

## **Elektrischer Strom als Jalousie – „smart windows“ helfen Energie sparen**

C. Wagner und M. Oetken

Wie kann man mit elektrochromen Fensterscheiben Energie sparen? „Smart windows“ können zur Reduktion der Wärmeeinstrahlung als „elektrische“ Jalousie verwendet werden und gleichzeitig als Energiespeicher fungieren.

**Stichworte:** *Elektrochromie – Vanadiumpentoxid – Berliner Blau – Eisenhexacyanoferrate*

### **1 Einleitung**

Zur Realisierung der politisch beschlossenen Energiewende ist die Entwicklung neuer Technologien zur Energiegewinnung und –einsparung dringend erforderlich. Elektrochrome Fensterscheiben sind in diesem Bereich von großem Interesse. Sogenannte „smart windows“ werden bereits kommerziell eingesetzt, beispielsweise bei der Verglasung von Gebäuden. Diese „intelligenten Fensterscheiben“ können helfen Energie einzusparen: Indem die Energieeinstrahlung durch eine Farbänderung variabel angepasst wird (wodurch die Sonnen- und Wärmeeinstrahlung im Gebäude verringert wird), lässt sich mit einer elektrochromen Wärmeschutzverglasung der Gesamtenergiedurchlassgrad von 36% auf 12% senken. Die dadurch erzeugte Energieeinsparung für die Kühlsysteme eines Gebäudes liegt bei ca. 30 %. Dies zeigt eine interessante Perspektive der effizienten Nutzung von Energie [1].

Unter dem Phänomen der Elektrochromie versteht man die reversible Änderung der optischen Eigenschaften (Transmission, Reflexion) eines Materials, die durch das Anlegen einer Spannung und einem resultierenden elektrischen Strom bewirkt werden kann. Elektrochrome Materialien bieten durch die elektrisch regelbare Farbänderung vielfältige Anwendungsmöglichkeiten, beispielsweise selbstabblendbare Autorückspiegel, Fahrzeugverglasung, oder die schon oben erwähnten Gebäudeverglasungen. Außerdem zeichnen sich elektrochrome Fenster durch ihre hohe Zyklenstabilität und somit eine Haltbarkeit über viele Jahre aus. Dies ist eine Grundvoraussetzung, die elektrochrome Fenster in Bezug auf Energieeffizienz bei Gebäuden für die aktuelle Forschung interessant machen [1, 3].

Ein weiterer interessanter Aspekt der „smart windows“ ist deren Fähigkeit Energie speichern zu können. So könnten elektrochrome Fensterscheiben zusätzlich zu den Energieeinsparungen durch die elektrochrome Farbveränderung auch als wieder aufladbare Batterien angesehen und genutzt werden [2]. Die elektrochromen Schichten sind - ähnlich wie Lithium-Ionen-Akkumulatoren - Materialien, die kleine Ionen einlagern bzw. wieder auslagern können. An einem sonnigen Tag könnte Sonnenenergie in den elektrochromen Fensterscheiben als chemische Energie konserviert und abends mit sich aufhellenden Fensterscheiben wieder als elektrische Energie genutzt werden. Diesem interessanten Aspekt soll im Rahmen der vorliegenden Veröffentlichung experimentell nachgegangen werden. Die „smart windows“ weisen offenbar ein wirklich intelligentes Energiespeicherkonzept vor.

Elektrochrome Materialien können auf verschiedenen Stoffen (z.B. Gold, Platin, Aluminium) abgeschieden werden. Als Trägermaterial eignen sich, mit Blick auf die

Anwendungsmöglichkeit bei Fahrzeug- oder Gebäudeverglasung, vor allem transparente Grundstoffe. Eine weitere wichtige Eigenschaft, die das Trägermaterial vorweisen muss, ist eine ausreichende elektrische Leitfähigkeit. In den meisten kommerziellen Anwendungen werden sogenannte ITO- oder FTO-Gläser verwendet. Die Abkürzungen ITO und FTO leiten sich aus dem Englischen ab und stehen für „Indium Tin Oxide“ (Indiumzinnoxid) bzw. „Fluorine-doped Tin Oxide“ (Fluor dotiertes Zinnoxid) [4]. Es handelt sich hierbei um transparente, leitende Oxide [4]. Normales Fensterglas ist naturgemäß ein klassischer Nichtleiter. Beschichtet man das Fensterglas jedoch mit einer dünnen FTO (oder ITO)-Schicht, so bleibt das Glas transparent und die beschichtete Seite wird elektrisch leitend [1]. FTO wird auf Grund seiner guten thermischen Stabilität oft als bessere und kostengünstigere Alternative zu ITO genutzt. Außerdem sind die Resistenz gegenüber physikalischer Abnutzung, die chemische Stabilität, eine hohe optische Transparenz und eine bessere elektrische Leitfähigkeit weitere Vorteile von FTO-Gläsern [5].

Es existieren eine große Anzahl organischer (z.B. Polypyrrol oder Polyanilin) und anorganischer (z.B.  $\text{WO}_3$ ,  $\text{V}_2\text{O}_5$  und  $\text{TiO}_2$ , Hexacyanoferrate) elektrochromer Materialien. Sie alle verändern ihre Farbe durch Anlegen einer Spannung und der resultierenden Einlagerung bzw. Auslagerung von geeigneten Ionen. Man kennt heute viele verschiedene Varianten eine Elektrode mit den elektrochromen Materialien zu beschichten. Hierzu zählen verschiedene Sol-Gel-Verfahren, Aufdampfen, Tauchverfahren (dipping), Rotationsbeschichtung (spin coating), aber auch eine elektrochemische Abscheidung durch Oxidation oder Reduktion [3]. Eine ausführliche Darstellung der verschiedenen elektrochromen Materialien und Beschichtungsmethoden führt im Rahmen dieses Beitrags zu weit. Daher sei an dieser Stelle auf weiterführende Literatur mit einem guten Überblick über die Vielfalt der Materialien und Beschichtungsverfahren verwiesen [6-8]. In diesem Artikel wird als Verfahren zum Beschichten der Elektrode (FTO-Glas) die elektrolytische Abscheidung durch Oxidation oder Reduktion geeigneter anorganischer Ausgangsstoffe in wässrigen Elektrolyten ausgewählt und ausführlich erläutert.

## 2 Elektrochromes Verhalten von Berliner Blau

Das Berliner Blau-System ist durch seinen Farbwechsel von transparent zu intensivem blau ein sehr beeindruckendes elektrochromes System. Man unterscheidet zwischen sogenanntem „löslichem“  $\text{K}[\text{Fe}^{\text{III}}\text{Fe}^{\text{II}}(\text{CN})_6]$  und „unlöslichem“  $\text{Fe}^{\text{III}}_4[\text{Fe}^{\text{II}}(\text{CN})_6]_3$  Berliner Blau. Beide Verbindungen sind grundsätzlich schlecht in Wasser löslich, wobei das lösliche Berliner Blau kolloidal vorliegt. Wie man aus der stöchiometrischen Zusammensetzung bereits ableiten kann, scheidet sich „lösliches“ Berliner Blau eher bei einem Überschuss an Kaliumionen ab [10]. Die Strukturen von „löslichem“ und „unlöslichem“ Berliner Blau sind aber grundsätzlich gleich und lassen sich durch ein kubisch flächenzentriertes Gitter beschreiben. Dabei wechseln sich  $\text{Fe}^{2+}$ - und  $\text{Fe}^{3+}$ -Ionen ab, wobei  $\text{Fe}^{3+}$  oktaedrisch von Stickstoffatomen und  $\text{Fe}^{2+}$  von Kohlenstoffatomen der Cyanid-Liganden umgeben ist (siehe Abb. 1). Bei löslichem Berliner Blau nehmen die Kaliumionen die Plätze in den Oktaederlücken ein und dienen der Ladungskompensation des insgesamt neutralen Komplexes. Bei unlöslichem Berliner Blau hingegen nehmen weitere Eisen(III)-Ionen die Plätze der Kaliumionen ein [6, 11]. Die oktaedrischen Zwischengitterplätze bieten nicht nur die Möglichkeit Eisen- und Kaliumionen einzulagern, sondern beispielsweise auch Lithium- oder Natriumionen.

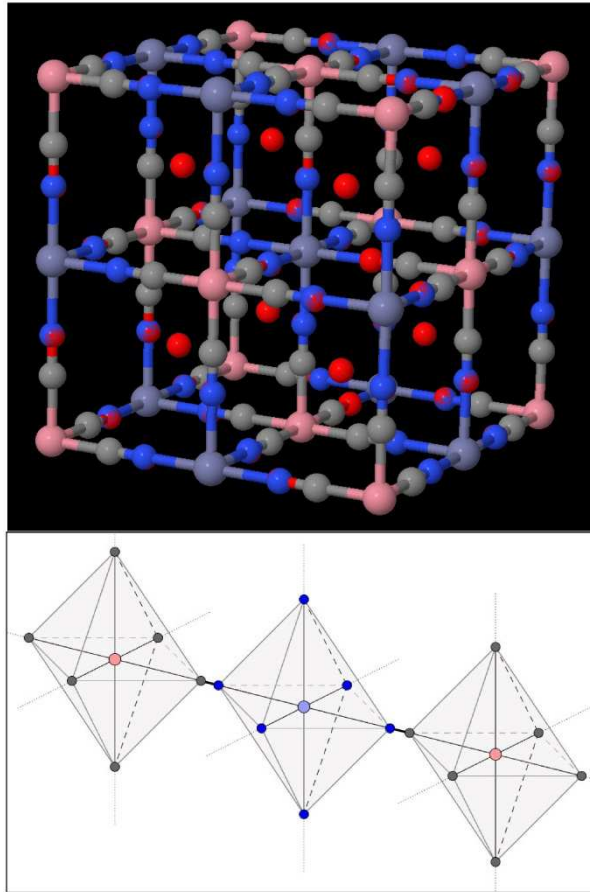


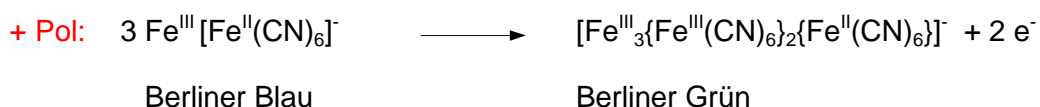
Abb. 1: oben: Elementarzelle der Berliner Blau Struktur; unten: Darstellung der oktaedrischen Koordination der Eisenionen; (graublau:  $\text{Fe}^{2+}$ , blau: C, grau: N, rosa:  $\text{Fe}^{3+}$ , rot:  $\text{K}^+$ )

Dünne Schichten von Berliner Blau in der Größenordnung von 20 – 100 nm werden häufig durch elektrochemische Reduktion aus einer  $\text{Fe(III)}$ -Ionen-Lösung und einer Hexacyanoferrat(III)-Lösung gewonnen. Beim Zusammengeben dieser beiden wässrigen Lösungen entsteht ein brauner löslicher Komplex, der Eisentricyanid-Komplex  $\text{Fe}^{\text{III}}[\text{Fe}^{\text{III}}(\text{CN})_6]$ , Preußisch oder Berliner Braun). Die kathodische Elektrodenreaktion zur elektrochemischen Abscheidung von Berliner Blau kann wie folgt formuliert werden [6, 7]:



Als Ladungsausgleich werden Kationen (z.B.  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Li}^+$ ) in das Berliner Blau-Gitter eingelagert [6].

