

Teilprojekt C 2.1:

Entwicklung neuer Ladungstransportmaterialien für OLEDs über übergangsmetallkatalysierte Kupplungsreaktionen

Prof. Dr.-Ing. Oskar Nuyken^{*a)}, Thomas Braig^{a)}, Georg Felix Mielke^{a)}, Michael S. Bayerl^{a)}, Rene Faber^{a)}, Dr. Wolfgang Radlik, Dr. Wolfgang Rogler, Dr. Andreas Kanitz, Jörg Staudigl^{b)}

a) Lehrstuhl für Makromolekulare Stoffe, Technische Universität München, Lichtenbergstr. 4, D-85747 Garching

b) Siemens AG, ZTMF 6, Paul-Gossen-Str. 100, D-91052 Erlangen

1. Einleitung

OLEDs oder *organic light emitting devices* finden in der Flachdisplaytechnologie Verwendung. Sie nutzen das physikalische Phänomen der Elektrolumineszenz: Bei der Rekombination von positiven Ladungsträgern, den sogenannten Ladungslöchern oder Löchern, aus dem HOMO (*highest occupied molecular orbital*) mit negativen Ladungsträgern, den Elektronen, aus dem LUMO (*lowest unoccupied molecular orbital*) entstehen zunächst angeregte Zustände, sogenannte Exzitonen. Diese Exzitonen kehren unter Lichtemission in den Grundzustand zurück.

Im einfachsten Fall besteht eine OLED aus einer Anode aus Indium-Zinn-Oxid (ITO), einer Schicht aus organischem elektrolumineszierenden Ladungstransportmaterial und einer Metallkathode [1]. Eine moderne Mehrschicht-OLED enthält dagegen ein Schichtensystem aus beispielsweise Lochtransport-, Emitter- und Elektronentransportverbindungen (*Abb. 1*) [2]. Durch den schichtweisen Aufbau mit unterschiedlichen Materialien werden interne Potentialbarrieren in die OLED eingebaut. Dadurch wird die Rekombinationszone von den Elektroden, die als strahlungslöschende *quenching sites* fungieren, hinein in das Innere der OLED verlagert. Dies führt zu einem enormen Effektivitätsanstieg.

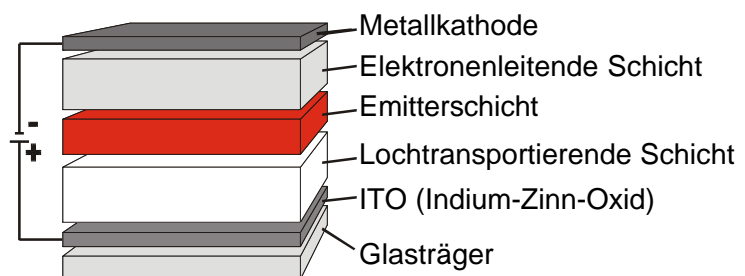


Abb. 1: Schematischer Aufbau einer Mehrschicht-OLED

Mehrschicht-OLEDs können durch Aufdampfverfahren im Vakuum (Sublimation) und Verfahren wie *spin-coating* oder Rakeln aus Lösung hergestellt werden. Durch Sublimationsverfahren ist der Aufbau wohldefinierter Mehrschichtsysteme von hoher Qualität problemlos möglich. Mit der Sublimation ist zudem ein hochwirksamer Reinigungsschritt für die eingesetzten Materialien in den Herstellungsprozeß integriert. Aufdampfverfahren sind aber auf Moleküle mit niedrigen Molmassen und ausreichender thermischer Stabilität beschränkt. Zusätzlich verursacht der große instrumentelle Aufwand hohe Herstellungskosten. Durch Einsatz von Herstellungsverfahren aus Lösung wie *spin-coating* können die Produktionskosten demgegenüber erheblich gesenkt werden, und es existieren keine Einschränkungen für die eingesetzten Materialien hinsichtlich der Molmassen. Der Hauptnachteil bei der Verwendung von *spin-coating* zum Aufbau von Mehrschichtsystemen ist, daß bereits aufgetragene Schichten bei den nachfolgenden *spin-coating*-Arbeitsgängen wieder auf- oder angelöst werden können. In diesem Projekt werden in Kooperation mit der Siemens AG, Erlangen, und Herrn David Müller aus der Arbeitsgruppe von PD Dr. Klaus Meerholz am Lehrstuhl für Physikalische Chemie I der Ludwig-Maximilian-Universität München für beide Herstellungsverfahren neue Verbindungen entwickelt.

