

Organische LEDs

- Die Lichtquelle der Zukunft? -

Simone Hofmann



Institut für Angewandte Photophysik (IAPP)

- gegründet 1908
- bis 1990: hauptsächlich Photographie
- ca. 130 Wissenschaftler

Heutige Themen:

- OLEDs
(**o**rganic **l**ight-**e**mitting **d**iode)
- Organische Solarzellen
- New Devices (organische Transistoren, Speicher,...)
- Organische Laser
- Elektroden und Verkapselung
- Rastersondenmikroskopie



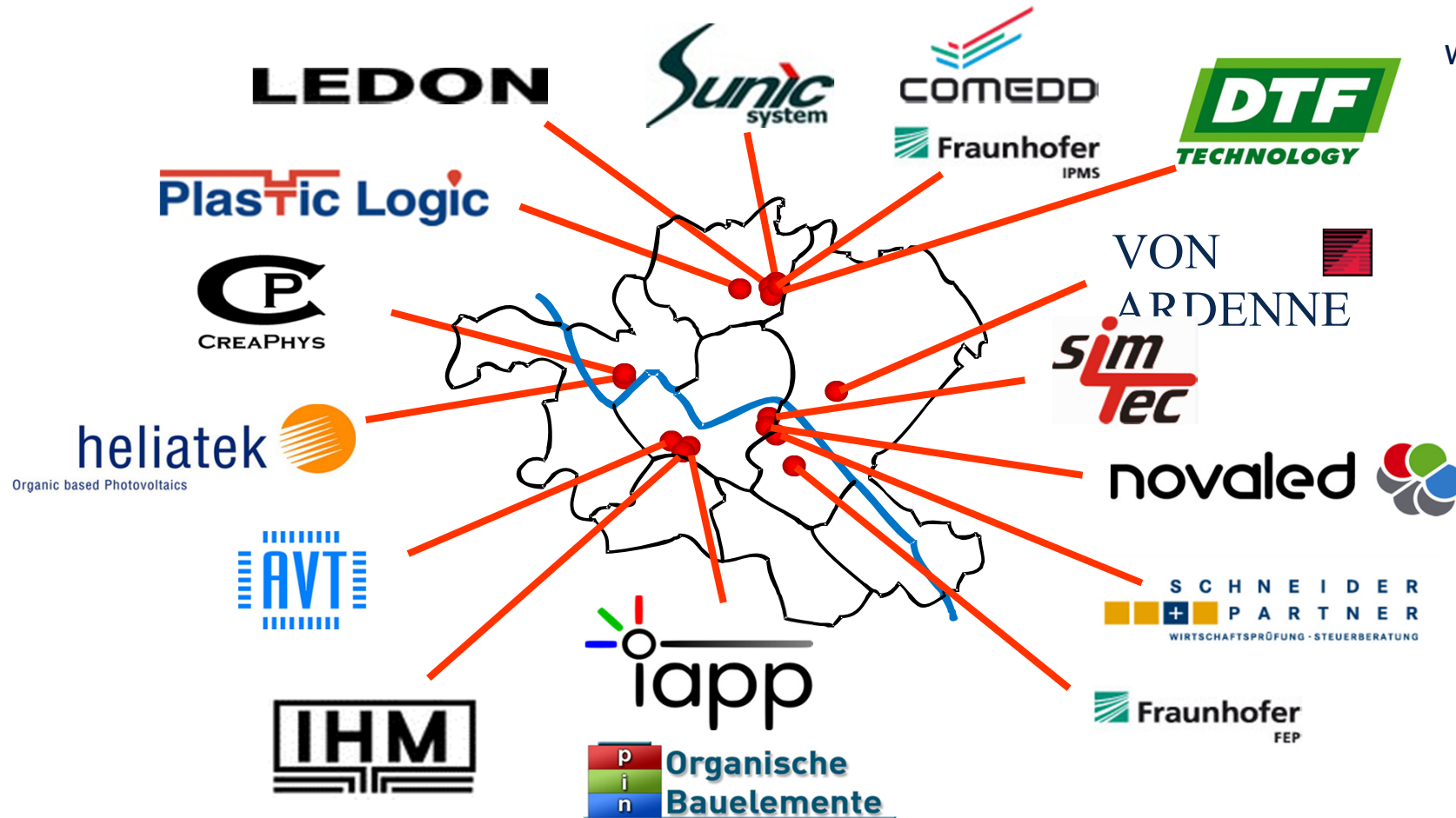
Vortrag auf www.iapp.de

Organische Elektronik in Dresden

Netzwerk an Forschung/Entwicklung und Industrie



www.oes-net.de



Was kann man mit OLEDs alles machen?

Beleuchtung

für Haushalt, Arbeitsplatz, Auto, Schilder,...

Displays

TV, Smartphones, Großleinwände
Head-up Displays, ...



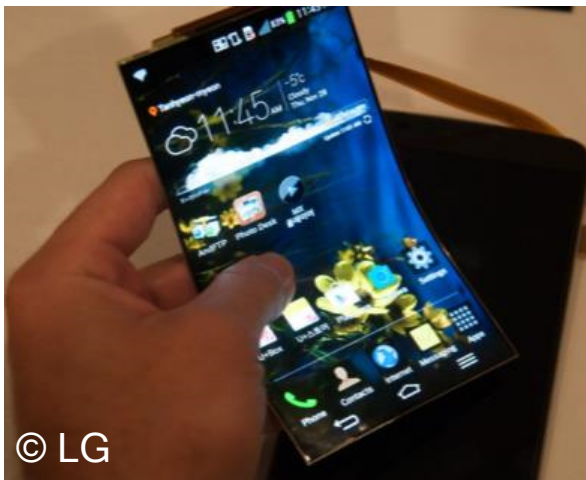
© Novaled



© Audi



© Philips



© LG



© Mitsubishi Electric



© Fraunhofer IPMS

Welche Eigenschaften haben OLEDs?



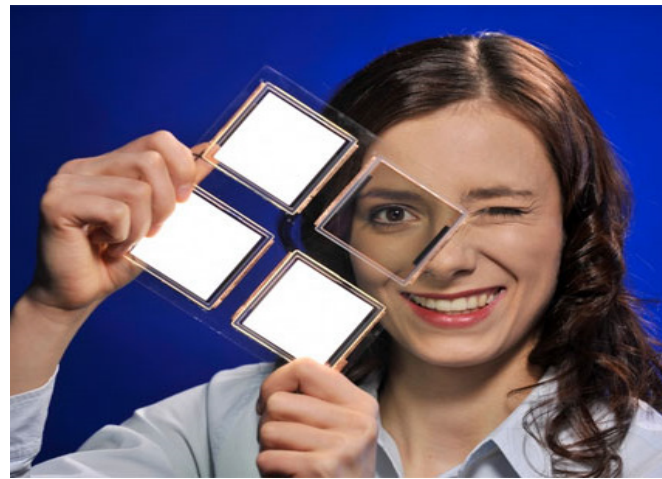
© Holst Centre



© Philips

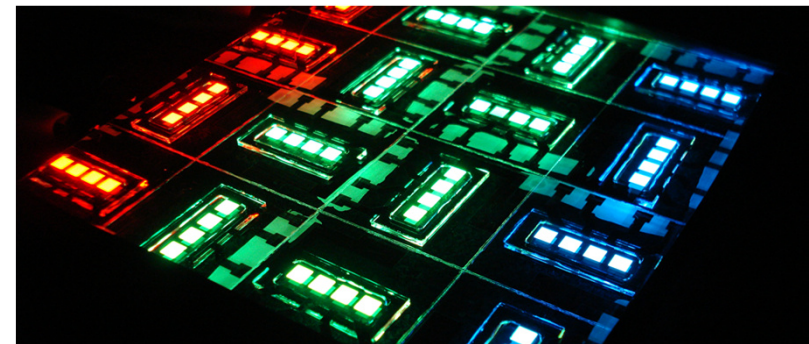


© OSRAM



© Novaled

- Flächenstrahler
- gleichmäßige Lichtabgabe in alle Betrachtungsrichtungen
- hohe Farbwiedergabe
- transparent
- flexibel
- dimmbar
- Freiheit in Form und Farbe



© IAPP

Kann man OLEDs bereits kaufen?



Reichelt/Conrad
30€-50€



Samsung
Galaxy I-IV
ab 50€



Samsung TV



Zukunftsmusik?!



Zukunftsmusik?!

<http://www.jonassamson.com/>



<http://youspin.co/blog/>



1. Einführung
 - 1.1 Organische Halbleiter (Chemie)
 - 1.2 Herstellung
 - 1.3 Funktionsprinzip

2. Effizienz (Physik)
 - 2.1 pin – OLED
 - 2.2 Exzitonen
 - 2.3 Lichtauskopplung
 - 2.4 Vergleich zu herkömmlichen Lichtquellen

3. Aktuelle Forschung

1. Einführung

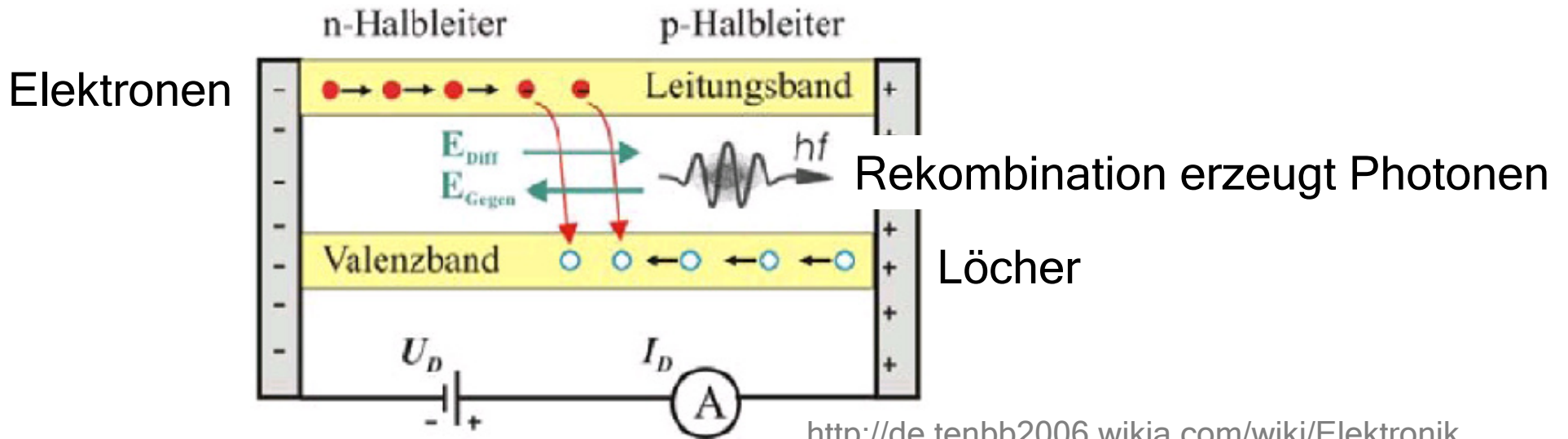
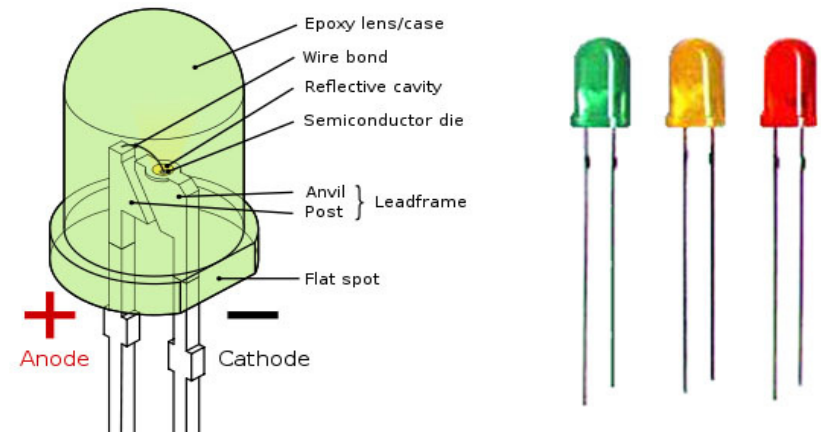
OLED = organische LED

bekannt aus Anorganik:

LED = Licht-emittierende Diode

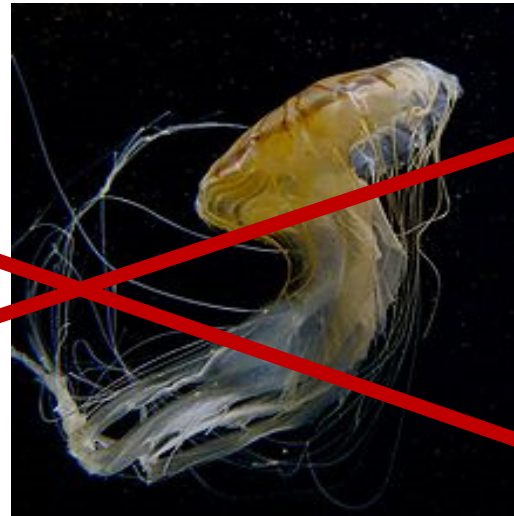
= pn Übergang mit Bandlücke im sichtbaren Wellenlängenbereich (400-800nm)

<http://gestalterwiki.de/led/start>



1.1 Organische Halbleiter

Was bedeutet jetzt „organisch“?



Keine Tierversuche!

Hier: organisch, weil Materialien u.a. auf Kohlenstoff basieren

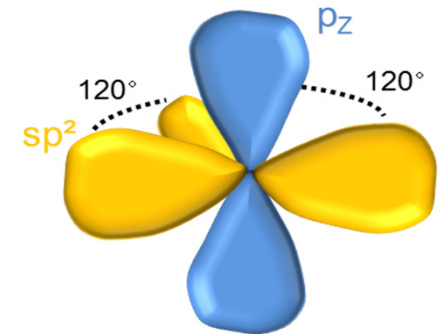
1.1 Organische Halbleiter

Organisch -Kohlenstoff

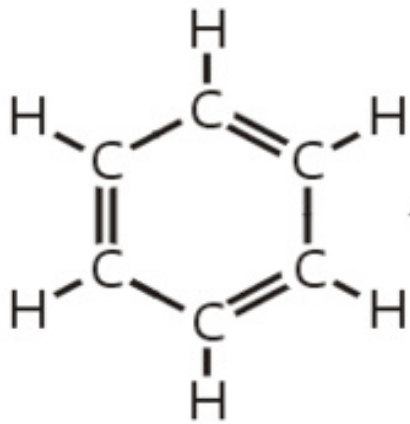
Halbleiter?

Organische Halbleiter besitzen ein **delokalisiertes π System**.

