

Wilke, Timm; Bodensiek, Oliver; Ruppertsberg, Klaus
Vom Reststoff zum Rohstoff. Modellexperimente zur Synthese von Nanopartikeln mit recyceltem Gold aus Elektronik-Schrott

formal überarbeitete Version der Originalveröffentlichung in:

formally revised edition of the original source in:

Chemie in unserer Zeit 52 (2018) 5, S. 342-349



Bitte verwenden Sie in der Quellenangabe folgende URN oder DOI /
Please use the following URN or DOI for reference:

urn:nbn:de:0111-pedocs-174544

10.25656/01:17454

<https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:0111-pedocs-174544>

<https://doi.org/10.25656/01:17454>

Nutzungsbedingungen

Gewährt wird ein nicht exklusives, nicht übertragbares, persönliches und beschränktes Recht auf Nutzung dieses Dokuments. Dieses Dokument ist ausschließlich für den persönlichen, nicht-kommerziellen Gebrauch bestimmt. Die Nutzung stellt keine Übertragung des Eigentumsrechts an diesem Dokument dar und gilt vorbehaltlich der folgenden Einschränkungen: Auf sämtlichen Kopien dieses Dokuments müssen alle Urheberrechtshinweise und sonstigen Hinweise auf gesetzlichen Schutz beibehalten werden. Sie dürfen dieses Dokument nicht in irgendeiner Weise abändern, noch dürfen Sie dieses Dokument für öffentliche oder kommerzielle Zwecke vervielfältigen, öffentlich ausstellen, aufführen, vertreiben oder anderweitig nutzen.

Mit der Verwendung dieses Dokuments erkennen Sie die Nutzungsbedingungen an.

Terms of use

We grant a non-exclusive, non-transferable, individual and limited right to using this document.

This document is solely intended for your personal, non-commercial use. Use of this document does not include any transfer of property rights and it is conditional to the following limitations: All of the copies of this documents must retain all copyright information and other information regarding legal protection. You are not allowed to alter this document in any way, to copy it for public or commercial purposes, to exhibit the document in public, to perform, distribute or otherwise use the document in public.

By using this particular document, you accept the above-stated conditions of use.

Kontakt / Contact:

peDOCS
DIPF | Leibniz-Institut für Bildungsforschung und Bildungsinformation
Informationszentrum (IZ) Bildung
E-Mail: pedocs@dipf.de
Internet: www.pedocs.de

Mitglied der


Leibniz-Gemeinschaft

Vom Reststoff zum Rohstoff

Modellexperimente zur Synthese von Nanopartikeln mit recyceltem Gold aus Elektronik-Schrott

Timm Wilke^[a], Oliver Bodensiek^[b] und Klaus Ruppersberg^[c]

^a Technische Universität Braunschweig, Institut für Ökologische und Nachhaltige Chemie,
Abteilung Fachdidaktik Chemie

^b Technische Universität Braunschweig, Institut für Fachdidaktik der Naturwissenschaften,
Abteilung Physik und Physikdidaktik

^c Leibniz-Institut für die Pädagogik der Naturwissenschaften und Mathematik
an der Universität zu Kiel (IPN) – Abteilung Didaktik der Chemie

Vorspann

Wie kann man im schulischen Experimentalunterricht Gold aus Elektronikschrott recyceln und gleich anschließend farbenprächtige Goldnanopartikel daraus herstellen? Hierzu eignet sich die im folgenden Text beschriebene Methode, die mit zwei alten Speicherriegeln und 20 Tropfen Königswasser auskommt. Am Ende erhält man wenige Milligramm Goldsäure, mit der sich rote und blaue Goldnanopartikel erzeugen lassen. Zur Vorbereitung für dieses Modellexperiment oder zur Überbrückung der nötigen Einwirkzeit bis zum Ablösen des Hauchgoldes von der Platine lassen sich gesellschaftspolitisch relevante Fakten zum professionellen und unprofessionellen Edelmetallrecycling erarbeiten. Als Nebenprodukt fällt eine überaus einfache Zementation von Kupfer mit Hilfe von entphlegmatisierter Eisenwolle ab.

Für ein funktionelles Recycling beispielsweise zur Anwendung in der Biomedizin werden Goldnanopartikel bestimmter Partikelgrößen benötigt. Die Farbe der Goldkolloide gibt einen ersten Anhaltspunkt, ist aber neben der Partikelgröße von vielen weiteren Faktoren abhängig. Obwohl eine Charakterisierung im Schulexperiment zunächst unmöglich scheint, gibt es eine auch für den Unterricht zu realisierende Methode zur näherungsweisen Bestimmung der Partikelgrößen, die auf der Lichtstreuung an den Nanopartikeln beruht.

Einführung

Gold übt einen besonderen Reiz aus

Gold zu finden und damit zu arbeiten war für Menschen seit jeher überaus reizvoll; bereits in alten Hochkulturen wie Ägypten und Griechenland spielte Gold eine wichtige Rolle. Zu dieser Zeit lebende Menschen konnten das Gold noch gediegen auf dem Erdboden, im Gestein oder in Form von Nuggets in Flüssen finden. Auch ohne jede Verarbeitung ist gediegenes Gold sehr ästhetisch (Abb. 1).



Abb. 1: Gediogenes Gold (Foto: Rob Lavinsky, iRocks.com – CC-BY-SA-3.0)

Von Zufallsfunden einmal abgesehen ist es in neuerer Zeit wesentlich schwieriger, Gold zu finden. Zwar wird auch heute noch für Touristen das aus Westernfilmen bekannte Goldwaschen angeboten [1], in Südafrika hingegen fahren Bergleute 3.000 m in die Tiefe ein, um bei knapp 60 °C geothermaler Hitze ein Gestein zu fördern, das pro Tonne 8-12 Gramm Gold enthält [2]. Das größte bekannte Goldvorkommen befindet sich jedoch nicht in Bergbauminen, sondern in den Weltmeeren. Auf die Suche nach ertragreichen Gewinnungsmethoden begaben sich namhafte Wissenschaftler wie etwa Fritz Haber. Das Projekt "Gold aus Meerwasser" ist allerdings aus wirtschaftlichen Gründen gescheitert, weil die gefundenen Konzentrationen um den Faktor 1.000 geringer waren als vermutet [3].

Gold aus Elektronikschrott

Seit einigen Jahren gibt es jedoch ein Goldvorkommen aus unseren Hand- und Hosentaschen, aus Haushalten, Schulen und Büros, das viel zu wenig Beachtung findet: Elektronikschrott von ausrangierten Computern, Handys, Wearables usw. enthält immer Gold, das meist nicht oder nicht richtig wiederverwertet wird. Das Recycling von Elektronikschrott gestaltet sich schwierig, weil Kleingeräte mit persönlichen Daten wie Smartphones, Tablets und Netbooks oftmals liebevoll aufbewahrt statt entsorgt werden [4]. Angesichts der geringen Mengen in einem kleinen Gerät fehlen Einsicht und Bewusstsein, dass das Recycling im großen Maßstab äußerst lohnend ist. Eine beachtenswerte Initiative um dieser Haltung zu begegnen ist die geplante Herstellung der Olympia-Goldmedaillen des Jahres 2020, die ausschließlich aus Gold von recycelten Handys produziert werden sollen [5].

Verwendung von Elektronikgeräten

Durch die stetig voranschreitende Digitalisierung von immer mehr Bereichen im beruflichen und privaten Umfeld werden immer mehr Elektronikgeräte produziert. Dabei nimmt nicht nur die Anzahl der Geräte zu (bspw. separate Handys, Tablets, Computer für Beruf und Freizeit), sondern auch die Anzahl der Geräteklassen. Neben sogenannten *Wearables* (Smartwatches, Google Glasses) bieten Minicomputer die Möglichkeit, überwiegend analoge Geräte mit einer intelligenten Steuerung auszustatten und an das Internet anzuschließen. Bezogen auf Wohnraum (Kühlschränke, Kameras, Heizkörper, Jalousien, ...) spricht man von *Smart Home*. Die Gesamtheit aller vernetzten Geräte wird als *Internet of Things* bezeichnet. Geschätzte 14 Milliarden Geräte sollen im Jahr 2018 mehr als 800 Terawattstunden Energie verbrauchen [6] – dies entspricht der halben Wärmeleistung des Golfstroms.

