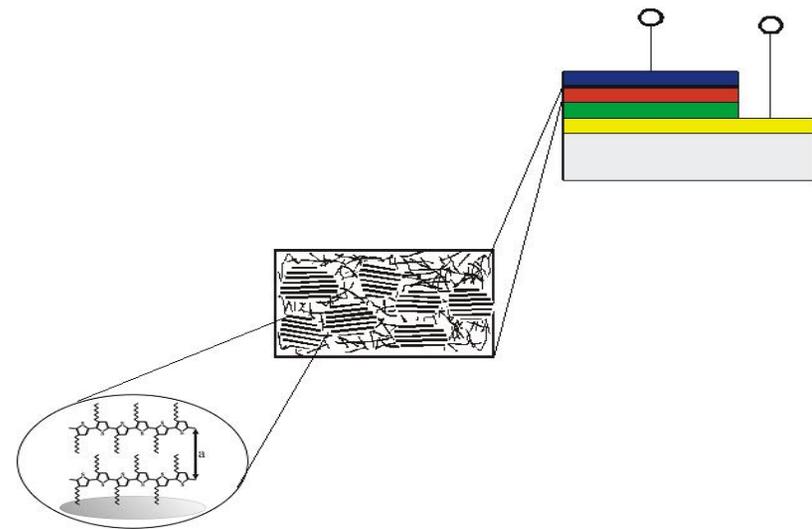


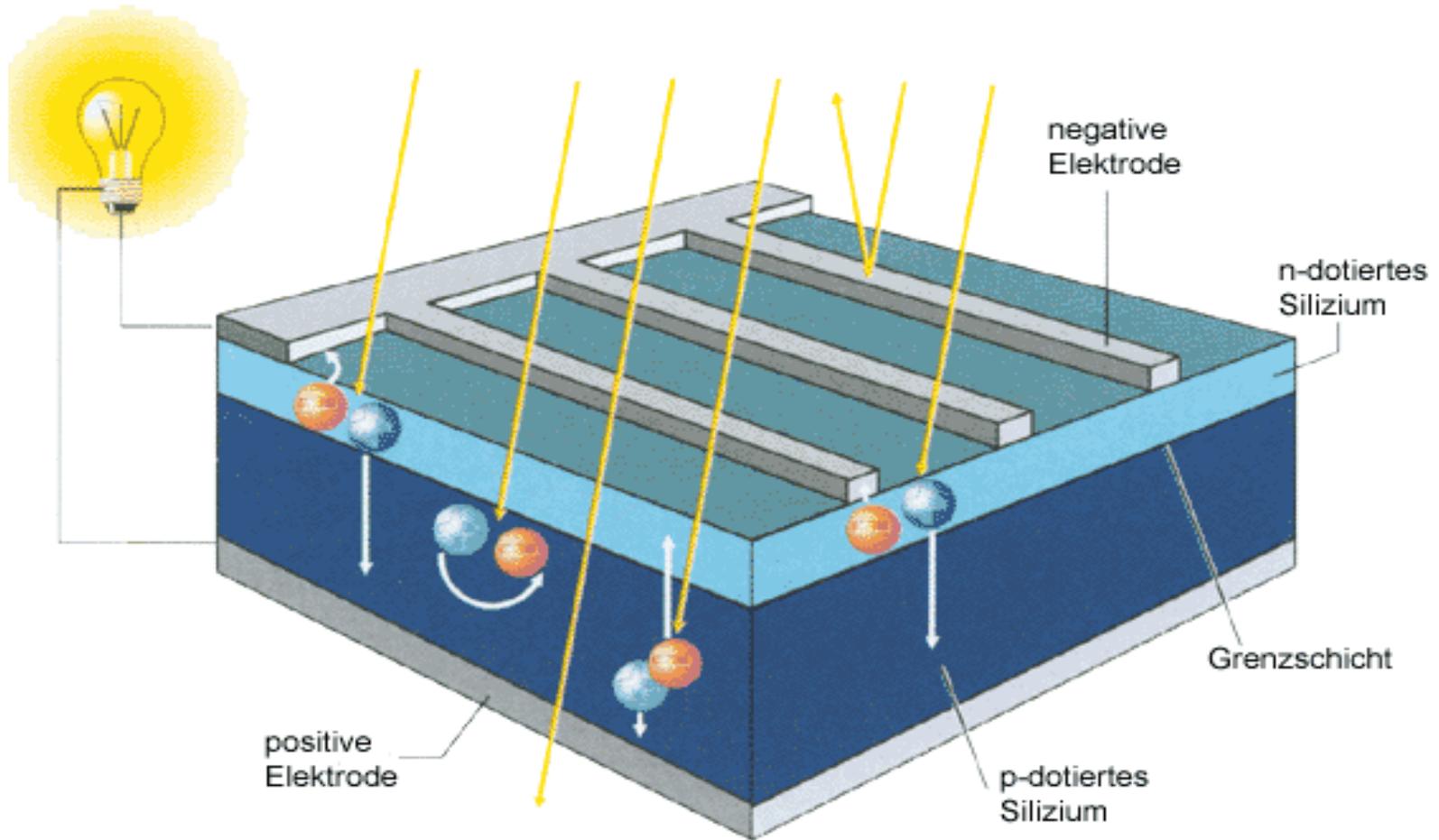
# *Plastiksolarzelle - eine Innovation der Photovoltaik*

**Prof. Dr. Gerhard Gobsch**

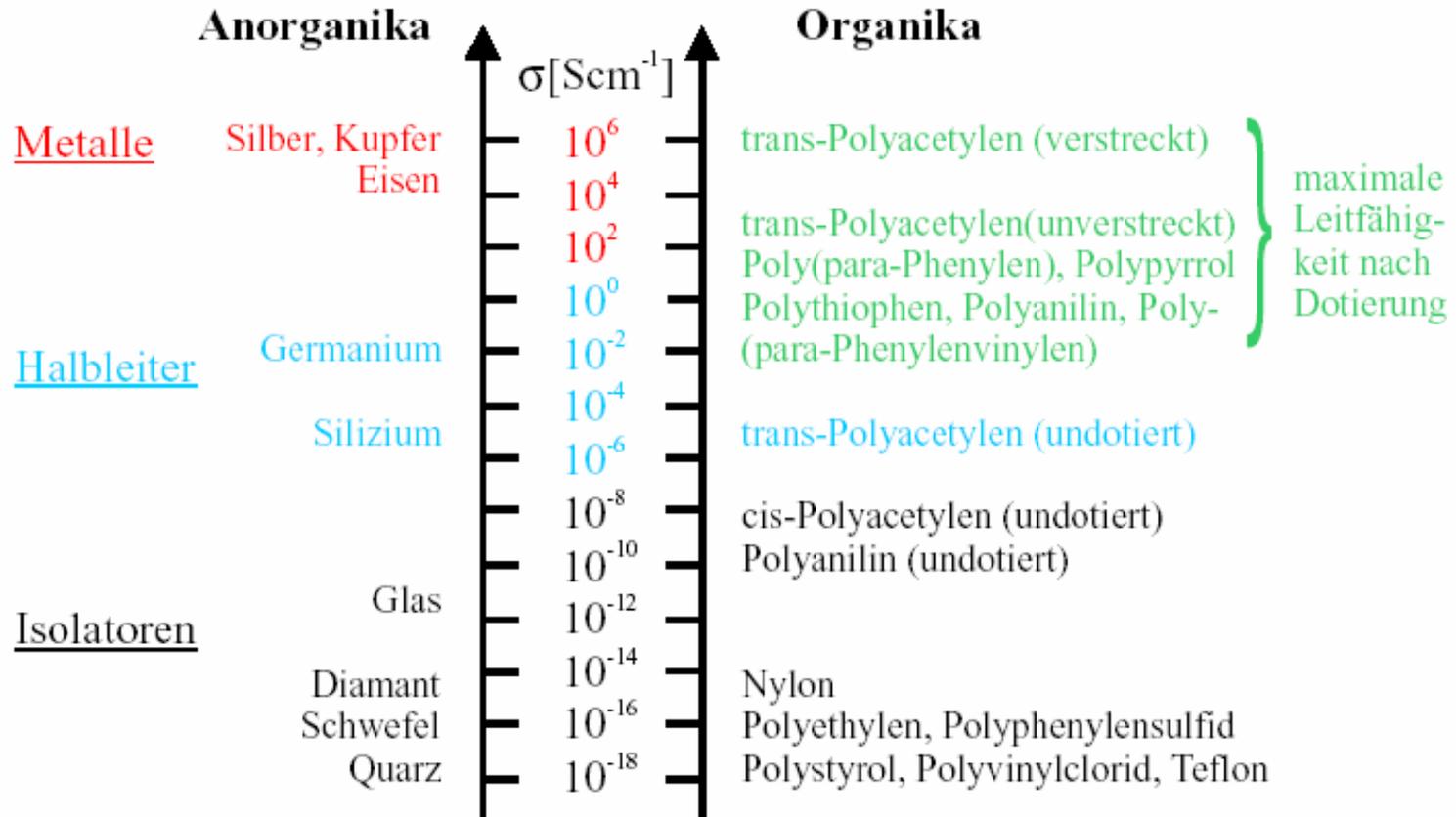
Technische Universität Ilmenau  
Institut für Physik  
Fachgebiet Experimentalphysik I



# Solarzelle auf der Basis anorganischer Halbleiter (hier: Siliziumsolarzelle)



# Elektrische Leitfähigkeit verschiedener Materialien





## Nobel-Preis für Chemie 2000

"for the discovery and development of conductive polymers"



