



Metall- und reagensfreie hochselektive anodische Kreuzkupplung von Phenolen

Bernd Elsler, Dieter Schollmeyer, Katrin Marie Dyballa, Robert Franke und Siegfried R. Waldvogel*

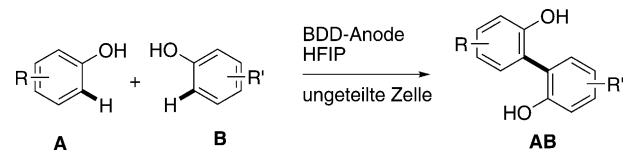
Abstract: Die direkte Kreuzkupplung von Phenolen ist eine herausfordernde chemische Umsetzung, da konkurrierende Homokupplungen stark bevorzugte Nebenreaktionen darstellen. Elektrochemische Methoden ermöglichen die Vermeidung von Oxidationsmitteln oder Metallkatalysatoren und sind daher äußerst attraktiv. Der Einsatz von Lösungsmitteln mit starker Neigung zur Wasserstoffbrückenbildung, wie Methanol in Kombination mit Ameisensäure oder 1,1,1,3,3,3-Hexafluor-2-propanol ermöglicht mittels Elektrolyse in ungeteilten Zellen die selektive Synthese von unsymmetrischen 2,2'-Biphenolen. Diese milde Methode toleriert eine Vielzahl funktioneller Gruppen, darunter auch tert-Butylgruppen, die in anderen stark elektrophilen Umgebungen nicht stabil sind, jedoch wichtige Strukturelemente für katalytische Anwendungen darstellen.

Unsymmetrische Biaryle sind äußerst wichtige Struktur-
elemente in der organischen Chemie,^[1] in der Naturstoffsyn-
these,^[2,3] in der Katalyse^[4] und in den Materialwissenschaften.^[5] Die zugrunde liegenden C-C-Kreuzkupplungen stellen
hierbei sehr vielseitig anwendbare Transformationen dar.^[3,6]
Typischerweise benötigen solche Kupplungsreaktionen oft
Abgangsfunktionalitäten und giftige, komplizierte Über-
gangsmetallkatalysatoren, welche beispielsweise auf Palladi-
um basieren.^[7] Die selektive Funktionalisierung von Arenen
durch direkte C-H-Aktivierung ist folglich eines der zentralen
Themen aktueller Forschung. Verschiedenste effiziente Me-
thoden wurden in jüngster Zeit für diese moderne Strategie
der Bindungsknüpfung entwickelt, welche nur einen akti-
vierten Kupplungspartner benötigen und mithilfe eines
Übergangsmetallkatalysators die Kreuzkupplung ermög-
lichen.^[8] C-H-Aktivierung eines Reaktionspartners kann auch
über einen organokatalytischen Weg erzielt werden.^[9] Bei der
Entwicklung von Liganden für Übergangsmetallkatalysierter

Reaktionen spielen im Besonderen 2,2'-Dihydroxybiaryle eine wichtige Rolle. Diese finden sehr breite Anwendung im Feld der sterisch gehinderten Diphosphitliganden, welche in der Rhodium-katalysierten Hydroformylierung, einer der größten homogenkatalysierten Reaktionen der Industrie, eingesetzt werden. Generell werden solche Phosphorigsäuretriester ausgehend von substituierten Biphenolen hergestellt. Ihre katalytischen Eigenschaften hängen stark von der Natur vorhandener Substituenten ab.^[10] Deshalb sind universell einsetzbare und direkte Synthesen von 2,2'-Biphenolen aus verschiedenen Phenolen von sehr großem Interesse.

So resultiert eine deutlich verbesserte Atomökonomie durch die direkte oxidative Kupplung von Arenen.^[6,11] Diese schließt die Notwendigkeit von Abgangsfunktionalitäten aus und repräsentiert einen wichtigen Durchbruch. Die vorausgehende Oxidation einer Komponente und nachfolgende Kupplung unter stark elektrophilen Bedingungen schafft Zugang zu einer Auswahl von Biarylen.^[12] Leider benötigen die meisten aktuell ausgearbeiteten Methoden sehr teure Katalysatorsysteme, und sie erzeugen große Abfallmengen.

