

„Nicht nur sauber, sondern rein“ - Reine Räume zur Herstellung kleinster Strukturen

von
**Christian Stief und
Axel Grabowski**

Im Jahr 1997 sollte ein etwa 20 qm großer Reinraum bei der Firma RNT GmbH Informationssysteme in München durch einen größeren ersetzt werden. Die RNT GmbH bot daraufhin den nicht mehr benötigten Raum Forschungseinrichtungen und Universitäten kostenlos zur Weiterverwendung an, wobei der Empfänger sowohl den Abbau in München als den Aufbau am neuen Einsatzort auf eigene Kosten übernehmen sollte. Professor Uwe Hartmann zeigte großes Interesse an diesem Reinraum, auf den ihn sein Kollege Professor Jan Kristian Krüger aufmerksam gemacht hatte. Nach erfolgreichen Verhandlungen übernahm die Technische Betriebsdirektion der Universität (TBD) sowohl den Abbau des Raumes in München als auch den Wiederaufbau in Saarbrücken. Nachdem auch alle erforderlichen Einrichtungsgegenstände installiert waren, konnte der Raum Mitte des Jahres 1998 in Saarbrücken in Betrieb genommen werden.

Wozu wird ein Reinraum benötigt?

Bei der Herstellung kleinster Strukturen ergeben sich große Probleme durch Verunreinigungen in der Luft. Diese bestehen nicht nur aus Hausstaub, sondern aus einer Vielzahl unterschiedlicher verschiedener Komponenten. Des-

Auch wenn heutige Computernutzer die Leistungsfähigkeit und Geschwindigkeit ihrer Rechner als selbstverständlich ansehen, konnten diese nur durch eine konsequente Miniaturisierung kontinuierlich gesteigert werden. Die enormen technischen Anforderungen an den Herstellungsprozess wuchsen dabei in gleichem Maße wie die Bauelemente kleiner wurden. Daneben mussten Prototypen der heutigen Bauelemente bereits einige Jahre zuvor in Forschungseinrichtungen eingehend überprüft werden, um die Alltagstauglichkeit sicher zu stellen.

Im Zuge dieser Entwicklung traten Probleme auf, die bis dahin kaum oder gar nicht ins Gewicht fielen. Als schwerwiegendstes erwies sich dabei ein eigentlich alltägliches Phänomen: der Staub und andere Verunreinigungen in der Umgebungsluft verursachten einen enormen Produktionsausschuss, da bereits ein einzelnes Staubkorn eine komplette Struktur zerstören kann. Die einzige Lösung dieses Problem bestand in der Verlagerung sowohl der Produktion als auch der Forschung in eine partikelfreie Umgebung. Eine solche wird durch „reine Räume“ bereitgestellt. Auch in der Arbeitsgruppe von Professor Uwe Hartmann in der Experimentalphysik in Saarbrücken steht seit kurzem ein solcher Raum zur Verfügung.

halb wird anstelle von *Staub* der Begriff *Kontamination* (der Luft) verwendet, womit die nicht gasförmigen Anteile normaler Umgebungsluft beschrieben werden. Diese Anteile setzen sich zusammen aus allen in der Luft befindlichen Staubteilchen, Mikroorganismen und Tröpfchen, deren Größe über einen weiten Bereich verteilt ist. Staubteilchen reichen von kleinsten Partikeln - wie beispielsweise Ruß mit einer Größe von wenigen tausendstel Millimetern - bis zu Flugsandkörnern und feinen Stofffäden, die einen Durchmesser von einigen Millimetern erreichen können. Ebenso wie feine Flüssigkeitströpfchen haben die Mikroorganismen in der Luft eine Größe im Bereich weniger hundertstel Millimeter. Durch die ständige Bewegung der Luft werden diese Kontaminationen durcheinander gewirbelt und gelan-

gen so an nahezu jeden Ort. Sie bleiben jedoch nicht beliebig lange in der Luft, sondern setzen sich auf allen Oberflächen ab. Was im Haushalt oder im Büro zwar ärgerlich, aber doch relativ einfach zu beseitigen ist, kann in einigen Bereichen von Industrie und Forschung fatale Folgen haben.

Ein Beispiel hierfür ist der Schreib-/Lesekopf einer ganz normalen Festplatte im Computer. Dieser Kopf schwebt bei einem Schreib- oder Lesevorgang in einer Höhe von nur 50 nm (1nm=1 Millionstel Millimeter) über der Oberfläche der Festplatte. Dieser Abstand ist 100mal geringer als der Durchmesser der kleinsten Staubpartikel in der Luft. Wenn der Kopf an ein Staubteilchen stößt und es mit-schleift, können sowohl der Kopf als auch die Festplatte mechanisch

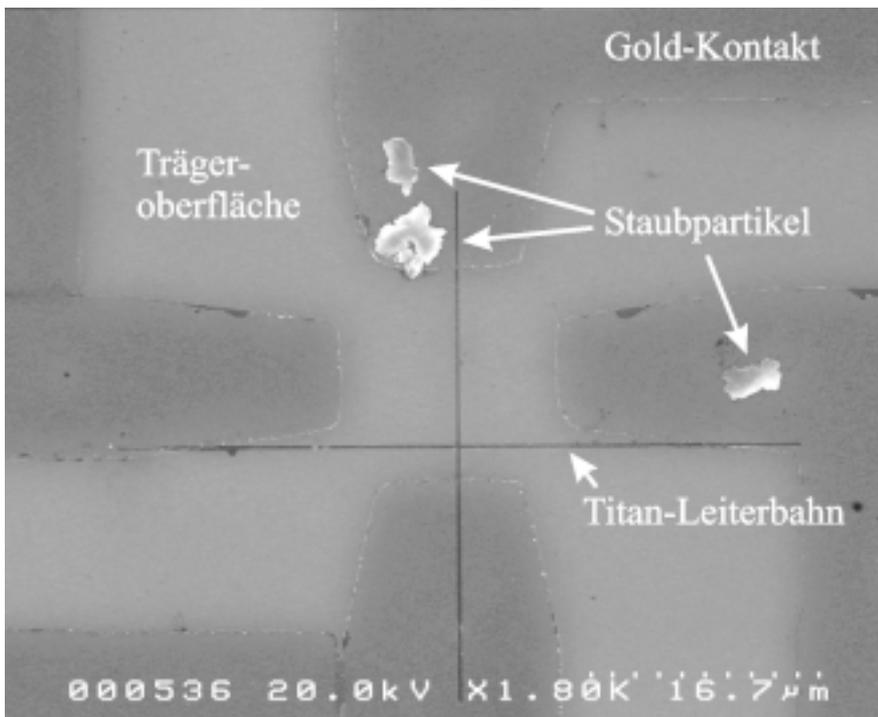


Abb. 1: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme zweier gekreuzter Titan-Leiterbahnen. Auf den Kontakten sind nach dem Herstellungsprozess Staubkörner zu liegen gekommen. Der Durchmesser dieser Körner ist ca. 10mal größer als die Breite der Leiterbahnen.

beschädigt oder sogar zerstört werden.

