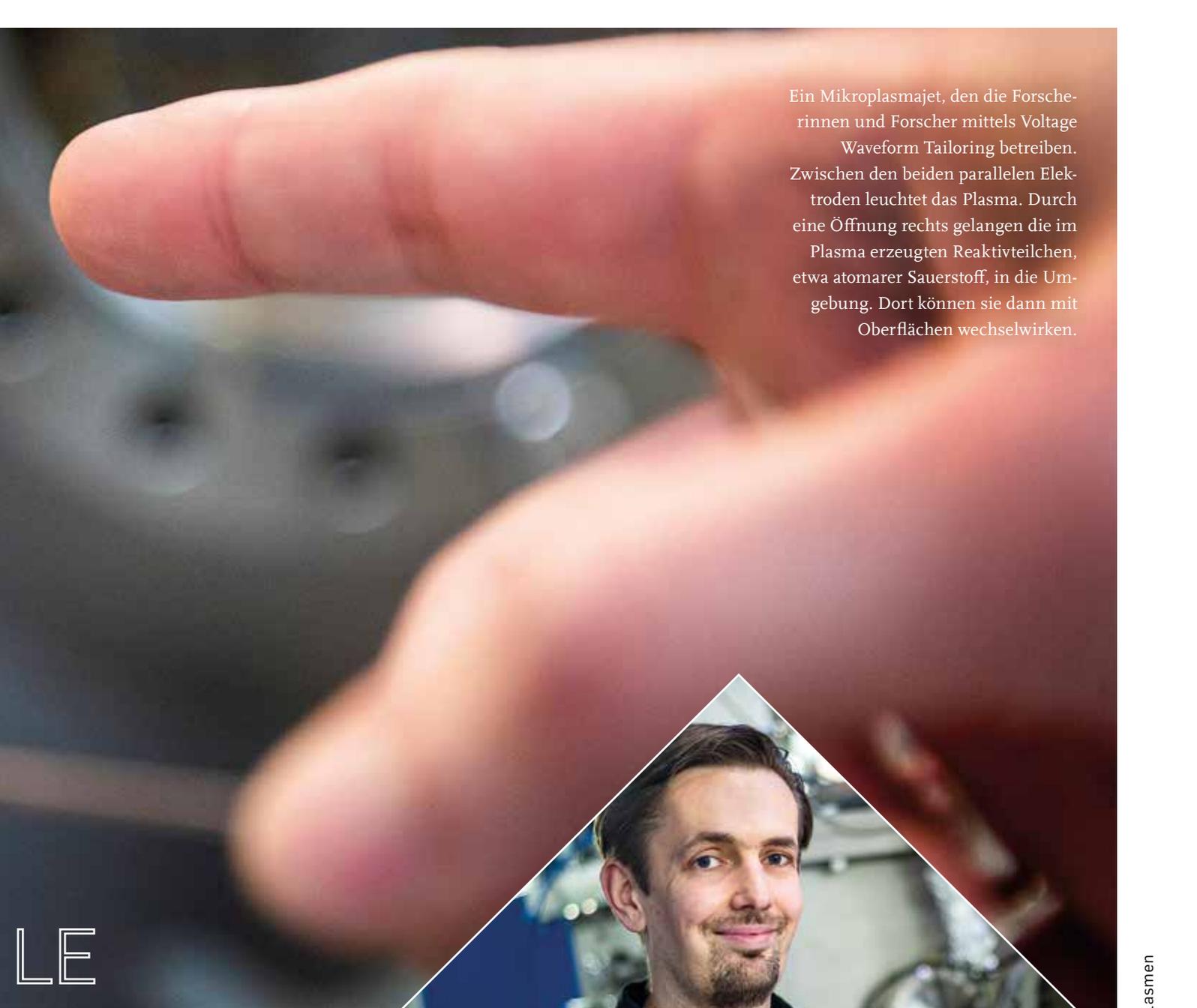
DIE MASSGESCHNEIDERTE WELT

Wie Plasmen bei gleicher Energiezufuhr bis zu zehnmal effizienter werden.

Plasmen werden als der vierte Aggregatzustand bezeichnet: Während in der festen Phase die Moleküle feste Plätze einnehmen, ist in der flüssigen Phase etwas und in der Gasphase wesentlich mehr Bewegungsfreiheit möglich. Führt man einem Gas Energie zu, brechen die Moleküle auf und ein Plasma entsteht. Die negativ geladenen Elektronen lösen sich von den positiv geladenen Atomkernen und machen diese zu Ionen. In elektromagnetischen Feldern können diese freien Elektronen und Ionen beschleunigt werden. Treffen die schnellen Elektronen auf andere Moleküle, können sie diese wiederum verändern, indem sie sie ionisieren oder zerlegen. So können unterschiedliche mitunter kurzlebige reaktive Neutralteilchen und Ionen entstehen, die nützlich sein können.

Plasmen werden in der Industrie zum Beispiel eingesetzt, um Oberflächen gezielt zu verändern, etwa Brillengläser oder Displays zu beschichten oder mikroskopische Kanäle

in Siliziumwafer zu ätzen. So entstehen feine Strukturen im Nanometerbereich. „Jedes Smartphone, jeder Laptop enthält Bauteile, die solche Prozesse durchlaufen haben“, verdeutlicht Dr. Julian Schulze vom Lehrstuhl für Allgemeine Elektrotechnik und Plasmatechnik der RUB und Mitglied in den Sonderforschungsbereichen 1316 und SFB/TR 87 die Dimension des Einsatzes von Plasmen in der Industrie. Sein Ziel ist es, die Details der Prozesse in Plasmen besser zu verstehen, um sie effizienter zu machen. Wie wird den Elektronen und Ionen Energie zugeführt? Wie werden sie beschleunigt? Wie kann man das optimieren? Um diesen Fragen nachzugehen, konzentriert sich der Forscher auf Plasmen, die bei Raumtemperatur entstehen, sogenannte Niedertemperaturplasmen. Sie werden für medizinische und industrielle Anwendungen gerne genutzt, weil sie die sie umgebenden Flächen nicht angreifen oder zerstören. Das gilt im medizinischen Bereich unter anderem für die menschliche Haut.



Ein Mikroplasmajet, den die Forscherinnen und Forscher mittels Voltage Waveform Tailoring betreiben. Zwischen den beiden parallelen Elektroden leuchtet das Plasma. Durch eine Öffnung rechts gelangen die im Plasma erzeugten Reaktivteilchen, etwa atomarer Sauerstoff, in die Umgebung. Dort können sie dann mit Oberflächen wechselwirken.

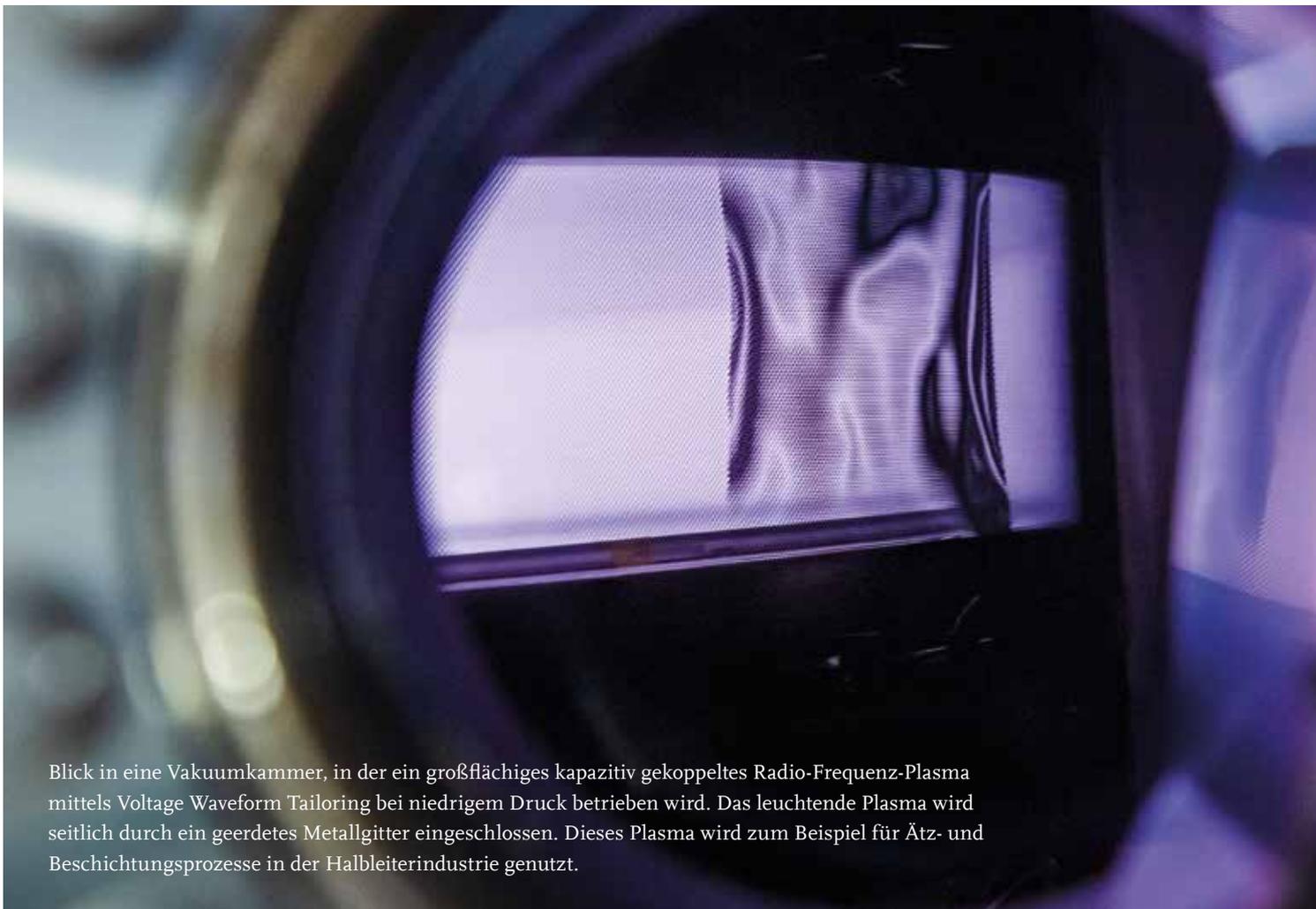
LE



Julian Schulze vor einem großen Plasmareaktor im Labor der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik.

Solche Plasmen können beispielsweise zwischen zwei Elektroden gezündet werden, deren eine geerdet ist, während an der anderen eine Spannung anliegt. Durch das Anlegen der Spannung entsteht an den Elektroden ein elektrisches Feld, das die negativ geladenen Elektronen von den Oberflächen abstößt, während es positiv geladene Ionen anzieht. Durch die schnelle Bewegung der Elektronen infolge dieser Beschleunigung können Neutralteilchen durch Stöße mit schnellen Elektronen angeregt werden. Dadurch leuchten Plasmen letztlich. Die Beschleunigung der Ionen auf die Oberfläche kann zur Oberflächenmodifikation genutzt werden.

Normalerweise legt man an die Elektrode eine sinusförmige Spannung an, auch in der Industrie. Dadurch werden die Elektronen auf eine bestimmte Art beschleunigt. Das führt dazu, dass das Plasma zu bestimmten Zeiten und an speziellen Orten Licht aussendet, das man messen kann. ►



Blick in eine Vakuumkammer, in der ein großflächiges kapazitiv gekoppeltes Radio-Frequenz-Plasma mittels Voltage Waveform Tailoring bei niedrigem Druck betrieben wird. Das leuchtende Plasma wird seitlich durch ein geerdetes Metallgitter eingeschlossen. Dieses Plasma wird zum Beispiel für Ätz- und Beschichtungsprozesse in der Halbleiterindustrie genutzt.

Außerdem erreichen positive Ionen die Oberflächen mit einer ganz bestimmten Energieverteilung. Mit diesem Ergebnis ist Julian Schulze aber nicht zufrieden: „Dabei bekommen viele Elektronen von der zugeführten Energie etwas ab, jedes einzelne von ihnen aber nicht genug, um andere Moleküle effizient zu zerschlagen und so hohe Reaktivteilchendichten zu erzeugen. Die Ionenenergieverteilung an den Grenzflächen kann nicht effizient kontrolliert werden“, verdeutlicht er. „Wir wollen die Energie nicht mit der Gießkanne auf Elektronen und Ionen verteilen, sondern gezielter einsetzen, sodass weniger Elektronen mehr Energie abbekommen und die Ionenenergie an Grenzflächen exakt eingestellt werden kann. Dadurch arbeiten Plasmen dann effizienter.“

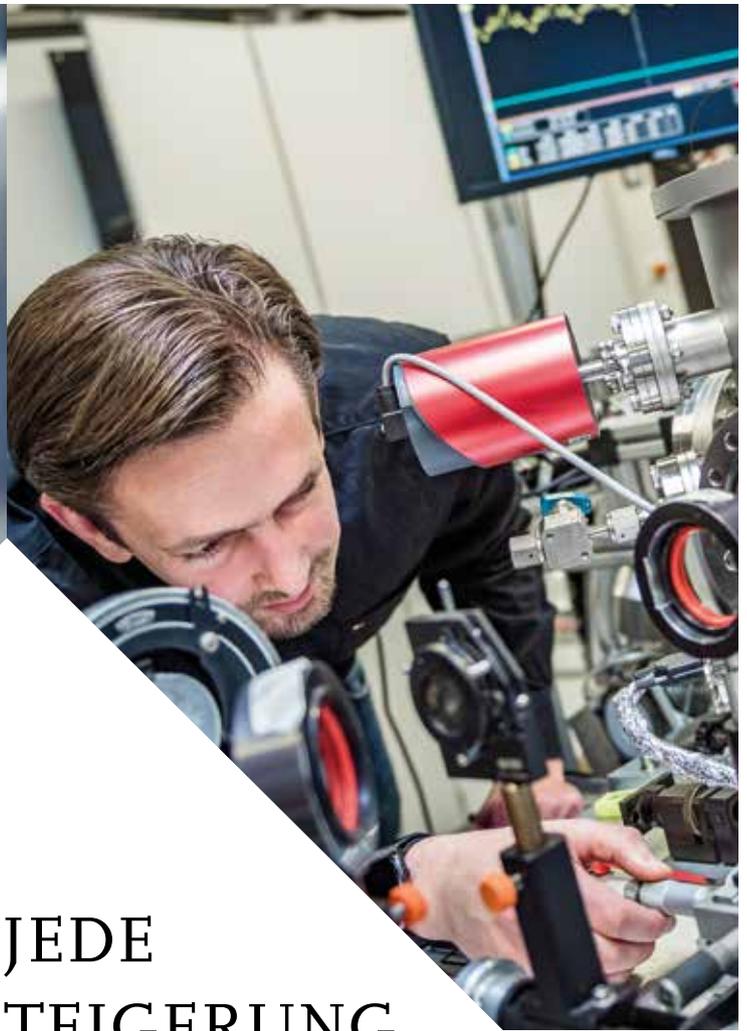
Dazu hat sein Team mit der Form der an die Elektrode angelegten Spannung experimentiert und Simulationen angestellt. Das an der RUB entwickelte Verfahren nennt sich Voltage Waveform Tailoring, kurz VWT. Durch die Überlagerung mehrerer Frequenzen lassen sich verschiedene Spannungsformen erzeugen, deren Wirkung auf das Plasma die Forscherinnen und Forscher untersucht haben.

Es zeigte sich dabei, dass sich durch das Maßschneiden dieser Spannung die zeitliche und örtliche Verteilung der Energiezufuhr an die Elektronen des Plasmas kontrollieren und verbessern lässt. Analog lässt sich so die Ionenenergieverteilung an Grenzflächen einstellen. „Während bei der sinusförmigen Spannung viele Elektronen zu verschiedenen Zeitpunkten und über breite Raumbereiche schwach

beschleunigt werden, ist es uns gelungen, durch solche optimierten Spannungen eine viel stärkere Beschleunigung einiger Elektronen zu nur einem Zeitpunkt innerhalb einer Periode der angelegten Spannung hervorzurufen“, erklärt Schulze. Bei Zufuhr derselben Menge an Energie vergrößert sich somit die Menge reaktiver Spezies, die im Plasma erzeugt wird. Ähnlich verhält es sich prinzipiell mit den Ionen: Auch hier kann die Beschleunigung der Ladungsträger in Ort und Zeit maßgeschneidert werden.

Die Mechanismen, die diesen Veränderungen zugrunde liegen, sind Gegenstand genauerer Untersuchungen. Der Einfluss der Spannung auf das Plasma liegt in der Veränderung der besonders interessanten Randzonen nahe den Elektroden: Der Raumbereich, in dem ein starkes elektrisches Feld besteht, das durch Anlegen der Spannung an der Elektrode entsteht, ist für die schnellen, heißen Elektronen eine Tabuzone, sie werden abgestoßen. Die positiv geladenen, schwereren, langsameren und kälteren Ionen werden hingegen angezogen. Durch die Form der angelegten Spannung wird dieser Randbereich moduliert: Er dehnt sich nach einem von der Spannung beeinflussten Muster aus und kollabiert wieder. „Die Elektronen werden von dem beweglichen Randbereich ins Plasma zurückgeschleudert wie ein Tennisball vom Schläger“, verdeutlicht Julian Schulze einen von mehreren Mechanismen, die im Plasma wirken. Moduliert man die Randschicht so, dass sie sich sehr schnell bewegt, kommen die Elektronen so schnell nicht mit. Dadurch bilden sich während

In der Vakuumkammer kann das Plasma in einer kontrollierten Gasumgebung gezündet werden. Mittels Laser werden Reaktivteilchendichten im Plasmajet gemessen. So lässt sich der Einfluss verschiedener maßgeschneiderter Spannungsformen auf diese Reaktivteilchendichten bestimmen.



„ JEDE
EFFIZIENZSTEIGERUNG
BEDEUTET ÖKONOMISCH
EINEN RIESIGEN
EFFEKT. “

Julian Schulze

des Randschichtkollaps elektrische Felder aus, die wiederum Elektronen in Richtung benachbarter Grenzflächen beschleunigen. „Das muss man sich so ähnlich vorstellen, wie wenn man eine Tischdecke blitzschnell unterm Geschirr wegzieht, sodass es einfach stehen bleibt, wo es war, obwohl man ihm den Boden wegzieht. Nachher muss man das Geschirr per Hand einsammeln, es folgt der Tischdecke nicht“, so Julian Schulze.

Die positiv geladenen Ionen vollführen die Gegenbewegung, weil sie durch die elektrischen Felder in der Plasmarandschicht auf die Grenzflächen zu beschleunigt werden. Hochenergetische, schnelle Ionen lassen sich dabei zum Ätzen der Grenzflächen benutzen, niederenergetische, langsamere zum Beschichten. In jedem Fall kann ihre Energie und können damit die Prozesse an den Oberflächen durch VWT maßgeschneidert werden.

Um herauszufinden, welche Mechanismen beim Anlegen solcher maßgeschneiderter Spannungen im Plasma genau wirken, nutzen die Ingenieure unter anderem hochauflösende Kameras, um die Elektronendynamik zu vermessen. Mittels Lasermessung lassen sich zum Beispiel angeregte Heliumspezies und andere Reaktivteilchen wie atomarer

Sauerstoff detektieren, die durch Stöße zwischen Neutralteilchen und energetischen Elektronen erzeugt werden. Da die angeregten Heliumteilchen die Laserstrahlung absorbieren, erlaubt die Messung des Laserlichts, das das Plasma durchdringt, Rückschlüsse darauf, wie viele solcher Teilchen anwesend sind.

