



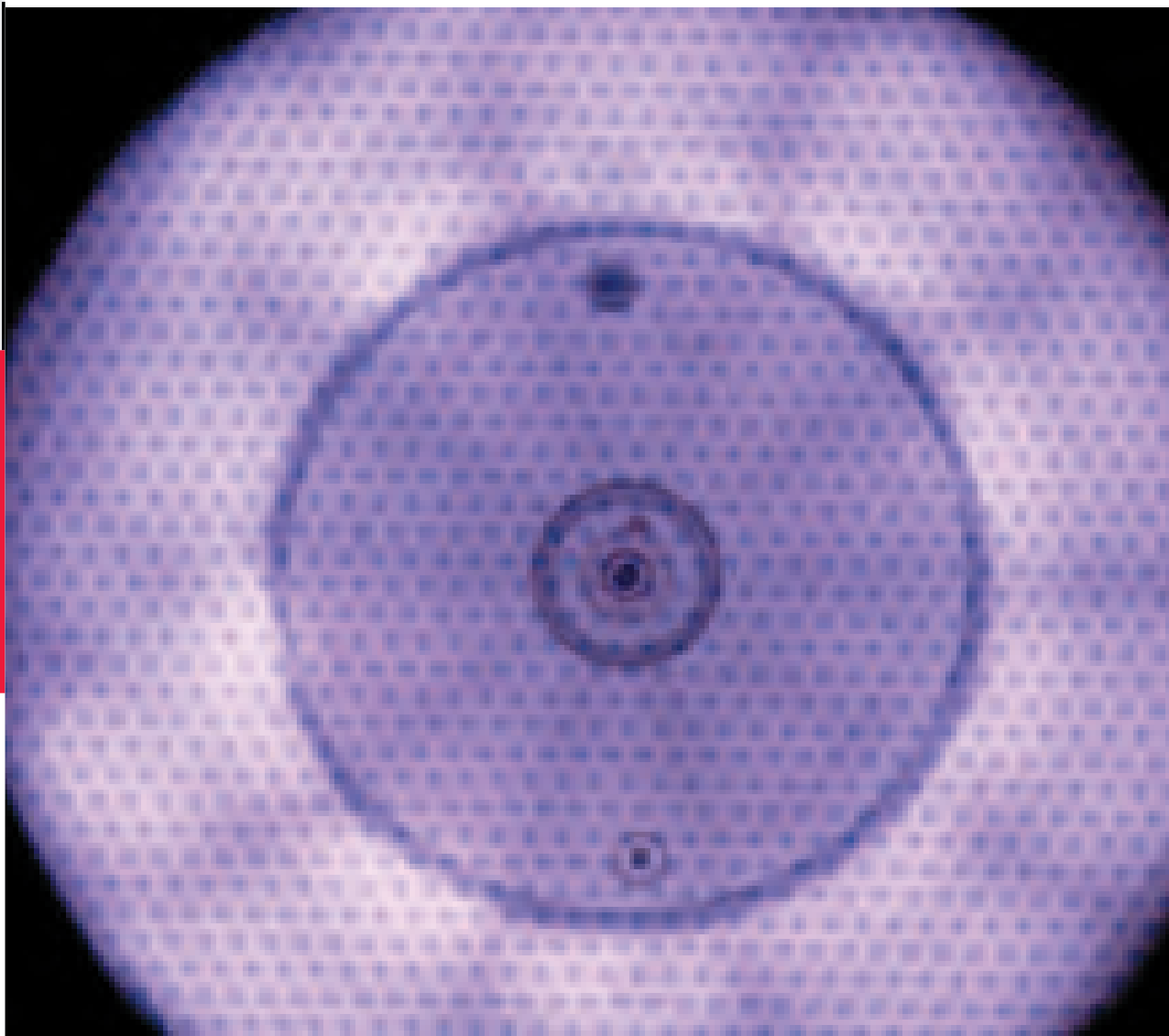
Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

bmb+f

Plasmatechnik

Prozessvielfalt + Nachhaltigkeit

BMBF



Impressum

Herausgeber:

Bundesministerium für
Bildung und Forschung

Referat Öffentlichkeitsarbeit

53170 Bonn
Telefax: 0228/573917
e-mail: information@bmbf.bund.de
Internet: <http://www.bmbf.de>

Mai 2000

Fachliche Beratung:

Dr. Karin Reichel
Dr. Ralf Fellenberg
VDI-Technologiezentrum
Düsseldorf

Text:

Rolf Kickuth
Gaiberg bei Heidelberg

Grafik, Layout, Satz:

Agentur Rubikon
Gaiberg
<http://www.rubikon.de>

Druck:

Roco Druck GmbH
Wolfenbüttel

Bild- und Grafiknachweis:

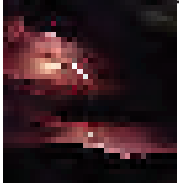
siehe Umschlagseite 3

*Gedruckt auf chlorfrei wiederaufbereitetem
Recyclingpapier*

Inhalt

Impressum	2
Vorbemerkung	3
Inhalt	4

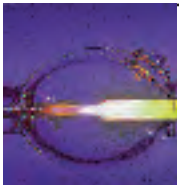
Einleitung



Plasma: Forschung von der Natur zum Markt

Plasma: Heiße Kälte schont Ressourcen	6
Blick zurück in Dunkelräume	8
In der Vielfalt liegt der Reiz	9
Quellen für vielfältige Anwendungen	11

Plasmen: allgegenwärtig



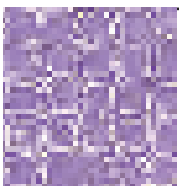
Heller und weiter mit weniger Energie

Sparen ohne Verzicht	13
Hohe Lichtausbeute, hell und farbecht	14
Umweltkonforme Mobilität	16

Nachhaltiger Oberflächenzauber

Aktiviert für neue Kontakte	17
Textilien trimmen auf Funktion und Filzfreiheit	17
Harte Schalen, weiche Kerne	19
Mehr Sein als Schein: Unsichtbare Strukturen	20

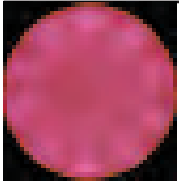
Direkt beim Menschen



Vermitteln und Bewahren

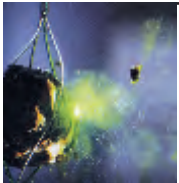
Fließende Übergänge schaffen Akzeptanz	23
Biomaterial-Haftung nach Maß	24
Sanfte Schärfe gegen Mikroorganismen	25

Die sanfte Macht



Kalte Reaktionen

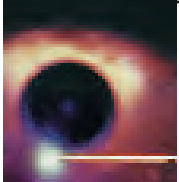
Prozessgase mit Verbindungsdrang	27
Pulsgetrieben in den Entsorgungstrakt	29



Eindringliches Verhalten

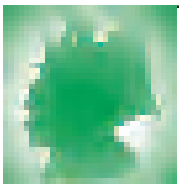
Power mit Puls	30
Schmelzen und Bohren	31

Mit F & E zu neuen Höhen



Drum prüfe, was sich bindet

Wenn Wand und Teilchen wechselwirken	33
Nicht linientreu, doch existent	35
Massiv Arbeit – nicht nur für Computer	36



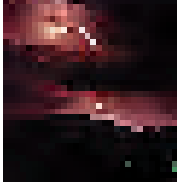
Plasmatechnik in Deutschland

Chance zur Technologieführerschaft	37
Förderung der Plasmatechnik	38



Glossar

A - G	39
H - W	40



Einleitung

Plasma: Forschung von der Natur zum Markt

Polarlicht über Lappland



Plasma: Heiße Kälte schont Ressourcen

Plasma ist keine Erfindung des Menschen. Man findet es in den Sternen einschließlich der Sonne, im Schweif von Kometen, in Gewitterblitzen, und auch die Polarlichter sind Plasma-Erscheinungen. Das Wort „Plasma“ stammt aus dem Griechischen und bedeutet „Gebilde“, aber auch „Geformtes“. Nebenbei: Zellfreie Blutflüssigkeit sowie ein grüner Halbedelstein, eine Jaspis-Art, haben auch die Bezeichnung „Plasma“.

Technische Plasmen finden heute mannigfaltige Einsatzmöglichkeiten in den unterschiedlichsten Bereichen der Produktion wie auch in Gebrauchsgegenständen des modernen Alltags. Entscheidend für ihre breit gefächerten Einsatzmöglichkeiten sind umfangreiche Forschungs- und Entwicklungsarbeiten auf diesem jungen Gebiet der Technik.

Aufgrund der aufwendigen Erzeugung von Plasmen meist über elektrische Entladungen in evakuierten Glasapparaturen sowie wegen der Komplexität der Plasmaerscheinungen war der Plasmaphysik lange Zeit eine exotische Nische beschieden. Das zunehmende Verständnis der Vorgänge in und um Plasmen hat nun aber eine Querschnittstechnologie par excellence hervorgebracht. Zu deren Hauptmerkmalen zählt der nachhaltige Einsatz von Rohstoffen und Energie, also die Ressourcenschonung – was der Umwelt, aber auch der Ökonomie entgegenkommt. Hohe Flexibilität und inhärente Sicherheit sind weitere Merkmale von Plasmaprozessen.

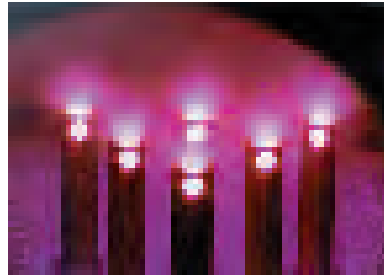
Plasma wird als vierter Aggregatzustand der Materie bezeichnet. Heizt man feste Materie auf, verwandelt sie sich typischerweise erst in eine Flüssigkeit, dann in ein Gas. Wenn dem Gas weiter Energie

zugeführt wird, dann wird es elektrisch leitend, obwohl es nach aussen hin mehr oder weniger neutral bleibt. Das liegt daran, dass sich Elektronen von den Atomen bzw. Molekülen des Gases lösen. In Plasmen liegt ein Gemisch von meist positiv geladenen Ionen, Elektronen und von Neutralteilchen vor.

Jetzt kommt der wohl wichtigste Trick von nicht thermischen Nieder-temperatur-Plasmen, von denen in dieser Broschüre die Rede sein soll (die extrem heißen Plasmen der Fusionsforschung bleiben außen vor): Während die Temperatur von Ionen und Neutralteilchen kaum einige 100 Grad Celsius beträgt, entspricht die Energie der Elektronen in solchen Plasmen einer Temperatur von einigen 10.000 Grad Celsius! Sie stellen daher hochreaktive Werkzeuge dar, die einen schonenden Einsatz ohne hohen Energieaufwand erlauben. Diese „heiße Kälte“ eröffnet ungeahnte Prozessmöglichkeiten und damit auch Marktchancen.

Der besondere Zukunftswert der Plasmatechnik wird durch ihr ausgesprochenes Potenzial für energie- und umweltschonende Prozesse, die geringen Prozesstemperaturen, die Flexibilität, technologische Breitenwirksamkeit und ausgeprägte **Umweltverträglichkeit** bestimmt. Hierdurch ist die Plasmatechnik prädestiniert für nachhaltige Entwicklungen und eröffnet durch innovative Produkte und Verfahren neue **unternehmerische Chancen**. Dies gilt insbesondere für die innovatorientierten kleinen und mittleren Unternehmen. Insofern wird die Plasmatechnik eine wesentliche Grundlage für die Schaffung von Arbeitsplätzen der Zukunft darstellen.

Plasma-
reinigung von
Kupfer-
röhrchen



2005

50 Mrd. DM

40 Mrd. DM

30 Mrd. DM

20 Mrd. DM

1995

Abschätzungen von Experten ergeben, dass das Marktvolumen von Produkten, die durch die Plasmatechnologie erst möglich werden, sich in Deutschland auf ungefähr 45 Milliarden € pro Jahr beläuft; weltweit schätzt man es auf etwa 500 Milliarden € pro Jahr. Besonderes Augenmerk verdient das Potenzial der Plasmatechnik für die gesamtwirtschaftliche Entwicklung: Den Auswertungen von Umfragen entsprechend wird Plasmatechnik die

Rate wirtschaftlichen Wachstums in Deutschland und vergleichbaren Industrieländern um den Anteil von etwa zehn Prozent positiv beeinflussen. Dies geschieht über marktstrategische Maßnahmen der Produktpflege sowie über Produktinnovationen.

Der Markt für Anbieter der Plasmatechnik selbst, also derjenige für Hersteller von Plasmaquellen und -anlagen sowie von Geräten zur Plasmaanalytik ist natürlich kleiner. Er betrug 1995 weltweit geschätzt sieben Milliarden € und soll im Jahre 2005 bei knapp 27 Milliarden € liegen. Das entspricht einer **mittleren Wachstumsrate von 15 Prozent pro Jahr**, weit über der durchschnittlichen Wirtschaftswachstumsrate.

Obwohl die Plasmatechnik heute in vielen Bereichen – bei Lampen ebenso wie in der Oberflächenveredelung – bereits genutzt wird, ist sie eine **junge Technologie**, deren Potenzial bei weitem noch nicht ausgeschöpft wird. Beispiele dafür sind Plasmareaktoren für den Umweltschutz wie etwa die Autoabgasreinigung, funktionale Beschichtungen von Architekturglas, Quecksilber-freie Lampen, die Plasmabehandlung von Materialien für den Lebensmittelbereich, und nicht zuletzt auch Nanomaterialien, die sich neben anderen Verfahren mit Hilfe von Plasmen erzeugen lassen.

Das BMBF unterstützt Entwicklungen in diesen wie anderen vielversprechenden Bereichen durch gezielte Förderungen von Forschungsprojekten, um die Chancen für die auf diesem Gebiet innovativen deutschen High-Tech-Firmen zu wahren und zu stärken. Häufig handelt es sich dabei um kleine und mittlere Unternehmen, die sich auch aus dem Umfeld von Universitäten bzw. Großforschungseinrichtungen entwickelt haben.

2000 ~ 2000

Alleine in Deutschland arbeiten weit mehr als 200 Firmen auf dem Gebiet der Niedertemperatur-Plasmatechnik.

1983

In Japan werden Substrate in einem Mikrowellenplasma mit polykristallinen Diamantschichten überzogen.

1953

Werner Schmeltenmeier entdeckt Diamanten als Produkt von Acetylen-Gasentladungen.

1950

1938

Leuchtstofflampen für den Markt verfügbar

1923

Irving Langmuir findet Plasmaschwingungen.

1900 ~ 1900

1900

Joseph John Thomson entschleierte die Natur der Kathodenstrahlen. Eugen Goldstein beweist die Existenz der „Kanalstrahlen“.

~ 1880

William Crookes entdeckt das Plasma.

1850

1857

Werner von Siemens entwickelt den Ozonisorator, die erste Anwendung technischer Plasmen.

~ 1820

Michael Faraday stellt die Frage nach dem 4. Aggregatzustand der Materie.

1800

~ 1780

Georg Christoph Lichtenberg erzeugte die nach ihm benannten Figuren (siehe Hintergrundbilder dieses Textes).

Blick zurück in Dunkelräume

Die Historie der Plasmatechnik reicht zurück bis ins 18. Jahrhundert. Der Physiker und Schriftsteller Georg Christoph Lichtenberg (1742 – 1799), der 1770 Professor für Mathematik in Göttingen wurde, erzeugte besonders schöne Oberflächenentladungen. Er brachte dazu zwischen eine Spitzenelektrode und eine Metallplatte eine isolierende Platte. Bestreute man diese zum Beispiel mit Farnsporen und legte zwischen den Elektroden eine Spannung an, bildeten sich daran Büschelentladungen aus.

Die Versuche von Lichtenberg waren nur eine Darstellung von Phänomenen; erste Erklärungsversuche, die auf den Plasma-Zustand ausgerichtet waren, gingen von dem Londoner Experimentator Michael Faraday (1791 – 1867) aus, dessen bedeutendste Entdeckung 1821 die des Elektromagnetismus war. In den Jahren 1816 bis 1819 hatte er versucht, die Eigenschaften der Materie zu extrapolieren: Was passiert, wenn Materie über den festen, flüssigen und dann gasförmigen Zustand – den drei weithin bekannten Aggregatzuständen der Materie – hinaus erhitzt wird? Gibt es einen **vierten Aggregatzustand**?

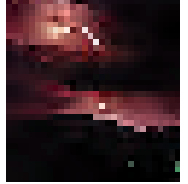
Faraday konnte darauf noch keine Antwort geben, aber sein Landsmann Sir William Crookes (1832 – 1919) fand diesen vierten Aggregatzustand 1879 als „strahlende Materie“ in **Entladungsröhren**. Er untersuchte, was passierte, wenn an Elektroden in einer Glasröhre mit nur noch geringem Luftdruck eine Spannung angelegt und die Glasröhre dann durch eine Pumpe weiter evakuiert wird. Ergebnis:

Das Restgas beginnt grünlich zu leuchten, teilt sich in Streifen; zudem bildet sich an der negativen Elektrode, der Kathode, ein Dunkelraum aus, heute noch bekannt als Crookescher Dunkelraum. Aufgrund dieser Ergebnisse postulierte Crookes einen vierten Aggregatzustand, der „ultragasförmig“ ist und unter den Bedingungen eines guten Vakuums entsteht. Er vermutete – richtig – elektrisch geladene Gasmoleküle, Ionen, in der Röhre; das Plasma war entdeckt. Zuvor – 1857 – hatte Werner von Siemens schon mit einer Apparatur zur Erzeugung von **Ozon** die erste Anwendung technischer Plasmen verwirklicht, ohne jedoch die Vorgänge darin als Plasmaprozesse zu erkennen.

Die Vorgänge in den Gasentladungsröhren leuchteten sich etwas mehr noch durch Untersuchungen von Sir Joseph John Thomson (1856 – 1940) in Cambridge, der 1897 in einer Veröffentlichung mitteilte, dass Kathodenstrahlen unzweifelhaft aus winzigen negativ geladenen Teilchen bestehen, die er als Korpuskeln bezeichnete. Er ermittelte das Verhältnis von Ladung zu Masse dieser später weithin als Elektronen bekannten Teilchen und postulierte, sie könnten aufgrund ihrer Winzigkeit im Verhältnis zu Atomen sehr wohl Bestandteile davon sein. Er folgerte, dass Atome aus positiv geladenen Massen bestehen, „in der überall Elektronen verstreut sind“.

Eine Bestätigung seiner Vorstellungen über das Elektron und dessen Rolle im Atom erhielt Thomson wenige Jahre später: Der deutsche Chemiker Eugen Goldstein bewies 1886, dass in einer Gasentladungsröhre neben

Plasma: Forschung von der Natur zum Markt

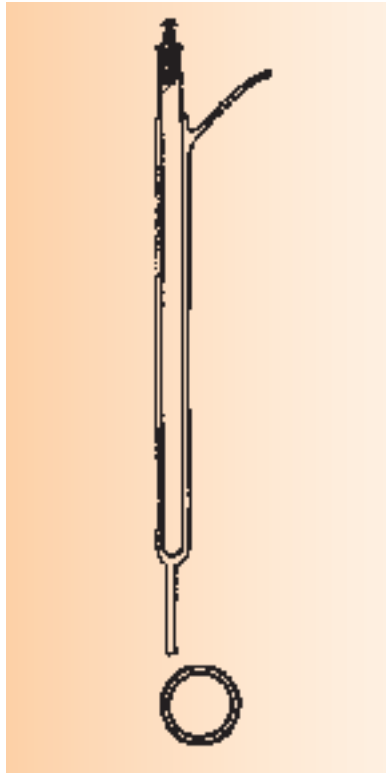


Kathodenstrahlen noch andere Strahlen existierten, die sich in die entgegengesetzte Richtung zur Anode hin bewegen. Er nannte sie Kanalstrahlen, die sich wenig später als positiv geladene atomare Teilchen, die Ionen, erwiesen, solche, denen Elektronen fehlten. Damit hatte man das Plasma als ein Gemisch von Elektronen und Ionen beschrieben.

Nur der Name fehlte noch, und den definierte der New Yorker Chemiker Irving Langmuir (1881 – 1957). Langmuir beobachtete 1923 in einem ionisierten Gas charakteristische Schwingungen, die durch die Elektronendichte und -masse bestimmt sind. Diese „kollektiven Schwingungen“ in einem System vieler geladener Teilchen nannte er „**Plasmaschwingungen**“. Sie entstehen durch zufällige ungleichmäßige Ladungsverteilungen in Plasmen – örtlichen Ansammlungen von Elektronen bzw. positiven Ionen – und dem Bestreben, dieses Ungleichgewicht auszugleichen.

Das erste zusammenfassende Werk über Gasentladungen verfasste der deutsche Physiker Johannes Stark im Jahre 1902: „Die Elektrizität in Gasen“. Als Direktor des Physikalischen Instituts der Universität Greifswald wurde ihm am 10. Dezember 1919 der Nobelpreis für die Entdeckung des Doppler-Effektes an Kanalstrahlen und die Aufspaltung der Spektrallinien in elektrischen Feldern zuerkannt. Stark holte Ende 1918 Rudolf Seeliger nach Greifswald, der dort bis 1955 wirkte und als einer der Pioniere moderner Plasma- und Gasentladungsphysik gilt.

In jüngerer Zeit sorgte die Erzeugung von Diamantschichten für Aufsehen. 1953 fand Werner Schmellenmeier an der Pädago-



Der Ozonisorator bestand aus zwei ineinander gesetzten Glasröhren. In dem luftgefüllten Zwischenraum ließ sich über einen Induktionsapparat mit Wagner'schem Hammer und metallischen Schichten an den entsprechenden Glaswänden ein Plasma erzeugen, das die Luft ozonisierte (Skizze aus dem 1889 bei Julius Springer, Berlin, veröffentlichten Buch „Wissenschaftliche und technische Arbeiten von Werner Siemens“).

