

# Elektrochrome Energiespeicher

Elektrochrome Bauteile wie zum Beispiel Fenster mit elektrisch einstellbarer Transparenz bzw. Abdunkelung sind wiederaufladbaren Batterien und elektrochemischen Kondensatoren (sogenannte Superkondensatoren) in Bezug auf Konstruktions- und Funktionsprinzip, Reaktionskinetik und Werkstoffeigenschaften der Bauteile sehr ähnlich. Diese prinzipiellen Ähnlichkeiten haben in den letzten Jahren zu Überlegungen geführt, ob und wie man elektrochrome Bauteile zusätzlich als Energiespeicher nutzen kann. Die sogenannte elektrochrome Energiespeicherung ist damit noch ein sehr junges Konzept und befindet sich überwiegend im Forschungsstadium.

Wiederaufladbare Batterien und Superkondensatoren gehören zu den vielversprechendsten Speichertechnologien sowohl im Bereich Elektromobilität als auch in der stationären Zwischenspeicherung elektrischer Energie aus alternativen Energiequellen. Sie unterscheiden sich allerdings derzeit noch erheblich in Bezug auf Ladezeiten und speicherbare Energiedichten pro Volumen. Batterien können sehr hohe Energiedichten erreichen, aber aktuell nur mäßige Stromdichten und damit Ladezeiten, bei Superkondensatoren verhält es sich genau andersherum.

Elektrochrome Bauteile sind mehrlagige Konstruktionen. Sie bestehen aus einer aktiven elektrochromen Elektrode, einer Elektrolytlage, einer Gegenelektrode, zwei flächigen transparenten Leiterbahnen jeweils außen auf den Elektroden sowie der mechanischen Trägerstruktur aus Glas oder Kunststoff. Dieser Aufbau entspricht im Prinzip dem einer wiederaufladbaren Dünnschicht-Batterie, hier allerdings mit dem Zusatznutzen, dass sich deren jeweiliger Ladezustand durch die Farbgebung ausdrücken würde. Beim klassischen elektrochromen Bauteil wird die Wahl des Elektrodenmaterials jedoch natürlich nicht von den Energiespeichereigenschaften, sondern von dessen Fähigkeit zur reversiblen Farbänderung geleitet.

Superkondensatoren nutzen derzeit zwei unterschiedliche Speicherprinzipien für elektrische Energie. Das eine Prinzip, die

statische Speicherung in einer Doppelschichtkapazität, nutzt den Aufbau von Nanometer-dünnen Doppelschichten durch Ladungstrennung direkt im Bereich der Oberfläche der Elektroden. Durch Bauweisen im Nanometerbereich, z.B. unter Nutzung von Aerogel-, Nanoröhrchen- oder Graphen-Elektroden, kann die nutzbare Elektrodenoberfläche in Bezug auf das Gesamtvolumen so stark erhöht werden, dass anwendungstechnisch interessante Energiedichten resultieren. Das zweite Prinzip ist die elektrochemische Speicherung in einer sogenannten Pseudokapazität. Kombiniert man die beiden Speicherprinzipien Doppelschicht- und Pseudokapazität geschickt, kann diese Eigenschaftskombination vermutlich weiter optimiert werden.

Vorstehend beschriebene Ähnlichkeiten waren der Ausgangspunkt für Untersuchungen, elektrochrome Verglasungen – beispielsweise solche moderner energieeffizienter Bürogebäude (Intelligente Fenster, Smart Privacy Glas) – oder andere elektrochrome Bauteile wie z.B. neuartige Flachbildschirme zusätzlich als Energiespeicher auszuliegen. Genauso wird umgekehrt untersucht, ob und wo elektrische Speichermedien mit dem Zusatznutzen elektrisch induzierter Farbänderung sinnvoll sein können, beispielsweise bei der Visualisierung des Ladezustandes bzw. der verfügbaren Restenergie. Um die beiden Aspekte Elektrochromie und elektrische Energiespeicherung künftig sinnvoll in einem Bauteil zu integrieren, werden derzeit drei Werkstoffgruppen als Elektrodenmaterial untersucht: Metalloxide, leitfähige Polymere und anorganische Nichtoxide.

Bei den Metalloxiden unterscheidet man zwischen kathodischer und anodischer Elektrochromie. Bei ersterer führt die Einlagerung von Ionen, bei letzterer die Abgabe von Ionen zu Farbänderungen. Das bekannteste Metalloxid in Bezug auf kathodische Elektrochromie ist Wolframoxid ( $\text{WO}_3$ ). Kürzlich konnte gezeigt werden, dass sehr dünne Wolframoxid-Schichten auch als pseudokapazitive Superkondensator funktionieren. Seit-

her wird intensiv an der Entwicklung elektrochromer Energiespeicher auf Basis von  $\text{WO}_3$  gearbeitet.

Anodische Elektrochromie zeigen die relativ kostengünstigen Werkstoffe Nickeloxid ( $\text{NiO}$ ) und Manganoxid ( $\text{MnO}_2$ ). Bei beiden können sowohl elektrochrome als auch superkapazitive Eigenschaften massiv verbessert werden, wenn sie in sehr dünnen Schichten auf ein Trägermaterial aufgebracht werden. Zusätzlich kann die Elektrochromie bei  $\text{NiO}$  durch Sauerstoffüberschuss in der Verbindung verstärkt werden. Einen Sonderfall stellt Vanadiumpentoxid ( $\text{V}_2\text{O}_5$ ) dar, denn es kombiniert kathodische und anodische Elektrochromie. In dünnen nanostrukturierten Schichten kann es außerdem äußerst schnell Li-Ionen einlagern, was es zusätzlich als ideales Elektrodenmaterial für Superkondensatoren erscheinen lässt. Erste Laborversuche verliefen sehr erfolgreich.

Leitfähige Polymere können sowohl in Richtung Elektrochromie als auch in Richtung Energiespeicherung maßgeschneidert werden. Gute kombinierte Eigenschaften zeigen verschiedene Polyaniline und Polypyrole. Vor wenigen Jahren wurde über geordnete Arrays aus Polyanilin-Nanodrähten als Elektrodenmaterial berichtet, die im Labormaßstab erfolgreich als elektrochrome Energiespeicher in Fenstern getestet wurden. Bei bestimmten Polypyrolen wurden in Kombination mit Gold und  $\text{WO}_3$  erstmals elektrochrome Energiespeicher mit nennenswerten Eigenschaften realisiert.

Bei den anorganischen Nichtoxiden stehen derzeit der Farbstoff Preußischblau und die Kohlenstoffmodifikation Graphen hervor. Beide Substanzen befinden sich in Bezug auf elektrochrome Energiespeicherung im frühen Forschungsstadium. Da Graphen seit einigen Jahren mit immensen Forschungsaufwand bezüglich unterschiedlichster Fragestellungen untersucht wird, könnten sich hier in absehbarer Zeit interessante Möglichkeiten für die Kombination von Elektrochromie und elektrischer Energiespeicherung eröffnen.

**Stefan Reschke**