Umgekehrt proportional zur Geräteanzahl verhält sich deren Lebensdauer. Da die Technologie sich immer schneller neu erfindet und leistungsfähiger wird, veralten neue Geräte in der Folge immer schneller (Moore'sches Gesetz [7]). Dadurch verkürzt sich die durchschnittliche Lebensdauer von Fernsehgeräten auf 6 Jahre, Computer werden nach 3 Jahren ausgetauscht, Smartphones nach 1,5 – 2 Jahren [8]. Als Folge wurden allein in Deutschland (konservativ geschätzt) mehr als 1,6 Millionen Tonnen Elektronikschrott produziert [9].

Recycling von Gold aus Elektronikschrott: Ein Modellexperiment

Im Rahmen des Chemieunterrichts kann diese bislang vernachlässigte Goldquelle thematisiert werden, um die verborgenen Werte eines scheinbar wertlosen Abfallprodukts freizulegen. Wer beispielsweise ein Handy aufschraubt und dabei die Bauteile betrachtet, findet auf den Kontakten gut sichtbar eine wenige Mikrometer dicke Schicht Hauchgold. Noch einfacher lassen sich in der Regel ausrangierte Computer zerlegen; darüber hinaus können deren Bauteile einzeln entnommen und auf mehrere Lerngruppen aufgeteilt werden. Im Idealfall reicht ein einziger Schrottcomputer somit für die Experimente einer ganzen Klasse aus.

Nachfolgend wird in einer Versuchsreihe exemplarisch beschrieben, wie Gold aus Elektronikschrott auf einfache Weise im Chemieunterricht gewonnen werden kann. Die Autoren sind sich bewusst, dass in elektronischen Bauteilen auch noch andere seltene Elemente versteckt sind; diese lassen sich jedoch mit Ausnahme von Kupfer (s.u.) mit schulischen Mitteln nicht so anschaulich gewinnen wie das im vorliegenden Artikel bevorzugte Gold.

Beschreibung der Versuchsreihe zum Goldrecycling

Ein Hinweis vorab: Für das Recycling im Unterricht können alle Geräte mit Baujahr nach 2006 verwendet werden, da seit diesem Zeitpunkt (z.B. für Lötzinn) kein Blei mehr verwendet werden darf. Sind geeignete Elektronik-Altgeräte gefunden, werden diese von der Stromversorgung getrennt und alle Bauteile mit sichtbaren Goldkontakten ausgebaut. Bei Computern sind dies typischerweise Speicherriegel, Sound- und Grafikkarten. Prozessoren enthalten zwar größere Mengen an Gold, sind aber schwieriger zu verarbeiten.

Der erste Schritt der Versuchsreihe ist die mechanische Vorbereitung. Um Verunreinigungen durch andere Metalle zu vermeiden und den Einsatz von Chemikalien im nächsten Schritt zu minimieren, werden die Goldkontakte mit einer Zange oder einem Seitenschneider von der restlichen Platine abgetrennt. In größeren Lerngruppen hat es sich als praktikabel erwiesen, mit Rollrandgläsern zu arbeiten. Entsprechend große Stücke müssen also passend zugeschnitten werden (Abb. 2). Für eine spätere Ausbeutebestimmung werden die einzelnen Proben mit einer Analysenwaage (vorzugsweise mit drei Nachkommastellen) gewogen und die Werte notiert.

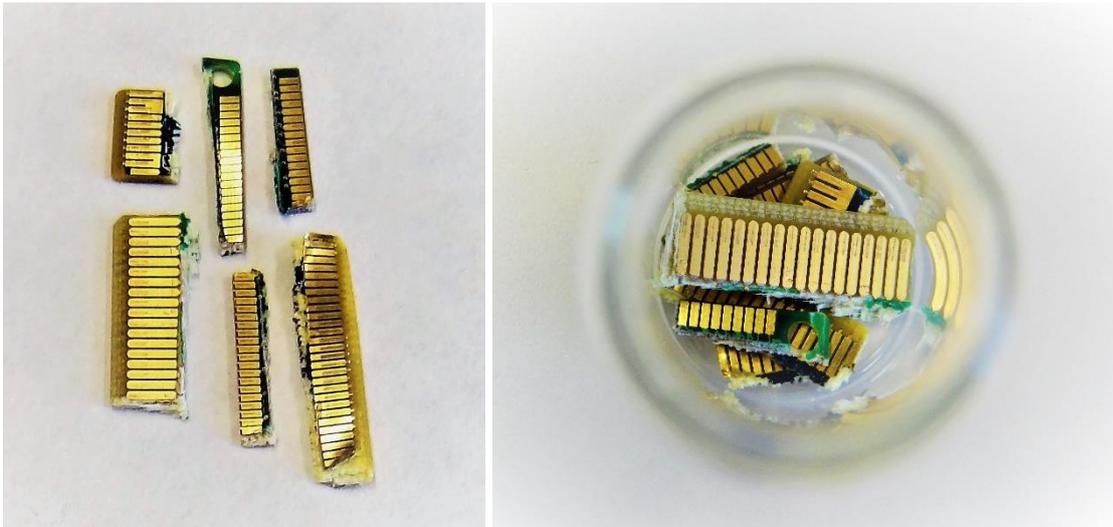


Abb. 2: Goldhaltige Platinenteile ($m = 1,9 \text{ g}$), mit einem Seitenschneider abgetrennt (links) und passend für ein Rollrandglas zugeschnitten (rechts).

Im zweiten Schritt wird das Edelmetall in Lösung gebracht – allerdings (noch) nicht Gold, sondern zunächst Kupfer. Letzteres ist Hauptbestandteil der vielen Leiterbahnen in den Platinen und somit in weitaus größeren Mengen verbaut als Gold, welches lediglich als hauchdünne Schicht über den Kontaktstellen vor Korrosion schützt. Warum lösen wir nun also Kupfer? Hierfür gibt es im Wesentlichen zwei Gründe:

1. **Schonende Trennung:** Durch das Lösen von Leiterbahnen und Kontaktstellen wird das darüber befindliche Hauchgold ohne Beschädigung abgetrennt. Auf mechanischem Wege kann dies bei einer so dünnen Schicht nicht erreicht werden.
2. **Reinheit:** Durch die eingesetzten Chemikalien werden weitere unedle Metalle gelöst und müssen im weiteren Verlauf nicht separat getrennt werden.

Ablösung des Hauchgoldes

Für die chemische Extraktion werden die Platinenabschnitte im Abzug zu gleichen Teilen mit Salzsäure ($\omega = 33\%$) und Wasserstoffperoxid ($\omega = 10\%$) überschichtet (siehe Arbeitsblatt 2, Abb. 3). Unmittelbar nach Zugabe der Lösung kann bereits die Reaktion anhand der Farbänderung verfolgt werden; nach einigen Minuten „schwebt“ schon das erste Hauchgold in der Lösung. Für ein ideales Ergebnis wird die Lösung über Nacht stehen gelassen, bis sich sämtliches Gold abgelöst hat. Wenn nicht so viel Zeit zur

Verfügung steht, kann nach 15 Minuten Einwirkzeit mit einer Zahnbürste vorsichtig nachgeholfen werden.

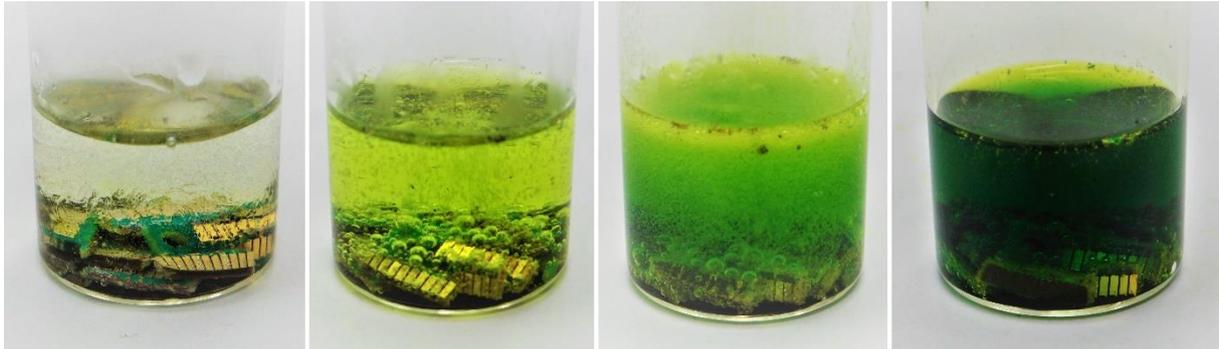


Abb. 3: Lösevorgang von Kupfer und unedlen Metallen im Rollrandglas. Nach etwa drei Minuten lösen sich bereits erste Goldbeschichtungen (Mitte rechts, oben auf dem Schaum schwimmend)

Nach dem Ende der Reaktion wird die Lösung filtriert. Um die Ausbeute zu erhöhen, werden anschließend Reste der kupferhaltigen Lösung mit wenigen Millilitern demineralisiertem Wasser aus dem Filter gewaschen. Im Filtrat ist die Präsenz von Kupfer(II)-chlorid in der salzsauren Lösung bereits durch die charakteristisch grüne Farbe erkennbar. Das Nachspülen mit Wasser bietet einen schönen Nebeneffekt, der bei Interesse von der Lehrkraft thematisiert werden kann: Die lokale Verdünnung im oberen Bereich der Lösung bewirkt durch Verschiebung des Gleichgewichts die Bildung des blauen Hexaaquakupfer(II)-Komplexes (Abb. 4). Durch erneute Zugabe von Salzsäure ist der Effekt reversibel und bietet somit einfache Anknüpfungspunkte an das chemische Gleichgewicht. In jedem Fall wird die Lösung für die Gewinnung von Kupfer verwendet (siehe Arbeitsblatt 2).