Verheerende Folgen kann die Anwesenheit von Staub auch bei der Herstellung von Halbleiterstrukturen wie Transistoren oder Computerprozessoren haben. Das Grundverfahren zur Herstellung solcher Elektronikbauelemente besteht im wesentlichen aus vier Arbeitsschritten: zunächst wird ein photoempfindlicher Lack auf einen Halbleiterrohling aufgebracht. In einem zweiten Schritt wird dieser Lack mit UV-Licht an vorher festgelegten Stellen belichtet. Danach werden die belichteten Stellen aus der Lackschicht herausgelöst, und die nun freiliegenden Stellen des Rohlings können ohne Auswirkungen auf die noch von Lack bedeckten Teile gezielt verändert werden. Diese vier Arbeitsschritte werden je nach Bauelement teilweise mehrere hundert Male wiederholt. Die minimale Größe der nach diesem Verfahren hergestellten funktionalen Einheiten eines Bauelementes beträgt nur noch 250 nm^1 , was immer noch 10mal kleiner als

die kleinsten Staubkörner ist. Wenn sich solche auf der Oberfläche des Halbleiterrohlings vor der Belackung bzw. während der Belichtung befinden, entstehen dadurch zwei große Probleme. Einerseits können Staubkörner große Bereiche der Rohlingoberfläche verdecken, die damit einer weiteren Bearbeitung nicht mehr zugänglich sind. Andererseits streuen Staubkörner das einfallende UV-Licht. Dadurch werden auch Bereiche des Lackes belichtet, die eigentlich die Schutzschicht im folgenden Prozessschritt darstellen sollen.

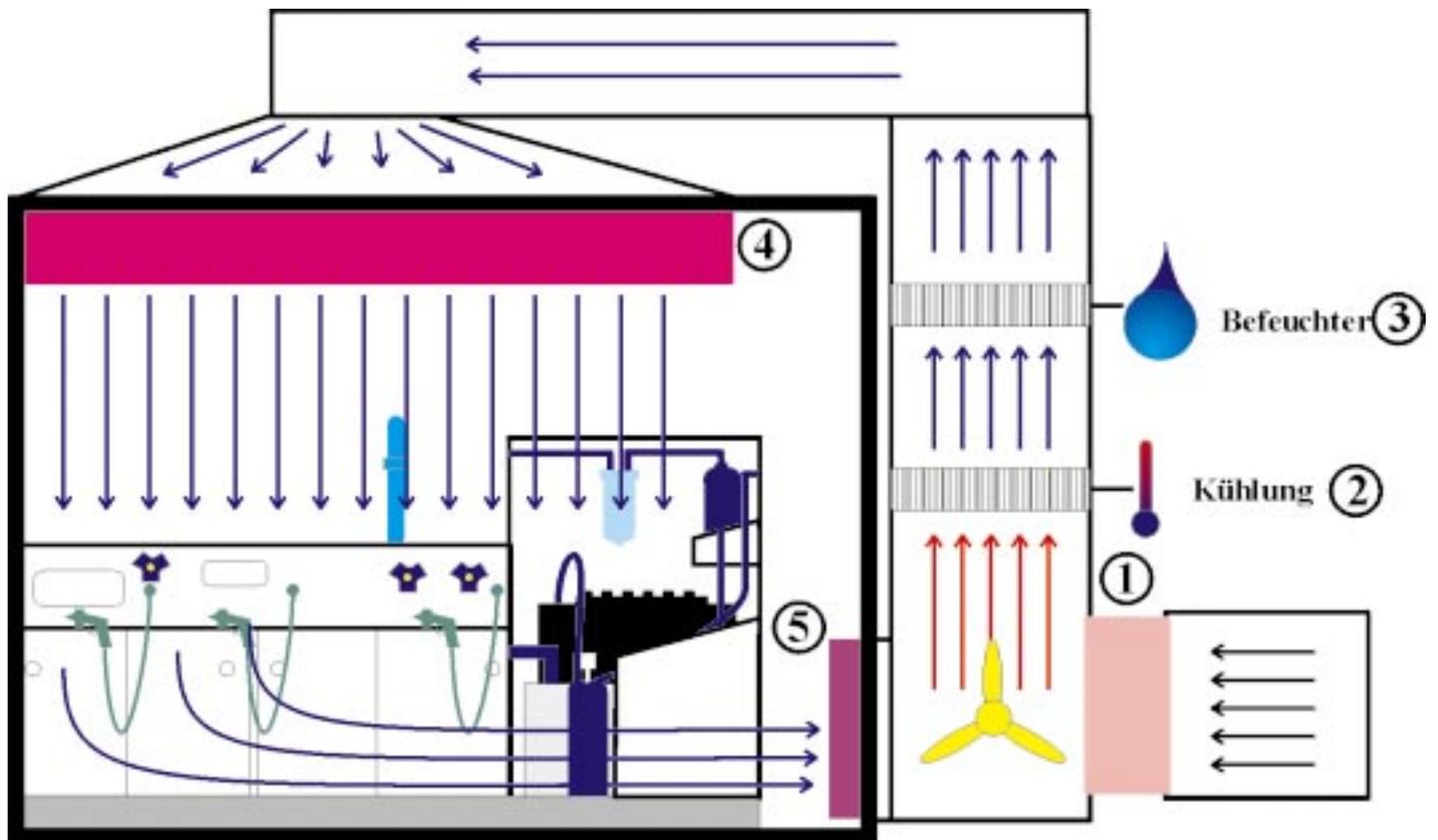
Neben der Herstellung von Elektronikbauteilen im industriellen Maßstab werden in Forschungseinrichtungen der ganzen Welt bereits heute die Bauelemente der übernächsten Generation entwickelt und bezüglich ihrer Funktionsweise und Alltagstauglichkeit überprüft, deren funktionale Einheiten um ein Vielfaches kleiner als die zur Zeit erhältlichen sind. Bei der Herstellung von Prototypen im Labormaßstab müssen selbstverständlich mindestens so hohe Anforderun-

gen an die Reinheit der Umgebung gestellt werden wie bei der Massenproduktion. Die Strukturen werden nach einem analogen Verfahren zu den Standardelektronikbauteilen in der Halbleiterindustrie hergestellt, wobei an Stelle von UV-Licht Elektronenstrahlen zur Belichtung des Lackes eingesetzt werden. Dadurch kann die Strukturgröße um das bis zu Hundertfache verkleinert werden²). Als Beispiel für die Folgen von Staub zeigt Abbildung 1 zwei gekreuzte Leiterbahnen aus Titan mit Goldkontakten, auf denen nach der Herstellung Staubpartikel zu liegen kamen. Der Durchmesser dieser Staubpartikel beträgt ungefähr $5 \mu\text{m}$ ($1 \mu\text{m} = 1$ tausendstel Millimeter), die Breite einer Leiterbahn dagegen nur $0,5 \mu\text{m}$. An Hand dieser Abbildung wird die oben beschriebene Problematik deutlich.