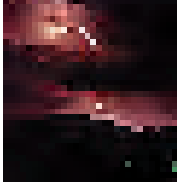
gischen Hochschule in Potsdam **Diamanten** als Produkt von Acetylen-Gasentladungen. In den 60er und 70er Jahren entwickelte man in Russland Verfahren zur chemischen Abscheidung von Diamantschichten aus der Gasphase, und 1983 erzeugten Japaner Diamantschichten mit einem Mikrowellenplasma.

In der Vielfalt liegt der Reiz

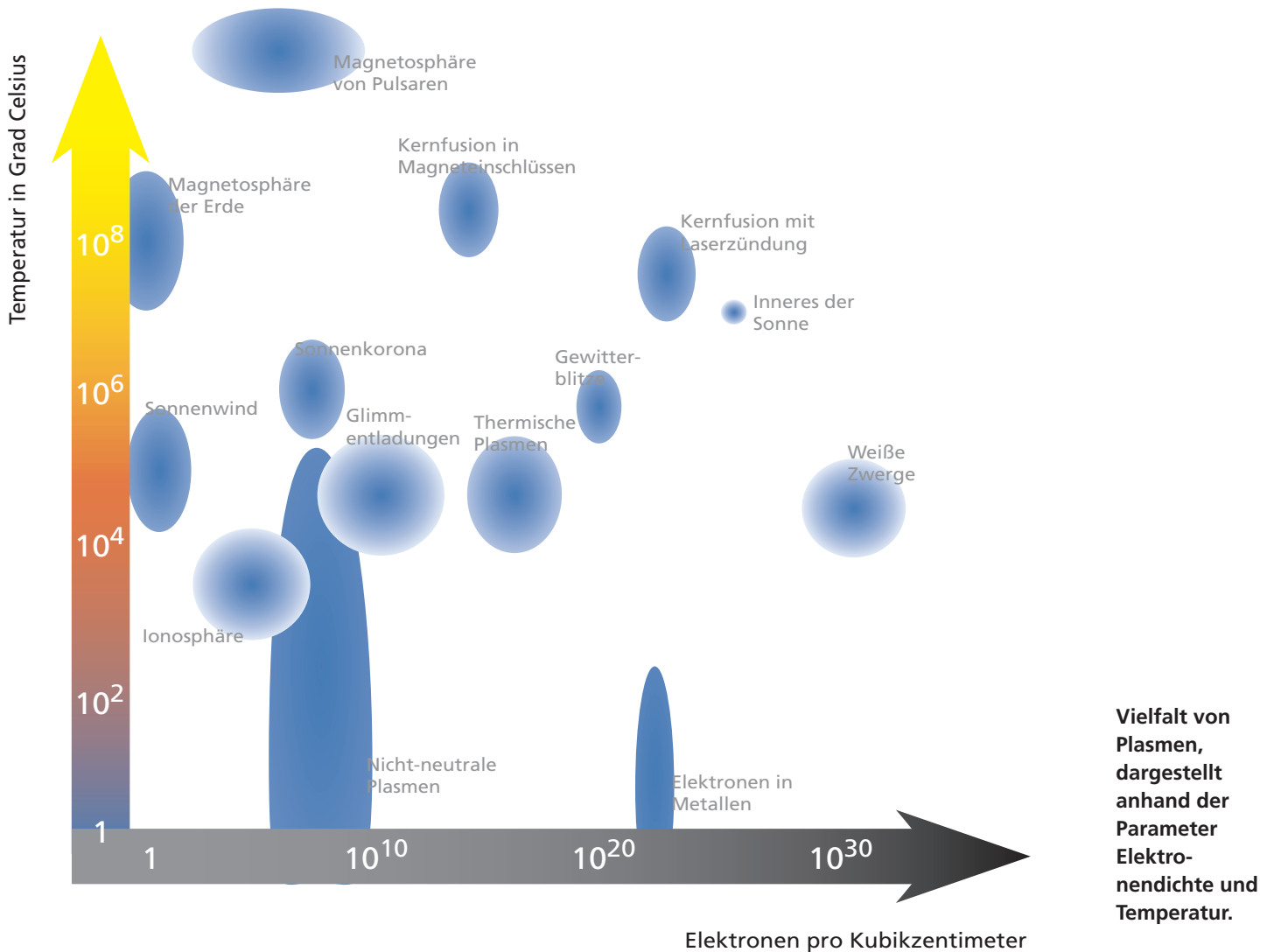
Grundlegend unterscheiden sich Plasmen dadurch, ob sie sich im thermischen Gleichgewicht befinden oder nicht. Die Frage dabei ist: Haben alle in dem Plasma anzutreffenden Teilchen etwa dieselbe Temperatur, dieselbe Energie, oder – um es bildlich auszudrücken – flitzen vielleicht ein paar Leichtgewichte unter ihnen durch eine ansonsten eher träge Teilchensuppe? Im erstgenannten Fall spricht man von **Gleichgewichtsplasmen** oder auch **thermischen Plasmen**; typische Gleichgewichtsplasmen sind diejenigen im Inneren von Sternen. Bei dem anderen Fall handelt es sich um **nicht thermische Plasmen**. Sie bilden den Regelfall der vielversprechenden **Niedertemperaturplasmen**, von deren Anwendungen diese Broschüre berichtet.

Plasmen werden in Gasen durch Aufheizen, Anlegen einer elektrischen Spannung oder Einspeisung elektromagnetischer Wellen erzeugt. Es ergibt sich eine immer schnellere Bewegung der einzelnen Gasteilchen, der Atome und Moleküle, in den drei Richtungen des Raumes, aber auch immer schnellere Rotationen bzw. Schwingungen von Atomen und Molekülen. Durch Stöße zerreißen schließlich Atom- und Molekülverbände; es entstehen die (meist) positiv geladenen Ionen und andererseits von den Atomen und Molekülen losgelöste Elektronen.

Je nach Art der Erzeugung entstehen Plasmen, die ein weites Spektrum von extremem Nichtgleichgewicht bis zu nahezu vollständigem thermischen Gleichgewicht aufweisen.



Plasma: Forschung von der Natur zum Markt



Plasma-Parameter – sowohl solche von natürlichen wie von technischen Plasmen – überstreichen einen weiten Wertebereich. So kann die Elektronendichte zwischen einem und 10^{25} Elektronen pro Kubikzentimeter liegen und damit höhere Werte als im Metall aufweisen. Die mittlere freie Weglänge der Teilchen, also der Weg, den sie fliegen können, bevor sie mit anderen Teilchen zusammenstoßen, kann viele zehn Millionen Kilometer oder auch nur einige Mikrometer betragen.

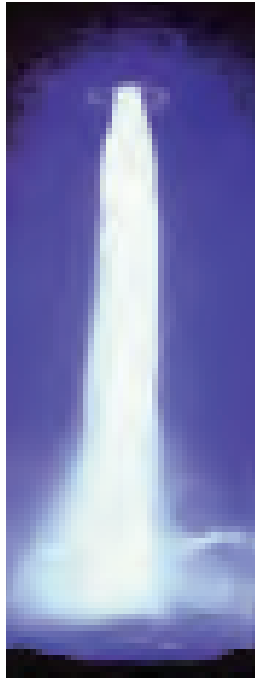
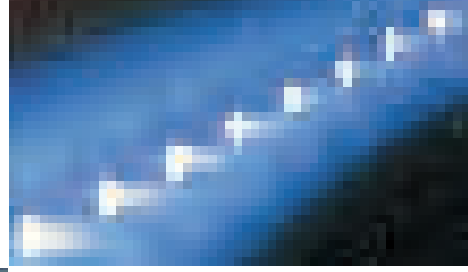
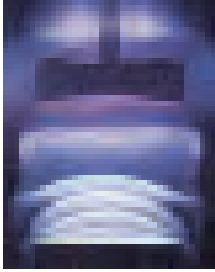
Für die technische Nutzung besonders interessant sind Nichtgleichgewichtsplasmen, weil in ihnen die Temperaturen der Ionen und des Neutralgases von der Temperatur der Elektronen getrennt gestaltet werden können.

Gerade die Energie der Elektronen ist jedoch wichtig für den Anstoß chemischer Reaktionen. Variiert man nun die Rahmenbedingungen für die Plasmenentstehung durch Wahl unterschiedlicher Grundgase, Energieeinspeisungen, Reaktorgeometrien, so schafft man Raum für eine Vielzahl von Einsatzmöglichkeiten in technischen Prozessen; darin liegt der hohe Nutzen der Niedertemperatur-Plasmatechnik, die sich im allgemeinen auf niederenergetische Nichtgleichgewichtsplasmen stützt.

Die solche Plasmen beschreibende Niedertemperatur-Plasmaphysik führte lange Zeit ein Schattendasein. Ihre Bedeutung für die Grundlagenforschung und die technische Nutzung wurde nicht

genügend erkannt. Das liegt zum Teil daran, dass sie ein äußerst komplexes Vielteilchensystem mit einer großen Zahl von Teilchenkomponenten und Zuständen umfasst. Nichtlineare Dynamik findet man dabei ebenso wie kollektive Wechselwirkung, stark inhomogene und schnell veränderliche Systeme sowie Plasma-Werkstoff-Wechselwirkungen.

Nicht thermische Plasmen fallen daher eher aus dem Rahmen leichter Berechenbarkeit, sind eine echte Herausforderung an Wissenschaft und Technik. Mittlerweile existieren jedoch zahlreiche Ansätze, die inneren Parameter derartiger Plasmen zu steuern und zu regeln.



Quellen für vielfältige Anwendungen

Es gibt sehr verschiedene Plasmaquellen; einige arbeiten bei sehr niedrigen Gasdrücken, andere bei Atmosphärendruck. Angeregt werden die Plasmen durch Gleich- oder Wechselstrom, oder durch die Einwirkung hochfrequenter elektromagnetischer Felder. Plasmaquellen lassen sich stetig oder gepulst betreiben. Legt man eine elektrische Spannung an Elektroden, die in eine nahezu evakuierte Glasröhre ragen, zündet darin unter geeigneten Umständen ein Plasma, in diesem Fall Glimmentladung genannt. Die Zündung wird durch den geringen Anteil immer vorliegender Ladungsträger initiiert. Die angelegte Spannung sorgt über Beschleunigungs- und Stossvorgänge für eine lawinenartige Vermehrung der Ladungsträger.

Vergrößert man den durch den Lawineneffekt aufgetretenen Entladungsstrom einer Glimmentladung durch immer höhere Spannungen an den Elektroden, erhitzt sich die negative Elektrode, die Kathode, durch den Beschuss mit positiven Ionen stark. Dadurch erhalten die Elektronen des Kathodenmetalls genügend Energie, um aus der Kathode auszutreten. Die Entladung schlägt um in eine Bogenentladung. Man findet erheblich höhere Entla-

dungsströme als bei einer Glimmentladung, die Kathode erhitzt sich auf einige tausend Grad Celsius und bestimmt die Zusammensetzung des Plasmas mit. Es liegt ein Bogenplasma vor. Moderne Anwendungen solcher Plasmen sind die gleißend hellen Scheinwerfer von Oberklasse-Automobilen, aber auch die Industrie bedient sich Bogenentladungs-Plasmen: Stahlschrott, legierte Stähle und hochschmelzende Metalle wie Titan, Tantal, Molybdän oder Niob schmilzt man mit **Plasmabrennern** im Megawatt-Bereich.

Bei Atmosphärendruck – eine beispielsweise für kontinuierliche Prozesse wichtige Bedingung – lassen sich auch Korona- oder Barriereentladungen erzeugen. **Koronaquellen** enthalten inhomogene elektrische Ausgangsfelder, die sich zum Beispiel an spitzen Elektrodenteilen ausbilden. **Barriere-Quellenanordnungen** zeichnen sich durch Isolierschichten auf einer oder beiden Elektroden bzw. im Gasraum zwischen den Elektroden aus. Mit beiden Quellen lassen sich großflächige Plasmen ausbilden, wobei Koronaentladungen einen ausgeprägten Filamentcharakter haben, Barriereentladungen deutlich homogener sind.

Auch durch die Einwirkung von Hochfrequenz-Feldern lässt sich ein Plasma in geeigneten Gefäßen zünden (**HF-Quellen**). Wie bei der

Gleichstrom-Plasmaquelle kommt es darauf an, dass die natürlicherweise vorhandenen Ladungsträger Energie aufnehmen können, die Atome ionisiert werden und ein Plasma zündet. Die Energieaufnahme geschieht durch die Wechselwirkung der Hochfrequenzfelder mit den Elektronen, die aufgrund ihrer Leichtigkeit den schnellen Feldänderungen folgen können. Die Plasma-Wandverluste werden kleiner, wenn sich das Hochfrequenz-Plasma in einem von außen zusätzlich angelegten Magnetfeld befindet.

Mikrowellen-Plasmaquellen bedienen sich – wie die Mikrowellenherde – für die Energielieferung bei elektromagnetischen Schwingungen einer Frequenz, die weit oberhalb der Hochfrequenz, jedoch unterhalb der Wärmestrahlung liegt. Derartige Plasmaquellen erlauben hohe Plasmadichten und eignen sich aufgrund geringer Ionenenergien besonders gut für schonende Oberflächenprozesse.

Auch Mikrowellen-Plasmen lassen sich durch Magnetfelder besonders gut steuern. Man spricht bei entsprechenden Anordnungen von **ECR-Plasmaquellen** (electron cyclotron resonance heating). Sie geben ihre Energie speziell an die Elektronen in Plasmen. ECR-Entladungen sind sehr rein und homogen, eine Eigenschaft, die man bei der Mikrochip-Herstellung schätzt.

Bilder oben von links: Glimmentladung; Barriereentladung bei Atmosphärendruck; HF-Plasmaquelle; Gleichstrom-Lichtbogen auf Stahl

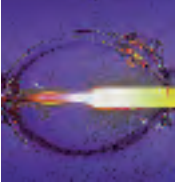


plasmen: allgegenwärtig

Das rasante Wachstum der Plasmatechnik repräsentiert sich in Anwendungen, die schon jetzt unsere Umgebung bequemer und gesünder gestalten. Die Unaufdringlichkeit, mit der durch Plasmaprozesse verbesserte oder sogar erst ermöglichte Produkte unsere Umgebung bereichern, steht für eine Wesenskategorie der Plasmatechnik: Nachhaltig im Umgang mit Rohstoffen und Energie, auf Langlebigkeit und Wertbeständigkeit programmiert.

Schon heute kommt man fast ständig mit plasmabehandelten Produkten in Kontakt, da sie beispielsweise von Plasma-brennern geschnitten oder in Plasmen beschichtet wurden. Als leuchtende Quellen in der Dunkelheit werden Plasmaerscheinungen in hochtechnologischen Lampen dafür sorgen, dass Licht zunehmend von Abwärmeprozessen entkoppelt wird. Es wird immer mehr Produkte geben, die durch Plasmen erstaunliche Eigenschaften erreichen – geboren in Plasmaprozessen, die gezielt die molekulare Struktur – beispielsweise den Vernetzungsgrad von Polymeren – dieser Produkte beeinflussen.

Sogar T-Shirts, Pullover und Wollsocken zeugen bald von dem Verbesserungspotenzial der Plasmaprozesse: Plasmabehandlung rüstet die Wolle filzfrei aus, ohne wie bisher auf umweltbelastende Chemikalien zurückgreifen zu müssen.



Heller und weiter mit weniger Energie

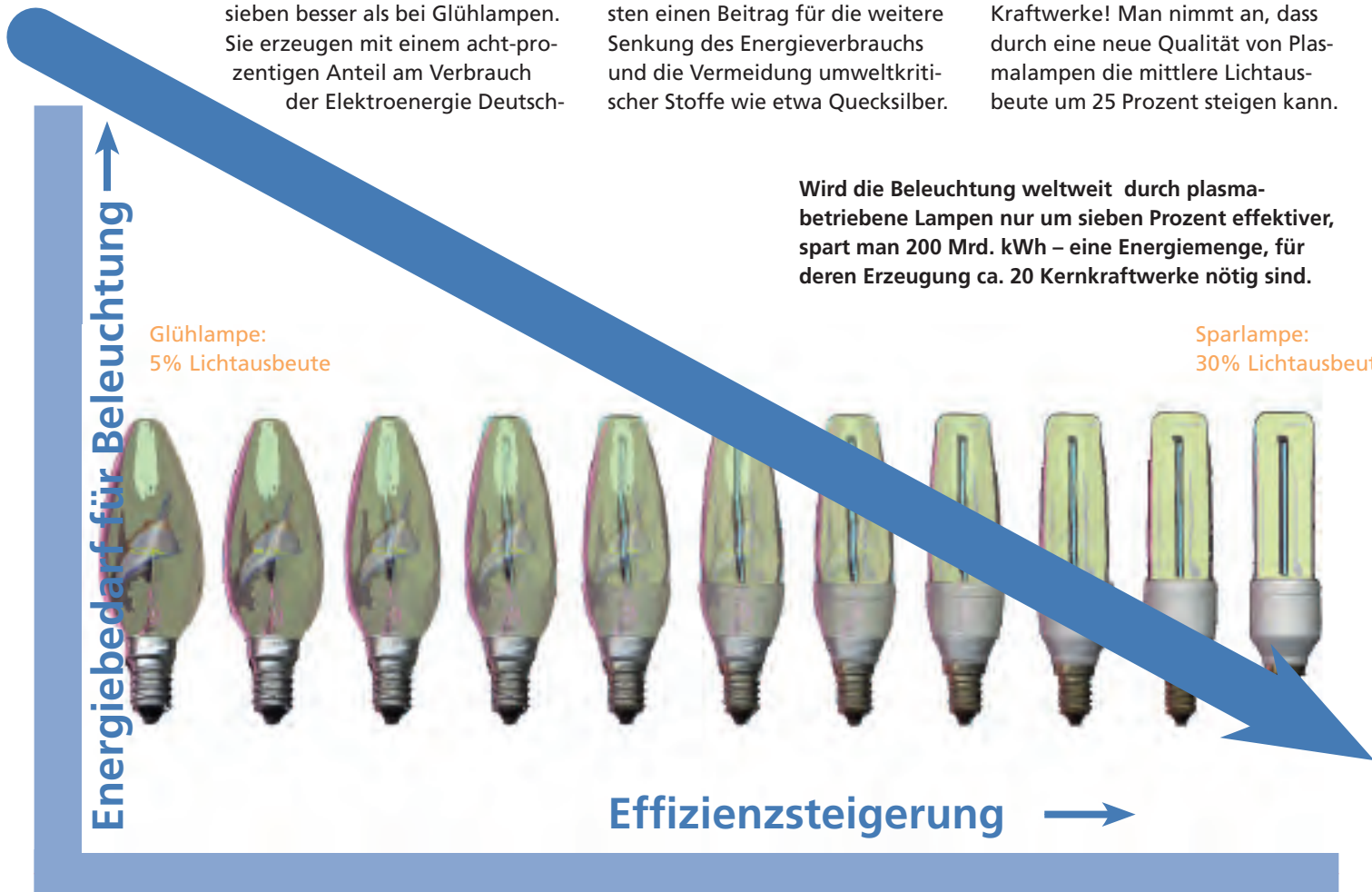
Sparen ohne Verzichten

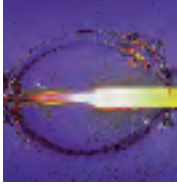
Moderne Lampen sind im wörtlichen wie im übertragenen Sinn ein leuchtendes Beispiel für das Wirken von Plasmatechnik in unserem direkten Umfeld, gleichzeitig auch für dessen „Unsichtbarkeit“: Man betont bei dem Begriff „Leuchtstoffröhren“ den Prozess der Lichtumwandlung, statt mit „Plasmaröhren“ den der Lichterzeugung zu nennen. Dennoch „werkeln“ in diesen Produkten des Alltags Plasmen, und zwar immer wirksamer im Nutzen für die Menschen bei gleichzeitigem Umweltschutz. So ist die **Lichtausbeute** der Gasentladungslampen – der allgemeine Begriff für plasmagestützte Lampen – um den Faktor sieben besser als bei Glühlampen. Sie erzeugen mit einem acht-prozentigen Anteil am Verbrauch der Elektroenergie Deutsch-

lands bereits heute 80 Prozent der in diesem Land benötigten Lichtmenge. Dabei verbrauchen sie aber nur 45 Prozent der für Beleuchtungszwecke benötigten elektrischen Energie. Den größeren Rest verzehren Glühlampen, die besser heizen als leuchten. Allerdings erreichen auch Entladungslampen nur etwa ein Drittel der theoretischen Lichtausbeute, einzelne Typen die Hälfte. Zudem enthalten viele heutige Lampen Quecksilber – wenn auch in geringen Mengen. Hier besteht also noch ein erhebliches Entwicklungspotenzial; das BMBF unterstützt deshalb grundlegende Arbeiten zur Aufklärung und Modellierung der plasmaphysikalischen Vorgänge. Diese Forschungsarbeiten leisten einen Beitrag für die weitere Senkung des Energieverbrauchs und die Vermeidung umweltkritischer Stoffe wie etwa Quecksilber.

Den Umwelteinfluss der Lampentechnik mögen folgende Zahlen verdeutlichen: Das weltweite Produktionsvolumen von Lampen liegt derzeit bei mehr als zehn Milliarden Stück jährlich; das repräsentiert einen Wert von etwa zwölf Milliarden €. Um 1990 benötigte man in der Welt etwa 3000 Milliarden Kilowattstunden (kWh) elektrischer Energie für die Beleuchtung.

Eine Erhöhung der mittleren Lichtausbeute um nur sieben Prozent würde bei diesen Zahlen weltweit einen um 500 Millionen Tonnen geringeren **Ausstoß von Kohlendioxid (CO₂)** pro Jahr bedeuten. Das ist etwa das Doppelte des CO₂-Ausstoßes aller deutschen Kraftwerke! Man nimmt an, dass durch eine neue Qualität von Plasmalampen die mittlere Lichtausbeute um 25 Prozent steigen kann.





Heller und weiter mit weniger Energie

Hohe Lichtausbeute, hell und farbecht

Für den Menschen gehört zu natürlichem Licht nicht nur genügend Helligkeit, sondern auch eine gute Farbwiedergabe. Nach theoretischen Betrachtungen sollte dabei eine Lichtausbeute von 280 Lumen pro Watt möglich sein, theoretisch...

