

Schlüsseltechnologie zwischen Großforschung und Praxis

Wenn über die Schlüsseltechnologien der Zukunft gesprochen wird – Quantencomputer, Fusionsforschung, Hochenergiephysik, Halbleiter, Weltraumtechnik –, dann ist das Vakuum fast immer mit im Spiel. Doch selten steht es im Rampenlicht. Dabei ist es das unsichtbare Rückgrat zahlloser Fortschritte – in der Forschung ebenso wie in der industriellen Produktion.



Vakuum ist nicht nur als Prozessumgebung wichtig, sondern auch im Bereich der Handhabung sensibler Bauteile wie zum Beispiel Bipolarplatten unverzichtbar. (Bild: Schmalz)

Liebe Leserinnen und Leser,

Der Mitgliederkontakttag der DVG fand dieses Jahr in Karlsruhe am Institut für Astroteilchenphysik statt und die Vortragsthemen zeigten deutlich, wie die Vakuumtechnik als Schlüssel zur Grenzphysik fungiert. Vom „KATRIN-Experiment“, dessen Ziel die bislang präziseste Bestimmung der Neutrinomasse ist – wobei der Detektor in einer ultrareinen Vakuumumgebung mit radioaktivem Tritiumgas arbeitet – über das Einstein-Teleskop – ein unterirdischer Gravitationswellendetektor, der mit riesigen Interferometerrohren in einem UHV-System von bisher nicht realisierter Größenordnung arbeiten soll – bis zur Simulation von UHV-Vakuumsystemen.

Ausgewählte Themen dieser Veranstaltung werden wir selbstverständlich in der VIP aufgreifen. Aber nicht nur das Vortrags-Programm war spannend, auch den KATRIN-Detektor in voller Größe live zu sehen, einen Blick in das Tritiumlabor zu werfen oder auf das KARA-Synchrotron war extrem beeindruckend. Der Rundgang zeigte auf der

einen Seite, was für einen gewaltigen Aufwand Grundlagenforschung bedeutet – aber auch was dadurch möglich ist. Die Vakuumtechnik ist dabei kein passives Hilfsmittel, sondern integraler Bestandteil moderner Forschungsarchitekturen.

Auch in dieser VIP-Ausgabe wollen wir das Vakuum in dieser Rolle würdigen: als Leistungsträger hinter Projekten, die die Grenzen unserer technologischen Möglichkeiten verschieben.

Ein Beispiel hierfür liefert eine Messreihe zum Thema Laserschweißen mithilfe des Petra III-Synchrotrons in Hamburg (Seite 24). Außerdem ein vielversprechender Ansatz für eine schnelle Verifizierung von Beschichtungsprozessen mittels speziell entwickelter Testchips – mehr dazu ab Seite 22.

Aber Vakuum wird nicht nur in der Forschung und in extrem anspruchsvollen Highend-Prozessen eingesetzt. Angeregt durch Impulse aus unserem Leserkreis möchten wir diesen Bereich stärker in den Fokus nehmen und star-

ten in dieser Ausgabe mit einem Special zum Thema Vakuumpumpen (ab Seite 14). Dort finden Sie auch einen Link auf unsere Webseite, wo wir nach Ihren Themen und Herausforderungen fragen, um diese zielgerichteter in unsere Themenplanung einbauen zu können. Wir wollen denjenigen Raum geben, die Vakuumsysteme konzipieren, betreiben, warten und verbessern – in Laboren, in der Fertigung, in Forschungseinrichtungen und mittelständischen Betrieben.

Ob Großforschung oder Laboralltag – das Vakuum verbindet Welten. Und wir freuen uns, wenn Sie uns auf diesem Weg begleiten.

Herzlichst, Ihr

C. Blumenstengel

DIE VIP-REDAKTION

Vakuum in Forschung und Praxis
vip@oberflaeche.de



Carsten Blumenstengel
Chefredakteur



Stéphane Itasse
Redakteur



Sonja Schwedler
Redaktion

INHALT

MAGAZIN

- 6 NEWS
- 8 FORSCHUNG
- 12 PERSONEN

OBERFLÄCHEN

14 Vakuumherzeugung – von grob bis UHV

Vakuumpumpen in Forschung und Praxis, ein technischer Überblick: Grundlagen, Pumpentypen und Anwendungen – Teil 1

Die Auslegung von Vakuumtechnologie, um eine wirtschaftliche Erzeugung und konstante Aufrechterhaltung eines definierten Vakuums für einen bestimmten Prozess zu gewährleisten, ist eine komplexe Angelegenheit.

ANALYTIK

19 Chemische Präkursoren präzise bereitstellen

Chipbasierte Aerosolquelle ermöglicht neue Lösungen für Synthesaufgaben

Dr. Mehrzad Roudini

Die Aerosolerzeugung auf Basis akustischer Oberflächenwellen (SAW) ist eine präzise, düsenfreie Technik für die Zufuhr flüssiger Ausgangsstoffe.

22 Testchips bringen schnell klare Ergebnisse

Pillarhall LHAS-Teststrukturen erleichtern Entwicklung in der Halbleiterfertigung deutlich

Thomas Werner

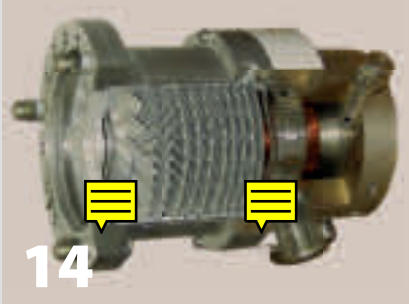
Die Entwicklung von Abscheidungsprozessen für Strukturen mit hohem Aspektverhältnis in der Halbleiterindustrie ist eine anspruchsvolle Aufgabe.

24 Tiefe Einblicke in den Schweißprozess

Unsichtbares wird sichtbar: Hochbrillante Röntgenstrahlung aus dem Vakuum trifft auf laserinduzierte Dynamik

Nikolaus Fecht

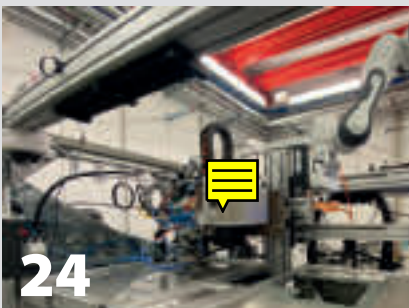
Am Synchrotron PETRA III in Hamburg analysieren Forscher mit Hochgeschwindigkeitskameras die dynamischen Vorgänge beim Laserschweißen.



14



19



24



30



34

ANWENDERBERICHTE

- 29 So werden Vakuumpumpen wieder sauber**
Deutscher Hersteller liefert High-Purity-Anlage für Überholung der Komponenten
- 30 Effizientere Verpackungsprozesse mit zentraler Vakuumerzeugung**
ROI von unter einem Jahr durch Vakuumkonzept mit drehzahl geregelter und generalüberholter Drehschieber-Pumpe
- 32 Hochpräzises Handling sensibler Produkte**
Bildverarbeitungsgestützte Robotik für mikrometergenaue Positionierung von Wafern
- 34 Schichtwechsel verhilft zu mehr Leistung**
Neue Schichtgeneration für Wälzschäl-Werkzeuge erhöht die Standzeit deutlich
- 36 Bessere Ziegel ohne Gas und Wasser**
Neue Vakuumpumpe im Dachziegelwerk halbiert den Stromverbrauch

VERANSTALTUNGEN

- 38 Aus Last wird Zukunftsgestaltung**
Webinar zeigt Wege zu weniger CO₂-Emissionen in der Dünnschichttechnik
- 40 Auch Europa kann Batterien herstellen**
Battery Show Europe 2025 zeigt die Rolle von Vakuumtechnik und dünnen Schichten
- 42 Die HiPIMS-Welt kommt nach Braunschweig**
Konferenz bringt Wissenschaft und Industrie mit neuen Anwendungen zusammen

MAGAZIN

- 43 TERMINE**
- 44 PRODUKTE**
- 48 BEZUGSQUELLEN**
- 51 IMPRESSUM/INDEX**

TITELBILD 3/2025:

Moderne Flächengreifer können sensible Werkstücke wie Bipolarplatten vollflächig schnell und sanft handhaben. (Bild: Schmalz)



VERLAG

I.G.T. Informationsgesellschaft Technik mbH
Carsten Blumenstengel (verantw.)
Jägerweg 10, 85521 Ottobrunn
Tel.: +49 89 673697-0, Fax: -19
www.oberflaeche.de

REDAKTION

STÉPHANE ITASSE
Telefon 089 / 673697-75
E-Mail: stephane.itaire@igt-verlag.de

KURATORIUM

HEINZ BARFUSS

DR. STEPHAN BECKER

DR. KLAUS BERGNER,
Vacom Vakuum Komponenten & Messtechnik GmbH,
Jena

DR. OLIVER BOSLAU,
Bruker Nano GmbH, Berlin

PROF. DR. GÜNTHER BRÄUER,
Fraunhofer IST, Braunschweig

DR. HARRO HAGEDORN,
Bühler Alzenau GmbH, Alzenau

PROF. DR. UDO KLOTZBACH,
Europäische Forschungsgesellschaft Dünne Schichten
(EFDS) e. V., Dresden

PROF. DR. MICHAEL KOPNARSKI,
IFOS GmbH, Kaiserslautern

PROF. DR. ANDREAS LESON,
Fraunhofer IWS, Dresden

PROF. DR. CHRISTIAN OEHR,
ANDREAS SCHOPPHOFF,
Pfeiffer Vacuum GmbH, Aßlar

DR. ULF SEYFERT,
Von Ardenne GmbH, Dresden

PROF. DR. SVEN ULRICH,
Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe

DR. GERHARD VOSS,
Leybold GmbH und Gaede-Archiv, Köln

PROF. DR. KLAUS-DIETER WELTMANN,
INP Greifswald e. V.

Wika Deutschland setzt auf PECVD-Anlage von Singulus

Anwendung für Produktion von Sensorbauelementen geplant

Die Wika Alexander Wiegand SE & Co. KG, Klingenberg (Wika), erweitert ihre Fertigung mit einer PECVD-Inline-Anlage des Typs Generis der Singulus Technologies AG. Sie soll der Abscheidung elektrischer Isolations- und Passivierungsschichten für Anwendungen in der Sensorik dienen, wie der Maschinenbauer in Kahl am Main mitteilt.

Mit der PECVD-Technik (Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition = Plasmaunterstützte Chemische Gasphasenabscheidung) lassen sich dünne Schichten im Inline-Verfahren aufbringen. Besonders bei präzisen Sensorbauelementen trägt die Abscheidung elektrisch isolierender und schützender Schichten zur Leistungssteigerung und

Langlebigkeit bei. Bei der Generis PECVD setzt Singulus nach eigenen Angaben auf eigens entwickelte, induktiv gekoppelte lineare Plasmaquellen (ICP). Dieses Verfahren zeichnet sich durch eine hohe Elektronen- und Aktivierungsdichte bei gleichzeitig niedriger Ionenenergie aus. Es ermöglicht sehr hohe Abscheideraten über große Substratbreiten, wobei insbesondere die Kombination aus linearer Plasmaquelle und Inline-Verfahren ein hohes Maß an Skalierbarkeit unter Beibehaltung von außergewöhnlichen Schichtqualitäten bietet – bei breiten Prozessfenstern, minimaler Substratschädigung und geringem CO₂-Fußabdruck.

Die Generis PECVD-Technik erfüllt damit die Anforderungen an Effizienz und Präzision und bietet Voraussetzungen für Märkte wie die Halbleiterindustrie, Medizintechnik, Automobilindustrie und die industrielle Messtechnik.



Sensoren benötigen dünne Schichten, Wika setzt dafür auf eine PECVD-Anlage von Singulus Technologies. (Bild: Singulus Technologies)

www.singulus.de

Effiziente Dichtigkeitsprüfung in der CFK-Fertigung

Vakuum dient dem Einpressen der Gelege auf die Form

Um Flugzeugbauteile aus kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff (CFK) herzustellen, wird auch Vakuum benötigt. Der Zulieferer Grunewald mit Standorten in Bocholt und Irlxleben kontrolliert dabei die Werkzeugoberflächen und Vakuumleitungen mit einem Vakuummeter von Thyracont.

Die Herstellung von CFK-Komponenten erfolgt mittels Curing-Tools. Dabei wird das Prepreg-Material – ein vorimprägniertes Kohlefasergewebe mit Harz – schichtweise in die gewünschte Form gelegt und mit einer Folie versiegelt. Eine Vakuumpumpe entzieht dem Gelege die Luft, wodurch das Material fest auf die Form gepresst wird.

Im anschließenden Autoklavprozess werden Werkzeug und Prepreg-Material auf 180 °C

erhitzt und unter Druck gesetzt. Durch die Hitze verflüssigt sich das Harz im Prepeg-Material, und der Druck sorgt

dafür, dass sich das flüssige Harz gleichmäßig verteilt. Im anschließenden Haltezyklus härtet das Bauteil aus und kann dann der Form entnommen werden.

Zur Prüfung der Vakuumleitungen und Werkzeugoberflächen setzt Grunewald das Kompakt-Vakuummeter VD810 des Passauer Herstellers Thyracont ein. Es misst sowohl Absolut- als auch Relativdruck im Bereich von 2000 bis 1 mbar (abs.) bzw. -1060 bis +1200 mbar (rel.) und ermöglicht so die Qualitätskontrolle. Dank seines chemiefesten Piezo-Keramiksensors mit FKM-Dichtung ist das Vakuummeter unempfindlich gegen Verschmutzungen und eignet sich für Industrieprozesse.



Bei der Herstellung von CFK-Bauteilen muss die Luft aus der Form entzogen werden. Den Prozess kontrolliert bei Grunewald das Vakuummeter VD810. (Bild: Thyracont)

www.thyracont-vacuum.com

Busch Vacuum zieht positive Bilanz der Messe Iffa 2025

Neue Dienstleistung für Vakuumprozesse vorgestellt

Auf der Iffa 2025, einer der weltweit führenden Messen für die Fleisch- und Proteinwirtschaft, hat Busch Vacuum Solutions seine Vakuumsysteme vorgestellt. Im Mittelpunkt standen Anwendungen für die Lebensmittelproduktion.

Ein Highlight auf dem Messestand war Vacuum Diagnostics – eine Dienstleistung zur ganzheitlichen Analyse von Vakuumprozessen, wie das Unternehmen mitteilt. Experten analysieren vor Ort Vakuumsysteme, deren Energieverbrauch sowie die Umgebungsbedingungen und identifizieren Optimierungspotenziale. Auf dieser Basis erhalten Kunden Empfehlungen zur

Senkung von Energieverbrauch und Betriebskosten, zur Optimierung von Wartungsintervallen und zur Erhöhung der Prozessstabilität.

Daneben stellte Busch Produktneheiten vor, darunter die kompakte R5 KD-Baureihe für Tabletop-Verpackungsmaschinen sowie die Cobra DX 0950 A Plus, eine trockene Schrauben-Vakuumpumpe für hygienekritische Anwendungen wie Gefriertrocknung, Pasteurisierung oder Vakuumkühlung.

www.buschvacuum.com



Busch Vacuum Solutions präsentierte auf der Iffa 2025 neue Produkte und Dienstleistungen für die Lebensmittelindustrie. (Bild: Busch Vacuum Solutions)

Pionier der industriellen Vakuumtechnik Leybold wird 175 Jahre alt

Kölner Unternehmen kann zahlreiche technische Durchbrüche für sich verbuchen

Der Vakuum-Pionier Leybold feiert sein 175-jähriges Firmenjubiläum. Zahlreiche Neuheiten für die Vakuumerzeugung und Prozessgasförderung markieren Meilensteine in der Unternehmensgeschichte.

Der deutsche Vakuumspezialist Leybold wurde im Jahr 1850 von Ernst Leybold in Köln gegründet. Jetzt, im Jahr 2025, feiert der renommierte Hersteller sein 175-jähriges Bestehen. Zu den Kernkompetenzen von Leybold gehören die Entwicklung und Herstellung von Systemen für die Vakuumerzeugung und Prozessgasförderung. Die Komponenten, Systeme und Dienstleistungen des Vakuum-Experten spielen bei der industriellen Beschichtung, der Analytik oder bei Forschungs- und Entwicklungsprozessen eine wichtige Rolle.

Mit der Eintragung in Köln wurde Leybold zum Begründer der industriellen Vakuumtechnik. 1906 gelang Leybolds Nachfolgern in Zusammenarbeit mit Dr. Wolfgang Gaede der Durchbruch in der Vakuumtechnik: zum Beispiel mit dem Grundprinzip der Turbomolekularpumpe (1911) und der Anwendung der Diffusionspumpe (1913), die beide noch heute im Einsatz sind. Auch das 1935 patentierte Gasballastgerät zum Abpumpen von Dämpfen ist noch in Gebrauch. 1870 wurde das

Unternehmen verkauft und unter dem Namen „E. Leybold's Nachfolger“ weitergeführt. Im September 2016 übernahm das schwedische Unternehmen Atlas Copco AB 100 % von Oerlikon Leybold Vacuum.

Die Vakuummetallurgie begann 1913: Dr. Wilhelm Rohn, Leiter des physikalischen Prüflabors der W.C. Heraeus GmbH, entwickelte in Hanau ein Verfahren zum Schmelzen hochreiner Metalle im Vakuum, das 1918 patentiert wurde. Wilhelm Carl Heraeus gelang es 1931, Metalle auf Glas zu verdampfen – dies

ebnete den Weg für die Vakuumbeschichtungstechnik. In der Folge wurde die Vakuumtechnik zunehmend in der Verfahrenstechnik angewandt.

Zu den derzeit relevanten Anwendungen der Vakuumtechnik im Strukturwandel gehören die Metallurgie, die Automobil- und Beschichtungsindustrie, Solar-, Display- und Lebensmittelanwendungen, die Analytik sowie Verfahren zur Herstellung von Lithium-Ionen-Batterien für die Elektromobilität.

www.leybold.com



Köln ist nicht nur Gründungsort, sondern bis heute Unternehmenssitz von Leybold. (Bild: Leybold)

Simulationswerkzeuge für alle

Forscher wollen Zugang mithilfe von KI vereinfachen

Simulationen sind unverzichtbare Werkzeuge für Forschung und Entwicklung. Bisher sind sie jedoch meist spezialisierten Fachleuten vorbehalten. Das Fraunhofer-Institut für Schicht- und Oberflächentechnik (IST) in Braunschweig will das grundlegend ändern – mit einem neuen Ansatz, der die Simu-

lation aus der Expertennische holt und in die industrielle Praxis überführt.

„Wir wollen die Simulation aus der reinen Expertenhand lösen und sie direkt in die Entwicklungspraxis integrieren“, sagt Dr. Dennis Barton, Teamleiter Simulation am Fraunhofer IST. Ziel sei es, Personen aus der Konstruktion und Entwicklung eine fundierte Entscheidungsgrundlage zu bieten, ohne dass sie sich in die Komplexität numerischer Modellierungen einarbeiten müssen.

Bereits heute nutzt das Institut einen selbst entwickelten und in der Fachwelt etablierten PICMC/DSMC-Code zur Simulation von Niederdruckplasmen und Gasflüssen in PVD-Beschichtungsprozessen. Die Modelle liefern Informationen zu Gastrennfaktoren, Targetabbrand und Schichtdickenprofilen. Ergänzt wird dies durch Methoden wie Computational Fluid Dynamics (CFD), etwa in der Auslegung von Elektrolytreaktoren oder Trocknerkonstruktionen.

Mit einem wachsenden Team, intelligenten Datenstrategien und künstlicher Intelligenz will das Fraunhofer IST den Zugang zu Simulationsverfahren vereinfachen. Machine-Learning-Methoden und Large Language Models sollen dabei helfen, simulationsgestützte Entscheidungen auch für Nicht-Experten zugänglich zu machen. Eine zentrale Rolle spielen dabei digitale Zwillinge, Datenmanagement und vernetzte Sensorik.

Auch die Förderung künftiger Fachkräfte hat das Institut im Blick. In seiner Lehrveranstaltung Modellierungsverfahren in der Oberflächentechnik an der TU Braunschweig vermittelt Barton das Rüstzeug: „Das Simulieren erfordert ein eigenes Mindset – ein Verständnis dafür, wann ein Modell gut genug ist, welche Rechenkapazitäten zur Verfügung stehen und wie Ergebnisse mit der Realität abzugleichen sind.“

www.ist.fraunhofer.de



Dr. Dennis Barton, Teamleiter Simulation, erklärt die neuen Simulationsansätze am Fraunhofer IST.
(Bild: Fraunhofer IST)

Messstellen direkt im Werkzeug abgeschieden

Dünnschichtsensorik ermöglicht eine automatisierte Echtzeit-Qualitätskontrolle beim Kunststoffspritzgießen

Für eine ressourcenschonende und wirtschaftliche Fertigung von Kunststoffbauteilen hat das Fraunhofer-Institut für Schicht- und Oberflächentechnik IST ein Sensorsystem entwickelt, das Prozessdaten wie Temperatur und Druck in Echtzeit direkt im Werkzeug erfasst.

Die verschleißfesten Dünnschichtsensoren und die Anbindung an maschinelle Lernverfahren ermöglichen eine präzise Überwachung, eine automatisierte Qualitätssicherung und eine Optimierung des Spritzgießprozesses.

Die multifunktionalen Dünnschichtsensoren werden direkt auf der Werkzeugoberfläche abgeschieden. Sie ermöglichen eine ortsaufgelöste Echtzeitmessung der Temperatur in den Hauptbelastungszonen des Spritzgießprozesses. Ein Beispiel ist das am Fraunhofer IST entwickelte System, das auf einem Werkzeugeinsatz appliziert wurde. Mit 13 Messstellen bietet es eine Analyse der Fließfront. Die thermoresistiven Sensoren sind so angeordnet, dass sie



Werkzeugeinleger mit Dünnschichtsensoren für das Kunststoffspritzgießen.
(Bild: Fraunhofer IST/Martin Rekowski)

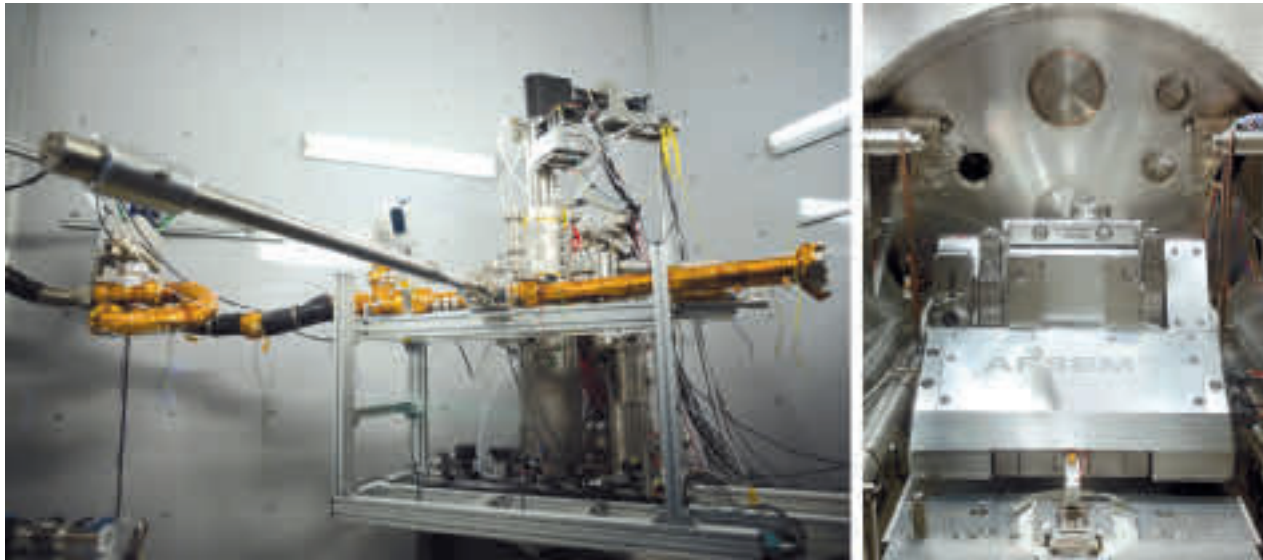
die Bauteilgeometrie abbilden. Die Daten werden in Echtzeit ausgelesen und verarbeitet. Mithilfe von maschinellen können Störungen und Schwachstellen sofort erkannt werden. Die Bauteilqualität wird bestimmt und als Farbsignal ausgegeben, noch bevor das Werkzeug

nach dem Spritzvorgang geöffnet wird. Aufgrund der hohen Verschleißbeständigkeit des Dünnschichtsystems ist auch die Überwachung von Prozessen mit hohem Glasfaser- und Rezyklat-Anteil möglich.

www.ist.fraunhofer.de

Ultrasaures Vakuum enthüllt neue Graphen-Eigenschaft

Forscher konstruieren besonderes System zur Untersuchung



Damit wurde die neue Graphen-Eigenschaft enthüllt: Links das drei Meter hohe Rastertransmissionselektronenmikroskop von Bruker, rechts die luftleere Kammer, die das Rasterkraftmikroskop von Quantum Design enthält. (Bild: Universität Wien)

Physiker haben es mit einer weltweit einzigartigen Methode geschafft, Graphen erstmals drastisch dehnbarer zu machen – durch Wellung wie bei einem Akkordeon. Das gibt den Weg frei für neue Anwendungsmöglichkeiten, in denen eine gewisse Dehnbarkeit nötig ist.

Unter den zweidimensionalen Festkörpern sticht Graphen mit seiner enormen elektrischen Leitfähigkeit heraus, allerdings ist es auch sehr zugfest. Die extreme Zugfestigkeit ist ein Resultat der bienenwabenförmigen Anordnung der Atome im Material. Das Entfernen einiger Atome aus dem Material samt damit einhergehender Bindungen sollte intuitiv zu einer Verringerung der Zugfestigkeit führen, doch wissenschaftliche Studien zeigten sowohl eine kleine Verringerung als auch eine starke Erhöhung derselben, wie die Universität Wien mitteilt.

Universität Wien entwickelt eigenes System für diese Forschung

Diese Widersprüche konnten Forscher um Gruppenleiter Jani Kotakoski an der Universität Wien durch neue Messungen nun aufklären. Die Experimente fanden in luftleeren ultrasauberen Kammern statt, welche durch ebenfalls luftleere Metallröhren

miteinander verbunden waren. Dadurch konnten die Proben von einem Gerät zum anderen gelangen, ohne jemals in Kontakt mit der Umgebungsluft zu kommen. „Dieses einzigartige System, das wir an der Universität Wien entwickelt haben, ermöglicht uns eine ungestörte Untersuchung von 2D-Materialien“, erläutert Kotakoski.

Graphen für Untersuchungen komplett von der Umgebung isoliert

Wael Joudi, Erstautor der Studie fügt hinzu: „Damit ist es uns erstmals gelungen das Graphen während dieser Art von Experimenten dauerhaft von der Umgebungsluft und den darin enthaltenen Fremdpartikeln zu isolieren. Andernfalls würden sich diese in kurzer Zeit auf der Oberfläche ablagern und sowohl die Versuchsdurchführung als auch die Messung beeinflussen.“

Tatsächlich führte der Fokus auf penible Sauberkeit der Materialoberfläche zur Entdeckung des so genannten Akkordeoneffekts bezüglich der mechanischen Zugfestigkeit von Graphen: Bereits die Entfernung von nur zwei benachbarten Atomen verursacht eine gewisse Wölbung des ursprünglich flachen Materials. Zusammen resultieren mehrere solcher Wölbungen in einer Wellung des Graphens: „Man kann sich das wie ein Akkordeon vorstellen. Beim Auseinanderziehen wer-

den diese Wellen abgeflacht, was wesentlich weniger Kraft benötigt als das flache Material zu spannen, wodurch es schließlich dehnbarer wird“, berichtet Joudi. Rika Saskia Windisch und Florian Libisch, beide theoretische Physiker an der Technischen Universität Wien, haben mit Simulationen sowohl die Wellenbildung als auch die daraus resultierende geringere Zugfestigkeit des Materials bestätigen können.

Widersprüchliche Eigenschaften durch Störfaktoren erzeugt

Während der Experimente zeigte sich auch, dass Fremdpartikel auf der Materialoberfläche diesen Effekt nicht nur unterdrücken, sondern sogar eine gegenteilige Wirkung hervorrufen. Konkret erscheint das Material dadurch zugfester, was auch die Widersprüche in der Vergangenheit erklärt. „Damit zeigen wir die Wichtigkeit der Messumgebung im Umgang mit 2D-Materialien. Die Ergebnisse öffnen einen Weg zur Regulierung der Zugfestigkeit von Graphen und legen damit den Weg frei für potenzielle Anwendungen“, sagt Joudi abschließend. Dazu könnte zum Beispiel die Integration von Elektronik in Bekleidung gehören (wearable electronics).

www.univie.ac.at

Dünne Folie wird zur Vakuumpumpe

Elektrodenbeschichtung ermöglicht Antrieb ohne Motor oder Druckluft



Im Vakuumpumpen-Prototyp zieht eine mit Elektroden beschichtete Silikonfolie ein Vakuum in einer Glasglocke mit Luftballon. Die Doktorandin Carmen Perri forscht an den smarten Pumpen und Ventilen. (Bild: Oliver Dietze)

Kompakt, leicht, flach und energieeffizient: Eine dünne Silikonfolie macht eine neue Art miniaturisierter Vakuumpumpen möglich. Sie funktionieren auf kleinem Raum, ohne Druckluft, ohne Motoren und Gerätschaften und ohne Schmiermittel, wie die Universität des Saarlandes mitteilt.