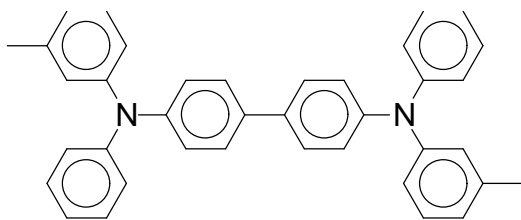


Abb. 2: *N,N'*-Diphenyl-*N,N'*-bis(*m*-tolyl)-benzidin TPD

Die in OLEDs eingesetzten Ladungstransportverbindungen werden in elektronentransportierende und lochtransportierende Materialien unterteilt. Als Elektronentransporter werden beispielsweise Oxadiazole und Tris(8-hydroxychinolin)aluminium angewendet.

Zum Lochtransport in Mehrschicht-OLEDs werden hauptsächlich Triarylamininderivate, wie zum Beispiel das *N,N'*-Diphenyl-*N,N'*-bis(*m*-tolyl)-benzidin TPD (Abb. 2) eingesetzt. Die Arbeiten im Rahmen dieses FORKAT-Projektes konzentrieren sich überwiegend auf die Klasse der Triarylamine, insbesondere auf die Optimierung der Strukturen in Hinblick auf Temperaturstabilität, Verarbeitbarkeit, elektronische Eigenschaften und Quantenausbeuten. Bei der Synthese der Triarylamine wird die über-

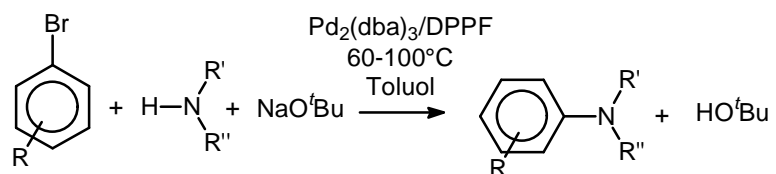


Abb. 3: Die palladiumkatalysierte Aminierung von Bromoaromaten (DPPF = 1,1'-Bis(diphenylphosphino)-ferrocen)

gangsmetallkatalysierte C-N-Kupplungsreaktion [3] angewandt und für die Triarylamin-synthese optimiert. Die palladium- oder nickeltkatalysierte C-N-Kupplung von aromatischen

Aminen mit Bromaromaten zeichnet sich durch Reaktionszeiten von weniger als 18 Stunden und Reaktionstemperaturen um die 100°C aus. Damit ist sie der klassischen Triarylaminsynthese deutlich überlegen, einer Variante der Ullmann-Kupplung von Diarylaminen mit Iodaromaten unter Kupfermetallkatalyse mit Reaktionszeiten von 12 bis 96 Stunden bei Temperaturen um 200°C. Die erzielten Produktausbeuten sind bei der palladiumkatalysierten C-N-Kupplung deutlich höher, daneben werden erheblich mehr funktionelle Gruppen toleriert.

2. Niedermolekulare Lochtransporter zum Aufbau von OLEDs durch Sublimationsverfahren

Zur Fabrikation von OLEDs durch Aufdampfverfahren müssen die verwendeten organischen Materialien unter den Sublimationsbedingungen von teilweise über 300°C im Hochvakuum stabil sein und eine ausreichende Flüchtigkeit besitzen, also niedermolekulare Verbindungen sein. Unter Betriebsbedingungen müssen die Materialien morphologisch stabil sein. Aufgrund thermischer Relaxationsprozesse können in OLEDs Betriebstemperaturen von über 100°C herrschen. Dies kann zur Kristallisation der eingesetzten Triarylamine führen, die allgemein niedrige Glasübergangstemperaturen besitzen. Ein Ziel dieser Arbeit war es also, durch Variation der Molekülgeometrie oder den Einbau sperriger Substituenten in Triarylaminderivate die Glasübergangstemperaturen zu erhöhen, die Kristallisationsneigung herabzusetzen und gleichzeitig eine ausreichende Flüchtigkeit unter Sublimationsbedingungen zu gewährleisten.