Um diesem Wert nahe zu kommen, lassen sich die Lampenentwickler einiges einfallen. So kamen sie schon früh auf die Idee, energetisch günstige Gasentladungen in Glasröhren durch elektrische Wechselfelder zu erzeugen. Als besonders leicht anzuregen erwies sich Quecksilberdampf. Um weitere elektrische Parameter optimal zu erfüllen, fügt man den Niederdruckröhren noch ein Puffergas bei, meist Argon. Nur leuchtet der angeregte Quecksilberdampf vorwiegend im ultravioletten Licht. Deshalb beschichtet man die Röhren innen mit einer Substanz, die ultraviolettes in sichtbares Licht verwandelt: Daher der Name „Leuchtstofflampen“, die es seit 1938 zu kaufen gibt.

Dennoch liegt auch in solchen **Niederdruck-Plasmalampen** noch ein erhebliches Entwicklungspotenzial. Der wegen des Verbreitungsgrades wohl größte Erfolg ist seit Ende der 80er Jahre die Energiesparlampe, praktisch eine gefaltete Leuchtstofflampe. Sie enthält einen Spannungs- und Frequenzwandler, der für die Plasmaerzeugung geeignete Wechselspannungen im Bereich einiger zehn Kilohertz liefert.

Die neueste Entwicklung bei den Niederdruck-Plasmalampen kommt sogar ohne Quecksilber aus; sie arbeitet mit Excimeren.

Hinter dem geheimnisvoll klingenden Namen, der sich aus „excited dimer“ zusammensetzt, verbergen sich elektronisch angeregte Molekülkomplexe. Sie sind äußerst kurzlebig und geben bei ihrem Zerfall nahezu einfarbiges UV-Licht mit hoher Intensität ab. Es ist eine Vielzahl von Excimeren bekannt, so dass für viele Wellenlängenbereiche eine geeignete Gasmischung gewählt werden kann. Dennoch besteht eine Schwierigkeit bei der Entwicklung von Lampen nach diesem Prinzip darin, geeignete Leuchtstoffe zu finden, die möglichst viel UV-Strahlung in weißes Licht umwandeln.

Eine erste Anwendung solch einer Lampe als reiner Lichtspender ist die der Hintergrundbeleuchtung für Computerdisplays. Die Quecksilber-freie Lampe leuchtet doppelt so hell wie konventionelle Display-Lampen, und das bis zu 100.000 Stunden, über elf Jahre.

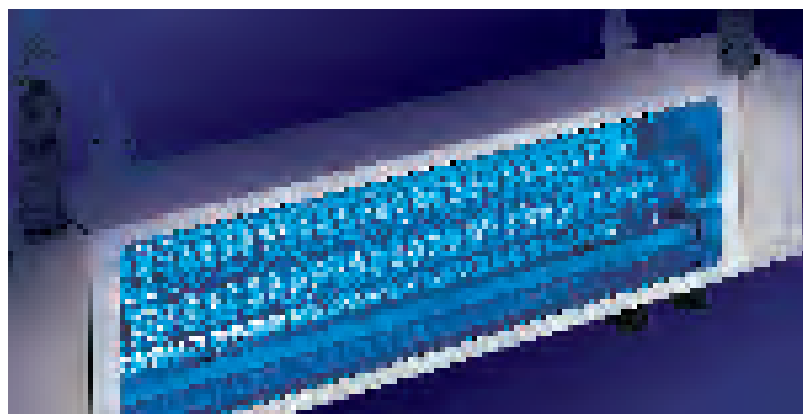
Über die Funktion eines Lichtspenders hinaus geht der Einsatz von Excimerlampen bei gezielten photochemischen Prozessen oder etwa bei Feinreinigungsschritten von Oberflächen oder vorgereinigtem Wasser. Das sehr kurzwellige Ultraviolettlicht solcher Lampen – gebräuchliche Wellenlängen sind



308, 222 oder gar nur 172 Nanometer – ist so energiereich, dass es Schadstoffe wie chlorierte Kohlenwasserstoffe oder auch Cyanide in Abwässern spalten und in unschädliche Verbindungen – etwa Wasser, Kohlendioxid – umwandeln kann. Damit eröffnen sich Alternativen für den Einsatz von Wasserstoffperoxid oder Ozon zur Abwasseraufbereitung, allerdings nur für spezielle Fälle. Aufgrund der geringen Eindringtiefe dieses extrem kurzwelligen Lichtes in Wasser werden sich voraussichtlich nur Reaktoren bauen lassen, die wenige Kubikmeter Abwasser pro Tag aufbereiten können.

Bei der Oberflächenbehandlung mit Excimerstrahlern beispielsweise bei der Härtung von Druckfarben wird das bestrahlte Substrat durch die UV-Belichtung nicht erwärmt. Das hat den Vorteil, das auch temperaturempfindliche Materialien mit intensiver UV-

Oben: Die Hochdruck-Gasentladungslampe leuchtet Tageslicht ähnlich ein Autoleben lang.



Links: Excimerlampe für prozesstechnische Anwendungen

Strahlung von Excimerstrahlern belichtet werden können.

Von den geschichtlichen Wurzeln her noch älter als Niederdruck-Plasmalampen sind **Hochdruck-Plasmalampen**, gehen sie doch auf den Lichtbogen zurück. Der wurde 1812 von dem Engländer Humphrey Davy entdeckt und noch im 19. Jahrhundert in Form von Kohleelektroden-Bogenlampen für Beleuchtungszwecke eingesetzt. Das neueste Massenprodukt heutiger Hochdruck-Plasmalampen sorgt bei Autofahrern für Diskussionen: Ihr helles, Tageslicht-ähnliches Licht erscheint manchem mangels Gewöhnung nachts bläulich-blendend. Sie arbeiten bei Drücken, die denjenigen der Atmosphäre um das Zehnfache übersteigen. Ihre Leuchtdichte kann die der Sonne übersteigen! Schon länger beleuchten solche Lampen große Plätze, Sportstadien und auch Straßen. Ihre Lichtausbeute erreicht bis zu 200 Lumen pro Watt.

Aktuelle Forschungen bei Plasmalampen dienen dazu, Verluste bei der Berührung angeregter Atome oder Moleküle mit den Wandmaterialien zu vermindern, Elektroden möglichst lange haltbar zu machen oder sogar ganz ohne sie auszukommen, aber auch beispielsweise, immer bessere Leuchtstoffe zu finden. Das BMBF fördert sowohl bei Niederdruck- wie auch bei Hochdruck-Plasmalampen grundlegende Forschungen. Ein wichtiges Ziel ist es, den Einsatz von Quecksilber in Lampen vollständig zu vermeiden und die Effizienz der Lampen zu erhöhen.

Zur Zeit noch exotisch sind Molekülstrahler wie die Schwefellampe, bei der über Mikrowelleneinstrahlung

ein Plasma in Schwefelgasen für eine tageslichtähnliche Beleuchtung sorgt. Das gesamte Lampensystem ist jedoch kompliziert und bisher nur für Großbeleuchtungen geeignet. Man untersucht deshalb weitere Mo-

leküle auf ihren Einsatz in Molekülstrahlern. Gegenstand von Forschungen sind auch Mikrowellen-angeregte Zusammenballungen aus einigen tausend Wolfram-Atomen, die ein tageslicht-ähnliches Licht abstrahlen.

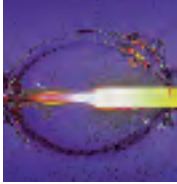
Lampenforschung

Das Beispiel für die Akribie der Forscher bei der Lampenentwicklung zeigt die Herausforderungen, die an die Plasmaanalytik gestellt werden: Man verfolgt Abläufe im Nanosekunden-Bereich; in dieser Zeit legt Licht gerade einmal 30 Zentimeter zurück...

Bei Hochdrucklampen beobachtet man ein Flackern der Entladung an der Kathode, wobei ihr Material verstärkt und ungleichmäßig abgetragen wird. Mit aufwendiger Technik konnte man jetzt unerwartete Phänomene nachweisen: Auf der heißen Kathode bilden sich Mikroplasma aus dem Oberflächenmaterial. Das obere Bild zeigt stark vergrößert solch eine Kathode, bestehend aus Wolframstift und – als unterem Teil – Wolframwendel, die emissionsförderndes Material enthält. Das Bild ist nur fünf millionstel Sekunden belichtet worden, sodass man das leuchtende

Lampenplasma fast nicht sieht, ebenso nicht die glühende Kathode. Hell hingegen zeichnet sich ein Mikroplasma auf der Wendel ab, das im unteren Bild an den Rand gewandert ist. Die Aufnahme ist äußerst kurz belichtet worden, nur die Hälfte einer milliardstel Sekunde lang. Dass man etwas sieht, liegt an der Durchstrahlung der Elektrodenregion von hinten mit einem leistungsstarken Laser. Dabei erscheint die Elektrode als Schattenbild, und auch das dichte, Laserlicht-absorbierende Mikroplasma wirft einen Schatten. Die Aufnahmen erlauben Schlüsse auf die Vorgänge im Elektrodenbereich. Ziel dieser Arbeiten sind eine höhere Lebensdauer sowie ein geringerer Energieverbrauch bei guter Beleuchtungsqualität von Gasentladungslampen.





Heller und weiter mit weniger Energie

Umweltkonforme Mobilität

Die Automobilhersteller müssen auseinanderlaufende Forderungen unter einen Hut bringen: Eine höhere Mobilität soll mit geringerem Energieverbrauch bei niedrigerem Abgasausstoß erreicht werden. Besonders enge Grenzen für den letztgenannten Punkt gibt die **Euro IV-Norm** vor, gemäß den Leitlinien der Internationalen Klimakonferenz. Ein Kraftfahrzeug, das – um die derzeit anspruchsvollste ökologische Vorstellung zu nennen – nur drei Liter Kraftstoff für eine Fahrstrecke von 100 Kilometern benötigt und dabei guten Komfort und hohe Sicherheit bietet, ist eine große Herausforderung der Automobilindustrie.

Einen wesentlichen Beitrag, um dieses Ziel zu erreichen, leistet die **Plasmatechnik**. Mit ihrer Hilfe soll der Antrieb verbrauchsärmer laufen, strahlen die Scheinwerfer heller und wird das Abgas gereinigt. Kunststofftanks lassen sich innen durch Mikrowellenentladungen gegen das Austreten von Kraftstoff versiegeln. Koronaentladungen machen Sitzbezüge weicher und besser einfärbbar; ebenso lässt sich der Einsatz von Schwermetallhaltigen Farben vermeiden. Lacke haften auf Kunststoffteilen wie Stossfängern besser, wenn zuvor Hochfrequenzentladungen auf deren Oberflächen eingewirkt haben.

Im Motor und Getriebe sorgen durch Plasmen gehärtete Hochtemperatur-Werkstoffe für reibungsarmen Lauf und verbessern so den Wirkungsgrad des Antriebs. Hilfe im Verkehrsgewühl bekommt der Fahrer durch Leit-

systeme, die ihre Informationen über Plasmadisplays mitteilen.

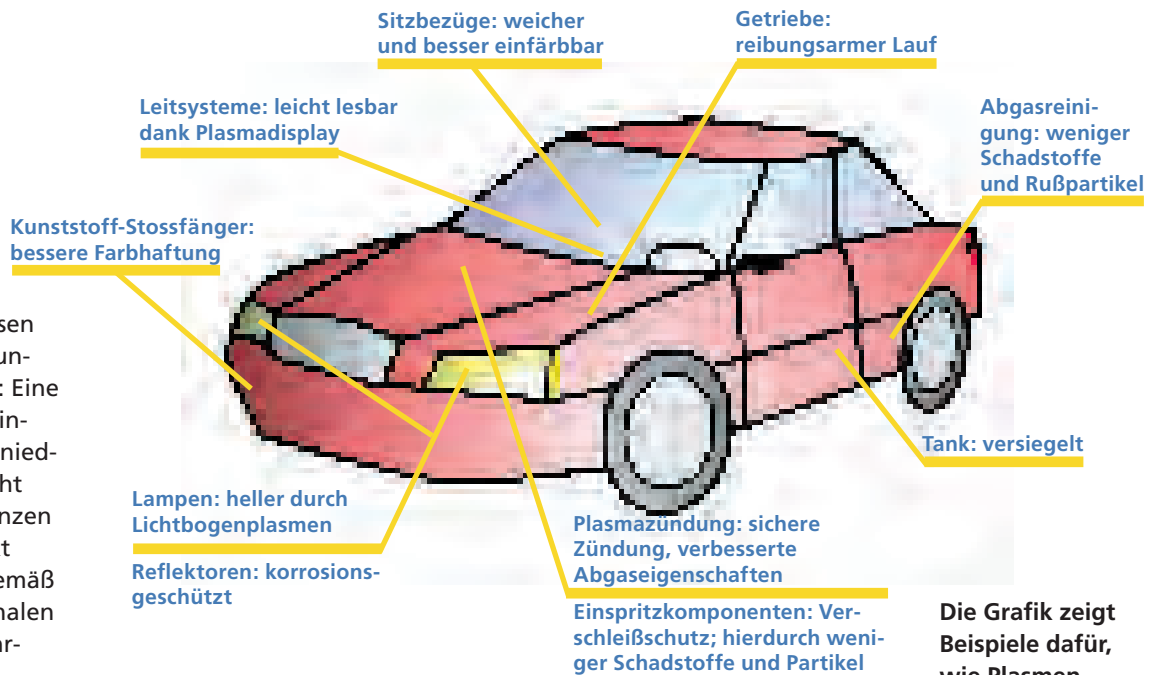
Zwei Entwicklungen für Autos der Zukunft sind besonders interessant, denn bei ihnen ist das Plasma ständiger Hauptakteur. Die eine Neuerung zielt dabei in das Herz des Ottomotors, den Brennraum in jedem Zylinder. Hier wird man in Zukunft vielleicht eine **Plasmazündung** antreffen. Zwar erzeugt auch jede konventionelle Zündkerze mit dem Zündfunken ein Plasma. Das Prinzip der Plasmazündung nutzt jedoch einen anderen Zündmechanismus im Nanosekunden-Bereich.

Damit sind mehrere Vorteile verbunden: Die Elektrodenanordnung kann so gestaltet werden, dass keine Teile mehr in den Verbrennungsraum ragen. Ein Plasmastrahl erreicht sicher die Schichten zündfähiger Gemische in den ausgeklügelten Verbrennungszonen gerade in modernen Benzin-Direktspritzern. Der Wirkungsgrad der Energieeinkopplung ist daher bei der Plasmazündung höher als bei anderen Zündformen. Die sichere Zündung verbessert so die Abgaseigenschaften moderner Motoren.

Es ist gut möglich, dass in Zukunft jedes Auto mit Otto- oder Dieselmotor über einen **Plasmareak-**

tor im Abgastrakt verfügt. Bei Motoren, die mit Sauerstoff-Überschuss betrieben werden müssen – Dieselmotoren wie auch moderne Magermix-Motoren – lässt sich der konventionelle Dreibeige-Katalysator nicht einsetzen; die Motoren blasen daher etliche Mengen an Stickoxiden in die Umwelt. Und auch das normale Auto mit Dreibeige-Kat hat seine Abgasschwachstellen: Wenn nach dem Start der Katalysator noch kalt ist, arbeitet er nur schlecht.

Für alle skizzierten Probleme bietet die Plasmatechnik Abhilfe, wenn sie in Verbindung mit geeigneten Katalysatoren installiert wird. Ein Plasmareaktor, der bei Atmosphärendruck gepulste Barriereentladungen erzeugt, kann sowohl unverbrannte Kohlenwasserstoffe, Kohlenmonoxid als auch Stickoxide zu ungiftigen Gasen umwandeln, sogar die Rußpartikel von Dieselabgasen lassen sich mit ihm unschädlich machen, und alles geht bereits beim Start. Noch sind derartige Plasmareaktoren jedoch in der Entwicklungsphase; das BMBF fördert entsprechende Grundlagenarbeiten. Ziel ist es, den Verbrauch durch den Reaktorbetrieb zu senken und die Abgase unschädlich zu machen.



Die Grafik zeigt Beispiele dafür, wie Plasmen direkt oder indirekt über die Herstellung Autofahren umweltfreundlicher machen – bei gleichzeitig verbesserten Eigenschaften





Aktiviert für neue Kontakte

Die Eigenschaften der verschiedenen Teilchen in Plasmen ändern sich drastisch, wenn sie mit fester Materie in Berührung kommen; damit verbunden sind Energie- und Ladungsverluste. Die Energie verpufft aber nicht wirkungslos. Vielmehr wird auf ganz besondere, plasmaspezifische Weise Energie in die Oberfläche der festen Materie eingetragen. Plasmen eignen sich daher sehr gut zur Oberflächenbehandlung. Sie können aktivieren, d. h. die molekularen Bestandteile der Oberfläche empfänglich für das Zusammengehen mit anderen Substanzen machen, aber sie dienen durch geeignete Wahl von Prozessgasen auch zur direkten Beschichtung von Oberflächen.

Typische Ziele von **Oberflächenaktivierungen** sind, diese besser aufnahmefähig für Lackierungen oder besser klebefähig für die Produktion einer Sandwich-Struktur zu machen. Diese Wirkmöglichkeiten ergeben sich aus den hohen Energien, die die Elektronen in Plasmen haben. Sie sind ausreichend, um chemische Bindungen aufzubrechen. Entsprechende plasmaunterstützte Prozesse haben schon erhebliche wirtschaftliche Bedeutung erlangt. So werden Millionen von Stossfängern an Autos nach einer Plasmabehandlung lackiert.

Ein anderes großes Einsatzgebiet für plasmaaktivierte Produkte ist der Verpackungssektor. Sie dienen hier dazu, die Attraktivität und somit den Verkaufserfolg zu steigern, denn bei Folien- und Kunststoffverpackungen ließe sich ohne eine Plasmabehandlung keine ausreichende Haftung der Druckfarben erreichen. Bei Lebensmittelverpackungen dient die Plasmabehandlung auch der Entkeimung.

Hand in Hand einher mit der Aktivierung von Oberflächen läßt sich übrigens auch deren Feinreinigung betreiben. Umweltschonender als mit Chemikalien lassen sich beispielsweise Metallwerkstücke von letzten Resten organischer Stoffe auf der Oberfläche durch Plasmabehandlung befreien. Die Fein- und Feinstreinigung steht am Ende einer Reinigungskette. Feinreinigung kann mit unterschiedlichen Plasmen erfolgen. Es lassen sich Schichten von etwa 100 bis 500 Milligramm organischer Substanzen quadrate meterweise abtragen, wobei die Werkstückoberfläche gleichzeitig für weitere Behandlungsschritte wie Lackierungen aktiviert wird.

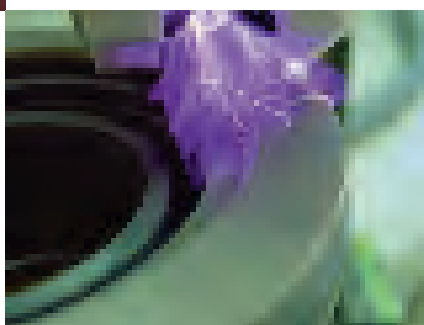
Bei der Oberflächenbehandlung durch Niedertemperatur-Plasmen geht man häufig einen Schritt weiter als die Flächen nur zu aktivieren. Dieser nächste Schritt ist eine **Funktionalisierung**. Beispielsweise führt die Behandlung von Kunststoffteilen mit Sauerstoff als Prozessgas zu Hydroxyl-, Carbonyl- oder auch Estergruppen, also chemisch funktionellen Molekülteilen, die derart vorbehandelte Werkstücke für weitere Oberflächenprozesse empfänglich machen.

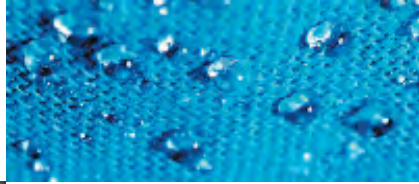
Textilien trimmen auf Funktion und Filzfreiheit

Plasmatechnische Funktionalisierungen führt man bei **technischen Textilien** durch, um diese wasser- und ölabweisend zu machen. Für die Plasmaerzeugung setzt man aufgrund der großflächigen Substrate auf Barriereentladungen bei Normaldruck. Die zu lösende Aufgabe, durch die unter anderem der Ersatz der umweltbelastenden nasschemischen Behandlung angestrebt wird, gestaltet sich jedoch im direkten Wortsinn mehrschichtig: Versuche zeigten einen Kompositaufbau aus haftvermittelnder Schicht, Deckschicht und abweisender Schicht als besonders geeignet an. Dazu gilt es, unterschiedliche reaktive Gaskomponenten während des Beschichtungsprozesses im Plasma einzusetzen. Die Anstrengungen, diese und ähnliche Prozesse mit Hilfe von Plasma- und Produktanalytik zu optimieren, lohnen sich; das beweist die steigende Zahl der Anwendungen: Technische Textilien findet man in Schutzkleidung, im Verkehrs- und Bauwesen, Umweltschutz, oder bei Filtrations- und Transportsystemen. Sie müssen fest und elastisch sein, sollen Wasser und Öl abweisen – oder auch aufsaugen, beständig gegen Chemikalien sein und sich gut beschichten lassen – um nur einige Beispiele für die vielfältigen Anforderungen zu nennen.

Auch unsere Alltagskleidung aus **Wolle** profitiert von der Plasmatechnik. Diese hat jetzt zu einem Antifilz-Verfahren geführt, das entgegen bisherigen chemischen Verfahren keine organischen Halogenverbindungen ins Abwasser entläßt. Andere chemische Verfahren bzw. eine enzyma-

Unten: Lackierungsvorbereitung bei Kunststoff-Karosserieteilen hat große wirtschaftliche Bedeutung. Ganz unten: Kombinierte Oberflächenreinigung und -aktivierung eines Metallwerkstücks in einer Koronaentladung bei Atmosphärendruck





Oben: Wasser- und ölabweisende Textilien lassen sich durch Plasmafunktionalisierung und -beschichtung herstellen.

