

- 11) O. N. Ulenikov, G. A. Onopenko, E. S. Bekhtereva, T. M. Petrova, A. M. Solodov, A. A. Solodov, *Mol. Phys.* 2010, 108(5), 637–647.
- 12) E. P. Chukalina, M. N. Popova, L. N. Bezmaternykh, I. A. Gudimb, *Phys. Lett. A* 2010, 374, 1790–1792.
- 13) G. L. Carr, R. J. Smith, L. Mihaly, H. Zhang, D. H. Reitze, D. B. Tanner, *Infrared Physics and Technology* 2008, 51(5), 404–406.
- 14) P. Roy, M. Rouzies, Z. Qi, O. Chubar, *Infrared Physics and Technology* 2006, 49(1–2), 139–146; J. Barros, C. Evain, L. Manceron et al., *Rev. Scient. Instrum.* 2013, 84(3), 033102; O. Pirali, M. Goubet, T. R. Huet et al., *Phys. Chem. Chem. Phys.* 2013, 15(25), 10141–10150; A. A. A. Azzam, S. N. Yurchenko, J. Tennyson, M. A. Martin-Drumel, O. Pirali, O. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2013, 130, 341–351; V. Boudon, P. Asselin, C. Souillard et al., *P. Molecular Physics*, 2013, 111 (14–15), 2154–2162; F. Kwabia Tchana, F. Willaert, X. Landsheere et al, *Review of Scientific Instruments*, 2013, 84(9), 093101; M. A. Martin-Drumel, O. Pirali, Y. Loquais, C. Falvo, P. Bréchnignac, *Chem. Phys. Lett.* 2013, 557; 53–58.
- 15) A. G. G. M. Tielens, *Ann. Rev. Astron. And. Astrophys.* 2008, 46, 289–337.
- 16) S. Albert, M. Quack, *J. Mol. Spectrosc.* 2007, 243, 280–291.
- 17) S. Albert, K. K. Albert, P. Lerch, M. Quack, *Faraday Disc.* 2011, 150, 146–151.
- 18) M. Quack, „Fundamental symmetries and symmetry violations from high resolution spectroscopy“, in: M. Quack, F. Merkt (Hrsg.), *Handbook of High-Resolution Spectroscopy*, 2011, Vol. 1, 965–1021; B. Fehrens, D. Luckhaus, M. Quack, *Chem. Phys.* 2007, 338, 90–105, R. P. Bell, *The tunnel effect in chemistry*, Chapman & Hall, Routledge, 1980.
- 19) F. Merkt, M. Quack, „Molecular quantum mechanics and molecular spectra, molecular symmetry, and interaction of matter with radiation“, in: M. Quack, F. Merkt (Hrsg.), *Handbook of High-Resolution Spectroscopy*, 2011, Vol. 1, 1–55.
- 20) R. Prentner, M. Quack, J. Stohner, M. Willeke, *Faraday Disc.* 2011, 150, 130–132.
- 21) M. Quack, J. Stohner, M. Willeke, *Annu. Rev. Phys. Chem.* 2008, 59, 741–769; M. Quack, *Angew. Chem.* 1989, 101, 588–604.
- 22) M. Quack, J. Stohner, *Phys. Rev. Lett.* 2000, 84, 3807; M. Quack, J. Stohner, *J. Chem. Phys.* 2003, 119, 11228; A. Bauder, A. Beil, D. Luckhaus, F. Müller, M. Quack, *J. Chem. Phys.* 1997, 106, 7558–7570; M. Quack, *Angew. Chem.* 2002, 114, 4812–4825,
- 23) M. Quack, *Chem. Phys. Lett.* 1986, 132, 147.
- 24) J. K. Laerdahl, P. Schwerdtfeger, H. M. Quiney, *Phys. Rev. Lett.* 2000, 84, 3811; C. Daussy, T. Marrel, A. Amy-Klein, C. T. Nguyen, C. J. Borde, C. Chardonnet, *Phys. Rev. Lett.* 1999, 83, 1554–1557; S. K. Tokunaga, C. Stoeffler, F. Auguste et al., *Mol. Phys.* 2013, 111, 2363–2373.