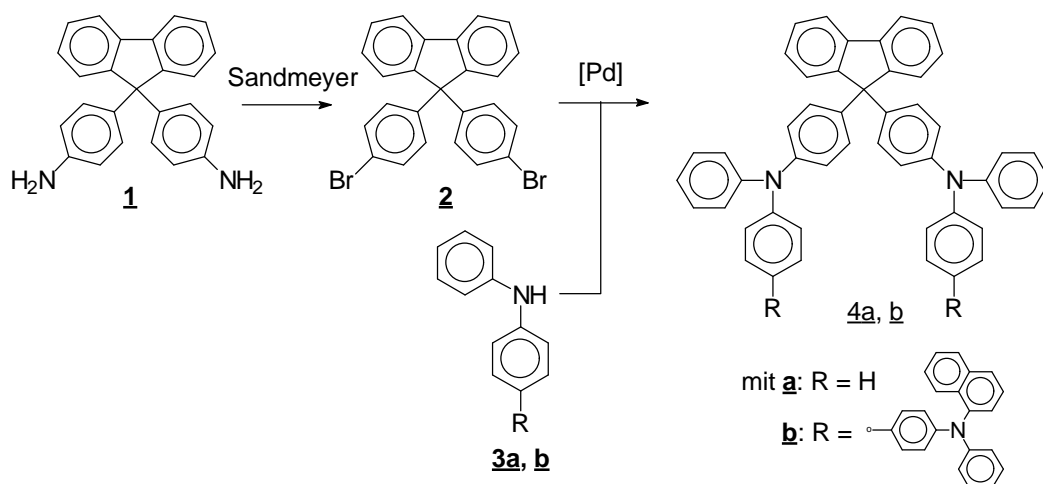


Abb. 4: Syntheseroute zu den triarylaminhaltigen Spiroverbindungen **4a** und **4b**.

Durch den Einsatz von Spiroverbindungen können nichtplanare Molekülgeometrien realisiert werden, durch die eine Kristallisation verhindert werden kann. Dies konnte bereits bei

einigen Ladungstransportverbindungen gezeigt werden [4]. Es gelang via palladiumkatalysierter C-N-Kupplungs-Reaktion ein synthetischer Zugang zu triarylaminhaltigen Spiroverbindungen (Abb. 4). Als Musterverbindung wurde zunächst das 9,9'-Bis(diphenylaminophenyl)fluoren **4a** synthetisiert. Diese Synthese wurde dann zur Herstellung des synthetisch anspruchsvolleren, für den Einsatz in OLEDs aber wertvolleren Fluorenderivats **4b** angewandt. Hier stehen zwei Stickstoffe über eine Biphenylenbrücke in Konjugation zueinander, entsprechend dem in Abb. 2 gezeigten TPD. Weitere Derivate sind in Arbeit.

Zunächst wird das 9,9'-Di(4-aminophenyl)fluoren **1** in einer Sandmeyer-Reaktion zu der Dibromverbindung **2** umgesetzt (Abb. 4). In einer palladiumkatalysierten C-N-Kupplungs-Reaktion erfolgt die Umsetzung zu den triarylaminhaltigen Spiroverbindungen **4a** und **4b**. Die dafür notwendigen Edukte **3a** bzw. **3b** wurden käuflich erworben bzw. ebenfalls über C-N-Kupplungs-Reaktionen synthetisiert. Die Glasübergangstemperatur liegt für **4b** bei 153 °C. Dies macht insbesondere Verbindung **4b** für den Einsatz in OLEDs interessant.

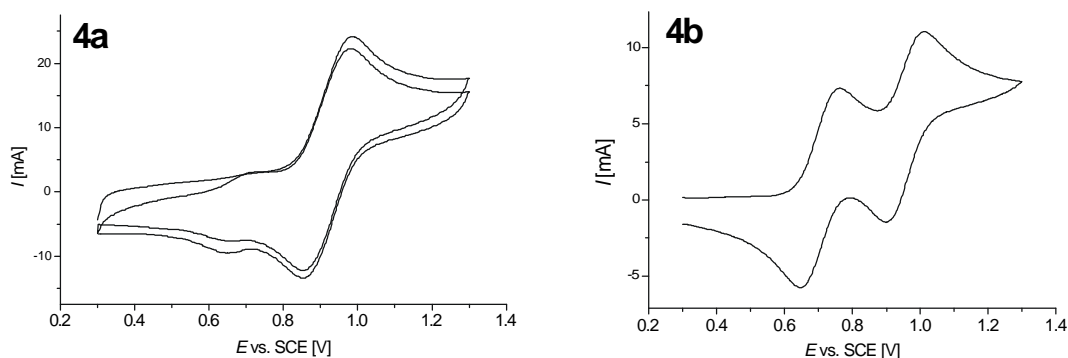


Abb. 5: Cyclovoltammogramme von **4a** und **4b** in CH_2Cl_2 bei Raumtemperatur gegen Kalomel-Elektroden, Scanrate = 100 mV/s

