

Eintopsynthesen

Dreikomponentenreaktionen auf der Basis einer Heck-Carbopalladierungs-Cyclisierungs-Dominoreaktion**

Christoph J. Kressierer und Thomas J. J. Müller*

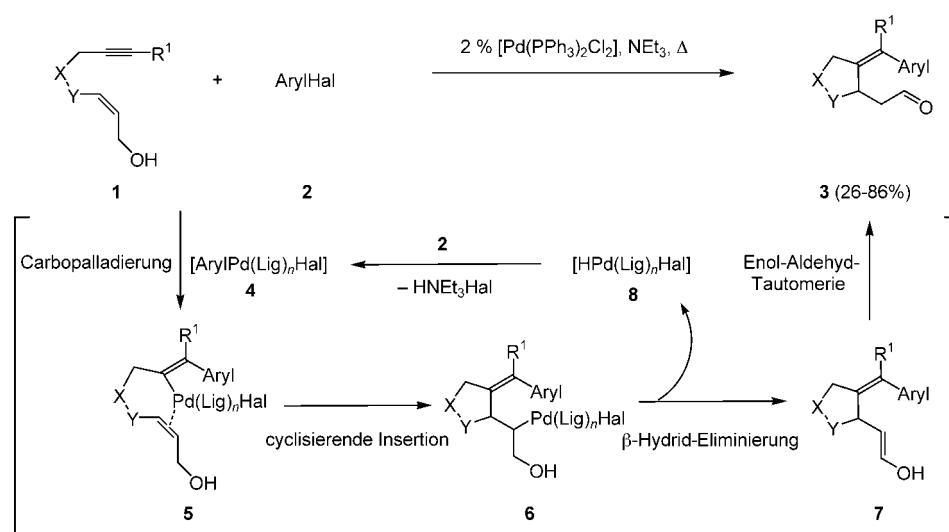
Professor Armin de Meijere zum 65. Geburtstag gewidmet

Palladiumkatalysierte Dominoreaktionen auf der Basis der sequenziellen Insertion intermediärer Organopalladiumspezies in Mehrfachbindungssysteme (Carbopalladierung) haben die Synthesekonzepte zum Aufbau von Carbo- und Heterocyclen grundlegend revolutioniert.^[1,2] Diese Transformationen verlaufen unter außerordentlich milden Bedingungen und tolerieren eine Vielfalt von polaren funktionellen Gruppen. Aus konzeptioneller Sicht betreffen Mehrkomponentenreaktionen,^[3] die durch palladiumkatalysierte C-C-Kupplungen^[2,4] eingeleitet werden, die fundamentalen Prinzipien von Syntheseeffizienz und Reaktionsplanung und erfahren daher in jüngster Zeit ein stetig zunehmendes Interesse aus akademischer, ökonomischer und ökologischer Sicht. Außerdem verspricht die Option, Eintopfreaktionen im kombinatorischen Sinne und am festen Träger durchzuführen,^[3c,5] vielfältige Möglichkeiten zur Entwicklung von Leitstrukturen für Pharmaka, Katalysatoren oder sogar molekularen Materialien. Aus diesen Gründen ist das Kombinieren von orga-

nischen Elementarreaktionen die zentrale Aufgabe bei der Konzeption neuartiger Mehrkomponentenreaktionen. Im Rahmen unserer Arbeiten zur Entwicklung neuer Eintopfsequenzen und Dominoprozesse auf der Basis der übergangsmetallkatalysierten In-situ-Aktivierung von Alkinen durch Kreuzkupplung^[6] oder Cycloisomerisierung,^[7] berichten wir hier über die erste Heck-Carbopalladierungs-Cyclisierungs-Sequenz von Inallylalkoholen und Arylhalogeniden zu γ,δ -Enalen sowie über zwei neuartige konsekutive Dreikomponentenreaktionen, die durch diese neue Dominoreaktion eingeleitet werden und das Prinzip illustrieren.