Die Aggregate sind zudem reinraumtauglich und lassen sich während des Betriebs regulieren. Mit dem Prototyp der Vakuumpumpe konnte das Team der Professoren Stefan Seelecke und Paul Motzki von der Universität des Saarlandes stufenlos ein Vakuum von bis zu 300 mbar Druck ziehen.

Elektrische Spannung setzt Folien in Bewegung

Die neuartigen Vakuumpumpen, aber auch Pumpen und Ventile, funktionieren mit dünnen Silikonfolien, in die allein mithilfe von elektrischer Spannung Bewegung kommen. „Die Technik ist

kostengünstig in der Herstellung, die Bauteile sind leicht, das hilft Platz und Gewicht zu sparen. Dazu sind diese Pumpen und Ventile erheblich energieeffizienter als heutige Verfahren“, sagt Motzki.

Energieverbrauch auf nur noch ein Vierhundertstel reduziert

„Im Vergleich zu einem marktüblichen Prozessventil für Druckluft mit einem Elektromagneten hat dasselbe Ventil mit unserem Antrieb einen 400-mal niedrigeren Energieverbrauch“, erläutert der Professor für Smarte Materialsysteme für innovative Produktion an der Universität des Saarlandes und Geschäftsführer des Zentrums für Mechatronik und Automatisierungstechnik (Zema). Auch kommen diese Verfahren ohne seltene Erden oder Kupfer aus. Und im Gegensatz zu mit Kompressoren betriebenen Pumpen sind die Folienpendants zudem leise.

Damit die 50 µ dicken Folien nach Belieben Bewegungen vollführen

können, sind sie beidseitig mit einer elektrisch leitfähigen, hochdehnbaren Elektrodenbeschichtung bedruckt. Legen die Ingenieure hier eine elektrische Spannung an, drückt sich die Folie wegen der elektrostatischen Anziehung vertikal zusammen und dehnt sich in ihrer Fläche aus. Indem die Forscher das elektrische Feld verändern, können sie die Folien stufenlos Hub-Bewegungen verrichten oder auch mit beliebiger Frequenz und Schwingung vibrieren lassen. Die Folie kann auch jede gewünschte Stellung halten, wobei sie keinen Strom verbraucht.

Folien fungieren zugleich als Positionssensoren

„Die Funktion eines Positionssensors liefern die dielektrischen Elastomere gleich mit“, sagt Motzki. Jede Verformung der Folie lässt sich einem Messwert der elektrischen Kapazität zuordnen. Anhand der Messwerte erkennen die Ingenieure, wie die Folie mechanisch ausgelenkt ist. In einer Regelungseinheit können sie anhand dieser Messwerte mithilfe Künstlicher Intelligenz Bewegungsabläufe programmieren. Eingesetzt als Antrieb in entsprechenden Apparaturen ziehen und lösen die Folien in motorlosen Pumpen ein Vakuum mit gewünschtem Druck, dosieren als Ventil Flüssigkeiten exakt oder fungieren als stufenlose Schalter.

Außerdem können die Folienpumpen und -ventile ihren Zustand überwachen und signalisieren, wo der Fehler liegt. Die Messwerte verraten, wenn etwas schiefgeht, also etwa das Vakuum nicht richtig gezogen wurde oder Ventil oder Pumpe durch einen Fremdkörper blockiert sind. Passiert dies heute in großen Industrieanlagen, kann die Fehlersuche mitunter kompliziert werden. Die Technik lässt sich zudem einfach skalieren. „Hierzu schalten wir unsere Aktoren und Pumpenkammern entweder parallel oder in Reihe oder beides zugleich und können so Druck und Volumenstrom vergrößern“, sagt Motzki.

www.uni-saarland.de

Mit anodischem Bogen zu flexiblen Solarzellen

Forscher wenden Beschichtungsverfahren auf Werkstoffe mit anderen Eigenschaften an



Verdampfung von Cäsiumjodid mit dem anodischen Bogen. (Bild: Fraunhofer FEP)

Im EU-geförderten Projekt Luminosity entwickeln die Forschungs- und Industriepartner Perowskit-Solarzellen auf flexiblen Trägermaterialien weiter. Dabei hat ein Forschungsinstitut mit seiner Expertise in der anodischen Bogenverdampfung Fortschritte bei der Abscheidung von Zinnoxid und Cäsiumjodid erzielt.

Diese Technologien bilden die Basis für die Entwicklung flexibler Perowskit-Solarzellen, die umweltfreundliche Solarenergie der nächsten Generation ermöglichen, wie das Fraunhofer-Institut für Elektronenstrahl- und Plasmatechnik (FEP) mitteilt. Das Projekt wird auf der pro flex Konferenz für Rolle-zu-Rolle-Beschichtung flexibler Materialien am 6. und 7. Mai in Dresden vorgestellt.

Das Fraunhofer FEP untersucht im Projekt unter anderem die Eignung der von ihm entwickelten anodischen Bogenverdampfung für die Perowskit-Photovoltaik. Dieses Verfahren nutzt eine spezielle Elektronenquelle (Hohlkathodenbogenentladung) und bietet Vorteile bei der Einstellung von Schichtparametern für eine Vielzahl von Materialien. Die Kombination aus Verdampfung und Plasmaprozessen ermöglicht eine präzise Anpassung der Schichteigenschaften.

In vorangegangenen Projekten wurde bereits gezeigt, dass die anodische Bogenverdampfung hochwertige, dropletfreie und glatte, überaus harte Kohlenstoffschichten (ta-C-Schichten) für Hartstoffbeschichtungen erzeugen kann. Auch die schonende Abscheidung transparenter, leitfähiger Schichten für die nächste Generation der Silizium-Heterojunction-Solarzellen konnte mit der anodischen Bogenverdampfung durchgeführt werden.

Neue Beschichtungsmaterialien Zinnoxid und Cäsiumjodid abgeschieden

Bisher konnte die Methode nur für elektrisch leitfähige Materialien eingesetzt werden. Im Projekt Luminosity wurden jedoch erste Ergebnisse für die Abscheidung von Zinnoxid und Cäsiumjodid erzielt. Zinnoxid ist ein wichtiges Material für die Fertigung flexibler Solarzellen. Dabei gilt es, Schutz- und elektrische Funktionsschichten in sanfter Weise abzuscheiden, ohne darunter liegende Bereiche zu beschädigen, wie das FEP berichtet.

Die Verdampfung von Cäsiumjodid zeigt, dass perspektivisch auch die Abscheidung der aktiven Perowskit-Halbleiterschicht über dieses Verfahren von großem Interesse sein kann. Das Be-

schichtungsverfahren lässt sich durch die Kombination mehrerer Verdampfermodule in der Beschichtungsbreite leicht skalieren.

Insgesamt 15 europäische Partner an dem Forschungsprojekt beteiligt

Das Projekt Luminosity präsentierte sich im Mai auf der pro flex Konferenz am Fraunhofer FEP in Dresden mit einem Vortrag von Herbert Lifka von HyET Solar: „Scaling up a Roll to Roll line for flexible PV-modules“.

Das Luminosity-Konsortium besteht aus 15 europäischen Partnern, darunter Forschungsorganisationen, Universitäten und Privatunternehmen. Dabei sind das Helmholtz-Zentrum Berlin für Materialien und Energie GmbH, das Fraunhofer FEP, das Consiglio Nazionale delle Ricerche, die Hyet Solar B.V., die Technische Universität Eindhoven, die Universität Lund, die Technische Universität Delft, Amires – The Business Innovation Management Institute z. ú., Infinity PV ApS, die Von Ardenne GmbH, die Universität Hasselt, die LPKF Solarquip GmbH, die Cyprus University of Technology sowie die Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa). Projektkoordinator ist die niederländische Organisation für angewandte naturwissenschaftliche Forschung TNO.

www.fep.fraunhofer.de



Verdampfung von Zinnoxid mit dem anodischen Bogen. (Bild: Fraunhofer FEP)

Dr. Johannes Schmalz steigt in Schmalz-Geschäftsführung ein

Neue Generation stärkt Zukunft des familiengeführten Unternehmens



Dr. Johannes Schmalz ist ab sofort der neue Geschäftsführende Gesellschafter von Schmalz. (Bild: J. Schmalz GmbH)

Dr. Johannes Schmalz ist seit Mai dieses Jahres drittes Geschäftsführungsmitglied bei der J. Schmalz GmbH in Glatten. Damit sichert der Vakuumspezialist seine langfristige Zukunft als familiengeführtes Unternehmen in vierter Generation.

„Ich freue mich riesig auf meine neue Aufgabe“, sagte Dr. Johannes Schmalz zum Auftakt seiner Tätigkeit als Geschäftsführender Gesellschafter. „Ich kenne die Firma seit Kindheitstagen und bin voller Vorfreude und Zuversicht, die Zukunft des Unternehmens selbst aktiv mitzugestalten.“ Der 39-Jährige wird gemeinsam mit seinem Vater Dr. Kurt Schmalz und Andreas Beutel künftig eine dreiköpfige Geschäftsführung bilden.

Verantwortung für IT, Digitalisierung, New Business und Strategie

Dr. Johannes Schmalz hat zuletzt als international verantwortliche Führungskraft im Bereich Digitalisierung bei einem großen globalen Familienun-

ternehmen der Elektronikbranche gearbeitet, wie es in der Mitteilung heißt. Darüber hinaus besitzt er Expertise in IT, Robotik und Strategie. Er ist zudem Gründer und Gesellschafter eines Technologie-Start-ups.

Die fachliche Verantwortung übernimmt Dr. Johannes Schmalz für die Bereiche IT und Digitalisierung, New Business und Unternehmensstrategie. Die Werte des Unternehmens, die die Unternehmenskultur seit Jahrzehnten prägen, hält der 39-Jährige dabei aufrecht: „Trotz all der wirtschaftlichen und technologischen Interessen: Es muss immer der Mensch im Mittelpunkt stehen.“

Vater sieht langfristige Sicherheit für das Unternehmen

Für Dr. Kurt Schmalz, der selbst vor 45 Jahren in das Unternehmen eingetreten ist, hat der Einstieg seines Sohnes eine besondere Bedeutung: „Mein ganzes berufliches Leben habe ich viel Herzblut in die Firma gesteckt und sie gemeinsam mit meinem Bruder Wolf-

gang aufgebaut“, sagt Dr. Kurt Schmalz. „In diesem Jahr werde ich 70 Jahre alt. Ich freue mich ganz besonders, dass durch den Einstieg von Johannes die langfristige Stabilität von Schmalz als Familienunternehmen dauerhaft gesichert ist.“

Zum Auftakt begab sich Dr. Johannes Schmalz auf einen Begrüßungsrundgang über das Firmengelände. Dort durchlief das neue Geschäftsführungsmitglied die verschiedenen Abteilungen und wurde von den insgesamt 1.800 Mitarbeitenden der Gruppe herzlich begrüßt – in persona am Standort Glatten und per Video von den Mitarbeitenden der weltweiten Standorte. Als kleines Antrittsgeschenk brachte der promovierte Ingenieur Pralinen mit Unternehmenslogo für alle Beschäftigten mit, um die ausreichende Schokoladen-Versorgung sicherzustellen, wie er mit einem Augenzwinkern anmerkte.

J. Schmalz GmbH
www.schmalz.com

Nachruf auf Prof. Dr. Wolfgang Jitschin

Wissenschaftler vereinte große Lehrbegabung und rege Publikationstätigkeit



Prof. Wolfgang Jitschin in seinem Vakuumlabor in Gießen im Jahre 2012.
(Bild: Technische Hochschule Mittelhessen)

Am 16. April 2025 verstarb in seinem 75. Lebensjahr Prof. Dr. Wolfgang Jitschin, ein wichtiger Schrittmacher der Vakuumphysik und -technik in Deutschland. Er wurde 1951 in Salzkotten im Kreis Paderborn geboren.

Nach dem Studium der Physik in Bonn habilitierte er 1985 an der Universität Bielefeld in Experimentalphysik nach mehreren Forschungsaufenthalten in Großbritannien, dem CERN und DESY. Von 1986 bis 1988 übernahm er die Leitung des Laboratoriums für Vakuumphysik der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt in Berlin. Bei seiner regen Publikationstätigkeit in dieser Zeit war erkennbar, dass er eine große Begabung in der Vermittlung seiner Wissenschaft hatte, die auf seinem außergewöhnlich guten physikalischen Verständnis beruhte. Seine Berichte waren immer sehr gut verständlich geschrieben, die Grundlagen für seine Experimente klar herausgearbeitet und so

war es nicht verwunderlich, dass er im Wintersemester 1988 als Professor an die damalige Fachhochschule Gießen, heute Technische Hochschule Mittelhessen, wechselte. Hier lehrte er bis zu seinem Ruhestand 2014.

Wichtiges Engagement für die Verbände

Seine Lehrbegabung brachte er auch in den Ausbildungsausschuss der Deutschen Vakuumgesellschaft (DVG) ein, dessen Mitglied und zeitweise Leiter er bis 2004 war. In diesem Jahr übernahm er bis 2010 den Vorsitz des Fachverbands Vakuumphysik und -technik der DVG und der Deutschen Physikalischen Gesellschaft (DPG) und vertrat die DVG zeitweise international bei der IUUVSTA. Im Ausbildungsausschuss erarbeitete er mit anderen eine wichtige Aufgabensammlung zur Vakuumphysik und -technik, die den einschlägigen deutschen Klassiker „Wutz – Handbuch Vakuumtechnik“

ergänzte. Er gründete mit der Fachhochschule in Frankfurt die Vakuumschule, die jährlich mit Theorie und Praxis zahlreiche Ingenieure und Techniker an die Vakuumtechnik heranführte. Als Karl Jousten die Herausgabe des Handbuch Vakuumtechnik übernahm, übertrug er Prof. Jitschin die Autorenschaft der Grundlagenkapitel, die aufgrund ihrer Exzellenz bis heute unverändert so im Handbuch stehen. In unserer Zeitschrift ViP veröffentlichte er über viele Jahre das Vakuumlexikon, welches im Jahr 2000 auch als Monographie erschien. Insgesamt stehen 86 wissenschaftliche Veröffentlichungen, vor allem im Bereich der Vakuumphysik, für seine beachtliche akademische Lebensleistung.

Prof. Jitschin hatte nicht nur eine große Lehrbegabung, sondern auch ein herausragendes experimentelles Geschick. Mit dem nur kleinen Etat, der ihm in der Fachhochschule zur Verfügung stand, konnte er dadurch eine große Wirkung erzielen, besonders bei seinen Arbeiten zu kleinen Gasflüssen. Er entwickelte in Nebentätigkeit ein Kalibrierlabor für Vakuummessgeräte und Standardlecks, welches heute als Transmit-Zentrum für Vakuumtechnik akkreditiert ist. Sein Hauptkunde war zu Beginn die Firma Pfeiffer Vacuum im Nachbarort Aßlar, aber durch seine zuverlässigen und schnellen Dienstleistungen sprach es sich schnell herum, dass im „Vakuumlabor“ der FH Gießen gute Arbeit gemacht wird. Heute hat das Labor sechs Angestellte und führt jährlich 1.700 Kalibrierungen durch.

Mitarbeit im Gießener Mathematikum

In seiner Freizeit arbeitete Prof. Jitschin auch gerne für das berühmte „Mathematikum“ in Gießen, eine Ausstellung, welche allen Interessierten einen lebendigen Zugang zur Mathematik eröffnet. Er war ein tiefgläubiger Mensch und brachte sich voll und ganz in seine katholische Gemeinde ein. Er starb in einem katholischen Pflegeheim. Die DVG ehrt ihr ehemaliges Vorstandsratsmitglied in besonderer Weise.

Karl Jousten

Vakuumerzeugung – von grob bis UHV

Vakuumpumpen in Forschung und Praxis, ein technischer Überblick: Grundlagen, Pumpentypen und Anwendungen – Teil 1

Die Auslegung von Vakuumtechnologie, um eine wirtschaftliche Erzeugung und konstante Aufrechterhaltung eines definierten Vakuums für einen bestimmten Prozess zu gewährleisten, ist eine komplexe Angelegenheit. Hierbei spielt die Auswahl und Einsatzweise von Vakuumpumpen eine entscheidende Rolle. Deshalb soll dieser erste Teil des VIP-Vakuumpumpen-Specials einen Überblick über die unterschiedlichen Funktionsweisen geben. Die folgenden Teile werden intensiver auf die einzelnen Technologien und Anwendungsgebiete eingehen.

Von der Halbleiterfertigung über die Beschichtungstechnik bis zur Massenspektrometrie und Oberflächenanalyse steigen die Anforderungen an das Vakuum. Inzwischen gewinnt bei der Auftragsvergabe die Energieeffizienz, Wartung und generell die Kostenoptimierung immer stärker an Relevanz. Vakuum spielt in vielen modernen Schlüsseltechnologien eine zentrale Rolle, von der Verschleißschutzbeschichtung von Komponenten eines Verbrennungsmotors über die Glas-

und Werkzeugbeschichtung bis hin zur physikalischen Grundlagenforschung. Dazu gehörenden Prozesse wie Sputtern, Elektronenstrahlverdampfung und verschiedenen Ionenstrahltechnologien. Nicht zu vergessen sind die zahllosen industriellen Anwendungen von sogenanntem Grobvakuum.

Komplexe Auslegungskriterien

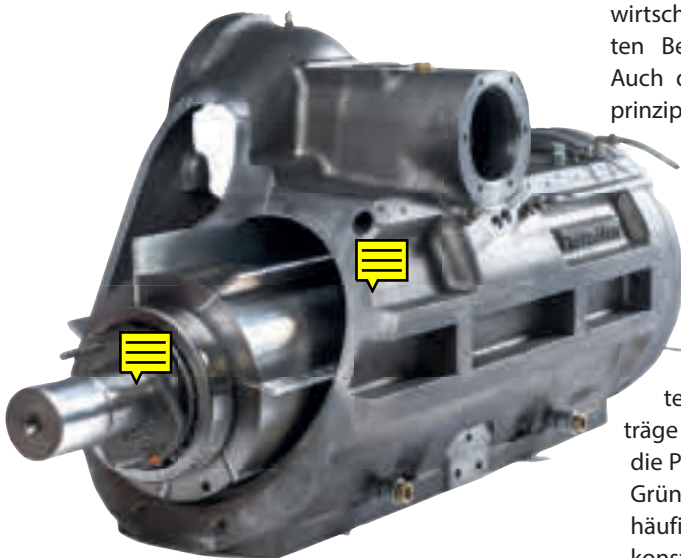
Die Kriterien für die Auslegung der Vakuumtechnologie für eine Anwendung müssen viele Aspekte umfassen, von der notwendigen Evakuierungszeit über den zu erreichenden Enddruck bis hin zu Kontaminationen aus dem Prozess, die ausgetragen werden müssen. Auch die Fahrweise der Pumpen sowie deren unter Umständen notwendige zyklische Regenerierung und Wartung müssen bei der Auslegung vor allem aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten Berücksichtigung finden. Auch die Robustheit eines Pumpenprinzips ist stets zu bedenken, denn Vakuumpumpen saugen alles an, was der erzeugte Volumenstrom mitreißen kann – von Gasen bis hin zu kleineren Partikeln. Und all das muss die Vakuumpumpe möglichst lange aushalten können. Eine Filterung, die sicherstellt, dass Einträge aus dem Prozess keinesfalls in die Pumpe gelangen können, ist aus Gründen der Effektivität der Pumpe häufig nicht umsetzbar. Geeignete konstruktive Maßnahmen können es den Restgasen jedoch erschweren, unerwünschte Mitbringsel in die Pumpe zu tragen.

Strömungsregime – Vakuum ist nicht gleich Vakuum

Betrachten wir als Beispiel das Abpumpen einer Vakuumkammer, so verläuft dieser nicht gleichförmig, sondern gliedert sich in physikalisch klar unterscheidbare Druckbereiche, in denen das Strömungsverhalten der Gase, die Effizienz der Pumpentechnologien und die geeigneten Betriebsstrategien jeweils stark variieren.



Diese Pumpenbaureihe kann bis zu 360 m³/h ansaugen, bei geschlossenem Ballastventil beträgt der erreichbare Enddruck laut Hersteller etwa 0,1 mbar. (Bild: Busch Vacuum)



Querschnitt durch eine Drehschieberpumpe, dieser Pumpentyp ist sehr robust und in der Regel ölgeschmiert. (Bild: Pneumofore)

Die zugrunde liegenden Unterschiede lassen sich anhand der Knudsen-Zahl beschreiben, die das Verhältnis zwischen der mittleren freien Weglänge der Gasmoleküle und der geometrischen Weite der Kammer definiert.

Abhängig davon dominieren entweder viskose, gemischte oder molekulare Strömungsformen. Für einen effizienten, störungsarmen und kontaminationsfreien Pumpprozess müssen die jeweils passenden Pumpentypen im richtigen Moment zu- oder abgeschaltet werden. Fehler können hier mitunter Schäden oder zumindest Wartungszyklen an den Pumpen erforderlich machen. Insofern sind zuverlässige Regel- und Kontrollmechanismen entscheidend, um die Verfügbarkeit und Wirtschaftlichkeit

der Vakuumherzeugung in einer Anwendung zu optimieren.

Großvakuum: Beginn im viskosen Strömungsregime

In der Anfangsphase, also zwischen Atmosphärendruck und etwa 1 mbar, herrscht das sogenannte viskose Strömungsverhalten. Hier kollidieren Gasmoleküle überwiegend untereinander – ähnlich wie in normalen Rohrleitungen bei atmosphärischem Druck. Insbesondere ermöglicht die Druckdifferenz zwischen Kammer und Umgebung ein effektives Fördern durch mechanische Verdrängung. Deshalb beginnt jede Evakuierung mit dem Einschalten einer Vorpumpe – meist eine Drehschieber-, Membran-, Schrauben- oder Klauenpumpe. In industriellen Großsystemen können auch Dampfstrahl- oder Ejektorpumpen zum Einsatz kommen. In diesem Druckbereich sind die Gasmassen noch so hoch, dass hohe Volumenströme und schnelle Pumpzeiten realisierbar sind. Allerdings spielen hier die Auslegung der Leitungsquerschnitte, Rückschlagventile und eventuell Filterelemente bereits eine wichtige Rolle für die spätere Prozessstabilität.

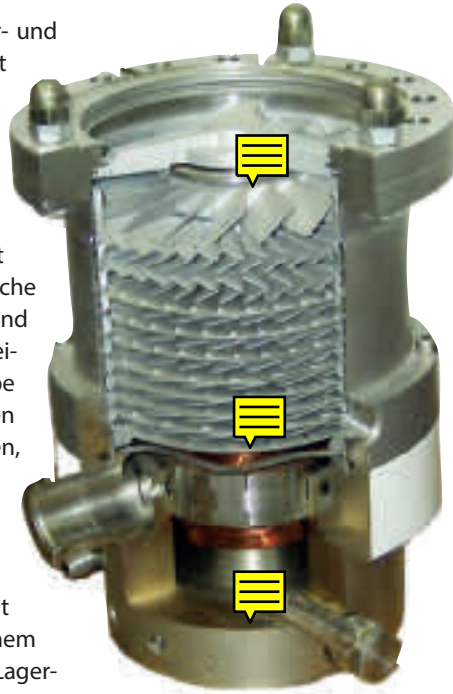
Feinvakuum: Übergangsströmung und Zuschaltung von Boosterstufen

Sobald der Druck unter etwa 1 mbar fällt, geht das Strömungsverhalten in den Übergangsbereich über und das Strömungsverhalten des Restgases verändert sich deutlich. Die mittlere freie Weglänge der Gasmoleküle wächst, Kollisionen mit den Kammerwänden nehmen zu, und die Effizienz der mechanischen Vorpumpe beginnt nachzulassen. Zwischen ca. 10^{-1} und 10^{-3} mbar operieren sogenannte Boosterpumpen am effektivsten – typischerweise sind das

Roots-Pumpen, die zwischen Vor- und Hochvakuumpumpe geschaltet werden. Ihre berührungsfreie Förderung erhöht den Volumenstrom drastisch, ohne das System thermisch oder mechanisch zu belasten. Soll der Druck noch deutlich weiter reduziert werden, beginnt nun die kritische Phase der Betriebsumschaltung und Molekularpumpen wie zum Beispiel die Turbomolekularpumpe müssen vorgewärmt und in den Leerlaufbetrieb versetzt werden, damit sie nach Erreichen eines stabilen Vorvakuums im Bereich von 10^{-2} bis 10^{-3} mbar zugeschaltet werden können. Erfolgt diese Zuschaltung zu früh oder kommt es nach der Zuschaltung zu einem Gaseinbruch, kann das zu einer Lagerüberlastung und zu einem vorzeitigen Ausfall führen.

Hochvakuum: Übergang in das molekulare Regime

Im Bereich zwischen etwa 10^{-3} und 10^{-7} mbar dominieren molekulare Strömungen. Bildlich gesprochen ist die Kammer schon sehr leer und die verbliebenen Gasmoleküle stoßen nur noch sehr selten miteinander zusammen, sondern interagieren fast ausschließlich mit den Wandflächen der Vakuumkammer. In diesem Regime funktionieren mechanische Pumpen praktisch nicht mehr. Die Förderung erfolgt nun durch Impulstransfer – etwa durch die Rotorblätter einer Turbomolekularpumpe, die das Molekül per Impuls in die gewünschte Richtung befördern – man könnte es bildhaft als eine Art Tennis auf molekularer Ebene beschreiben. Spätestens bei Erreichen des Hochvakuums wird die TMP voll aktiviert und die Gasförderung von der Vorpumpe in den molekularen Bereich überführt. Eine Alternative zur Turbomolekular-



Schnitt durch eine Turbomolekularpumpe (TMP), dieser Pumpentyp wird vielfach in der Hochvakuumtechnik angewendet, kann jedoch bei zu hohen Partikelfrachten und Gaseinbrüchen schnell Schaden nehmen. (Bild: Liquidat, Wikimedia Commons, CC BY-SA 3.0)

pumpe sind Diffusionspumpen. Sie arbeiten mit gerichteten Dampfstrahlen und beschleunigen die Moleküle ebenfalls durch Impulsübertragung.

Die Wahl zwischen TMP und Diffusionspumpe hängt stark von den Prozessanforderungen ab: TMPs sind präziser, rückstromfrei und für partikelarme Anwendungen im Bereich Halbleiterfertigung oder Analytik prädestiniert; Diffusionspumpen sind günstiger in der Anschaffung, erfordern jedoch Öl als Betriebsstoff und sind insgesamt wartungsintensiver. Beide Typen erfordern eine aktive Vorpumpe, die das durch molekulare Förderung zur Auslassseite gelangte, aufkonzentrierte Gas abzutransportieren.

Ultrahochvakuum: spezialisierte Pumpsysteme für Restgase

Unterschreitet der Druck die Grenze von etwa 10^{-7} mbar, beginnt das Ultrahochvakuum – ein Bereich, in dem insbesondere Wasserstoff und Helium dominieren. Der relative Anteil von Wasserstoff kann 80 Prozent erreichen. Noch dazu entweicht Wasserstoff leicht



Roots-Pumpen arbeiten öl- und berührungsfrei und dienen häufig als Boosterpumpen, um den Übergang in das molekulare Strömungsregime zu vollziehen. Im Bild die RUVAC Serie von Leybold, je nach Modell sind Volumenströme bis 2050 m³/h möglich. (Bild: Atlas Copco)

aus Metallen (Desorption) und wird also ständig von den Kammerwänden freigesetzt. Diese Gase sind besonders mobil, schwer zu binden und werden von vielen Pumpentypen nur unzureichend entfernt.

Sie stellen daher eine besondere Herausforderung dar – etwa für die Langzeitstabilität in analytischen Anwendungen oder für die Erreichung sehr niedriger Restgasdrücke.

Deshalb sind klassische mechanische und molekulare Pumpen kaum noch wirksam. Stattdessen übernehmen Getterpumpen, Ionengetterpumpen oder Kryopumpen die Aufgabe, die vorhandenen Gase weiter zu reduzieren. Die genannten Pumpentypen

arbeiten entweder über den Aufbau einer chemischen Bindung (NEG), Ionisation (Ionenpumpe) oder durch Kondensation an kryogenen Oberflächen.