Bei Überlagerung zweier Frequenzen der an die Elektrode angelegten Spannung konnten die Forscher eine mehr als fünfmal größere Dichte der Teilchen messen. „Es ist möglich, die Dichte solcher Teilchen im Vergleich zum Anlegen der Sinusspannung zu verzehnfachen und durch Verstellen der Spannungsform zu kontrollieren“, erklärt Julian Schulze. Angesichts des Ausmaßes der Plasmannutzung in der Halbleiterindustrie wird die Tragweite dieser Verbesserung deutlich. „Das ist eine Milliarden-Dollar-Industrie“, so der Forscher. „Jede Effizienzsteigerung bedeutet ökonomisch einen riesigen Effekt.“

Text: md, Fotos: dg

EINE KUGEL, DIE ELEKTRONEN ZUM SCHWINGEN BRINGT

Eine kugelfunde Sonde macht es möglich, die Elektronendichte in Plasmen ständig zu überwachen und so konstant zu halten.

Plasmen spielen in vielen industriellen Anwendungen eine zentrale Rolle. Die energetisch angeregten Gase lassen sich zum Beispiel nutzen, um Beschichtungen auf Oberflächen aufzubringen, etwa kratzfeste Schutzschichten auf Brillengläser aus Kunststoff, oder hochpräzise optische Filter auf Quarzglas. Das Plasma hat dabei die Aufgabe, die durch Verdampfung auf den Träger aufgebrachten Schichten mittels Ionenbeschuss gewissermaßen festzuklopfen.

Solche Prozesse müssen aber viele Bedingungen einhalten. Zum Beispiel müssen sie bei niedrigen Temperaturen ablaufen, damit die zu beschichtenden Oberflächen keinen Schaden nehmen. „In der modernen Produktion wird auch immer mehr Wert auf Exaktheit gelegt“, sagt Prof. Dr. Ralf Peter Brinkmann, Inhaber des Lehrstuhls Theoretische Elektrotechnik der RUB. Alle entstehenden Produkte müssen genau gleich sein, die Beschichtung darf keine Fehler aufweisen. Um diese Genauigkeit zu erreichen, ist es notwendig, das Plasma ständig zu überwachen. Besonders auf die Elektronendichte kommt es bei Beschichtungsprozessen an. Würde sie zu stark schwanken, würde dies die Beschaffenheit der fertigen Beschichtung negativ beeinflussen. „Idealerweise sollte die Elektronendichte ständig gemessen und bei Bedarf automatisch nachjustiert werden, sodass kein Mensch in den Prozess eingreifen muss“, erklärt Brinkmann.

Die Anforderungen an ein Messinstrument, das das leisten kann, sind vielfältig: Es sollte möglichst klein sein, zuverlässig, wartungsfrei, und es darf weder den Beschichtungsprozess stören noch selbst im Plasma beschädigt werden. Die Fachwelt spricht von „prozesskompatibler Plasmadiagnostik“.

Eine Idee wird schon seit langem verfolgt: Die Elektronen, die sich im Plasma frei bewegen, können durch das Anlegen einer kleinen äußeren Spannung in Schwingungen geraten. Trifft man die richtige Frequenz, entsteht eine Resonanz, erkennbar daran, dass das Plasma besonders viel Energie aufnimmt. Da die Resonanzfrequenz abhängig von der Elektronendichte ist, kann man diese im Prinzip dann berechnen.

Frühere Versuche, diese Idee in die Praxis umzusetzen, hatten aber mit Schwierigkeiten zu kämpfen. Eine japanische Arbeitsgruppe schlug zum Beispiel eine sehr einfache Konstruktion vor: Das Team nutzte ein Koaxialkabel, ähnlich einem analogen Antennenkabel, ließ den Innenleiter ein Stückchen herausstehen und führte das Ende des Kabels in das Plasma ein. Legte man nun eine Spannung an, konnte

man durchaus Resonanzen des Plasmas messen. Allerdings traten bei mehreren verschiedenen Frequenzen gleichwertige Resonanzen auf, praktisch ein ganzer Zoo. „Das Problem war: Welche sollte man für die Diagnostik nehmen?“, erläutert Ralf Peter Brinkmann.

Analysen der Bochumer Theoretiker gaben Antwort auf die Frage, woher die verschiedenen Resonanzen kamen: So einfach die Messapparatur auch konstruiert war, es entstanden an verschiedenen ihrer Teile unterschiedliche Schwingungen mit unterschiedlichen Resonanzfrequenzen. „Das kann man sich in etwa so vorstellen, wie wenn man ein altes Auto fährt“, veranschaulicht Ralf Peter Brinkmann. „Bei einer bestimmten Geschwindigkeit klappert der Auspuff, bei einer anderen der Außenspiegel.“

Um Abhilfe zu schaffen, entwarf das Team ein Konzept, das auf möglichst einfache Schwingungen zielt. Es galt: je symmetrischer, desto besser. „Die Kugelform ist die einfachste denkbare Konfiguration“, so Brinkmann. „Am liebsten wäre uns eine schwebende Murmel gewesen.“ Ganz so einfach ging es jedoch natürlich nicht. Strom benötigt immer einen Hin- und einen Rückleiter. So wurden zwei metallische Halbkugeln gewählt. Die Konstruktion ist dreh- und spiegelsymmetrisch, beide Elektroden sind gleich groß. „Auch hier findet man bei Messungen Resonanzen bei verschiedenen Frequenzen vor“, erklärt Ralf Peter Brinkmann. „Sie lassen sich aber eindeutig sortieren. Die stärkste Resonanz ist die Dipolresonanz; die anderen, schwächeren, stellen gewissermaßen die Obertöne zu diesem Grundton dar.“ In Anlehnung an das dabei eingesetzte mathematische Verfahren der Multipolanalyse kam es zum Namen Multipolresonanzsonde, kurz MRP.

Der Vorteil der Formel

Der besondere Reiz der MRP liegt darin, dass der Zusammenhang zwischen Plasmadichte und Resonanzfrequenz durch eine einfache mathematische Formel gegeben ist. Die Plasmadichte ist darin die einzige Unbekannte. Löst man die Gleichung danach auf, kann man sie aus den gemessenen Werten berechnen. „Somit ist es auch nicht nötig, die Messsonde vor dem Einsatz zu kalibrieren, also mit anders gewonnen Messwerten abzugleichen“, freut sich Ralf Peter Brinkmann.



Soweit die theoretische Grundidee. Zur praktischen Umsetzung taten sich die Theoretiker mit drei anderen Lehrstühlen der Fakultät zusammen. Der Lehrstuhl für Hochfrequenzsysteme von Prof. Dr. Ilona Rolfes unternahm eine hochfrequenzmäßige Optimierung des Gesamtsystems aus Sondenkopf und Halterung. So gelang es zum Beispiel, die Halterung für das Plasma praktisch unsichtbar zu machen. Der Lehrstuhl für Elektronische Schaltungstechnik von Prof. Dr. Thomas Musch entwarf eine Ansteuerelektronik auf Basis der Radartechnologie. Und schließlich überprüfte der Lehrstuhl für Allgemeine Elektrotechnik und Plasmatechnik von Prof. Dr. Peter Awakowicz die fertige Sonde in vielen Plasmaprozessen.

Ralf Peter Brinkmann leitet an der RUB den Lehrstuhl Theoretische Elektrotechnik.



Die Entwicklung von der MRP bis hin zur praktischen Einsetzbarkeit wurde vom Bundesministerium für Bildung und Forschung in den Verbundprojekten Pluto und Pluto plus gefördert. Dabei ergab sich auch die Chance, die Sonde bei Industriepartnern zu testen. Und es zeigte sich: Wurde die Elektronendichte im Plasma durch ständige Überwachung mittels MRP und automatische Anpassung der Ansteuerung konstant gehalten, reduzierte das die Schwankungen der Prozessergebnisse maßgeblich.

Text: md, Fotos: dg

Die Sonde überwacht das Innere eines Plasmas, indem sie seine Schwingungen misst.

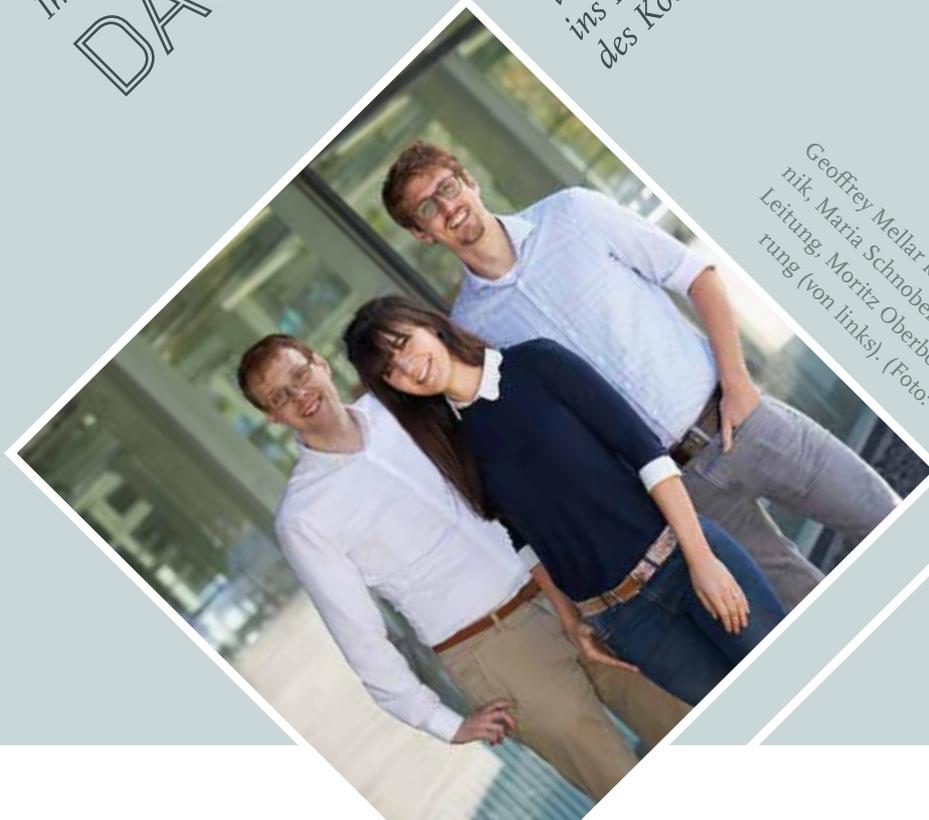


Moritz Oberberg konnte sich die Selbstständigkeit schon immer gut vorstellen. Inzwischen hat die Multipolresonanzsonde die Marktreife fast erreicht. (Foto: dg)

Im Gespräch

DAS INNERE VON PLASMEN LIVE ÜBERWACHEN

Eine neue Technik macht möglich, was Moritz Oberberg mit dem Blick ins Innere eines Frühstückseis während des Kochens vergleicht.



Geoffrey Mellar kümmert sich um die Technik, Maria Schnober hat die kaufmännische Leitung, Moritz Oberberg die Geschäftsführung (von links). (Foto: House of Plasma)

Mit seinen zwei Teamkollegen bereitet Dr. Moritz Oberberg die Gründung des Spin-offs „House of Plasma“ vor. Das Unternehmen bringt die Multipolresonanzsonde in verschiedenen Designs auf den Markt. Sie erlaubt es, industrielle Plasmen in Echtzeit zu überwachen und so dafür zu sorgen, dass sie zum Beispiel helfen, immer gleiche, fehlerfreie Beschichtungen auf Oberflächen aufzubringen.

Herr Dr. Oberberg, wenn Ihnen vor fünf Jahren jemand gesagt hätte, dass Sie heute ein Unternehmen gründen möchten, was hätten Sie dann gesagt?

Die Idee, mit der Messtechnik ein Spin-off zu gründen, ist gar nicht so neu. Bei meinem Vorgänger, der allerdings schon 2015 seine Promotion abgeschlossen hat, war das schon einmal ein Thema, aber da war das Ganze noch nicht ausgereift. Ich persönlich konnte mir schon immer gut vorstellen, selbstständig zu arbeiten. Der Zeitpunkt hängt natürlich auch von der Entwicklung ab und von der Resonanz. Aber den Gedanken an eine Selbstständigkeit hatte ich schon länger. Ich komme aus dem Bereich und bringe neben der Ausbildung auch die Kontakte mit.

Noch ist die Firma nicht gegründet. Was füllt zurzeit Ihre Arbeitstage?

Ich bin ja nicht alleine, wir teilen zu dritt alle anstehenden Aufgaben. Zurzeit planen wir Industrietests mit einer Firma für unsere neuesten Entwicklungen – dafür steht eine Auslandsreise an. Da gibt es viele bürokratische Hürden zu nehmen. Messeequipment außer Landes zu bringen ist gar nicht so einfach. Ansonsten bin ich mit der Weiterentwicklung unserer Produkte und dem Schreiben von Projektanträgen beschäftigt. Wobei ich unterstreichen will, dass die RUB mit dem Worldfactory Start-up Center uns extrem gut unterstützt. Da sind enorm gute Leute, die helfen bei allem. Zurzeit geht es zum Beispiel darum, Patente zu übernehmen, die die RUB hält. Es muss für die Firmengründung noch ein Gesellschaftervertrag ausgearbeitet werden, die Finanzierungsplanung läuft, die Investorensuche auch. Bevor wir etwas verkaufen können, müssen wir ja einkaufen können, dafür brauchen wir Kapital, ebenso dann für Marketing, Räumlichkeiten, Ausstattung und so weiter.

Im aktuellen Förderprojekt an der Uni laufen weiter Tests im Labor und bei Industriepartnern, coronabedingt unter erschwerten Bedingungen, und die Technik wird laufend weiterentwickelt. Das läuft alles parallel.

Was werden potenzielle Kunden von Ihnen erwarten können?

Zur potenziellen Kundschaft könnte zum Beispiel ein Unternehmen gehören, das Brillengläser beschichtet. Wir würden mit ihm klären, was die Erwartungen sind und ob unsere Technik für die Firma einen Mehrwert bietet. Ist sie einsetzbar? Wenn ja, dann kann unsere Hardware in Verbindung mit der passenden Software Einblicke liefern, die vorher nicht da waren.

Wir vergleichen das immer mit einem Frühstücksei: Das mag ich gern, wenn das Eigelb noch weich ist, das Eiweiß aber hart. Während des Kochens kann ich mich aber nur auf meine Erfahrung verlassen, nicht wirklich messen, was im Ei vorgeht. Höchstens eine periphere Messung der Temperatur an der Schale wäre möglich, aber eben nicht im Ei. Wir liefern nun aber die Daten direkt aus dem Ei.

Auf Wunsch bieten wir begleitend auch mehr an. Wir können die Regelungstechnik entwickeln, die Beschichtungseigenschaften des Brillenglases weiter verbessern, auch Forschungs- und Entwicklungsprojekte begleiten.

Hebt Sie der Blick ins Ei von anderen Anbietern ab?

Ja. Anbieter für die Überwachung peripherer Größen, die nur indirekte Rückschlüsse auf Vorgänge im Plasma erlauben, oder für zu langsame Messtechnik gibt es einige. Aber wir bieten die Messtechnik für innere Parameter, die eine Live-Überwachung ermöglicht. Die Überwachung der Parameter in Echtzeit ist unser Alleinstellungsmerkmal. Bisher konnte man weniger wichtige Daten schnell messen, die wichtigen aber eben nicht schnell. Das geht jetzt zusammen.

Wenn Sie fünf Jahre in die Zukunft blicken, was wünschen Sie sich zu sehen?

Die Firma wird gegründet sein, wir werden Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter eingestellt haben. In der DACH-Region kennt man „House of Plasma“ als Anbieter für Plasmadiagnostik und überlegt, mit uns zusammenzuarbeiten. USA und Südostasien kommen langsam dazu – da gibt es viele interessante Firmen. Wir wollen der Anbieter schlechthin für Plasmadiagnostik werden.

i ERSTER PLATZ UND SONDERPREIS

Das Team von House of Plasma hat im Senkrechtstarter-Wettbewerb den ersten Platz belegt und darüber hinaus einen Sonderpreis für die beste Hochschulausgründung gewonnen. Die Preisverleihung fand am 17. Juni 2021 statt. Der Wettbewerb wird von der Wirtschaftsentwicklung Bochum veranstaltet. Die Gewinner erhalten professionelle Beratung und Preisgelder für ihr Start-up.

md

EINE REFERENZQUELLE FÜR DIE PLASMAFORSCHUNG

Ein Plasma zu erzeugen ist gar nicht so schwer. Daher gibt es unzählige verschiedene Plasmaquellen auf der Welt. Für die Forschung ist das aber ein Problem.

Die Einsatzgebiete von Plasmen scheinen unerschöpflich. In der Biomedizin verspricht die Technik etwa, chronische Wunden besser heilen, antibiotikaresistente Keime abtöten oder Krebszellen selektiv behandeln zu können. „Es gibt viele Studien, die zeigen, dass Plasmen dafür nützlich sein könnten“, sagt Prof. Dr. Judith Golda, Physikerin im Sonderforschungsbereich 1316. „Um Plasmen für diese Zwecke einsetzen zu können, muss man aber die Mechanismen verstehen, mit denen sie wirken.“

Ein Problem dabei ist, dass im Lauf der Jahre zwar viele Studien entstanden sind, dass aber die verwendete Technik nicht vergleichbar war. „Ein Plasma mit Atmosphärendruck herzustellen ist leicht“, erklärt die Bochumer Forscherin. „Man braucht eigentlich nur zwei Drähte, an die man eine Spannung anlegt, sodass ein elektrisches Feld entsteht, das das Gas zwischen den Drähten ionisiert.“ Weil das so leicht ist, haben viele Forschungsgruppen ihre eigenen Plasmaquellen gebaut. Doch Plasma ist nicht gleich Plasma. Es gibt viele Eigenschaften, die darüber entscheiden, wie gut ein Plasma für einen bestimmten Einsatzzweck geeignet ist, etwa die Stärke der elektrischen Felder oder die Art und Menge der enthaltenen reaktiven Teilchen.

Da sowohl die Plasmaphysik als auch die biologischen Prozesse, die man mit Plasmen beeinflussen möchte, sehr komplex sind, ist es bei der Vielzahl an variablen Parametern im Plasma schwer, die beobachteten Effekte von Plasmabehandlungen mechanistisch zu erklären. Anfang der 2010er-Jahre entstand daher die Idee, eine Referenzquelle zu entwickeln, also ein Plasma, dessen Eigenschaften genau charakterisiert sind und das sich mit genau diesen Eigenschaften reproduzierbar herstellen lässt. Würden verschiedene Forschungsgruppen dieses Plasma nutzen, so die Hoffnung, wüsste man genau, auf welche Plasmaparameter bestimmte Effekte zurückzuführen sind. „Solch eine Referenzquelle gab es bereits für Niederdruckplasmen, wir wollten das Konzept nun auf Atmosphärendruckplasmen übertragen“, erinnert sich Judith Golda, die bereits während ihrer Promotion an der RUB an diesem Thema arbeitete.

Gemeinsam mit Partnern aus Greifswald, Eindhoven, Milton Keynes, York und Dublin wählte die Bochumer Gruppe eine Plasmaquelle aus, die RUB-Physiker Dr. Volker ▶



Der COST-Jet wird an vielen Plasmaforschungsstandorten genutzt. Die Karte zeigt alle Standorte, die an der RUB bekannt sind, aber erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

Dublin, Irland



York, UK

Kiel, Deutschland

Greifswald, Deutschland

Paderborn, Deutschland

Bochum, Deutschland

Eindhoven, Niederlande

Prag, Tschechische Republik

Orleans, Frankreich

Freiburg, Deutschland

Ispra, Italien

Bologna, Italien

Barcelona, Spanien

Die in Bochum maßgeblich mit entwickelte Referenzplasmaquelle, der COST-Jet, ist etwa so groß wie ein Zeigefinger.



