

Vorstellungsberichte der neuen Mitglieder

Stefanie Dehnen

Aus Zwei mache Drei: Von Grundlagenforschung zu neuen Materialien



Stefanie Dehnen, Professorin für Anorganische Chemie in Marburg, O. Mitglied der Akademie seit 2016

Sehr geehrter Herr Präsident, verehrte Vizepräsidenten, meine sehr verehrten Damen und Herren, durch die Wahl zum Ordentlichen Mitglied der Akademie der Wissenschaften zu Göttingen fühle ich mich sehr geehrt, und ich möchte Ihnen an dieser Stelle meinen ganz herzlichen Dank dafür aussprechen. Es ist für mich eine große Freude und wiederum eine besondere Ehre, Ihnen heute im Rahmen dieses Vortrags meine Person und meine wissenschaftlichen Interessen vorstellen zu dürfen.

Lassen Sie mich damit beginnen, einen Zusammenhang zwischen der Akademie mit dem schönen Leitmotiv „*Fecundat et ornat – sie befruchtet und ziert*“ und mir selbst herzustellen. Ich möchte

hierzu ein paar der zentralen Persönlichkeiten und Themen der Akademie aufgreifen.

Zunächst fallen mir die Brüder Jakob und Wilhelm Grimm ein, die mich seit frühester Kindheit begleiten, weil mein Geburts- und Heimatort Gelnhausen exakt zwischen den beiden Grimm-Städten Hanau und Steinau a. d. Straße liegt, so dass hier immer eine enge Beziehung vorhanden war. Auch mein heutiger Arbeitsort, Marburg, ist eine Brüder-Grimm-Stadt, genau wie Göttingen selbst.

Auch das Mittelalter – ein weiteres Schwerpunktthema der Akademie – ist mir zumindest vertraut, haben doch sowohl Gelnhausen als auch Marburg eindeutig vom Mittelalter geprägte Stadtbilder und rufen einem allenthalben diese Zeit in Erinnerung.

Als Wissenschaftlerin wird mir – wie allen Kollegen – bei der Nennung des Namens Gottfried Wilhelm Leibniz warm ums Herz. Es gibt aber noch andere, teilweise zufällige, Zusammenhänge zu berichten. So wurde Leibniz am 1. Juli 1646, also just heute vor 370 Jahren geboren. Sein Motto „*theoria cum praxi*“ ist auch meines. In unseren Forschungsarbeiten vereinen wir experimentelle anorganische Chemie mit quantenchemischen Rechnungen mit großem Gewinn für neue Erkenntnisse.

Zuletzt sei Georg Christoph Lichtenberg genannt, dessen Werke und Wirken die Akademie der Wissenschaften zu Göttingen ebenfalls im Fokus hat. Der Zufall will es, dass auch Lichtenberg am 1. Juli geboren wurde; allerdings 1742 und damit

heute vor 274 Jahren. Mit ihm verbindet mich, dass er – genau wie ich – einen Theologen zum Vater hatte und ein begeisterter Naturwissenschaftler und Autor war. Seine Vorliebe für Experimente tat er häufig in öffentlichen Experimentalvorlesungen kund, genauso wie wir das in dem von mir geführten Science-Center „Chemikum Marburg“ pflegen.

Nach diesen eher humoristischen Einblicken in meine Vita und den darin auftretenden, zuvor ungeahnten Verknüpfungen mit der Akademie der Wissenschaften möchte ich nun dazu überleiten, Ihnen meine wissenschaftliche Seite vorzustellen, die ich mit dem Titel „Aus Zwei mache Drei: Von Grundlagenforschung zu neuen Materialien“ zusammengefasst habe.

Sie sehen hier den Ausschnitt eines Gemäldes von Joseph Wright of Derby (1771), auf dem dargestellt ist, wie der Alchemist Hennig Brand im Jahre 1669 zufällig weißen Phosphor und dessen Leuchterscheinungen entdeckt. Brand war wie alle Kollegen seiner Zeit eigentlich auf der Suche nach dem Stein der Weisen, den er bekanntermaßen nicht fand, wofür er aber nicht davor zurückschreckte, menschlichen Urin einzudampfen – um schließlich aus Versehen ein neues chemisches Element zu isolieren. Solche Zufälle waren bei „chemischer“ Forschung im Mittelalter an der Tagesordnung, aber auch heute noch haben ungeplante Entdeckungen oft spannende und nachhaltige Folgen, wie Sie später noch sehen werden.

