

Organokatalytische oxidative Anellierung von Benzamid-Derivaten mit Alkinen**

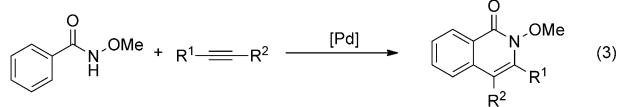
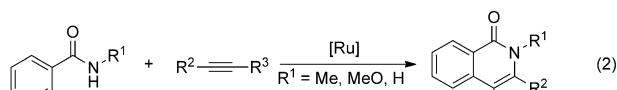
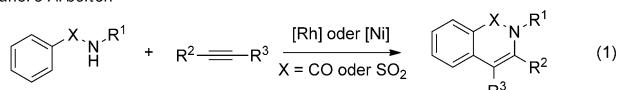
Srimanta Manna und Andrey P. Antonchick*

Abstract: Eine organokatalytische Anellierung durch Funktionalisierung von Benzamid-Derivaten mit Alkinen wurde entwickelt. Wir berichten über einen neuen Ansatz für Cycloadditionen unter Verwendung von einfachen Katalysatoren wie Iodbenzol und Peressigsäure als Oxidationsmittel. Diese milden Reaktionsbedingungen ermöglichen die einfache und schnelle Synthese von Isochinolonen. Eine bemerkenswerte Selektivität der Anellierung wurde für unsymmetrische disubstituierte Alkine demonstriert.

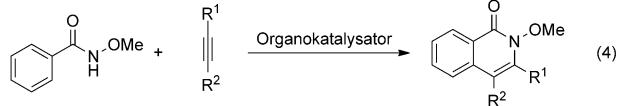
C-H-Funktionalisierungen wurden in den letzten Jahrzehnten entwickelt und stellen eine attraktive Strategie zur Erhöhung molekularer Komplexität dar. Übergangsmetallkatalysierte C-H-Funktionalisierungen sind ein intensiv untersuchter Bereich von großer Bedeutung.^[1] Methoden zur direkten Kupplung nichtfunktionalisierter Verbindungen bilden eine umweltverträgliche und wirtschaftlich attraktive Synthesestrategie für die gewünschten Produkte. Die Entwicklung von effizienten, direkten oxidativen Kreuzkupplungsmethoden ist sehr gefragt.^[1]

Isochinoline und Isochinolone sind wichtige heterocyclische Gerüste mit einer großen Bandbreite an biologischen Aktivitäten.^[2] Mehrere attraktive Syntheserouten zu Isochinolonen unter Verwendung von übergangsmetallkatalysierten Prozessen wurden in den letzten Jahren entwickelt.^[3–8] Beeindruckende Anellierungen mit Alkinen wurden zuerst von Fagnou und Mitarbeitern unter Einsatz einer Rhodium-katalysierten direkten C-H-Aktivierung entwickelt.^[3a] Interessanterweise demonstrierte Rovis' Gruppe unabhängig davon die Anellierung von Benzamiden mit Alkinen und Alkenen durch Rhodium-katalysierte C-H-Funktionalisierung [Schema 1, Gl. (1)].^[4a] Kürzlich berichteten die Gruppen von Ackermann und Wang über einen effizienten Ruthenium-katalysierten Ansatz zur Anellierung von Benzaminen und Alkinen [Schema 1, Gl. (2)].^[5] Vor kurzem wurde eine Palladium-katalysierte Synthese von Isochinolonen von Huang und Mitarbeitern entwickelt [Schema 1, Gl. (3)].^[6] In

Frühere Arbeiten



Diese Arbeit



Schema 1. Anellierung von Benzamid- und Benzsulfonamid-Derivaten mit Alkinen.

der Regel erfordern übergangsmetallkatalysierte Anellierungen hohe Temperaturen, externe Oxidationsmittel und lange Reaktionszeiten. Es ist hervorzuheben, dass metallfreie Ansätze zur Anellierung von Benzamid-Derivaten mit Alkinen noch nie beschrieben wurden. Darüber hinaus ist eine milde, effiziente und organokatalytische Synthese von Isochinolonen durch Anellierung von Alkinen und Benzamiden sehr gefragt. Hier berichten wir über die erste metallfreie Anellierung von Alkinen durch kaskadenartige C-C- und C-N-Bindungsbildung unter organokatalytischen Reaktionsbedingungen [Schema 1, Gl. (4)].