- 25) S. Albert, K. Keppler Albert, P. Lerch, M. Quack in: M. Lewerenz, O. Dutuit and R. Marquardt (Hrsg.), *Proceedings of the 18th Symposium on Atomic, Cluster and Surface Physics 2012 (SASP 2012)*, Alpe d’Huez, France, 22 to 27 January 2012, 86–89; S. Albert, K. Keppler Albert, S. Bauerecker, M. Quack in: R. D. Beck, M. Drabbels, T. R. Rizzo (Hrsg.), *Proceedings of the 16th Symposium on Atomic, Cluster and Surface Physics 2008 (SASP 2008)*, 79–82.
- 26) H. Hollenstein, D. Luckhaus, J. Porchert, M. Quack, G. Seyfang, *Angew. Chem. Int. Ed.* 1997, 36, 140–143; H. Gross, G. Grassi, M. Quack, *Chem. Eur. J.* 1998, 4, 441–448.
- 27) K. Keppler Albert, S. Albert, M. Quack, J. Stohner, O. Trapp, V. Schurig, *Proc. 19th Coll. High Resol. Mol. Spectr.*, Salamanca 2005, 248; K. Keppler Albert, S. Albert, M. Quack, *J. Stohner, Chimia* 2008, 62, 656; K. Keppler Albert, S. Albert, M. Quack, *J. Stohner, Chimia* 2009, 63, 477.
- 28) M. Gottselig, M. Quack, *J. Chem. Phys.* 2005, 123, 084305–1–11.
- 29) M. Snels, M. Quack, *J. Chem. Phys.* 1991, 95, 6355–6361, S. Albert, K. Keppler Albert, M. Quack, *J. Mol. Struct.* 2004, 695–696, 385–389.
- 30) S. Albert, S. Bauerecker, M. Quack, A. Steinlin, *Mol. Phys.* 2007, 105, 541–558.
- 31) R. Berger, G. Laubender, M. Quack, A. Sieben, J. Stohner, M. Willeke, *Angew. Chem. Int. Ed.* 2005, 117, 3689–3693.
- 32) P. Souillard, P. Asselin, A. Cuisset et al., *Phys. Chem. Chem. Phys.* 2006, 8, 79–92.
- 33) S. Albert, S. Bauerecker, V. Boudon et al., *Chem. Phys.* 2009, 356, 131–146; A. Nikitin, V. Boudon, C. Wenger et al., *Phys. Chem. Chem. Phys.* 2013, 15, 10071–10093; L. R. Brown, K. Sung, D. C. Brenner et al., *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer* 2013, 130, 201–219.
- 34) H. M. Niederer, S. Albert, S. Bauerecker, V. Boudon, J. P. Champion, M. Quack, *Chimia* 2008, 62, 273–276; A. H.-M. Niederer, X.-G. Wang, T. Carrington Jr. et al., *J. Mol. Spectrosc.* 2013, 291, 33–47; H. M. Niederer, S. Albert, S. Bauerecker, V. Boudon, G. Seyfang, M. Quack, *Faraday Disc.* 2011, 150, 128–130.
- 35) O. N. Ulenikov, E. S. Bekhtereva, S. Albert, S. Bauerecker, H. Hollenstein, M. Quack, *Mol. Phys.* 2010, 108, 1209–1240; O. N. Ulenikov, E. S. Bekhtereva, S. Albert, S. Bauerecker, H. Hollenstein, M. Quack, *J. Phys. Chem. A* 2009, 113, 2218–2231.
- 36) A. Campargue, O. Leshchishina, L. Wang, D. Mondelain, S. Kassi, A. V. Nikitin, *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer* 2012 113, 1855–73; V. Boudon, O. Pirali, P. Roy, J.-B. Brubach, L. Manceron, J. van der Auwera, J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer 2010, 111, 1117–29; M. Abe, K. Iwakuni, S. Okubo, H. Sasada, *J. Opt. Soc. Am. B* 2013, 30, 1027–35; A. V. Nikitin, L. R. Brown, M. Rey, et al., *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer* 2013, 114, 1–12, X. G. Wang, T. Carrington, *J. Chem. Phys.* 2004, 121, 2937–2954.
- 37) R. Berger, J. L. Stuber, *Mol. Phys.* 2007, 105, 41–49.