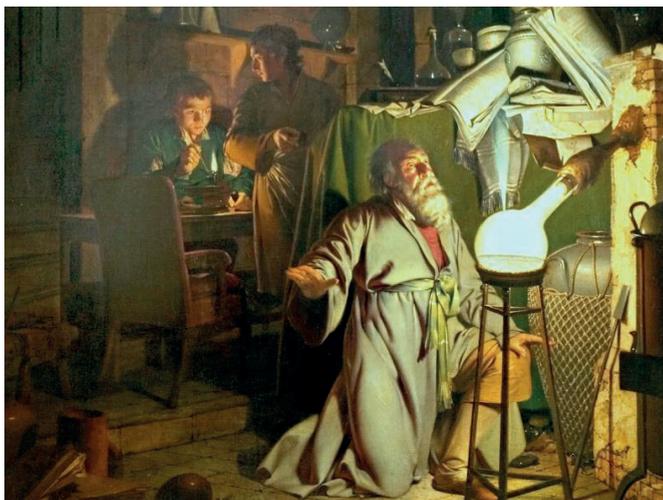


Abb. 1: „Der Alchemist auf der Suche nach dem Stein der Weisen“ (Hennig Brand entdeckt das Element Phosphor), Joseph Wright of Derby, 1771 (Ausschnitt).

Wie lässt sich die heutige Chemie, speziell die Synthesechemie, nun charakterisieren? Man kann die Forschungsinteressen aktuell arbeitender Chemiker ganz grob zwei anwendungsorientierten, übergeordneten Bereichen zuordnen, den Lebens-

wissenschaften und den Materialwissenschaften. Beide werden jedoch von einer dritten Säule, der Grundlagenforschung, nachhaltig und unverzichtbar unterstützt.

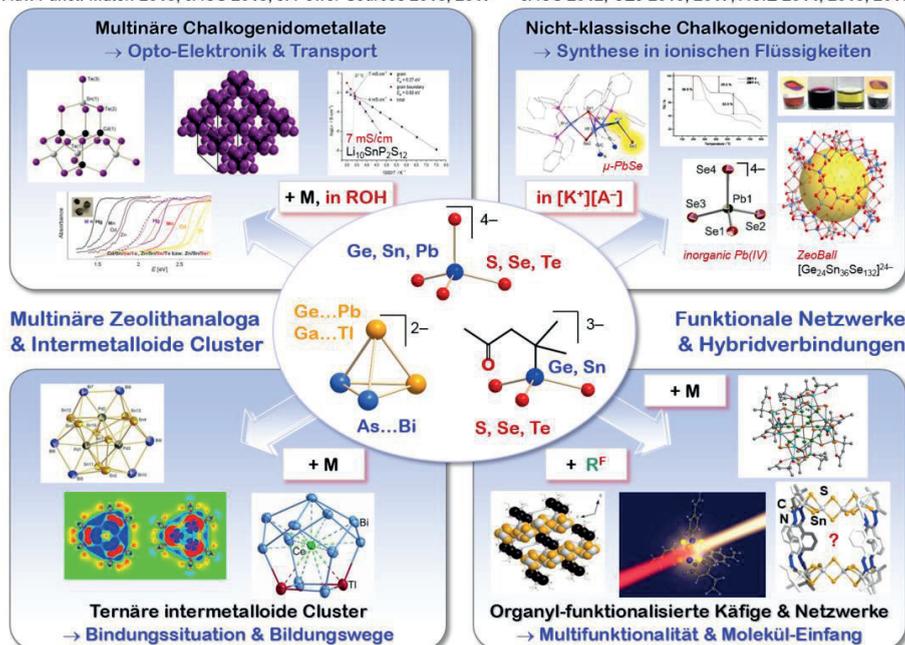
An Forschungsarbeiten im Bereich der Lebenswissenschaften beteiligen sich Chemiker heutzutage zum Beispiel mit der Synthese und Untersuchung von Enzymmodellen oder anderen Biomimetika, und Chemiker sind maßgeblich in der pharmazeutischen Forschung tätig. In diesem Bereich ist meine Arbeitsgruppe allerdings nicht tätig, daher möchte ich mich im Folgenden auf die beiden anderen Felder „Grundlagenforschung“ und „Materialwissenschaften“ konzentrieren.

Grundlegende Erkenntnisse zu chemischen Fragestellungen werden etwa dadurch gewonnen, dass man neue Synthesemethoden auslotet oder dass man Bindungsverhältnisse in chemischen Verbindungen und den strukturellen Bau chemischer Stoffe untersucht. Diese Kenntnisse helfen dann enorm, Eigenschaften gezielt anzusteuern beziehungsweise zu verstehen, um sie darauf aufbauend zu optimieren. Der Bereich „Materialwissenschaften“ zielt heute besonders auf Materialien ab, die in irgendeiner Form zur Energiewende beitragen – etwa durch neuartige Energiespeicher oder Energiewandler – oder die als Katalysatoren zur Effizienz von chemischen Synthesen beitragen. Unsere Forschung im Bereich neuer Materialien konzentriert sich zum einen auf Feststoffe, die für die Konstruktion neuer Lithium- oder Natrium-Ionenakkumulatoren geeignet sind. Wir untersuchen aber auch Stoffe, die Lichtenergie umwandeln können.