Wir begannen unsere Studien zur Anellierung unter Verwendung von *N*-Methoxybenzamid (**1a**) und Diphenylacetylen (**2a**) als Startmaterialien in Gegenwart von (Diacetoxyiod)benzol (PIDA) als Oxidationsmittel in 1,1,1,3,3,3-Hexafluor-2-propanol (HFIP) bei Raumtemperatur (Tabelle 1).^[10] Dabei konnte das Anellierungsprodukt in 40 % Ausbeute isoliert werden.^[11] Des Weiteren führte der Einsatz von PhI(OCOCF₃)₂ nicht zu dem gewünschten Produkt (Tabelle 1, Nr. 1 und 2). Durch diese ersten Ergebnisse ermutigt, testeten wir organokatalytische Bedingungen mit Iodbenzol als Katalysator in Gegenwart von Oxidationsmitteln wie *m*-CPBA. Die Verwendung von substochiometrischen Mengen an Iodbenzol resultierte in der Bildung des Produkts **3a** mit höherer Ausbeute (Tabelle 1, Nr. 3). Bei Untersuchungen mit verschiedenen Oxidationsmitteln stellte sich Peressigsäure als das beste Oxidationsmittel zur Bildung des Isochinolons **3a** mit 68 % Ausbeute heraus (Tabelle 1, Nr. 3–6). HFIP war das beste Lösungsmittel, um das gewünschte Anellierungspro-

[*] S. Manna, Dr. A. P. Antonchick

Abteilung Chemische Biologie
Max-Planck-Institut für Molekulare Physiologie
Otto-Hahn-Straße 11, 44227 Dortmund (Deutschland)
und
Fakultät Chemie, Chemische Biologie
Technische Universität Dortmund
Otto-Hahn-Straße 6, 44221 Dortmund (Deutschland)
E-Mail: andrey.antonchick@mpi-dortmund.mpg.de

[**] Wir danken Prof. Dr. Herbert Waldmann für seine großzügige Unterstützung.

Hintergrundinformationen zu diesem Beitrag sind im WWW unter <http://dx.doi.org/10.1002/ange.201404222> zu finden.

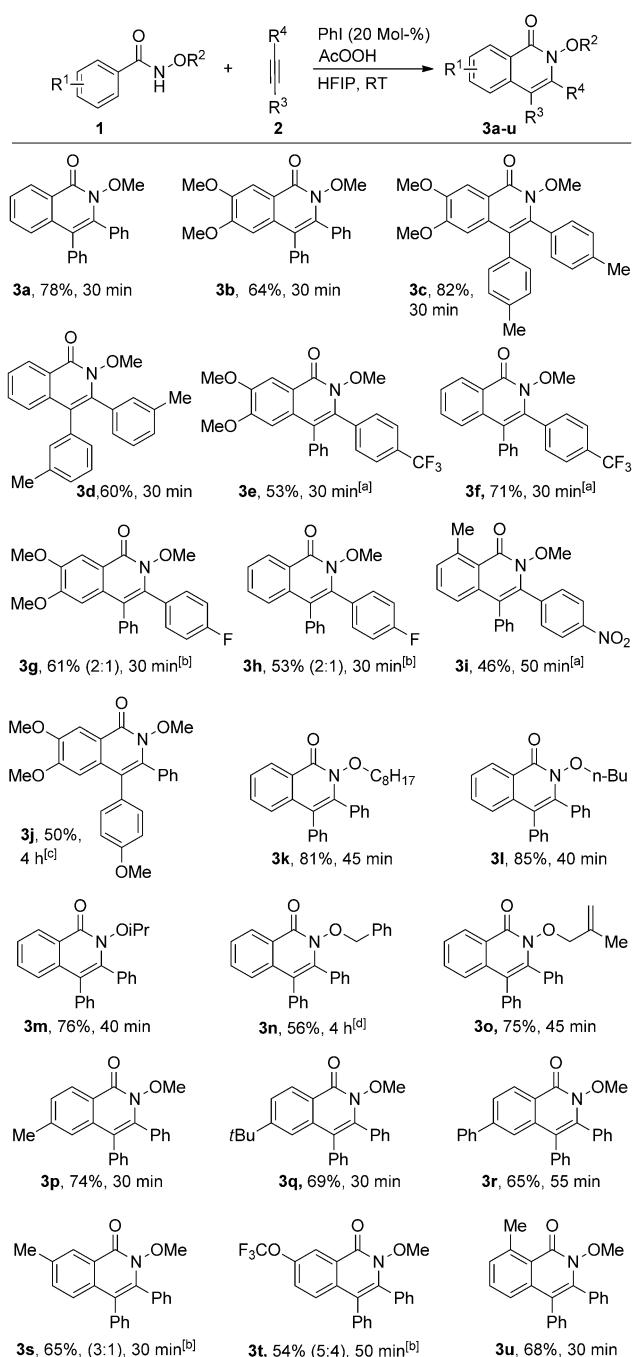
Tabelle 1: Optimierung der organokatalysierten Isochinolon-Synthese.^[a]