Obwohl intramolekulare Heck-Reaktionen^[8] zu einer beachtlichen methodischen Breite entwickelt und in eindrucksvollen Dominosequenzen wie den Negishi-Zipper-Reaktionen angewendet wurden^[1a] und obwohl auch der Einsatz von Eninen als Relais in Heck-Carbopalladierungs-Cyclisierungs-Sequenzen gründlich untersucht wurde,^[9,10] ist die Transformation von Inallylalkoholen, die zu γ,δ -Enalen führen können, bis heute unerforscht geblieben. Hier könnte die Erzeugung einer Aldehydfunktionalität den Diversitätsgrad von Mehrkomponentenreaktionen erhöhen.

Bei der Umsetzung der Alkinylallylalkohole **1**^[11] mit den Arylhalogeniden **2** in Gegenwart von 2 Mol-% $[\text{Pd}(\text{PPh}_3)_2\text{Cl}_2]$ in siedendem Triethylamin wurden unter den Bedingungen der Heck-Reaktion die cyclischen γ,δ -Enale **3** (die Tetrahydrofuran-Derivate **3a–i** und die Chroman-Derivate **3k–m**) in mittleren bis guten Ausbeuten erhalten (Schema 1, Tabelle 1).^[12]



Schema 1. Palladiumkatalysierte Heck-Carbopalladierungs-Cyclisierungs-Sequenz von Inallylalkoholen **1** zu γ,δ -Enalen **3**.

[*] Dipl.-Chem. C. J. Kressierer, Prof. Dr. T. J. J. Müller
Organisch-Chemisches Institut
Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg
Im Neuenheimer Feld 270, 69120 Heidelberg (Deutschland)
Fax: (+49) 6221-546-579
E-mail: thomas_j.j.mueller@urz.uni-heidelberg.de

[**] Diese Arbeit wurde von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (SFB 623), dem Fonds der Chemischen Industrie und der Dr.-Otto-Röhm-Gedächtnisstiftung unterstützt. Die Autoren danken der BASF AG für großzügige Chemikalienspenden.

Die Strukturen der Aldehyde **3** wurden eindeutig durch spektroskopische Methoden zugeordnet (^1H -, ^{13}C -, DEPT-, COSY-, NOESY-, HETCOR- und HMBC-NMR-Experimente, IR- und UV/Vis-Spektroskopie und Massenspektrometrie). Die Konfiguration der tetrasubstituierten Doppelbindungen kann zweifelsfrei aus den relevanten Kreuzsignalen (zwischen den Signalen der exocyclischen Trimethylsilylmeethyl-, Methyl- und Methylen substituenten und den Resonan-

Tabelle 1: Palladiumkatalysierte Heck-Carbopalladierungs-Cyclisierungs-Sequenz von Inallylalkoholen **1** zu γ,δ -Enalen **3**.^[a]

Nr.	Inallylalkohol 1	Arylhalogenid 2	t [h]	γ,δ -Enal 3	Ausb. [%] ^[b]
1			5		65
2	1a		2.5		85
3	1a		5		86
4	1a		2		76
5	1a		15		66
6 ^[c]	1a		0.5		85
7			4.5		47
8 ^[d]			24		29
9 ^[d]			28		26
10			6		58
11	1e		5		60
12	1e		6		65

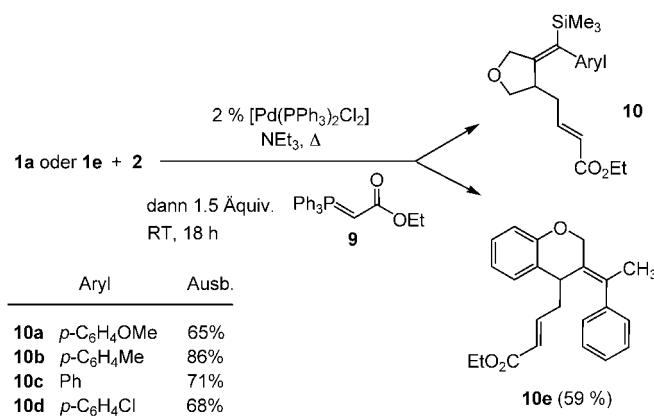
Fußnoten siehe Folgeseite.

zen der endocyclischen Methylenprotonen in α -Position zur Etherbrücke) in den NOESY-Spektren abgeleitet werden.