1



2

„WIR HABEN
SOZUSAGEN EIN
PLASMA GESUCHT,
DAS MEHRHEITIS-
FÄHIG IST.“

Judith Golda

Schulz-von der Ga-
then zuvor bereits in-
tensiv untersucht hatte.

„Ein wichtiges Argument
für uns bei der Auswahl war,
dass auch viele andere Gruppen
weltweit schon mit ähnlichen Quel-
len gearbeitet haben. Wir haben also so-
zusagen ein Plasma gesucht, das mehrheits-
fähig ist“, erklärt Judith Golda.

Das internationale Team charakterisierte die
Plasmaquelle im Detail. Die RUB-Forschenden bau-
ten zunächst fünf identische Quellen, sodass jeder Ko-
operationspartner das Plasma an seinem Standort untersu-
chen konnte, um sicherzustellen, dass sich stets die gleichen
Eigenschaften ergaben – was auf Anhieb gut funktionierte.
Die Arbeiten fanden im Rahmen eines Förderprogramms
der European Cooperation in Science and Technology, kurz
COST, statt. Daher taufte die Wissenschaftlerinnen und
Wissenschaftler ihre Quelle letztendlich COST-Jet. Jet, weil
das Plasma in Form eines Strahls aus einer Öffnung austritt.

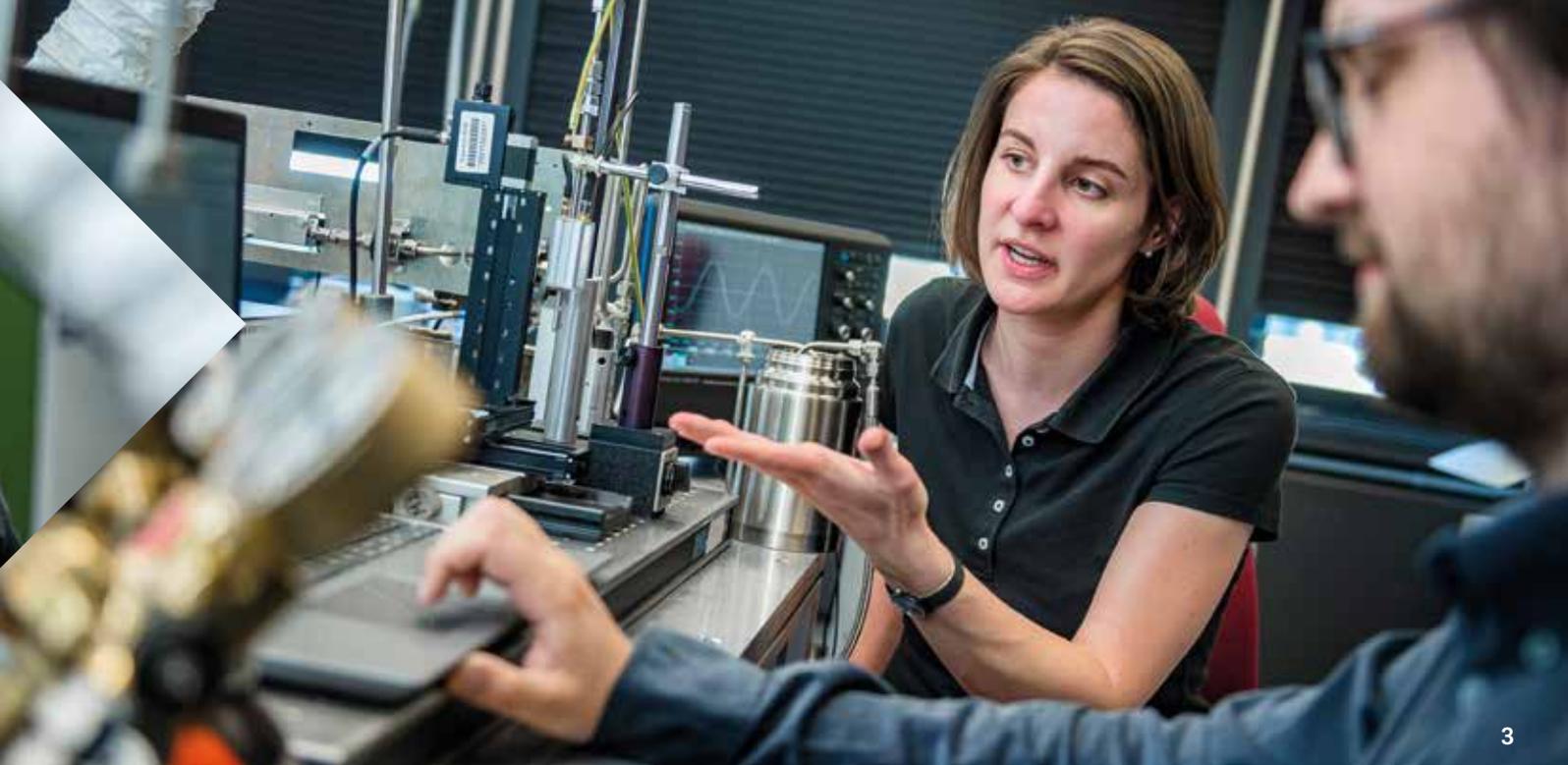
Um die Plasmaquelle für alle Forschungsgruppen welt-
weit verfügbar zu machen, schrieb das Projektteam detail-
lierte Bauanleitungen und veröffentlichte sie frei zugänglich
im Internet unter cost-jet.eu. „Weil es für Forschende ohne
Vorerfahrung aber manchmal nicht so leicht ist, eine solche
Anleitung umzusetzen, haben wir uns auch dafür eingesetzt,
dass man den COST-Jet fertig gebaut zum Selbstkostenpreis
erwerben kann“, erklärt Golda. Der Vertrieb läuft über das
aus der RUB ausgegründete Unternehmen Plasma Applica-
tions Consulting. Viele Gruppen weltweit (siehe Karte auf Sei-
te 29) nutzen den COST-Jet mittlerweile, sodass die Arbeiten
all dieser Gruppen vergleichbar sind. Komplettiert werden die
Untersuchungen durch theoretisch arbeitende Gruppen.

„Es gibt natürlich auch Alternativquellen“, weiß Judith
Golda. „Und die haben auch ihre Berechtigung. Denn je nach
Anwendung benötigt man unterschiedliche Plasmen.“ Trotz-

dem freut sich die
Physikerin, dass das
in Bochum maßgeblich
mit entwickelte Referenz-
plasma an vielen Plasmafor-
schungsstandorten auf der Welt
im Einsatz ist.

Auch an der RUB wird im Rahmen
der Plasma-Sonderforschungsbereiche wei-
ter damit geforscht. Gruppen aus der Physik
und Elektrotechnik kooperieren etwa, um detail-
liert zu verstehen, welche reaktiven Spezies sich im
COST-Jet bilden und wie ihre Menge sich mit zunehmen-
der Entfernung von der Quelle verändert. „Je nachdem wel-
ches Gas man nutzt, können sich in einem Plasma schnell
bis zu 1.000 verschiedene Reaktionen abspielen, weil die re-
aktiven Spezies in vielen Kombinationen interagieren“, erläu-
tert Golda. Der COST-Jet basiert auf den Edelgasen Helium
und Argon mit geringen Beimischungen von anderen Gasen,
etwa Sauerstoff und Stickstoff. Werden diese in den elektri-
schen Feldern dissoziiert und ionisiert, können die Atome
alle möglichen reaktiven Formen annehmen: Sauerstoff kann
etwa als positiv (O^+) oder negativ geladenes Ion (O^-), als neu-
trales Atom (O), als molekularer Sauerstoff (O_2) oder Ozon
(O_3) vorliegen. Ist Stickstoff (N) mit in der Mischung enthal-
ten, ergeben sich schnell zahlreiche weitere Kombinationen,
beispielsweise NO , N_2O , NO_2 und weitere. „Die Reaktions-
chemie explodiert förmlich“, beschreibt Judith Golda.

So interessierten sich die Bochumer Wissenschaftlerin-
nen und Wissenschaftler beispielsweise dafür, wie viele re-
aktive Sauerstoffatome im COST-Jet entstehen und wie ihre
Menge mit zunehmendem Abstand zur Quelle abnimmt.
„Viele biologische Systeme benötigen eine gewisse Menge ato-
maren Sauerstoffs, sodass Plasmabehandlungen mit reakti-
ven Sauerstoffspezies positive Effekte haben können“, erklärt
Golda. „Manchmal kann es aber auch zu viel Sauerstoff sein.“
Daher sei es wichtig zu wissen, wie viel reaktiver Sauerstoff



3

genau im Plasma vorliegt und wie die optimale Entfernung von der zu behandelnden Oberfläche zum Plasma wäre. „Nur so kann man später Anwendungen entwickeln, die auch sicher für Patientinnen und Patienten sind“, so die Physikerin.

Die erforderlichen Messungen erfolgten mittels Spektroskopie. Dabei schicken die Forscherinnen und Forscher Laserlicht einer bestimmten Wellenlänge in das Plasma. Dieses Licht wird von den Sauerstoffteilchen absorbiert, wodurch sie auf ein höheres Energieniveau gehoben werden. Nach einer Weile kehren sie in den Grundzustand zurück; dabei strahlen sie Licht einer bestimmten Wellenlänge aus, welches die Forschenden messen können. Die emittierte Wellenlänge hängt dabei von dem Teilchen ab, das das Licht aussendet; ein neutrales Sauerstoffatom schickt etwa anderes Licht zurück als ein positiv geladenes Sauerstoffion. Aus der Menge des abgestrahlten Lichts bestimmter Wellenlängen können die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler somit auf die Menge verschiedener Sauerstoffspezies zurückschließen.

Auf diese Weise stellte das Team fest, dass die Menge der Sauerstoffatome im Plasma exponentiell mit der Entfernung zur Quelle abnimmt. Mit analytischen Modellen zeigten sie auch die Gründe dafür. „Weil die Teilchen so reaktiv sind, reagieren sie schnell zu anderen Verbindungen weiter, etwa zu molekularem Sauerstoff oder Ozon“, schildert Judith Golda. Auch die reaktiven Spezies, die sich durch eine Beimischung von Stickstoff in die Quelle ergeben, erforscht das Team, zum Beispiel Stickstoffmonoxid (NO). Das ist für die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler besonders interessant, weil NO auch im menschlichen Körper als Botenstoff vorkommt und wichtig für die Wundheilung ist. Sie ermitteln beispielsweise das Strömungsmuster der NO-Moleküle, wenn diese aus der Plasmaquelle auf eine Oberfläche treffen.

Insgesamt, so Judith Golda, sei der COST-Jet schon sehr gut charakterisiert. „Wir wissen ziemlich genau, was aus der Quelle vorne rauskommt – das ist nur bei wenigen Quellen der Fall“, sagt sie.

1 Um die Eigenschaften des COST-Jets zu analysieren, ist ein größerer Messaufbau erforderlich. Das Plasma selbst ist violett leuchtend unterhalb des Kästchens mit dem RUB-Aufkleber zu erkennen.

2 Doktorand David Steuer führte die Messungen der reaktiven Sauerstoffspezies im COST-Jet durch.

3 Judith Golda hat an der RUB die Juniorprofessur für Nichtgleichgewichtsphänomene an Grenzflächen inne.

4 Volker Schulz-von der Gathen und Judith Golda bei der Besprechung der Datenauswertung



4

DIE ZUKUNFT DER PLASMAFORSCHUNG



Technische Chemie

PLASMAGENERATOREN STEUERN KATALYTISCHE PROZESSE

In zehn Jahren werden Forschende die Wechselwirkungen zwischen Katalysatoren, die bei chemischen Reaktionen die Geschwindigkeit beeinflussen, und Plasmen verstanden haben. Dies ermöglicht, bei Atmosphärendruck das Plasma so anzuregen, dass seine Eigenschaften die Reaktionen auf der Katalysatoroberfläche gezielt beschleunigen. Auf diese Weise werden Chemiker nicht nur den Umsatz der Ausgangsstoffe erhöhen, sondern auch deren Anteil, der zum gewünschten Produkt umgewandelt wird. Die Vision ist somit, dass Plasmageneratoren katalytische Prozesse steuern. Es werden neue kompakte Plasma-Katalysator-Module entste-

hen, durch die große Gasströme bei geringem Druckabfall fließen können. Dies ermöglicht, Abgasströme zu reinigen und andere wichtige industrielle Reaktionen durchzuführen. Damit die Module ressourcensparend arbeiten, müssen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler noch ihre Energieeffizienz erhöhen. Zukünftig werden Katalyse-, Plasma- und Reaktionstechnikexperten Hand in Hand arbeiten, um die Plasma-Katalysator-Module zu entwickeln. Computergestützte Plasma-, Geschwindigkeits- und Strömungssimulationen werden helfen, sie zu optimieren.

Prof. Dr. Martin Muhler



Angewandte Mikrobiologie

PLASMEN HELFEN BEI WUNDHEILUNG, KREBSTHERAPIE UND SCHADSTOFFABBAU

Reaktive Sauerstoff- und Stickstoffspezies (RONS) haben in der Biologie unterschiedliche Funktionen: In geringen Konzentrationen fungieren sie als Signalstoffe, zum Beispiel bei der Wundheilung. In hohen Konzentrationen zerstören sie Biomoleküle, was Immunzellen zur Abtötung von Erregern nutzen. Nicht-Gleichgewichtsplasmen, in denen zwar die Elektronen hohe Temperaturen haben, die Gastemperatur aber niedrig bleibt, können solche RONS erzeugen, ohne die behandelten Proben zu erwärmen. Diese nicht-thermischen Plasmen werden bereits jetzt zu Sterilisationszwecken genutzt. Ihr therapeutischer Einsatz in Wundbehandlung und Krebstherapie befindet sich in der Erprobungsphase.

In zehn Jahren werden wir die Mechanismen, die der Entstehung der verschiedenen Reaktivteilchen im Plasma sowie ihren biologischen Wirkungen zugrunde liegen, detaillierter verstehen. Auf dieser Basis können dann Plasmareaktoren konzipiert werden, die RONS in gewünschten Konzentrationen und Mischungsverhältnissen bereitstellen: für Anwendungen wie enzym-katalysierte Reaktionen oder den Abbau von Schadstoffen durch Zusammenwirken von Plasmen und Mikroben.

Prof. Dr. Julia Bandow



Fotos: dg

Elektrodynamik und Plasmatechnik

PLASMASIMULATION UNTERSTÜTZT ENTWICKLUNG SCHNELLERER PROZESSOREN

Plasmasimulationen werden eine immer wichtigere Rolle bei der Entwicklung von Plasmaprozessen spielen – insbesondere für die Herstellung nanoelektronischer Schaltungen. Ohne das fundamentale Verständnis der einzigartigen Eigenschaften von Niedertemperaturplasmen werden kaum kleinere und schnellere Prozessoren und Speicher hergestellt werden können. Die dafür notwendigen Erkenntnisse stammen zunehmend aus Plasmasimulationen und entsprechenden Experimenten.

Insbesondere um Strategien zur Regelung der Prozesse zu entwickeln, benötigen wir die Hilfe angepasster mathematischer Modelle. Hierbei werden auch die modernen Verfahren des maschinellen Lernens ihre Anwendung finden. Wir werden aber auch in zehn Jahren noch nicht in der Lage sein, ein Plasma vollständig zu simulieren – auch nicht mit allen Supercomputern der Welt. Ein Laborplasma besteht aus unvorstellbaren 10^{18} Teilchen. Um nur einen einzigen Zustand zu speichern, wären eine Million Ein-Terabyte-Festplatten nötig. Hier helfen nur mathematische Modelle, die einerseits die Komplexität auf ein Minimum reduzieren, andererseits aber die entscheidenden Aspekte berücksichtigen. Es bleibt viel zu tun.

Prof. Dr. Thomas Mussenbrock

Unterwasserplasmen

CO₂-RECYCLING MIT HILFE VON PLASMA UND ELEKTROLYSE

Plasmen in Flüssigkeiten kommen längst bei der Wasserreinigung und Wundbehandlung zur Anwendung.

Nun sollen sie die Effizienz und Lebensdauer einer Elektrolysezelle verbessern, die zur CO₂-Umwandlung eingesetzt wird.

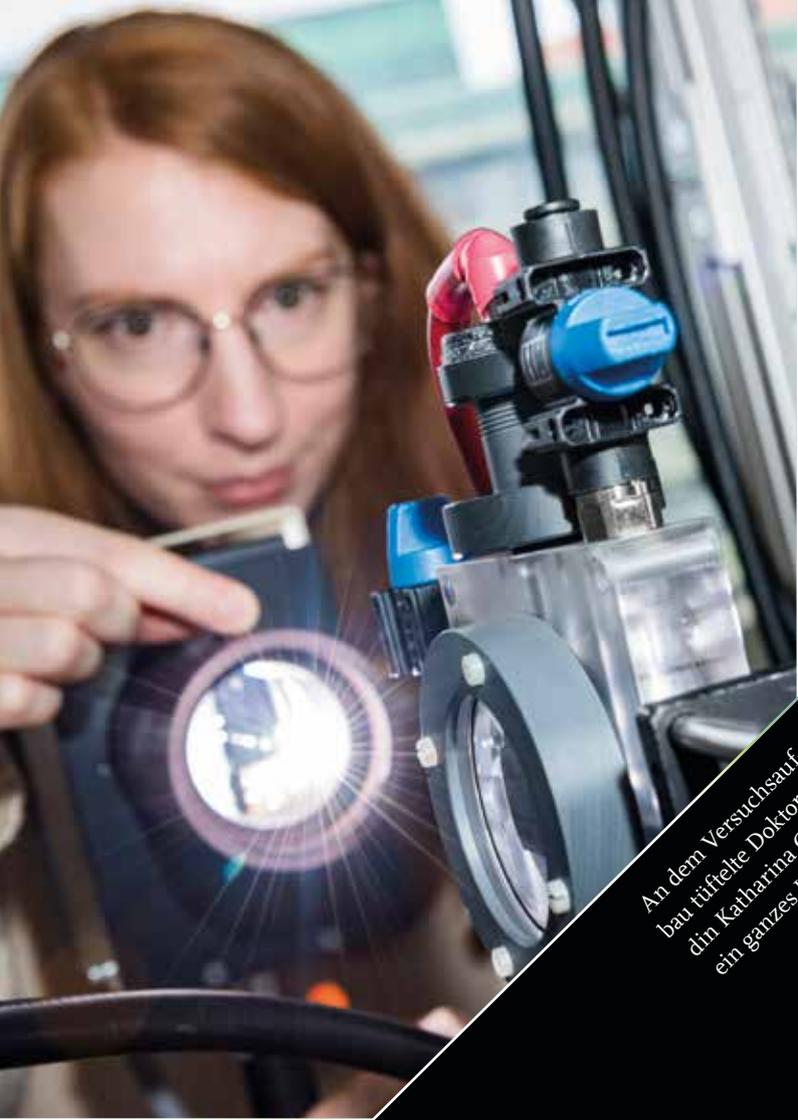
Gleißend hell zündet das Plasma und durchreißt für wenige Milliardstelsekunden blitzartig das Wasser. Katharina Grosse vom Sonderforschungsbereich 1316 „Transiente Atmosphärendruckplasmen: vom Plasma zu Flüssigkeiten zu Festkörpern“ (RUB) gelangen spektakuläre Aufnahmen, die den Zündungsprozess von Plasma unter Wasser anschauen und zeitscharf verfolgen lassen. Die Wissenschaftlerin liefert die ersten Datensätze mit sehr hoher Zeitauflösung und unterstützt eine Hypothese zur Zündung dieser Plasmen: Im Nanosekundenbereich reicht die Zeit nicht aus, um eine Gasumgebung zu formen. Das Nanosekunden-Plasma zündet direkt in der Flüssigkeit. Die während der Zündung entstandenen Teilchen können effizient mit katalytischen Oberflächen wechselwirken.