Nr.	Lösungsmittel	RI	Oxidationsmittel	Ausbeute [%] ^[b]
1	HFIP	–	PhI(OAc) ₂	40
2	HFIP	–	PIFA	n.d.
3 ^[c]	HFIP	PhI	<i>m</i> -CPBA	52
4	HFIP	PhI	AcOOH	68
5	HFIP	PhI	DTHP	n.d.
6	HFIP	PhI	H ₂ O ₂	n.d.
7	CF ₃ CH ₂ OH	PhI	AcOOH	44
8	HFIP/CH ₂ Cl ₂ (1:1)	PhI	AcOOH	41
9	CHCl ₃	PhI	AcOOH	n.d.
10	MeOH	PhI	AcOOH	n.d.
11	CICH ₂ CH ₂ Cl	PhI	AcOOH	n.d.
12	HFIP	4-MeOC ₆ H ₄ I	AcOOH	5
13	HFIP	4-MeC ₆ H ₄ I	AcOOH	20
14	HFIP	4-NO ₂ C ₆ H ₄ I	AcOOH	n.d.
15 ^[d]	HFIP	A	AcOOH	64
16 ^[e]	HFIP	PhI	AcOOH	73
17 ^[e,f]	HFIP	PhI	AcOOH	78
18 ^[g,e]	HFIP	PhI	AcOOH	55

[a] Reaktionsbedingungen: **1a** (0.15 mmol), **2a** (0.18 mmol), RI (20 Mol-%) und Oxidationsmittel (2 Äquiv.) in Lösungsmittel (1.0 mL) und offenem Reaktionsgefäß für 30 min. [b] Ausbeute an isoliertem Produkt nach Säulenchromatographie. [c] Mit 1.5 Äquiv. *m*-CPBA. [d] Mit 10 Mol-% 2,2'-Diod-4,4',6,6'-tetramethyl-1,1'-biphenyl (A). [e] Mit 1.5 Äquiv. AcOOH. [f] AcOOH wurde portionsweise in 15 min hinzugegeben. [g] Mit 15 Mol-% PhI. n.d. = nicht detektiert.

dukt zu erhalten: Die Bildung von **3a** wurde unter Verwendung von EtOAc, CHCl₃, MeOH und DCE als Lösungsmitteln nicht beobachtet (Tabelle 1, Nr. 7–11; siehe auch die Hintergrundinformationen). Die Anwendung von CF₃CH₂OH als Lösungsmittel resultierte in einer reduzierten Ausbeute des gewünschten Produktes **3a**. Als nächstes untersuchten wir verschiedene Aryliodide als mögliche Katalysatoren (Tabelle 1, Nr. 12–15). Unter den getesteten Verbindungen lieferte Iodbenzol das beste Ergebnis. Die Ausbeute des Anellierungsprodukts wurde durch portionsweise Zugabe von Peressigsäure erhöht. Der Zusatz von 1.5 Äquivalenten Peressigsäure und 20 Mol-% Katalysator erwies sich als optimal (Tabelle 1, Nr. 16–18; siehe auch die Hintergrundinformationen). Unter optimierten Bedingungen wurde das gewünschte Produkt **3a** mit 78% Ausbeute in 30 Minuten erhalten (Tabelle 1, Nr. 17).