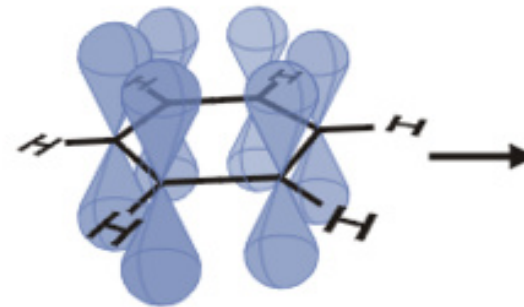
Vor.: Doppelbindungen sind durch genau eine Einfachbindung getrennt



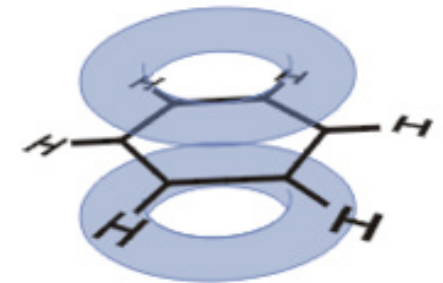
Beispiel: Benzen



σ -Bindungen mit hybridisierten sp^2 -Orbitalen



6 p_z -Orbitale

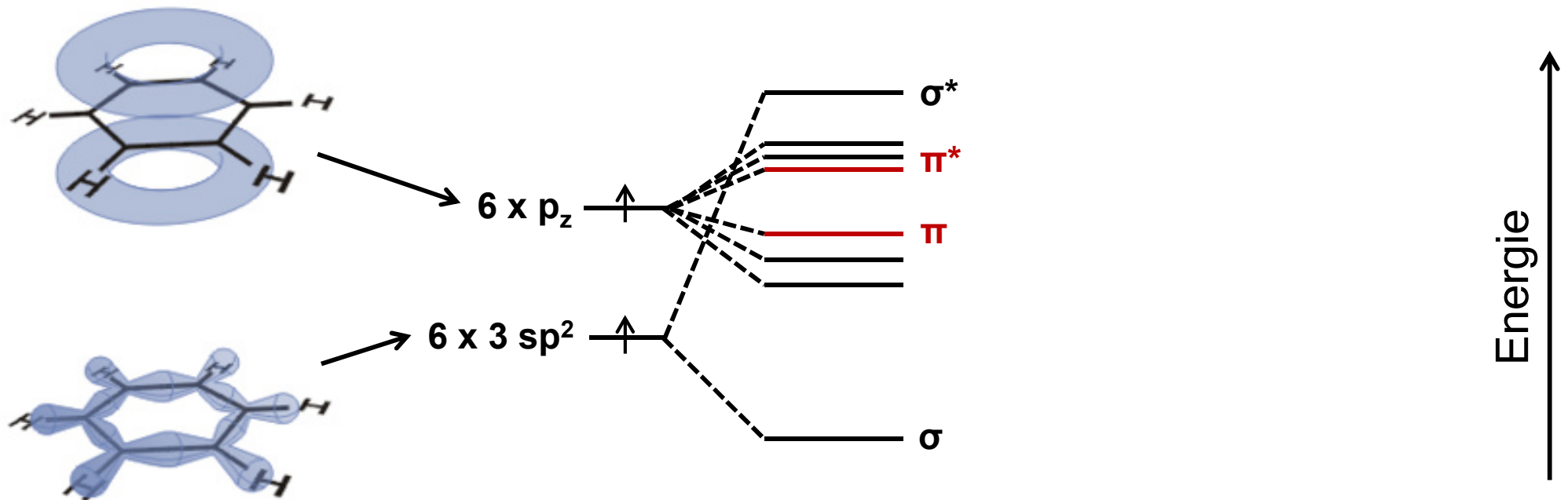


delokalisierte π -Orbitalwolke

1.1 Organische Halbleiter

Organische Halbleiter - delokalisiertes π System

Beispiel: Benzen

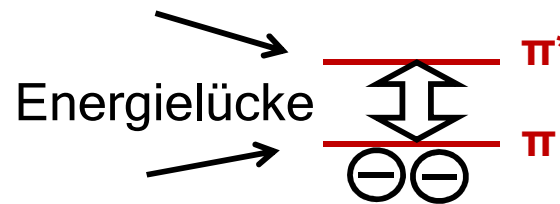


1.1 Organische Halbleiter

Organische Halbleiter - delokalisiertes π System

LUMO = niedrigstes unbesetztes Orbital
(lowest unoccupied molecular orbital)

HOMO = höchstes besetztes Orbital
(highest occupied molecular orbital)



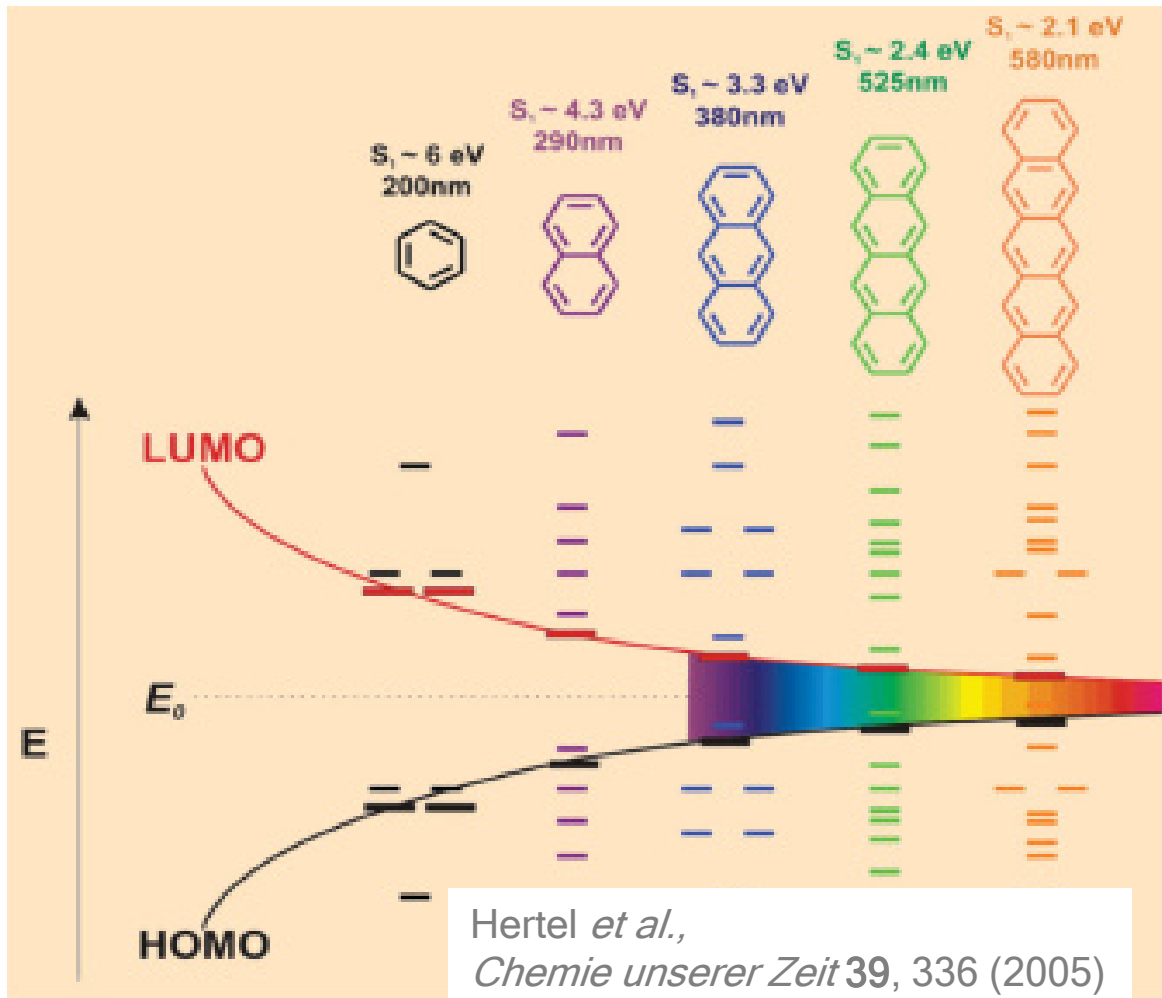
Analogon:
klassischer Halbleiter

Leitungsband

Valenzband

Energie ↑

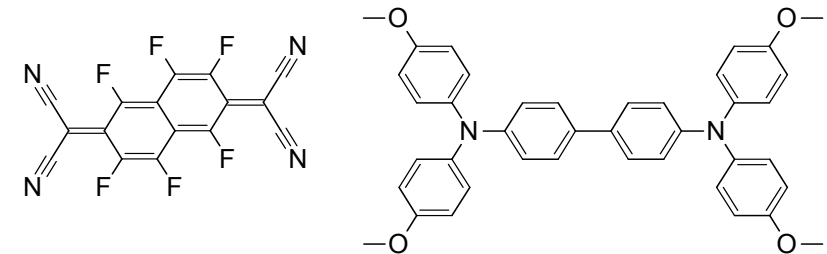
1.1 Organische Halbleiter



Energielücke im sichtbaren Wellenlängenbereich durch Veränderung der Molekülstruktur

nahezu unbegrenzter Pool an organischen halbleitenden Materialien

weitere Beispiele:

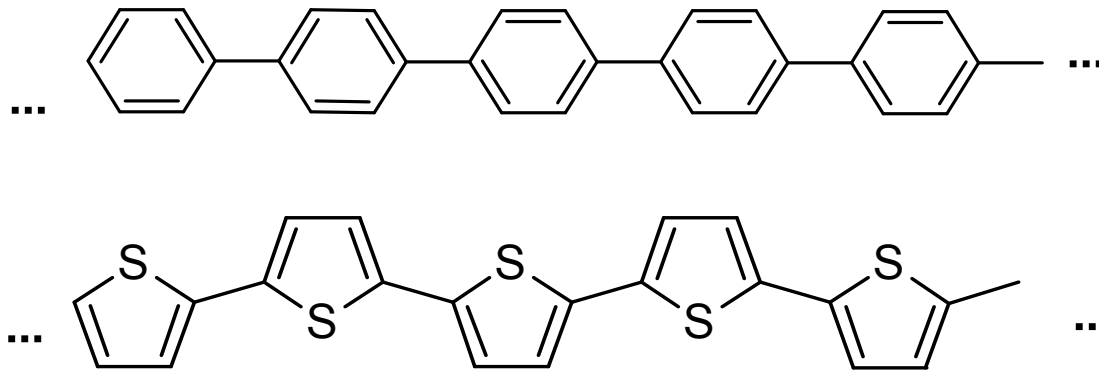




1.1 Organische Halbleiter

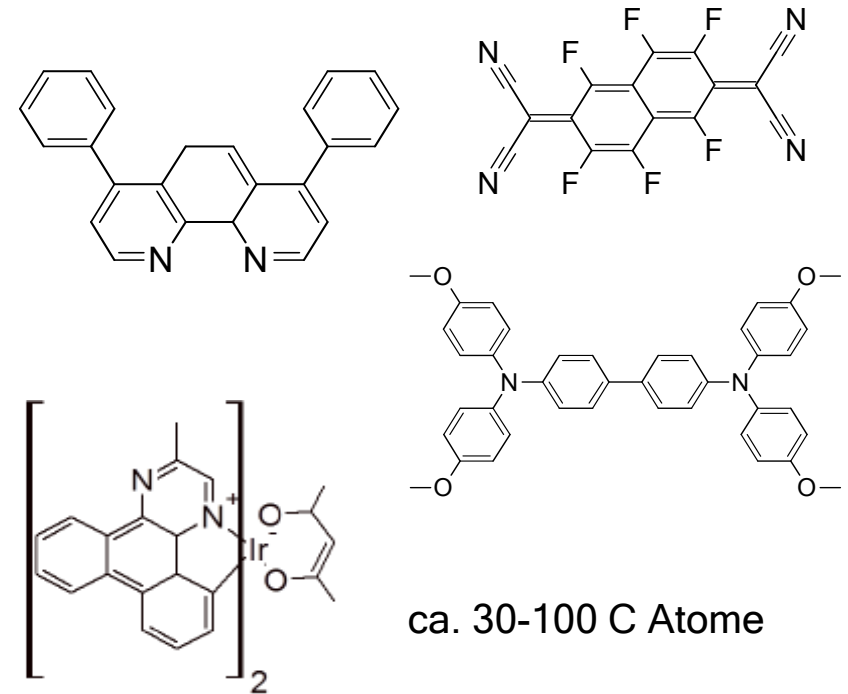
Klassen organischer Halbleiter:

Polymere



lange Molekülketten

kleine Moleküle (Oligomere)





1.1 Organische Halbleiter

Klassen organischer Halbleiter:

Polymere



<http://blog.subnetmask.de/>



<http://idw-online.de>

kleine Moleküle (Oligomere)



<http://www.farbeundlack.de>

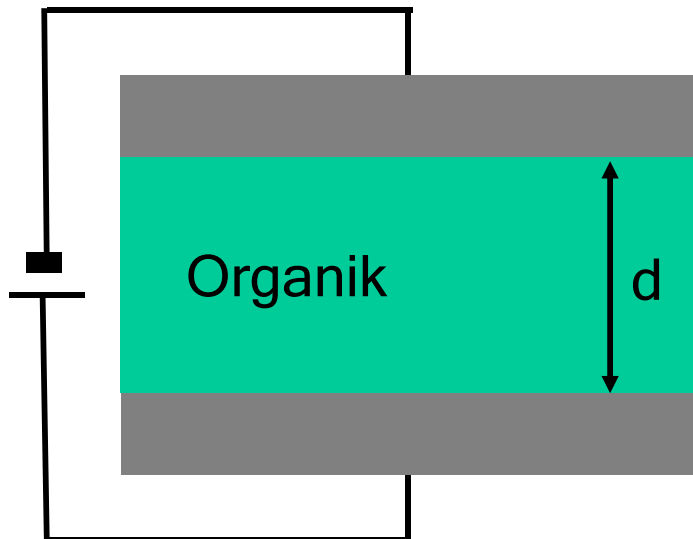


<http://www.nordpool-media.com/>

1.1 Organische Halbleiter

Folie/Farbe leitet doch überhaupt keinen Strom!

Rechenbeispiel:



Doch! Sie müssen nur ganz dünn sein.