**Alan J. Heeger**

🏆 1/3 of the prize

USA

University of  
California  
Santa Barbara, CA,  
USA

b. 1936

**Alan G.  
MacDiarmid**

🏆 1/3 of the prize

USA and New  
Zealand

University of  
Pennsylvania  
Philadelphia, PA,  
USA

b. 1927  
(in Masterton, New  
Zealand)

**Hideki  
Shirakawa**

🏆 1/3 of the prize

Japan

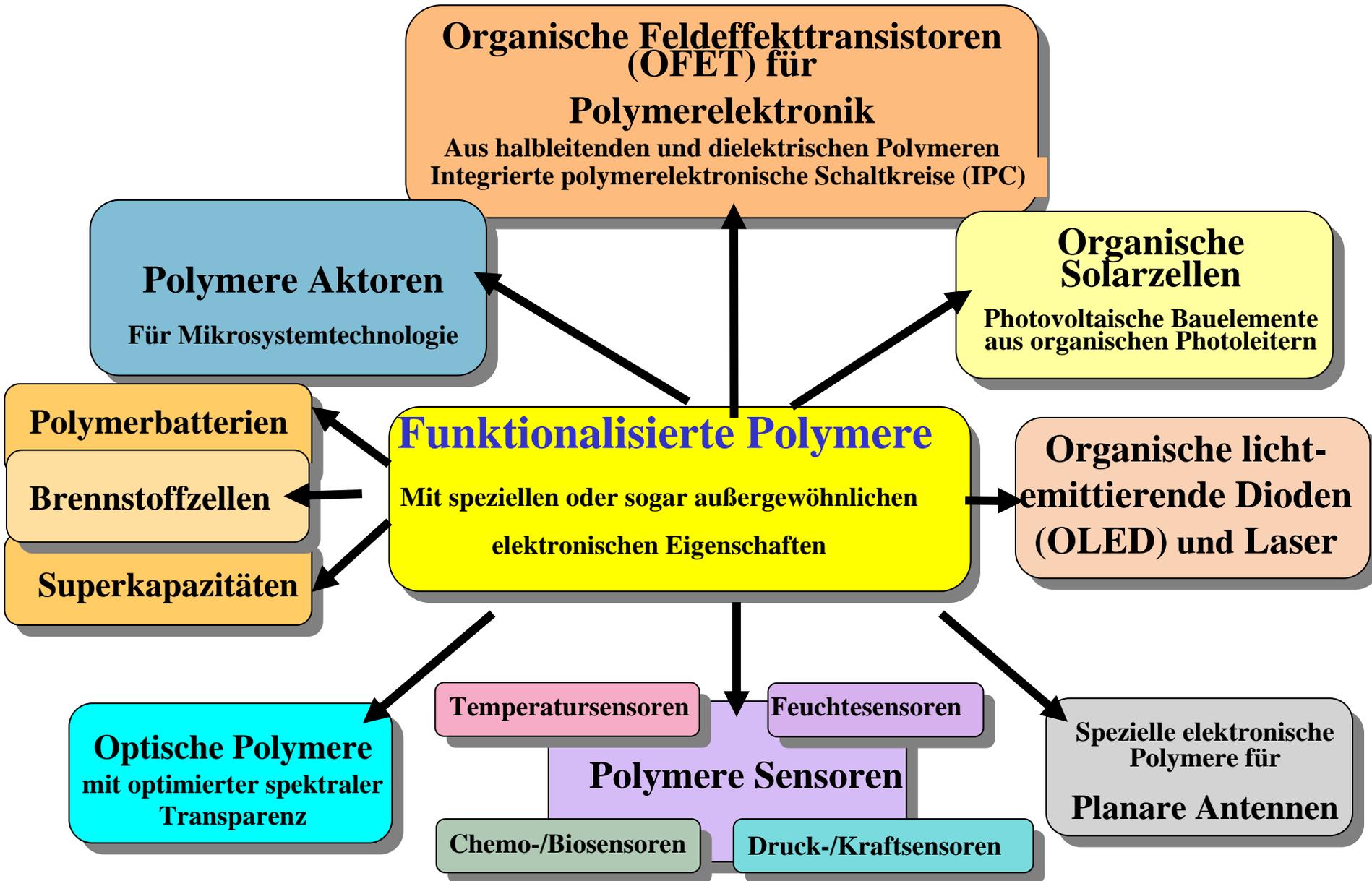
University of  
Tsukuba  
Tokyo, Japan

b. 1936

“für die Entdeckung  
und die Entwicklung  
leitfähiger Polymere“

Eine neue  
Materialklasse!

# Anwendung funktionalisierter Polymere



# Vor- und Nachteile von Polymeren für elektronische Anwendungen

## Vorteile

- Metallische und halbleitende Eigenschaften durch Dotierung
- Kombination von plastischen mit elektronischen Eigenschaften
- Gezielt einstellbare Eigenschaften
- Löslichkeit, verschiedenartige Prozessierbarkeit
- Anwendung von großflächigen Drucktechniken
- Keine extremen Vakuum- und Hochtemperaturprozesse  
→ Niedrig-Kosten-Produktion

## Nachteile

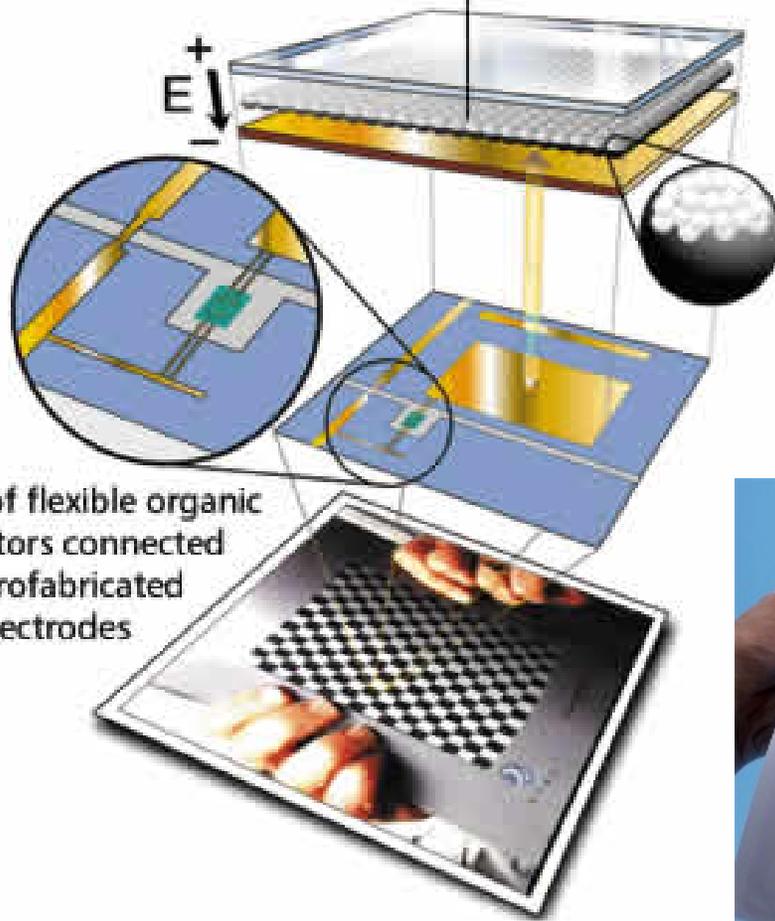
- Z.Zt. nur niedrig-integrierte Bauelemente und Schaltkreise
  - Degeneration in O<sub>2</sub>- und H<sub>2</sub>O-Atmosphäre  
→ Langzeit-Stabilität ist z.Zt. noch kritisch
-