Acht Milligramm Hauchgold

Der Rückstand wird mit Wasser gewaschen – neben dem Hauchgold verbleiben hierbei meist kleine Verunreinigungen (insb. Platinsplitter) im Filter. Je nach Zielsetzung der Lehrkraft kann nun auf unterschiedliche Weise vorgegangen werden: Eine relativ saubere Probe kann mithilfe einer Pinzette und etwas Geschick von Verunreinigungen gesäubert werden. Durch Abwiegen der Probe kann die Menge des gewonnenen Goldes schnell bestimmt werden – aus der abgebildeten Probe von 1,927 g Elektronik-Schrott wurden 8 mg Gold gewonnen.



Abb. 4: Filtration der Suspension (links), kupferhaltiges Filtrat (Mitte) und gewaschener Rückstand im Filter (rechts).

Für die Synthese von Gold-Nanopartikeln wird das gewonnene Gold mit 20 Tropfen Königswasser zu Tetrachloridogold(III)-säure („Goldsäure“) umgesetzt und durch eine Filtration von letzten Verunreinigungen getrennt. Um nicht wesentliche Anteile der Ausbeute im Filter zu verlieren, sollte hier mit etwas demineralisiertem Wasser nachgespült werden. Anschließend wird durch vorsichtiges Eindampfen (und ggf. anschließender Trocknung im Exsikkator) das Volumen der Lösung reduziert und die Ausbeute bestimmt – im vorliegenden Fall 22 mg (die Ausbeute von über 100% erklärt sich durch die hygroskopische Wirkung von Goldsäure). Ausgehend von den eingesetzten 8 mg Gold entspricht dies ca. 0,04 mmol und ermöglicht die Herstellung von 20 mL der in Arbeitsblatt 2 benötigten Goldsäurelösung ($c = 2 \text{ mmol L}^{-1}$) zur Erstellung der Gold-Nanopartikel. Dies reicht aus, um etwa 16 Gold-Nanopartikel-Synthesen nach [10; 11] durchzuführen (Abb. 5).

20 Tropfen Königswasser

Der Einsatz von Königswasser wird im Chemieunterricht gewöhnlich vermieden, stellt aber bei fachgerechtem Umgang ein beherrschbares Risiko dar. Im vorliegenden Fall ist die Verwendung von Königswasser notwendig, daher übersteht die Mischung von Salz- und Salpetersäure die Ersatzstoffprüfung (ESP) gemäß DGUV-Liste [12]. Es besteht lediglich ein Tätigkeitsverbot für Schüler bis Klasse 4 („-S4K“). Dennoch sollten Lehrkräfte und Schüler einen gewissen Respekt vor dem Experiment aufbringen und alle Schutzbestimmungen beachten. Die Tetrachloridogold(III)-säure-Lösung sollte möglichst rasch verwendet werden und keinen alkalischen Bedingungen ausgesetzt werden, denn sonst besteht die Möglichkeit der versehentlichen Knallgoldbildung (siehe Kasten).

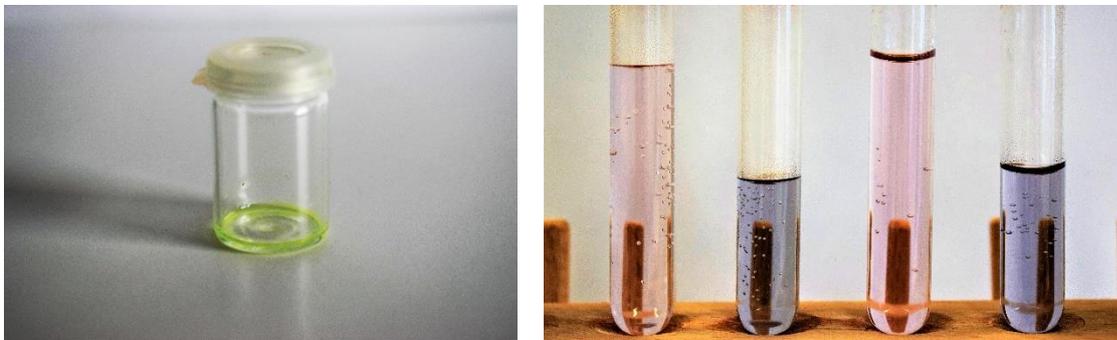


Abb 5: Tetrachloridogold(III)-säure-Lösung (links); Gold-Nanopartikel mit unterschiedlicher Partikelgröße (rechts) nach [10].

Optische Eigenschaften und Charakterisierung der Goldnanopartikel

Im Sinne eines professionellen und funktionellen Recyclings ist insbesondere die Größe der hergestellten Goldnanopartikel interessant. Einen ersten Hinweis darauf liefert bereits die unterschiedliche Färbung der Gold-Kolloide (Abb. 5, rechts und Abb. 6, links). Jedoch ist diese Färbung auch stark von weiteren Faktoren wie etwa dem pH-Wert abhängig.

Der Grund für die unterschiedlichen Farben liegt in den unterschiedlichen Frequenzbereichen der sogenannten Plasmonenresonanzen (Info-Kasten). Bei Plasmonen handelt es sich um kollektive, quantisierte Schwingungsmoden der freien Elektronen im Metall. Diese können durch elektromagnetische Wellen angeregt werden und treten bei einer bestimmten Frequenz in Resonanz mit diesen. In dem entsprechenden Wellenlängenbereich wird die Strahlung stark absorbiert und gestreut. Die Frequenz dieser Resonanz hängt wiederum stark von Form, Oberfläche und Agglomeration der Nanopartikel, der umgebenden Lösung, aber auch von der Größe der Nanopartikel ab: Während die kleineren Partikel im kurzwelligeren Bereich absorbieren und die Lösung rötlich erscheint, weist eine bläuliche Lösung auf größere Partikel hin, da die Plasmonenresonanz für diese größeren Partikel eine Rotverschiebung aufweist.

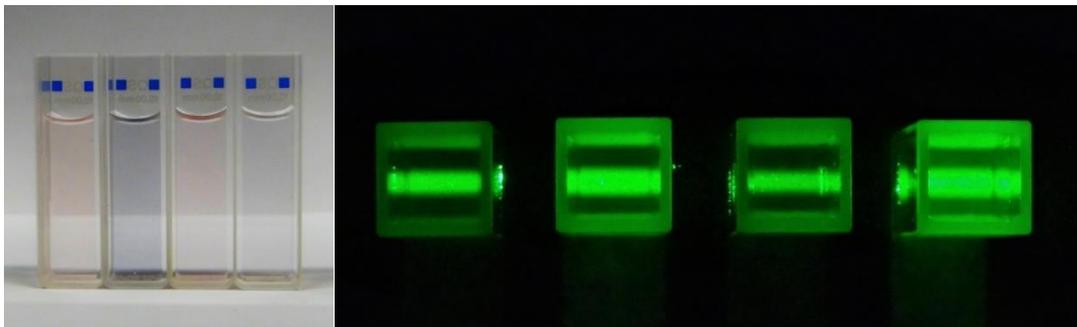


Abb. 6: Quarzküvetten mit Proben der vier hergestellten Lösungen (links); Tyndall-Effekt an Gold-Nanopartikeln, Küvetten von oben fotografiert (rechts).

