

Dr. Sebastian Schellhammer,
Dresden Integrated Center for Applied Physics and Photonic Materials (IAPP)

**Halbleitertechnologie mal anders:
Dank organischer Moleküle flexibel,
minimalistisch - hochfunktional**

Was
ist

INFINITE?



was und wer?

- ein Projekt (2024-2028) finanziert von der EU

- 9 Ausbildungszentren & Organisationen aus Deutschland, Spanien, Lettland, Finnland



Ziel

Skills zu gedruckter, flexibler, organischer Elektronik in Ausbildungen integrieren

wie?

- Workshops für Ausbilder*innen & Azubis (z.B. heute)

- Austausch mit Firmen: welche skills brauchen sie?
- Lehrpläne modernisieren



warum?

wir wollen Europas junge Fachkräfte fit machen für innovative Technologien!

(Grober) Ablauf

9:00 Grundlagen der Organischen Elektronik

– 10 min Pause –

10:10 Von Solarzellen über Sensoren zu OLEDs

– 10 min Pause –

11:20 Einblicke in die aktuelle Forschung am IAPP

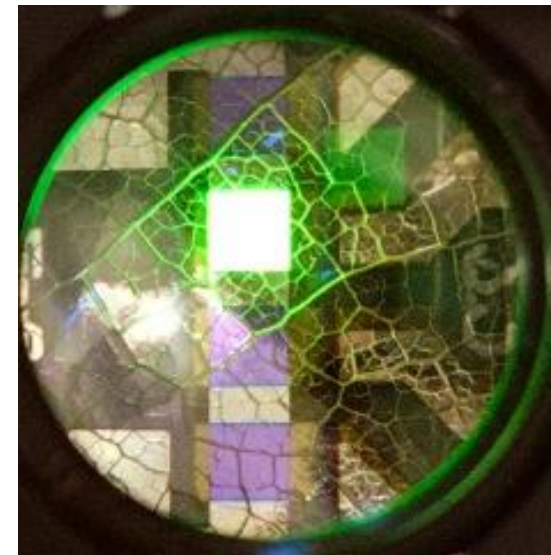
– Mittagspause in der Mensa –

13:15 Einblicke in unsere Labore

14:20 Abschluss und Evaluation



[oiger.de]



[Hänisch et al. *Adv. Funct. Mater.* eingereicht]

Lernziele

Ihr...

- ... **entwickelt ein grundlegendes Verständnis für organische Halbleitermaterialien mit Fokus auf kleine Moleküle und versteht konzeptionelle Unterschiede zu konventionellen Halbleitern.**
- ... kennt Anwendungsszenarien in Photonik und Elektronik und könnt Vor- und Nachteile beurteilen.
- ... bekommt authentische Einblicke in aktuelle Forschungsfelder am IAPP.
- ... kennt Tätigkeitsfelder für Physiklaborant:innen und Physik-Laborassistent:innen auf dem Gebiet der Organischen Elektronik.
- ... bekommt authentische Einblicke in Labore und exemplarische Herstellungs- sowie Messmethoden.

Organische Elektronik an der TU Dresden:

Dresden Integrated Center for Applied Physics and Photonic Materials (IAPP)



OES
Organic Electronics Saxony



Source:
OpenStreetMap



Emerging semiconductors (strong focus on organics)

- LEDs
- Photovoltaics
- Transistors
- Photodetectors
- Sensors
- Laser application
- Further applications
- Fundamental material properties

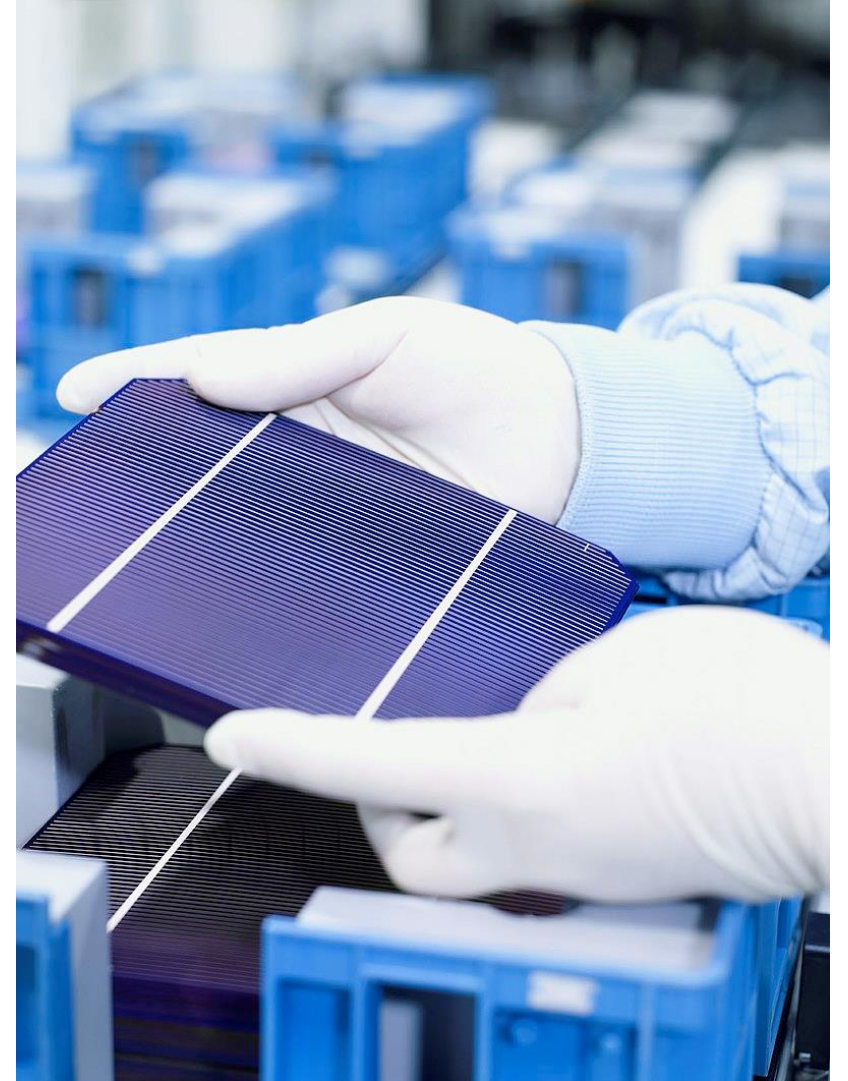


Grundlagen der Organischen Elektronik

- Wann verhalten sich organische Moleküle wie Halbleiter?
- Was ist das Besondere an diesen Materialien?
- Welche Vor- und Nachteile ergeben sich?

Konventionelle Halbleitermaterialien: Silizium, Galliumarsenid,...

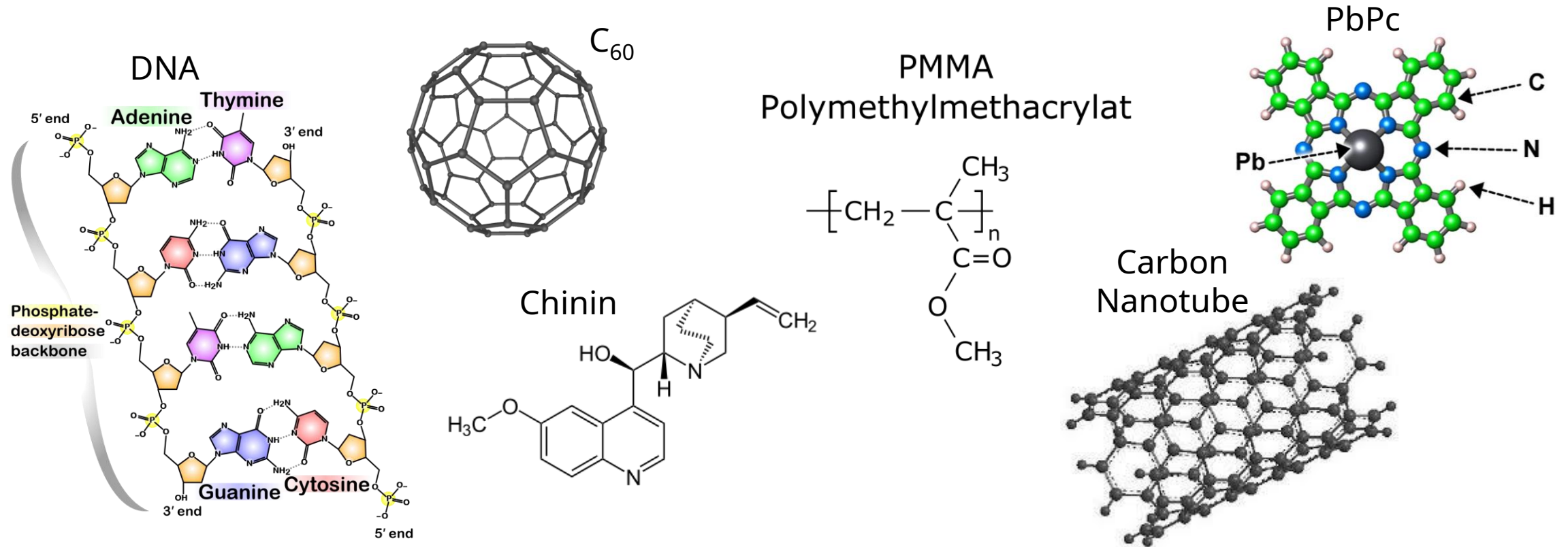
- Welche Eigenschaften verbindet ihr mit konventionellen Halbleitern?
- Welche Anwendungen verbindet ihr mit konventionellen Halbleitern?
- Welche Nachteile verbindet ihr mit konventionellen Halbleitern?



[wikimedia.org]

Organische Materialien

➤ Was davon sind organische Materialien? – Und was organische Halbleiter?

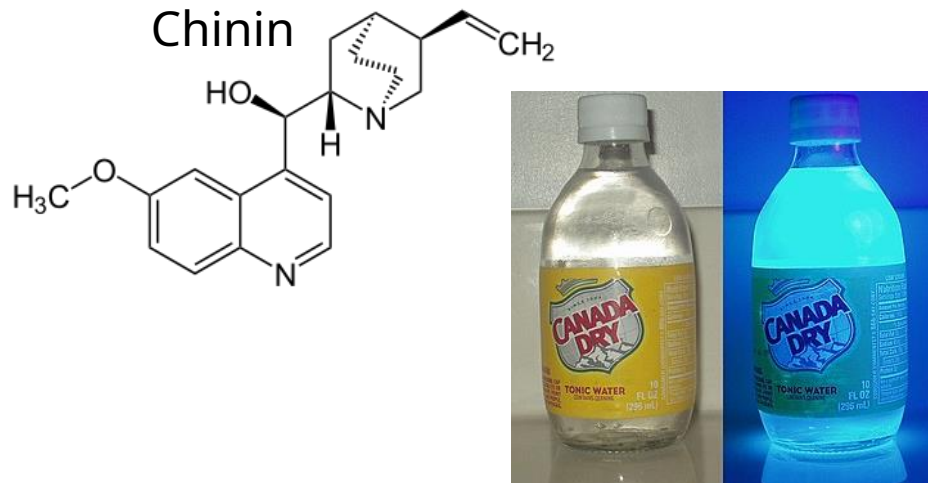


[wikimedia.org]

Organische Materialien

- Kohlenwasserstoffe mit diversen Heteroatomen (z.B. N, O, Cl, F, S, ...) bis hin zu Metallorganik-Komplexen (z.B. Iridiumkomplexe als Emitter in OLEDs)

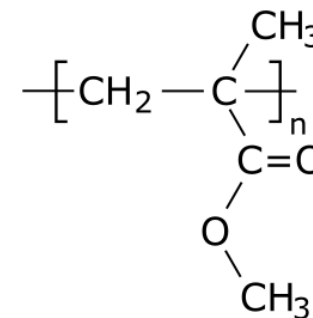
Small Molecules ... niedrige Molekülmasse



[wikimedia.org]

Polymere & Makromoleküle ... hohe Molekülmasse

PMMA Polymethylmethacrylat



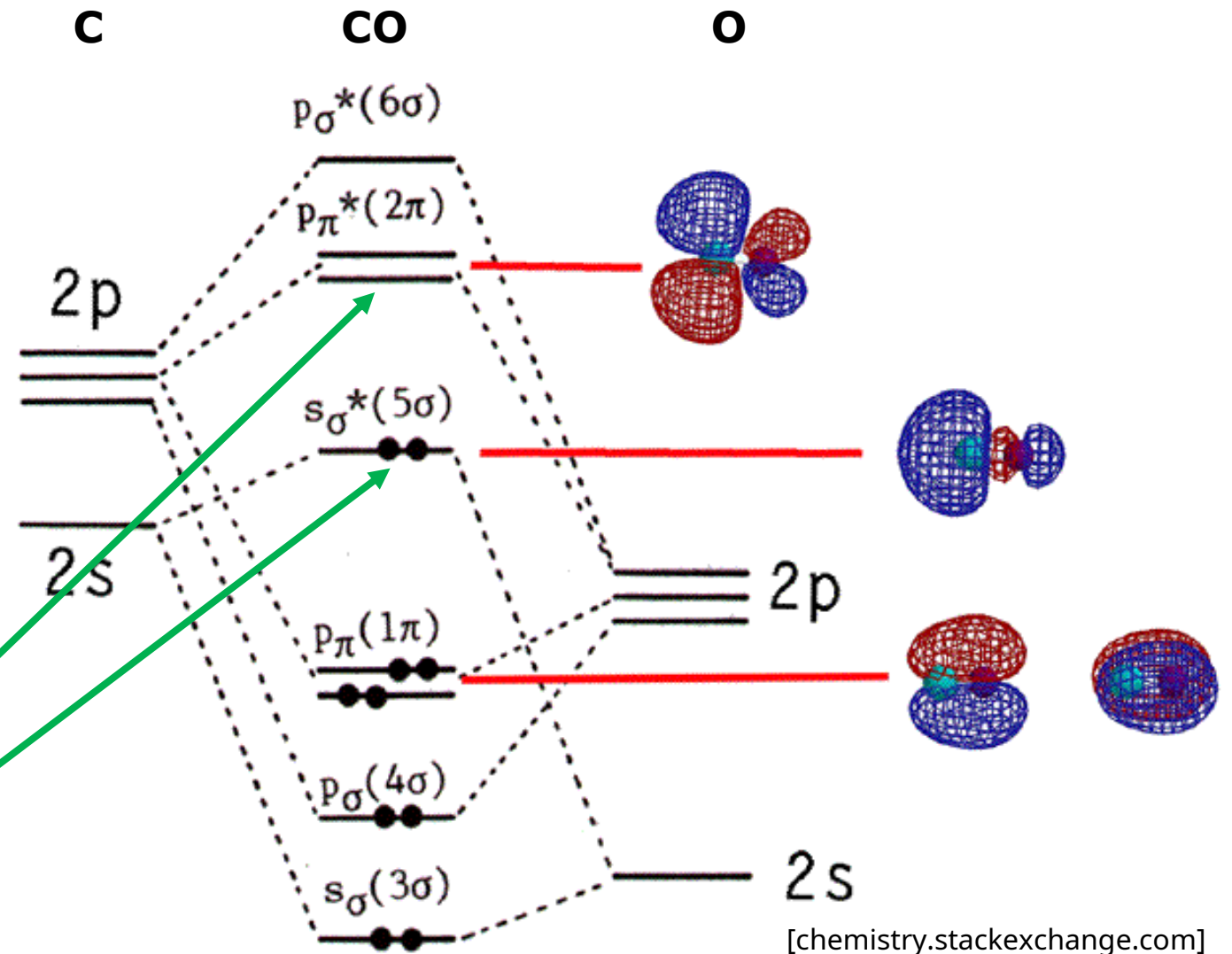
[maschinenbau-wissen.de]



[ms-viscom.com]

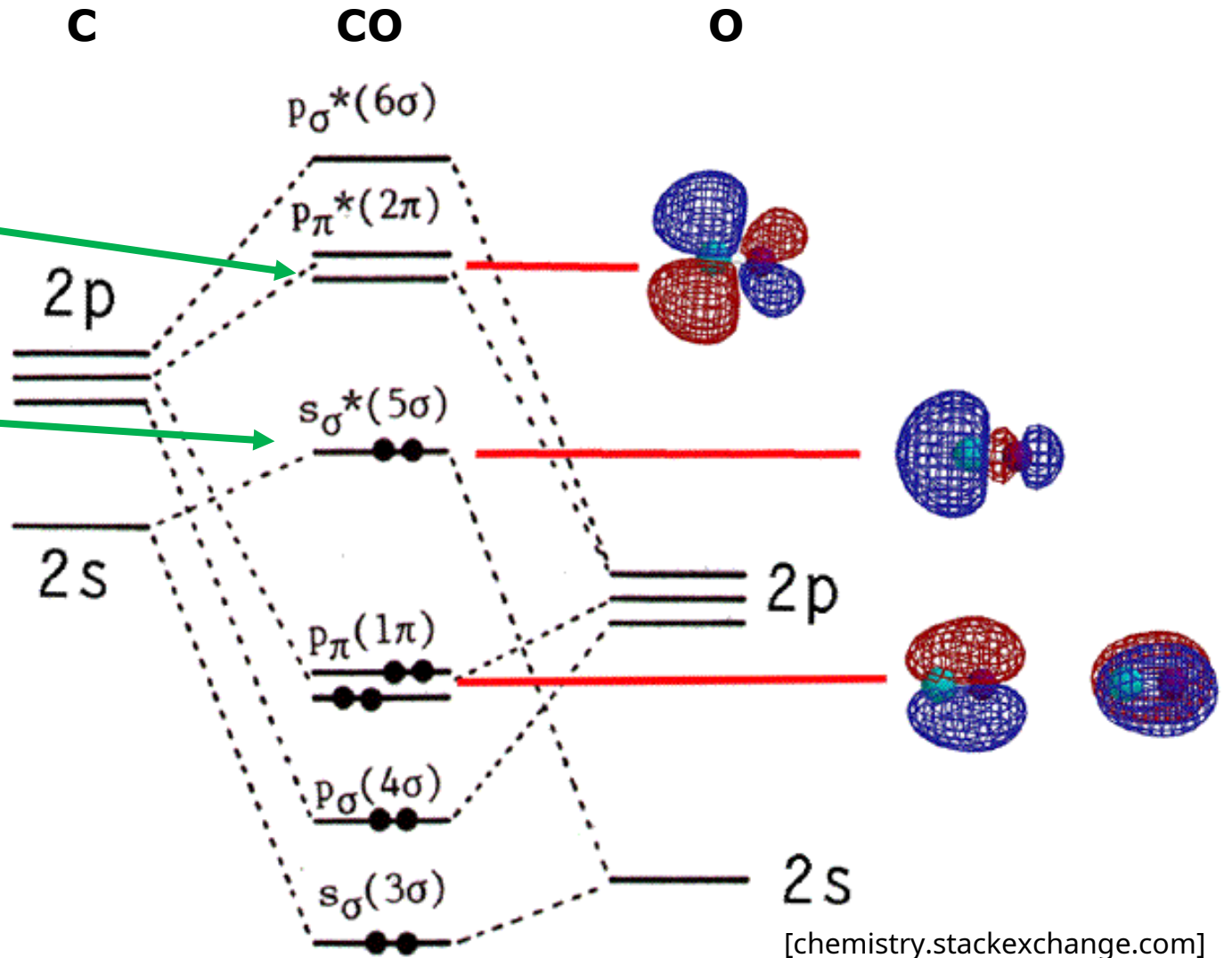
Elektronische Struktur von (organischen) Molekülen

- Molekülorbitale (MO) als Linearkombination atomarer Orbitale (LCAO-Ansatz)
- Übliche Moleküle mit gerader Elektronenzahl
- Systematisch von tiefen zu hohen Energien mit 2 Elektronen aufgefüllt (Pauli-Prinzip):
LUMO (lowest unoccupied MO)
HOMO (highest occupied MO)



Elektronische Struktur von (organischen) Molekülen

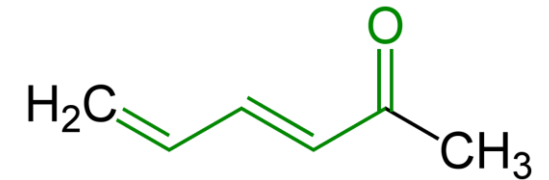
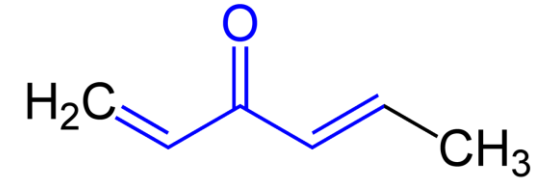
- LUMO
 ≈ Leitungsband konventioneller Halbleiter
 → bspw. relevant für Elektronentransport
- HOMO
 ≈ Valenzband konventioneller Halbleiter
 → bspw. relevant für Lochtransport
- $\Delta E = E_{\text{HOMO}} - E_{\text{LUMO}}$
 ≈ Bandlücke
 → bestimmt bspw. Absorptionsenergie



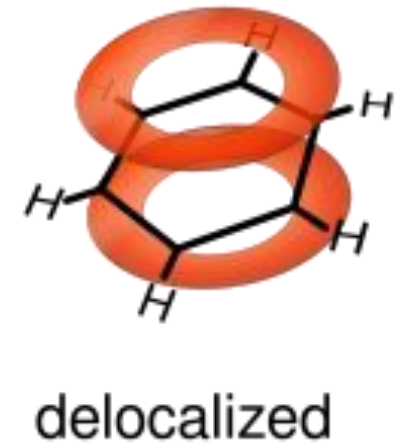
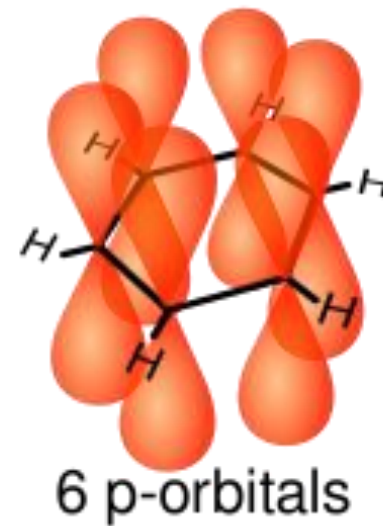
Bindungen organischer Moleküle

- π -konjugierte und insbesondere aromatische Gruppen als Grundbausteine organischer Halbleiter:
 - Symmetrie sorgt für Resonanzstruktur mit delokalisierten Elektronen = vergleichsweise schwach gebunden
 - Delokalisation aus der Ebene ermöglicht Ladungstransport
 - Delokalisation in der Ebene ermöglicht Finetuning