Das Zuschalten getter- oder kryobasierter Pumpstufen im Ultrahochvakuum (UHV) erfolgt in der Regel erst nach einer systematischen Ausheizphase der Vakuumkammer, diese kann bis zu 72 Stunden betragen, die notwendigen Temperaturen können 250°C erreichen. Hintergrund ist das Verhalten von adsorbierten Gasmolekülen, insbesondere Wasserdampf, Kohlenstoffoxide und leichte Kohlenwasserstoffe, die sich während der Offenzeit oder des Aufheizens an Innenflächen, Dichtungen und Porenmaterialien angelagert haben. Diese Moleküle werden bei UHV-relevanten Drücken ($< 10^{-7}$ mbar) zu einer dominanten Restgasquelle, führen zu instabilen Druckverhältnissen und können sensible Pumpstufen wie NEG-Elemente oder Kryooberflächen kontaminieren und deren Aufnahmefähigkeit frühzeitig

erschöpfen. In der Praxis werden diese Pumpen entweder ergänzend zur TMP geschaltet oder als Langzeitstabilisierung bei empfindlichen Analysesystemen genutzt. Die Vorpumpe bleibt

in der Regel ebenfalls aktiv, um den Auslassdruck der TMP zu stabilisieren.

Fazit:
Druckgerechtes Pumpen – kein lineares, sondern ein abgestuftes Verfahren

Das Evakuieren einer Vakuumkammer ist also ein Prozess, der in physikalisch klar voneinander getrennten Phasen abläuft – mit jeweils eigenen Regeln für Strömung, Gasverhalten und Pumptechnik. Die Effizienz und Betriebssicherheit eines Vakuumsystems hängt maßgeblich

davon ab, dass die richtigen Pumpentypen in der passenden Druckstufe zugeschaltet werden – nicht zu früh und nicht zu spät. Nur so lassen sich stabile Enddrücke, minimale Ausgasraten und lange Wartungsintervalle erreichen. Moderne Steuerungen übernehmen diese schrittweise Zuschaltung automatisch, dennoch bleibt ein tiefes Verständnis der zugrunde liegenden Regime für Planung, Auslegung und Störfallanalyse unverzichtbar.

Die Funktionsprinzipien – von Verdrängerpumpe bis Sorption

In der Praxis werden Vakuumsysteme nahezu immer durch eine Kombination mehrerer Pumpen realisiert. Ein Beispiel dafür ist die klassische Kombination aus Drehschieberpumpe (Vorpumpe) und Turbomolekularpumpe (Hochvakuumherzeugung). Je nach Anwendung kommen weitere Stufen, wie Kryopumpen zur Restgasreduktion oder Ionengetterpumpen für dauerhaftes UHV, hinzu.

Eigenschaften und Charakteristika der wichtigsten Pumpentypen

Drehschieberpumpen sind robuste, weitverbreitete Verdrängerpumpen, die in vielen allgemeinen Anwendungen ihren Platz gefunden haben. Sie zeichnen sich durch günstige Anschaffungskosten, hohe Betriebssicherheit und einfache Wartung aus, benötigen allerdings Ölschmierung. Die Bauweise kann zu Rückstrom und Wartungsaufwand führen, weshalb sie für kontaminationsempfindliche Prozesse weniger geeignet sind.

Membranpumpen hingegen arbeiten ölfrei, leise und nahezu wartungsfrei. Ihre Förderleistung und das erreichbare Endvakuum sind jedoch begrenzt. Dennoch sind sie für analytische Systeme und mobile Anwendungen sehr gut geeignet.

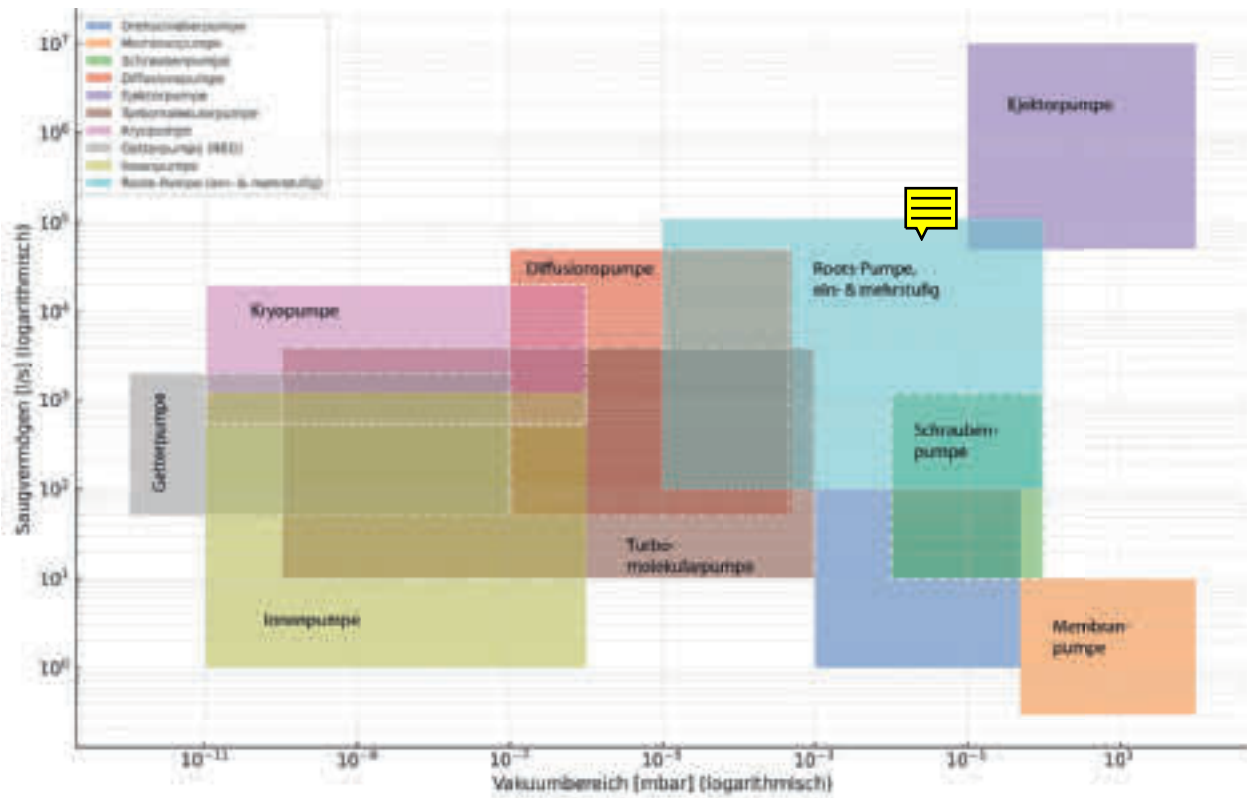
Ejektorpumpen arbeiten im Grobvakuum mit Dampfstrahlen, die Gasmoleküle mitreißen. Ihr Wirkprinzip basiert auf einer Laval Düse, die mittels einer viskosen Strömung Unterdruck erzeugt. Sie finden sich vor allem in großformatigen Anlagen der chemischen und petrochemischen Industrie. Ihr größter Vorteil ist die Wartungsfreiheit – allerdings auf Kosten eines hohen Energie- und Wasserverbrauchs.

Trockenlaufende Schraubenpumpen sind für viele industrielle Prozesse geeignet. Ihr berührungsfreier Lauf reduziert Verschleiß und Kontaminationsrisiken. Sie sind unempfindlich gegen viele Prozessgase und haben ein gutes Saugvermögen auch bei hohem Druck. Die Anschaffungskosten sind deutlich höher als bei ölbasierten Systemen, dafür reduzieren sich die Betriebskosten durch längere Wartungszyklen.

Ein weiterer häufig genutzter Typ ist die sogenannte **Roots-Pumpe**, auch als Wälzkolbenpumpe bezeichnet. Diese trockenlaufende, berührungslos arbeitende Verdrängerpumpentyp wird insbesondere im Feinvakuumbereich (ca. 10^{-1} bis 10^{-3} mbar) als leistungsstarker Booster zwischen Vorpumpe und Hochvakuumstufe eingesetzt. Charakteristisch ist ihr rotierendes Verdrängersystem, bestehend aus zwei gegenläufig drehenden, meist achtförmigen Kolben (Lobes), die das Gas durch das Pumpengehäuse fördern, ohne es intern zu komprimieren. Diese berührungsfreie



Die tatsächliche Leistung einer TMP hängt von den Einsatzbedingungen ab. Dieses Modell erreicht für N_2 ein Kompressionsverhältnis von $1 \cdot 10^{11} \text{ Pa m}^3/\text{s}$ und bei Enddrehzahl von 90.000 1/min einen Gasdurchsatz von 1,3 hPa L/s. (Bild: Pfeiffer)



Das Diagramm veranschaulicht die Leistungswerte unterschiedlicher Vakuumpumpentechnologien in Bezug auf das erreichbare Vakuum und die Saugleistung. Bei der Darstellung ist in beiden Achsen logarithmisch, um die Wertebereiche in einem Diagramm darstellen zu können. (Bild: VIP)

Arbeitsweise ermöglicht hohe Drehzahlen und große Volumenströme bei vergleichsweise geringer mechanischer Belastung. Eine solche Booster-Kombination verbessert das Saugvermögen im Feinvakuumbereich erheblich – bei gleichzeitig niedrigerem Enddruck und höherer Wirtschaftlichkeit.

Pumpen durch Impulstransfer

Im Bereich des Hochvakuums zählen **Diffusionspumpen** zu den ältesten, aber immer noch gebräuchlichen Pum-

pentypen. Ihr Funktionsprinzip basiert auf dem Impulstransfer durch einen gerichteten Dampfstrahl, typischerweise aus Silikonöl oder synthetischem Kohlenwasserstoff. Dieser Dampf wird durch ein zentrales Heizelement erzeugt und durch Düsen mit hoher Geschwindigkeit zum Auslass geführt. Gasmoleküle aus der Kammer, die in diesen Strahl eintreten, werden durch Stoßimpulse mit den Dampfsmolekülen in Richtung Auslass mitgerissen, wo sie von einer Vorpumpe abgesaugt wer-

den. Eine wirksame Kühlung der Mantelflächen sorgt dafür, dass der Dampf kondensiert und dem Kreislauf wieder zugeführt wird. Die Bezeichnung „Diffusionspumpe“ ist historisch bedingt und basiert auf einer anfänglichen Fehlinterpretation des Wirkungsprinzips, denn tatsächlich findet in ihr weniger ein Diffusionsprozess im klassischen Sinn statt als vielmehr ein gerichteter Impulstransfer in einer molekularen Gasströmung. Aufgrund ihrer Einfachheit und hohen Förderleistung bei vergleichsweise geringen Kosten werden Diffusionspumpen weiterhin in zahlreichen industriellen Anwendungen eingesetzt, insbesondere in großen Beschichtungsanlagen. Eine effiziente Rückströmvermeidung (zum Beispiel durch Baffles oder Kaltfallen) ist allerdings unerlässlich.

Turbomolekularpumpen – Präzisions-Hochvakuumtechnik

Turbomolekularpumpen (TMP) sind die dominierende Pumpentechnologie bei Anwendungen im Hoch- bis Ultrahochvakuum (typischer Arbeitsbereich: 10^{-3} bis 10^{-9} mbar, in Spezialfällen auch $< 10^{-10}$ mbar). Ihr Wirkprinzip basiert auf dem gezielten Impulsübertrag von

SIE ARBEITEN MIT VAKUUM?



Wir wollen Ihre Herausforderungen und Problemstellungen kennenlernen, von dem Thema Vakuumherzeugung bis zur Analytik!

Wir möchten wissen, was Sie im betrieblichen Alltag rund um Ihre Vakuumprozesse beschäftigt, wo Sie sich Verbesserungen wünschen oder Informationsbedarf haben.

Außerdem interessiert uns, welche Herausforderungen es für Vakuumanwender zu bewältigen gibt und insbesondere welche in den letzten Jahren hinzugekommen sind – von Wirtschaftlichkeitsthemen über Verfügbarkeit, Wartung und Standfestigkeit bis hin zur Digitalisierung und Dokumentation.

Bringen Sie Ihre Themen ein auf: vip-praxis.oberflaeche.de

rotierenden Rotorblättern auf Gasmoleküle, wodurch diese in Richtung Auslass beschleunigt werden. Die Konstruktion besteht aus mehreren, gegeneinander verschachtelten Rotor- und Statorstufen mit speziell geneigten Schaufeln. Die Rotoren drehen sich mit sehr hoher Geschwindigkeit – in der Regel zwischen 24.000 und 90.000 U/min, je nach Baugröße und Ausführung.

Der effektive Transport der Gasmoleküle funktioniert nur im molekularen Strömungsregime, also bei Drücken, bei denen die mittlere freie Weglänge der Gasmoleküle größer ist als der Abstand der Schaufelstufen. Deshalb benötigen Turbomolekularpumpen immer eine Vorpumpe, die den Einlassdruck zunächst auf etwa 10^{-1} bis 10^{-2} mbar absenkt. Unterhalb dieses Bereichs kann die TMP dann kontinuierlich fördern.

Ein wesentliches Merkmal der TMP ist ihre Rückstromfreiheit. Da keine Schmierstoffe oder Dichtmittel im Gasweg verwendet werden, sind sie besonders geeignet für Prozesse mit hohen Anforderungen an Gasreinheit – etwa in der Elektronenmikroskopie, Massenspektrometrie, Vakuumprozessanalytik, Halbleitertechnik oder der Forschung mit Synchrotron- und Teilchenstrahlanlagen. TMP sind dabei sehr leistungsfähig, insbesondere für leichte und mittlere Molekülmassen (H_2 , He, N_2 , Ar). Allerdings zeigen sie eine stark abfallende Saugwirkung bei hohen Massen oder bei kondensierbaren Dämpfen.

Zudem sind sie empfindlich gegenüber mechanischen Schocks, Partikelemissionen aus dem Prozess und plötzlichen Gaseinbrüchen – etwa durch Bedienfehler oder Vakuumleckagen.

Kryopumpen entfernen Gase, indem sie sie auf extrem kalten Oberflächen kondensieren lassen. Sie sind besonders effektiv für Wasserdampf und generell leicht kondensierbare Gase. Aufgrund ihrer Komplexität, des Energieverbrauchs und der Notwendigkeit regelmäßiger Regeneration kommen sie nur für spezifische Anwendungen in Betracht – dazu gehören die optische Beschichtung, UHV oder Halbleitertechnik.

Physikalisch-chemische Wirkprinzipien

Getter- und Ionenpumpen arbeiten physikalisch-chemisch, indem sie Gas-

moleküle an Oberflächen binden oder durch Ionisation einfangen. Diese Pumpenarten sind vibrationsfrei, langlebig und benötigen kaum Wartung, sind aber meist nur im Ultrahochvakuumbereich effektiv. Ihre Einsatzgrenzen liegen bei Edelgasen und nichtreaktiven Molekülen.

Anwendungen und Auswahlkriterien

Je nach Prozess, Gasart und angestrebtem Druckbereich variieren die Anforderungen an das Vakuumsystem erheblich. In allgemeinen Laboranwendungen, etwa bei einfachen Trocknungen oder Lecktests, genügen oft ölgeschmierte Drehschieber- oder ölfreie Membranpumpen. Für anspruchsvollere physikalische Analyseverfahren – wie Elektronenmikroskopie, Oberflächenanalytik oder Massenspektrometrie – sind Turbomolekularpumpen mit ölfreien Vorpumpen (z. B. Scroll- oder Schraubenpumpen) heute Stand der Technik.

In der industriellen Beschichtung, insbesondere von Glas, Werkzeugen oder optischen Komponenten, dominieren robuste Schraubenpumpen oder Diffusionspumpen in Kombination mit Hochvakuumstufen. Bei der Halbleiterfertigung wiederum kommen oft komplexe Systeme aus Turbomolekularpumpe, Kryopumpe sowie



Die Edwards nHT-Serie ist für industrielle Hochvakuumanwendungen konzipiert, je nach Größe reicht ihr He-Saugvermögen von 4.500 - 42.000 l/s, der Betriebsbereich reicht bis 10^{-7} bar. (Bild: Atlas Copco)

ergänzender Abgasnachbehandlung zum Einsatz. Diese dient der kontrollierten Entfernung und Neutralisation chemisch aggressiver, toxischer oder pyrophorer Prozessgase – häufig über thermische, katalytische

oder plasmaunterstützte Reaktoren, die unmittelbar an das Pumpensystem gekoppelt sind. Die Wahl und Kombination der Pumpentechnologien richtet sich dabei nicht nur nach dem Zielvakuum, sondern auch nach der thermischen, chemischen und partikulären Belastung des jeweiligen Prozesses.

Ausblick

Diese Einführung dient als systematische Grundlage, auf der die weiteren Teile dieser Fachserie aufbauen werden. In den folgenden Beiträgen werden einzelne Pumpentypen vertiefend betrachtet, typische Schadensmechanismen analysiert und praxisnahe Hinweise zu Auswahl, Wartung und Prozessintegration Thema sein. Ziel ist es, sowohl dem erfahrenen Anwender als auch dem entwicklungsnahe Ingenieur eine belastbare Orientierung zu bieten. CB

VAKUUMPUMPEN IN FORSCHUNG UND PRAXIS TEIL 2

In der VIP 4/2025 folgt der zweite Teil der mehrteiligen Themenreihe **Vakuumpumpen in Forschung und Praxis – zum Thema Erzeugung von Grobvakuum.**

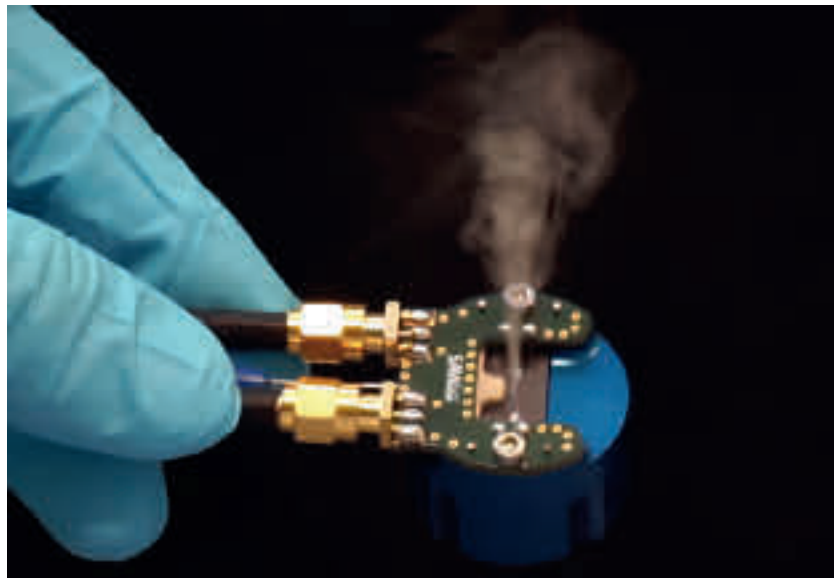
Geplanter Erscheinungstermin dieser Ausgabe wird der 15. August sein.

Inhaltlich werden Anwendungskonzepte mit unterschiedlichen Pumpentypen behandelt, von der Drehschieber- über Injektorpumpen bis zur Roots Pumpe. Dabei werden unter anderem anwendungsbezogene Vor- und Nachteile der Pumpenkonzepte herausgearbeitet. Weiterhin werden Betriebskosten, Wartung und die Steigerung der Verfügbarkeit Thema sein.

Verpassen Sie nicht diese Ausgabe: vip-bestellung.oberflaeche.de

Chemische Präkursoren präzise bereitstellen

Chipbasierte Aerosolquelle ermöglicht neue Lösungen für Synthesaufgaben



Mikroakustische Aerosolquellen bieten neue Möglichkeiten zum Zerstäuben von Präkursoren in Beschichtungsanwendungen. (Bilder: Leibniz IFW/ Roudini)

Die Aerosolerzeugung auf Basis akustischer Oberflächenwellen (SAW) ist eine präzise, düsenfreie Technik für die Zufuhr flüssiger Ausgangsstoffe. Sie lässt sich für eine Vielzahl von chemischen Abscheidungs- und Syntheseprozessen einsetzen, zum Beispiel chemische Gasphasenabscheidung, Atomlagenabscheidung, Pyrolyse und verwandte Verfahren.

Neuartige mikroakustische Aerosolquellen, entwickelt von der Sonojet GmbH, einem Spin-off des Leibniz-Instituts für Festkörper- und Werkstoffforschung (IFW) Dresden, ermöglichen eine Aerosolerzeugung ohne Druckquelle, eine präzise Steuerung der Aerosolrate, Skalierbarkeit und die Vakuumkompatibilität. Sonojet entwickelt verschiedene Versionen der Aerosolquellen, angepasst zum Beispiel an flanschbasierte chemische Synthesenanlagen, F&E-Anwendungen und Aerosol-Druckköpfe.

Chemische Präkursoren immer exakter benötigt

Da Halbleiterbauelemente immer kleiner und gleichzeitig immer komplexer

werden, ist eine präzise Dünnschichtabscheidung für jede hergestellte Schicht in allen Mikrochips von entscheidender Bedeutung. Chemische Gasphasenabscheidung (CVD) [Sun2021], Atomlagenabscheidung (ALD) [George2009] und verwandte Technologien sind daher Schlüsseltechnologien in der Chipindustrie. Mit dem Vorstoß in Richtung Sub-2-nm-Technologie sind sie entscheidend für die nächste Generation von Mikrochips – sie verbessern deren Leistung, Effizienz und Skalierbarkeit. Während die chemische Gasphasenabscheidung (CVD) hohe Abscheideraten ermöglicht, fehlt ihr die atomare Präzision. Die Atomlagenabscheidung (ALD) hingegen nutzt sequenzielle, selbstbegrenzende Oberflächenreaktionen und gewährleistet so eine gleichmäßige und konforme Filmbildung auf atomarer Ebene.

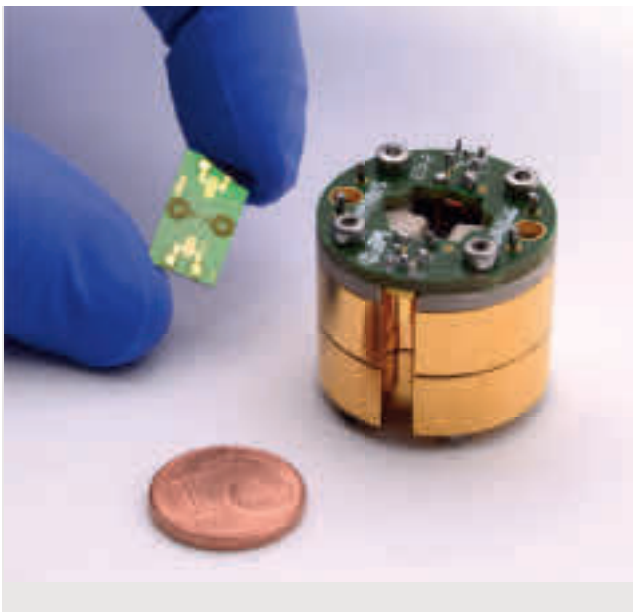
Bei CVD und ALD werden häufig flüssige und manchmal sogar feste, in einer Flüssigkeit dispergierte oder gelöste, Ausgangsstoffe, die so genannten Präkursoren, verwendet. Die Präkursoren werden dazu in die Dampfphase gebracht und dann in eine Vakuumkammer geleitet, wo sie mit der gewünschten Oberfläche

reagieren und dünne Schichten bilden. Zu den bekannten Methoden der Zufuhr von flüssigen Präkursoren für CVD, ALD sowie räumliche ALD, direkte ALD und Pyrolyse gehören erstens die „Dampfabsaugung“, ein passiver Ansatz zur Zuführung von Präkursoren, der typischerweise bei flüssigen Präkursoren mit hohem Dampfdruck eingesetzt wird. Dabei wird lediglich ein Vakuum an das flüchtige Material angelegt, um dessen Dampf in das System zu überführen. Die zweite Methode nutzt „Bubblers“, bei denen ein Trägergas (wie N₂ oder Ar) durch einen flüssigen Präkursor geleitet wird, wodurch ein Dampfstrom erzeugt wird. Dies ist ideal für flüssige Präkursoren mit mittlerem Dampfdruck. Die dritte Möglichkeit ist die direkte Flüssigkeitsinjektion (engl. direct liquid injection, DLI) durch Druckdüsenvernebler, bei der eine kontrollierte Menge eines flüssigen Präkursor unter hohem Druck in eine beheizte Verdampfungskammer injiziert wird, oder durch Ultraschallzerstäuber. Dies ist geeignet für Präkursoren mit niedrigem Dampfdruck.

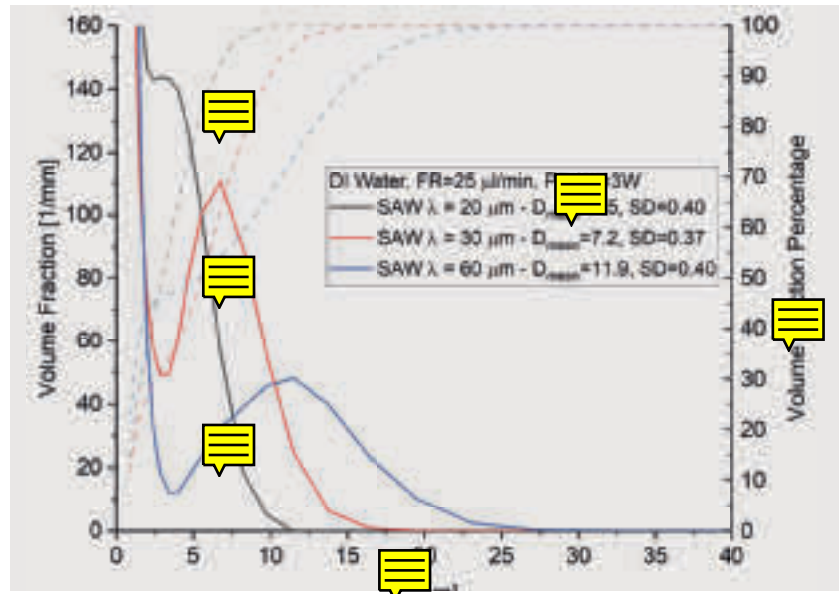
Mit den Techniken der Dampfabsaugung und des Bubbler-Verfahrens lassen sich keine ausreichenden Konzentrationen von schwer flüchtigen, mehrkomponentigen oder gelösten Präkursoren erzielen. Um die Menge des in die Reaktionskammer eingebrachten Präkursors zu erhöhen, wird häufig die Temperatur erhöht, um den Dampfdruck des Materials zu steigern. Dies ist eine Herausforderung und kann sogar kontraproduktiv sein, da das Risiko der Zersetzung des Präkursors, insbesondere bei chemisch komplexen Verbindungen, ebenfalls erhöht wird. Darüber hinaus garantiert das Erhitzen des Vorläufers nicht unbedingt eine ausreichende Dampfkonzentration des gewünschten Vorläufermaterials innerhalb des Systems. Insbesondere bei mehrkomponentigen und in Lösungsmittel gelösten festen Vorläufern würde zudem hauptsächlich das leicht flüchtige

Lösungsmittel verdampfen und in die Kammer geleitet werden, während das eigentliche Vorläufermaterial im Vorratsbehälter verbleibt.

DLI-Systeme bieten im Prinzip eine Alternative für die Bereitstellung von Präkursoren, indem sie kleine Tröpfchen mit einem großen Oberflächen-Volumen-Verhältnis erzeugen, die schnell in die Gasphase übergehen und weniger vom spezifischen Dampfdruck/den spezifischen Dampfdrücken abhängen. Die bestehenden DLI-Systeme sind jedoch recht komplex im Betrieb, kostenintensiv und werden nur von wenigen Unternehmen angeboten. Sie erfordern in der Regel ein relativ großes Flüssigkeitsvolumen, das mit einer großen Menge an unter Druck stehendem Trägergas durch einen Druckinjektor (oder Druckzerstäuber) der Prozesskammer zugeführt wird. Daher sind die bestehenden DLI-Systeme primär für Prozesse mit hohem Durchsatz geeignet und weniger für die präzise Zuführung kleiner Dampfmenigen. Dies schränkt den nutzbaren Betriebsbereich von ALD- und CVD-Reaktoren erheblich ein. Außerdem ist bekannt, dass Druckdüsenzerstäuber eine unerwünscht breite Tröpfchengrößenverteilung erzeugen, was die Verdampfungseffizienz der Aerosoltröpfchen und die Prozesskinetik verringert.



Kompakte Aerosolquelle, die auf den akustischen Oberflächenwellen (SAW) basiert.



Die Tröpfchengröße von Wasser variiert mit der Länge der akustischen Oberflächenwellen (SAW). (Grafik: Leibniz IFW)

Bei neuen DLI-Systemen mit Ultraschallzerstäubern werden dagegen hochfrequente Schallwellen eingesetzt, um ein feines Aerosol zu erzeugen. Dies wird von einem Gasstrom transportiert und verdampft, bevor es das Substrat erreicht. Die Schallwellen wandeln das flüssige Ausgangsmaterial ohne zusätzliche Erwärmung und bei niedrigen Durchflussraten und niedrigem Druck in ein Aerosol um. Allerdings weisen auch die derzeitigen Systeme eine breite Tröpfchengrößenverteilung auf und sind nur für Flüssigkeiten mit einer Viskosität von 1 bis 20 mPas geeignet. Das schränkt die Auswahl an Vorläufersubstanzen ein. Die zukünftige Integration in kompakte Präkursor-Quellen, die Kontrolle der Tröpfchengröße und die gepulste Aerosolabgabe sind mit Ultraschallzerstäubern nicht möglich.