## Organische Feldeffekttransistoren: RF ID Technologie

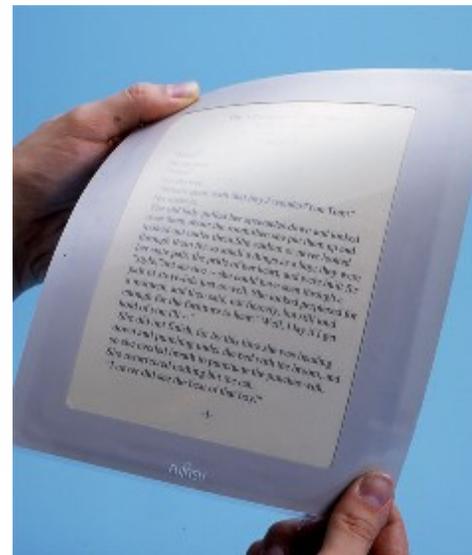


## Organischer Feldeffekttransistor: Elektronisches Papier

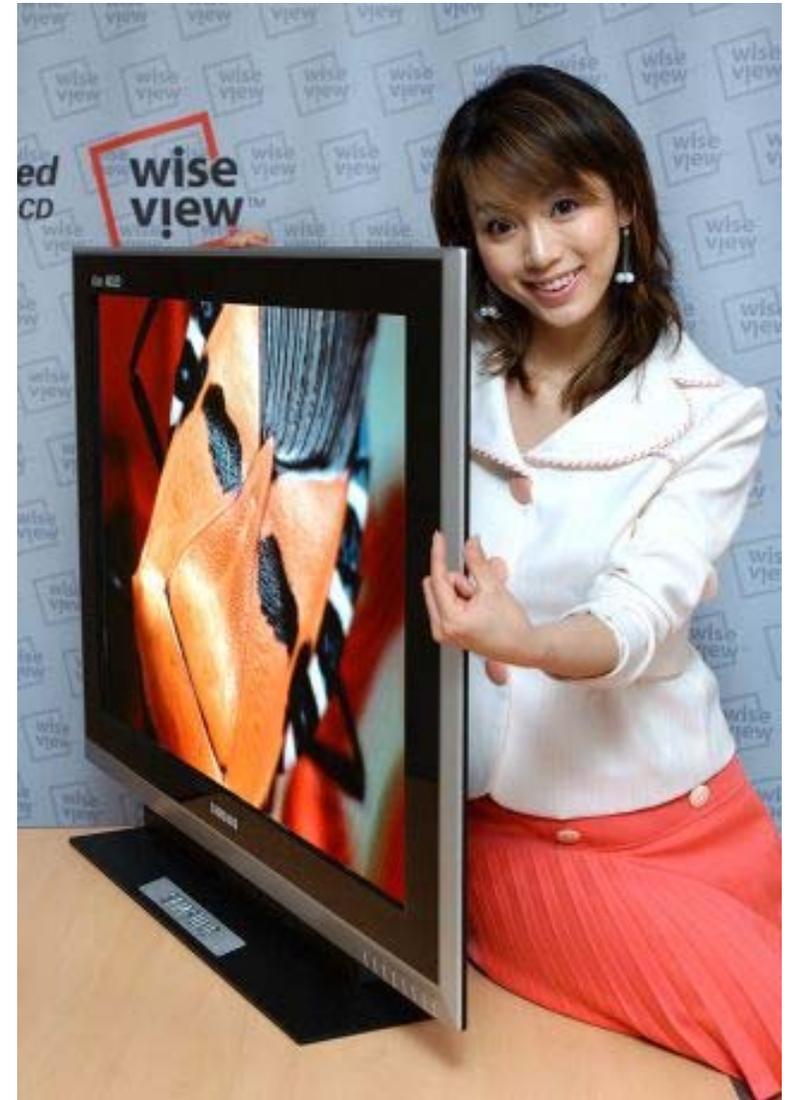
Layer of microencapsulated e-ink



Array of flexible organic transistors connected by microfabricated gold electrodes

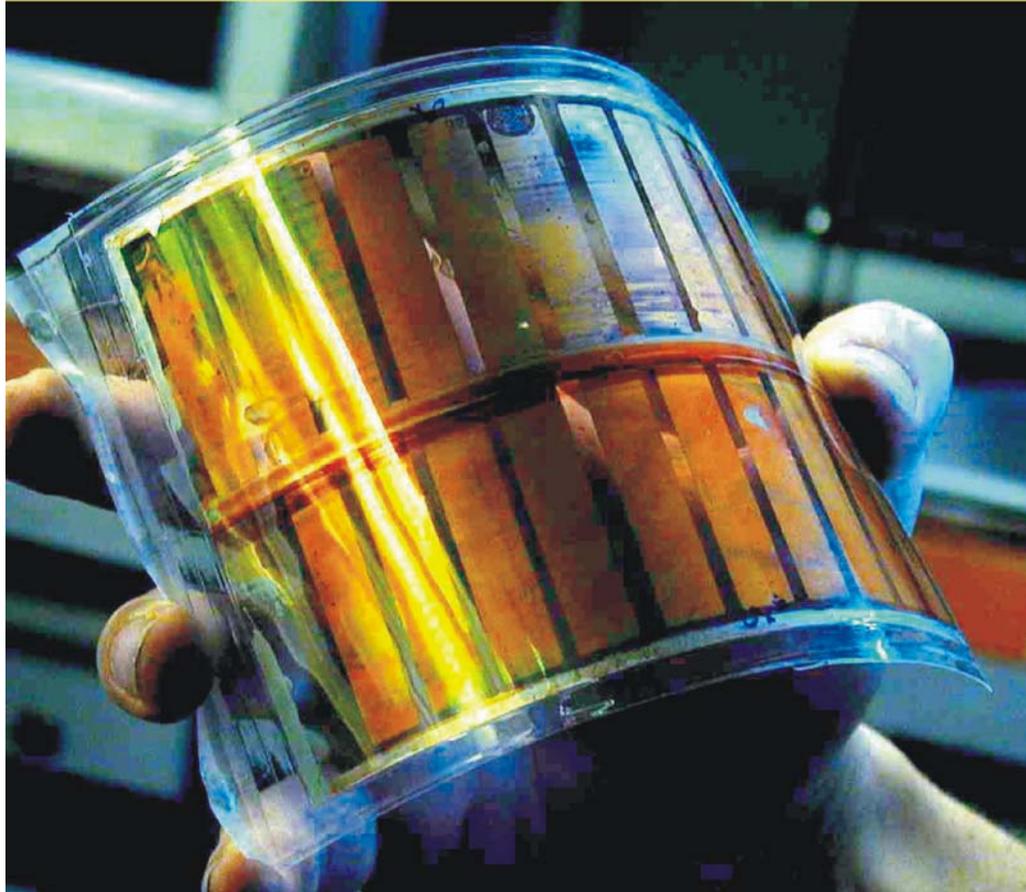


Organische Lichtemittierende Displays:

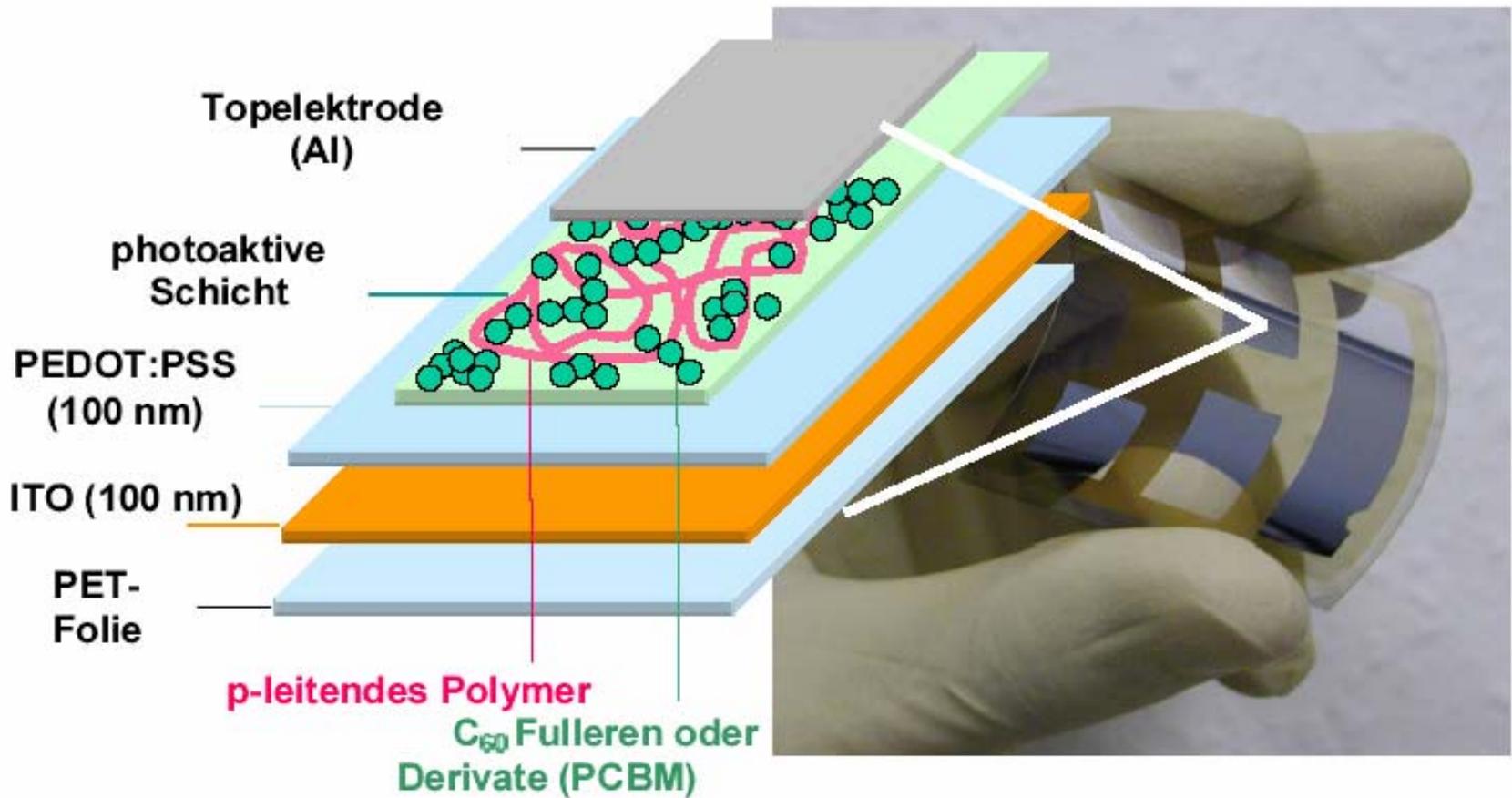


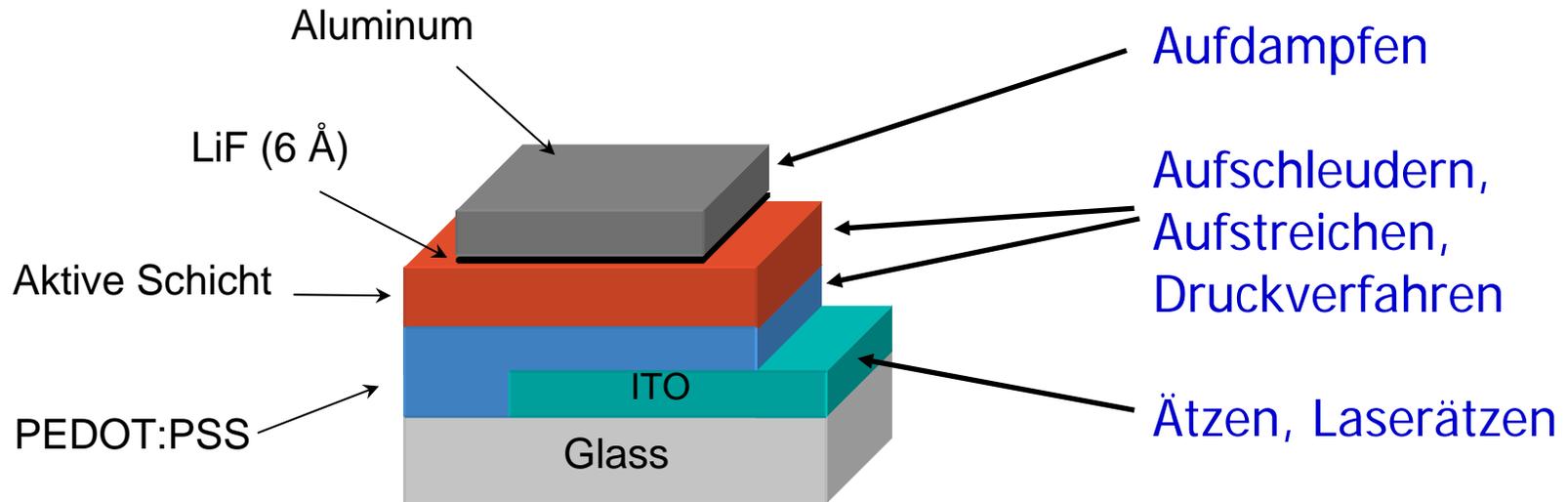
Extrem großer Sehwinke!

# Organische Solarzelle = Polymere Solarzelle = Plastiksolarzelle



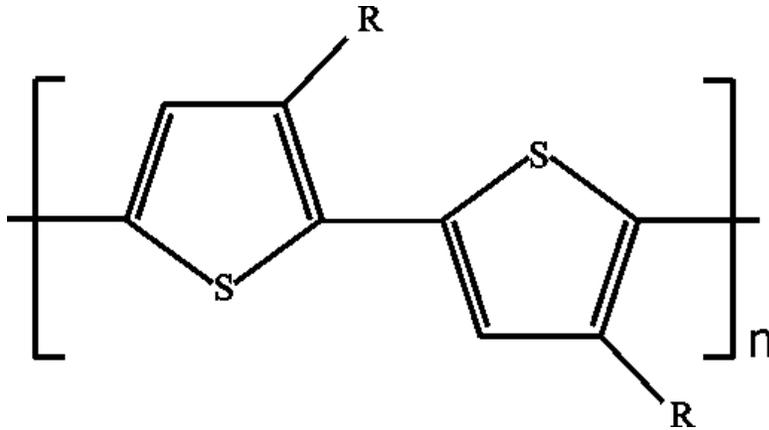
# Prinzip der polymeren Solarzelle





- **aktive Schicht:** z.B. Komposit aus konjugiertem Polymer + Fulleren
- **Selektive Kontakte:**
  - Elektronen: Al/LiF
  - Löcher: ITO/ PEDOT:PSS (poly[3,4-(ethylenedioxy) thiophene] : poly(styrene sulfonate))

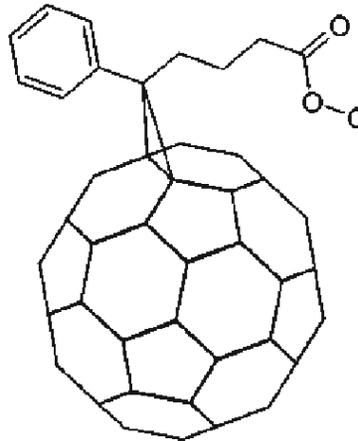
## Konjugiertes Polymer als Donator



$R = C_8H_{17}$   
poly(3-octylthiophene) - **P3OT**

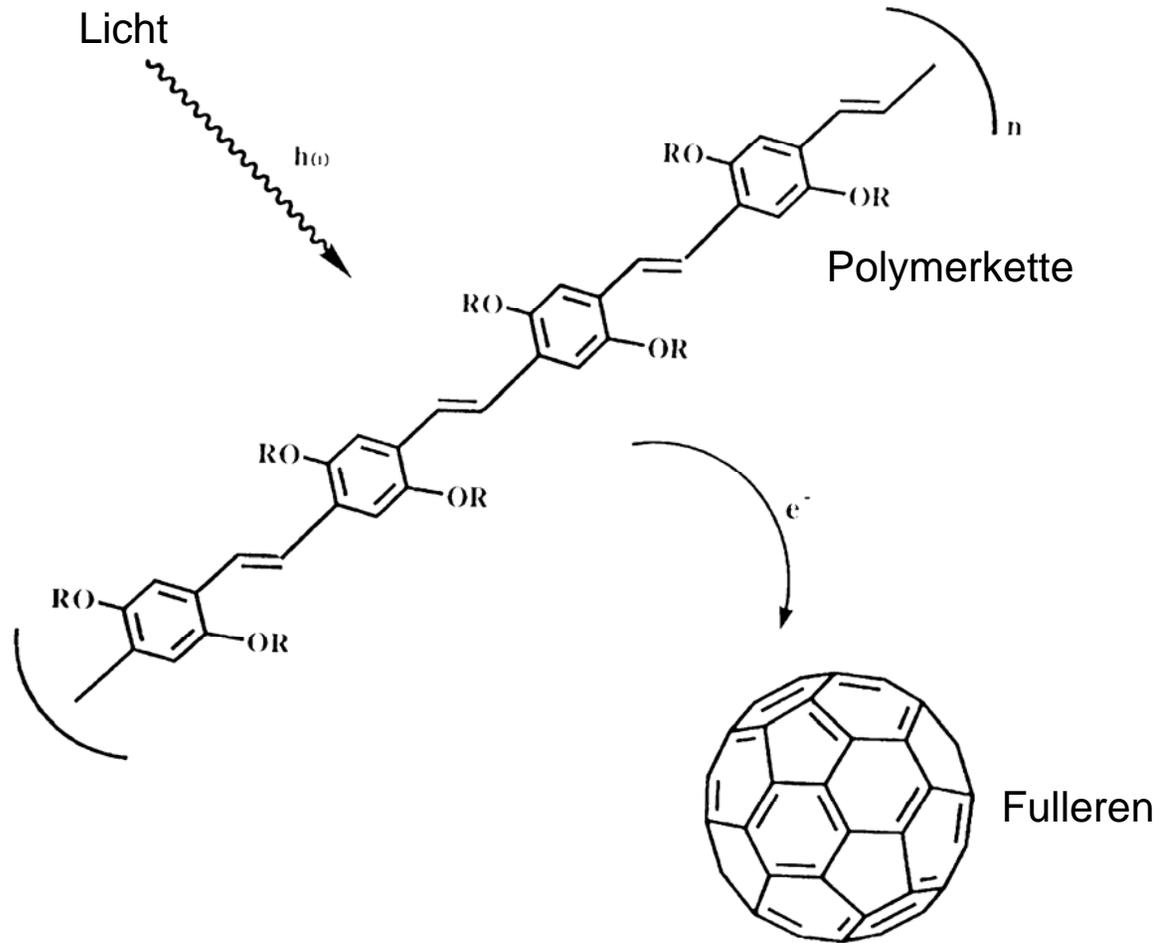
$R = C_6H_{13}$   
poly(3-hexylthiophene) - **P3HT**