Für einen Einsatz der neu synthetisierten Verbindungen werden Informationen über elektrochemische Eigenschaften wie Ionisationspotential und Elektronenaffinität benötigt, die durch Cyclovoltammetrie der Verbindungen in Lösung gewonnen werden. So ist die Abschätzung der energetischen Lage der HOMO- und der LUMO-Orbitale der entsprechenden Materialien im Festkörper möglich. Zum Aufbau von mehrschichtigen Dioden, deren Materialien energetisch sinnvoll aufeinander abgestimmt sind, ist das Wissen über die energetische Lage der Orbitale der eingesetzten Verbindungen von Interesse. Entscheidend für in OLEDs eingesetzte Ladungstransportverbindungen ist, insbesondere in Hinblick auf die Lebensdauer der Dioden, daß das Redoxverhalten voll reversibel ist. Auch darüber kann die Cyclovoltammetrie Auskunft geben. Die Cyclovoltammogramme von **4a** und **4b** sind in Abb. 5 gezeigt. Anhand der

Cyclovoltammogramme wird deutlich, daß das Redoxverhalten der Verbindung **4a** nicht voll reversibel ist. Zu erwarten ist eine Dimerisierung oder Polymerisation, wie dies für Triphenylamin bekannt ist. Verbindung **4b** besitzt dagegen ein voll reversibles Redoxverhalten und dürfte daher für den Einsatz in OLED sehr gut geeignet sein. Für die energetische Lage des HOMO von **4b** wird ein $E_{HOMO} = -5,09$ eV berechnet. Die Erprobung in Test-OLEDs durch die Siemens AG, Erlangen, wurde bereits begonnen.

Ein weiterer Schwerpunkt der Arbeiten dieses Projekt befaßt sich mit den Auswirkungen von Verunreinigungen der Materialien, die durch die palladiumkatalysierte C-N-Kupplungsreaktion verursacht werden, auf die Effizienz und Lebensdauer der OLED. Verunreinigungen können als *quenching sites* fungieren und so die Leistungsfähigkeit der OLED herabsetzen. Dazu wurde *N,N'*-Di (α -naphthyl)-*N,N'*-diphenyl-benzidin α -NPD (Abb. 6) via palladiumkatalysierter C-N-Kupplungsreaktion in

großen Mengen synthetisiert und mit verschiedenen Methoden wie Säulenchromatographie, mehrfache Sublimation oder Reinigung mit Spezialabsorbent aufgereinigt. Aus den diversen Proben werden der Fremdatomgehalt mittels

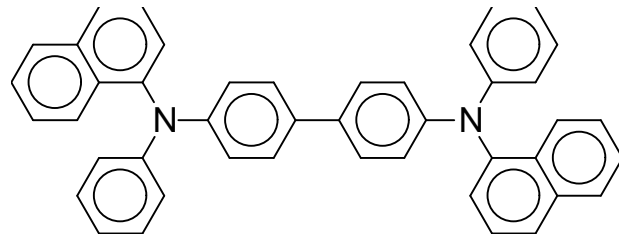


Abb. 6: *N,N'*-Di (α -naphthyl)-*N,N'*-diphenylbenzidin (α -NPD)

Neutronenaktivierungsanalyse bestimmt und OLEDs durch die Siemens AG, Erlangen, hergestellt. Die Proben sind fertiggestellt, die Erprobung der OLEDs ist zur Zeit in Arbeit. Insbesondere interessiert die Auswirkung des Palladiumgehaltes auf die Lebensdauer der OLEDs.

3. Vernetzbare Lochtransportverbindungen zum Aufbau mehrschichtiger OLEDs durch *spin-coating*

Einleitend wurde bereits erwähnt, daß über Lösungsverfahren wie *spin-coating* oder Rakeln großflächige OLEDs kostengünstig produziert werden könnten. Einschränkungen für eingesetzte Materialien hinsichtlich der Molmassen wie bei der Sublimation entfallen hier, entscheidend sind Löslichkeits- und Filmbildungseigenschaften der Materialien, die auch Polymere enthalten können. Allerdings werden beim Aufbau von Mehrschichtsystemen bereits aufgetragene Schichten in den nachfolgenden *spin-coating*-Arbeitsgängen aufgelöst oder wenigstens angelöst. Die Vermischung verschiedener Materialien wie Lochtransport- und

Elektronentransportverbindungen sind die Folge. Dies äußert sich in einer Verringerung der Effizienz und dem *overshoot*-Effekt in der fertigen Leuchtdiode [5].

Sollen Lösungsverfahren zum Aufbau von mehrschichtigen OLEDs eingesetzt werden, muß also die Löslichkeit der hergestellten Schichten nach dem Aufschleudern reduziert werden. Dies kann über Präpolymererouten realisiert werden, bei denen eine lösliche Vorstufe in der Schicht in ein unlösliches Polymer thermisch konvertiert wird. Dieses Konzept ist beispielsweise von Poly(*p*-phenylenvinyl) (PPV) bekannt [1]. Die materialbelastenden Konvertierungsbedingungen und die dabei freigesetzten Nebenprodukte (HCl) schränken diese Methode aber stark ein.