Mit den optimierten Reaktionsbedingungen erforschten wir als nächstes die Anwendbarkeit der Reaktion mit einer Vielzahl von substituierten Alkinen (Schema 2). Die Anellierungen von Alkinen mit elektronenziehenden und elektronenschiebenden Gruppen ergaben die cyclisierten Produkte problemlos und in guten Ausbeuten. Symmetrische disubstituierte Diphenylacetylene reagierten gut und lieferten die gewünschten Produkte in 60–82% Ausbeute (Schema 2, **3b–d**). Hervorzuheben ist, dass bei Verwendung von *N*,3,4-Trimethoxybenzamid als Kupplungspartner selektiv ein Regioisomer gebildet wurde (Schema 2, **3b**, **3c**). Zahlreiche funktionelle Gruppen, wie Trifluormethyl, Fluor, Nitro und Methoxy, wurden unter den milden organokatalytischen Reaktionsbedingungen toleriert (Schema 2, **3e–j**). Auch mit Methoxy-, Nitro- und Trifluormethyl-Gruppen substituierte unsymmetrische Diphenylacetylene lieferten



Schema 2: Anwendungsbereich der organokatalysierten Anellierung. Reaktionsbedingungen: **1** (0.15 mmol), **2** (0.18 mmol), 20 Mol-% PhI und AcOOH (1.5 Äquiv.) in HFIP bei RT. [a] Mit 25 Mol-% PhI. [b] Das Hauptisomer ist dargestellt. [c] PhI(OAc)₂ (1.5 Äquiv.) wurde anstelle von PhI und AcOOH verwendet. [d] Katalysator A (10 Mol-%), CF₃CO₂H (5 Äquiv.) und AcOOH (2 Äquiv.) wurden in 1,2-Dichlorethan (2 mL) verwendet.

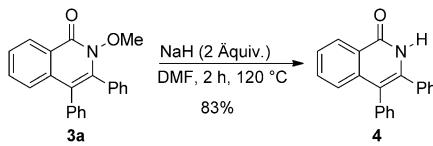
tiv ein Regioisomer gebildet wurde (Schema 2, **3b**, **3c**). Zahlreiche funktionelle Gruppen, wie Trifluormethyl, Fluor, Nitro und Methoxy, wurden unter den milden organokatalytischen Reaktionsbedingungen toleriert (Schema 2, **3e–j**). Auch mit Methoxy-, Nitro- und Trifluormethyl-Gruppen substituierte unsymmetrische Diphenylacetylene lieferten

einzelne Regioisomere, was mit analogen übergangsmetallkatalysierten Prozessen nicht gelang (Schema 2; **3e**, **3f**, **3i**, **3j**). Allerdings führte der Einsatz von Diphenylacetylenen, die Gruppen mit schwachem elektronischem Effekt, beispielsweise Fluor, aufwiesen, zur Bildung von Regioisomerengemischen (Schema 2; **3g**, **3h**).

Nach der Untersuchung der Anwendbarkeit von Alkinen wurden verschiedene am Stickstoffatom substituierte Benzamide in der Anellierung mit Diphenylacetylenen getestet. Wir beobachteten, dass Substrate mit einem breiten Spektrum an Alkoxygruppen unter den organokatalytischen Reaktionsbedingungen eingesetzt werden konnten und die Produkte in 56–85 % Ausbeute ergaben (Schema 2, **3k**–**o**). Eine Doppelbindung wird unter den oxidativen Reaktionsbedingungen toleriert (Schema 2, **3o**), doch die Verwendung von *N*-Alkyl- und *N*-Aryl-Benzamiden führte nicht zur Bildung der gewünschten Produkte. Folglich ist die Alkoxygruppe am Stickstoffatom des Benzamids essenziell für die erfolgreiche organokatalytische Anellierung.