Doch wie zündet das Plasma in diesen kurzen Zeitskalen? Was passiert danach? Welche Stoffe werden produziert? Und wie wird diese Zündung in der Flüssigkeit überhaupt erst möglich? In ihrer Doktorarbeit geht Physikerin Grosse ebendiesen Fragen nach. Dazu legt sie an eine haarfeine, in Wasser untergetauchte Elektrode für zehn Nanosekunden eine hohe Spannung an. Das so erzeugte starke elektrische Feld führt zur Zündung des Plasmas. Mittels schneller optischer Spektroskopie in Kombination mit einer Modellierung der Flüssigkeitsdynamik gelingt es der Bochumer Forscherin, Leistung, Druck und Temperatur in diesen Unterwasserplasmen vorherzusagen und somit den Zündungsprozess und die Plasmaentwicklung im Nanosekundenbereich aufzuklären. Ihre Beobachtung: Zum Zeitpunkt der Zündung existieren extreme Verhältnisse im Wasser. Kurzzeitig entstehen Drücke von vielen Tausend Bar, was dem Druck am tiefsten Punkt im Pazifik entspricht oder diesen sogar übersteigt, sowie Temperaturen von vielen tausend Grad ähnlich zur Oberflächentemperatur der Sonne. „In den Plasmen wird zudem für kurze Zeit eine Leistung von einigen 100 Kilowatt verbraucht, was der Anschlussleistung von mehreren Einfamilienhäusern entspricht“, erklärt Prof. Dr. Achim von Keudell, Grosses Doktorvater und Inhaber des Lehrstuhls für Experimentalphysik II.

Um zu diesen Messergebnissen zu gelangen, ist ein komplizierter Aufbau notwendig, den Katharina Grosse etwa ein Jahr lang entwickelte: „Die elektromagnetische Interferenz ist sehr stark und beeinträchtigt die gesamte Messelektronik. Wir haben einen großen Metallkäfig um die Plasmakammer bauen müssen, um diese Störquelle zu umgehen. Eine weitere Schwierigkeit bestand darin, die Gleichzeitigkeit von spektroskopischer Messung und Kameraaufnahme zu gewährleisten.“



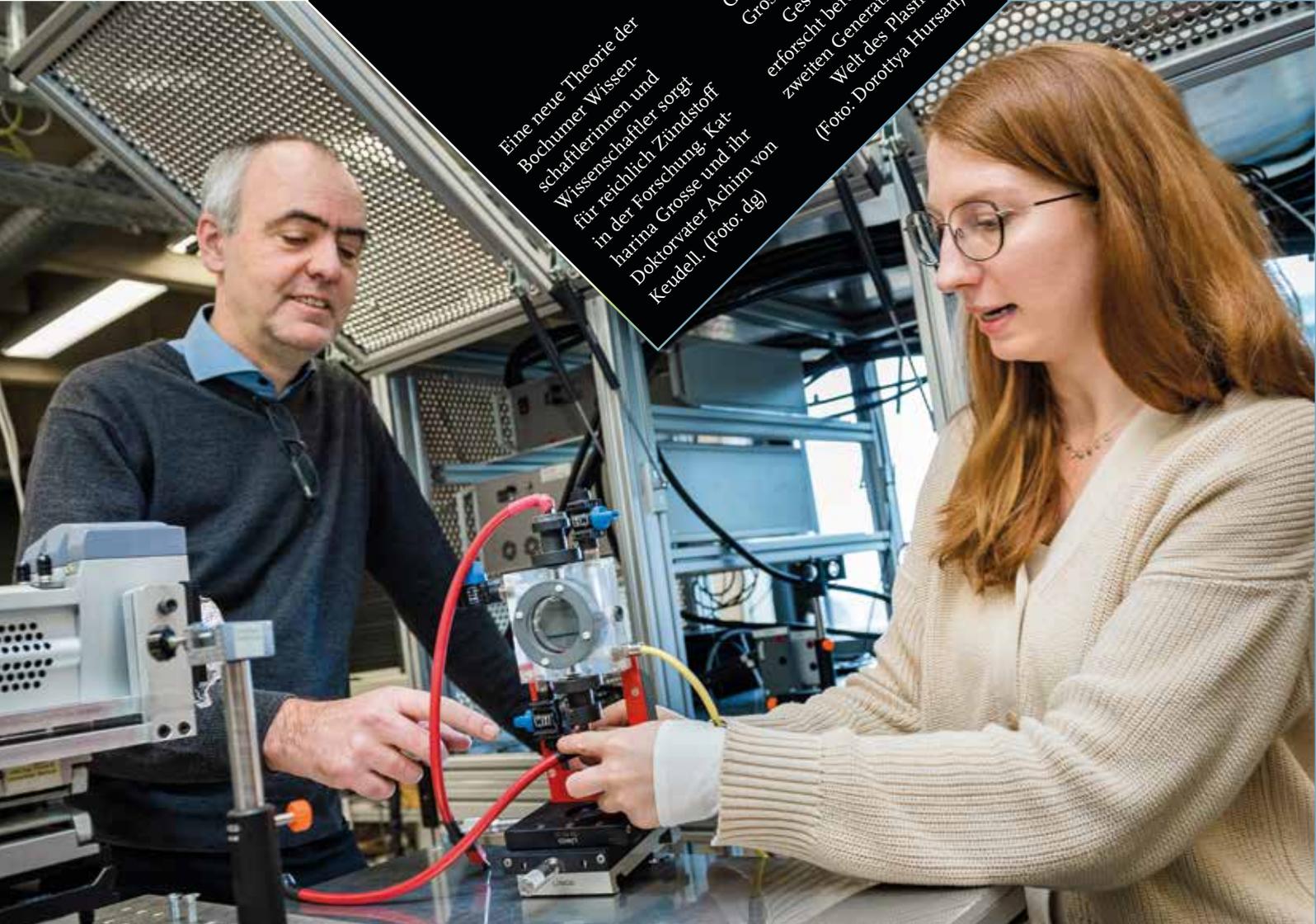
Physikerin Katharina Grosse vom Lehrstuhl für Experimentalphysik II gelangen spektakuläre Aufnahmen und Messungen von Unterwasserplasmen. (Fotos: dg)



An dem Versuchsaufbau tüftelte Doktorandin Katharina Grosse ein ganzes Jahr lang. (Foto: dg)

Chemiker Philipp Grosse ist Katharina Grosse Bruder. Das Geschwisterpaar erforscht bereits in der zweiten Generation die Welt des Plasmas. (Foto: Dorothea Hursan)

Eine neue Theorie der Bochumer Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler sorgt für reichlich Zündstoff in der Forschung. Katharina Grosse und ihr Doktorvater Achim von Keudell. (Foto: dg)



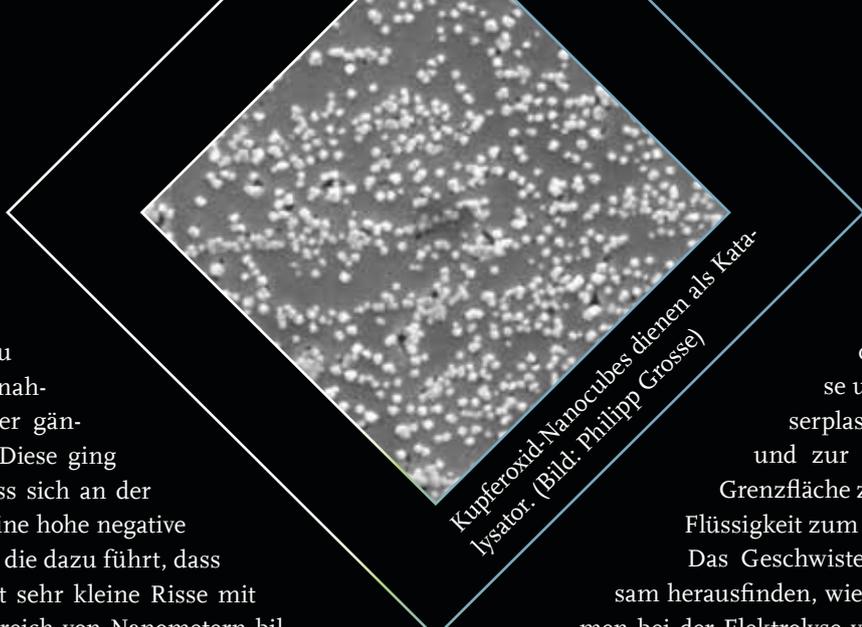
Das Tüfteln hat sich gelohnt. Die Plasmaentwicklung lässt sich sehr genau beobachten. Die Aufnahmen stellen die bisher gängige Theorie infrage. Diese ging bislang davon aus, dass sich an der Spitze der Elektrode eine hohe negative Druckdifferenz bildet, die dazu führt, dass sich in der Flüssigkeit sehr kleine Risse mit Ausdehnungen im Bereich von Nanometern bilden, in denen sich dann das Plasma ausbreiten kann.

„Man nahm an, dass eine Elektronenlawine sich in den Rissen unter Wasser bildet und damit die Zündung des Plasmas möglich macht“, so von Keudell. Die Aufnahmen des Bochumer Forschungsteams legen jedoch nahe, dass das Plasma „lokal innerhalb der Flüssigkeit gezündet wird“, erklärt Katharina Grosse.

Bei ihrem Erklärungsansatz bedient sich die Physikerin am quantenmechanischen Tunneleffekt. Er beschreibt die Tatsache, dass Teilchen eine Energiebarriere überqueren können, die sie nach den Gesetzen der klassischen Physik eigentlich nicht überqueren können dürften, weil sie dafür selbst zu wenig Energie besitzen. „Schaut man sich die Aufnahmen der Plasmazündung an, so deutet alles darauf hin, dass einzelne Elektronen durch die Energiebarriere der Wassermoleküle zu der Elektrode hin tunneln und dort das Plasma lokal zünden, und zwar genau dort, wo das elektrische Feld am höchsten ist“, sagt Katharina Grosse. Eine Theorie, für die viel spricht und die in der Fachwelt für große Diskussionen sorgt. Weiterführende Experimente mit negativen Pulsen sollen Grosses Tunnel-Theorie stützen.

So faszinierend der Zündungsprozess unter Wasser ist, so vielversprechend sind auch die Ergebnisse der chemischen Reaktion für die Praxis. Die Emissionsspektren zeigen, dass die Wassermoleküle bei Nanosekunden-Pulsen keine Gelegenheit mehr haben, den Druck des Plasmas auszugleichen. Durch die Plasmazündung werden sie in ihre Bestandteile zerlegt, nämlich in atomaren Wasserstoff und Sauerstoff. Letzterer reagiert gern mit Oberflächen. Und hier genau liegt das große Potenzial, erklärt Physikerin Grosse. „Der frei gewordene Sauerstoff kann möglicherweise katalytische Oberflächen in elektrochemischen Zellen re-oxidieren, sodass sie regeneriert werden und ihre katalytische Aktivität wieder voll entfalten können“, sagt die Forscherin.

Wie genau soll das gelingen? Lassen sich Plasma und Elektrolyse kombinieren? Auf diese Fragen sucht RUB-Doktorand und Chemiker Philipp Grosse am Fritz-Haber-Institut der Max-Planck-Gesellschaft in Berlin Antworten. „Elektrochemische Zellen“, erklärt er, „helfen unter anderem dabei, Kohlendioxid zu reduzieren, zu recyceln und in nützliche Chemikalien umzuwandeln. Dazu ist ein Katalysator notwendig. Während des elektrochemischen Prozesses nutzen sich die katalytischen Oberflächen allerdings ab und verlieren



Kupferoxid-Nanocubes dienen als Katalysator. (Bild: Philipp Grosse)

ihre katalytischen Fähigkeiten.“ Hier könnten die von Katharina Grosse untersuchten Unterwasserplasmen Abhilfe schaffen und zur Stoffwandlung an der Grenzfläche zwischen Elektrode und Flüssigkeit zum Einsatz kommen.

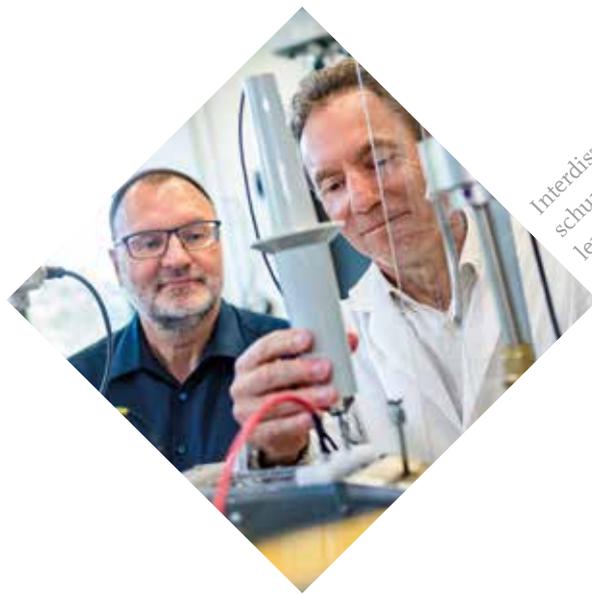
Das Geschwisterpaar möchte gemeinsam herausfinden, wie man Unterwasserplasmen bei der Elektrolyse von chemischen Stoffen einsetzen kann. Wie können die Plasmen die Elektrolyse durch Veränderungen der Flüssigkeit und der Elektrodenoberfläche unterstützen? Wie interagiert Plasma mit der elektrochemischen Zelle? Dazu baut Katharina Grosse ihre Versuchsanlage in Berlin auf, wo Bruder Philipp seit zwei Jahren forscht. Statt Wasser wählen sie Elektrolyte, und eine katalytische Oberfläche wird direkt in die Plasmakammer mit eingebaut. Als Katalysator entscheiden die Grosses sich für Kupferoxid in Form von sogenannten Nanocubes. Das sind Nanometer große Kupferoxid-Würfel, die als Katalysator zur CO₂-Reduktion eingesetzt werden. Für einige Mikrosekunden legen sie dann an die Elektrode eine hohe Spannung an. Ein Plasma zündet.

Die zu beobachtenden Veränderungen an den Kupferwürfeln lassen vermuten, dass der durch die Plasmazündung produzierte Sauerstoff das Kupferoxid aktiviert. Die ersten Messungen legen nahe, dass das extreme Plasma tatsächlich in der Lage ist, die Kupferwürfel zu re-oxidieren und damit die katalytische Oberfläche zu regenerieren. Ist der Katalysator wieder einsatzbereit, sollte auch die elektrochemische Zelle funktionieren und damit der CO₂-Verwertungsprozess. CO₂ könnte auf diese Weise in industriellen Anlagen kontinuierlich in andere Produkte umgewandelt werden; der Kreislauf wäre somit geschlossen. Auch bei der Gewinnung von grünem Wasserstoff durch Wasserspaltung könnte die Methode künftig zum Einsatz kommen.

In Bochum und Berlin träumt man bereits von einer unendlich lang laufenden elektrochemischen Zelle, in der sich elektrochemische Prozesse und Plasmazündungen abwechseln. Doch bis dahin liegt noch ein komplizierter Weg vor den Grosses. Die größte Herausforderung liegt aktuell darin, den physikalischen mit dem chemischen Aufbau zu verbinden, sodass Plasmazündung und Elektrolyse gleichzeitig stattfinden können. Sollte das gelingen wäre es ein „Meilenstein, eine Technologie mit viel Potenzial“, so von Keudell. Die chemische Industrie hat sehr großes Interesse an solch einem Plasmaverfahren, weiß der Sprecher des Sonderforschungsbereiches. „Dort setzt man große Hoffnungen in die Elektrifizierung der chemischen Industrie.“ Die Vorteile der Plasmatechnik: Sie nimmt wenig Raum ein und die elektrische Energie kann auf Knopfdruck die Umwandlung von chemischen Stoffen unterstützen.

Nichtthermische Plasmen
VOM KLIMAKILLER ZUM
ROHSTOFF MIT HILFE
VON PLASMA-TECHNIK

Nichtthermisches Plasma könnte künftig gezielt zur Reinigung und Aufbereitung von Hüttengasen eingesetzt werden. (Foto: dg)



Interdisziplinäre Forschung: Martin Muhler (links) und Peter Awakowicz verbinden ihre Ergebnisse aus der Plasmachemie und Plasmatechnik. (Foto: dg)

Kalte Plasmen und plasmakatalytische Verfahren könnten sich eignen, um Hüttengase der Stahlindustrie zu reinigen und aufzubereiten.

Wasserstoff, Sauerstoff, Kohlenmonoxid, Kohlendioxid, Methan – einen wahren und mitunter schadstoffreichen Gas-Cocktail setzt die Stahlindustrie stündlich frei. Doch wie lassen sich diese Hüttengase reinigen? Wie können sie in wertvolle Kraftstoffe umgesetzt werden? Hier setzt die Forschung von Prof. Dr. Peter Awakowicz vom Lehrstuhl für Allgemeine Elektrotechnik und Plasmatechnik und Prof. Dr. Martin Muhler vom Lehrstuhl für Technische Chemie an. Das interdisziplinäre Forschungsteam der Ruhr-Universität Bochum untersucht, wie man nichtthermisches Plasma gezielt zur Reinigung und Aufbereitung des Hüttengasgemisches einsetzen kann. Im vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Verbundprojekt Carbon2Chem, an dem die beiden Wissenschaftler seit 2016 beteiligt sind, erproben sie ihre innovative Plasmatechnik an Realgasen. „Die Kombination aus einem Grundlagenforschungsprojekt des Sonderforschungsbereiches 1316 und einem anwendungsorientierten BMBF-Projekt ist ein Traum, den wir beide schon immer hatten und uns jetzt erfüllen können“, so Awakowicz.

Im Teilprojekt L3 von Carbon2Chem, an dem die RUB-Wissenschaftler mitarbeiten, geht es konkret um die Vorreinigung, die Entfernung des Sauerstoffes aus dem Kokereigas. „Das klingt einfach, ist aber schwierig im Detail“, erklärt Chemiker Muhler. Es sei eine Kunst, den Sauerstoff aus den überwiegend wasserstoffhaltigen Kokereigasen zu entfernen. Klassische Methoden zur Abgasreinigung, wie die Druckwechseladsorption, würden nicht funktionieren, wenn zu viel Sauerstoff vorhanden sei. Die hohe chemische Reaktionsfähigkeit des Sauerstoffs würde unter Normaldruck gefährliche Gasreaktionen wie etwa eine Knallgasexplosion auslösen. Peter Awakowicz und Martin Muhler setzen daher auf Vorreinigung per Plasmatechnik mit kaltem Plasma. Wie funktioniert das? Was ist das Besondere an diesem nichtthermischen Plasma? Und wie wird es erzeugt?