Die zitierten Arbeiten der Arbeitsgruppe in Zürich wurden durch die ETH Zürich, den Schweizerischen Nationalfonds, das Paul-Scherrer-Institut sowie einen ERC Advanced Grant unterstützt.

Ionische Flüssigkeiten

◆ Wengleich der Begriff „ionische Flüssigkeit“ (Ionic liquids, IL) nach wie vor nicht jedem Chemiker geläufig ist, so feiert die wohl erste Beschreibung einer solchen durch Paul Walden dieses Jahr ihren einhundertsten Geburtstag.¹⁾ Anfangs sah es noch so aus, als würde diese Materialklasse als Laboratoriumskuriosität enden. Allerdings haben sich in den letzten Jahren etliche Anwendungsgebiete ergeben, und zwar nicht nur solche, bei denen ionische Flüssigkeiten als Lösungsmittel fungieren.

Einsatz als Elektrolyt

◆ Seit einigen Jahren wird auf die Möglichkeit hingewiesen, ionische Flüssigkeiten als Elektrolyte für Anwendungen der Energieumwandlung und -speicherung einzusetzen,²⁾ unter anderem in Batterien,³⁾ elektrochemischen Doppelschichtkondensatoren,⁴⁾ Brennstoffzellen⁵⁾ oder Farbstoffsolarzellen.⁶⁾

Batterien

◆ Getrieben durch den globalen Megatrend Elektromobilität und in Deutschland zudem durch die Energiewende, wird der Bedarf an Systemen zur Speicherung elektrischer Energie in den kommenden Jahren zunehmen. Wengleich die intensiv beforschten Lithiumionenbatterien in den letzten Jahren Fortschritte in Richtung höherer Energiedichte machten, so gibt es Alternativen mit höherer theoretischer möglicher Energiedichte, die auch kostengünstiger pro kWh sind, etwa Metallluftbatterien.⁷⁾ Aber auch bei diesen sind technische Hürden zu überwinden: Konventionelle Elektrolyte würden aufgrund ihrer Flüchtigkeit in einer prinzipiell offen zu konzipierenden Metallluftbatterie mit der Zeit verdampfen. Die durch die Lade- und Entladezyklen herbeigeführte Zer-

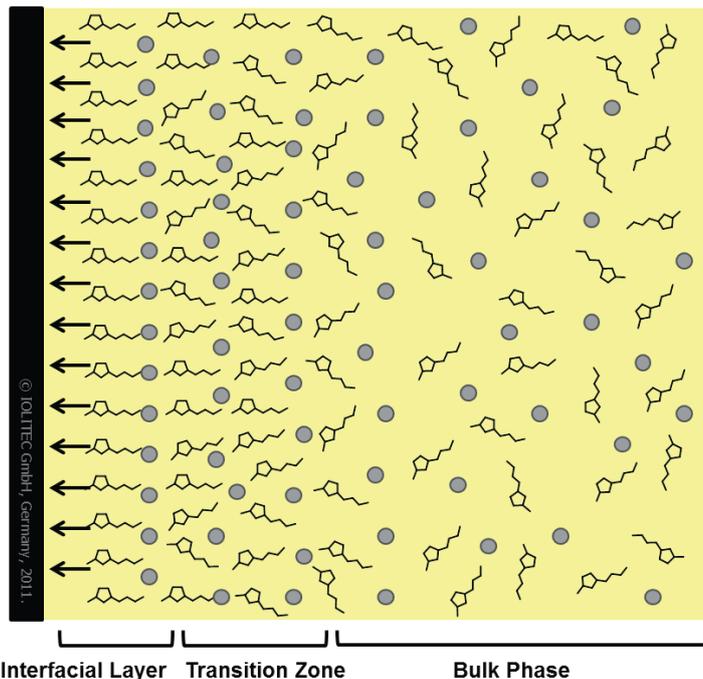
setzung gängiger Elektrolyten führt zu einer geringen Lebensdauer dieser Systeme. Schließlich diffundieren flüssige Elektrolyte in die Poren der Lufolektrode, was die notwendige Diffusion des Sauerstoffs ganz oder zumindest teilweise verhindert.