Wir wendeten unsere Aufmerksamkeit als nächstes verschiedenen im aromatischen Teil substituierten Benzamiden zu (Schema 2; **3p**–**u**). Generell wurden Substituenten in *ortho*-, *meta*- und *para*-Position toleriert. Dennoch resultierten Reaktionen mit *meta*-substituierten Derivaten in der Bildung von Regioisomerengemischen (Schema 2; **3s**, **3t**). Während Benzamide mit elektronenschiebenden und elektronisch neutralen Substituenten die gewünschten Isochinolone ergaben, unterdrückten elektronenziehende Gruppen die Bildung der Anellierungsprodukte. Zusammengefasst haben wir aber die breite Anwendbarkeit der Anellierung in Bezug auf verschiedene Kupplungspartner demonstriert.

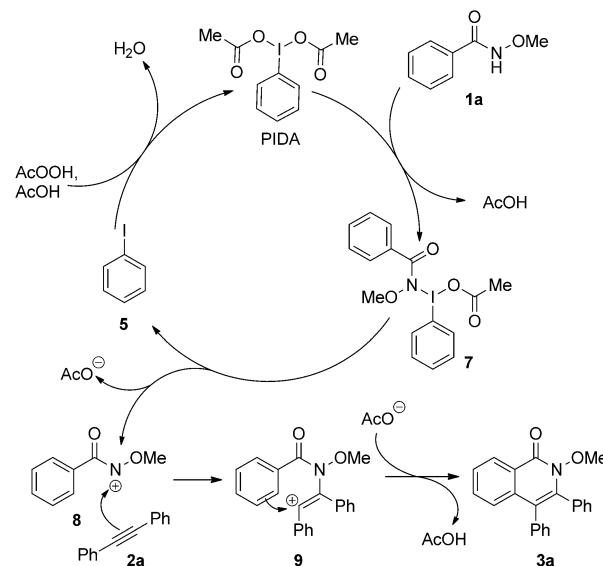
Die erhaltenen Produkte können einfach durch Spaltung der N-O-Bindungen zu substituierten Isochinolin-1(2*H*)onen entschützt werden.^[6] Beispielsweise ergab die Behandlung von **3a** mit Natriumhydrid das gewünschte Produkt mit 83 % Ausbeute (Schema 3).



Schema 3. Entschützung von Isochinolon **3a**.

Basierend auf früheren Studien wurde ein möglicher Mechanismus in Schema 4 dargestellt. Zunächst wird Iodbenzol (**5**) zu PIDA oxidiert. Die nachfolgende Reaktion von PIDA mit **1a** erzeugt durch Ligandenaustausch am hypervalenten Iodzentrum das Intermediat **7**. Im Anschluss werden das Nitreniumion **8** und Iodbenzol (**5**) durch Disproportionierung von **7** gebildet. Das Nitreniumion **8** wird unter Bildung des Carbeniumions **9** von dem Alkin **2a** abgefangen. Eine anschließende intermolekulare Friedel-Crafts-Reaktion resultiert in dem gewünschten Isochinolon **3a** (Schema 4).

Zusammenfassend haben wir eine Iodbenzol-katalysierte regioselektive Anellierung von *N*-Alkoxybenzamiden mit leicht zugänglichen Alkinen beschrieben. Einfache Organokatalysatoren ermöglichen diesen neuen, schnellen Ansatz



Schema 4. Vorgeschlagener Mechanismus zur organokatalysierten Anellierung von Benzamiden.

zur Synthese von Isochinolonen. Die gewünschten Produkte bildeten sich glatt bei Raumtemperatur in kurzer Zeit unter Verwendung von Peressigsäure als Oxidationsmittel. Eine bemerkenswert hohe Regioselektivität wurde für die Anellierung von unsymmetrischen Diarylacetylenen beschrieben. Dies demonstriert die Überlegenheit des hier vorgestellten organokatalytischen Ansatzes gegenüber übergangsmetallkatalysierten Reaktionen.

