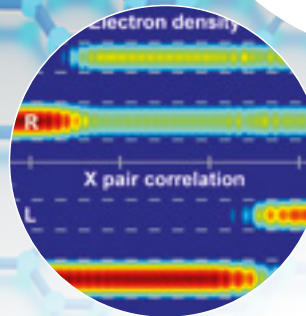
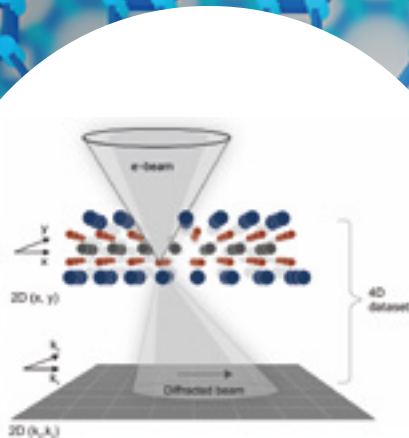
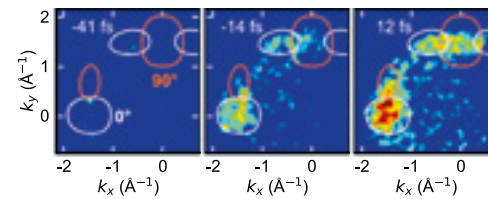
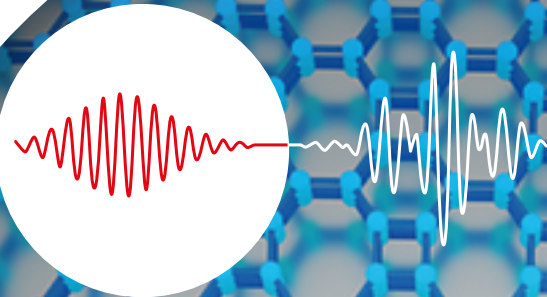




SFB 1083

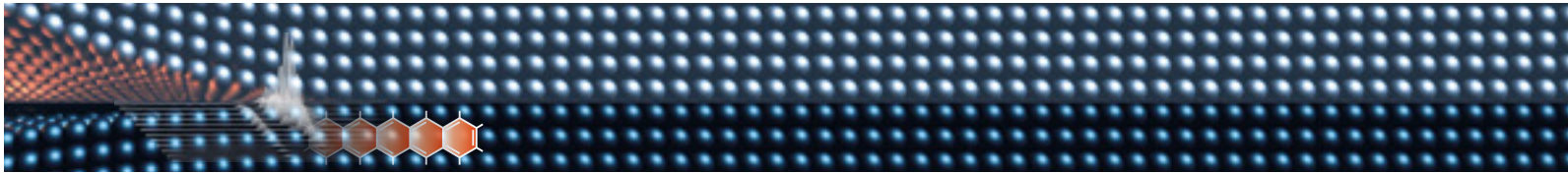
Struktur und Dynamik
innerer Grenzflächen



Faszination Grenzfläche

Struktur und Dynamik
innerer Grenzflächen

Inhalt



Faszination Grenzfläche	4
Wissenschaftliche Highlights	8
Projektbereich A	
Entwicklung und Charakterisierung von Modellsystemen	12
Projektbereich B	
Ladungstransfer und Optodynamik	34
Projektleitende der beendeten Projekte	48
Chemikum Marburg im SFB 1083 – Wir gehen an die Grenze	52
Optimale Förderung für hochqualifizierte Forscherinnen und Forscher	54
Internationale Partner	56
Infrastruktur – eine Übersicht	58
Projektübersicht	62
Zahlen & Fakten	66
Impressum	68

Faszination Grenzfläche

Elektronische Bauteile basieren darauf, dass an ihren inneren Grenzflächen – dort, wo zwei unterschiedliche Materialien aufeinanderstoßen – die Ladungsträger entweder getrennt oder aber darüber hinweg transportiert werden. Doch wie funktioniert das genau auf mikroskopischer Skala? Wie lassen sich die physikalischen und chemischen Prozesse gezielt steuern? In einem Sonderforschungsbereich wollen Forschende aus Physik und Chemie gemeinsam die „Struktur und Dynamik innerer Grenzflächen“ von Grund auf verstehen lernen. Ihre Erkenntnisse dienen langfristig dazu, die Leistungsfähigkeit der Bauteile zu verbessern und Materialien mit neuen opto-elektronischen Eigenschaften zu entwickeln.

Die Miniaturisierung nimmt immer weiter zu: Milliarden von Transistoren finden auf Fingernagelgröße Platz. Die typischen Abmessungen von Transistorstrukturen liegen dabei bei wenigen Nanometern (Millionstel Millimeter). Damit steigen auch die Anzahl und die Bedeutung innerer Grenzflächen. Denn ihre optischen und elektronischen Eigenschaften bestimmen ganz wesentlich die Funktions- und Leistungsfähigkeit des Bauteils. Den deutsch-amerikanischen Physiknobelpreisträger Herbert Kroemer veranlasste das zur prägnanten Feststellung: „Die Grenzfläche ist das Bauteil.“

Gleichzeitig tritt an Grenzflächen eine Vielzahl neuer Phänomene auf, die ein weites Feld für die erkenntnisorientierte Grundlagenforschung bieten. Es können sich neuartige elektronische Zustände ausbilden, die weder eine Entsprechung im Volumen der beiden Festkörper noch in den Atomen haben, aus denen sie aufgebaut sind. Viele elementare Anregungen wie Elektron-Loch-Paare (Exzitonen) oder Gitterschwingungen (Phononen) haben an der zweidimensionalen Grenzfläche völlig andere Eigenschaften als im dreidimensionalen Volumen. Genauso spannend sind die Strukturfragen: Wann verläuft die Grenzfläche zwischen zwei hochgeordneten Materialien atomar abrupt, wann bildet sich eine Art Mischphase aus, und kann man das steuern?



Prof. Dr. Kerstin Volz und Prof. Dr. Michael Gottfried

Der Forschungsbedarf ist daher groß. Denn nicht nur verlangt die fortschreitende Miniaturisierung herkömmlicher Bauelemente ein besseres Verständnis der Grenzflächenprozesse. Weitere Materialien kommen hinzu: Leuchtdioden, Displays und Solarzellen, die auf organischen Materialien basieren, oder eines Tages vielleicht sogar Logikbausteine, bei denen einzelne Moleküle an einer Grenzfläche die Schaltvorgänge steuern. Hier treffen dann auch mit der Physik und der Chemie zwei wissenschaftliche Disziplinen aufeinander.

„Nur gemeinsam können die Forscherinnen und Forscher beider Fachrichtungen die Grenzflächen vielfältiger Materialkombinationen – anorganisch/organisch, Metall/Polymer, oder innerhalb von Halbleiter-Heterostrukturen und Atomlagen-dünnen zweidimensionalen Materialien – herstellen, charakterisieren und untersuchen“, sagt Prof. Kerstin Volz. Die Physikerin ist seit 2021 die Sprecherin des im Jahr 2013 eingerichteten Sonderforschungsbereichs SFB 1083 „Struktur und Dynamik innerer Grenzflächen“, der die physikalischen und chemischen Prozesse in Grenzflächen aufdecken soll.

Offene Fragen – Langfristige Forschung

Die Untersuchung der Grenzflächen gilt als eine der drängendsten Fragestellungen der aktuellen Festkörperphysik. „Grenzflächen sind erstens komplex. Und zweitens sind viele leistungsfähige experimentelle Untersuchungsmethoden der Festkörperphysik und der Oberflächenphysik nicht auf innere Grenzflächen übertragbar. Es ist schwierig, die schwachen Signale der Grenzflächen in den Experimenten

gegenüber dem Volumensignal herauszufiltern. Daher muss diese Forschung langfristig angelegt werden, wenn sie nachhaltige Erfolge erzielen soll“, betont Experimentalphysikerin Kerstin Volz und gibt ein Beispiel: „Es hat nahezu ein Jahrhundert gedauert, das Transmissionselektronenmikroskop dahingehend weiter zu entwickeln, dass einzelne Atome in Proteinen heutzutage sichtbar gemacht werden können.“

An dem auf zwölf Jahre von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) angelegten SFB beteiligen sich insgesamt 20 Forschergruppen aus der Physik und Chemie. Ins Leben gerufen wurde der SFB unter Leitung von Prof. Ulrich Höfer zunächst als Zusammenschluss von Marburger Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern, die sich zum Ziel gesetzt haben, den kleineren Standort durch die Zusammenarbeit in einem speziellen Themengebiet im Vergleich zu größeren Städten zu stärken. In der zweiten und dritten Förderperiode haben sich nun weitere Gruppen aus Gießen, ein Zusammenschluss von Oberflächenphysikern im Forschungszentrum Jülich und je eine Theoriegruppe aus Münster und Leipzig hinzugesellt. Rund 80 Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler steuern ihre Expertise in der chemischen Synthese, Halbleiterphysik, Oberflächenphysik, Strukturanalyse, Laserspektroskopie und physikalischen wie chemischen Theorie bei. Bei der Auswahl der teilnehmenden Gruppenleitenden wurde dabei auch darauf geachtet, neben den renommierten Professoren auch fünf Nachwuchswissenschaftlerinnen und Nachwuchswissenschaftlern die Möglichkeit zu geben, ihre wissenschaftliche Karriere durch ihren Beitrag voranzubringen.

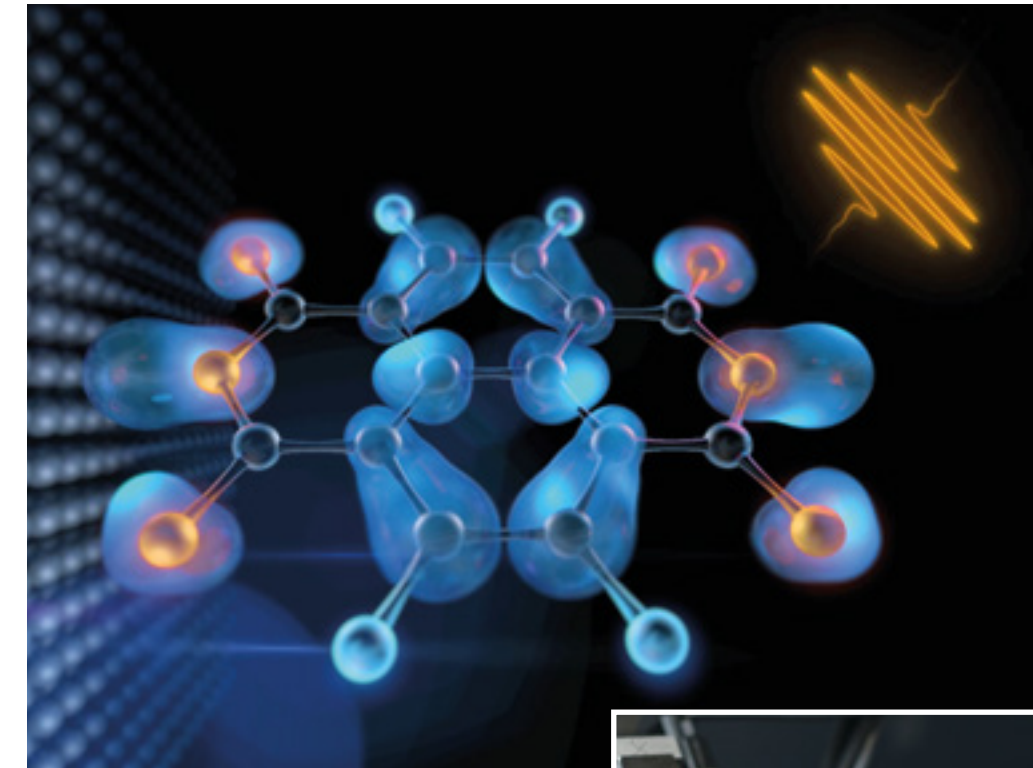


Struktur und Dynamik innerer Grenzflächen

Der SFB gliedert sich in zwei Teile. Im **Arbeitsgebiet A** entwickeln und charakterisieren elf Projekte Modellstrukturen der Schichtsysteme. Da die Grenzflächen in realen Bauteilen oft nicht genau definiert sind, stellen die Forschenden idealisierte, speziell präparierte Modellschichtsysteme her und charakterisieren diese auf atomarer Ebene. Die Forschenden aus der Synthesechemie stellen beispielsweise wohldefinierte Clusterbausteine oder organische Moleküle bereit, während die Forschenden aus der Physik hochgenau abgeschiedene Halbleiter-Heterostrukturen präparieren, die im Elektronenmikroskop geprüft werden.

Im **Arbeitsgebiet B** untersuchen weitere sieben Projekte die opto-elektronischen Eigenschaften dieser Modellsysteme. Im Blick steht insbesondere der Ladungstransfer über die Grenzfläche. Die Methoden der Wahl kommen aus der optischen Spektroskopie. Mit ausgeklügelten Messverfahren lassen sich die schwachen Signale der Grenzschicht detektieren. Teilweise erlauben sie eine Zeitauflösung im Bereich von Femtosekunden (Millionstel einer Milliardstel Sekunde).

Der SFB verknüpft in seinen Projekten die chemische Synthese der Grenzflächenmaterialien, den Aufbau der Schichten, die spektroskopischen Untersuchungen und die theoretische Modellierung. „Diese enge Verknüpfung und Rückkopplung von Experiment und Theorie ist für Marburg einmalig und hat es uns erlaubt, in der dritten Förderphase den Fokus auch weiter auf Bauelementanwendungen unserer Forschung zu legen“ betont Prof. Michael Gottfried, der stellvertretende Sprecher des SFB. Mit Investitionen in die Forschungsinfrastruktur und einer gezielten Personalstrategie hat die Universität ihr Profil in der Grenzflächenforschung geschärft.



Hinzu kommt, dass erst in jüngster Zeit die experimentellen Techniken sowie die Theoriebildung weit genug fortgeschritten sind, um die Grenzflächen auf atomarer Skala untersuchen zu können. Dazu zählen beispielsweise die Transmissionselektronenmikroskopie für die Strukturaufklärung in Grenzflächen und optische Methoden, um die elektronischen Prozesse tief im Inneren eines Festkörpers aufklären zu können. Für die Forscherinnen und Forscher um Kerstin Volz und Michael Gottfried ist daher die Zeit gekommen, die offenen Fragen der Grenzflächenphysik und -chemie zu klären.

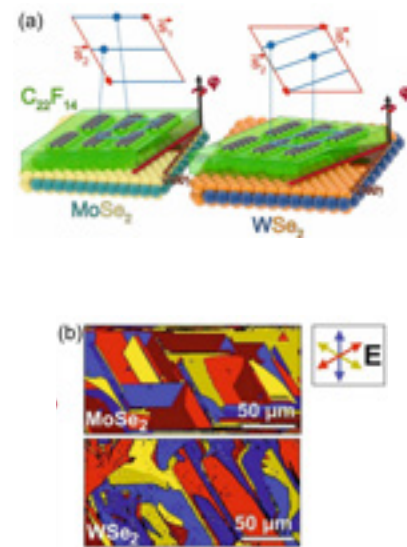


Wissenschaftliche Highlights

Acht Jahre nach seinem Start im Jahr 2013 geht der SFB 1083 in die zweite Verlängerung. Mehr als 350 wissenschaftliche Publikationen sind erschienen. Die PIs und ihre Forschung haben sich weiterentwickelt. Forschungsschwerpunkte und -orte haben sich verschoben: PIs kamen neu hinzu oder erhielten einen Ruf, blieben an der Universität Marburg oder wechselten den Standort. Wieder wurden etliche Projekte erfolgreich abgeschlossen, neue wurden in der dritten Förderperiode aufgelegt. Hier sollen fünf Highlights aus Forschung und Methodenentwicklung die Fortschritte illustrieren.

Hybridsysteme mit hohem Ordnungsgrad

Wie ordnen sich organische Moleküle auf Oberflächen an, wenn sie keine wohldefinierte chemische Bindung mit der Unterlage, dem Substrat, ausbilden? Das haben die Arbeitsgruppen um den Physiker Gregor Witte und den Chemiker Ulrich Koert an Modellsystemen untersucht. Hybridsysteme aus anorganischen Trägersubstraten und organischen Molekülschichten sollen das Beste aus zwei Welten vereinen: Anorganische Materialien lassen sich gut ansteuern, prozessieren und in Bauelemente packen. Moleküle hingegen können für spezifische Funktionen leicht maßgeschneidert werden, etwa für organische Solarzellen oder Sensoren. Heißer Kandidat für zukünftige opto-elektronische Bauelemente sind aromatische organische Halbleiter wie etwa Pentacen auf 2D-Materialien des Typs Übergangsmetall-Dichalkogene (TMDC, *engl. transition metal dichalcogenide*).

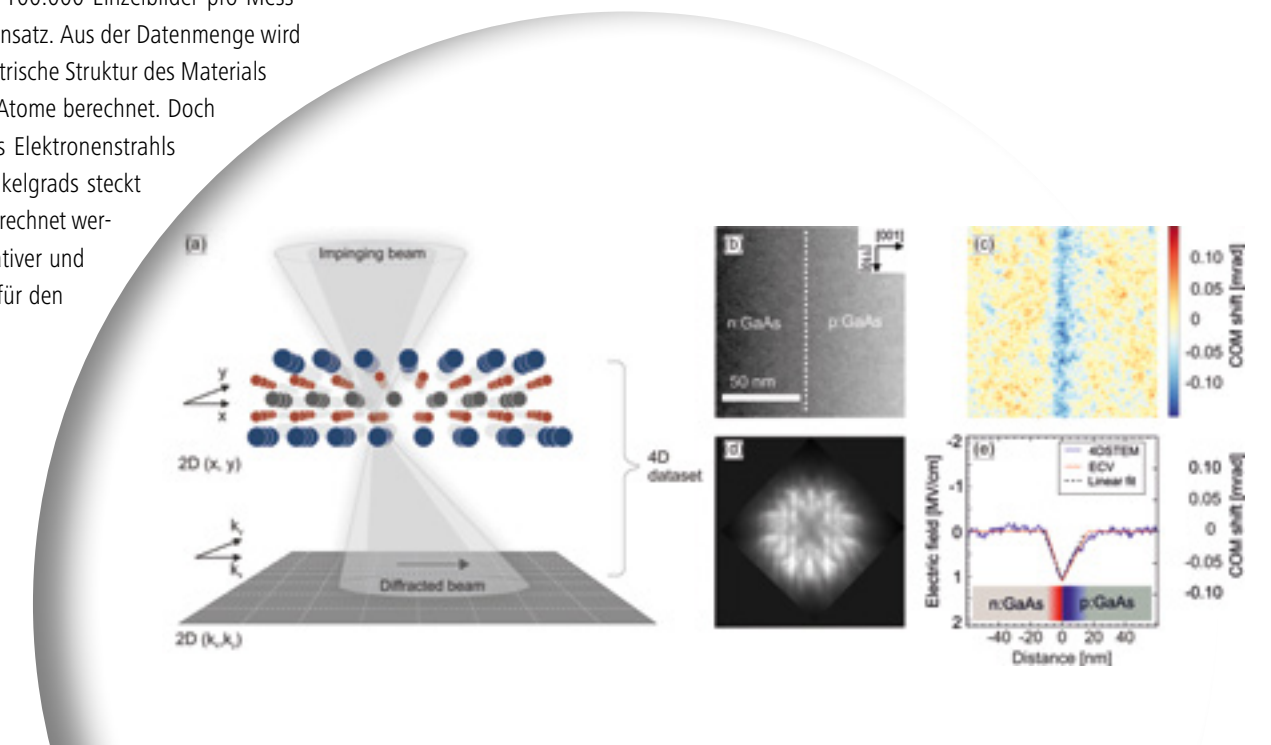


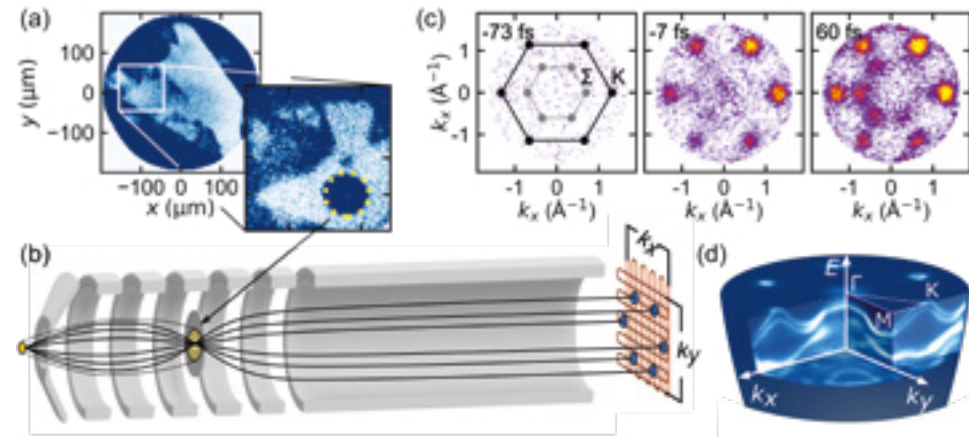
Die Herausforderung: Die Moleküle wechselwirken nur sehr schwach mit den TMDCs, was die Herstellung und Kontrolle geordneter Molekülfilme erheblich erschwert, da die flach liegenden Moleküle eine abstoßende Rand-zu-Rand-Wechselwirkung zeigen. Die Forschenden haben herausgefunden, welche Faktoren für die Ausbildung wohldefinierter Schichten von aromatischen Molekülen auf TMDCs nötig sind. In ultradünnen 2D-Molekülfilmen benötigt es aufgrund geometrischer Restriktion anziehende Molekül-Molekül-Wechselwirkungen, welche die Bildung einer geordneten Lage überhaupt erst ermöglicht. Diese können durch gezielte chemische Modifikation der Prototyp-Moleküle, z.B. durch Teilfluorierung, maßgeschneidert werden. In dickeren Filmen, in denen die Molekül-Molekül-Wechselwirkungen aufgrund der fehlenden geometrischen Einschränkung deutlich verstärkt sind, ermöglicht die schwache Molekül-Substrat-Wechselwirkung die Ausbildung von Mikrometer großen Domänen. Und mehr noch: Sie erlaubt es sogar mittels Anpassung von Prozessparametern die Ausrichtung des Films genau einzustellen. Im weiteren Verlauf des SFBs sollen die opto-elektrischen Eigenschaften der Ladungsträgerbildung und ihres Transports genauer untersucht werden.