Unter Umgebungsbedingungen ist demnach weder eine Herstellung von Halbleiterstrukturen auf industriellem Maßstab noch von Prototypen für die Forschung sinnvoll. Durch die Anwesenheit von Kontaminationen übersteigt die Ausschussproduktion die funktionsfähigen Elemente um ein Vielfaches. Die Lösung kann also nur in einer Verlagerung der Herstellung in eine staubfreie Umgebung liegen. Diese Anforderung wird von einem Reinraum erfüllt, in welchem die Konzentration der Kontaminationen wesentlich niedriger ist als in der Umgebungsluft.

Aufbau und Funktion eines Reinraums

Ein Reinraum ist ein luftdicht versiegelter Raum, in den über ein mehrstufiges Filtersystem nahezu staubfreie Luft eingelassen wird. Abbildung 2 zeigt schematisch die Wege der Luft. An Punkt 1 wird normale Umgebungsluft in das System angesaugt und über einen Grobfilter in den eigentlichen Luftkreislauf eingespeist. Die Luft wird zuerst gekühlt



- Feinstfilter
- Luftauslass Reinraum
- Grobfilter für Aussenluft

Abb. 2: Schematischer Querschnitt durch den Reinraum im Fachbereich Experimentalphysik der Universität des Saarlandes zur Verdeutlichung des Prinzips der Reinigung der Luft. Die Pfeile zeigen den Weg der Luft durch das Reinigungssystem und den eigentlichen Reinraum.

(Punkt 2) und anschließend getrocknet bzw. befeuchtet (Punkt 3), um über ein System von Fein- und Feinstfiltern (Punkt 4) durch die Decke in den eigentlichen Raum eingelassen zu werden. Am Boden (Punkt 5) wird die Luft wieder abgesaugt, um den Reinigungsreis-

lauf erneut zu durchlaufen. Dadurch werden Kontaminationen, die von außen in den Arbeitsraum eingedrungen sind, mit der Luft wieder heraus getragen.

Durch die Klimatisierung der Luft (Punkte 2 und 3) werden immer

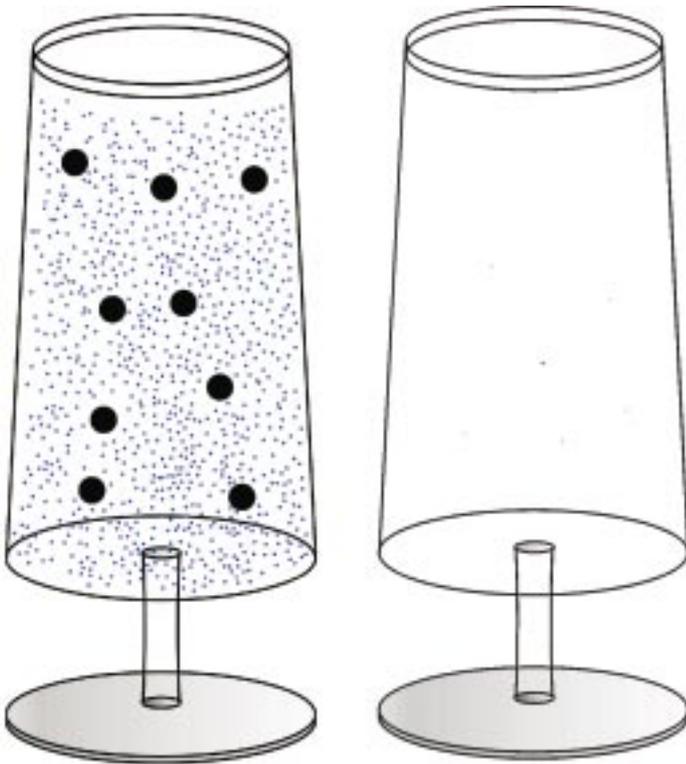
gleiche Bedingungen eingestellt – zum Beispiel 22° C und 25% Luftfeuchtigkeit.

Reinräume werden je nach Anzahl der Teilchen pro Einheitsvolumen in verschiedene Klassen eingeteilt. Aus historischen Gründen wurde das Einheitsvolumen zu 1 ft³ (Kubik-Fuß) festgelegt. Die höchstens zulässige Anzahl an Teilchen der Größe 0,5 µm gibt der Klasse ihren Namen. Tabelle 1 zeigt eine Übersicht über die verschiedenen Klassen.

Tab. 1: Maximal zulässige Anzahl der Staubteilchen einer bestimmten Größe in den verschiedenen Reinraumklassen (nach Federal Standard 209E). Die Klasse 100.000 entspricht dabei der Umgebungsluft.

Klasse	1	10	100	1.000	10.000	100.000
Anzahl Teilchen 0,5µm/ft ³	1	10	100	1.000	10.000	100.000
Anzahl Teilchen 0,3µm/ft ³	3	30	300	beliebig	beliebig	beliebig

Neuere Einteilungen ergeben aufgrund einer anderer Festlegung des Einheitsvolumens andere Teilchenzahlen, z. B. entspricht die



Partikeldurchmesser: 5 μm , 0,5 μm , 0,3 μm

Abb. 3: Vergleich der Belastung der Luft im Volumen eines Bierglases zwischen normaler Umgebungsluft (links) und der Luft in einem Klasse-100-Reinraum (rechts). Die schematische Größe der Partikel ist dabei nicht maßstabsgetreu.

Klasse 3 nach ISO 14644-1 (35 Teilchen pro m^3) der Klasse 1 nach FED STD 209E³). Die Namen nach FED STD 209E sind heute aber die gebräuchlichsten. Einen anschaulichen Vergleich zwischen der Kontamination normaler Umgebungsluft und der Luft in einem Klasse-100-Reinraum gibt Abbildung 3. Im linken Bierglas befinden sich ungefähr 870 Teilchen von 0,5 μm Größe und 9 der Größe 5 μm . Im Gegensatz dazu sind im rechten Bierglas nur noch 1 Teilchen der Größe 0,5 μm und 5 Teilchen der Größe 0,3 μm . Wenn die Anzahl der letztgenannten Teilchen im rechten Bild dargestellt werden sollte, so wäre das gesamte Volumen grün eingefärbt.