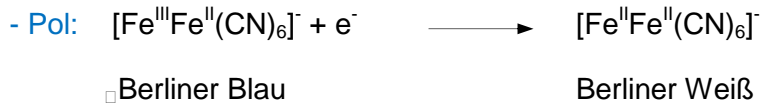
Das abgeschiedene Berliner Blau kann nun elektrochemisch oxidiert und reduziert werden. Bei einer partiellen Oxidation von Berliner Blau ergibt sich Berliner Grün (Preußisch oder Berliner Grün) [6].



Die vollständig oxidierte Form von Berliner Blau hat eine gelb-braune Farbe und wird durch anodische Oxidation von Berliner Blau erreicht [7].



Durch eine kathodische Reduktion von Berliner Blau entsteht Berliner Weiß (Everitts-Salz), welches als dünne Schicht farblos transparent erscheint [6].



Bei allen hier aufgeführten Redoxreaktionen werden für die Elektroneutralität Kationen ein- bzw. ausgelagert. Diese wurden zur Vereinfachung der Reaktionsgleichungen hier jedoch weggelassen.

Die Reduktion von Berliner Blau zu Berliner Weiß verläuft bei kathodischer Belastung innerhalb weniger Sekunden vergleichsweise zügig. Dagegen erfolgt der Übergang von Berliner Blau zum vollständig oxidierten Berliner Braun wesentlich langsamer und häufig auch inhomogener. Es zeigen sich verschiedene gemischtvalente Zusammensetzungen, wie z.B. Berliner Grün als partiell oxidierte Verbindung [7]. Die Oxidation von Berliner Blau über Berliner Grün zu Berliner Braun wurde daher für Anwendungszwecke nicht weiter erforscht [9].

In der fachdidaktischen Forschung sind bereits erste Experimente über das elektrochrome Verhalten von Berliner Blau in wässrigen Lösungen auf einer Eisenelektrode beschrieben worden. Die vorgeschlagene experimentelle Anordnung ist grundsätzlich sehr interessant, eignet sich aber aus nachvollziehbaren Gründen nicht für die in diesem Beitrag in den Blick genommene Anwendung eines energieeinsparenden elektrochromen Fensters [12].

### 3 Elektrochromes Verhalten von Vanadiumoxid

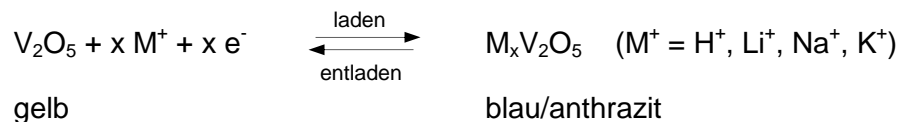
Ein weiteres anorganisches elektrochromes Material ist Vanadiumpentoxid. Es handelt sich um ein elektrochromes Übergangsmetalloxid und ist in der Lage von einem „farblosen“ oxidierten Zustand in eine intensiv „farbige“, reduzierte Form zu wechseln [3]. Vanadiumpentoxid-Dünnschichten können, wie Berliner Blau, beispielsweise durch elektrolytische Abscheidung auf verschiedensten Elektrodenmaterialien (z.B. Aluminiumfolie [13], ITO, FTO) erhalten werden [13]. Umfangreiche Untersuchungen haben gezeigt, dass man Vanadium(V)-oxid ( $\text{V}_2\text{O}_5$ ) elektrochemisch aus einer Elektrolytlösung, bestehend aus Vanadylsulfat ( $\text{VO}\text{SO}_4$ ) und einem 1:1 Gemisch aus absolutem Ethanol und Wasser als Lösungsmittel abscheiden kann [14].

Man erhält Vanadiumpentoxid durch eine anodische Abscheidung aus einer  $\text{VO}^{2+}$ -Lösung ( $\text{VO}\text{SO}_4$ ), wobei das Vanadium ausgehend von der Oxidationsstufe +IV zu Vanadium(V) oxidiert wird.

Die Elektrodenreaktionen können folgendermaßen formuliert werden [15]:



Die zugrunde liegende Elektrodenreaktion bei der elektrochromen Umfärbung kann allgemein wie folgt beschrieben werden [3]:



Es ist ein Anliegen der Autoren, dass dieses fachwissenschaftlich aktuelle und zukunftsweisende Thema der Electrochromie nun auch Einzug in die Schule findet, da eine nachhaltige und effiziente Energieversorgung sowie neue Technologien zu Energieeinsparungen grundlegend für eine baldige Energiewende sind.

Deshalb stellte sich den Autoren die Frage, ob es mit schulischen Mitteln möglich ist, elektrochrome Materialien (z.B. Berliner Blau, Vanadiumpentoxid) auf einem FTO-Glas als dünne, transparente Schicht elektrochemisch abzuscheiden und davon ausgehend eine elektrochrome Antwort des Materials in einem geeigneten Elektrolytssystem zu erhalten. Zudem sollte eine möglichst „unsichtbare“ Gegenelektrode für ein elektrochromes FTO-Glas gefunden werden, welche es zulässt, das beschichtete FTO-Glas auch als Fensterscheibe zu nutzen. Eine weitere interessante Frage ist, ob dieses System auch als Akkumulator dienen kann, indem die gespeicherte chemische Energie in den elektrochromen Schichten zum betreiben eines Verbrauchers genutzt werden kann.

#### 4 Experimente zum Themenfeld Berliner Blau

Zunächst ist es nötig das FTO-Glas mit einem dünnen Berliner Blau-Film in einem guten Verhältnis von Filmdicke und Farbintensität zu beschichten. Dies wird im folgenden Experiment durch eine elektrolytische Abscheidung realisiert.

##### Versuch 1: Elektrolytische Abscheidung von Berliner Blau auf einem FTO-Glas

*Geräte und Chemikalien:* Kunststoffgefäß (Tic-Tac® Dose 8 cm x 4,5 cm x 2 cm), Bodenplatte aus Kunststoff (optional), Voltmeter, Amperemeter, Verbindungskabel, Netzgerät, Krokodilklemmen, 2 Messkolben 100 mL, Graphitfolie Keratherm® 4 cm x 8 cm (Bezugsquelle: www.conrad.de), FTO-Glas (4 cm x 8 cm), Magnetrührer, Eisen(III)-sulfat ( $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ ) ( $X_n$ , gesundheitsschädlich), Kaliumhexacyanoferrat(III) ( $\text{K}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6]$ ), destilliertes Wasser, Aceton (F, leichtentzündlich;  $X_i$ , reizend).

*Herstellung der Elektrolytlösungen: Lösung A:* Es wird eine 0,1 molare, wässrige Eisen(III)-sulfat-Lösung hergestellt (ca. 4,0 g  $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$  auf 100 mL Wasser).

*Lösung B:* Außerdem wird eine 0,1 molare, wässrige Kaliumhexacyanoferrat(III)-Lösung aus rotem Blutlaugensalz hergestellt (ca. 3,3 g  $\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$  auf 100 mL Wasser).

*Durchführung:* Es wird ein 1:1 Gemisch aus 20 mL der Lösung A und 20 mL der Lösung B im Kunststoffgefäß hergestellt. Anschließend wird der Elektrolyt durch Rühren mit einem Glasstab vermischt.

Die beiden Elektroden (Graphitfolie und FTO-Glas) werden im Vorfeld sorgfältig mit Aceton gereinigt. Anschließend wird die leitfähige Seite des FTO-Glases mit einem Multimeter ermittelt und der Versuch wird wie in Abb. 2 dargestellt, aufgebaut. Die Graphitfolie wird als **+ Pol**, das FTO-Glas als **- Pol** geschaltet. Es ist darauf zu achten, dass die leitfähige Seite des FTO-Glases der Graphitfolie zugewandt ist. Die Elektroden werden am oberen Rand des Gefäßes mit je einer Krokodilklemme fixiert. Nun wird eine Spannung von ca. 0,3 V angelegt und unterschiedlich lange (30 s, 60 s, 3 min, 10 min) elektrolysiert. Unter den hier

beschriebenen Versuchsbedingungen fließt zu Beginn des Abscheidungsprozesses ein Strom von etwa 4 mA, der nach 60 s auf etwa 2 mA absinkt. Bei jeder Elektrolyse muss jeweils ein neues FTO-Glas und eine neue Graphitfolie verwendet werden. Der Elektrolyt kann mehrmals genutzt werden.