Deep inside: Elektrische Felder direkt mit dem Transmissionselektronenmikroskop messen

Die Verteilung elektrischer Felder in Materialien zählt zu den maßgeblichen Treibern des Verhaltens von Ladungsträgern an Grenzflächen und ist damit auch entscheidend für die Anwendung. Doch wie lassen diese sich lokal aufgelöst messen? Die Arbeitsgruppe von Kerstin Volz hat dazu ihr hochauflösendes Rastertransmissionselektronenmikroskop (STEM) aufgerüstet. Ein hauchdünner Strahl von fokussierten Elektronen (der Fokus kann dabei kleiner als ein Atomdurchmesser sein) scannt eine Probe ab. Dabei werden die Elektronen natürlich von elektrischen Feldern in der Probe abgelenkt. Eine hochempfindliche Kamera nimmt bis zu 10.000 Bilder in der Sekunde auf. Beim Abrastern entstehen solchermaßen etwa 100.000 Einzelbilder pro Messzyklus – ein riesiger Datensatz. Aus der Datenmenge wird üblicherweise die geometrische Struktur des Materials und die Anordnung der Atome berechnet. Doch auch die Ablenkung des Elektronenstrahls in Bruchteilen eines Winkelgrads steckt darin und kann heraus berechnet werden. „Ein riesiger apparativer und rechnerischer Aufwand, für den

wir auch Methoden der künstlichen Intelligenz einsetzen wollen“, sagt Physikerin Kerstin Volz. Der Aufwand lohnt sich, denn wie das Modellbeispiel eines GaAs p-n-Übergangs zeigt, kann das elektrische Feld an der Grenzfläche bestimmt werden und das mit hoher lateraler Auflösung. Weitere Arbeiten gehen nun dahin, die Materialpalette auszuweiten zu 2D-Materialien, verdrehten Schichtsystemen und anderen Heterostrukturen. Auch für zukünftige Materialsysteme wie etwa für Feststoffbatterien könnte die Methode wichtig werden, um die Feldstärken zu vermessen und die Strukturen zu verstehen und zu optimieren.





Ein Traum wird wahr: Elektrische Ströme an Grenzflächen kontaktlos vermessen

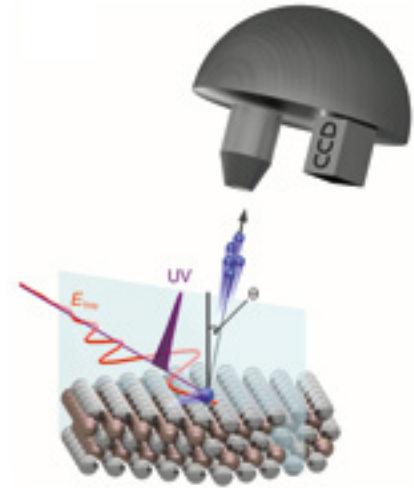
In der vergangenen Förderperiode haben die Marburger Physiker um Ulrich Höfer mit kooperierenden Gruppen eine neue Messmethode entwickelt, um in Oberflächen und entlang von Grenzflächen elektrische Ströme kontaktlos zu vermessen. Hier werden die Ströme zunächst optisch erzeugt: Mit Terahertz-Strahlung wird ein elektrisches Wechselfeld aufgebaut, das die Elektronen beschleunigt. „Und während das Feld einwirkt, messen wir mit der Photoelektronenspektroskopie“, sagt Ulrich Höfer. Die Forschenden richten einen scharfen UV-Laserpuls auf das Material, der Elektronen herauslöst und einem Spektrometer zuführt. Die Zeitauflösung liegt dabei unterhalb der Schwingungszeit einer Terahertz-Welle. Solchermaßen

gelingt es den Forschenden, den elektrischen Strom kontaktlos zu vermessen, etwa wie lange es dauert, bis die Elektronen im Material streuen (also phänomenologisch auf einen elektrischen Widerstand treffen). Dieser Widerstand ist in topologischen Isolatoren sehr stark vermindert, was an den Grenzflächeneigenschaften des Materialsystems Bi_2Te_3 liegt. Die Elektronen verhalten sich hier wie Kanonenkugeln, die nichts abbremst. Die Forscher sprechen hier von einem sogenannten ballistischen Strom. Im weiteren Verlauf des SFB setzen die Forschenden diese Methode ein, um in unterschiedlichen Materialsystemen die Wechselwirkung der Grenzflächeneffekte mit dem Stromfluss zu untersuchen.

Das zeitauflösende Impulsmikroskop

Auf die Perspektive kommt es an. Sind manche direkte Messgrößen nicht zugänglich, etwa wo sich gerade die Elektronen in einem Material bewegen, dann lohnt sich vielleicht ein Blick auf Alternativen. Physiker schauen sich das Systemverhalten dann meist im sogenannten Impulsraum an, der etwa die Geschwindigkeitsverteilung der Ladungsträger beschreibt. Dann ist die Ortsinformation nur eine mathematische Transformation entfernt. Die Arbeitsgruppen um Ulrich Höfer und Robert Wallauer haben daher ein ganz spezielles Impulsmikroskop entwickelt, das nicht auf Ortsinformationen schaut, sondern auf die Impulsverteilung von Ladungsträgern. „Solchermaßen können wir genau sehen, wie Elektronen sich in Molekülorbitalen bewegen und den Bindungspartner wechseln“,

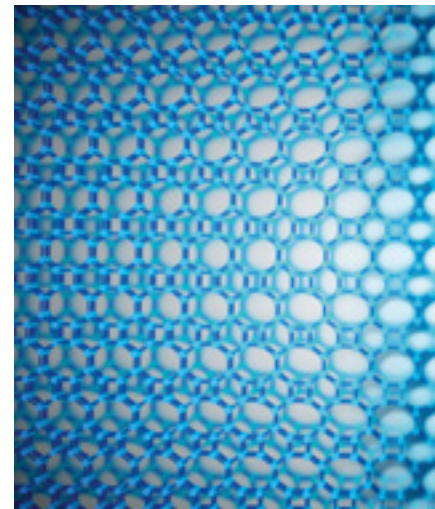
sagt Physiker Ulrich Höfer. Mit einem Pump-Probe-Experiment regen die Forschenden die Ladungsträger in organischen Halbleitern oder 2D-Systemen zunächst an und schlagen sie dann aus dem Material heraus. Die Winkelinformation des austretenden Elektrons enthält die Impulsinformation. In einem Flugzeitexperiment bekommen die Forschenden die Energie des Elektrons heraus. Bei Molekülen auf Oberflächen können die Physiker die chemischen Reaktionen verfolgen. In Festkörpern nehmen sie die Bandstruktur ins Visier. „Das ist ein herausragendes Experiment, da wir alle Quantenzustände und -informationen der Ladungsträger direkt messen können“, erklärt Höfer. In der dritten Förderperiode erweitern die Forschenden ihre Experimente auf weitere Materialklassen im SFB.



Mehr als Graphen: überraschendes 2D-Kohlenstoffmaterial

Das Highlight einer Forscherkarriere in der Physik ist es, neue physikalische Gesetzmäßigkeiten oder Effekte zu entdecken, in der Chemie ist das die Synthese neuer Moleküle oder Materialien. Letzteres ist den Arbeitsgruppen des Physikochemikers Michael Gottfried und des organischen Chemikers Ulrich Koert gelungen. Sie synthetisierten gewissermaßen einen Zwilling des Wundermaterials Graphen. Während Graphen einer Monolage aus Kohlenstoff-Sechsecken entspricht, besteht das neue Material aus einer Anordnung von vier-, sechs- und achteckigen Ringen. „Die Ringe sind in diesem sogenannten Biphenylen-Netzwerk völlig regelmäßig angeordnet“, sagt Michael Gottfried. Bislang war die neue Struktur nur theoretisch vermutet worden, aber herstellen ließ sie sich noch nicht. Erfolg

hatten die Forscherinnen und Forscher nun, indem sie auf einer Goldoberfläche Molekülketten herstellten, die sich geordnet zusammenlagern und anschließend die neue Kohlenstoffart bilden. Im Unterschied zu Graphen haben bereits sehr schmale Steifen des neuen Materials metallische Eigenschaften. Für den SFB erweitert das neue Material den Baukasten, Schichtsysteme aus metallischen, halbleitenden und organischen Lagen zu kombinieren und die physikalischen Eigenschaften der Grenzflächen weiter zu untersuchen und zu steuern. Interessant dürfte insbesondere sein, wie sich die physikalischen Eigenschaften solcher Schichtsysteme ändern, wenn die einzelnen Schichten in einem Winkel gegeneinander verdreht sind und übereinander liegen.



Organisch/anorganische- und organisch/organische-Grenzflächen: Struktur und Ladungsträgertransport

Um die komplexe Struktur organischer Bauelemente, etwa organischer Solarzellen oder Transistoren, zu verstehen und deren Leistungsfähigkeit zu verbessern, braucht es ein grundlegendes Verständnis der Modellsysteme. Dazu zählen Schichtstrukturen organischer Moleküle auf anorganischen Trägersubstraten, die in der Arbeitsgruppe von Gregor Witte hergestellt werden. Die kontrollierte Herstellung kristalliner Dünnschichten aus Molekülen wie Acenen oder molekularen Akzeptoren mit definierter Molekülorientierung auf 2D-Materialien und anderen Substraten beherrschen in Deutschland nur wenige Arbeitsgruppen.

„Wir nehmen uns der Herausforderung an, einzelne Schichten, die nur durch schwache van-der-Waals-Kräfte gebunden sind, kontrolliert in kristalliner Ordnung zu bringen“, sagt Witte.

Die Forschenden studieren dann die mikroskopischen Wechselwirkungen von Molekülen untereinander, von Dünnschichten mit ihren Substraten, sowie die Grenzflächeneffekte übereinander gestapelter funktioneller Molekülschichten. Ein detailliertes Verständnis all dieser Wechselwirkungen ermöglicht ihnen die präzise Kontrolle der Orientierung kristalliner Dünnschichten auf 2D-Materialien und damit die Untersuchung neuer Grenzflächeneffekte.

In einem weiteren Experiment zeigen die Forschenden, dass die Terminierung der Substratoberfläche vor dem Aufbringen von Molekülen einen drastischen Einfluss auf die Performance organischer Feldeffekt-Transistoren (OFETs) hat. Mittels gezielter Oberflächenoxidation der Elektroden oder durch Aufbringen von molekularen Kontaktschichten sind sie in der Lage, Transistoren mit außerordentlich kleinen Kontaktwiderständen herzustellen. Um ihre Transistoren weiter zu verbessern, haben die Forscher eine weltweit einzigartige Prozesskette zur Herstellung von OFETs im Ultrahochvakuum entwickelt. Durch den Einsatz hochpräziser Mikromanipulatoren lassen sich zudem molekulare Einkristalle sowie Flocken von 2D-Materialien im Ultrahochvakuum kontrolliert positionieren, ausrichten und spalten. Mithilfe dieser Techniken können die Forscher den Ladungstransport an hochdefinierten Grenzflächen zwischen organischen Materialien und 2D-Materialien untersuchen.

Prof. Dr. Gregor Witte
Philipps-Universität Marburg
Molekulare Festkörperphysik

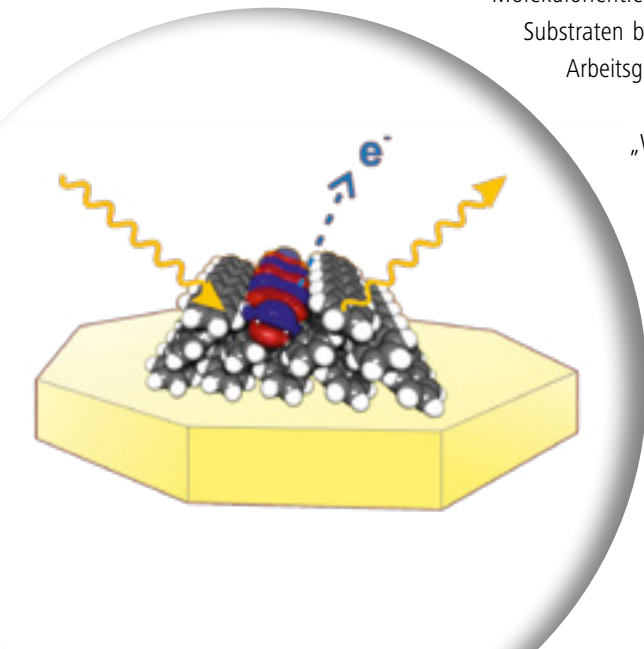
(+49) 6421 28-21384
gregor.witte@physik.uni-marburg.de

EXPERTISE:

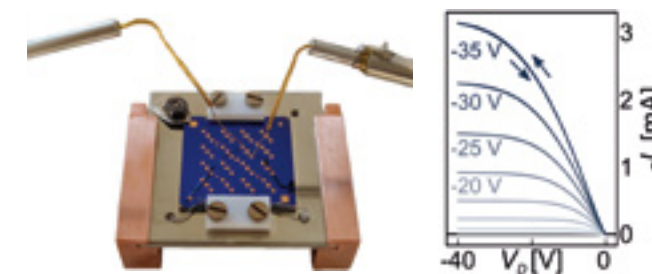
Organische Halbleiterschichten, physikalische Chemie der Adsorbate, templat- und grenzflächenabhängiges Dünnschicht-Wachstum, Synchrotron-basierte Röntgenabsorptionsspektroskopie, Röntgendiffraktometrie, Rastersondenmikroskopie, UV/Vis Spektroskopie, Device-Charakterisierung

Materialien: Metall/Organik, Anorganik/Organik, Organik/Organik, 2D Grenzflächen

Methoden: Strukturanalyse, Epitaktisches Wachstum, Optische Spektroskopie

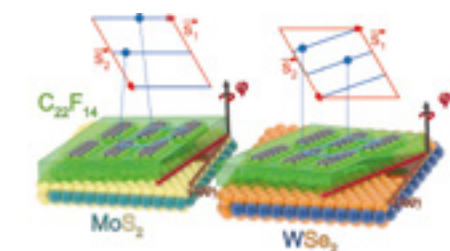


Ladungsträgertransport



Hochdefinierte Kontaktflächen zwischen organischen Dünnschichten und ihrem Substrat ermöglichen die Herstellung von OFETs mit extrem kleinen Kontaktwiderständen.

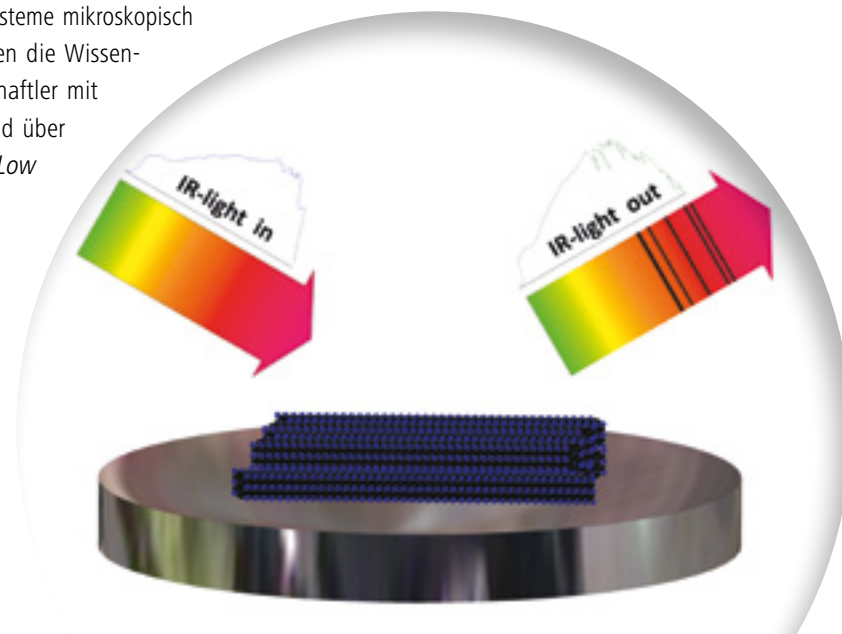
Organisch/anorganische Grenzflächen



Im Gegensatz zu metallischen Substraten wird das Wachstum organischer Filme auf 2D-Materialien primär durch Molekül-Molekül-Wechselwirkungen bestimmt. Die sogenannte van-der-Waals-Epitaxie konnte in der Gruppe von Prof. Witte erstmals experimentell nachgewiesen werden

Grenzflächen organischer Heteroschichtsysteme: Struktur und Vibrationsanregungen

Organische Modellstrukturen auf Metallen, wie z. B. Silber oder Gold, präpariert und charakterisiert die Arbeitsgruppe von Peter Jakob. Zunächst scheidet die Forschenden die organischen Moleküle mit speziellen opto-elektronischen Eigenschaften per Molekülstrahlepitaxie im Ultrahochvakuum ab. Über die Prozessparameter, wie etwa Temperatur und Substanzmenge, kann auf die Anordnung der Moleküle – ob gerade aufliegend oder verkantet schräg stehend – Einfluss genommen werden; ebenso auf die relative Lage der Moleküle bei Mehrkomponentensystemen. Wie sich die Schichtsysteme mikroskopisch ausgebildet haben, überprüfen die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler mit der Infrarot-Spektroskopie und über die Elektronenbeugung LEED (*Low Energy Electron Diffraction*).



Da die Moleküle je nach Anordnung unterschiedlich schwingen, und dies durch theoretische Studien auch modelliert werden kann, können die Forscherinnen und Forscher den Strukturaufbau der Schichten anhand der Schwingungsbanden im Infrarot-Spektrum verifizieren und Präparationsbedingungen entsprechend modifizieren. Genauso lassen sich chemische Reaktionen im Detail untersuchen und die sich bildenden Produktspezies mit hoher Empfindlichkeit nachweisen.



Prof. Dr. Peter Jakob
Philipps-Universität Marburg
Oberflächenphysik

(+49) 6421 28-24328
peter.jakob@physik.uni-marburg.de

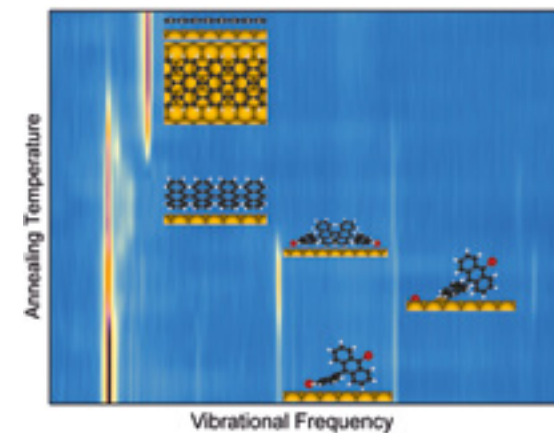
EXPERTISE:

Vibrationsspektroskopie an Oberflächen und Grenzflächen, Oberflächenchemie, Kinetik von Oberflächenprozessen, organische Molekularstrahldeposition

Materialien: Metall/Organik, Organik/Organik, Anorganik/Organik

Methoden: Strukturanalyse, Epitaktisches Wachstum, Optische Spektroskopie

Eine weitere wichtige Fragestellung betrifft die Kopplung zwischen molekularen Schichten, sowie Ladungstransferprozesse an der Molekül-Metall Grenzfläche. Dabei stehen der Einfluss von Strukturparametern, sowie der Schichtzusammensetzung im Vordergrund des Interesses und inwieweit sich die physikalischen Prozesse und Zeitskalen durch gezielte Modifikationen beeinflussen lassen.



Die Prozesskette zur Erzeugung graphen-artiger ‚nanoribbons‘ an der Molekül-Metall Grenzfläche lässt sich mittels Infrarot-Spektroskopie präzise nachverfolgen.

Reaktivität, Energetik und Struktur von vergrabenen Organik/Metall-Grenzflächen

Die mikroskopische Struktur und Dynamik von Grenzflächen zwischen Metallen und organischen Materialien spielen insbesondere beim Kontaktieren organischer Halbleiter (in Solarzellen oder Leuchtdioden) eine entscheidende Rolle. Das Team von Michael Gottfried untersucht die physikalisch-chemischen Prozesse in der Kontaktzone: Wie verhält sich die organische Schicht gegenüber dem Metall? Welche Reaktionen laufen ab? Und wie ändert sich der chemische Zustand, wie etwa die Oxidationsstufe der Reaktionspartner? Dafür setzen sie u.a. reaktionsfreudige Metalle wie Lithium ein.

Beim Bedampfen der organischen Modellschichten mit einem Metall diffundiert dieses in die organische Schicht und reagiert zu einem Metallkomplex, der eine Zwischenschicht (Interphase) ausbildet. „Das sind gute Modellsysteme, mit denen wir die Bildung der wichtigen Interphasen verstehen können, die auch bei organischen Batteriematerialien eine Rolle spielen“, sagt Michael Gottfried. Photoelektronenspektroskopie mit harter Röntgenstrahlung, durchgeführt am Berliner Elektronensynchrotron BESSY II, liefert den Forschern genaue Tiefenprofile der Schichtsysteme.