Ionische Flüssigkeiten haben einen meist sehr geringen Dampfdruck, eine befriedigende bis gute Leitfähigkeit und thermische sowie elektrochemische Stabilität. Diese Eigenschaften machen sie interessant für elektrochemische Anwendungen. So umgingen Zhang und Zhou durch die ionische Flüssigkeit 1-Ethyl-3-methylimidazoliumbis(trifluorsulfonyl)imid das Problem der Verdampfung und steigerten gleichzeitig die Stabilität des Elektrolyten. Um auch die Diffusion zu erhöhen, kombinierten sie diese ionische Flüssigkeit mit einwandigen Kohlenstoffnanoröhren (single-walled carbon-nanotubes, SWCNTs), um ein cross-linked network gel (CNG) zu erzeugen. Die ionischen Flüssigkeiten tragen in diesem Fall dazu bei, die Leitfähigkeit zwischen zwei Bündeln kreuzverbundener SWCNTs zu gewährleisten. Gleichzeitig ist die Sauerstoffdiffusion innerhalb des gelartigen Netzwerks sichergestellt, da dieses über zahlreiche kleine Hohlräume verfügt.⁸⁾

Einen ganz anderen Aspekt ionischer Flüssigkeiten beleuchten die Arbeiten von Endres, der aus Tetrachloraluminat-basierten ionischen Flüssigkeiten Aluminiumnanodrähte auf einer einseitig mit Gold gesputterten nanoporösen Polycarbonatmembran wachsen ließ. Diese neuen Elektrodenmaterialien lassen sich zyklisch lithieren und delithieren und zeigen auch nach 50 Zyklen keine signifikanten Degenerationserscheinungen.⁹⁾

Superkondensatoren

◆ Anders als die auf Energiedichte optimierten Lithiumionenbatterien weisen elektrochemische Doppelschichtkondensatoren (auch Ultrad oder Supercaps) hohe Leistungs-



Ionische Flüssigkeit auf einer Metalloberfläche (links): Die starke Wechselwirkung zeigt sich in Messungen mit dem Rasterkraftmikroskop (AFM); um mit der Spitze die erste Schicht (Interfacial Layer) zu durchstoßen, ist eine Kraft von 28 nN nötig, für die zweite Schicht (Transition Zone) lediglich 10 nN (bei $-1,0$ V gegen Pt auf einer Au(111)-Oberfläche).

dichten auf und lassen sich nahezu unbegrenzt laden und entladen (>500 000 Zyklen). Dies ist für solche Anwendungen von Bedeutung, bei denen kurzzeitig große Energiemengen aufgenommen werden müssen. Beispiele sind Elektro- und Hybridfahrzeuge, bei denen die beim Bremsvorgang gewonnene Energie schnell aufgenommen und gepuffert werden muss (Rekuperation), um diese dann kontrolliert an die Batterien abzugeben. Auch im Hinblick auf Netzstabilität sind neue Einsatzgebiete denkbar.

Kapazität und damit Energiedichte eines solchen Kondensators hängen von der Fläche der Elektroden und von der Betriebsspannung ab. Diese liegt derzeit bei gängigen Supercaps bei etwa 2,7 V, da sich bei höheren Spannungen der Elektrolyt zersetzt. Durch speziell designte ionische Flüssigkeiten als Elektrolyt lassen sich die Betriebsspannung auf über 3,5 V steigern und gleichzeitig gute Zyklenstabilitäten erzielen.¹⁰⁾

Da Superkondensatoren allerdings hauptsächlich wegen ihrer hohen Leistungsaufnahme einge-

setzt werden, ist ein Ziel, die vergleichsweise hohe Viskosität ionischer Flüssigkeiten zu verringern. Eine Strategie hierfür ist die Mischung ionischer Flüssigkeiten. So bleibt der Vorteil des geringen Dampfdrucks erhalten und gleichzeitig ergibt sich die Option, das Temperaturfenster zu vergrößern. Die Literatur beschreibt bereits binäre¹¹⁾ und ternäre Mischungen.¹²⁾ Eine andere Möglichkeit ist die Mischung ionischer Flüssigkeiten mit gängigen organischen Lösungsmitteln wie Propylencarbonat (PC) oder Acetonitril (ACN).¹³⁾ Das 7. Rahmenprogramm der EU fördert dieses Gebiet.¹⁴⁾