Bei der Bestrahlung der Gold-Kolloiden mit einem Laser ist der Tyndall-Effekt deutlich zu erkennen (Abb. 6, rechts). Dabei wird einfallendes Licht an den Goldnanopartikeln auch seitlich zur Strahlrichtung elastisch gestreut, so dass der Verlauf eines Lichtstrahls durch die Lösung sichtbar wird. Im Versuch wird ein Diodenlaser der Wellenlänge 532 nm mit einer Leistung von 4,5 mW verwendet, womit der Tyndall-Effekt besonders deutlich in Erscheinung tritt und für einen direkten Vergleich auch mehrere Küvetten hintereinander durchstrahlt werden können. Dabei ist bereits mit bloßem Auge (Tragen einer Laserschutzbrille!) ein starker Intensitätsunterschied sichtbar. Tatsächlich kann hier schon ein Zusammenhang zwischen Partikelgröße und der Streuintensität vermutet und als Hypothese aufgestellt werden – je größer die Nanopartikel bei gleicher Konzentration sind, desto stärker ist auch die Intensität des gestreuten Lichts.

Versuch: Intensitätsmessung der statischen Lichtstreuung zur Ermittlung der Partikelgröße

In einem verhältnismäßig einfachen Versuchsaufbau (Abb. 7) können diese Streuintensitäten mittels einer Photodiode und entsprechendem Photodiodenverstärker als Photoströme I_{photo} gemessen werden, die proportional zur einfallenden Lichtintensität sind. Nach Abzug des Photostroms $I_{photo,0}$ für eine Küvette mit der reinen Natriumcitrat-Lösung, können die Photoströme in Relation zueinander gesetzt werden. Um den experimentellen Aufwand gering zu halten, wird die Streuintensität lediglich in einem Winkel von 90° zum Strahl gemessen. Die jeweilige vom Laser durchstrahlte Küvette wird dabei direkt

an der offenen Blende der Fotodiode zentriert. Eine Markierung hilft dabei, die Küvetten jeweils möglichst gleich auszurichten.

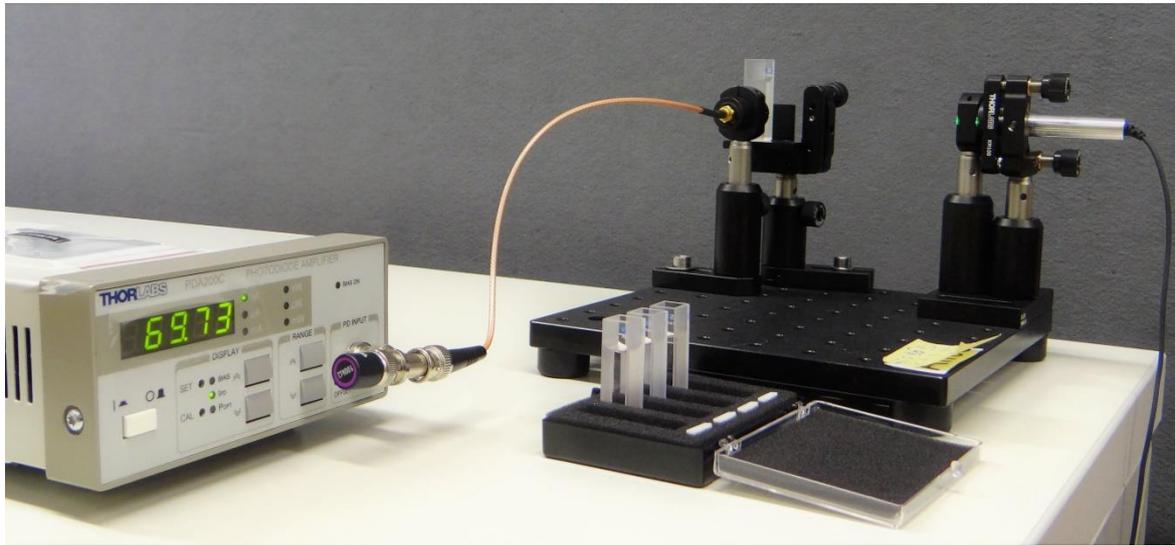


Abb. 7: Experimenteller Aufbau zur Intensitätsmessung der statischen Lichtstreuung.

Da die Messdaten allerdings noch in keiner Relation zu den Partikelgrößen stehen, müssen diese für eine Referenzkurve einmalig möglichst zeitnah nach Erstellung der Gold-Kolloide professionell vermessen werden, etwa durch die Methode der dynamischen Lichtstreuung (DLS) oder der Transmissions-elektronenmikroskopie. Danach können die Messdaten zur Bestimmung des vom experimentellen Aufbau abhängigen Proportionalitätsfaktors im mathematischen Modell (s.u.) verwendet werden. Damit können die mittleren Nanopartikelgrößen schließlich allein durch Messung des Photostroms näherungsweise bestimmt werden.

Info-Kasten für Erklärung von Fachbegriffen:

Plasmon (Physik) Schwingungsquant: Ein Plasmon bezeichnet in der Physik die quantisierte Anregung einer kollektiven Schwingungsmode der "Plasmas" der freien Elektronen im Metall oder auf der Oberfläche eines Metalls bzw. Metallpartikels.

Plasmonenresonanz: Während bei organischen Farbstoffen die Valenzelektronen des Farbstoffmoleküls bestimmte Wellenlängen des sichtbaren Lichts absorbieren und dadurch zum Erscheinen einer Farbe führen, muss bei metallischen Nanopartikeln der Effekt der Plasmonenresonanz berücksichtigt werden. Durch diese Resonanz werden bestimmte Wellenlängen in Abhängigkeit von der Partikelgröße stark absorbiert.

Mie-Streuung: Elastische Streuung elektromagnetischer Wellen an sphärischen Objekten, deren Durchmesser ungefähr in der Größenordnung der Wellenlänge der Strahlung liegt. Die Mie-Streuung erzeugt den Tyndall-Effekt mit einer starken Streuintensität.

Rayleigh-Streuung: Elastische Streuung elektromagnetischer Wellen an Objekten, die sehr viel kleiner als die Wellenlänge der Strahlung sind, z.B. an Molekülen oder sehr kleinen Nanopartikeln. Die Intensität des gestreuten Lichtes ist in diesem Fall sehr schwach.

Versuchsauswertung und Modellerstellung

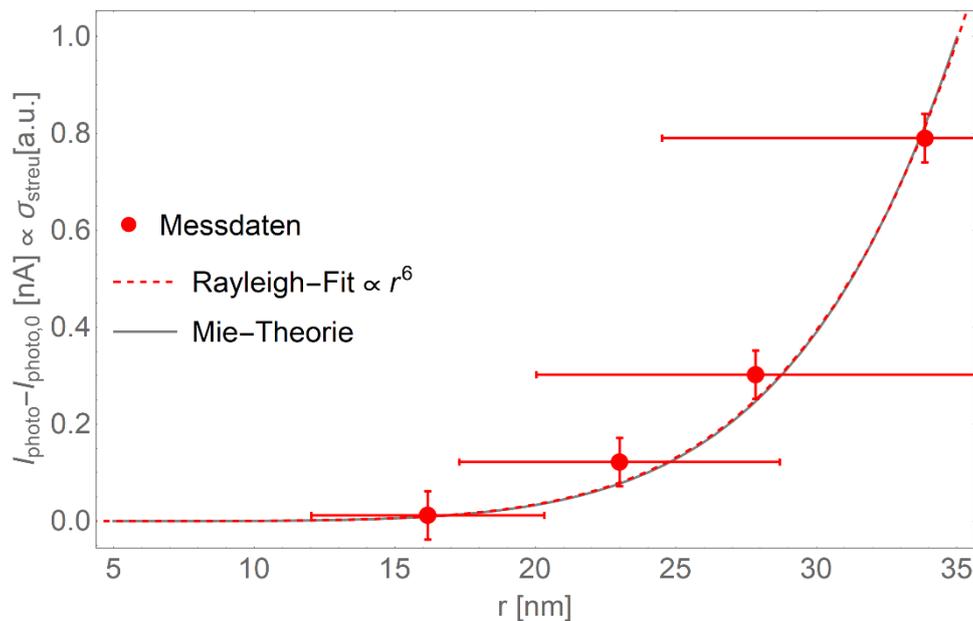


Abb. 8: Vergleich der Messdaten (Radius der Nanopartikel aus DLS, Intensität bzw. Photodiodenstrom aus der statischen Lichtstreuung entsprechend des obigen experimentellen Aufbaus) mit der Mie-Theorie, mit der sich der Streuquerschnitt σ_{streu} berechnen lässt.