Die elektroorganische Synthese ist eine attraktive Me-
thode für den Aufbau organischer Verbindungen,^[13] insbe-
sondere für C-C-Kupplungen.^[14] Weil lediglich Elektronen als
Reagens dienen und benutzte Kohlenstoffelektroden nach-
haltig hergestellt werden, erfüllt Elektrochemie die Bedin-
gungen der „grünen Chemie“.^[15] Die direkte elektrochemi-
sche Kreuzkupplung steht der Problematik gegenüber, dass
normalerweise individuelle Oxidationspotentiale die Selektiv-
ität der Reaktion bestimmen. Dies führt zu einer starken
Bevorzugung von Homokupplungsprodukten, wohingegen
nur Spuren des gewünschten Kreuzkupplungsproduktes ge-
bildet werden. Kürzlich umgingen Yoshida et al. dieses Di-
lemma mithilfe der „Cation-pool“-Methode und entwickelten
einen eleganten elektroorganischen Zugang zu Biarylen.^[14d,16]
Allerdings kann diese Methode bisher auf Biphenole
ausgeweitet noch im großen Maßstab durchgeführt werden.
Dadurch wird eine direkte Kreuzkupplung für die selektive
Synthese von 2,2'-Biphenolen äußerst wünschenswert. Hier
berichten wir über die erste Kreuzkupplung von Phenol- und
Naphthalenderivaten ohne den Einsatz von Abgangsfunktio-
nen, Schutzgruppen oder Reagentien in einer ungeteilten
Elektrolysezelle (Schema 1).



Schema 1. Direkte anodische Kreuzkupplung von Phenolen

[*] B. Elsler, Dr. D. Schollmeyer, Prof. Dr. S. R. Waldvogel
Institut für Organische Chemie
Johannes Gutenberg-Universität Mainz
Duesbergweg 10-14, 55128 Mainz (Deutschland)
E-Mail: waldvogel@uni-mainz.de
Homepage: <http://www.chemie.uni-mainz.de/OC/AK-Waldvogel/>
Dr. K. M. Dyballa, Prof. Dr. R. Franke
Evonik Industries AG
Paul-Baumann-Straße 1, 45772 Marl (Deutschland)
Prof. Dr. R. Franke
Lehrstuhl für Theoretische Chemie
Ruhr-Universität Bochum
44780 Bochum (Deutschland)

 Hintergrundinformationen zu diesem Beitrag sind im WWW unter <http://dx.doi.org/10.1002/ange.201400627> zu finden.

Bor-dotierter Diamant (BDD) hat inzwischen besondere Aufmerksamkeit als neuartiges Elektrodenmaterial erlangt und kann leicht durch chemische Gasphasenabscheidung gewonnen werden.^[17] Wegen seiner einzigartigen elektrochemischen Eigenschaften^[18] ermöglicht BDD neue Strategien in der elektroorganischen Synthese.^[19] Aufgrund der außergewöhnlich hohen Überspannungen in protischen Lösungsmitteln können Oxyradikale mit hoher Effizienz direkt gebildet werden.^[20] Diese hoch reaktiven Radikale werden für die Abwasserbehandlung, aber auch für die konstruktive Synthese verwendet.^[21] Fluorierte Alkohole wie 1,1,1,3,3,3-Hexafluor-2-propanol (HFIP) scheinen einen außergewöhnlichen stabilisierenden Einfluss auf diese Spinzentren zu haben, wodurch die Zersetzung der Reaktanten verhindert wird.^[22,23] Unlängst berichteten wir über die direkte Phenol-Aren-Kreuzkupplung,^[24] wobei sowohl Ausbeuten als auch Selektivitäten durch Wasser- oder Methanolzugabe zum Elektrolyten drastisch verbessert wurden.^[25] Trotz des Elektrolyt-dominierten Prozesses führen BDD-Anoden zum besten Ergebnis. Eingesetztes HFIP kann quantitativ rezykliert werden, da dieser Alkohol eine herausragende elektrochemische Stabilität aufweist.^[26] Ungeachtet der Tendenz von Phenolen, durch anodische Behandlung polycyclische Gerüste zu bilden,^[27] konnte dieses Konzept auf die Kreuzkupplung von Phenolen ausgeweitet werden.