Brennstoffzellen

◆ Die Entwicklung von Brennstoffzellen ist ein wenig in den Hintergrund gerückt. Dennoch bietet diese Technik bei mobilen Anwendungen gegenüber Batterien nach wie vor Vorteile: Zum einen ist das Tanken eines Energieträgers oder Kraftstoffs schneller als das Aufladen aller bekannten Batterietypen, zum anderen bieten Brennstoffzel-

len größere Reichweiten, sofern andere Probleme überwunden werden, etwa die fehlende Infrastruktur für Methanol oder Wasserstoff.

Damit Polymerelektrolytbrennstoffzellen laufen, muss die Membran feucht sein. Dies begrenzt die Betriebstemperatur auf 80°C. Ein Betrieb bei Temperaturen oberhalb von 100°C hätte den Vorteil, dass das Wassermanagement innerhalb der Zelle verzichtbar wäre, dadurch würden die Herstellkosten erheblich sinken. Gleichzeitig steigt der Wirkungsgrad von Brennstoffzellen dieses Typs bei höheren Temperaturen. Aus diesen Gründen werden seit einiger Zeit protonenleitende protische ionische Flüssigkeiten (protic ionic liquids, kurz PILs) als Alternative zu Wasser erforscht, da diese aufgrund ihres geringen Dampfdrucks den Schritt zu höheren Betriebstemperaturen (angestrebt sind 130°C) ermöglichen könnten.

Typischerweise reagiert eine Brönstedt-Säure mit einer Brön-

stedt-Base zu PILs. Um möglichst thermisch stabile Materialien zu erhalten, ist die Differenz zwischen dem pK_a -Wert der Säure und der Base zu beachten: Erst bei pK_a -Wert-Differenzen oberhalb von 15 sind die erhaltenen PILs hinreichend stabil. Wie Watanabe et al. darüber hinaus zeigten, liegt das Optimum im Hinblick auf die Leerlaufspannung (open circuit voltage, OCV) bei einem ΔpK_a zwischen 16 und 18.¹⁵⁾ Aufgrund dieser und weiterer Ergebnisse auf diesem Gebiet könnte die Brennstoffzellenforschung eine Renaissance erleben.¹⁶⁾

Metallabscheidung

◆ Die elektrochemische Abscheidung von Metallen hat für den Korrosionsschutz bei Autos und Flugzeugen, aber auch für dekorative Anwendungen, etwa für die Beschichtung von Kunststoff, große technische Bedeutung. Allerdings stößt die wässrige Galvanik bei unedlen Metallen aufgrund des

schmalen elektrochemischen Fensters von Wasser, noch etwas verbreitert durch die jeweilige Überspannung, an ihre Grenzen. Daher sind einige technisch bedeutsame Metalle wie Magnesium, Titan, Tantal und Aluminium aus wässrigen Lösungen nicht abscheidbar, obwohl sie aufgrund ihrer Neigung zur Passivierung interessant wären.

Einige ionische Flüssigkeiten sind elektrochemisch deutlich stabiler als Wasser, daher ist es möglich, einige dieser unedlen Metalle aus ihnen abzuscheiden. Ein besonderes Interesse liegt auf der Abscheidung von Aluminium, die zwar seit geraumer Zeit aus der Literatur bekannt ist,¹⁷⁾ den Sprung in die Anwendung allerdings noch nicht geschafft hat. Neben der fehlenden Prozess- und Anlagentechnik sind es vor allem die Stabilität des Elektrolyten, die Geschwindigkeit der Abscheidung sowie das Nachdunkeln der beschichteten Werkstücke, die einer Einführung des Verfahrens im Wege stehen.