Ketone



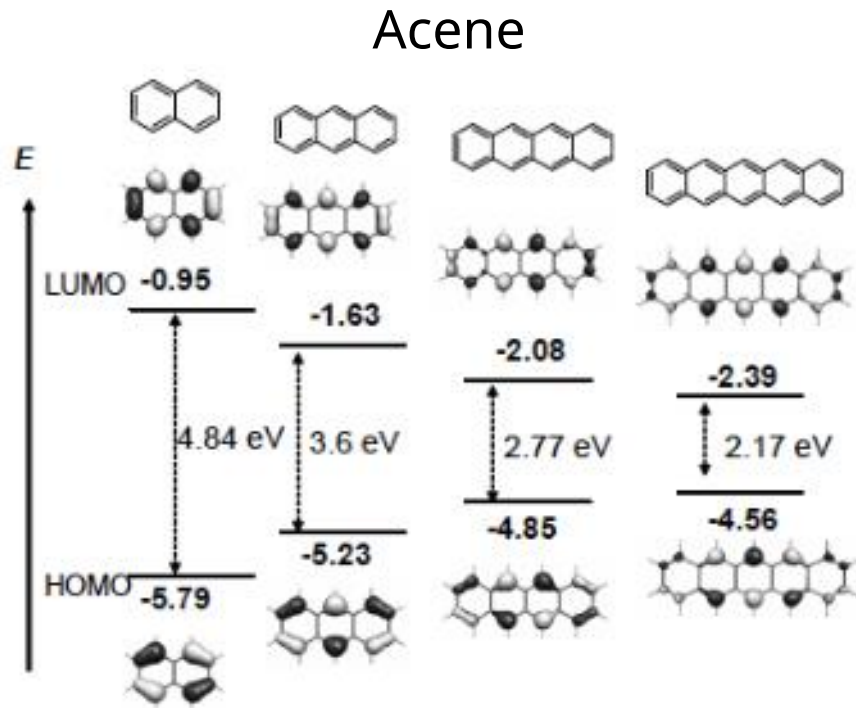
Benzen



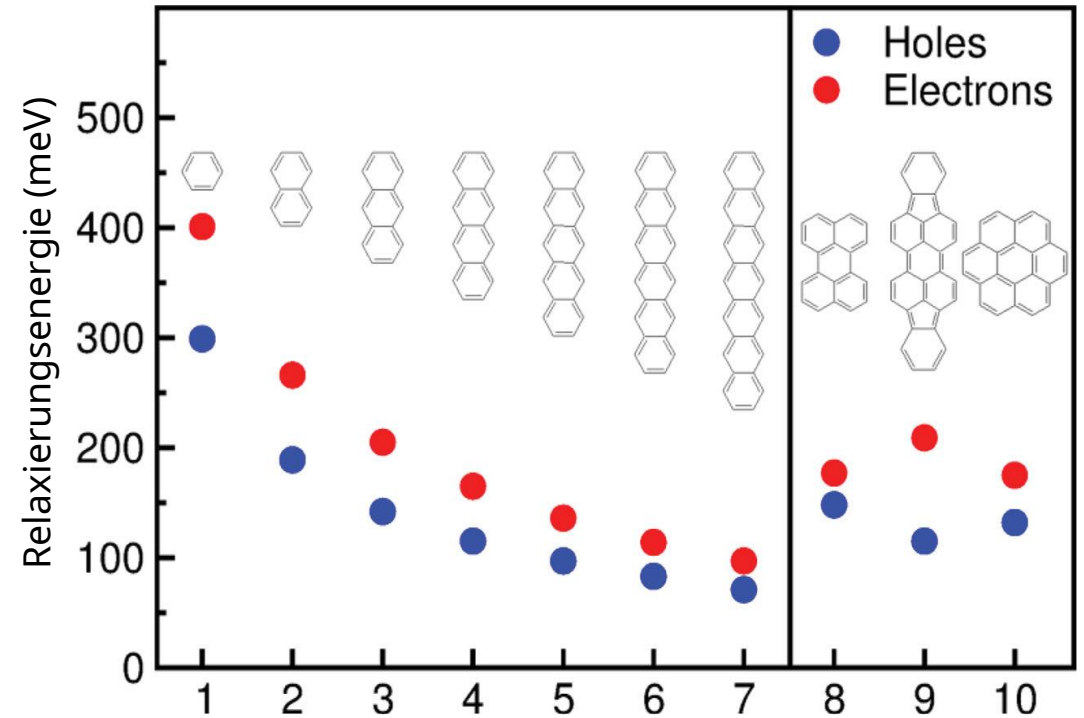
[wikimedia.com]

Von organischen Molekülen zu organischen Halbleitern

- Aromatizität als Grundbaustein organischer Halbleiter:



[Shinamura et al. *Heterocycles* 2011, 83, 1187]

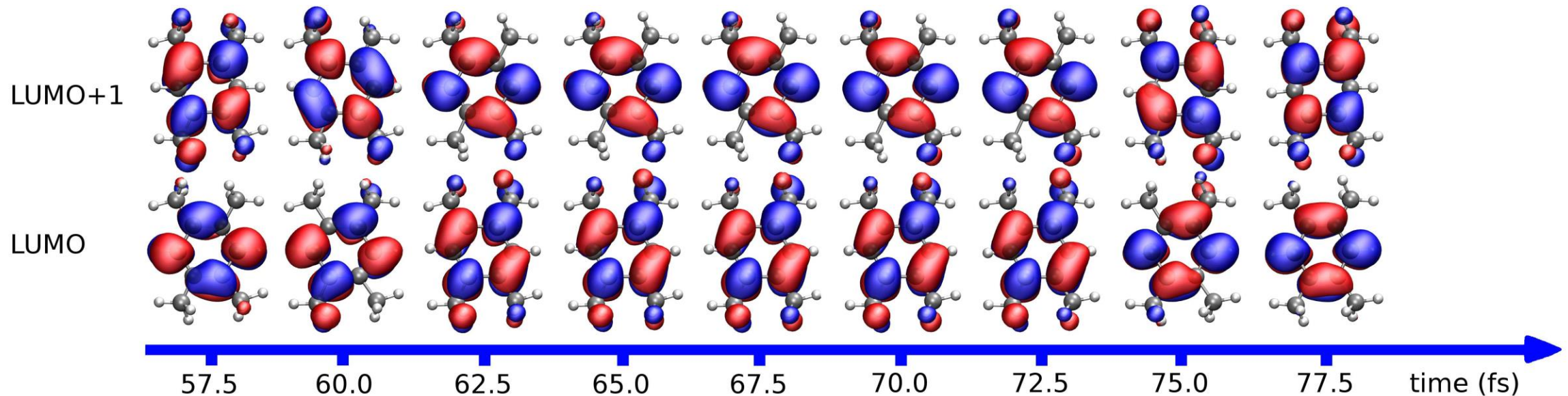


[Ortmann et al. *Adv. Funct. Mater.* 2014, 25, 1933]

Von organischen Molekülen zu organischen Halbleitern

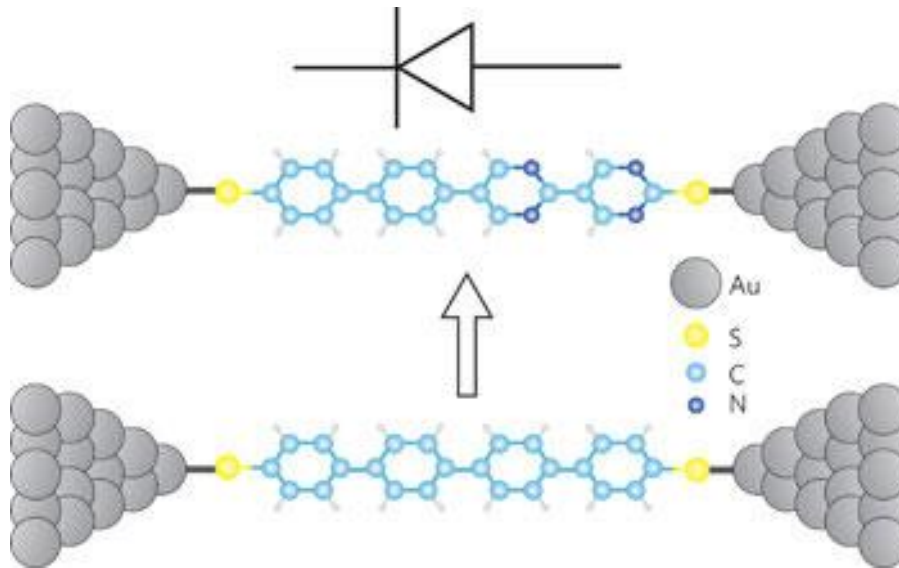
➤ Organische Materialien = weiche Materie

→ Elektronische Struktur entscheidend durch molekulare Dynamik beeinflusst



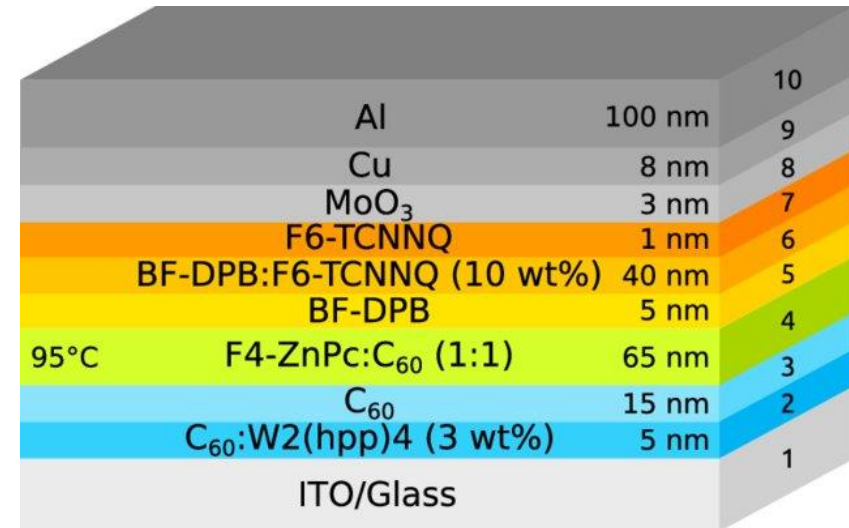
Von einzelnen Molekülen zu Filmen und Bauteilen

Molecular Electronics



[Díez-Pérez et al. *Nature Chemistry* 2009, 1, 635]

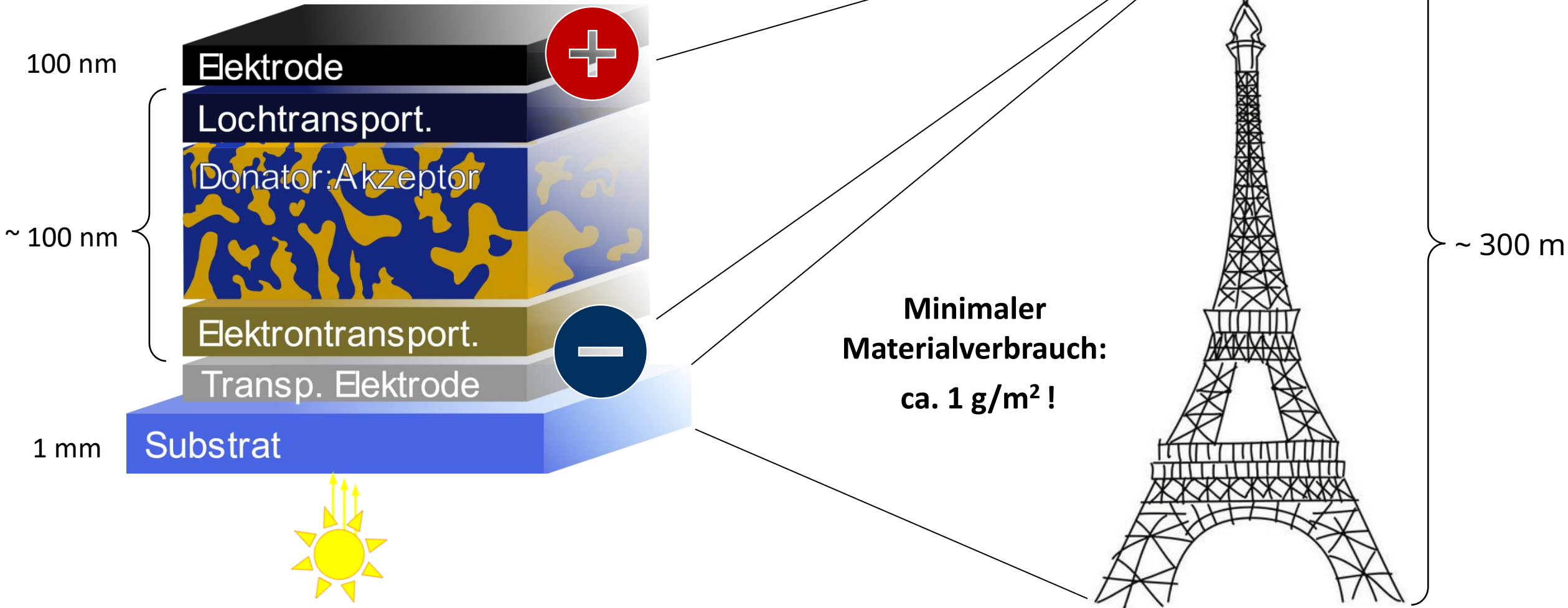
Organic Electronics



[Dollinger et al. *Organic Electronics* 2017, 46, 242]

**Bauteile immer funktionelle
Mehrschichtsysteme!**

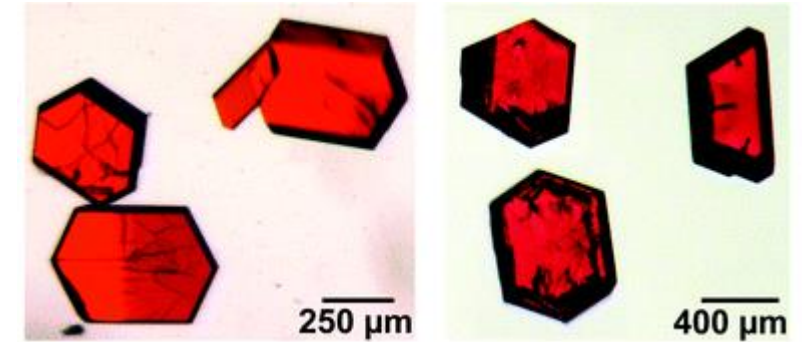
Von einzelnen Molekülen zu Filmen und Bauteilen



Von einzelnen Molekülen zu Filmen und Bauteilen

- Anordnung von organischen Molekülen = Morphologie:

Dominiert von schwachen Wechselwirkungen
... insbesondere Van-der-Waals-Wechselwirkungen

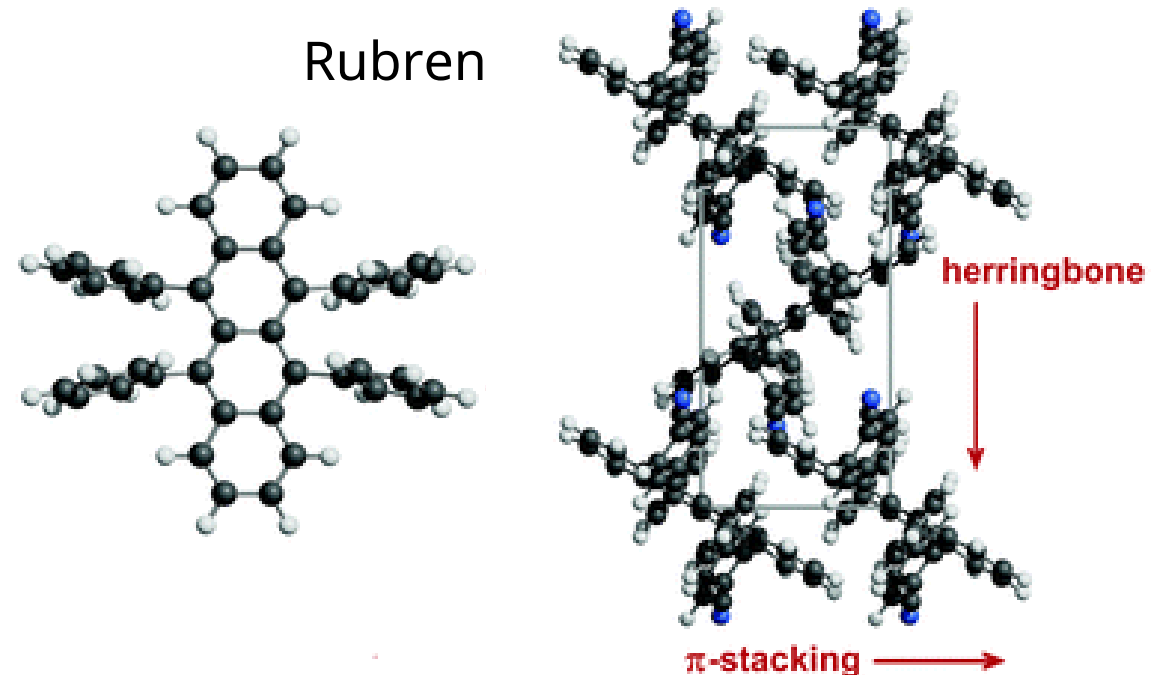


1) Einkristalle

... geordnete, periodische Anordnung
der Moleküle in dichter Packung

... von Verfahren abhängig

... bester Ladungstransport $> 1 \text{ cm}^2/\text{Vs}$,
aber für Anwendungen schwer nutzbar
und stark richtungsabhängig und
defektsensitiv

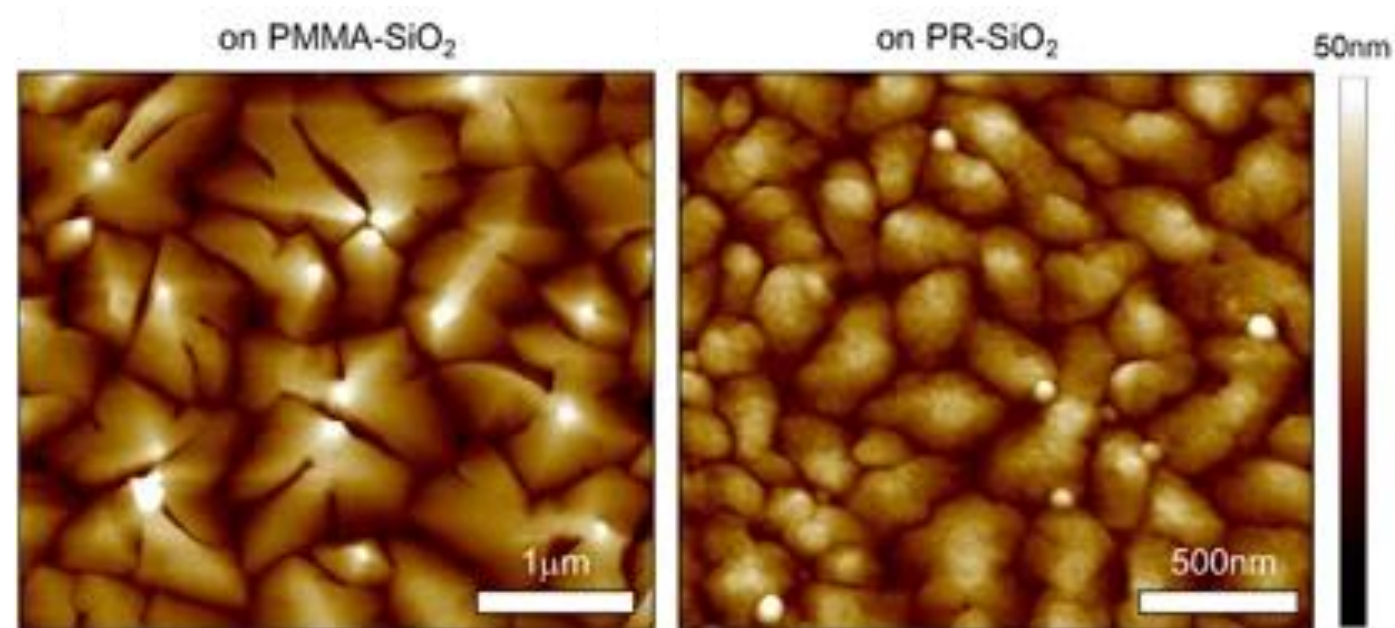


Von einzelnen Molekülen zu Filmen und Bauteilen

- Anordnung von organischen Molekülen = Morphologie

2) Polykristalline Filme

- ... geordnete Nanokristalle
- ... von Verfahren und Substrat abhängig
- ... Ladungstransport signifikant durch Grenzbereiche limitiert
- ... glattere Oberflächen zwischen Filmen



[Kim et al. *NPG Asia Materials* 2014, 6, e91]