Die Größenordnung der Nanopartikel von üblicherweise ca. 10-100 nm im Durchmesser liegt genau in dem Übergangsbereich der Rayleigh-Streuung zur Mie-Streuung (Info-Kasten). Dies ist auch in Abb. 8 zu erkennen: Die Mie-Streuung mit einer stärkeren Intensität setzt erst ab einem Partikelradius von ca. 20 nm ein. Bis zu einem Partikelradius von etwa 60 nm kann die Rayleigh-Näherung hier zur mathematischen Modellierung jedoch noch sehr gut angewendet werden, wie im Vergleich mit der exakten Mie-Theorie sichtbar wird, die für sehr kleine Radien gegenüber der Lichtwellenlänge gerade der Rayleigh-Näherung entspricht. Selbst für etwas größere Nanopartikel ist die Rayleigh-Näherung für die Berechnung im Unterricht noch akzeptabel.

Im Rahmen der Rayleigh-Näherung gilt der Zusammenhang

$$r(I_{photo}) \approx \left(\frac{I_{photo} - I_{photo,0}}{\alpha} \right)^{\frac{1}{6}}$$

zwischen dem mittleren Radius r der Nanopartikel (hier in nm) und dem Photostrom (hier in nA). Den vom Versuchsaufbau abhängigen Proportionalitätsfaktor bestimmen wir damit zu $\alpha = 5,38 \times 10^{-10}$. Sofern die Möglichkeit zur einmaligen Kalibrierung durch die Erstellung einer Referenzkurve besteht, bietet der Ansatz so eine einfache Möglichkeit zur Größencharakterisierung der Nanopartikel.

Diskussionsanregung für die unterrichtliche Betrachtung

Neben der bereits erwähnten Anziehungskraft von Gold auf Schülerinnen und Schüler (und Lehrende!) bietet die Behandlung des Recyclings von Elektronik-Schrott viele attraktive Lerngelegenheiten für Schule und Schülerlabor. Inhaltlich können im Rahmen der Versuchsreihe vielfältige klassische Inhalte des Chemieunterrichts (Redoxreihe und –reaktionen der Metalle, Löslichkeit, chemisches Gleichgewicht, Nachweisreaktionen, ...) erlernt oder vertieft werden. Noch mehr Möglichkeiten und Anknüpfungspunkte bieten sich, wenn der Fokus auf Nachweis und Gewinnung weiterer Metalle (Eisen, Aluminium, Silber, Zinn, ...) und Seltene Erden erweitert wird. Beispiele für entsprechende Unterrichtsprojekte wurden von Di Fuccia [13] und Sieve [14] vorgestellt.

Die Versuchsreihe kann didaktisch-methodisch auf vielfältige Weise aufgegriffen werden – im Rahmen des Regelunterrichts oder auch in Seminarfacharbeiten, Jugend-Forscht-Projekten sowie im WPU-Unterricht oder in Kursangeboten eines Schülerlabors. Die eingangs erwähnte (problematische) Gewinnung von Ressourcen in Teilen der zweiten und dritten Welt bietet hierzu einen gewinnbringenden Kontext für den Unterricht sowie eine Gelegenheit, das (eigene) Konsumverhalten kritisch zu reflektieren und zu diskutieren. In Podiumsdiskussionen, Klassenkonferenzen und vielen weiteren Formaten können auf diese Weise die Kompetenzbereiche Kommunikation und Bewertung gefördert werden – ein Beispiel wurde von Menthe [15] verfasst.

Einen konkreten Diskussionsanlass, der von Schülerinnen und Schülern häufig nach der Versuchsreihe erfragt wird, bieten die verwendeten Chemikalien. Ist der Einsatz von konzentrierten Säuren für so geringe Mengen Gold tatsächlich ökologisch und ökonomisch sinnvoll oder gar nachhaltig? Natürlich sind Salzsäure, Wasserstoffperoxid und Salpetersäure keine umweltfreundlichen Chemikalien – zur Beurteilung der (Umwelt-) Bilanz muss diese allerdings in ein Verhältnis mit der konventionellen Gewinnung betrachtet werden. Durch den eingangs erwähnten Goldbergbau werden pro Feinunze Gold (31,1 g) 556 kg Kohlenstoffdioxid emittiert [16] und 11% aller Quecksilberemissionen verursacht. Das Auslaugen des Bodens verursacht an Bergbaustandorten eine irreversible Umweltkontamination, da der teilweise toxische Abraum aus Kostengründen nicht entsorgt wird. In Peru etwa wurden hierdurch in den vergangenen Jahren über 50.000 Hektar Regenwald zerstört [17]. Das Internet bietet hierfür genügend Quellen, sodass Schülerinnen und Schülern diese Fragestellung eigenständig bearbeiten können.

Fazit

Insgesamt stellt die vorgestellte Versuchsreihe ein lohnendes Themenfeld für den Unterricht dar – auch über das primäre Unterrichtsziel des Recyclings hinaus. Die gewonnene Goldsäure ermöglicht die Synthese von Gold-Nanopartikeln, die (unter anderem) aufgrund der aussagekräftigen Ergebnisse oftmals als Einstieg in die Nanotechnologie gewählt wird. Die hergestellten Partikel können anhand der vorgestellten Untersuchungsmethode mit einfachen Materialien fächerübergreifend im Physikunterricht mit hoher Genauigkeit charakterisiert werden. Auf diese Weise können die mit bloßem Auge erkennbaren Farbunterschiede anhand der Messergebnisse wissenschaftlich ausgewertet und als Struktur-Eigenschafts-Beziehungen beschrieben werden.

Gold, das kracht: Knallgold

Wer mit kolloidalem Gold umgeht, sollte über die Möglichkeit der unbeabsichtigten Knallgoldbildung Bescheid wissen [18]. Als Gegenmaßnahme finden sich sehr unterschiedliche Angaben: „Die kolloidalen Lösungen dürfen nicht aufbewahrt werden, da sich durch die langsame Reaktion mit Luftstickstoff oder mit anderen Stickstoffverbindungen explosives Knallgold Au_3N oder Knallsilber Ag_3N bilden können“ [19]. Diese Anweisung ist sicherlich von großem Sicherheitsdenken geprägt. Werden kolloidale Lösungen sofort nach der Arbeit im Sondermüllbehälter entsorgt, so muss darauf geachtet werden, dass das Abfallgemisch bis zur Abholung im sauren pH-Bereich gehalten wird; ansonsten könnte sich z.B. durch versehentliche Zugabe von Alkalien auch dort Knallgold bilden [20].



Abb. K1: Detonation von wenigen Milligramm Knallgold, Bildabdruck mit freundlicher Genehmigung von Dr. Johannes H. Sterba, Atominstitut der TU Wien [20])

Telefonische und schriftliche Anfragen an andere erfahrene Experimentatoren ergaben mildere Empfehlungen. Generell sollten selbstzubereitete Lösungen nur für einen überschaubaren Zeitraum angefertigt werden, etwa der Vorrat für ein halbes Jahr, ein Semester, einen Unterrichtsabschnitt. Das gut

lesbare Etikett sollte mit Mengenangabe, Datum und Namenskürzel versehen werden. Von der Verwendung von Schliffstopfen-Flaschen sollte bei Goldsäurelösungen abgesehen werden, da kleinere Verunreinigungen am Flaschenhals mit dem Ammoniak der Laborluft zu Knallgold reagieren könnten. Wer sich einmal die von Salmiakstaub weißen Vorratsflaschen in vielen Labors vor Augen führt, wird sicherlich zustimmen, dass auf diese Weise eine unbeabsichtigte Knallgoldbildung stattfinden könnte. Beim nächsten Öffnen zerreibt der Glasstopfen die am Schliff befindlichen Kristalle; dies könnte wie ein Zündmechanismus wirken und zu erheblichen Verletzungen an den Händen und im Gesicht führen. Im Jahre 1809 hatte auch der berühmte schwedische Chemiker Jöns Jakob Berzelius einen Knallgoldunfall, der ihn monatelang gesundheitlich beeinträchtigte [18]. Dabei erlitt er schwere Verletzungen an der linken Hand und an den Augen. In einem seiner vielen Lehrbücher ist folgendes zu lesen: „Es giebt (sic!) zwei Arten von Knallgold. Die eine ist dunkelgelb, und wird gebildet, wenn die Goldauflösung mit einer geringeren Quantität Ammoniak gefällt wird. (...) Das Knallgold hingegen, welches durch Kochen mit ammoniakhaltigem (...) Wasser völlig ausgewaschen worden ist, hat eine gelbbraune, zum Purpur sich hinziehende Farbe, und detonirt (sic!) nach dem Trocknen äusserst (sic!) leicht mit einem starken Knall und einer schwachen Flamme“ [21].