Blättern jetzt auch online



GDCh-Mitglieder starten ihr E-Paper hier:
www.nachrichtenausderchemie.de



In unserer eigenen Forschung erhöhten Additivpakete die Zahl möglicher Abscheidungen aus einem Elektrolyten und gleichzeitig die Geschwindigkeit der Abscheidung, die unter anderem durch Transporteigenschaften im Elektrolyten limitiert ist. Für dekorative Anwendungen wie Smartphone-Hüllen ist das Abdunkeln der beschichteten Werkstücke nach wie vor ein Problem.

Schmiermittel und Schmiermitteladditive

Obwohl tribologische Anwendungen in der gängigen wissenschaftlichen Literatur eher unterrepräsentiert sind, spielen sie technisch in einer mobilen, industrialisierten Welt eine bedeutende Rolle. In den vergangenen Jahren haben ionische Flüssigkeiten die Eigenschaften von Schmiermitteln und deren Einsatzgebiete erweitert. Grundsätzlich können reine ionische Flüssigkeiten dabei selbst als Schmiermittel dienen. Es läuft aber auch die Entwicklung von IL-basierten Additiven, um bestimmte Eigenschaften etwa in Mineralöle gezielt einzubringen.

Ein Beispiel, wie physikalisch-chemische Grundlagenforschung neue Anwendungsgebiete befruchtet, geben hier die Arbeiten von Atkin und Endres. Sie zeigen, wie stark ionische Flüssigkeiten mit elektrisch geladenen Oberflächen wechselwirken: Hierzu ermittelten die Autoren mit einem Rasterkraftmikroskop die Kraft, die erforderlich ist, die oberflächennahen Schichten von ionischer Flüssigkeiten zu durchstoßen (Abbildung S. 319). Dazu legten sie an einer Au(111)-Oberfläche eine Spannung von -1V gegen Pt an. Nach der Auftragung Kraft gegen den Abstand der Spitze zur Oberfläche ist für die erste Schicht eine Kraft von 28 nN nötig, für die zweite Schicht lediglich noch 10 nN .¹⁸⁾ Aufgrund dieser starken Wechselwirkung ist es folglich möglich, bestimmte Oberflächen(-bereiche) durch das Anlegen einer Spannung

vor Reibung und Verschleiß zu schützen.

Ionische Flüssigkeiten und Graphen

Nach Fullerenen, Kohlenstoff-Nanoröhren und Nanodiamanten ist Graphen der jüngste Star in der Reihe der Kohlenstoffallotrope.¹⁹⁾ Die zahlreichen Möglichkeiten, die diesem neuen Material zugeschrieben werden, haben die Europäische Kommission dazu veranlasst, die Forschung auf diesem Gebiet zu einem von zwei Flaggschiffprojekten für die kommenden Jahre zu erklären und mit insgesamt einer Milliarde Euro zu fördern.²⁰⁾

Es liegt nahe, bei ionischen Flüssigkeiten und Graphen nach interessanten Schnittmengen zu suchen.²¹⁾ Rogers et al. gelang in ionischen Flüssigkeiten als Lösungsmittel die Darstellung und Dispersion von oberflächenreinem Graphen durch Abtrag von Graphit.²²⁾

Wie ebenfalls von Rogers beschrieben, reduziert in ionischen Flüssigkeiten dispergiertes Graphen die inneren Wechselwirkungen und senkt somit die Viskosität. Im konkreten Anwendungsfall reichte die Beimischung von $0,03\%$ reinem Graphen zu hypergolischen ionischen Flüssigkeiten, um die Viskosität bei 0°C um bis zu $50\text{ mPa}\cdot\text{s}$ zu senken. Eine hypergolische Flüssigkeiten reagiert spontan mit einer anderen geeigneten Flüssigkeit, sobald sie mit dieser in Kontakt kommt (selbstzündende Treibstoffmischung). Die untersuchten ionischen Flüssigkeiten kommen als Alternative zu dem flüchtigen und toxischen Hydrazin in Betracht.²³⁾

Thomas Schubert studierte Chemie an den Universitäten Karlsruhe und Köln. Nach dem er im Jahr 2001 an der Universität Köln promoviert hatte, trat er in das Start-up-Unternehmen Solvent Innovation in Köln ein. Im Jahr 2003 gründete er das Unternehmen Iolitec Ionic Liquids Technologies, Heilbronn, deren Geschäftsführer er seither ist. schubert@iolitec.de