Miniaturisierte DLI-Systeme durch akustische Oberflächenwellen

Seit 2011 leisten Forscher am Leibniz-Institut für Festkörper- und Werkstoffforschung (IFW) in Dresden Pionierarbeit bei der Entwicklung von Aerosolquellen auf Basis akustischer Oberflächenwellen (engl. Surface Acoustic Waves, SAWs) [Roudini2020, Roudini2023, Roudini2024, Winkler2017, Winkler 2016, Winkler 2016b, Winkler 2015, Collins 2012] und haben nun neue Quellen für technische Aerosole

zur Marktreife gebracht.

Der SAW-basierte Aerosolgenerator nutzt piezoelektrische Chipsubstrate, die mit interdigitalen Wandlerelektroden strukturiert sind, um akustische Oberflächenwellen anzuregen, welche sich entlang der Chipoberfläche ausbreiten. Wenn eine Flüssigkeit mit diesen Wellen in Wechselwirkung tritt, gleichen sich Kapillar- und Trägheitskräfte aus. Das führt zur Bildung und Stabilisierung von Flüssigkeitsdomen auf der Chipoberfläche, aus denen schließlich die Aerosolfahne senkrecht zur Substratoberfläche ausgestoßen wird. Durch Abstimmung der Durchflussraten und Wellenparameter können Tröpfchengrößen zwischen $<1 \mu\text{m}$ und $20 \mu\text{m}$ eingestellt werden.

Die Aerosolquellen arbeiten mit vielen Flüssigkeiten, von wässrigen Lösungen und organischen Lösungsmitteln bis hin zu Nanopartikelsuspensionen in einem großen Viskositätsbereich bis zu 1000 mPas. Das ermöglicht die Nutzung vieler chemischer Präkursoren. Die idealen Durchflussraten reichen von 0,1 bis 150 $\mu\text{l/min}$ bei quasi vollständigem Materialumsatz. Die Zerstäubung kann dabei kontinuierlich oder gepulst (Hz- bis MHz-Frequenz) betrieben werden.

Die SAW-basierten Aerosolquellen bieten eine hohe Zerstäubungseffizienz, was insbesondere für teure Materialien oder Materialien mit geringer

Verfügbarkeit entscheidend ist. Sie ermöglichen kompakte Quellsendesigns und eine stark vereinfachte Systemarchitektur mit derzeit nur weniger als 50 cm³ Platzbedarf für die eigentliche Quelle, wobei in zukünftigen Designs eine noch höhere Integration möglich ist.

In einer ALD-Demonstration wurde Bis(trimethylsilyl)tellur ($\text{Te}(\text{SiMe}_3)_2$) mit dem SAW-System aerosoliert. Außerdem wurde das System als Wasserquelle für die ALD von ZnO eingesetzt, das mit Diethylzink (DEZ) in einer kommerziellen ALD-Kammer reagierte, was nach 300 ALD-Zyklen zur Abscheidung einer 49 nm dicken ZnO-Schicht führte. Der Experimentalaufbau unterstützte den kontinuierlichen und gepulsten Betrieb (zum Beispiel 10 ms, 50 % Einschaltdauer) und ermöglichte eine präzise Materialdosierung in die ALD-Kammer. Dies erlaubte eine kontrollierte Verdampfung des Präkursors, minimierte den Abfall und verbesserte die Gleichmäßigkeit der Schicht – besonders wichtig bei hitzeempfindlichen Substraten.

Skalierbares und integriertes Systemdesign

Die Aerosolquellen bestehen aus einem aktiven Chipelement zur Wellenanregung, das sich in einem Chipträger befindet. Dieser versorgt den Chip mit

elektrischen Hochfrequenzsignalen und mit der zu zerstäubenden Flüssigkeit. Darüber hinaus kann er Temperaturregelungs- und Sensorelemente enthalten. Die Chips können im Wafer-Maßstab mit industriekompatiblen Mikrotechniken in großen Mengen zu einem niedrigen Preis hergestellt werden. Sie werden typischerweise als Verbrauchsmaterial betrachtet, das an eine bestimmte Flüssigkeit angepasst ist.

Der Chiphalter integriert Flüssigkeitszufuhr, HF-Anschlüsse und optionale aktive Temperaturkontrolle und bietet Plug-and-Play-Kompatibilität mit ALD-Reaktoren und Inline-Tools. Die weitere Peripherie besteht aus einer Elektronikbox, einer (Niederdruck-)Pumpe für die Flüssigkeit und einer Transportgasversorgung, falls erforderlich.

Ausblick und Branchenrelevanz

Basierend auf mehreren Patentfamilien, die auf diesem Gebiet angemeldet wurden, und derzeit unterstützt durch ein Exist-Forschungstransfer-Stipendium des Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWK), gründete das IFW im Mai 2025 die Sonojet GmbH mit dem Ziel, die SAW-Aerosolquelle zu einem kommerziellen Prototyp zu entwickeln.

Dank der Vorteile in Bezug auf den geringen Stromverbrauch, die Tropfchenpräzision und das Integra-

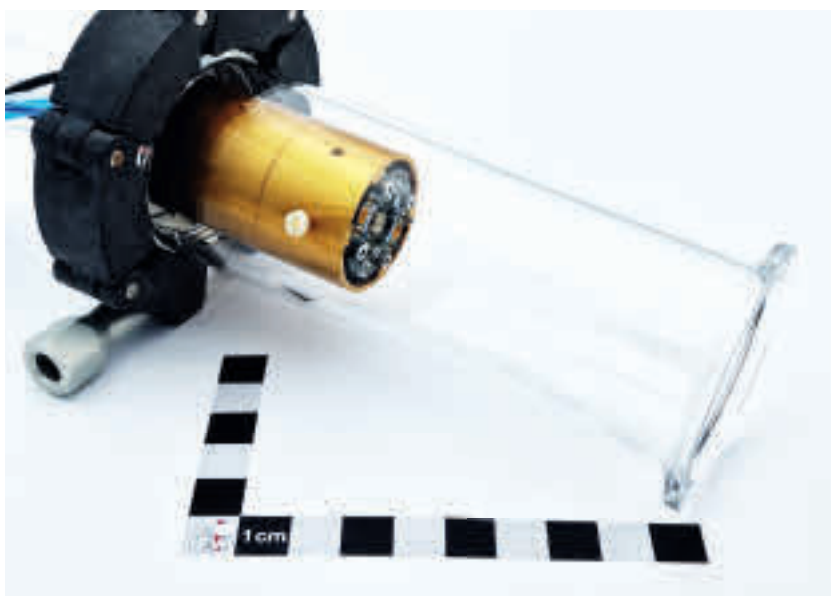


Aufbau für Integrationstests zur Atomlagenabscheidung (ALD) mit der SAW-basierten Aerosolquelle im Vakuumsystem.

tionspotenzial eignen sich die neuen Aerosolquellen für eine Vielzahl von Anwendungen, darunter die Versorgung mit Präkursoren, die Massenspektrometrie, das Aerosoldrucken, Forschungs- und Entwicklungsaufgaben sowie künftige Anwendungen in der Inhalationstherapie und der lokalen Geruchserzeugung.

Dr. Mehrzad Roudini

Leibniz-Institut für Festkörper- und Werkstoffforschung Dresden e. V.
www.ifw-dresden.de



Die Aerosolquelle, integriert in ein vakuumtaugliches Experimentalsystem. Der Aufbau umfasst strömungstechnische und elektrische Schnittstellen, die eine kontrollierte Zufuhr von Präkursoren unter Niederdruckbedingungen ermöglichen.

Literatur:

- L.Z. Sun et al., Nature Reviews Methods Primers 1:1 (2021);
- S.M. George, Chemical Reviews 110:1 (2009);
- M. Roudini et al. in PHYSICAL REVIEW APPLIED 14, 014071 (2020).
- M. Roudini et al., Ultrasonics Sonochemistry 98, 2023.
- M. Roudini et al., Aerosol Science and Technology VOL. 58, NO. 7, 2024.
- A. Winkler, et al., Biomedical Microdevices 19:9 (2017);
- A. Winkler, et al., Open Journal of Acoustics 6:3, 23-33 (2016);
- A. Winkler, et al., Journal of Sol-Gel Science and Technology 78:1, 26 (2016);
- A. Winkler, et al., Lab-on-a-Chip 18, 3793-3799 (2015);
- D.J. Collins, et al., Physical Review E 86, 56312/1-9 (2012)

Testchips bringen schnell klare Ergebnisse

Pillarhall LHAR-Teststrukturen erleichtern Entwicklung in der Halbleiterfertigung deutlich

Die Entwicklung von Abscheidungsprozessen für Strukturen mit hohem Aspektverhältnis in der Halbleiterindustrie ist eine anspruchsvolle Aufgabe. Eine der größten Herausforderungen besteht in der Verfügbarkeit geeigneter Teststrukturen. Zudem erfordern die dafür notwendigen Querschnittsanalysen hochentwickelte Elektronenmikroskope (SEM oder TEM) und aufwändige Probenpräparation.

Um diesen Prozess effizienter zu gestalten, hat Chipmetrics das Testchip-System Pillarhall entwickelt. Es ermöglicht die Bewertung von Filmeigenschaften in Strukturen mit hohem Aspektverhältnis durch einfachere Techniken.

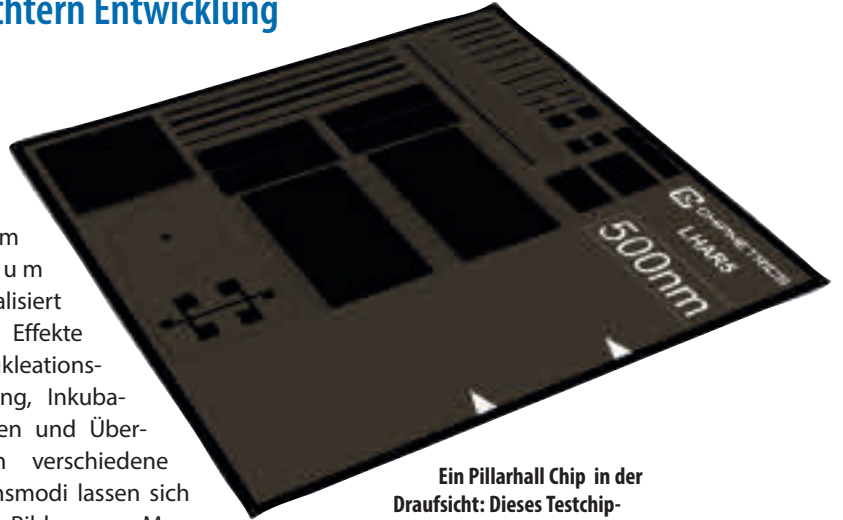
Seitlich geätzter Siliziumkanal als Herzstück

Das Herzstück der Pillarhall-Plattform ist die LHAR-Struktur (Lateral High-Aspect-Ratio), ein seitlich geätzter Siliziumkanal, der in der fünften Generation (LHAR5) nur 100 nm hoch ist, aber sich seitlich über mehrere Millimeter erstreckt. Dieses Design erreicht Aspektverhältnisse von 10.000:1 und darüber hinaus – um Größenordnungen höher als die gegenwärtig anspruchsvollsten 3D-NAND- oder DRAM-Strukturen.

Ein Silizium-„Dach“ verschließt die Kavität; eine Öffnung an einem Rand erlaubt das laterale Eindiffundieren von Reaktanten. Nach dem Abscheidungs-schritt wird das Dach durch einfaches Abziehen entfernt, wodurch ein Querschnitt sichtbar wird – ein Prozess, der sonst eine FIB/XSEM-Sitzung erfordert. Der jetzt sichtbare Film weist ein hochaufgelöstes Dickenprofil auf, das eine differenzierte Analyse von Haft- und Dosiseffizienz in Abhängigkeit von Eindringtiefe und Precursor-Expositionsdauer erlaubt. Weiterhin können

Bereiche mit inhomogenem Wachstum leicht lokalisiert werden. Effekte wie Nukleationsverzögerung, Inkubationsphasen und Übergänge in verschiedene Wachstumsmodi lassen sich bis hin zur Bildung von Monolagen beobachten. Eine Analyse der chemischen Zusammensetzung der Schichtzusammensetzung kann beispielsweise mittels XPS oder TOF-SIMS erfolgen. Sogar die Messung der elektrischen Eigenschaften einer Schicht als Funktion der Eindringtiefe ist mittels AFM-basierter Methoden möglich. Ein einziger Wafer-Durchlauf liefert dank mehrerer LHAR-Kavitäten mit unterschiedlichen Längen und Eingangsweiten einen Fingerabdruck der Prozesskinetik.

Während LHAR-Chips sich besonders für laterale Diffusionsstudien eignen, benötigen viele moderne Technologien auch Daten zur Selektivität von Abscheidungen (Area Selective Deposition – ASD) und Eindringverhalten in vertikalen Strukturen mit hohem Aspektverhältnis. Daher bietet Chipmetrics zwei ergänzende Chips an: Der ASD-1 weist abwechselnde Nanolinien verschiedener Materialien (wie $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$) auf um selektive Abscheidung zu detektieren – inklusive unerwünschter Nukleation und Wachstum an Linienkanten. Der VHAR1 enthält ein Gebiet aus vertikalen Löchern mit 1 μm Durchmesser und 200 μm Tiefe ($\text{AR} \approx 200:1$), ideal zur Analyse des „Füllvermögens“ für TSV-ähnliche Strukturen. Diese drei Chips – ASD-1, VHAR1 und Pillarhall – bilden zusammen eine komplementäre Produktfamilie für Selektivität der Abscheidung, laterale



Ein Pillarhall Chip in der Draufsicht: Dieses Testchip-System vereinfacht die Bewertung von Filmeigenschaften in Strukturen mit hohem Aspektverhältnis. (Bilder: Chipmetrics)

Konformität und vertikale Penetration.

Typischerweise werden Pillarhall-Chips als einzelne Elemente in der Entwicklung eingesetzt. Um diese auch in 300-mm-CMOS-Linien einsetzbar zu machen, entwickelte Chipmetrics das Pocket-Wafer-Konzept: Dabei werden Chips in flache Aussparungen standardisierter 300-mm-Wafer gebondet. Das Ergebnis ist ein roboter- und vakuumkompatibler Wafer mit geringer Partikeldichte, der wie Produktwafer in typischen Abscheideanlagen in Halbleiterfabriken prozessiert werden kann. Mehrere Chiparten beziehungsweise Messtrukturen wie Filmstressmembranen, Kelvin- und van-der-Pauw-Strukturen lassen sich auf einem Träger kombinieren und ersetzen so mehrere Monitorwafer.

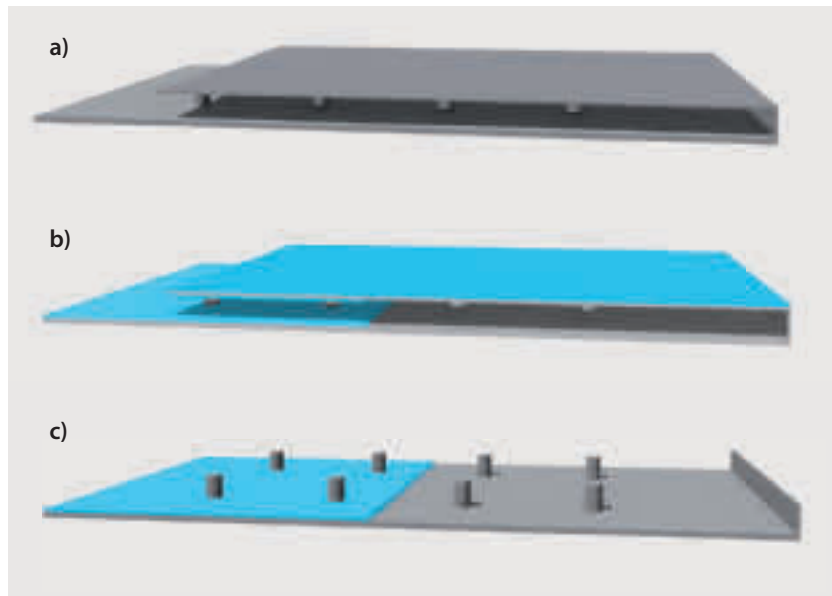
Schnelle, anbieterunabhängige Qualifikation

Die herkömmliche Anlagenqualifikation verbraucht Testwafer und erfordert zusätzliche Querschnittsanalysen. Mit Pillarhall Chips genügt ein einzelner Pocket-Wafer: Rezept fahren, Profildaten digitalisieren – fertig. Ein

Akzeptanztest für neue Anlagen mit LHAR-Daten für Testläufe, Produktionsbedingungen und Stretch-Optimierungen ist damit an einem Tag möglich. Auch die Qualifikation nach Wartung wird einfacher: Mit einem Wafer können Eindringtiefen und Schichtdicken ohne aufwendige Querschnittsanalysen schnell charakterisiert werden. Bei einem Prozesstransfer können Standort-zu-Standort-Vergleiche durch das einheitliche Testdesign vereinfacht werden. Im Ergebnis zeigt sich eine 70 bis 90 % schnellere Qualifikation und Entlastung für Lithografie, Metrologie und Integration. Abscheidungsprozesse wie CVD oder ALD unterliegen Schwankungen (zum Beispiel Prekursorfluss, Temperatur, Partikelbildung). Aufgrund ihrer überkritischen Aspektverhältnisse detektieren LHAR-Strukturen Bereits kleinste Veränderungen, lange bevor nominale Teststrukturen reagieren. Eine ± 2 %-Änderung in der Konformität bei 10.000:1 weist früh auf eine ± 15 %-Seitenwandverengung in künftigen 3D-NAND-Strukturen hin. Frühzeitige Detektion vermeidet Yieldverluste, Zuverlässigkeitsrisiken und Ausfallzeiten.

Pocket-Wafer erlaubt objektive Beschaffung und Benchmarking

Wenn Marketingversprechen „beste Stufendeckung“ suggerieren, liefert der LHAR5-Pocket-Wafer den Realitätscheck: Gleicher Chip, gleiche Kavität, gleiche Analyse und die Anbieter

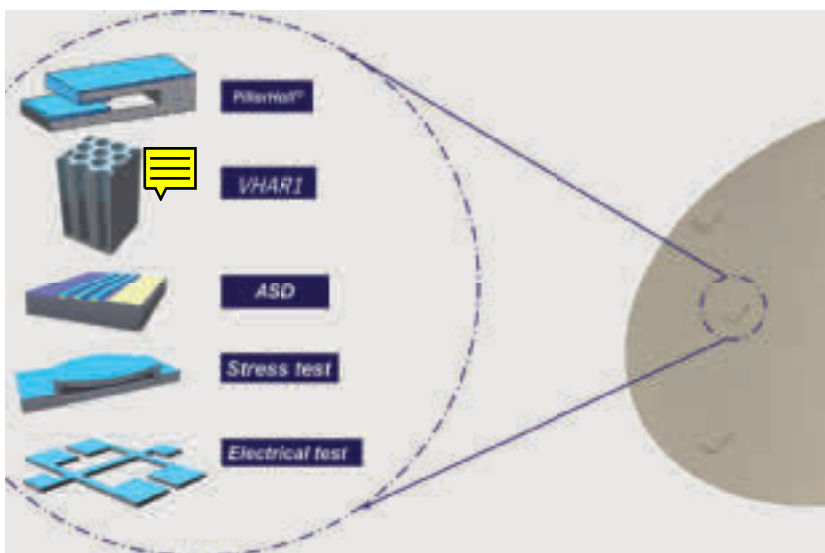


Die Strukturen eines Pillarhall Wafers: a) im Querschnitt, b) nach Filmabscheidung, c) nach Entfernung der Membran.

können direkt verglichen werden. Technikteams können damit Akzeptanzkriterien wie „50 % Penetration bei 10.000:1 nach 300 s Dosis“ definieren. Der Einkauf gewinnt Verhandlungsspielraum und die Prozesstechnik erhält verwertbare Messwerte statt subjektiver Einschätzungen. Auch die Nachhaltigkeit steigt, die Betriebskosten sinken. Ein Pocket-Wafer ersetzt mehrere Produkt- oder Testwafer und Dummyzyklen, was Wafermaterial und Chemie einspart. Zudem sinkt der Energieeinsatz, weil kürzere Qualifikationszyklen weniger Pumpphasen

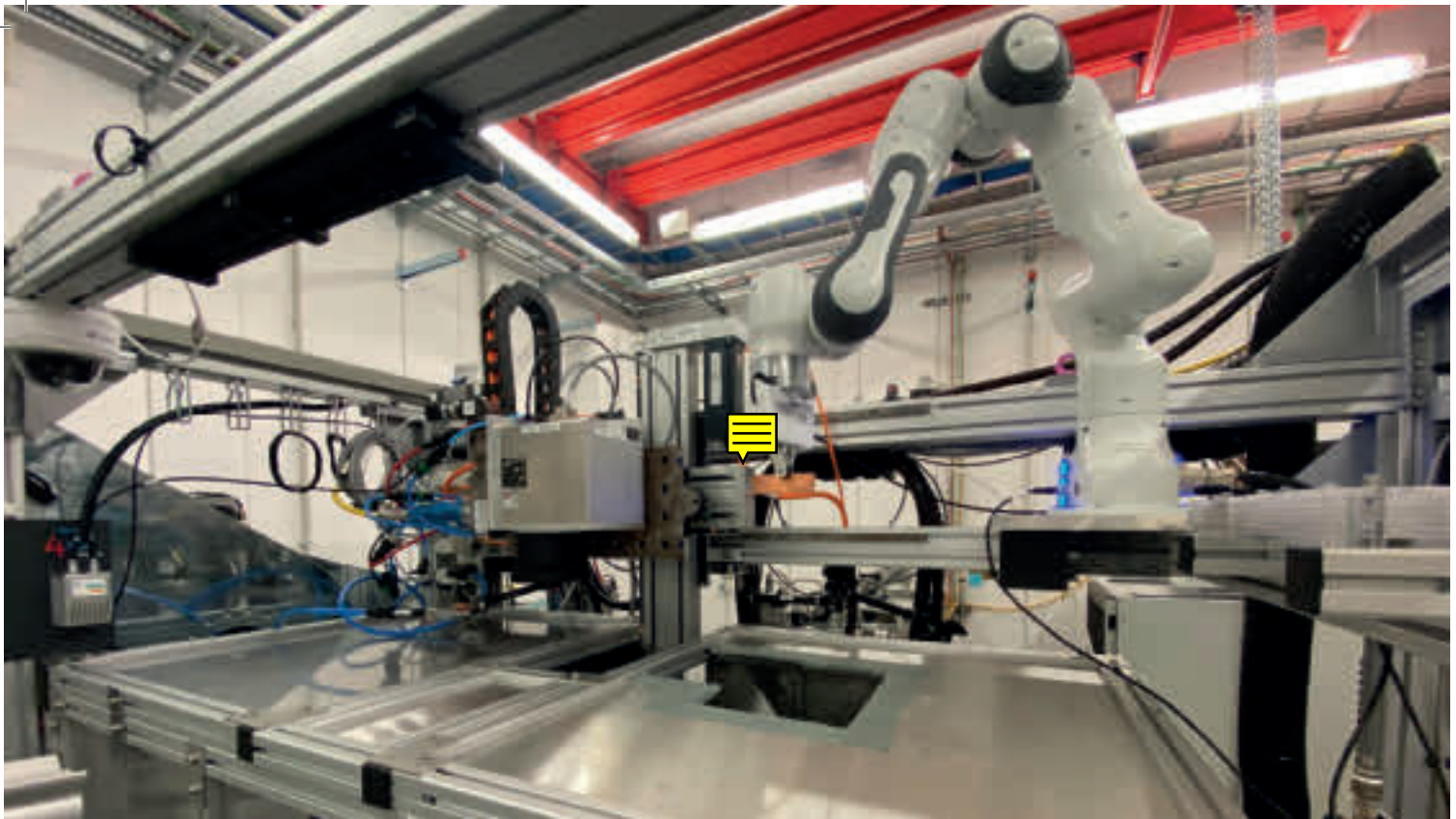
und Leerlauf bedeuten. Nicht zuletzt erlauben Penetrationsprofile eine präzise Dosierung ohne Risiko und damit einen optimierten Chemikalieneinsatz. So entsteht ein positiver Kreislauf: Weniger Materialverbrauch und weniger Ausschuss führen zu einem messbar geringeren CO₂-Fußabdruck. Die 100-nm-LHAR5-Struktur bereitet den Übergang zu GAA-CFETs und 3D-DRAM-Cubes vor. Da sich die Kavität auf <50 nm Höhe verkleinern lässt, bleibt die Plattform über mehrere Technologiegenerationen skalierbar. In einer Zeit, in der jeder Ångström an Inhomogenität die Ausbeute schmälert und jede Stunde Stillstand Millionen kostet, steigen die Anforderungen an die Prozessqualifikation und -überwachung. Pillarhall LHAR5-Pocket-Wafer ermöglichen eine schnelle, quantitative und herstellernerneutrale Sicht auf Abscheidungsprozesse, und das bei geringerer Umweltbelastung. Für Halbleiterfabs gilt: Prozesskontrolle muss mit der Geometrie mithalten. Eine 100 nm hohe, millimeterlange Teststruktur im Monitor-Wafer ist ein guter Anfang.

Thomas Werner



Ein Pocketwafer bietet mehrere mögliche Bestückungsvarianten für verschiedene Tests.

Chipmetrics GmbH
chipmetrics.com



Versuchsaufbau an der Beamline P61A: Ein Laserstrahl trifft senkrecht auf das Werkstück, während ein seitlich einfallender Synchrotronstrahl die Probe durchdringt. Szintillatoren (z. B. GaGG:Ce) wandeln die Röntgenstrahlung in Licht um, das mit Hochgeschwindigkeitskameras (bis 50.000 fps) aufgezeichnet wird. (Bild: RWTH Aachen – Lehrstuhl für Lasertechnik)

Tiefe Einblicke in den Schweißprozess

Unsichtbares wird sichtbar: Hochbrillante Röntgenstrahlung aus dem Vakuum trifft auf laserinduzierte Dynamik

Am Synchrotron PETRA III in Hamburg analysieren Forschende mit Hochgeschwindigkeitskameras die dynamischen Vorgänge beim Laserschweißen – insbesondere die Entstehung und das Verhalten von Dampfkapillaren, Poren und Schmelzbewegungen. Die Grundlage dafür ist ein komplexes Zusammenspiel von Laserstrahlung und hochbrillanter Synchrotronstrahlung, wie sie ausschließlich unter Ultrahochvakuumbedingungen im Elektronenbeschleuniger erzeugt wird.

Laserschweißen ist aus der modernen Produktion nicht mehr wegzudenken – sei es bei Batteriekontakten in der E-Mobilität, bei hauchdünnen Kupferverbindungen in der Mikroelektronik oder beim Fügen anspruchsvoller Leichtbauwerkstoffe. Obwohl das Verfahren weit verbreitet ist, weiß man bisher nur wenig darüber, was genau

in der Schweißzone physikalisch passiert. Wie genau entstehen Dampfkapillaren, Poren oder Risse? Welche Wechselwirkungen beeinflussen die Einschweißtiefe und Materialmischung? Diesen Fragen geht ein interdisziplinäres Forschungsteam unter Leitung des Fraunhofer-Instituts für Lasertechnik ILT und der RWTH Aachen mit einer einzigartigen Kombination aus Lasertechnologie und Synchrotronstrahlung auf den Grund.

Vom Ultrahochvakuum zur atmosphärischen Laserbearbeitung

Die Kombination aus laserbasierter Materialbearbeitung und Synchrotronstrahlung erfordert eine hochkomplexe Versuchsanordnung, wie sie an der Strahlführungslinie P61A des PETRA-III-Synchrotrons realisiert wurde. Die Röntgenstrahlung wird durch zehn 2 m lange Wiggler-Magnete erzeugt, die

eine kontinuierliche Spektralverteilung (White Beam) im Energiebereich von 20 bis 200 keV liefern. Sie entsteht im ringförmigen Elektronenbeschleuniger unter Ultrahochvakuumbedingungen mit einem Druck von etwa 10^{-9} mbar und wird über strahlführende Vakuumkanäle bis an den Versuchsbereich geleitet.

Der Übergang in die unter Normaldruck betriebene Versuchskammer erfolgt durch ein Berylliumfenster, das sowohl vakuumdicht als auch hochtransparent für Röntgenstrahlung ist. Der Weg, den die Strahlung unter atmosphärischen Bedingungen zurücklegt, beträgt lediglich wenige Zentimeter und ist aufgrund der hohen Photonenenergie strahlungsphysikalisch unkritisch – selbst bei maximalen Energien von 200 keV.

Die Laserbearbeitung erfolgt ebenfalls unter Atmosphärendruck, typi-

scherweise mit einem IPG YLR-4000 Faserlaser (2000 W, 1070 nm), der über Faserleitungen in die abgeschirmte Zone eingekoppelt wird. Ein robotergestütztes Handling-System positioniert das Probenblech hochpräzise im Fokusbereich beider Strahlen, wodurch ein exakter Abgleich von Laserwirkung und Röntgenanalytik möglich wird.