Je nach Klasse muss die Luft im Raum unterschiedlich oft vollständig ausgetauscht werden. In einem Klasse-100-Reinraum beispielsweise geschieht dies 400-600mal pro

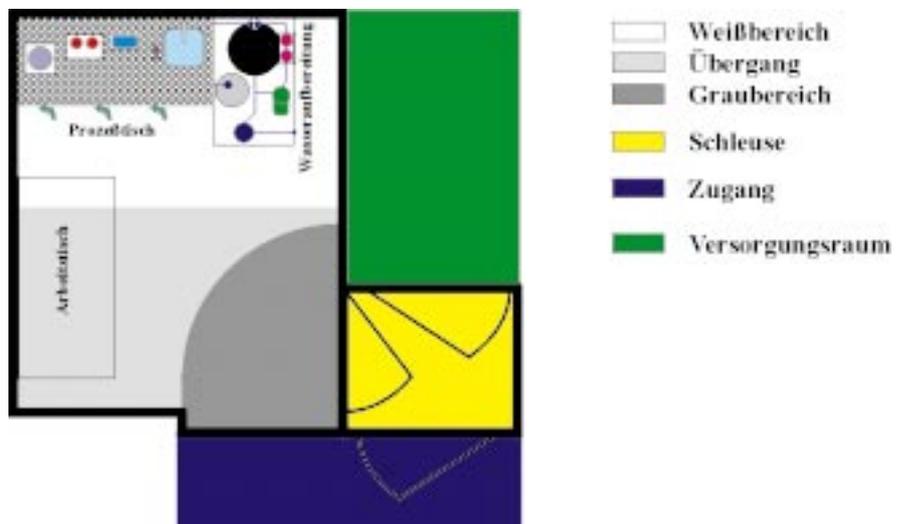
Stunde⁴), d.h. für den Reinraum der Experimentalphysik, dass pro Sekunde 6,9 m^3 Luft umgewälzt werden. Zusätzlich zur Umwälzung wird ein permanenter Überdruck im Raum aufrecht erhalten, um das Eindringen von Staubteilchen zu erschweren.

Die Reinheit der Luft ist nicht in jedem Bereich des Raumes gleich, obwohl es keine räumliche Trennung gibt. Man unterscheidet einen sogenannten Graubereich mit einer relativ hohen Staubkonzentration, einen Übergangsbereich und einen

Weißbereich, in dem die Staubkonzentration oftmals sogar niedriger ist als nach Tabelle 1 gefordert (siehe Abb. 4). Um eine Durchmischung der verschiedenen stark kontaminierten Luftvolumina aus den verschiedenen Bereichen zu verhindern, muss die Luftströmung zwischen den Punkten 4 und 5 aus Abbildung 2 laminar sein. Als laminar wird eine Strömung dann bezeichnet, wenn sie ohne Verwirbelungen ist. Diese Eigenschaft der Luftströmung wird durch spezielle Luftauslässe unterhalb der Feinstfilter, sogenannte Diffuser, gewährleistet.

Wie Abbildung 4 zeigt, gehören noch weitere Bereiche zum Reinraum, aber nicht zum eigentlichen Arbeitsbereich. Dieser kann nur über einen Zugang und durch eine Luftschleuse erreicht werden. Der Zugang ist mit einer schmutzbindenden Folie ausgelegt, an der Staubpartikel haften bleiben, die beim Durchqueren des Zugangs herabfallen. In der Schleuse erfolgt das Anlegen der Schutzkleidung, die für ein Betreten des eigentlichen Arbeitsbereiches unerlässlich ist. Die Schleuse selbst ist dabei bereits an die Luftumwälzung ange-

Abb. 4: Schematischer Grundriss des Reinraumes in der Experimentalphysik in Saarbrücken. Die einzelnen Einheiten sind zur Verdeutlichung farbig dargestellt. Innerhalb des eigentlichen Reinraumes existieren verschiedene Bereiche mit unterschiedlicher Anzahl von Kontaminationen pro Luftvolumen.



schlossen, jedoch mit weniger feinen Filtern, und ebenfalls mit einem schmutzbindendem Fußbodenbelag ausgestattet. Hinter der Schleuse befindet sich der technische Versorgungsraum mit allen zum Betrieb notwendigen Aggregaten und technischen Einrichtungen (Ventilation, Klimaanlage, Grobfiltrierung, Leitungswasser- und Prozessgaseinspeisung etc.).

Im eigentlichen Arbeitsraum beginnt der Graubereich direkt hinter der Tür zur Schleuse. Hier entstehen vor allem Kontaminationen durch das Betreten sowie durch Einschleusen von Gegenständen, deshalb befinden sich hier keine Einrichtungen. Daran schließt sich der Übergangsbereich mit einem Tisch für vorbereitende Arbeiten (Endreinigung von Geräten, Reinigung der Proben, Dokumentation der Arbeiten, etc.) an. Im eigentlichen Reinstbereich, dem Weißbereich, steht der Prozesstisch. Darin integriert sind eine Lackschleuder zum Aufbringen eines Photo- bzw. elektronenstrahl-empfindlichen Lackes sowie zwei Heizplatten zum Ausdampfen von Lösungsmitteln aus dem Lack. Zur Endreinigung der Proben gibt es weiterhin ein Ultraschallbad und drei Stickstoffgaspistolen sowie ein Waschbecken mit Handbrause. Abbildung 5 zeigt den Prozesstisch.

Auch das bei der Arbeit benötigte Wasser muss eine sehr hohe Reinheit aufweisen, damit auch auf diesem Weg keinerlei Kontamination der Proben erfolgen kann. Die Reinigung von ganz normalem Stadt- wasser erfolgt zunächst über einen Ionentauscher, dieses vorgereinigte