Links: Anlage zur Veredelung technischer Textilien bei Atmosphärendruck.

Auch der Einsatz von Niederdruckplasma im Vakuumbereich zählt zu den Aufgaben, die die Textilindustrie für die Plasmatechnik bereit hält. Dazu zählt die Behandlung von Cellulosefasern, um diese leichter benetzen zu können, etwa bei dem Färbeprozess. Ergebnis: Durch eine Plasmabehandlung in einem Niederdruck-Sauerstoffplasma werden alle Baumwollgewebe sehr gut benetzbar. Dadurch lassen sich bisher notwendige Vorbehandlungsstufen einsparen. Zudem steigt die Färb- und damit die Produktionsgeschwindigkeit und auch die Färbequalität von Baumwollprodukten.

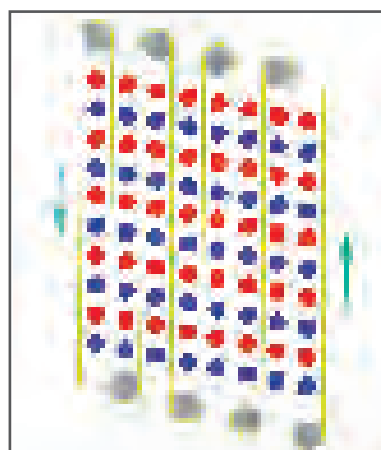
Ein Problem bei der Verfahrensentwicklung war die Trocknung des Textilgutes. Selbst trockene Baumwollballen haben noch eine Restfeuchte von einem Prozent. Das macht ein stufenweises Arbeiten unter Vakuumbedingungen unumgänglich. Zudem gilt es, die Gasentladungen stabil zu halten; sie neigen bei großen Elektrodenflächen – und die werden wegen der Textilbahn benötigt – leicht zum Umschlagen in heiße Bogenentladungen. Das Problem ließ sich lösen, indem man den Gasentladungsprozess auf mehr als 100 Einzelelektroden aufteilte.

Ein anderer Plasmaeinsatz für die Weberei gilt der Stärkung von Kettfäden, die bei der Gewebeherstellung einer besonderen Beanspruchung unterliegen. Man nimmt dazu Schlichtemittel, die einen Polymer-Schutzmantel auf den Garnen bilden. Vor der Veredelung der Gewebe muss das Schlichtemittel jedoch in einem Waschprozess wieder entfernt werden und bildet dann mit einem Anteil von 40 bis 60 Prozent den mengenmäßig bedeutendsten Abwasserlaststoff der Textilveredelung.

Eine Plasmabehandlung durch eine Koronaentladung mit der Umgebungsluft als „Prozessgas“ verbessert die Haftfähigkeit des Schlichtemittels an den Fasern. Dadurch verringert sich die Menge des aufzutragenden Schlichtemittels, es fällt weniger Abwasser an, und durch eine gleichmäßige Verteilung des Mittels auf dem Faden hält dieser besser. Maschinenstopps von Webmaschinen durch Kettfadenbrüche lassen sich auf diese Weise verringern.

tische Wollbehandlung schieden aus Kostengründen oder wegen technischer Probleme aus. Untersuchungen zur plasmatechnischen Wollbehandlung wurden vom BMBF gefördert. Diese Förderung hat auch Auswirkungen auf die Textilbranche: Sie kann nun ohne umweltbelastende Prozesse ihr Sortiment erweitern. Die Tendenz für den Verkauf filzfrei ausgerüsteter Wolle ist weiter steigend.

Für die Wollhersteller hat das Plasmaverfahren, das auf einer Barriereentladung bei Normaldruck basiert, weitere wirtschaftliche Vorteile: Das Proteinmaterial der Wollfaser-Oberfläche wird im Vergleich zur chemischen Behandlung deutlich weniger stark angegriffen. Wollgewichtsverluste – bisher zwei Prozent der teuren Wolle – treten somit nicht auf. Auch bei der Weiterverarbeitung wie dem Färben verliert plasmabehandelte Wolle deutlich weniger Proteine als chemisch behandelte Fasern.



Anlage zur Plasmabehandlung textiler Bahnware im Niederdruckplasma (Grafik: Elektrodenanordnung mit abwechselnd positiven und negativen Elektroden, um eine große Elektrodenfläche zu erzielen).



Harte Schalen, weiche Kerne

Die Variationsbreite der Plasmaverfahren eröffnet eine Vielzahl von Möglichkeiten, andere als „pure“ Edelgasplasmen zu verwenden. Schon wenn der Luftstickstoff ins Spiel kommt – der ja unter normalen Umständen auch als chemisch träge gilt, ändern sich die Verhältnisse entscheidend. Im Plasma brechen die Moleküle des zweiatomigen Stickstoffs auf, und die Radikale und reaktiven Ionen können dann Reaktionen mit Oberflächen von Werkstücken eingehen. Dies wird bewusst zur Herstellung besonders harter Werkzeuge und Werkstücke herangezogen – Bohrer, Kugellager, Zahnräder. Bei solchen Verfahren finden Veränderungen in den Werkstücken ganz nah an der Oberfläche statt. Man spricht daher von **Plasmarandschichtverfahren**. Die weitgehendste Veränderung von Oberflächen durch Plasmaprozesse bilden **Beschichtungen**, und man findet auch Kombinationen von Aktivierung, Funktionalisierung und Beschichtung in einem Plasmaprozess.

Mit noch anderen Prozessgasen lassen sich Oberflächen durch Beschichtungen geradezu verzaubern: dauerhaft schillernd färben, extrem härten – und zwar nicht stahlhart, sondern diamanthart! – sowie gasundurchlässig machen. Für die Erzeugung aller genannter Eigenschaften haben sich schon Märkte erschlossen bzw. stehen riesige Märkte offen. Viele dieser Verfahren wurden mit Unterstützung des BMBF erarbeitet.

So veredelt man kratz- und anlaufempfindliche Metalle wie etwa Messing mit geeigneten

Für das Genussempfinden des Verbrauchers noch wichtiger sind Verpackungseigenschaften, die empfindliche Lebensmittel vor schnellem Verderben durch Kontakt mit der Umgebung schützen. Auch hier bahnt sich durch Plasmatechnik eine Umwälzung an: Der PET-Markt legt zur Zeit jährlich um zehn Prozent zu, und zwar sowohl auf der Verbraucher- wie auf der Maschinenseite. Konkret bedeutet dies, dass im Jahr 2000 etwa 120 Milliarden **Kunststoffflaschen aus Polyethylen-Terephthalat (PET)** erzeugt werden. Und die benötigt man bisher vor allen Dingen für Tafelwasser und Limonaden. PET-Flaschen sind hingegen ist bisher kein geeignetes Behältnis für Bier – nicht nur aus geschmacks-ästhetischen Gründen. Vielmehr läßt PET zuviel Sauerstoff in das Bier eindringen und zuviel Kohlendioxid aus dem Getränk entweichen; dadurch wird das Bier schal und schnell ungenießbar. Das soll sich mit Hilfe der Plasmatechnik ändern: Es gibt jetzt erste Anlagen zur Beschichtung von frisch geblasenen PET-Flaschen. Ein Verfahren arbeitet mit amorphem Kohlenstoff als Innenbeschichtung, durchgeführt in einem Niederdruck-Plasma mit Acetylen als Prozessgas. Die Barriereigenschaften von PET sollen dadurch für Sauerstoff um das 30-fache, für Kohlendioxid noch um das Siebenfache steigen. Ein anderes Verfahren bringt außen auf die Flaschen eine dünne Siliziumoxidschicht. Die Barriereigenschaften verbessern sich rund um den Faktor 4; dafür bleibt die PET-Flasche im Gegensatz zu der milchigen Carbonbeschichtung glasklar. Damit erwächst der Glasflasche eine ernste Konkurrenz, und das bei einer Schichtdicke des amorphen Kohlenstoffs von nur 100 Nanometern! Potenzial der wirtschaftlichen Bedeutung: 300 Milliarden Bier-Verpackungseinheiten pro Jahr! Potenzial für die Umwelt: Treibstoffersparnis beim Transport. Das BMBF fördert Arbeiten zur Entkeimung von Kunststoffflaschen und -verpackungen auch in Kombination mit Beschichtungen.

Oberflächenschichten. Das Ergebnis sind Türgriffe, die ihren Glanz auch nach Jahren noch behalten, nach Wunsch auch in schillernden Farben strahlen.

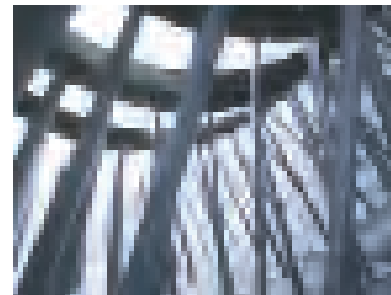
Mit kohlenstoffhaltigen Reaktionsgasen in Plasmen läßt sich aber noch ein Zauber vollführen, der Assoziationen an den Stein der Weisen aufkommen läßt; viele Alchemisten suchten ihn, denn er sollte alles in Gold verwandeln, was er nur berührte. Plasma leistet mehr: Es produziert Diamanten! Allerdings geht das nicht ganz so einfach...

Dennoch: Mit plasmagestützten CVD-Verfahren (CVD steht für Chemical Vapour Deposition und bedeutet, dass chemisch aktive Gase sich auf Substraten abscheiden) hat man Prozesse zur Hand, um **zentimetergroße Diamantscheiben in Millimeterdicke** zu erzeugen. Sie lassen sich als be-

Oben: Diamantscheiben im Plasma gewachsen von 5 cm Durchmesser und 0,3 mm Dicke; unten: Türgriffe mit Carbonbeschichtung



Turbinenschaufeln mit keramischem Material beschichtet verbessern Turbinen-Wirkungsgrade, weil ein Betrieb bei höheren Temperaturen möglich ist – im Flugzeug und bei stationären Anlagen.



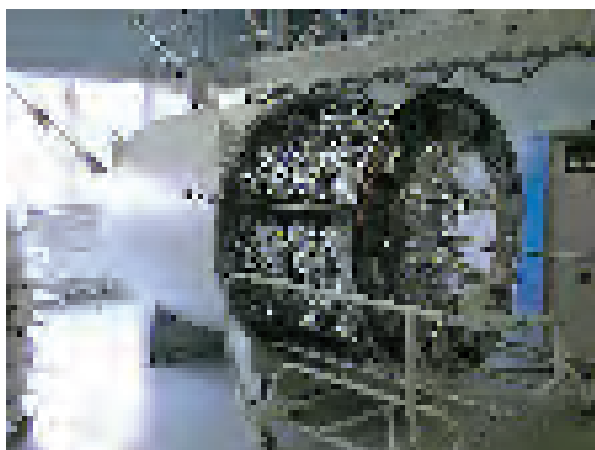
sonders wirksame Kühl„bleche“ etwa auf Mikrochips oder bei Laserdioden einsetzen; Diamant leitet Wärme fünfmal besser als Kupfer und ist dabei ein elektrischer Isolator. Diamant- und diamantartige Schichten lassen sich aber auch auf Werkstückoberflächen abscheiden und vermindern den Verschleiß. Dies kommt beispielsweise dem Automobil- und Maschinenbau zugute. So kann man bei beschichteten Werkzeugen teilweise auf Kühl- und Schmierstoffe bei der Materialbearbeitung verzichten – wieder ein Beitrag zur Umweltentlastung mit Unterstützung durch das BMBF. Die beschriebenen Schichten sind bei ihrer Härte aber auch präzise: Entsprechende Beschichtungen von Nassrasiererklingen sorgen für ein sanfteres Rasieren.

Von den absoluten Werten her ein besonders großes Plus für die Umwelt erzielt die Plasmatechnik durch ihre Anwendungen bei der Herstellung von **beschichtetem Architekturglas**. Unmerklich für den persönlichen Komfort läßt sich so eine Menge Wärmeenergie sparen: Im Vergleich zu normalen Fensterscheiben vermindern beschichtete Scheiben den Wärmeverlust im Winter um bis zu 60 Prozent. Umgerechnet erspart so jeder Quadratmeter vergüteter Fensterglasfläche den Verbrauch von 20 Litern Öl pro Heizsaison! Eine Jahresproduktion von wärmedämmendem Glas führt so zu einem Minderverbrauch von fast einer Milliarde Liter Heizöl pro Jahr; in demselben Zeitraum vermindert sich durch den Einsatz solchermaßen behandelten Glases der Ausstoß des Treibhausgases Kohlendioxid um zweieinhalb Millionen Tonnen.

Der Trick bei der Glasbeschichtung: Bestimmte Metalle und Oxide lassen als dünne Schicht auf Fensterscheiben sichtbares Licht ungehindert durch, reflektieren jedoch die langwelligere Wärmestrahlung. Neue Technologien führen zu besonders guten Ergebnissen bei rationeller, großflächiger Glasbeschichtung. Sie wurden zum Teil mit Unterstützung des BMBF entwickelt.

Zur Zeit führt man auch Untersuchungen durch, in denen Photokatalysatoren auf ihre Eignung zur Reinigung von Fensterscheiben überprüft werden. Dazu werden Gläser mit sehr dünnen photokatalytisch wirksamen Schichten versehen – plasmaunterstützt. Andere künftige Entwicklungen werden zu Fenstern mit elektrisch, thermisch oder chemisch angeregten veränderlichen Eigenschaften führen. Vielleicht werden Fensterscheiben eines Tages auch gleichzeitig Strom liefern.

Autoscheinwerfer-Reflektoren, plasmatechnisch metallisiert und ohne Unterbrechung des Vakuums nach Einleiten eines Prozessgases unter Plasma mit einer durchsichtigen Polymer-Schutzschicht versehen.



Mehr Sein als Schein: Unsichtbare Strukturen

Wie ein Gegenstand aussieht bestimmt seine Oberfläche; auch bei Fragen der Benetzungsfähigkeit oder Reibung spielt sie eine wichtige Rolle. Enthält sie Strukturen im Nanometer-Maßstab, lassen sich materialuntypische oder Zusatzigenschaften erzielen. Plasmatechnik dient jetzt dazu, dass derartige **Nanostrukturierungen wirtschaftlich** werden und der Zusatznutzen entsprechender Gegenstände für eine breite Bevölkerungsschicht verfügbar wird.

Vorbildlich für ein Beispiel solch einer Entwicklung waren Untersuchungen der Augen von vorwiegend dämmerungs- und nachtaktiven Schmetterlingen. Reflexion entsteht durch die plötzliche Änderung des Brechungsindex von Licht an der Grenzfläche zweier Medien. Oberflächenstrukturen jedoch, die kleiner sind als die Lichtwellenlänge, bewirken einen sanften Übergang des Brechungsindex etwa an der Grenzfläche von Luft und Glas bzw. transparentem Kunststoff. Etliche Schmetterlingsaugen haben eine solche Struktur durch Mikrowölbungen der Augenoberfläche; die Tiere sehen also reflexarm.

Brillenträger bevorzugen bei ihren Sehhilfen ebenfalls reflexarme Ausführungen. Antireflex-Optiken produziert man bisher aufwendig durch entspiegelnde Schichtsysteme auf der Basis von Interferenzsystemen. Die Schmetterlingsaugen zeigen einen anderen Weg für reflexfreie Brillen auf, die Nanostrukturen. Sie lassen sich einfach über einen Stempel aufbringen. Damit hat man



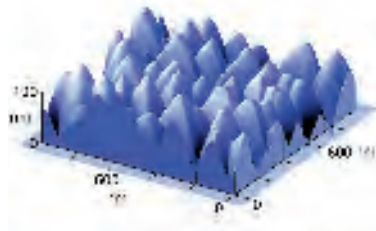
Nachhaltiger Oberflächenzauber

ein effektives Instrument, mit dem schnell eine Vielzahl von Einzelflächen strukturiert werden kann. Das Problem der Stempelerstellung löst die Plasmatechnik.

In ihr hat man ein Werkzeug gefunden, mit dem dünne Keramikschichten nanostrukturiert auf Metallstempel aufgetragen werden können, die dann wiederum beispielsweise Plexiglas mit dieser Nanostruktur prägen können. Die Strukturbildung der Keramikschicht erfolgt selbstorganisierend, aber der Plasmaprozess muss so gesteuert werden, dass genau die gewünschte Selbstorganisation stattfinden kann.

Das Ergebnis ist ein Beispiel für das oft unsichtbare Wirken von Plasmatechnik: Entsprechend behandeltes Plexiglas ist besonders durchsichtig, die Spiegelreflexe lassen sich auf unter ein Prozent senken; der Schmetterlingsaugeneffekt funktioniert auch hier. Eine Herausforderung für die technische Entwicklung ist es, das Plasma zur Erzeugung der Stempeloberfläche so zu steuern, dass auch dreidimensional formgebende Werkzeuge wie etwa Walzen gleichmäßig beschichtet werden.

Eine andere Anwendung von Oberflächenstrukturierungen nutzt deren Einfluss auf die Benetzbarkeit der Oberflächen. Plasmatechniker haben jetzt Wege erschlossen, Glasoberflächen nach Wunsch zu modifizieren: von besonders leicht benetzbar bis wasserabstoßend. Dazu muss mehr in den Scheiben stecken, als man ihnen ansieht, mehr Struktur, mehr Information. Bei wasserabweisenden Scheiben können das Hügelchen im Bereich einiger zehn Mikrometer sein. Auch hier ist das Vorbild die Natur: Mit



Das Rasterkraftmikroskop enthüllt diese Struktur einer im Plasma auf Metall aufgetragenen Keramikoberfläche. Sie formt sich unter geeigneten Bedingungen selbstorganisierend in einer Hügelstruktur aus, die wie Schmetterlingsaugen mit ähnlicher Struktur Lichtreflexe „schluckt“.

entsprechenden Strukturen aus Wackskristallen schützt sich der Lotus vor Benetzung und Verschmutzung. Vielleicht ersparen entsprechend behandelte Autoscheiben in Zukunft die Scheibenwischermechanik: Ohne Schlieren könnte der Regen von den Scheiben abperlen.

Plasmen können Oberflächen nicht nur aufbauen, sondern auch abtragen. Man spricht dann von **Plasmaätzen**. Auch mit solchen Verfahren lassen sich Oberflächen strukturieren, und diese haben überragende Bedeutung in der **Chipfertigung**. Ohne Plasmaverfahren gäbe es nicht die leistungsfähigen Computer- und Speicherchips unserer Zeit! Plasmachemische Verfahren haben sich als unverzichtbares Mittel für das Ätzen (und auch für das Bedampfen) von Waferoberflächen erwiesen, da

sich mit ihnen deutlich kleinere Strukturen als mit konventionellen nasschemischen Prozessen erzeugen lassen.

Nanostrukturierung ist nicht das einzige Anwendungsfeld des Plasmaätzens. Auch relativ großflächige Strukturen – jedoch mit Genauigkeiten im Nanometerbereich – lassen sich mit entsprechenden Verfahren ausbilden, beispielsweise asphärische Linsen. Sie vermeiden u.a. Farbfehler, die bei normalen Linsen durch Korrekturlinsen ausgeglichen werden müssen und so bei Kameras zu großen und schweren Objektivsystemen führen. Die Produktion von Asphären wie bisher mit speziellen Kunststoffbeschichtungen ist jedoch kompliziert und teuer. Mit Unterstützung des BMBF wird jetzt ein Verfahren zum plasmachemischen Ätzen mit hohen Abtragraten erforscht. Hauptbestandteil davon ist eine Mikrowellen-Plasmajetquelle. Ziel der Arbeiten ist ein Prozess, der die kostengünstige Fertigung von Asphären erlaubt und damit die hohe Abbildungsqualität dem Massenmarkt zugänglich macht.

Aufnahme eines Schmetterlingsauges im Rasterelektronenmikroskop: Mikrowölbungen, die je etwa 200 Nanometer breit sind, verhelfen zum reflexarmen Sehen.





Direkt beim Menschen

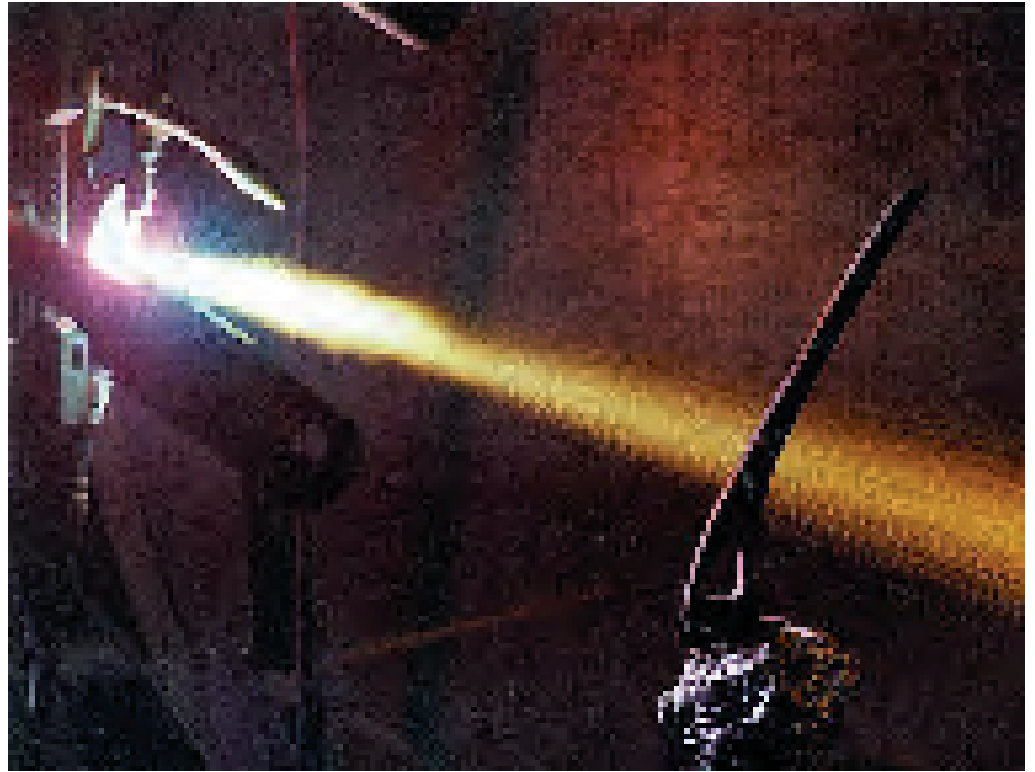
Gesundheit hat für den Menschen einen besonders hohen Stellenwert. Was nutzen die schönsten Dinge, wenn Gebrechlichkeiten davon abhalten, sie zu genießen? Plasmatechnik wird zunehmend dazu beitragen, dass der einzelne Mensch nicht nur älter wird, sondern dabei auch länger aktiv bleiben kann. Der Einsatz von Plasmen führt in der Medizin zu neuen diagnostischen und therapeutischen Möglichkeiten. Belastungen der Patienten verringern sich dadurch in vielen Fällen.