Mit der Nanojoulekalorimetrie will das Team außerdem die Bindungsenergien der Metallatome an die Oberfläche der organischen Modellschichten messen. „Wir wollen dann schrittweise die Komplexität unserer Modellsysteme steigern, aber die volle Kontrolle über alle Eigenschaften behalten“, sagt Michael Gottfried. Die Forschenden betrachten dazu auch Moleküle mit sogenannten nichtbenzenoiden Topologien. Das sind Moleküle, die Ringe mit beispielsweise vier, fünf oder sieben Ecken enthalten und die daraus resultierend ganz andere Eigenschaften haben als Moleküle, die nur auch den sechseckigen Benzolringen bestehen. „Wir machen hier als Chemiker den Schritt zu neuartigen Modellsystemen für die organische Elektronik.“

Prof. Dr. Michael Gottfried
Philipps-Universität Marburg
Physikalische Chemie

(+49) 6421 28-22541
michael.gottfried@chemie.uni-marburg.de

EXPERTISE:

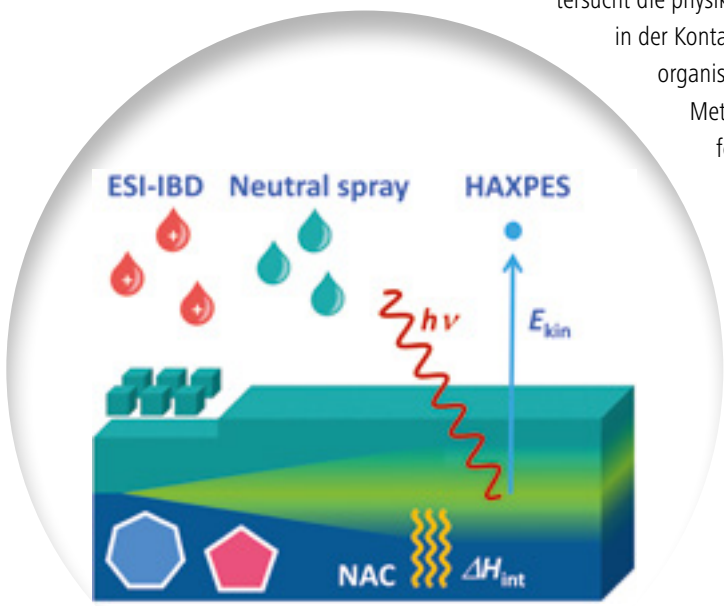
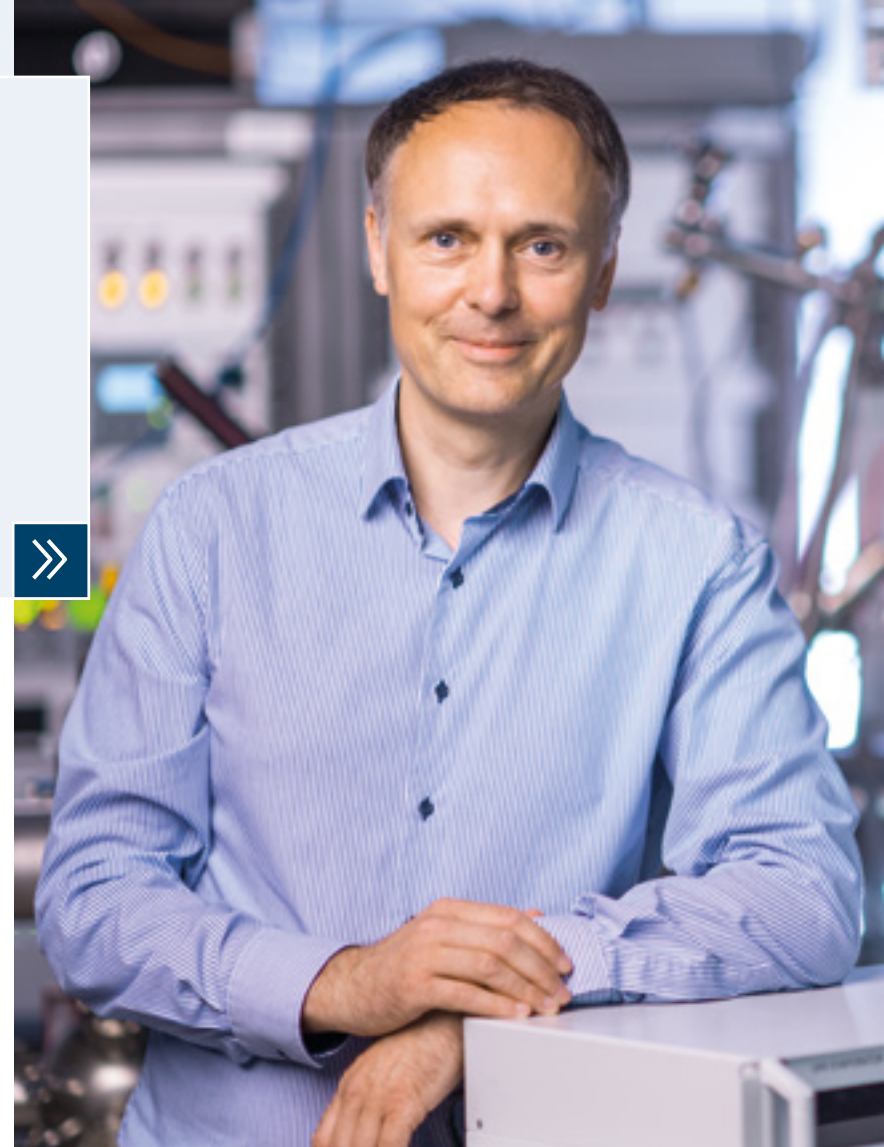
Oberflächenchemie, Modellkatalyse, organische und organometallische Dünnschichten, Photoelektronenspektroskopie

Materialien: Metall/Organik, 2D Grenzflächen

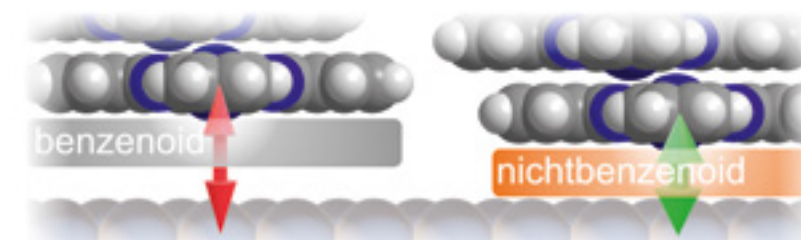
Methoden: Strukturanalyse, Epitaktisches Wachstum

Die nichtbenzenoiden Moleküle sind außerdem gute Modelle für Defekte in Graphen“, erklärt Gottfried. Mit diesen realitätsnahen Materialsystemen wollen die Forscherinnen und Forscher besser verstehen, wie zukünftige Bauelemente auf Basis von organischen Molekülen oder Graphen optimiert werden können. Neben Präparation und Charakterisierung der Schichtsysteme studiert die Arbeitsgruppe daher auch, wie sich die reaktiven Prozesse an der Grenzfläche steuern – etwa verstärken oder unterbinden – lassen und welche chemischen Bindungen sich an den Grenzflächen bilden.

Grenzflächen zwischen Metallen und benzenoiden (links) bzw. nichtbenzenoiden (rechts) Molekülen. Die stärkere Metall-Organik-Bindung bei den nichtbenzenoiden Molekülen sollte sich auch auf die darüberliegenden Molekülschichten auswirken und die elektronischen Eigenschaften der Grenzfläche beeinflussen.



Organik/Metall-Grenzflächen werden mit verschiedenen komplementären Methoden präpariert und die dabei ablaufenden Prozesse untersucht.

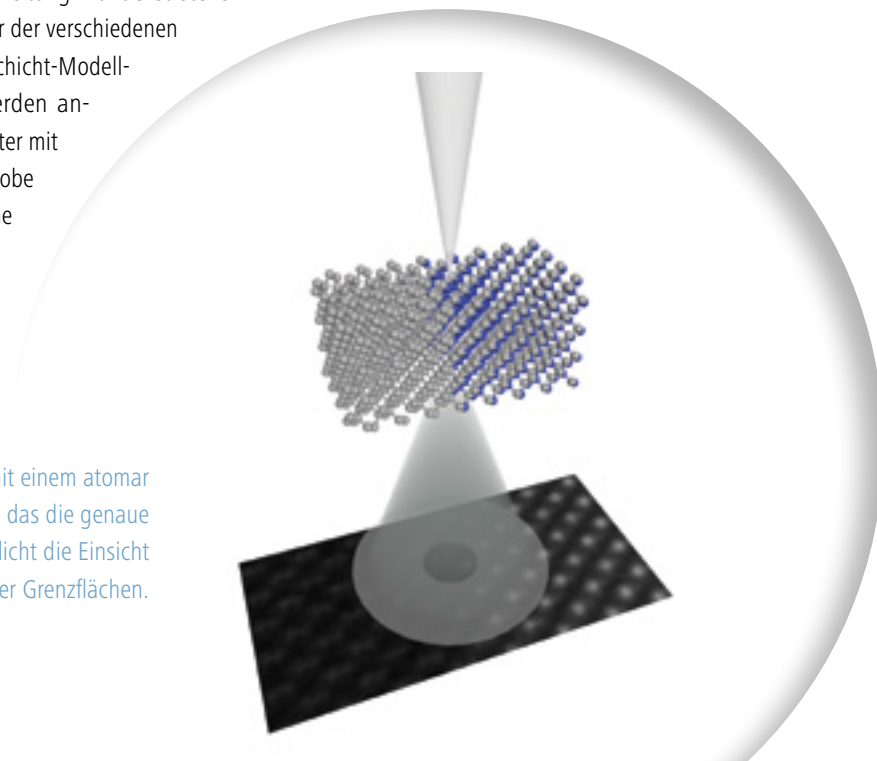


Atomar aufgelöste Struktur vergrabener Grenzflächen zwischen Festkörpern



Mit ihren Methoden schaut die Arbeitsgruppe von Kerstin Volz den Materialsystemen gewissermaßen unter die Motorhaube. Zentrales Instrument ist das Transmissionselektronenmikroskop. Damit lassen sich Festkörper atomar durchleuchten. Um eine hohe Grenzflächenempfindlichkeit zu erreichen, bedarf es einer äußerst präzisen Probenvorbereitung. Zunächst stellen die Forscherinnen und Forscher der verschiedenen Arbeitsgruppen des SFB ihre Schicht-Modellsysteme her. Die Proben werden anschließend geschliffen und weiter mit Ionenstrahlen gedünnt. „Die Probe muss sehr dünn sein. Das ist eine hohe Kunst“, sagt Kerstin Volz.

Der auf atomare Dimensionen fokussierte Elektronenstrahl bewegt sich parallel zur Grenzschicht durch die dann nur wenige Hundert Atomlagen dicke Probe und rastert den gesamten Schichtverlauf ab.



Beim Abrastern der hauchdünn geschnittenen Schichtsysteme mit einem atomar feinen Elektronenstrahl ergibt sich ein Transmissionsbild, das die genaue Position der einzelnen Atome im Kristallgefüge verrät. Dies ermöglicht die Einsicht in die mikroskopische Struktur vergrabener Grenzflächen.

Prof. Dr. Kerstin Volz
Philipps-Universität Marburg
Struktur- & Technologieforschungslabor
(+49) 6421 28-22297
kerstin.volz@physik.uni-marburg.de

EXPERTISE:

Strukturanalyse, Transmissionselektronenmikroskopie, Epitaktisches Wachstum von Halbleiterstrukturen, strukturelle, optische und Wachstumskorrelation von funktionalen Materialien

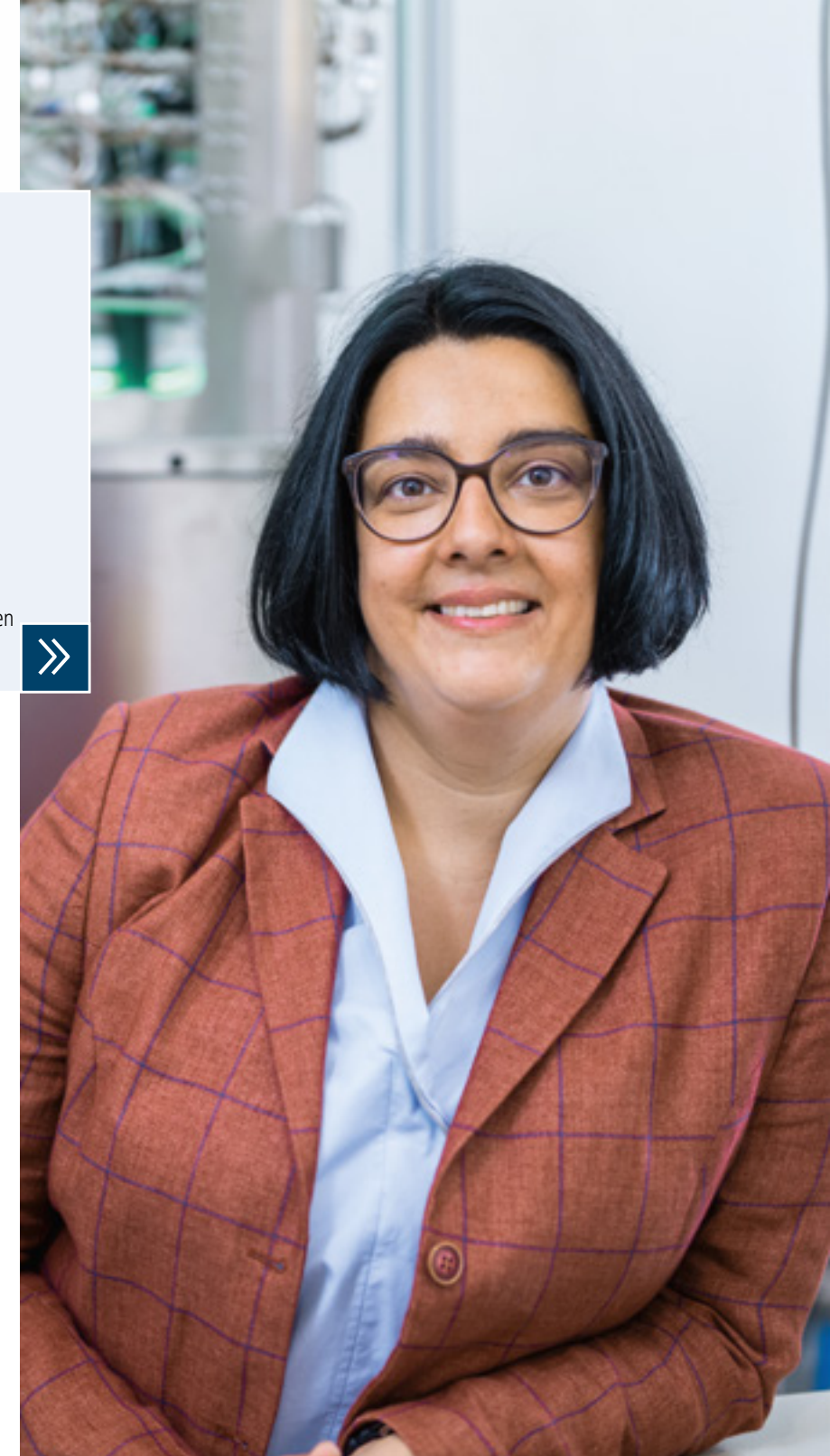
Materialien: Anorganik/Anorganik, Anorganik/Organik, 2D Grenzflächen

Methoden: Strukturanalyse, Theorie/Modellierung



Wichtige Fragestellungen sind, wie sich die Atome im Grenzschichtgefüge anordnen und welche elektrischen Felder dort herrschen – welches Verhalten wird intrinsisch durch das Material vorgegeben und welchen Einfluss spielt die Herstellung? Kerstin Volz betrachtet Halbleitermaterialien und deren Heterostrukturen, wie etwa Silizium, GaP, oder auch TMDCs, die sich beispielsweise in den elektrischen Eigenschaften (Polarität) und Struktur (Gitterabstände) unterscheiden. Interessant ist dann, wie sich die Grenzflächen in Abhängigkeit dieser Parameter bilden und Ladungen sich gegebenenfalls umverteilen.

Wichtiges Arbeitsgebiet ist auch, die Empfindlichkeit des Rastertransmissionselektronenmikroskops und die Modellierung immer weiter zu verbessern, um noch mehr Informationen aus den experimentellen Aufnahmen zu erhalten. Dies geschieht durch Simulationen des Abbildungsprozesses auf Hochleistungsrechnern, auch unter zu Hilfenahme von Methoden der künstlichen Intelligenz.



Gemeinsame Beschreibung von chemischer Bindung und Wechselwirkungen an Anorganik/Organik-Grenzflächen mittels Dichtefunktionaltheorie

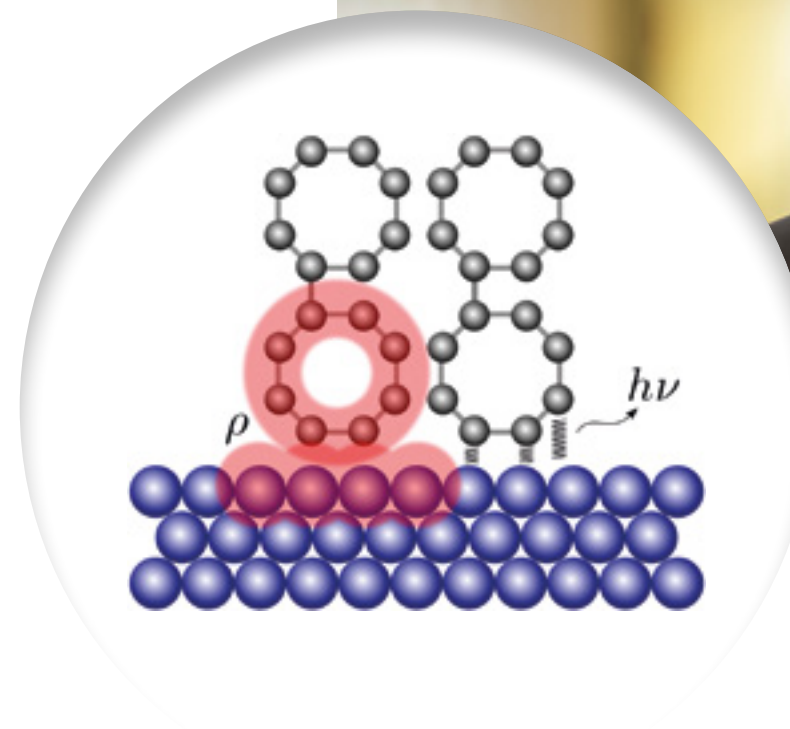


Mit ihren theoretischen Methoden können die Forschenden der Gruppe von Prof. Ralf Tonner genau beschreiben, wie sich organische Moleküle auf Oberflächen verhalten. Im Fokus stehen dabei die Anordnung in der Oberflächenschicht und die Bindungstypen, etwa van-der-Waals-Kräfte oder kovalente chemische Bindungen. Aus diesen „ab initio“-Simulationen leiten die Chemikerinnen und Chemiker auch die elektronischen Eigenschaften der Grenzflächen ab, die von Physikern mit spektroskopischen Methoden untersucht und im Wechselspiel von Theorie und Experiment verifiziert werden können.

Die Modelle helfen den Forschenden aus der Synthesechemie, die Moleküle so zu funktionalisieren, dass diese zielsicher ihren Ort auf der Oberfläche finden und beispielsweise keine unerwünschten Nebenreaktionen stattfinden. „Wir untersuchen auch, ob und wie Verfahren der Klick-Chemie funktionieren, um die nächste Lage an organischen Molekülen anzubinden“, sagt Tonner.

In einem weiteren Teilprojekt schauen sich die Chemikerinnen und Chemiker Grenzflächen zwischen ungewöhnlichen, aromatischen Molekülen und Metalloberflächen an. In Vorarbeiten wurden hier überraschende elektronische Eigenschaften gefunden, die nun intensiver untersucht werden sollen.

In Zukunft wollen die Forschenden weitere elektronische und dynamische Effekte in ihre Modelle einbeziehen, um den experimentellen Disziplinen Vorhersagen zu liefern. Es klingt schon verrückt: Nur auf Basis von Formeln und Gedankenarbeit sowie der Hilfe leistungsstarker Großrechner errechnen die Theoretikerinnen und Theoretiker ein Bild, das der Experimentierende dann im Tunnelmikroskop oder als spektroskopische Messkurve sieht.



Schichten organischer Moleküle auf Halbleiter-Oberflächen bieten vielfältige Ansätze zum Verständnis elektronischer Effekte und chemischer Reaktivitäten im Grenzflächen-Aufbau.

Prof. Dr. Ralf Tonner
Universität Leipzig
Theoretische Chemie komplexer Materie

(+49) 341 97-36401
ralf.tonner@uni-leipzig.de

EXPERTISE:

Computerchemie, Dichtefunktionaltheorie, Oberflächenchemie, Chemische Bindung, Grenzflächen

Materialien: Anorganik/Organik, Anorganik/Anorganik

Methoden: Theorie/Modellierung

Organische Moleküle als Bausteine für die Synthese innerer Grenzflächen

Ein wichtiger wissenschaftlicher Meilenstein in den ersten Förderperioden des SFBs war die erfolgreiche Kontaktierung, also die kovalente chemische Anbindung, von funktionalisierten organischen Molekülen auf der hochreaktiven Siliziumoberfläche. Das gelang durch die direkte Kooperation von Forschenden aus Chemie (Arbeitsgruppe Ulrich Koert, Marburg) und Physik (Arbeitsgruppen Michael Dürr, Gießen und Ulrich Höfer, Marburg).

Als Materialsystem bedeutet die „Organik auf Halbleitern“ einen Durchbruch: „Es verbindet die Welt der Computerelektronik mit der funktionellen Gestaltungsvielfalt der organischen Chemie und eröffnet so ganz neue Möglichkeiten“, erklärt Michael Dürr.

Im Fokus steht hier das Molekül Cyclooctin, ein Ring aus acht Kohlenstoffatomen mit einer gespannten Dreifachbindung, die besonders reaktiv ist. Die Forschenden aus Chemie und Physik haben zuerst den Reaktionsmechanismus von Cyclooctin auf der Siliziumoberfläche aufgeklärt und insbesondere gezeigt, dass Cyclooctin selektiv mit seiner Dreifachbindung an die Halbleiteroberfläche anbindet. Über diese erste organische Schicht konnten dann gezielt weitere, funktionale organische Moleküle kovalent mit der Siliziumoberfläche verankert werden.

Diese weiteren Schichten werden dabei in einer Kombination aus selektiven Reaktionen im Ultrahochvakuum und katalysierten Reaktionen in Lösung aufgebracht. „Die richtige Kombination der unterschiedlichen Reaktionen ist dabei der Schlüssel zum Erfolg“, erläutert Ulrich Koert.

Die Forscherinnen und Forscher können durch die chemische Synthese die organischen Schichten designen und die Schicht- und Grenzflächeneigenschaften z. B. mit spektroskopischen Methoden (B2 Chatterjee, Gießen; B11 Gütde/Höfer, Marburg) vermessen. Die äußerste Schicht hätte mit geeigneter Funktionalisierung auch einen aktiven Sensorcharakter und könnte in elektronischen Bauteilen eingesetzt werden – doch das ist die Zukunft.