In ihren Elementarschritten hat diese neue palladiumkatalysierte Dominoreaktion durchaus bekannte Vorbilder wie die intramolekulare Insertion von Eninen^[1a] und die Heck-Reaktion von Allylalkoholen, die 3-Arylpropanale liefern.^[13] Daher kann diese neue Sequenz wie folgt erklärt werden (Schema 1): Nach der oxidativen Addition des Arylhalogenids **2** an die in situ erzeugte Pd^0 -Spezies koordiniert das Arylpalladiumhalogenid **4** an die Dreifachbindung des Inallylalkohols **1** und inseriert im Sinne einer *syn*-Carbopalladierung unter stereospezifischer Bildung des Vinylpalladiumkomplexes **5**. Als Folge der Koordination und cyclisierenden Insertion des Allylalkoholfragments bildet sich eine Alkylpalladiumspezies **6**, die unter β -Hydrid-Eliminierung das Dienol **7** liefert, das dann sofort zum Enal **3** tautomerisiert. Der Hydridopalladiumhalogenidkomplex **8** reagiert durch basenunterstützte reduktive Eliminierung von Halogenwasserstoff zurück zum Pd^0 -Komplex. Nach oxidativer Addition von **2** beginnt der Katalysezyklus von Neuem. Interessanterweise ergibt die Reaktion mit dem trimethylsilylsubstituierten **1a** als Substrat deutlich höhere Ausbeuten (siehe Tabelle 1, Nr. 1–6 und 7–9). Auch das konformativ starre phenylenverbrückte **1e** kann erfolgreich in der Sequenz eingesetzt werden und liefert Chromanylacetalddehyd-Derivate in guten Ausbeuten (Nr. 10–12). Da die Heck-Carbopalladierungs-Cyclisierungs-Sequenz für elektronenarme Arylhalogenide beträchtlich erschwert ist (längere Reaktionszeiten bzw. Mikrowellenbestrahlung zum Erreichen einer vollständigen Umsetzung; Tabelle 1, Nr. 5 und 6), übt offenbar die Arylpalladiumspezies einen starken elektronischen Effekt auf den Carbopalladierungsschritt aus.

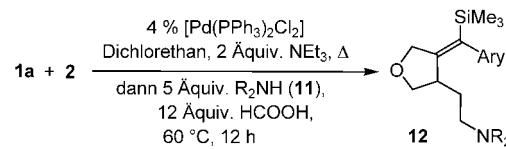
Diese neue Heck-Carbopalladierungs-Cyclisierungs-Dominosequenz von Alkinylallylalkoholen zu γ,δ -Enalen dient als Basis für sequenzielle Eintopf-Dreikomponentenreaktionen, die mit den milden Reaktionsbedingungen des einleitenden Pd -katalysierten Prozesses kompatibel sind. So eignet sich die neugebildete Aldehydfunktionalität hervorragend für eine anschließende Wittig-Reaktion im Rahmen einer sequenziellen Eintopfreaktion. Entsprechend liefert die Umsetzung von **1a** oder **1e** mit **2** in Gegenwart katalytischer Mengen $[Pd(PPh_3)_2Cl_2]$ in siedendem Triethylamin und anschließende Zugabe eines stabilisierten Phosphorylids des Typs **9** bei Raumtemperatur 2,3,6,7-doppeltungesättigte Ester **10** in mittleren bis guten Ausbeuten (Schema 2).^[12]

Darüber hinaus kann die neue Heck-Carbopalladierungs-Cyclisierungs-Sequenz durch Verringerung der Triethylaminmenge auf nur zwei Äquivalente als Einstieg in eine nachfolgende reduktive Aminierung unter Leuckart-Wallach-Bedingungen^[14] in einer sequenziellen Eintopfreaktion dienen. Entsprechend führt die Umsetzung von **1a** mit **2** in Gegenwart katalytischer Mengen $[Pd(PPh_3)_2Cl_2]$ und 2 Äquivalenten Triethylamin in siedendem Dichlorehthan und anschlie-



Schema 2. Palladiumkatalysierte Heck-Carbopalladierungs-Cyclisierungs-Wittig-Sequenz zu 2,3,6,7-doppeltungesättigten Carbonylverbindungen **10**.