In dieser Arbeit wird ein Ansatz verfolgt, in dem aufgetragene Schichten photovernetzt und somit unlöslich werden [6]. Niedermolekulare Verbindungen wie beispielsweise lochtransportierende

Triaryla-
mine mit zwei polyme-
risierbaren funktionellen
Gruppen werden durch
spin-coating aufgetra-
gen (Abb. 7). Nach Ver-
dampfen des Lö-
sungsmittels werden die

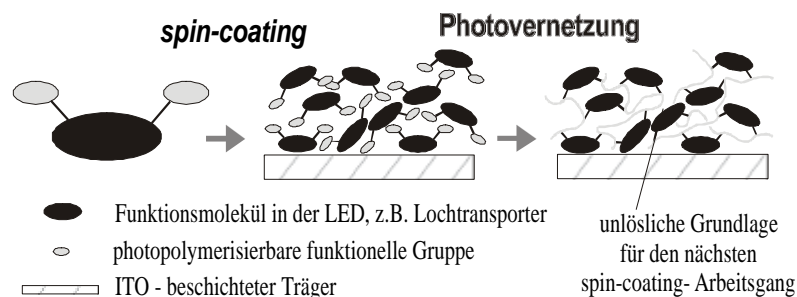


Abb 7: Aufbau von Mehrschicht OLEDs durch Kombination von *spin-coating* und Photovernetzung.

Monomere in Substanz durch Bestrahlung mit Licht polymerisiert. Durch den Einsatz bifunktioneller Monomere entstehen kovalente Netzwerke, die hohe Glasübergangstemperaturen besitzen und unlöslich sind. Diese Schichten dienen als Grundlage für nachfolgende *spin-coating*-Arbeitsgänge.

Die Monomere müssen in Substanz polymerisierbar sein. Die eingesetzten polymerisierbaren Gruppen sollen unempfindlich sein und dürfen nicht bereits beim Aufschleudern reagieren. Hohe Umsätze bei der Polymerisation sind erforderlich, da nicht umgesetzte funktionelle Gruppen in der fertigen OLED deren Effizienz herabsetzen können. Für die Filmbildungseigenschaften ist es besonders wichtig, daß die Volumenschrumpfung bei der Vernetzung gering ist. Zu großer Schrumpfung würde zu Rissen in den Filmen führen. Deshalb wurde in dieser Arbeit die Oxetanfunktionalität als polymerisierbare Gruppe gewählt. Unter Einsatz von Photoinitiatoren können Oxetane nach einem kationischen Mechanismus in Substanz polymerisiert werden. Die Oxetane zeichnen sich durch eine äußerst niedrige Volumenschrumpfung während der Vernetzung aus und sind chemisch relativ unempfindlich [7].

Bei der Herstellung einer mehrschichtigen LED erfolgt der Schichtenaufbau gewöhnlich von der Lochtransportschicht hin zur Elektronentransportschicht. Daher sind oxetanfunktionalisierte Lochtransporter für dieses Verfahren unentbehrlich. In Anlehnung an den gebräuchlichen Lochtransporter TPD (Abb. 2) wurde zunächst das *N,N,N',N'*-Tetraphenylbenzidinderivat **9** (Abb. 8) synthetisiert, das zwei polymerisierbare Oxetansubstituenten enthält [8]. Ausgehend von 3-Ethyl-3-(hydroxymethyl)oxetan **5** wird über eine Veretherung der oxetanfunktionalisierte Bromaromat **6**

dargestellt. Im Schlüsselschritt der Synthese wird das Tetraphenylbenzidinderivat **8** in einer palladiumkatalysierten C-N-Kupplungsreaktion gewonnen. Aufgrund der milden Reaktionstemperaturen um 100°C, die durch die palladiumkatalysierte C-N-Kupplungsreaktion ermöglicht werden, konnte selbst unter den stark basischen Reaktionsbedingungen (NaO^tBu) keine Zersetzung des Oxetans beobachtet werden. Damit stand der Weg frei zu einer effizienten konvergenten Syntheseroute, die in Abb. 8 dargestellt ist.