Von einzelnen Molekülen zu Filmen und Bauteilen

- Anordnung von organischen Molekülen = Morphologie

3) Amorphe Filme

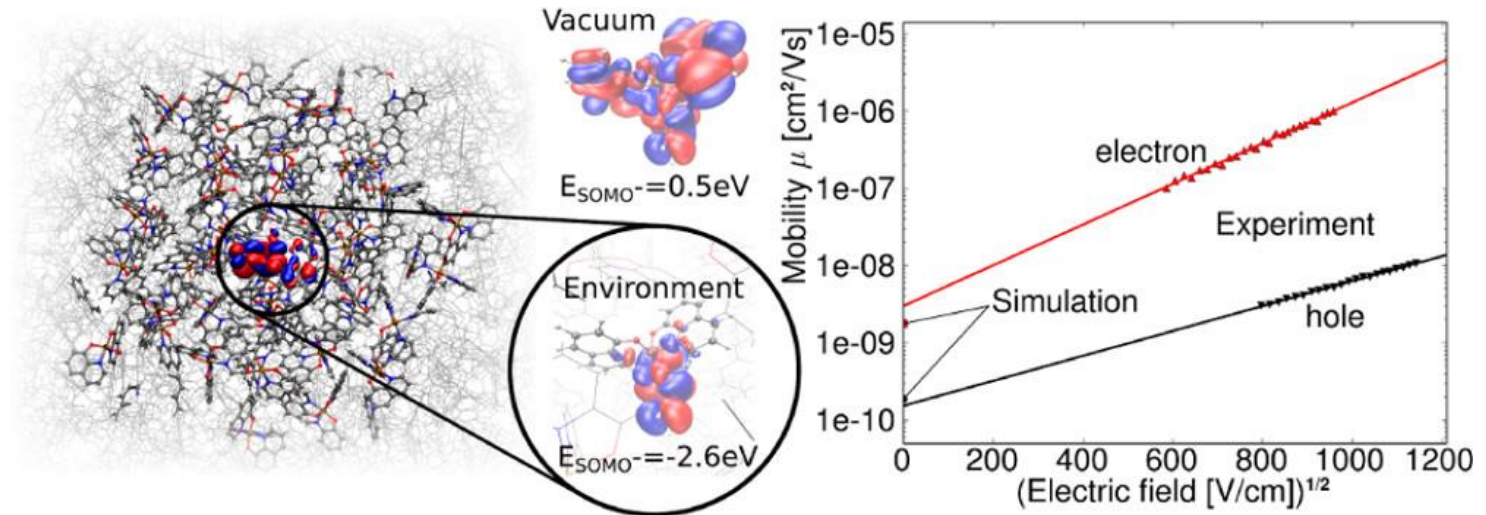
... Standard in organischen Bauteilen

... amorph heißt nicht willkürlich

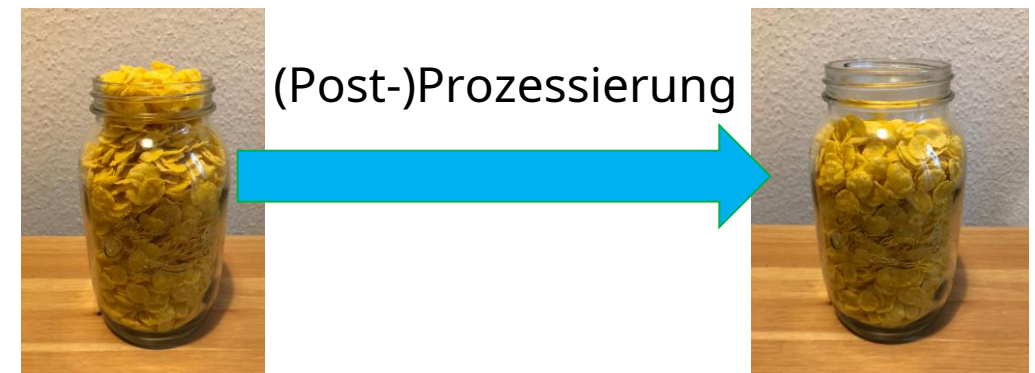
→ bspw. bevorzugte Emitterorientierung

... Eigenschaften des Films erneut variierbar

→ Ultrastabile Gläser

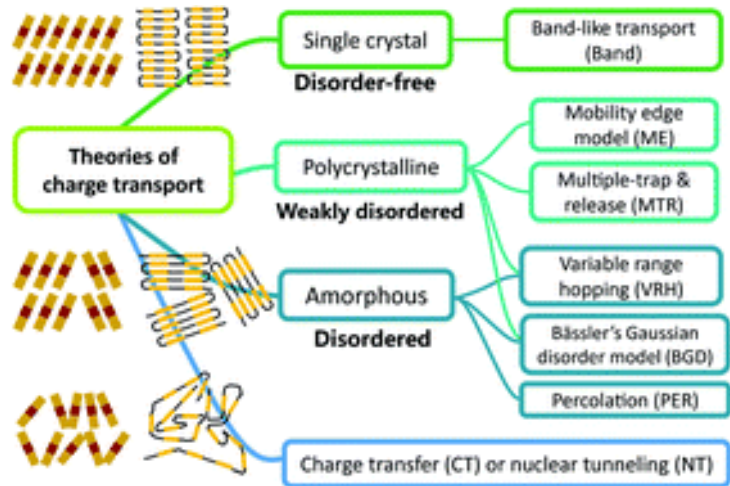


[Friederich et al. *J. Chem. Theory Comput.* 2014, 10, 3720]

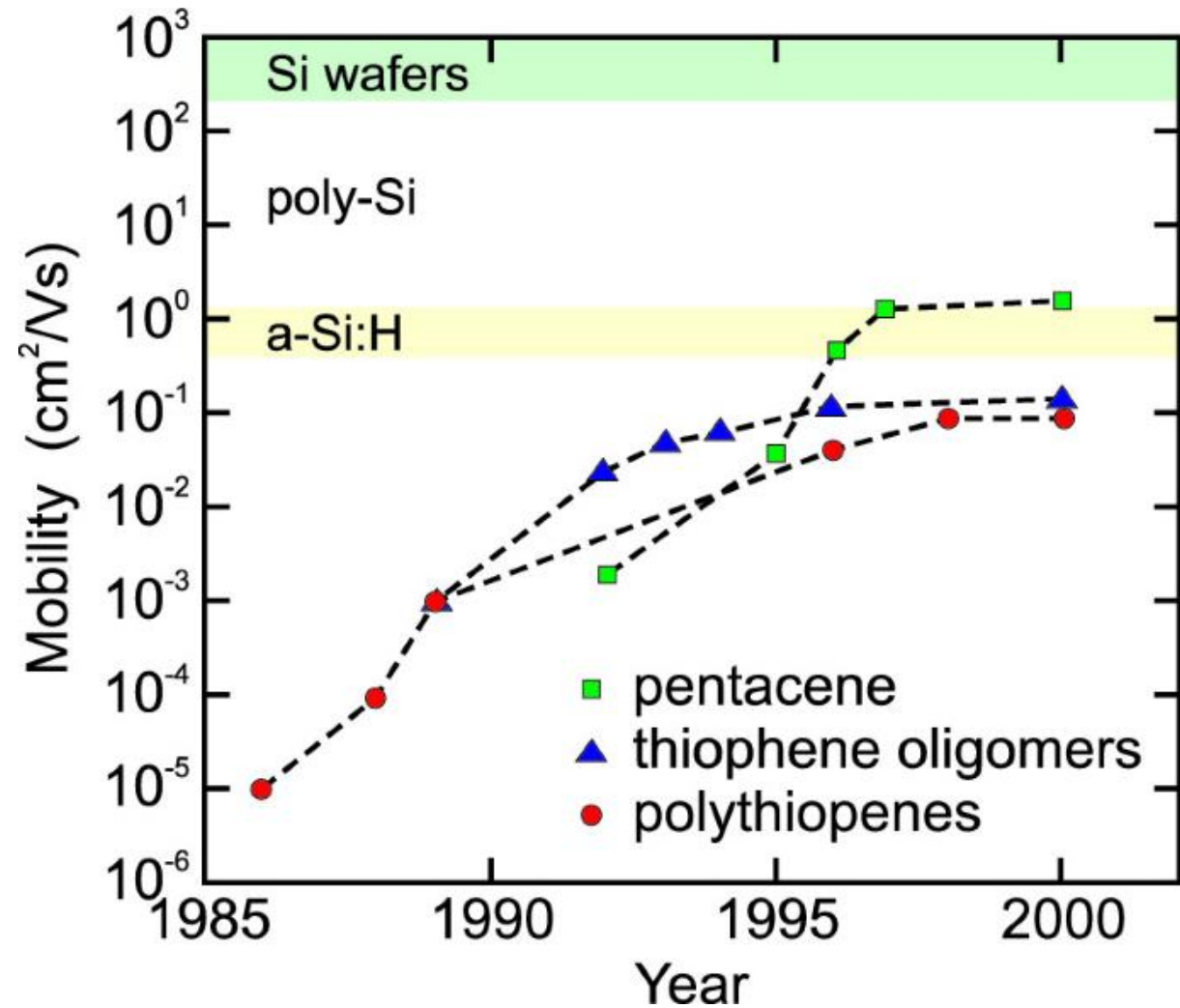


Von einzelnen Molekülen zu Filmen und Bauteilen

- Ladungstransport unabhängig von Morphologie schlechter als in konventionellen Halbleitermaterialien
→ tw. kompensiert durch dünne Filme
- Und theoretische Beschreibung weitaus komplexer



[Liu et al. *Mater. Horiz.* 2017,4, 608-618]



[Grundmann, Organic Semiconductors. In: The Physics of Semiconductors. Graduate Texts in Physics. Springer, Cham, 2021]

Von einzelnen Molekülen zu Filmen und Bauteilen

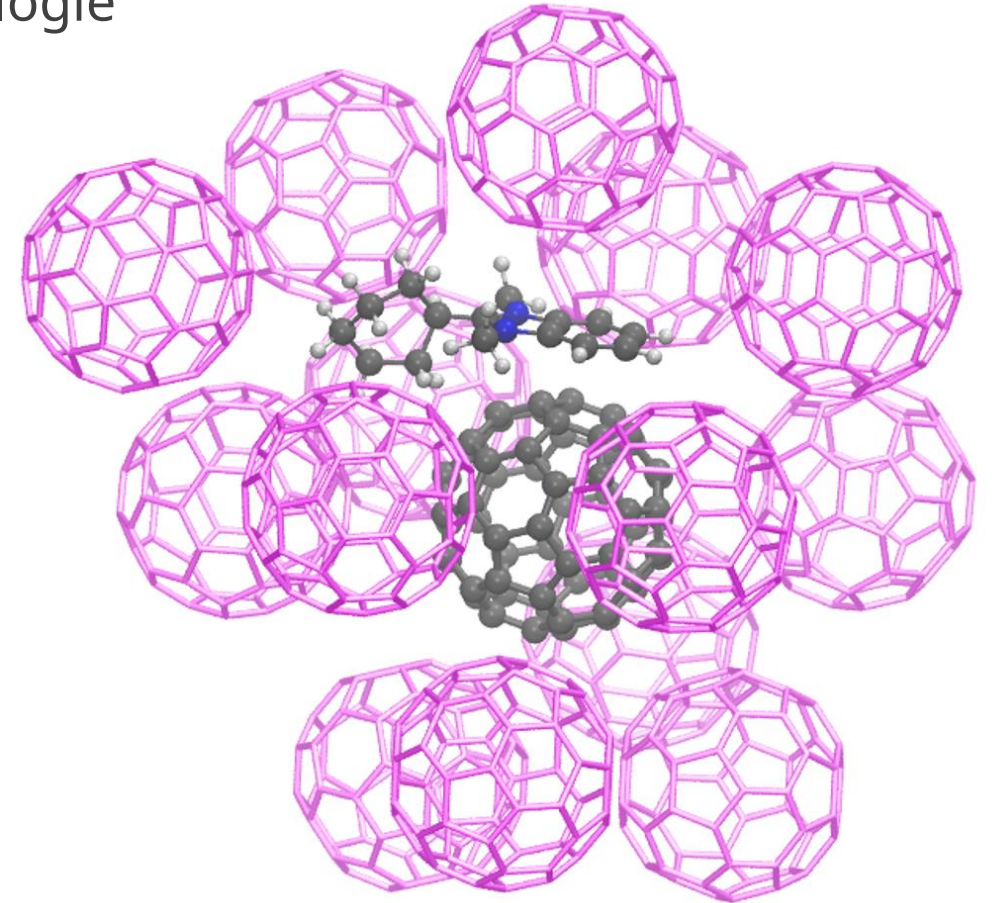
- Anordnung von organischen Molekülen = Morphologie

4) Blends = Mischschichten

... Erhöhung der Funktionalität des Films durch die Mischung von Materialien
→ Funktionalität vs. Komplexität

Bsp.:

- Dotierung von Filmen für verbesserten Ladungstransport
- Emitter eingebettet in Hostmaterial in OLEDs
- Donator und Akzeptor gemischt in Solarzellen



[Gaul et al. *Nature Mat.* 2018, 17, 439]

Von einzelnen Molekülen zu Filmen und Bauteilen

- Dotierung kann Performanz deutlich verbessern
 - verbesserte Leitfähigkeit
 - verbesserte Injektion von Ladungsträgern an der Grenzschicht zwischen Elektroden und organischen Schichten
 - p-Dotierung üblicherweise durch Moleküle (z.B. F₄-TCNQ)
 - n-Dotierung üblicherweise durch Alkalimetalle (z.B. Li, Cs)

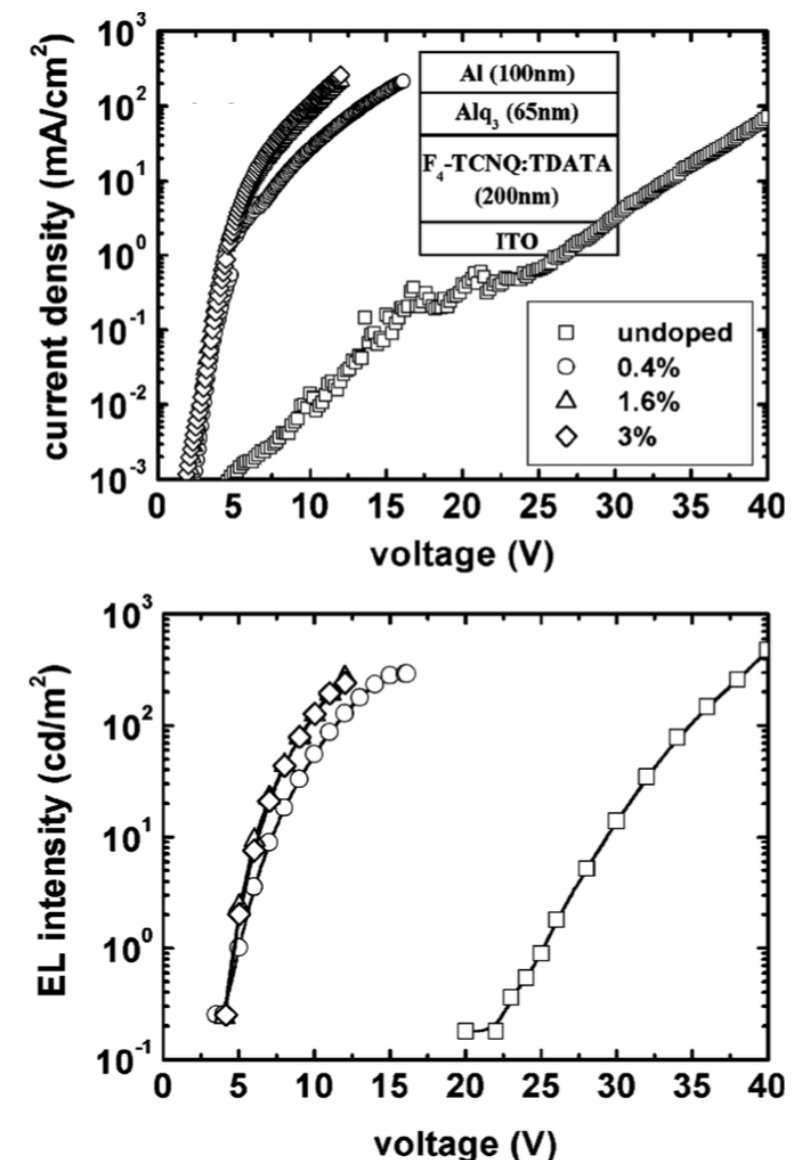
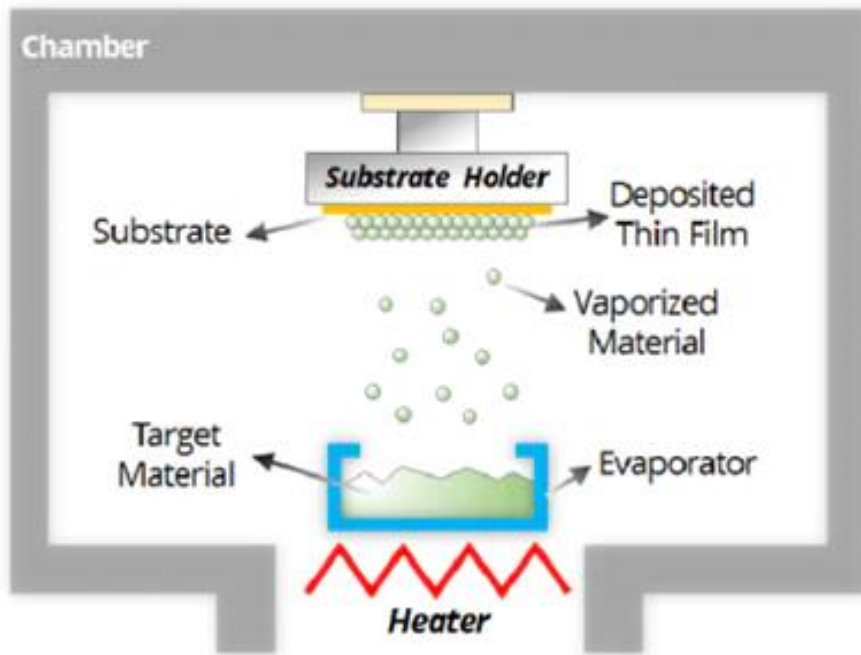


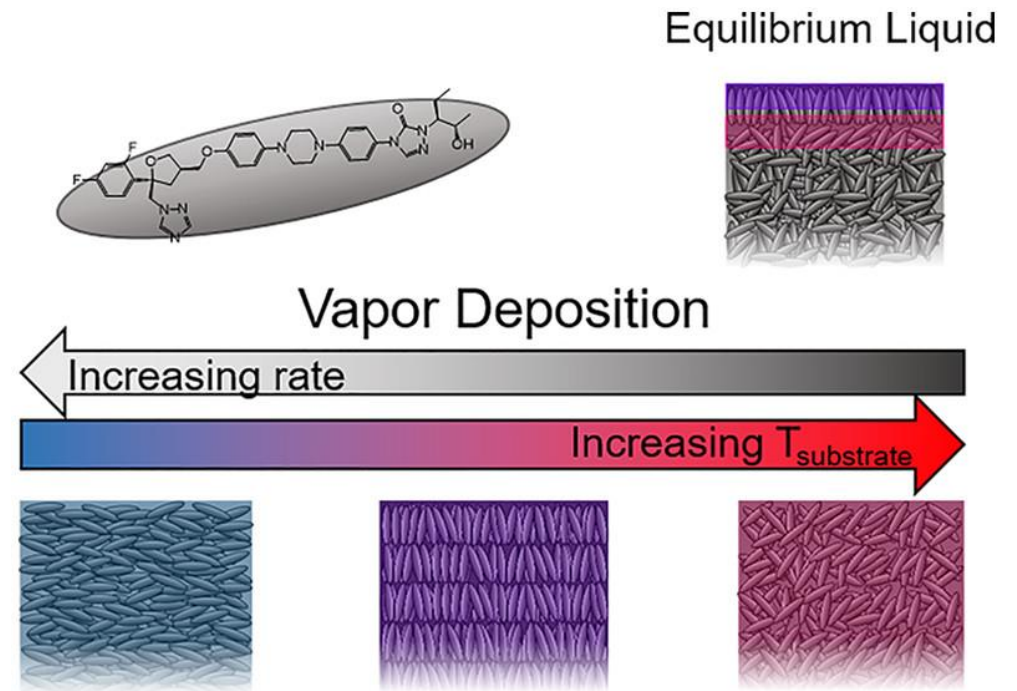
Figure 27. (a) Current–voltage characteristics for a series of OLEDs with the layer sequence ITO/F₄-TCNQ–TDATA (200 nm)/Alq₃ (65 nm)/LiF (1 nm)/Al and (b) luminance–voltage characteristics for the same series of OLEDs. Reprinted with permission from ref 117. Copyright 2001 Wiley-VCH.

Herstellungsmethoden

- Trockenprozessierung
z.B. Physical Vapor Deposition



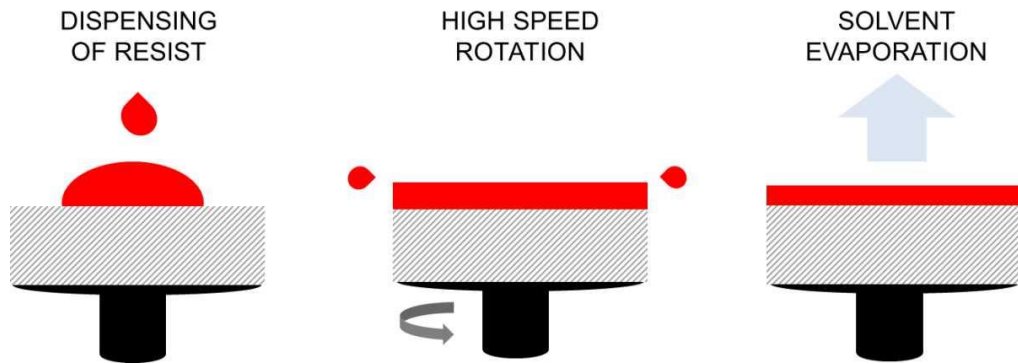
[Park et al. *INT J PR ENG MAN-GT* 2016, 3, 397]



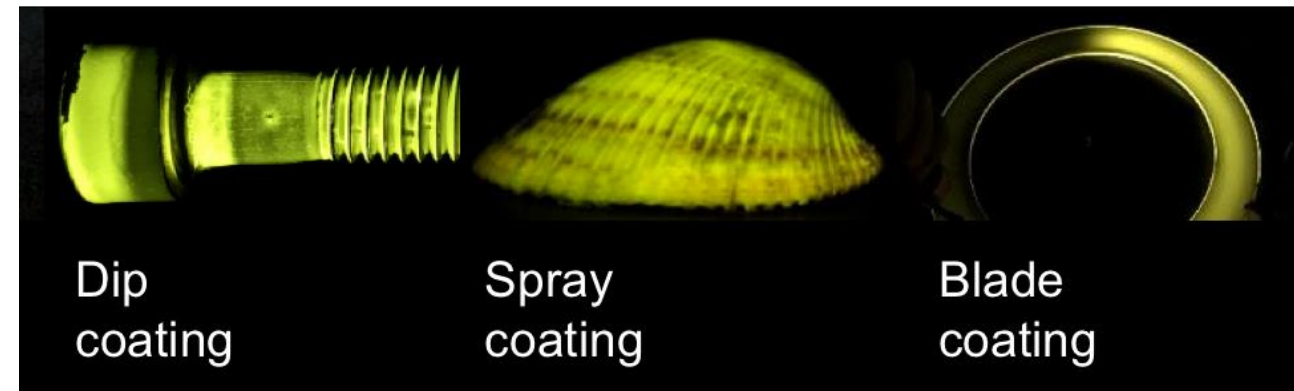
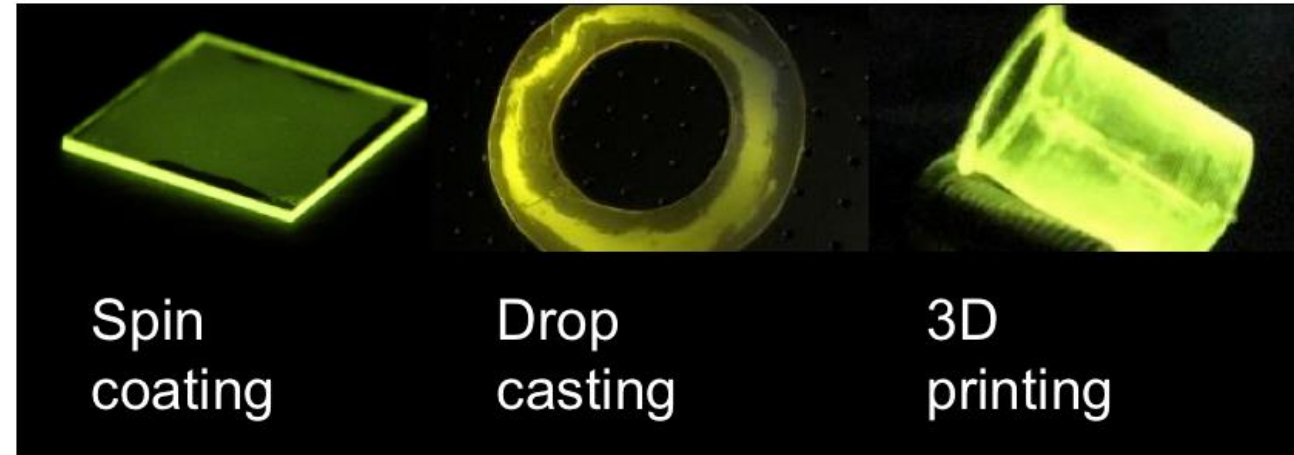
[Bishop et al *J. Phys. Chem. B* 2020, 124, 2505]