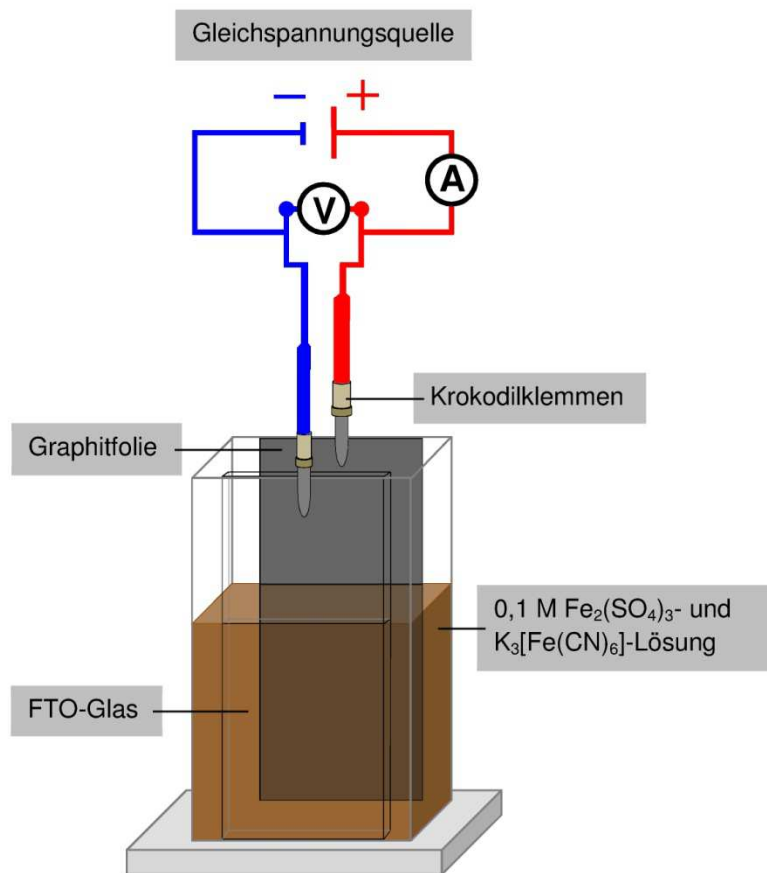


Abb. 2: Versuchsaufbau elektrolytische Abscheidung von Berliner Blau

Nach jeder Elektrolyse wird das FTO-Glas aus dem Elektrolyten entnommen und kurz in ein Wasserbad getaucht. Danach wird es zum Trocknen auf ein saugfähiges Tuch gestellt und für etwa zwei Minuten mit einem Föhn getrocknet.

*Beobachtung und Auswertung:* Beim Zusammengeben der beiden Elektrolytlösungen entsteht das Eisentricyanid mit einer intensiv braunen Farbe. Das transparente FTO-Glas ist nach dem elektrolytischen Abscheidungsprozess gleichmäßig mit einer blauen Schicht von Berliner Blau überzogen. Je länger elektrolysiert wurde, desto intensiver ist die blaue Farbe (siehe Abb. 3). Nach einer Elektrolysezeit von zehn Minuten ist das FTO-Glas fast nicht mehr transparent. Als optimale Elektrolysezeit stellten sich 60 Sekunden heraus. Hier ist die Farbintensität hoch und trotzdem noch transparent genug. Scheidet man das Berliner Blau zu lange ab, zeigt sich zwar eine deutlichere Blaufärbung, jedoch ist nach unseren Erfahrungen in der Regel keine vollständige Rückfärbung zu Berliner Weiß mehr möglich (siehe Versuch 2).

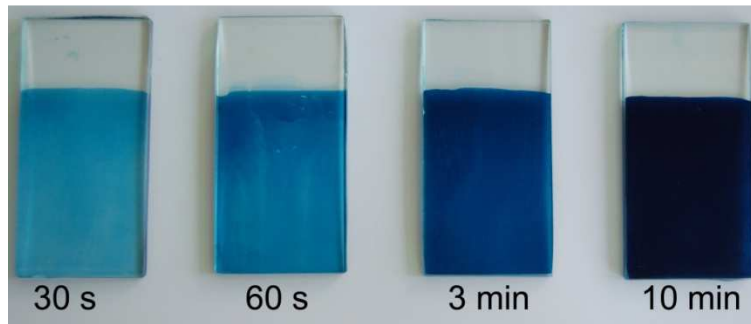
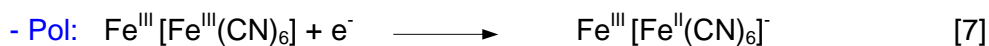


Abb. 3: Verschieden intensive Blaufärbungen von elektrochemisch abgeschiedenem Berliner Blau

Berliner Blau wurde hier kathodisch abgeschieden. Am Minuspol werden Elektronen in die Elektrode hinein „gepumpt“ und entsprechend werden  $\text{Fe}^{3+}$ - zu  $\text{Fe}^{2+}$ -Ionen reduziert. Dabei entsteht auf der Oberfläche des FTO-Glases unlösliches Berliner Blau. Die ablaufende Elektrodenreaktion am Minuspol kann wie folgt formuliert werden:



Am Pluspol kommt es bei der geringen Elektrolysespannung vermutlich nicht zu einer anodischen Sauerstoffentwicklung, sondern es findet eine Adsorption von Anionen statt (kapazitive Effekte).

Im nächsten Experiment wird die faszinierende elektrochrome Umfärbung von Berliner Blau zu Berliner Weiß gezeigt und eindrucksvoll bewiesen, dass dieser Prozess in hohem Maße reversibel ist.

### **Versuch 2: Elektrochrome Umfärbung einer mit Berliner Blau beschichteten Fensterscheibe mit Graphitfolie-Streifen als Gegenelektrode (Berliner Blau-Akkumulator)**

*Geräte und Chemikalien:* Kunststoffgefäß (Tic-Tac® Dose 8 cm x 4,5 cm x 2cm), Bodenplatte aus Kunststoff (optional), Voltmeter, Amperemeter, Verbindungskabel, Netzgerät, Solarmodul (5-zelliges Photovoltaikmodul, Bezugsquelle: Heliocentris), Lampe, Krokodilklemmen, Magnetrührer, Graphitfolie (4 cm x 8 cm), Filterpapier, beschichtetes FTO-Glas (aus Versuch 1), Messkolben 100 mL, Lithiumperchlorat (O, brandfördernd;  $X_n$ , gesundheitsschädlich), Dimethylcarbonat (DMC) (F, leichtentzündlich).

*Herstellung der Elektrolytlösung:* Es wird eine 1 molare Elektrolytlösung hergestellt. Dazu wird in einen Messkolben ein Rührfisch und 10,6 g Lithiumperchlorat gegeben und mit DMC auf 100 mL (bis zum Eichstrich) aufgefüllt. Anschließend wird mit einem Magnetrührer ca. 15 Minuten gerührt, bis sich das Leitsalz vollständig gelöst hat. Nun wird der Rührfisch aus dem Messkolben entfernt und die Differenz zwischen Elektrolythöhe und Eichstrich mit DMC aufgefüllt.

*Durchführung:* Es werden 40 mL der Elektrolytlösung in das Kunststoffgefäß gegeben. Der Versuch wird wie in Abb. 4 dargestellt, aufgebaut. Die Graphitfolie wird im Vorfeld mit Aceton abgerieben und als **+ Pol** geschaltet.

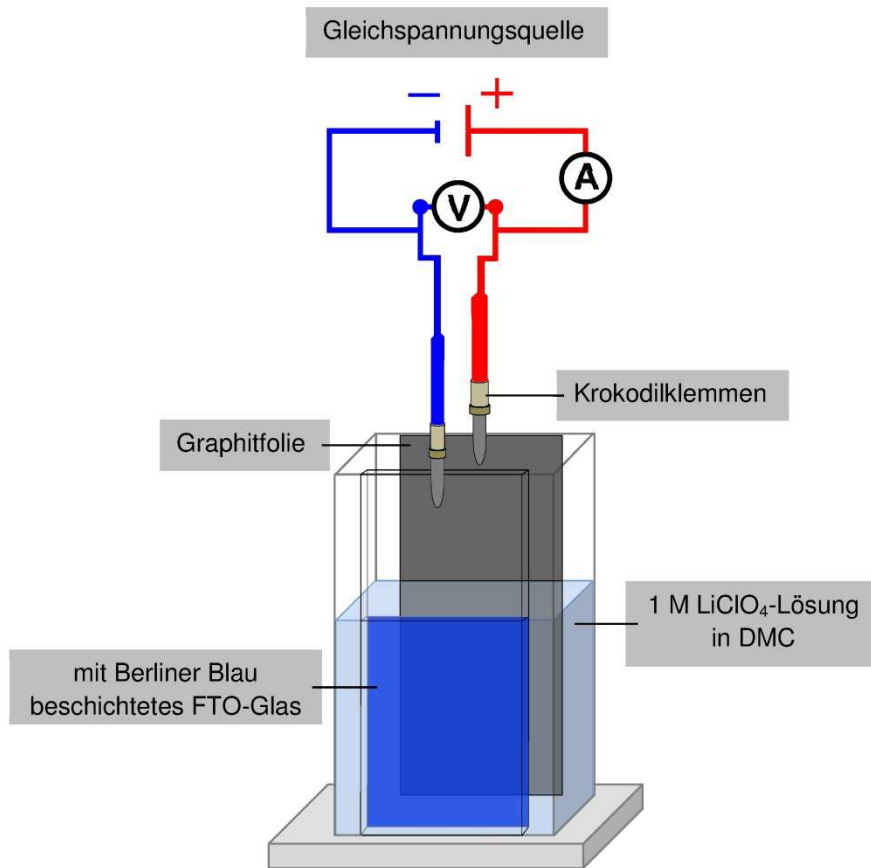


Abb.4: Versuchsaufbau der elektrochromen Umfärbung von Berliner Blau mit Graphitfolie

Das blaue FTO-Glas (aus dem Versuch 1: 0,3 V/60s) wird als **- Pol** geschaltet. Die mit Berliner Blau beschichtete Seite des FTO-Glases steht der Graphitfolie direkt gegenüber. Die beiden Elektroden werden am oberen Rand mit Krokodilklemmen fixiert und stehen auf dem Boden des Kunststoffgefäßes. Um die Umfärbung besser beobachten zu können kann ein doppelt gefaltetes Filterpapier der Größe 4,2 cm x 8 cm zwischen die beiden Elektroden platziert werden.

Nun wird das beschichtete FTO-Glas bei ca. 2 V entweder mit einer Spannungsquelle oder mit einem Solarmodul und Lampe (Aufbau siehe Abb. 5) entfärbt. Der Vorgang ist beendet, wenn sich das FTO-Glas von blau nach weiß entfärbt hat oder die Stromstärke etwa auf 1-2 mA gesunken ist. Anschließend wird umgepolt, und wiederum eine Spannung von ca. 2 V angelegt. Der Färbe-/Entfärbe- Prozess kann beliebig oft wiederholt werden.