Fließende Übergänge schaffen Akzeptanz

Nicht nur Automotoren laufen gut, wenn sie gut geölt sind – oder wenn modernste Plasmabeschichtungen für eine Herabsetzung der Reibung sorgen. Auch der Bewegungsapparat des Menschen braucht „Schmiere“. Das regelt die Natur lange Zeit von selbst. Aber im Alter kommt es dann doch eventuell zu Abnutzungserscheinungen, die bis zum Ausfall – zur Bewegungsunfähigkeit – führen können. Besonders anfällig sind die Hüftgelenke, und hier hat man deshalb schon vor längerer Zeit künstliche Alternativen entwickelt. Die Entwicklung ist jedoch nicht stehen geblieben, geht es doch darum, die Langzeit-Funktion solcher Hüftprothesen sicherzustellen und Wiederholungsoperationen zu vermeiden. Die schon angesprochenen Möglichkeiten der Oberflächenmodifizierung mit Hilfe von Plasmaprozessen lassen darauf schließen, dass auch **medizinische Anwendungen** durch diese moderne Technik entscheidende Vorteile erzielen können.

So lassen sich die Kugelgelenke und Gelenkpfannen von Hüftprothesen mit Plasmaprozessen härten. Eine besondere medizinische Herausforderung ist jedoch die Verbindung zwischen Prothese und Knochen. Nur durch eine zuverlässige Verankerung im Knochen, ein gutes Einwachsen der Prothese lassen sich Operationen vermeiden, die bei sich lockern den Prothesen notwendig sind.

Neuartige Beschichtungen zum Teil mit knochenähnlichen Keramiken – plasmatechnisch aufgebracht – verbessern nun das Einwachsverhalten in das Kno-



chengewebe. Über die Verwendung von bioaktiven Beschichtungen können die Vorteile hochfester Metallimplantate mit der guten **Bioverträglichkeit** keramischer Werkstoffe kombiniert werden.

Die **Implantatbeschichtung** ist vielseitig ausführbar. So läßt sich beispielsweise durch das Aufbringen gradiert Schichten der Übergang zwischen bioaktivem Werkstoff und lasttragenden Prothesenbauteilen fließend einstellen. Dadurch unterbleiben oder vermindern sich Schichthafungsprobleme, die sonst bei plötzlichem Sprung zwischen unterschiedlichen mechanischen Werkstoffkennwerten auftreten. Vorstellbar ist auch die Darstellung eines linearen, also fließenden Übergangs von bioaktiven Schichten zu solchen, die vom Körpergewebe resorbiert, aufgelöst werden.

Mit beschichteten Hüftprothesen ist es in der Medizintechnik aber nicht getan. Das Spektrum der Anwendungen, die plasmatechnisch unterstützt werden, erstreckt sich von den genannten Hüftgelenken über Knieprothesen, künstliche Herzklappen, künstliche Augenlinsen, Brustimplantate, Bänder- und Sehnenprothesen, Zahnimplantate bis zu künstlichen Aderteilen.

Hüftprothese während der Beschichtung durch atmosphärisches Plasmaspritzen.

Vermitteln und Bewahren

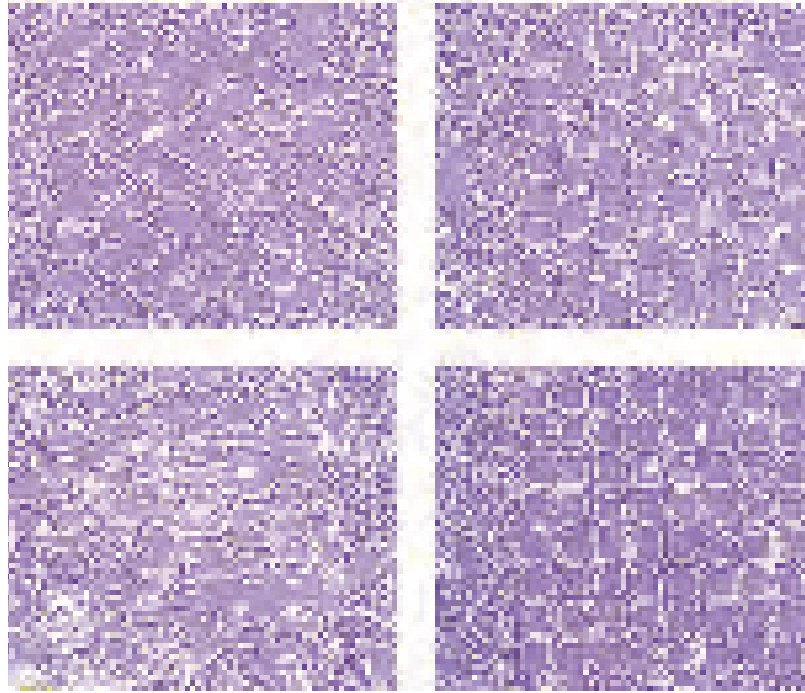
Verschiedene Ausführungen von Stents



Biomaterial-Haftung nach Maß

Mit High-Tech-Beschichtungen lassen sich auch widersprüchliche Anforderungen erfüllen. Dies zeigt beispielhaft die Entwicklung von Stents, Spiraldrahtprothesen zur Offenhaltung von Adern, die eine Herz-Bypass-Operation ersparen können. Bei den noch verwendeten Systemen gibt es manchmal Komplikationen durch die Interaktion des Materials mit den Aderinnenflächen; dadurch liegt die Gefahr der Restenose, des wieder Zuwachsens, bei 35 bis 40 Prozent. Eine plasmatechnisch auf den Katheter aufgebrauchte Karbonschicht mit diamantähnlicher Struktur vermeidet durch seine Glätte das „Ankratzen“ der Adern, ist andererseits bei stahlangepassten Eigenschaften flexibel genug, um die Adern dehnen zu können. Im Übrigen lassen sich auch normale Katheter durch das Einwirken von Plasmen an ihrer Oberfläche so modifizieren, dass sie weniger Fibrinogene adsorbieren; dadurch vermindert sich das Risiko von Thrombosen.

Kürzlich ist es gelungen, bei Mikrofiltrations-Membranen die funktionsbeeinträchtigenden Ablagerungen – neudeutsch Fouling – zu minimieren, wiederum durch Plasmatechnik. Sie übernimmt in einem ersten Verfahrensschritt die Funktionalisierung der Membranen für die Aufnahme geeigneter Beschichtungen. Das



Mikrostrukturiertes Wachstum von Mäusezellen auf mit Hilfe von Plasmen geschaffenen chemischen Mikrostrukturen an Kunststoffoberflächen

Membran-Fouling ließ sich in Laborversuchen mit Modellsustanzen (Proteinen) um den Faktor zehn vermindern. Gleichzeitig wurde die Selektivität der Membranen von 60 auf 95 Prozent gesteigert. Das kommt der Meerwasserentsalzung ebenso zugute wie Trennprozessen in der Lebensmittel- und Pharmaindustrie. Insbesondere dürften davon aber Dialysepatienten profitieren, weil die Blutwäsche so störungsärmer abläuft.

Oberflächen von Zellkulturmaterialien lassen sich mit Plasmen auch so konditionieren, dass sie besonders günstige Möglichkeiten für die Haftung und das Wachstum biologischer Zellen bieten. Das ist für Zellkulturen wichtig, aus denen Ersatz für zerstörtes Körpergewebe wie Haut oder sogar ganze Ersatzorgane wachsen sollen – ein Blick in die Zukunft. Gegenwart hingegen ist eine plasmagestützte Beschichtung von Biosensoren, die Enzyme tragen,

oder von Immunoassays, mit denen sich das Vorhandensein bestimmter Eiweißstrukturen nachweisen lässt – ein Instrument zur Diagnose von Krankheitserregern im Blut.

Die Entwicklung milder Plasmen zur **Strukturierung funktionalisierter Polymere** für die Anwendung bei Biomaterialien wird vom BMBF unterstützt, um die genannten Ziele von Zellwachstum und -haftung zu erreichen.

Plasmabehandelte Knieprothese



Sanfte Schärfe gegen Mikroorganismen

Die Anwendungen der Plasmatechnik im Medizin- und Gesundheitssektor beschränken sich jedoch nicht allein auf Oberflächenbehandlungen. Ein wichtiges Gebiet ist die **Sterilisation**. Auch hier eröffnet der Einsatz von Plasmen neue Horizonte. Ein Beispiel dafür ist die Sterilisation von Dialyseschlauch-Gebinden in der Verpackung, die die Gefahr von Infektionen bei Patienten mit Nierenversagen weiter zurückdrängt. Der Zusatznutzen der Plasmabehandlung: Die Oberfläche der Dialyseschläuche lässt sich in einem Verfahrensgang mit der Sterilisation anti-koagulierend ausstatten. Weil sich so die Voraussetzungen zur Bildung von Blutgerinnseln vermindern, benötigen die Patienten weniger gerinnungshemmende Mittel. Bei Verletzungen vermindert sich so ihr Risiko eines hohen Blutverlustes.

Grundsätzlich kommt die Plasma-sterilisation da zum Zuge, wo thermisch empfindliche Güter sich nicht in heißem Dampf sterilisieren lassen. Bislang unterzieht man diese einer Behandlung mit Gammastrahlen oder mit Chemikalien. Hier kann die Plasmatechnik wieder durch ihre inhärente Nachhaltigkeit bei geringerem

Materialaufwand die Umwelt entlasten. Sterilisation mit Hilfe von Plasmen kann dabei sowohl über die Entkeimung mit plasmaerzeugtem UV-Licht wie auch über die Einwirkung reaktiver Gase geschehen. Hier noch ein Beispiel, wie Plasmasterilisation besondere Anforderungen erfüllt: Enzymatische Biosensoren für die kontinuierliche Messung der Blutzuckerkonzentration von Diabetes-Patienten sind in der Entwicklung. Ein Problem, das es zu lösen galt, war deren Sterilisation, denn sie werden ja unter die Haut implantiert. Andererseits sind die Enzyme jedoch so empfindlich, dass sie durch herkömmliche Sterilisationsverfahren zerstört würden. Plasmatechnik half bei der Lösung des Problems.

Auch über die **Pharmazie** hält die Plasmatechnik Fortschritte für die Medizin bereit. Für die Pharmaproduzenten interessant sind extrem glatte, weil in Plasmen behandelte Prägewerkzeuge für die Tablettenherstellung. Durch ihren Einsatz verringert sich der Ausschuss in der Produktion. Zudem lässt sich der Einsatz von Trennmitteln vermeiden, ein Plus für die Arzneimittelqualität.

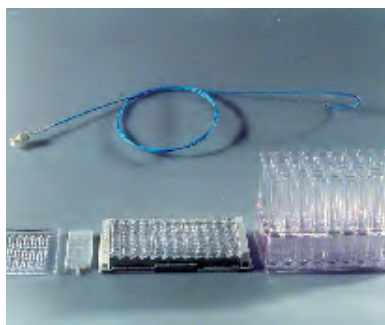
Aber auch die Wirkstoffanwendung bei den Patienten kann durch Plasmatechnik verbessert werden, was zum Beispiel zu

einer gezielteren Behandlung mit geringeren Wirkstoffkonzentrationen und entsprechender Nebenwirkungsarmut führt. Die grundlegenden Mechanismen zur Konditionierung von Medikamenten in Plasmen zielen auf die Veränderung winziger Wirkstoffteilchen – oft im Nanometerbereich – ab, um sie besser resorbierbar zu machen, aber auch, um sie vor vorzeitiger Zerstörung zu schützen und unverseht an den gewünschten Ort ihrer Wirkung zu bringen.

Und der Plasmaeinsatz in der Medizin geht noch weiter. So gibt es Nierensteinertrümmerer, die die gezielt zerstörende Kraft in Form einer Schallwellenfront an die Steine bringen, geschaltet durch ein Funkenplasma. Und man denke auch an die verschiedenen Licht-Therapien, die sich wiederum auf Plasma-betriebene Lampen stützen.

Plasma-beschichtete Tablettenstempel ermöglichen eine Produktion ohne Trennmittel.

Plasma-sterilisierte Katheter, sterile Probenbehälter

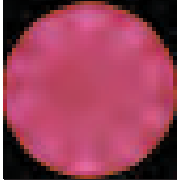




Die sanfte Macht

Ionen, Radikale, Elektronen – man findet sie nicht nur in Plasmen, sondern auch die ganz normale Chemie dreht sich um diese Teilchen. Chemische Reaktionen bauen auf der Wechselwirkung angeregter elektronischer Zustände auf. Kein Wunder also, dass die Chemiker versuchen, Chemie mit Plasmen zu betreiben, wo reaktive Teilchen „in Reinkultur“ vorliegen. Bei insgesamt milden Bedingungen können Reaktionen ablaufen, deren Aktivierung hochangeregte Teilchen erfordert, und diese Reaktionen lassen sich auch noch über Plasmabedingungen wie Pulsparameter lenken.

Mit Pulsen lassen sich überhaupt etliche Aufgaben der Plasmatechnik lösen. Ein Beispiel außerhalb der Chemie ist die Zerkleinerung von armiertem Beton derart, dass Zuschlagstoffe fein sauberlich abgetrennt werden. Für weitere Aufgaben der Materialbearbeitung stellt die Plasmatechnik zusätzliche Variationsmöglichkeiten bereit, exakt zugeschnitten auf die Anwendung: Millionen Löcher pro Stunde in Leiterplatten bohren beispielsweise.



Kalte Reaktionen

Prozessgase mit Verbindungsdrang

Die Geburtsstunde der **plasmachemischen Prozesse** liegt schon lange zurück: 1857 erfand Werner von Siemens den Ozonisator, ein Gerät, das in einer Korona-Entladung aus dem normalen zweiatomigen Sauerstoff Ozon herstellt, ein reaktionsfreudiges Gas, dessen Moleküle aus jeweils drei Sauerstoffatomen bestehen. Fast eineinhalb Jahrhunderte danach sind selbst in dieser historischen Anwendung die chemischen Abläufe noch nicht voll geklärt – ein Zeichen für die Komplexität plasmachemischer Vorgänge, aber auch für die Chancen, die sich durch die Analyse und Beherrschung der Vorgänge eröffnen.

Beispiele für plasmachemische Vorgänge wurden bereits in vorhergehenden Kapiteln beschrieben: Die oberflächentechnologischen Prozesse über Aktivierung und Feinreinigung, Funktionalisierung und Beschichtung einschließlich der Plasmarandschichtverfahren beruhen auf chemischen Reaktionen. Bei der Feinreinigung von Me-

tallen etwa erleichtert die Plasmabehandlung die Reaktionen zwischen geringen Resten organischer Substanzen wie Öle und Fette einerseits und Sauerstoff andererseits; die Sub-

stanzen wandeln sich durch Oxidation in leicht verdampfende, abpumpbare Verbindungen um. Bei der **Aktivierung** wirkt ein Edelgas-Plasma auf Werkstücke aus Polymerwerkstoffen ein. Dabei bewirken die Edelgase und deren Ionen und Elektronen Bindungsbrüche der Polymere. Es entstehen Radikale, die zu Folgereaktionen fähig sind; die Oberfläche ist aktiviert. Möglich ist aber auch eine Reaktion dieser Radikale untereinander, so dass sich eine besonders hoch vernetzte Oberflächenschicht ausbildet.

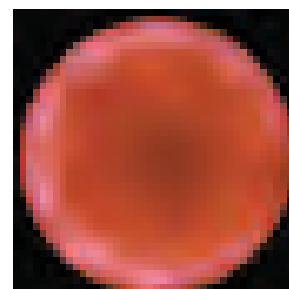
Zur **Funktionalisierung** werden als Prozessgase keine Edelgase verwendet, sondern beispielsweise Sauerstoff, Stickstoff oder Ammoniak. Deren im Plasma erzeugte Fragmente schieben sich zusätzlich zwischen die Polymermoleküle in die Oberfläche und liefern funktionelle Gruppen, die weitere chemische Reaktionen eingehen können. Möglicherweise lassen sich plasmachemische Oberflächenmodifizierungen von Polymeren sogar zu plasmagestützten Mikrostrukturierungen weiterentwickeln, um beispielsweise funktionelle Trenn- und Trägermaterialien zu erzeugen. Das BMBF fördert die Klärung dieser Fragestellungen.

Aktivierung und Funktionalisierung gemein ist, dass die verwendeten Plasmagase nicht selbst

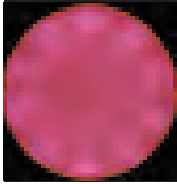
zur Kettenbildung, zur **Polymerrisation** fähig sind. Enthält das Plasma Substanzen, die polymerisieren können – Kohlenstoff-, Silizium- oder etwa Schwefelverbindungen, verbinden sich ihre im Plasma erzeugten Bruchstücke miteinander auf der Werkstoffoberfläche zu einer neuen Polymerschicht, die sich durch eine hohe Vernetzung und meist amorphe Struktur auszeichnet.

Plasmachemie kann aber noch mehr als Oberflächen modifizieren: Sie läßt sich auch für die **Synthese gasförmiger Verbindungen** bei Atmosphärendruck nutzen. Wie bei den festen Werkstücken – dort allerdings nur an der Oberfläche – lassen sich durch Stoßprozesse von Molekülen mit hochenergetischen Elektronen Radikale erzeugen. Durch Steuerung der Elektronenenergien, durch Variation der Plasmaeinwirkung bei gepulsten Plasmen lassen sich so auch gezielt spezielle Reaktionen fördern und ungewünschte unterdrücken, was bei der normalen Nasschemie **mit dieser Präzision** nicht möglich ist.

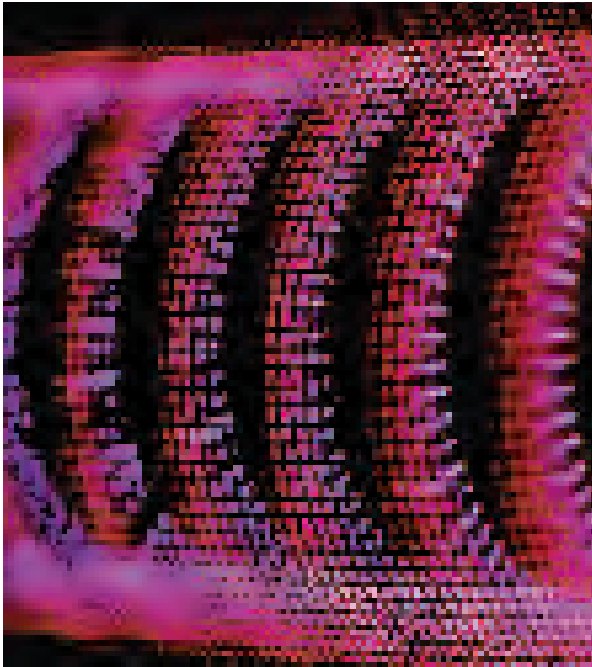
Ein besonderer Anreiz für Plasmachemiker besteht in der Entwicklung von Alternativen zu katalytischen Verfahren. Diese Verfahren selbst haben einen großen Teil zu dem enormen Erfolg der industriellen Chemie in unserer Zeit beigetragen.



Mikrowellenplasmen verschiedener Gase und Drücke



Kalte Reaktionen



Wirkungsgrad. Als mögliche Einsatzgebiete von Plasmareaktionen stellt sich die Umwandlung von Kohlenwasserstoffen zur dezentralen Erzeugung von Wasserstoff dar. Die Lösung dieser Aufgabe hat ein großes Zukunftspotential, weil die Entwicklung der Null-Emissions-Kraftfahrzeuge als einen Weg den Betrieb von Autos mit Brennstoffzellen vorsieht, die aus der „kalten“ Reaktion von Wasserstoff mit Sauerstoff Strom erzeugen; normalerweise ist eine Explosion die Begleiterscheinung der Knallgasreaktion von Wasserstoff und Sauerstoff zu Wasser. Ein anderes mögliches Einsatzgebiet derartiger Brennstoffzellen ist die dezentrale Hausenergieversorgung. Plasma-Prozesse könnten auch dazu dienen, wegen ihres hohen Gehaltes an Kohlenstoffoxiden bislang unwirtschaftliche Erdgasvorkommen zu nutzen. Ebenso sind Synthesen höherer Kohlenwasserstoffe aus Methan ein Anwendungsgebiet der Plasmachemie.

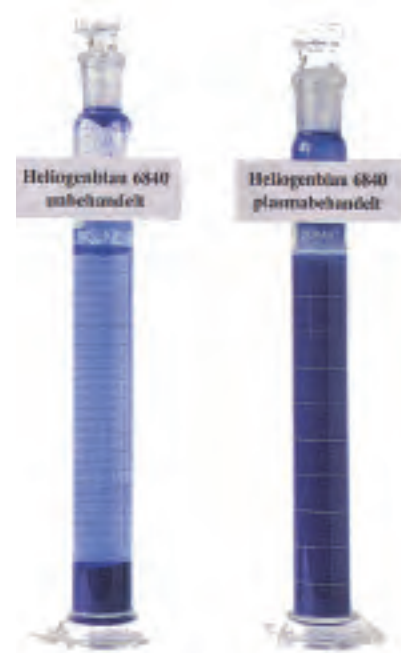
Auch für die **Pigmentchemie** liefert die Plasmatechnik neue Impulse. Bei Pigmenten verschmelzen die Begriffe von Oberfläche und Volumenkörper. Die Oberflächen-Atom- bzw. Molekülschichten haben bei Nanometer-kleinen Pigmentteilchen einen merklichen Anteil am Gesamtteilchen. Umso bedeutender ist für das Pigmentverhalten die Oberfläche der einzelnen Teilchen, und Oberflächenreaktionen sind eine Paradedisziplin der Plasmatechnik.