ßende Zugabe von sekundären Aminen **11** und Ameisensäure bei 60 °C zur Bildung von β -Aminoethylalkyldentetrahydrofuranen **12** in guten bis ausgezeichneten Ausbeuten (Schema 3).^[12]



Aryl	NR ₂	Ausb.
12a Ph	NEt ₂	69%
12b Ph	N(CH ₂) ₄	79%
12c Ph	N(CH ₂) ₆	65%
12d <i>p</i> -C ₆ H ₄ CH ₃	N(CH ₂) ₆	62%
12e Ph	N(CH ₂ CH ₂) ₂ O	69%
12f Ph	N(CH ₂ CH ₂) ₂ NCH ₃	59%

Schema 3. Palladiumkatalysierte Sequenz aus Heck-Carbopalladierung-Cyclisierung und reduktiver Aminierung zu β -Ethylaminobenzyliden-tetrahydrofuranen **12**.

Zusammenfassend haben wir eine Heck-Carbopalladierungs-Cyclisierungs-Dominoreaktion entwickelt, die ausgehend von Inallylalkoholen **1** und Arylhalogeniden γ,δ -Enale **3** liefert. Dieser neue Dominoprozess wurde zu zwei konsekutiven Eintopf-Dreikomponentensequenzen weiterentwickelt, wobei eine Heck-Carbopalladierungs-Cyclisierungs-Wittig-Sequenz und eine Sequenz aus Heck-Carbopalladierung-Cyclisierung und reduktiver Aminierung einen Zugang zu heterocyclischen 2,3,6,7-doppeltungesättigten Estern bzw. β -Aminoethylalkyldentetrahydrofuranen eröffneten. Studien zur methodischen Breite dieser Sequenz und verwandter Transformationen zur Erhöhung der molekularen Diversität

Tabelle 1: [a] Reaktionsbedingungen: 1 Äquiv. **1**, 1.1 Äquiv. **2** (0.1 M in Triethylamin) und 0.02 Äquiv. $[Pd(PPh_3)_2Cl_2]$ werden 2–28 h unter Rückfluss erhitzt. [b] Ausbeuten der isolierten Produkte **3** nach Flash-Chromatographie an Kieselgel; Reinheiten $\geq 95\%$ gemäß NMR-Spektroskopie und Elementaranalyse und/oder HR-MS. [c] Die Reaktion wurde in einem Mikrowellenreaktor durchgeführt (0.50 mmol **1a**, 0.55 mmol **2f**, 2 Mol-% $[Pd(PPh_3)_2Cl_2]$; Aufheizphase: 160 s bis 150 °C bei 300 W, 30 min Reaktionsphase bei 150 °C, Abkühlphase: 240 s bis 45 °C). [d] $[Pd(PPh_3)_4]$ als Katalysator.

in pharmakologisch interessanten Zielverbindungen sind derzeit in Bearbeitung.