In der anodischen Phenol-Aren-Kreuzkupplung stellten sich Guajakolderivate als passende Kupplungskomponenten heraus,^[24,26] welche in Abwesenheit anderer Kupplungspartner unsymmetrische Homodimere bildeten.^[28] 4-Methylguajakol hat ein niedrigeres Oxidationspotential und stellt damit die Komponente **A** dar, welche die Kreuzkupplungssequenz initiiert (siehe die Hintergrundinformationen). Die Elektrolysen wurden in einer ungeteilten Zelle mit einer BDD-Anode und einer Nickelkathode durchgeführt. Als Lösungsmittel wurden entweder HFIP oder HFIP/Methanol verwendet, in welchen Methyltriethylammoniummethylsulfat als Leitsalz gelöst wurde. Die Substratbreite gewünschter 2,2'-

Tabelle 1: Substratbreite der direkten anodischen Phenol-Kreuzkupplung.^[a,b]

Nr.	Bed. ^[c]	Produkt(e)	Ausb. ^[d]
1	I		1 36 %
2	I		2 39 %
3	I		3 34 %
4a	II		4a 21 %
4b			4b 23 %

Tabelle 1: (Fortsetzung)

Nr.	Bed. ^[c]	Produkt(e)	Ausb. ^[d]
5	II		5 52 %
6	II		6 63 %
7	I		7 52 %
8	II		8 50 %
9a	II ^[e]		9a 39 %
9b			9b 19 %
10 ^[f]	I		10 52 %
11	I		11 36 %
12	I		12 46 %
13a			13a 61 %
13b	I		13b 7 %
14	I		14 63 %

[a] Elektrolysebedingungen: 50 °C, galvanostatisch ($j=2.8 \text{ mA cm}^{-2}$), BDD-Anode, Nickelnetz-Kathode, ungeteilte Zelle, $Q=2 \text{ F} \cdot \eta$ (Phenol **A**), Leitsalz: 0.68 g Et₃NMe₂SOMe. [b] Verhältnis des/der Kreuzkupplungsprodukt(e) **AB** zu Homokupplungsprodukten **AA** oder **BB** (bestimmt mittels GC) jeweils > 100:1, mit Ausnahme von Nr. 10. [c] Lösungsmittel: I: HFIP + 18 Vol.-% MeOH; II: HFIP. [d] Ausbeuten der isolierten Produkte. [e] BDD-Anode und -Kathode. [f] **AB/BB** = 9:1.

Biphenole durch Kreuzkupplung von 4-Methylguajakol mit einfachen Phenolderivaten und die Variationsmöglichkeit der Substituenten sind in Tabelle 1 dargestellt. Bei allen Beispielen außer Nr. 10 wurde keine Homokupplung der einzelnen Komponenten detektiert. Die elektrochemische Vor-