Ein zentraler Bestandteil der Detektion ist der Szintillator (z. B. GaGG:Ce oder LuAG), der die Röntgenstrahlung in sichtbares Licht umwandelt. Dieses wird von Hochgeschwindigkeitskameras mit Bildraten bis zu 50.000 fps erfasst. Um Bildqualität und Kontrast zu optimieren, kommen spezielle Filtermaterialien wie Graphit oder Kupfer zum Einsatz, abhängig von Energie, Material und Probendicke. Die Versuchskammer selbst ist mit mehreren Zentimetern Blei und zusätzlichem Edelstahl gegen Streustrahlung geschützt. Aufgrund der thermischen Belastung bei hoher Röntgenenergie wird der Szintillator mit flüssigem Stickstoff gekühlt. In enger Abstimmung mit DESY und Industriepartnern arbeiten die Forscher an verbesserten Kühlkonzepten auf Basis wärmeleitfähiger Diamantsubstrate.

Grafische 3D-Darstellung der sechs Messstrecken in der Paul E. Ewald Halle, die zu dem Abschnitt PETRA III Nord gehört.

Im Mittelpunkt steht die Dampfkapillare

Im Fokus der Untersuchungen steht ein winziger, röhrenförmiger Hohlraum, der sich im Schmelzbad durch Materialverdampfung bildet: die sogenannte Dampfkapillare. Ihre Form, Stabilität und Dynamik beeinflussen die Qualität der

Schweißnaht wesentlich – etwa durch die Tiefe des Einbrands oder durch die Neigung zur Porenbildung. Da sie nur wenige Zehntelmillimeter groß und extrem kurzlebig ist, ließ sich ihr Verhalten bisher nur sehr schwer beobachten und analysieren.

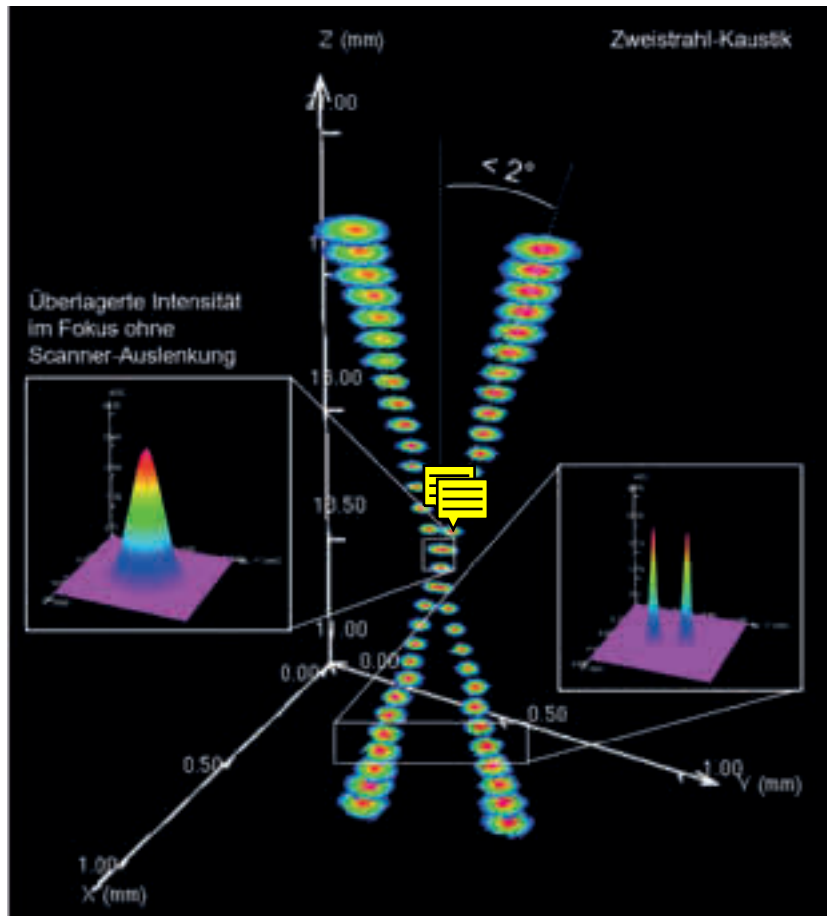
Die Nutzung des Synchrotrons PETRA III in Hamburg erfordert dabei enormen logistischen und personellen Aufwand: Strahlzeit ist so knapp, dass sie Jahre im Voraus beantragt werden muss. Für jede Messkampagne muss ein vollständiges Laserlabor vor Ort eingerichtet werden – inklusive Transport und Justage aller Komponenten sowie einem Schichtbetrieb rund um die Uhr.

Die Messkampagnen selbst sind geprägt von höchsten Anforderungen an die Beteiligten: Der Aufbau umfasst Laser- und Optiksyste-me, strahlungsgeschützte Gehäuse, spezielle Szintillatoren, Hochgeschwindigkeitskameras mit Bildraten bis zu 50.000 Bildern pro Sekunde sowie aufwändige Kühl- und Filtertechnik. Die Bildqualität hängt wesentlich von der optimalen Auswahl von Kamera, Filtermaterialien und Szintillatordicke ab – gerade bei hoch absorbierenden Materialien wie Kupfer oder Nickel.

Einer dieser Forschungsverbünde ist die Initiative „Laser meets Synchrotron“, an der u. a. das Fraunhofer ILT,



Experimentierhalle des Synchrotrons PETRA III, Hamburg: Die Infrastruktur mit meterdicken Betonabschirmungen und mehreren Strahlführungen ermöglicht laserbasierte Prozesse und Echtzeit-Röntgenanalytik unter extrem strahlungsreichen Bedingungen. (Bild: DESY/D. Altrath)



Zwei überlagerte NIR-Laserstrahlen (1070 nm): In der Echtzeitaufnahme am DESY wird sichtbar, wie eine gezielte Modulation des Energieeintrags die Form der Dampfkapillare und das Fließverhalten der Schmelze beeinflusst. (Grafik: Fraunhofer ILT)

die RWTH Aachen, DESY und weitere Hochschulen beteiligt sind. Erste Experimente fanden an der Strahlführungsline P07 mit Bildraten bis 18.000 Bildern pro Sekunde statt. Mit der neuen Strahlführungsline P61A konnten deutlich höhere Energien und Bildraten bis 50.000 Bilder pro Sekunde sowie die Untersuchung mehrlagiger oder dicker Proben realisiert werden. Aluminium-Kupfer-Sandwichverbindungen und andere komplexe Materialsysteme wurden mit Echtzeitaufnahmen analysiert.

Hier kommt die Synchrotronanalytik ins Spiel: Ihr entscheidender Vorteil liegt in der extrem hohen Brillanz, Kohärenz und Bildrate, mit der selbst kleinste Materialveränderungen zeitlich und räumlich aufgelöst werden können. Möglich wird das durch Röntgenstrahlung, die in kilometerlangen Vakuumröhren erzeugt und durch meterdicke Betonabschirmungen zur Strahlführung dirigiert wird. Nur unter diesen Bedingungen lassen sich komplexe Vorgänge wie die Schmelzbewegung oder

die Dynamik von Poren und Dampfkapillaren in Echtzeit und mit mikrometeregenauer Präzision verfolgen – ein Alleinstellungsmerkmal gegenüber konventionellen Diagnosesystemen.

Vom experimentellen Durchbruch zur industriellen Umsetzung

Die Kombination aus laserbasierten Schweißprozessen und hochauflösender Synchrotronanalytik eröffnet neue Möglichkeiten für die gezielte Prozessführung und Materialentwicklung. In den kommenden Jahren wollen die beteiligten Forschungsgruppen die Methodik weiter verfeinern – insbesondere durch die Nutzung noch höherer Bildraten (über 100 kHz), die Erprobung neuartiger Filter- und Kühltechniken sowie die Integration zusätzlicher Sensorik, etwa für akustische oder spektrale Prozessüberwachung.

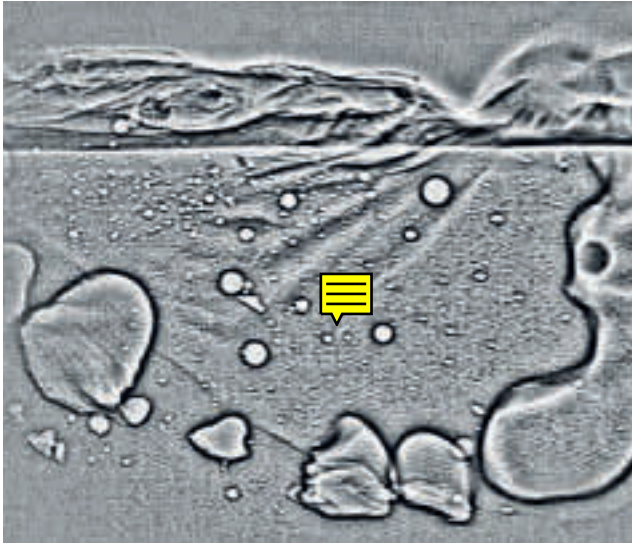
Ein weiteres Ziel besteht in der Untersuchung bislang schwer schweißbarer Materialsysteme wie Nickelbasislegierungen, beschichteter Substrate oder

multischichtiger Kupfer-Aluminium-Verbunde. Die gewonnenen Daten sollen nicht nur zur Optimierung bestehender Prozesse beitragen, sondern auch die Grundlage für simulationsgestützte Strategien in der Schweißtechnik bilden. Bei der Auswertung der großen Bilddatenmengen setzen die Fachleute auf KI: Mithilfe KI-gestützter Verfahren wollen sie Veränderungen im Schmelzbadverhalten frühzeitig erkennen und mit den jeweiligen Prozessparametern verknüpfen. So entsteht eine neue Art der Prozessführung, bei der Bildgebung, Simulation und Steuerung nahtlos zusammenarbeiten und die Fertigung noch stabiler und effizienter machen.

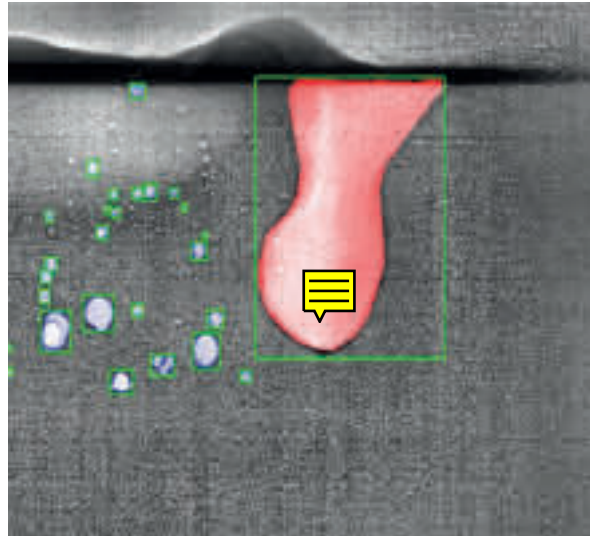
Strahlquelle für ultraschnelle Einblicke

Die Strahlführungsline P61A an PETRA III wurde ursprünglich für materialwissenschaftliche In-situ-Experimente mit metallischen Proben entwickelt. Sie bietet einen besonders breiten und energiereichen Röntgenstrahl im Bereich von 20 bis 200 Kiloelektronenvolt, der auch für hoch absorbierende Materialien wie Stahl, Nickel oder Kupfer geeignet ist. Für die Laserexperimente wurde ein speziell angepasster Aufbau aus Aachen in den Versuchsbereich transportiert. Im Zentrum steht ein laserbasierter Schweißprozess, dessen Dampfkapillare, Schmelzbad und Porenbildung ein System von Hochgeschwindigkeitskameras mit Phasenkontrast erfasst – einer Methode, die selbst feinste Dichteunterschiede im Material sichtbar macht, indem sie minimale Ablenkungen der Synchrotronstrahlung in hochaufgelöste Bilddaten übersetzt.

Die Versuchsanordnung besteht aus einem seitlich einfallenden Synchrotronstrahl, einem gebündelten Laserstrahl und einem empfindlichen Detektorsystem. Ein zentraler Bestandteil ist der Szintillatorkristall, der die unsichtbare Röntgenstrahlung in sichtbares Licht umwandelt. Je nach Material und Strahlenenergie kommen unterschiedliche Filter, Kristalldicken und Kamertypen zum Einsatz. Die gesamte Apparatur ist in einem strahlungsgeschützten Gehäuse untergebracht, das aus mehreren Zentimetern Blei besteht, um die Sicherheit des Teams zu gewährleisten.



Hochauflösende Echtzeitaufnahme (Phasenkontrast) einer Dampfkapillare im Schmelzbad einer Aluminium-Kupfer-Verbindung: Die entstandene Bildserie (bis 50.000 fps) zeigt mikrometergenaue Veränderungen der Kapillarform, Schmelzbewegung und Porenentstehung unter industriellen Schweißbedingungen. (Bild: RWTH Aachen – Lehrstuhl für Lasertechnik)



KI-gestützte Algorithmen analysieren automatisch die Bewegung von Dampfkapillaren und Poren in den Hochgeschwindigkeitsaufnahmen. So werden relevante Prozessphänomene aus mehreren Terabyte Bilddaten extrahiert und mit den jeweiligen Prozessparametern verknüpft. (Bild: RWTH Aachen – Lehrstuhl für Lasertechnik)

Die Bilddaten werden mit Hochgeschwindigkeitskameras aufgenommen und anschließend mit eigens entwickelten Algorithmen analysiert. Die Herausforderung liegt dabei nicht nur in der Erfassung der extrem schnellen Prozesse, sondern auch im Management der enormen Datenmengen – pro Versuch entstehen mehrere Terabyte an Rohdaten, die mit KI-gestützten Verfahren ausgewertet werden.

Materialkombinationen in Elektromobilität gefragt

Ein zentrales Ziel der aktuellen Arbeiten ist es, realitätsnahe Bedingungen für die industrielle Anwendung zu schaffen. Während die ersten Versuche mit dün-

nen Aluminiumblechen durchgeführt wurden, erlaubt die neue Strahlführungslinie nun die Untersuchung dicker Materialkombinationen – bis hin zu mehreren Millimetern dicken Schichten. Auch die Analyse von Sandwichstrukturen, etwa aus Aluminium und Kupfer, ist inzwischen möglich.

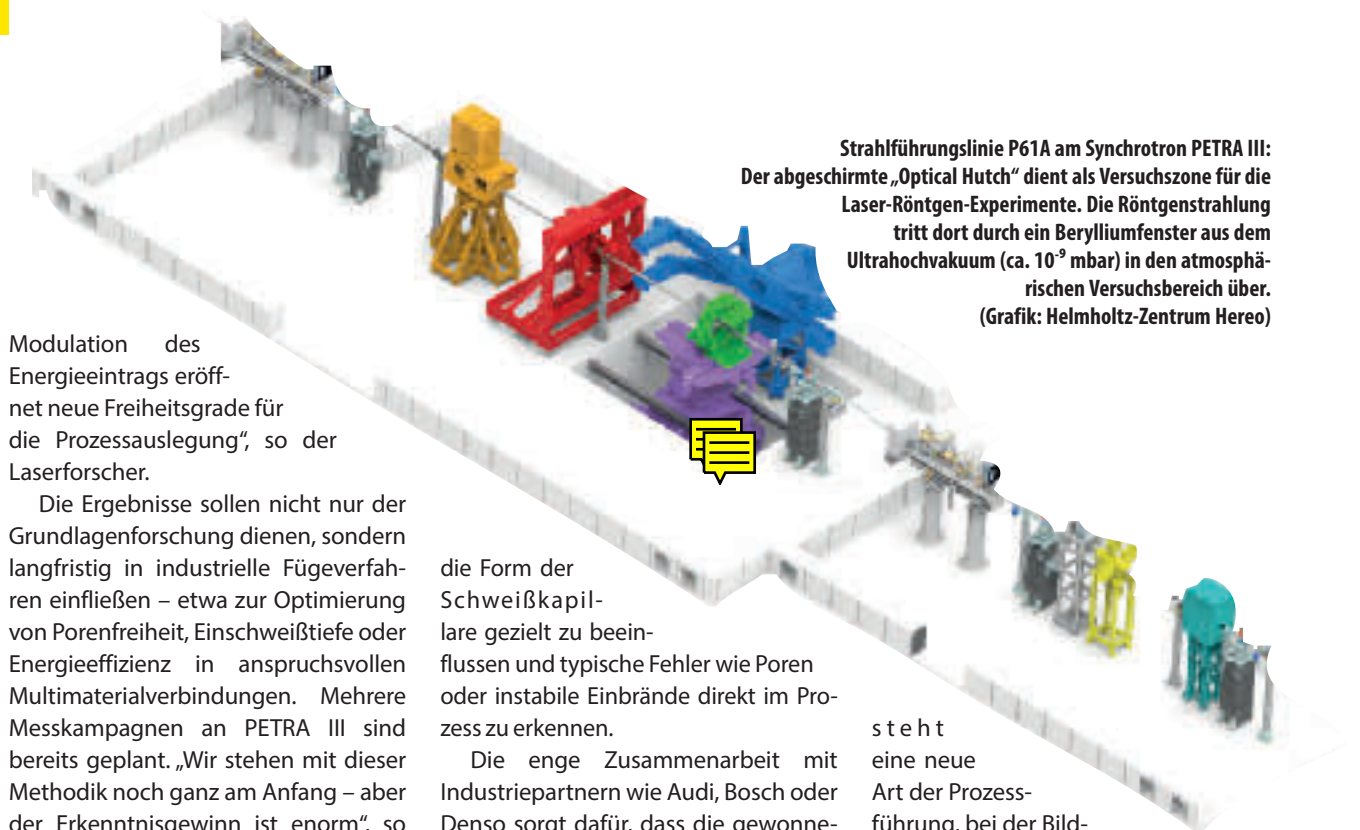
So wurden beispielhaft Proben aus AW6082 (hochfester Aluminiumwerkstoff mit guter Schweißbarkeit) und CuSn6 (Kupfer-Zinn-Legierung mit hoher Festigkeit und guter Leitfähigkeit) mit unterschiedlichen Geometrien untersucht – darunter doppelte Stumpfnähte mit asymmetrischem Aufbau. Durch die Kombination aus erhöhter Röntgenenergie, optimierter

Filtertechnik und präziser Lasermodulation gelang es, das Verhalten der Schmelze bei verschiedenen Energiedichten darzustellen. Die Aufnahmen zeigten erstmals in Echtzeit, wie sich Dampfkapillare und Schmelzbad unter wechselnden Laserparametern verformen, wie Poren entstehen und wie sich verschiedene Materialien im Schmelzbad vermischen.

Besonders interessant ist die Überlagerung unterschiedlicher Wellenlängen – etwa eines blauen Lasers (450 Nanometer) und einer Strahlquelle im nahen Infrarotbereich (NIR: 1070 Nanometer). Derartige überlagerte Laserstrahlquellen beeinflussen die Form der Dampfkapillare signifikant. „Diese gezielte



Experimentierhalle PETRA III: Hier werden groß angelegte Messkampagnen mit mobilen Laserlaboren und hochpräziser Strahlführung durchgeführt. Der logistische Aufwand umfasst den Transport kompletter Lasersysteme und die Einrichtung von Schichtbetrieben für die Durchführung hunderter Experimente pro Woche. (Bild: DESY)



Strahlführungsline P61A am Synchrotron PETRA III:
Der abgeschirmte „Optical Hutch“ dient als Versuchszone für die Laser-Röntgen-Experimente. Die Röntgenstrahlung tritt dort durch ein Berylliumfenster aus dem Ultrahochvakuum (ca. 10^{-9} mbar) in den atmosphärischen Versuchsbereich über.
(Grafik: Helmholtz-Zentrum Hereo)

Modulation des Energieeintrags eröffnet neue Freiheitsgrade für die Prozessauslegung“, so der Laserforscher.

Die Ergebnisse sollen nicht nur der Grundlagenforschung dienen, sondern langfristig in industrielle Fügeverfahren einfließen – etwa zur Optimierung von Porenfreiheit, Einschweißtiefe oder Energieeffizienz in anspruchsvollen Multimaterialverbindungen. Mehrere Messkampagnen an PETRA III sind bereits geplant. „Wir stehen mit dieser Methodik noch ganz am Anfang – aber der Erkenntnisgewinn ist enorm“, so Christoph Spurk, M.Sc., wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Lasertechnik der RWTH Aachen University auf dem LSE'25 – Laser Symposium Electromobility.

Blick in die Zukunft

Für den Laserforscher aus Aachen ist „Laser meets Synchrotron“ erst der Anfang. In den nächsten Jahren will sein Team die Methode gezielt weiterentwickeln und auf neue Werkstoffe anwenden – darunter schwer schweißbare Legierungen, beschichtete Bauteile und empfindliche Mikrostrukturen. Sie planen konkrete Versuchsreihen, um

die Form der Schweißkapillare gezielt zu beeinflussen und typische Fehler wie Poren oder instabile Einbrände direkt im Prozess zu erkennen.

Die enge Zusammenarbeit mit Industriepartnern wie Audi, Bosch oder Denso sorgt dafür, dass die gewonnenen Erkenntnisse direkt in die Praxis einfließen. So konnten bereits erste Optimierungen bei der Herstellung von Batteriekontakten umgesetzt werden, die zu einer Reduktion der Porenbildung und einer Steigerung der elektrischen Leitfähigkeit führten – entscheidende Faktoren für die Reichweite und Sicherheit von Elektrofahrzeugen.

Auch bei der Auswertung der großen Bilddatenmengen setzen die Fachleute auf Fortschritt: Mithilfe KI-gestützter Verfahren wollen sie Veränderungen im Schmelzbadverhalten frühzeitig erkennen und mit den jeweiligen Prozessparametern verknüpfen. So ent-

steht eine neue Art der Prozessführung, bei der Bildgebung, Simulation und Steuerung nahtlos zusammenarbeiten und die Fertigung noch stabiler und effizienter machen.

Zusammenarbeit und Ausblick

Das Projekt lebt von der engen Kooperation zwischen Universitäten, Forschungsinstituten und Industrie. Neben dem Fraunhofer ILT und der RWTH Aachen sind Partner wie das DESY, das Forschungszentrum Jülich und zahlreiche Unternehmen beteiligt. Gemeinsam treiben sie die Entwicklung neuer Fügetechnologien voran, die nicht nur die Produktqualität verbessern, sondern auch zu nachhaltigeren und ressourcenschonenderen Produktionsprozessen beitragen – ein Gewinn für Wirtschaft und Gesellschaft.

„Wenn wir lernen, den Prozess im Innern vollständig zu verstehen, können wir ihn auch kontrollieren – das ist unser Weg zur nächsten Generation laserbasierter Fügeverfahren“, so Spurk. „Ich bin mir sicher: Die Kombination aus Grundlagenforschung, Hochtechnologie und praxisnaher Anwendung wird die Laserfertigung in der Elektromobilität entscheidend prägen.“

Nikolaus Fecht



Transport eines mobilen Laserlabors: Für die Messkampagne an der Beamline P61A bringt das Team des Fraunhofer ILT die komplette Lasertechnik, Steuerung und Optiksyste me nach Hamburg – ein logistischer Kraftakt. (Bild: RWTH Aachen – Lehrstuhl für Lasertechnik)

Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT
www.ilt.fraunhofer.de

So werden Vakuumpumpen wieder sauber

Deutscher Hersteller liefert High-Purity-Anlage für Überholung der Komponenten

Komponenten gebrauchter Vakuumpumpen sind meistens stark verschmutzt. Bei einer Überholung der Aggregate müssen diese Einzelteile deshalb sorgfältig und gründlich gereinigt werden. Dafür hat ein deutscher Hersteller ein High-Purity-System nach Taiwan geliefert.

Für das britische Unternehmen Edwards hat die LPW Reinigungssysteme GmbH ein CNp-System entwickelt und nach Taiwan ausgeliefert. Bei diesem Projekt ging es um die Reinigung gebrauchter Komponenten von Vakuumpumpen vor der Überholung. Verfahrenstechnisch war dies eine echte Herausforderung. Des Weiteren konzipierte das Riedericher Unternehmen eine Shuttle-Automation, die an die Produktionslogistik des Kunden angebunden wurde.

Stark anhaftende, dünne Verschmutzungen entfernen

Edwards ist ein multinationaler Hersteller unter anderem von Vakuumpumpen. Im Betrieb sind deren Einzelkomponenten nicht nur einem starken Verschleiß, sondern auch einer



Die Powerjet 1100 T 5 Triple CNp steht bei Edwards in Taiwan auf fast 170 m² und wird für die Reinigung von Vakuumpumpenkomponenten vor der Aufbereitung eingesetzt. (Bild: LPW)

hochgradigen Verschmutzung ausgesetzt, von neutral bis supergiftig. Diese Verunreinigungen gilt es im Zuge der Wiederaufbereitung zu entfernen. Eine komplexe Aufgabe, da sich die Kontaminationen in dünnen Schichten auf die Innenbereiche der Vakuumpumpen ablegen und daher sehr hartnäckig anhaften.

Die Ingenieure von LPW sollten einen Reinigungs-, Spül- und Trocknungsprozess entwickeln. Gefordert war, dass er zum einen flexibel auf Materialmengen, Geometrie sowie Verunreinigungen reagiert und zum anderen die spezielle und hochperformante Reinigungschemie zu handhaben und aufzubereiten weiß. Nicht zuletzt musste ein Automationssystem realisiert werden, das zum autonomen Logistiksystem am Edwards-Standort in Taiwan passt.

Kombination von zwei Baureihen führt zum Ziel

Dieses Projekt stellte verfahrenstechnisch eine echte Herausforderung dar und beanspruchte eine sehr intensive Planungs- sowie Umsetzungsarbeit in enger Kooperation mit den Edwards-Verantwortlichen in Taiwan, Tschechien und Großbritannien. Schlussendlich realisierten die Riedericher ein komplett neues Anlagendesign auf Basis zweier Baureihen in Form der Powerjet 1100T5 Triple CNp inklusive einer ebenfalls bei LPW gefertigten Automation.

Grundlage waren die Maschinen aus den Standardbaureihen Powerjet Ultra und Powerjet heavy duty. Die gefertigte Reinigungsanlage enthält drei Behandlungskammern mit je circa 900 l Füllvolumen: Eine Beizkammer, eine CNp-/Ultraschall-Reinigungskammer und eine CNp-Spül- und Trocknungskammer. Es gibt fünf Medientankvorlagen, teils aus Kunststoff aufgrund der Materialbeständigkeit. Der Durchsatz liegt bei 5 Chargen pro Stunde, das Chargengewicht bei circa 300 kg und die Chargengröße bei etwa 1100 x 520 x 520 mm. Die Reinigungsanlage benötigt eine Aufstellfläche von knapp 170 m². Die zusätzliche Niederflur-Shuttleautomation hat LPW mit drei Beladestationen sowie einer Entladestrecke mit integrierter Bauteilabkühlung versehen.

Im Edwards-Projekt konnte LPW seine Expertise in der Kammertechnik für robuste Anforderungen, den Umgang mit aggressiven Reinigungsmedien und die Entwicklung flexibler Automationssysteme zusammenbringen. „Außerdem sind wir mit unserem CNp in der Lage gerade jene Verfahren bereitzustellen, die einen langzyklischen pulsierenden Vakuumprozess erzeugen, um eine optimale Zuführung frischer und waschaktiver Chemie an die Bauteiloberfläche sowie deren kontinuierlichen Austausch zu gewährleisten“, sagt LPW-CEO Gerhard Koblenzer.

LPW Reinigungssysteme GmbH
www.lpw-cleaning.com



Das Edwards-System benötigte schwereres Gerät, um allein die Grundanlage mit 30 t bewegen zu können. (Bild: LPW)

Effizientere Verpackungsprozesse mit zentraler Vakuumerzeugung

ROI von unter einem Jahr durch Vakuumkonzept mit drehzahlgegener und generalüberholter Drehschieber-Pumpe



Neben der signifikanten Reduktion des Energieverbrauchs gelang es bei einem führenden irischen Fleischverarbeitungsbetrieb durch eine zentralisierte Pumpenstation erhebliche Einsparungen in Bezug auf Energie, Wartung sowie reduzierte Stillstandszeiten zu erzielen. (Bilder: Pneumofore)

Moderne Verpackungsprozesse, insbesondere in der Lebensmittelindustrie, sind auf Vakuumtechnologie angewiesen. Weit verbreitet ist der häufig dezentrale Einsatz mehrerer, kleinerer Pumpenkombinationen. Demgegenüber kann eine leistungsgeregelte, zentrale Vakuumerzeugung in erheblichem Maße energieeffizienter sein – wie diese Fallstudie zeigt.