Geg.: Spannung $U = 3 \text{ V}$
 Stromdichte $j = 10 \text{ mA/cm}^2$
 Leitfähigkeit $\sigma = 10^{-8} \text{ S/cm}$

Ges.:
 Schichtdicke d

Lös.:

$$E = \frac{U}{d} \quad j = \sigma E$$

$$d = \frac{U\sigma}{j} = \frac{3\text{V} \cdot 10^{-8}\text{S/cm}}{10 \text{ mA/cm}^2} = \frac{3\text{V} \cdot 10^{-8}\text{A/V}}{10^{-2}\text{A/cm}}$$

$$\underline{\underline{d = 3 \cdot 10^{-6}\text{cm} = 30 \text{ nm}}}$$

1.2 Herstellung

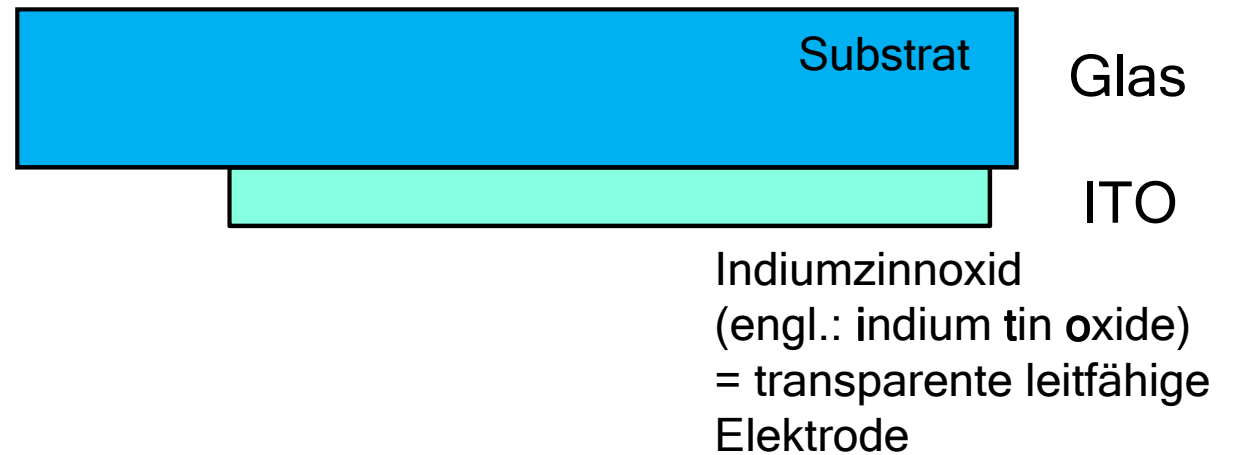
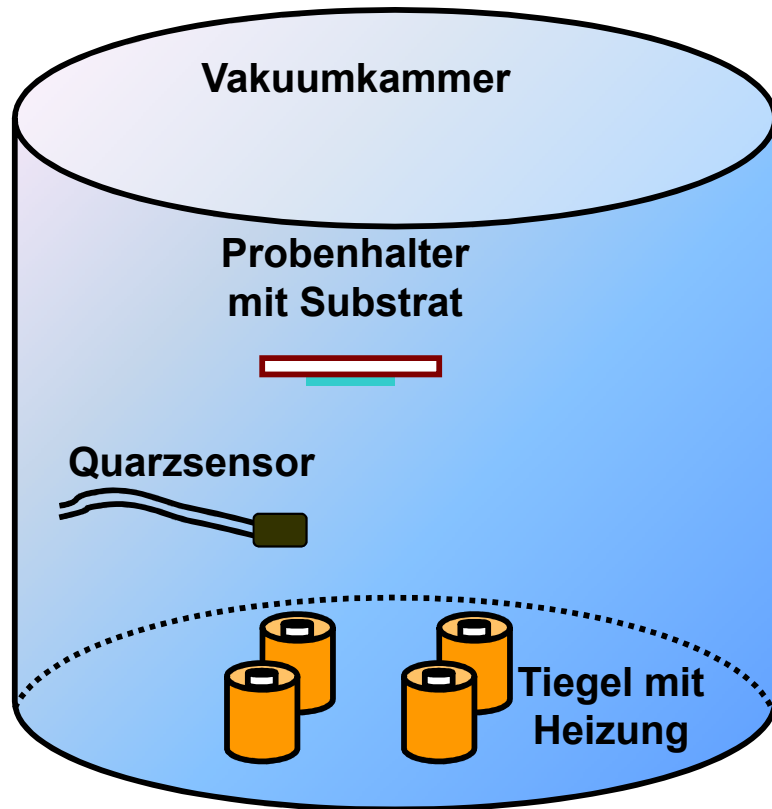
kleine Moleküle - dünne Schichten - Verdampfen im Ultrahochvakuum



<http://www.schulzeug-online.de>

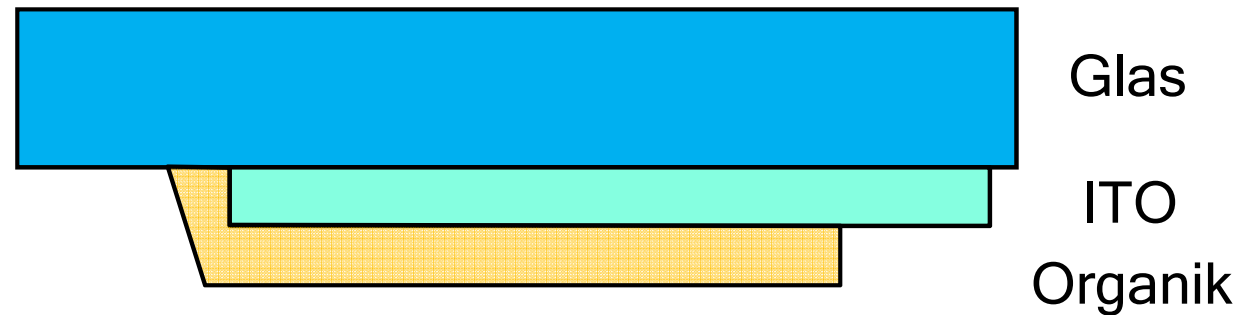
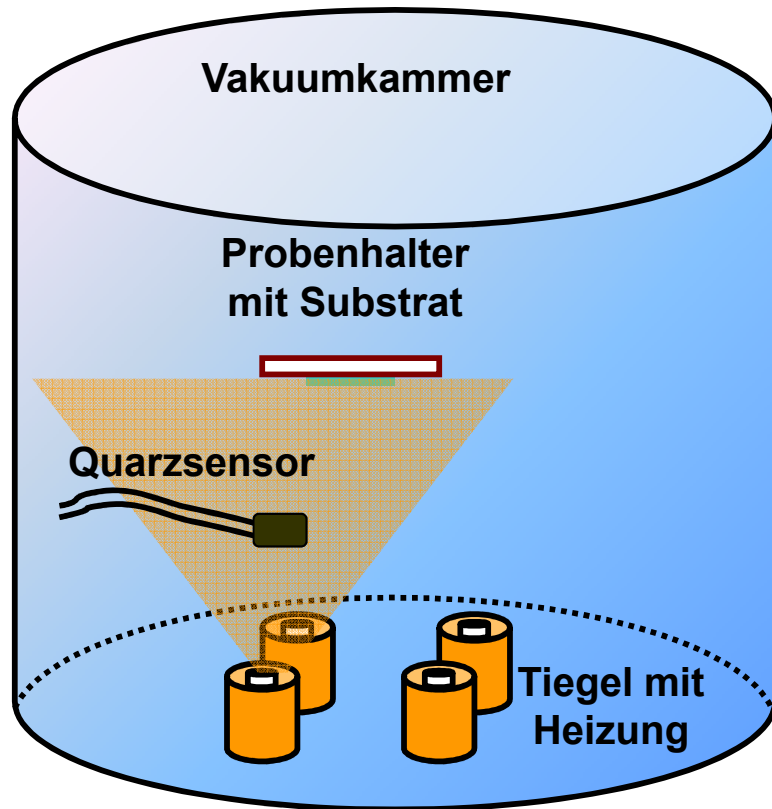
1.2 Herstellung

kleine Moleküle - Verdampfen im Ultrahochvakuum



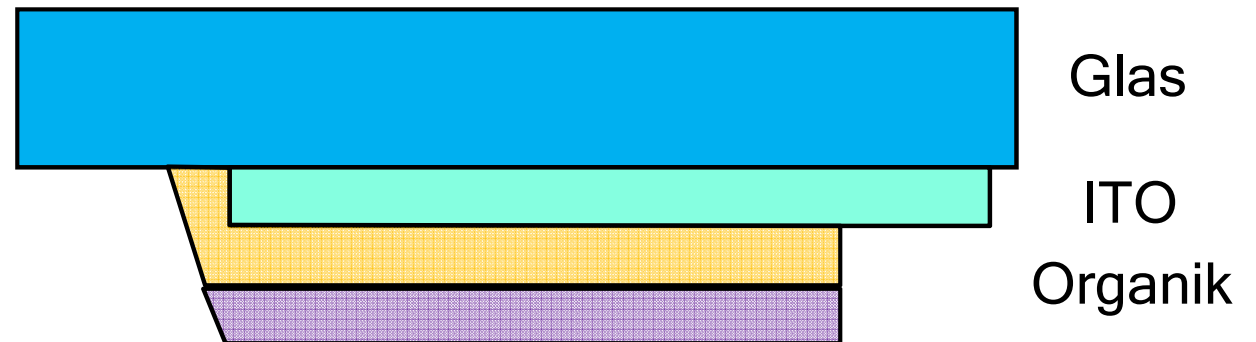
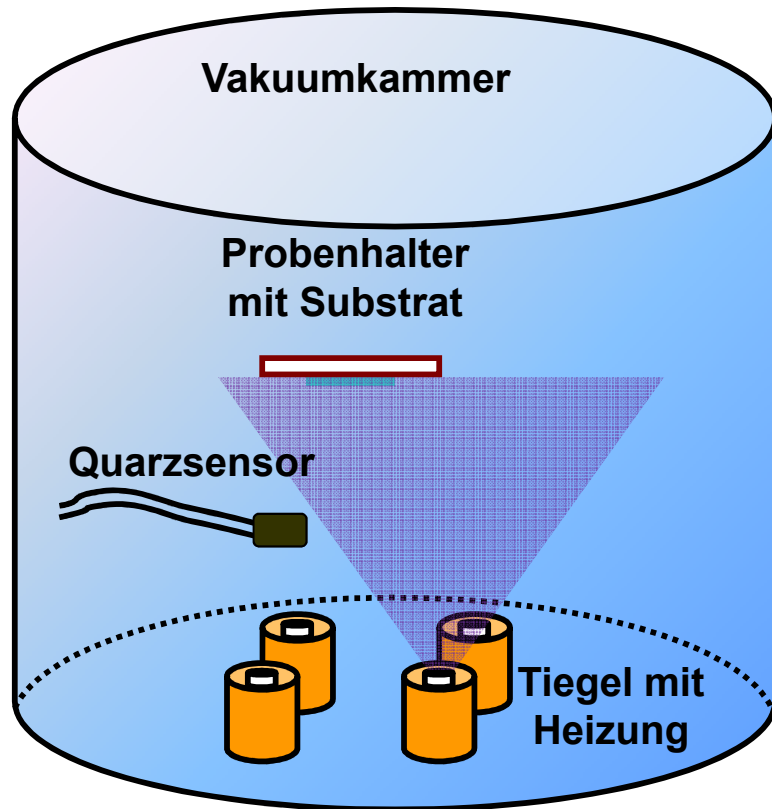
1.2 Herstellung

kleine Moleküle - Verdampfen im Ultrahochvakuum



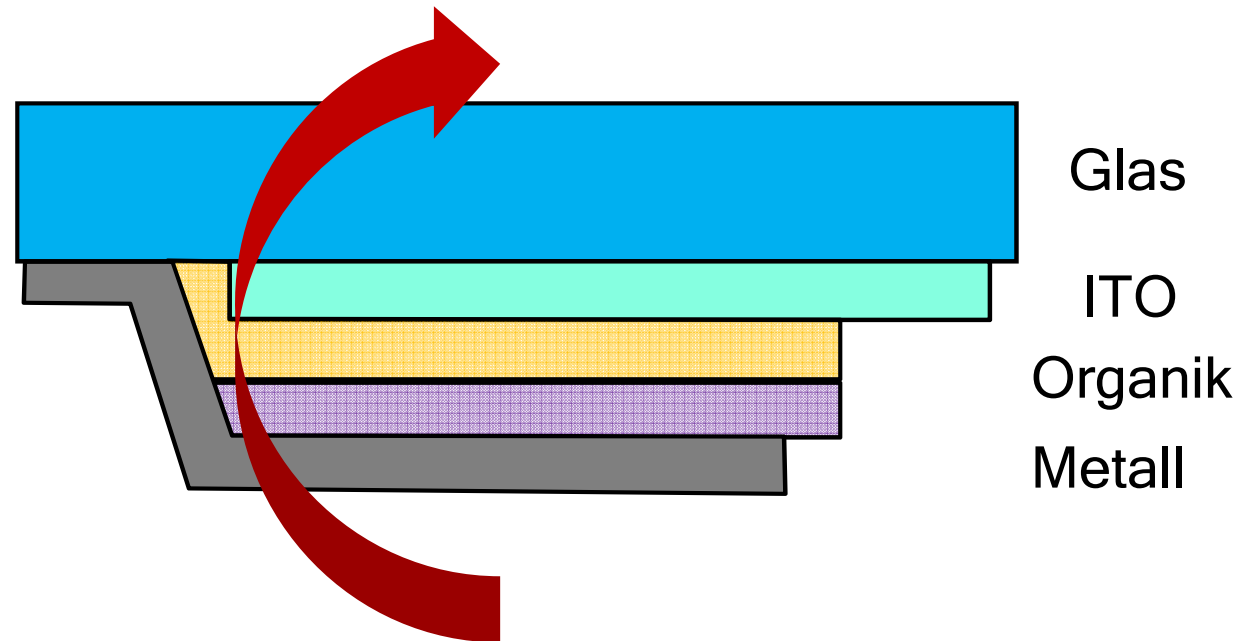
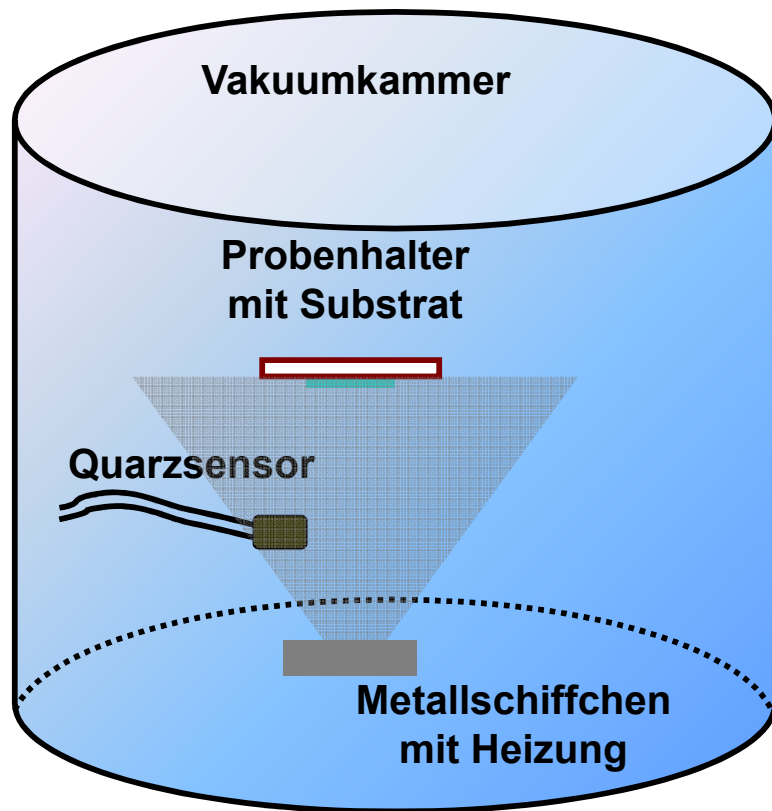
1.2 Herstellung