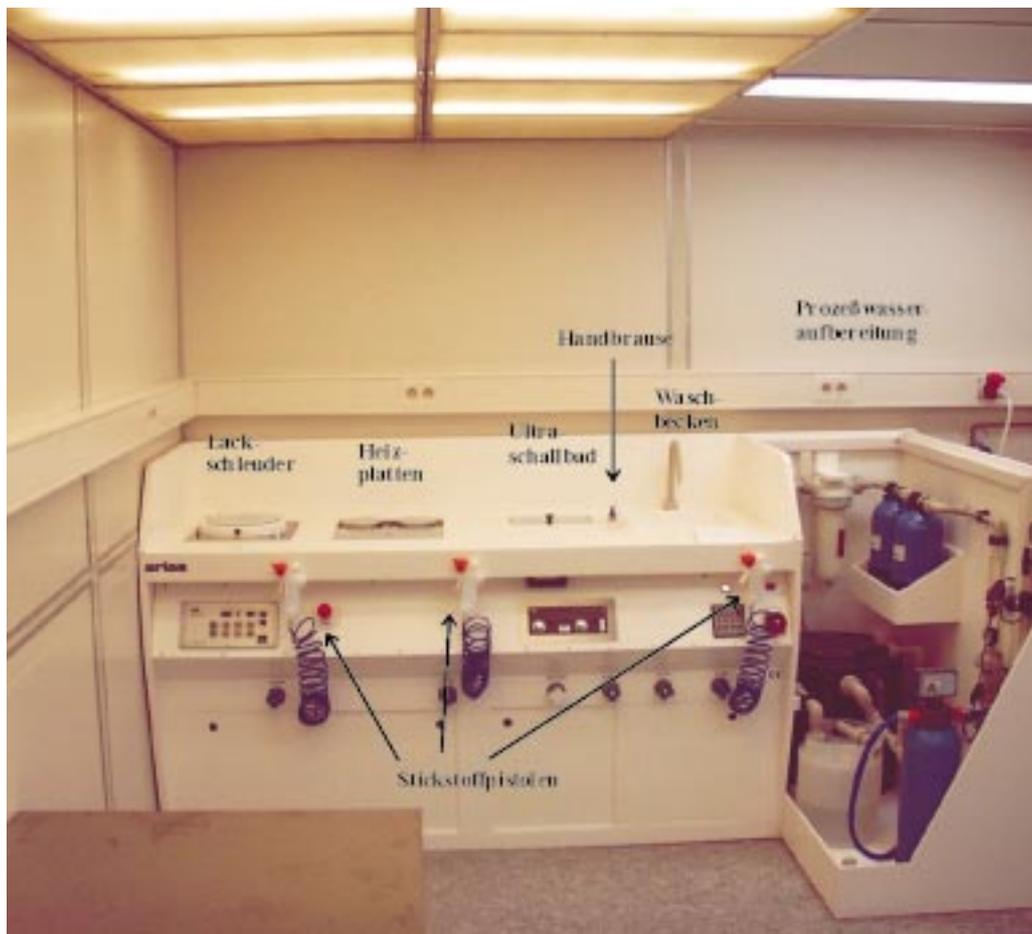


Abb. 5: Der Prozesstisch im Weißbereich des Reinraumes. Die einzelnen integrierten Geräte sind gekennzeichnet.

Wasser wird dann in einen Vorratsbehälter gepumpt. Es handelt sich nun um destilliertes Wasser, wie es zum Beispiel im Bügeleisen oder Autobatterien verwendet wird. Dieses destillierte Wasser genügt jedoch den Ansprüchen des Reinraumes noch längst nicht. Es wird aus dem Vorratsbehälter über einen Kreislauf durch zwei weitere Filterstufen in den eigentlichen Prozesstisch gepumpt, nicht benötigtes Wasser fließt zurück in den Vorratsbehälter. Die erste Filterstufe entfernt dabei die restlichen im Wasser gelösten Teilchen, die zweite hält kleinste Schwebeteilchen (in der Größe weniger als 100 nm) zurück. Im Wasser, das an den Hähnen des Prozesstisches entnommen werden kann, befinden sich jetzt keinerlei Kontaminationen mehr. Wasser, das durch Prozessschritte verunreinigt wird, fließt nicht zurück in den Kreislauf, son-

dern wird in einem Auffangbehälter gesammelt.

Vorsichtsmaßnahmen und Pflege

Bei der Arbeit im Reinraum entstehen ständig neue Kontaminationen, die verschiedenen Quellen entstammen. Zum einen haften an Laborgeräten, Hilfsmitteln und Proben Verunreinigungen, die von dort in die Luft gelangen können. Eine weitere, weitaus stärkere Belastung für die Reinheit der Umgebung stellt der Mensch dar, der sich im Reinraum aufhält und darin arbeitet.

Am einfachsten zu vermeiden sind neue Kontaminationen, die durch das Einschleusen von Laborgeräten, Hilfsmitteln und zu bearbeitenden Proben eindringen. Laborgeräte bleiben nach einmaligem Einschleu-



Abb. 6: Abblasen von Lösungsmitteln von einer Probenoberfläche nach der Endreinigung. Zum Betreten des Reinraumes muss geeignete Schutzkleidung, die nahezu die gesamte Körperoberfläche bedeckt, angelegt werden.

sen dauerhaft im Reinraum und stellen somit keine neuen Schmutzquellen mehr dar. Darüber hinaus gibt es spezielle Ausstattungsgegenstände wie fusselfreies Papier und Reinigungstücher, die ausschließlich zum Gebrauch im Reinraum hergestellt werden. Ebenso dürfen nur speziell hergestellte Reinstchemikalien verwendet werden. Vor dem Einschleusen müssen sämtliche Laborgeräte, Vorrats- und Transferbehälter sowie Proben außerhalb des eigentlichen Reinraumes vorgereinigt und anschließend im Übergangsbereich endgereinigt werden. Durch diese Maßnahmen kann eine erneute Verunreinigung durch diese Quellen nahezu vermieden werden.

Der weitaus größte Teil neuer Kontaminationen geht vom Reinraumpersonal selbst aus. Zum einen kann ganz normaler Staub von

der Haut und aus den Haaren in die Umgebung gelangen, zum anderen verliert der Mensch ständig mikroskopisch kleine Haut- und Haarschuppen. Hinzu kommen weiterhin kleine Flüssigkeitströpfchen aus der Atemluft. Alle diese Verschmutzungen können nahezu vermieden werden, wenn entsprechende Verhaltensregeln beachtet werden.

Das Eindringen von Staub- und Haut- oder Haarteilchen in die Reinraumumgebung kann durch die Benutzung einer geeigneten Schutzkleidung verhindert werden, die im Idealfall die gesamte Körperoberfläche abdeckt (siehe Abb. 6). Diese Schutzkleidung besteht aus einem luftdichten Overall mit Kapuze, Überschuhen, einem Mundschutz und Handschuhen. Beim Anlegen der Schutzkleidung muss eine feste Reihenfolge eingehalten werden⁵⁾, um die oben genannten Kontaminationsquellen durch den Anzug ausschalten zu können.

Vor dem Betreten des Reinraumes werden sämtliche dort nicht benötigten Gegenstände (Schmuck, Uhren etc.) einschließlich der Straßenschuhe außerhalb des Zugangsbereiches abgelegt. Danach wird die Schleuse mit der Schutzkleidung und allen einzuschleusenden Gegenstände betreten. Nachdem die Tür zum Zugangsbereich wieder geschlossen ist, wird die

Schutzkleidung angelegt. Erst danach darf der eigentliche Reinraum betreten werden.