## Fulleren (PCBM) als Akzeptor

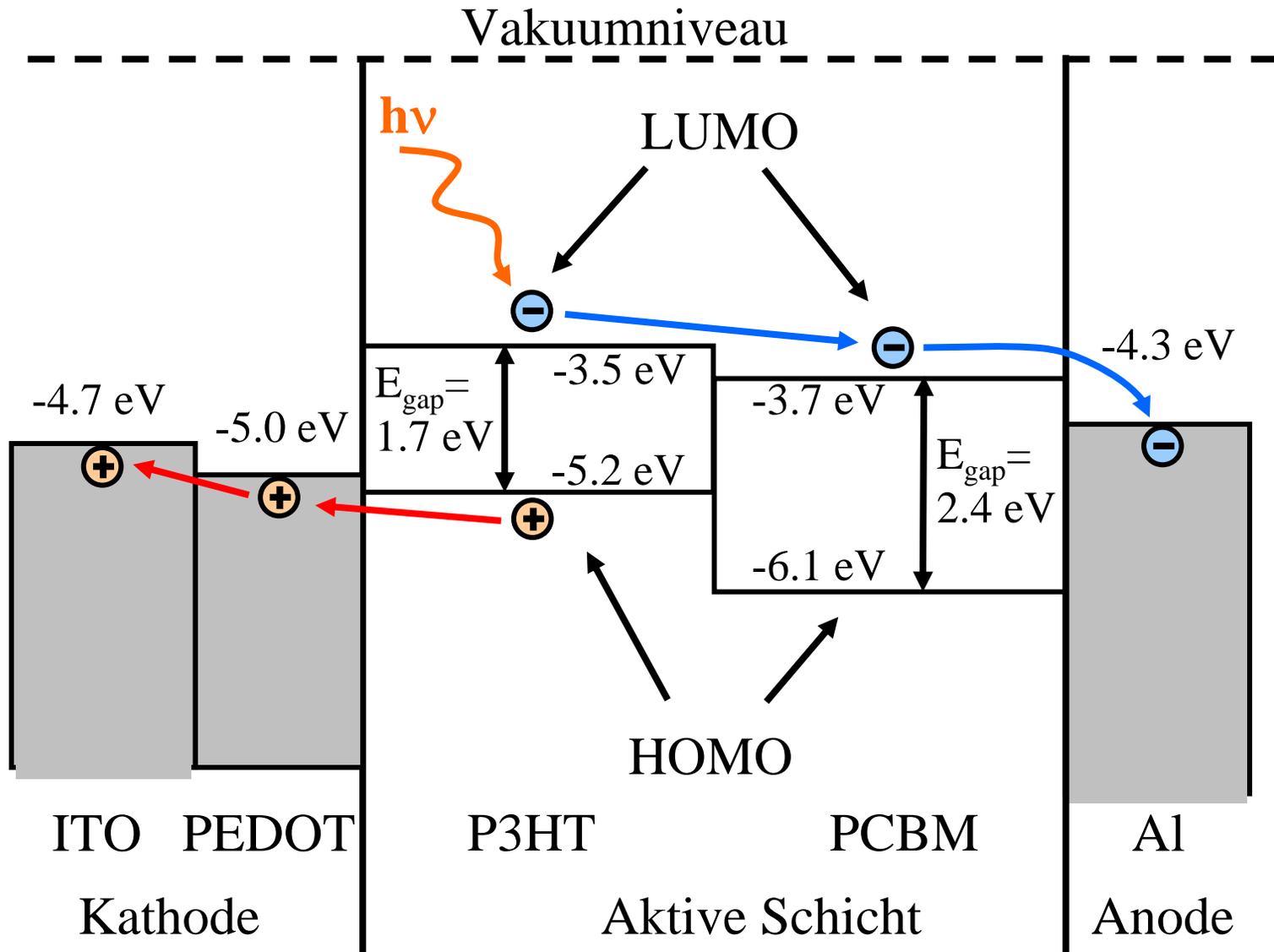


[6,6]-phenyl C<sub>61</sub> butyric acid methyl ester - **PCBM**

# Ultraschneller Elektronentransfer (innerhalb $\sim 40$ fs)



# Bänderschema



Before: white light power conversion efficiencies  $\eta = 10^{-3} - 10^{-2} \%$

1970: first US patents on organic solar cells

1978: single layer merocyanine solar cells reach  $\eta = 0.7\%$

1986: bilayer Cu-Phthalocyanine / perylene with  $\eta = 1\%$

1998: laminated bilayer polymer/polymer solar cell with  $\eta = 1.9\%$

2000: evaporated bilayer exceeds  $\eta > 1\%$

2001: Feb.: 2.5% bulk heterojunction plastic solar cell (polymer/fullerene)

2001: July: 3.6% bilayer solar cell CuPc / C<sub>60</sub>

2002: March: 1.7% hybrid organic-inorganic solar cells

2003: Feb.: 3.5% bulk heterojunction plastic solar cell (polymer/fullerene)

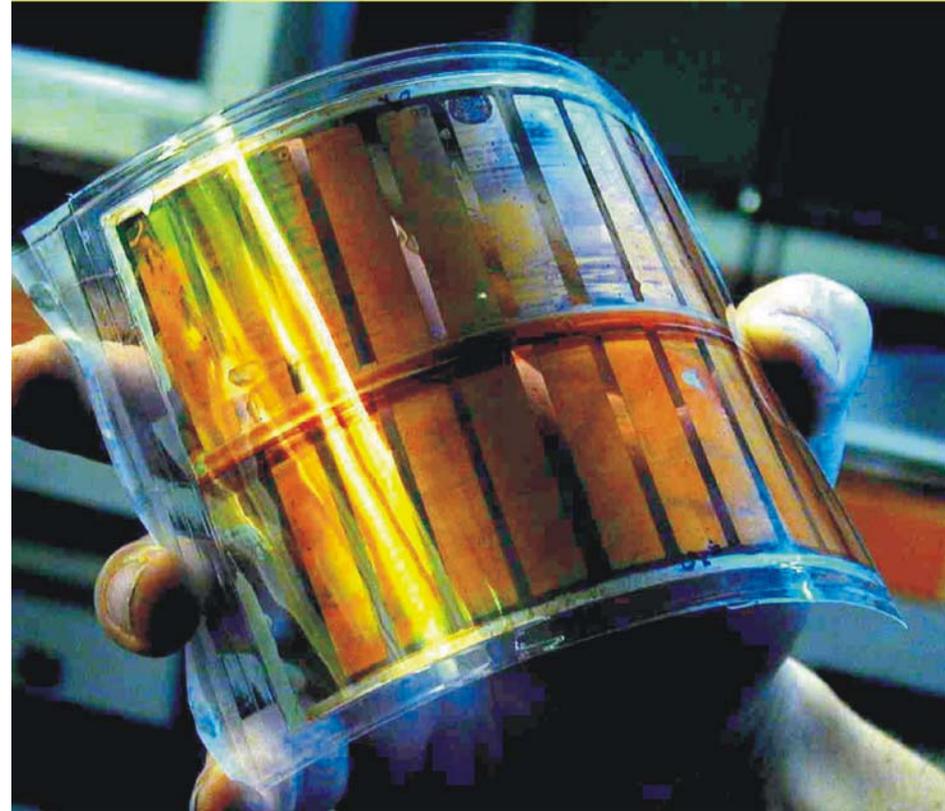
2003-2005: 1.9 – 3.8% bulk heterojunction p-i-n molecular solar cells

2004/2005: 5% bulk heterojunction plastic solar cell (polymer/fullerene)

2004: Dez.: 5.7% evaporated bulk heterojunction tandem solar cell

# Wirkungsgrade $\eta$

Material	$\eta$ (%) (Year)
<b>Anorganische Solarzellen<sup>1</sup></b>	
c-Si	24.7
CdTe	16.5
CIGS	18.4
<b>Plastiksolarzellen</b>	
MDMO-PPV/PCBM	2.5 <sup>2</sup> (2001)
P3HT/PCBM	3.5 <sup>3,4</sup> (2003)
	5.0 <sup>5,6,7</sup> (2005)



**=> Weitere Verbesserung des Wirkungsgrades der Plastiksolarzelle erforderlich**

<sup>1</sup>M. A. Green et. al., Prog. Photovolt. **12**, 365 (2004)

<sup>2</sup>S. E. Shaheen et. al., Appl. Phys. Lett. **78**, 841 (2001)

<sup>3</sup>F. Padinger et. al., Adv. Func. Mat. **13**, 85 (2003)

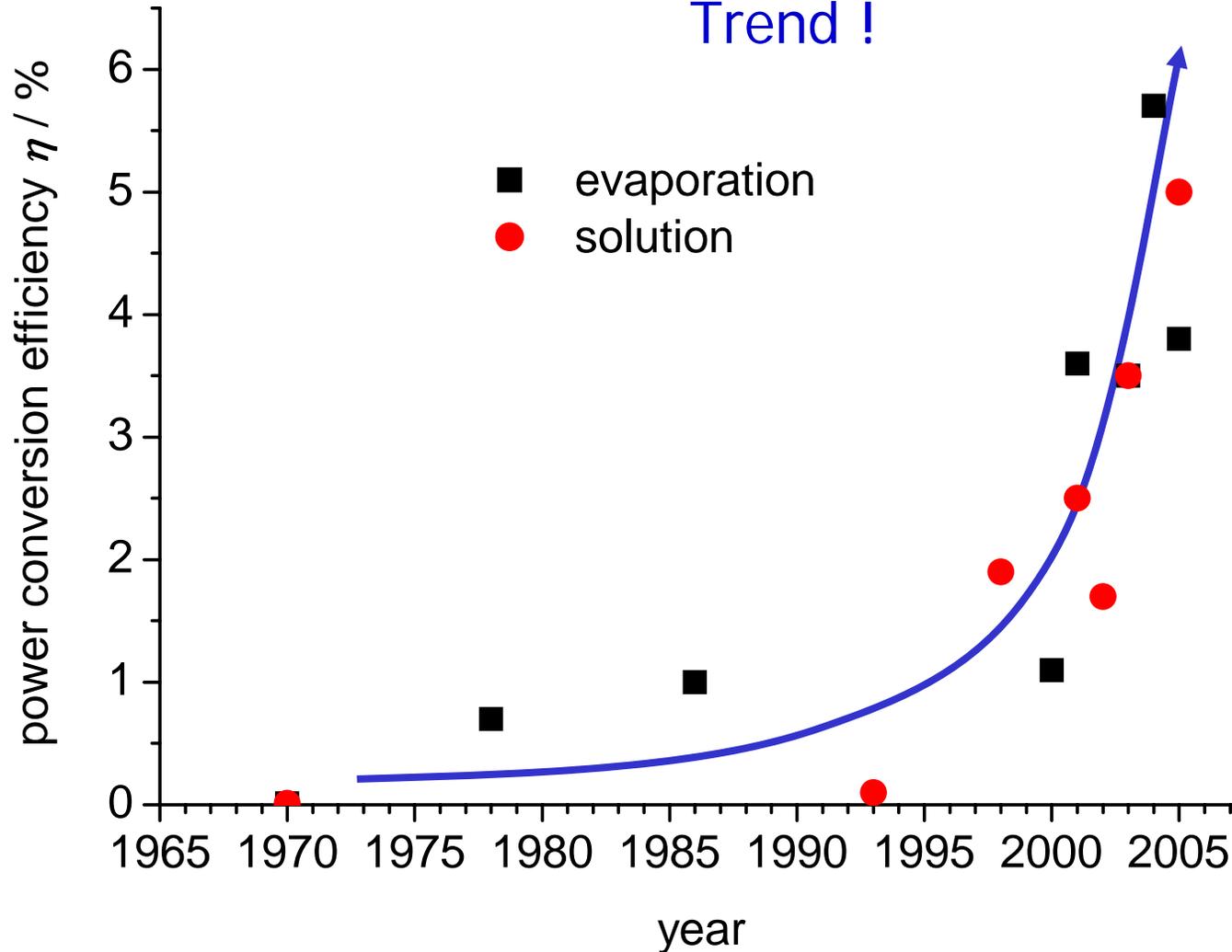
<sup>4</sup>M. Al-Ibrahim et. al., Appl. Phys. Lett. **86**, 201120 (2005)