Wer den Suchbegriff „Knallgold“ oder „fulminating gold“ bei Youtube eingibt, bekommt zahlreiche Filme zu sehen, die diese Schilderung untermauern. Da Knallgold äußerst unberechenbar reagiert und auch kleinste Mengen ohne weiteres den Verlust eines Auges oder Teilen der Hand herbeiführen können, wird von einer Nachahmung der Youtube-Sequenzen dringend abgeraten: „This real explosive, which caused considerable injuries and death between alchemists, could unexpectedly be just over the corner.“ [22].

Zusammenfassung

Wer mit Gold-Nanopartikeln arbeiten möchte, scheitert oft daran, dass in der Schule aus Kostengründen keine goldhaltigen Chemikalien angeschafft werden. Der folgende Artikel stellt eine praktikable Lösung vor: Die Aufarbeitung von goldhaltigem Elektronikschrott, der selbst in Schulen häufig achtlos mit dem Restmüll entsorgt wird, wird als Modellexperiment vorgestellt. Dazu kommen kritische Denkansätze zum unsachgemäßen Recycling in Teilen der Dritten Welt sowie die Bewusstmachung hoher Sachwerte, die unbeachtet vergeudet werden. Last but not least wird die gewonnene Goldsäure für die Synthese der eingangs erwähnten Gold-Nanopartikel eingesetzt.

Summary

Experiments with gold nanoparticles can often not be carried out at school, since the required precursors containing gold are too expensive. The following article presents a practicable solution for the processing of gold-bearing electronic waste, which is often disposed of carelessly with residual waste even in schools. The gold acid obtained herein is used for the synthesis of the gold nanoparticles mentioned above. In addition to the series of experiments, critical approaches concerning improper recycling in parts of the Third World and the high material values, which are wasted unnoticed in our society, are discussed in class.

Schlagworte

Gold-Recycling, Elektronik-Schrott, Nanotechnologie, Chemieunterricht

Literatur

- [1] Schweiz Tourismus, *Goldwaschen als Touristenattraktion*, <https://www.myswitzerland.com/de-de/goldwaschen.html>, **2018**.
- [2] M. M. Haefliger, *In immer tiefere Tiefen*, *Neue Züricher Zeitung*, <https://www.nzz.ch/in-immer-tiefere-tiefen-1.16991705>, **2012**.
- [3] D. Stoltzenberg, *Chemie in unserer Zeit* **1994**, *28*, 321–327, DOI: 10.1002/ciuz.19940280611.
- [4] T. Wilke und K. Ruppertsberg, *UC* **2017 (161)**, *27*, 22–26.
- [5] Stern, *Japan plant Innovation: Die nächsten Olympia-Goldmedaillen bestehen aus ...*, <https://www.stern.de/digital/technik/olympia-2020--die-goldmedaillen-bestehen-aus-elektroschrott-7313146.html>, **2017**.
- [6] International Energy Agency, *More Data, Less Energy*, Paris, http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/MoreData_LessEnergy.pdf, **2014**.
- [7] G. E. Moore, *Electronics* **1965**, *38*, 114–117.
- [8] D. Schmalz, *Produktlebenszyklus*, <http://www.vorlesungen.info/node/1229>, **2011**.
- [9] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, *Elektroaltgeräte*, <https://www.umweltbundesamt.de/themen/abfall-ressourcen/produktverantwortung-in-der-abfallwirtschaft/elektroaltgeraete>, **2017**.
- [10] K. Ruppertsberg und S. Nick, *CHEMKON* **2017**, *24*, 146–147, DOI: 10.1002/ckon.201780371.
- [11] S. Schwarzer, R. Abdelaziz, M. Elbahri und T. Wilke, *CHEMKON* **2016**, *23*, 188–190, DOI: 10.1002/ckon.201610287.
- [12] Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e.V., *DGUV Information 213-098 Stoffliste zur DGUV Regel 113-018*, <http://publikationen.dguv.de/dguv/pdf/10002/213-098.pdf>.
- [13] D. Di Fuccia, C. Meierotte und B. Ralle, *CHEMKON* **2006**, *13*, 189–196, DOI: 10.1002/ckon.200610050.
- [14] B. Sieve, *UC* **2014**, *25*, 20–27.
- [15] Menthe, J., Baumann, S., Sprenger, S.: *Unterricht Chemie* **2016**, *27*, 23–27.
- [16] A. Manhart, *Ressourcenfieber - Seltene Erden & kritische Metalle*, München, **08.02.2012**.
- [17] R. I. Duerr, *Edelmetalle - Tödliche Gier nach Gold*, <http://www.sueddeutsche.de/wissen/edelmetalle-toedliche-gier-nach-gold-1.3231437-3>, **07.11.2016**.
- [18] G. Steinhauser, J. Evers, S. Jakob, T. Klapötke und G. Oehlinger, *Gold Bulletin* **2008**, *41*, 305–317.
- [19] T. Seilnacht, *Kolloidales Gold und Silber*, http://www.seilnacht.com/nano/nano_kol.html, **2014**.
- [20] J. Sterba und M. Hammer, *Das Gold, das kracht*, <http://sciencev1.orf.at/news/154577.html>, **17.02.2009**.
- [21] J. J. Berzelius, *Lehrbuch der Chemie*, Arnold, Dresden, **1834**.
- [22] I. Millesima, *Aqua Regia & Fulminating Gold*, <https://www.labyrinthdesigners.org/alchemy-ancient-chemistry/aqua-regia-fulminating-gold/>.

Biografien



Timm Wilke, Jahrgang 1988, studierte gymnasiales Lehramt von 2007 – 2012 an den Universitäten Göttingen und Toulouse. Im Anschluss promovierte er in der Abteilung Fachdidaktik Chemie der Universität Göttingen mit Gastaufenthalten am Florida Institute of Technology und am IPN in Kiel. Seit November 2016 ist er Juniorprofessor für Chemiedidaktik am Agnes-Pockels-SchülerInnenlabor der Technischen Universität Braunschweig und befasst sich insbesondere mit der fachdidaktischen Rekonstruktion aktueller Forschungsthemen sowie der Entwicklung von digital gestützten Lehr-Lern-Formaten für Schule und Schülerlabor. Parallel unterrichtet er an einem Braunschweiger Gymnasium.

*Korrespondenzanschrift: Jun.-Prof. Dr. Timm Wilke, Technische Universität Braunschweig, Institut für Ökologische und Nachhaltige Chemie, Hagenring 30, D-38106 Braunschweig.

E-Mail: t.wilke@tu-braunschweig.de



Oliver Bodensiek, Jahrgang 1985, studierte Physik an der Georg-August-Universität Göttingen und promovierte dort in der theoretischen Festkörperphysik mit mehreren Gastaufenthalten am Institut Jozef Stefan Ljubljana. Nach einer Industrietätigkeit kam er zunächst als Post-Doc in die Abteilung Physik und Physikdidaktik des Instituts für Fachdidaktik der Naturwissenschaften der Technischen Universität Braunschweig. Im September 2016 wurde er dort zum Juniorprofessor für Didaktik der Physik und Lehrerbildung berufen und befasst sich unter anderem mit der fachdidaktischen Rekonstruktion von aktuellen Themen aus der Nano- und Quantentechnologie.

Email: o.bodensiek@tu-braunschweig.de



Klaus Ruppertsberg, Jahrgang 1959, hat sein Studium der Chemie und Biologie an der Albertus Magnus-Universität Köln 1986 mit dem 1. Staatsexamen abgeschlossen. Nach dem 2. Staatsexamen in Bensheim an der Bergstraße war er über 20 Jahre Lehrer an verschiedenen Schulformen, zuletzt als Fachbereichsleiter Chemie an der Domschule in Schleswig. Seit August 2014 ist er an das Leibniz-Institut für die Pädagogik der Naturwissenschaften und Mathematik (Abt. Chemiedidaktik – Prof. Dr. Ilka Parchmann) in Kiel abgeordnet.