Kalte Plasmen oder auch nichtthermische Plasmen sind Plasmen, in denen die Temperaturen von Ionen, Elektronen und Neutralteilchen variieren. „Die Temperatur der Elektronen ist in diesen Plasmen hoch, die Temperatur der anderen Gasteilchen vergleichsweise gering“, erläutert Awakowicz. Da sich die Plasmen im thermischen Nichtgleichgewicht befinden, werden sie auch häufig als Nichtgleichgewichtsplasmen bezeichnet. Ihr Vorteil mit Blick auf die Verfahren zur Gasreinigung: Das gezündete, kalte Plasma kann zur Gasbehandlung verwendet werden, ohne dass es zu einem nennenswerten Temperaturanstieg des Gases führt.

Die Herstellung von kaltem Plasma ist jedoch nicht einfach. „Die Schwierigkeit besteht darin, dem Gas gerade so viel Energie zukommen zu lassen, dass zwar die winzigen Elektronen beschleunigt und somit heiß werden, die Temperatur der großen, schweren Neutralteilchen und Ionen sich aber kaum ändert“, erklärt Awakowicz. Dem Forschungsteam vom Lehrstuhl für Allgemeine Elektrotechnik und Plasmatechnik ist es gelungen, ebendiesen Zustand von nichtthermischem Plasma im eigens dafür gebauten Plasmareaktor herzustellen: Die Elektronen werden einige Zehntausend Grad Celsius heiß, ohne dass sich die Gastemperatur des gesamten Plasmas auf kaum mehr als die Raumtemperatur erhöht.

„Um diesen Zustand zu erreichen war aufwendige Plasmadiagnostik notwendig. Immer wieder mussten wir die einzelnen Parameter, wie etwa Geometrie und Materialien der Elektroden, die Spannungsamplitude und -frequenz, aber auch die eingetragene Leistung neu justieren. Anschließend mussten die fundamentalen Plasmaparameter wie die Elektronendichte, die Verteilungsfunktion der freien Elektronen, aber auch die Gastemperatur bestimmt werden, um alles zu optimieren“, beschreibt Awakowicz die Herausforderungen.

Während das Team um Elektrotechniker Awakowicz an den Parametern zur Herstellung des kalten Plasmas feilte, analysierten die Chemikerinnen und Chemiker um Muhler ▶

DIE VISION VON DER PLASMAKATALYSE

Das Forschungsteam sieht seine nächsten Forschungsaktivitäten im Bereich der Plasmakatalyse und damit einem Verfahren, das kaltes Plasma mit geeigneten Katalysatoren in Verbindung bringt. Welche Wechselwirkungen zwischen kaltem Plasma und Katalysatoren sind möglich? Wie kombiniert man sie effizient, um etwa die Deaktivierung von Katalysatoren zu verhindern oder auch die Vergiftung von Katalysatoren zu reduzieren? Erste Experimente zu sogenannten dielektrisch behinderten Plasmaentladungen, also Entladungen, die beispielsweise durch eine Aluminiumoxidplatte behindert werden, erscheinen vielversprechend. Die Beobachtungen zeigen, dass die Oberfläche eines Katalysators, wie zum Beispiel Platin, bei den niedrigen Temperaturen

des kalten Plasmas verändert und chemisch aktiviert werden kann. Möglicherweise, so die Vision von Peter Awakowicz und Martin Muhler, ist das nichtthermische Plasma in der Lage, den Katalysator aktiv zu halten, und im Ernstfall einer Vergiftung des Katalysators durch Schadstoffe im Gasraum, diese Gifte zu entfernen. So haben die Forscher bereits herausgefunden, dass durch die Verwendung des Katalysators Manganoxid der Schadstoff Kohlenmonoxid nahezu vermieden werden kann. Bis das alles optimal gelingt, gibt es noch viel auszutüfteln, nämlich welche Elektrodenform sich empfiehlt, welche Entladungskanäle sich anbieten oder auch welche Oberflächenstruktur und -dichte der Katalysator aufweisen sollte.

„ EIN SPEKTAKULÄRES PROJEKT,
WEIL DIE DIMENSIONEN SO RIESIG
SIND. “

Peter Awakowicz und Martin Muhler

die durch die Plasmaentladung angestoßenen chemischen Reaktionen. Es zeigte sich, dass das kalte Plasma so reaktiv ist, dass es den im Kokereigas enthaltenen Sauerstoff zur Reaktion mit Wasserstoff animiert, sodass Wasser entsteht. Das Gasgemisch ist vom Sauerstoff befreit, und steht somit für weitere Reinigungsprozesse bereit.

Was Awakowicz und Muhler im Labor der RUB grundlegend erforscht haben, wird im BMBF-Projekt Carbon2Chem auf konkrete Gasgemische der Stahlindustrie angewendet. In der ersten Projektphase von 2016 bis 2020 haben die Forscher bereits den Machbarkeitsnachweis erbracht: Die entwickelte Plasmatechnik lässt sich auf diese spezifischen Hüttengase anwenden. In der zweiten Förderphase von 2020 bis 2024 sollen nun die technischen Verfahren weiter validiert und für die Industrieanwendung ab 2025 hochskaliert werden.

Die Experimente dazu finden auf einer Fläche von 3.700 Quadratmetern im Technikum in Duisburg statt. Das Technikum wurde 2018 angrenzend an das Gelände von Thyssenkrupp Steel Europe errichtet und ermöglicht, dass die Versuche von Carbon2Chem unter industriellen Rahmenbe-

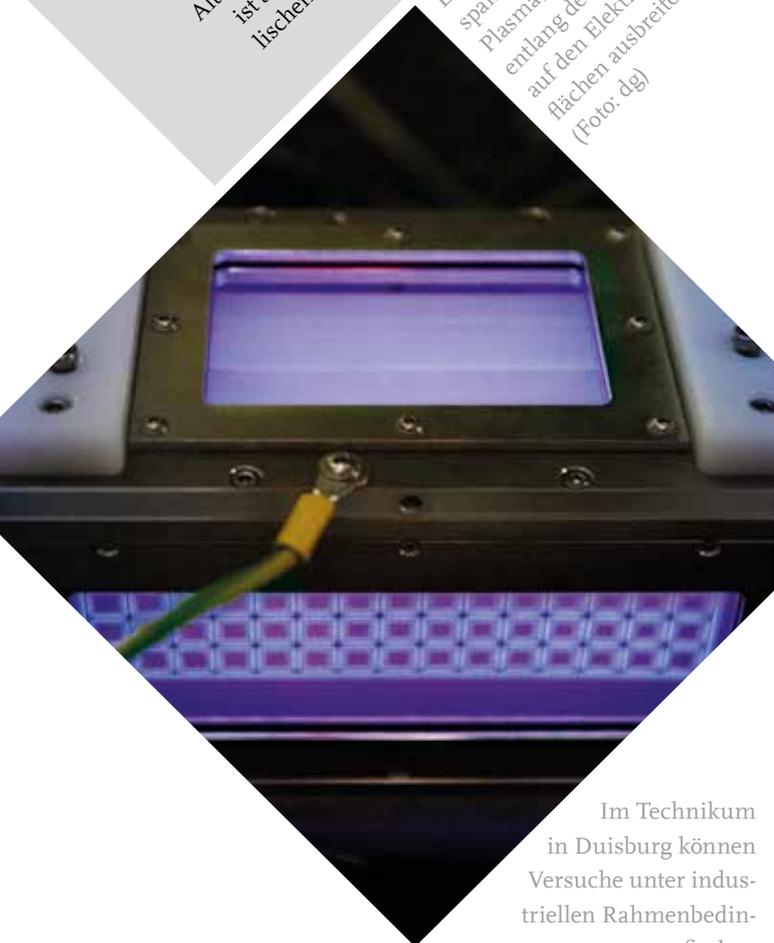
dingungen durchgeführt werden können. „Die realen Abgase werden auf das Technikum-Gelände geleitet und stehen uns dort zur Verfügung“, berichtet Muhler. „Wir müssen jetzt zeigen, dass unsere Plasmaanlage mit den realen Gasen arbeiten kann. Natürlich in einem viel größeren Maßstab. Der Reaktor soll die mehr als fünfzigfache Menge an Gas reinigen können“, beschreibt er die Herausforderung. An der RUB haben die Forscher bisher im Labor mit kleinen Gasströmen von zehn Litern pro Minute gearbeitet; am Technikum geht es um Ströme mit einem deutlich größeren Volumen von 500 Litern pro Minute und mehr. „Ein spektakuläres Projekt, weil die Dimensionen so riesig sind“, finden Awakowicz und Muhler.

In vier Jahren steht die kommerzielle Implementierung der Gasreinigungsanlage an. „Der letzte Schritt, die Hochskalierung von zehnfach auf hundertfach wird eine Kraftanstrengung“, ahnt Awakowicz. Und fügt hinzu: „Dann müssen wir Forscher irgendwann den Staffelstab an die Industrie abgeben.“



Im Labor stellen die Plasmatechniker im extra dafür konstruierten Reaktor kaltes Plasma her. Dazu legen sie eine hohe elektrische Wechselspannung an eine oder mehrere dünne, parallele, plattenförmige Elektroden im Gasraum an. Jede dieser aus Aluminiumoxid bestehenden Elektroden ist auf beiden Seiten mit einem metallischen Gitter aus Nickel-Leiterbahnen beschichtet. (Foto: dg)

Legt man die Wechselspannung an, zündet ein Plasma, das sich dann entlang der Gitterlinien auf den Elektrodenoberflächen ausbreitet. (Foto: dg)



Im Technikum in Duisburg können Versuche unter industriellen Rahmenbedingungen stattfinden. (Foto: thyssenkrupp Steel Europe)

i CARBON2CHEM

Rund 17 Millionen Tonnen CO₂ setzt die Stahlerzeugung am Standort Duisburg im Jahr frei. Im BMBF-geförderten Verbundprojekt Carbon2Chem, an dem auch die Ruhr-Universität Bochum beteiligt ist, erforscht ein Team seit 2016, wie die in der Stahlerzeugung anfallenden Hüttengase mithilfe von erneuerbaren Energien in chemische Grundstoffe umgewandelt werden können. Ziel ist es, den Anlagenverbund aus Stahl-, Chemie- und Energieindustrie zu optimieren, langfristig CO₂-Emissionen zu reduzieren und so die Klimaschutzziele der Bundesregierung zu erreichen.

Carbon2Chem setzt sich aus sieben thematisch aufgeteilten Leitprojekten zusammen. Die Teilprojekte L1 bis L6 beschäftigen sich mit den Modulen Wasserstoff, Methanol, Höhere Alkohole, Polymere, Oxymethylen-ether sowie der Gasreinigung. Ausgehend von der Grundlagenforschung führt die angewandte Forschung in enger Zusammenarbeit mit der Industrie die Ergebnisse in Marktreife. Die RUB-Forscher Awakowicz und Muhler arbeiten, zusammen mit dem RUB-Physiker Achim von Keudell, mit der Firma Linde, der Firma thyssenkrupp, dem Max-Planck-Institut für Chemische Energiekonversion, dem Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik und der Firma Clariant im Projekt L3 (Gasreinigung) zusammen. Das Verbundprojekt wird von der thyssenkrupp AG, dem Max-Planck-Institut für Chemische Energiekonversion und dem Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik gesteuert. Insgesamt sind im Carbon2Chem-Projekt 18 Projektpartner aus Wissenschaft und Wirtschaft beteiligt: Clariant Produkte, Covestro Deutschland, Evonik Industries, Evonik Resource Efficiency, Fraunhofer Gesellschaft, Linde, Max-Planck-Gesellschaft, Nouryon Industrial Chemicals, Remondis, Rheinkalk, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Ruhr-Universität Bochum, Siemens, Siemens Gas and Power, Thyssen Vermögensverwaltung, thyssenkrupp.

Das Bundesministerium für Bildung und Forschung förderte das Projekt mit mehr als 60 Millionen Euro in der ersten Phase. In der zweiten Förderperiode stehen bis 2024 insgesamt 75 Millionen Euro zur Verfügung. Für die kommerzielle Realisierung sind mehr als eine Milliarde Euro vorgesehen.



„DAS WAR EINE ETWAS VERRÜCKTE IDEE“

Eigentlich wirken Plasmen zerstörerisch auf Enzyme. Hier liefern sie ihnen auf Knopfdruck einen Baustein für die Biokatalyse zu.

Bei der Herstellung vieler Chemikalien entsteht neben dem gewünschten Produkt auch sein Spiegelbild: Die beiden sogenannten Enantiomere sind einander physikochemisch sehr ähnlich und daher schwierig voneinander zu trennen, haben aber unterschiedliche biologische Eigenschaften. Gerade bei Medikamenten ist das augenfällig: So wirkt zum Beispiel das (S)-Ibuprofen-Molekül gegen Schmerzen, sein Zwillings (R)-Ibuprofen aber nicht. „Es kommt auch vor, dass eine der beiden Formen giftig ist“, verdeutlicht Prof. Dr. Julia Bandow, Inhaberin des Lehrstuhls Angewandte Mikrobiologie an der Fakultät für Biologie und Biotechnologie der RUB und Mitglied im Sonderforschungsbereich 1316.

Ihre Arbeitsgruppe setzt daher für die Herstellung solcher Chemikalien auf Enzyme, biologische Katalysatoren, die zum Beispiel aus Bakterien oder Pilzen stammen. Manche Enzyme stellen nur eins der beiden Enantiomere her.

Allerdings sind Enzyme generell eher sensible Katalysatoren. Manche sind sogar anfällig für eine Inaktivierung durch das Substrat, das sie umsetzen. „Unser Beispielenzym ist so ein Fall“, sagt Bandow. „Die unspezifische Peroxygenase, kurz UPO, aus dem Speisepilz *Agrocybe aegerita* oder Südlischen Ackerling, die die Arbeitsgruppe von Prof. Dr. Frank Hollmann aus Delft hergestellt hat, kann den Duftstoff (R)-1-Phenylethanol herstellen. Als Substrat braucht sie dafür Wasserstoffperoxid. Wenn man ihn dem Enzym in Lösung einfach in Form eines Konzentrats zufügt, deaktiviert der Ausgangsstoff der gewünschten Reaktion das Enzym innerhalb kurzer Zeit“, erklärt die Bochumer Forscherin.

Ein Dilemma, aus dem das Team mit mehreren Tricks herauskam. Einer davon war, ein Plasma zur Herstellung von Wasserstoffperoxid zu nutzen. „Das war eine etwas verrückte Idee“, schmunzelt Bandow im Rückblick. „Denn eigentlich nutzt man Plasmen vorzugsweise, um etwas zu zerstören.“ In Plasmen, die entstehen, indem man einem Gas Energie zuführt, bilden sich zahlreiche reaktive Substanzen, zum Beispiel atomarer Sau- ▶



Abdulkadir Yayci und Julia Bandow untersuchen die Effizienz der Biokatalyse beim Einsatz verschiedener Plasmen. Der Plasma-Jet wird mit Helium als Prozessgas betrieben.



In einem speziell gefertigten Reaktor, der sich dank eines Magnetes permanent dreht, befinden sich Kügelchen mit immobilisiertem Enzym. Die Durchmischung der Probe sorgt für eine effiziente Zuführung der Substrate, während die Immobilisierung gewährleistet, dass eine gewisse Pufferzone entsteht, in der hoch reaktive Teilchen aus dem Plasma-Jet abreagieren können.



Mithilfe einer FPLC-Anlage (kurz für fast protein liquid chromatography) reinigen Abdulkadir Yayci und Tim Dirks (links) Enzyme für die Biokatalyse auf.

erstoff, Hydroxylradikale, freie Elektronen und verschiedene angeregte Spezies. Krebszellen, Biofilme, Viren oder Prionen lassen sich daher mittels Plasmen inaktivieren. Hier jedoch sollte das Plasma zum Schutz der Biokatalysatoren beitragen, indem es die reaktiven Substanzen, die für die Katalyse des Duftstoffs notwendig sind, dem Enzym auf Knopfdruck genau in der richtigen Dosis zur Verfügung stellt.

„Die Erzeugung von Wasserstoffperoxid durch Plasma ist gegenüber alternativen Herstellungsmethoden mittels Enzymen oder Elektroden von Vorteil. Entsprechende Enzyme sind teuer in der Herstellung, auch sie werden durch Wasserstoffperoxid angegriffen und die Wasserstoffperoxid-erzeugung ist schwer dosierbar. An den Elektroden können die Biokatalysatoren wie die UPO ausfallen und diese zusetzen“, erklärt Julia Bandow.

Die Gruppe experimentierte also mit Plasmen auf Basis von Luft oder Edelgasen, die direkt über den in Lösung befindlichen Enzymen zur Herstellung des Duftstoffs (R)-1-Phenylethanol gezündet wurden. Die an der Oberfläche befindlichen Enzyme wurden durch die reaktiven Spezies aber schnell zerstört. So kam es zu Trick Nummer zwei: Die Forscherinnen und Forscher befestigten die Enzyme an Beads, kleinen Kugeln mit poröser Oberfläche, die am Boden der Lösung liegen und die Enzyme dort festhalten. Die optimale Beschaffenheit der Kugeln testeten sie vorher aus, denn nicht jedes Enzym kann auf jeder Oberfläche gut andocken und trotzdem seine Arbeit verrichten, für die manchmal auch Bewegungen der Enzyme notwendig sind.

So gelang es, dass oberhalb der Kugeln am Boden des Behältnisses etwas Lösung die Enzyme von der Gasphase trennt und abpuffert. Das mithilfe des Plasmas erzeugte Wasser-

stoffperoxid diffundiert zu den Enzymen und wird von diesen umgesetzt. Die Enzyme kommen dabei aber nie mit einer Überdosis des Substrats oder anderer reaktiver Spezies in Kontakt. So bleiben sie intakt und funktionsfähig.

„Die Schutzschicht, die über den Enzymen liegt, ist nur ungefähr einen Millimeter dick“, so Julia Bandow, „denn die Reaktoren, die wir dafür bisher nutzen, sind winzig.“ Sie fassen nur bis zu fünf Milliliter Flüssigkeit. Trotzdem genügt der Abstand zwischen Erzeugung und Nutzung dafür, dass instabile und kurzlebige reaktive Substanzen, die im Plasma entstehen, abreagieren – manche praktischerweise zu Wasserstoffperoxid, das als Substrat gebraucht wird. Wasserstoffperoxid selbst ist vergleichsweise langlebig. Seine Dosis lässt sich zum Beispiel dadurch einstellen, dass man das Plasma pulst, also ein- und ausschaltet.

Die Enzyme hielten im Experiment achtmal zehn Minuten unbeschadet durch. Zwischendurch musste immer der zweite Ausgangsstoff Ethylbenzol nachgeliefert werden. Die Extraktion des dann in der Lösung befindlichen Produkts (R)-1-Phenylethanol erfolgte mit Ethylacetat in nur einem Schritt. „Darin liegt der große Vorteil gegenüber Katalyseverfahren, die beide Enantiomere hervorbringen“, unterstreicht Julia Bandow.

Bis hierher war das Ganze ein Proof-of-Concept-Projekt, das belegt hat: Der Ansatz funktioniert. Jetzt hat die Arbeitsgruppe begonnen, das Verfahren zu optimieren, vor allem mit dem Ziel, es für größere Mengen einsatzfähig zu machen und die Reaktoren zu optimieren. Ein Reaktor, in dem die auf Kugeln befestigten Enzyme in der Lösung rotieren, sodass die Enzyme gleichmäßiger mit den Substraten in Kontakt kommen, brachte bereits Erfolge.



In Vorbereitung der Plasma-Behandlung wird eine Mischung aus Enzym und Substrat auf einem Glas-träger platziert.

Das Plasma einer dielektrischen Barriereentladung liefert Wasserstoffperoxid für die Biokatalyse. Das eingesetzte Enzym umsetzt Ethylbenzol zu dem Duftstoff (R)-1-Phenylethanol um.