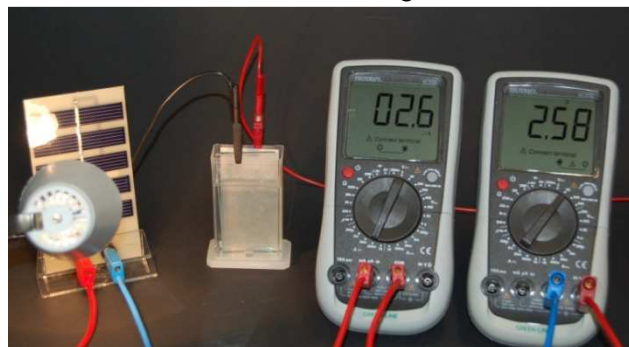


Abb.5: Versuchsaufbau Berliner Blau-Akkumulator mit Graphitfolie und Solarmodul

*Beobachtung und Auswertung:* Das als **- Pol** geschaltete und mit Berliner Blau beschichtete FTO-Glas entfärbt sich beim Anlegen einer Spannung von ca. 2 V mit fortschreiten des



Ladevorgangs innerhalb kurzer Zeit und wird transparent. Wird nach Beendigung des Ladevorgangs umgepolt, so zeigt sich nach kurzer Zeit wieder die charakteristische Blaufärbung des FTO-Glases durch Berliner Blau (siehe Abb. 6).

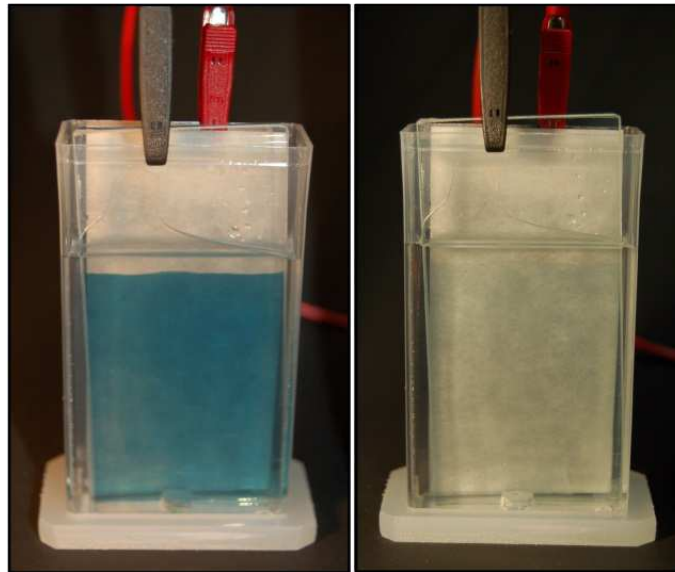
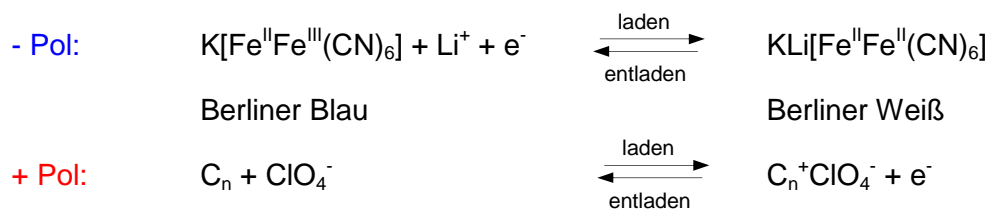


Abb. 6: links: blaues  $\text{KFe}^{\text{II}}[\text{Fe}^{\text{III}}(\text{CN})_6]$ , rechts: weißes  $\text{KLiFe}^{\text{II}}[\text{Fe}^{\text{II}}(\text{CN})_6]$

Beim Entfärbeprozess wird am Minuspol die in Berliner Blau vorhandenen  $\text{Fe}^{3+}$ -Ionen zu  $\text{Fe}^{2+}$ -Ionen reduziert. Gleichzeitig werden zum Ladungsausgleich Lithium-Ionen in die Hexacyanoferrat-Struktur eingelagert. Am Pluspol werden Perchlorat-Ionen in die Graphitfolie intercaliert bzw. adsorbiert (siehe Abb. 7 und 8). Die Elektrodenreaktionen können wie folgt formuliert werden:



Wahrscheinlich findet am Pluspol auf Grund des zu niedrigen Potentials keine Intercalation von Perchlorat-Ionen statt, sondern eine Adsorption dieser an die positive Graphitoberfläche.

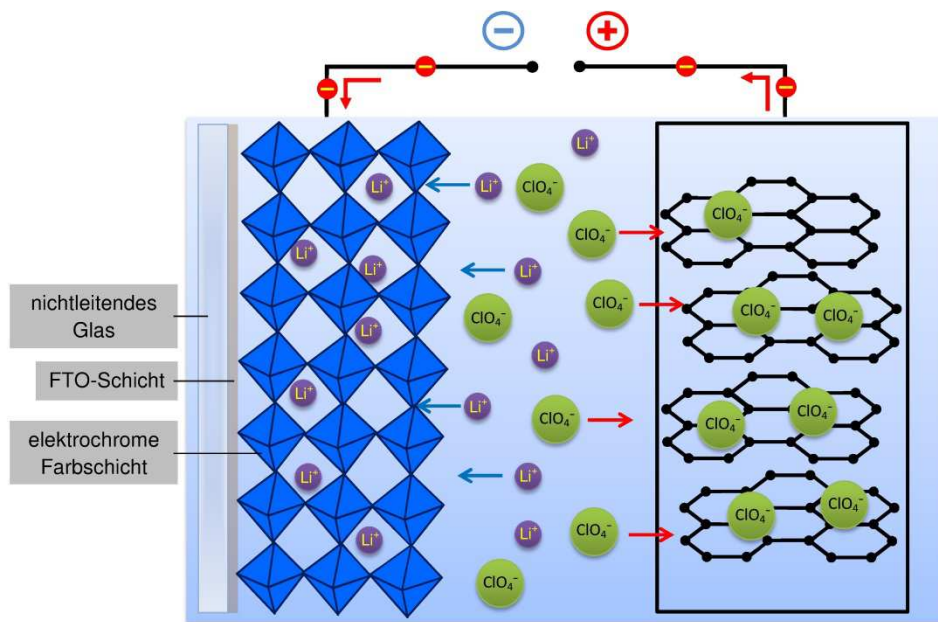


Abb.7: Entfärbeprozess (Ladevorgang) eines Berliner Blau-„smart-windows“;  
links: Berliner Blau-Anode; rechts: Graphitkathode

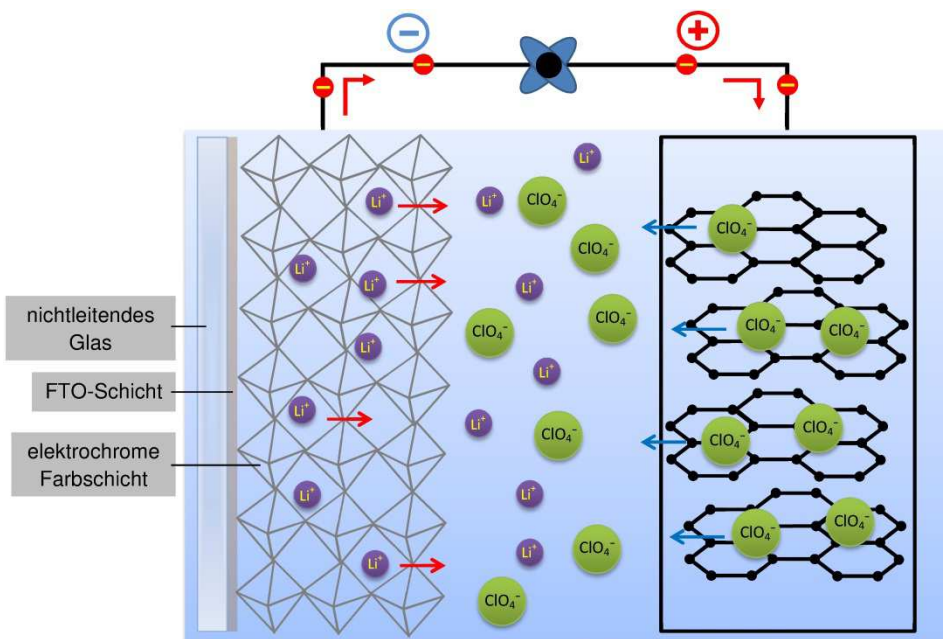


Abb.8: Färbeprozess (Entladevorgang) eines Berliner Blau-„smart-windows“;  
links: Berliner Weiß-Anode; rechts: Graphitkathode

Es zeigt sich hier ein beeindruckendes Farbenspiel zwischen einer farblosen und einer blauen Scheibe. Je nach Tageszeit und Sonneneinstrahlung kann so also die Fensterscheibe abgedunkelt (Blau) und bei Bedarf wieder aufgehellt werden. Dieser Vorgang kann durch ein Solarmodul und somit mit regenerativ gewonnener Energie realisiert werden.

In Versuch 2 ist das Hindurchschauen, das bei einem Fensterglas erwünscht wäre, wegen der undurchsichtigen Gegenelektrode (Graphitfolie) noch nicht gegeben. Dies soll in Versuch 3 (und 5) durch alternative Gegenelektroden realisiert werden. Außerdem soll in Versuch 3 die in den Fensterscheiben gespeicherte Energie nutzbar gemacht werden und neben dem Berliner Weiß-/Berliner Blau-System eine partielle Oxidation zum Berliner Grün und die vollständig oxidierte Form, Berliner Braun gezeigt werden.

### Versuch 3: Die drei Oxidationsstufen des Berliner Blau-Systems mit Graphitfolie-Streifen als Gegenelektrode

*Geräte und Chemikalien:* Siehe Versuch 2, Zusätzlich einen Elektromotor (Glockenanker Wundermotor LE 2201 mit Luftschraube, Anlaufspannung: 0,08 V, Spannungsbereich: 0,08 V-20 V). Anstelle der Graphitfolie 4 cm x 8 cm werden zwei Graphitfolie-Streifen der Größe 1cm x 8 cm verwendet.

*Durchführung: Teil A:* Die beiden Graphitfolie-Streifen werden an den schmalen Seiten des Kunststoffgefäßes mit je einer Krokodilklemme fixiert und parallel zueinander als **+ Pol** geschaltet (siehe Abb. 9). Das blau beschichtete FTO-Glas wird als **- Pol** geschaltet. Dabei ist darauf zu achten, dass sich die Graphitfolie-Streifen und das FTO-Glas nicht berühren. Nun kann der Ladevorgang durchgeführt werden. Es wird bei 2 V so lange geladen, bis das Berliner Blau auf dem FTO-Glas vollständig entfärbt, bzw. die Stromstärke etwa auf 1-2 mA gesunken ist. Dann wird der Elektromotor mit Luftschraube zwischen geschaltet und der Entladevorgang eingeleitet.