E-Mail: ruppertsberg@ipn.uni-kiel.de

Arbeitsblätter

Arbeitsblatt 1: Festigung des Wissens und Vorbereitung für Arbeitsblatt 2

Name, Vorname: _____ Klasse: _____

Lese den Artikel „Vom Reststoff zum Rohstoff - Modellexperimente zur Synthese von Nanopartikeln mit recyceltem Gold aus Elektronik-Schrott“ sorgfältig durch und beantworte dann folgende Fragen durch Erklären und Erläutern:

1. Was ist gediegenes Gold?
2. In welchen Hochkulturen wurde bereits vor mehreren Tausend Jahren Gold verarbeitet?
3. In welchen alltäglichen Gegenständen ist Gold enthalten?
4. Welche besondere Initiative gibt es anlässlich der Olympischen Spiele in Japan und warum ist dies beachtenswert?
5. Warum sollte man für das Modellexperiment zum Goldrecycling die goldhaltigen Kontakte mit einer Zange oder einem Seitenschneider herausarbeiten?
6. Warum muss im Modellexperiment zuerst das Kupfer von der Platine gelöst werden?
7. Woraus besteht Königswasser und warum muss besonders vorsichtig damit gearbeitet werden?
8. Was sind Nanopartikel und wozu können Goldnanopartikel eingesetzt werden?
9. Was versteht man unter der Mie-Streuung und welchen Effekt erzeugt sie?
10. Was ist ein Laser und auf welche Gefahren ist zu achten?
11. Warum muss man die Farbigekeit von Goldnanopartikeln – anders als bei Farbstoffmolekülen – mit Hilfe der Plasmonenresonanz erklären?
12. Wie kann man die Größe von Goldnanopartikeln bestimmen?
13. Unter welchen Umständen findet die Gewinnung von Gold durch Bergbau statt?
14. Was ist Knallgold und warum sollte man sowohl die absichtliche als auch die versehentliche Entstehung von Knallgold vermeiden?
15. Welcher berühmte Forscher erlitt eine Verletzung durch eine Knallgoldexplosion und wie vermeidet man die Entstehung von Knallgold?

Wenn du fertig bist, vergleiche deine Antworten mit den Musterlösungen (bei deiner Lehrkraft erhältlich)

Musterlösungen zu Arbeitsblatt 1

Hinweis: Eine Musterlösung ist nur ein Beispiel für eine richtige Lösung; eine abweichende Lösung muss nicht unbedingt falsch sein.

1. Was ist gediegenes Gold: Gold, das in Reinform in teilweise sehr ästhetischen Formen in der Natur oder beim Schürfen gefunden wird.
2. In welchen Hochkulturen wurde bereits vor mehreren Tausend Jahren Gold verarbeitet: Ägypten, Griechenland, ...
3. In welchen alltäglichen Gegenständen ist Gold enthalten: Elektronik, z.B. Smartphones, Computer, ... auch Zahngold, Uhren, Münzen, Schmuck, ...
4. Welche besondere Initiative gibt es anlässlich der Olympischen Spiele in Japan und warum ist dies beachtenswert: Gold- und Silbermedaillen sollen aus gespendeten Smartphones hergestellt werden.
5. Warum sollte man für das Modellexperiment zum Goldrecycling die goldhaltigen Kontakte mit einer Zange oder einem Seitenschneider herausarbeiten: Damit das Experiment nicht durch viele weitere Metalle, die ebenfalls vorhanden sind, gestört wird.
6. Warum muss im Modellexperiment zuerst das Kupfer von der Platine gelöst werden: Weil das Hauchgold auf einer Kupferunterlage sitzt. Durch das Lösen des Kupfers wird das Gold von der Unterlage befreit.
7. Woraus besteht Königswasser und warum muss besonders vorsichtig damit gearbeitet werden: Aus drei Teilen Salzsäure (37%) und einem Teil Salpetersäure (65%), beide sind Gefahrstoffe.
8. Was sind Nanopartikel und wozu können Goldnanopartikel eingesetzt werden: Nanopartikel haben eine Größe von 1- 100 Nanometer. Sie können z.B. für medizinische Zwecke eingesetzt werden.
9. Was versteht man unter einer Mie-Streuung und welchen Effekt erzeugt sie: Die Mie-Streuung ist elastische Streuung elektromagnetischer Wellen an spärlichen Objekten, deren Durchmesser ungefähr der Wellenlänge der Strahlung entspricht. Sie erzeugt den Tyndall-Effekt.
10. Was ist ein Laser und auf welche Gefahren ist zu achten: Unter Laser versteht man einen einfarbigen scharf gebündelten Lichtstrahl mit großer Intensität. Es kann die Augen schädigen, daher gelten für die Arbeit mit Lasern besondere Schutzbestimmungen.
11. Warum muss man die Farbigkeit von Goldnanopartikeln –anders als bei Farbstoffmolekülen- mit Hilfe der Plasmonenresonanz erklären: Während bei Farbstoffmolekülen die Valenzelektronen bestimmte Wellenlängen des sichtbaren Lichts absorbieren und dadurch zum Erscheinen einer Farbe führen, muss bei metallischen Nanopartikeln der Effekt der Plasmonenresonanz berücksichtigt werden. Durch diese Resonanz werden bestimmte Wellenlängen in Abhängigkeit von der Partikelgröße vollständig absorbiert.
12. Wie kann man die Größe von Goldnanopartikeln bestimmen: Die durchschnittliche Größe der beobachteten Nanopartikel kann mit Hilfe eines Absorptionsspektrums bestimmt werden.
13. Unter welchen Umständen findet die Gewinnung von Gold durch Bergbau statt: Schwierige Arbeitsbedingungen, große Tiefe, geothermale Hitze, Kohlenstoffdioxidemission, Quecksilberemission, Umweltschädigung durch toxischen Abraum.
14. Was ist Knallgold und warum sollte man seine Entstehung vermeiden: Knallgold ist eine Verbindung von Gold und Stickstoff; es explodiert unberechenbar.
15. Welcher berühmte Forscher erlitt eine Verletzung durch eine Knallgoldexplosion und wie vermeidet man die Entstehung von Knallgold: Jöns Jakob Berzelius erlitt 1809 eine schwere Verletzung der linken Hand und der Augen. Knallgold entsteht nur im alkalischen Bereich, daher müssen Goldabfälle im sauren Bereich gelagert werden.

Arbeitsblatt 2. Praktische Arbeit

Experiment 1: Gold und Goldsäure gewinnen

Geräte und Chemikalien

Abzug, Schutzbrille, Labormantel („Kittel“), Zange / Seitenschneider, Kunststoff-Pinzette, 2 alte Speicherkarten, 2 Schnappdeckelgläser, Salzsäure ($\omega = 33\%$, GHS05), Wasserstoffperoxid-Lösung ($\omega = 10\%$, GHS07), Eisenwolle (ggf. einmal kurz in Aceton baden, um die Phlegmatisierung zu entfernen), Filtriergestell, Trichter, Filterpapier, Feinwaage, Dauermagnet.

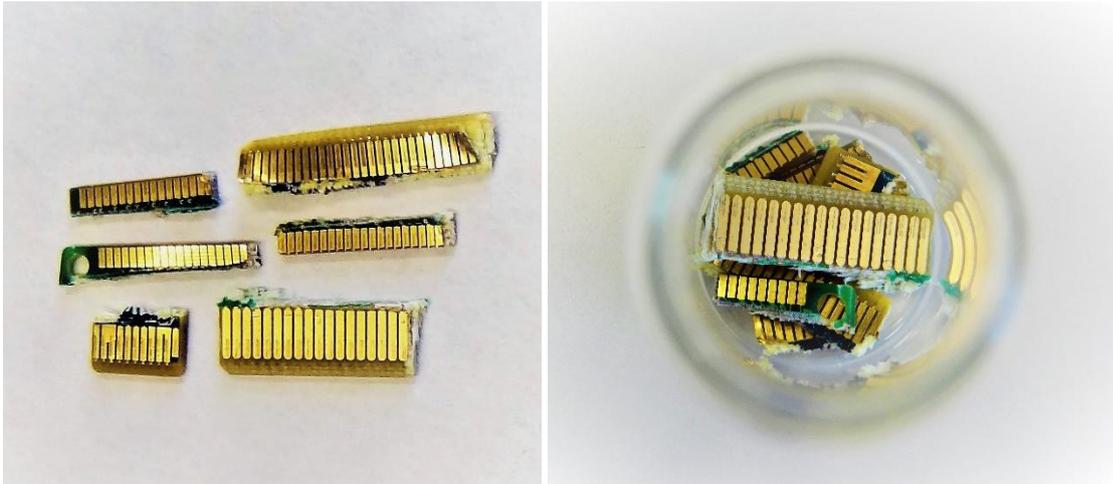


Abb. A1: Mit Seitenschneider/ Zange vorbereiteter Elektronikschrott (links) wird so zerkleinert, dass er in ein Rollrandgefäß passt (rechts).