Durch Plasmaverfahren, die sich zum Teil noch in Entwicklung befinden, lassen sich beispielsweise Pigmentteilchen in Farben wasserfreundlich machen; die Umweltproblematik führt hin zu wässrigen Lacksystemen. Organische Lackpigmente sind aber oft unpolar. Sie

In diesem Reaktor laufen in nicht-thermischen Plasmen gezielte chemische Gasphasenreaktionen ab.

Katalytische Verfahren benötigen meist recht viel Platz und teure Katalysatoren, laufen oft bei hohen Temperaturen ab, reagieren empfindlich auf Verunreinigungen („Katalysatorgifte“). In diesen Schwachpunkten liegt ein Potenzial der Plasmachemie. Ein anderer Forschungsansatz besteht darin, mit plasmachemischen Prozessen kolloidale Systeme zu polymerisieren und diese in der homogenen Katalyse einzusetzen. Das BMBF unterstützt entsprechende Arbeiten.

Plasmareaktionen sind in einem breiten Temperaturbereich einsetzbar, da sie durch energiereiche Elektronen ausgelöst werden und damit von der Gastemperatur kaum abhängen. Sie erlauben einen schnelleren Stoffumsatz als katalytische Oberflächenreaktionen, da das Plasmaverfahren Volumenreaktionen in Gasen initiiert, die weniger durch Stofftransportprozesse begrenzt sind. In Kombination mit Katalysatoren erweitern Plasmen deren Anwendungsmöglichkeiten und verbessern ihren

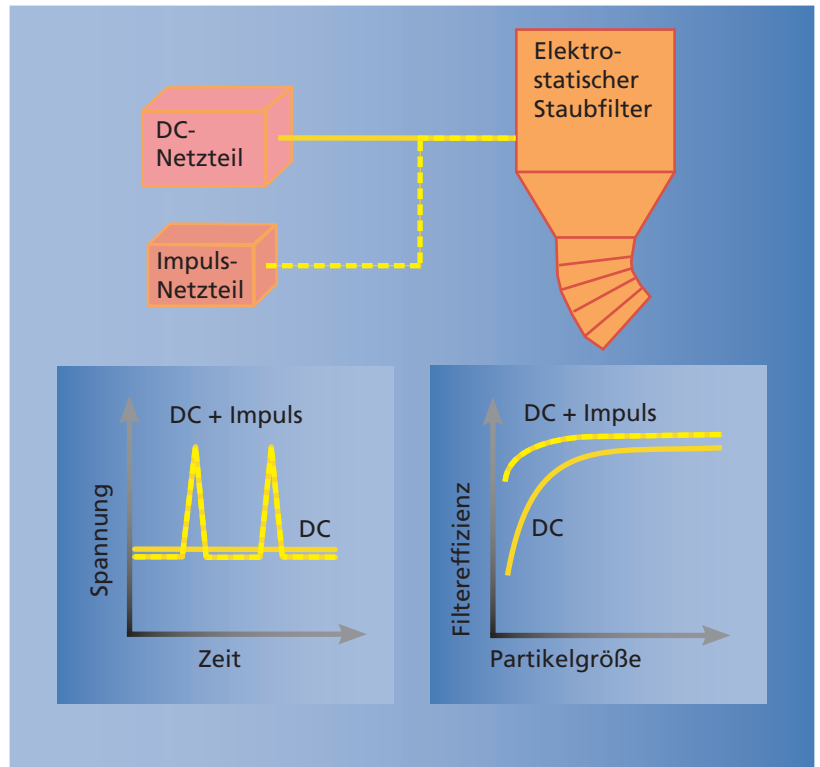


Das wenig polare Pigment Kupfer-Phtalocyanin ist in Wasser schlecht dispergierbar (links). Durch Plasmabehandlung mit Sauerstoff entstehen auf der Oberfläche der Pigmentteilchen Hydroxylgruppen, die die Polarität erhöhen. Dann läßt sich der Farbstoff gut in Wasser dispergieren (rechts).

neigen in polaren wässrigen Systemen dazu, sich zu größeren Verbänden zusammenzulagern. Bringt man jedoch ein Pulver mit derartigen Pigmenten in ein Plasma mit Ammoniak oder Sauerstoff als Prozessgas, werden dort Amino- bzw. Hydroxylgruppen an den Pigmentoberflächen erzeugt. Diese Funktionalisierung führt zu wasserfreundlicherem Verhalten.

Plasmachemie läßt sich vorteilhaft nicht nur mit nicht thermischen Plasmen, sondern auch mit thermischen Plasmen betreiben. Gegenüber den nicht thermischen Verfahren lassen sich damit besonders hohe Stoffumsätze bei Atmosphärendruck oder auch bei erhöhtem Druck erreichen. Geeignet sind solche Verfahren zur Zersetzung chemischer Verbindungen (Plasmapyrolyse), zur Darstellung von Hochtemperaturreaktionen und zur Ent- und Vergasung fester Stoffe. Auch die **thermische Plasmachemie** hat Geschichte: Seit 1905 stellt man so Stickoxide her, seit 1940 Acetylen.

Die neue Plasmatechnik mit gepulsten Elektrofiltern führt zu hohen Staubabscheideraten bei vermindertem Energieverbrauch.



Über die produktionsorientierten Aspekte hinweg hat die Plasmatechnik Einfluß auf die Chemie durch neue Möglichkeiten in der **chemischen Analytik**. Diese betreffen optische, spektroskopische und massenspektroskopische Methoden; letztere erlauben den Nachweis einer Vielzahl von Elementen in einer Probe in wenigen Minuten, die optischen Verfahren sind bei niedrigen Nachweisgrenzen einfach zu handhaben. Plasmen bei diesen Methoden dienen dabei der Anregung der Proben.

Verbreitet sind mittlerweile ICP-spektroskopische Methoden (ICP steht für Inductively Coupled Plasma). Bei den massenspektroskopischen bzw. optischen Emissions-Analysegeräten dieser Art werden Proben durch Plasmen angeregt, die ihre Energie durch induktive Einkopplung elektrischer Energie beziehen. Während massenspektroskopische Methoden immer ein Hochvakuum benötigen, arbeiten die optischen Methoden wie ICP-OES (Optische Emissionsspektroskopie) bei Atmosphärendruck und sind auch in Routine- und Screeningverfahren einsetzbar.

Pulsgetriebenen in den Entsorgungstrakt

Abgasbehandlungen für saubere Luft lassen sich in großtechnischen Bereichen mit Plasmatechnik durchführen. Teilweise sind derartige Techniken schon länger eingeführt, so die elektrische Rauchgasreinigung. Damit soll die Menge der Aerosole aus Industrieanlagen drastisch reduziert werden. Immerhin gelangen

heute weltweit jährlich mehr als 50 Millionen Tonnen Stäube in die Atmosphäre. Deshalb gibt es in Deutschland und Europa strenge Auflagen, die höchste Anforderungen an die Abgasreinigung stellen. Die Staubpartikel in Größen von weniger als einem Mikrometer bis zu mehreren zehn Mikrometern beeinflussen das Klima, weil sie die Sonnenstrahlen reflektieren, und natürlich sind sie auch gesundheitsschädlich.

Die bisher zur **Rauchgasreinigung** eingesetzten Elektrofilter laden die Staub- und Rauchteilchen in einer Koronaentladung elektrisch auf und lenken sie dann durch elektrische Felder aus dem Abgasstrom heraus zu einer Abscheidervorrichtung. Diese Filter sind große Anlagen: In Kraftwerken gilt es, mehr als 100.000 Kubikmeter Abluft pro Stunde zu filtern. Sie weisen heute einen Wirkungsgrad von 98 Prozent und etwas darüber auf.

Leider zeigen die vorhandenen Elektrofilter Schwächen beim Ausfiltern von kleinen Partikeln im einstelligen Mikrometerbereich und darunter. Gerade solche Teilchen gelangen aber beim Einatmen ungehindert in die Lungen.

Eine höhere Aufladung der Teilchen für eine bessere Abscheiderate scheiterte wegen der hierfür erforderlichen hohen elektrischen Felder im Elektrofilter. Die Lösung der Plasmatechnik für dieses Problem heißt Puls. Mit weiterentwickelten Leistungshalbleitern lassen sich zukünftig die benötigten Impulsspitzenleistungen von 50 Megawatt bei Pulsraten von 200 Hertz schalten. Die Plasmen in den Partikelfiltern werden dann mit **Hochspannungspulsen** überlagert. Die Folge ist, dass Staubpartikel bis deutlich unter einem Mikrometer quantitativ abgeschieden werden; wegen der kurzen Pulsdauer erfolgt trotzdem kein Filterdurchschlag.

Das Prinzip eignet sich auch zur Konstruktion von Plasmachemiereaktoren etwa zur Umwandlung fossiler Brennstoffe, und auch Abluftreinigung durch plasmachemische Vorgänge ist möglich. Das BMBF fördert sowohl Untersuchungen zur plasmakatalytischen Oxidation chlorierter Kohlenwasserstoffe als auch zur Modellierung der zugrundeliegenden Vorgänge. Darauf aufbauend lassen sich entsprechende Plasmareaktoren bauen.



Eindringliches Verhalten

Power mit Puls

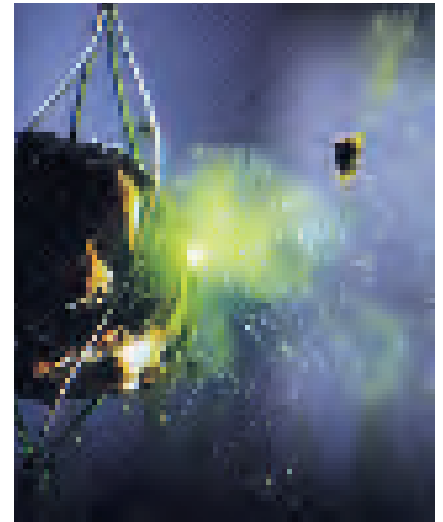
Die Leistungsfähigkeit gepulster Hochleistungsplasmen – auch als Pulse Power-Technologie bezeichnet – eröffnet ökologische Problemlösungen auf dem Sektor des **Stoffrecyclings**, zum Beispiel für die Zerkleinerung von Betonbrocken. Das Prinzip dabei besteht in der Umwandlung der elektrischen Energie eines Funkens in Leistungsschallpulse. Mit dem Verfahren lassen sich Betonblöcke aus Abrissunternehmungen so zerkleinern, dass eine definierte Partikelgrößenverteilung hergestellt wird und sich Betonzuschlagstoffe spezifisch herauslösen lassen. Damit erschließt sich ein Weg zur Wertstoffrückgewinnung. Übrigens übernimmt Plasma auch die Schaltung des Funkens.

Das Prinzip der Energieumwandlung eines Funkens – selbst ein Plasma – in starke Schallpulse läßt sich aber auch auf andere Einsatzgebiete erweitern, etwa auf die Zertrümmerung von Nieren- oder Gallensteinen mit schonenden Operationstechniken. Im Bergbau erprobt man den Ersatz chemischer Sprengmittel durch Stoßwellen, und auch Ablagerungen in Rohren sind eine denkbare Anwendung für Stoßwellen. Die Bereiche Hochleistungspulse

und Plasmen sind miteinander verbunden: Hochleistungspulse müssen erzeugt und geschaltet werden. Dabei geht es durchaus um Schaltspannungen von 100 Kilovolt; die nach dem Schaltvorgang fließenden Ströme können 100 Kiloampere betragen. In gepulsten industriellen Anwendungen müssen Schalter milliardenfach schalten. Oftmals erfüllen diese Anforderungen nur **Plasmaschalter**, für die es jetzt Neuentwicklungen gibt.

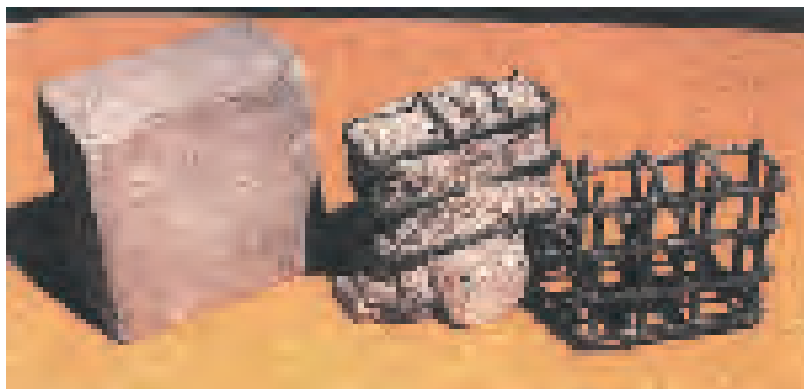
Ungepulst finden Plasmaschalter Anwendung in der Stromverteilung; hier sind die elektrischen Leistungswerte noch höher als die oben genannten. Die Beispiele zeigen: Plasmaschalter erweisen sich als Schlüsselkomponente in der Leistungspulstechnik.

Plasmen als Schalter und Plasmen als Werkzeug, als Medium, treffen bei gepulsten Gasentladungslasern wie Excimer- und Kohlendioxidlasern zusammen. Bei ihnen dient das Plasma als Schaltmedium im Schalter für die Pulserzeugung. Im Laser selbst ist das Plasma Medium für die Erzeugung der Strahlung. Und wenn solche Laser in der Materialbearbeitung eingesetzt werden, erfolgt die eigentliche Bearbeitung über das **lasererzeugte Plasma**.



Derartige laserinduzierte Plasmen weisen sehr hohe Elektronendichten von bis zu 10^{19} pro Kubikzentimeter auf. Ein solches Plasma dient in der Materialbearbeitung zum Schneiden, Bohren und Schweißen. Einsatzmöglichkeiten gibt es ebenso in der Plasmachemie: Moleküle mit Fußball- und ähnlichen Strukturen – Fullerenen – können so dargestellt werden. Und fast kurios: Lasererzeugte Plasmen werden bei entsprechender Auslegung selbst zum Laser – und zwar sogar für weiche Röntgenstrahlung, weil in ihnen ein sehr hoher Überschuss an angeregten Teilchen vorliegen kann.

Leistungsschall aus laser-angeregten Plasmapulsen zertrümmert gezielt Gallensteine.

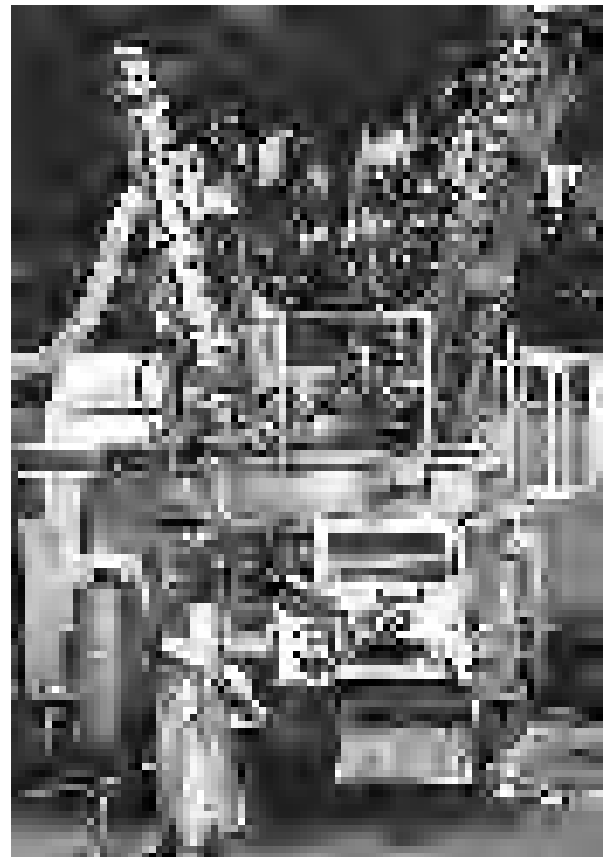


Oben: Durch Leistungsschall vom Zement befreiter Zuschlagstoff; links: herausgelöste Bewehrung



Plasmaschalter für Betonzerkleinerer

**Versuchs-
reaktor zur
Filterstaub-
verbrennung**



Schmelzen und Bohren

Gepulste Plasmen haben zweifellos einen Siegeszug in industriellen Anwendungen angetreten. Ein Grund dafür ist die Vielzahl von Möglichkeiten zu Pulsvariationen, die höhere Freiheitsgrade etwa in der Reaktionsgestaltung bei plasmachemischen Aufgabenstellungen erlauben und zu maßgeschneiderten Lösungen führen. Zu den derzeit größten und leistungsstärksten industriellen Plasmaanlagen mit Leistungen von einigen zehn Megawatt zählen allerdings solche im Dauerbetrieb. Es sind **Plasmaschmelzanlagen**, die vorwiegend für das Schmelzen von Stahlschrott und für das Umschmelzen von legierten Stählen und hochschmelzenden Metallen wie Titan, Tantal, Molybdän oder Niob eingesetzt werden. Verwendet werden Plasmaanlagen auch zum kontrollierten Heizen von Stahlschmelzen beim optimierten Stranggießen.

Einsatz finden derartige Hochleistungs-Plasmbrenner auch im Umweltschutz: Bei der Müllverbrennung fallen große Mengen Filterstäube an. Ein Verfahren ihrer Behandlung als Sondermüll setzt auf Plasmbrenner. Sie schmelzen die Stäube auf und zerstören dabei Dioxine und andere giftige Verbindungen thermisch. Müssen unbehandelte Filterstäube als Sondermüll entsorgt werden, lassen sich Plasmaaufgeschmolzene Filterstäube zu einer bautechnisch verwertbaren Schlacke verarbeiten. Dazu wird die Schmelze schlagartig abgekühlt; Schwermetalle werden aus den Dämpfen rückgewonnen.

Plasmen schneiden, schweißen, schmelzen, bohren Werkstoffe, wandeln sie um, und zum Teil

schalten sie die rekordverdächtigen elektrischen Ströme, die für einige dieser Verfahrensschritte notwendig sind. Plasma als schießes Energiewerkzeug in großen Geräten und Anlagen? Weit gefehlt, wie eine bemerkenswerte Anwendung aus der Elektronikindustrie zeigt: **Mikroplasmen** ätzen in gedruckten elektronischen Schaltungen in einer Stunde Millionen von Mikrolöchern für die Verbindung von Schaltelementen! Dabei erreichen sie Abmessungen, die um das Zehnfache geringer sind als mit Mikrobohrern gebohrt. Die Packungsdichte solcher Schaltungen nimmt somit weiter zu.

Plasmen ätzen Millionen haarfeiner Löcher in einer Stunde in Leiterplatten.

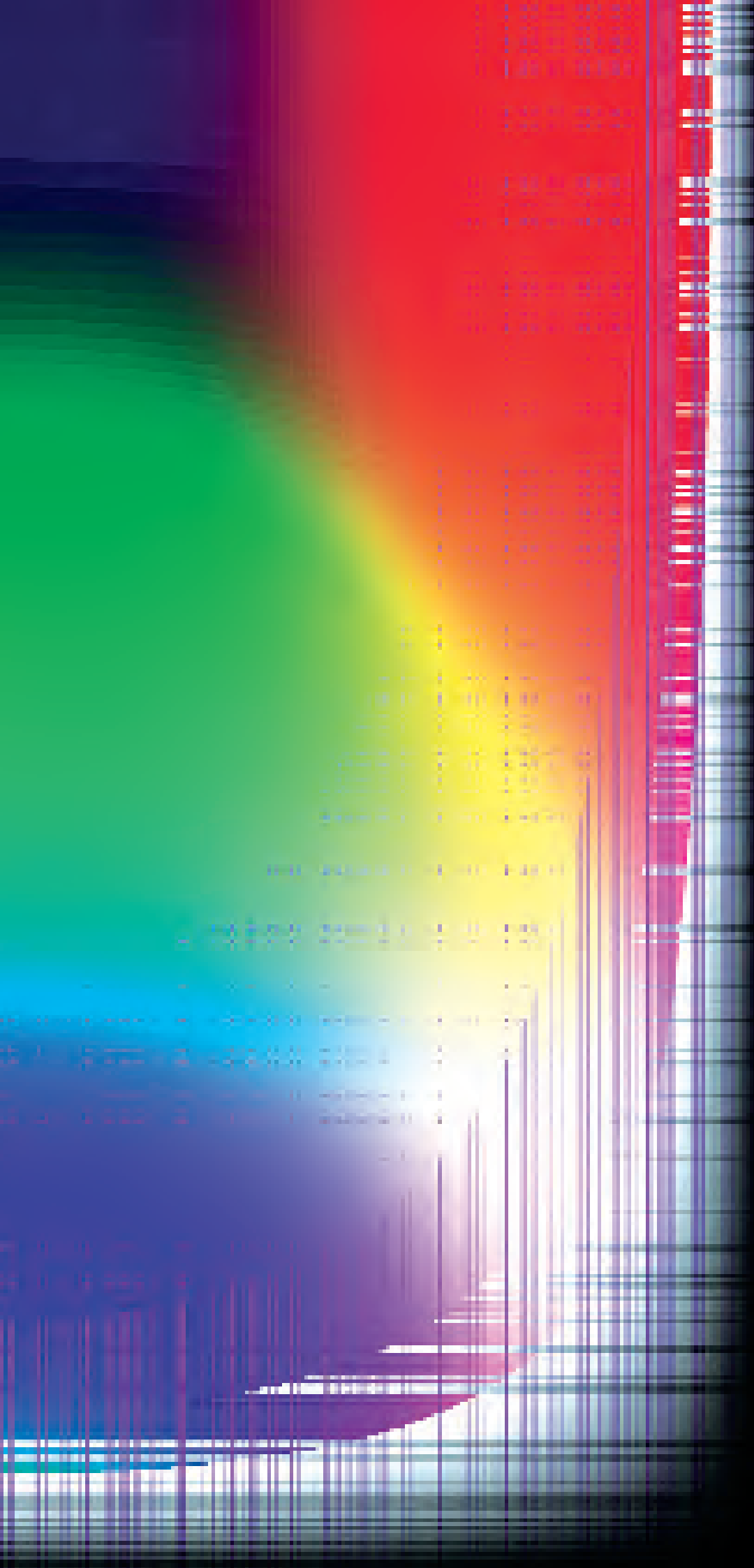


Bohrer 0,3 mm Durchmesser

Menschliches Haar

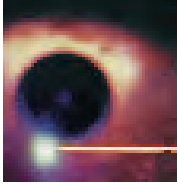
Mikroloch mit einem Durchmesser von 50 Mikrometern

Fläche einer konventionellen Kontaktierung

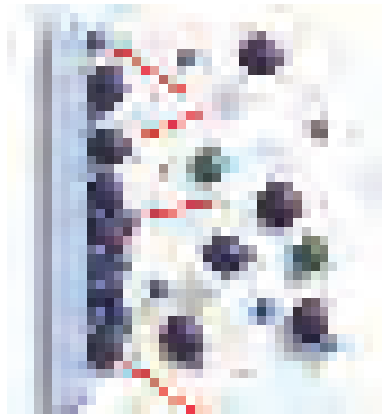
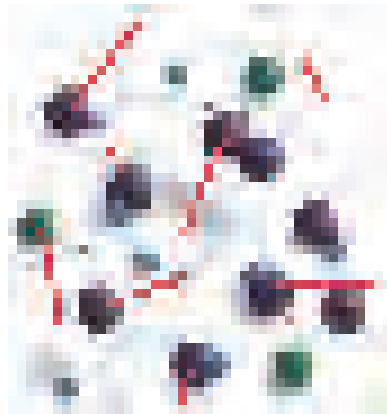


Die Plasmatechnik ist in der jüngeren Vergangenheit dank zahlreicher neuer Erkenntnisse und der technischen Entwicklung zum Beispiel in der Leistungselektronik aus dem Dornröschenschlaf aufgewacht. Eine Vielzahl von Projekten befinden sich in Entwicklung oder haben bereits Produkt- und Produktionsreife erlangt. Doch das ist erst der Anfang.