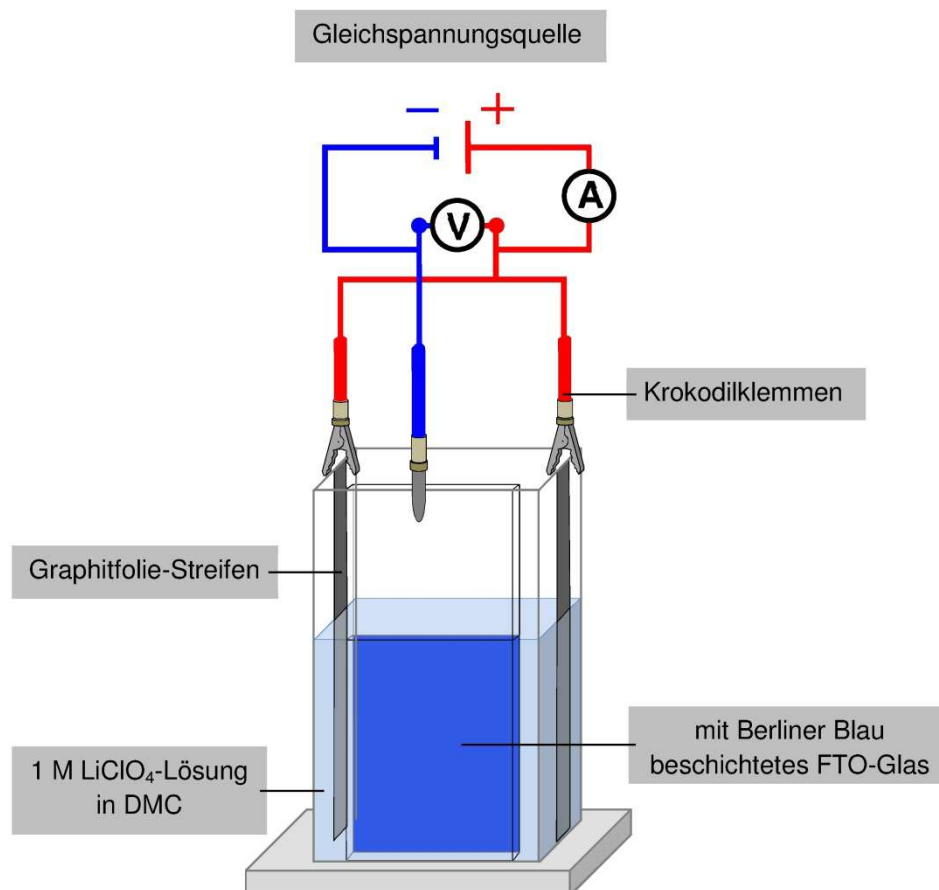


Abb. 9: Versuchsaufbau Berliner Blau-Akkumulator mit Graphitfolie-Streifen

*Teil B:* Um die verschiedenen Oxidationsstufen des Berliner Blau-Systems zu realisieren, beginnt man am besten mit Berliner Weiß, der vollständig reduzierten Form ( $\text{Fe}^{\text{II}}[\text{Fe}^{\text{II}}(\text{CN})_6]^{2-}$ ). Das mit Berliner Weiß beschichtete FTO-Glas wird als **+ Pol** geschaltet, die Graphitfolie-Streifen als **- Pol**. Es wird eine Spannung von ca. 2 V angelegt, bis Berliner Weiß zu Berliner Blau oxidiert wurde. Dann wird die Spannung für ca. 10-15 Minuten auf etwa 4 V erhöht, bis sich das FTO-Glas von blau über grün bis zu gelb-braun gefärbt hat. Anschließend wird die

Spannung auf etwa 2 V zurückgeregelt und umgepolt. Die Graphitfolie-Streifen werden als + Pol und das gelb-braune FTO-Glas als – Pol geschaltet.

*Beobachtung und Auswertung: Teil A:* Schaltet man nach dem Ladevorgang und der damit verbundenen Entfärbung des FTO-Glases einen Elektromotor zwischen, so kann die in der Fensterscheibe gespeicherte Energie nutzbar gemacht werden (siehe Abb 10).

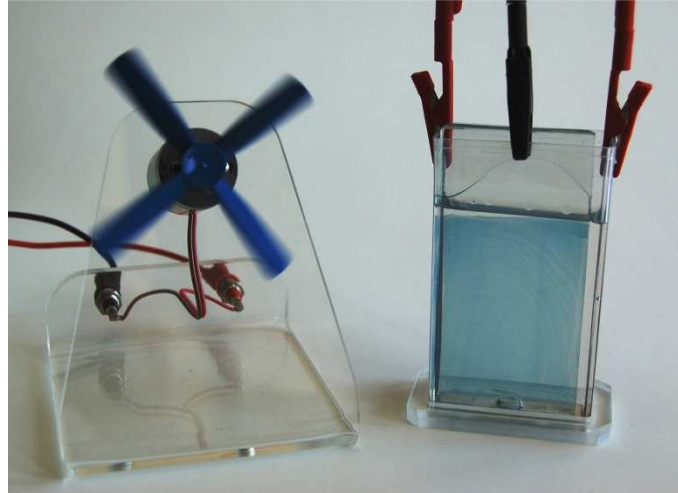


Abb.10: Entladevorgang des mit Berliner Blau beschichteten FTO-Glases mit einem Elektromotor

Während der Laufzeit des Elektromotors ist die bemerkenswerte Rückfärbung von farblos zu einer blau gefärbten Scheibe immer deutlicher erkennbar. Anhand der Farbe der Glasscheibe ist so der Lade- bzw. Entladezustand des Akkumulators sichtbar. Genauere Einblicke liefert natürlich ein Stromstärke-Zeit-Diagramm des entsprechenden Lade-/Entladevorganges (siehe Abb. 11). Zu Beginn des Ladevorgangs liegt die Stromstärke für kurze Zeit bei Werten bis zu 40 mA, fällt dann aber mit zunehmender Entfärbung nach ca. 30 s auf Werte von unter 1 mA ab.

Beim Entladevorgang mit dem Elektromotor ist eine sehr gleichbleibende Stromstärkekurve sichtbar. Ist die Laufzeit des Verbrauchers beendet, so sinkt auch hier die Stromstärke-Kurve auf nahezu 0 mA.

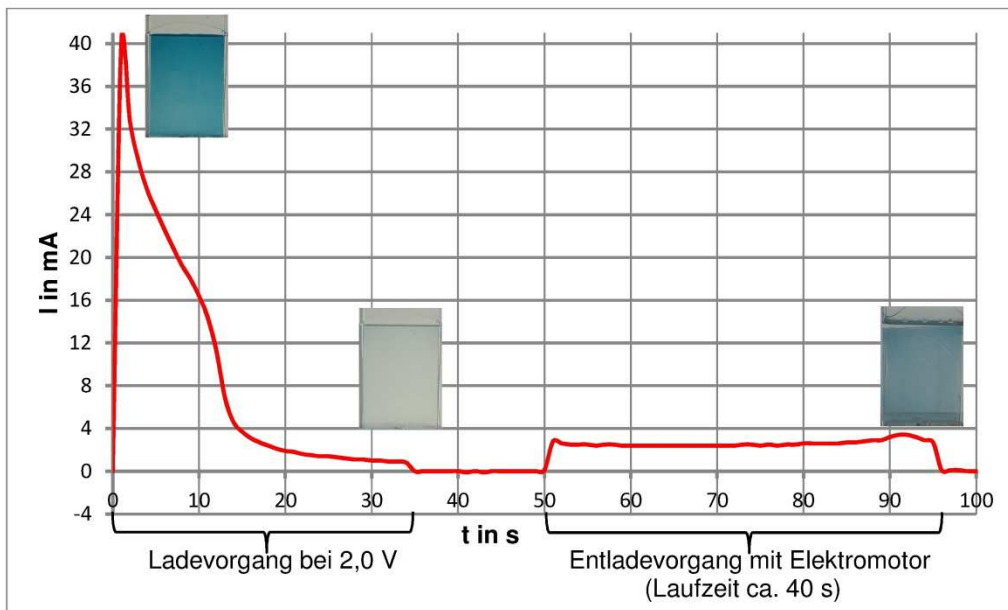


Abb. 11: Stromstärke-Zeit-Diagramm des Lade- und Entladevorgangs mit einem Elektromotor

*Teil B:* Das Hexacyanoferrat-System ist ein beeindruckendes elektrochromes Vier-Farben-System, in dem alle Oxidationsstufen (inklusive einer Zwischenoxidationsstufe) von weiß über blau zu grün und schließlich zu gelb durchlaufen werden können (siehe Abb. 12).

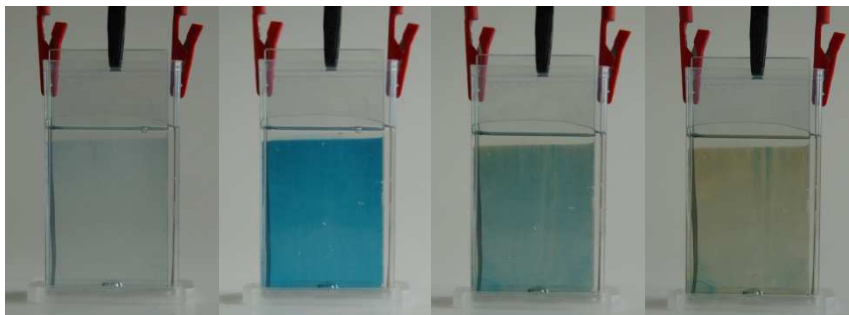


Abb. 12: links: Berliner Weiß; zweites Bild von links: Berliner Blau; zweites Bild von rechts: Berliner Grün; rechts: Berliner Braun

Bei einer Spannung von 2 V findet zunächst eine Oxidation von Berliner Weiß ( $\text{Fe}^{\text{II}}[\text{Fe}^{\text{II}}(\text{CN})_6]^{2-}$ ) zu Berliner Blau ( $\text{Fe}^{\text{III}}[\text{Fe}^{\text{II}}(\text{CN})_6]$ ) statt. Erhöht man die Spannung auf ca. 4 V findet zunächst eine teilweise Oxidation des Berliner Blau zu Berliner Grün ( $[\text{Fe}^{\text{III}}_3\{\text{Fe}^{\text{III}}(\text{CN})_6\}_2\{\text{Fe}^{\text{II}}(\text{CN})_6\}]^-$ ) statt und schließlich gelangt man zur vollständig oxidierten Form, Berliner Braun ( $\text{Fe}^{\text{III}}[\text{Fe}^{\text{III}}(\text{CN})_6]$ ) (Reaktionsgleichungen siehe Kapitel 2).