Herstellungsmethoden

- Nassprozessierung
z.B. Spin Coating



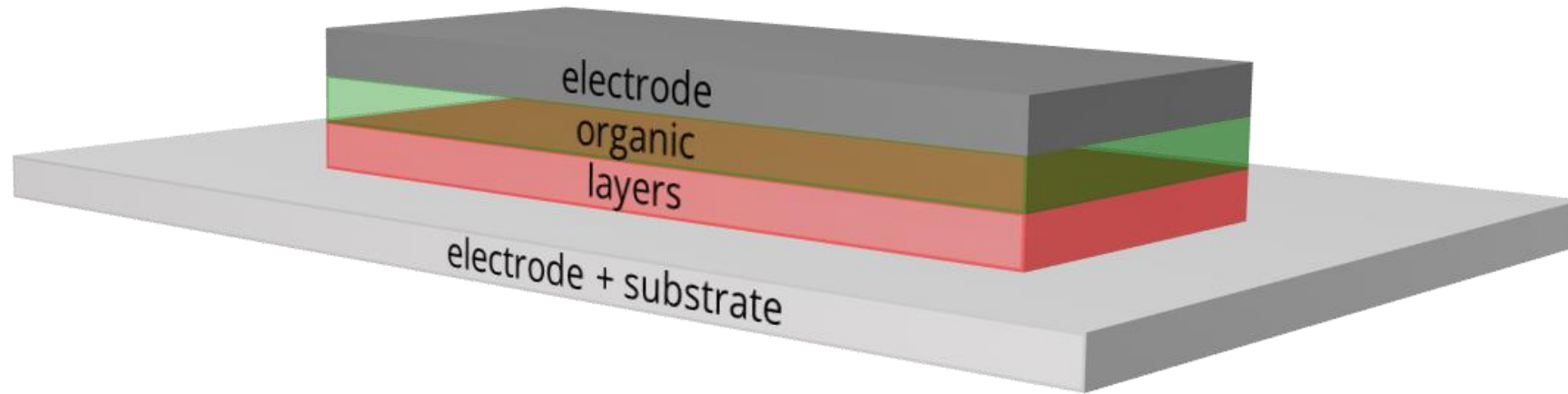
[inseto.co.uk]



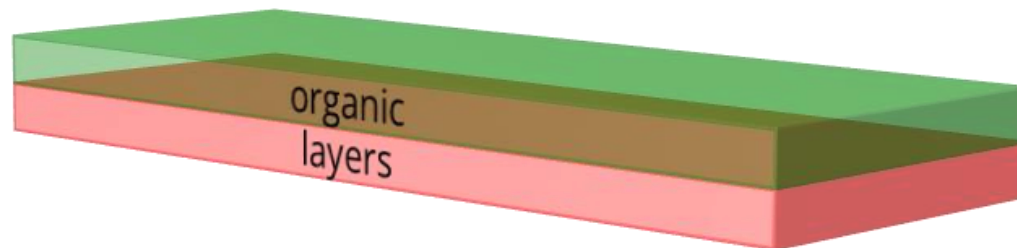
[M. Gmelch *et al.*, Sci. Adv. 2019]

Anwendungsarten

Elektronik

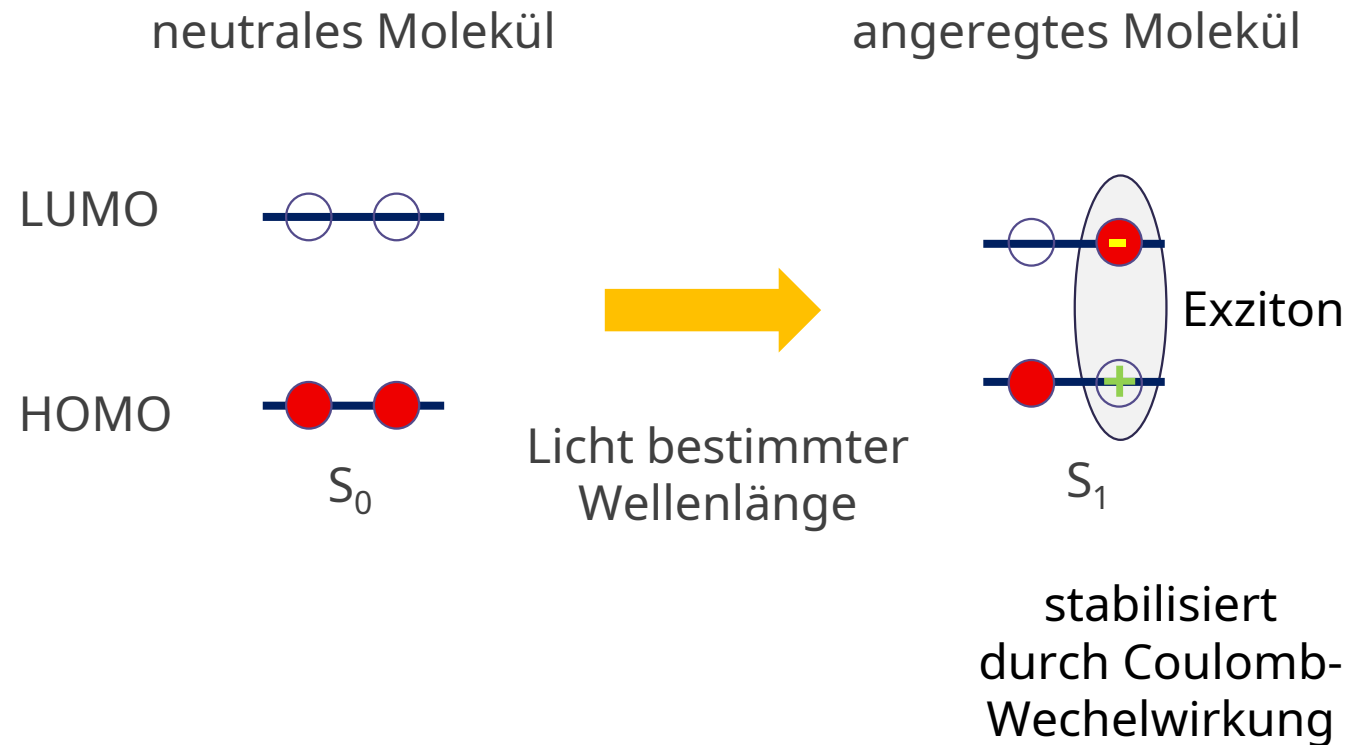


Photonik

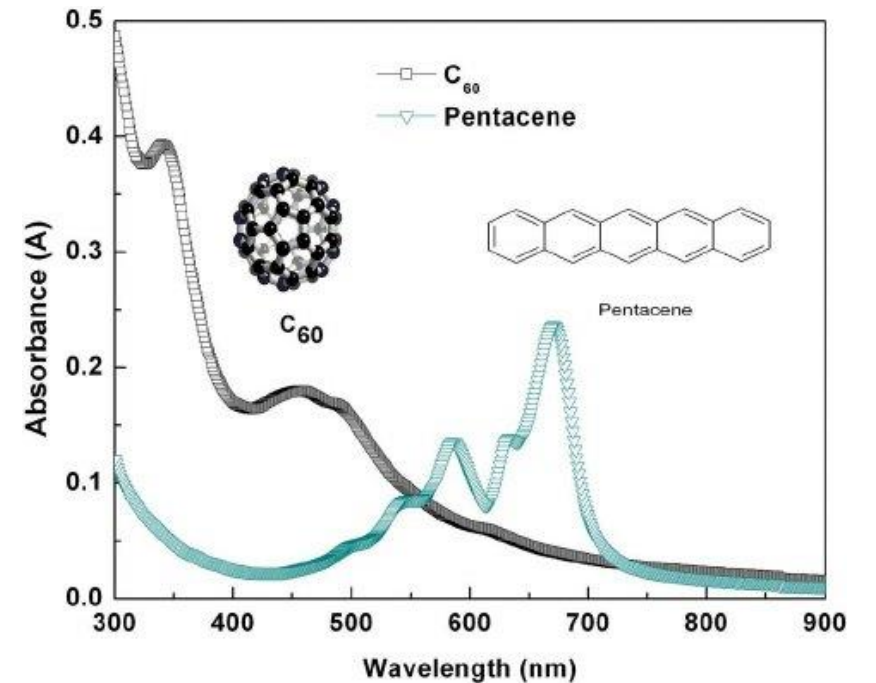


Photophysik: Absorption

- Vereinfachte Beschreibung im Orbitalbild



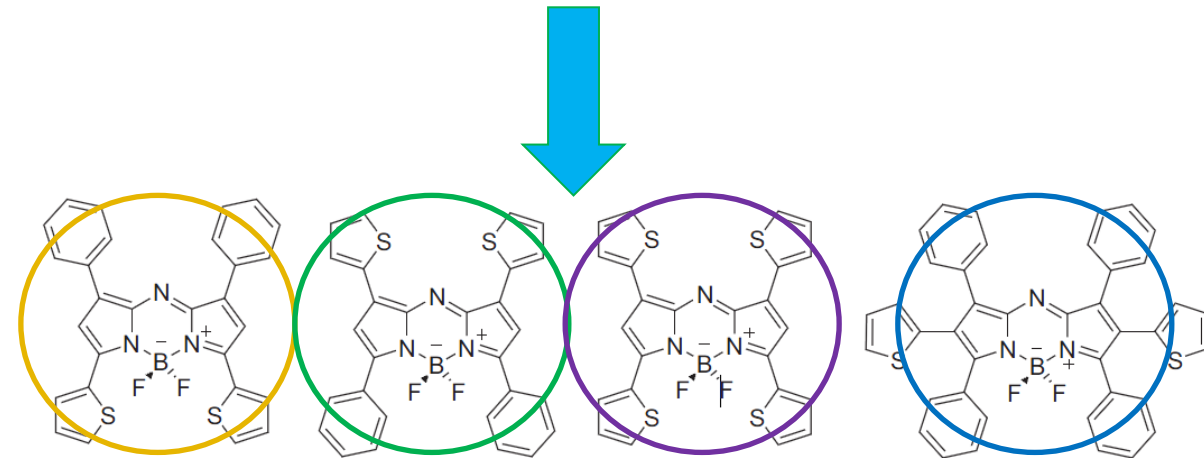
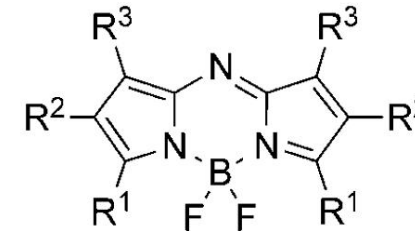
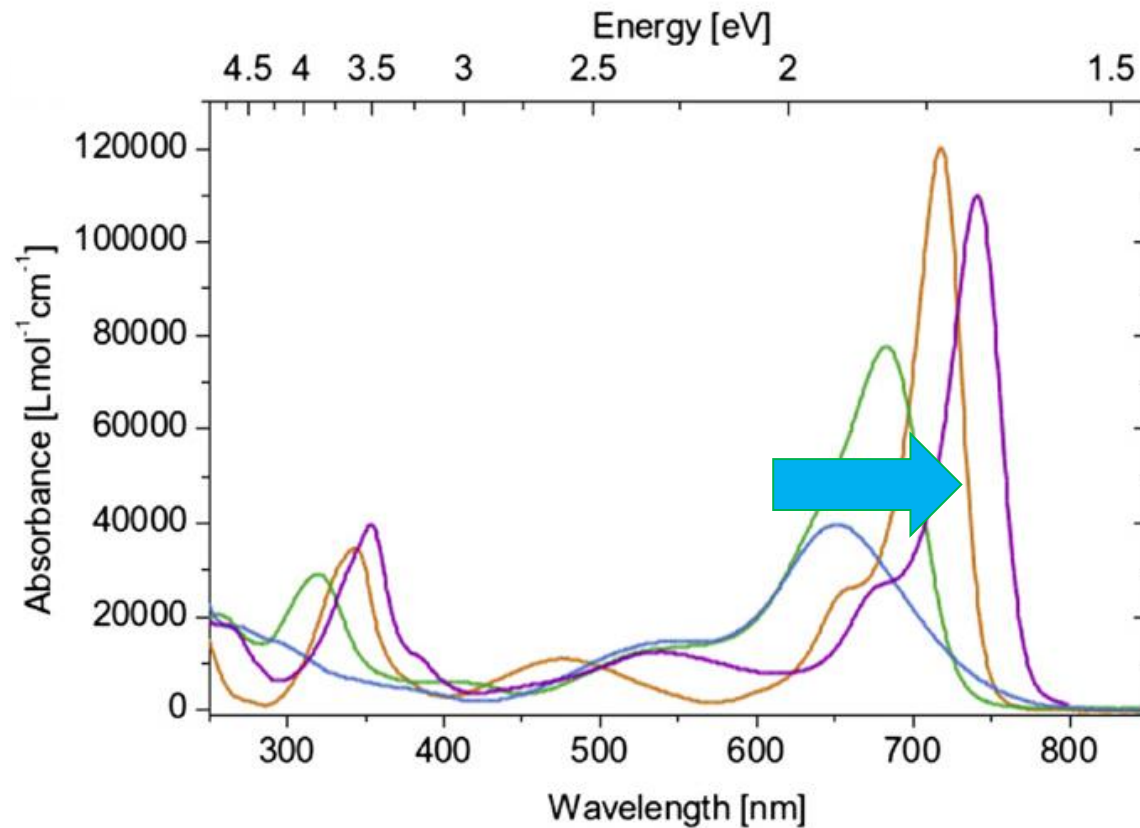
Absorptionsspektrum



[Pandey et al. *Appl. Phys. Lett.* 2009, 94, 103303]

Photophysik: Absorption

➤ Tuning der Absorptionseigenschaften



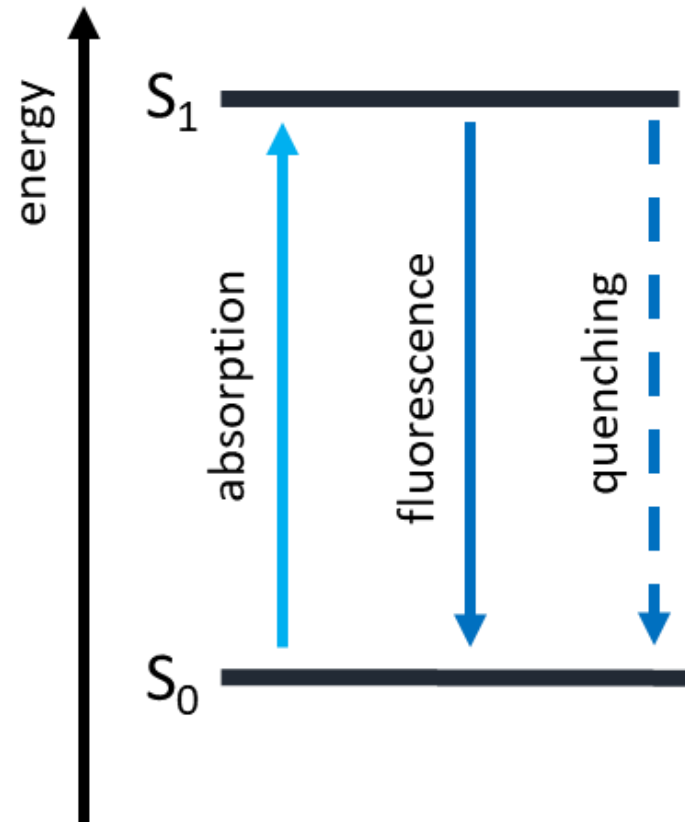
Absorption organischer Moleküle kann sehr vielfältig durch chemische Funktionalisierung gesteuert werden!

[R. Gresser et al. *Tetrahedron* **2011**, 67, 7148 – 7155]

Photophysik: Emission

➤ Fluoreszenz

- übliche Emission organischer Moleküle
- schnelle, strahlende Abregung
~ ns
- gegenüber Absorption
rotverschoben durch
Geometrieänderung
= Stokes-Shift
- ähnlich durch Funktionalisierung
verschiebbar wie Absorption

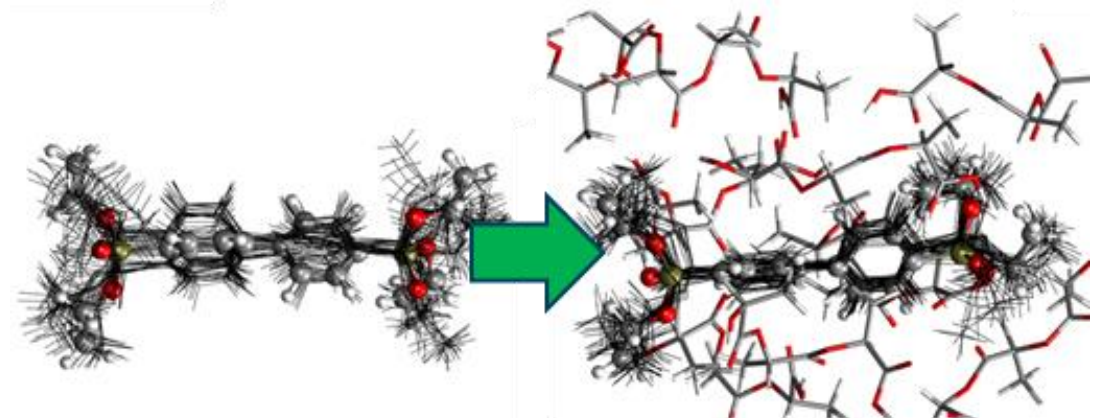
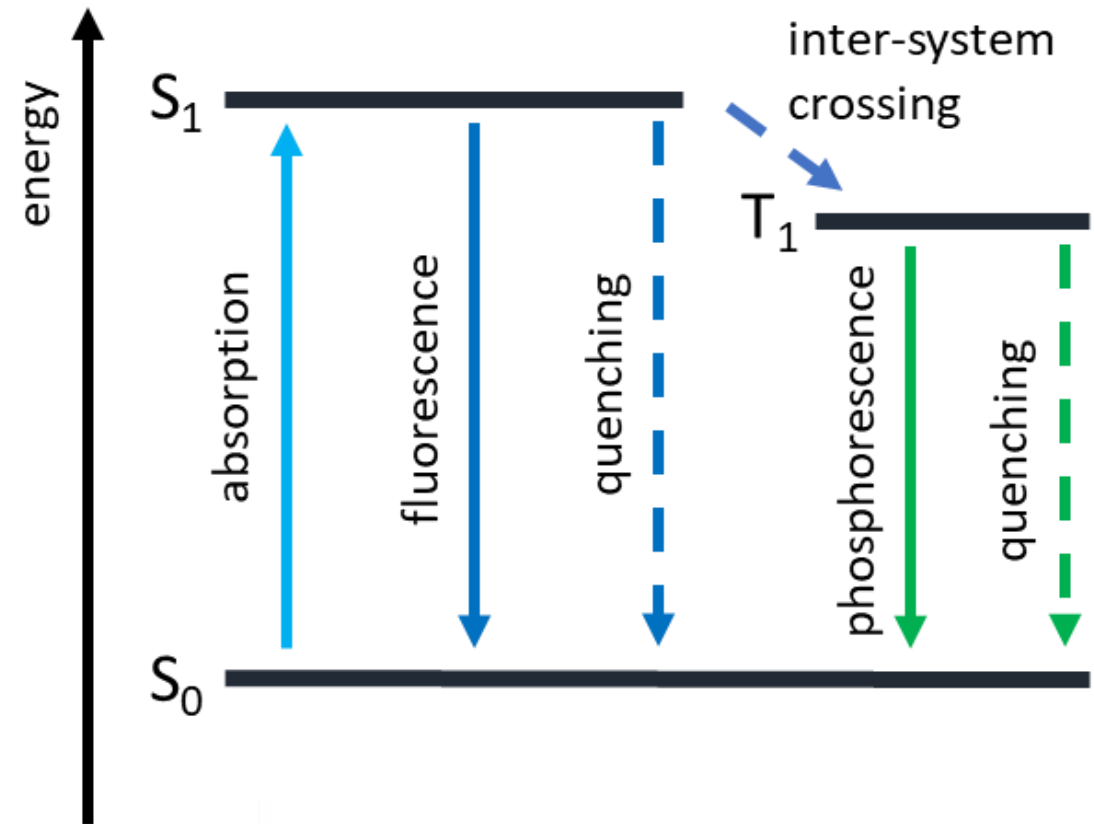


[wikimedia.org]

Photophysik: Emission

➤ Phosphoreszenz

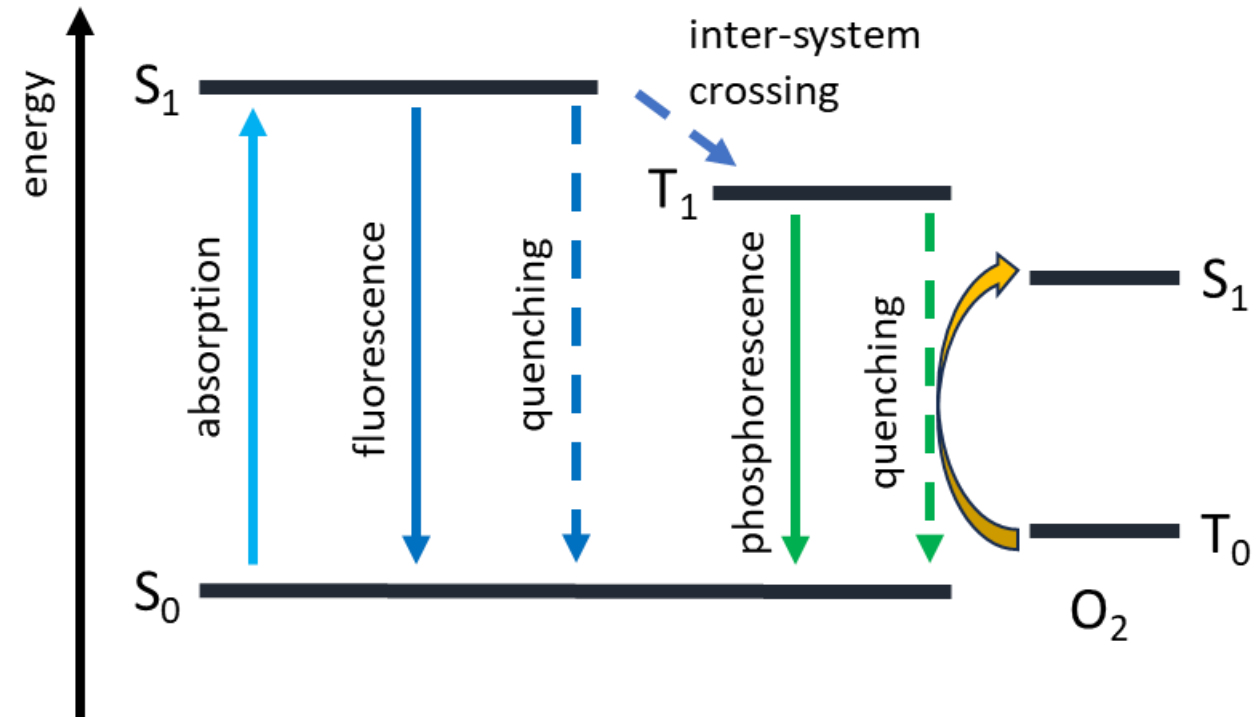
- langsame, strahlende Abregung
~ ms – s
... deutlich schneller und effizienter durch das Einbringen „schwerer“ Elemente: Ir, Pt, Eu,...
- gegenüber Fluoreszenz rotverschoben
- braucht starre Umgebung des Emittermoleküls, um Verlustprozesse zu reduzieren
... Einbettung in Polymer