Prof. Dr. Ulrich Koert Philipps-Universität Marburg Organische Chemie

(+49) 6421 28-26970
koert@chemie.uni-marburg.de

EXPERTISE:

Organische Synthese komplexer Moleküle (Naturstoffe, Funktionsstoffe, Ionenkanäle, molekulare Schalter), Entwicklung selektiver und effizienter Synthesemethoden

Materialien: Anorganik/Organik, Organik/Organik

Methoden: Chemische Synthese



Prof. Dr. Michael Dürr Justus-Liebig-Universität Gießen Experimentelle Physik

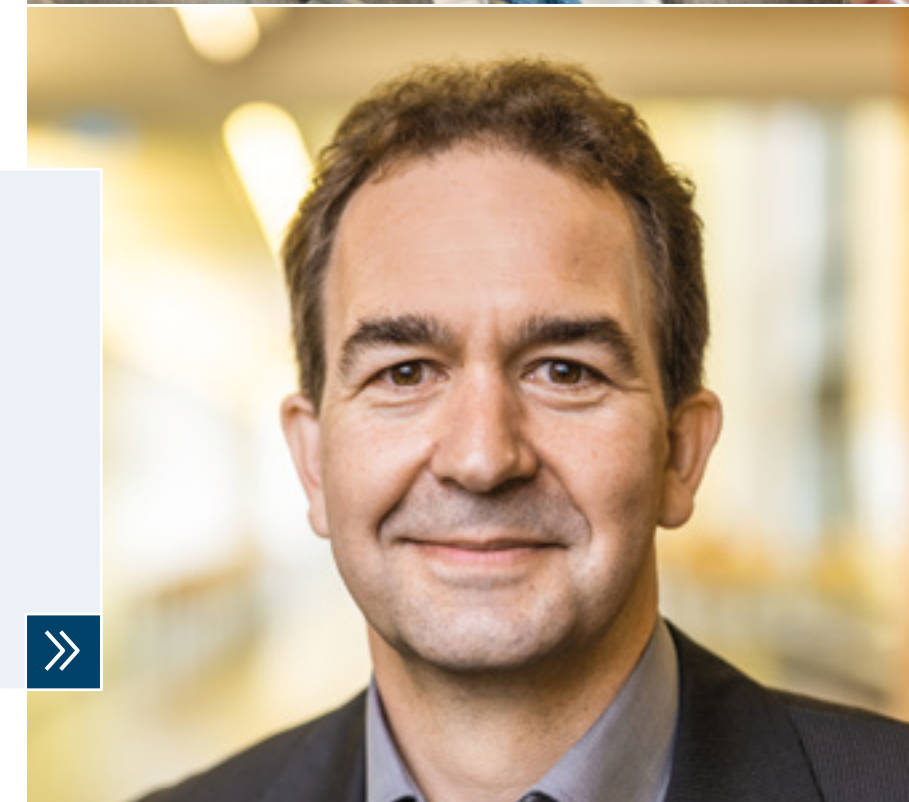
(+49) 641 99-33490
michael.duerr@ap.physik.uni-giessen.de

EXPERTISE:

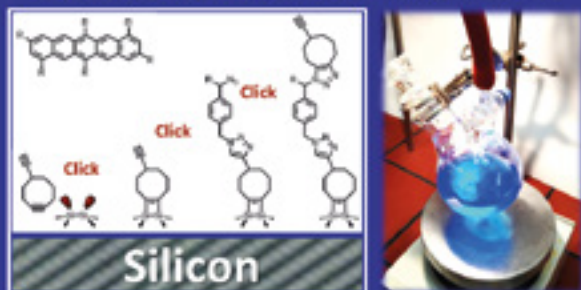
Experimentalphysik, Reaktionsdynamik an Halbleiteroberflächen, Rastertunnelmikroskopie, Massenspektrometrie

Materialien: Anorganik/Organik, Organik/Organik

Methoden: Strukturanalyse, Epitaktisches Wachstum



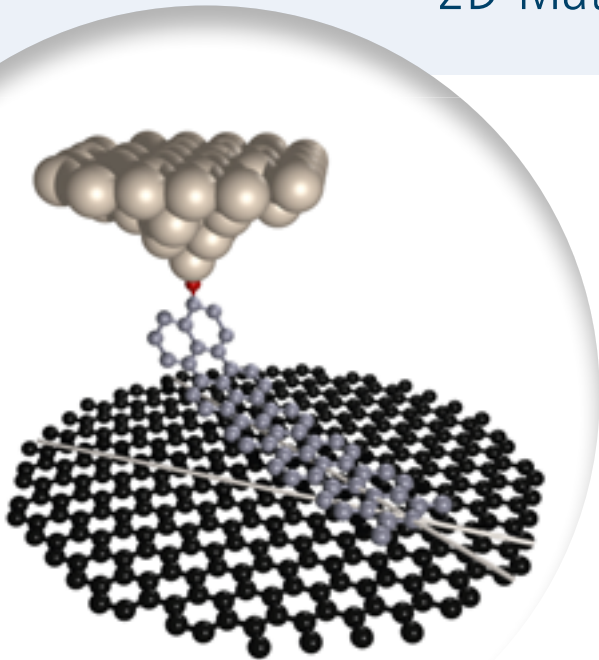
Organic Molecular Building Blocks for Internal Interfaces



synthetic efficiency by selective reactivity
functional molecular architectures

Struktur und Phononen von hetero-epitaktischen Schichtsystemen aus schwach wechselwirkenden 2D-Materialien und molekularen Schichten

A 12



Die Henkel-Methode:
Kontrolliertes Stapeln und
Verdrehen von 2D
Schichten im Vakuum.

Die Forschenden der Arbeitsgruppe von Stefan Tautz am Peter Grünberg-Institut des Forschungszentrums Jülich sind Experten der Oberflächenmanipulation und -analyse. Im SFB geht es ihnen darum, für geschichtete 2D-Materialien den richtigen Dreh zu finden. Werden hauchdünne, nur atomlagendicke Schichten von Graphen oder TMDCs verdreht (englisch: *twisted*) aufeinander gestapelt, so erwarten Stefan Tautz und seine Kollegen François Bocquet und Christian Kumpf ganz neue Effekte. Im Jahr 2018 war dies etwa die Supraleitfähigkeit von Graphen auf Graphen beim „magischen Winkel“ von 1,1 Grad. „Wir erwarten da jetzt exotische Effekte und ganz neue Eigenschaften, da wir die Grenzflächen ändern“, sagt Stefan Tautz. So könnten etwa an den Ecken verdrehter Schichten ganz neue quantenphysikalische Zustände entstehen. Und diesen sind die Forschenden auf der Spur.

Zwei Methoden der Präparation stehen zur Wahl. Zum einen können Schichten per Exfoliation (Tesafile-Methode) von einem Kristall abgezogen und in einer speziellen Apparatur auf ein vorgegebenes 2D-Material „twisted“ übertragen werden. Zum anderen wollen die Physiker per Rastersondenmikroskop (STM) an spezielle 2D-Schichten mit Henkel (aus dem Projekt A16) andocken, diese von der Syntheseunterlage abziehen und verdreht auf Graphen, TMDC oder weiteren 2D-Systemen aufbringen. Die Spitze des STM geht dabei mit dem Henkel eine schaltbare Verbindung ein. Das erlaubt ganz neue Freiheitsgrade für verdrehte Schichtsysteme, da etwa mit klassischen epitaktischen Abscheideverfahren (eruiert in der 2. Förderperiode des SFB) nur durch geometrische Gittereigenschaften bestimmte fixe Winkel von z.B. 30 Grad möglich waren. „Unser Traum ist, wie mit Legobausteinen neue Materialien mit vorbestimmten Eigenschaften zusammen zu stecken“, sagt Physiker Tautz. Die Technik zukünftiger Bauelemente hat auch schon einen Namen: Twistrionics.



Prof. Dr. F. Stefan Tautz
Peter Grünberg Institut, Forschungszentrum Jülich
Experimentelle Physik

(+49) 2461 61-4561
s.tautz@fz-juelich.de

EXPERTISE:

Quanten Nanowissenschaft, Quantum Materialien, Oberflächenphysik, Rastersondenverfahren, Elektronenspektroskopie

Materialien: Metall/Organik, Organik/Organik, 2D Grenzflächen

Methoden: Strukturanalyse



Dr. François C. Bocquet
Peter Grünberg Institut, Forschungszentrum Jülich
Experimentelle Physik

(+49) 2461 61-3987
f.bocquet@fz-juelich.de

EXPERTISE:

Oberflächenphysik, Spektroskopie

Materialien: 2D Grenzflächen

Methoden: Strukturanalyse, Epitaktisches Wachstum



Prof. Dr. Christian Kumpf
Peter Grünberg Institut, Forschungszentrum Jülich
Experimentelle Physik

(+49) 2461 61-1452
c.kumpf@fz-juelich.de

EXPERTISE:

Oberflächenphysik, Wechselwirkungsphänomene an Grenzflächen

Materialien: Metall/Organik, Organik/Organik, 2D Grenzflächen

Methoden: Strukturanalyse, Epitaktisches Wachstum

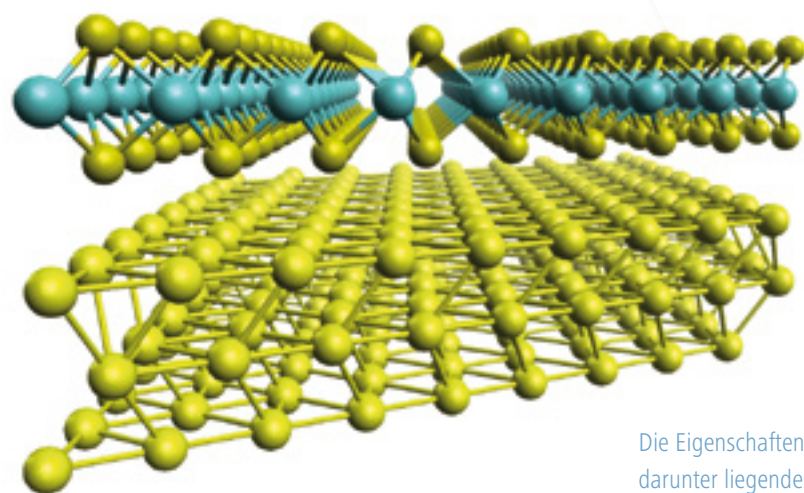
Theorie elektronischer Grenzflächen-Zustände in schwach gebundenen Heterostrukturen

„Der SFB ist so weit fortgeschritten, dass ganz neue Dinge betrachtet werden können.“ So begründet der theoretische Physiker Michael Rohlfing vom Institut für Festkörpertheorie der Universität Münster sein Projekt innerhalb des SFBs. Der Theoretiker verfügt über einen ganzen Werkzeugkasten an Modellen und Beschreibungskonzepten für

Festkörper-Schichtsysteme. „Die Monolagen und Grenzflächenphysik des SFB passen da wie maßgeschneidert rein“, sagt Rohlfing. Besonderes Augenmerk richtet das Team auf die Substanzklasse der TMDCs.

Zwei Aspekte stehen im Mittelpunkt des theoretischen Interesses: Wie hängen die Oberflächen- und Grenzflächeneigenschaften vom Substrat ab und lässt sich das entkoppeln? Wie können Moleküle, die auf die Oberfläche gebracht werden, die Materialeigenschaften modifizieren? „Durch diese Moleküle könnten wir die Monolage manipulieren und technisch nutzbar machen“, erklärt Rohlfing. Der Forscher und sein Team nutzen dazu Methoden der Dichtefunktionaltheorie sowie der um die Beschreibung elektronischer Anregungen erweiterten Vielteilchen-Störungstheorie.

„Damit können wir neben der Struktur beispielsweise die optischen Eigenschaften von Monolagen und Schichtsystemen beschreiben“, sagt der Forscher. Wichtiges Ziel seiner Arbeit sieht Michael Rohlfing auch darin, den Theorie-Werkzeugkasten weiter auszubauen, um die 2D-Materialien und -Schichtsysteme besser beschreiben und im iterativen Erkenntnisprozess mit den Experimentatoren verstehen zu können.



Die Eigenschaften eines atomar dünnen Halbleiters können durch ein darunter liegendes Trägermaterial entscheidend verändert werden.

Prof. Dr. Michael Rohlfing
Westfälische Wilhelms-Universität Münster
Festkörpertheorie

(+49) 251 83-33581
michael.rohlfing@wwu.de

EXPERTISE:

Vielteilchen-Quantenmechanik, optisch angeregte Zustände, Dichtefunktionaltheorie, Vielteilchen-Störungstheorie

Materialien: Metall/Organik, 2D Grenzflächen

Methoden: Theorie/Modellierung



Metallorganische Gasphasen-Abscheidung von zweidimensionalen Heterostrukturen



In-situ Kontrolle der Abscheidung

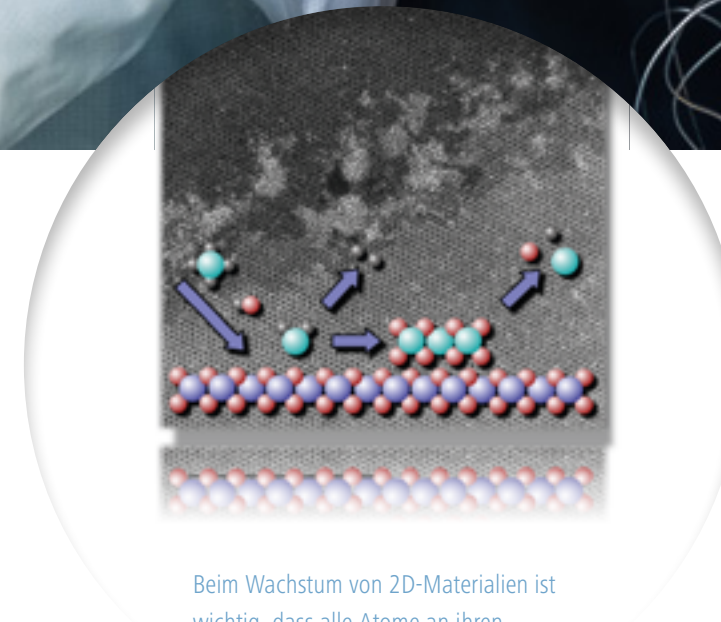
Die Arbeitsgruppe um Kerstin Volz betritt Neuland bei der gezielten Herstellung von Monolagen auf Oberflächen, die zu 2D-Materialien oder daraus aufgebauten, sogenannten Heterostrukturen führen.

Bislang werden diese Strukturen mit der, für Forschungszwecke ausreichenden, sogenannten ‚scotch tape method‘ präpariert. Dabei werden z.B. von Graphit kleinste 2D-Flakes an Graphen mittels Tesafilm abgezogen (was vormals auch zu einem Physik-Nobelpreis zur Entdeckung des Graphens führte). Doch für eine reproduzierbar technische oder gar industrielle Herstellung braucht man neue Methoden. Die Arbeitsgruppe von Kerstin Volz zielt darauf ab, mit der etablierten chemischen Gasphasenabscheidung (MOVPE = *Metal Organic Vapour Phase Epitaxy*) wohldefinierte Schichten herzustellen.

Die späteren Schichtmaterialien wie Gallium, Molybdän, Wolfram, Schwefel und Selen sind zunächst in organische Moleküle eingebettet, treffen in der Gasphase auf ein Substrat wie Saphir, Graphen oder Mica, reagieren dort mit anderen Molekülen und formieren eine zweidimensionale Struktur. Diesen Wachstumsprozess mitsamt thermodynamischer Parameter und Reaktionskinetiken gilt es zu verstehen.

Mit einem Massenspektrometer lässt sich *in-situ* beispielsweise prüfen, wie sich die Moleküle an der Oberfläche zerlegen. Mit optischen Methoden lässt sich der Verlauf der Abscheidung abschätzen. „Wir probieren alles aus und sehen große Unterschiede“, sagt Physikerin Kerstin Volz. Etwa in der Oberflächenmorphologie. So bildet das bei Raumtemperatur schon flüssige Gallium auf einer Saphiroberfläche kleine Tröpfchen, die dort mobil sind und sich zu kleinen Drähten vereinen können. Saphiroberfläche und Tröpfchen sind dabei trotzdem von einer Monolage Galliumsulfid überzogen.

Abgesehen davon, dass hier ganz neue Nanostrukturen entstehen, wäre es das Ziel im Sinne des SFBs, das Entstehen der Tröpfchen zu verstehen und dann zu unterdrücken. Bislang sind die per MOVPE hergestellten Monolagen nämlich nur kleine, wenige Mikrometer messende Inseln auf einem 2-Zoll-Wafer. Und den soll eine abgeschiedene Monolage einmal ganz ausfüllen.



Beim Wachstum von 2D-Materialien ist wichtig, dass alle Atome an ihren vorgesehenen Gitterplatz einbauen.

Prof. Dr. Kerstin Volz
Philipps-Universität Marburg
Struktur- & Technologieforschungslabor

(+49) 6421 28-22297
kerstin.volz@physik.uni-marburg.de

EXPERTISE:

Transmissionselektronenmikroskopie, Epitaktisches Wachstum von Halbleiterstrukturen, strukturelle, optische und Wachstumskorrelation von funktionalen Materialien

Materialien: Anorganik/Anorganik, Anorganik/Organik, 2D Grenzflächen

Methoden: Strukturanalyse, Epitaktisches Wachstum

Ionische 2D Materialien für designbare Organik-Anorganik Grenzflächen

Auf dem Weg zur Anwendung kennt die Materialforschung im Wesentlichen zwei Wege: ein neues Material entwickeln und schauen, auf welche Anwendung das passt. Oder ein ganzes Materialsystem dermaßen zu untersuchen und zu verstehen, dass die Eigenschaften auf eine Anwendung maßgeschneidert ausgerichtet werden können. Letzteren Weg geht das Projekt der Forschungsgruppe von Johanna Heine, die ionische 2D-Materialien herstellen, Eigenschaften charakterisieren und mit anderen Materialien wie etwa TMDCs in Verbindung bringen will.



„Ionisch“ heißt hier zunächst, dass eine ionische chemische Bindung zwischen zwei Bindungspartnern dominiert. Wie in Zellmembranen, wo Moleküle eine Schicht formen, ordnen sich die häufig von Metallen abgeleiteten Anionen und die organischen Kationen zu einem 2D-Material. „Das Schöne daran: wir haben eine so große Spielwiese“, sagt Chemikerin Heine. Bei den Anionen steht prinzipiell das ganze Periodensystem der chemischen Elemente zur Verfügung, bei den Kationen der Molekülbaukasten der organischen Chemie. Die eigentliche Schicht besteht aus einem Tri-Layer der Abfolge Kation-Anion-Kation auf der weitere Tri-Layer Platz finden. Die einzelnen Schichten sind hier nur durch eine lose van-der-Waals-Bindung verbunden. Hergestellt werden die Schichten entweder durch Exfoliation (Tesa-film-Methode) von einem Kristall oder durch Synthese aus einer Lösung.

Viele Vorversuche und ein systematischer Workflow sind nötig, um gezielt Eigenschaften wie Chiralität oder Leitfähigkeit im Schichtsystem einzustellen. Andere Arbeitsgruppen im SFB charakterisieren dann die optischen und elektrischen Eigenschaften. Spannend wird die Kombination von ionischen 2D-Materialien auf TMDC-Schichtsystemen und die opto-elektronischen Eigenschaften der entstandenen Grenzfläche.

Dr. Johanna Heine
Philipps-Universität Marburg
Anorganische Chemie

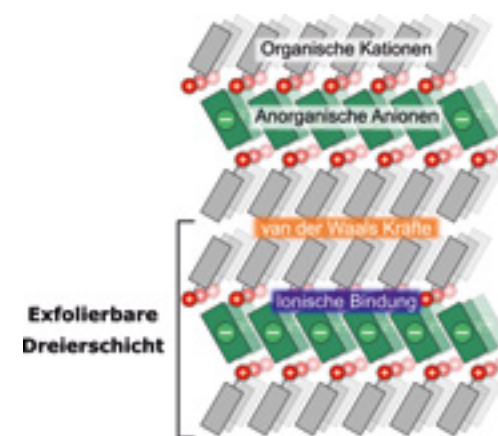
(+49) 6421 28-25527
johanna.heine@chemie.uni-marburg.de

EXPERTISE:

Anorganische Synthese und Charakterisierung, Chemie der Bismut-Verbindungen, Kristallstrukturanalyse, optische Spektroskopie

Materialien: Anorganik/Organik, 2D Grenzflächen

Methoden: Chemische Synthese



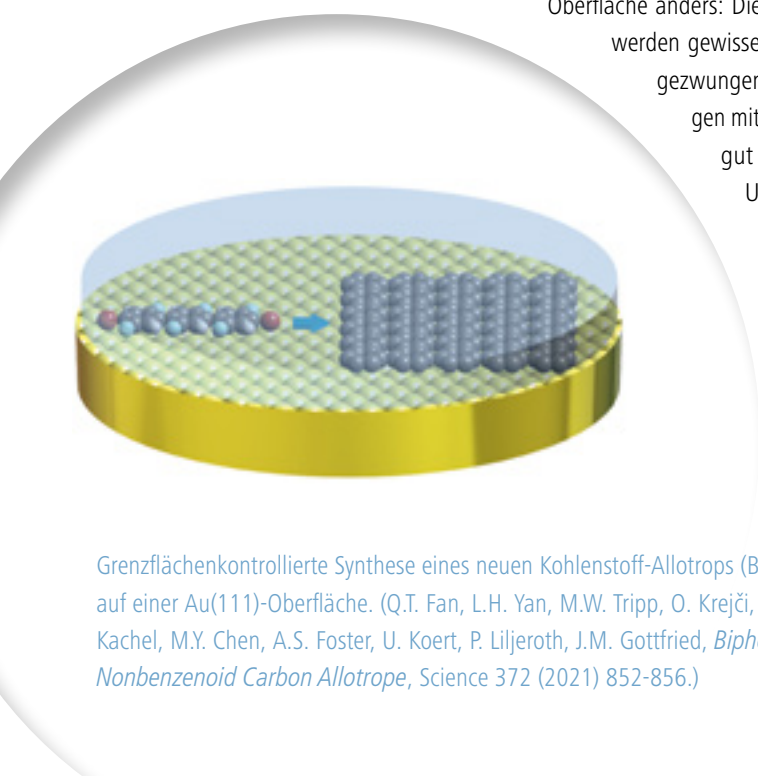
Mit der Perowskitverbindung Benzylammonium-Bismutchlorid („BBC“) hat die Gruppe ein vielversprechendes Modellsystem designt. „Für bessere Solarzellen und Handydisplays wollen wir neue umweltfreundliche und effiziente Materialien in den Fokus nehmen“, sagt Chemikerin Johanna Heine.



Synthetische Grenzflächenchemie

Mit neuartigen Synthesen an und auf Oberflächen wollen die Forschungsgruppen von Michael Gottfried (Physikalische Chemie) und Ulrich Koert (Organische Chemie) neue Materialien und Schichtstrukturen herstellen. Bei Molekülreaktionen der klassischen Chemie in einer Lösung gibt es im Raum keine Vorzugsrichtung. Das ist an der Oberfläche anders: Die synthetisierten Materialien werden gewissermaßen in eine 2D-Struktur

gezwungen. „Aromatische Verbindungen mit ihrem π -System eignen sich gut für die spektroskopischen Untersuchungen der Physiker“, sagt Ulrich Koert.