Experimentelles

Heck-Carbopalladierungs-Cyclisierungs-Sequenz (**3b**): In einem 50-mL-Schraubdeckelgefäß wurden 15 mg (0.02 mmol) $[\text{Pd}(\text{PPh}_3)_2\text{Cl}_2]$ in 10 mL luftfreiem Triethylamin gelöst. Die Lösung wurde nacheinander mit 198 mg (1.0 mmol) **1a** und 240 mg (1.1 mmol) **2b** versetzt und 2.5 h zum Rückfluss erhitzt. Nach Abkühlen auf Raumtemperatur wurden 150 mL Diethylether zugegeben und der Niederschlag durch Filtration abgetrennt. Die Lösungsmittel des Filtrats wurden im Vakuum entfernt, und der Rückstand wurde durch Flash-Chromatographie an Kieselgel gereinigt. Es wurden 239 mg (85 %) analytisch reines **3b** in Form eines blassgelben Öls isoliert. $R_f = 0.59$ (Hexan/Diethylether 1:1). $^1\text{H-NMR}$ (CDCl_3 , 500 MHz): $\delta = -0.17$ (s, 9H), 2.34 (s, 3H), 2.50–2.55 (m, 1H), 2.76–2.81 (m, 1H), 2.93 (ddd, $J = 1.6, 9.7, 17.8$ Hz, 1H), 3.68–3.72 (m, 1H), 3.81 (dd, $J = 1.6, 11.3$ Hz, 1H), 4.08 (d, $J = 17.1$ Hz, 1H), 4.20 (dd, $J = 2.3, 17.2$ Hz, 1H), 6.97–7.01 (m, 2H), 7.10–7.14 (m, 2H), 9.86–9.87 ppm (m, 1H). $^{13}\text{C-NMR}$ (CDCl_3 , 125.8 MHz): $\delta = 0.2$ (CH_3), 21.1 (CH_3), 31.2 (CH), 46.8 (CH_2), 67.3 (CH₂), 70.6 (CH₂), 128.5 (CH), 128.7 (CH), 133.8 ($\text{C}_{\text{quart.}}$), 137.2 ($\text{C}_{\text{quart.}}$), 137.4 ($\text{C}_{\text{quart.}}$), 149.5 ($\text{C}_{\text{quart.}}$), 201.5 ppm (CH). HR-MS ber. für $\text{C}_{17}\text{H}_{24}\text{O}_2\text{Si}$: 288.1546; gef.: 288.1543. Elementaranalyse ber. für $\text{C}_{17}\text{H}_{24}\text{O}_2\text{Si}$ (288.5): C 70.78, H 8.39; gef.: C 70.61, H 8.43.

Heck-Carbopalladierungs-Cyclisierungs-Wittig-Sequenz (**10b**): In einem 50-mL-Schraubdeckelgefäß wurden 14 mg (0.02 mmol) $[\text{Pd}(\text{PPh}_3)_2\text{Cl}_2]$ in 10 mL luftfreiem Triethylamin gelöst. Die Lösung wurde nacheinander mit 198 mg (1.0 mmol) **1a** und 241 mg (1.1 mmol) **2b** versetzt und 2.5 h zum Rückfluss erhitzt. Nach Abkühlen auf Raumtemperatur wurden nacheinander 5 mL THF und 523 mg (1.5 mmol) **9** zugegeben, und die Reaktionsmischung wurde 18 h bei Raumtemperatur gerührt. Die entstandenen Niederschläge wurden durch Filtration abgetrennt. Die Lösungsmittel des Filtrats wurden im Vakuum entfernt, und der Rückstand wurde durch Flash-Chromatographie an Kieselgel gereinigt. Es wurden 301 mg (86 %) analytisch reines **10b** in Form eines gelben Öls isoliert. $R_f = 0.72$ (Hexan/Diethylether 1:1). $^1\text{H-NMR}$ (CDCl_3 , 250 MHz): $\delta = -0.16$ (s, 9H), 1.30 (t, $J = 7.1$ Hz, 3H), 2.23–2.61 (m, 6H), 3.58–3.66 (m, 1H), 3.81 (dd, $J = 1.9, 11.2$ Hz, 1H), 4.02–4.26 (m, 4H), 5.92 (dt, $J = 1.4, 15.6$ Hz, 1H), 6.91–7.15 ppm (m, 5H). $^{13}\text{C-NMR}$ (CDCl_3 , 75.5 MHz): $\delta = 0.4$ (CH_3), 14.2 (CH_3), 21.1 (CH_3), 35.2 (CH₂), 36.0 (CH), 60.1 (CH₂), 66.0 (CH₂), 70.5 (CH₂), 122.8 (CH), 128.6 (CH), 128.7 (CH), 134.5 ($\text{C}_{\text{quart.}}$), 137.1 ($\text{C}_{\text{quart.}}$), 137.6 ($\text{C}_{\text{quart.}}$), 147.1 (CH), 149.2 ($\text{C}_{\text{quart.}}$), 166.4 ppm ($\text{C}_{\text{quart.}}$). HR-MS ber. für $\text{C}_{21}\text{H}_{30}\text{O}_3\text{Si}$: 358.1964; gef.: 358.1950. Elementaranalyse ber. für $\text{C}_{21}\text{H}_{30}\text{O}_3\text{Si}$ (358.6): C 70.35, H 8.43; gef.: C 70.31, H 8.42.