Da beim Arbeiten eine Vielzahl von Verhaltensvorschriften zu beachten sind, ist der Zutritt nur geschultem Personal gestattet. Um eine Verwirbelung der Luft zu vermeiden, müssen schnelle Bewegungen vermieden werden. Auch erkältete oder an Heuschnupfen leidende Personen sind wegen Husten oder Niesgefahr ausgeschlossen. Informationen zum Verhalten in den sensiblen Bereichen des Reinraumes haben verschiedene Dachverbände zusammengestellt⁶⁾.

Selbst bei Beachtung aller Regeln lässt sich ein gewisser Grad an Kontamination nicht vermeiden. In regelmäßigen Abständen muss deshalb eine Reinigung sämtlicher Oberflächen des Reinraumes sowie des Zugangs und der Schleuse erfolgen. Dazu werden spezielle Reinigungsmittel verwendet, die sowohl den Staub von den Oberflächen entfernen als auch einen antistatischen Schutzfilm hinterlassen. In regelmäßigen Abständen muss die gesamte Filteranlage überprüft und gegebenenfalls ein Austausch der Filter vorgenommen werden. Bei diesen Arbeiten sowie bei der Wartung und Instandhaltung der technischen Versorgungseinrichtungen wird der Fachbereich von der Technischen Betriebsdirektion der Universität unterstützt.

Arbeitsabläufe im Reinraum

Vor dem Betreten des Reinstbereiches werden die zu bearbeitenden Proben vorgereinigt. Es handelt sich dabei um Trägermaterialien, auf die ein elektronenstrahlempfindlicher Lack aufgebracht werden soll. Nach der Vorreinigung werden die Proben in Transferbehälter verpackt. Darüber hinaus erfolgt eine Vorreinigung verschiedener Labor-

geräte und Chemikalienbehälter, die ebenfalls mit eingeschleust werden sollen. Im Reinraum werden alle eingeschleusten Gegenstände auf dem Arbeitstisch ein zweites Mal gereinigt, Laborgeräte und Hilfsmittel können jetzt verwendet werden. Die Proben werden zusätzlich im Ultraschallbad durch ein Lösungsmittel endgereinigt, dieses wird anschließend mit Stickstoff von der Probenoberfläche abgeblasen (siehe Abb. 6). Erst jetzt ist gewährleistet, dass sich keine Kontaminationen mehr auf der Oberfläche befinden und der elektronenstrahlempfindliche Lack aufgebracht werden kann. Dieser wird mittels einer Pipette auf die Oberfläche getropft und mit Hilfe der Lackschleuder gleichmäßig über die gesamte Oberfläche verteilt. Durch Erhitzen der Proben auf einer Heizplatte wird anschließend das restliche Lösungsmittel aus der Lackschicht entfernt. Um eine Verunreinigung dieser Schicht vor der Weiterbearbeitung mit einem Elektronenstrahl zu verhindern, werden die Proben in saubere Transferbehälter verpackt.

Vor dem Verlassen des Raumes müssen die Oberflächen des Arbeits- und Prozesstisches wieder gereinigt werden. Es erfolgt eine Kontrolle des Füllstands im Wasser auffangbehälter und gegebenenfalls eine Entleerung über Transferbehälter. Der angefallene Festmüll (Papier, Reinigungstücher, Einmallaborgeräte, entleerte Chemika-

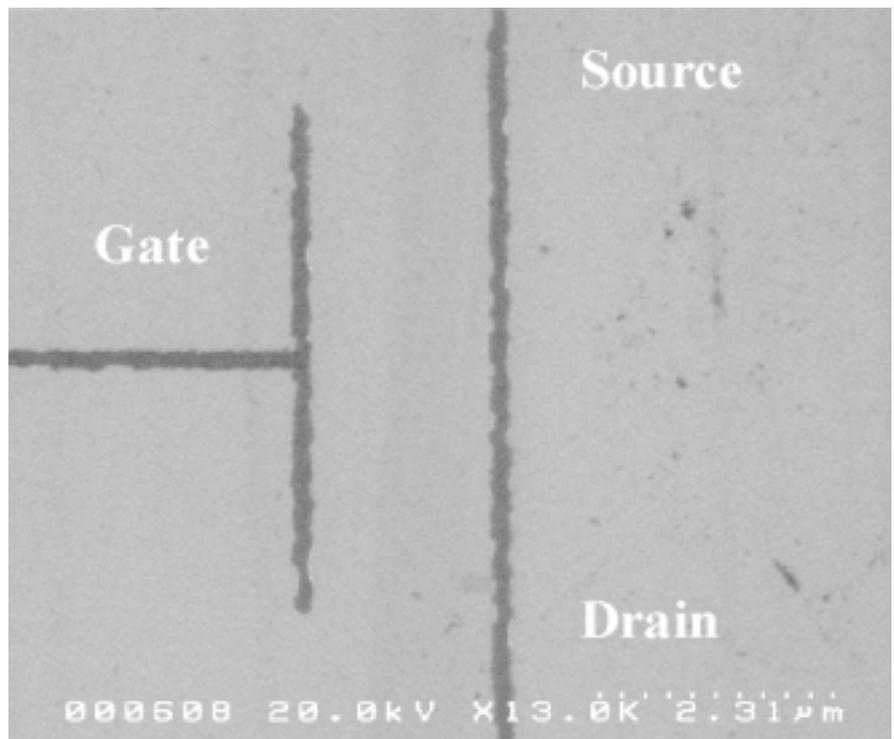


Abb. 7: Metallische Leiterbahnen aus Titan, die als Vorstruktur zur Herstellung eines SET-Transistors dienen sollen.

lienbehälter) wird ebenfalls in Transferbehältern verpackt.

Auf dem Weg in ein neues Zeitalter der Bauelementetechnik

Bei der Herstellung kleiner und kleinster Strukturen gibt es kritische Prozessschritte, die sinnvoll nur unter Reinraumbedingungen durchgeführt werden können. So hat die Halbleiter- und Computerindustrie die industrielle Massenfertigung von Produkten wie Transistoren oder Computerfestplatten in

Reinräume verlegt. Der Produktionsausschuss wird so auf ein Minimum reduziert, wodurch Computer mit Rechenleistungen, die vor zehn Jahren noch Großanlagen vorbehalten waren, erschwinglicher und dadurch für viele Anwendungen nutzbar wurden. Der explosionsartige Anstieg der Leistungsfähigkeit von Computern hat seine eigentliche Ursache jedoch nicht in der Massenfertigung der Prozessoren, sondern in der fast ebenso rasanten Verkleinerung der funktionalen Einheiten. Je kleiner eine solche Einheit ist, desto mehr davon können in einen Prozessor integriert werden und desto schneller können sie arbeiten. Dieser notwendigen Miniaturisierung setzt die Physik jedoch natürliche Grenzen, die inzwischen fast erreicht sind. So müssen neue Lösungen zur weiteren Verkleinerung gefunden werden. Eine vielversprechende Lösung liegt in der Ausnutzung anderer physikalischer Effekte.