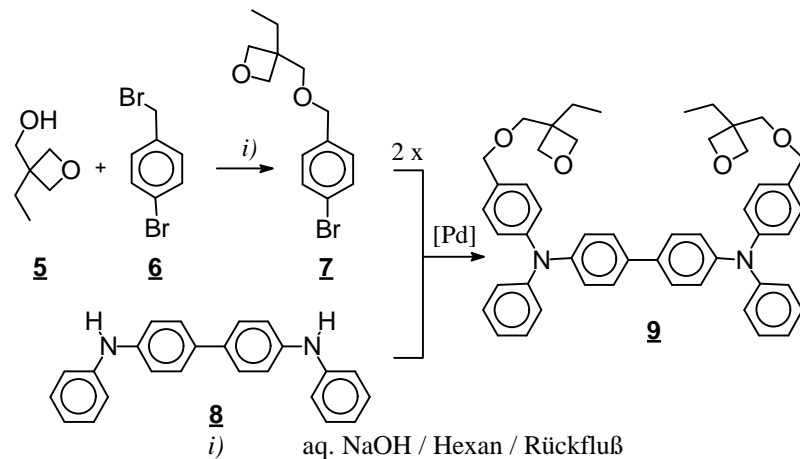


Abb. 8: Syntheseroute zum *N,N,N',N'*-Tetraphenylbenzidinderivat **9**

Das Konzept der Kombination von *spin-coating* und Photovernetzung erfordert Monomere, die gute Filmbildungseigenschaften, niedrige Glasübergangstemperaturen im unvernetzten Zustand besitzen und die bei der Photoinitiation möglichst quantitativ zu Polymeren umgesetzt werden und dabei vernetzen. Durch Einführung von Alkylspacern zwischen dem Lochtransporter und der Oxetanfunktion konnten die Filmbildungseigenschaften verbessert und die Glasübergangstemperaturen erniedrigt werden. Bislang wurden die in Abb. 9 gezeigten „homologen“

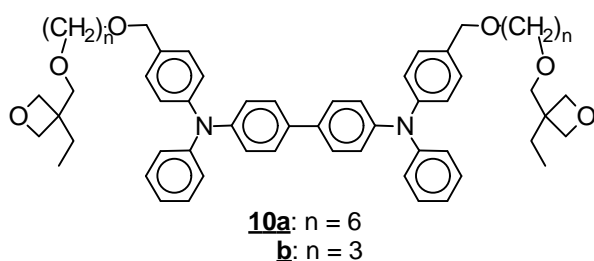


Abb. 9: Synthetisierte *N,N,N',N'*-Tetraphenylbenzidinderivate mit Alkylspacern

Tetraphenylbenzidinderivate **10a** und **10b** analog der in Abb. 8 vorgestellten Syntheseroute dargestellt. Durch die niedrigere Glasübergangstemperatur und die über die Alkylspacer

eingeführte höhere Beweglichkeit der Oxetangruppen sollten sich außerdem höhere Vernetzungsgrade erzielen lassen. Informationen über die bei der Vernetzung erzielten Umsätze sollen Echtzeit-FT-IR-Experimente liefern.

Weitere oxetanfunktionalisierte Triphenylamine, deren Ionisierungspotential durch Einführung elektronenschiebender oder -ziehender Substituenten variiert wird, wurden bereits synthetisiert. Ebenso Triarylamine, die nur eine Oxetangruppe tragen und so als Reaktivverdünner bei der Vernetzung wirken.

Die unmittelbare Erprobung der neu synthetisierten Lochtransportverbindungen in OLEDs hat bei dieser Arbeit höchsten Stellenwert. Die Leistungsfähigkeit der vernetzbaren Verbindungen in OLEDs wird in einer Kooperation mit Herrn David Müller aus der Gruppe von PD Dr. Klaus Meerholz am Lehrstuhl für Physikalische Chemie I an der Ludwig-Maximilians-Universität München geprüft.

Zunächst wurde das TPD-Derivat **9** in einer OLED im unvernetzten und vernetzten Zustand verglichen. Wegen der guten Löslichkeit der Materialien im unvernetzten Zustand konnten

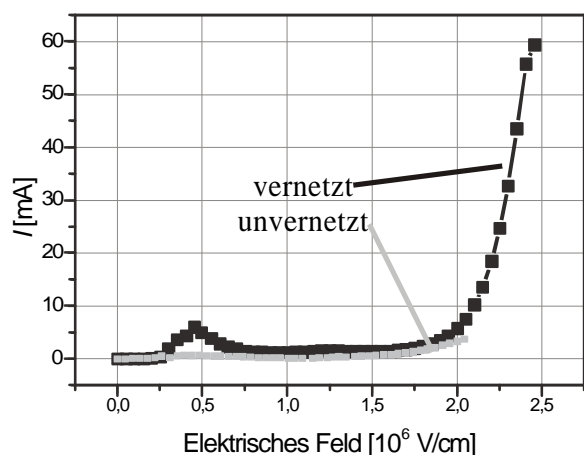


Abb. 10: Diodenkennlinien einer Einschicht-OLED aus unvernetztem und vernetztem **9**

diese Untersuchungen nur an einer Einschicht-OLED vorgenommen werden. Die Vernetzung wurde mit dem literaturbekannten Photoinitiator 4-(Thiophenoxyphenyl)diphenylsulfoniumhexafluoroantimonat [9] initiiert. Ein Vergleich der Diodenkennlinien der OLEDs aus unvernetztem und vernetztem **9** in Abb. 10 zeigt, daß durch die Vernetzung der maximal mögliche Stromfluß um den Faktor 15 erhöht wird.