Sequenz aus Heck-Carbopalladierung-Cyclisierung und reduktiver Aminierung (**12b**): In einem 50-mL-Schraubdeckelgefäß wurden 28 mg (0.04 mmol) $[\text{Pd}(\text{PPh}_3)_2\text{Cl}_2]$ in einer Mischung aus 10 mL luftfreiem 1,2-Dichlorethan und 202 mg (2.0 mmol) Triethylamin gelöst. Die Lösung wurde nacheinander mit 198 mg (1.0 mmol) **1a** und 240 mg (1.10 mmol) **2c** versetzt und 3 h zum Rückfluss erhitzt. Nach Abkühlen auf Raumtemperatur wurden nacheinander 552 mg (12.0 mmol) Ameisensäure und 356 mg (5.0 mmol) Pyrrolidin (**11b**) zugegeben, und die Reaktionsmischung wurde 12 h auf 60°C gehalten. Nach Abkühlen auf Raumtemperatur wurden 150 mL Diethylether und wasserfreies Kaliumcarbonat zugegeben und die Niederschläge durch Filtration abgetrennt. Die Lösungsmittel des Filtrats wurden im Vakuum entfernt, und der Rückstand wurde durch Flash-Chromatographie an basischem Alox (Brockmann-Aktivität IV) gereinigt. Es wurden 261 mg (79 %) analytisch reines **12b** in Form eines gelbroten Öls isoliert. $R_f = 0.31$ (Hexan/Diethylether 1:2). $^1\text{H-NMR}$ (CDCl_3 , 500 MHz): $\delta = -0.22$ (s, 9H), 1.67–1.85 (m, 6H), 2.09–2.18 (m, 1H), 2.42–2.60 (m, 6H), 3.60–3.67 (m, 1H), 3.83 (dd, $J = 2.2, 11.0$ Hz, 1H), 4.04 (d, $J = 16.9$ Hz, 1H), 4.20 (dd, $J = 2.2, 16.9$ Hz, 1H), 7.04–7.11 (m, 2H), 7.20–7.30 ppm (m, 3H). $^{13}\text{C-NMR}$ (CDCl_3 ,

125.8 MHz): $\delta = 0.4$ (CH_3), 23.4 (CH_2), 31.5 (CH_2), 35.3 (CH), 54.3 (CH₂), 54.9 (CH₂), 66.8 (CH₂), 70.4 (CH₂), 127.2 (CH), 127.9 (CH), 128.8 (CH), 135.8 ($\text{C}_{\text{quart.}}$), 141.0 ($\text{C}_{\text{quart.}}$), 148.2 ppm ($\text{C}_{\text{quart.}}$). HR-MS ber. für $\text{C}_{20}\text{H}_{31}\text{NOSi}$: 329.2175; gef.: 329.2167. Elementaranalyse ber. für $\text{C}_{20}\text{H}_{31}\text{NOSi}$ (329.56): C 72.89, H 9.48, N 4.25; gef.: C 73.36, H 9.71, N 3.91.

Eingegangen am 30. Juni 2004

Stichwörter: Aminierungen · C-C-Kupplungen · Dominoreaktionen · Mehrkomponentenreaktionen · Olefinierungen