Grenzflächenkontrollierte Synthese eines neuen Kohlenstoff-Allotropes (Biphenylen-Netzwerk) auf einer Au(111)-Oberfläche. (Q.T. Fan, L.H. Yan, M.W. Tripp, O. Krejčí, S. Dimosthenous, S.R. Kachel, M.Y. Chen, A.S. Foster, U. Koert, P. Liljeroth, J.M. Gottfried, *Biphenylene Network: A Nonbenzenoid Carbon Allotrope*, *Science* 372 (2021) 852-856.)

Auf die Oberfläche gebracht, will Michael Gottfried neue Reaktionsmechanismen entwickeln, um die Moleküle zu Ketten, Streifen oder größeren 2D-Schichtelementen zu verknüpfen. „Wir wollen nicht nur neue Kohlenstoffmaterialien herstellen, sondern auch die Grundlagen für neue Reaktionstypen legen und so die Toolbox für die Oberflächensynthese erweitern“, sagt Michael Gottfried.

Der Clou am Projekt: Koert versieht die Vorläufer wie Methanoannulen mit einem „Henkel“ in die dritte Dimension. Zu Schichtsystemen reagiert, dienen die „Henkel“ zum einen als Abstandshalter zur nächsten Schicht in einem Schichtstapel, zum anderen als Verbindungsglied. Ein Rastertunnelmikroskop kann sogar mit seiner Sondenspitze an den „Henkel“ andocken, Schichten aktiv aufeinanderstapeln und auch gezielt verdrehen. Durch das Verdrehen der Schichten gegeneinander versprechen sich die Forschenden neue Effekte. Auch erste Charakterisierungen von Oberflächenmorphologie und optoelektronischen Eigenschaften unternehmen die Forschenden, stellen ihre Materialien aber auch den anderen Projekten für tiefer gehende Analysen zur Verfügung. Da je nach Precursor-Struktur auch poröse Schichten entstehen, dürfte es besonders spannend sein, welche Eigenschaften poröse 2D-Materialien den Schichtsystemen verleihen.

Prof. Dr. Michael Gottfried Philipps-Universität Marburg Physikalische Chemie

(+49) 6421 28-22541
michael.gottfried@chemie.uni-marburg.de

EXPERTISE:

Oberflächenchemie, Modellkatalyse, organische und organometallische Dünnschichten, Photoelektronenspektroskopie

Materialien: Metall/Organik, 2D Grenzflächen

Methoden: Strukturanalyse, Epitaktisches Wachstum



Prof. Dr. Ulrich Koert Philipps-Universität Marburg Organische Chemie

(+49) 6421 28-26970
koert@chemie.uni-marburg.de

EXPERTISE:

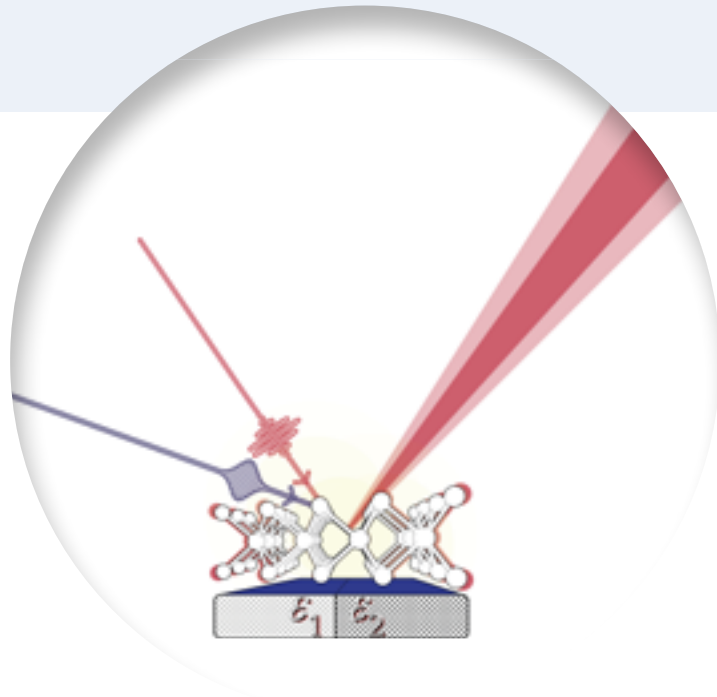
Organische Synthese komplexer Moleküle (Naturstoffe, Funktionsstoffe, Ionenkanäle, molekulare Schalter), Entwicklung selektiver und effizienter Synthesemethoden

Materialien: Metall/Organik, 2D Grenzflächen

Methoden: Chemische Synthese



Ultrakurzzeitspektroskopie und Kontrolle von Anregungen an inneren Grenzflächen



Mit der zeitaufgelösten, optischen Spektroskopie untersucht die Gießener Forschergruppe von Sangam Chatterjee, wie sich Elektronen oder andere Teilchen an und in Grenzschichten verhalten. Zu diesen ‚anderen‘ Teilchen zählen die Physikerinnen und Physiker beispielsweise Exzitonen, also gebundene Elektron-Loch-Paare, die sich an Trennschichten bilden. Anders als in früheren Studien untersuchen die Forschenden allerdings nicht den Übergang von Ladungsträgern durch die Grenzfläche ‚in die Tiefe‘, sondern längs der Schichtebenen, im Fachjargon ‚lateral‘.

Das liegt auch daran, dass Bauelemente aufgrund der zunehmenden Miniaturisierung in der Halbleitertechnik nur aus hauchdünnen Schichten bestehen, Grenzflächeneffekte längs („lateral“) zur Schichtebene also immer prominenter werden. Dazu ist allerdings nur wenig bekannt. Und bei weiterer Miniaturisierung werden Erkenntnisse hier zunehmend wichtiger.

Mit zeit- und orts aufgelöster Pump-Probe-Lasertechnik und Photolumineszenz-Spektroskopie wollen die Forscherinnen und Forscher nachvollziehen, welchen Weg ein Elektron oder ein erzeugtes Ladungsträgerpaar (Exziton) in der Energielandschaft der Grenzfläche nehmen. Wo befinden sich Teilchen, welche Energie haben sie und welcher Richtung folgen sie? In typischen Versuchsanordnungen befindet sich über einem nanostrukturierten Substratmaterial aus Titanoxid und Aluminiumoxid eine 2D-Schicht als exemplarische Grenzfläche.



Prof. Dr. Sangam Chatterjee
Justus-Liebig-Universität Gießen
Spektroskopie • Optik

(+49) 641 99-33100

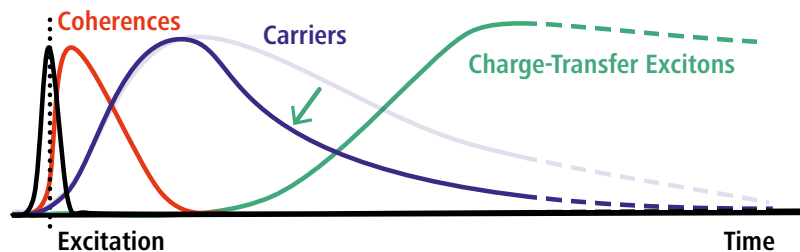
sangam.chatterjee@physik.uni-giessen.de

EXPERTISE:

Experimentalphysik, Festkörperphysik, Halbleiter-Optoelektronik, Ultrakurzzeitspektroskopie, Optik

Materialien: Anorganik/Anorganik, 2D Grenzflächen

Methoden: Optische Spektroskopie



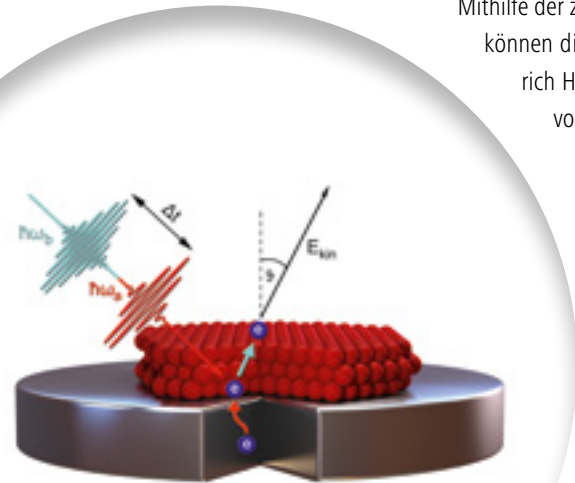
Untersuchungen der Elektronen- und Exzitonendynamik an Grenzflächen mit Hilfe der zeitaufgelösten Zweiphotonenphotoemission

Mithilfe der zeitaufgelösten Zweiphotonenphotoemission können die Forschenden um Robert Wallauer und Ulrich Höfer die elektronische Struktur und Dynamik von Modell-Grenzflächen bis hin zu mikroskopischen Größenskalen komplett entschlüsseln. Wie schnell bewegen sich die elektrischen Ladungen, welche Energie besitzen die angeregten Zustände und wie verändern sie sich auf kurzen Zeitskalen? Mit einem ersten Laserimpuls, dem „Pump“-Strahl, treiben sie zunächst ein Elektron aus dem Grundzustand in einen angeregten Zustand; es bleibt im Material gebunden. Ein zeitlich verzögerter, zweiter Laserimpuls, der „Probe“-Strahl schlägt das Elektron ins Vakuum.

Mit Hilfe eines sogenannten Impulsmikroskops misst die Arbeitsgruppe die Bewegungsrichtung des ausgesendeten Photoelektrons und bestimmt seine Energie über die Flugzeit. Durch den systematischen zeitlichen Versatz von „Pump“ und „Probe“ können die Forschenden so den Quantenzustand des angeregten Elektrons mit einer zeitlichen Auflösung von einigen Femtosekunden verfolgen.

Im Fokus stehen dabei einerseits die von ihnen entdeckten Grenzflächenzustände an den elektrischen Kontaktflächen organischer Halbleiter und andererseits Grenzflächenexzitonen in 2D-Materialien wie MoS_2 oder WS_2 , die zur Materialklasse der TMDCs gehören. Neben herkömmlichen Femtosekundenlasern haben die Forscherinnen und Forscher dazu eine spezielle, selbst entwickelte Laserquelle zur Hand. Aus sichtbarem Laserlicht erzeugen sie in Kryptongas Harmonische mit der 7-fachen Frequenz der Ausgangsimpulse. Mit solchen Probestrahlen im fernen ultravioletten Spektralbereich kann die Photoemission Molekülorbitale sichtbar machen.

„Diese neue Kombination von Lasersystem und Impulsmikroskop ist fantastisch. Wir können nun, ähnlich der Computertomographie, riesige dreidimensionale Datensätze in Bereichen aufnehmen, die uns vorher nicht zugänglich waren“, sagt Robert Wallauer. Mit Hilfe dieses experimentellen Aufbaus konnten die Forschenden nun erstmals die Anregung von Molekülorbitalen mit Femtosekundenauflösung vermessen. Dadurch entsteht ein neuer Zugang zur Elektronendynamik an Grenzflächen, denn die Abbildung der Orbitale erlaubt es, den Elektronen auf ihrem Weg von einer Molekülschicht in die nächste zu folgen.



Schematische Darstellung der Zweiphotonenphotoemission (2PPE) an einer Metallgrenzfläche. Elektronen werden nur emittiert, nachdem sie sowohl ein Photon des „Pump“-Strahls ($\hbar\omega_a$) als auch ein Photon des „Probe“-Strahls ($\hbar\omega_b$) absorbiert haben.



Prof. Dr. Ulrich Höfer Philipps-Universität Marburg Oberflächenphysik

(+49) 6421 28-24215
ulrich.hoefer@physik.uni-marburg.de

EXPERTISE:

Experimentalphysik, Laserspektroskopie an Oberflächen und Grenzflächen, ultraschnelle Elektronendynamik, Adsorption auf Halbleiteroberflächen, Zweiphotonenphotoemission

Materialien: Metall/Organik, Anorganik/Organik, Organik/Organik, 2D Grenzflächen

Methoden: Epitaktisches Wachstum, Optische Spektroskopie



Dr. Robert Wallauer Philipps-Universität Marburg Oberflächenphysik

(+49) 6421 28-21406
robert.wallauer@physik.uni-marburg.de

EXPERTISE:

Experimentalphysik, hochauflösende Elektronenspektroskopie, ultraschnelle Elektronendynamik, Zweiphotonenphotoemission, Impulsmikroskopie

Materialien: Metall/Organik, Anorganik/Organik, 2D Grenzflächen

Methoden: Epitaktisches Wachstum, Optische Spektroskopie

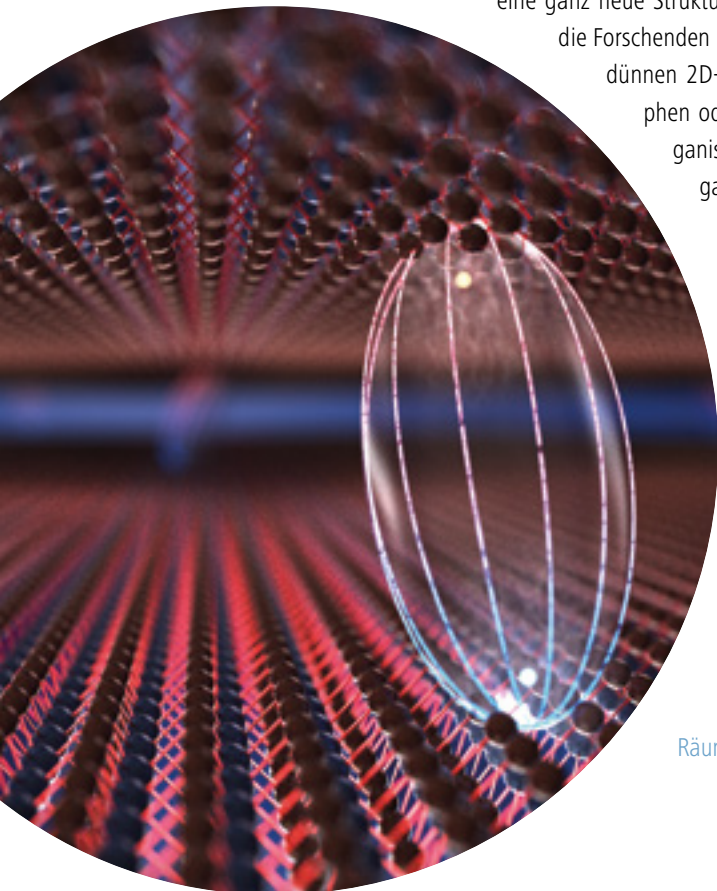
Licht-Materie-Wechselwirkung bei Grenzflächen zwischen atomdünne Nanomaterialien

In der Optik gibt es den sogenannten Moiré-Effekt, nach dem sich bei Überlagerung zweier verschiedener Gitter eine ganz neue Struktur ergibt. Ganz Ähnliches sehen die Forschenden im SFB beim Stapeln von atomdünne 2D-Materialien, etwa TMDCs, Graphen oder periodisch angeordneten organischen Schichten. Es ergeben sich ganz neue periodische Strukturen mit überraschenden Eigenschaften. Die Arbeitsgruppe um den theoretischen Physiker Ermin Malic kann basierend auf quantenmechanischen Methoden Moiré-Effekte modellieren.

„Wir haben eine sehr starke Anbindung an das Experiment“, sagt der Physiker, der Anfang 2021 von der schwedischen Chalmers Universität (Göteborg) nach Marburg wechselte. Die spezifische Materialmodellierung hilft, die experimentellen Daten zu interpretieren und Strategien zu entwickeln, bestimmte technologisch relevante Eigenschaften zu optimieren.

Mit dem mikroskopischen Formalismus der Dichtematrixtheorie können die Forschenden aus der Physik den Weg der Elektronen innerhalb der geschichteten 2D-Materialien in der Zeit, Energie und sogar Ort auflösen und damit deren Optik-, Dynamik- und Transport-Eigenschaften vorhersagen, die letztendlich die technologische Anwendung von diesen Materialien bestimmen. Spannung verspricht insbesondere das Verdrehen der Schichten gegeneinander: Erst jüngst konnten Forscher am MIT zeigen, dass ein Verdrehen von zwei Lagen von Graphen um einen „magischen Winkel“ von genau 1,1 Grad überraschenderweise supraleitende Eigenschaften zutage förderte.

Räumlich getrenntes Interlagen-Exziton.



Prof. Dr. Ermin Malic
Philipps-Universität Marburg
Ultraschnelle Quantendynamik
(+49) 6421 28-22641
ermin.malic@physik.uni-marburg.de

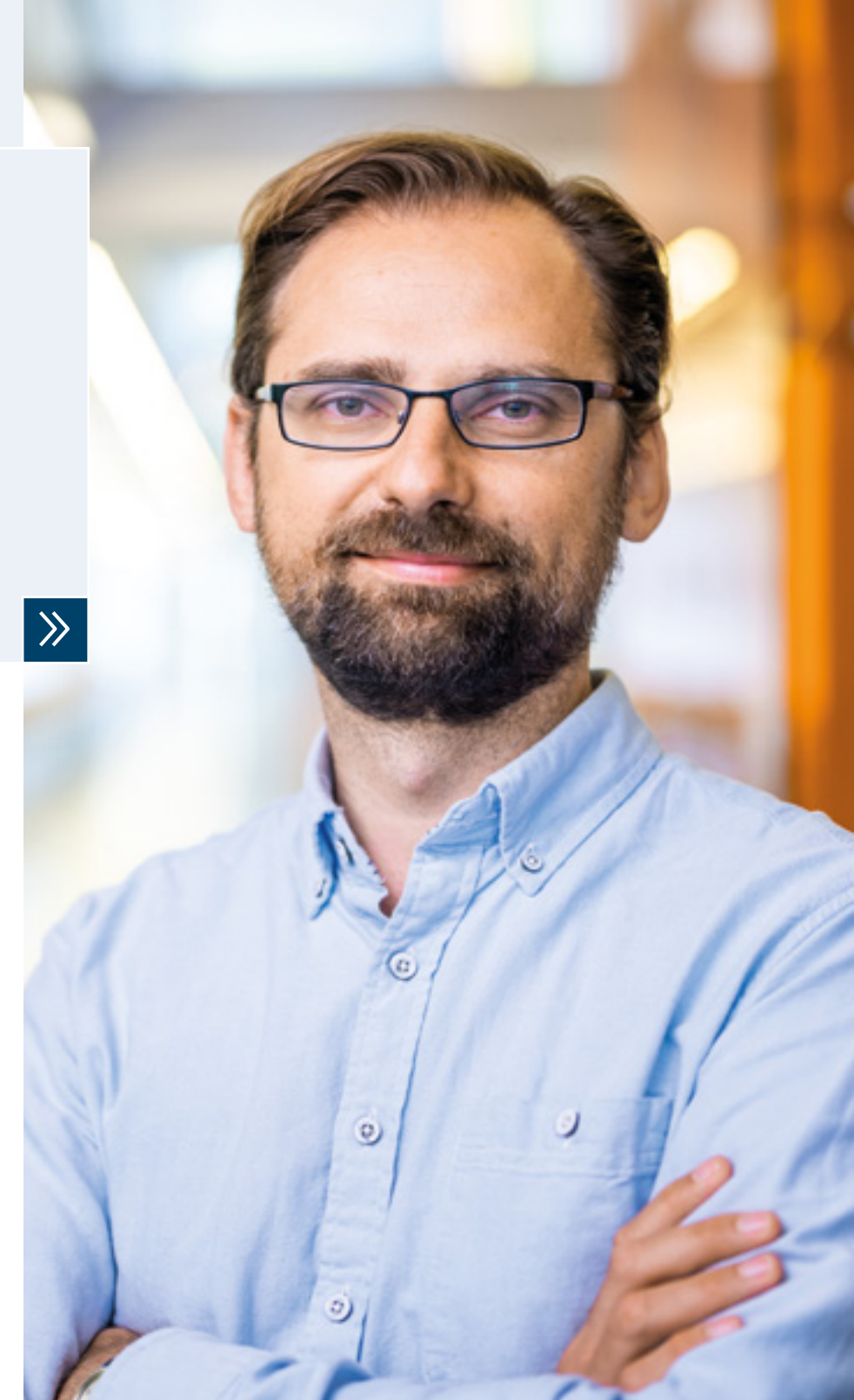
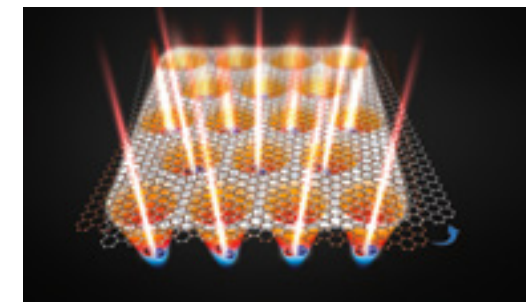
EXPERTISE:

Theoretische Physik, Festkörperphysik, Licht-Materie Kopplung, Ultraschnelle Quantendynamik, Exzitonen, Moiré Phänomene, Dichtematrixformalismus

Materialien: 2D Grenzflächen

Methoden: Theorie/Modellierung

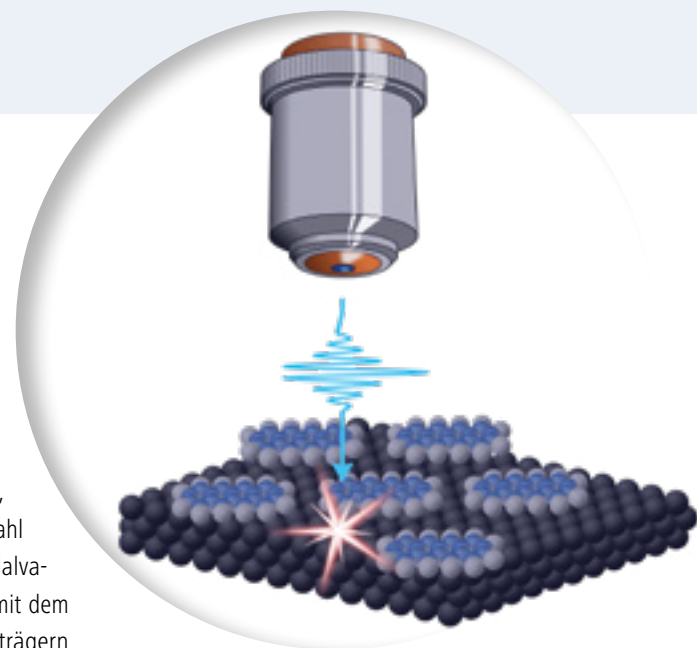
„Durch den Drehwinkel können wir fundamentale Material-Eigenschaften verändern“, sagt Ermin Malic. Das Projekt B9 plant gemeinsam mit experimentellen Projekten innerhalb des SFBs, den Drehwinkel als neuen Freiheitsgrad für die gezielte Änderung von optischen und elektronischen Eigenschaften von Schichtsystemen aus 2D-Materialien (TMDC, Graphen, organische Kristalle) auszunutzen.