Fallstudie aus der Lebensmittelindustrie:

Ein führender irischer Anbieter der Fleischverarbeitung und dessen Verpackung rüstete Anfang 2025 eine neue Produktionslinie am britischen Standort Huntingdon mit einer zentralen Vakuumlösung aus. Zum Einsatz kam hierbei eine Drehschiebervakuumpumpe der Marke Pneumofore, Typ UV16 H kombiniert mit einem unterstützenden Roots-Gebläse zur Erzeugung des benötigten Vakuums. Im Rahmen des Verpackungsprozesses unter modifizierter Atmosphäre (Modified Atmosphere Packaging, MAP) wurden die bestehenden Vakuumpumpen in den installierten Verpackungsmaschinen ersetzt. Die vormals installierte Vakuumlösung bestand aus sechs Schraubenvakuumpumpen und drei Drehschieberpum-

pen mit einer jeweils nominellen Förderleistung von ca. 300 m³/h. Diese waren über neun Vakuumleitungen geringer Nennweite miteinander verbunden. Im Zuge der Systemoptimierung wurde eine gebrauchte Pneumofore Drehschiebervakuumpumpe testweise installiert.

Die Effizienz einer Vakuumanlage hängt auch von der Auslegung des Rohrleitungssystems ab. Eine einzige Leitung mit großem Durchmesser ist in der Regel energetisch effizienter als mehrere kleinere Leitungen. Daher wurde das bestehende Rohrleitungssystem auf eine DN125 Variante vergrößert und für den Anschluss an die Drehschiebervakuumpumpe konzipiert. Die installierte spezielle Pneumofore UV16 H arbeitet bei einer modifizierten Betriebstemperatur von 110 °C, wobei das „H“ die Hochtemperaturausführung dieser auf die Lebensmittelindustrie entwickelte Baureihe kennzeichnet. Die Betriebstemperatur der Pumpe von 110 °C stellt insbesondere sicher, dass aus dem Ansaugprozess anfallende Feuchtigkeit vollständig im Dampfzustand verbleibt, ohne zusätzlich Ballastluft zu benötigen.

Außerdem ist die Pumpe in der Lage den gesättigten Wasserdampf aus der Prozessluft zu saugen, was

diese insbesondere für feuchte Prozessbedingungen in der Lebensmittelverpackung prädestiniert. Bei dem für den Betrieb der Pumpe verwendeten Schmiermittel handelt es sich um ein für die Anwendung optimiertes Öl mit lebensmittelrechtlicher NSF-Klassifizierung.

Technische Umsetzung und Leistungsanalyse

Bereits während der initialen Testphase übertraf die installierte Drehschieberpumpe alle Erwartungen des Anwenders. Das erreichte Vakuumniveau blieb während des gesamten Testzeitraums konstant auch bei sich ändernder Produktivität der Anlage. Insbesondere zeigte sich schon nach den ersten Tests, das obwohl die ursprüngliche Vakuuminstallation mit neun Pumpen und einer kumulierten Nennförderleistung von 2.510 m³/h theoretisch bezüglich ihrer Vakuumleistung fast dreifach überlegen sein müsste, die neue Installation mit einer nominellen Förderleistung von „nur“ 970 m³/h trotzdem eine überlegene Systemleistung erreichte.

Daraus lässt sich ganz klar ableiten, dass eine hohe Pumpleistung kein Garant für eine gute Vakuumleistung ist. Hinzu kommt der Effizienzverlust, wenn weniger als der Hälfte der vorher

installierten Nennkapazität bei entsprechender Optimierung der Installationsumgebung der Prozess beim Anwender stabil betrieben werden kann. Es ist also wenig überraschend, dass der Betreiber gleichermaßen erstaunt und erfreut war.

Die ursprüngliche Anlage verfügte über sechs unregelmäßig angeordnete Schraubepumpen mit je 7,5 kW Antriebsleistung sowie drei Drehschiebervakuum- à 5,5 kW, was eine Gesamtanschlussleistung von 61,5 kW und eine durchschnittliche Leistungsaufnahme von 44,1 kW ergab. Demgegenüber steht die UV16 H mit einem installierten Frequenzumrichter und einer installierten Nennleistung von 37 kW. Bei einem Betriebsdruck von 30 mbar (abs.) beträgt die reale durchschnittliche Leistungsaufnahme lediglich 19,6 kW. Die daraus resultierende Differenz bei der Anschlussleistung beträgt 24,5 kW. Bei einem Strompreis von 0,25 GBP/kWh in Großbritannien und einem Dreischichtbetrieb mit kalkulierten 8.500 Betriebsstunden jährlich ergeben sich daraus folgende Einsparungen:

$24,5 \text{ kW} \times 8.500 \text{ h} \times 0,25 \text{ GBP/kWh} = 52.062 \text{ GBP pro Jahr}$ – umgerechnet in Euro ca. 62.400 Euro.

Dieses jährliche Einsparpotenzial überstieg den Listenpreis einer neuen UV16 H und führt somit zu einem Return-on-Investment (ROI) von etwa acht Monaten. Da es sich bei der getesteten Maschine um ein überholtes Modell aus dem Jahr 2000 handelte, dessen Wiederbeschaffungswert deutlich unter dem Neupreis liegt, fiel der tatsächliche ROI noch kürzer aus – ein weiterer Pluspunkt aus Sicht des Anwenders. Ob in Großbritannien oder in Europa – solche großen Einsparpotentiale sind heute wichtiger denn je für produzierende Un-

ternehmen. Bei einem angenommenen Strompreis von 0,18 €/kWh in Deutschland für vergleichbare Unternehmen ergibt sich aus einer solchen Konstellation immerhin auch eine respektable Einsparung von 37.485 € pro Jahr.



Im Bereich der Lebensmittelverarbeitung erfordert der hohe Feuchtegehalt spezialisierte Vakuumpumpen mit ausgeprägter Wasserresistenz – hier eine dafür optimierte Pumpeninstallation von Pneumofore, Typ UV16 H aus dem Jahr 2000.

Beitrag zur Dekarbonisierung und Nachhaltigkeit

Seit Jahrzehnten bewähren sich Drehschiebervakuum-pumpen aus dem Hause der Pneumofore S.p.A weltweit als sehr gut geeignete Lösung für Anwendungen mit hohem Wasseranteil im Vakuumstrom. Die Hauptvorteile der drehzahlgeregelten „H“ Technologie liegen in der deutlich reduzierten Stromaufnahme, geringeren Wartungskosten, niedrigem Ersatzteilbedarf sowie einer geminderten Geräuschemission.

Zudem ist die Vakuumpumpe der „H“ Serie die Einzige auf dem Markt, die ohne energieintensives Ballastventil auskommt. Die deutliche Reduktion

des Stromverbrauchs leistet einen direkten Beitrag zur CO₂-Einsparung und unterstützt notwendige Ziele von Unternehmen zur Dekarbonisierung, welche auch im Vereinigten Königreich staatlich gefördert werden. Dieser Umstand stärkt die Entscheidung zugunsten einer frequenzgeregelten Drehschiebervakuum-pumpe mit angepasster branchenspezifischer Technologie zusätzlich.

Drehschiebervakuum-pumpen sind langlebig

Eine Drehschiebervakuum-pumpe ist für einen lang-jährigen Dauerbetrieb ohne grundlegende Überholung ausgelegt. Die in diesem Projekt eingesetzte Pumpe aus dem Jahr 2000 wurde vor der finalen Inbetriebnahme fachgerecht überholt und erfolgreich getestet. Die Maschine befindet sich seither störungsfrei im Einsatz beim Anwender – ein Beleg für die nachhaltige Konstruktion und Langlebigkeit dieser Baureihe.

Fazit

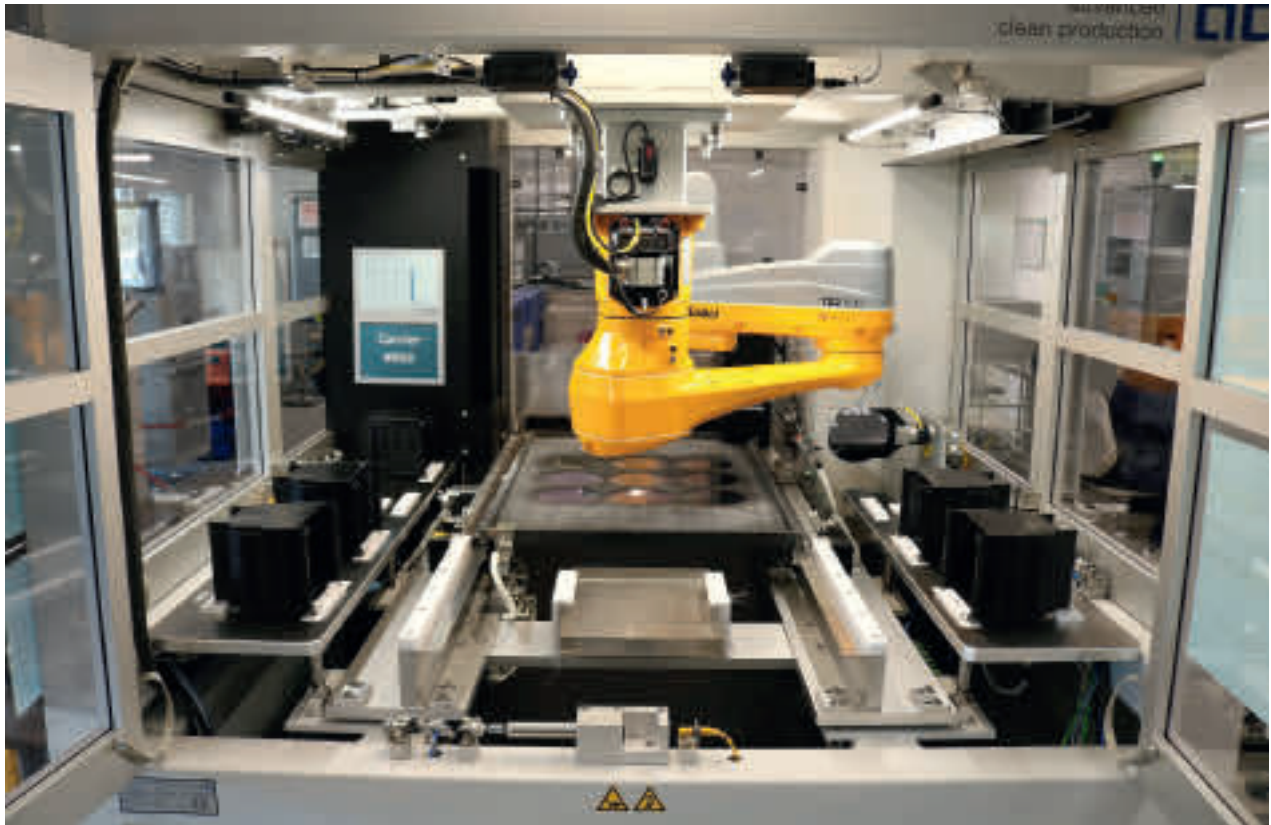
Diese Fallstudie zeigt eindeutige Vorteile einer zentralen Vakuumversorgung auf und unterstreicht die Energieeffizienz und den

Wirkungsgrad von drehzahlgeregelten Drehschiebervakuum-pumpen am Beispiel der UV-Vakuum-pumpen von Pneumofore. Dank ihres auf minimalen Gesamtbetriebskosten (Total Cost of Ownership) ausgelegten Designs, ihrer langjährigen Betriebssicherheit und ihres geringen CO₂-Fußabdrucks stellen sie eine zukunftsweisende Lösung für industrielle Vakuumanwendungen in der Lebensmittelverpackungsindustrie und für andere Anwendungen dar.

Flex-Air GmbH
Industrie-, Druckluft- und Vakuumtechnik
www.flex-air.com

Hochpräzises Handling sensibler Produkte

Bildverarbeitungsgestützte Robotik für mikrometergenaue Positionierung von Wafern



Der Roboter des bildverarbeitungsgestützten Handlingsystems wurde aus Platzgründen an der Decke des Beladebereichs der Beschichtungsanlage montiert und verfügt über eine Reichweite von 1.000 mm. (Bild: Azur Space Solar Power)

Für das automatisierte Be- und Entladen eines Werkstückträgers mit unterschiedlich großen Wafern vor der PECVD-Beschichtung hat ein Maschinenbauer für einen Hersteller von Raumfahrt-Solartechnologie ein bildverarbeitungsgestütztes Robotiksystem entwickelt.

Die in Heilbronn ansässige Azur Space Solar Power GmbH zählt zu den weltweit führenden Unternehmen in der Entwicklung und Produktion von Mehrfachsolarzellen für die Raumfahrt und terrestrische Konzentratorsysteme (CPV). Die Solarzellen basieren auf der neuen Triple- und Quadruple-Junction-Technik, bei der die Schichten auf einem Germanium-Substrat aufgebaut werden.

Automatisierung des Be- und Entladens mit Herausforderungen

Während des Herstellungsprozesses durchlaufen die Wafer mit 4, 6 und 8 Inch (100, 150 und 200 mm) Durchmes-

ser unter anderem einen PECVD-Prozess (Plasma-enhanced Chemical Vapour Deposition – plasmaunterstützte chemische Dampfabscheidung) in Anlagen der Singulus Technologies AG, Kahl am Main. Die Solarzellen werden dafür in Kassetten bereitgestellt, herausgenommen und in den nur wenige Hundert Mikrometer größeren Taschen spezieller Kohlefaser-Werkstückträger positioniert. Je nach Zellgröße können die 1000 x 600 mm großen Carrier 4, 9 oder 16 Wafer aufnehmen. Um Crashes zu vermeiden, muss beim Beladen der Werkstückträger eine Positioniergenauigkeit von 0,1 mm eingehalten werden. Nach der ein- oder zweiseitigen Beschichtung gilt es, die Solarzellen wieder in Kassetten abzulegen.

Diese Tätigkeit hatte Azur Space zuvor mit Saugpipetten durchgeführt, wie der Automatisierungsspezialist ACP Systems AG, Ditzingen, mitteilt. Da der manuelle Prozess zeit- und kostenintensiv war, wollte Azur Space die Vorgänge automatisieren. Herausforderungen er-

geben sich dabei durch die Lage der Solarwafer mit Flats in den Kassetten mit Abweichungen von 5° und 3 mm sowie exakt vorgegebenen Positionen für das Greifen. Darüber hinaus müssen die fertigungsbedingten Toleranzen der Carrier ebenso ausgeglichen werden wie die abkühlungsbedingte Schrumpfung. Sie ergibt sich durch die fallende Temperatur der Werkstückträger, die mit bis zu 350 °C aus dem Beschichtungsprozess kommen und während des Ent- und Beladens abkühlen.

Genaue Positionierung mit Leucht-Ausrichttisch und Bildverarbeitung

Für diese Aufgabenstellung entwickelte ACP Systems ein bildverarbeitungsgestütztes Handlingsystem mit einem Industrieroboter. Dieser wurde aus Platzgründen an der Decke des Beladebereichs der Beschichtungsanlage montiert und hat eine Reichweite von 1.000 mm. Ausgestattet ist der Scara-Roboter mit einem speziellen Flach-Va-

kuumgreifsystem, das für die verschiedenen großen Wafer schnell austauschbar ist.

Der Roboter entnimmt den Wafer aus der Kassette und legt ihn auf einem hinterleuchteten Ausrichttisch ab. Darüber ist ein Kamerasystem mit 12-Megapixel-Kamera im Arbeitsabstand von 680 mm platziert. Es erkennt die genaue Position des Wafers und gibt diese Information an die Software Cognex Vision Pro weiter. Basierend darauf wird die Lage- und Winkelkompensation berechnet, mit welcher der Wafer in das Carriernest eingelegt werden muss, und der Robotersteuerung übermittelt. Eventuelle Verzerrungen des Kamerasystems wurden bei dessen Inbetriebnahme durch die Kalibrierung mit einer „Checker Plate“ ausgeglichen.

Genaue Vermessung macht Toleranzen beherrschbar

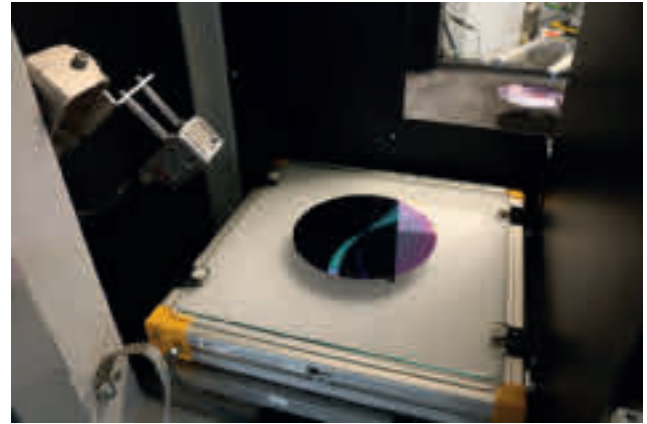
Um die Fertigungstoleranzen der Carrier und die durch Abkühlung auftretende Schrumpfung überhaupt zu beherrschen, wird der Werkstückträger zunächst durch Ziehen gegen einen Anschlag und durch Indexierung zentriert. Dies ermöglicht, den Koordinaten-Nullpunkt aller Carrier im Handlingsystem reproduzierbar festzulegen. Darüber hinaus wurden zum Ausgleich der Fertigungstoleranzen zuvor alle Carrier

im kalten Neuzustand vermessen und jeder mit einem Datamatrix-Code zur Identifizierung versehen. Unter diesem Code sind die für die Berechnung der Kompensation der Lagetoleranzen der Carriernester relevanten Daten in der Steuerung hinterlegt.

Um die durch die Abkühlung der Werkstückträger auftretende thermische Schrumpfung auszugleichen, wurde zunächst eine Passermarke in der dem Koordinaten-Nullpunkt gegenüberliegenden Ecke des Carriers angebracht und diese ebenfalls im kalten Zustand genau vermessen. Darüber befindet sich ein zweites Kamerasystem, mit dem der Versatz der Passermarke gegenüber dem kalten Zustand ermittelt wird. Die Software berechnet anhand dieser Informationen die Kompensation für die genaue Positionierung des Wafers. Dieser Vorgang wird für jeden einzulegenden Wafer wiederholt.

Flippstation für das Drehen der Wafer

Für das Drehen der Solarzellen, die beidseitig beschichtet werden, hat ACP Systems eine Flippstation integriert. Diese erhält die entsprechenden Wafer einzeln vom Roboter und greift sie an definierten Bereichen mit Vakuum-Saugpunkten. Nach der Rotation um



Das Kamerasystem über dem hinterleuchteten Ausrichttisch erkennt die Position des Wafers und gibt diese Information an die Software weiter. Basierend darauf wird die Lage- und Winkelkompensation berechnet, mit welcher der Wafer in das Carriernest eingelegt werden muss. (Bild: Azur Space Solar Power)

180 Grad übernimmt der Robotergriffe den Wafer wieder und transportiert ihn zum Ausrichttisch.

Handling verursacht keinen Waferbruch seit Inbetriebnahme

Bevor die beschichteten Solarzellen wieder in den Kassetten abgelegt werden, erfolgt durch das Kamerasystem am Ausrichttisch abschließend eine Qualitätskontrolle. Es wird dabei geprüft, ob die Kanten der Wafer frei von Beschädigungen sind. Das bildverarbeitungsgestützte Robotiksystem sorgt für ein präzises und schonendes Handling der empfindlichen Solarwafer. Dies zeigt sich vor allem daran, dass es seit Inbetriebnahme zu keinem handlingsbedingten Waferbruch kam, wie es in der Pressemitteilung heißt. Insgesamt resultiert aus dem Ersatz der manuellen Handhabung durch ein vollautomatisches System eine deutlich verbesserte Produktivität und Wirtschaftlichkeit.



Das Flach-Vakuumgreifsystem, das für die verschiedenen großen Wafer schnell austauschbar ist, hält die beim Beladen der Werkstückträger vorgegebene Positioniergenauigkeit von 0,1 mm ein. (Bild: Azur Space Solar Power)

Azur Space Solar Power GmbH
www.azurspace.com

Singulus Technologies AG
www.singulus.de

ACP Systems AG
www.acp-systems.com

Schichtwechsel verhilft zu mehr Leistung

Neue Schichtgeneration für Wälzschäl-Werkzeuge erhöht die Standzeit deutlich



Dathan Verzahnungswerkzeuge bietet viel Know-how für das Verfahren des Wälzschälens, hier für das Schärfen der Wälzschälräder. (Bild: Oerlikon Balzers)

30 % höhere Standzeiten und Lebensdauern sind beim Verzahnen ein deutlicher Fortschritt. Den hat ein Nachschleifservice mit einer neuen Generation von Schichtsystemen für die Zerspanungswerkzeuge erreicht.

Schichtwechsel bei Dathan Verzahnungswerkzeuge: Der Nachschleifspezialist schützt die Schälräder, Wälzfräser und Stoßräder seiner Kunden nun mit Balinit Alcrona Evo von Oerlikon Balzers. Die Allround-Beschichtung ist mittlerweile in dritter Generation erhältlich. So ist es auch beim Familienunternehmen Dathan, das in England unlängst sein 100-jähriges Bestehen feierte und in Deutschland viel Know-how für das Wälzschälen mitbringt.

Wälzschälen profitiert von Fortschritten in der CNC-Technik

Dieses Zerspanungsverfahren erlebt seit einiger Zeit dank fortschreitender CNC-Technik eine Renaissance. Unter

dem Begriff Skiving mischt es etablierte Verzahnungsverfahren auf: Wird etwa Wälzfräsen vorwiegend für Außenverzahnungen und das Räumen für Innenverzahnungen genutzt, so lässt sich Wälzschälen für beides gut verwenden. Das kontinuierlich abwälzende Verfahren eignet sich wegen seiner Flexibilität für die vielfältige Bearbeitung von Verzahnungsteilen, auch mit Störkonturen. Durch seine hohe Wirtschaftlichkeit und Produktivität ist diese Fertigungstechnik gerade bei kleinen und mittleren Losgrößen die bevorzugte Wahl für immer mehr Anwender und Hersteller.

„Als der Trend vor fast 20 Jahren losging, war Dathan dafür Werkzeuglieferant der ersten Stunde“, beschreibt Jonathan Zimmermann, Geschäftsführer und Teilhaber von Dathan Verzahnungswerkzeuge in Neukirchen-Vluyn. Er brachte selbst viel Wälzschäl-Know-how aus der Anwendungstechnik ein, als er die Führung der 2019 startenden deutschen Tochter von Dathan Tool and Gauge Ltd. übernahm. Das

Mutterunternehmen aus dem englischen Holmfirth bei Manchester wurde schon 1924 gegründet und bedient mit meist individuell angefertigten Verzahnungswerkzeugen internationale Kunden aus Branchen wie Luft- und Raumfahrt, Robotik, Automotive, Landwirtschaft, Energieerzeugung, Bau, Öl und Gas.

Leistungssprung beim Wälzschälen

Beim Nachschärfen von Wälzschälradern, Stoßrädern und Wälzfräsern – der Kernkompetenz am deutschen Standort – ist Oerlikon Balzers nach eigenen Angaben bevorzugter Beschichtungspartner. Das AlCrN-basierte Schichtmaterial für die Zerspanungswerkzeuge wird per Lichtbogenverdampfen aufgetragen. Als Schicht Härte HIT gibt der Hersteller ungefähr 44 GPa (± 4) an, gemessen durch Nanoeindringung nach ISO 14577, wobei der Wert abhängig von der jeweiligen Anwendung sowie den Umgebungs- und Testbedin-

gungen ist. Die Eigenspannung liegt bei $-3.5 \text{ Gpa } (\pm 1)$, gemessen mittels Röntgendiffraktion beziehungsweise Biegeverfahren (Stoney-Gleichung). Die berechnete thermische Belastung wurde abgezogen. Die maximale Anwendungstemperatur liegt nach Herstellerangaben bei etwa 1100°C , ist allerdings auch vom Druck abhängig.

Beim Wechsel von der nun abgelösten AlCrN-Schicht Balinit Alcrona Pro auf die neue Generation Alcrona Evo durfte Zimmermann einen deutlichen Fortschritt erleben. Beide Beschichtungen kamen in Vergleichstests auf Wälzschälradern eines deutschen Dathan-Kunden zum Einsatz. Prozessbedingungen, Vorschübe und Standzeiten für die dortige Bearbeitung von Nockenwellen-Kettenrädern blieben dabei unverändert. Das Ergebnis zeigte: Allein der Schichtwechsel erbrachte eine um 20 bis 30 % geringere Verschleißmarkenbreite und entsprechend verlängerte Lebensdauer. Das liegt daran, dass das Nachschleifvolumen sinkt und das Werkzeug sich öfter wiederaufbereiten lässt – inklusive weniger Neuwerkzeugkosten.

Dabei spielte Balinit Alcrona Evo ihre im Vergleich zu der Vorgängerin nochmals gesteigerte Schichthärte und Zähigkeit aus wie auch ihre bessere Homogenität und Kantenstabilität, heißt es in der Pressemitteilung von Oerlikon Balzers. „Wir arbeiten auch bei der Schneidkantenverrundung der Schneidräder für unsere Kunden mit Oerlikon Balzers zusammen, denn die Beschichtung soll sich so homogen wie möglich über die Schneidkanten verteilen“, ergänzt der Dathan-Deutschland-Firmenchef. Er empfiehlt die Schichten besonders für den Einsatz bei hohen Schnittgeschwindigkeiten mit großer Wärmeentwicklung.

Von 12.000 auf 16.000 Kettenräder in der Spitze

Ihre Eigenschaften zeigte die neue Schichtgeneration auch bei einem Hersteller von Kettenrädern für die Zwei-



Sie dürfen sich über mehr Lebensdauer für Schälräder, Wälzfräser und Stoßräder mit der neuen Beschichtung freuen: Jonathan Zimmermann (links), Geschäftsführer von Dathan Verzahnungswerkzeuge, und Klaus Springer, Kundenberater bei Oerlikon Balzers. (Bild: Oerlikon Balzers)

radindustrie. Nacheinander wurden dort acht Wälzfräser mit beiden Schichten getestet, am Ende war auch dieser Dathan-Kunde überzeugt. Denn mit Balinit Alcrona Evo gelang der Sprung von 12.000 auf eine Stückzahl von in der Spitze 16.000 Kettenräder, unterm Strich eine Standzeitsteigerung um 20 bis über 30 %. „Solche Versuche sind nicht zuletzt eine gute Gelegenheit für alle Beteiligten, Prozesse auf einen aktuellen Stand zu bringen“, urteilt Zimmermann.

Für Oerlikon Balzers bestätigte sich nach eigenen Angaben damit, dass die vor über 20 Jahren eingeführte Universalschicht Balinit Alcrona auch in dritter Generation die Qualitäten eines Allrounders zeigt und in ihrer Leistung noch zulegen kann. „Die Schicht punktet nicht nur beim Verzahnern, sondern auch auf Schaftwerkzeugen oder beim Stanzen und Umformen, bei verschiedenen Werkzeugs substraten, Schnittgeschwindigkeiten und Bauteilgrößen. Die Ausrollung bei Kunden läuft, und das Feedback ist durchweg positiv“, erläutert Klaus Springer, Kundenberater bei Oerlikon Balzers. Und dass die Schicht bereits in allen Balzers-Kundenzentren von über 30 Ländern in Europa, Nord- und Südamerika sowie Asien verfügbar ist, gefällt auch Zimmermann: „Da Dathan

international aufgestellt ist, schätzen wir zuverlässige Partner, die weltweit liefern können – ob nun aus Deutschland oder China.“ *SI*

Dathan Verzahnungswerkzeuge GmbH
www.dathan.eu

Oerlikon Balzers Coating Germany GmbH
www.oerlikon.com/balzers/de



Damit die Performance stimmt, untersucht Dathan die Werkzeuge nach ihrer Wiederaufbereitung und Beschichtung mit einem Lichtmikroskop. (Bild: Oerlikon Balzers)

Bessere Ziegel ohne Gas und Wasser

Neue Vakuumpumpe im Dachziegelwerk halbiert den Stromverbrauch



In der Entgasungskammer an der Strangpresse werden Luftblasen und Gase aus dem Ton gesaugt. (Bild: Busch Vacuum Solutions)

Energieeinsparungen bis 50 % und einfachere Wartung: Davon profitiert ein Dachziegelwerk, seit bei ihm eine neue Schraubenvakuumpumpe für die Tonentgasung im Einsatz ist.

Hoch türmt sich die Tonerde in der Eingangshalle des Klinkerdachziegelwerks KDW in Natrup-Hagen bei Osnabrück. Ein Fließband befördert das Material zu einem Siebrundbeschicker, einer zylinderförmigen Maschine, die Tonerden vermischt, befeuchtet und homogenisiert, bis das Ausgangsmaterial für die KDW-Dachziegel bereitsteht. Im weiteren Produktionsverlauf wird die so vorbereitete Tonmasse unter Einsatz von Vakuum verdichtet, sodass die fertigen Ziegel später ein besonders homogenes Erscheinungsbild aufweisen und mechanisch besonders stabil sind. Dieser Vorgang erfolgt durch eine Tonentgasungsanlage des Maulburger Herstellers, deren Kernstück eine trockene Schraubenvakuumpumpe des Typs Cobra NX bildet.