Eingegangen am 11. April 2014
Online veröffentlicht am 21. Mai 2014

Stichwörter: Alkine · Anellierungen · Heterocyclen · Hypervalente Iodverbindungen · Organokatalyse

- [1] Ausgewählte aktuelle Übersichten: a) S. A. Girard, T. Knauber, C. J. Li, *Angew. Chem.* **2014**, *126*, 76–103; *Angew. Chem. Int. Ed.* **2014**, *53*, 74–100; b) R. Kumar, E. V. Van der Eycken, *Chem. Soc. Rev.* **2013**, *42*, 1121–1146; c) C. Zhang, C. H. Tang, N. Jiao, *Chem. Soc. Rev.* **2012**, *41*, 3464–3484; d) J. Yamaguchi, A. D. Yamaguchi, K. Itami, *Angew. Chem.* **2012**, *124*, 9092–9142; *Angew. Chem. Int. Ed.* **2012**, *51*, 8960–9009; e) G. Y. Song, F. Wang, X. W. Li, *Chem. Soc. Rev.* **2012**, *41*, 3651–3678; f) F. W. Patureau, J. Wencel-Delord, F. Glorius, *Aldrichimica Acta* **2012**, *45*, 31–41; g) S. R. Neufeld, M. S. Sanford, *Acc. Chem. Res.* **2012**, *45*, 936–946; h) A. J. Hickman, M. S. Sanford, *Nature* **2012**, *484*, 177–185; i) K. M. Engle, T. S. Mei, M. Wasa, J. Q. Yu, *Acc. Chem. Res.* **2012**, *45*, 788–802; j) D. A. Colby, A. S. Tsai, R. G. Bergman, J. A. Ellman, *Acc. Chem. Res.* **2012**, *45*, 814–825; k) A. N. Campbell, S. S. Stahl, *Acc. Chem. Res.* **2012**, *45*, 851–863; l) T. Brückl, R. D. Baxter, Y. Ishihara, P. S. Baran, *Acc. Chem. Res.* **2012**, *45*, 826–839; m) P. B. Arockiam, C. Bruneau, P. H. Dixneuf, *Chem. Rev.* **2012**, *112*, 5879–5918; n) J. Wencel-Delord, T. Droege, F. Liu, F. Glorius, *Chem. Soc. Rev.* **2011**, *40*, 4740–4761; o) L. McMurray, F. O'Hara, M. J. Gaunt, *Chem. Soc. Rev.* **2011**, *40*, 1885–1898; p) S. H. Cho, J. Y. Kim, J. Kwak, S. Chang, *Chem. Soc. Rev.* **2011**, *40*, 5068–5083; q) T. C. Boorman, I. Larrosa, *Chem. Soc. Rev.* **2011**, *40*, 1910–1925; r) O. Baudoin,