kleine Moleküle - Verdampfen im Ultrahochvakuum



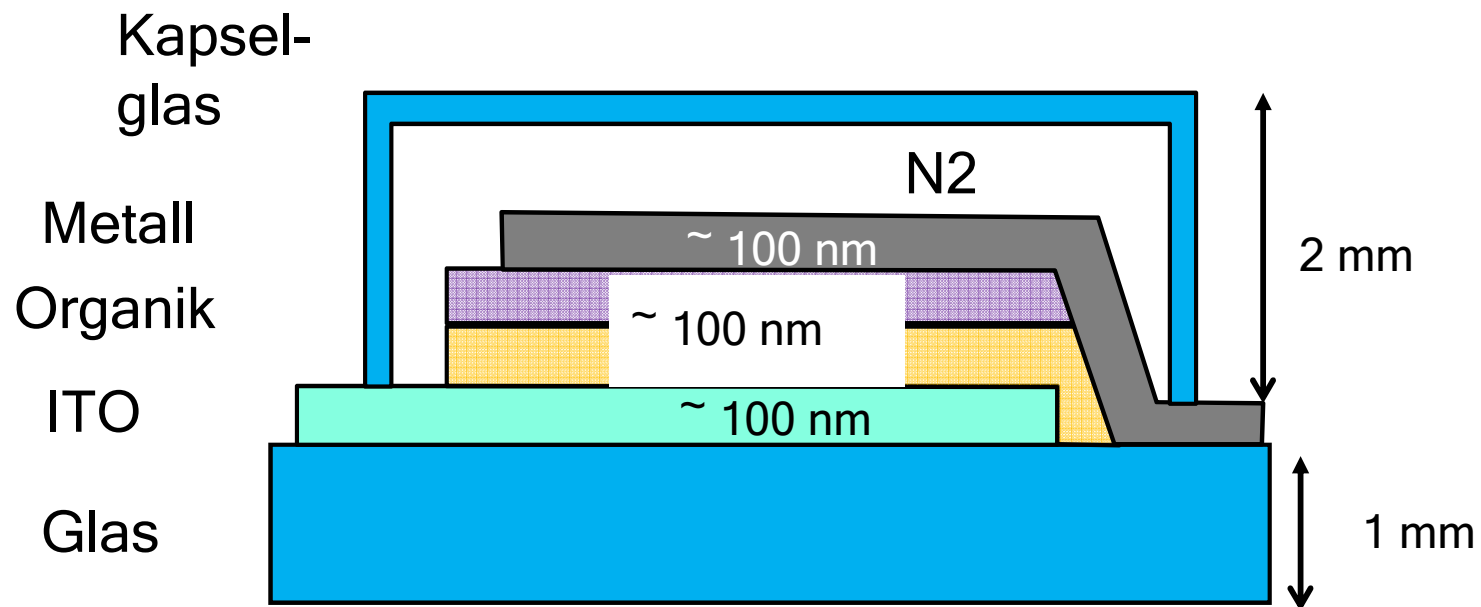
1.2 Herstellung

kleine Moleküle - Verdampfen im Ultrahochvakuum



1.2 Herstellung

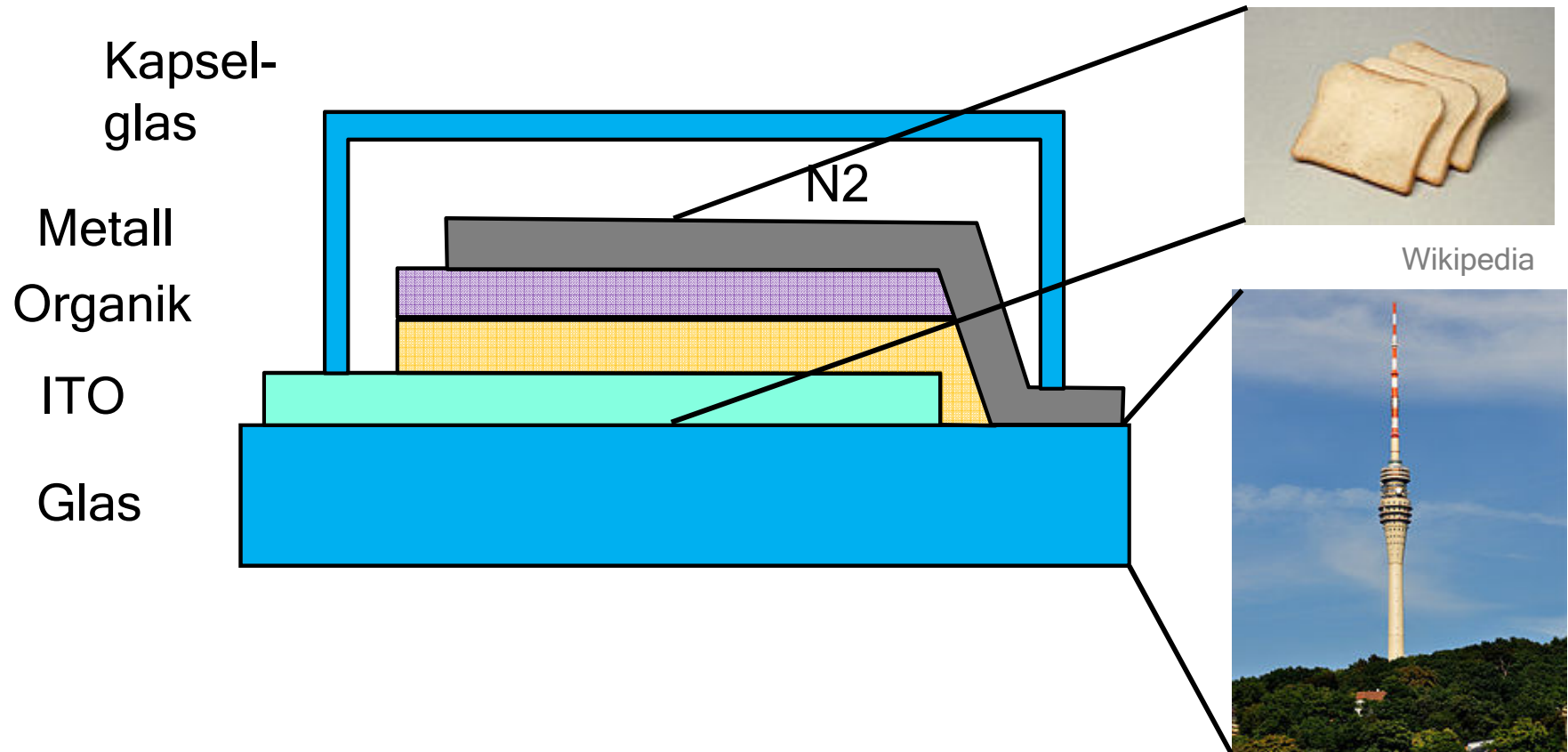
kleine Moleküle - Verdampfen im Ultrahochvakuum



100 nm = 1/1000 der
Dicke eines Haares

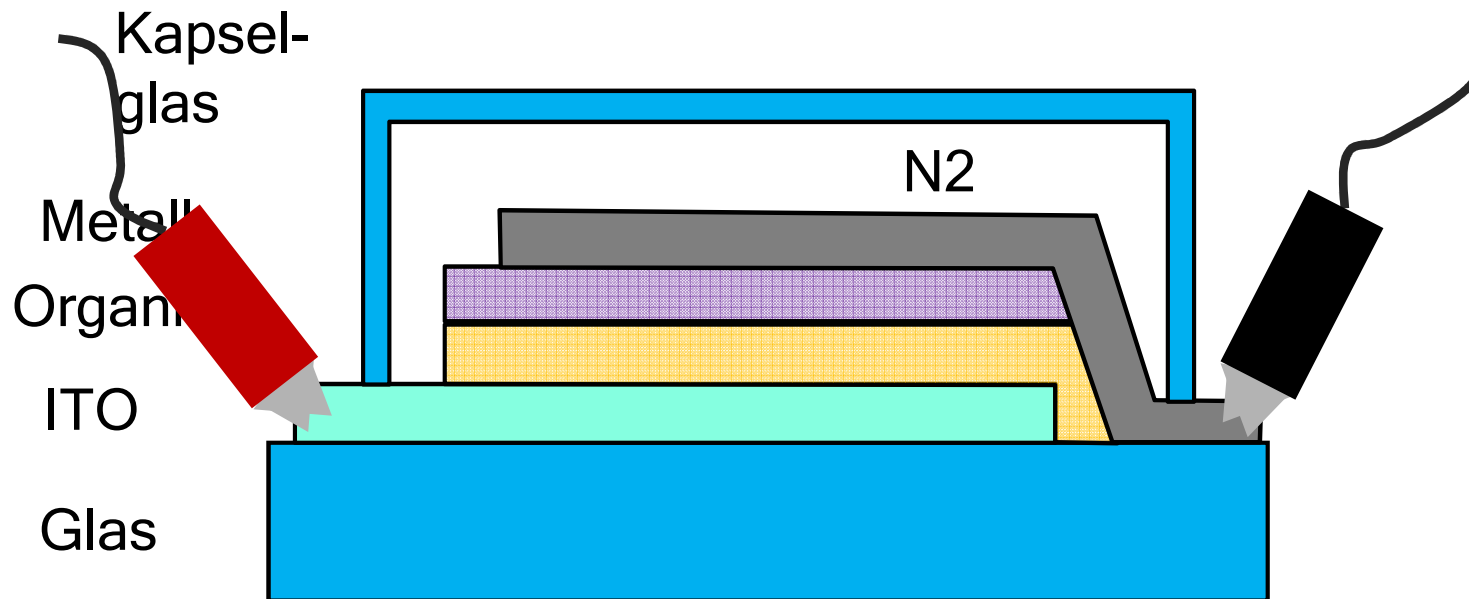
1.2 Herstellung

kleine Moleküle - Verdampfen im Ultrahochvakuum



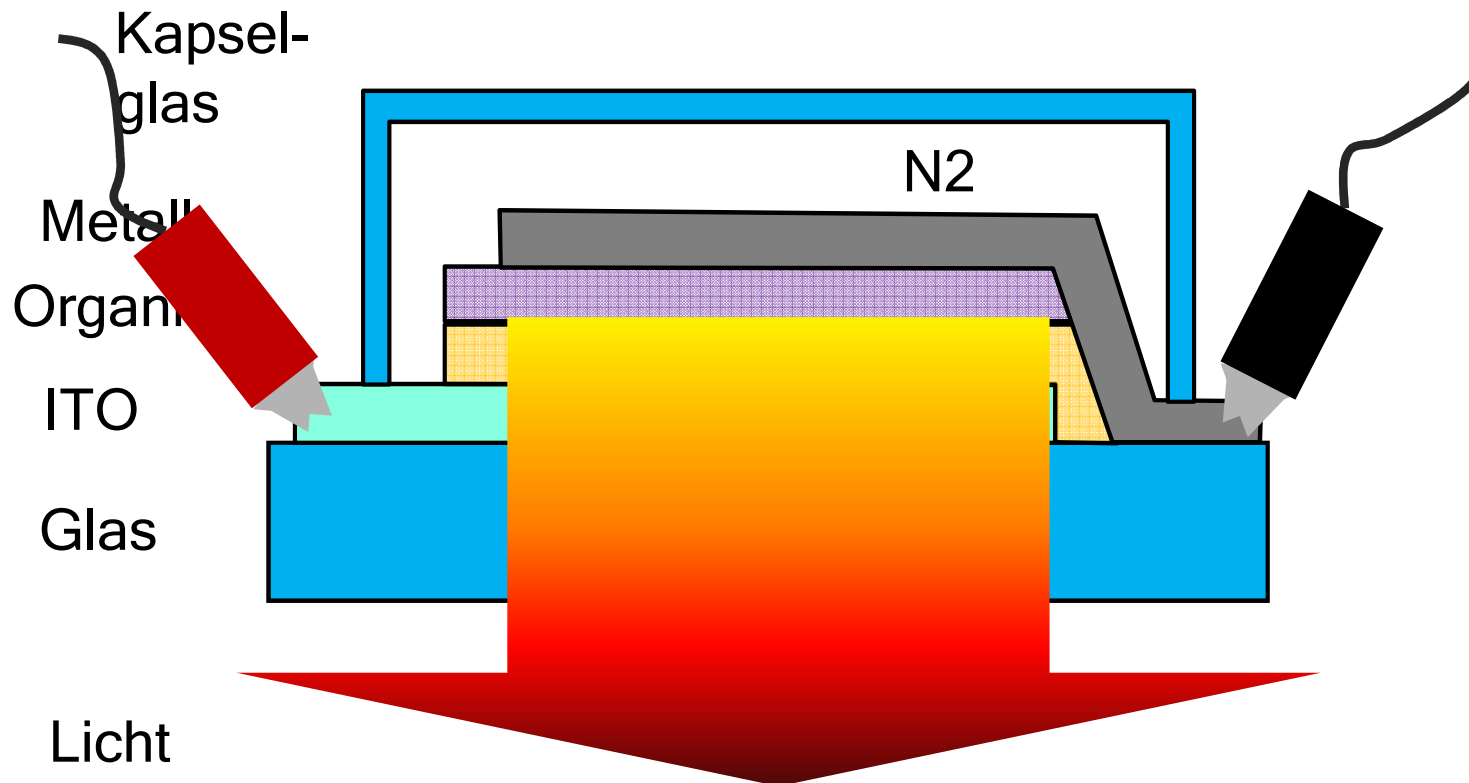
1.3 Funktionsprinzip

kleine Moleküle - Verdampfen im Ultrahochvakuum



1.3 Funktionsprinzip

kleine Moleküle - Verdampfen im Ultrahochvakuum



1.3 Funktionsprinzip

1987 Kodak: Tang und VanSlyke

erste OLED (grün):

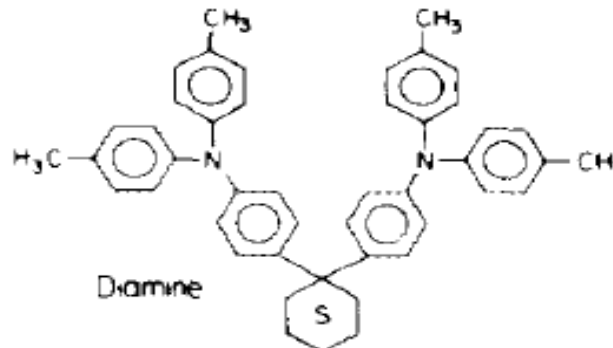
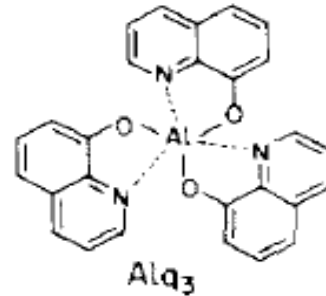
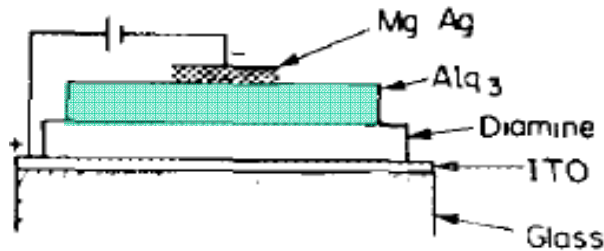


FIG. 1. Configuration of EL cell and molecular structures.