KDW ist das kleinste Dachziegelwerk Deutschlands. Im einschichtigen Betrieb arbeitet die Belegschaft rund 9 Stunden an Wochentagen und eine halbe Schicht am Samstag und produziert dabei zwischen 125.000 und

130.000 Ziegel pro Woche. KDW bezieht seine Tonerden, die meist Schiefertone sind, aus mehreren Gruben in der Umgebung. Das Werk wurde 1990 gegründet und hat 25 Mitarbeiter. Es ist Teil der ABC-Klinkergruppe, einem inhabergeführten Hersteller von Dach-, Fassaden-Verblend- und Bodenkeramiken mit insgesamt 250 Mitarbeitern an sechs Produktionsstandorten, der auf rund 135 Jahre Erfahrung zurückblickt.

Geringer Energieverbrauch und einfache Wartung

Nachdem KDW-Betriebsleiter Ingo Hofmeister die trockene Schraubenvakuumpumpe von Busch in einer anderen Ziegelei begutachtet hatte, entschied er sich, für die Tonentgasung eine Vakuumpumpe Cobra NX zu testen. Zunächst sollte sie nur als Backup für die Flüssigkeitsring-Vakuumpumpe dienen, die bei KDW bisher zu diesem Zweck im Einsatz war. Aber bereits nach einer kurzen Testphase war der Betriebsleiter so überzeugt von der Cobra, dass er sich entschloss, sie dauerhaft zu verwenden: „Mir war schnell klar, dass es sinnvoll ist, die Cobra nicht als Ersatzpumpe für den Notfall zurückzuhalten, weil sie ab-

solut wartungsarm ist und wir keine Betriebsflüssigkeiten nachfüllen müssen“, sagt Hofmeister. „Außerdem ist ihr Energieverbrauch viel geringer. Deshalb macht sie jetzt die Arbeit bei der Tonentgasung. Die Flüssigkeitsring-Vakuumpumpe behalten wir noch als Ersatz. Allerdings wurde sie bisher gar nicht mehr gebraucht.“

Die Cobra NX entgast den Ton und entwässert die Gipsformen: Zunächst saugt sie eingeschlossene Luftblasen und Gase aus dem Material, während es die Vakuumkammer zwischen Doppelwellenmischer und Strangpresse durchläuft. Würden die Luft- und Gaseinschlüsse nicht aus dem Ton entfernt werden, könnten sie beim Brennen zu Rissen führen oder die Lebensdauer der Ziegel verkürzen. Anschließend werden die Tonstränge am sogenannten Abscheider in einzelne Rohlinge geschnitten und über vier parallele Fließbänder zu einer Revolverpresse geleitet, wo sie zwischen zwei Formen aus Gips in ihre endgültige Form gepresst werden. Dort saugt die Cobra NX das Wasser, das beim Pressvorgang aus dem Material gedrückt wird, durch die Formen ab, damit keine Wasserflecken und Abdrücke auf den Ziegeln entstehen. So wird bereits während des Produktionsprozesses Ausschuss vermieden und die Produktivität erhöht. Die Tonentgasung und Entwässerung der Gipsformen gewährleistet für die von KDW produzierten Dachziegel ein sehr homogenes Aussehen und darüber hinaus ihre hohe und frostbeständige Qualität.

Energieeffizientes Entgasen mit VSD

Die Cobra NX, die Hofmeister in der Tonentgasungsanlage einsetzt, ist mit einem Variable Speed Drive (VSD) ausgestattet. Es passt die Motordrehzahl an und sorgt dafür, dass ein konstantes Vakuumniveau aufrechterhalten wird. Wenn der Vakuumbedarf während des Produktionsprozesses sinkt, führt dies zu einer reduzierten Drehzahl und damit zu einem geringeren Energie-

verbrauch. Dies kann zum Beispiel der Fall sein, wenn der Ton weniger feucht ist und daher weniger Feuchtigkeit mit der Luft aus der Vakuumkammer abgesaugt werden muss. Dank der Cobra-Vakuumpumpe mit drehzahl-geregeltem Antrieb profitiert KDW im Vergleich zu den unregelmäßigen Flüssigkeitsring-Vakuumpumpen, die permanent mit voller Leistung liefen, von erheblichen Energieeinsparungen. Denn durch die Anpassung der Drehzahl an den tatsächlichen Bedarf können Energieeinsparungen von bis zu 50 % erzielt werden. „Die Flüssigkeitsring-Vakuumpumpen zogen immer mit voller Kraft. Die Cobra hingegen regelt sich problemlos selbst, auch in feuchter, schmutziger Umgebung“, erläutert Hofmeister.

Tatsächlich ist es für die Cobra NX kein Problem, feuchte Massen zu entgasen. Sie hat eine Korrosionsschutzbeschichtung, was ihr selbst in feuchtschmutziger Umgebung eine lange Lebensdauer verleiht. Die Spezialisten von Busch schalteten der Cobra bei KDW zusätzlich einen Standfilter für die Abscheidung von Stäuben und Partikeln vor. Dieser ist platzsparend, leicht zu reinigen und schützt die Pumpe zusätzlich vor Beschädigungen durch Verunreinigungen. Ein Steuerschrank, ein Ansaugfilter und eine Kühlwasser-Zirkulationseinheit komplettieren das Tonentgasungssystem.



Das vollständige Tonentgasungssystem besteht aus einer Vakuumpumpe Cobra NX, einem Standfilter, einem Steuerschrank, einem Ansaugfilter und einer Kühlwasser-Zirkulationseinheit. (Bild: Busch Vacuum Solutions)

Gute Ersatzteilversorgung

Für den Betriebsleiter von KDW ist es besonders wichtig, ohne Unterbrechungen produzieren zu können. Deshalb ist er froh über den Service von Busch: „Bisher haben wir für die Cobra noch keine Ersatzteile gebraucht. Aber es ist gut zu wissen, dass sie im Notfall sofort verfügbar wären. Bei den Flüssigkeitsring-

Vakuumpumpen mussten wir teilweise wochenlang auf Ersatzteile warten.“ Servicestützpunkte und regionale Servicetechniker ermöglichen dem Maulburger Hersteller, seine Kunden bei Bedarf mit Ersatz- und Verschleißteilen zu versorgen. Auch mit dem geringen Wartungsaufwand für die neue Vakuumpumpe zeigt sich der Betriebsleiter sehr zufrieden: „Wir müssen die Cobra nur einmal im Jahr warten. Ansonsten tauschen wir gelegentlich den Filter. Aber selbst der Filtertausch ist völlig unkompliziert. Er wird uns von der Pumpe angezeigt, sobald er nötig ist.“

Ingo Hofmeister ist sich sicher, dass er sich mit der Cobra NX richtig entschieden hat: „Weil es mit der Busch Pumpe so gut läuft, überlegen wir sogar, alle unsere Flüssigkeitsring-Vakuumpumpen durch Cobras zu ersetzen“, sagt er zufrieden.



Blick in die Revolverpresse: Beim Pressen wird Wasser aus dem Ton gedrückt, das durch die Oberfläche abgesaugt wird. (Bild: Busch Vacuum Solutions)

Dr.-Ing. K. Busch GmbH
www.buschvacuum.com

KDW-Klinkerdachziegelwerk GmbH & Co. KG
www.abc-klinker.de

Aus Last wird Zukunftsgestaltung

Webinar zeigt Wege zu weniger CO₂-Emissionen in der Dünnschichttechnik



Die CO₂-Reduktionsziele hat die Politik definiert, jetzt müssen auch Unternehmen aus der Dünnschichttechnik diese Ziele erreichen. (Bildquelle: Adobe Stock/Pakin)

Kunden, Kreditgeber oder Mitarbeiter: Immer häufiger werden Unternehmer danach gefragt, welche CO₂-Emissionen sie mit ihren Aktivitäten verursachen. Wie man solche Emissionen misst und was man mit den Messdaten machen kann, zeigte das Webinar „CO₂-Fußabdruck in der Dünnschichttechnik“.

Den Auftakt des von der Europäischen Forschungsgesellschaft Dünne Schichten e.V. (EFDS) organisierten Webinars machte Cornelia Lanz von der Klimaktiv Consulting GmbH. „Decarbonisierung sollte als Keimzelle für die Zukunftsfähigkeit des Unternehmens verstanden werden“, sagte sie. Wer Nachhaltigkeit strategisch nutzt und den Wandel aktiv gestaltet, kann eine führende Rolle in der Branche übernehmen. Regulierungen sowie Anforderungen von Kunden und Investoren bieten die Möglichkeit, das eigene Unternehmen aus einer neuen Perspektive zu verstehen. Umweltauswirkungen zu quantifizieren, schafft

Transparenz und der Reduktionspfad ermöglicht strukturierten Wandel. „Wer nicht handelt, riskiert neben steigenden Kosten den Verlust von Marktanteilen und den Ausschluss aus wichtigen Lieferketten“, warnte die Beraterin.

Unternehmen berichten aus der Praxis

Wie sich das Unternehmen Dr.-Ing. Max Schlötter GmbH & Co. KG auf den Weg zur Klimaneutralität macht und wie es seinen CO₂-Fußabdruck berechnet, zeigte Theresa Knobloch. In ihrem Vortrag beleuchtete sie den Weg zur Klimaneutralität, dabei stand die Berechnung der Treibhausgasemissionen im Mittelpunkt. Es gab Einblicke in die praktische Umsetzung der Berechnung von Product Carbon Footprints bei Schlötter sowie der Berechnung von galvanischen Prozessen und den daraus resultierenden Chancen und Herausforderungen bei der Reduktion von Emissionen.

Auch der Hersteller von Vakuumbeschichtungssystemen Von Ardenne GmbH in Dresden musste seine Klimastrategien mit der Einführung der EU-Richtlinie zur Nachhaltigkeitsberichterstattung (CSRD) neu ausrichten. Beatrice Thümmeler zeigte auf, wie regulatorische Vorgaben und Kundenanforderungen als Chance genutzt werden können, Nachhaltigkeit zum Wettbewerbsvorteil zu machen.

Mehr zu den Grundlagen und von Carbon Footprints konnten die Webinar-Teilnehmenden von Thomas Prinz, ebenfalls bei Klimaktiv Consulting tätig, erfahren. Außerdem zeigte er auf, wie man einen Corporate Carbon Footprint für die Ermittlung des Product Carbon Footprints nutzen kann. Weiter erläuterte er, welche Aspekte grundsätzlich bei der Bewertung von Dünnschichtanwendungen und Vergleichen zu anderen Anwendungen zu beachten sind. An einem Beispiel aus der Photovoltaik führt er vor, wie ein Vergleich durchgeführt wird. Zum Abschluss erläuterte er, welchen Nutzen Product Carbon Footprints haben.

Impulse zur Reduzierung des CO₂-Footprints gab Ulf Seefeldt von M.Tec Engineering. In seinem Vortrag zeigte er an Beispielen, wie KI-gestützte Prozesse schon in der Entwicklung helfen können, spürbare positive Effekte in Sachen Umweltverträglichkeit und Wirtschaftlichkeit zu erreichen.

Die Bedeutung von Nachhaltigkeitsbewertungen und Life Cycle Engineering als treibende Kräfte für Innovationen beleuchtete Christoph Herrmann vom Fraunhofer-Institut für Schicht- und Oberflächentechnik (IST).

Anhand aktueller Forschungsprojekte des Fraunhofer IST und der TU Braunschweig zeigte er, wie durch die ganzheitliche Betrachtung von Produkten und Prozessen über ihren gesamten Lebenszyklus nachhaltige und wirtschaftliche Lösungen entwickelt werden können. Besonderes Augenmerk legte er dabei auf der Anwendung dieser Ansätze in der Dünnschichttechnik und deren Beitrag zur Reduktion des CO₂-Fußabdrucks.

EU-Regulierung zwingt Unternehmen zum Handeln

Monika Brom vom Umweltbundesamt Österreich gab einen Überblick über den Stand und die weitere Entwicklung der EU-Nachhaltigkeitsstandards (ESRS) im Rahmen der Corporate Sustainability Reporting Directive (CSRD). Dabei beleuchtete sie sowohl regulatorische Anforderungen als auch Chancen durch eine strategische Auseinandersetzung mit ESG-Themen. Insbesondere für technologieorientierte Branchen wie die Oberflächen- und Dünnschichttechnik bieten sich durch frühzeitiges ESG-Engagement neue Möglichkeiten für Transparenz, Prozessoptimierung und Innovationsentwicklung.

Mehr über Planungen der EU-Kommission zum Omnibus-Paket und zur – CSRD erfuhren die Teilnehmenden von Christian Röckendorf, ECG Energie Consulting GmbH. Das Paket soll den Verwaltungsaufwand für Unternehmen reduzieren und betrifft insbesondere die Corporate Sustainability Reporting Directive (CSRD), die EU-Taxonomie, die EU-Lieferkettenrichtlinie (CSDDD) sowie das CO₂-Grenzausgleichssystem (CBAM). Das Webinar beleuchtete die geplanten Änderungen im Detail, mit besonderem Fokus auf die CSRD.

Vakuumbeschichtungsverfahren leisten einen wichtigen Beitrag zur Entwicklung nachhaltiger Produkte –



Die EU verlangt in den kommenden Jahren von Unternehmen klar definierte Nachhaltigkeitsberichte. (Bildquelle: Adobe Stock/Vad)

gleichzeitig sind die Prozesse häufig energieintensiv, wie Matthias Fahland vom Fraunhofer-Institut für Elektronenstrahl- und Plasmatechnik (FEP) berichtete. Das Institut untersucht deshalb Ansätze zur Verbesserung der Energieeffizienz und Ressourcenschonung in diesem Bereich. In seinem Vortrag stellte Fahland Erfahrungen bei der Integration eines Energiemanagementsystems im Anlagenbetrieb vor. Zudem analysierte er den Energieeinsatz in verschiedenen Vakuumbeschichtungsprozessen mit Blick auf Optimierungspotenziale. Ein weiterer Fokus lag auf der Substratreinigung, die sowohl energetisch als auch hinsichtlich der

eingesetzten Materialien wesentlichen Einfluss auf die Nachhaltigkeit hat.

In zwei Teile hatten Christian Mittlerer von der Montanuniversität Leoben und Klaus Böbel von der Oerlikon AG ihren Vortrag „Verzahnung von Wissenschaft und Industrie zur Verbesserung des ökologischen Fußabdrucks von Beschichtungen“ geteilt. Im ersten Teil stellen sie die notwendigen Herangehensweisen vor, um auch bei den ressourcenintensiven PVD- und PACVD-Verfahren die Nachhaltigkeitsziele zu erreichen. Dazu erläuterten sie Ansätze zur Steigerung der Energie- und Ressourceneffizienz und stellten Ideen für nachhaltige Werkstoffkonzepte und Anwendungen vor. Der zweite Teil behandelte den Stand der industriellen Umsetzung.

Zum Abschluss zeigte Karel Stolba von der KBR Energymanagement GmbH datenbasierte Ansätze zur Emissionsbewertung und Prozessoptimierung. Mit einem Energiedatenmanagementsystem können Unternehmen Transparenz schaffen, Emissionen bewerten und ihre Prozesse optimieren. Anhand von Anwendungsbeispielen beleuchtete er den Weg von der Datenerfassung bis zur Entscheidungsfindung – inklusive Herausforderungen, Erfolgsfaktoren und typischer Stolpersteine. *SI*



Das Erfassen und Auswerten von Energiedaten schafft eine Grundlage für mehr Effizienz. (Bild: Adobe Stock/Degimages)

Europäische Forschungsgesellschaft Dünne Schichten e.V.
www.efds.org

Auch Europa kann Batterien herstellen

Battery Show Europe 2025 zeigt die Rolle von Vakuumtechnik und dünnen Schichten



Mit hohem Volumenstrom packt der Flächengreifer FLGR sensible Werkstücke wie Bipolarplatten vollflächig. (Bild: Schmalz)

Europa soll 90 % seiner Batterien selbst herstellen – das strebt die EU-Kommission bis zum Jahr 2030 an. Was diese Produktion für Prozesse erfordert und was die Vakuum- und Dünnschichttechnik dazu beiträgt, war auf der Messe „Battery Show Europe 2025“ vom 3. bis 5. Juni in Stuttgart zu sehen.

Unterdruck ermöglicht präzises Handling von Batteriezellen bei hoher Reproduzierbarkeit. Das gilt sogar für empfindliche Werkstücke wie Batteriefolien. So greift der Federstößel FSTImc mithilfe einer weichen Dämpfungsfeder prozesssicher, wie der Hersteller J. Schmalz GmbH aus Glatten mitteilt. Sie kompensiert zudem ungleichmäßige Bauteilhöhen sowie Wölbungen ohne steuerungstechnischen Aufwand.

Vakuum zum Handhaben empfindlicher Werkstücke

Bei der Handhabung unterschiedlich großer Komponenten empfiehlt der

Anbieter integrierte Strömungsventile, um nicht belegte Saugstellen zu verschließen. Bei porösen Werkstücken übernehmen Strömungswiderstände diese Funktion. Durch seinen kompakten Aufbau passt der Federstößel auch in beengte Produktionsumgebungen, seine Konstruktion schützt ihn vor Schmutz und mechanischen Einflüssen. Ein vakuumführendes Profil oder eine starre Schlauchverbindung versorgen ihn mit Unterdruck.

Metallische und graphitische Bipolarplatten bewegt der Flächengreifer FLGR im schnellen Takt. Am Messestand stapelte er mithilfe eines Roboters Membran-Elektroden-Einheiten und Bipolarplatten präzise. Hierfür richtet er die Komponenten aus, ohne die Oberflächen zu beeinträchtigen.

Kompaktejektoren stellen Vakuum an der richtigen Stelle bereit. Dank ihres geringen Gewichts eignet sich die Baureihe SCPSb BY / SCPSc BY / SCPSi BY für bewegliche Roboterarme und Linearantriebe. Für die Batteriefertigung hat

Schmalz diese Baureihe so entwickelt, dass sie kaum Kupfer, Nickel und Zink enthält, da diese Elemente die Batterien unbrauchbar machen können.

Vakuumtechnik hilft bei der Lecksuche

Auch die Busch Group zeigte auf der Messe Vakuum- und Lecksuchsysteme ihrer Marken Busch Vacuum Solutions und Pfeiffer Vacuum+Fab Solutions. Pfeiffer stellte ein System aus der ölfreien Spiral-Vakuumpumpe Hiscroll 46 und dem modularen Prüfgas-Leckdetektor ASI 35 vor, der für die Integration in industrielle Lecksuchsysteme entwickelt wurde. Es eignet sich für die Dichtheitsprüfung von Batteriezellengehäusen und ermöglicht die frühzeitige Erkennung von Lecks, durch die Feuchtigkeit eindringen könnte. Die Kombination aus Vakuumpumpe und Leckdetektor erlaubt laut Anbieter eine schnelle und präzise Prüfung mit hohem Durchsatz, gleich bleibender Qualität und niedrigen Kosten in der Großserienfertigung.

Ein weiteres Exponat war der Helium- und Wasserstoff-Leckdetektor ASM 340, der für Produktion, Qualitätskontrolle und Wartung entwickelt wurde. Er bietet laut Hersteller schnelle Ansprechzeiten, hohe Empfindlichkeit und eine benutzerfreundliche Bedienoberfläche. Auf der Battery Show wurde das Gerät live vorgeführt.

Die Busch Group bietet Vakuumsysteme für verschiedene Prozessschritte der Batterieproduktion und des Batterierecyclings wie Mischen, Trocknen, Elektrolytbefüllung, Entgasen und Recycling an. Für Sicherheit in explosionsgefährdeten Bereichen sorgen ATEX-konforme Vakuumpumpen und Vakuumzentralanlagen des Maulburger Herstellers.

Aussteller aus Asien zeigen ihre Technik in Stuttgart

Aus Asien war die Korea Vacuum Ltd. (Kova) als Aussteller nach Stuttgart gekommen. Für die Batteriefertigung präsentierte das Unternehmen mehrere Fertigungssysteme. So konnten sich

die Besucher am Stand über Vakuum-trocknungssysteme für die Produktion von Lithium-Ionen-Batterien (LiB) kundig machen. Diese Trockner entfernen Feuchtigkeit und NMP-Bestandteile (N-Methyl-2-Pyrrolidon), indem sie Elektrodenmaterialien in einer Vakuumumgebung trocknen. Die Vakuumtrockner sind in verschiedenen Konfigurationen erhältlich, einschließlich Batch- und Inline-Modellen.

Für die Vakuum-Oberflächenbeschichtung bietet Kova zudem Sputteranlagen für die Inline- und Aufdampfanlagen für die Batch-Bearbeitung. Nicht zuletzt bietet das koreanische Unternehmen DLC-Beschichtungen (Diamond-Like Carbon) an.

Eine weitere Vakuumanwendung von Kova ist ein System zur Beseitigung von Wasserstoff aus Beschichtungen mittels Presswalzen. Der im Beschichtungswerkstoff enthaltene Wasserstoff würde andernfalls zu Versprödungen im Substrat führen. In einer Vakuumumgebung wird bei 100 bis 250 °C innerhalb von 5 bis 30 min. der Wasserstoff entfernt.

Auch AGC Plasma Technology Solutions war auf der Messe präsent. Die Tochtergesellschaft des japanischen Konzerns Asahi Glass Company (AGC) fertigt Anlagen für die Vakuumbeschichtung, einschließlich der Quellen für Magnetronsputtern, die plasmaunterstützte chemische Gasphasenabscheidung (PE CVD) beziehungsweise

Der modulare Prüfgas-Leckdetektor ASI 35 eignet sich für die Dichtheitsprüfung von Batteriezellengehäusen und lässt sich in industrielle Lecksuchsysteme integrieren.
(Bild: Pfeiffer Vacuum+Fab Solutions)

die thermische Verdampfung. Am Stand konnten sich die Besucher über Pilot- und industrielle Beschichtungsanlagen für flexible und für starre Substratmaterialien informieren.

Der japanische Produzent Ulvac zeigte eine ganze Reihe von Geräten für die Batterieherstellung und -forschung. Zu sehen waren Helium-Dichtheitsprüfsysteme, darunter auch eine automatisierte Anlage mit Heliumrückgewinnung, die laut Anbieter bis zu 98 % der Heliumkosten einspart. Bei den Vakuumpumpen zeigte Ulvac kleine,

trockene Pumpen und mechanische Booster-/Öldiffusionspumpen. Für die Chargen- und Inline-Beschichtung auf Kunststoff-, Papier- oder Metallfolien informierte der Hersteller über seine Verdampfungssysteme. Nicht zuletzt präsentierte Ulvac Sputter-Cluster-Systeme für die Abscheidung von dünnen Schichten auf Substraten bis zu 200 mm. Sie sind geeignet für Forschung, Entwicklung und kleine bis mittlere Produktionsstückzahlen.

Plasmatechnik hilft bei der Batterieherstellung

Anwendungen aus der Plasmatechnik stellte Diener Electronic vor. Das Unternehmen stellt Nieder- und Atmosphärendruck-Plasmaanlagen sowie Parylene- und Vakuumanlagen her.

Aus den USA stellte sich Agilent Technologies auf der Battery Show Europe vor. Neben verschiedenen Geräten zur Laboranalyse zeigte das Unternehmen auch Vakuumpumpen und Leckagesuchgeräte.

Auch die Messtechnik darf auf einer solchen Messe nicht fehlen. So stellte Helmut Fischer für die Röntgenfluoreszenzanalyse sein Gerät XDAL 237 SDD vor. Damit lassen sich Schichtdicken von weniger als 0,05 µm messen. SI



Die Federstößel FST1mc sind auch mit integrierten Strömungswiderständen und Strömungsventilen verfügbar. (Bild: Schmalz)

The Battery Show Europe
www.thebatteryshow.eu

Die HiPIMS-Welt kommt nach Braunschweig

Konferenz bringt Wissenschaft und Industrie mit neuen Anwendungen zusammen

Die „International Conference on Fundamentals and Industrial Applications of HiPIMS“ macht in diesem Jahr Station in Braunschweig. Am 25. und 26. Juni treffen sich im dortigen Fraunhofer-Institut für Schicht- und Oberflächentechnik (IST) die Fachleute für das Hochenergieimpulsmagnetronspattern.

Die 15. Ausgabe der Konferenz will ein Forum für die Präsentation der neuesten Forschungsergebnisse von Wissenschaftlern und Ingenieuren aus der Industrie, aus technischen Instituten und aus Hochschulen bieten. Die Beiträge werden sowohl grundlegende wissenschaftliche Aspekte als auch anwendungsorientierte Forschung und Entwicklung abdecken. Darüber hinaus wird es um die erfolgreiche Markteinführung neuer Produkte gehen, die das Hochenergieimpulsmagnetronspattern (englisch: high-power impulse magnetron sputtering, abgekürzt HiPIMS) nutzen. Neben den Vorträgen wird es auch eine begleitende Ausstellung geben, auf der sich Unternehmen mit ihren HiPIMS-Anwendungen vorstellen können.

Industrieunternehmen stellen ihre Neuentwicklungen vor

Bis zum Redaktionsschluss dieser Ausgabe standen bereits mehrere Vorträge von Fachleuten aus Forschung und Industrie fest. Unter anderem wird Philipp Immich von IHI Hauzer Techno Coating über HiPIMS als Enabler für die nächsten Schritte in Werkzeug-, dekorativen und funktionalen Anwendungen berichten. Biljana Mesic, Cemecon, hält einen Vortrag zum Thema überlegene HiPIMS-abgeschiedene AlCrN-Beschichtungen für eine große Bandbreite von Schneidanwendungen. Das Einstellen von HiPIMS-Prozessen in Echtzeit ist das Thema von Plasus und Thomas Schütte. Mit gleich zwei Vorträgen zum Thema Simulationen ist Plasmasolve vertreten: Adam Obrusnik



Das Fraunhofer-Institut für Schicht- und Oberflächentechnik in Braunschweig ist in diesem Jahr der Veranstaltungsort der HiPIMS-Konferenz. (Bild: Wikimedia/Verograph, CC BY-SA 3.0)

berichtet über die Simulation der Dynamik von industriellem HiPIMS-Plasma unter Verwendung eines 2D-Hybridmodells, Kristina Tomankova über die simulationsbasierte Vorhersage der Eigenschaften von SiO_x- und AlO_x-Filmeigenschaften in einer reaktiven HiPIMS- und Hochfrequenzabscheidung.

Vom gastgebenden Fraunhofer IST berichtet Timon Belz über die digitale Modellierung eines industriellen Inline-Sputtering-Systems und das Bestehen des Turing-Tests für eine praktische Anwendung. Jonas Müller, tätig beim Schwesterinstitut Fraunhofer IWM, referiert über die elektrische Charakterisierung eines überlagernden HiPIMS / Hochfrequenzsputtern auf einem einzelnen Magnetron.

Beiträge aus grundlagen- und anwendungsorientierter Forschung

Auf gleich zwei Vorträge aus der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel können sich die Teilnehmenden freuen. Caroline Adam wird über „Plasma und Energieflussdiagnostik in HiPIMS-Entladungen“ sprechen, ihr Kollege Holger Kersten über „I-V-Charakteristiken und

Drifts – Leuchten, Bögen und HiPIMS-Entladungen: Einige historische Anmerkungen“.

Neue Einblicke in HiPIMS-Entladungen aus partikelbasierten Simulationen verspricht der Vortrag von Tomas Kozak von der Universität Westböhmen in Pilsen. Seine Kollegin Andrea Pajdarová erläutert die zeitliche Auflösung der Spektroskopie optischer Emissionen des Materialtransports während des Sputterns eines Compound-NbC-Targets mittels HiPIMS.

Über die Ablagerung eines Indium-Gallium-Zinkoxidfilms für Dünnschichttransistoren mittels HiPIMS wird Takayuki Ohta von der japanischen Meijo University berichten. Und von den Feng Chia University, mit der das Fraunhofer IST 2024 eine Kooperation vereinbart hat, spricht Ping-Yen Hsieh über die verbesserte Osseointegration von HiPIMS-Titanbeschichtungen auf lasertexturiertem PEEK für Wirbelsäulenimplantate. SI

International Conference on Fundamentals and Industrial Applications of HiPIMS 2025
www.ist.fraunhofer.de/en/events-trade-fairs/2025/hipims-2025.html

DATUM	VERANSTALTUNG	ORT	WEBSITE
JUNI 2025			
24.–27.	Messe Laser World of Photonics	München	world-of-photonics.com
25.–26.	15th International Conference on HIPIMS	Braunschweig	www.ist.fraunhofer.de
30.6.–2.7.	3. Tagung Angewandte Oberflächen- und Festkörperanalytik	Kaiserslautern	www.aofka.de
SEPTEMBER 2025			
3.–5.	PVD-/CVD-Seminar	Aachen	www.iot.rwth-aachen.de
22.–26.	Messe EMO Hannover	Hannover	www.emo-hannover.de
23.–25	Messe Fachpack	Nürnberg	fachpack.de
OKTOBER 2025			
7.–9.	Messe parts2clean	Stuttgart	www.parts2clean.de
13. – 16.	V2025 International Conference and Exhibition for Vacuum, Plasma, Surface and Coating	Dresden	efds.org
NOVEMBER 2025			
18.–21.	Messe Semicon Europa	München	www.semiconeuropa.org

Ölfreie Vakuumpumpen für Anwendungen mit hohem Durchsatz präsentiert

Mit den Modellen IDP-35 und IDP-45 hat Agilent Technologies zwei neue trockene Schraubenvakuumpumpen vorgestellt. Sie bieten laut Hersteller ein leises, effizientes und umweltfreundliches Vakuumsystem für Anwendungen, die eine höhere Pumpleistung

erfordern. Das kleinere Modell IDP-35 erreicht ein maximales Saugvermögen von 35 m³/h, beim größeren Modell IDP-45 sind es 45 m³/h. Beide Aggregate erreichen ein Endvakuum von $1,07 \times 10^{-2}$ mbar und sind luftgekühlt. Die Motorleistung erreicht jeweils

1,1 kW. Den Schalldruckpegel gibt der Hersteller mit 58 beziehungsweise 59 dB(A) bei einer Toleranz von ± 2 dB(A) an.