Eine Möglichkeit ist die Ausnutzung sogenannter Quan-

Arbeitsgruppe Rastersondentechnologie

Die Autoren sind Mitglieder der Arbeitsgruppe Rastersondentechnologie in der Fachrichtung Experimentalphysik der Universität des Saarlandes in Saarbrücken unter der Leitung von Professor Dr. U. Hartmann. Ihr Arbeitsgebiet umfasst die Herstellung und Charakterisierung mesoskopischer Strukturen unter Verwendung von Elektronenstrahlolithographie und Rastersondentechniken. In der Arbeitsgruppe werden diese ebenfalls zur Charakterisierung und Modifikation biologischer Materialien eingesetzt. Weiterhin werden Fragestellungen aus der Informationstechnologie, z. B. zur Prozessierung von halbleitenden Materialien wie Silizium oder Galliumarsenid, von Hochtemperatursupraleiterschichten und zum Magnetismus dünner metallischer Schichten bearbeitet. Ein weiterer Teil der Arbeitsgruppe beschäftigt sich mit der Herstellung, Charakterisierung und Anwendung von höchstauflösenden Magnetfeldsensoren.

teneffekte. Diese beruhen auf den Gesetzen der Quantenmechanik, die eine Beschreibung der Eigenschaften kleinster Teilchen (z. B. Elektronen) und Strukturen liefert. Solche Strukturen haben den Vorteil, dass sie um so besser funktionieren, je kleiner sie sind.

Ein typischer Quanteneffekt ist der Tunneleffekt, der sich wie folgt veranschaulichen lässt: Ein Kind wirft einen Ball gegen eine Wand. Der Ball wird jedesmal von der Wand zurückspringen und das Kind kann ihn wieder auffangen. Bei einer quantenmechanischen Betrachtungsweise würde das Kind anstatt eines Balles ein Elektron zum Spielen nehmen. Das Kind wirft also das Elektron gegen besagte Wand (in der Quantenmechanik ist diese Wand ein sogenannter Potentialwall). Das Elektron wird von dieser zurückspringen bzw. - physikalisch gesehen - reflektiert. Diese Analogie zwischen der makroskopischen Welt des Kindes mit dem Ball und der quantenmechanischen Welt ist noch nicht ganz korrekt. So wird nach den Gesetzen der Quantenmechanik das Elektron nicht jedesmal von der Wand reflektiert, sondern es hat auch die Möglichkeit, durch die Wand hindurchzutreten, es durchtunnelt die Wand. Dieser Tunneleffekt wird um so wahrscheinlicher, je dünner und niedriger die Wand ist. Dies ist nur einer von vielen Effekten, bei denen die Quantenmechanik von der klassischen Vorstellungswelt abweicht. Quanteneffekte kommen immer dann zum Tragen, wenn die geometrischen Abmessungen in den Bereich charakteristischer Längen gelangen. Eine solche charakteristische Länge ist z. B. der Weg, den ein Elektron in einem Festkörper (z. B. in einem Kupferdraht) zurücklegt, ohne dass sein Bewegungszustand durch eine Kollision mit einem Baustein des Kabels oder einem anderen Elektron geändert wird. Diese Länge beträgt im Kupferkabel nur we-

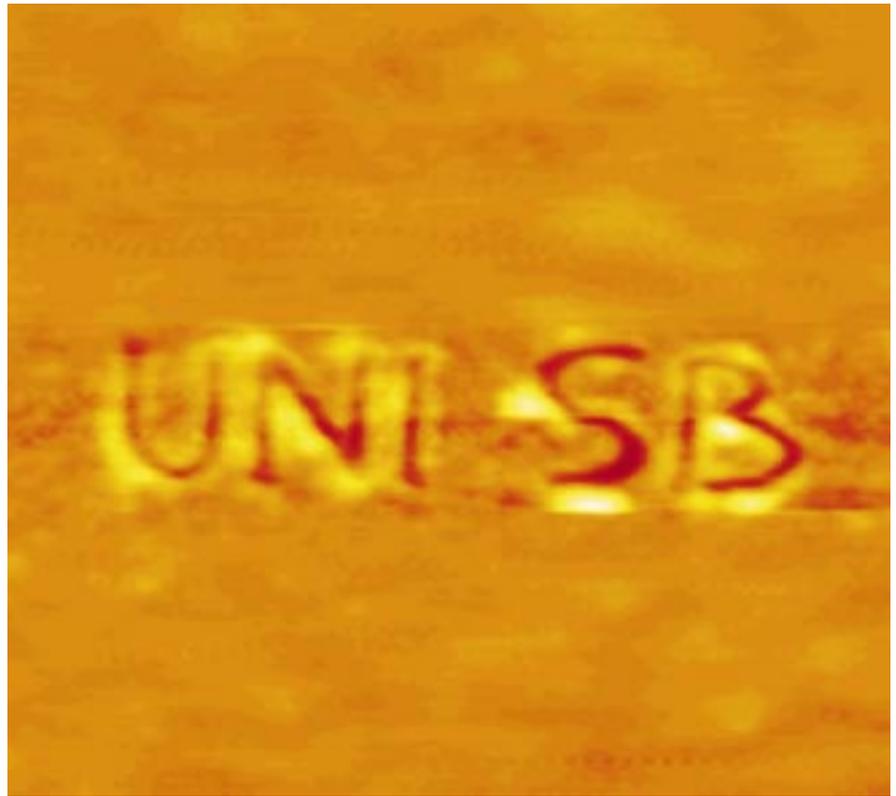


Abb. 8: Der Schriftzug „UNI SB“ in einer Goldoberfläche. Die einzelnen Buchstaben haben eine Höhe von 200 nm und eine Breite von 100 nm. Durch Kratzen mit der SONDENSPIZELLE eines Rasterkraftmikroskopes lassen sich beliebige Strukturen herstellen. (Zur Funktionsweise eines Rasterkraftmikroskopes vgl. 7), 8))

nige Atomabstände. Anhand zweier typischer Bauelemente kann die Ausnutzung solcher Effekte für eine breite Anwendung beschrieben werden.