Appl. Phys. Lett. 51, 913 (1987)

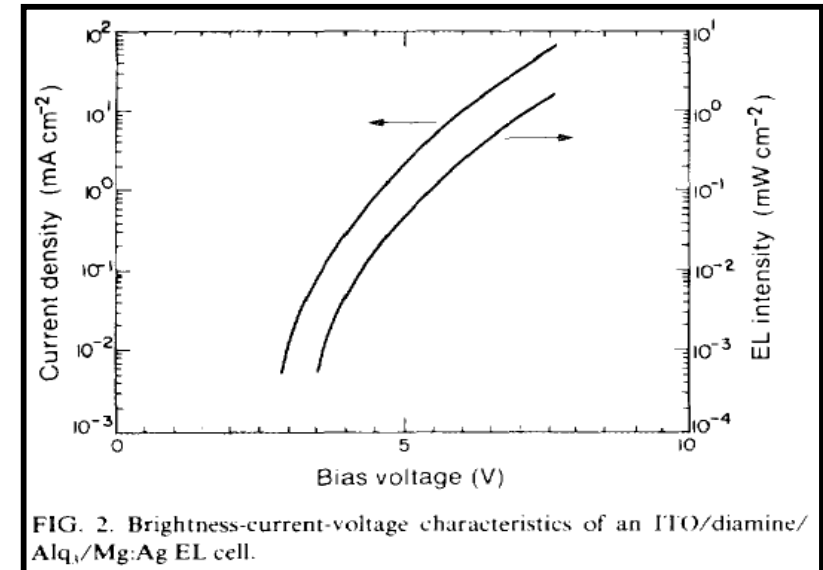


FIG. 2. Brightness-current-voltage characteristics of an ITO/diamine/Alq₃/Mg:Ag EL cell.

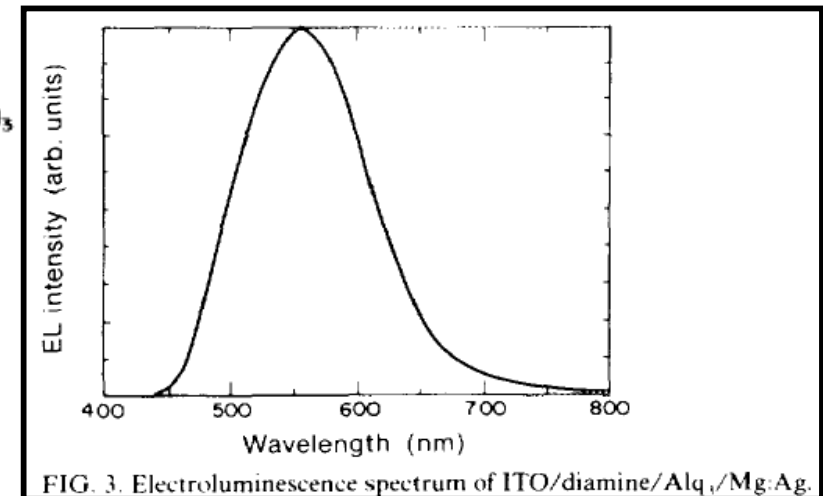
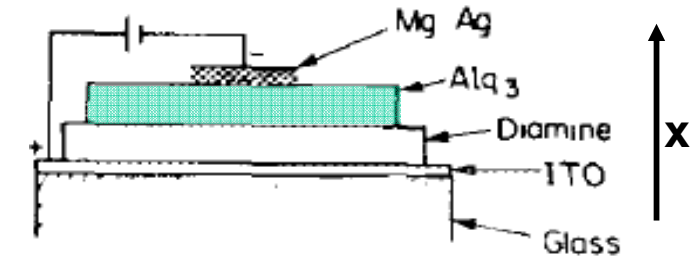
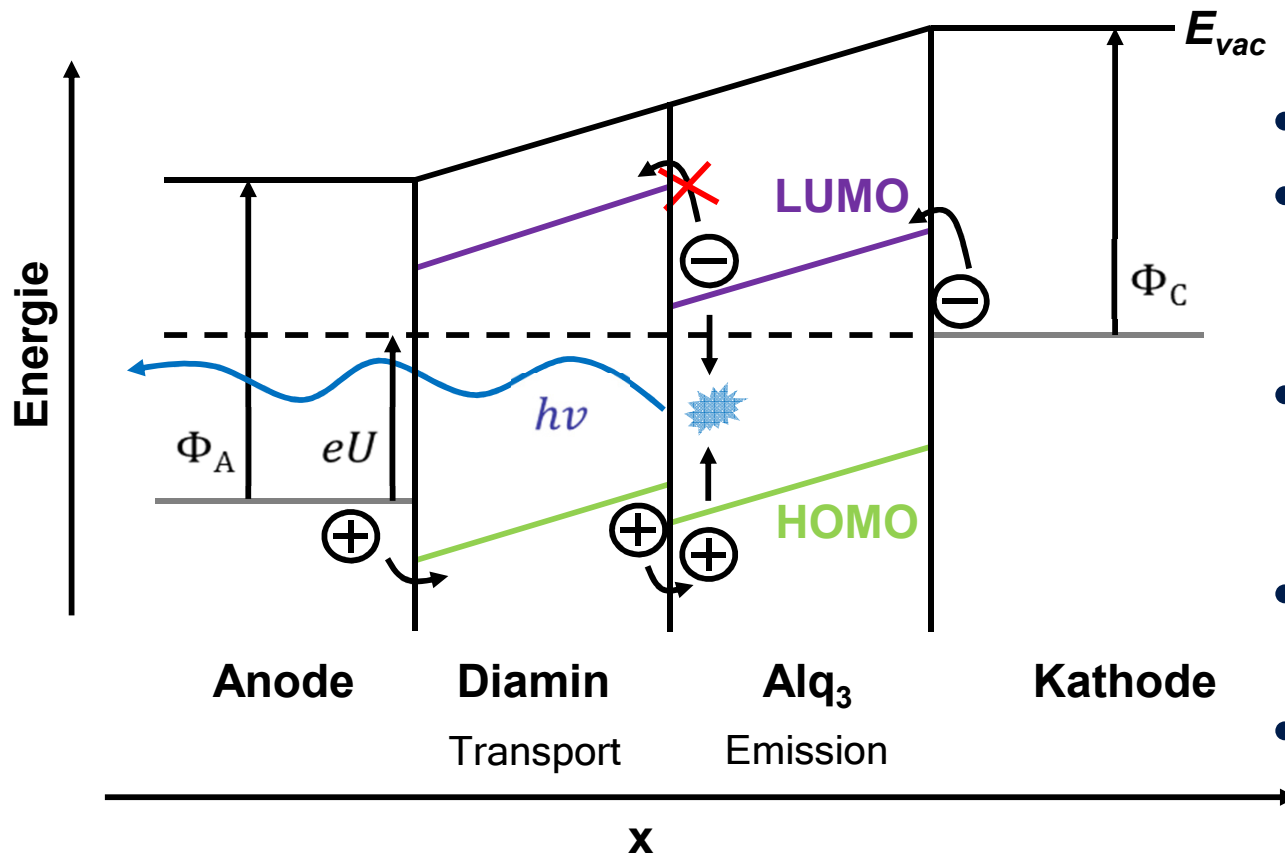


FIG. 3. Electroluminescence spectrum of ITO/diamine/Alq₃/Mg:Ag.

1.3 Funktionsprinzip

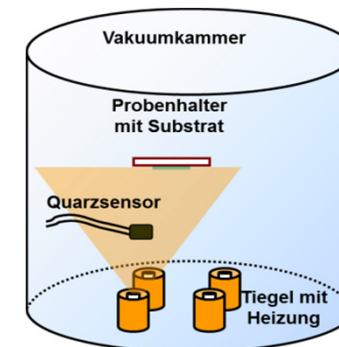
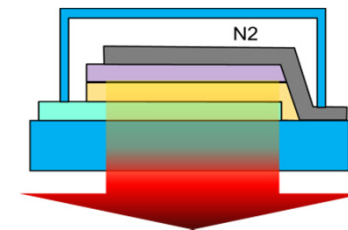
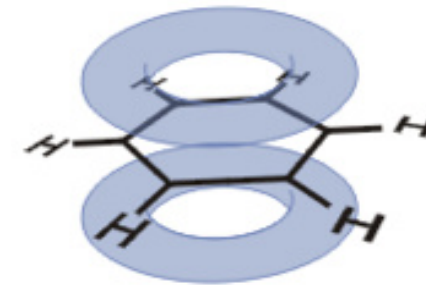
Funktion:



- Ladungsträgerinjektion
- Ladungsträgertransport zur Grenzschicht, Stau an Ladungsträgern
- Ladungsträger rekombinieren = Bildung Exziton
- strahlender Zerfall = Lichtemission
- Lichtauskopplung

Zusammenfassung OLED, Aufbau, Herstellung

- Organische Halbleiter** = Verbindung aus **Kohlenwasserstoffen** mit einer Bandlücke im optischen Spektralbereich
(Vor.: delokalisiertes π -Elektronensystem)
- OLED** = Stapel aus **dünnen organischen Schichten** zwischen zwei Elektroden
- Dünne Schichten** durch **Verdampfen** der Materialien im **Ultrahochvakuum**



2. Effizienz

Leistungseffizienz [lm/W]:
optische Leistung/elektrische Leistung
(Lichtausbeute bei Beleuchtung)

$$\eta_{\text{LE}} = \frac{\Phi_v}{P} = \frac{\Phi_v}{U \cdot I}$$

$$\eta_{\text{LE}} \uparrow \quad U \downarrow \quad U \sim \frac{1}{\sigma} \quad \sigma \uparrow$$

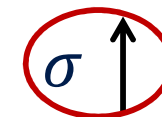
Lichtstrom Φ_v
Spannung U
Leitfähigkeit σ

Leistung P
Strom I

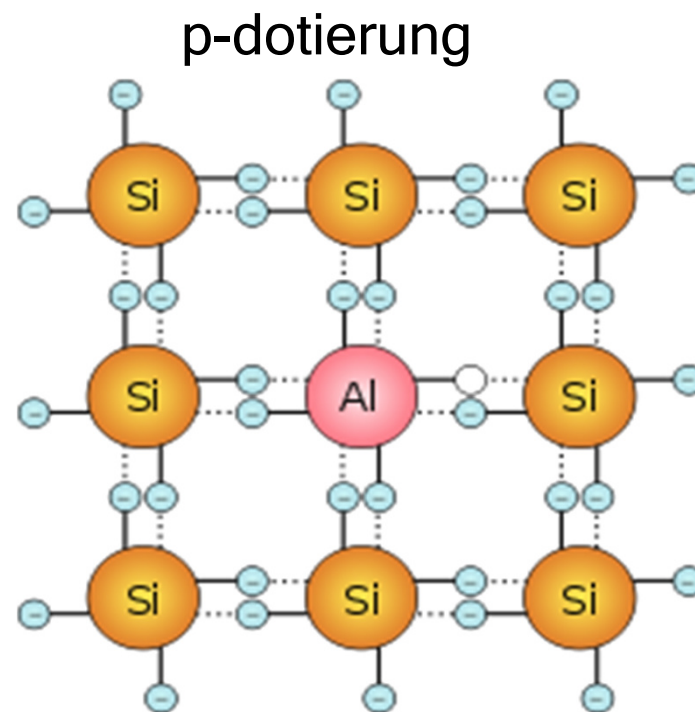
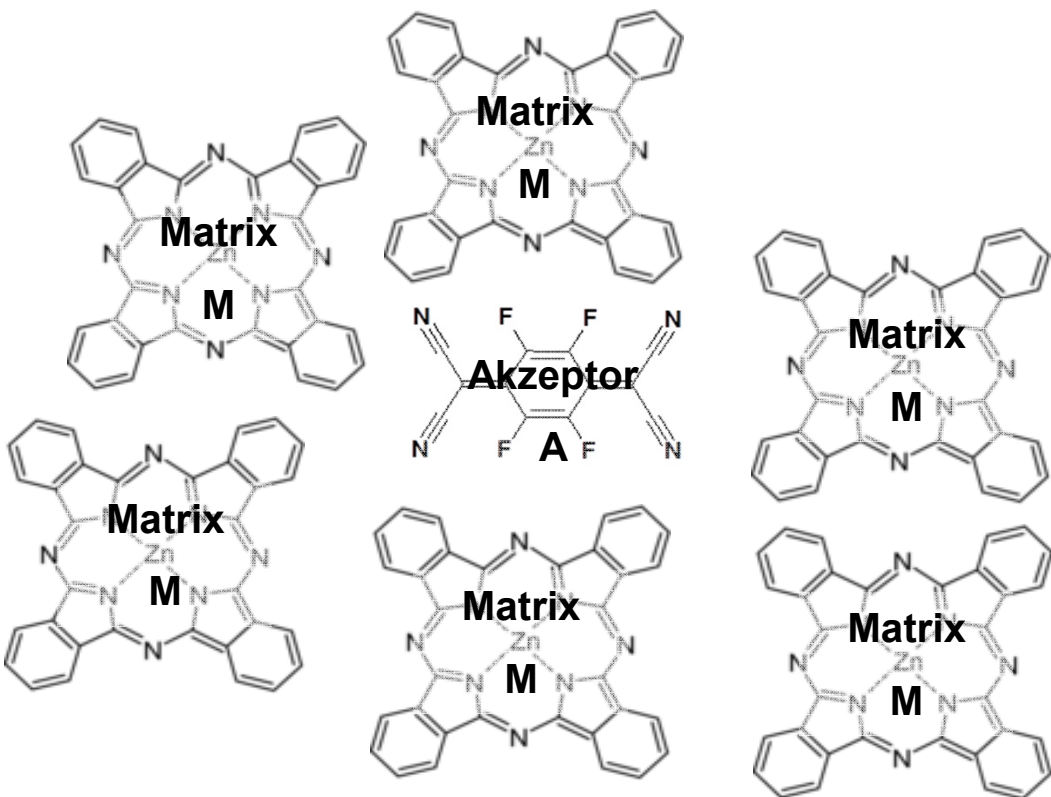
Externe Quanteneffizienz [%]:
ausgekoppelte Photonen n_γ
injizierte Elektronen n_e