Um die Abdunkelung (und Aufhellung) der Fensterscheibe und die damit verbundene Verringerung (Vergrößerung) der Transmission der elektrochromen Fensterscheibe im Experiment zu veranschaulichen, werden im nächsten Versuch zwei Möglichkeiten aufgezeigt, wie die Lichtdurchlässigkeit, aber auch die Rot-Grün-Blau-Farbwerte mit einer Smartphone-App gemessen werden können.

## Versuch 4: Messung der Beleuchtungsstärke und der Rot-Grün-Blau-Werte mit zwei Smartphone-Apps

*Geräte und Chemikalien:* Kunststoffgefäß (Tic-Tac® Dose 8 cm x 4,5 cm x 2 cm), Bodenplatte aus Kunststoff (optional), Voltmeter, Amperemeter, Verbindungskabel, Netzgerät, Lampe, Krokodilklemmen, zwei Graphitfolie-Streifen (1 cm x 8 cm) beschichtetes FTO-Glas (aus Versuch 1), Elektrolyt (aus Versuch 2), Smartphone mit Lichtsensor und RGB-Sensor, App: Physics Toolbox Light Sensor (Android), App: RGB Light Sensor beta (Android).

*Durchführung:* Das FTO-Glas und die Graphitfolie-Streifen werden wie in Abb. 9 in Versuch 2 dargestellt, aufgebaut. Das Smartphone mit einem Licht- bzw. RGB-Sensor wird so positioniert, dass der Sensor hinter der farbigen Scheibe liegt. Die Beleuchtungsstärke kann mit der Physics Toolbox Sensor-App gemessen werden, wobei das FTO-Glas von vorne mit einer Lampe bestrahlt und durch anlegen einer Spannung von 2 V umgefärbt wird. Die Rot-Grün-Blau-Werte (RGB-Werte) werden mit der RGB Light Sensor-App bei Tageslicht und ebenfalls beim Umfärben des FTO-Glases bestimmt.

*Beobachtung und Auswertung:* Beim Messen der Beleuchtungsstärke, erkennt man in Abb. 13 (rechtes Bild), dass beim Umfärben des beschichteten FTO-Glases von weiß nach blau (eine Abdunkelung der Fensterscheibe) die Belichtungsstärke (Einheit Lux=lx) deutlich nach unten abfällt. Färbt man die Scheibe wieder weiß (Aufhellung der Scheibe), steigt die Kurve wieder deutlich an. Somit kann im Unterricht auf anschauliche Weise gezeigt werden (falls das Handy als Messinstrument erlaubt ist), dass die Berliner Blau Fensterscheibe weniger lichtdurchlässig ist, als das Berliner Weiß Glas.

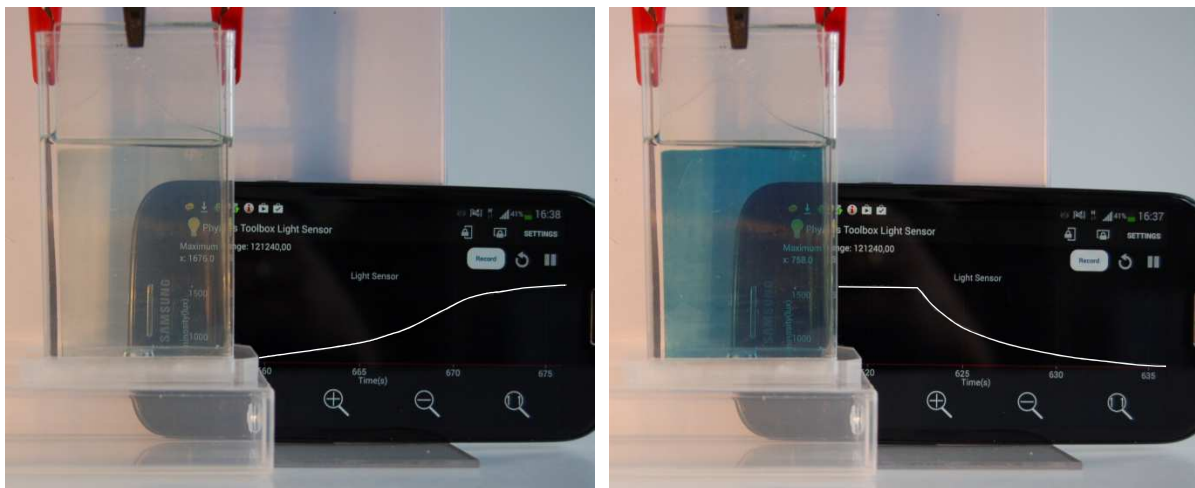


Abb. 13: Smartphone mit Lichtsensor und einer App zur Messung der Beleuchtungsstärke; links: FTO-Glas mit Berliner Blau; rechts: FTO-Glas mit Berliner Weiß

Für die Darstellung der Rot-Grün-Blau-Werte sind in Abb. 14 (linkes Bild) bei einer Berliner-Weiß-Scheibe die einzelnen Farbbalken auf dem Smartphone-Display sichtbar. Färbt man die weiße Scheibe elektrochrom um, so ist deutlich sichtbar (Abb. 14, rechts), dass der blaue Balken im Spektrum wesentlich breiter wird, während die roten und grünen Wellenlängenanteile erwartungsgemäß stark absorbiert werden.



Abb. 14: Smartphone mit einem RGB-Sensor und einer App zur Messung der RGB-Werte; links: FTO-Glas mit Berliner Weiß; rechts: FTO-Glas mit Berliner Blau

### **Versuch 5: Intensivierung der Blaufärbung durch Verwendung von zwei beschichteten FTO-Gläsern mit Graphitfolie-Streifen als Gegenelektroden.**

*Geräte und Chemikalien:* Siehe Versuch 2. Anstelle der Graphitfolie 4 cm x 8 cm werden zwei Graphitfolie-Streifen der Größe 1 cm x 8 cm verwendet, zwei mit Berliner Blau (0,3 V/ ca. 60 s) beschichtete FTO-Gläser (Herstellung siehe Versuch 1), Elektromotor (Glockenanker Wundermotor LE 2201 mit Luftschraube, Anlaufspannung: 0,08 V, Spannungsbereich: 0,08 V – 20 V).

*Durchführung:* Die beiden Graphitfolie-Streifen werden im Kunststoffgefäß fixiert und parallel als + Pol geschaltet. Die blau-beschichteten FTO-Gläser werden ebenfalls parallel zueinander, als - Pol geschaltet, mit der beschichteten Seite nach innen in das Kunststoffgefäß gestellt und mit je einer Krokodilklemme fixiert (siehe Abb. 15) Dabei ist darauf zu achten, dass sich die Graphitfolie-Streifen und die FTO-Gläser nicht berühren. Nun werden ca. 30 mL des Elektrolyten (Herstellung des Elektrolyten siehe Versuch 2) in das Kunststoffgefäß gegeben. Der Entfärbe- und Färbevorgang kann jetzt wie in Versuch 3 beschrieben vorgenommen und beliebig oft wiederholt werden. Auch hier kann der Entladevorgang (Blaufärbung) mit einem Elektromotor durchgeführt werden.

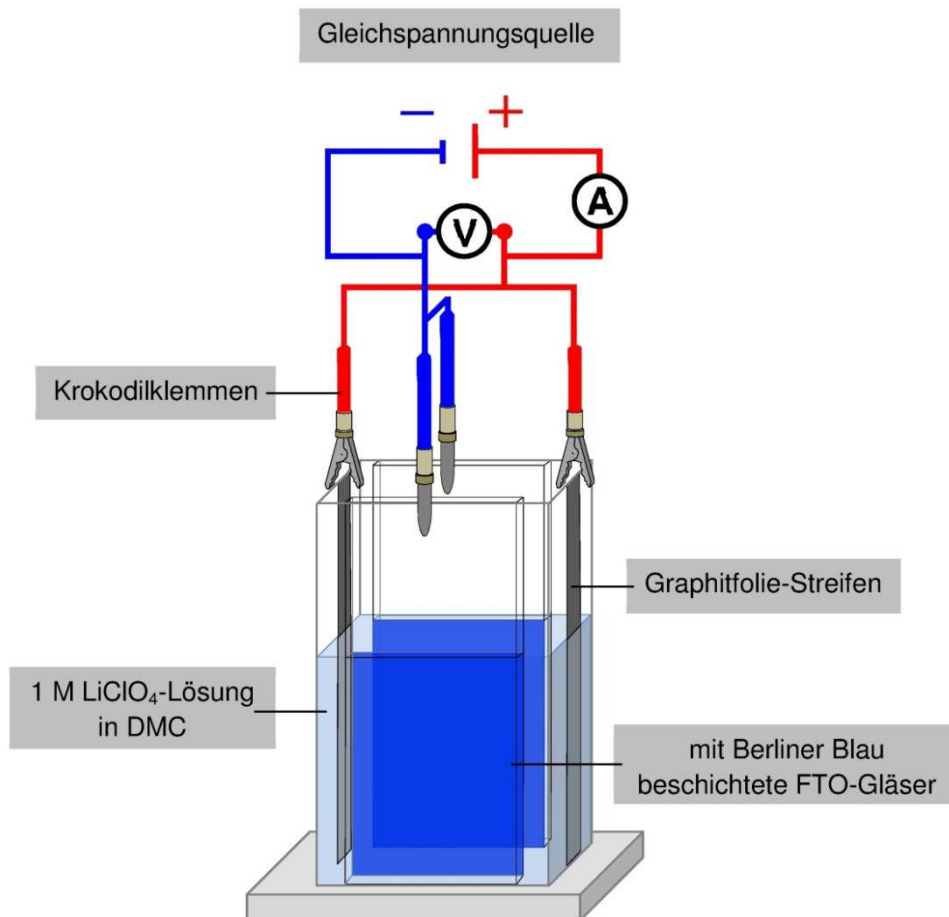


Abb. 15: „Elektrochromes Doppelfenster“ mit zwei FTO-Gläsern, beschichtet mit Berliner Blau und Graphitfolie-Streifen als Gegenelektroden.