Weitere Experimente haben gezeigt, dass der Prozess noch besser funktioniert, wenn man statt Luft als Basis für das Plasma das Edelgas Helium nutzt und Wasserdampf hinzugeibt. „Dann findet man in der Lösung sehr viel Wasserstoffperoxid vor, vielleicht über die Zwischenstufe von OH-Radikalen“, vermutet Julia Bandow. Der Ertrag stieg dadurch von etwa zehn Nanomol Wasserstoffperoxid pro Minute auf 200 Nanomol pro Minute an. Eine weitere Steigerung der Wasserstoffperoxidbildung um 50 Prozent ließ sich durch eine Spannungsänderung erreichen.

„Unser größter Erfolg ist es, dass wir in verhältnismäßig kurzer Zeit so weit gekommen sind“, unterstreicht Julia Bandow. „Der Plasmareaktor könnte eine neue Klasse von Enzymen für die kommerzielle Nutzung erschließen.“

Auf der Suche nach weiteren Enzymen, die wertvolle Chemikalien herstellen können, verfolgen die Forscherinnen und Forscher mehrere Strategien. Streptomyceten, eine Gruppe im Boden lebender Bakterien, verfügen ebenfalls über Wasserstoffperoxid-umsetzende Enzyme. Eine Charakterisierung von drei Kandidaten brachte allerdings bisher keine aussichtsreichen Hersteller attraktiver Produkte hervor.

Ein weiterer Weg zu neuen Enzymen könnte über Kompost führen. Untersuchungen mit Modellsubstraten, deren Umsatz zum Beispiel durch einen Farbumschlag angezeigt wird, förderten vielversprechende Ergebnisse zutage. „Wir wissen schon, bei welchem pH-Wert und welcher Temperatur solche Reaktionen erfolgen“, so Bandow, „aber wir kennen die verantwortlichen Enzyme noch nicht. Das ist die große Unbekannte.“

Text: md, Fotos: dg

„ UNSER GRÖSSTER ERFOLG IST ES, DASS WIR IN VERHÄLTNISMÄSSIG KURZER ZEIT SO WEIT GEKOMMEN SIND. “

Julia Bandow

DIE ZUKUNFT DER PLASMAFORSCHUNG



Plasmamedizin

GEMEINSAM ANS ZIEL

Eine der interessantesten und wichtigsten Eigenschaften des Faches Plasmamedizin ist ihr interdisziplinärer Charakter, der Naturwissenschaftler, Ingenieure und Kliniker zusammenführt. In den vergangenen zehn Jahren ist die Anzahl der unterschiedlichen wissenschaftlichen Fachrichtungen, die in diesem Arbeitsbereich vertreten sind, kontinuierlich gewachsen. Diese Interdisziplinarität ist in vielen Fällen eine treibende Kraft hinter den klinischen Studien gewesen, zum Beispiel bei der Wundbehandlung.

Über die nächsten zehn Jahre, während die Plasmamedizin weiterwächst und neue Forscherinnen und Forscher anzieht, erwarte ich eine Verstärkung dieses Trends: Der Forschungsbereich wird voraussichtlich noch interdisziplinärer, als er heute ist.

Dies wird zu neuen Perspektiven auf existierende Fragen, neuen therapeutischen Konzepten und innovativen Forschungsmethoden führen. Meiner Meinung nach werden diese Faktoren ausschlaggebend sein für neue wissenschaftliche Entdeckungen und die Überführung der entstehenden Verfahren – wie der Plasma-basierten Krebstherapie – in die klinische Praxis.

Prof. Dr. Andrew Gibson



Fotos: dg

Plasmaphysik

GRUNDLAGENFORSCHUNG TRIFFT TECHNOLOGIE

Plasmaphysik beschäftigt sich mit dem Verhalten ionisierter Gase. Dabei vereinen sich statistische Physik, Fluidodynamik, Elektrodynamik sowie Atom- und Molekülphysik zu einem ganz eigenen Fach. Plasmen bestimmen sowohl die Sternentwicklung auf astronomischen Skalen als auch das Ätzen von Nanostrukturen in der Halbleiterindustrie. Schon heute treiben plasmabasierte Triebwerke Satelliten im All an, und sehr heiße magnetisierte Plasmen werden vielleicht in der Zukunft saubere Energie durch kontrollierte Kernfusion bereitstellen. Winzige kalte Plasmen bei Atmosphärendruck bieten ein weites Anwendungsfeld von der CO₂-Umwandlung bis zur Medizin oder Biologie.

Große Fortschritte bei der Messung der inneren Parameter von Plasmen und deren Simulation haben in jüngster Zeit zu einem deutlich besseren Verständnis dieser komplexen Systeme beigetragen. Wo auch immer die Reise in die Zukunft hingeht, sie wird nicht ohne Plasmen verlaufen.

Prof. Dr. Uwe Czarnetzki

Mikrosystemtechnik

PLASMEN ERMÖGLICHEN HERSTELLUNG KLEINER STRUKTUREN

Plasmen sind das Werkzeug schlechthin für die Mikrosystemtechnik. Auf immer kleiner werdenden elektronischen Chips lassen sich Strukturen nur noch mit trockenen, Plasma-unterstützten Prozessen erzeugen. Nasschemische Verfahren funktionieren in dieser Größenskala nicht mehr. Die Oberflächenspannung verklebt kleine, bewegliche Strukturen beim Trocknen so, wie auch zwei Glasscheiben mit einem sehr dünnen Wasserfilm dazwischen kaum noch zu trennen sind. Neue Materialien wie Gläser oder 2D-Halbleiter erfordern neue Prozesse zum Abscheiden und Strukturieren.

Der Schlüssel dazu sind speziell adaptierte Plasmen! Zudem benötigen wir wesentliche Fortschritte bei den Methoden, um in Echtzeit die inneren Parameter eines Plasmas zu messen und bei der damit verbundenen Prozessregelung. Nur so können wir auch in der Serienfertigung reproduzierbare Ergebnisse erreichen. Außerdem bieten Plasmaverfahren ressourcenschonende, umweltfreundliche Fertigungsmethoden mit minimalem Materialeinsatz – auch bei der Beschichtung mit neuartigen Werkstoffen. Diese Zukunft beginnt jetzt, mit dem Aufbau von Forschungsanlagen an der Grenze zwischen Grundlagen- und angewandter Forschung und der Disziplinen-übergreifenden Kooperation, um den Einsatz von innovativen Materialien zu ermöglichen.

Prof. Dr. Martin Hoffmann

Dieses Plasma in Stickstoff wird innerhalb von Nanosekunden an- und ausgeschaltet. Es ist gerade einmal einen Millimeter groß.



Je kleiner ein Plasma, desto größer ist oft der Messaufbau, um es zu untersuchen. Der Aufwand lohnt sich, denn in Kubik-Millimeter kleinen Plasmen finden sich Reaktionsbedingungen wie nirgendwo sonst.

PLASMEN ALS CHEMIELABOR

Plasmen mit Atmosphärendruck sind oft nur wenige Kubik-Millimeter groß – aber trotzdem haben sie es in sich. Denn in ihnen lassen sich spezielle Nichtgleichgewichtszustände einstellen, die physikalische und chemische Prozesse erlauben, welche in keiner anderen Umgebung möglich sind. So wird das Plasma zu einer Art Speziallabor: Atome und Moleküle können darin angeregt werden, ohne dass sich ihre Umgebung erhitzt. „Solche Anregungen könnte man theoretisch auch in einem Gas erzeugen, aber dazu müsste man es auf mehrere tausend Grad Kelvin erhitzen – dann würden sich die Moleküle allerdings zersetzen“, erklärt Prof. Dr. Uwe Czarnetzki, Leiter des Lehrstuhls für Plasma- und Atomphysik an der Fakultät für Physik und Astronomie. Seit vielen Jahren entwickelt er mit seinem Team Verfahren, um die Vorgänge im Inneren von Plasmen zu untersuchen und die Plasmen zu charakterisieren.

Das Besondere an Plasmen: Über elektrische Felder kann den Elektronen im Plasma Energie zugeführt werden; die Elektronen wiederum wechselwirken mit Molekülen wie Stickstoff oder Kohlendioxid und geben die Energie dabei an diese ab – die Moleküle werden angeregt, und zwar, ohne dass sich die Umgebung dabei erhitzt, wie es in einem Gas der Fall wäre. Die zu Schwingungen angeregten Moleküle besitzen wiederum eine weit höhere Reaktivität als solche im Grundzustand. Man kann also durch das Plasma die Chemie verändern beziehungsweise gewisse chemische Abläufe überhaupt erst ermöglichen. Das Plasma bietet Grundlagenforscherinnen und -forschern somit eine einzigartige Möglichkeit, um die Anregung von Molekülen und die damit verbundene Chemie fernab des thermodynamischen Gleichgewichts zu untersuchen. Uwe Czarnetzki interessiert sich daher vor allem für die Schwingungszustände von Molekülen in Plasmen.

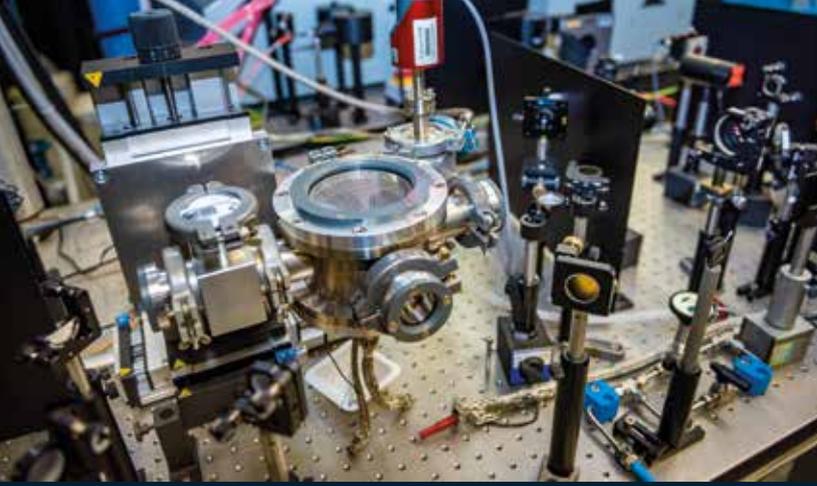
Die einzelnen Atome von Molekülen – etwa die Kohlenstoff- und Sauerstoffatome im Kohlendioxid-Molekül – sind nicht starr miteinander verbunden. Die Bindungen zwischen den Atomen verformen sich periodisch auf unterschiedliche Weisen. Diese Schwingungen können auf mehreren Energieniveaus stattfinden, also mit verschiedenen Frequenzen, die sich durch Lichtenergie anregen lassen. Dazu muss die Frequenz des Lichtes der Differenz der Frequenzen zwischen zwei benachbarten Energieniveaus entsprechen. Aus der Abnahme der Intensität des Lichtes bei dieser speziellen Frequenz kann man auf die Zahl der absorbierenden Moleküle im Lichtstrahl schließen. Diese Tatsache nutzen die Bochumer Physikerinnen und Physiker um Uwe Czarnetzki und Dr. Dirk Luggenhölscher im Sonderforschungsbereich 1316 „Transiente Atmosphärendruckplasmen“, um die Schwingungszustände von Molekülen in Plasmen zu untersuchen, insbesondere in Zusammenarbeit mit der Humboldt-Stipendiatin Dr. Yanjun Du. Sie interessiert, wie viele verschiedene Zustände wie häufig vorkommen.

„Leider funktioniert dieses Verfahren aber nicht bei allen Molekülen oder Schwingungen“, sagt Czarnetzki. Daher entwickelte er mit seinem Team, allen voran Jan Kuhfeld, die CARS-Methode weiter, kurz für Coherent anti-Stokes Raman Scattering. Das aufwendige Laserverfahren erfasst die sonst verbotenen Übergänge mit hoher Empfindlichkeit, zeitlicher und räumlicher Auflösung. Insbesondere überarbeiteten die Forschenden das Auswerteverfahren für die theoretische Berechnung der Spektren, sodass sie auch Energieverteilungen bestimmen können, die nicht einem thermodynamischen Gleichgewicht entsprechen. „Gerade die sind der entscheidende Punkt bei der Verwendung von Plasmen“, so Czarnetzki. Das Team modifizierte zudem das Lasersystem, um alle Schwingungszustände gleichzeitig detektieren zu können.

Um die Schwingungszustände anregen zu können, ist das elektrische Feld entscheidend. Die Krux: Zur Erzeugung des Plasmas benötigt man ein sehr hohes elektrisches Feld, zur effizienten Schwingungsanregung ein vergleichsweise kleines Feld. Warum die effiziente Schwingungsanregung trotz dieses vermeintlichen Widerspruchs funktioniert, war zunächst nicht klar. „Plasmen neigen dazu, Dinge zu tun, die man erst einmal nicht versteht, die aber nützlich sind“, weiß Czarnetzki. „Wenn man den Mechanismus dann einmal verstanden hat, ist er im Nachhinein betrachtet sehr banal.“ Dank einer in Bochum von Dr. Nikita Lepikhin und seinen Kolleginnen und Kollegen neu entwickelten Lasertechnik zur Messung der elektrischen Felder konnten die Forschenden nachvollziehen, was genau bei der Entstehung des Plasmas und der Anregung der Schwingungen passiert.

Zunächst muss man sich vor Augen führen, wie ein Plasma entsteht: Zu Beginn liegt ein Gas vor, dem Energie in Form von elektrischem Strom zugeführt wird, bis schließlich ein hochenergetischer Zustand entsteht, in dem ein gewisser Anteil des Gases ionisiert ist. Es entstehen aber nicht alle Ladungen auf einen Schlag. Anfänglich werden nur einige Teilchen des Gases ionisiert und beschleunigt, was wiederum neue Ladungen erzeugt. „In wenigen Nanosekunden bildet sich eine Lawine von Ladungen, und ein hochdichtes Plasma entsteht“, erklärt Uwe Czarnetzki. Einen so energiereichen Zustand kann man nicht dauerhaft aufrechterhalten, daher werden die Plasmen gepulst betrieben, also sozusagen immer wieder an- und ausgeschaltet, typischerweise einige tausendmal pro Sekunde.

Durch das extrem schnelle Pulsen der Entladung löst das Plasma das vermeintliche Problem des unterschiedlichen optimalen elektrischen Feldes für Plasmaerzeugung und Schwingungsanregung quasi von selbst. In den ersten Nanosekunden nach Anlegen der Spannung liegt eine kleine Plasmadichte, daher ein hoher elektrischer Widerstand und somit auch ein hohes Feld vor. Man erreicht eine starke Ionisation und somit schließlich eine außergewöhnlich hohe Plasma- ▶



Je kleiner das Plasma, desto größer ist in der Regel die Messtechnik, die man braucht, um die Vorgänge in seinem Inneren zu untersuchen. Das CARS-Messsystem füllt quasi einen ganzen Raum. Das Plasma selbst befindet sich in dem Metallzylinder im Vordergrund.



Doktorand Jan Kuhfeld bei der Justierung des CARS-Systems



Nikita Lepikhin analysiert das Emissionsprofil eines Mikroplasmas.

dichte. Damit sinkt der Widerstand und somit auch die Größe des Feldes. In der sich daran anschließenden Phase ist das Feld klein und ideal für die Schwingungsanregung. Die durch den Stromfluss abfließenden Ladungen werden zudem in einem sehr dünnen Übergangsbereich zwischen Plasma und Elektrode passend nachgeliefert. Der weitaus größte Teil des hochdichten Plasmas erzeugt aber keine neuen Ladungen, sondern wirkt nur wie ein Stromleiter. Die Elektronen werden hier in einem schwachen Feld sanft beschleunigt und geben die so aufgenommene Energie fast vollständig an die Schwingungsanregung der Moleküle ab.

Zumindest bei Stickstoff-Molekülen klappt das schon gut. Künftig wollen die Physiker auch CO₂-Moleküle auf diese Weise untersuchen. Erste Messungen und auch theoretische Überlegungen stimmen sie optimistisch.

Mittlerweile gelang es Czarnetzki's Team außerdem, das Verfahren zur Messung der Schwingungszustände mit der Methode zur Messung der elektrischen Felder in Plasmen zu kombinieren – eine Herausforderung. „Je kleiner ein

Plasma ist, desto größer wird eigentlich der Messaufbau, den man benötigt, um es zu untersuchen“, erklärt Uwe Czarnetzki. „Unsere Plasmen sind so klein, dass wir keinen Platz haben, einen dicken Messdraht hineinzustecken.“

Abhilfe schafft die Lasertechnik, die jedoch komplexe Messaufbauten mit sich bringt. Daher ließ sich das experimentelle Setup für die Messung der elektrischen Felder und der Schwingungszustände nicht einfach miteinander verknüpfen. Stattdessen erzeugten die Physikerinnen und Physiker mit großem Aufwand und großer Akribie zwei identische Plasmen, an denen sie die Messungen parallel laufen lassen und die Daten dann zusammenbringen konnten. Dabei kam es auf jede Kleinigkeit an. „Es kann schon reichen, wenn ein Kabel falsch verlegt ist, um Störungen ins System zu bekommen“, verdeutlicht Uwe Czarnetzki. Dass es gelungen ist, die beiden sensiblen Messverfahren zu kombinieren und damit erstmalig ein kohärentes Bild der Vorgänge im Plasma zu erlangen, zählt für ihn daher zu seinen Forschungshighlights.

”

PLASMEN NEIGEN DAZU, DINGE ZU TUN, DIE MAN ERST EINMAL NICHT VERSTEHT.

“

Uwe Czarnetzki

Im Gespräch

ZUHAUSE IN ZWEI LÄNDERN

Uwe Czarnetzki (rechts) pflegt vielfältige Kooperationen, vor allem nach Japan.

Die Plasmaforschung am Lehrstuhl von Prof. Dr. Uwe Czarnetzki findet eigentlich nicht nur in Bochum, sondern auch in Japan statt. Nach einem Postdoc-Aufenthalt im Jahr 1992 packte ihn die Begeisterung für Land und Leute. So baute Czarnetzki bis 2015 Kooperationen zu fünf verschiedenen japanischen Universitäten auf, später kamen größere gemeinsame Verbundforschungsprojekte hinzu. An die rund 30 Jahre Zusammenarbeit mit Fernost erinnert er sich gern zurück.

Herr Professor Czarnetzki, warum kooperieren Sie so stark mit Japan, was ist das Besondere an dem Land?

Japan ist eine der führenden Nationen im Bereich der Plasmaforschung. Ich bin schon zum Ende meiner Promotion über meinen damaligen Chef Professor Hans Frieder Döbele mit einem japanischen Forscher, Professor Katsunori Muraoka, in Kontakt gekommen, und habe dann auch mit Unterstützung der Humboldt-Stiftung ein Postdoc-Jahr an der Kyushu-Universität absolviert. Das war eines der besten Jahre meines Lebens, ich habe mich in dem Land einfach wohlfühlt. Und diese Verbindung zu Japan hatte weitreichende Folgen.

Welche denn?

Es ist ein kulturell und wissenschaftlich sehr inspirierendes Land, ich bin seit der Postdoc-Zeit praktisch jedes Jahr dorthin zurückgekehrt – und habe dort auch meine Frau kennengelernt. Mittlerweile ist Japan zu meiner zweiten Heimat geworden. Natürlich ist nicht alles perfekt, aber mir gefällt die Kultur, das Land – und vor allem auch das Essen!

Aber die Verbindung ist weit mehr als nur privater Natur.