Wie der Anbieter mitteilt, eignen sich diese Pumpen für Anwendungen, die eine höhere Pumpleistung erfordern, ohne die Nachteile von ölgeschmierten Pumpen. Eine Wartung ist nur alle zwei bis drei Jahre erforderlich und kann intern in etwa einer halben Stunde durchgeführt werden.

Diese neuen Vakuumpumpen stellen mit Drehzahlen zwischen 1.200 und 1.980 min⁻¹ auch eine umweltfreundlichere Alternative zu ölgedichteten Aggregaten dar, die bisher die einzige Option für höhere Drehzahlen

waren. Damit entfallen Ölemissionen und die Entsorgung von Sondermüll.

Der Hersteller hat nach eigenen Angaben die Pumpen IDP-35 und IDP-45 mit intelligenten Funktionen ausgestattet, um die Steuerung und den Komfort zu verbessern. Diese Funktionen ermöglichen eine Fernüberwachung in Echtzeit und einen präzisen Betrieb.

Diese Vakuumpumpen eignen sich für viele Anwendungen, von Instrumenten wie Rasterelektronenmikroskopen und Massenspektrometern bis hin zu Gefriertrocknern und in der Forschung, wie der Anbieter berichtet.

www.agilent.com

Bild: Agilent Technologies



Die ölfreie Schraubenvakuumpumpe IDP-35 (hier im Bild) und das größere Modell IDP-45 erreichen auch im Trockenbetrieb hohe Drehzahlen.

Trockene Klauenvakuumpumpen für eine lange Lebensdauer

Saubere Verfahren haben in der Vakuumtechnik eine besondere Bedeutung, denn sie sind gleichermaßen umweltfreundlich und betriebswirtschaftlich vorteilhaft. Vor diesem Hintergrund hat Atlas Copco eine neue Reihe von Vakuumpumpen entwickelt.

Die trockenen, ölfreien Klauenvakuumpumpen DZS 600 VSD+ und DZS 1200 VSD+ sind laut Hersteller leistungsstark, energieeffizient und lassen sich einfach steuern und warten. Typische Einsatzgebiete sind CNC-Fräsen, pneumatische Förderanlagen und zentrale Vakuumsysteme, etwa in Krankenhäusern. In solchen Anwendungen arbeiten die ölfreien, luftgekühlten Klauenvakuumpumpen sehr zuverlässig und erreichen lange Lebensdauern.

Einfacher Aufbau macht Klauenvakuumpumpen robust

„Die DZS VSD+ sind einfach und modular aufgebaut“, erläutert Ahmed Elshaffie, der zuständige Produktmanager. Sie bestehen aus der Pumpen- und der Getriebekammer, die

durch Dichtungen getrennt sind. Ihr energieeffizienter, verschleißarmer Betrieb basiert auf der speziellen Peekcoat-Beschichtung der medienberührten Teile und Rotoren sowie auf ihrem einfachen Funktionsprinzip. Zwei Klauen drehen sich berührungslos in entgegengesetzter Richtung im Pumpengehäuse. Dadurch wird Luft in den Pumpenraum angesaugt, komprimiert und unter Druck wieder ausgestoßen.

Rückschlagventil stoppt zurückströmende Luft

In der Getriebekammer synchronisieren zwei Zahnräder die Rotation der Klauen. Das Rückschlagventil im Einlassflansch verhindert, dass beim Abschalten der Pumpe Luft in die Vakuumkammer zurückströmt. Die Pumpen werden über eine Kupplung von einem angeflanschten Motor angetrieben.

Das kleinere Modell DZS 600 VSD+ bietet einen maximalen Luftvolumenstrom von 600 m³/h, das größere Modell DZS 1200 VSD+ kommt auf 1140 m³/h. Die

Motornennleistung beträgt 11 beziehungsweise 22 kW. Beide Klauenvakuumpumpen erreichen ein dauerhaftes Endvakuum von 200 mbar.

Klauenvakuumpumpen haben nur geringen Platzbedarf

Mit ihrem integrierten VSD+ Umrichterantrieb mit Drucksollwertregelung können die Vakuumpumpen mit hohen Rotordrehzahlen betrieben werden. Die Motordrehzahl passt sich an die Prozesslast an, was den Betrieb energieeffizienter macht. „Die Modelle DZS 600 VSD+ und DZS 1200 VSD+ können dauerhaft im Endvakuum betrieben werden, ohne zu überhitzen“, ergänzt Elshaffie.

Zudem lassen sie sich variabel einsetzen, weil die Pumpen in Grobvakuumwendungen nur wenig Einbauraum beanspruchen: Das kleinere Modell kommt auf Abmessungen von 586 × 969 × 1362 mm³ (B × H × L), das größere auf 680 × 1284 × 1460 mm³.

Um die Überhitzung im Endvakuum über eine

lange Betriebsdauer zu verhindern, verfügen beide Aggregate über ein Vakuum-Überdruckventil. Ein Einlass-Rückschlagventil isoliert die Vakuumpumpen beim Abschalten des Prozesses. Der Schalldämpfer reduziert die Geräuschentwicklung der Geräte in der Arbeitsumgebung: Den Schallpegel für die kleinere Pumpe gibt Atlas Copco mit bis zu 78 dB(A) an, für die größere Pumpe erreicht er bis zu 85 dB(A).

App unterstützt bei Inbetriebnahme

Mit der Atlas-Copco-VSD+-App können Anwender die Vakuumpumpen über ihr eigenes Smartphone ganz einfach steuern und überwachen. Außerdem erleichtert die App auch die Inbetriebnahme durch die Einstellung von Zieldruck, Start-/Stopp-Verzögerung und Stoppniveau. Dazu muss der Nutzer die Pumpe starten, die VSD+-App über Bluetooth verbinden und die gewünschten Parameter eingeben.

www.atlascopco.com



Die trockene Klauenvakuumpumpe DZS 1200 VSD+ (linkes Bild) und das kleinere Modell DZS 600 VSD+ sind laut Hersteller robust und langlebig.

Bilder: Atlas Copco

Greifersystem unabhängig von Größe und Form

Ein frei skalierbares Greifersystem für die Robotik namens FQE-V hat Schmalz entwickelt. Damit lassen sich unterschiedlich große und geformte Werkstücke sicher handhaben, wie der Hersteller mitteilt.

Die J. Schmalz GmbH in Glatten hat die FQE-Greiferbaureihe weiterentwickelt und mit dem FQE-V

ergänzt. Mit Größen von 230 × 120 mm bis 400 × 280 mm ist der neue Flächengreifer flexibler in seiner Abmessung und Geometrie. Damit ermöglicht er ein genaues und sicheres Handling individuell geformter Werkstücke, wie der Anbieter berichtet. Dafür lassen sich Saugplattenabmessung und Sauglochraster frei skalieren. Anwender

passen den Greifer mit Konstruktionstools in kurzer Zeit an unterschiedliche Werkstücke an. Losgröße 1 werde damit zum Standard.

Die Neuentwicklung bietet Schmalz in zwei Versionen an. Der FQE-V-M ist mit einer externen, der FQE-V-X mit einer integrierten, energieeffizienten Vakuumerzeugung ausgestattet.

Die Steuerventile seien ebenfalls eingebunden. Mit seiner modularen Leichtbauweise spart der neue Flächengreifer Gewicht und erhöht damit die Traglast. Als Dichtelement stehen Sauger in unterschiedlicher Form und Material und Schaum zur Verfügung. Eine Schalldämmung minimiert die Geräuschbelastung für umstehende Mitarbeitende.

Anwender können Saugwannen mit unterschiedlichen Formen auswählen. Im Standard sind diese rechteckig, rund oder oval. Es lassen sich jedoch auch beliebige Freiformen skalieren, zum Beispiel eine T-Form. Das Design des neuen Flächengreifers erfüllt laut Anbieter die Anforderungen der Norm ISO TS 15066 und eignet damit für stationäre Handhabungsaufgaben bei Mensch-Roboter-Kollaborationen (MRK).



Bild: J. Schmalz

Der neue Flächengreifer FQE-V ermöglicht ein genaues und sicheres Handling individuell geformter Werkstücke.

www.schmalz.com

Schlauchheber in neuer Edelstahl-Variante vorgestellt

Einen neuen Edelstahl-Schlauchheber mit überarbeiteten Features stellt Aero-Lift als Erweiterung seiner Force-Lift Serie vor. Damit richtet sich das Unternehmen an Branchen mit erhöhten Hygieneanforderungen, wie die Lebensmittel-, Pharma- und Chemie-industrie.

Die neue Variante kombiniert die Sicherheit, Bedienerfreundlichkeit und intuitive Steuerung der Force-Lift-Serie mit zusätzlichen hygienischen Eigenschaften, wie die Aero-Lift Vakuumtechnik GmbH in Geislingen-Binsdorf mitteilt. Dadurch werden die Geräte den besonderen

Anforderungen dieser Branchen gerecht.

Die Edelstahl-Version des Schlauchhebers besteht aus korrosionsbeständigem Material und ist so konzipiert, dass sie sich leicht reinigen und desinfizieren lässt. Dadurch werde eine sichere Nutzung in Umgebungen mit sensiblen Hygienevorschriften gewährleistet. Die überarbeitete Konstruktion soll das Risiko von Verunreinigungen minimieren und gleichzeitig die Ansprüche an Ergonomie und Effizienz der Force-Lift Serie erfüllen.

Von der Verarbeitung empfindlicher Lebensmittel bis hin zur Herstellung

pharmazeutischer Produkte biete der Schlauchheber ein flexibles System für unterschiedliche Handling-Anforderungen. Dank dem vielfältigen Sauggreiferangebot

soll der Schlauchheber verschiedene Produkte sicher und effizient handhaben, können.

www.aero-lift.de



Bild: Aero-Lift

Aero-Lift erweitert seine Schlauchheber-Serie Force-Lift um eine Edelstahl-Variante für Branchen mit erhöhten Hygieneanforderungen.

Vakuumpumpen unterstützen Kühlung in KI-Rechenzentren

Da Rechenzentren und KI-gesteuerte Systeme immer komplexer und leistungsfähiger werden, wird auch das Wärmemanagement wichtiger. Je größer der Datendurchsatz, desto höher die Wärmebelastung, was die Stabilität und Effizienz der Rechenzentren herausfordert.

Ohne richtig dimensionierte Kühlung kann eine Überhitzung zu Leistungseinbußen, Systemausfallzeiten und sogar zu Hardwareausfällen führen. Darüber hinaus

Kühlplatten minimieren auch die Abhängigkeit von zusätzlichen Kühlmethoden wie Lüftern oder Klimaanlage und bieten ein nachhaltigeres und kostengünstigeres Wärmemanagement.

Vakuumpumpe führt warme Dämpfe und Partikel ab

„Mit der wachsenden Nachfrage nach Hochleistungscomputern war der Bedarf an intelligenter und effizienter Kühlung noch nie so groß wie heute“, sagt Ranga Ve-

Kühlinfrastruktur reduzieren, wie der Anbieter mitteilt.

Das Herzstück dieser Neuheiten ist die Edwards GV80 Trockenvakuumpumpe, eine ölfreie Klauenpumpe, die sich für die Ableitung von elektronischer Wärme bewährt hat. Sie ist so konstruiert, dass sie Dämpfe und Partikel mit Präzision abführt, und ist Teil eines Kühlsystems, das Wärmerohre, Dampfkammern, Flüssigkeitskühlung sowie eine intelligente Drehzahlregelung umfasst.

Hochleistungskühlung braucht Vakuumsysteme

Für Anwendungen, die eine tiefe Evakuierung vor der Flüssigkeitszufuhr erfordern, bietet Edwards die Drehschieberpumpen E2M40 und E2M80 an. Sie erzeugen Vakuumbedingungen bis hinunter zu 10-2 mbar und machen flüssigkeitsbasierte Kühlprozesse effizient.

Ergänzt wird das Angebot durch die trockene Schraubenvakuumpumpe EXS, die laut Mitteilung des Herstellers für ihren geringen Wartungsbedarf und ihre Betriebseffizienz bekannt ist. Sie unterstützt eine umfangreiche Kühlung bei minimalem Energie- und Flüssigkeitsverbrauch.

Tim McGrath, Product Marketing Manager bei Edwards, erläutert den Bedarf an speziellen Vakuumpumpen für die Kühlung: „Hinter jeder Hochleistungskühlung steht ein zuverlässiges Vakuumsystem.“ Die Nass- und Trockenvakuumpumpen tragen dazu bei, einen stabilen Betrieb zu unterstützen, eine Überhitzung zu verhindern und sie bewirken, dass die Elektronik kühler, länger und effizienter läuft.

Zusammengenommen spiegeln diese Innovationen das Engagement von Edwards Vacuum wider, die Infrastruktur der digitalen Welt mit intelligenten, nachhaltigen Kühlsystemen zu unterstützen, die den sich entwickelnden Anforderungen an die elektronische Leistung gerecht werden, wie es in der Mitteilung des Unternehmens abschließend heißt.

www.edwardsvacuum.com



Bild: Edwards Vacuum

Die ölfreie Klauenvakuumpumpe Edwards GV80 hat sich für die Ableitung von elektronischer Wärme bewährt.

würden dauerhaft hohe Temperaturen die Lebensdauer elektronischer Komponenten verkürzen. In diesem Umfeld tragen Kühlsysteme dazu bei, Überhitzung zu vermeiden und die Gesamtenergieeffizienz zu verbessern. Heatpipes, Dampfkammern, Flüssigkeitskühlungen oder

nugopalan, Senior Market Sector Manager bei Edwards Vacuum. Die Vakuumpumpen des Herstellers unterstützen Heatpipe-Kühlsysteme, die nicht nur ihren sicheren Betrieb gewährleisten, sondern auch den Energieverbrauch und die Abhängigkeit von der traditionellen

Das System hält die Temperatur in seinen Anwendungsbereichen konstant. Die Leistung wird auf einem hohen Vakuumniveau stabilisiert und die Lebensdauer der Komponenten wird verlängert, insbesondere in großen Servern oder Rechenzentren.

Kompaktes System zur Restgasanalyse

Als Komplettsystem für die Restgasanalyse stellt Pfeiffer Vacuum+Fab Solutions den Hicube Neo RGA vor. Er vereint eine Hicube Neo Vakuumpumpeneinheit und ein PrismaPro Massenspektrometer.

Die in die Einheit integrierte Turbomolekular-Vakuumpumpe erzeugt das für die Massenspektrometrie erforderliche Vakuumniveau. Damit kann das Massenspektrometer bestimmte Massenbereiche von Gasmolekülen erkennen sowie analysieren und auf diese Weise Daten für die Prozessüberwachung oder Qualitätssteuerung liefern.

Restgase aufspüren und identifizieren

Mit diesem System lassen sich Restgase präzise identifizieren und untersuchen, wie der Anbieter berichtet. Der Hicube Neo RGA arbeitet in einem breiten Druckbereich von Atmosphärendruck bis hin zum Hochvakuum. Er kann in zahlreichen Anwendungen, zum Beispiel der Beschichtung und für unterschiedliche analytische Aufgaben, eingesetzt werden.

Für einen stabilen Betrieb und zum Schutz der Bauteile verfügt das Restgasanalyse-System über mehrere eingebaute Sicherheitsmechanismen. Es enthält außerdem ein Vakuummessgerät zur kontinuierlichen Überwachung des Totaldrucks. Überschreitet der Druck eine vordefinierte Sicherheitsschwelle, schaltet das System das Filament im Massenspektrometer automatisch ab. Dadurch wird eine Beschädigung des Filaments durch einen zu hohen Druck verhindert,



Bild: Pfeiffer Vacuum+Fab Solutions

Der neue Hicube Neo RGA für die Restgasanalyse arbeitet von Atmosphärendruck bis Hochvakuum.

was die Standzeit verlängern und die Austauschhäufigkeit reduzieren kann. Zudem besteht die Möglichkeit, das Restgasanalyse-System mit einem integrierten Absperrventil auszustatten.

Viele Anschlussmöglichkeiten für Sensoren

Das Restgasanalyse-System Hicube Neo RGA bietet zahlreiche Anschlussoptionen für die Integration externer Sensoren und von Überwachungsequipment. Es unterstützt sowohl digitale als auch analoge Ein- und Ausgänge, sodass Daten von zusätzlichen Sensoren – zum Beispiel von weiteren angeschlossenen Vakuummessgeräten – in die Analyse einbezogen werden können.

Das eingebaute Touch-Display bietet direkten Zugriff auf die Messdaten und zeigt Signale von angeschlossenen Komponenten an. Die Software PV Massspec ermöglicht zudem den schnellen und einfachen Zugang zu den Messungen.

Optionales Rezipienten-Heizgerät lässt sich integrieren

Darüber hinaus lässt sich das Restgasanalyse-System an verschiedene Anwendungen, von der Lecksuche bis hin zu Vakuumöfen, anpassen. Eine solche Option ist ein integriertes Rezipienten-Heizgerät, das zur Freisetzung adsorbierter Gase beiträgt. Indem es diese Gase verdampfen lässt und aus dem System entfernt, reduziert das Heizgerät

Verunreinigungen und minimiert Untergrundsignale, die die Messgenauigkeit beeinträchtigen könnten.

Mobil einsetzbar

Das Restgasanalyse-System Hicube Neo RGA ist laut Hersteller für den Plug&Pump-Betrieb ausgelegt und schnell einzurichten. Für Anwendungen, die eine Gasanalyse an mehreren Stellen erfordern, kann das System auf einem Wagen montiert und einfach transportiert werden. Auf diese Weise kann es ohne Demontage zwischen verschiedenen Arbeitsplätzen bewegt werden.

www.pfeiffer-vacuum.com

Aufdampfanlagen vapour deposition systems



BESTEC

BESTEC GmbH
Am Studio 2b, 12489 Berlin
Tel. (030) 677 43 76, Fax: - 677 57 18
www.bestec.de, info@bestec.de

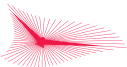
Aufdampfmaterien deposition materials



ChemPur Feinchemikalien
und Forschungsbedarf GmbH
Rüppurrer Str. 92, 76137 Karlsruhe
Tel. 0721-9338140 Fax -472001
info@chempur.de www.chempur.de

MaTecK GmbH Forschungsmaterialien
Im Langenbroich 20
52428 Jülich
Tel: 0 24 61/93 52-0, Fax: -11
service@mateck.de
http://www.mateck.de

Ausrüstungen für Synchrotrons synchrotron equipment



BESTEC

BESTEC GmbH
Am Studio 2b, 12489 Berlin
Tel. (030) 677 43 76, Fax: - 677 57 18
www.bestec.de, info@bestec.de

Drehschieberpumpen rotary vane pumps



Dr.-Ing. K. Busch GmbH
Schauinslandstrasse 1
79689 Maulburg
+49 (0)7622 681-0
sales@busch.de
www.buschvacuum.com

Flansch-Bauteile flanges and fittings



METALLIC FLEX GmbH
Tel. +49 5606 563 174
info@metallicflex.de
www.metallicflex.de



Pfeiffer Vacuum Components & Solutions
GmbH
T +49 551 99963-0
www.pfeiffer-vacuum.com
www.vacuum-shop.com



WISSEL GmbH
Haagstr. 43
63776 Mömbris-Hohl
Tel. 06029/99-93-0, Fax 99-93-50
E-Mail: info@wissel-vakuum.de
http://www.wissel-vakuum.de

Flüssigkeitsring-Vakuumpumpen liquid ring vacuum pumps



Dr.-Ing. K. Busch GmbH
Schauinslandstrasse 1
79689 Maulburg
+49 (0)7622 681-0
sales@busch.de
www.buschvacuum.com

Massenspektrometer mass spectrometer



Pfeiffer Vacuum GmbH
T +496441802-0
www.pfeiffer-vacuum.com

Membranbälge bellows



METALLIC FLEX GmbH
Kirchweg 3
34317 Habichtswald
Tel. +49 5606 563 174
info@metallicflex.de

Plasmaquellen/Plasmastrahlquellen plasma source/plasma beam source



CCR GmbH, Beschichtungstechnologie
Camp-Spich-Str. 3a, 53842 Troisdorf
Tel. +49(0)2241-93215-0, Fax -200
contact@ccrtechnology.de

Reinraum – Reinigung und Montage von Baugruppen Clean room – cleaning and assembly of components



ALMA driving-elements GmbH
Obere Heeg 5
97852 Schollbrunn
Tel. +49 9394 9700-0
Fax +49 9394 9700-30
info@alma-driving.de
www.alma-driving.de

Sputteranlagen sputter-systems (UHV)



BESTEC

BESTEC GmbH
Am Studio 2b, 12489 Berlin
Tel. (030) 677 43 76, Fax: - 677 57 18
www.bestec.de, info@bestec.de

Sputtertargets sputter-targets

MaTecK GmbH Forschungsmaterialien
Im Langenbroich 20
52428 Jülich
Tel: 0 24 61/93 52-0, Fax: -11
service@mateck.de
http://www.mateck.de

Thermal-Vakuum-Testkammern thermal vacuum test chambers



JUST VACUUM GmbH
Daimlerstraße 17, 66849 Landstuhl
+49 6371 92760
info@justvacuum.com, www.justvacuum.com



Pfeiffer Vacuum Components & Solutions
GmbH
T +49 551 99963-0
www.pfeiffer-vacuum.com
www.vacuum-shop.com



PiNK GmbH Vakuumtechnik
Gyula-Horn-Straße 20, 97877 Wertheim
Tel. 09342/872-0, Fax: 09342/872-111
info@pink-vak.de, www.pink-vak.de

UHV-Manipulatoren
UHV-manipulators



Talstr. 33, 67737 Frankelbach
Tel. 06308-2099600 / 0151-14304081
info@andreas-mattil.de,
www.andreas-mattil.de
Shop: www.andreas-mattil-shop.com

METALLIC FLEX GmbH

Tel. +49 5606 563 174
info@metallicflex.de
www.metallicflex.de



PINK GmbH Vakuumtechnik
Gyula-Horn-Straße 20, 97877 Wertheim
Tel. 09342/872-0, Fax: 09342/872-111
info@pink-vak.de, www.pink-vak.de

Vakuumbauteile und Komponenten
vacuum components



Pfeiffer Vacuum Components & Solutions GmbH
T +49 551 99963-0
www.pfeiffer-vacuum.com
www.vacuum-shop.com



Fertigung komplexer Einzelteile und Baugruppen
Bergener Ring 59
01458 Ottendorf-Okrilla
Tel.: +49 35205 41750
info@vpd-gmbh.de
www.vpd-gmbh.de

Vakuum Direktantriebe, magnetfluidgedichtet
vacuum direct drives, magnetic fluid sealed



ALMA driving-elements GmbH
Obere Heeg 5
97852 Schollbrunn
Tel. +49 9394 9700-0
Fax +49 9394 9700-30
info@alma-driving.de
www.alma-driving.de

Vakuumdrehdurchführungen und Zubehör
rotary feed-through and accessories



ALMA driving-elements GmbH
Obere Heeg 5
97852 Schollbrunn
Tel. +49 9394 9700-0
Fax +49 9394 9700-30
info@alma-driving.de
www.alma-driving.de



Pfeiffer Vacuum Components & Solutions GmbH
T +49 551 99963-0
www.pfeiffer-vacuum.com
www.vacuum-shop.com

Vakuulkammern
vacuum chambers



ALMA driving-elements GmbH
Obere Heeg 5
97852 Schollbrunn
Tel. +49 9394 9700-0
Fax +49 9394 9700-30
info@alma-driving.de
www.alma-driving.de

METALLIC FLEX GmbH
Tel. +49 5606 563 174
info@metallicflex.de
www.metallicflex.de



MSA MASCHINEN SYSTEME ANLAGEN AG
Laudenbacher Weg 4
D-97753 Karlstadt am Main
Tel. 09353 984039-0, Fax 984039-11
http://www.msa-ag.de



Pfeiffer Vacuum Components & Solutions GmbH
T +49 551 99963-0
www.pfeiffer-vacuum.com
www.vacuum-shop.com

DER GESAMTE VAKUUMBEREICH

Im Produkt- und Lieferantenverzeichnis finden Sie **Produkte, Verfahren und Dienstleistungen**.

Die Rubriken/Stichworte in Deutsch und Englisch können jederzeit nach Ihren Wünschen ergänzt werden.

Sie können den Eintrag Ihres Unternehmens durch Ihr **Firmenlogo** besonders hervorheben.

Außerdem erscheinen alle Eintragungen zusätzlich kostenfrei im Internet unter www.pro-physik.de.

Machen Sie es Ihren Kunden leichter – zeigen Sie, was Sie zu bieten haben. Das VIP-Bezugsquellenverzeichnis ist dafür die ideale Plattform.

Werden Sie zum VIP!

Annahmeschluss für die
nächste Ausgabe ist der
28. Juli 2025

Ich unterstützen Sie dabei gerne!

Ihr Mediaberater für VIP



Thomas Schumann
Leitung Media Sales
Tel.: +49 89 673697-35
thomas.schumann@igt-verlag.de



PiNK GmbH Vakuumtechnik

Gyula-Horn-Straße 20, 97877 Wertheim
Tel. 09342/872-0, Fax: 09342/872-111
info@pink-vak.de, www.pink-vak.de

Vakuum-Messgeräte vacuum gauges

Edwards GmbH

Vakuumlösungen von Atmosphäre bis UHV
Philipp-Hauck-Straße 2, 85622 Feldkirchen
T 0800 0001456 oder +49 89 99191856
DEvertrieb@edwardsvacuum.com
www.edwardsvacuum.com



Pfeiffer Vacuum GmbH

T +496441802-0
www.pfeiffer-vacuum.com

Vakuumpumpen vacuum pumps



Dr.-Ing. K. Busch GmbH

Schauinslandstrasse 1
79689 Maulburg
+49 (0)7622 681-0
sales@busch.de
www.buschvacuum.com



Edwards GmbH

Vakuumlösungen von Atmosphäre bis UHV
Philipp-Hauck-Straße 2, 85622 Feldkirchen
T 0800 0001456 oder +49 89 99191856
DEvertrieb@edwardsvacuum.com



Multi-Stage Roots Pumps

Kashiyama Europe GmbH

Münchener Straße 24
85774 Unterföhring, Germany
keg@kashiyama.com
https://de.kashiyama.com/



Pfeiffer Vacuum GmbH

T +496441802-0
www.pfeiffer-vacuum.com

Vakuumschrauben, entlüftet vacuum screws, vented



ALMA driving-elements GmbH

Obere Heeg 5
97852 Schollbrunn
Tel. +49 9394 9700-0
Fax +49 9394 9700-30
info@alma-driving.de
www.alma-driving.de

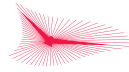
Vakuumservice vacuum consulting



Druschke Group

Am Bruchweg 2
DE-63571 Gelnhausen
Telefon 0049 (0) 6051 916678-0
Telefax 0049 (0) 6051 916678-17
www.druschke.eu
info@druschke.eu

Vakuumtechnik, Sonderanfertigungen special vacuum plants



BESTEC

BESTEC GmbH

Am Studio 2b, 12489 Berlin
Tel. (030) 677 43 76, Fax: - 677 57 18
www.bestec.de, info@bestec.de

Edwards GmbH

Vakuumlösungen von Atmosphäre bis UHV
Philipp-Hauck-Straße 2, 85622 Feldkirchen
T 0800 0001456 oder +49 89 99191856
DEvertrieb@edwardsvacuum.com
www.edwardsvacuum.com



MSA MASCHINEN SYSTEME ANLAGEN AG

Laudenbacher Weg 4
D-97753 Karlstadt am Main
Tel. 09353 984039-0, Fax 984039-11
http://www.msa-ag.de



Pfeiffer Vacuum GmbH

T +496441802-0
www.pfeiffer-vacuum.com



PiNK GmbH Vakuumtechnik

Gyula-Horn-Straße 20, 97877 Wertheim
Tel. 09342/872-0, Fax: 09342/872-111
info@pink-vak.de, www.pink-vak.de



WISSEL GmbH

Haagstr. 43
63776 Mömbris-Hohl
Tel. 06029/99-93-0, Fax 99-93-50
E-Mail: info@wissel-vakuum.de
http://www.wissel-vakuum.de

LOGO?

Thomas Schumann
Tel.: +49 89 673697-35
thomas.schumann@igt-verlag.de