*Beobachtung und Auswertung:* Durch die Wahl von zwei Berliner Blau-Gläsern ist der blaue Farbeindruck des „Elektrochromen Doppelfensters“ erwartungsgemäß intensiver. Beim Entfärbeprozess ist wegen der beiden seitlich angebrachten Graphitfolie-Streifen und der damit einhergehenden unterschiedlich langen Diffusionswege im Elektrolyten ein deutlicher „Vorhang-Effekt“ beobachtbar. Die jeweils äußeren Ränder der beschichteten FTO-Gläser entfärben sich schneller, da sich dieser Teil der Berliner Blau-Schicht näher an den Graphitkathoden befindet und somit die Ionen-Wanderwege kürzer sind (siehe Abb. 16). Die Laufzeit des Elektromotors liegt wegen der größeren (doppelten) aktiven Oberfläche an Berliner Blau bei ca. zwei Minuten und ist damit deutlich länger, als bei nur einem beschichteten FTO-Glas. Die ablaufenden Elektrodenreaktionen wurden bereits in Versuch 2 dargelegt.



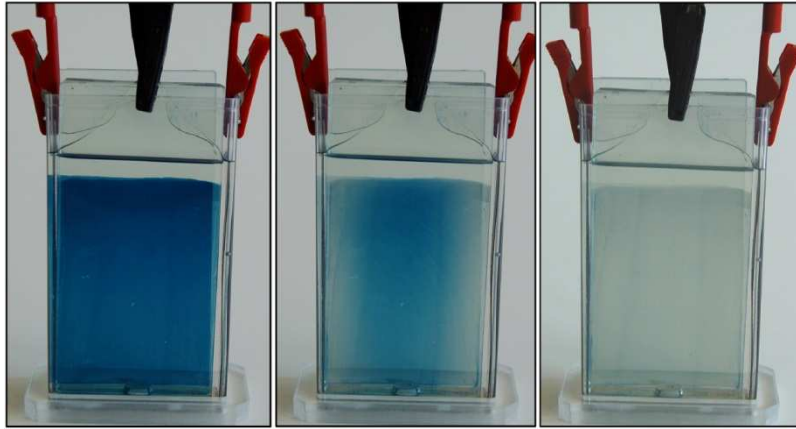


Abb. 16: Zwei mit Berliner Blau beschichtete FTO-Gläser beim Entfärbevorgang mit Graphitfolie-Streifen als Gegenelektroden.

## 5 Experimente zum Themenfeld Vanadiumpentoxid

Als weiteres anorganisches elektrochromes Material wird im folgenden Vanadiumpentoxid vorgestellt. Auch hier muss die elektrochrome Schicht zunächst durch eine Elektrolyse auf dem FTO-Glas abgeschieden werden, um sie dann elektrochrom umfärben zu können.

*Achtung:* Für Vanadiumpentoxid existiert laut DGISS (Verweis auf DGUV Regel BG/GUV-SR 2003) eine Tätigkeitsbeschränkung für Schülerinnen und Schüler bis einschließlich Jahrgangsstufe 4. Schülerexperimente ab der Jahrgangsstufe 5 sind möglich. Bei Experimenten mit Vanadiumpentoxid (Versuch 6 und 7) sollten die Schülerinnen und Schüler geeignete Schutzkleidung (Handschuhe und Schutzbrille) tragen. Nach Möglichkeit sollten die Schülerinnen und Schüler unter dem Abzug arbeiten, jedoch ist die Gesundheitsgefährdung beim Einatmen als sehr gering einzustufen, da das  $V_2O_5$  als dünne Schicht direkt an der Elektrode abgeschieden wird und somit die Entstehung von Stäuben ausgeschlossen sein sollte. Außerdem entstehen nur sehr geringe Mengen (max. 13 mg) Vanadiumpentoxid als feste Schicht auf der Elektrode.

### Versuch 6: Elektrolytische Abscheidung von Vanadiumpentoxid auf einem FTO-Glas

*Geräte und Chemikalien:* Kunststoffgefäß (Tic-Tac® Dose 8 cm x 4,5 cm x 2cm), Bodenplatte aus Kunststoff (optional), Voltmeter, Amperemeter, Verbindungskabel, Netzgerät, Krokodilklemmen, ca. 150 mL Becherglas, Graphitfolie (4 cm x 8 cm), FTO-Glas (4 cm x 8 cm), Magnetrührer, Vanadylsulfat ( $VOSO_4 \cdot x H_2O$ ) ( $X_n$ , gesundheitsschädlich), Ethanol absolut (F, leichtentzündlich), Aceton (F, leichtentzündlich;  $X_i$ , reizend), destilliertes Wasser.

*Herstellung der Elektrolytlösung:* Es werden 1,9 g Vanadylsulfat in ein Becherglas gegeben und in 17,5 mL destilliertem Wasser und 18 mL Ethanol absolut gelöst. Mit einem Magnetrührer wird ca. 5 min gerührt bis sich das  $VOSO_4 \cdot x H_2O$  vollständig gelöst hat. Die leicht saure Lösung besitzt eine tiefblaue Farbe.

*Durchführung:* Die beiden Elektroden (Graphitfolie und FTO-Glas) werden im Vorfeld sorgfältig mit Aceton gereinigt. Anschließend wird die leitfähige Seite des FTO-Glases mit einem Multimeter ermittelt und der Versuch wie in Abb. 17 dargestellt, aufgebaut. Es werden

etwa 40 mL der Elektrolytlösung in das Kunststoffgefäß gegeben. Die Graphitfolie wird als – Pol, das FTO-Glas als + Pol geschaltet. Nun wird bei etwa 2,5 V für ca. 10 min elektrolysiert. Anschließend wird das FTO-Glas aus dem Elektrolyten entnommen und für ca. 5 min in ein Bad aus einem 1:1 Gemisch aus H<sub>2</sub>O dest. und Ethanol abs. gestellt. Danach wird es zum Trocknen auf ein saugfähiges Tuch gelegt und für etwa zwei Minuten mit einem Föhn getrocknet.

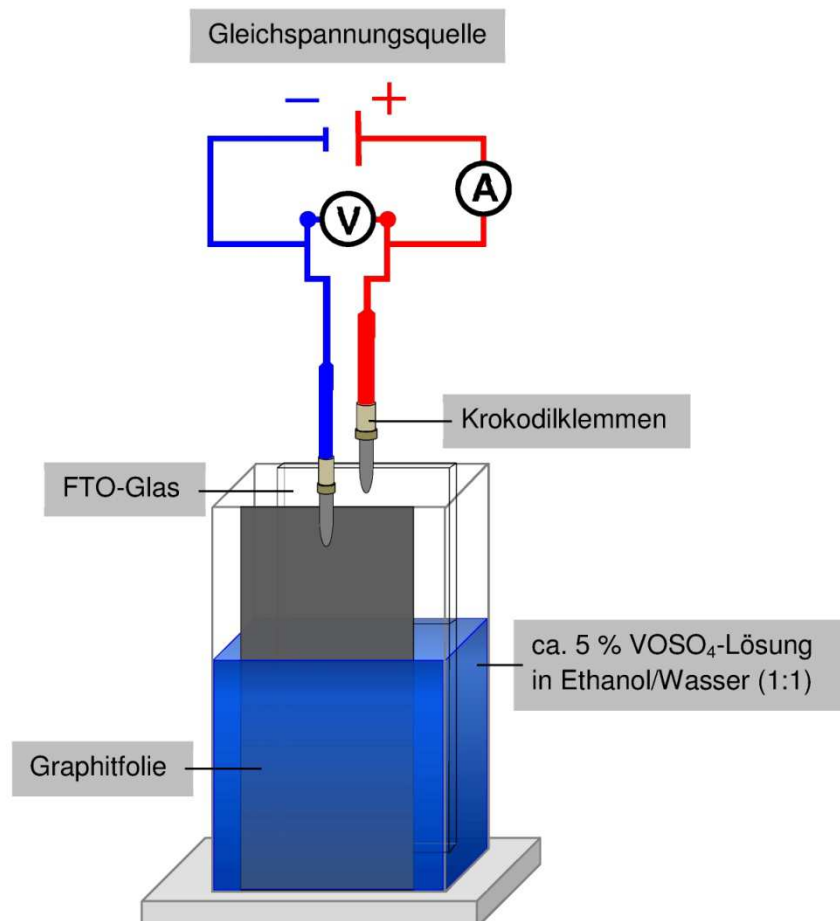
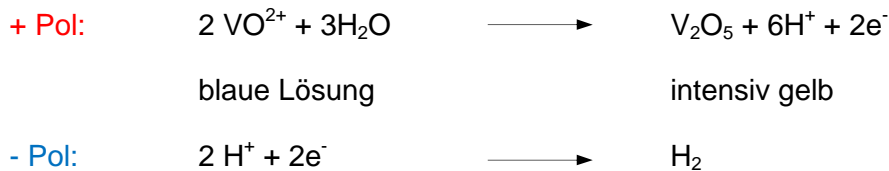


Abb. 17: Versuchsaufbau elektrolytische Abscheidung von Vanadumpentoxid

*Beobachtung und Auswertung:* Nach Beendigung der elektrolytischen Abscheidung nimmt man das intensiv-gelb gefärbte FTO-Glas aus dem Elektrolysebad. Falls die Oberfläche des gelben Vanadumpentoxids etwas bräunlich benetzt ist, kann man dies vorsichtig mit einem saugfähigen Tuch abwischen.

Beim Lösen des Vanadylsulfat in Ethanol/Wasser entstehen VO<sup>2+</sup>-Ionen. Vanadium liegt hier in der Oxidationsstufe +IV vor. Bei der Elektrolyse findet am Pluspol eine Oxidation des Vanadium(IV)-Ions zum Vanadium(V) statt. Das entstehende gelbe Vanadumpentoxid scheidet sich mit einem gleichmäßigen Film auf der Oberfläche des FTO-Glases ab. Die Elektrodenreaktionen können wie folgt beschrieben werden:



Im nächsten Experiment wird nun das gelbe, mit Vanadiumpentoxid beschichtete FTO-Glas in einem organischen Elektrolyten elektrochrom umgefärbt.