Das stimmt, es gibt eine starke wissenschaftliche Anbindung. Wir ermöglichen Studierenden, Promovierenden und Postdocs den Austausch zwischen der RUB und verschiedenen japanischen Universitäten, und veranstalten gemeinsame Symposia und Workshops. Natürlich gab und gibt es auch zahlreiche Forschungsk Kooperationen; außerdem war ich als Gastprofessor an den Universitäten in Osaka und Nagoya, und ich habe weltweit die erste Alumni-Vereinigung der Japan Society for the Promotion of Science mitgegründet. Wenn ich stichpunktartig all meine Kooperationen mit Japan auflisten würde, bekäme ich leicht einige DIN-A4-Seiten voll. Im Lauf der Zeit sind viele wertvolle Kontakte entstanden, und natürlich auch Freundschaften. Ein Kollege und Freund aus Osaka, Professor Satoshi Hamaguchi, ist aktuell Mercator-Fellow in unserem Sonderforschungsbereich.

Was bedeutet die Coronapandemie für Ihr Netzwerk?

Sie erschwert den Austausch ungemein. Natürlich gibt es viele Videokonferenzen, und wir konnten eines unserer Seminare durch den virtuellen Austausch so international gestalten wie noch nie: Alle Kontinente sind vertreten. Es fehlt eigentlich nur die Antarktis. Insbesondere sind aber auch Kollegen aus Japan beteiligt. Aber ohne Reisen und persönliche Kontakte ist man schon stark eingeschränkt. Überhaupt hat die Coronakrise unsere Forschung sehr gebremst. Nicht nur dass Gastwissenschaftler teils nicht anreisen konnten oder mehrwöchige Quarantänen über sich ergehen lassen mussten. Auch Spezialtechniker aus dem Ausland, die wir benötigen, um spezielles Laserequipment zu reparieren, konnten nicht anreisen. Ich hoffe sehr, dass der Austausch in Zukunft wieder leichter sein wird.

Text: jwe, Foto: dg

WIE COLA NACH EINEM JAHR NOCH PRICKELT

Wenige Nanometer dünne quarzähnliche Beschichtungen können die Haltbarkeit von Lebensmitteln vervielfachen, brillante OLED-Fernsehbilder ermöglichen oder Gase trennen. Beim Recycling kann man sie vernachlässigen.

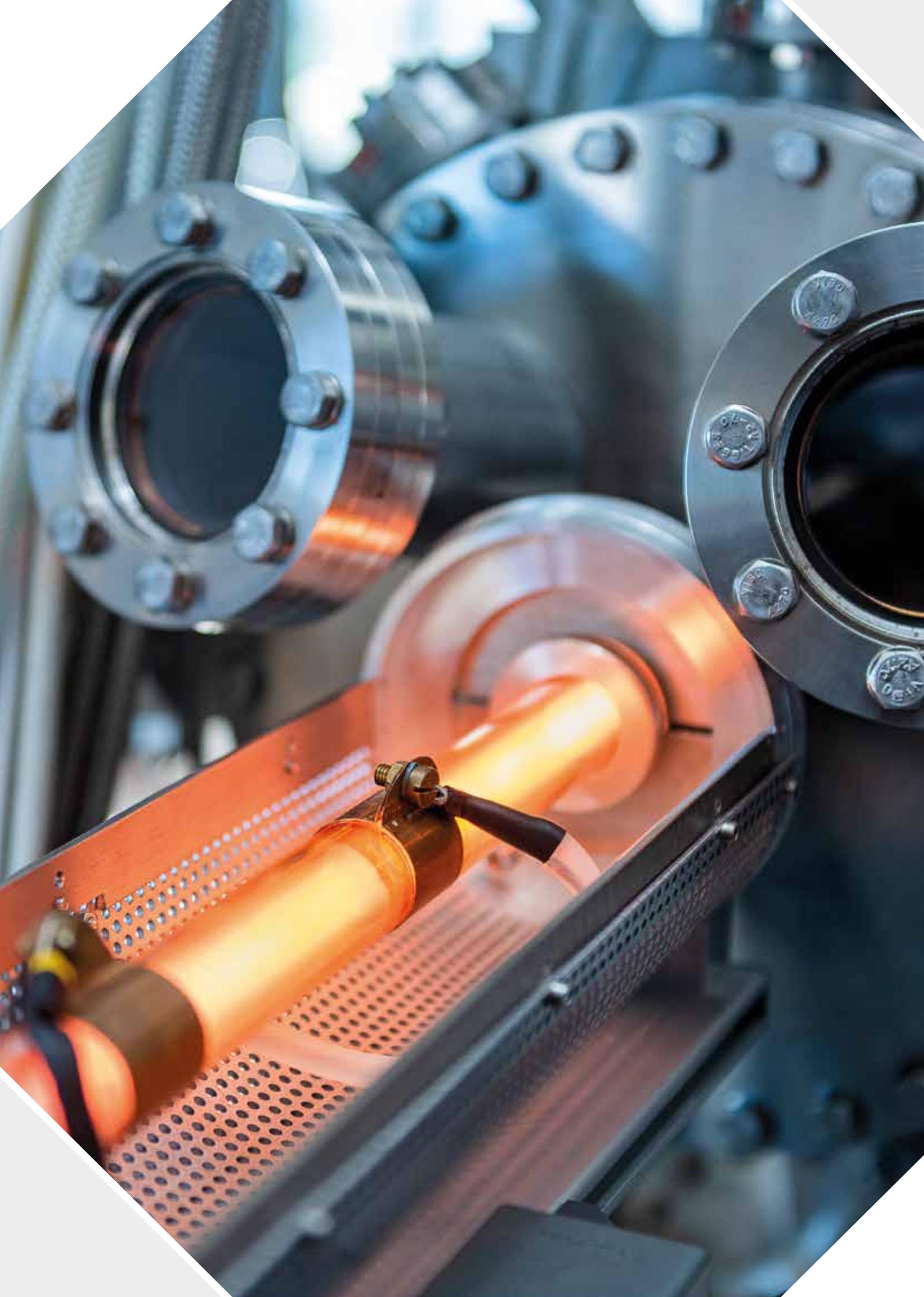
Wenn man Gasen oder Gasmischen Energie zuführt, kann ein Plasma entstehen, und darin geht es rund: Atome werden zu Ionen, freie Elektronen flitzen durch den Raum und stoßen mit allem zusammen, manche Inhaltsstoffe zerfallen, andere Stoffe bilden sich neu. Je nachdem, was man dem Ausgangsstoff hinzufügt, kann man Plasmen daher dafür nutzen, größere Verbindungen herzustellen. Aus Kohlenwasserstoffen und Siliziumwasserstoffen entstehen lange Molekülketten, die Polymere.

„Will man mit Plasmen, die zur Polymerbildung neigen, ätzen, ist das schlecht, weil die entstehenden Nanoteilchen dabei hinderlich sind“, erklärt Prof. Dr. Peter Awakowicz, Inhaber des Lehrstuhls Allgemeine Elektrotechnik und Plasmatechnik an der Ruhr-Universität Bochum. Sein Team hat sich die Sache aber zunutze gemacht. Sorgt man gezielt dafür, dass sich Polymere bilden und auf den das Plasma umgebenden Oberflächen abgelagern, kann man diese gezielt beschichten. Dank dieser sogenannten Plasma Enhanced Chemical Vapour Deposition, kurz PECVD, kann man zum Beispiel dünnste, gasdichte Beschichtungen auf die Innenseite von PET-Flaschen aufbringen, die dafür sorgen, dass sich der Inhalt länger hält, oder organische Leuchtdioden (OLED) vor Feuchtigkeit schützen, damit die Fernsehbildschirme lange funktionieren. Das und noch viel mehr ist nur möglich, weil die Plasmen kalt sind und somit die PET-Flasche oder andere zu beschichtende Oberflächen nicht durch Hitze beschädigen. Nur die schnellen Elektronen im Plasma sind heiß, und sie schädigen die Oberflächen nicht.

Die nur 20 bis 30 Nanometer dünne, glasartige Beschichtung des Kunststoffes sorgt dafür, dass 10- bis 100-mal weniger Gas durch die Flasche entweicht. Das verlängert die Haltbarkeit einer Limonade von bisher vier Wochen auf ungefähr ein Jahr. Die Methode ist auch für die Verpackungen von Milch und anderen Lebensmitteln, aber auch Medikamenten bis hin zu mikroelektronischen Bauelementen interessant.

„Diese Art der Beschichtung ist auch umweltfreundlich, denn die winzige Menge an Material kann man beim Recycling einfach vernachlässigen“, erklärt Dr. Marc Böke vom Lehrstuhl Experimentelle Physik II der RUB. Verbundmaterialien aus Kunststoff und Aluminium wie etwa Tetrapaks sind weitaus schwieriger wiederzuverwerten, weil sich die ▶

Eine kapazitiv gekoppelte Plasmaquelle (CCP) zur Erzeugung von Nanopartikeln. Die Nanopartikel werden in Kompositschichten für Filtermembranen eingebettet, um die Selektivität für verschiedene Gase zu steuern.





Runde Elektrode mit Substrathalteraufnahme, im Hintergrund eine Plasmasonde zur Bestimmung von Elektronendichte und Teilchenflüssen auf die Substrate

Marc Böke (links) und Peter Awakowicz im Labor

”
DIESE ART DER
BESCHICHTUNG
IST UMWELT-
FREUNDLICH.
“

Marc Böke

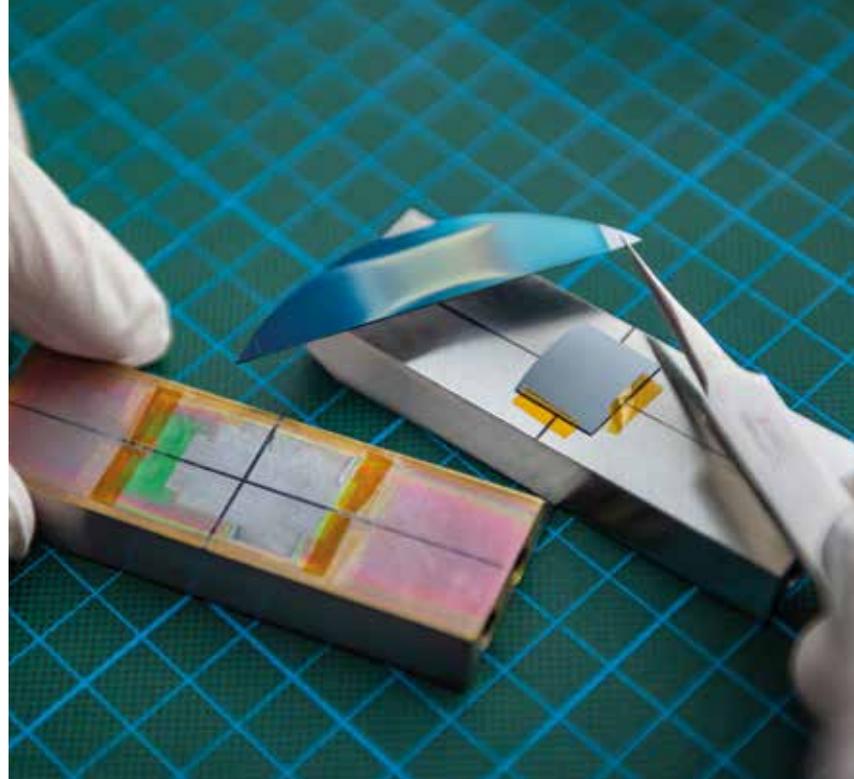
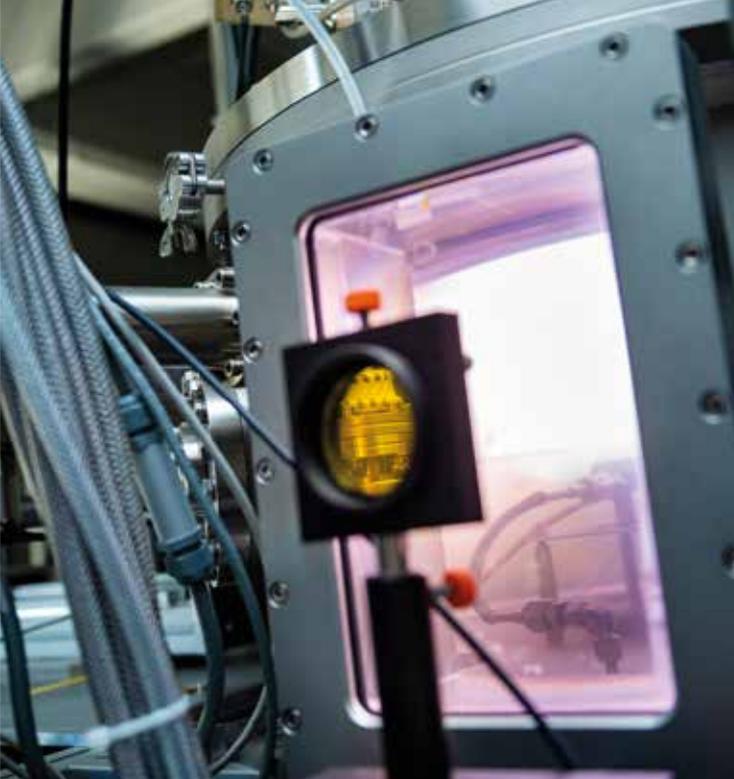
Komponenten nur sehr schlecht voneinander trennen lassen. Eine andere Anwendung der PECVD-Methode kann zum Beispiel die Beschichtung von Implantaten sein, die besser in den Knochen einwachsen als herkömmliche. Auch viele mikroelektronische Anwendungen gibt es. So lassen sich Transistoren mit ultradünnen Siliziumdioxid-Filmen im Plasma aufbringen.

Die Herausforderung liegt in der Kontrolle der Schichtbildung. „Die Schichten sollen nicht nur ultradünn, sondern auch absolut dicht, lückenfrei und gleichmäßig sein“, erklärt Marc Böke. Die Stellschrauben dafür sind vielfältig. Es kommt zum einen auf das Gasgemisch an. Ein besonders wichtiger Mitspieler dabei ist atomarer Sauerstoff. Über seinen Anteil lässt sich unter anderem steuern, ob sich aus weiteren Zusatzstoffen, die ins Plasma verdampft werden, anorganische Schichten bilden, wie das glasähnliche Siliziumdioxid, oder organische, die andere interessante Eigenschaften haben, etwa Oberflächen größere Biokompatibilität verleihen oder Gastrennung ermöglichen.

Auch der Druck, unter dem das Plasma betrieben wird, ist bedeutend. Bei höheren Drücken und entsprechenden Gasen kommt es zur Beschichtung von Oberflächen, bei niedrigeren eher zu Ätzvorgängen, die für die gesamte Mikroelektronik vom Handy bis zum modernen Auto von zentraler Bedeutung sind. Ebenso beeinflussen die Geometrie des Reaktors und die Wahl der Energiequelle, was im Plasma passiert und wie sich das auf die umgebenden Oberflächen auswirkt. So lässt sich ein entsprechendes Plasma zum Beispiel durch Mikrowellen zünden, aber auch durch induktiv oder kapazitiv eingekoppelte Hochfrequenz. „Generell sind verschiedene

Größen des Plasmareaktors möglich, bis hin zu den riesigen Ausmaßen, die man braucht, um ganze Fensterscheiben für Hochhäuser zu beschichten“, so Peter Awakowicz. Diese Beschichtungen dienen dazu, Infrarotstrahlung zu reflektieren, die sonst dazu führen würde, dass es dahinter bei Sonneneinstrahlung so heiß werden würde wie in einem Treibhaus. Durchgucken kann man aber immer noch. Mit dem dazu verwendeten Sputtern von dünnen Metallschichten auf Folien kann man auch im Durchschleuseverfahren arbeiten und somit viele Quadratmeter beschichten.

Erst nachdem die grundlegenden Mechanismen des hochleistungs-gepulsten Sputterns (HiPIMS) und PECVD in der ersten Phase des Sonderforschungsbereichs SFB/TR 87 vermessen und verstanden worden waren, konnten die For-



Induktiv gekoppeltes Hochleistungsplasma zur Untersuchung der Plasmavorreinigung und Aktivierung von Kunststoffsubstraten vor der Beschichtung

Verschiedene Proben in Vorbereitung: links eine PET-Folie, in der Mitte ein Siliziumwafer, auf den eine Siliziumdioxidsschicht mit eingebetteten Nanopartikeln abgeschieden wurde, und rechts ein unbehandelter Siliziumwafer

schungsteams darangehen, solche großflächigen Beschichtungen umzusetzen. „Die entsprechenden Messtechniken mussten wir teilweise erst entwickeln“, erzählt Awakowicz. „Wenn man einfach eine Messsonde in das Plasma hält, wird die unter Umständen selbst beschichtet und verliert ihre Funktion“, gibt er ein Beispiel.

Viele Aspekte der möglichen Prozesse konnten die Forscherinnen und Forscher nach und nach ergründen und perfektionieren. So werden PET-Flaschen vor der Beschichtung gereinigt und aktiviert, ebenfalls mittels Plasma. Aber auch hierbei verändert sich die Oberfläche der Flasche, was wiederum Einfluss auf die spätere Beschichtung hat. Messungen der Teilchenflüsse während der Reinigung förderten zutage, was dabei passiert: Wird die Benetzbarkeit erhöht? Und wenn ja wie? Verändert sich die Oberflächenenergie? Ab welcher Dauer der Behandlung wird die Oberfläche aufgeraut?

„Eine zu raue Oberfläche kann man mit einer ultradünnen Schicht nicht mehr gleichmäßig abdecken“, schildert Marc Böke. Wenn man bei der Reinigung alle diese Aspekte einbezieht und den Prozess optimal ablaufen lässt, hat das einen erheblichen Einfluss auf den Erfolg der späteren Beschichtung: „Wir konnten die Dichtigkeit, die durch die Beschichtung anfangs bei Faktor 100 lag (je nach Substratmaterial), durch die richtige Einstellung der vorherigen Reinigung auf den Faktor 500 steigern“, so Peter Awakowicz.

Die detaillierten Kenntnisse über die Prozesse im Plasma und die daraus resultierenden Beschichtungen erlauben es inzwischen auch, dehnbare Folien mit gasdichten Dünnschichten zu überziehen. Dank einer dazwischenliegenden Pufferschicht konnte das Team um Marc Böke die Toleranz

der Schicht gegenüber der Dehnung der Folie von ursprünglich etwa drei auf rund sechs Prozent erhöhen. Auch diese Anwendung ist zum Beispiel für die Lebensmittelindustrie interessant, da die dichte Beschichtung Inhaltsstoffe aus der Folie wie die gefürchteten Weichmacher daran hindern, in das Lebensmittel einzudringen.