Die hohen Freiheitsgrade der Teilchen in Plasmen, die große Auswahl an Prozessgasen, die riesige Anzahl veränderlicher Prozessparameter, die unzähligen Reaktorgeometrien ermöglichen eine Vielzahl von Anwendungen der Plasmatechnik. Produkt- und Verfahrensinnovationen lassen sich jedoch nur durch erhebliche Anstrengungen in Forschung und Entwicklung (F&E) erreichen. Es gilt, Prozesse zu klassifizieren und Plasmaverhalten vorherzusagen. Modelle und Simulationen von Plasmen müssen dazu auf verlässliche Daten der Plasmadiagnostik zurückgreifen können – alles Felder aktueller Forschung und Entwicklung.



Drum prüfe, was sich bindet



Wenn Wand und Teilchen wechselwirken

Die systematische Erforschung und Beschreibung der **Niedertemperatur-Plasmaphysik** wurde wie erwähnt lange vernachlässigt, gerade weil die Beschreibung der Teilchen, Felder und Strömungen in einem Plasma sehr komplex ist. Das alternative „Trial and Error“-Vorgehen konnte nur begrenzt zufrieden stellen.

Das wohl größte Problem für die Erforschung ist die Wechselwirkung von Niedertemperatur-Plasmen mit den Werkstücken, da hier drastische Änderungen der Teilchen- und Energiezustände auftreten. Die die Plasmen umschließenden Materialien – seien es die der Plasmaquellen oder die von zu bearbeitenden Werkstücken – haben nämlich vielfältige Einflüsse auf die Plasmen. So führen sie dazu, dass nie ein reines Plasma vorliegt, weil sich immer auch Teilchen von den Materialien lösen und in das Plasma gelangen.

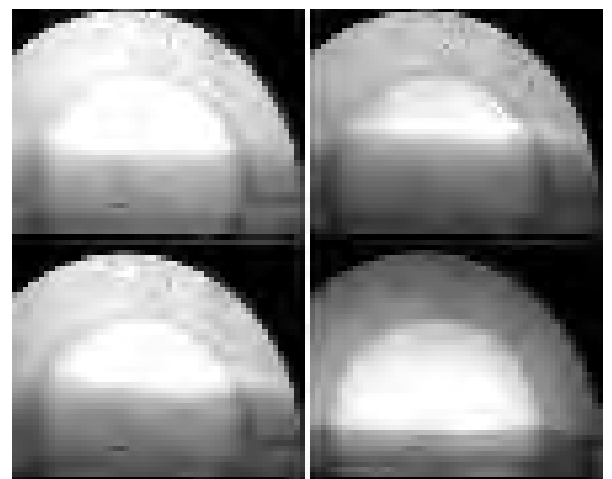
Zudem benötigt man andere Modelle zur Beschreibung des Plasmas in der Nähe von Festkörpern: Kann man „freies“ Plasma (im thermischen Gleichgewicht) mit Mittelwert bildenden Methoden berechnen, wird in der Nähe eines

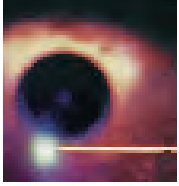
Festkörpers praktisch jedes Teilchen zu einem Individuum und verlangt eine „persönliche“ Berechnung. Davon abgesehen liegen schon im Plasma selbst die Teilchen in sehr zahlreichen zu berücksichtigenden Zuständen vor, die alle einzubeziehen sind. In der Theorie der Plasmaphysik konnte man deshalb vor 20 oder gar 30 Jahren viele Probleme weder beschreiben noch theoretisch berechnen. Man musste immer mit Modellzonen arbeiten – Stückwerk, wie Experten meinen. Erst heute gibt es Computer, mit denen sich Niedertemperatur-Plasmasysteme modellieren lassen – sofern sie nicht allzu komplex sind. Plasmamodelle und -simulationen stellen ein wichtiges Handwerkszeug zur Beherrschung von technisch nutzbaren Plasmen dar.

Ein zweites Problem zur Beherrschung von Plasmen ist deren Diagnostik. Man konnte lange Zeit nicht gut genug in die Plasmen hineinsehen, um überhaupt eine numerische Basis für Berechnungen zu bekommen. Noch heute fehlen viele Daten, die den Übergang der Teilchen in unterschiedliche Zustände und Erscheinungsformen beschreiben. Die Feinheit der Messungen, solche Daten zu bekommen, ist mit extremen Anforderungen an die experimentel-

Acetylenmoleküle im Gaszustand (links) dissoziieren bei genügender Energieeinwirkung zu Ionen, Elektronen, Radikalen – und bilden somit ein Plasma (Mitte). Stoßen Teilchen an eine feste Grenzschicht (rechts), kann das zu schlagartigem Energieverlust führen; die Wand erhält eine Schicht aus amorphem Kohlenstoff.

Die Plasmarandschicht (Dunkelraum) hängt von Entladungsleistung und Druck ab. Eine Messung dieser Schichtdicke liefert Plasmadaten. In den Bildern variiert der Druck des Argonplasmas zwischen 0,005 und 0,01 Millibar, die Leistung zwischen 10 und 50 Watt.





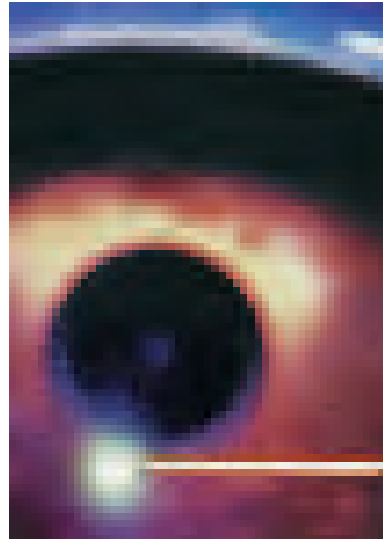
Drum prüfe, was sich bindet

len Möglichkeiten verknüpft. Ein Zauberwort, das in Gesprächen mit Plasmaexperten hinsichtlich aktueller Entwicklungen immer wieder aufkommt, ist **Puls**. Planare Oberflächen etwa lassen sich gut mit ebenso planaren Plasmen bearbeiten – wenn man weiß wie. Entladungen schlagen aber oft ohne besondere Maßnahmen aufgrund von Instabilitäten in andere Erscheinungsformen um, es bilden sich Entladungsspitzen, die die Werkstücke zerstören. Dies kann man dadurch vermeiden, indem man das Plasma pulst. Jede Instabilität hat nämlich einen bestimmten Zeitaufwand; gepulste Plasmen lassen zerstörende Entladungsformen keine Zeit zur Ausbildung.

Gepulste Plasmen können aber noch mehr. In der Plasmachemie lassen sich damit gezielt Moleküle anregen. Es kann für Anwendungen nützlich sein, bei chemischen Substanzen bestimmte Molekülgruppen gezielt anzuregen oder zu entfernen. Dazu muss man die Plasmaenergie sehr genau einstellen. Das erreicht man mittlerweile durch zeitliche Variation der Plasmaenergie. Die Plasmapartikel haben ja eine unterschiedliche Lebensdauer. Durch Variation von Pulsdauer und Pause lässt sich dann ein Zustand des Plasmas erreichen, in dem lang- und kurzlebige Partikel in unterschiedlichen Konzentrationen vorliegen. Dadurch lässt sich die Ausbeute chemischer Reaktionen in vielen Anwendungen maximieren. Die Experten sind sich einig: Die Entwicklung geht hin zu zeitveränderlichen Plasmen. Damit verbunden ergeben sich entsprechende Aufgaben der Plasmadiagnostik, in der dann auch zeit- und ortsauflösend gemessen werden muss, sowie solche der Plasmasimulation und der Plasmaquellen-Konstruktion.

Erfreulicherweise verzeichnet die **Plasmadiagnostik** erhebliche Fortschritte. In früheren Zeiten glich beispielsweise die Plasmachemie, die die Reaktionen verschiedenster Teilchen in Plasmen untersuchen, beschreiben und auch lenken will, lange Zeit eher der Alchemie. Das wohl älteste plasmadiagnostische Instrument, die Langmuirsonde – vereinfacht ein Draht im Plasma, über den sich etwa Elektronen- oder Ionendichten ermitteln lassen, bedarf in vielen Fällen einer kritischen Prüfung. So arbeiten viele Prozesse in der Plasmatechnik mit Gasen, die zur Bildung einer dünnen, nichtleitenden Schicht auf der Sondenoberfläche führen, welche die Messung verfälscht.

Alternativ setzt man zur Messung der Elektronendichte in beschichtenden bzw. reaktiven Plasmen die Plasmaoszillationsmethode ein. Hierbei wird ein schwacher Elektronenstrahl von einem negativ vorgespannten Glühdraht in das Plasma injiziert. Dieser Strahl regt eine Plasmaschwingung an, deren Messung Auskunft über die Elektronendichte gibt.



Zylindrische Langmuirsonde mit Keramik-Abschirmung im Plasma. Zur Reinigung erhält die Sonde vor der Messung ein positives Potenzial. Das führt durch einen hohen Sondenstrom zum Glühen der Spitze.

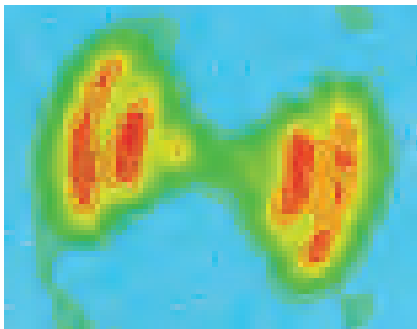
Nicht linientreu, doch existent

Modellierung und Simulation von Plasmen unterstützen Untersuchungen zum grundlegenden Verständnis plasmatechnischer Vorgänge und beschleunigen die Entwicklung von Konzepten für reale Systeme. Bedeutsam für die Simulation ist, dass seitens der mathematischen Methoden als Grundlage der Simulation in der jüngeren Vergangenheit erhebliche Fortschritte erzielt wurden. So fließen Erkenntnisse der Chaostheorie ebenso in die Plasmasimulation ein wie solche der Synergetik oder evolutionärer Algorithmen. Chaostheorie und Synergetik – in angelsächsischen Ländern ging letztgenannter Begriff in dem Bereich der **nicht-linearen Dynamik** auf – helfen beispielsweise bei der Erklärung schnell ablaufender Modenänderungen in Plasmen, und mit evolutionären Algorithmen lässt sich die Geometrie von Plasmaquellen optimieren.

Dabei ergeben sich auch „Abfallprodukte“ der theoretischen Plasmaforschung für andere Wissenschaften, Beispiel: Die Existenzdiagramm-Methode, die jetzt Erfolge in der Meteorologie feiert. Entwickelt wurde sie aus der Aufgabenstellung heraus, Berechnungen durchführen zu können, auch wenn viele der für die Berechnung benötigten Daten unbekannt sind.

Technologische Herausforderungen, die es zunehmend zu meistern gilt, liegen in der **Skalierung von Plasmaprozessen**. Dabei geht es um die Übertragung von Plasmaprozessen aus der Grundlagenforschung heraus über angewandte Forschung und Pilotphasen hin zum industriellen Einsatz. Ska-

Beispiel für ein Plasma- tomogramm



liert werden müssen beispielsweise Größe, Zeit oder Druck. Geht man zu größeren Abmessungen über, gilt es etwa, Leistungswerte anzupassen oder auch Geometrien zu optimieren.

Veränderungen im Zeitmaßstab zielen meist auf eine Verkürzung der Prozesszeit ohne Veränderung der Prozessqualität. Dies erfordert intensive, hochwirksame Plasmen.

Skalierung im Druck bedeutet eine Erhöhung des Prozessdrucks und damit eine Reduktion der Anlagenkosten. Heutige Plasma-Anwendungen arbeiten meist bei Niederdruck; die nötige Vakuumtechnik kostet Geld; Ziel sind deshalb Normaldruckprozesse. Allerdings funktioniert die Anwendung von Plasmen unter Normaldruck bisher nur in einem geringen Teil der Fälle, etwa bei der Aktivierung von Oberflächen.

Beschichtungen bei Atmosphärendruck stellen plasmatechnisch ein großes Problem dar. Schuld daran sind Prinzipien der Gasdynamik: Bei Atmosphärendruck sind die mittleren freien Weglängen der Teilchen sehr klein; schnell stoßen sie mit anderen zusammen, verlieren dabei ihre Reaktivität oder lagern sich selbst zu Staubteilchen im Nanomaßstab zusammen.

Solche Vorgänge eröffnen natürlich andererseits neue Herstellungsmöglichkeiten für Nanomaterialien. Aus **Nanopulvern** lassen sich Werkstoffe erzeugen, die Eigenschaften von Keramik und Metallen vereinen. Nanopulver werden sicher in sehr gut beherrschten Plasmen bei hohem Druck hergestellt.

Laser-Diagnostik: Die Anzahl der angeregten Atome des Plasmas in verschiedenen Zuständen werden absolut gemessen.



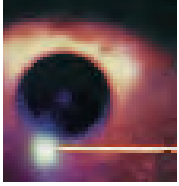
Ein großes Potenzial für Anwendungen der Niedertemperatur-Plasmatechnik liegt auch in **Remote-Plasma-Prozessen**. Zielsetzung dabei ist es, sehr empfindliche Materialien plasmatechnisch bearbeiten zu können, für die selbst die geringe thermische Belastung von Standard-Niedertemperaturplasmen zu hoch ist. Auch das Aufbrechen von Molekülbindungen in solchen Materialien durch energiereiche Elektronen kann unerwünscht sein. Hier will man mit einem Trick weiterkommen: Man entkoppelt den Plasmaprozess von der Plasmaerzeugung. Das Werkstück befindet sich also außerhalb des Plasmas, ist entfernt davon, neudeutsch: remote. Dazu strömt das Arbeitsgas durch das Plasma, wird angeregt, ionisiert und dissoziiert und strömt weiter in den Remote-Bereich, wo sich das Werkstück befindet und der Veredelungsprozess stattfindet.

Mit der **Plasmadiagnostik** ermittelt man Daten, die mittelbar beispielsweise über Simulationen oder unmittelbar über Steuerung und Regelung die Herstellung von plasmabehandelten Produkten in gleichbleibend hoher Qualität ermöglichen. Die Plasmadiagnostik profitierte in jüngerer Zeit haupt-

sächlich durch gerätetechnische Fortschritte – ähnlich wie bei der Simulation durch die Computertechnik.

Großen Anteil haben hier spektroskopische Methoden, vorangetrieben durch moderne Entwicklungen in der Fotodetektion und in der Lasertechnik. Für letztgenannte ein Beispiel ist die Laser-induzierte Fluoreszenzspektroskopie (LIF). In vielen industriell relevanten Plasmaprozessen werden molekulare Gase, häufig auch Gasgemische eingesetzt. Zu deren Untersuchung ist eine teilchenspezifische Diagnostik erforderlich, die LIF liefert. Sie gestattet eine exzellente räumliche und zeitliche Auflösung sowie die Bestimmung der für die Prozesse wichtigen absoluten Teilchendichten im elektronischen Grundzustand. Mit LIF läßt sich beispielsweise in gepulsten Sauerstoffplasmen die Abhängigkeit der Dichte atomaren Sauerstoffs von Pulsfrequenz und dem Verhältnis von Pulsdauer zu Pausendauer ermitteln.

Spektroskopische Methoden zur Diagnostik energetischer Zustände von Atomen und Molekülen – wie beispielsweise die Absorptions-Spektroskopie mit abstimmbaren



Drum prüfe, was sich bindet

Diodenlasern oder spezielle Methoden der Ramanspektroskopie – werden ergänzt durch Oberflächendiagnostiken. Beispiele dafür sind die Raster-Elektronenmikroskopie, die Atom-Kraftmikroskopie oder die Auger-Spektroskopie. Über die eigentliche Plasma-diagnostik hinaus kommen Untersuchungen plasmachemischer Produkte, etwa mit Massenspektroskopie, Gaschromatographie oder Fouriertransform-Infrarotspektroskopie, ergänzend hinzu.

Vielversprechend sind derzeit Entwicklungen, die Querschnittsbilder aus Plasmen liefern sollen. Analoge Bilder kennt man in der medizinischen Diagnostik von Tomographen her. **Plasmatomographie** gibt Aufschlüsse etwa über verschiedene Atome oder Moleküle bzw. verschiedene Spezies (Ionen, Radikale) in Plasmen, deren Konzentration oder Temperatur. Es lassen sich auch dreidimensionale Parameterstrukturen ermitteln; denn die Parameterfelder, die Querschnitte, können noch „gestapelt“ werden.

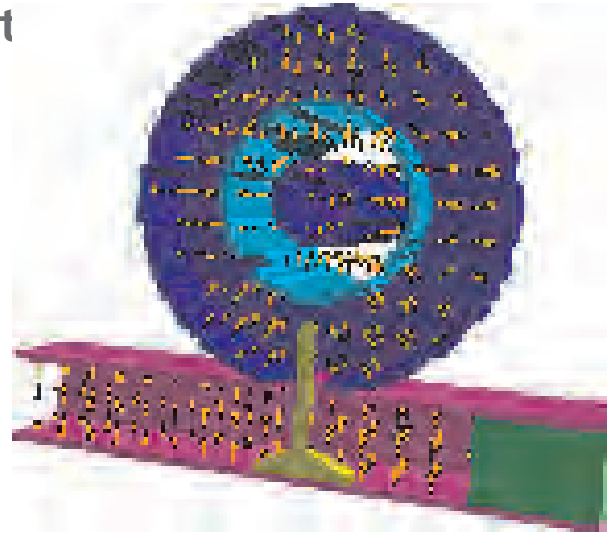
Heutige Computer erlauben die Berechnung von Parameterfeldern fast in Echtzeit, so dass die Plasmatomographie zur Prozesssteuerung in greifbare Nähe rückt. Reproduzierbare Plasmaprofilparameter für einen bestimmten Prozess einzustellen und zu regeln wird möglich.

Zur Grundlagenforschung gehören Untersuchungen von **Plasmakristallen**, regelmäßigen Anordnungen hochgeladener makroskopischer Partikel in staubigen Plasmen. Unter dem Einfluss der gegenseitigen Abstoßung und den umgebenden elektrischen Feldern in einem Plasma bilden die Partikel eine kristallartige Ordnung aus.

Massiv Arbeit – nicht nur für Computer

Die wichtigsten Themen zur weiteren Forschung und Entwicklung im Bereich der Plasmatechnik fassen die folgenden Punkte heraus:

- **Wechselwirkungen von Plasmen mit Werkstoffen**
Ihnen kommen bei allen technischen Oberflächenprozessen Schlüsselfunktionen zu.
- **Nichtstationäre, periodisch oder gepulst angeregte Plasmen**
Sie eröffnen große Entwicklungsmöglichkeiten, da sie gegenüber stationären Systemen eine große Zahl zusätzlicher Steuerungsparameter bereitstellen.
- **Reaktionskinetik von Mehrkomponenten-Plasmen**
Aus Gründen gewünschter chemischer Prozesse oder durch Verunreinigungen stellen sie den realen Plasmazustand dar.
- **Reaktive Plasmabeeinflussung**
Neben äußeren experimentellen Parametern unterliegen technische Plasmen auch reaktiven Einwirkungen der Wände, Elektroden und Werkstoffe.