Hinter unserem Forschungskonzept „Aus Zwei mache Drei“ verbirgt sich ein modularer Ansatz, bei dem wir von binären (= aus zwei Elementen bestehenden) kleinen Molekülen ausgehen und daraus komplexere, häufig ternäre (= aus drei Komponenten bestehende) Moleküle oder Netzwerkverbindungen aufbauen. Je nachdem, welcher Art die Startverbindungen sind und unter welchen Reaktionsbedingungen wir sie mit den Reaktionspartnern zusammenbringen, entstehen daraus sehr unterschiedliche Zielverbindungen. Drei davon gehören zu der großen Familie der Chalkogenidverbindungen, welche eine wichtige Rolle bei der Entwicklung neuer (Photo-)Halbleitender, Thermoelektrika oder Batteriematerialien spielen.^[1–3] Die vierte Stoffgruppe lässt sich der Chemie von Zintl-Polyanionen zuordnen. Dies sind negativ geladene Metallcluster, was sie von Natur aus ungewöhnlich und daher seit einigen Jahren zum begehrten Untersuchungsobjekt macht.^[4–6] Die nachfolgende Abbildung gibt einen Überblick über die Variationsmöglichkeiten und das Produktspektrum unserer Synthesen.

Die Reaktionen gehen von den im Zentrum abgebildeten kleinen Molekülen aus (unter Permutation der angegebenen Atomsorten). Die vier Schaubilder repräsentieren vier verschiedene Synthesemethoden und die damit angesteuerten Verbindungsklassen.

Adv. Funct. Mater. 2013; JACS 2013; J. Power Sources 2016; 2017 JACS 2012; CEJ 2013; 2017; ACIE 2014; 2015; 2016



JACS 2016; ACIE 2013; 2014; 2016; 2017; Nat. Comm. 2016 CC 2014; CEJ 2015; 2016; 2017; Science 2016; JACS 2016

Abb. 2: Überblick über den synthesechemischen Forschungsansatz in der Arbeitsgruppe Dehnen. M = Metallatom, R = organische Gruppe, R^F = organische Gruppe mit zusätzlicher Funktionalisierung, K⁺ = Kation, A⁻ = Anion. Auf einige aktuelle Publikationen in Fachzeitschriften wird in abgekürzter Form hingewiesen.

Die beiden oben dargestellten Varianten starten mit tetraedrischen $[\text{TE}_4]^{4-}$ -Molekülen (T = Ge, Sn, Pb; E = S, Se, Te), den schweren Homologen des ortho-Silikatanions $[\text{SiO}_4]^{4-}$. Sie finden in protischen Lösungsmitteln (H_2O , Methanol; links) oder in Niedertemperatur-Salzschnmelzen (sogenannten ionischen Flüssigkeiten; rechts) statt, zumeist unter Zusatz der Verbindung eines Übergangsmetalls (= Element der Gruppe 3-12 des Periodensystems der Elemente)^[7,8] In beiden Fällen erhält man molekulare Cluster (wohl definierte „Atomhaufen“) oder Netzwerkverbindungen mit rein anorganischer Zusammensetzung. Später werde ich Ihnen einige der so erzeugten Clusterverbindungen noch genauer vorstellen. Die Stoffe, so genannte Chalkogenidometallate, leiten sich häufig von Halbleiterverbindungen wie etwa Zinnsulfid ab, deren Eigenschaften wir durch neuartige Zusammensetzungen und Strukturen modifizieren. Auch sehr schnelle Lithium- oder Natrium-Ionenleiter lassen sich hierbei erhalten:^[9,10] Da die Wechselwirkung der Chalkogenidometallat-Anionen mit den Lithium- und Natrium-Kationen nicht sehr stark ist, sind sie viel beweglicher als beispielsweise die Kationen in den verwandten Oxosilikaten (wie etwa dem Mineral Olivin, Na_4SiO_4).

Nach unten rechts gelangt man durch Einsatz von Bausteinen, in denen eines der vier E-Atome durch einen organischen Rest ausgetauscht wurde. Letzterer besitzt zumeist eine reaktive Stelle, so dass wir in dieser Richtung unserer Synthesen zweierlei tun können, um die Verbindungen zu modifizieren: Entweder wird eine weitere anorganische Komponente (zum Beispiel eine weitere Metallatomsorte) eingeführt oder es finden Reaktionen an der reaktiven Stelle der organischen Gruppe statt. Beides kann auch zugleich erfolgen, so dass hierbei sehr komplexe „Hybridverbindungen“ mit anorganischen und organischen Bestandteilen resultieren.^[11–14] Diese Kombination bringt mitunter sehr ungewöhnliche physikalische Eigenschaften der Verbindungen mit sich. Auf eine dieser Hybridverbindungen gehe ich am Ende des Vortrags noch detailliert ein.