<sup>5</sup>M. Reyes-Reyes et. al., Appl. Phys. Lett. **87**, 083506 (2005)

<sup>6</sup>W. Ma et. al., Adv. Func. Mat. **15**, 1617 (2005)

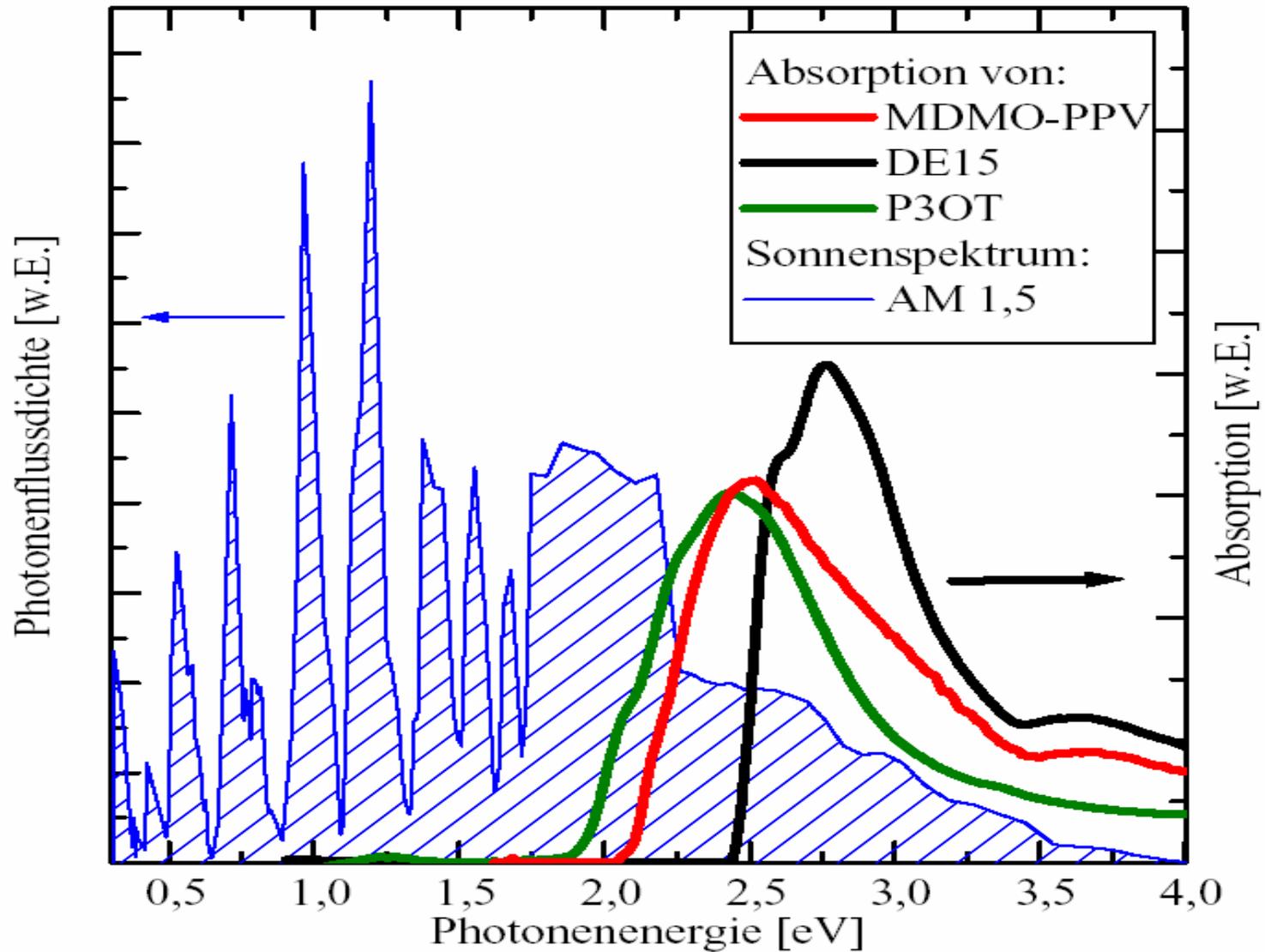
<sup>7</sup>H. Hoppe, G. Gobsch., et al. (to be published)

Erfolg versprechender positiver  
Trend !



- Anpassung der Absorption der Polymere an das solare Spektrum (→ Bandlücke  $E_g$ ) und Anpassung von HOMO und LUMO
- Optimierung der Nanomorphologie der Polymer-Fulleren-Mischung
- Optimierung der Kontakte
- Langzeitstabilität / Verkapselung
- ....

# Solares Spectrum AM 1.5 und Absorption

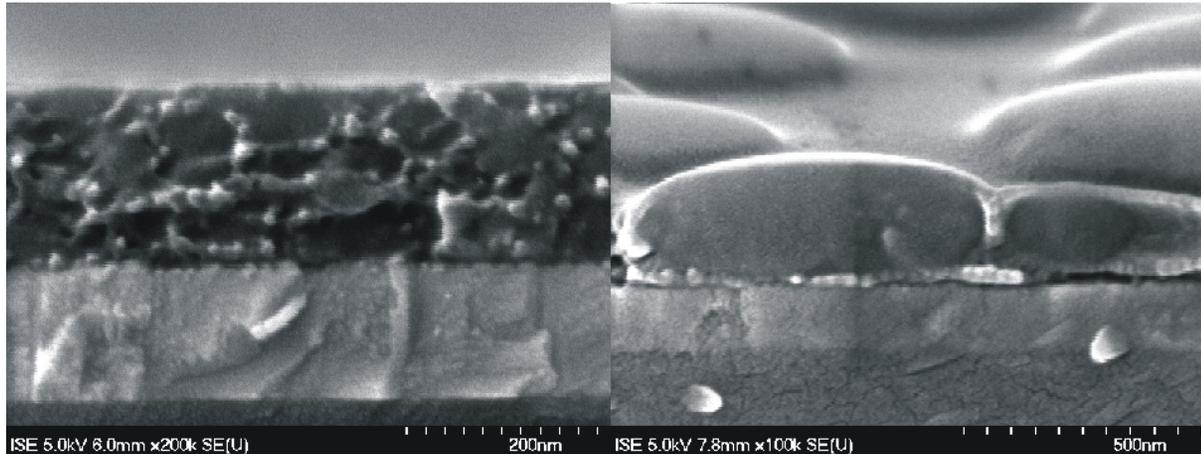


Folgende Herstellungsparameter wurden als entscheidend für die Nanomorphologie der aktiven Schicht (Polymer-Fulleren-Gemisch) identifiziert:

- **Lösungsmittel** beim Aufschleuderprozeß,
- **Mischungsverhältnis** (Polymer/Fulleren),
- **Lösungskonzentration**,
- Nanophasenseparation und Kristallisation durch **Tempern**,
- **chemische Struktur** der Materialien.