gehensweise benötigt keine Blockierung aller aktivierten Positionen. Indes liefert *p*-Kresol das gemischte 2,2'-Biphenol in 36% Ausbeute, wohingegen größere Alkylsubstituenten in 4-Position von Komponente **B** ähnlich gute isolierte Ausbeuten lieferten (Nr. 1–3). Es ist bemerkenswert, dass diese Produkte eine freie und aktivierte 3-Position aufweisen. Trotz der Bildung einer kleinen Menge oligomerer Spezies können die Produkte leicht isoliert werden. Die Verwendung von *m*-Kresol als Phenolkomponente **B** lieferte nur zwei Kreuzkupplungsprodukte (Nr. 4). Weil die 4- und 6-Positionen von *m*-Kresol leichter zugänglich und aktiver sind, werden beide Kupplungsprodukte in nahezu identischer Menge erhalten. Substrate mit sperrigeren Substituenten führen nicht nur zu einer Erhöhung der Ausbeute, sondern zur ausschließlichen Bildung des gewünschten 2,2'-Biphenols mit 52% bzw. 63% Ausbeute (Nr. 5 und 6). 3,4-Disubstituierte Phenole **B** lieferten verlässliche Ausbeuten über 50% (Nr. 7–9). Sind Bromsubstituenten involviert, kommt es neben der Kupplung ebenso zu einer partiellen Dehalogenierung an der Kathode. Interessanterweise wurde nach der Debromierung **9b** ohne die entsprechende isomere Verbindung beobachtet (Nr. 9). Folglich können Bromsubstituenten spurlos entfernt und somit als Schutzgruppen für diese Umsetzung benutzt werden. 2,4-Dimethylphenol kann ebenso einer Kreuzkupplung mit 52% Ausbeute unterzogen werden (Nr. 10). Der Austausch einer Methylgruppe *ortho* oder *para* durch eine *tert*-Butylgruppe reduziert die Ausbeute, zeigt jedoch identisch exklusive Selektivitäten für die Kreuzkupplung (Nr. 11 und 12). 2-Naphthole sind ebenso für die elektrochemische Kupplung geeignet. Mit 4-Methylguajakol werden ausschließlich Kreuzkupplungsprodukte gefunden. Das erwünschte 2,2'-Dihydroxybaryl **13a** wurde mit einer guten Ausbeute von 61% erhalten. Aus der Elektrolysemischung konnten ferner 7% der isomeren Verbindung erhalten werden (Nr. 13). Der Wechsel auf ein elektronenreicheres Substrat **A** führte zur Bildung eines einzigen Kreuzkupplungsprodukts in 63% Ausbeute (Nr. 14). Alle Strukturen wurden vollständig charakterisiert und die meisten der gezeigten Substanzen sind neu (siehe die Hintergrundinformationen). Die Molekülstrukturen wurden durch Vermessung geeigneter Einkristalle bestätigt.

Trotz der Effizienz für die Rückführung des genutzten HFIP kann die ökologische Problematik hochfluorierter Lösungsmittel nicht verleugnet werden. Daher wäre ein anderes Lösungsmittelsystem äußerst wünschenswert. Erste Untersuchungen für die Phenol-Aren-Kupplung in elektrochemischen Mikroreaktoren deuteten darauf hin, dass Ameisensäure ähnliche Eigenschaften wie HFIP aufweist.^[29] Ein geeignetes Screening für die Phenol-Phenol-Kreuzkupplung offenbarte einen gleichen Lösungsmitteleffekt (Tabelle 2).

Die Verwendung von Ameisensäure statt HFIP erzielte dieselben Selektivitäten für die Kreuzkupplung, Ausbeuten für entsprechende 2,2'-Dihydroxybaryle fielen jedoch niedriger aus. Die reduzierte Effizienz der Kreuzkupplung kann auf die erheblich geringere anodische Stabilität von Ameisensäure zurückgeführt werden. Trotz alledem bleibt der Umsatz aufgrund der niedrigen Kosten, des direkten Prozesses und des verbesserten Umweltaspektes zur Synthese von **13a** in 45% Ausbeute sinnvoll (Nr. 3b). Verglichen mit

Tabelle 2: Vergleich von HFIP und Ameisensäure für die anodische Biphenolsynthese.^[a,b]

Nr.	Lösungsmittel	Produkt(e)	Ausb. ^[c]
1 a	HFIP + 18 Vol.-% MeOH		36%
1 b	HCOOH + 9 Vol.-% MeOH		13%
2 a	HFIP		50%
2 b	HCOOH + 9 Vol.-% MeOH		28%
3 a	HFIP + 18 Vol.-% MeOH		61%
3 b	HCOOH + 9 Vol.-% MeOH		45%
4 a	HFIP + 18 Vol.-% MeOH		63%
4 b	HCOOH + 9 Vol.-% MeOH		34%