- Chem. Soc. Rev.* **2011**, *40*, 4902–4911; s) L. Ackermann, *Chem. Rev.* **2011**, *111*, 1315–1345; t) I. A. I. Mkhaldid, J. H. Barnard, T. B. Marder, J. M. Murphy, J. F. Hartwig, *Chem. Rev.* **2010**, *110*, 890–931; u) T. W. Lyons, M. S. Sanford, *Chem. Rev.* **2010**, *110*, 1147–1169; v) D. A. Colby, R. G. Bergman, J. A. Ellman, *Chem. Rev.* **2010**, *110*, 624–655; w) D. Balcells, E. Clot, O. Eisenstein, *Chem. Rev.* **2010**, *110*, 749–823.
- [2] a) P. Giri, G. S. Kumar, *Mini-Rev. Med. Chem.* **2010**, *10*, 568–577; b) K. Bhadra, G. S. Kumar, *Mini-Rev. Med. Chem.* **2010**, *10*, 1235–1247; c) A. Capasso, S. Piacente, N. De Tommasi, L. Rastrelli, C. Pizza, *Curr. Med. Chem.* **2006**, *13*, 807–812; d) K. W. Bentley, *Nat. Prod. Rep.* **2006**, *23*, 444–463; e) K. W. Bentley, *Nat. Prod. Rep.* **2005**, *22*, 249–268; f) V. A. Glushkov, Y. V. Shklyaev, *Chem. Heterocycl. Compd.* **2001**, *723*–747; g) T. Nagatsu, *Neurosci. Res.* **1997**, *29*, 99–111.
- [3] Isochinolin-Synthesen mit Alkinen: a) N. Guimond, K. Fagnou, *J. Am. Chem. Soc.* **2009**, *131*, 12050–12051; b) T. Fukutani, N. Umeda, K. Hirano, T. Satoh, M. Miura, *Chem. Commun.* **2009**, 5141–5143; c) K. Morimoto, K. Hirano, T. Satoh, M. Miura, *Org. Lett.* **2010**, *12*, 2068–2071; d) X. Wei, M. Zhao, Z. Du, X. Li, *Org. Lett.* **2011**, *13*, 4636–4639; e) J. Jayakumar, K. Parthasarathy, C.-H. Cheng, *Angew. Chem.* **2012**, *124*, 201–204; *Angew. Chem. Int. Ed.* **2012**, *51*, 197–200; f) G. Zhang, L. Yang, Y. Wang, Y. Xie, H. Huang, *J. Am. Chem. Soc.* **2013**, *135*, 8850–8853; g) X. Zhang, D. Chen, M. Zhao, J. Zhao, A. Jia, X. Li, *Adv. Synth. Catal.* **2011**, *353*, 719–723; h) S.-C. Chuang, P. Gandeeapan, C.-H. Cheng, *Org. Lett.* **2013**, *15*, 5750–5753.
- [4] Rhodium-katalysierte Isochinolin-Synthesen: a) T. K. Hyster, T. Rovis, *J. Am. Chem. Soc.* **2010**, *132*, 10565–10569; b) X. Xu, Y. Liu, C.-M. Park, *Angew. Chem.* **2012**, *124*, 9506–9510; *Angew. Chem. Int. Ed.* **2012**, *51*, 9372–9376; c) N. Guimond, S. I. Gorelsky, K. Fagnou, *J. Am. Chem. Soc.* **2011**, *133*, 6449–6457; d) H. Wang, C. Grohmann, C. Nimphius, F. Glorius, *J. Am. Chem. Soc.* **2012**, *134*, 19592–19595; e) J. R. Huckins, E. A. Bercot, O. R. Thiel, T.-Li. Hwang, M. M. Bio, *J. Am. Chem. Soc.* **2013**, *135*, 14492–14495; f) S. Mochida, N. Umeda, K. Hirano, T. Satoh, M. Miura, *Chem. Lett.* **2010**, *39*, 744–746; g) N. Guimond, C. Gouliaras, K. Fagnou, *J. Am. Chem. Soc.* **2010**, *132*, 6908–6909.
- [5] Ruthenium-katalysierte Isochinolin-Synthesen: a) L. Ackermann, A. V. Lygin, N. Hofmann, *Angew. Chem.* **2011**, *123*, 6503–6506; *Angew. Chem. Int. Ed.* **2011**, *50*, 6379–6382; b) B. Li, H. Feng, S. Xu, B. Wang, *Chem. Eur. J.* **2011**, *17*, 12573–12577; c) L. Ackermann, S. Fenner, *Org. Lett.* **2011**, *13*, 6548–6551; d) J. Ghesquière, N. Gauthie, J. D. Winter, P. Gerbaux, C. Moucheiron, E. Defrancq, A. K.-D. Mesmaeker, *Chem. Eur. J.* **2012**, *18*, 355–364; e) B. Li, H. Feng, N. Wang, J. Ma, H. Song, S. Xu, B. Wang, *Chem. Eur. J.* **2012**, *18*, 12873–12879.
- [6] Palladium-katalysierte Isochinolin-Synthesen: H. Zhong, D. Yang, S. Wang, J. Huang, *Chem. Commun.* **2012**, *48*, 3236–3238.