Andere Autoren beschreiben, daß durch eine Vernetzung ihrer Systeme über einen radikalischen Mechanismus dagegen eine Verschlechterung der Device-Stabilität bewirkt wird [6].

Wesentlich interessanter ist die Erprobung der Materialien in Zweischicht-OLEDs. Alle bisher synthetisierten oxetanfunktionalisierten Lochtransportverbindungen wurden inzwischen in Zweischicht-OLEDs getestet. Exemplarisch wird hier über die Ergebnisse für das TPD-Derivat **9** berichtet. Als elektronenleitende zweite Schicht wurde 2-Biphenyl-5-(4-*tert.*-butylphenyl)-3,4-oxadiazol (PBD) im Massenverhältnis 1:1 mit einer Poly(α -methylstyrol)matrix als Elektronentransportschicht eingesetzt, die mit 1 Gew.-% Perylen als

Chromophor dotiert war. Eine charakteristische Strom-Spannungskurve und die Lumineszenz-Spannungskurve einer entsprechenden OLED ist in *Abb. 11* zu sehen. Die Diode emittiert im blauen Spektralbereich. Die Helligkeit lag bei über 2000 cd/m^2 .

Ausdrücklich betont werden muß, daß die Verarbeitung der Verbindungen in OLEDs via Vernetzung laufend optimiert wird, so

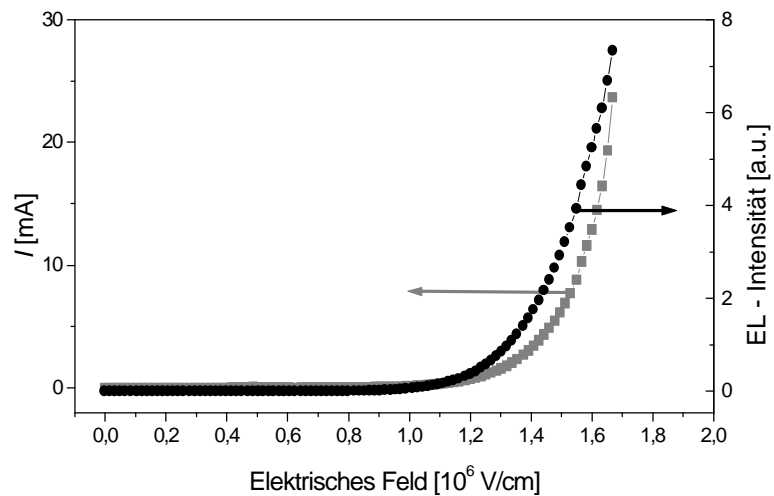


Abb. 11: Diodenkennlinien für eine Zweischicht-Diode {ITO/2 vernetzt/2 PBD (49,5 Gew.-%)/Poly(*a*-methylstyrol) (49,5 Gew.-%)/Perylen (1 Gew.-%)/Ca}

daß weitere Verbesserungen der resultierenden OLEDs zu erwarten sind. Das Konzept der vernetzenden Materialien wird zur Zeit auf die übrigen Schichten einer OLED aus Emittiermaterialien und Elektronentransportmaterialien übertragen. Damit könnten erstmals drei- und mehrschichtige OLEDs via *spin-coating* hergestellt werden. Für industrielle Anwendungen ist insbesondere die Diodenlebensdauer von Bedeutung. Dazu sind Untersuchungen in Kooperation mit der Siemens AG, Erlangen, geplant.