Ein Bauelement, dessen Funktionsweise nur auf der Basis von Quanteneffekten verstanden werden kann, ist der sogenannte SET-Transistor (*Single Electron Tunneling*, Einzelelektronentunneln). Der beschriebene Tunneleffekt spielt hier die entscheidende Rolle. Man kann sich einen Transistor vorstellen als einen Schalter, der drei Anschlüsse hat: *Source*, *Drain* und *Gate*. Abhängig von der Spannung am Anschluss *Gate*, kann ein Strom zwischen *Source* und *Drain* fließen oder nicht. Bei heutigen Transistoren besteht dieser Strom aus etwa 100.000 Elektronen. Der SET-Transistor arbeitet völlig analog. Der Unterschied zum konventionellen Transistor besteht darin, dass zwischen den beiden Anschlüssen *Source* und

Drain eine kleine Insel durch Tunnelbarrieren von den eigentlichen Zuleitungen getrennt ist. Diese Insel muss so klein sein, dass ein Elektron, das sich auf der Insel befindet, alle anderen davon abhält, ebenfalls auf die Insel zu gelangen. Über die Spannung am Anschluss *Gate* kann dieser Effekt gesteuert werden. Die Elektronen können die Insel immer nur eines nach dem anderen durchqueren, d. h. der Elektronenstrom durch den SET-Transistor wird von einzelnen Elektronen getragen. Daher stammt der Name des Transistors. Abbildung 7 zeigt einen Rohling zur Herstellung eines solchen Transistors. Die beiden gegenüberliegenden Anschlüsse werden zu *Source* und *Drain*, das T-förmige Stück daneben ist das *Gate*.

Als zweites Beispiel sei der SQUID (*Superconducting Quantum Interference Device*, supraleitender Quanteninterferenz-Detektor) ge-

nannt. Hier spielt ebenfalls der Tunneleffekt die entscheidende Rolle: der SQUID besteht aus einer ringförmigen Struktur aus supraleitendem Material, die an zwei gegenüberliegenden Stellen durch Tunnelbarrieren unterbrochen ist. Diese Ringstruktur wird über zwei Zuleitungen elektrisch kontaktiert. Wenn sich die Struktur in einem Magnetfeld befindet, zeigen sich charakteristische Muster im Strom, der durch das Bauelement fließt. Diese Muster sind abhängig von der Stärke des Magnetfeldes. Durch genaues Vermessen der Muster lässt sich die Stärke des Magnetfeldes sehr genau bestimmen.

Bauelemente auf der Basis von Quanteneffekten müssen um ein Vielfaches kleiner sein als die heutigen Strukturen. Dadurch entsteht ein weiteres Problem, das kurz angesprochen werden soll. Die konventionelle Lithographie, wie sie heute zur Herstellung von Elektronikbauelementen verwendet wird, ist - wie die Bauelemente selbst - an ihrer physikalischen Grenze angekommen. In diesem Bereich besteht die Notwendigkeit, neue Verfahren zu entwickeln, die die Herstellung von Quantenbauelementen ermöglichen. Allein das theoretische Wissen um die Effekte und die Vision, wie sie eingesetzt werden können, stellen noch keine Lösung des Miniaturisierungsproblems dar. Die kontinuierliche Weiterentwicklung der konventionellen Lithographietechniken findet zwar statt, wird aber keine dauerhafte Lösung bringen (siehe dazu den Artikel von R. Sietmann¹⁾).

Durch die Entwicklung der Raster-sondenmikroskope hat sich eine faszinierende Möglichkeit erschlossen, Oberflächen gezielt zu verändern^{7), 8)}, wobei sogar die Position einzelner Atome in oder auf der Oberfläche manipuliert werden kann^{9), 10)}. Damit steht auch eine Möglichkeit zur Herstellung von Prototypen neuer Quantenbauele-

mente zur Verfügung. Diese erfolgt in der Saarbrücker Arbeitsgruppe üblicherweise in zwei Schritten. Unter Zuhilfenahme der konventionellen Lithographietechniken werden Rohlinge hergestellt, die anschließend weiter verkleinert werden. Diese Verkleinerung kann z. B. durch Kratzen mit der Sonden spitze eines Rasterkraftmikroskops erfolgen (siehe Abb. 8).

An Hand dieser noch kleineren Strukturen können sowohl der Elektronenstrom als auch äußere Einflüsse auf Strom untersucht werden. Die Arbeitsgruppe von Professor Dr. Uwe Hartmann beschäftigt sich unter anderem mit solchen mesoskopischen Transportphänomenen, vor allem durch metallische und magnetische Strukturen.

Ausblick

Durch die Inbetriebnahme des Reinraumes in der Experimentalphysik der Universität des Saarlandes erschließen sich völlig neue Möglichkeiten zur Herstellung ultrakleiner Strukturen. Den Mitarbeitern der Arbeitsgruppe wird damit ein geeignetes Arbeitsumfeld zur Verfügung gestellt, um quantenmechanische Phänomene auf dem Gebiet des elektronischen Transports durch ultrakleine Strukturen zu untersuchen. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse können anschließend auf ihre Nutzbarkeit für zukünftige Bauelementgenerationen überprüft werden. Neben der Möglichkeit zur Herstellung solcher Strukturen wird gleichzeitig die Ausschussproduktion auf ein Minimum gesenkt, wodurch wissenschaftliche Ergebnisse schneller erzielt werden können. Durch die verbesserte wissenschaftliche Infrastruktur erschließen sich neue Felder in der Hochtechnologie, was nicht nur für Kooperationen mit der Industrie, sondern auch bei der Vergabe zukünftiger Forschungsprojekte von großer Bedeutung sein wird.

Textverweise und weiterführende Literatur

- 1) R. Sietmann, *c't* 2/1999, 82 (1999)
- 2) D. R. S. Cummings, S. Thoms, S. P. Beaumont und J. M. R. Wagner, *Appl. Phys. Lett.* 68, 322 (1996)
- 3) Institute for Environmental Sciences and Technology, Mount Prospect, Illinois, 60056, USA
- 4) D. Faulkner, *CBS Newsletter* 11 (1996); ebenso unter <http://eande.lbl.gov/CBS/NEWSLETTER/NL11/cleanrooms.html>
- 5) B. Whyte, *Cleanroom Disciplines and entry procedures for personnel* (Scottish Society for Contamination Control, ISBN: 0 953122 12); ebenso unter: <http://www.s2c2.co.uk/cdepp.html>
- 6) Für einen Überblick siehe: <http://www.iccs.org/secindex.html>
- 7) U. Hartmann, *Magazin Forschung* 2/96 (1996)
- 8) U. Hartmann, *Magazin Forschung* 1/97 (1997)
- 9) D. Eigler et al., *Physics Today* 46, 17 (1993)
- 10) D. Eigler et al., *Nature* 344, 524 (1990)
- 11) A. Liebermann, *Contamination Control and Cleanrooms* (Reinhold van Nostrand, New York, USA, 1992)
- 12) DL. Toliver (Hrsg.), *Handbook of Contamination Control in Microelectronics* (Noyes Publications, Park Ridge NJ, USA, 1988)

Weiterführende Literatur ist unter anderem sowohl unter den oben angegebenen URLs und unter 'http://www.crc.de' zu finden als auch über die Scottish Society for Contamination Control zu beziehen.

E-Mail der Verfasser:
 c.stief@mx.uni-saarland.de
 axgr0000@stud.uni.de