$$\eta_{\text{EQE}} = \frac{n_\gamma}{n_e}$$

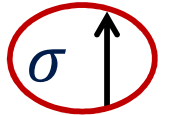
2.1 pin-OLED



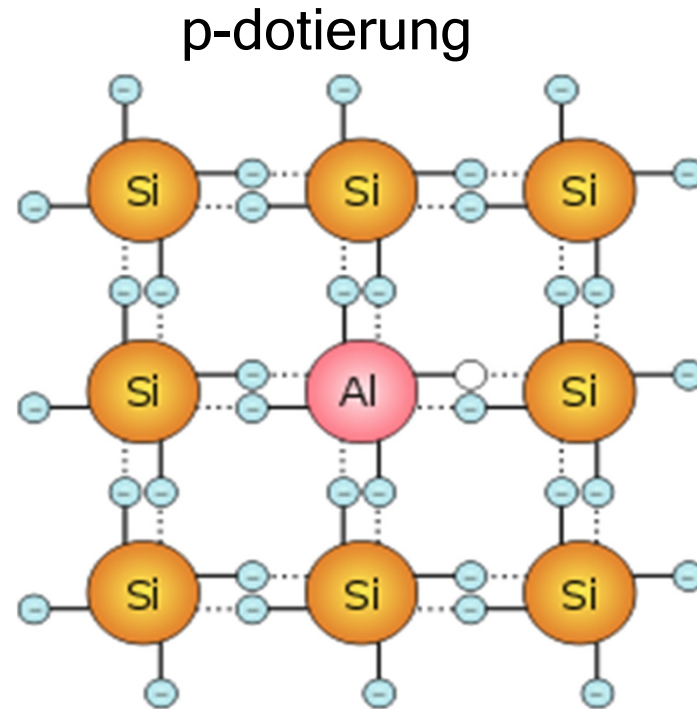
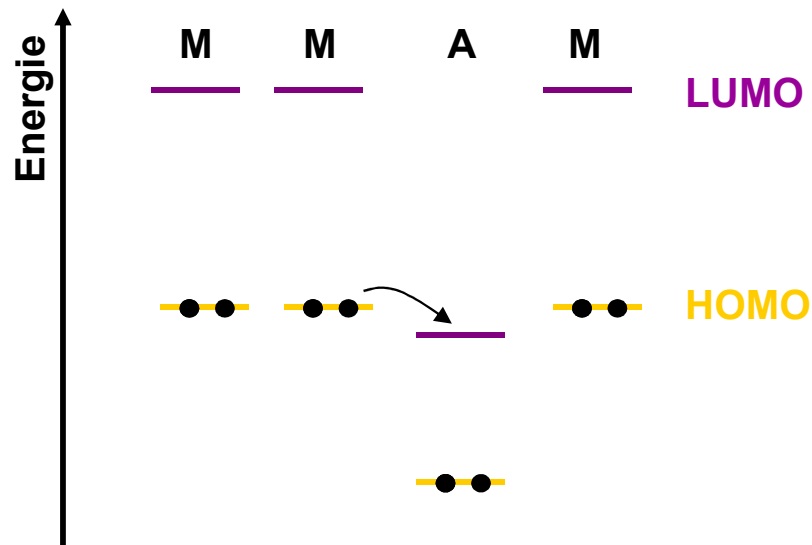
Dotierung
 Einbringen von Fremdmolekülen



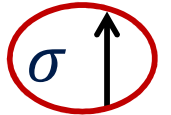
2.1 pin-OLED



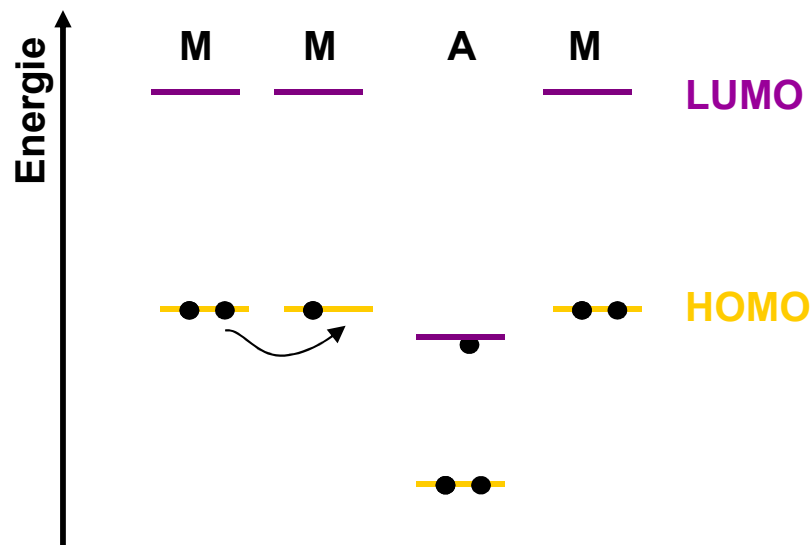
Dotierung
 Einbringen von Fremdmolekülen



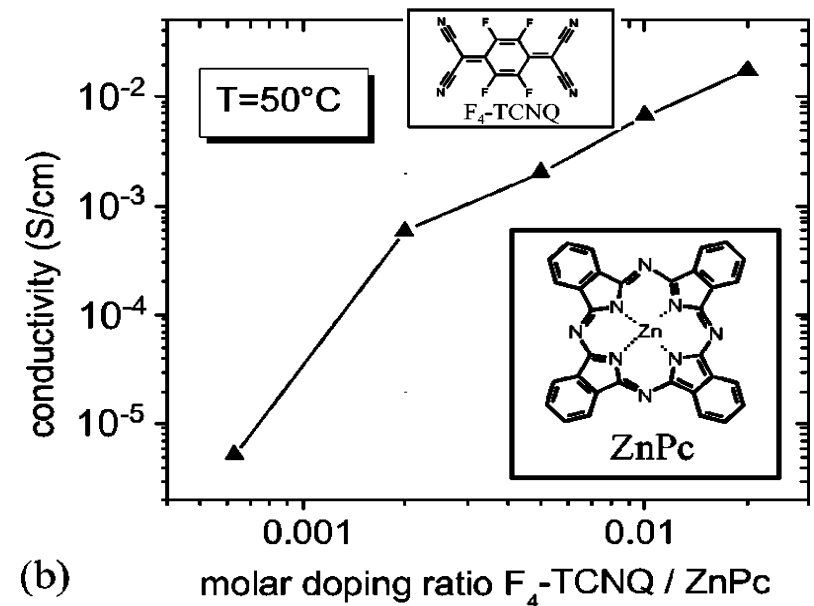
2.1 pin-OLED



Dotierung
Einbringen von Fremdmolekülen

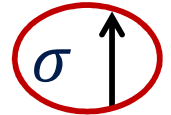


Erhöhung der Leitfähigkeit

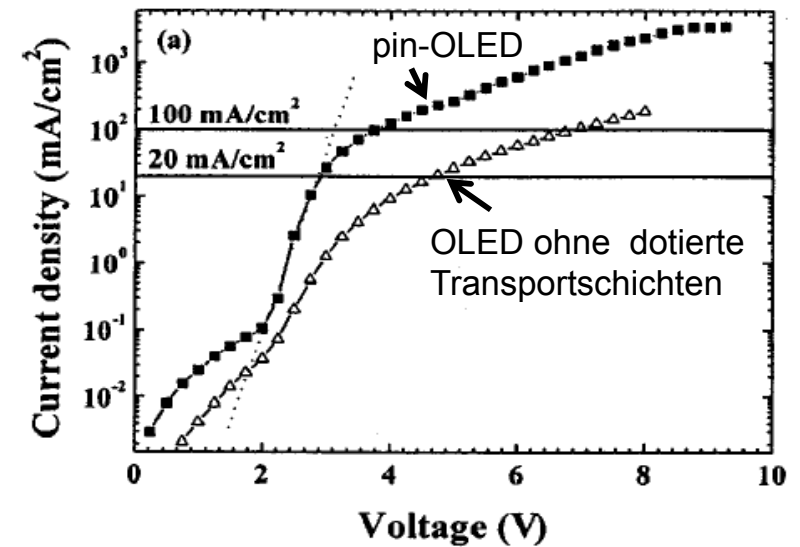
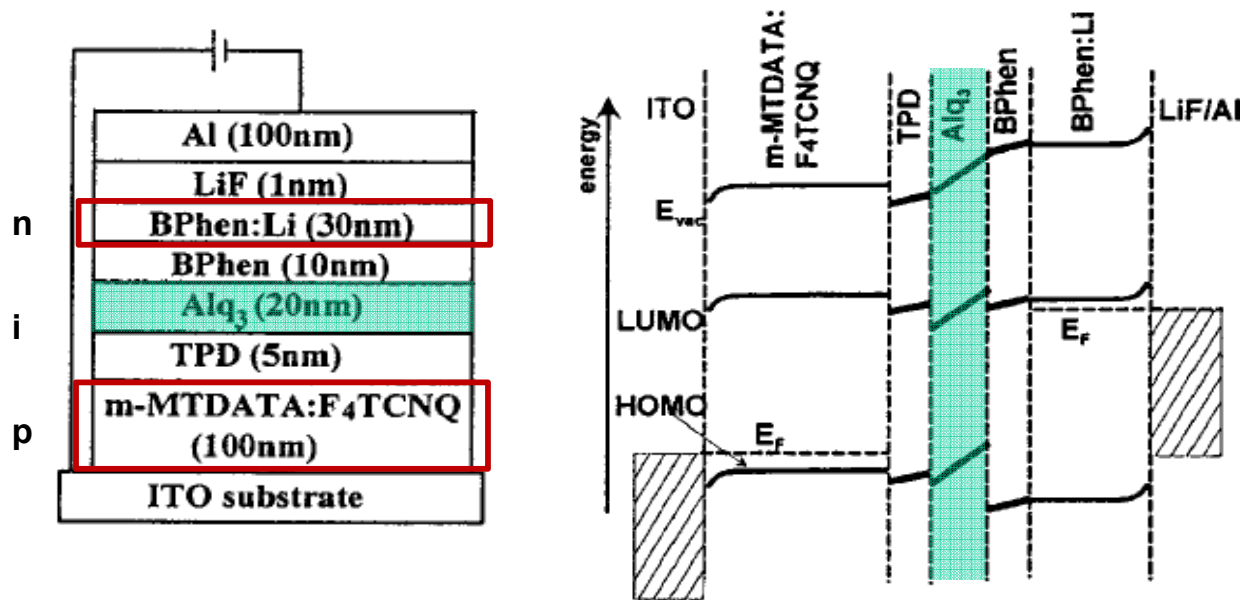


B. Männig *et al.*,
Phys. Rev. B **64**, 195208 (2001)

2.1 pin-OLED



IAPP: erste pin-OLED mit dotierten Transportschichten (2002)




- Mehrschicht OLEDs
- Betriebsspannung < 3V
- aber: externe Quanteneffizienz < 5%

J. Huang *et al.*,
Appl.Phys.Lett. 80, 139 (2002)

2. Effizienz

Leistungseffizienz [lm/W]:
 optische Leistung/elektrische Leistung
 (Lichtausbeute bei Beleuchtung)

$$\eta_{LE} = \frac{\Phi_v}{P} = \frac{\Phi_v}{U \cdot I}$$

$\eta_{LE} \uparrow$ $U \downarrow$ $U \sim \frac{1}{\sigma}$ $\sigma \uparrow$


Lichtstrom Φ_v
 Spannung U
 Leitfähigkeit σ

Leistung P
 Strom I

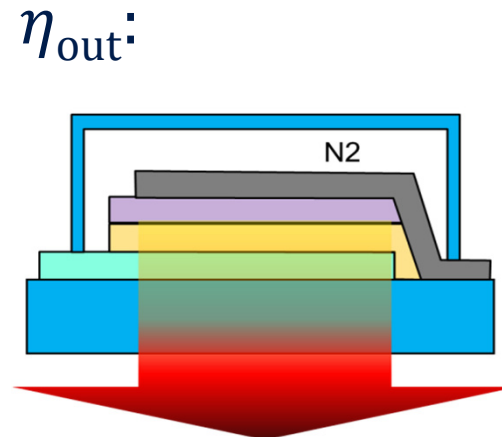
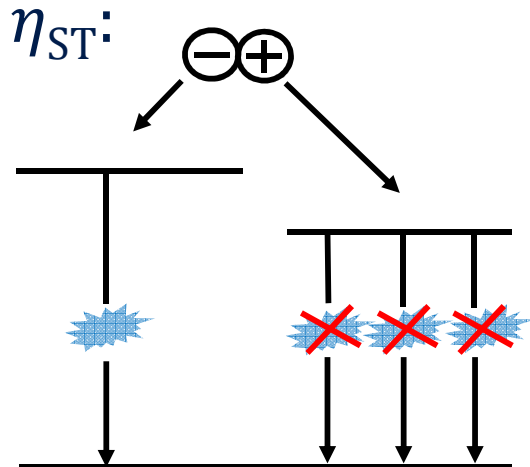
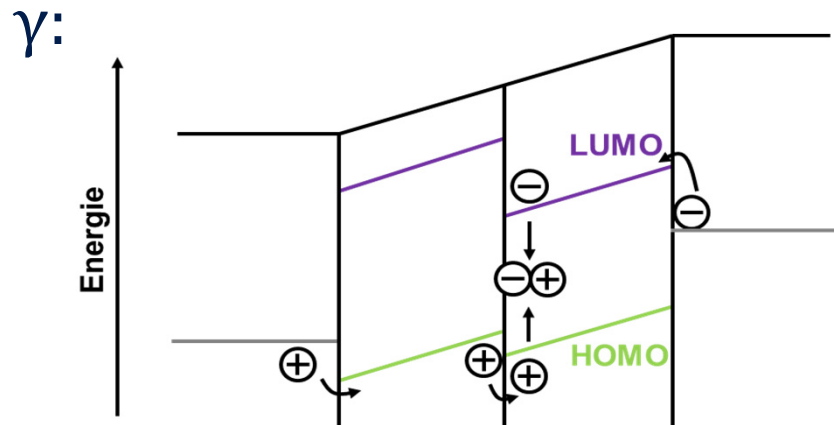
Externe Quanteneffizienz [%]:
ausgekoppelte Photonen n_γ
 injizierte Elektronen n_e