[a] Elektrolysebedingungen: 50°C, galvanostatisch ($j=2.8 \text{ mA cm}^{-2}$), BDD-Anode, Nickelnetz-Kathode, ungeteilte Zelle, $Q=2 \text{ F} \cdot \text{g}^{-1}$ (Phenol **A**), Leitsalz: 0.68 g Et₃NMe₂SOMe. [b] Verhältnis des/der Kreuzkupplungsprodukt(e) **AB** zu Homokupplungsprodukten **AA** oder **BB** bestimmt mittels GC, jeweils $>100:1$. [c] Ausbeuten der isolierten Produkte.

herkömmlichen Methoden für ähnliche 2,2'-Biphenole können die Schritte der O-Schützung, Einführung von Abgangsgruppen in beide Kupplungspartner, katalysierte Kupplung und Entschützung abgekürzt und durch eine einfache Elektrolyse ersetzt werden.

Eingegangen am 20. Januar 2014
Online veröffentlicht am 18. März 2014

Stichwörter: Anodische Biarylsynthese · C-C-Kupplungen · Grüne Chemie · Oxidative Kupplungen · Phenol-Kreuzkupplungen

- [1] a) R. Noyori, *Angew. Chem.* **2002**, *114*, 2108–2123; *Angew. Chem. Int. Ed.* **2002**, *41*, 2008–2022; b) C. A. Mulrooney, X. Li, E. S. DiVirgilio, M. C. Kozlowski, *J. Am. Chem. Soc.* **2003**, *125*, 6856–6857.
- [2] a) G. Bringmann, A. J. P. Mortimer, P. A. Keller, M. J. Gresser, J. Garner, M. Breuning, *Angew. Chem.* **2005**, *117*, 5518–5563; *Angew. Chem. Int. Ed.* **2005**, *44*, 5384–5427; b) G. Bringmann, T. Gulder, T. A. M. Gulder, M. Breuning, *Chem. Rev.* **2011**, *111*, 563–639; c) M. C. Kozlowski, B. J. Morgan, E. C. Linton, *Chem. Soc. Rev.* **2009**, *38*, 3193.
- [3] J. Hassan, M. Sévignon, C. Gozzi, E. Schulz, M. Lemaire, *Chem. Rev.* **2002**, *102*, 1359–1470.
- [4] a) J. B. Alexander, D. S. La, D. R. Cefalo, A. H. Hoveyda, R. R. Schrock, *J. Am. Chem. Soc.* **1998**, *120*, 4041–4042; b) A. F. Kiely, J. A. Jernelius, R. R. Schrock, A. H. Hoveyda, *J. Am. Chem. Soc.* **2002**, *124*, 2868–2869; c) R. Singh, C. Czekelius, R. R. Schrock, P. Müller, A. H. Hoveyda, *Organometallics* **2007**, *26*, 2528–2539; d) K. C. Hultsch, J. A. Jernelius, A. H. Hoveyda, R. R. Schrock, *Angew. Chem.* **2002**, *114*, 609–613; *Angew. Chem. Int. Ed.* **2002**, *41*, 589–593; e) K. Mikami, T. Korenaga, M. Terada, T. Ohkuma, T. Pham, R. Noyori, *Angew. Chem.* **1999**, *111*, 517–