4. Zusammenfassung

Im Rahmen dieses Forkatprojektes sollen neue Ladungstransportmaterialien für OLEDs entwickelt werden. Die Forschungsaktivitäten konzentrieren sich dabei auf die Lochtransportierenden Triarylamine. Bei deren Synthese nimmt die palladiumkatalysierte C-N-Kupplungs-Reaktion eine Schlüsselstellung ein. Einerseits wurden dabei verschiedene niedermolekulare triarylaminhaltige Spiroverbindungen synthetisiert, die über Sublimationsverfahren verarbeitet werden können. Durch die spezielle Molekülgeometrie konnten hohe Glasübergangstemperaturen und thermische Stabilität bei ausreichender Flüchtigkeit gewährleistet werden. Die Verbindungen wurden cyclovoltammetrisch untersucht und werden von den Kooperationspartnern der Siemens AG, Erlangen, in OLEDs erprobt. In Kooperation mit der Siemens AG, Erlangen, laufen ferner Untersuchungen über die Auswirkungen des Palladiumrestgehaltes in den Materialien auf die Lebensdauer und die Effektivität der OLEDs. Der andere Schwerpunkt des Projekts liegt auf der Entwicklung von oxetanfunktionalisierten vernetzbaren Ladungstrans-

portverbindungen, aus denen Mehrschicht-OLEDs durch Lösungsverfahren wie *spin-coating* hergestellt werden können. Durch die Photovernetzung der Verbindungen über die Oxetanfunktion nach einem kationischen Mechanismus werden die Materialien unlöslich und können als Grundlage für weitere *spin-coating*-Arbeitsgänge verwendet werden. Dank der palladiumkatalysierten C-N-Kupplungs-Reaktion konnte eine effiziente Syntheseroute für oxetanfunktionalisierte Triarylamine entwickelt werden. Erste Erprobungen der neuen Verbindungen in OLEDs wurden in Kooperation mit der Gruppe von PD Dr. Klaus Meerholz am Lehrstuhl für Physikalische Chemie I der Ludwig-Maximilian-Universität München durchgeführt. Lebensdaueruntersuchungen an vernetzten OLEDs erfolgen in Kooperation mit der Siemens AG, Erlangen. Bereits diese orientierenden Experimenten ist zu entnehmen, daß der Weg über die Vernetzung der Einzelschichten einen interessanten Zugang zu Hochleistungs-Multischicht-OLEDs eröffnet.

5. Literatur

- [1] J.H. Borroughes, D.D.C. Bradley, A.R. Brown, R.N. Marks, K. Mackay, R.H. Friend, P.L. Burns, A.B. Holmes, *Nature* **347**, 539 (1990)
- [2] a) C.W. Tang, S.A. VanSlyke, *Appl. Phys. Lett.* **51**, 913 (1987); b) Y.-H. Tak, H. Vestweber, H. Bässler, A. Bleyer, R. Stockmann, H.-H. Hörhold, *Chem. Phys.* **212**, 471 (1996); c) D.V. Khrotchenkov, V.I. Arkhipov, H. Bässler, *J. Appl. Phys.* **81**, 6954, (1997); d) Y.-H. Tak, H. Bässler, *J. Appl. Phys.* **81**, 6963 (1997)
- [3] a) M.S. Driver, J.F. Hartwig, *J. Am. Chem. Soc.* **118**, 7217 (1996); b) J.P. Wolfe, S. Wagaw, S.L. Buchwald, *J. Am. Chem. Soc.* **118**, 7215 (1996)
- [4] a) S.A. Van Slyke, C.H. Chen, C.W. Tang, *Appl. Phys. Lett.* **69**, 2160 (1996); b) Y. Kuwabara, H. Ogawa, H. Inada, N. Noma, Y. Shirota, *Adv. Mater.* **6**, 677 (1994); c) P.-W. Wang, Y.-J. Liu, C. Devadoss, P. Bharathi, J.S. Moore, *Adv. Mater.* **8**, 237 (1996)
- [5] V.R. Nikitenko, V.I. Arkhipov, Y.-H. Tak, J. Pommerehne, H. Bässler, H.-H. Hörhold, *J. Appl. Phys.* **81**, 7414 (1997)
- [6] a) E. Bellmann, S.E. Shaheen, S. Thayumanavan, S. Barlow, R.H. Grubbs, S.R. Marder, B. Kippelen, N. Peyghambarian, *Chem. Mater.* **10**, 1668 (1998); b) X.C. Li, T.M. Yong, J. Grüner, A.B. Holmes, S.C. Moratti, F. Cacialli, R.H. Friend, *Synth. Met.* **84**, 437 (1997)
- [7] R. Böhner, C. Erdmann, O. Nuyken, *Macromol. Symp.* **107**, 125 (1996)
- [8] a) T. Braig, M.S. Bayerl, O. Nuyken, D.C. Müller, M. Groß, K. Meerholz, *Polym. Prepr. (Am. Chem. Soc., Div. Polym. Chem.)* **40(1)**, (1999) im Druck; b) M.S. Bayerl, T. Braig; O. Nuyken, D.C. Müller, M. Groß, K. Meerholz, *Macromol. Rapid Commun.* **20**, (1999) im Druck
- [9] J.V. Crivello, J.H.W. Lam, *J. Polym. Chem. Ed.* **18**, 2697 (1980)