- [7] Nickel-katalysierte Isochinolon-Synthesen: a) Y. Kajita, S. Matsubara, T. Kurahashi, *J. Am. Chem. Soc.* **2008**, *130*, 6058–6059; b) H. Shiota, Y. Ano, Y. Aihara, Y. Fukumoto, N. Chatani, *J. Am. Chem. Soc.* **2011**, *133*, 14952–14955; c) T. Miura, M. Yamauchi, M. Murakami, *Org. Lett.* **2008**, *10*, 3085–3088.
- [8] Andere Beispiele: a) M. V. Pham, B. Ye, N. Cramer, *Angew. Chem.* **2012**, *124*, 10762–10766; *Angew. Chem. Int. Ed.* **2012**, *51*, 10610–10614; b) S. Park, B. Seo, S. Shin, J.-Y. Son, P. H. Lee, *Chem. Commun.* **2013**, *49*, 8671–8673; c) D. Zhao, C. Nimphius, M. Lindale, F. Glorius, *Org. Lett.* **2013**, *15*, 4504–4507; d) W. Dong, L. Wang, K. Parthasarathy, F. Pan, C. Bolm, *Angew. Chem.* **2013**, *125*, 11787–11790; *Angew. Chem. Int. Ed.* **2013**, *52*, 11573–11576; e) Y. Unoh, K. Hirano, T. Satoh, M. Miura, *Angew. Chem.* **2013**, *125*, 13213–13217; *Angew. Chem. Int. Ed.* **2013**, *52*, 12975–12979.
- [9] Eine Übersicht über die Arbeit unserer Gruppe: a) R. Samanta, K. Matcha, A. P. Antonchick, *Eur. J. Org. Chem.* **2013**, 5769–5804; jüngere Studien: b) R. Samanta, J. O. Bauer, C. Strohmann, A. P. Antonchick, *Org. Lett.* **2012**, *14*, 5518–5521; c) R. Samanta, J. Lategahn, A. P. Antonchick, *Chem. Commun.* **2012**, *48*, 3194–3196; d) A. P. Antonchick, R. Samanta, K. Kulikov, J. Lategahn, *Angew. Chem.* **2011**, *123*, 8764–8767; *Angew. Chem. Int. Ed.* **2011**, *50*, 8605–8608; e) K. Matcha, R. Narayan, A. P. Antonchick, *Angew. Chem.* **2013**, *125*, 8143–8147; *Angew. Chem. Int. Ed.* **2013**, *52*, 7985–7989; f) K. Matcha, A. P. Antonchick, *Angew. Chem.* **2013**, *125*, 2136–2140; *Angew. Chem. Int. Ed.* **2013**, *52*, 2082–2086; g) A. P. Antonchick, L. Burgmann, *Angew. Chem.* **2013**, *125*, 3349–3353; *Angew. Chem. Int. Ed.* **2013**, *52*, 3267–3271.
- [10] Übersichten zur Chemie hypervalenter Iodverbindungen: a) V. V. Zhdankin, P. J. Stang, *Chem. Rev.* **2008**, *108*, 5299–5358; b) S. Quideau, L. Pouysegu, D. Deffieux, *Synlett* **2008**, 467–495; c) J. P. Brand, D. F. Gonzalez, S. Nicolai, J. Waser, *Chem. Commun.* **2011**, *47*, 102–115; d) V. V. Zhdankin, *ARKIVOC* **2009**, *1*–62; e) M. S. Yusubov, V. V. Zhdankin, *Curr. Org. Synth.* **2012**, *9*, 247–272; f) J. L. F. Silva, Jr., B. Olofsson, *Nat. Prod. Rep.* **2011**, *28*, 1722–1754; g) E. A. Merritt, B. Olofsson, *Synthesis* **2011**, 517–538; h) M. Uyanik, K. Ishihara, *Chem. Commun.* **2009**, 2086–2099; i) T. Dohi, M. Ito, N. Yamaoka, K. Morimoto, H. Fujioka, Y. Kita, *Tetrahedron* **2009**, *65*, 10797–10815; j) Z. S. Zheng, D. Zhang-Negrerie, Y. F. Du, K. Zhao, *Sci. China Chem.* **2014**, *57*, 189–214; k) F. V. Singh, T. Wirth, *Chem. Asian J.* **2014**, *9*, 950–971; l) V. V. Zhdankin, *Hypervalent Iodine Chemistry: Preparation, Structure and Synthetic Applications of Polyvalent Iodine Compounds*, Wiley, Chichester, **2014**.
- [11] Durch hypervalente Iodspezies induzierte Anellierung von o-Phenylendiaminen und elektronenarmen Alkinen: S. Okumura, Y. Takeda, K. Kiyokawa, S. Minakata, *Chem. Commun.* **2013**, *49*, 9266–9268.