- 519; *Angew. Chem. Int. Ed.* **1999**, *38*, 495–497; f) G. A. Cortez, R. R. Schrock, A. H. Hoveyda, *Angew. Chem.* **2007**, *119*, 4618–4622; *Angew. Chem. Int. Ed.* **2007**, *46*, 4534–4538.
- [5] a) A. C. Grimsdale, K. L. Chan, R. E. Martin, P. G. Jokisz, A. B. Holmes, *Chem. Rev.* **2009**, *109*, 897–1091; b) P. Kirsch, M. Bremer, *Angew. Chem.* **2000**, *112*, 4384–4405; *Angew. Chem. Int. Ed.* **2000**, *39*, 4216–4235; c) L. F. Tietze, G. Kettschau, U. Heuschert, G. Nordmann, *Chem. Eur. J.* **2001**, *7*, 368–373; d) P. W. N. M. van Leeuwen, P. C. J. Kamer, C. Claver, O. Pàmies, M. Diéguéz, *Chem. Rev.* **2011**, *111*, 2077–2118; e) S.-J. Su, D. Tanaka, Y.-J. Li, H. Sasabe, T. Takeda, J. Kido, *Org. Lett.* **2008**, *10*, 941–944.
- [6] G. P. McGlacken, L. M. Bateman, *Chem. Soc. Rev.* **2009**, *38*, 2447.
- [7] a) X. Chen, K. M. Engle, D.-H. Wang, J.-Q. Yu, *Angew. Chem.* **2009**, *121*, 5196–5217; *Angew. Chem. Int. Ed.* **2009**, *48*, 5094–5115; b) I. V. Seregin, V. Gevorgyan, *Chem. Soc. Rev.* **2007**, *36*, 1173–1193; c) L. Ackermann, *Top. Organomet. Chem.* **2008**, *24*, 35–60.
- [8] a) L. Ackermann, *Modern Arylation Methods*, Wiley-VCH, Weinheim, **2009**; b) G. Dyker, *Handbook of C-H Transformations*, Wiley-VCH, Weinheim, **2005**; c) J. A. Labinger, J. E. Bercaw, *Nature* **2002**, *417*, 507–514; d) D. Alberico, M. E. Scott, M. Lautens, *Chem. Rev.* **2007**, *107*, 174–238; e) K. Godula, *Science* **2006**, *312*, 67–72.
- [9] C.-L. Sun, H. Li, D.-G. Yu, M. Yu, X. Zhou, X.-Y. Lu, K. Huang, S.-F. Zheng, B.-J. Li, Z.-J. Shi, *Nat. Chem.* **2010**, *2*, 1044–1049.
- [10] R. Franke, D. Selent, A. Börner, *Chem. Rev.* **2012**, *112*, 5675–5732.
- [11] a) D. R. Stuart, K. Fagnou, *Science* **2007**, *316*, 1172–1175; b) T. Dohi, M. Ito, K. Morimoto, M. Iwata, Y. Kita, *Angew. Chem.* **2008**, *120*, 1321–1324; *Angew. Chem. Int. Ed.* **2008**, *47*, 1301–1304.
- [12] S. K. R. Parumala, R. K. Peddinti, *Org. Lett.* **2013**, *15*, 3546–3549.
- [13] a) H. J. Schäfer, A. J. Bard, M. Stratmann, *Organic Electrochemistry, Encyclopedia of Electrochemistry*, Wiley-VCH, Weinheim, **2004**; b) H. Lund, O. Hammerich, *Organic Electrochemistry*, Marcel Dekker, New York, **2001**.
- [14] a) H. J. Schäfer, *Angew. Chem.* **1981**, *93*, 978–1000; *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.* **1981**, *20*, 911–934; b) F. Tang, K. D. Moeller, *J. Am. Chem. Soc.* **2007**, *129*, 12414–12415; c) H.-C. Xu, K. D. Moeller, *Angew. Chem.* **2010**, *122*, 8176–8179; *Angew. Chem. Int. Ed.* **2010**, *49*, 8004–8007; d) T. Morofuji, A. Shimizu, J.-i. Yoshida, *Angew. Chem.* **2012**, *124*, 7371–7374; *Angew. Chem. Int. Ed.* **2012**, *51*, 7259–7262.