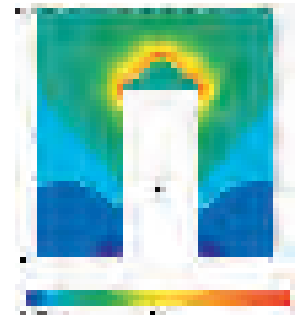
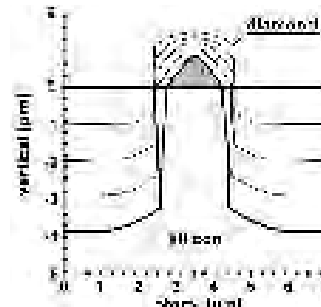


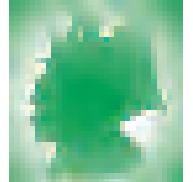
Berechnete Verteilung des elektrischen Feldes in einer Mikrowellen-Plasmaquelle

- **Plasmasteuerung**
Technische Plasmen müssen unter definierten Bedingungen stabil arbeiten, um hohe Produktqualitäten zu erzielen. Dies müssen Steuerung und Regelung leisten.
- **Modellierung und Simulation von Plasmen**
Sie unterstützen Untersuchungen zum grundlegenden Verständnis plasmatechnischer Vorgänge und helfen bei der Konzeption von realen Systemen.

Gerade die stürmische Entwicklung in der Computertechnik ermöglicht es, dass in den genannten Gebieten gute Fortschritte erzielt werden. Beispielsweise lassen sich bei der Strömungsberechnung und der Feldberechnung – beides wichtige Bestandteile der Plasmasimulation – Aufgaben parallelisieren und dann auf Computern, die eine Vielzahl von Prozessoren enthalten (Parallelrechner), gleichzeitig berechnen. Simulationsverfahren unterstützen ebenfalls die Realisierung von Feldemittern, die unter anderem mit Plasmatechnik hergestellt werden.

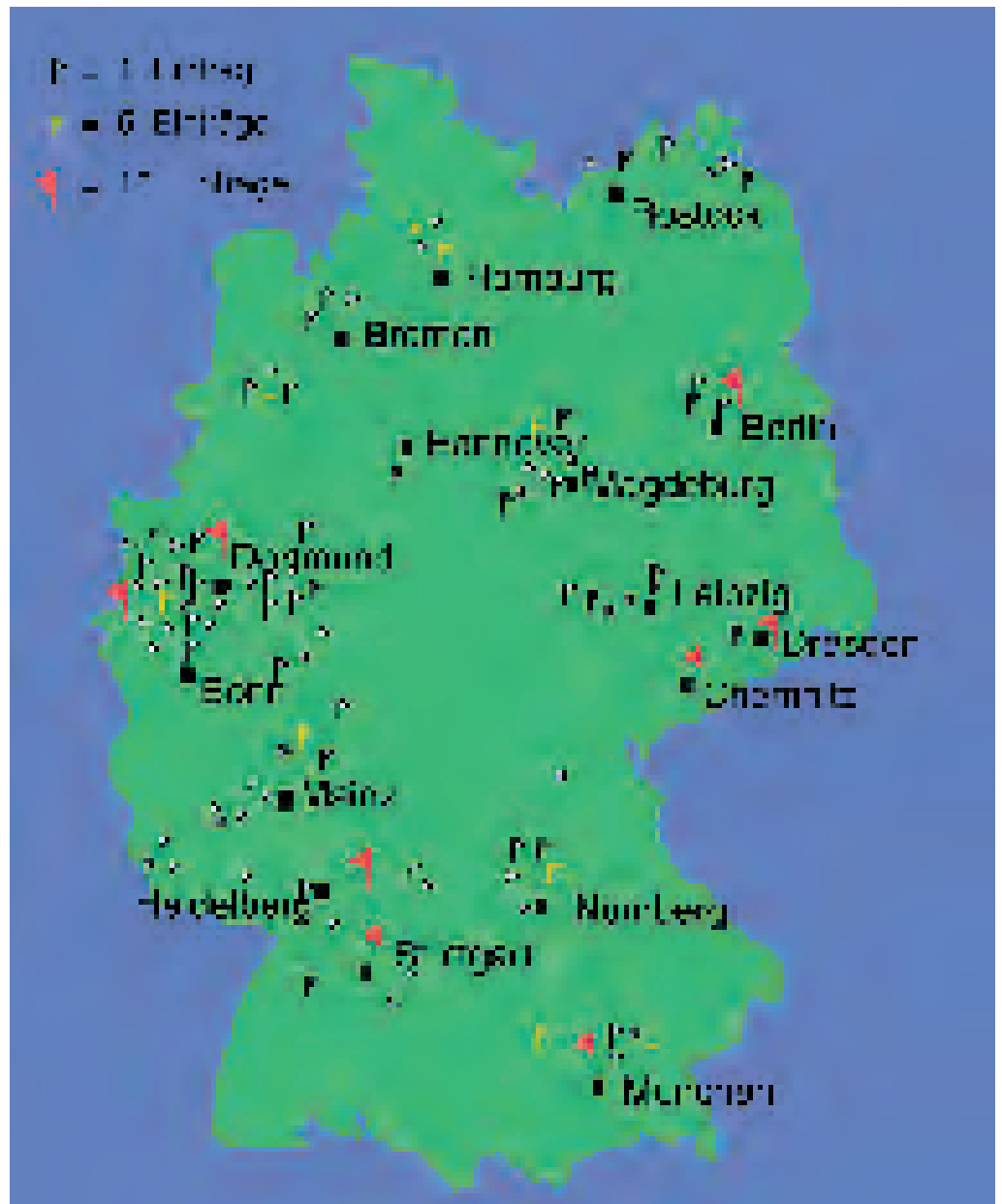
Unten links: Elektronenemitter für Flachbildschirme (Diamantspitze auf Siliziumsäule); Mitte: Simulation der Diamanterzeugung, rechts: Feldverteilung





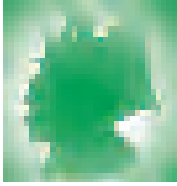
Chancen zur Technologieführerschaft

Mit plasmatechnischen Fragestellungen befassen sich bereits heute viele Unternehmen, Universitäten und Institute in Deutschland. Die nebenstehende Landkarte zeigt das Umfrageergebnis (Stand 1997) im Rahmen der Erstellung des Handbuchs „PlaTA - Plasmatechnologien und Anwendungen“. Dabei ist zu erkennen, dass in allen Teilen Deutschlands Aktivitäten bestehen. Die Fähnchen stehen dabei für die Anzahl der Einträge im o.g. Handbuch.



Die Förderung durch das BMBF hat zur Stärkung der Position deutscher Unternehmen in der Plasmatechnik und ihrer Anwendungen wichtige Beiträge geleistet. So wurden in den Jahren 1988 - 1996 in den Förderschwerpunkten „Dünnschichttechnologien“ und „Oberflächen- und Schichttechnologien (OSTec)“ zahlreiche plasmagestützte Beschichtungsverfahren gefördert. Die Förderung im Förderschwerpunkt „Plasmatechnik“ hat seit 1993 die Anwendungen von neuen Plasmatechniken über die Bereiche von OSTec hinaus deutlich verbreitert. Bisher wurden vorwiegend industrielle **Verbundprojekte zu folgenden Themenbereichen** initiiert:

- Gepulste Plasmen und ihre Anwendungen
- Atmosphärendruck-Plasmaquellen
- Plasmaschalter für die Hochleistungspulstechnik
- Elektrodenprozesse in Gasentladungslampen und neuartige Lampenfüllungen
- Plasmabehandlung von Textilien
- Lokales Hochrateplasmaätzen zur Veredlung optischer Oberflächen
- Plasmatechnische Verfahren zur verbrennungsmotorischen Abgasreinigung
- Plasmaentkeimung von Lebensmittelverpackungen und thermolabilen Implantaten
- Plasmachemische Prozesse und ihre Anwendungen



Plasmatechnik in Deutschland

Förderung der Plasmatechnik

Das Bundesministerium für Bildung und Forschung unterstützt **Forschungsvorhaben im Bereich der Plasmatechnik**. Im Vordergrund stehen dabei industrielle Verbundprojekte, bei denen Unternehmen mit universitären und außeruniversitären Instituten kooperieren.

Ziel der Förderung ist die Erarbeitung von wissenschaftlich-technischen Grundlagen für innovative Lösungen, z.B. in den Life Sciences, der Umwelt- und Medizintechnik, in der Elektro- und Fahrzeugtechnik sowie in der Materialbearbeitung.

Ausgangspunkt sind hierbei Ergebnisse der Grundlagenforschung, die die komplexen Niedertemperatur-Plasmen technisch beherrschbarer machen. Im Vordergrund stehen ressourcen- und umweltverträgliche Technologien und Verfahren wie

- neuartige Plasmaquellen
- effiziente Lichterzeugung
- plasmachemische Prozesse zur trockenen Prozessführung und zum Schadstoffabbau in Abgasen und Abwässern
- Einstellung neuer Werkstoffeigenschaften durch Modifizierung, Konditionierung, Aktivierung und Funktionalisierung
- Reinigen, Sterilisieren
- Plasmapräzisionsbearbeitung
- Analytik

Bei Fragen zur Förderung wenden Sie sich bitte an den **zuständigen Projektträger des BMBF**

*VDI-Technologiezentrum
Physikalische Technologien*

*Graf-Recke-Str. 84
40239 Düsseldorf*

*Tel: 0211/6214-401
Fax: 0211/6214-484*

*<http://www.vdi.de/tz-pt/tz-pt.htm>
e-mail: vditz@vdi.de*

Plasmatechnische Fragestellungen können neben der Förderung im Bereich Plasmatechnik je nach Schwerpunktsetzung auch Relevanz für **weitere Förderbereiche des BMBF** besitzen, wie z.B.:

- Neue Materialien
- Produktionstechnik
- Mikrosystemtechnik
- Nanotechnologie
- Umwelttechnik
- Energietechnik
- Lasertechnik

AC Alternating Current (englisch für Wechselstrom)

Aggregatzustand Der durch Temperatur und Druck sowie von Schmelz- und Siedepunkt bestimmte Zustand eines Stoffes als fester Körper, Flüssigkeit, Gas oder Plasma.

Aminogruppe Bezeichnung für die Molekülgruppe $-NH_2$

amorph Bezeichnung für feste Körper, deren Atome regellos angeordnet sind, kein Kristallgitter bilden, z. B. Gläser, Harze, Opal.

Anode Positive Elektrode

Ätzen Abtragen der Oberfläche fester Stoffe durch Chemikalien, Plasmen oder Elektrolyse.

Bogenentladung Aus einer Glimmentladung hervorgehend, wenn durch höhere angelegte Spannungen die Stromdichten an der Kathode so hoch werden, dass sie stark erhitzt wird und thermisch Elektronen emittiert. Für die Entladungsströme gibt es nach oben fast keine Grenzen; Schichten und Zonen in der Entladung verschwinden.

Büschelentladung Gasentladung, die vor allem an Spitzen und Kanten spannungsführender Teile als Folge der dort besonders hohen elektrischen Feldstärke auftritt.

Carboxylgruppe Bezeichnung für die Molekülgruppe $>C=O$

Chaostheorie Theorie zur Beschreibung von nichtlinearen Systemen, die sich durch ein

bestimmbares (deterministisches) Zufallsverhalten und durch eine unregelmäßige Strukturbildung auszeichnen. Kleine Änderungen können in solchen Systemen große Auswirkungen haben.

Cluster Gebundene oder in ihrer Bewegung korrelierte Teilchen.

DC Direct Current (englisch für Gleichstrom)

Dunkelentladung Unselbständige Gasentladung weitgehend ohne Photoionisation, bei der nur eine kleine Spannung zwischen zwei Elektroden anliegt. Anwendung findet dieser Entladungstyp in Strahlendosimetern.

ECR-Plasmaquellen (electron cyclotron resonance heating) Erzeugt durch Mikrowellen mit Frequenzen bis über 100 Gigahertz, über Magnetfelder gesteuert. Sie geben ihre Energie speziell an die Elektronen in Plasmen. ECR-Entladungen sind sehr rein und homogen.

Enzyme Hochmolekulare Eiweißstoffe, die als Biokatalysatoren chemische Reaktionen beschleunigen.

Estergruppen Bezeichnung von Molekülgruppen der Form $-COOR$

Evolutionäre Algorithmen Algorithmen auf Grundlage von Auswahloperationen, wie sie auch in der Evolution repräsentiert sind. Sie eignen sich, um Lösungen zu finden, die vorgegebene Bedingungen besser erfüllen als vorhandene Strukturen. Sie sind somit ein Optimierungswerkzeug.

Excimer Elektronisch angeregter Molekülkomplex (excited dimer), äußerst kurzlebig, gibt bei Zerfall ein UV-Lichtquant ab. Excimer-Molekülkomplexe können von zwei Edelgasatomen (je zwei Argon-, Krypton- oder Xenonatome) oder auch von einem Edelgasatom und einem Halogenatom (Fluor, Chlor) gebildet werden. Je nach Molekülkomplex entsprechen die angeregten Energieniveaus unterschiedlichen Wellenlängen.

Fibrinogen Eiweißstoff, der maßgeblich an der Blutgerinnung beteiligt ist.

Fullerene Substanzen aus Molekülen, bei denen Kohlenstoffatome ein dreidimensionales, geschlossenes Gerüst bilden, das einen Hohlraum umschließt.

funktionelle Gruppe Molekülgruppen, die ein Wasserstoffatom eines Moleküls ersetzen können. Sie verleiht einer Verbindungsklasse charakteristische chemische und physikalische Eigenschaften; Beispiele: Hydroxylgruppe bei Alkoholen, Aminogruppe bei Aminen.

Glimmentladung Gasentladungen im Niederdruckbereich mit kalten Elektroden, Strömen im Bereich von etwa 0,1 mA bis über 100 mA und Brennspannungen von 70 V bis zu einigen 100 V. Glimmentladungen entwickeln sich aus Dunkelentladungen bei Erhöhung der Stromdichte. Bei einer vollständig ausgebildeten Glimmentladung treten eine Anzahl charakteristischer Leuchtschichten und Dunkelräume auf.

Hochfrequenz (HF) Bezeichnung für den Bereich der Frequenzen von elektromagnetischen Schwingungen und Wechselströmen, die zwischen 10 Kilohertz und 300 Megahertz liegen; das entspricht Wellenlängen zwischen 30 Kilometern und einem Meter.

Hydroxylgruppe Bezeichnung für die Molekülgruppe –OH

Immunoassay Englische Bezeichnung für Immuntest. Ein Beispiel dafür ist das Immunfluoreszenzverfahren: Körperschädliche Stoffe (Antigene) werden von Antikörpern besetzt. Markiert man diese Antikörper mit fluoreszierenden Stoffen, lassen sich Antigene aufspüren.

Interferenz Überlagerungerscheinungen beim Zusammentreffen von zwei oder mehr Wellenzügen ausreichend ähnlicher Wellenlänge und Phase. Auf diese Erscheinung aufbauend lassen sich Filter konstruieren, die nur Teile des Wellenspektrums passieren lassen.

Katalysatoren Stoffe, die chemische Reaktionen beschleunigen bzw. in bestimmte Richtungen lenken und aus diesen Reaktionen unverändert hervorgehen.

Kathode Negative Elektrode

Kelvin Basiseinheit der Temperatur im Internationalen Einheitensystem. 0 Kelvin entsprechen -273,16 Grad Celsius. Ein Temperaturunterschied von einem Grad Celsius entspricht einem Kelvin.

Koronaentladung Gasentladung in einem stark inhomogenen elektrischen Feld, d.h. insbesondere

an Spitzen und Kanten von unter Spannung stehenden Körpern. Nur im Gebiet der höchsten Feldstärke tritt eine mit Leuchterscheinungen (in Form einer „Lichthaut“) verbundene Stoßionisation des Gases auf.

Kosmische Strahlung Strahlung aus dem Weltraum aus hochenergetischen nuklearen Partikeln, Elementarteilchen, Neutrinos und elektromagnetischer Strahlung, die (z.T. nach vielen Umwandlungen) noch tief in der Erdkruste bzw. im Meer nachweisbar ist.

Lumen Die Einheit des Lichtstroms im internationalen Einheitensystem.

Magnetron 1. Senderröhre für Mikrowellen; 2. Anlage zur Erzeugung von Plasmen, zum Zerstäuben („Sputtern“) von Material unter Plasmaeinwirkung, optimiert durch äußere Magnetfelder auf eine hohe Zerstäubungsrate für Beschichtungen.

Mikrowellen Elektromagnetische Wellen im Dezimeter-, Zentimeter- und Millimeterbereich mit entsprechenden Frequenzen zwischen 300 Megahertz und 300 Gigahertz. Sie liegen zwischen den Radiowellen und der Infrarotstrahlung.

Nichtlineare Dynamik Theorie dynamischer Systeme, deren Bewegungsgleichungen nichtlinear sind (Beispiel: Gravitationsbedingte Bewegung eines 3-Körper-Systems).

Ozon Bei Raumtemperatur ein giftiges Gas aus Sauerstoffmolekülen, die aus je drei Sauerstoffatomen bestehen.

Plasma 4. Aggregatzustand der Materie, der aus Ionen, Elektronen und neutralen Teilchen besteht.

Polarlicht In den Polargebieten nachts zu beobachtende Leuchterscheinung, die durch Korpuskularstrahlung der Sonne in der Erdatmosphäre in Höhen zwischen ca. 70 und 1000 Kilometern Höhe ausgelöst wird.

Radikal Atom oder Molekül mit einem ungepaarten Elektron, typischerweise sehr reaktiv, die auch untereinander reagieren (rekombinieren). Häufig entstehen aus den Reaktionen neue Radikale, so dass eine Kettenreaktion gestartet wird.

Radionuklid Radioaktive Atomkerne, die sich durch radioaktiven Zerfall in andere Nuklide umwandeln.

Sputtern Feinstzerstäuben von Materialien durch Ionenbeschuss.

Synergetik Kooperation individueller Teile eines Systems, das dadurch als Ganzes räumliche, zeitliche oder funktionale Strukturen bildet. Dies betrifft bestimmbare (deterministische) wie auch Zufallsprozesse.

Thrombose Gefäßverengung oder -verschluss durch ein Blutgerinnsel

Wafer Scheibe aus einem Halbleiter-Einkristall mit einem Durchmesser von bis zu 30 Zentimetern, auf der hunderte bis tausende integrierter Schaltungen erzeugt werden.

Bild- und Grafiknachweis

ANTEC GmbH, Kelkheim (19)

Arbeitsgemeinschaft Plasmaphysik APP, Bochum (8 (2x), 11)

Aurion Anlagentechnik GmbH, Seligenstadt (7)

Balzers and Leybold Holding, Hanau (20)

BASF AG, Ludwigshafen (28)

Dyconex AG, Zürich, Schweiz (31)

Forschungszentrum für Mikrostrukturtechnik FMT, Wuppertal (5 (2x), 11, 27 (5x), 28, 33, 34 (2x), 36 (5x))

Fraunhofer Institut Schicht- und Oberflächentechnik IST, Braunschweig (19, 25)

Fraunhofer Institut Werkstoffmechanik IWM, Freiburg (21 (2x))

Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Physikalisches Institut I (30)

FZM GmbH, Flöha/Sachsen (18, 20)

Helms, Thomas, Berlin (6)

Heraeus Noblelight GmbH, Kleinostheim (14)

Humboldt-Universität Berlin, Institut für Physik (15 (2x))

Institut für Niedertemperatur-Plasmaphysik INP, Greifswald (4, 23, 24 (5x), 35 (2x))

Institut für Textil- und Verfahrenstechnik ITV, Denkendorf (18)

Kickuth, Rolf (4, 5 (2x), 6, 7, 8, 9, 10 (2x), 13, 16 (2x), 17, 18 (nach FZM), 21, 22 (mit FMT), 26, 29 (nach Siemens), 32, 37 (2, nach

PlaTA Handbuch Plasmatechnologien und -anwendungen, Raabe, Stuttgart), 38)

Laser- und Medizin-Technologie GmbH, Berlin (5, 30)

Mannesmann AG, Düsseldorf (11)

Messe München AG (4, 17, 19, 21)

Osram GmbH, München (4, 12, 13, 14 (2x), 16)

Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Institut für Allgemeine Elektrotechnik und Leistungselektronik (30 (2x))

PHYTIS International GmbH, Dreieich (24)

PLASMA-finish GmbH, Schwedt/Oder (25)

RWTH Aachen, Lehr- und Forschungsgebiet Werkstoffwissenschaften (23, 25)

Sidel Groupe, Octeville-sur-mer, Frankreich (33 (3x))

Siemens AG, Erlangen (28)

SOFTAL electronic Eric Blumenfeld GmbH & Co. KG, Hamburg (11)

Springer-Verlag, Heidelberg (9)

Thyssen Krupp AG, Düsseldorf (31)

Tigres Dr. Gerstenberg GmbH, Hamburg (17)

Universität Gesamthochschule Essen, Institut für Laser- und Plasmaphysik (33 (4x))



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

bmb+f

Diese Druckschrift wird im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit vom Bundesministerium für Bildung und Forschung unentgeltlich abgegeben. Sie ist nicht zum gewerblichen Vertrieb bestimmt. Sie darf weder von Parteien noch von Wahlbewerbern oder Wahlhelfern während eines Wahlkampfes zum Zwecke der Wahlwerbung verwendet werden. Dies gilt für Bundestags-, Landtags- und Kommunalwahlen sowie für Wahlen zum Europäischen Parlament. Missbräuchlich ist insbesondere die Verteilung auf Wahlveranstaltungen und an Informationsständen der Parteien sowie das Einlegen, Aufdrucken oder Aufkleben parteipolitischer Informationen oder Werbemittel. Untersagt ist gleichfalls die Weitergabe an Dritte zum Zwecke der Wahlwerbung.

Unabhängig davon, wann, auf welchem Weg und in welcher Anzahl diese Schrift dem Empfänger zugegangen ist, darf sie auch ohne zeitlichen Bezug zu einer bevorstehenden Wahl nicht in einer Weise verwendet werden, die als Parteinahme der Bundesregierung zugunsten einzelner politischer Gruppen verstanden werden könnte.

BMBF