### Versuch 7: Umfärbung einer mit Vanadiumpentoxid beschichteten Fensterscheibe auf Knopfdruck

*Geräte und Chemikalien:* Kunststoffgefäß (Tic-Tac® Dose 8 cm x 4,5 cm x 2 cm), Bodenplatte aus Kunststoff (optional), Voltmeter, Amperemeter, Verbindungskabel, Netzgerät, Krokodilklemmen, Graphitfolie-Streifen (1 cm x 8 cm) Filterpapier, beschichtetes FTO-Glas (aus Versuch 6).

*Herstellung der Elektrolytlösung:* siehe Versuche 2.

*Durchführung:* Es werden 40 mL der Elektrolytlösung in das Kunststoffgefäß gegeben. Der Versuch wird wie in Abb. 9 dargestellt, aufgebaut. Die Graphitfolie-Streifen werden im Vorfeld mit Aceton abgerieben und als + Pol, das gelbe FTO-Glas (aus Versuch 6) als - Pol geschaltet. Die Elektroden werden am oberen Rand mit Krokodilklemmen fixiert und stehen auf dem Boden des Kunststoffgefäßes.

Nun wird das System bei ca. 2 V geladen. Der Ladevorgang ist beendet, wenn sich das FTO-Glas von gelb nach anthrazit umgefärbt hat und die Stromstärke auf ca. 1-2 mA gesunken ist. Anschließend wird umgepolt; das anthrazitfarbene FTO-Glas wird als + Pol, die Graphitfolie als - Pol geschaltet und eine Spannung von 2 V angelegt. Der Färbe-/Entfärbe-Prozess kann beliebig oft wiederholt werden.

*Beobachtung und Auswertung:* Das elektrochrome Übergangsmetalloxid Vanadiumpentoxid zeigt ein weiteres beeindruckendes Farbenspiel. Das als - Pol geschaltete, mit Vanadiumpentoxid beschichtete FTO-Glas färbt sich beim Anlegen einer Spannung von gelb nach anthrazit um (siehe Abb. 18). Wird nach Beendigung des Prozesses umgepolt, so ist eine Rückfärbung zu gelb erkennbar.

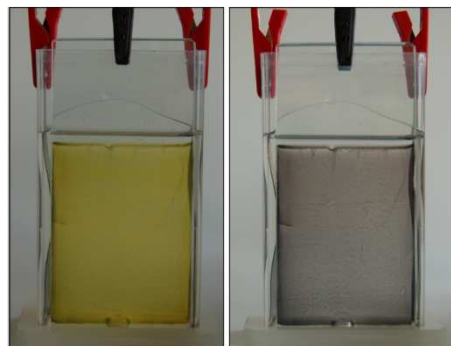
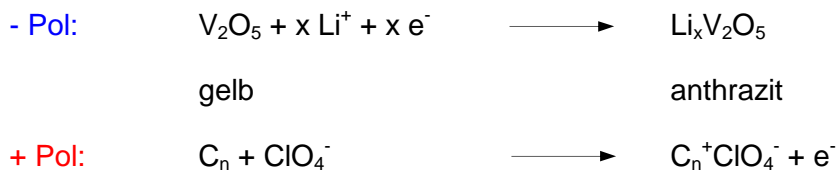


Abb. 18: links: gelbes  $\text{V}_2\text{O}_5$ , rechts: anthrazitfarbenes  $\text{Li}_x\text{V}_2\text{O}_5$

Beim „Ladevorgang“ wird am Minuspol das Vanadium(V) unter Aufnahme eines Elektrons und Intercalation von Lithium-Ionen zu Vanadium(IV) reduziert. Am Pluspol werden

Elektronen entzogen und Perchlorat-Ionen in die Graphitfolie intercaliert bzw. adsorbiert (vgl. oben). Die Elektrodenreaktionen können wie folgt formuliert werden:



Diese reversible elektrochrome Farbveränderung ist in nahezu beliebig hoher Zyklenzahl durch entsprechendes Umpolen reproduzierbar.

## 6 Schlussbetrachtung

Intelligente Fensterscheiben, so genannte „smart windows“ lassen sich durch einen reversiblen elektrochemischen Prozess umfärben, wodurch die Sonnen- und Wärmeeinstrahlung in Gebäuden flexibel angepasst und Energie für die Klimatisierung eingespart werden kann. Von daher, könnte diese Technologie ein weiterer Baustein zur Realisierung der Energiewende sein. Im Beitrag wurde aufgezeigt, wie sich mit schulisch relevanten Mitteln völlig neuartige Experimente mit den elektrochromen Materialien Berliner Blau und Vanadiumpentoxid durchführen lassen.

Mit dem Themenfeld der Elektrochromie wurde so ein weiterer (fachdidaktischer) Baustein zur Energiewende für die Schule und Hochschule experimentell und konzeptionell zugänglich gemacht.

An dieser Stelle sei bereits angedeutet, dass sich nicht nur die oben verwendeten anorganischen elektrochromen Materialien für eine Anwendung in „smart windows“ eignen. Auch der Bereich der organischen elektrochromen Materialien eröffnet eine völlig neuartige Zugangsweise zu diesem Themenfeld, mit einer Schnittmenge unter anderem mit dem Bereich der elektrisch leitfähigen Polymere. In Kürze werden wir ausführlich über erste spannende Ergebnisse berichten können.

### Beschaffungshinweis:

Die Autoren entwickeln zur Zeit ein Experimentierset zu dem Themenfeld „Elektrochrome Systeme“, das dann bei der Lehrmittelfirma Hedinger zu beziehen ist. Die FTO-Gläser können bereits jetzt bei [unter experimente-zur-energiewende@web.de](mailto:experimente-zur-energiewende@web.de) (Stück 7,90 €) bezogen werden.

### Danksagung

Wir danken dem Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) und dem Fonds der Chemischen Industrie für die finanzielle Unterstützung der Arbeit.

### Anschriften der Verfasser:

Prof. Dr. Marco Oetken, Corina Wagner, Pädagogische Hochschule Freiburg, Abteilung Chemie, Kunzenweg 21, D-79117 Freiburg, E-Mail: marco.oetken@ph-freiburg.de, corina.wagner@ph-freiburg.de

#### Literatur:

- [1] [scidok.sulb.uni-saarland.de/volltexte/2009/2551/pdf/aeg200614.pdf](http://scidok.sulb.uni-saarland.de/volltexte/2009/2551/pdf/aeg200614.pdf) (INM - Leibniz-Institut für Neue Materialien Saarbrücken, Letzter Zugriff 11.06.2014)
- [2] M. Kaneko, T. Okada, A secondary battery composed of multilayer Prussian Blue and its reaction characteristics. *Journal of Electroanalytical Chemistry* **255**, S. 45 - 52 (1988)
- [3] N. M. Rowley, R. J. Mortimer, New electrochromic materials. *Science Progress* **85** (3), S. 243 - 262 (2002)
- [4] S. Wu, S. Yuan, L. Shi, Y. Zhao, J. Fang, Preparation, characterization and electrical properties of fluorine-doped tin oxide nanocrystals. *Journal of Colloid Interface Science* **346**, S. 12 - 16 (2010)
- [5] B. Russo, G. Z. Cao, Fabrication and characterization of fluorine-doped tin oxide thin films nanorod arrays via spray pyrolysis. *Applied Physics A* **90**, S. 311-315 (2008)
- [6] P. R. Somani, S. Radhakrishnan, Electrochromic materials and devices: present and future. *Materials Chemistry and Physics* **77**, S. 117 - 133 (2002)
- [7] R. J. Mortimer, Electrochromic materials. *Chemical Society Reviews* **26**, S. 147 - 156 (1997)
- [8] H. Schmidt, Nanochemie – Oberflächentechnik über chemische Verfahren mit Nanotechnologie. *PdN-ChiS* **51** (4), S. 2 – 10 (2002)
- [9] D. R. Rosseinsky, R. J. Mortimer, Electrochromic Systems and the Prospects for Devices. *Advanced Materials* **13** (11), S. 783 - 793 (2001)
- [10] D. Ellis, M. Eckhoff, V. D. Neff, Electrochromism in the Mixed-Valence Hexacyanides. 1. Voltammetric and Spectral Studies of the Oxidation and Reduction of Thin Films of Prussian Blue. *Journal of Physical Chemistry* **85**, S. 1225 - 1231 (1981)
- [11] K. Itaya, I. Uchida, V. D. Neff, Electrochemistry of Polynuclear Transition Metal Cyanides: Prussian Blue and its Analogues. *Accounts of Chemical Research* **19**, S. 162 - 168 (1986)
- [12] M. Nashan, J. Freienberg, G. Wittstock, Farbeffekte auf Knopfdruck. *Chemkon* **14** (4), S. 189 - 191 (2007)
- [13] P. Liu, S.-H. Lee, C. E. Tracy, J. A. Turner, J. R. Pitts, S. K. Deb, Electrochromic and chemochromic performance of mesoporous thin-film vanadium oxide. *Solid state Ionics* **165**, S. 223 - 228 (2003)
- [14] P. Liu, S.-H. Lee, C. E. Tracy, Y. Yan, J. A. Turner, Preparation and Lithium Insertion Properties of Mesoporous Vanadium Oxide. *Advanced Materials* **14** (1), S. 27 - 30 (2002)
- [15] K. Takahashi, S. J. Limmer, Y. Wang, G. Cao, Synthesis and Electrochemical Properties of Single-Crystal  $V_2O_5$  Nanorod Arrays by Template-Based Electrodeposition. *Journal of Physical Chemistry B* **108**, S. 9795 - 9800 (2004)

## **Kurzfassung:**

### **Elektrischer Strom als Jalousie – „smart windows“ helfen Energie sparen**

C. Wagner und M. Oetken

Intelligente Fensterscheiben, so genannte „smart windows“ lassen sich durch einen reversiblen elektrochemischen Prozess umfärben, wodurch die Sonnen- und Wärmeeinstrahlung in Gebäuden flexibel angepasst und Energie für die Klimatisierung eingespart werden kann. Im Beitrag werden völlig neuartige Experimente zu den elektrochromen Materialien Berliner Blau und Vanadiumpentoxid in Theorie und Praxis vorgestellt.