Photophysik: Emission

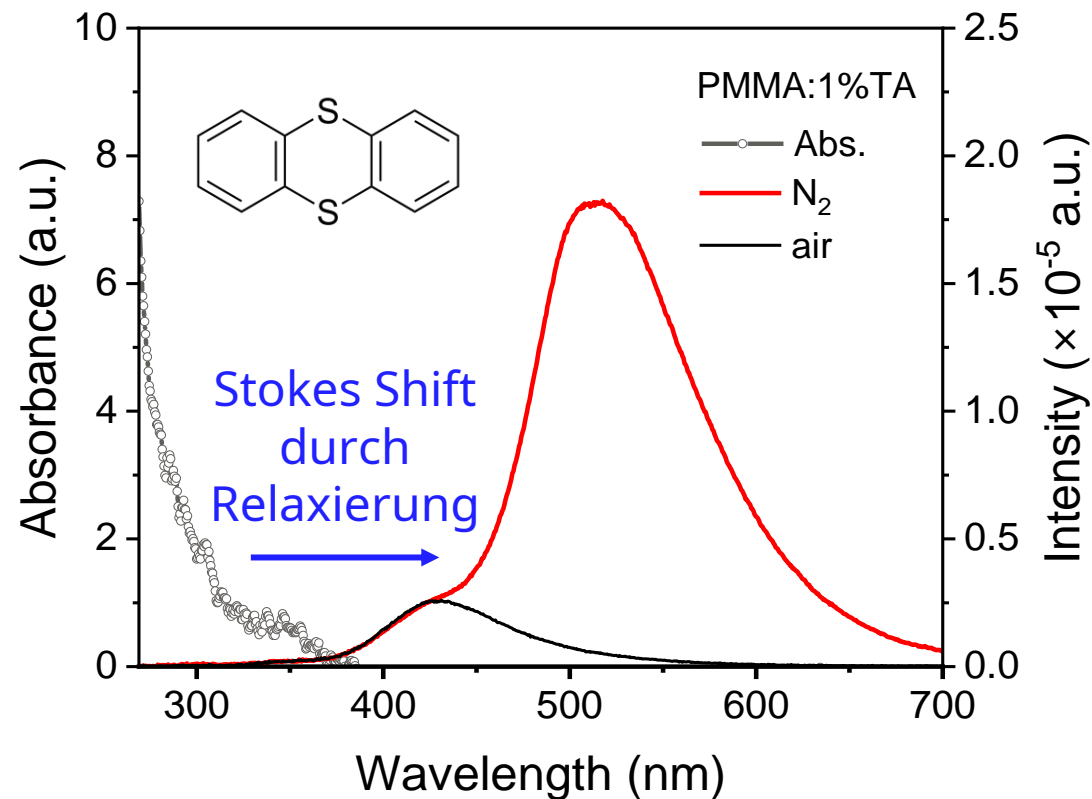
➤ Phosphoreszenz

- sensitiv gegenüber molekularem Sauerstoff
- Grundlage für experimentelle Charakterisierung
- Grundlage für photonische Bauteile
- Möglichkeit zur Erzeugung von Sauerstoffradikalen



Photophysik: Zusammenfassung

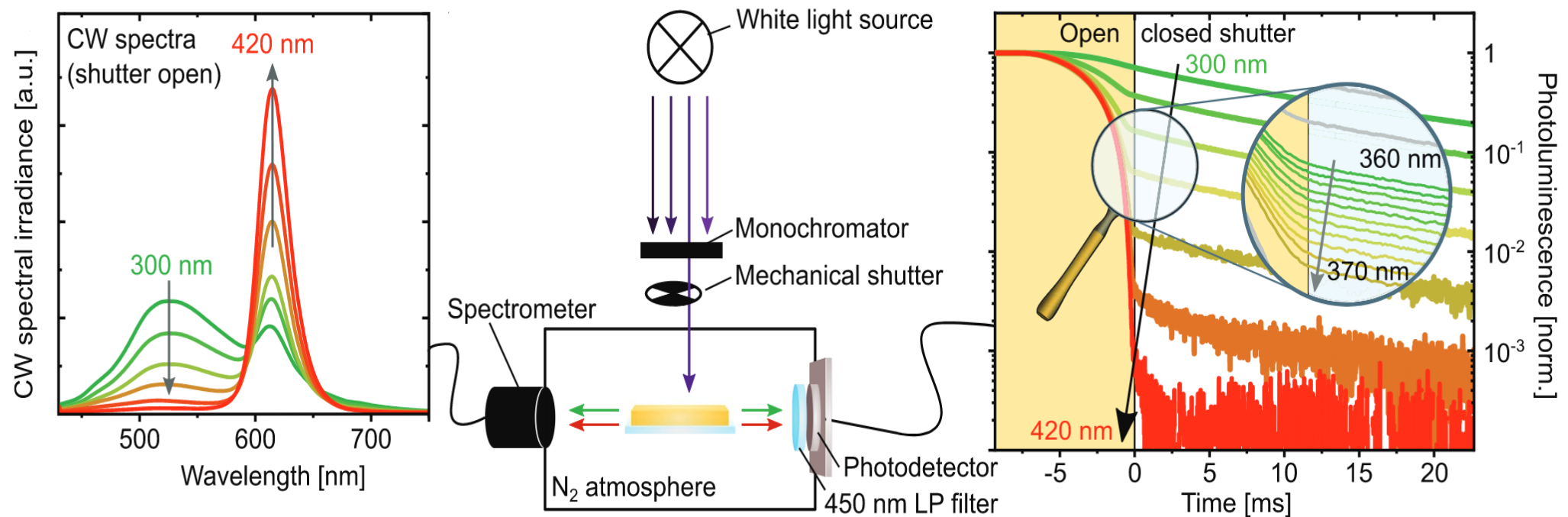
➤ Photophysik von Thianthren



- Absorption:
erstes Maximum bei ca. 340 nm
= UV
- Fluoreszenz:
sichtbar in Luft und N_2 ,
Maximum bei 430 nm
= blau
- Phosphoreszenz:
nur sichtbar in N_2 ,
Maximum bei 510 nm
= grün

Photonik: Sensor für Wellenlänge von Lichtquellen

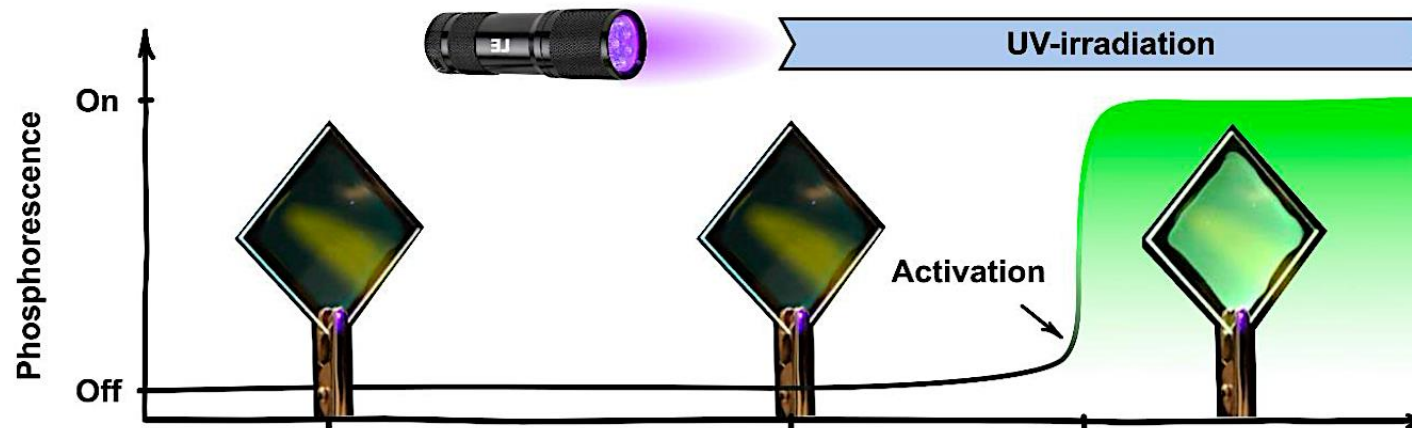
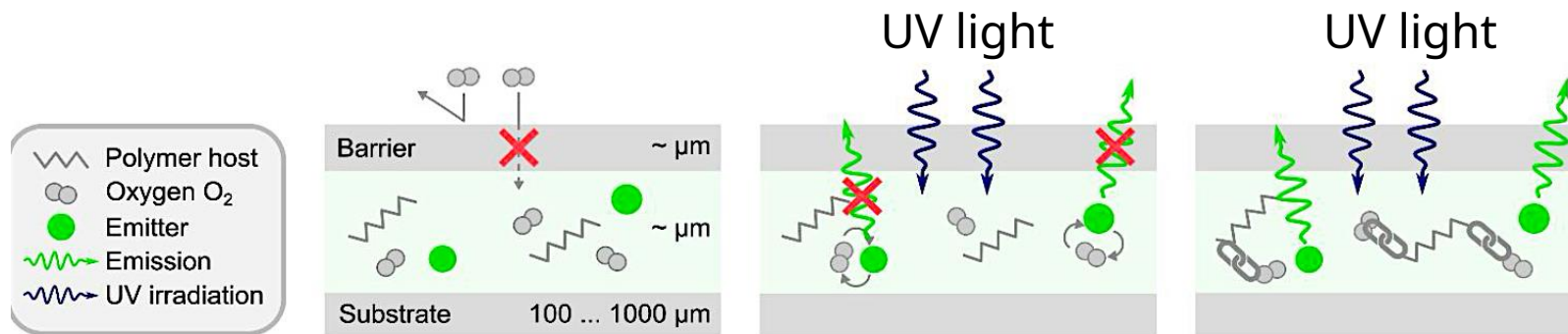
- Intensität von Fluoreszenz und Phosphoreszenz abhängig von der Anregungswellenlänge



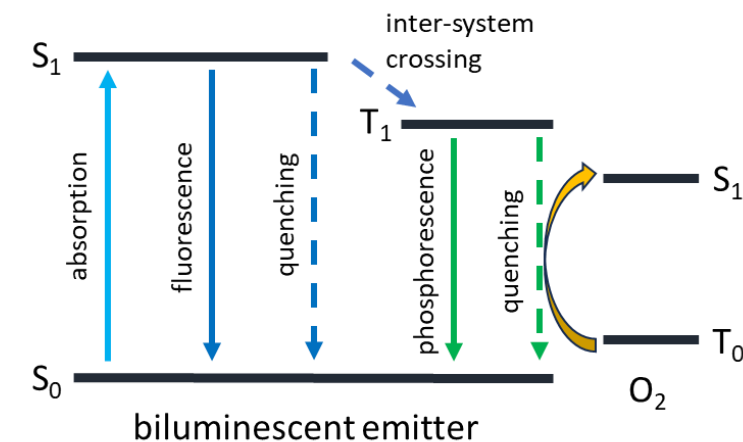
[Kirch et al. Adv. Mater. 2022]

Photonik: Programmierbare lumineszente Etiketten

➤ Sauerstoff als Schalter für Phosphoreszenz

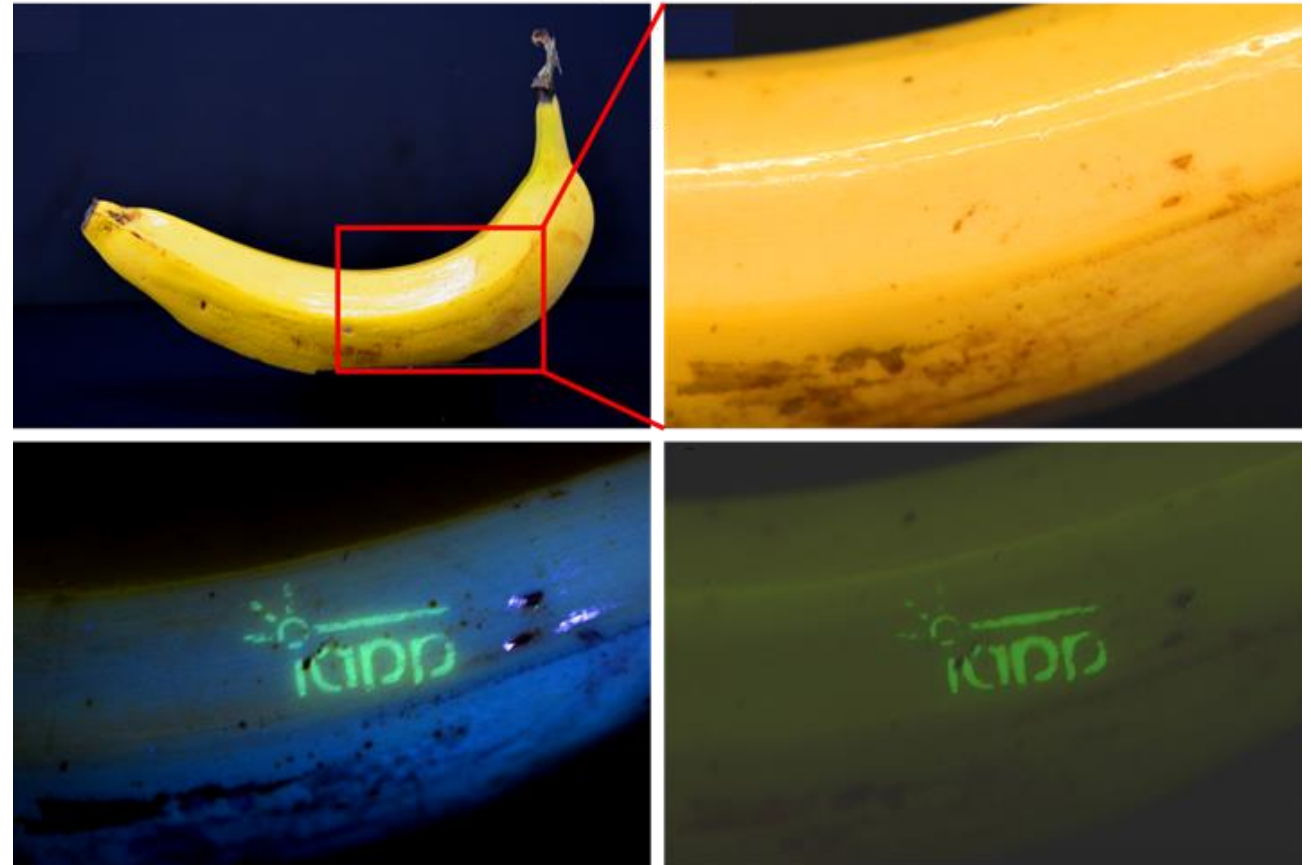
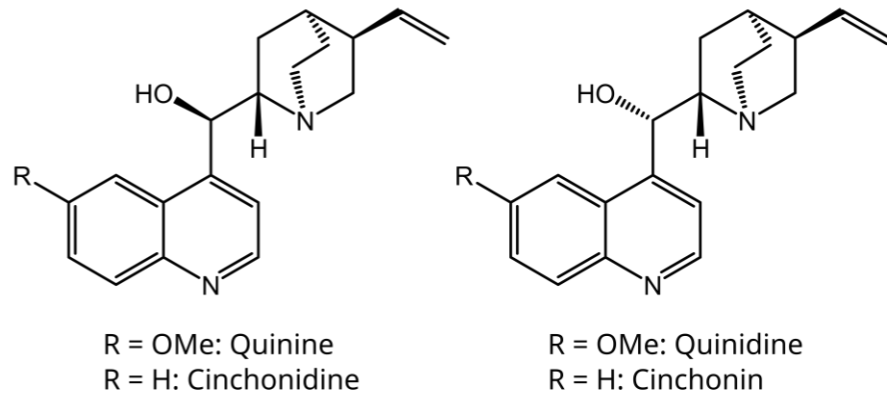


[Gmelch et al. Sci. Adv. 2019]



Photonik: Programmierbare lumineszente Etiketten

➤ Auch in biologisch abbaubar



[Thomas *et al.* Adv. Mater. 2024]

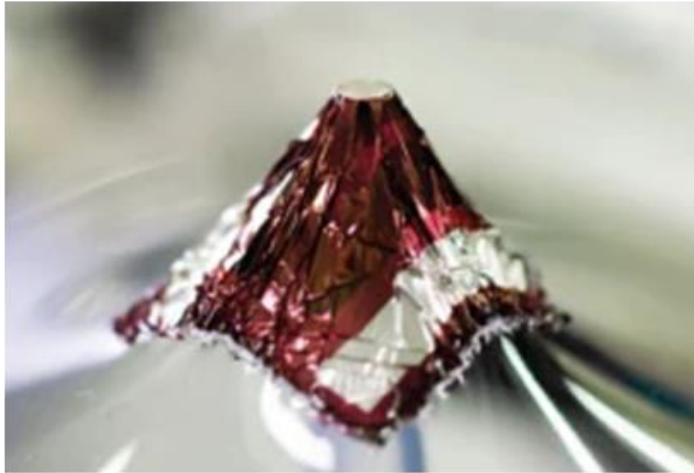
Von Solarzellen über Sensoren zu OLEDs

- Wie werden organische Halbleiter in Halbleiterbauelementen eingesetzt?
- Wo finden wir Bauelemente bereits im Alltag und wo nicht? Was sind die Gründe?

Überblick

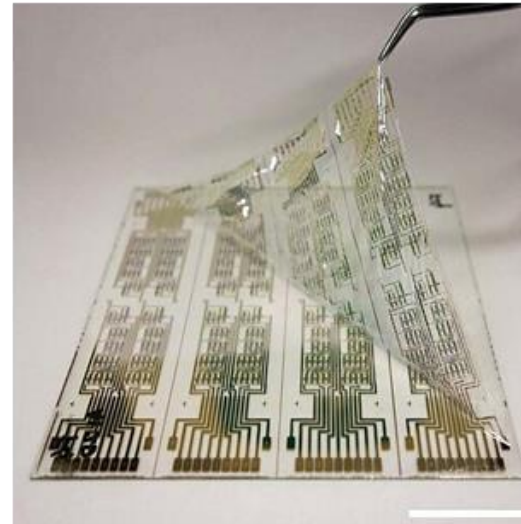
Solarzellen & Sensoren

[Kaltenbrunner et al. *Nat. Commun.* 2012]



Feldeffekt-Transistoren

[Takeda et al. *Sci. Rep.* 2016]



Leuchtdioden

[Miao & Yin, *iScience* 2022]



Solarzellen: Von Licht zu Strom

Sehr dünn < 2 mm

Geringe Masse < 2 kg

Flexibel

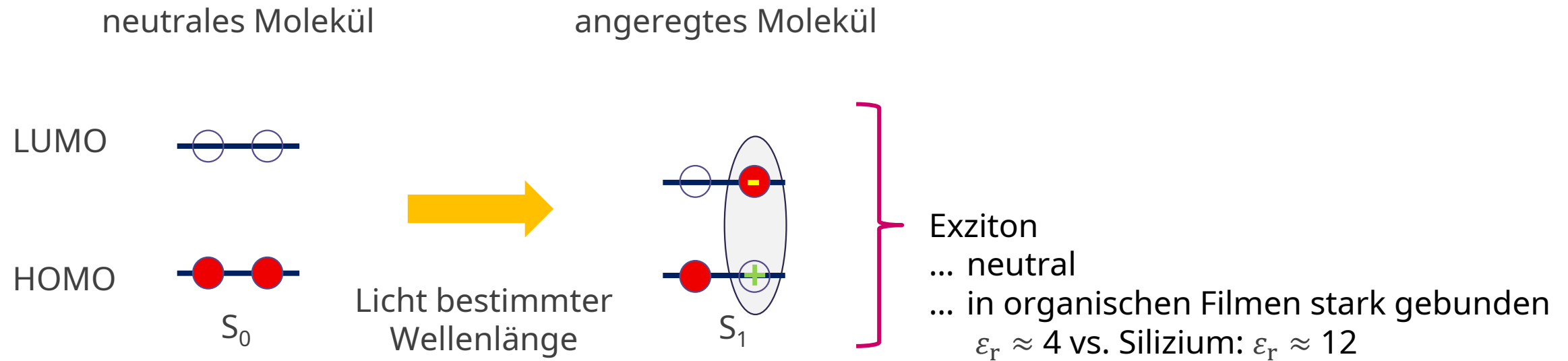
Einfache Installation

Nur 1 g/m²
organisches Material

© Heliatek GmbH

Solarzellen: Von Licht zu Strom

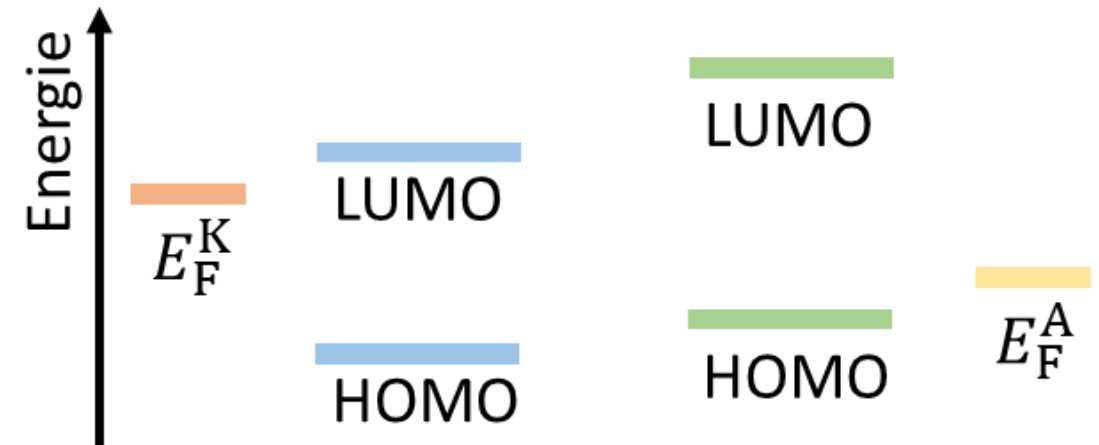
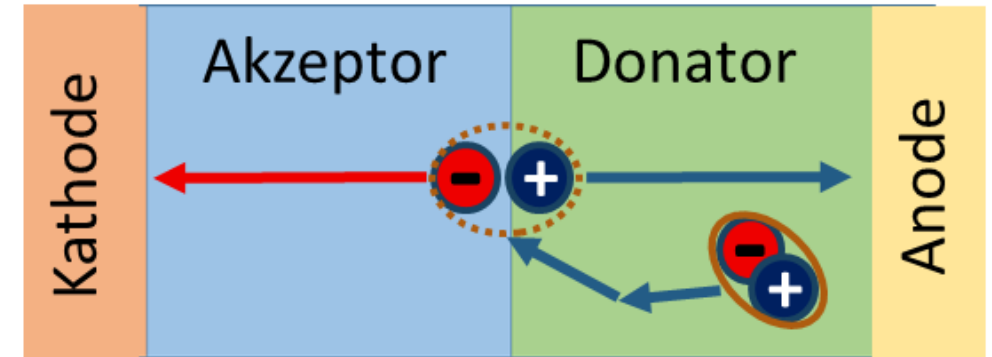
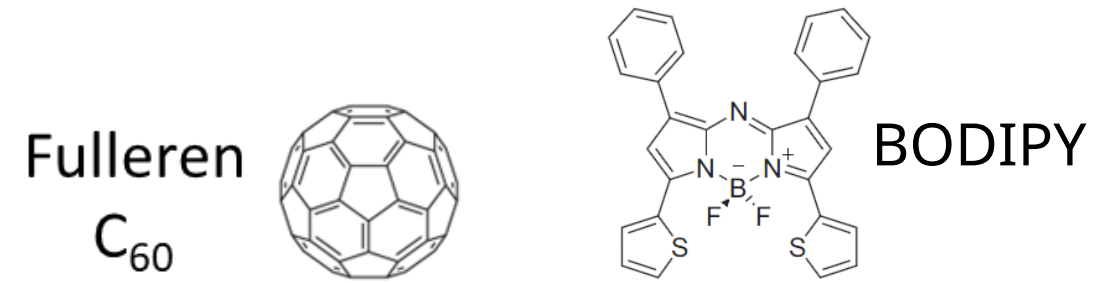
➤ Exzitonen in organischen Halbleitern



→ Wie kann das Exziton in freie Ladungsträger getrennt werden?