Zuletzt kann man für die Kombination der Elemente im Startmolekül auch andere Hauptgruppen des Periodensystems der Elemente wählen. Sie sehen unten links wiederum ein tetraederförmig aufgebautes Molekül, dieses Mal aber ohne zentrales Atom. Hier finden wir andere Bindungsverhältnisse zwischen den Metallatomen, was sich auf die Reaktionsprodukte und damit die Zielverbindungen überträgt. Wir erhalten bei Reaktionen mit Übergangsmetallverbindungen hier sogenannte intermetalloide Cluster. Dies sind wohldefinierte, zumeist hochsymmetrische Moleküle aus etwa 10 bis 20 Metallatomen, bei denen ein inneres Metallatom von einer Hülle aus anderen Metallatomen umgeben ist. Diese kleinen Cluster sind sehr reaktiv; aus diesem Grund, aber auch wegen ihrer hohen Ästhetik und der ungewöhnlichen Bindungsverhältnisse interessieren sie uns ganz grundlegend.^[15–19]

Meine Damen und Herren, bevor ich Ihnen zwei Beispiele aus dem Fundus an neuen Verbindungen aus meiner Arbeitsgruppe vorstellen werde, möchte ich ganz kurz auf unsere Arbeitsmethoden eingehen. In der folgenden Abbildung (s.u.) sind diese schematisch zusammengefasst.

Weil die Substanzen, mit denen wir uns beschäftigen, zumeist luft- und feuchtigkeitsempfindlich sind, führen wir unsere Reaktionen unter Schutzgasatmosphäre durch. Dies erfolgt entweder in Handschuhkästen oder an speziellen Laboraufbauten, in denen wir über spezielle Leitungssysteme aus Glas zwischen Vakuum zum Entfernen der Umgebungsluft aus den Reaktionsgefäßen und anschließender Schutzgaszufuhr hin- und herschalten können.

Nach den Reaktionen in typischen Gefäßen wie Rundkolben oder sogenannten Schlenk-Rohren versuchen wir, aus den Produkten Einkristalle zu züchten (im Unterschied zu polykristallinen Festkörpern, die aus vielen miteinander verwachsenen Einkristallen bestehen). Wenn dies erfolgreich war, setzen wir die etwa einen Millimeter großen Kristalle auf den Goniometerkopf eines Röntgendiffraktometers, wo Röntgenstrahlen am regelmäßigen Kristallgitter der Atome gebeugt werden und ein regelmäßiges Reflexmuster ergeben. Mithilfe von Computern und spezieller Software lässt sich aus dem Reflexmuster auf die Lage der Atome in den Einkristallen rückschließen. Wenn wir eine molekulare Clusterverbindung syntheti-

siert haben, erkennen wir in der Einkristallstruktur dann die Molekülstruktur des Clusters.

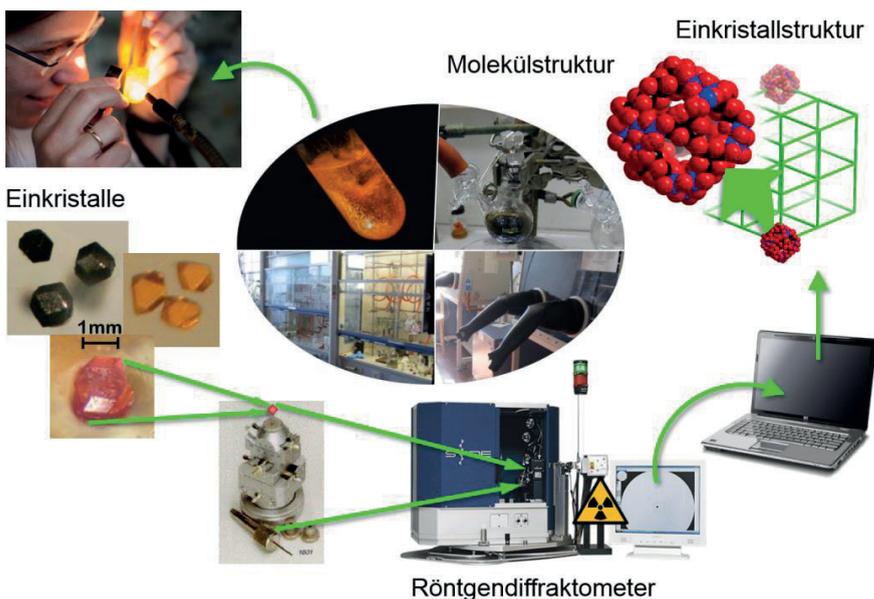


Abb. 3: Schematischer Überblick über die Synthese und Analyse von kristallinen Cluster- und Netzwerkverbindungen in der Arbeitsgruppe Dehnen.