Durchführung

A) Der Elektronikschrott (Abb. A1) wird gewogen und mit einem Seitenschneider so zerkleinert, dass er in ein Rollrandgefäß passt und darin nicht höher als bis zur Hälfte aufragt. Dann wird er je zur Hälfte mit 10%iger Wasserstoffperoxid-Lösung und 33%iger Salzsäure übergossen und über Nacht unter dem eingeschalteten Abzug stengelassen (Zettel mit Namen und Datum dazulegen). Dann werden mit der Kunststoff-Pinzette die Reste des Elektronikschrotts aus dem Becherglas entnommen (Entsorgung im Hausmüll) und die Flüssigkeit wird abfiltriert. Dabei bleibt das abgelöste Gold im Filter zurück (Abb. A2) und kann getrocknet und gewogen werden. Die kupferhaltige Lösung wird aufbewahrt und für Experiment 3 verwendet.



Abb. A2: Filtration der Suspension (links), kupferhaltiges Filtrat (Mitte) und gewaschener Rückstand im Filter (rechts).

B) Das Gold aus A) wird nun in das zweite Schnappdeckelglas gegeben und vorsichtig mit 15 Tropfen Salzsäure ($\omega = 33\%$) und mit 5 Tropfen Salpetersäure ($\omega = 65\%$) versetzt (Insgesamt sind es also 20 Tropfen Königswasser). Das Gefäß bleibt solange im Abzug stehen, bis das feste Gold zu Tetrachloridogold(III)-säure ("Goldsäure") umgesetzt wird. Anschließend wird es durch eine Filtration von letzten Verunreinigungen getrennt. Um nicht wesentliche Anteile der Ausbeute im Filter zu verlieren, sollte hier mit ausreichend demineralisiertem Wasser nachgespült werden. Anschließend wird durch vorsichtiges Eindampfen (und ggf. anschließender Trocknung im Exsikkator) das Volumen der Lösung reduziert und die Ausbeute bestimmt – typischerweise einige wenige Milligramm. Anschließend kann der Versuch zur Herstellung der Goldnanopartikel durchgeführt werden. Aus der abgebildeten Probe von 1,927 g Elektronik-Schrott wurden 8 mg Gold gewonnen, das entspricht ca. 0,04 mmol und ermöglicht die Herstellung von 20 mL der in Arbeitsblatt 2 benötigten Goldsäurelösung ($c = 2 \text{ mmol L}^{-1}$) zur Erstellung der Gold-Nanopartikel. Da bei diesem Experiment pro Durchlauf 5 mL Goldsäurelösung benötigt werden, entspricht die in diesem Beispiel erzeugte Menge exakt vier Durchläufen.

Experiment 2: Goldnanopartikel aus Tetrachloridogold(III)-säure und Natriumcitrat

Geräte, Chemikalien: Eine Heizplatte, ein 400 mL-Becherglas, das mit ca. 150 mL demin. Wasser gefüllt ist, vier Reagenzgläser, Messpipetten zum Abmessen der folgenden Lösungen, 5 mL Tetrachloridogold(III)-säure-Trihydrat-Lösung ($c = 0,002 \text{ mol L}^{-1}$), 14 mL Natriumcitrat-Lösung ($\omega = 0,04 \%$), einige Kochsalzkristalle (NaCl).

Durchführung: Erhitze das Wasser im Becherglas bis zum Sieden und schalte dann die Heizplatte ab. Befülle während des Aufheizens die Reagenzgläser 1 bis 4 gemäß Tabelle 1, stelle sie dann in das heiße Wasserbad und beobachte den Farbverlauf.

Halte die unterschiedlichen Farbstadien mit einer Smartphone-Kamera fest. Gib einige Körnchen Kochsalz zu Reagenzglas 3 und 4 und beobachte die Veränderung.

Tabelle 1:

Reagenzglas	Natriumcitrat-Lösung ($\omega = 0,04 \%$)	Tetrachloridogold(III)-säure-Lösung ($c = 0,002 \text{ mol L}^{-1}$)	Farbverlauf von ... bis...
1	5,0 mL	1,0 mL	
2	2,0 mL	1,5 mL	
3	5,0 mL	1,0 mL	Mit NaCl:
4	2,0 mL	1,5 mL	Mit NaCl:

Suche dann einen dunklen Raum auf und beleuchte die Lösungen mit einem Lichtstrahl (z.B. Laser (Schutzbestimmungen beachten!) oder Smartphone-Taschenlampe, letztere ggf. durch ein kleines Loch in schwarzer Pappe begrenzen, „Lochblende“). Interpretiere die Beobachtung unter Zuhilfenahme des Stichworts „Tyndall-Effekt“.



Abb. A3: Reagenzgläser mit Lösungen von Goldnanopartikeln unterschiedlicher Größe (Erläuterung siehe Text im zugehörigen Artikel)

Experiment 3: Zementierung von Kupfer

Geräte, Chemikalien: 3 kleine Bechergläser (50 mL), Plastik-Pinzette, Eisenwolle, Aceton, kupferhaltige Lösung aus Experiment 1, Dauermagnet, Salzsäure ($\omega = 33\%$).

Durchführung: Forme etwas Eisenwolle zu einem Ring und bade ihn ggf. kurz in Aceton, um die Phlegmatisierung zu lösen. Halte eine Kamera bereit und fotografiere die Eisenwolle in mehreren Stadien. Gib die kupferhaltige Lösung aus Experiment 1 in das zweite Becherglas und tauche den Ring aus Eisenwolle mit einer Plastik-Pinzette hinein. Sobald sich die Lösung entfärbt hat, sind keine Kupfer-Ionen mehr in der Lösung. Eventuell überschüssiges Eisen (mit einem Dauermagneten überprüfen) kann anschließend in einem dritten Becherglas mit 33%iger Salzsäure herausgelöst werden. Das zementierte Kupfer wird anschließend gewaschen, abfiltriert und getrocknet, bevor es zuletzt für die Ausbeutebestimmung gewogen werden kann.

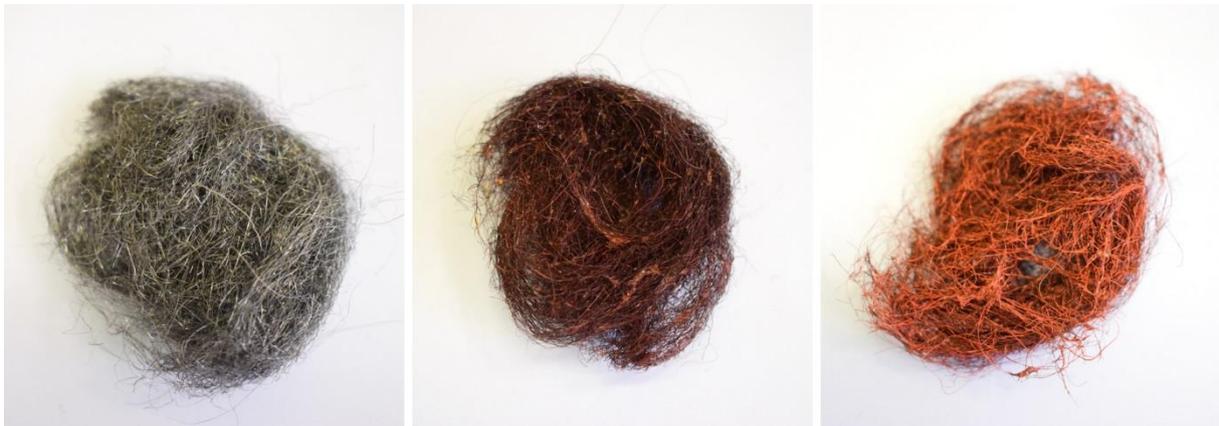


Abb. A4: Kupfer nach der Zementation mit entphlegmatisierter Eisenwolle (v.l.n.r.: 0 Sekunden, 5 Sek., 60 Sek.)