Solarzellen: Von Licht zu Strom

- Photoaktive Schicht aus Donator und Akzeptor
→ Energetik so gewählt, dass sich das Exziton an der Grenzfläche in freie Ladungsträger aufteilt
- Akzeptor auch guter Leiter für Elektronen
- Donator auch guter Leiter für Löcher
- Exzitonen nur mit begrenzter Mobilität (ungerichtete Diffusion, da neutral)



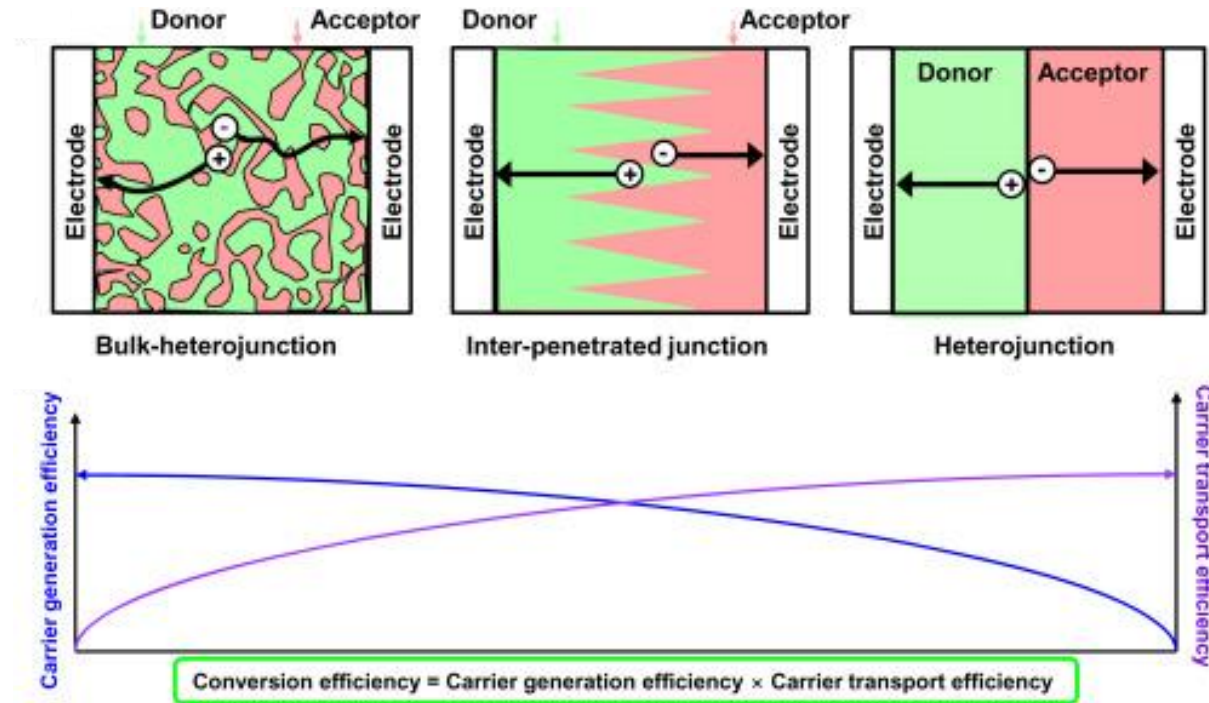
Solarzellen: Von Licht zu Strom

➤ Mischung von Donator und Akzeptor, um Exzitonendissoziation zu verbessern

→ immer Grenzfläche innerhalb der Diffusionslänge der Exzitonen erreichbar

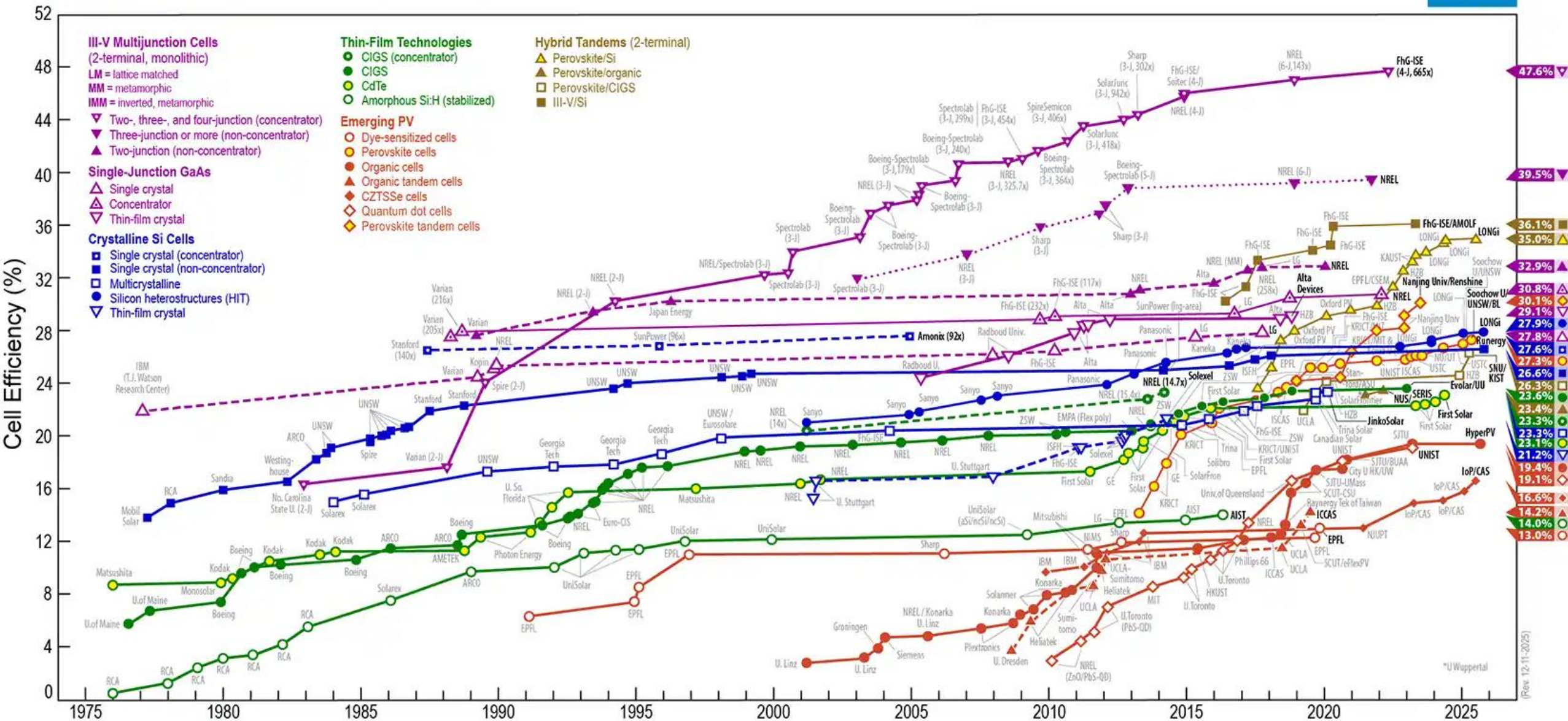
→ Perkolationsnetzwerk nötig, um weiterhin effizienten Ladungstransport zu gewährleisten

→ herausfordernd, ideale Balance aus Mischung und Entmischung zu erzielen

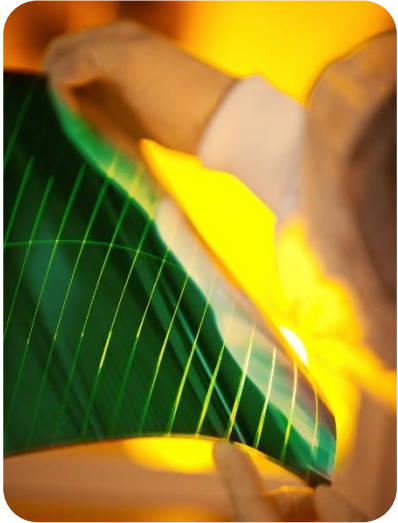


[Oku *et al.* Nanomaterials for Solar Cell Applications 2019]

Best Research-Cell Efficiencies



Von Solarzellen zu Photodetektoren



[© Helatek GmbH]

- ❑ Umwandlung von Sonnenlicht in Elektrizität
- ❑ Betrieb am maximalen Leistungspunkt
- ❑ Stationärer Betrieb

→ **Power conversion efficiency**

$$PCE = \frac{P_{el}}{P_{solar}}$$



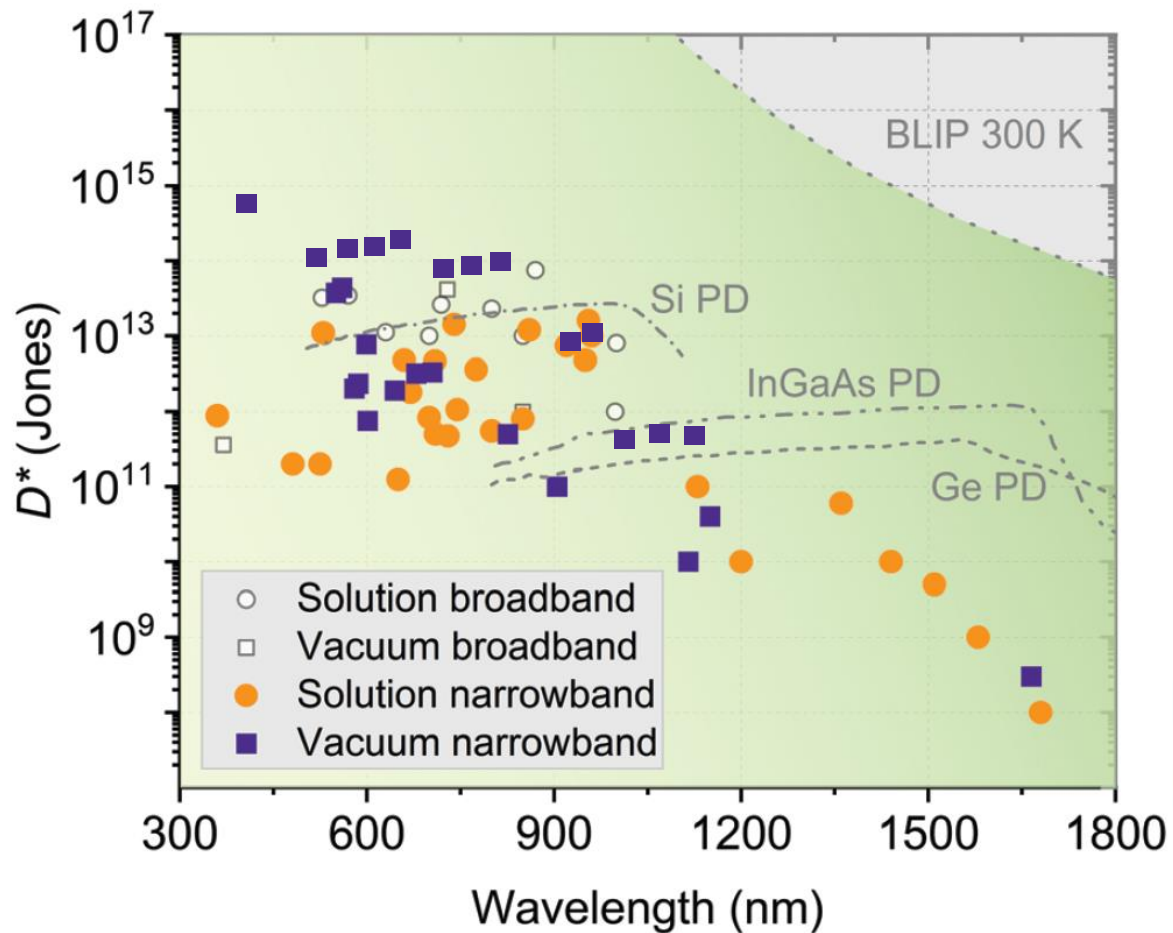
[Wang et al. *Adv. Funct. Mater.* 2024, 34, 2313689]

- ❑ Strahlungssignal zu elektrischem Signal
- ❑ Kommt drauf an, typische Sperrspannung
- ❑ Schnelle Reaktion

→ **Specific detectivity**

$$D^* \propto \frac{EQE}{i_{noise}}$$

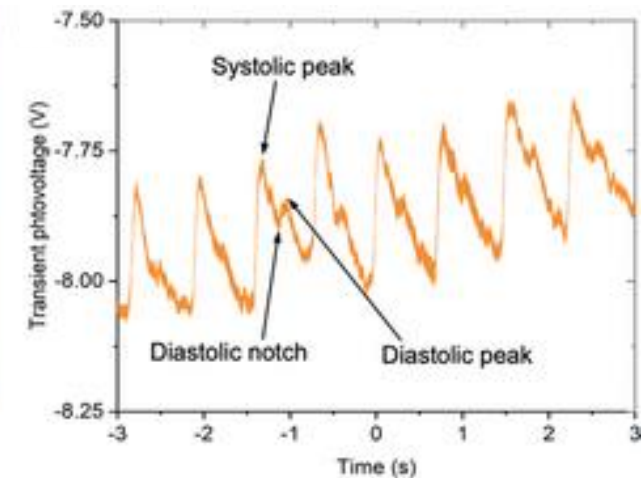
Organische Photodetektoren bereits konkurrenzfähig



Specific detectivity

→ Erhöhung der external quantum efficiency (EQE)

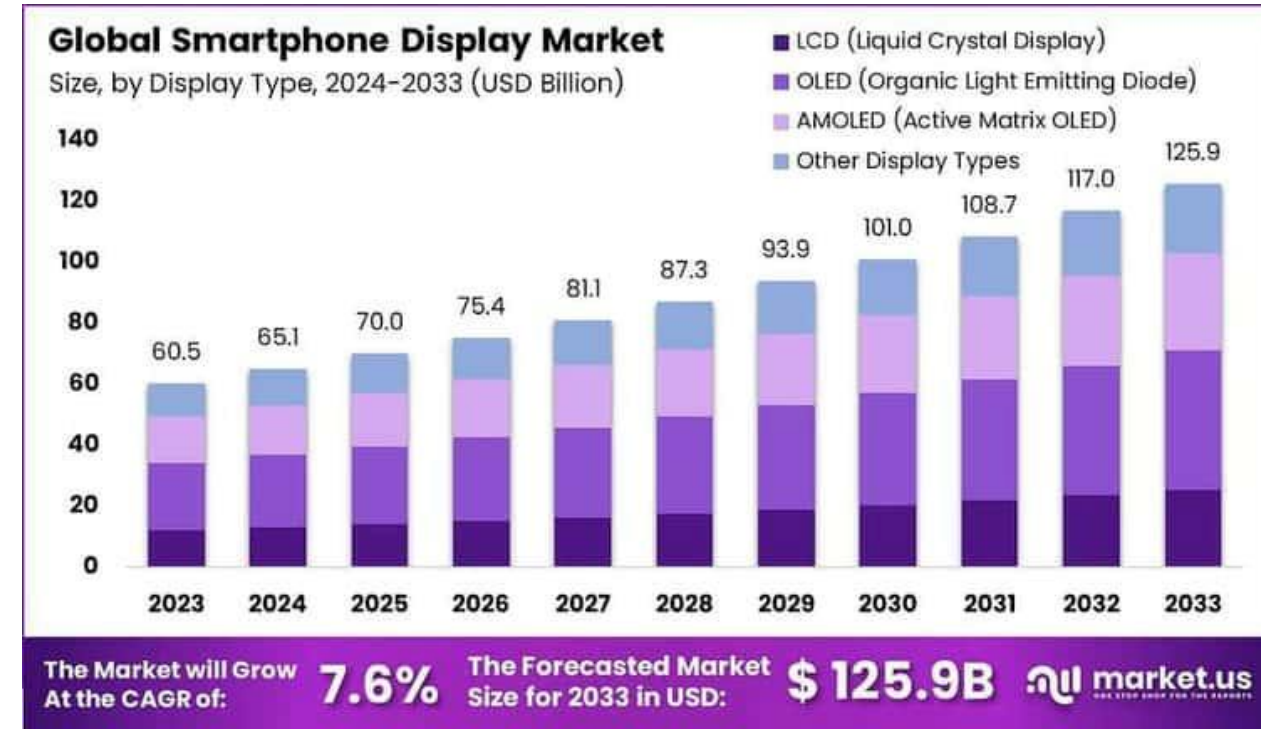
→ Reduktion des Rauschstroms i_{noise}



[Wang et al. *Adv. Funct. Mater.* 2024, 34, 2313689]

Von Lichtabsorption zu Lichtemission: OLEDs

- Nicht nur Zukunftsmusik, sondern bereits heute bei mobilen Displays marktbestimmend, u.a. weil
 - exzellente Farben und Kontrast
 - keine Hintergrundbeleuchtung
 - nahezu unbeschränkter Blickwinkel
 - schnelle Reaktionszeiten (<1 ms)
 - geringer Stromverbrauch
 - keine Farbfilter
 - dünne, flexible Bauform
 - ...