Das erste Beispiel eines Forschungsergebnisses aus jüngerer Zeit haben wir bei unseren Synthesen in ionischen Flüssigkeiten erhalten. Lassen Sie mich daher in wenigen Worten erläutern, was es mit diesen Reaktionsmedien auf sich hat:^[20] Ionische Flüssigkeiten sind der Definition nach Salzschnmelzen, die einen Schmelzpunkt von (deutlich) unter 100°C besitzen. In der Regel sind sie sogar bei Raumtemperatur flüssig. Der Grund dafür ist eine recht ungünstige Kombination von (zumeist organischen) Kationen und komplexen Anionen, die dazu führt, dass das Kristallgitter des Salzes instabil ist und leicht schmilzt. Diese Schmelze hat jedoch ausgezeichnete Lösungsmittleigenschaften – ohne die störenden Eigenschaften anderer Lösungsmittel, zum Beispiel niedrige Siedepunkte und das damit verbundene Freiwerden (giftiger) Dämpfe. Man kann die ionischen Flüssigkeiten zudem leicht synthetisieren und durch Wahl entsprechender Kationen und Anionen sehr variantenreich zusammenstellen. Man spricht in diesem Zusammenhang daher von „Designer-Lösungsmitteln“. Diese erlauben die Synthese neuartiger und – wie in unserem Fall – sehr ungewöhnlicher – Feststoffe im Temperaturregime zwischen Raumtemperatur und moderat erhöhten Temperaturen ($\leq 200^\circ\text{C}$), während traditionelle Syntheserouten für feste Materialien zumeist über Hochtemperaturmethoden ($\geq 700^\circ\text{C}$) verliefen.

Bei unseren Reaktionen in ionischen Flüssigkeiten streben wir die Synthese von Chalkogenidometallat-Salzen an. In der unten stehenden Abbildung sehen Sie das Syntheschema der ersten Beispielreaktion, die ich für Sie ausgewählt habe.

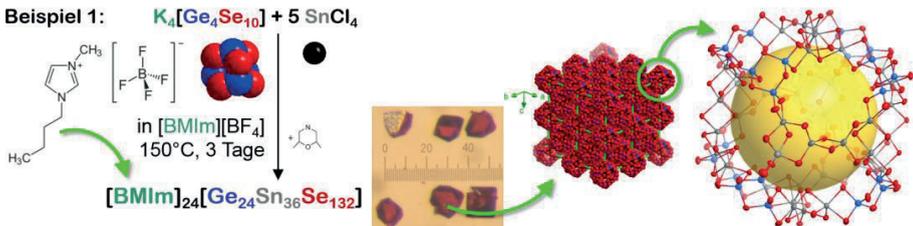


Abb. 4: Synthese der Verbindung $[BMIm]_{24}[Ge_{24}Sn_{36}Se_{132}]$ in der ionischen Flüssigkeit $[BMIm][BF_4]$ = 1-Butyl-4-methylimidazolium-tetrafluoridoborat mit Fotografie der isolierten Einkristalle. Das Cluster-Anion der Verbindung ist ganz rechts im Kugel-Stab-Modell abgebildet. Graue Kugeln = Zinnatome (Sn), blaue Kugeln = Germaniumatome (Ge), rote Kugeln = Selenatome (Se). Der gelbe Ball im Innern des sphärischen Moleküls repräsentiert den dort befindlichen Hohlraum mit ca. 1.2 nm Durchmesser ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$).

Das Anion in dem Reaktionsprodukt $[BMIm]_{24}[Ge_{24}Sn_{36}Se_{132}]$ ($[BMIm]$ = 1-Butyl-4-methylimidazolium) ist ein gigantischer Cluster mit 192 Atomen, der das größte bekannte Hauptgruppenelementpolyanion darstellt.^[21,22] Es ist ein sphärisches Molekül mit einem inneren Hohlraum, dessen Durchmesser ca. 1.2 Nanometer misst ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$). Das Kugelgerüst ist aus zwei Bausteinen aufgebaut, dem grau-rot dargestellten $[Sn_6Se_{18}]$ -Fragment und dem blau-rot dargestellten $[Ge_3Se_9]$ -Fragment, die über gemeinsame Se-Atome verknüpft sind. Wenn man nur die Schwerpunkte der in Dreiergruppen zusammengestellten Zinn- oder Germaniumatome zeichnet, ergibt sich die Topologie eines Pentagondodekaeders, was uns zeigt, dass selbst ausgesprochen komplexe Strukturen in der Chemie auf einfachen, hochsymmetrischen Bauprinzipien beruhen. Mit dieser Substanz gelang es uns, Iodmoleküle (aus einer Lösung von Iod in Cyclohexan) aufzunehmen und heterolytisch zu spalten, so dass man den Ball als eine Art „Nanoreaktor“ auffassen darf.