Dynamik von Ladungstransferexzitonen an organisch/ organischen und hybriden organisch/anorganischen Heterogrenzflächen

Wie verhält sich eine Population von Exzitonen an einer Grenzfläche? Wohin wandern sie, und welche energetischen Eigenschaften weisen sie auf? Welche Rollen spielen Morphologie und Material? All dies will die Arbeitsgruppe von Marina Gerhard mit der zeitaufgelösten Photolumineszenzspektroskopie herausfinden. „Das ist für mich wie beim Lösen eines Kriminalfalls“, sagt die Marburger Physikerin. Es gibt eine Vielzahl an Indizien, also: Messdaten, Parameter, Materialvarianten. Die gilt es in ein Gesamtbild zu fügen, mit dem Ziel, die Dynamik von Exzitonen und Ladungsträgern grundlegend zu verstehen. Untersucht werden beispielsweise Heterostrukturen aus verschiedenen organischen Materialien oder etwa organische Schichten auf anorganischen TMDCs.

Bei der zeitaufgelösten Photolumineszenzspektroskopie werden zunächst Ladungsträger im Material durch einen Laserpuls angeregt. Diese durchwandern dann die Energielandschaft und es können sich Elektron-Loch-Paare bilden. Bei der Rekombination oder Relaxation wird wiederum ein charakteristischer Lichtpuls abgestrahlt, der in einer Kamera/Spektrometeranordnung zeitlich und wahlweise spektral oder räumlich aufgelöst werden kann.



Die Abbildung skizziert die Methodik, die für das Projekt zentral ist: Die zeit- und ortsauflöste Photolumineszenzspektroskopie. Ein wichtiger Gegenstand der Untersuchungen sind organisch/anorganische Grenzflächen.

Prof. Dr. Marina Gerhard
Philipps-Universität Marburg
Experimentelle Halbleiterphysik

(+49) 6421 28-24303
marina.gerhard@physik.uni-marburg.de

EXPERTISE:

Organische und anorganische Halbleiter, ungeordnete Materialien, optische und Terahertzspektroskopie, zeitaufgelöste Photolumineszenzspektroskopie, Photolumineszenzmikroskopie

Materialien: Metall/Organik, Organik/Anorganik, Organik/Organik, 2D Grenzflächen

Methoden: Optische Spektroskopie

„Wahnsinnig spannend ist, ob sich da ganz neue Zustände bilden“, sagt Marina Gerhard. Bei einem sogenannten Charge-Transfer-Exziton (bei dem die beiden Ladungsteile über die Grenzfläche separiert sind) kann sich die Ladung im TMDC recht gut bewegen, in der Schicht organischer Moleküle ist der korrespondierende Ladungsanteil jedoch eher auf das Molekül begrenzt. Doch wie verhält sich nun das Exziton als Ganzes? Anhand der Modellsysteme wollen die Forschenden die physikalischen Grundlagen verstehen. Für zukünftige Anwendungen kann dann die Kenntnis entscheidend sein, welche Prozesse ein Bauteil effizient machen und welche nicht.



Ultrakurzzeitdynamik von elektrischen Strömen an Grenzflächen

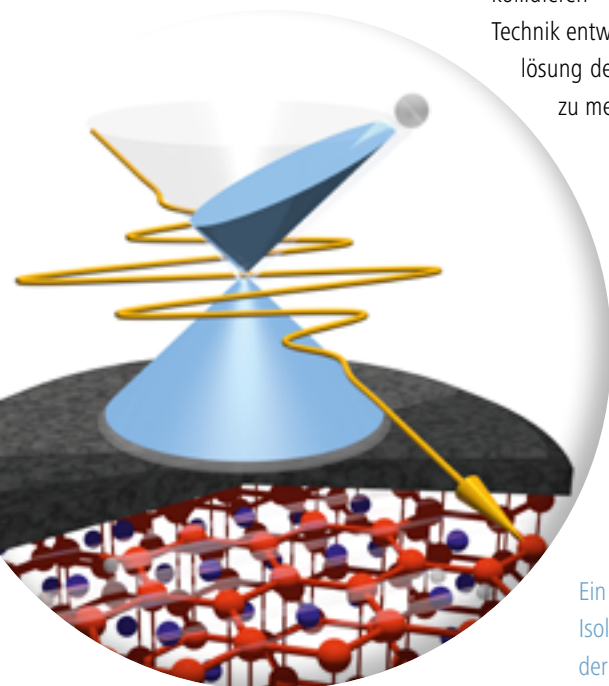
Tief in die physikalische Trickkiste greifen die Physiker Ulrich Höfer und Jens Gütde, um dem elektrischen Stromtransport an Grenzflächen in Echtzeit zuzuschauen. Elektronen sind in Festkörpern recht flüchtige Objekte, sie bewegen sich mit extrem hohen Geschwindigkeiten von einigen 100 km pro Sekunde, bis sie mit Hindernissen wie Defekten, Fremdatomen oder Gitterschwingungen kollidieren – im Fachjargon „streuen“. „Wir haben eine Technik entwickelt, um kontaktlos und mit hoher Zeitauflösung den Stromtransport entlang von Grenzflächen zu messen“, sagt der Physiker Ulrich Höfer.

„Die Methode hat den Vorteil, dass die Zeitauflösung nicht durch elektronische Geräte begrenzt ist und es keinerlei Artefakte durch aufgebrachte Kontakte oder Sonden gibt“, erläutert sein Kollege Jens Gütde. Damit können die Forschenden aus der Physik direkt und unmittelbar erforschen, was den Stromfluss befördert oder hemmt. Im Blick haben sie die neue Materialklasse der topologischen Isolatoren,

Ein intensiver, ultrakurzer Terahertz-Impuls beschleunigt Elektronen an der Grenzfläche zu einem topologischen Isolator, dessen elektronische Bandstruktur dort einen Dirac-Kegel ausbildet. Aus der beobachteten Verkipfung der Elektronenverteilung kann direkt auf den induzierten Strom geschlossen werden.

deren elektrisch leitende Grenzflächen prinzipiell einen ungehinderten Stromfluss ermöglichen. Dies konnte im Vakuum an reinen, nackten Oberflächen schon demonstriert werden. Jetzt gilt es, dies auch für technische Anwendungen zu zeigen, in denen die aktive Grenzfläche unter einer Schutzschicht vergraben ist.

Für ihre Analyse der Stromflüsse beschleunigen die Forschenden zunächst die Elektronen im elektromagnetischen Feld von Terahertz-Strahlen. Dann schießen sie die Elektronen mit einem kurzen ultravioletten Laserimpuls ins Vakuum, wo sie in einem Spektrometer registriert werden. Aus der gemessenen Geschwindigkeitsverteilung der Elektronen können sie direkt auf den elektrischen Strom entlang der Grenzfläche schließen. Besonderes Augenmerk verdient dabei, ob und wie sich ein ‚ballistischer Stromfluss‘ einstellt, also ein Strom ohne Streuung. Mit einem solchen ungehinderten Stromfluss wären zukünftig Bauelemente realisierbar, deren Schaltfrequenz im THz-Bereich liegt, also 1000-mal höher ist, als die GHz-Taktfrequenz heutiger Mikrochips.



Prof. Dr. Ulrich Höfer
Philipps-Universität Marburg
Oberflächenphysik

(+49) 6421 28-24215
ulrich.hoefer@physik.uni-marburg.de

EXPERTISE:

Experimentalphysik, Laserspektroskopie an Oberflächen und Grenzflächen, ultraschnelle Elektronendynamik, Adsorption auf Halbleiteroberflächen

Materialien: Anorganik/Anorganik, Anorganik/Organik, 2D Grenzflächen

Methoden: Optische Spektroskopie



Prof. Dr. Jens Gütde
Philipps-Universität Marburg
Oberflächenphysik

(+49) 6421 28-24149
jens.guedde@physik.uni-marburg.de

EXPERTISE:

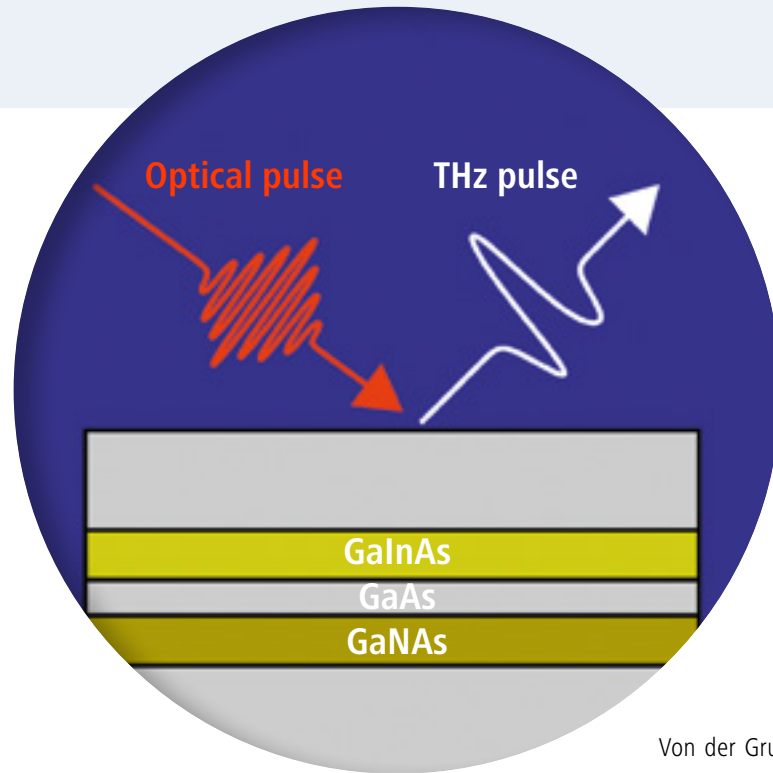
Experimentelle Festkörperphysik, Laserspektroskopie und nichtlineare optische Methoden, zeit- und winkelaufgelöste Photoelektronenspektroskopie, ultraschnelle Elektronendynamik an Ober- und Grenzfläche

Materialien: Anorganik/Anorganik, Anorganik/Organik, 2D Grenzflächen

Methoden: Optische Spektroskopie



THz-Emitter auf der Basis von Typ-II-Strukturen



Ein ultrakurzer Laserpuls regt Ladungsträger in einer speziellen Halbleiter-Nanostruktur an. Der anschließende räumliche Ladungsträgertransfer zwischen inneren Schichten ist die Quelle für einen kurzen Terahertz-Impuls.

Von der Grundlagenforschung zum Prototyp eines technischen Bauelements: Die Forschenden im SFB wollen auch exemplarisch zeigen, wie aus wissenschaftlichen Ergebnissen neue Anwendungsideen entstehen können. So etwa im Bereich von Terahertz-Emittern. Der elektromagnetische Spektralbereich von THz – gelegen zwischen Mikrowellen und Infrarot – ist bislang kaum erschlossen, was auch an wenig leistungsfähigen Bauelementen liegt. Bislang werden THz-Wellen bei Körperscannern genutzt und gelten als Kandidaten für das WLAN der Zukunft.

In ihrem Forschungsprojekt will die Gruppe um Martin Koch durch Laserpulse auf ein strukturiertes Halbleitermaterial aus der Familie der III/V-Halbleiter kontrolliert Terahertz-Wellen erzeugen. Dazu wird das Schichtmaterial mit ultrakurzen Laserpulsen bestrahlt, wobei freie Ladungsträger erzeugt werden. In einem Tunnelprozess durch eine Barriere gelangen die erzeugten Ladungsträger in benachbarte Materialschichten. Der mit der Bewegung der Ladungsträger verbundene Strompuls ist nach den Maxwell'schen Gesetzen die Quelle eines abstrahlenden elektromagnetischen Pulses im Frequenzbereich der Terahertz-Wellen.

Die weiteren Forschungsanstrengungen im Verbund mit der Herstellung der Halbleiter-Heterostrukturen (AG Volz) und den Modellierern um Ermin Malic zielen darauf, die zugrunde liegenden physikalischen Abläufe in Abhängigkeit von Material- und Prozessparametern besser zu verstehen und die Energieausbeute für den resultierenden Terahertz-Puls zu verbessern. Zudem wollen die Forschenden ein statisches magnetisches Feld anlegen und so die Strompulse ‚umbiegen‘. Diese Geometrieänderung soll es der THz-Welle erleichtern, das Material zu verlassen und so eine stärkere THz-Emission zu ermöglichen.

Prof. Dr. Martin Koch
Philipps-Universität Marburg
Experimentelle Halbleiterphysik

(+49) 6421 28-22119
martin.koch@physik.uni-marburg.de

EXPERTISE:

Laserspektroskopie von Halbleitern und Halbleiter-Heterostrukturen, Terahertz-Spektroskopie

Materialien: Anorganik/Anorganik

Methoden: Optische Spektroskopie



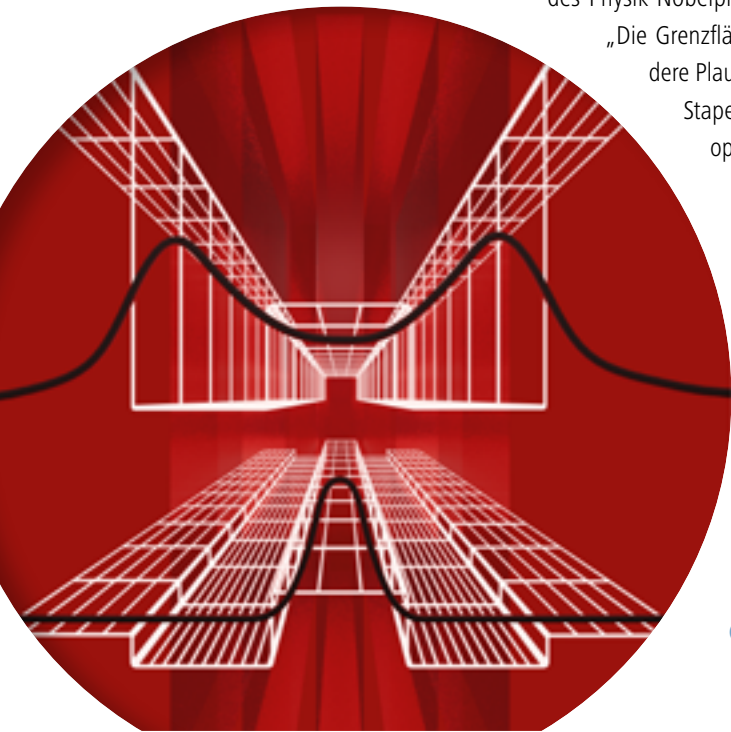
Anorganische, Grenzflächen-dominierte Heterostrukturen für Bauelementkonzepte

Wichtiges Anwendungsprojekt im SFB ist der sogenannte W-Laser. Er ist nach der W-ähnlichen Bandlückenkonfiguration der aktiven Zone in Wachstumsrichtung benannt (siehe Graphik). Nicht nur Materialien und Dotierungen sind für seine Funktion entscheidend, sondern auch alle Grenzflächen, da die Ladungsträger über die Grenzflächen hinweg rekombinieren. Hier erlangt die Aussage des Physik-Nobelpreisträgers Herbert Kroemer – „Die Grenzfläche ist das Bauteil“ – besondere Plausibilität. Für die Theorie ist das Stapelprinzip charmant, da sich die opto-elektronischen Bauteileigenschaften sehr gut berechnen lassen. In den ersten beiden Förderperioden konnte nun im Wechselspiel von Theorie und Experiment der Proof-of-Principle gemacht werden, dass der W-Laser bei 1.3 Mikrometern Emissionswellenlänge stabil funktioniert.

Doch damit nicht genug. In der kommenden Förderperiode wollen die Teams von Kerstin Volz (Materialentwicklung) und Sangam Chatterjee (Spektroskopie) die Laser-Parameter so weit optimieren, dass mit 1.55 Mikrometern das ‚Kommunikationsfenster‘ von Glasfaserkabeln erreicht wird. „Und bei 2 - 3 Mikrometern haben Gase und Moleküle ihre Fingerprint-Region“, erläutert Kerstin Volz. Dort können Laser in der Umweltanalytik und Medizin-diagnostik eingesetzt werden. Die Forschenden ‚spielen‘ also an den Materialien – den Verbindungshalbleitern Ga(N,As) und Ga(As,Bi) –, der Dotierung und den Prozessparametern der epitaktischen Abscheidung auf einem GaAs-Substrat, um ihre Ziele zu erreichen.

Mit spektroskopischen Methoden sollen dann die Teststrukturen analysiert und der Aufbau mit für den Laserbetrieb relevanten Parametern korreliert werden. Solchermaßen gilt es, den W-Laser durch Materialaufbau, Dotierung und Grenzflächenstrukturen immer weiter zu infraroten Strahlungsübergängen zu schieben und schließlich stabile Laseraktivität im Mittelinfraroten zu demonstrieren.

Künstlerische Illustration der Wellenfunktion, des Bandlückenverlaufs und der Gitteranpassung des Schichtstapels der aktiven Zone eines W-Lasers.



Prof. Dr. Kerstin Volz
 Philipps-Universität Marburg
 Struktur- & Technologieforschungslabor
 (+49) 6421 28-22297
 kerstin.volz@physik.uni-marburg.de

EXPERTISE:

Transmissionselektronenmikroskopie, Metallorganische Gasphasenepitaxie, Epitaktisches Wachstum von Halbleiterstrukturen, strukturelle, optische und Wachstumskorrelation von funktionalen Materialien

Materialien: Anorganik/Anorganik, Anorganik/Organik

Methoden: Strukturanalyse, Epitaktisches Wachstum



Prof. Dr. Sangam Chatterjee
 Justus-Liebig-Universität Gießen
 Spektroskopie • Optik
 (+49) 641 99-33100
 sangam.chatterjee@physik.uni-giessen.de

EXPERTISE:

Experimentalphysik, Festkörperphysik, Halbleiter-Optoelektronik, Ultrakurzzeitspektroskopie, Optik

Materialien: Anorganik/Anorganik

Methoden: Optische Spektroskopie



Projektleitende der beendeten Projekte



Prof. Dr. Robert Berger
Philipps-Universität Marburg,
Theoretische Chemie

robert.berger@chemie.uni-marburg.de

EXPERTISE:

Quantenchemie, Theoretische Chemie, Methodenentwicklung (vibronische Strukturmethoden, molekulare Eigenschaften, elektroschwache Quantenchemie, relativistische Quantenchemie), Anwendungen (Photochemie, Photophysik, theoretische Spektroskopie, Materialien, Katalyse)

Ehemaliger Projektleiter von B8 (Quantenchemie für molekulare Schwingungs- und elektronische Übergänge an organischen Grenzflächen)



Prof. Dr. Stefanie Dehnen
Philipps-Universität Marburg,
Anorganische Chemie

stefanie.dehnen@chemie.uni-marburg.de

EXPERTISE:

Anorganische Synthese, organometallische Synthese, Kristallstrukturanalyse, Spektroskopie (NMR/IR/Raman/UV-Vis), thermogravimetrische Analyse, Quantenchemie von Molekülen

Ehemalige Projektleiterin von A9 (Synthese und Eigenschaften von molekularen anorganisch/anorganisch/organischen Multilayer-Clustern)



Prof. Dr. Pedro Miguel Echenique

DIPC – Donostia International Physics Center, San Sebastián, Spanien

pedromiguel.echenique@ehu.eus

EXPERTISE:

Theoretische Festkörperphysik, elektronische Eigenschaften von Oberflächen und Nanostrukturen

Ehemaliger Projektleiter von GP1 (Ab initio Theorie der Elektronendynamik an organisch/anorganischen Grenzflächen)



Dr. Katharina Ines Gries
Philipps-Universität Marburg,
Struktur- & Technologieforschungslabor

kgries@gmx.de

EXPERTISE:

Strukturanalyse, Transmissionselektronenmikroskopie

Ehemalige Projektleiterin von A5 (Atomar aufgelöste Struktur vergrabener Grenzflächen zwischen Festkörpern)



Prof. Dr. Wolfram Heimbrodt
Philipps-Universität Marburg,
Experimentelle Halbleiterphysik

wolfram.heimbrodt@physik.uni-marburg.de

EXPERTISE:

Optische und magneto-optische Spektroskopie von Halbleiternanostrukturen, Exzitonendynamik in Halbleiternanostrukturen und organisch-anorganischen Hybriden

Ehemaliger Projektleiter von B1 (Optische Spektroskopie an inneren Grenzflächen – Halbleiter Heterostrukturen und organisch-anorganische Hybridsysteme) und B3 (Zeitaufgelöste Terahertz- und optische Spektroskopie an vergrabenen Grenzflächen)



Prof. Dr. Mackillo Kira
Department of Electrical Engineering University of Michigan, Ann Arbor, MI/USA (jetzt)

mackkira@umich.edu

EXPERTISE:

Halbleiter Quantenoptik, Quantenoptik, Festkörpertheorie, Terahertzspektroskopie, Vielteilcheneffekte, photonische Korrelationen, kohärente und ultraschnelle Phänomene, Clusterentwicklung (Formalismus und Programmierung)

Ehemaliger Projektleiter von B4 (Mikroskopische Theorie der optischen Anregungen in grenzflächendominierten Materialsystemen)

Projektleitende der beendeten Projekte



Prof. Dr. Stephan W. Koch

Philipps-Universität Marburg,
Theoretische Halbleiterphysik

stephan.w.koch@physik.uni-marburg.de

EXPERTISE:

Festkörpertheorie, optische und elektronische Eigenschaften von Festkörpern, Vielteilcheneffekte, Halbleiter Quantenoptik, Quanten-Confinement-Effekte, kohärente und ultraschnelle Phänomene, Halbleiterlasertheorie, Mikroresonatoren und photonische Kristalle

Ehemaliger Projektleiter von B4 (Mikroskopische Theorie der optischen Anregungen in grenzflächendominierten Materialsystemen) und B7 (Grenzflächendominierte Halbleiter-Laserstrukturen)



Dr. Gerson Mette

Philipps-Universität Marburg,
Oberflächenphysik

gerson.mette@gmx.de

EXPERTISE:

Experimentalphysik, Nichtlineare optische Spektroskopie an Grenzflächen, Rastertunnelmikroskopie, Adsorption auf Halbleiteroberflächen

Ehemaliger Projektleiter von B5 (Zeitaufgelöste nichtlineare optische Spektroskopie an Halbleitergrenzflächen)