$$\eta_{EQE} = \frac{n_\gamma}{n_e}$$

$$\eta_{EQE} = \gamma \cdot \eta_{ST} \cdot \eta_{out}$$

Ladungsbalance γ
 Exzitonenspinfaktor η_{ST}
 Auskopplungseffizienz η_{out}

2. Effizienz



Externe Quanteneffizienz [%]:
 $\frac{\text{ausgekoppelte Photonen } n_\gamma}{\text{injizierte Elektronen } n_e}$

$$\eta_{EQE} = \frac{n_\gamma}{n_e}$$

$$\eta_{EQE} = \gamma \cdot \eta_{ST} \cdot \eta_{out}$$

Ladungsbalance γ

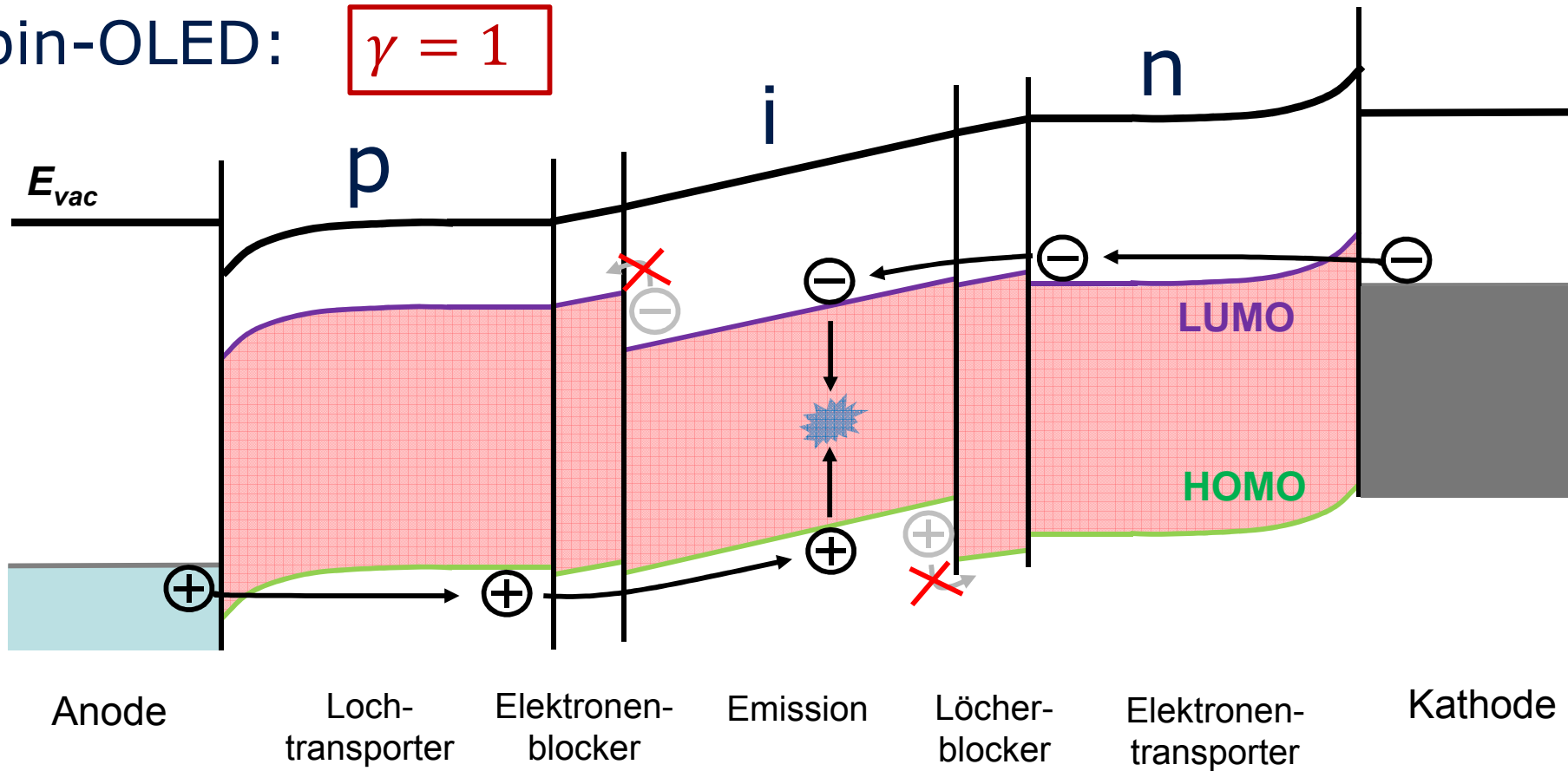
Exzitonenspinfaktor η_{ST}

Auskopplungseffizienz η_{out}

2. Effizienz

$$\eta_{EQE} = \gamma \cdot \eta_{ST} \cdot \eta_{out}$$

pin-OLED: $\gamma = 1$



2.2 Exzitonen

Elektron und Loch → Exziton

- = gebundenes Elektronen-Loch Paar $\oplus\ominus$
- (engl.: exciton von excitation, Anregung)
- = ein Quasiteilchen im angeregten Zustand

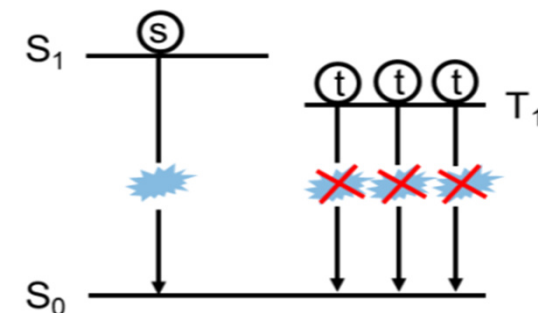
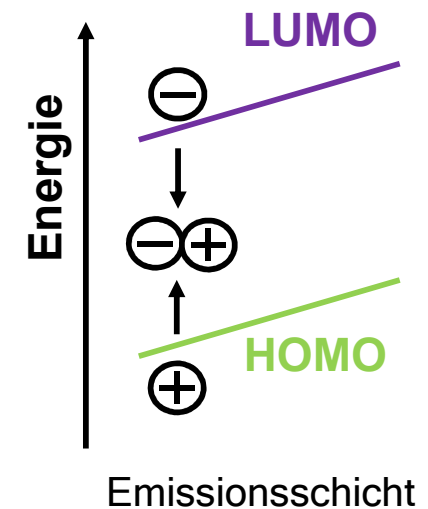
	Singulett	Triplett
Spin	anti-parallel	parallel
Lebensdauer	ns (kurz)	μs - ms (lang)
Emission	Fluoreszenz	Phosphoreszenz

OLED: $\frac{1}{4}$ Singulett und $\frac{3}{4}$ Tripletts (Spinstatistik)

fluoreszente Emitter: (z.B. Alq₃)

$$\eta_{ST} = 0,25$$

$$\eta_{EQE} = \gamma \cdot \eta_{ST} \cdot \eta_{out}$$



2.2 Exzitonen

Elektron und Loch → Exziton

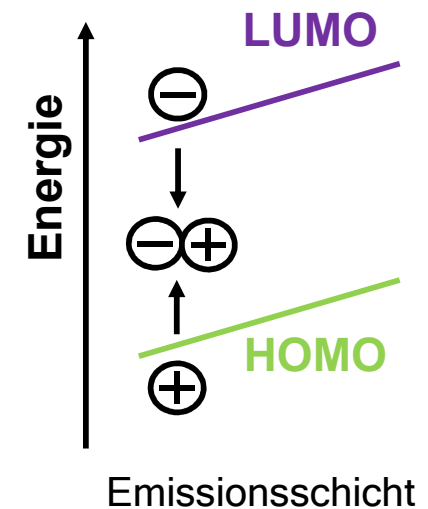
= gebundenes Elektronen-Loch Paar $\oplus\ominus$
 (engl.: exciton von excitation, Anregung)
 = ein Quasiteilchen im angeregten Zustand

	Singulett	Triplett
Spin	anti-parallel	parallel
Lebensdauer	ns (kurz)	μs - ms (lang)
Emission	Fluoreszenz	Phosphoreszenz

OLED: $\frac{1}{4}$ Singulett und $\frac{3}{4}$ Triplett
 (Spinstatistik)

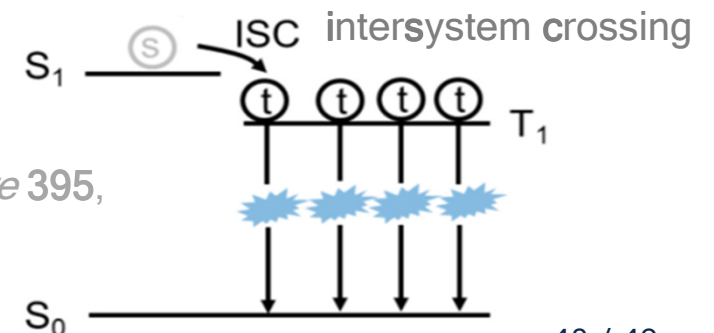
$$\eta_{ST} = 1$$

$$\eta_{EQE} = \gamma \cdot \eta_{ST} \cdot \eta_{out}$$



phosphoreszente Emittter:
 (1998)

Baldo *et al.*, *Nature* 395,
 151 (1998)



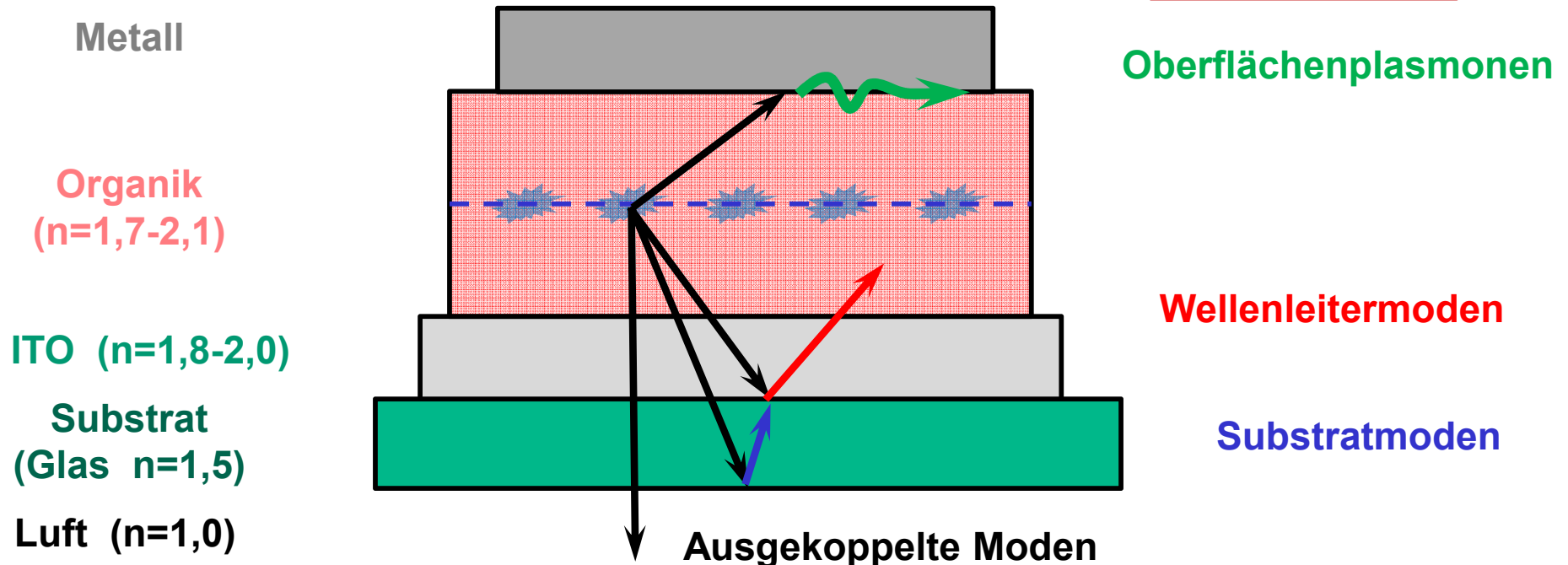
2.3 Lichtauskopplung

$$\eta_{\text{EQE}} = \gamma \cdot \eta_{\text{ST}} \cdot \eta_{\text{out}}$$

$$20\% = 1 \cdot 1 \cdot 0,2$$

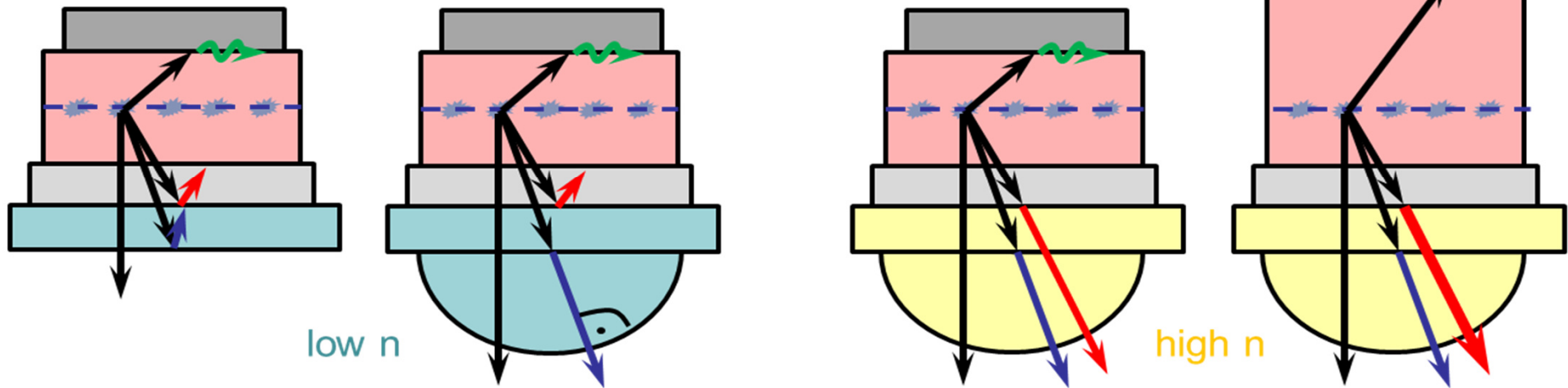
Durch **interne Totalreflexion** bleiben ca. **80%** des erzeugten Lichtes in der OLED Struktur gefangen!