Das zweite Beispiel stammt aus dem Bereich der Hybridverbindungen. Diese Verbindung entstand ausgehend von einem Organozinntrichlorid-Molekül, das eine organische Styrylgruppe trägt. Wir wollten daraus unter Zusatz von Sulfidionen einen Cluster erzeugen, der über die endständige C=C-Doppelbindung der Styrylgruppen für weitere Reaktionen oder Wechselwirkungen mit Halbleiteroberflächen geeignet ist. Zu unserem Erstaunen erhielten wir dieses Mal kein kristallines Produkt, sondern ein amorphes Pulver, das dafür allerdings – ebenfalls ungewöhnlich für unsere Verbindungen – luftstabil war.^[23,24] Per Massenspektrometrie ließ sich die angestrebte Zusammensetzung $[(R^{Sty}Sn)_4S_6]$ (R^{Sty} = Styrylgruppe, $C_6H_4-CH=CH_2$) bestätigen. Da die Molekülstruktur eines amorphen Stoffs nicht ermittelt werden kann, nutzten wir hierfür quantenchemische Rechnungen. In der unten stehenden Abbildung ist die Struktur neben einer Fotografie des Pulvers und

dem experimentellen und per Simulation berechneten Massenspektrum zur Analyse der Zusammensetzung zu sehen. Der Cluster hat einen anorganischen Kern aus vier Zinn- und sechs Schwefelatomen und trägt wie in der Startverbindung eine Styrylgruppe pro Zinnatom.

Beispiel 2:

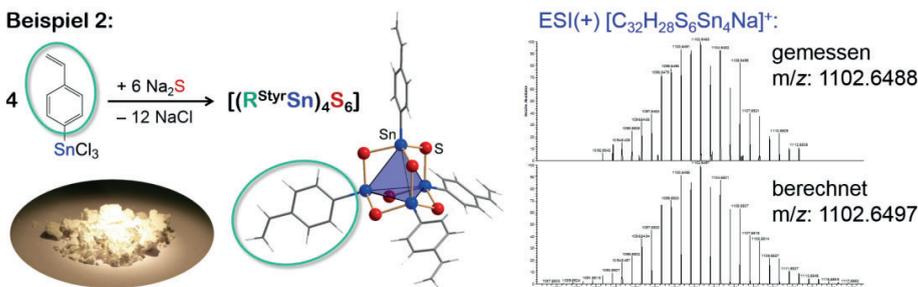


Abb. 5: Synthese und Fotografie des Pulvers der Verbindung $[(R^{\text{Sty}}\text{Sn})_4\text{S}_6]$ (R^{Sty} = Styrylgruppe, $\text{C}_6\text{H}_4\text{-CH=CH}_2$) sowie berechnete Molekülstruktur. Zinnatome (Sn, blau) und Schwefelatome (S, rot) sind im Kugel-Stab-Modus abgebildet, die Kohlenstoffatome (C, grau) und Wasserstoffatome (H, weiß) der Styrylgruppen sind als Stäbe dargestellt. Die Styrylgruppen der Startverbindung (Strichschreibweise) und eine der Styrylgruppen in der Produktstruktur sind grün umrandet. Rechts ist das Massenspektrum der Verbindung zu sehen, in dem das gemessene Isotopenmuster dem um den erwarteten Wert von 1102.6 Masseneinheiten (m/z) zentrierten, berechneten gegenübergestellt ist.