Dr. Daniel Sánchez-Portal

DIPC – Donostia International Physics Center, San Sebastián, Spanien

daniel.sanchez@ehu.eus

EXPERTISE:

Theoretische Festkörperphysik, elektronische Eigenschaften von Oberflächen und Nanostrukturen, Ab-initio Rechnungen, Methoden-Entwicklung und Implementierung für Elektronen-Struktur-Berechnungen

Ehemaliger Projektleiter von GP1 (Ab initio Theorie der Elektronendynamik an organisch/anorganischen Grenzflächen)



Dr. Martin Schmid

Philipps-Universität Marburg,
Physikalische Chemie

Martin.Schmid@scientaomicron.com

EXPERTISE:

Oberflächenchemie, organische und organometallische Dünnschichten, Photoelektronenspektroskopie, Rastertunnelmikroskopie

Ehemaliger Projektleiter von A4 (Reaktivität, Energetik und Struktur von vergrabenen Organik/Metall-Grenzflächen)



Prof. Dr. Wolfgang Stolz

Philipps-Universität Marburg,
Struktur- & Technologieforschungslabor

wolfgang.stolz@physik.uni-marburg.de

EXPERTISE:

Epitaktisches Wachstum von III/V Halbleiter Hetero- und Nanostrukturen, deren strukturelle, elektrische und optoelektronische Charakterisierung, Halbleitertechnologie, optoelektronische Anwendungen

Ehemaliger Projektleiter von A1 (Metallorganische Gasphasenepitaxie von Halbleiter-Heterostrukturen und -grenzflächen) und B7 (Grenzflächendominierte Halbleiter-Laserstrukturen)



Prof. Dr. Jörg Sundermeyer

Philipps-Universität Marburg,
Organometallchemie

jsu@chemie.uni-marburg.de

EXPERTISE:

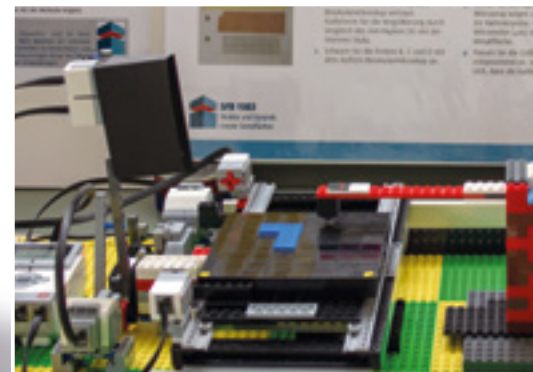
Anorganische Molekülchemie, Koordinationschemie, Organometallchemie, Homogenkatalyse, Biphasenkatalyse, Funktionsmoleküle für die Materialchemie

Ehemaliger Projektleiter von A7 (Funktionsdesign und Synthese metallorganischer Chromophore für interne Grenzflächen)

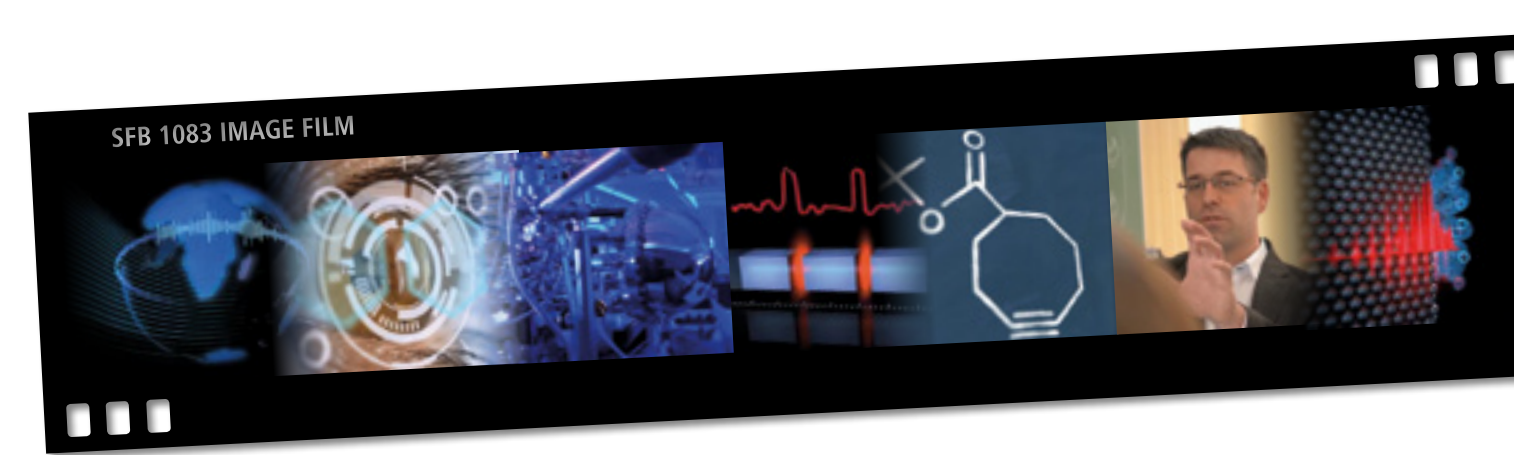
Wir gehen an die Grenze

Das Chemikum Marburg ist ein erfolgreiches Science Center und Mitmach-Labor mitten in der Universitätsstadt Marburg. Rund 13.000 Besucher kommen jährlich zu den Vorträgen, Führungen und Workshops. Unter dem Motto „Wir gehen an die Grenze“ präsentiert sich dort der Sonderforschungsbereich 1083 mit rund einem Dutzend Exponaten und Experimenten.

Insgesamt deckt das Chemikum mit 50 Experimentierstationen ganz verschiedene Aspekte der Naturwissenschaften im Leben der Menschen ab. Verteilt über das gesamte Chemikum kommen die Besucher immer wieder mit Grenzflächen-Experimenten und Exponaten des SFB in Berührung. Dazu zählen Licht- und Wellenphänomene. Mit einem AFM („atomic force microscope“) aus Lego-Bausteinen können kleinste Strukturen untersucht werden. Dann geht es um Grenzflächentechnik für Smartphones, günstige Oberflächeneigenschaften fürs Kleben von Bauteilen oder chemische Reaktionen an Oberflächen wie bei der Nylon-Herstellung.




chemikummarburg



Die Experimente im Chemikum sind wesentlich betreuungsaufwändiger als in klassischen Science Centern, berichtet Dr. Christof Wegscheid-Gerlach, Mitglied des Direktoriums. Die Besucher bekommen Studierende oder Doktoranden als Betreuer zur Seite gestellt. „Wir lassen nicht Knöpfchen drücken. Die Besucher können die Versuche selbst durchführen“, sagt Wegscheid-Gerlach. Günstig gelegen am Hauptbahnhof von Marburg hat das Chemikum einen Einzugsbereich von Frankfurt bis Kassel, entlang der Bahnlinie, aber auch darüber hinaus.

Gleichzeitig präsentiert sich das Chemikum „mobil“ auf Stadt- und Strassenfesten. Der SFB-Grenzflächenversuch zu Solarzellen bietet sich hierfür besonders an.



Die Integration des SFB in das Chemikum hat für die Museumsdirektorin Prof. Dr. Stefanie Dehnen gleich zwei wichtige Aspekte: „Unser Chemikum bekommt neue, einzigartige Experimente. Das stärkt unser Alleinstellungsmerkmal unter den Science Centern.“ Ferner hat sich das Chemikum bewährt, naturwissenschaftliche Inhalte in die Öffentlichkeit zu tragen. „So können wir den SFB weiter bekannt machen“, sagt der Leiter des Ö-Projekts Dr. Christof Wegscheid-Gerlach.

Das Chemikum ist immer in Bewegung und wird nie langweilig. Dadurch gelingt es der Einrichtung, Menschen auch mehrmals ins Museum zu locken. Seit Herbst 2017 gibt es Workshops, die sich speziell den Grenzflächenphänomenen widmen und sich insbesondere an Schulklassen richten. Diese werden in der kommenden Förderperiode mit virtuellen Versuchen ergänzt. So können Details an der Grenzfläche im Nanometer-Bereich veranschaulicht werden.

Die Besucher des Chemikums können dort auch den SFB-Imagefilm sehen, der den wissenschaftlichen Hintergrund des Verbunds und die Bedeutung im täglichen Leben veranschaulicht. Der Film ist auf [Deutsch](#) und [Englisch](#) verfügbar.

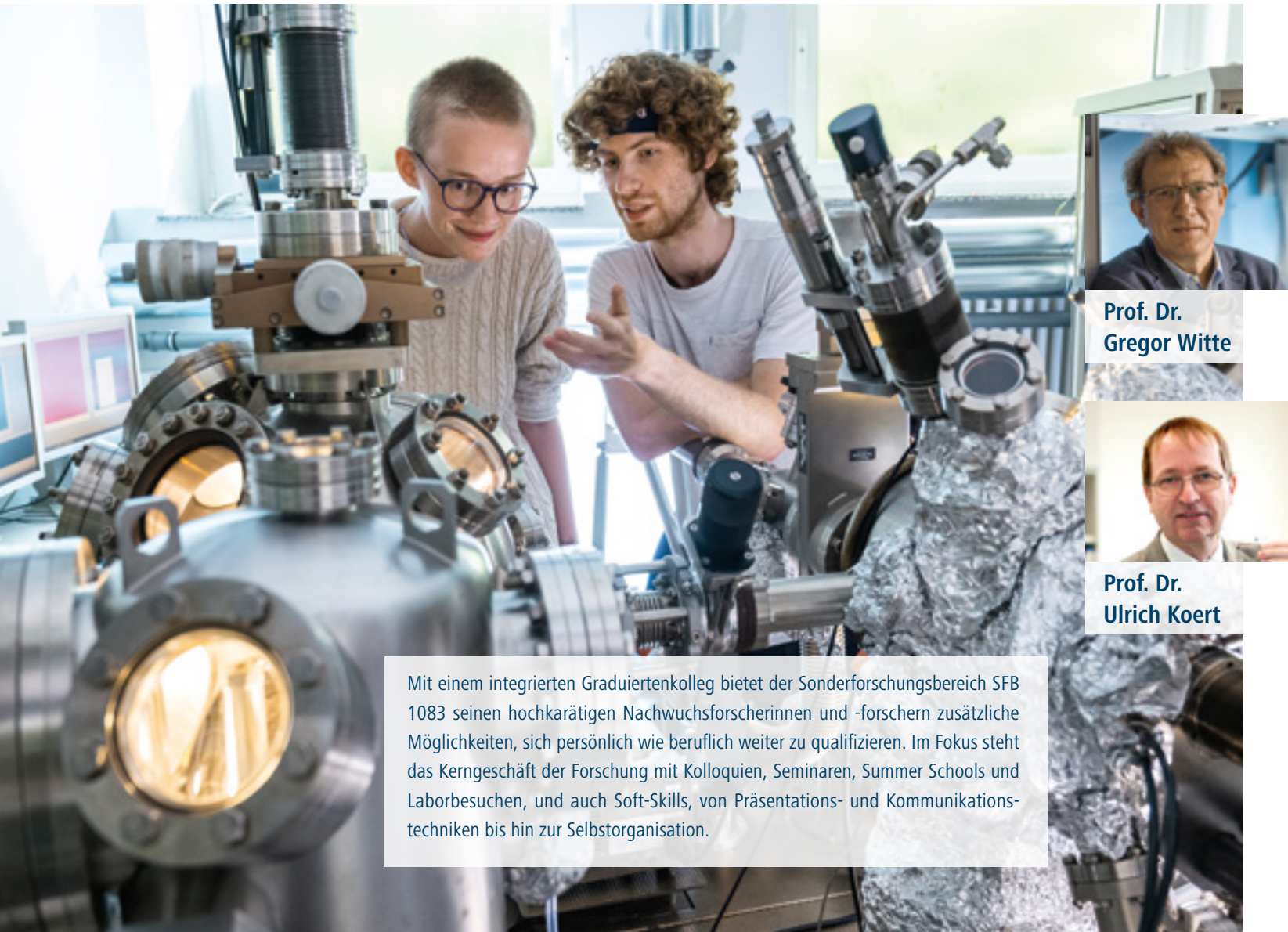
Chemikum Marburg e.V.

Bahnhofstraße 7
35037 Marburg
Telefonische Buchungen/Anfragen:
06421-28 25 25 2

Mo-Fr.: 8.30-13.00 Uhr
Mi und Fr: 15.00-17.00 Uhr
Sa: 11.00-13.00 und 15.00-17.00 Uhr

Im Internet: www.chemikum-marburg.de

Optimale Förderung für hochqualifizierte Forscherinnen und Forscher



Mit einem integrierten Graduiertenkolleg bietet der Sonderforschungsbereich SFB 1083 seinen hochkarätigen Nachwuchsforscherinnen und -forschern zusätzliche Möglichkeiten, sich persönlich wie beruflich weiter zu qualifizieren. Im Fokus steht das Kerngeschäft der Forschung mit Kolloquien, Seminaren, Summer Schools und Laborbesuchen, und auch Soft-Skills, von Präsentations- und Kommunikationstechniken bis hin zur Selbstorganisation.

**Prof. Dr.
Gregor Witte**

**Prof. Dr.
Ulrich Koert**

Forschung ist Teamarbeit, die den Forschenden eine Vielzahl an Kompetenzen abverlangt: in Forschung und Lehre, Präsentation und Kommunikation, Leitung und Zusammenarbeit. Das integrierte Graduiertenkolleg des SFB soll genau diesen Reifeprozess der sogenannten Nachwuchsforschenden zu selbständig agierenden Forschenden an Hochschule oder auch in der Industrie unterstützen. „Durch den SFB sind 25 Doktorandenstellen eingeworben worden, so dass zusammen mit den Promovierenden der Grundausstattung insgesamt rund 50 Kollegiatinnen und Kollegiaten am Graduiertenkolleg teilnehmen“, sagt Gregor Witte, Physikprofessor an der Universität Marburg und einer von zwei Koordinatoren des Kollegs. Witte betont, dass die Programminhalte des Kollegs kein Pflichtprogramm darstellen, sondern den Promovierenden eine Toolbox (siehe Kasten) bieten, genau das Richtige um ihren Weg zu finden. „Das Programm soll auch nicht vom Kernthema Forschung ablenken, sondern auf den eigenen Forschungs- und Karrierefortschritt fokussieren“, sagt Witte. Es gilt, die richtige Balance für jeden Einzelnen zu finden.

Das Graduiertenkolleg bietet auch eine Art geschützten Raum, in dem sich die Forschenden ausprobieren können. Das reicht vom Auftreten und Präsentieren auf einer (internen) Konferenz, wie etwa bei einer Summer School, bis hin zum Aufbau von Kooperation über die Arbeitsgruppe oder gar die Universität hinweg. Es gibt auch ausdrücklich Seminarkonzepte ohne Projektleiterinnen und -leiter. „Wenn die Doktorandinnen und Doktoranden sich hier erfolgreich unterstützen lernen, haben wir ein wichtiges pädagogisches Ziel erreicht“, sagt Ulrich Koert, Hochschullehrer für Organische Chemie und der zweite Koordinator des Kollegs.

Über ein Kurzzeitstipendium können ausländische Studierende frische SFB-Luft schnuppern und während eines 3- bis 6-monatigen Forschungspraktikums in Marburg die Option auf eine Promotion abwägen. Später können Promovierende bei Laborbesuchen in die verschiedenen Arbeitsgruppen hineinschnuppern oder auch eigenständig Forschungsaufenthalte in AGs im Ausland organisieren. Kurz: Kolleg und Koordinatoren bieten Support und Betreuung, nutzen die bestehenden Strukturen der Graduiertenförderung der beteiligten Partner-Universitäten in Gießen, Jülich, Leipzig, Marburg und Münster und bieten den Promovierenden ein bestmögliches Umfeld zur Weiterqualifizierung.

Toolbox:

- SFB-Kolloquium
- Seminarreihen
- gegenseitige Laborbesuche
- 2-wöchige Hospitationen in Nachbar-AGs
- mehrmonatige Forschungsaufenthalte
- Präsentations- und Kommunikationstechniken
- Summer Schools
- Betreuung

Internationale Partner

Rund um den Globus ist der SFB durch internationale Kooperationen vertreten. Die ohnehin guten Vernetzungen der vorangegangenen Förderperioden konnten nochmals erweitert werden, speziell nach Asien. Innerhalb Deutschlands ist der SFB 1083 mit den zusätzlichen Standorten in Gießen, Jülich, Münster und Leipzig sehr breit aufgestellt.



Prof. Dr. Rupert Huber
 Institut für Experimentelle und Angewandte
 Physik, Universität Regensburg



Prof. Dr. Peter Liljeroth
 Department of Applied Physics
 Aalto University, Espoo, Finland



Prof. Dr. Xike Gao
 Institute of Organic Chemistry, Chinese
 Academy of Sciences, Shanghai, China



Prof. Dr. Kyoko Ishizaka
 School of Engineering, University of Tokyo
 and RIKEN, Japan Matter Science, Japan



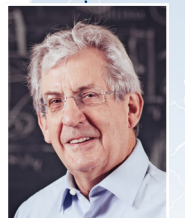
Prof. Dr. Mackillo Kira
 Department of Electrical Engineering
 University of Michigan, Ann Arbor, MI/USA



Prof. Dr. Hrvoje Petek
 Department of Physics and Astronomy
 University of Pittsburgh, PA/USA



Prof. James Hone
 Columbia Engineering, Columbia University,
 New York, NY/USA



Prof. Dr. Pedro M. Echenique
 Donostia International Physics Center
 (DIPC), San Sebastián, Spain



Dr. Daniel Sánchez-Portal
 Centro de Física de Materiales, CSIC-UPV/
 EHU und DIPC, San Sebastián, Spain



Dr. Kunie Ishioka
 National Institute for Materials Science
 (NIMS), Tsukuba, Japan

Infrastruktur – eine Übersicht

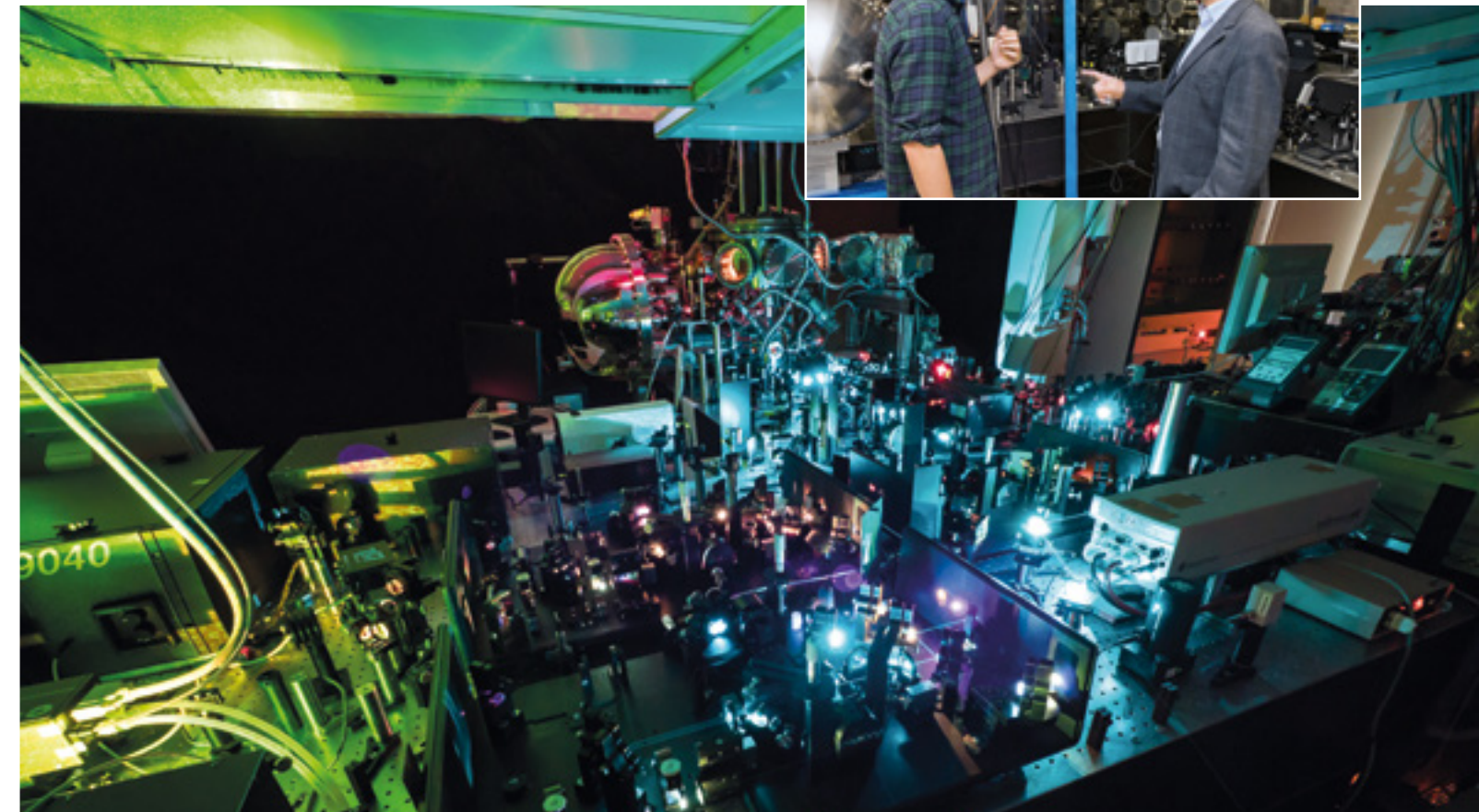
Eine gute Infrastruktur technischer Geräte ist die Voraussetzung für exzellente Forschung. Daher profitiert der Sonderforschungsbereich „Struktur und Dynamik innerer Grenzflächen“ in besonderem Maße von Infrastruktur-Investitionen an der Philipps-Universität Marburg. Hierzu zählen Apparaturen, um Schichten und innere Grenzflächen aufzubauen, sowie die Ausstattung, um diese Modellsysteme zu charakterisieren und die opto-elektronischen Eigenschaften zu untersuchen.