Aufgeschleudert aus einer Lösung mit:  
Chlorbenzol                      Toluol

## Struktur der aktiven Schicht



SEM-Aufnahmen der aktiven Schicht einer Plastiksolarzelle\*

**Solarzellen-Wirkungsgrad:**  
2.5%                      0.9%

→ **Struktur-Eigenschafts-Zusammenhang**

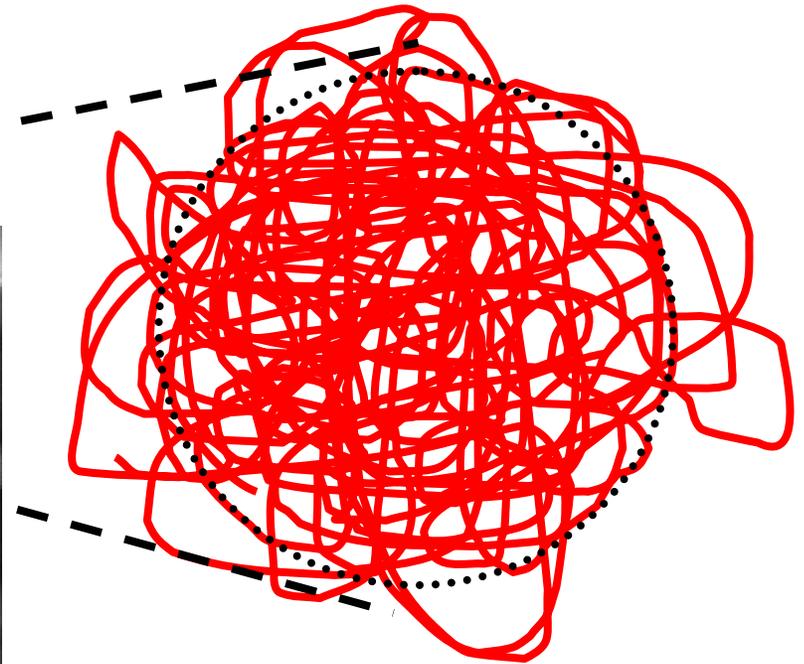
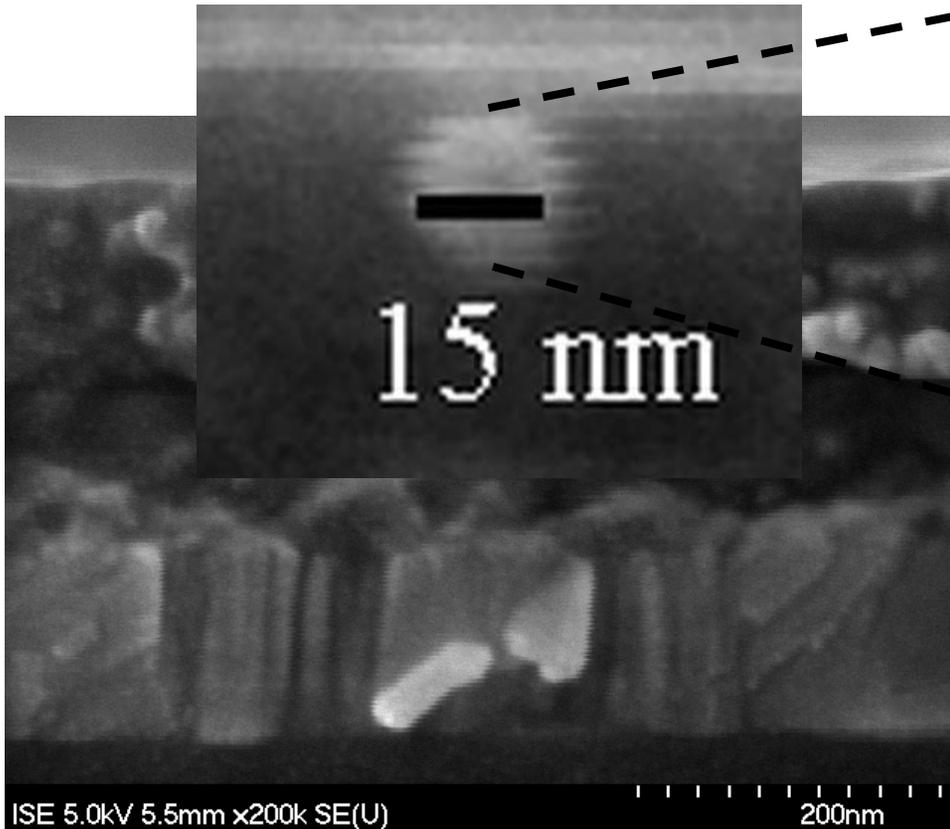
\*H. Hoppe, M. Niggemann, C. Winder, J. Kraut, R. Hiesgen, A. Hinsch, D. Meissner, N. S. Sariciftci, Adv. Funct. Mat. **14**, 1005 (2004)

# Sehen Polymeraggregationen so aus?



...oder mehr so?!



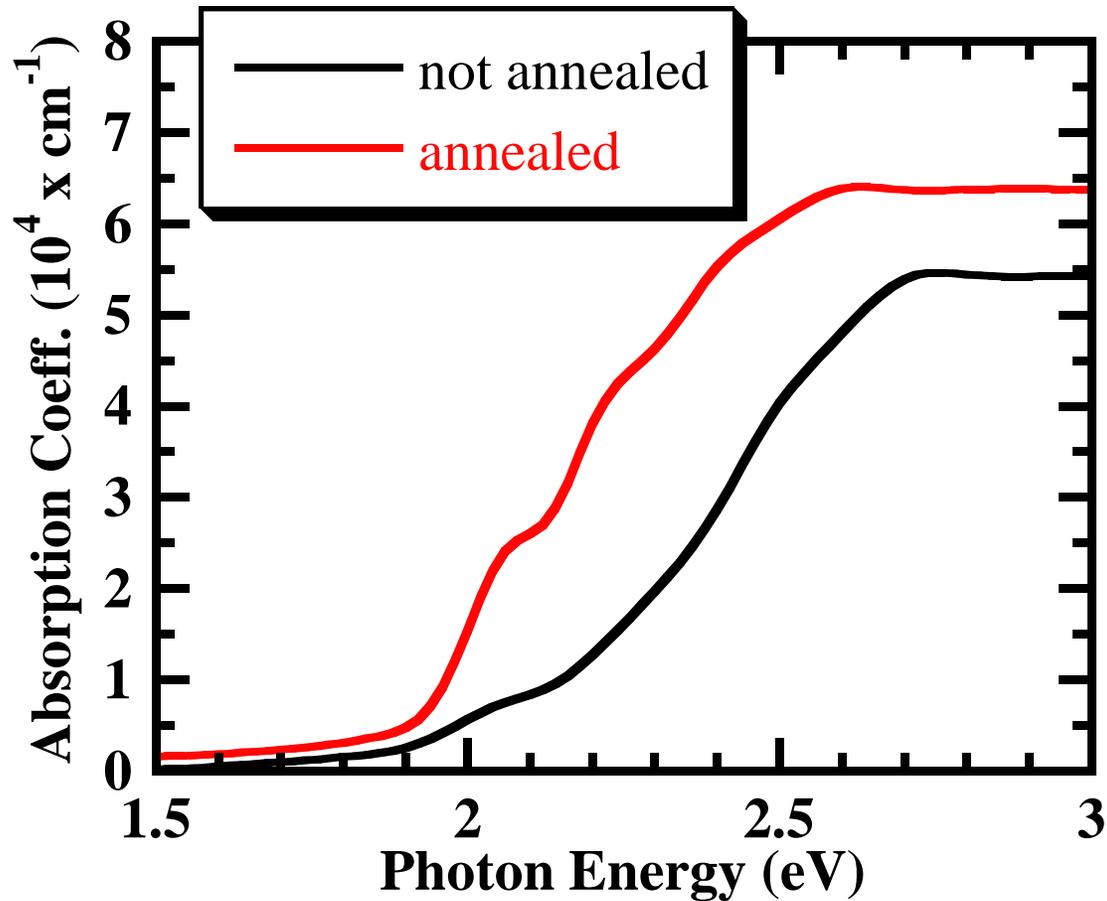


$$V_c = \frac{m}{\rho} = \frac{10^6 \cdot 1.66 \cdot 10^{-21} \text{ kg}}{910 \text{ kg/m}^3}$$

$$= 1.824 \cdot 10^{-24} \text{ m}^3$$

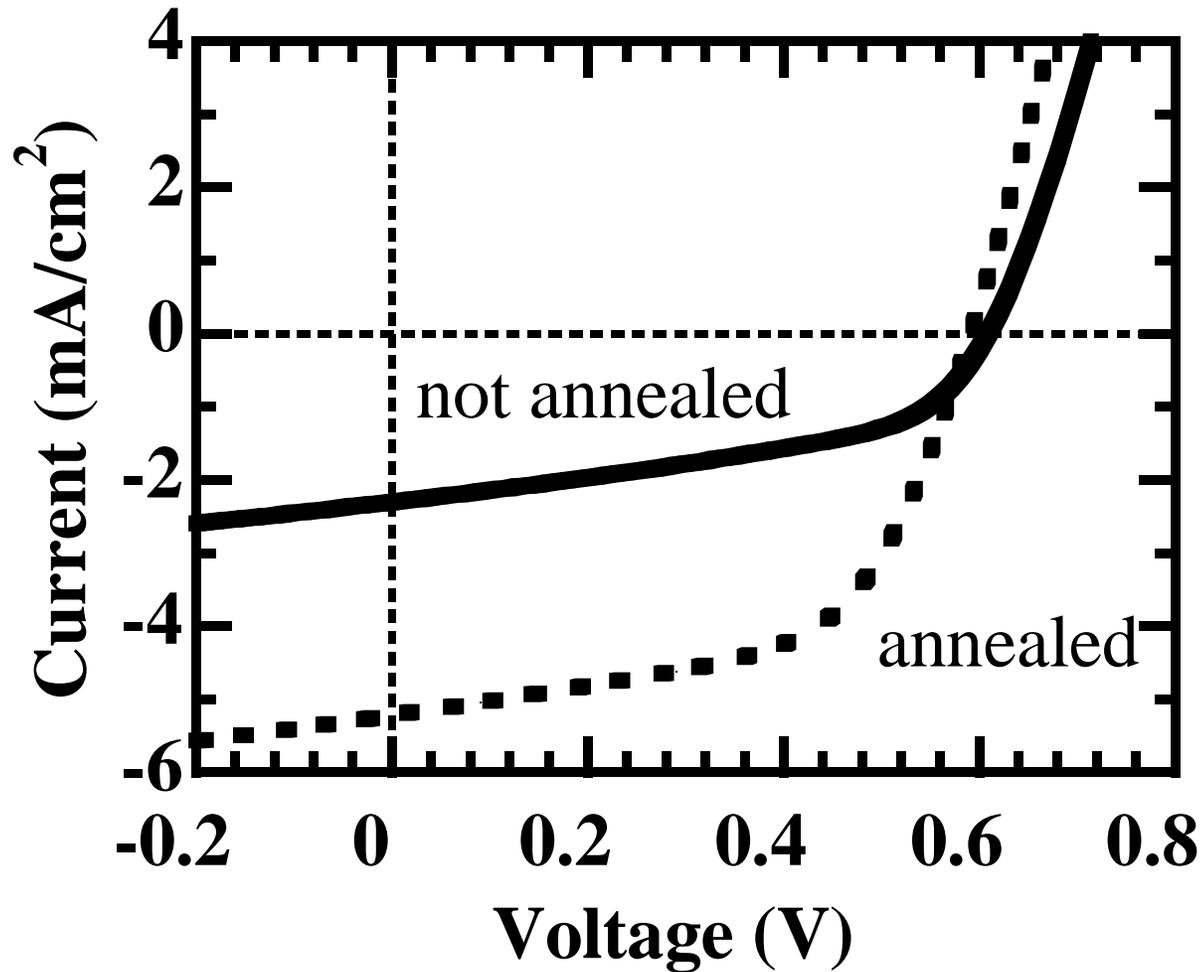
$$V_s = \frac{4}{3} \pi r^3 = V_c \Leftrightarrow r = \sqrt[3]{\frac{3}{4\pi} V_c} = \sqrt[3]{\frac{3}{4\pi} 1.824 \cdot 10^{-24} \text{ m}^3} = 7.57 \cdot 10^{-9} \text{ m}$$