- Übersichten zum Thema, siehe z. B. a) E.-I. Negishi, C. Copéret, S. Ma, S.-Y. Liou, F. Liu, *Chem. Rev.* **1996**, *96*, 365; b) M. Malacria, *Chem. Rev.* **1996**, *96*, 289; c) S. Bräse, A. de Meijere in *Metal-Catalyzed Cross-Coupling Reactions*, Wiley-VCH, Weinheim, **1998**, S. 99.
- Übersichten zu übergangsmetallkatalysierten Reaktionen in Heterocyclensynthesen, siehe z. B. a) G. Kirsch, S. Hesse, A. Cornel, *Curr. Org. Synth.* **2004**, *1*, 47; b) I. Nakamura, Y. Yamamoto, *Chem. Rev.* **2004**, *104*, 2127, zit. Lit.; c) zur Heterocyclensynthese durch palladiumkatalysierte Reaktionen, siehe z. B. J. J. Lie, G. W. Gribble, *Palladium in Heterocyclic Chemistry*, Pergamon, Oxford, **2000**.
- a) H. Bienaymé, C. Hulme, G. Oddon, P. Schmitt, *Chem. Eur. J.* **2000**, *6*, 3321; b) I. Ugi, A. Dömling, B. Werner, *J. Heterocycl. Chem.* **2000**, *37*, 647; c) L. Weber, K. Illgen, M. Almstetter, *Synlett* **1999**, 366; d) G. H. Posner, *Chem. Rev.* **1986**, *86*, 831.
- Übersichten zu übergangsmetallgestützten sequenziellen Transformationen und Dominoprozessen, siehe z. B. a) G. Balme, E. Bossharth, N. Monteiro, *Eur. J. Org. Chem.* **2003**, 4101; b) G. Battistuzzi, S. Cacchi, G. Fabrizi, *Eur. J. Org. Chem.* **2002**, 2671; c) L. F. Tietze, *Chem. Rev.* **1996**, *96*, 115.
- S. Kobayashi, *Chem. Soc. Rev.* **1999**, *28*, 1.
- a) A. S. Karpov, T. Oeser, T. J. J. Müller, *Chem. Commun.* **2004**, 1502; b) A. S. Karpov, F. Rominger, T. J. J. Müller, *J. Org. Chem.* **2003**, *68*, 1503; c) N. A. M. Yehia, K. Polborn, T. J. J. Müller, *Tetrahedron Lett.* **2002**, *43*, 6907; d) R. U. Braun, K. Zeitler, T. J. J. Müller, *Org. Lett.* **2001**, *3*, 3297; e) T. J. J. Müller, J. P. Robert, E. Schmälzlin, C. Bräuchle, K. Meerholz, *Org. Lett.* **2000**, *2*, 2419; f) T. J. J. Müller, M. Ansorge, D. Aktah, *Angew. Chem.* **2000**, *112*, 1323; *Angew. Chem. Int. Ed.* **2000**, *39*, 1253.
- a) C. J. Kressierer, T. J. J. Müller, *Tetrahedron Lett.* **2004**, *45*, 2155; b) C. J. Kressierer, T. J. J. Müller, *Synlett* **2004**, 655.
- J. T. Link, L. E. Overman in *Metal-Catalyzed Cross-Coupling Reactions*, Wiley-VCH, Weinheim, **1998**, S. 231.
- Übersichten zum Thema, siehe z. B. a) B. M. Trost, *Acc. Chem. Res.* **1990**, *23*, 34; b) B. M. Trost, J. Dumas, M. Villa, *J. Am. Chem. Soc.* **1992**, *114*, 9836; c) B. M. Trost, J. Dumas, *J. Am. Chem. Soc.* **1992**, *114*, 1924; d) S. Brown, S. Clarkson, R. Grigg, V. Sridharan, *Tetrahedron Lett.* **1993**, *34*, 157.
- X. Xie, X. Lu, *Tetrahedron Lett.* **1999**, *40*, 8415.
- Die Synthese der Alkinylallylalkoholsubstrate wurde in Anlehnung an H. Sajiki, K. Hirota, *Tetrahedron* **1998**, *54*, 13981 durchgeführt. Die detaillierten Syntheseprotokolle werden an anderer Stelle beschrieben werden.
- Alle Verbindungen wurden vollständig durch spektroskopische Methoden und durch korrekte Elementaranalysen oder HR-MS charakterisiert.
- a) T. Jeffery, *Tetrahedron Lett.* **1990**, *31*, 6641; b) S. A. Buntin, R. F. Heck, *Org. Synth. Coll. Vol.* **1990**, *7*, 361.
- Übersichten, siehe z. B. a) M. L. Moore, *Org. React.* **1949**, *5*, 301; b) A. Lukasiewicz, *Tetrahedron* **1963**, *19*, 1789.