Über die erstaunlichen physikalischen Eigenschaften dieser Verbindung möchte ich zum Abschluss meines Vortrags sprechen. Zunächst bestätigte sich, dass die endständige Doppelbindung ($-\text{CH=CH}_2$) der Styrylgruppe mit Halbleiteroberflächen in Wechselwirkung treten kann: Sowohl auf Silizium- als auch auf Galliumarsenid-Oberflächen haften die Cluster und bildeten eine Monolage. Zweitens fällt auf, dass die Molekülstruktur keine Inversionssymmetrie besitzt. Dies kann ein Hinweis darauf sein, dass die Verbindung nicht-lineare optische Eigenschaften besitzt, was wir in Kooperation mit der Arbeitsgruppe meines Kollegen Sangam Chatterjee (Experimentalphysik, vormals Philipps-Universität Marburg, jetzt Justus-Liebig-Universität Gießen) untersuchten. Ein typisches Phänomen nicht-linearer optischer Eigenschaften ist die Frequenzverdopplung, bei der monochromatisches Licht, das eine Probe durchdringt, diese mit der doppelten Frequenz (= als Licht mit der halben Wellenlänge) wieder verlässt. So wird beispielsweise rotes Licht in grünes Licht verwandelt. Unsere Substanz zeigte nach Bestrahlung mit rotem Laserlicht einer einfachen, käuflichen CW-Galliumarsenid-Laserdiode allerdings ein unerwartetes Ergebnis: Aus der Probe trat warmweißes Licht, also Licht unterschiedlicher Wellenlängen, anstelle von monochromatischem grünem Licht. Die folgende Abbildung fasst die Beobachtungen zusammen.

**Gerichtete Weißlicht-Lumineszenz
ohne gepulsten Laser**

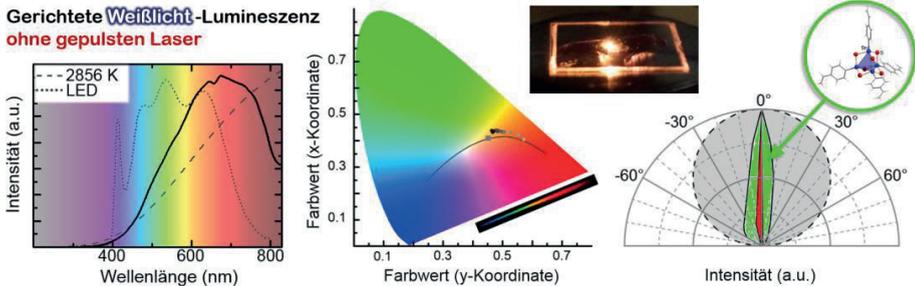


Abb. 6: Links: Optisches Spektrum nach Durchstrahlen des Pulvers der Verbindung $[(R^{Sb}Sn)_4S_6]$ (durchgezogene Linie) im Vergleich mit dem Spektrum eines schwarzen Strahlers bei 2856 K (= Farbtemperatur einer gewöhnlichen Wolfram-Glühbirne, gestrichelte Linie) und dem Spektrum einer handelsüblichen Weißlicht-LED-Lichtquelle (gepunktete Linie). Mitte: Farbmischung eines schwarzen Strahlers (durchgezogene Linie mit einem grauen Quadrat bei 2856 K), Farbmischung nach Durchstrahlen der Verbindung $[(R^{Sb}Sn)_4S_6]$ (graue Punkte: niedrige Laser-Pumpleistung, schwarze Punkte: große Laser-Pumpleistung) und Fotografien des Lichteindrucks und des Regenbogenspektrums nach Brechung des Weißlichts an einem Prisma. Rechts: Brillanz des erzeugten Weißlichts (grüne Fläche) im Vergleich mit der des anregenden Laserstrahls (rote Fläche) und der eines isotropen Lambert-Strahlers (graue Fläche).

Man erkennt, dass das Spektrum nach Durchstrahlen des Pulvers der Verbindung $[(R^{Sb}Sn)_4S_6]$ (durchgezogene Linie) dem einer gewöhnlichen Wolfram-Glühbirne ähnelt und deutlich stärker in den roten Spektralbereich verschoben ist als bei einer handelsübliche Weißlicht-LED-Lichtquelle. Der warmweiße Lichteindruck lässt sich auch an der Farbmischung ablesen, die bei größter Laser-Pumpleistung derjenigen einer Wolfram-Lichtquelle sehr ähnlich ist. Die Fotografie und das Regenbogenspektrum bestätigen die Ergebnisse der spektroskopischen Untersuchungen. Das Phänomen der sogenannten Superkontinuums-Erzeugung ist zwar bei vielen Stoffen zu beobachten, allerdings ist dafür extrem teures Equipment (in Form gepulster Laser) vonnöten, dessen Auswirkung auf das Material man gut verstanden hat. Wie das Weißlicht in unserem Fall entsteht, ist hingegen noch völlig ungeklärt. Die Brillanz (= Strahlbündelung) des Lichts weicht nur sehr wenig von der des anregenden Laserstrahls ab, was darauf hinweist, dass sich die Verbindung für eine neue, günstige Form der Weißlicht-Projektion eignen könnte, die nicht nur für die Entwicklung von Beamern interessant wäre, sondern auch im medizinischen Bereich zum Einsatz kommen könnte.