# Absorption - P3HT/PCBM (1:2) (dünne Filme auf Glas)



→ nach dem Tempern ist die Absorption (im spektralen Bereich (2.0 - 2.5eV))  
deutlich verbessert

# Kennlinie einer P3HT/Fulleren (1:2) Solarzelle



Effizienz  $\eta$ :

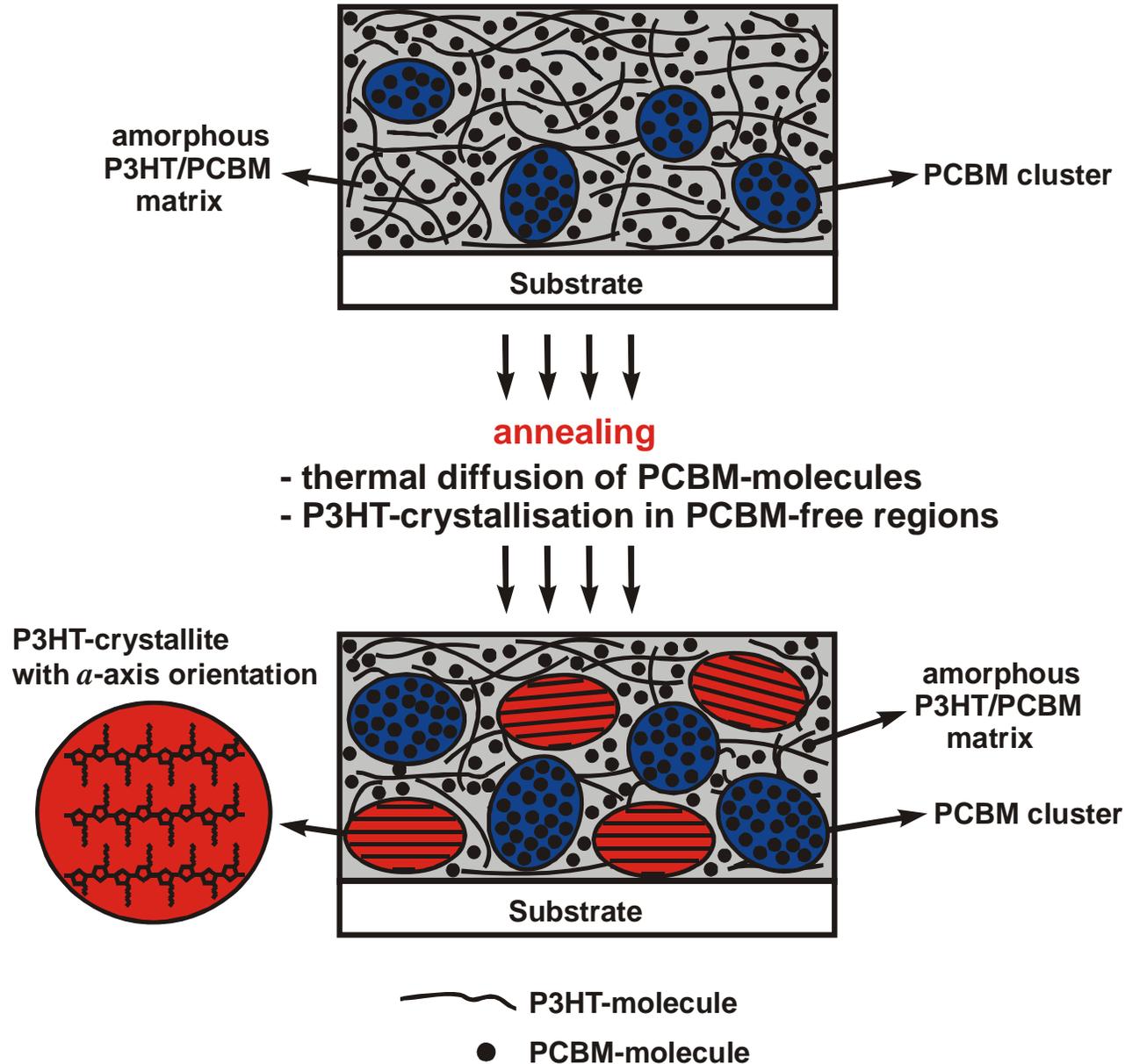
Nicht getempert

$$\eta = 1.0\%$$

Nach Temperung

$$\eta = 3.6\%$$

# Modell der Strukturänderung beim Tempern



- $\eta$  wird entscheidend von der Nanomorphologie determiniert
- Percolation and Kristallinität haben starken Einfluß auf den Ladungstransport und den Photostrom
- Eine Reihe von Parametern beeinflusst die Morphologie und muß deshalb gleichzeitig optimiert werden: Lösungsmittel, Lösungsverhältnis, Temperregime, Filmherstellungstechnologie, Materialkompatibilität, ...

# Herstellungsmethoden für polymerelektronische Bauelemente (einschließlich PSZ)

- Aufschleuderverfahren (Spin Coating) → bis max. wenige 10 cm
- Aufstreichen (Doctor Blading)
- Tintenstrahldrucker (gelöste Polymere sind wie „Tinte“)
- Rolle-zu-Rolle-Druckverfahren (nur durch Druckmaschinengröße beschränkt → z.B. leuchtende Tapeten oder großflächige Solarzellen)  
→ **Film**
- Aufdampfen im Hochvakuum (sehr genau, insbesondere für Displays, Bildschirme etc.)

## Organische Solarzelle



## Marktstudie von I.T. Strategies 10/2005:

**2010** für die verschiedenen Applikationsfeldern von **gedruckter Polymerelektronik** (Displays, Beleuchtung & Werbung, Photovoltaik, Sensorik, gedruckte Elektronik & Smart Packaging, Anorganisch-Organische Hybridelektronik, Smart Textiles) →

weltweites Marktvolumen: **1,20 Mrd.€**

(davon **100 Mio. €** für **organische Photovoltaik**) .

---

I.T. Strategies, Inc., Boston & Tokyo, <http://www.it-strategies.com>

---

	<u>Angaben für 2004</u>	[*]
c-Si	2.45 $\$/W_p$	
mc-Si	2.1 $\$/W_p$	
a-Si	2.7 $\$/W_p$	
CdTe	2.3 $\$/W_p$	
CIS	2.25 $\$/W_p$	
Farbstoff	2.2 $\$/W_p$	
Polymer	<1 $\$/W_p$	

[\*] A. Baumann, Y. Bhargava, Z.X. Liu, G. Nemet, J. Wilcox, Photovoltaic Technology Review, MSE/C226, December 6, 2004

# Fazit

- Die Polymerelektronik ist eine Hochtechnologie mit enormem Entwicklungspotential für den Freistaat Thüringen
- Die polymere Solarzelle erschließt völlig neue Anwendungsfelder für die PV
- Die polymere Solarzelle ist äußerst kostengünstig herzustellen. Sie hat viele Vorteile, (aber natürlich auch Nachteile)
- Es bedarf weiterer verstärkter Anstrengungen in F&E
- Die in einem Netzwerk eng zusammen arbeitenden Thüringer Forschungseinrichtungen (TU Ilmenau, TITK Rudolstadt, FSU Jena, CiS Erfurt, u.a.) bieten beste Voraussetzungen, um auch weiterhin den internationalen Forschungs- und Entwicklungsstand auf dem Gebiet der Platiksolarzelle mit zu bestimmen
- Es bedarf nunmehr verstärkt der industriellen Umsetzung und Realisierung auch in Thüringen!

## TU Ilmenau

Institut für Physik (Harald Hoppe, Uladzimir Zhokhavets, Tobias Erb, Rüdiger Goldhahn, Sviatoslav Shokhovets, Dirk Schulze, Paul Denner)

ZMN (Oliver Ambacher, Maher Al-Ibrahim, Susanne Scheinert)

FG Chemie (Peter Scharff, Uwe Ritter)

## TITK Rudolstadt (Aninstitut der TU Ilmenau)

Steffi Sensfuß, Hans-K.Roth, Klaus Heinemann, Ralf-Uwe Bauer

## FSU Jena

Institut für Chemie (Elisabeth Klemm, Daniel Egbe)

Institut für Werkstoffe (Klaus Jandt)

Konarka Austria (Ch. Brabec),

LIOS Linz (S. Sariciftci),

Universität Oldenburg (J. Parisi),

ISE Freiburg (A. Hinsch),

HMI Berlin (K. Fostiropoulos, M. Mohr)

## Projektförderung:

Thüringer Kultusministerium TMK (NanOrgI),

BMBF, DFG, INTAS, EU (NoE),

Fonds der Chemischen Industrie,

TU Ilmenau (Exzellenzförderung)



Zentrum für Mikro- und  
Nanotechnologien der TU  
Ilmenau

Danke für Ihre geschätzte Aufmerksamkeit !