Von Lichtabsorption zu Lichtemission: OLEDs und AMOLEDs

➤ AMOLED = active-matrix organic light-emitting diode

... zusätzliche Schicht von Dünnschichttransistoren verknüpft mit OLED-Pixel, um Stromfluss zu steuern

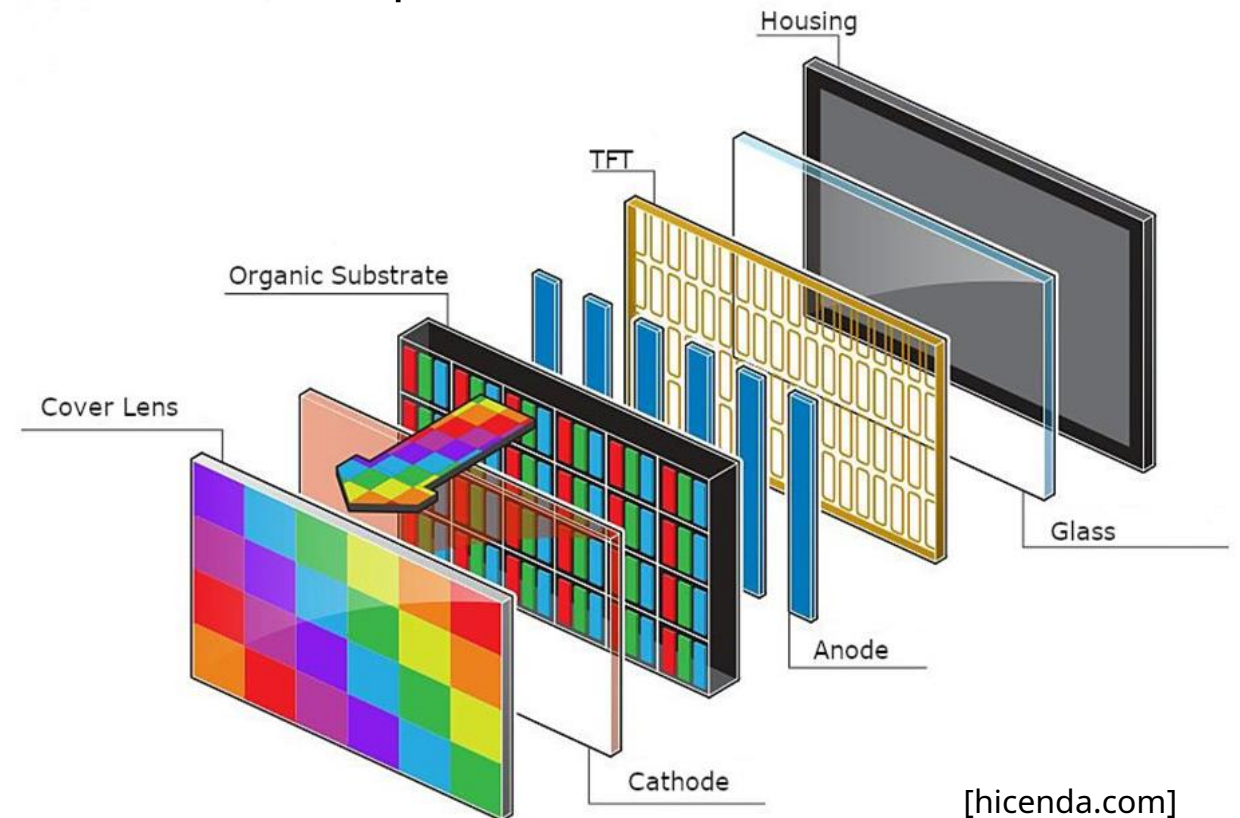
→ geringerer Energieverbrauch

→ bessere Bildqualität

→ schnellere Refresh-Rate ($< 1 \text{ ms}$)

→ flexibler, aber auch teurer

→ Risiko von Farbübersättigung



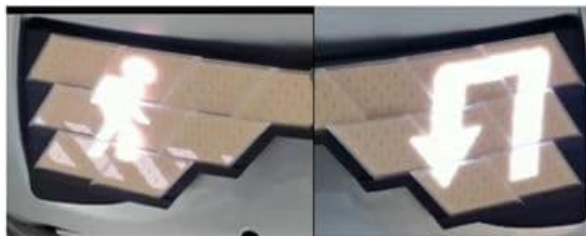
[hicenda.com]

Von Lichtabsorption zu Lichtemission: OLEDs

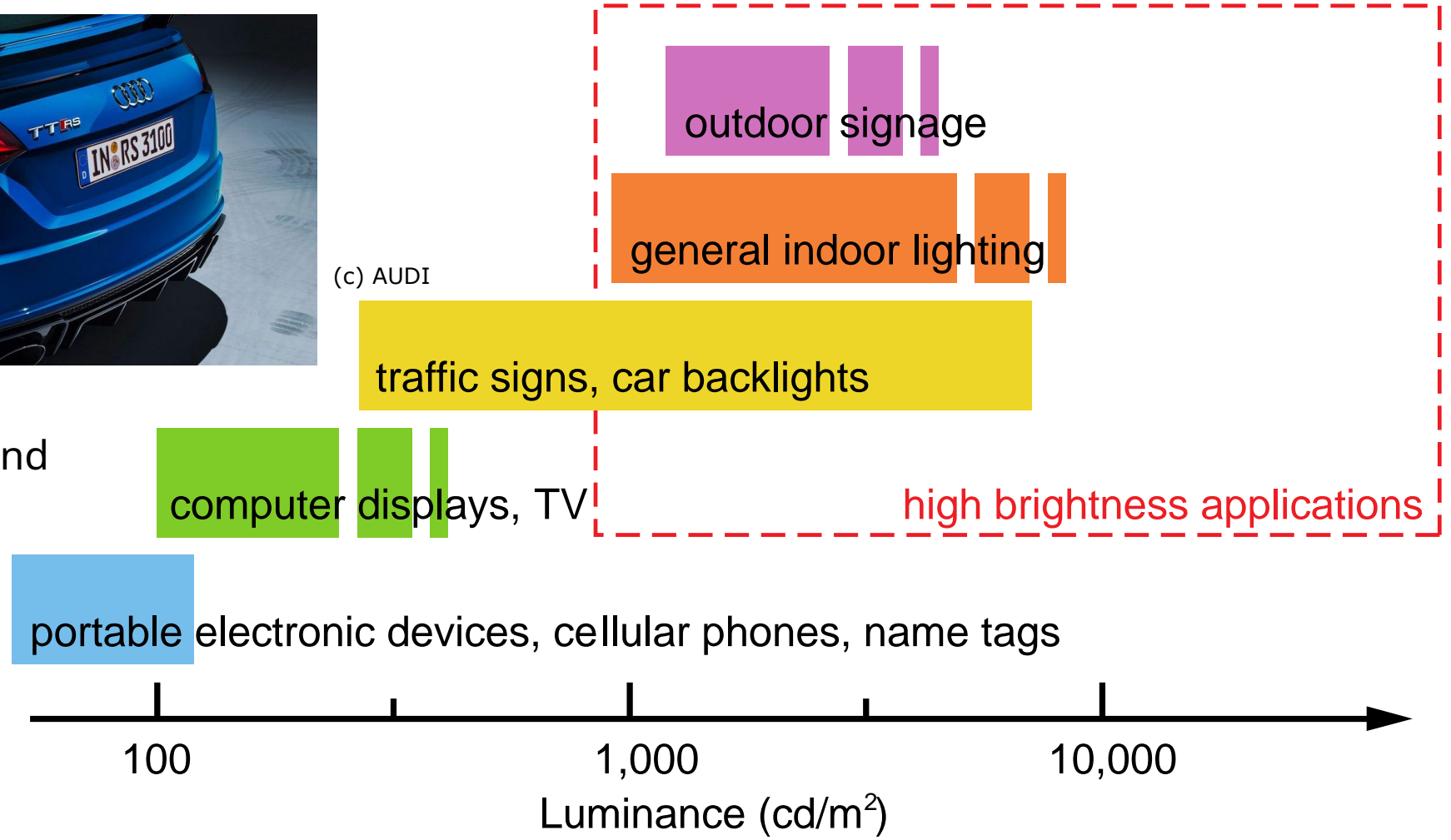


(c) AUDI

- Flächenlichtquellen
- effizienter, leichter und homogener
- digitalisiertes Lichtdesign

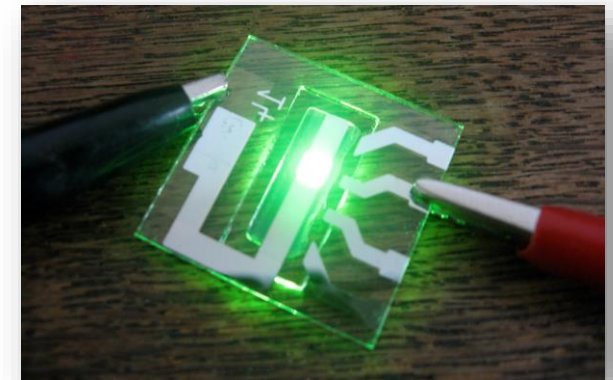
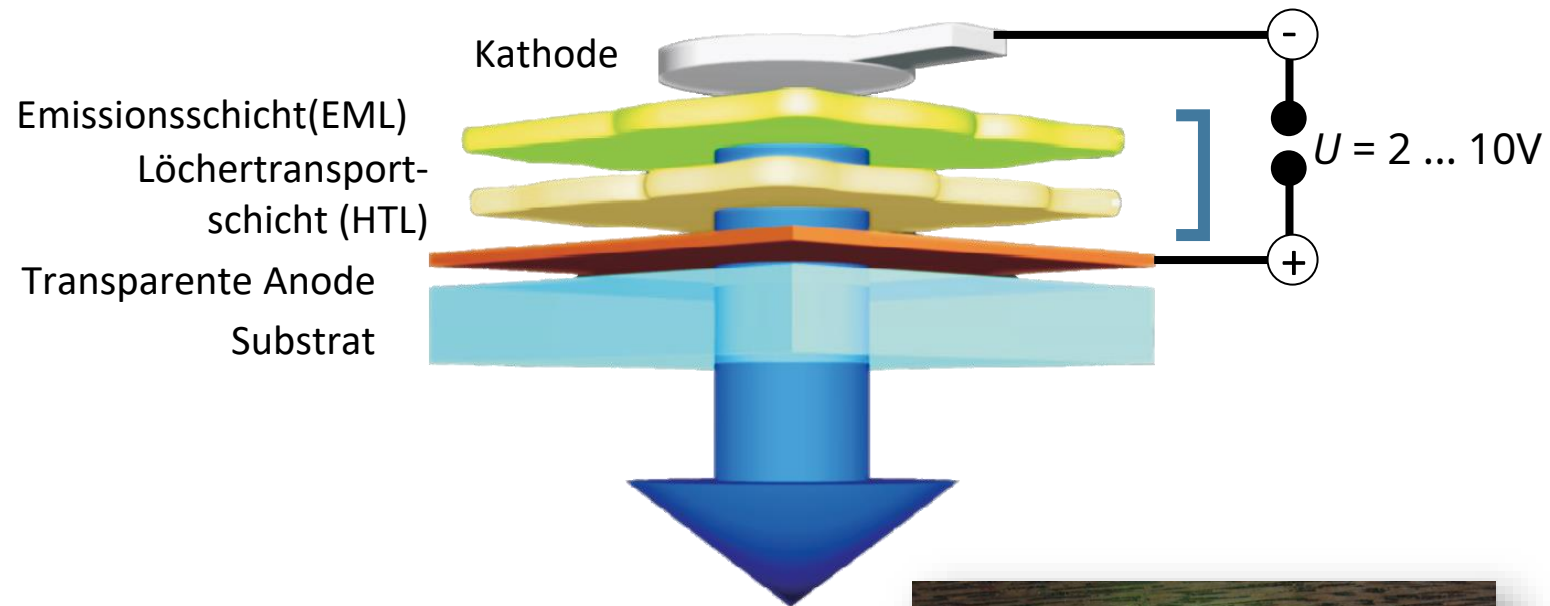


[static4.arrow.com]



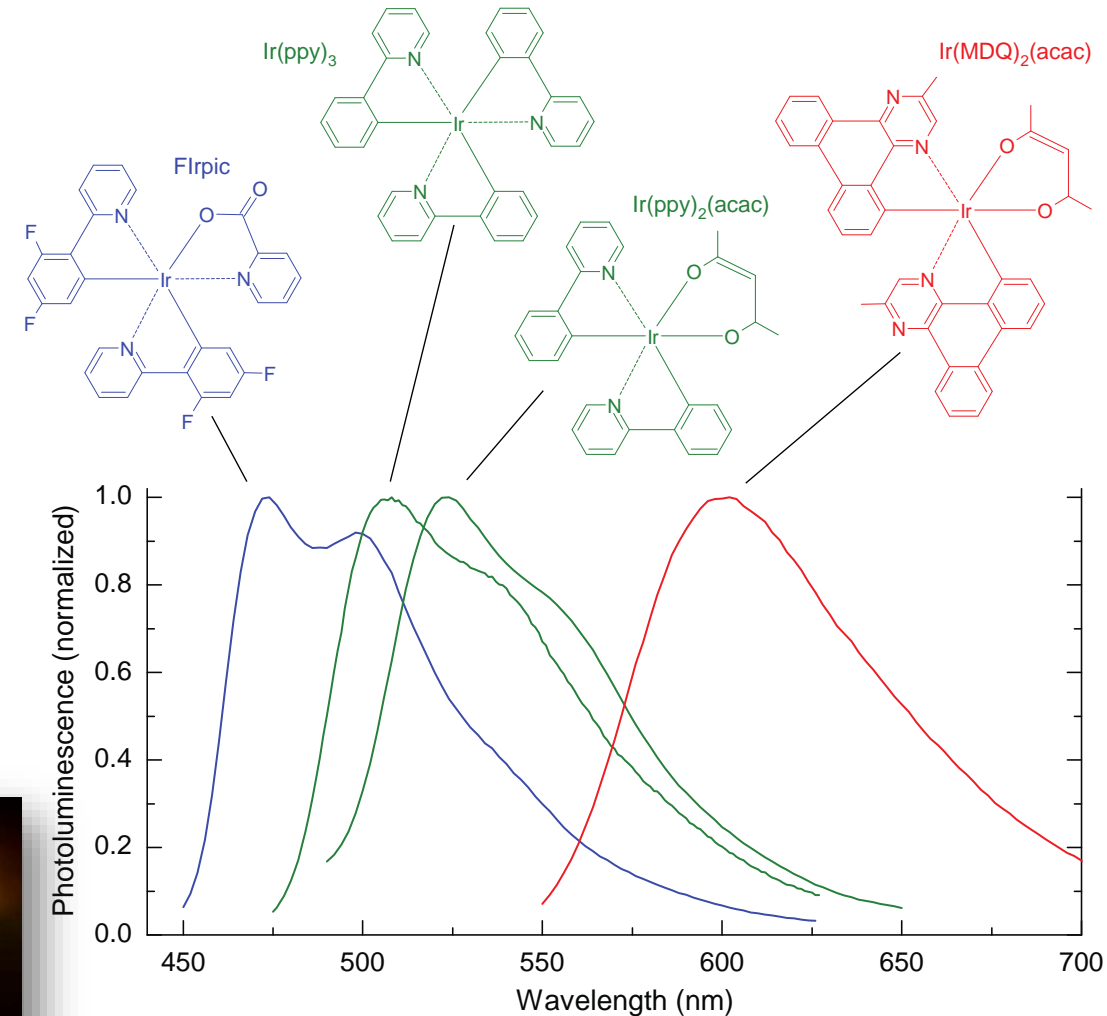
Aufbau von OLEDs: Die umgekehrte Solarzelle

- Aus Strom (Ladungsträgern) wird Licht
- Beliebig komplizierter für bessere Performanz: Elektronentransportschicht, Blocking-Layers, Injektionsschichten, Dotierung, komplexere Emissionssysteme, horizontale Orientierung der Emitter, Mikrokavitäten,...



Aufbau von OLEDs: Die umgekehrte Solarzelle

- Emittertypen entscheiden über Effizienz
 - 1. Generation: Fluoreszente Emmitter
 - nur Singulett-Exzitonen umgesetzt = Internal Quantum Efficiency (IQE) $\leq 25\%$
 - 2. Generation: Phosphoreszente Emmitter
 - IQE bis zu 100% für Metall-Organische Verbindungen
 - = Standard für grüne und rote Pixel
 - Und blaue Pixel?

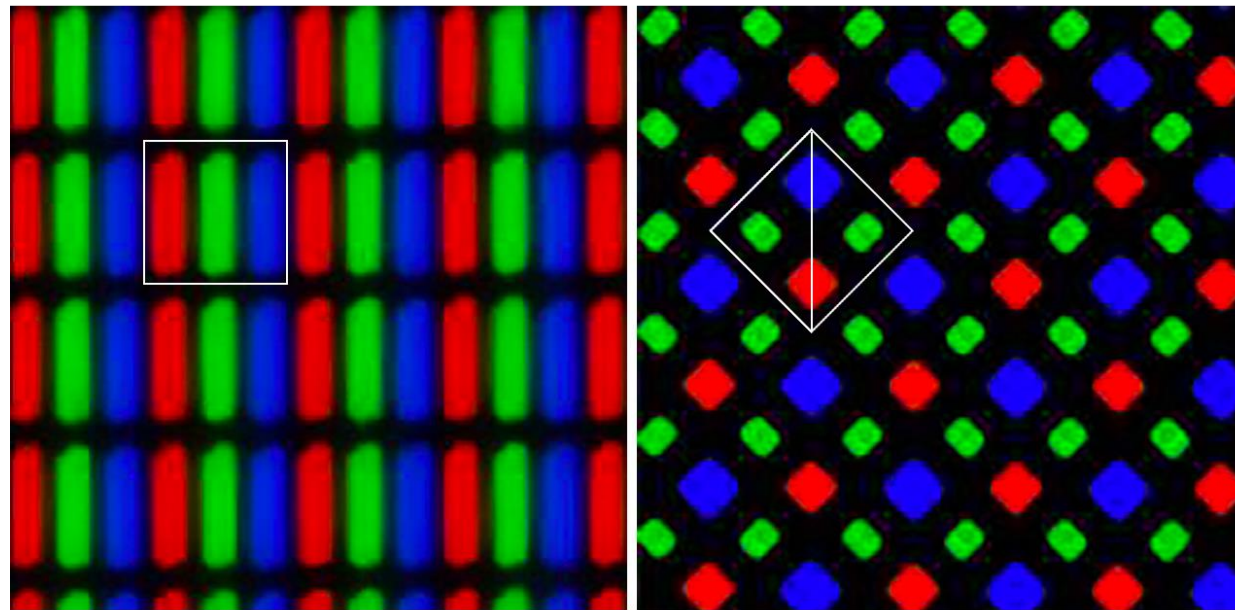


Aufbau von OLEDs: Die umgekehrte Solarzelle

➤ Vom Pixel zum Display

Matrice RGB vs Diamond Pixel Pentile

Gleichmäßig
und gleich groß



iPhone Xr: LCD/IPS

Photo by DisplayMate

iPhone Xs: OLED

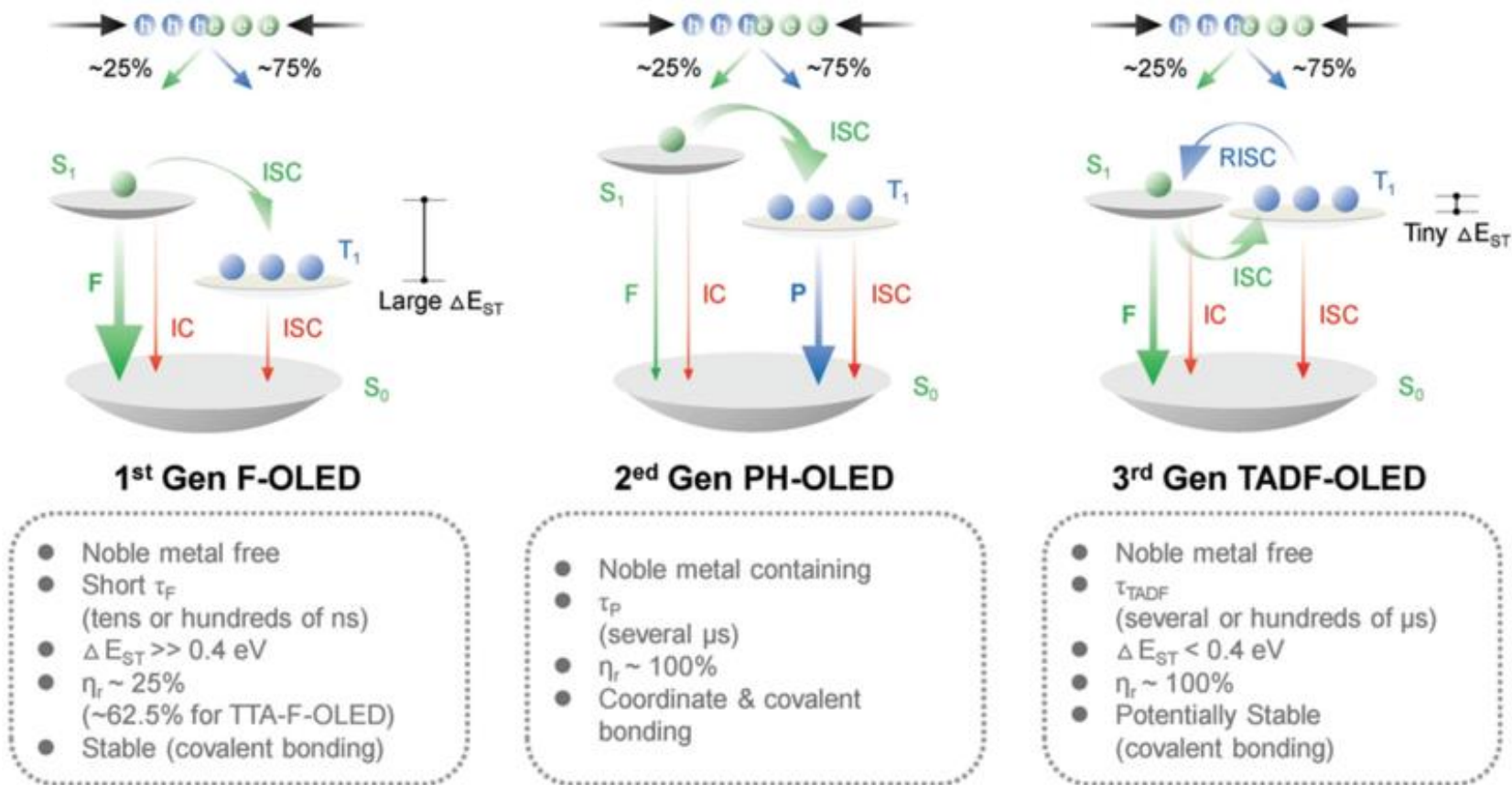
Vielfältige Anordnungen
in Produkten umgesetzt:

Diamantanordnung
verbessert Schärfe und
Detailgenauigkeit

Blaue Pixel in der Regel
größer, um geringere
Helligkeit zu
kompensieren
-> auch Langlebigkeit
ein Problem

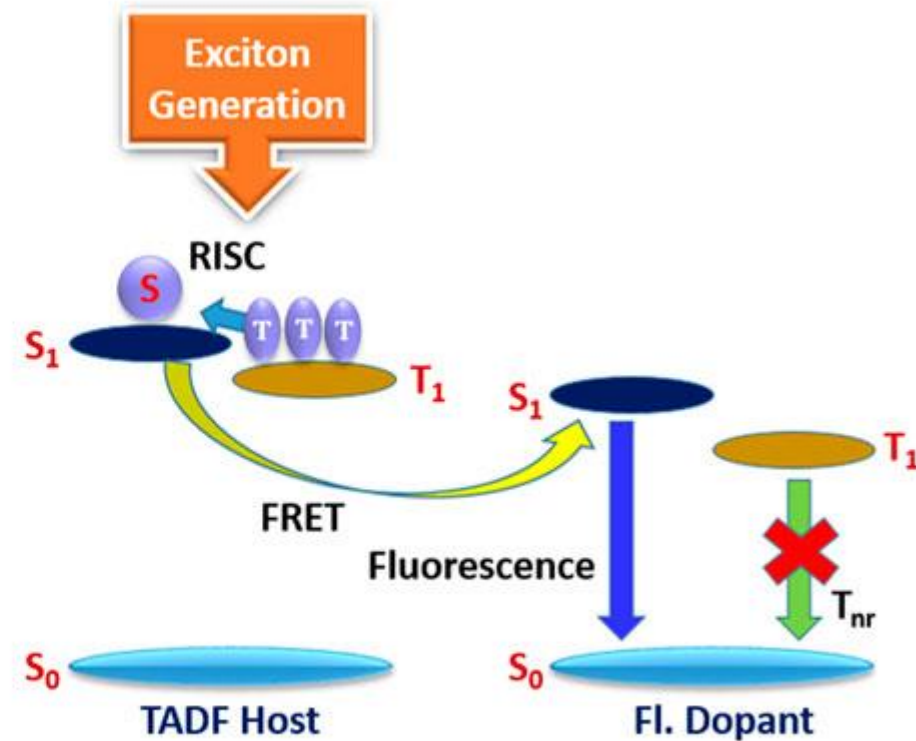
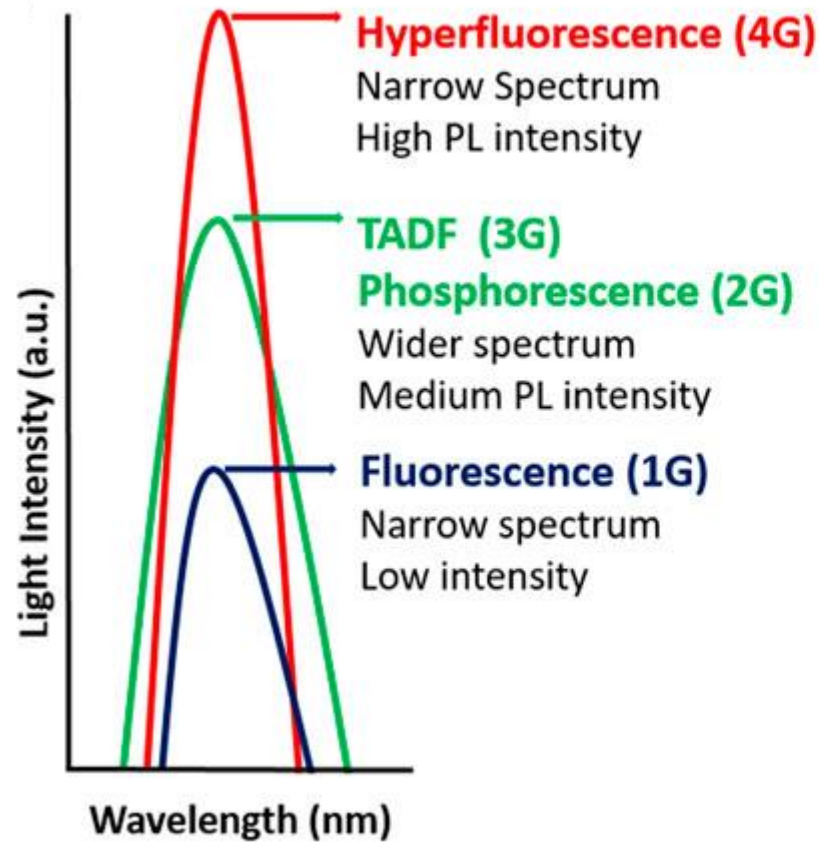
Aufbau von OLEDs: neue Emitterkonzepte