- [15] a) E. Steckhan, T. Arns, W. R. Heineman, G. Hilt, D. Hoormann, J. Jörissen, L. Kröner, B. Lewall, H. Pütter, *Chemosphere* **2001**, *43*, 63–73; b) P. Anastas, N. Eghbali, *Chem. Soc. Rev.* **2009**, *38*, 301–312; c) R. A. Sheldon, *Green Chem.* **2007**, *9*, 1273–1283; d) H. J. Schäfer, *C. R. Chim.* **2011**, *14*, 745–765; e) H. J. Schäfer, M. Harenbrock, E. Klocke, M. Plate, A. Weiper-Idelmann, *Pure Appl. Chem.* **2007**, *79*, 2047–2057; f) B. A. Frontana-Uribe, R. D. Little, J. G. Ibanez, A. Palma, R. Vasquez-Medrano, *Green Chem.* **2010**, *12*, 2099–2119.
- [16] a) J.-i. Yoshida, K. Kataoka, R. Horcajada, A. Nagaki, *Chem. Rev.* **2008**, *108*, 2265–2299.
- [17] *Diamond Electrochemistry* (Hrsg.: A. Fujishima, Y. Einaga), BKC Inc., Tokyo, and Elsevier, Amsterdam, **2005**.
- [18] *Electrochemistry for the Environment* (Hrsg.: C. Comninellis, G. Chen), Springer, New York, **2010**.
- [19] a) *Synthetic Diamond Films—Preparation, Electrochemistry, Characterization and Applications* (Hrsg.: E. Brillas, C. A. Martínez-Huitle), Wiley-VCH, Weinheim, **2011**; b) S. R. Waldvogel, B. Elsler, *Electrochim. Acta* **2012**, *82*, 434–443; c) S. R. Waldvogel, S. Mentizi, A. Kirste, *Top. Curr. Chem.* **2012**, *320*, 1–31.
- [20] B. Marselli, J. Garcia-Gomez, P. A. Michaud, M. A. Rodrigo, C. Comninellis, *J. Electrochem. Soc.* **2003**, *150*, D79–D83.
- [21] I. M. Malkowsky, U. Griesbach, H. Pütter, S. R. Waldvogel, I. M. Malkowsky, U. Griesbach, H. Pütter, S. R. Waldvogel, *Eur. J. Org. Chem.* **2006**, 4569–4572.
- [22] L. Eberson, M. P. Hartshorn, O. Persson, *J. Chem. Soc. Perkin Trans. 2* **1995**, 1735–1744.
- [23] L. Eberson, O. Persson, M. P. Hartshorn, *Angew. Chem.* **1995**, *107*, 2417–2418; *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.* **1995**, *34*, 2268–2269.
- [24] A. Kirste, G. Schnakenburg, F. Stecker, A. Fischer, S. R. Waldvogel, *Angew. Chem.* **2010**, *122*, 983–987; *Angew. Chem. Int. Ed.* **2010**, *49*, 971–975.
- [25] A. Kirste, B. Elsler, G. Schnakenburg, S. R. Waldvogel, *J. Am. Chem. Soc.* **2012**, *134*, 3571–3576.
- [26] R. Francke, D. Cericola, R. Kötz, D. Weingarth, S. R. Waldvogel, *Electrochim. Acta* **2012**, *62*, 372–380.
- [27] a) J. Barjau, G. Schnakenburg, S. R. Waldvogel, *Angew. Chem.* **2011**, *123*, 1451–1455; *Angew. Chem. Int. Ed.* **2011**, *50*, 1415–1419; b) J. Barjau, P. Koenigs, O. Kataeva, S. R. Waldvogel, *Synlett* **2008**, 2309–2312; c) J. Barjau, G. Schnakenburg, S. R. Waldvogel, *Synthesis* **2011**, 2054–2061; d) J. Barjau, J. Fleischhauer, G. Schnakenburg, S. R. Waldvogel, *Chem. Eur. J.* **2011**, *17*, 14785–14791.
- [28] A. Kirste, G. Schnakenburg, S. R. Waldvogel, *Org. Lett.* **2011**, *13*, 3126–3129.
- [29] T. Kashiwagi, B. Elsler, S. R. Waldvogel, T. Fuchigami, M. Atobe, *J. Electrochem. Soc.* **2013**, *160*, G3058–G3061.