Literatur

- 1) P. Walden, Bull. Acad. Sci. 1914, 8, 405.
- 2) R. Holze, T. Jacob, Nachr. Chem. 2012, 60, 313–318.
- 3) F. Endres, MRS Bulletin 2013, 38, 567.
- 4) A. Brandt, S. Pohlmann, A. Varzi, A. Balducci, S. Passerini, MRS Bulletin 2013, 38, 554.
- 5) T. Yasuda, M. Watanabe, MRS Bulletin 2013, 3, 560.
- 6) B. O'Regan, M. Grätzel, Nature 1991, 335, 737; A. Hagfeldt, M. Grätzel, Acc. Chem. Res. 2000, 33, 269.
- 7) G. Girishkumar, B. McCloskey, A. C. Lutz, S. Swanson, W. Wilcke, J. Phys. Chem. Lett. 2010, 1, 2193; A. Kraysberg, Y. Ein-Eli, J. Power Sources 2011, 196, 886.
- 8) T. Zhang, H. Zhou, Angew. Chem. 2012, 124, 11224–11229.
- 9) S. Z. El Abedin, F. Endres, ChemPhysChem 2012, 13, 250; S. Z. El Abedin, A. Garsuch, F. Endres, Aust. J. Chem. 2012, 65, 1529.
- 10) C. Arbizzani, M. Bisio, D. Cericola, M. Lazzeri, F. Soavi, M. Mastragostino, J. Power Sources 2008, 185, 1575; J. Reiter, E. Pailard, L. Grande, M. Winter, S. Passerini, Electrochim. Acta 2013, 91, 101.
- 11) R. Lin, P.-L. Taberna, S. Fantini et al., J. Phys. Chem. Lett. 2011, 2, 2396; R. Palm, H. Kurig, K. Tonurist, A. Jänes, E. Lust, Electrochem. Commun. 2012, 2, 203.
- 12) M. A. Taige, D. Hilbert, T. Schubert, Z. Phys. Chem. 2012, 226, 129.
- 13) V. Ruiz, T. Huynh, S. R. Sivakumar, A. G. Pandolfo, RSC Adv. 2012, 2, 5591; A. Krause, A. Balducci, Electrochem. Commun. 2011, 13, 814.
- 14) Zum Beispiel EU-Projekte „NEST“ (www.project-nest.eu) und „BACCARAT“.
- 15) M. S. Miran, H. Kinoshita, T. Yasuda, M. A. B. H. Susan, M. Watanabe, Phys. Chem. Chem. Phys. 2012, 14, 5178; M. S. Miran, T. Yasuda, M. A. B. H. Susan, K. Dokko, M. Watanabe, RSC Adv. 2013, 3, 4141.
- 16) T. Yasuda, M. Watanabe, MRS Bulletin 2013, 38, 560.
- 17) R. Hempelmann, H. Natter: „Nanostructured Metals and Alloys Deposited from Ionic Liquids“ in Elektrodeposition from Ionic Liquids, Wiley-VCH, Weinheim, 2008; T. S. J. Schubert, S. Zein, El-Abedin et al.: „Electrodeposition of Metals“ in Elektrodeposition from Ionic Liquids, Wiley-VCH, Weinheim, 2008.
- 18) R. Atkin, N. Borisenko, M. Drüschler et al., Phys. Chem. Chem. Phys. 2011, 13, 6849.
- 19) A. Geim, A. Novoselov, Nobelpreis für Physik 2010 „für grundlegende Experimente mit dem zweidimensionalen Material Graphen“.
- 20) <http://graphene-flagship.eu>.
- 21) T. J. S. Schubert, CIT 2011, 83, 1468.
- 22) R. M. Frazier, D. T. Daly, S. K. Spear, R. D. Rogers, „Exfoliation of Graphite using Ionic Liquids“, Provisional Patent, November 25, 2008; PCT Int. Appl. WO, 2010065346 A1, June 10, 2010.
- 23) P. D. McCrary, P. A. Beasley, S. A. Alaniz, C. S. Griggs, R. M. Frazier, R. D. Rogers, Angew. Chem. 2012, 124, 9922.