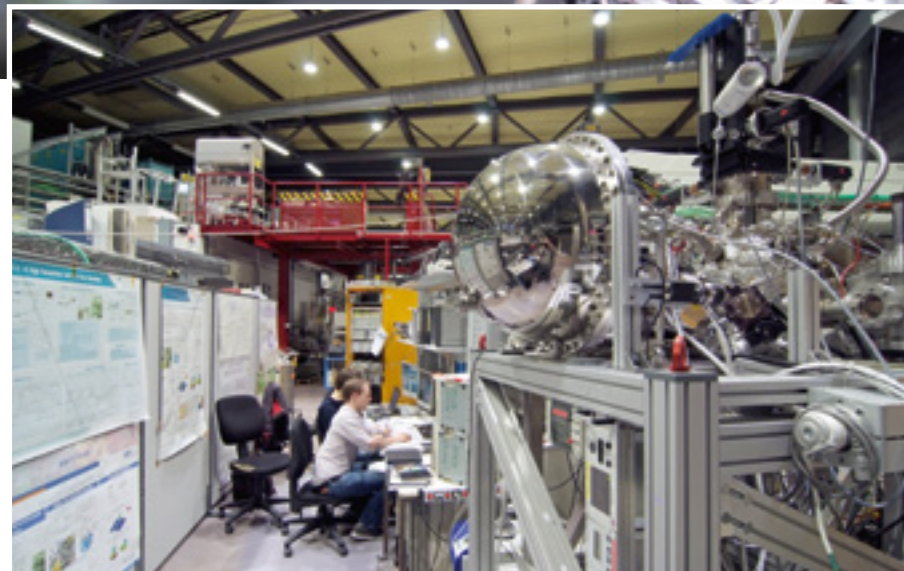
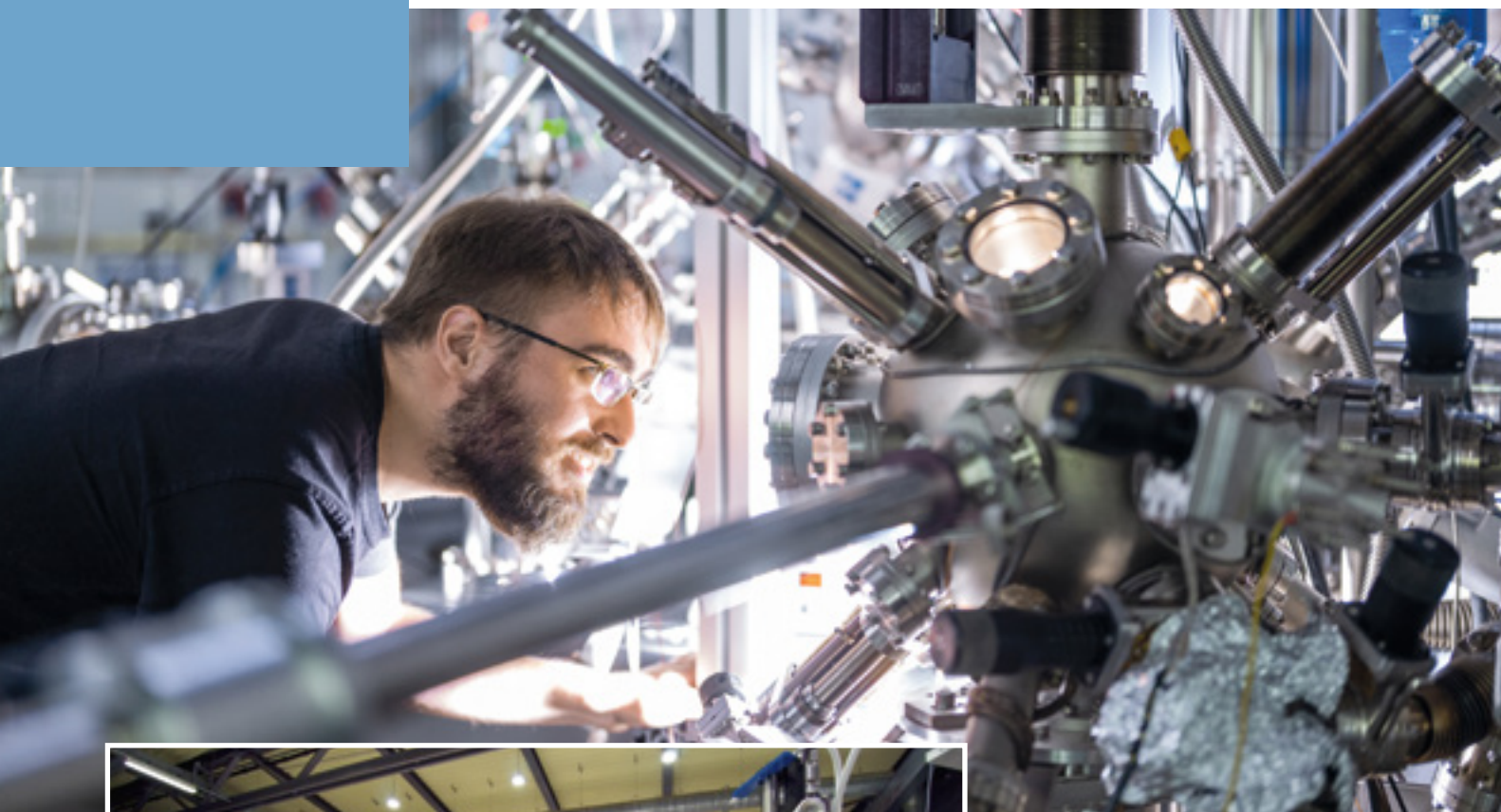


Am Wissenschaftlichen Zentrum für Materialwissenschaften (WZMW) hat die Universität die besondere Expertise von Physikern und Chemikern gebündelt. Dort forscht das Team um Prof. Kerstin Volz an Materialproben mit dem Rastertransmissionselektronenmikroskop (STEM). Das STEM kann die Probe mit atomarer Auflösung vermessen. Die Methode gibt Aufschluss über die Atomsorte und deren exakte Lokalisierung im Material. Für viele Experimente im SFB ist das STEM daher unverzichtbar zur Strukturaufklärung. Im weiteren Verlauf des SFB wollen die Forscherinnen und Forscher ihr Verständnis der Elektron-Materie Wechselwirkung nutzen, um ganz neue Informationen, wie zum Beispiel die atomar aufgelöste Verteilung von Ladungen und Feldern an Grenzflächen, zu erhalten.

Die Laserspektroskopie ist in Marburg traditionell stark. Im SFB haben die Arbeitsgruppen von Ulrich Höfer und Jens Güdde sowie Robert Wallauer, ferner Martin Koch und Marina Gerhard sowie Sangam Chatterjee (jetzt JLU Gießen) ihre Methodik erfolgreich auf innere Grenzflächen übertragen. Jetzt können sie in den unterschiedlichen Arbeitspaketen die Struktur und Dynamik innerer Grenzflächenzustände, insbesondere die opto-elektronischen Effekte, gezielt untersuchen. In die apparative Ausstattung dieser Experimente gingen große Investitionen der ersten Förderperiode des SFB.

Die Möglichkeiten der zeitaufgelösten Photoemission für die Untersuchung von Ladungstransfer-Prozessen an Grenzflächen auf der Zeitskala von Femtosekunden ($1 \text{ fs} = 10^{-15} \text{ s}$) wurden in der zweiten Förderperiode mit dem Aufbau eines speziellen Impulsmikroskops für Photoelektronen und durch die Kombination mit THz-Anregung nochmals deutlich erweitert.





Komplementär zur optischen Photoelektronenspektroskopie ist die Anregung mit Röntgenstrahlung, die weitere Energiebereiche und damit Informationstiefen in Schichtsystemen erschließt. An den Synchrotronstrahlungsquellen BESSY-II in Berlin und Diamond Light Source bei Oxford betreiben gleich drei Arbeitsgruppen Experimente für den SFB. Die Röntgenstrahlung löst aus den Materialproben Elektronen heraus, deren Eigenschaften Auskunft über die chemische Zusammensetzung und Struktur des Materials und seiner Grenzfläche gibt.

Zur weiteren Grundausstattung im SFB zählen Probenpräparation, Vakuumapparaturen, Röntgendiffraktometer und Rechencluster. Halbleiter-Heterostrukturen und 2-dimensionale Materialien stellen die Forschenden beispielsweise in Epitaxie-Anlagen (MOVPE) her. Die Experimente an den Grenzflächen finden dann meist im Ultrahochvakuum statt, da dies die beste Kontrolle der Probenparameter erlaubt, z.B. in einem Kombinationsgerät für Photoelektronenspektroskopie (XPS, UPS) und Rastertunnelmikroskopie.



Ein klassisches Instrument der Strukturanalyse ist etwa das Röntgendiffraktometer (XRD), um den Materialaufbau zu entschlüsseln. Und natürlich benötigen die Theoretiker im SFB je nach Fragestellung eine große Bandbreite an leistungsfähigen Großrechnern, die vom Rechencluster der Universität bis zu den nationalen Höchstleistungsrechenzentren reicht.



Projektübersicht

Projekttitle und verantwortliche Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler

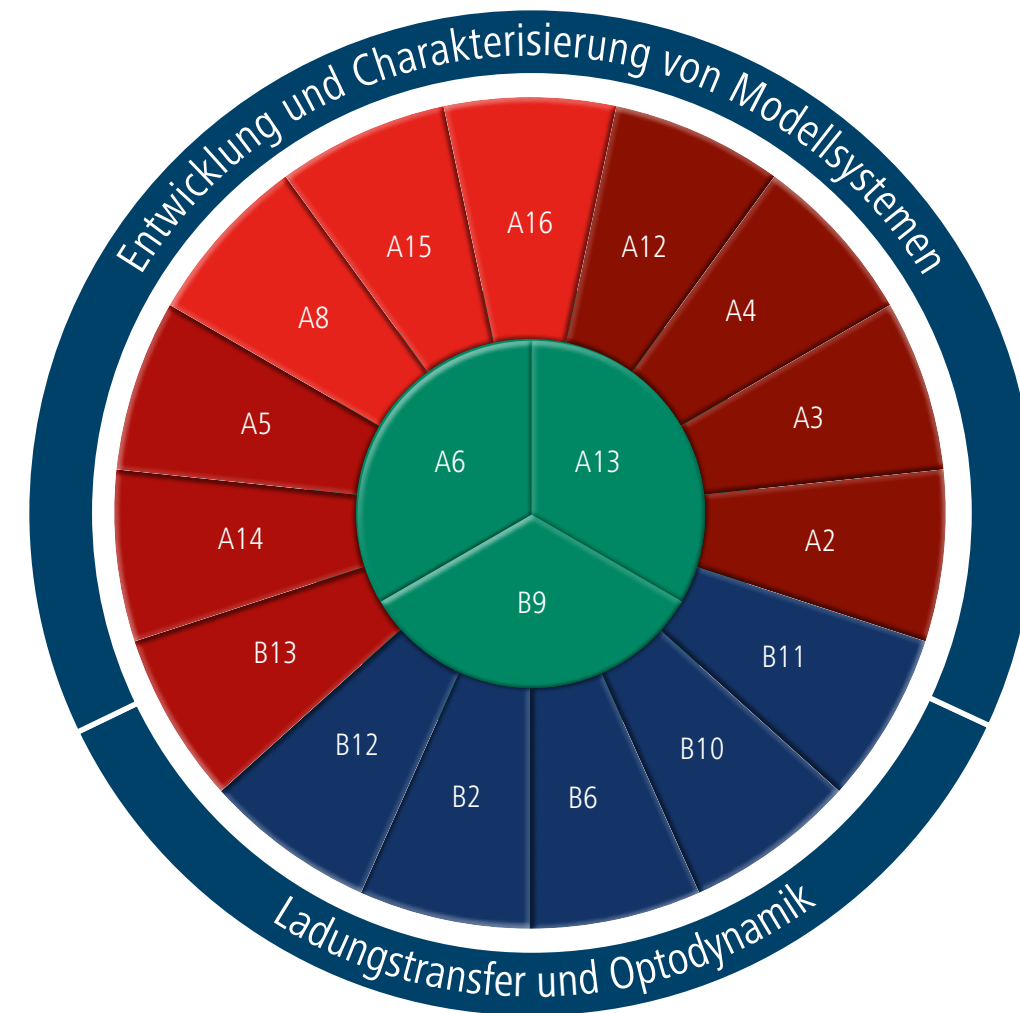
A2	Prof. Dr. Gregor Witte	Organisch/anorganische und organisch/organische Grenzflächen: Struktur und Ladungsträgertransport Inorganic/organic and organic/organic interfaces: structure and charge transport	Experimentalphysik
A3	Prof. Dr. Peter Jakob	Grenzflächen organischer Heteroschichtsysteme: Struktur und Vibrationsanregungen Organic heterolayer interfaces: structure and vibrational excitations	Experimentalphysik
A4	Prof. Dr. Michael Gottfried	Reaktivität, Energetik und Struktur von vergrabenen Organik/Metall-Grenzflächen Reactivity, energetics and structure of buried organic/metal interfaces	Physikalische Chemie
A5	Prof. Dr. Kerstin Volz	Atomar aufgelöste Struktur vergrabener Grenzflächen zwischen Festkörpern Atomically resolved structure of solid/solid interfaces	Experimentalphysik
A6	Prof. Dr. Ralf Tonner (Leipzig)	Gemeinsame Beschreibung von chemischer Bindung und Wechselwirkungen an Anorganik/Organik-Grenzflächen mittels Dichtefunktionaltheorie Unified density functional description of bonding and interactions at inorganic/organic interfaces	Theoretische Chemie
A8	Prof. Dr. Ulrich Koert Prof. Dr. Michael Dürr (Gießen)	Organische Moleküle als Bausteine für die Synthese innerer Grenzflächen Organic molecular building blocks for the synthesis of internal interfaces	Organische Chemie/ Experimentalphysik
A12	Prof. Dr. Stefan F. Tautz Dr. François C. Bocquet Prof. Dr. Christian Kumpf (alle FZ Jülich)	Struktur und Phononen von hetero-epitaktischen Schichtsystemen aus schwach wechselwirkenden 2D-Materialien und molekularen Schichten Structure and phonons of hetero-epitaxial stacks of weakly interacting 2D materials and molecular layers	Experimentalphysik
A13	Prof. Dr. Michael Rohlfing (Münster)	Theorie elektronischer Grenzflächen-Zustände in schwach gebundenen Heterostrukturen Theory of electronic interface states in weakly bound heterostructures	Theoretische Physik
A14	Prof. Dr. Kerstin Volz	Metallorganische Gasphasen-Abscheidung von zweidimensionalen Heterostrukturen Metal organic vapour phase deposition of 2-dimensional heterostructures	Experimentalphysik

A15	Dr. Johanna Heine	Ionische 2D-Materialien für designbare Organik/Anorganik-Grenzflächen Ionic 2D materials for designable organic-inorganic interfaces	Anorganische Chemie
A16	Prof. Dr. Michael Gottfried Prof. Dr. Ulrich Koert	Synthetische Grenzflächenchemie Synthetic interface chemistry	Physikalische/ Organische Chemie
B2	Prof. Dr. Sangam Chatterjee (Gießen)	Ultrakurzzeitspektroskopie und Kontrolle von Anregungen an inneren Grenzflächen Ultrafast spectroscopy and control of excitations across internal interfaces	Experimentalphysik
B6	Prof. Dr. Ulrich Höfer Dr. Robert Wallauer	Untersuchungen der Elektronen- und Exzitonendynamik an Grenzflächen mit Hilfe der zeitaufgelosten Zweiphotonenphotoemission Time-resolved two-photon photoemission studies of interface electron and exciton dynamics	Experimentalphysik
B9	Prof. Dr. Ermin Malic	Licht-Materie-Wechselwirkung bei Grenzflächen zwischen atomdünne Nanomaterialien Light-matter interaction at interfaces of quantum materials	Theoretische Physik
B10	Prof. Dr. Marina Gerhard	Dynamik von Ladungstransferexzitonen an organisch/organischen und hybriden organisch/anorganischen Heterogrenzflächen Dynamics of charge-transfer excitons at organic/organic and hybrid organic/inorganic heterointerfaces	Experimentalphysik
B11	Prof. Dr. Jens Güdde Prof. Dr. Ulrich Höfer	Ultrakurzzeitdynamik von elektrischen Strömen an Grenzflächen Ultrafast dynamics of interface currents	Experimentalphysik
B12	Prof. Dr. Martin Koch	THz-Emitter auf der Basis von Typ-II-Strukturen Type-II based THz emitters	Experimentalphysik
B13	Prof. Dr. Sangam Chatterjee (Gießen) Prof. Dr. Kerstin Volz	Anorganische, Grenzflächen-dominierte Heterostrukturen für Bauelementkonzepte Inorganic, interface-dominated heterostructures for device concepts	Experimentalphysik

Projektübersicht

Materialien und Methoden

		Anorganik/Anorganik	2D Grenzflächen	Metall/Organik	Organik/Organik	Anorganik/Organik	Chemische Synthese	Epitaktisches Wachstum	Strukturanalyse	Optische Spektroskopie	Theorie / Modellierung
A2	Prof. Dr. Gregor Witte		●	●	●	●		●	●	●	
A3	Prof. Dr. Peter Jakob			●	●	●		●	●	●	
A4	Prof. Dr. Michael Gottfried		●	●				●	●		
A5	Prof. Dr. Kerstin Volz	●	●			●		●		●	
A6	Prof. Dr. Ralf Tonner					●					●
A8	Prof. Dr. Ulrich Koert, Prof. Dr. Michael Dürr				●	●	●	●	●		
A12	Prof. Dr. F. Stefan Tautz, Dr. François C. Bocquet, Prof. Dr. Christian Kumpf		●	●				●	●		
A13	Prof. Dr. Michael Rohlfing		●	●							●
A14	Prof. Dr. Kerstin Volz		●					●	●		
A15	Dr. Johanna Heine		●				●				
A16	Prof. Dr. Michael Gottfried, Prof. Dr. Ulrich Koert		●			●	●	●	●		
B2	Prof. Dr. Sangam Chatterjee	●	●							●	
B6	Prof. Dr. Ulrich Höfer, Dr. Robert Wallauer		●		●	●				●	
B9	Prof. Dr. Ermin Malic		●								●
B10	Prof. Dr. Marina Gerhard		●	●	●	●				●	
B11	Prof. Dr. Jens Güdde, Prof. Dr. Ulrich Höfer	●	●			●				●	
B12	Prof. Dr. Martin Koch	●								●	
B13	Prof. Dr. Sangam Chatterjee, Prof. Dr. Kerstin Volz	●					●	●	●		



- Halbleiterphysik
- Chemische Synthese
- Oberflächenphysik und -chemie
- Laser-Spektroskopie
- Theorie / Modellierung

Zahlen & Fakten



Sprecherin:
Prof. Dr. Kerstin Volz

Vizesprecher:
Prof. Dr. Michael Gottfried

Weitere Mitglieder
der Strukturkommission:
Prof. Dr. Ulrich Höfer
Prof. Dr. Ulrich Koert
Prof. Dr. Stefan Tautz

Fördermittel DFG	1. Förderperiode	2. Förderperiode	3. Förderperiode
Personalmittel			
Postdoktoranden	1.164.500	1.231.200	1.096.200
Doktoranden	3.224.000	4.557.600	5.423.400
Nichtwissenschaftliche Mitarbeiter	120.000	141.600	208.000
Hilfskräfte	146.300	184.800	184.800
	4.654.800	6.115.200	6.912.400
Sachmittel			
Verbrauch und Kleingeräte	859.100	903.700	1.270.000
Geräte über 10.000€	726.800	265.300	244.800
Zentrale Mittel	1.027.000	1.435.500	1.803.400
	2.612.900	2.604.500	3.318.200
Programmpauschale	1.453.400	1.918.800	2.251.100
Fördermittel DFG gesamt	8.721.100	10.638.500	12.481.700

Personalstellen finanziert durch die DFG	1. Förderperiode	2. Förderperiode	3. Förderperiode
Postdoktoranden	5	4	3
Doktoranden	20	24	26
Nichtwissenschaftliche Mitarbeiter	1	2	3
(Studentische) Hilfskräfte	7	7	7
	33	37	39

Grundausstattung Forschungsausrüstung	1. Förderperiode	2. Förderperiode	3. Förderperiode
Bund/Länder Großgeräteprogramm	3.286.000	1.800.000	3.600.000
Sachmittel Universität Marburg	489.400	574.400	604.000
Sachmittel der übrigen beteiligten Institutionen	24.000	96.000	140.000

Mitarbeiter Universität & DFG finanziert	1. Förderperiode	2. Förderperiode	3. Förderperiode
Projektleiter	19	24	19
davon Nachwuchsgruppenleiter	2	6	4
Assoziierte Mitglieder	7	8	10
Postdoktoranden	12	10	12
Doktoranden	40	46	49
Weitere Wissenschaftler	2	5	7
Nichtwissenschaftliche Mitarbeiter	31	36	36
Masterstudenten	19	26	39
(Studentische) Hilfskräfte	9	14	15

Veröffentlichungen	Bis 09/2021
Gesamtzahl	350
Mit Beteiligung von zwei und mehr Teilprojekten	98
Mit Beteiligung von drei und mehr Teilprojekten	31

Wissenschaftlicher Austausch	Bis 09/2021
Ausgerichtete Internationale Konferenzen, Symposia	19
Interne Workshops	25
Ausgerichtete Kolloquia und Seminare	102
Vom SFB eingeladene Sprecher	176
Gastwissenschaftler	76
Besuchte internationale Konferenzen	193
Eingeladene Vorträge von SFB-Mitgliedern	165

Weiteres	1. Förderperiode
Wissenschaftspreise und Auszeichnungen	53
Rufe von SFB Mitgliedern auf Professuren	13
Erfolgreich abgeschlossene Promotionen	68

- 1. Förderperiode: 01.10.2013 – 30.06.2017
- 2. Förderperiode: 01.07.2017 – 30.06.2021
- 3. Förderperiode: 01.07.2021 – 30.06.2025

Impressum

SFB 1083

Sonderforschungsbereich 1083
Philipps-Universität Marburg
Hans-Meerwein-Straße 6
35032 Marburg

www.internal-interfaces.de

Redaktion:

Dr. Stefan R. Kachel, SFB 1083 Geschäftsstelle
Prof. Dr. Kerstin Volz, Philipps-Universität Marburg
Prof. Dr. Michael Gottfried, Philipps-Universität Marburg
Dr. Helen A. Pfuhl, SFB 1083 Geschäftsstelle
Dr. Andreas Namgalies, Philipps-Universität Marburg
Prof. Dr. Stefanie Dehnen, Philipps-Universität Marburg
Martin Schäfer, martin.schaefer@euroscience.net

Gestaltung und Satz:

Bosse und Meinhard – Wissen und Kommunikation, Bonn

SFB 1083

Sonderforschungsbereich 1083
Philipps-Universität Marburg
Hans-Meerwein-Straße 6
35032 Marburg

www.internal-interfaces.de