Die neueste Anwendung, an der zurzeit gearbeitet wird, macht aus der Not eine Tugend: Wünscht man sich eigentlich möglichst dichte und fehlerfreie Schichten, sind Fehler wie kleinste Poren in der Beschichtung kaum zu vermeiden. Sie erlauben es den Forschungsteams, mittels Plasmabeschichtung nicht- quellende Filtermembranen zu entwickeln, die bisher unbekannte Eigenschaften zeigen. Sie können Wasser entsalzen oder Gase voneinander trennen, etwa Sauerstoff von CO_2 . „Normalerweise gilt: Je selektiver eine Membran ist, desto geringer ist deren Transmission, das heißt desto ineffizienter ist der Prozess“, erläutert Marc Böke. „Mit der Plasmabeschichtung können wir die Porenbildung aber so steuern, dass die Selektivität nicht mehr so stark auf Kosten der Transmission beziehungsweise Effizienz geht.“

Die polaren Eigenschaften der Membran können die Forscher innerhalb des SFB/TR 87 simulieren und maßschneidern. So gelingt es, dass bestimmte Moleküle einfacher durch die Membran treten können. „Wassermoleküle zum Beispiel werden dazu gebracht, dass sie ihren eigentlichen Winkel aufgeben, sich praktisch flachlegen und so durch die Pore gleiten“, beschreibt Peter Awakowicz. „So etwas konnte man vorher nicht gezielt einstellen.“

Text: md, Fotos: dg

Ausschnitt eines Plasmasimulationsprogramms, das in der Programmiersprache C geschrieben ist. (Foto: dg)

```
Text Editor
+(*Species).Electrons.ProcessE2Signal(Energy)
+(*Species).Electrons.ProcessE3Signal(Energy)
+(*Species).Electrons.ProcessE4Signal(Energy)
+(*Species).Electrons.ProcessE5Signal(Energy)
CollisionParameter=sqrt(Energy/(*Species).Electrons.Mass);
CollisionParameter>MaxCollisionParameter;
MaxCollisionParameter=CollisionParameter;

(*Species).Electrons.MaxCollisionParameter=MaxCollisionParameter;
CollisionFrequency=GasDensity*MaxCollisionParameter;
(*Species).Electrons.CollisionProbability=1.0*exp(-CollisionFrequency);
CollisionExtraFactor=0.5;
CollisionFrequencyElectrons=CollisionFrequency;

// when ions */
if (GasFlag==1)
    printf("Generating %d argon ions ... \n",InitialNumber);
    (*Species).Ions[0].Mass=ArgonMassFactor*AtomicMass;
    (*Species).Ions[0].Charge=ArgonIonAtomicNumber*ElementaryCharge;
}
if (GasFlag==2)
    printf("Generating %d helium ions ... \n",InitialNumber);
    (*Species).Ions[0].Mass=HeliumMassFactor*AtomicMass;
    (*Species).Ions[0].Charge=HeliumIonAtomicNumber*ElementaryCharge;
}
if (GasFlag==3)
    printf("Generating %d neon ions ... \n",InitialNumber);
    (*Species).Ions[0].Mass=NeonMassFactor*AtomicMass;
    (*Species).Ions[0].Charge=NeonIonAtomicNumber*ElementaryCharge;
}
(*Species).Ions[0].Number=InitialNumberParticles;
(*Species).Ions[0].InitialEnergy=InitialIonTemperature;
(*Species).Ions[0].PositionX1=(double*)malloc(MaxX);
(*Species).Ions[0].PositionX10ld=(double*)malloc(MaxX);
(*Species).Ions[0].PositionX2=(double*)malloc(MaxX);
(*Species).Ions[0].PositionX20ld=(double*)malloc(MaxX);
(*Species).Ions[0].PositionX3=(double*)malloc(MaxX);
(*Species).Ions[0].PositionX30ld=(double*)malloc(MaxX);
(*Species).Ions[0].Velocity1=(double*)malloc(MaxV);
(*Species).Ions[0].Velocity2=(double*)malloc(MaxV);
(*Species).Ions[0].Velocity3=(double*)malloc(MaxV);
vth=sqrt((*Species).Ions[0].Charge*(*Species).Mass);
for (i=0; i<(*Species).Ions[0].Number; i++)
{
    MaxwellDistribution(&(*Species).Ions[0].Velocity1,
    (*Species).Ions[0].PositionX1[i]=LengthX,
    (*Species).Ions[0].PositionX10ld[i]=LengthX,
    (*Species).Ions[0].PositionX2[i]=LengthX,
    (*Species).Ions[0].PositionX20ld[i]=LengthX,
    (*Species).Ions[0].PositionX3[i]=LengthX,
    (*Species).Ions[0].PositionX30ld[i]=LengthX);
}
```

WAS GENAU AN DER GRENZSCHICHT ZWISCHEN PLASMA UND OBERFLÄCHE GESCHIEHT

Im kleinsten Detail berechnen Forschende die Vorgänge in Plasmen und in Grenzschichten zwischen Plasmen und Oberflächen. So wollen sie verstehen, was geschieht, und es sich besser zunutze machen.

Plasmen werden schon seit Jahrzehnten mit großem Erfolg in der Industrie genutzt. Ihre Anwendung basierte jedoch in vielen Fällen auf Versuch und Irrtum. Ein tiefergehendes Verständnis der Prozesse, die in den angeregten Gasen teilweise in kürzester Zeit und auf winzigen Längenskalen ablaufen, fehlte bislang weitgehend. Auf dieses neue Gebiet wagen sich Forschende aus Bochum und Ulm im Sonderforschungsbereich 1316 „Transiente Atmosphärendruckplasmen“ gemeinsam vor.

Ihre Arbeitsgebiete ergänzen sich dabei: Während Prof. Dr. Thomas Mussenbrock, Inhaber des Lehrstuhls für Angewandte Elektrodynamik und Plasmatechnik der RUB, das Plasma als Ganzes im Blick hat, stellt Prof. Dr. Timo Jacob, Leiter des Instituts für Elektrochemie der Universität Ulm, atomare Abläufe in den Mittelpunkt. „Wir berechnen Prozesse an verschiedenen Enden der Zeit- und Längenskalen und versuchen, die bisherige Lücke dazwischen zu füllen“, fasst Mussenbrock zusammen.

Timo Jacob ist der Spezialist für Grenzflächen zwischen Plasmen und ihrer Umgebung. Diese Grenze kann sowohl zwischen Plasma und Feststoff, aber auch zwischen Plasma und Flüssigkeit verlaufen. „Jemand, der eine Oberfläche mittels Plasma beschichten oder verändern will, sieht sich vor allem an, welche Teilchen mit welcher Energie aus dem Plasma darauf auftreffen“, erklärt er. Dieser Prozess scheint einfach und berechenbar. Sein Team geht aber wesentlich weiter ins Detail. Denn in Plasmen können sich auch komplizierte Moleküle bilden, die in spezifischen angeregten Zuständen vorliegen. Diese können dann sowohl die Eigenschaften und die Struktur von katalytischen Oberflächen verändern oder auch direkt aktiv Einfluss auf Reaktionen an der Grenzfläche nehmen. Über solche Details gab es bisher kaum Erkenntnisse. „Dafür mussten wir erst einmal das Handwerkszeug entwickeln“, so Timo Jacob.

Er und sein Team etablierten Methoden, die beschreiben können, wie das Plasma die Moleküle während einer Reaktion verändert. Aus den Bewegungen der Moleküle zum Beispiel kann ein Effekt auf die Grenzfläche resultieren, der zwar sehr instabil ist, aber interessant für katalytische Reaktionen. ►



Timo Jacob von der Universität Ulm ist Partner im Sonderforschungsbereich und arbeitet eng mit dem Bochumer Forschungsteam zusammen. (Foto: Elvira Eberhardt/Uni Ulm)

”

DAS ZUSAMMENBRINGEN DER BEIDEN ENDEN DER ZEIT- UND LÄNGENSKALEN IST WISSENSCHAFTLICHES NEULAND.

“

Thomas Mussenbrock

Die so berechneten Prozesse laufen auf der Ångström- oder Nanometerskala binnen Sekundenbruchteilen ab. Je weniger Effekte man zeitgleich berechnen muss, desto genauer kann die Simulation werden. „Unsere hochgenauen Berechnungen beziehen maximal 300 bis 400 Atome ein, semi-empirische dynamische Simulationen dann sogar mehrere 100.000“, erklärt der Forscher. „Und dafür nutzen wir teils eigens angeschaffte Rechencluster oder Großrechner an Hochleistungsrechenzentren.“ Der Aufwand wächst meist kubisch, das heißt bei doppelt so vielen Atomen, die in die Berechnung einfließen sollen, verachtfacht sich der Rechenaufwand.

Die gewonnenen, grundlegenden Erkenntnisse sollen unter anderem helfen, Plasmen für neue Anwendungen nutzbar zu machen, darunter besonders wichtig: katalytische Prozesse. Als Modell nutzen die Forschenden dabei sowohl die Reduktion von Kohlendioxid (CO_2) als auch die Zerlegung von

verhältnismäßig einfachen Kohlenwasserstoffen am Beispiel von n-Butan. Für eine Nutzung genügt es natürlich nicht, nur wenige Hundert Atome zu betrachten. Hier ergänzt die Arbeit von Thomas Mussenbrocks Team das Gesamtbild. Seine Längenskala ist eine Milliarde Mal größer als die von Timo Jacob. Quantenmechanische Effekte, die auf der atomaren Ebene von Bedeutung sind, brauchen hier nicht mehr explizit berücksichtigt zu werden. Es geht darum, die Plasmadynamik und die Plasmachemie abzubilden. „Wir schauen uns das Plasma basierend auf der klassischen Physik an“, sagt Mussenbrock. Die Methoden sind hierfür bekannt und gut verstanden, aber die Datenlage ist extrem dünn.

Eine besondere Herausforderung liegt darin, dass industrielle Prozesse mit Plasmen möglichst bei Atmosphärendruck und am besten in der Luft stattfinden sollen. „Bei diesem verhältnismäßig hohen Druck spielen viele Wechsel-



wirkungen eine Rolle“, erklärt Mussenbrock. Was reagiert wie stark mit welchen Molekülen und Atomen? Ausgehend von den Ergebnissen der Berechnungen von Timo Jacob skaliert sein Team die Simulation hoch. Die Ergebnisse lassen sich mit Experimenten abgleichen – Abweichungen müssen verstanden und erklärt werden. „Das Zusammenbringen der beiden Enden der Zeit- und Längenskalen ist wissenschaftliches Neuland“, unterstreicht Thomas Mussenbrock. Die Teams leisten daher gemeinsam Pionierarbeit. Vielleicht kann es irgendwann dank der Erkenntnisse gelingen, großindustrielle Prozesse wie etwa die Ammoniakherstellung energieeffizienter zu machen.

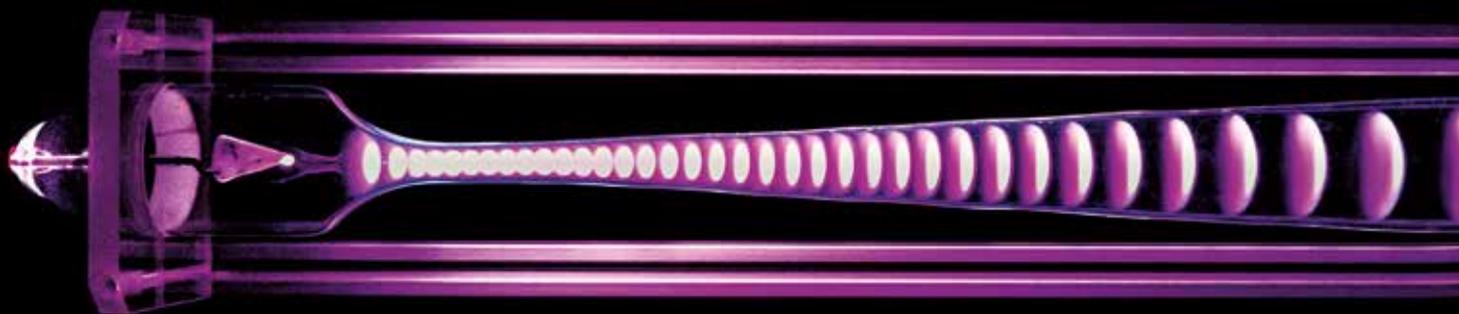
md

- 2
- 1 Die grafische Darstellung von Simulationsergebnissen zeigt die räumliche Verteilung der elektrischen Feldstärke im Bereich über einer Hochspannungselektrode einer dielektrischen Oberflächenbarriereentladung. (Foto: dg)
 - 2 Prof. Dr. Thomas Mussenbrock (rechts) und Dr. Ihor Korolov diskutieren die Simulationsergebnisse. (Foto: dg)

PLASMEN FÜR ALLE

Zahlreiche Alltagstechnologien würde es ohne Plasmen nicht geben. Die Teams der Sonderforschungsbereiche wollen das Wissen über ihre Relevanz in die Öffentlichkeit tragen.

MIT DEM PLASMATRUCK ZUR SCHULE



Die Plasmaforscherinnen und -forscher der RUB engagieren sich seit vielen Jahren, um Schülerinnen und Schülern verschiedener Jahrgangsstufen Plasmen näherzubringen. „Im Physikunterricht werden zwar teils Experimente gemacht, bei denen Plasmen im Einsatz sind, aber das Wort Plasma taucht im Lehrplan gar nicht auf“, erklärt Science Managerin Dr. Marina Prenzel. Um Schülerinnen und Schüler der Oberstufe mit dem Konzept eines Plasmas vertraut zu machen, hat das SFB-Team in Zusammenarbeit mit Physik-Didaktikern um Prof. Dr. Heiko Krabbe verschiedene in Boxen verstaubare Plasma-Experimente konstruiert, die handlich im Kleinbus transportiert werden können. Mit ihnen können die Forschenden abwechslungsreiche 90-minütige Workshops in Oberstufenklassen abhalten, bei denen Schülerinnen und Schüler selbst experimentieren und verschiedene Anwendungsbereiche von Plasmen kennenlernen können. „So wollen wir ein Bewusstsein dafür schaffen, dass Plasmen extrem wichtig für viele unserer heutigen Technologien sind“, sagt Marina Prenzel.

Ein Experiment aus dem Plasmatruck: Zwischen zwei Elektroden wird ein Plasma gezündet. In regelmäßigen Abständen entstehen durch beschleunigte Elektronen Plasmaschichten.

SCHÜLER BEWERTEN FORSCHUNGSPROJEKTE

Nicht nur, was ein Plasma eigentlich ist und wo es zum Einsatz kommt, sollen Schülerinnen und Schüler erfahren können. Das SFB-Team baut derzeit zusammen mit der Physik-Didaktik auch ein Projekt auf, das die Bewertungskompetenz der Jugendlichen und jungen Erwachsenen fördern soll. Hierbei sollen Schülerinnen und Schüler Einblicke in verschiedene Plasmaforschungsvorhaben bekommen und bewerten, welche dieser Projekte sie fördern würden. Ziel ist dabei auch zu vermitteln, wie Plasmen dazu beitragen können, die Herausforderungen der Klimaerwärmung zu meistern.

136
Vortragende
aus 16
Ländern
20 Jahre

ÜBER 20 JAHRE PLASMA SUMMER SCHOOL

Seit über 20 Jahren organisieren Plasmaforscherinnen und -forscher der RUB einmal im Jahr eine internationale Summer School für Master-Studierende und Promovierende. Sie ging ursprünglich aus einem europäischen Erasmus-Projekt hervor, das die Technische Universität Eindhoven federführend eingeworben hatte. Als die Fördergelder im Jahr 2000 ausliefen, engagierte sich das RUB-Team für die Fortsetzung. „Die Schule ist eigentlich immer über 90 Teilnehmerinnen und Teilnehmer sowie die Vortragenden kommen aus der ganzen Welt. Ziel der siebentägigen Veranstaltung ist es, ihnen Einblicke in alle wesentlichen technischen relevanten plasmatischen Forschungsdes Fachs zu ermöglichen. „Einige der ehemaligen Teilnehmerinnen und Teilnehmer leiten mittlerweile selbst Plasmalabore“, erzählt Böke. Das RUB-Team hofft, das erfolgreiche Format trotz der Coronasituation bald wieder in Präsenz fortführen zu können.

Weitere Informationen: www.plasma-school.org

Über 1800
Teilnehmende
aus 40
Ländern

VIRTUELLE FÜHRUNGEN DURCH DIE PLASMALABORE

Auch wenn der direkte Kontakt zur Öffentlichkeit während der Coronapandemie nur sehr eingeschränkt möglich ist, hat sich das SFB-Team etwas einfallen lassen: Die Forschenden fertigten 360 Grad-Aufnahmen ihrer Labore an. Nicht nur Schulklassen, sondern auch interessierte Bürgerinnen und Bürger haben so die Möglichkeit, an geführten Touren durch die Labore teilzunehmen. Am 27. Oktober 2021 findet um 16 Uhr eine öffentliche Führung statt. Interessierte können sich unter sfb1316@rub.de kostenlos anmelden und erhalten dann einen Link zur virtuellen Tour zugeschickt.

Text: jwe, Foto: dg

18 verschiedene
Öffentlichkeitsarbeitsprojekte
für Menschen ab sechs Jahren
für: breite Öffentlichkeit,
Schülerinnen und Schüler,
Studierende und Forscher,
Forschende

REDAKTIONSSCHLUSS



Eine leuchtende Tasse – dank Plasmen kein Problem. Auf dieses Objekt stieß das SFB-Team durch Zufall und integrierte es kurzerhand in seine Experimente für Schülerinnen und Schüler. Im Untersetzer der Tasse befindet sich eine Spule, an die Wechselspannung angelegt ist. So wird ein elektrisches Feld induziert, das die freien Elektronen in der Gasschicht zwischen den Glaswänden beschleunigt. Sie stoßen mit Gasatomen zusammen, die dadurch angeregt und ionisiert werden. Positive und negative Ladungen der Gasteilchen werden kurzzeitig getrennt. Bei der Abregung der Gasatome wird ein Lichtteilchen frei – die Tasse scheint zu leuchten.

IMPRESSUM

HERAUSGEBER: Sonderforschungsbereich 1316 „Transiente Atmosphärenendruckplasmen – vom Plasma zu Flüssigkeiten zu Festkörpern“ und Sonderforschungsbereich/Transregio 87 „Gepulste Hochleistungsplasmen zur Synthese nanostrukturierter Funktionsschichten“ in Verbindung mit dem Dezernat Hochschulkommunikation der Ruhr-Universität Bochum (Hubert Hundt, v.i.S.d.P.)

REDAKTIONSANSCHRIFT: Dezernat Hochschulkommunikation, Redaktion RUBIN, Ruhr-Universität Bochum, 44780 Bochum, Tel.: 0234/32-25228, Fax: 0234/32-14136, rubin@rub.de, news.rub.de/rubin

REDAKTION: Dr. Julia Weiler (iwe, Redaktionsleitung), Meike Drießen (md), Lisa Bischoff (lb)

INHALTLICHE KOORDINATION: Dr. Marina Prenzel, Dr. Marc Böke, Prof. Dr. Achim von Keudell, Prof. Dr. Peter Awakowicz

FOTOGRAFIE: Damian Gorczany (dg), Hofsteeter Str. 86, 44809 Bochum, Tel.: 0176/29706008, damiangorczany@yahoo.de

FOTOGRAFIE COVER, UMSCHLAG INNEN UND INHALTSVERZEICHNIS: Damian Gorczany

GRAFIK, ILLUSTRATION, LAYOUT UND SATZ: Agentur der RUB, www.rub.de/agentur

DRUCK: Lensing Druck GmbH & Co. KG, Feldbachacker 16, 44149 Dortmund, Tel.: 0231/80592000, info@lensingdruck.de

AUFLAGE: 4.500

BEZUG: Die reguläre Ausgabe von Rubin erscheint zweimal jährlich und ist erhältlich im Dezernat Hochschulkommunikation der Ruhr-Universität Bochum. Das Heft kann kostenlos abonniert werden unter news.rub.de/rubin/abo. Das Abonnement kann per E-Mail an rubin@rub.de/rubin/abo. Das Abonnement kann per Mail auch bei Research Department „Plasmas with Complex Interactions“ (Dr. Marina Prenzel, rd-plasma@rub.de),

ISSN: 0942-6639

Nachdruck bei Quellenangabe und Zusenden von Belegexemplaren

WISSENSCHAFT ZUM NULLTARIF

Forschungsmagazin Rubin kostenlos abonnierbar

**RUBIN
ABONNIEREN**

→ news.rub.de/rubin/abo