$$\eta_{\text{out}} = 0,2$$



2.3 Lichtauskopplung

Lösung(en):



low n

high n

Methode	Glashalbkugel	+ hochbrechendes Glas	+ „weite“ Entfernung zum Metallkontakt
adressierte Moden	Substratmoden	Wellenleitermoden	Oberflächenplasmonen

2.3 Lichtauskopplung

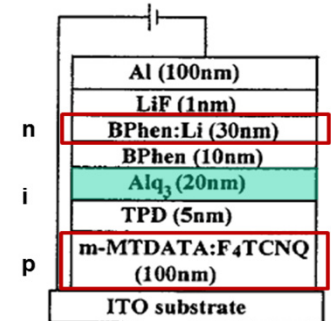
Weltrekord IAPP 2009:

Weiße OLEDs >100 lm/W (> 40%)

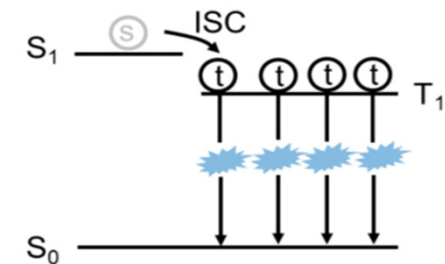


Reineke *et al.*,
Nature 459, 234 (2009)

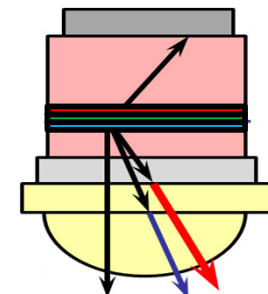
pin-Konzept



+ phosphoreszente
Emitter

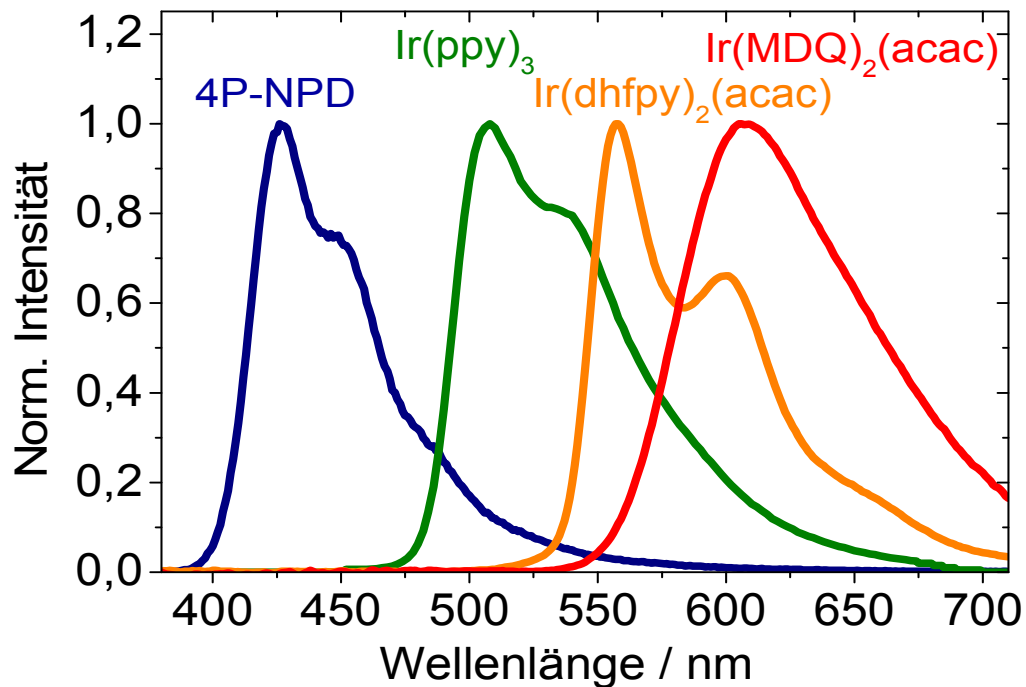


+ Auskopplung



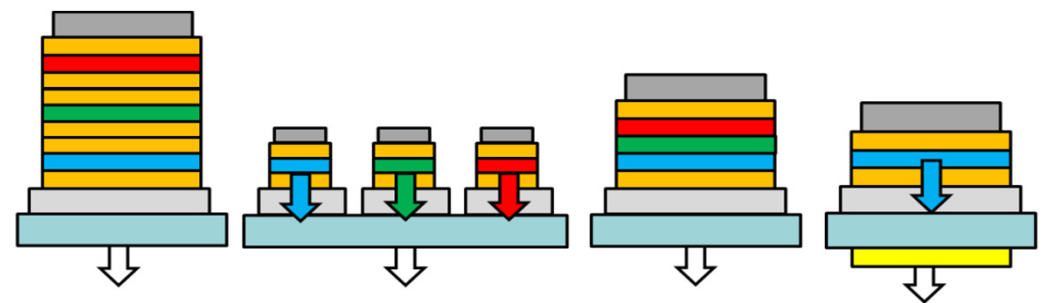
2.3 Lichtauskopplung – Weißlichterzeugung

Emission der Emittermoleküle





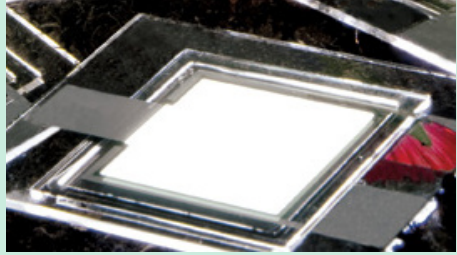


weiß = Kombination von meist 3
 Emittern
 (rot – grün –blau)

z.B.:



2.4 Effizienz und Vergleich zu herkömmlichen Lichtquellen - Weiße Lampen

	Glühlampe	Halogenlampe	Fluoreszenzlampe/-röhre	LED	OLED
					
η_{LE}	15 lm/W	20 lm/W	60-100 lm/W	65-120 lm/W (276 lm/W*)	30-80 lm/W (150 lm/W*)
η_{EQE}	5%	8%	25%	30% (80%*)	15% (50%*)
t	10^3 h	$2 \cdot 10^3$ h	$30 \cdot 10^3$ h	$25 \cdot 10^3$ h	$5 \cdot 10^3$ h
+				Helligkeit	flexibel, transparent
-	verboten	Effizienz	Quecksilber	(Vorwärtsstrahlung)	(Lebensdauer, Kosten)

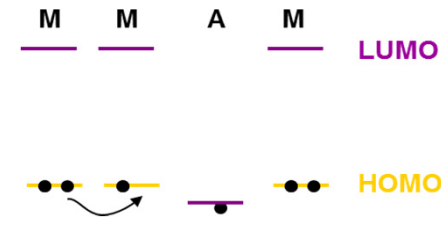
Quellen: Wikipedia, R. Steele et al., Nature Photonics 1, 25 (2007), <http://www.cree.com>

* Labor

Zusammenfassung Effizienz von OLEDs

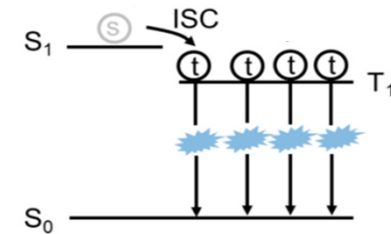
- **Schlüsseltechnologie Dotierung:**

pin-OLED: $U \downarrow$ $\eta_{LE} \uparrow$ $\gamma = 1$ $\eta_{EQE} \uparrow$



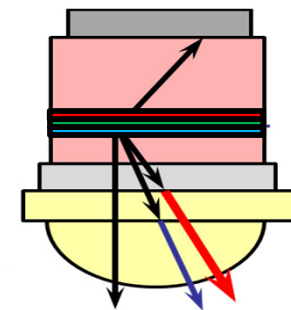
- **Phosphoreszente Emitter**

$\eta_{ST} = 1$ $\eta_{EQE} \uparrow$



- **Lichtauskopplung** durch Halbkugel und hochbrechendes Glas

$\eta_{out} > 0,2$ $\eta_{EQE} \uparrow$

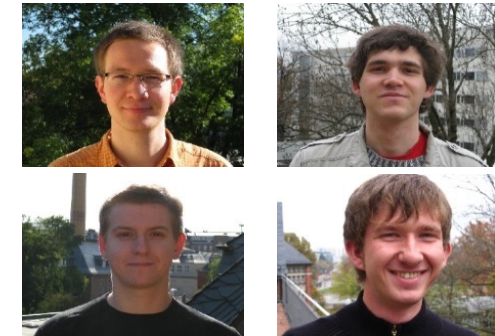
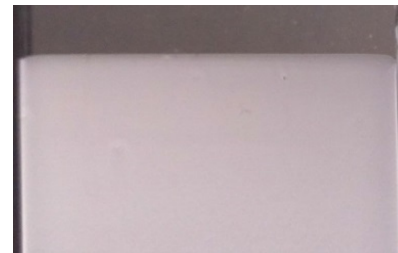
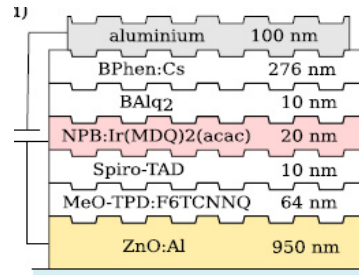


Weiße OLEDs erreichen ähnliche Effizienzen wie heutige LEDs und Leuchtstoffröhren.

3. Aktuelle Forschung

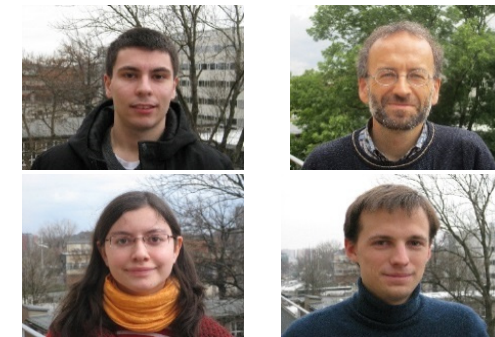
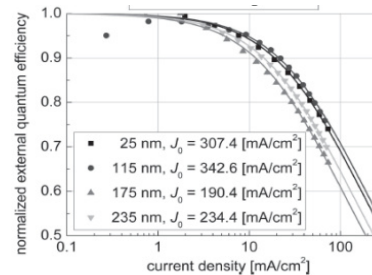
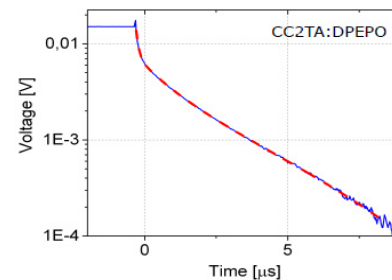
Auskopplung / optische Simulation

Periodische Gitter
Streuschichten

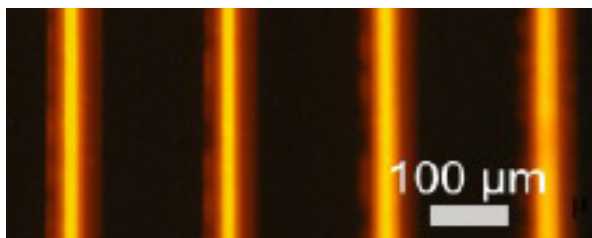


Intrinsik / Verhalten von Exzitonen

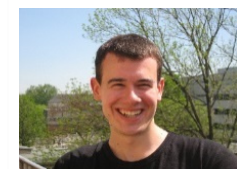
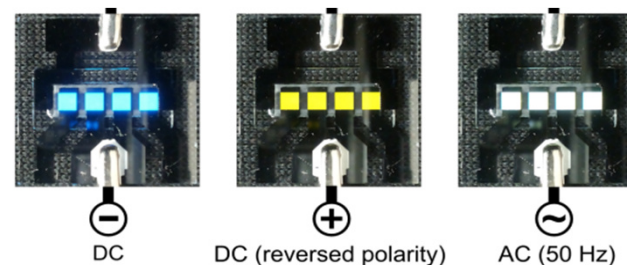
Verzögerte Fluoreszenz
Roll-off
Lebensdauer



µ-Strukturierung

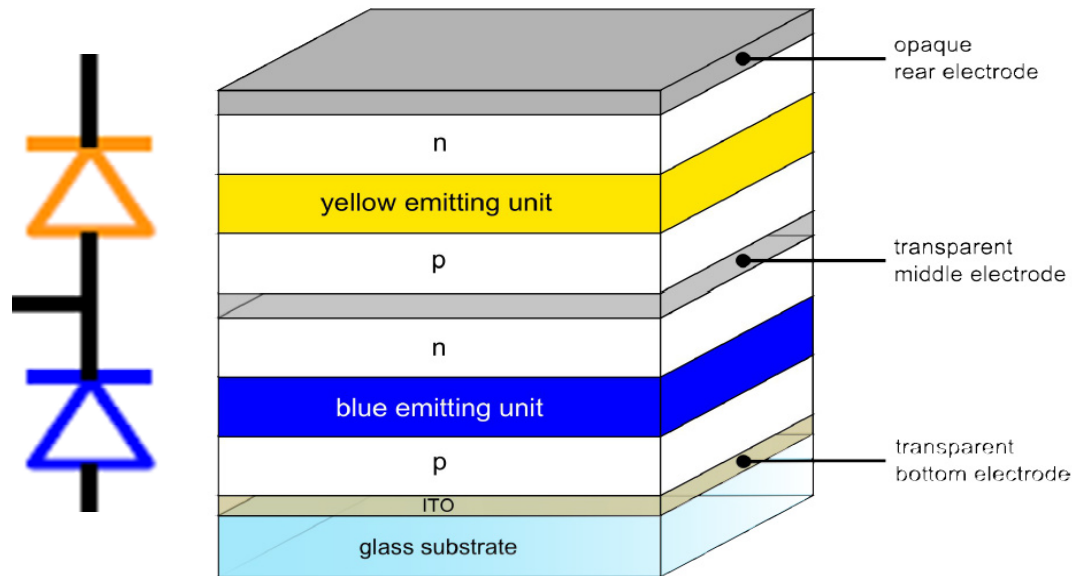


AC/DC OLEDs



3. Weiße OLEDs durch Wechselstrom

Prinzip:



DC



DC
(andere Polung)



AC



Fazit:

OLEDs und LEDs werden in Zukunft unseren Alltag bestimmen.

Videos:

www.youtube.com

„best of amazing organic electronics“

www.youtube.com/watch?v=wxGXCUr8G5w

„OLED Sendung mit der Maus“

www.youtube.com/watch?v=e-uuT3r27cg

Homepages:

www.iapp.de (Vortrag)

www.oes-net.de/ [→Organische Elektronik]

www.organische-elektronik.de

www.orgworld.de/ (englisch)

Offene Fragen: simone.hofmann@iapp.de

Auch für Schüler: **Lange Nacht der Wissenschaften** (4.7.14)

Technische Sammlungen (Cool X, School_Lab)

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!