Meine sehr verehrten Damen und Herren, mit dieser Illustration unserer Forschungsschwerpunkte möchte ich schließen und noch einmal zum Beginn meines Vortrags zurückkehren. Ich zeigte Ihnen ein Bild von Hennig Brand, wie er die Lumineszenz von weißem Phosphor beobachtet, den er bei dieser Gelegenheit zufällig entdeckte. Ich hoffe, Ihnen gezeigt zu haben, dass wir Syntheschemiker heute von der Arbeitsweise der Alchemisten des 17. Jahrhunderts weit entfernt

sind – aber auch die moderne Forschung kann noch mit erstaunlichen Überraschungen aufwarten, die uns dann nicht weniger freuen.

Hiermit bin ich am Ende meiner Ausführungen angelangt. Die Arbeiten, die ich Ihnen in aller Kürze vorgestellt habe, wurden von meinen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern ausgeführt, denen mein ganz besonderer Dank gilt. Auch meinen wissenschaftlichen Kooperationspartnern und diversen Geldgebern – allen voran der Deutschen Forschungsgemeinschaft – bin ich zu tiefem Dank verpflichtet.

Ihnen, meine sehr verehrten Damen und Herren, danke ich nochmals herzlich für die Aufnahme in die Akademie der Wissenschaften zu Göttingen – und für Ihre Aufmerksamkeit.

Referenzen:

- [1] I. Chung, M.G. Kanatzidis, *Chem. Mater.* 2014, 26, 849–869.
- [2] G. Tan, L.-D. Zhao, M.G. Kanatzidis, *Chem. Rev.* 2016, 116, 12123–12149.
- [3] M.J. Manos, M.G. Kanatzidis, *Chem. Sci.* 2016, 7, 4804–4824.
- [4] J.M. Goicoechea, S.C. Sevov, *Organometallics* 2006, 25, 4530–4536.
- [5] S. Scharfe, F. Kraus, S. Stegmaier, A. Schier, T.F. Fässler, *Angew. Chem.* 2011, 123, 3712–3754.
- [6] T. Fässler, *Struct. Bond.* 2011, 140, 91–132.
- [7] S. Dehnen, M. Melullis, *Coord. Chem. Rev.* 2007, 251, 1259–1280.
- [8] S. Santner, J. Heine, S. Dehnen, *Angew. Chem.* 2016, 128, 886–904.
- [9] P. Bron, S. Johansson, K. Zick, J. Schmedt auf der Günne, S. Dehnen, B. Roling, *J. Am. Chem. Soc.* 2013, 135, 15694–15697.
- [10] P. Bron, S. Dehnen, B. Roling, *J. Power Sources* 2016, 329, 530–535.
- [11] N. Rinn, L. Guggolz, K. Gries, K. Volz, J. Senker, S. Dehnen, *Chem. Eur. J.* 2017, 23, 15607–15611.
- [12] N. Rinn, J.-P. Berndt, A. Kreher, R. Hrdina, M. Reinmuth, P.R. Schreiner, S. Dehnen, *Organometallics* 2016, 35, 3215–3220.
- [13] J.P. Eußner, R.O. Kusche, S. Dehnen, *Chem. Eur. J.* 2015, 21, 12376–12388.
- [14] J.P. Eußner, S. Dehnen, *Chem. Commun.* 2014, 50, 11385–11388.
- [15] B. Weinert, S. Dehnen, *Struct. Bond.* 2017, 174, 99–134.
- [16] R.J. Wilson, S. Dehnen, *Angew. Chem.* 2017, 129, 3144–3149.
- [17] R.J. Wilson, L. Broeckaert, F. Spitzer, F. Weigend, S. Dehnen, *Angew. Chem.* 2016, 128, 11950–11955.
- [18] N. Lichtenberger, R.J. Wilson, A.R. Eulenstein, W. Massa, R. Clérac, F. Weigend, S. Dehnen, *J. Am. Chem. Soc.* 2016, 138, 9033–9036.

- [19] S. Mitzinger, L. Broeckaert, W. Massa, F. Weigand, S. Dehnen, *Nat. Commun.* 2016, 7, 10480–10490.
- [20] R.E. Morris, *Chem. Commun.* 2009, 2990–2998.
- [21] S. Santner, S. Yogendra, J. J. Weigand, S. Dehnen, *Chem. Eur. J.* 2017, 23, 1999–2004.
- [22] Y. Lin, W. Massa, S. Dehnen, *J. Am. Chem. Soc.* 2012, 134, 4497–4500.
- [23] N.W. Rosemann, J.P. Eußner, E. Dornsiepen, S. Chatterjee, S. Dehnen, *J. Am. Chem. Soc.* 2016, 138, 16224–16227.
- [24] N.W. Rosemann, J.P. Eußner, A. Beyer, S.W. Koch, K. Volz, S. Dehnen, S. Chatterjee, *Science* 2016, 352, 1301–1304.