➤ Thermisch aktivierte verzögerte Fluoreszenz (TADF)



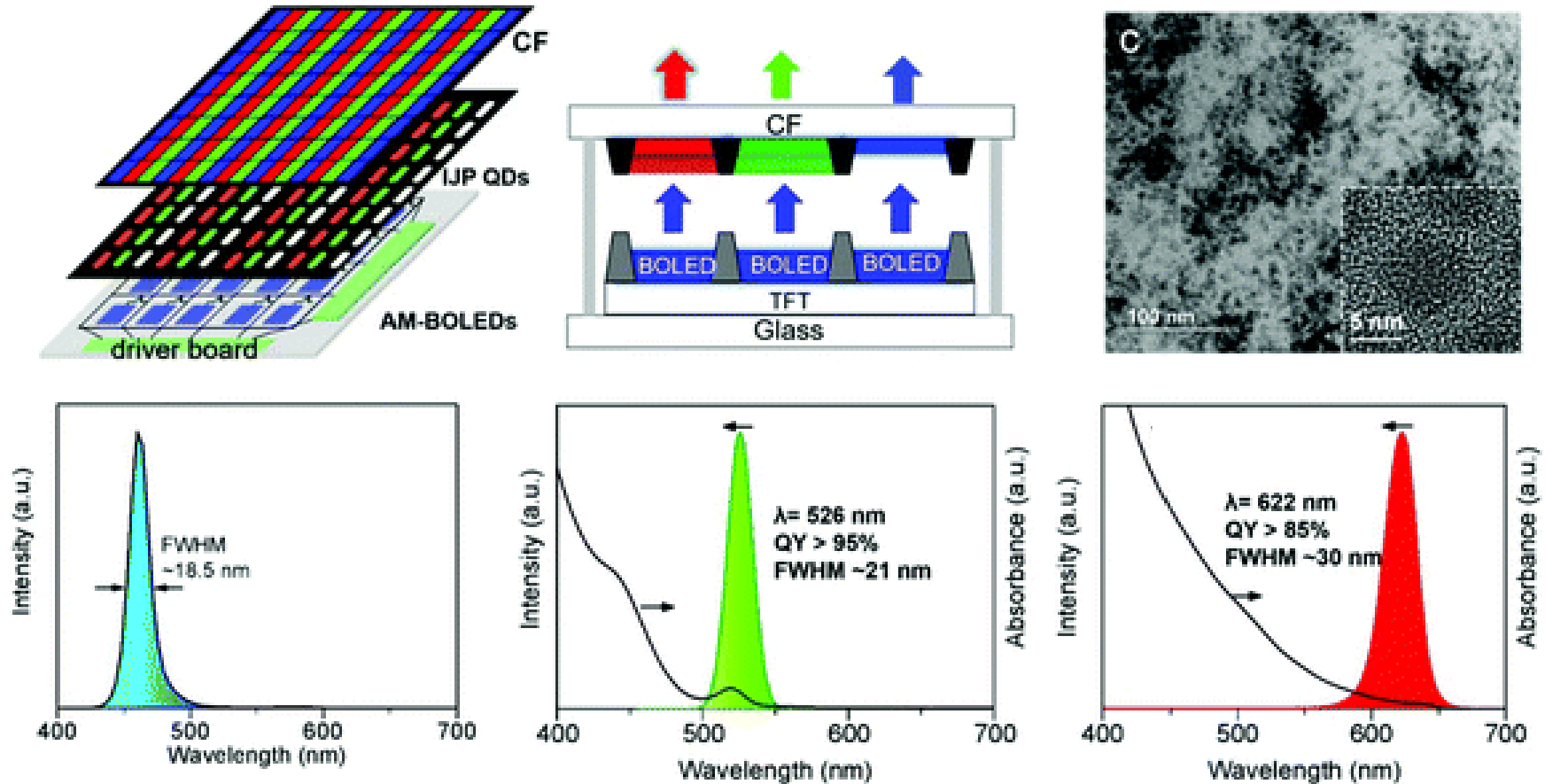
Aufbau von OLEDs: neue Emitterkonzepte

➤ Hyperfluoreszenz



Aufbau von OLEDs: neue Emitterkonzepte

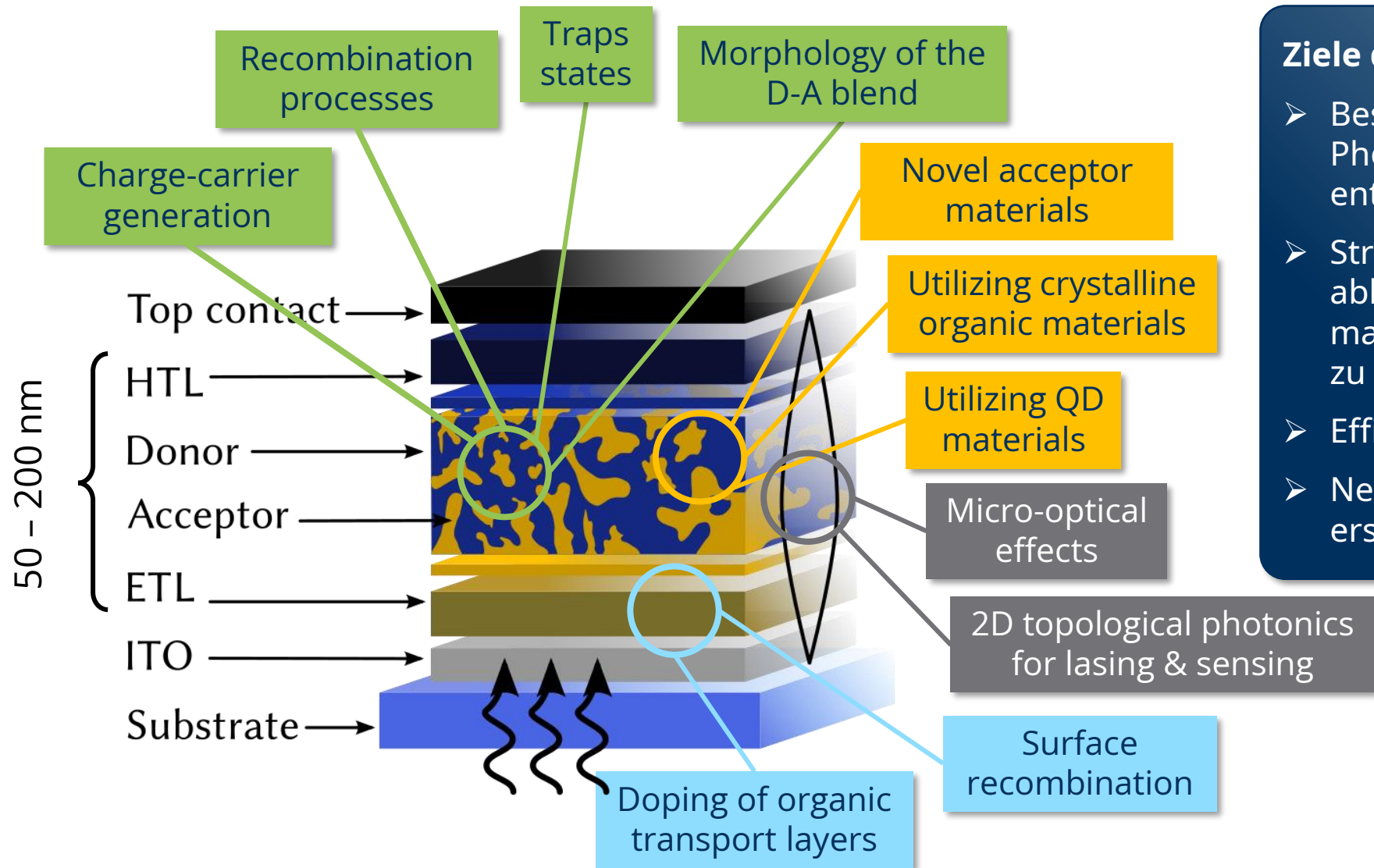
➤ Full-Color Displays dank Color Conversion



Aktuelle Forschung auf dem Gebiet der Organischen Elektronik am IAPP und darüber hinaus

Wie sieht Forschung am IAPP aus?
Zwischen Grundlagenforschung und Engineering

Forschungstätigkeiten rund um organische Photodetektoren

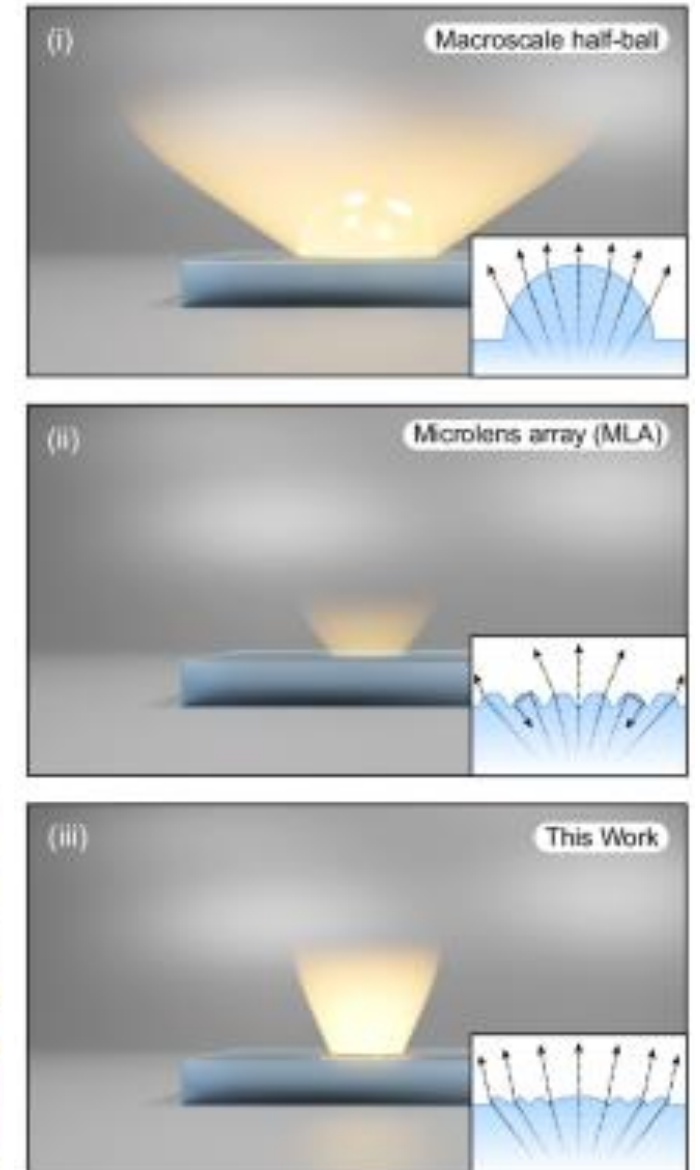
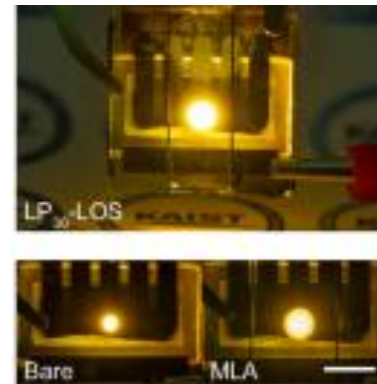


Ziele der OSENS-Gruppe am IAPP:

- Besseres Verständnis für die Photophysik organischer Halbleiter entwickeln
- Struktur-Eigenschafts-Beziehungen ableiten, um zielgerichtet maßgeschneiderte Materialien zu entwickeln
- Effizienz von Bauteilen verbessern
- Neue Anwendungsfelder erschließen

Grundsätzliche Forschungsanliegen

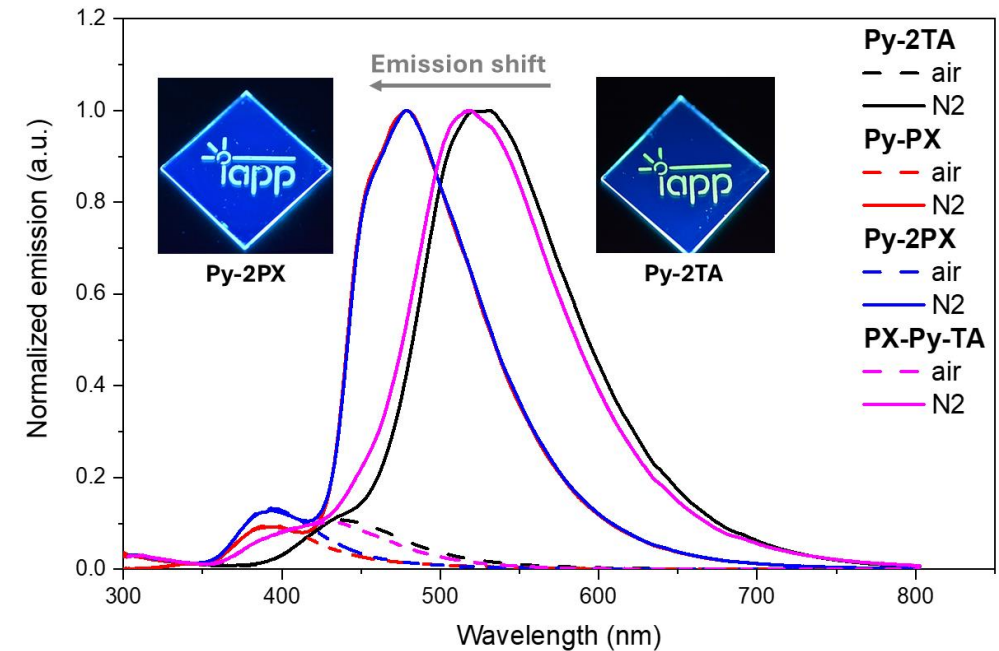
- Besseres Verständnis entwickeln
 - ... von Materialien
 - zielgerichtetes Design maßgeschneiderter Materialien
 - ... von Effekten der Bauelemente
 - verbessertes Design (bspw. Optimierung der Lichtauskopplung bei OLEDs)
- Neue Anwendungen erschließen
- Nachhaltigkeit verbessern



[Kim et al. Nature Commun. (2025) 16, 11606]

Grenzen experimenteller Forschung

- Resultat ist immer Produkt der gesamten Probe/
des gesamten Bauelements
= top-down Ansatz
- Variationen sind nicht immer so systematisch
möglich, wie man es sich wünscht
- Veränderungen in den Resultaten durch
Variation können Ergebnis vielfältiger Effekte sein
- Nicht immer sind alle gewünschten Messaufbauten
verfügbar



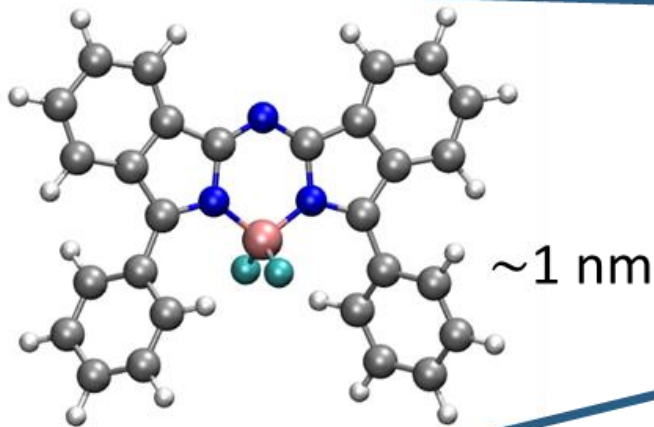
Ursache für Blauverschiebung
der Emission neuer
phosphoreszenter Emitter?

Ergänzung durch Materialsimulationen

- Umgekehrter Ansatz: Bottom-Up Analyse von Materialien und Phänomenen

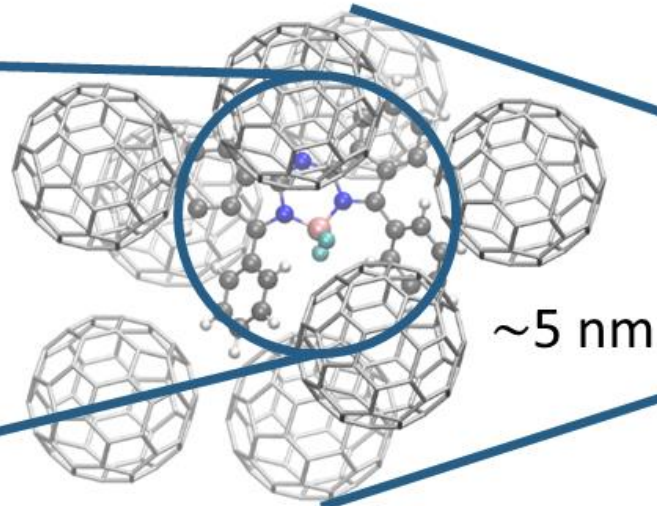
Einzelmoleküle

Einfluss der chemischen Struktur auf elementare Eigenschaften



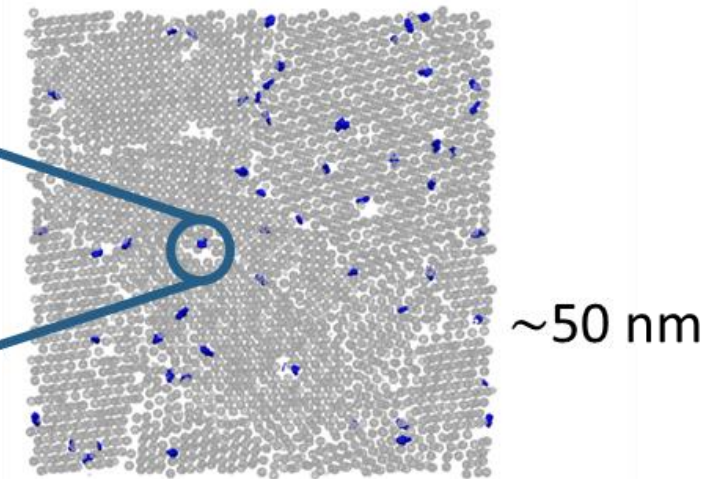
Molekülcluster

Einfluss kurzreichweitiger Wechselwirkungen



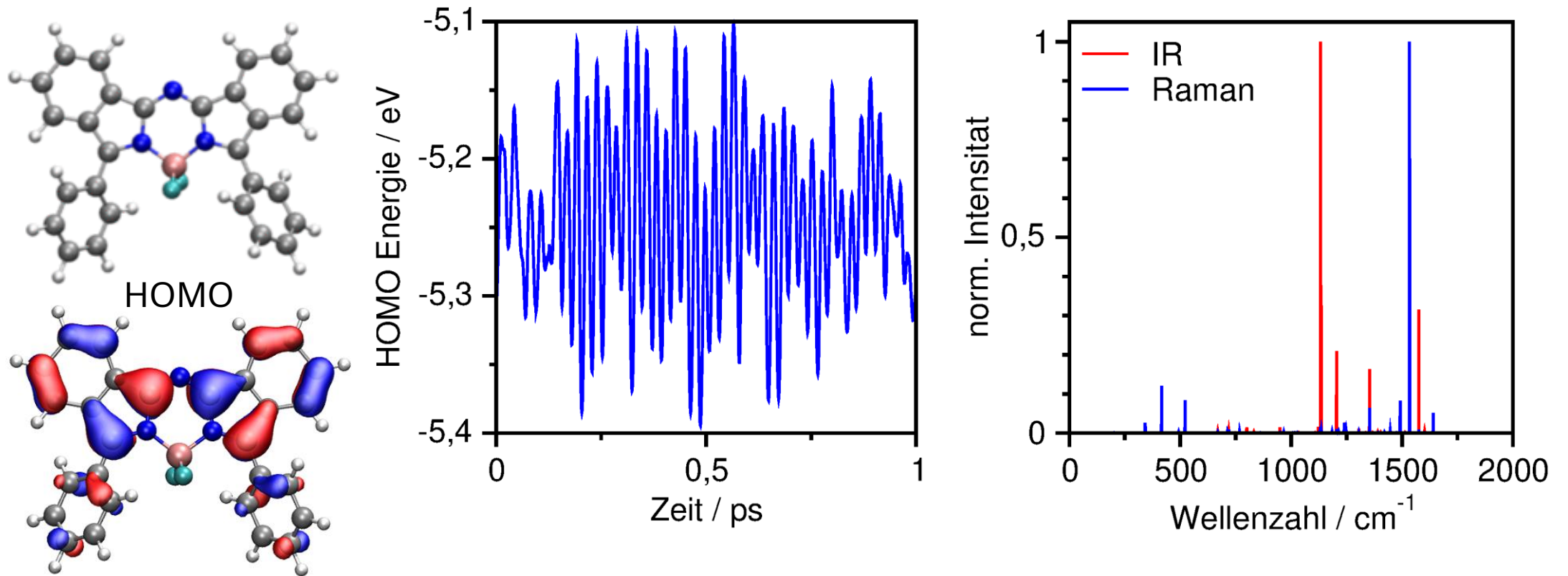
Filmausschnitte

Einfluss langreichweitiger Wechselwirkungen



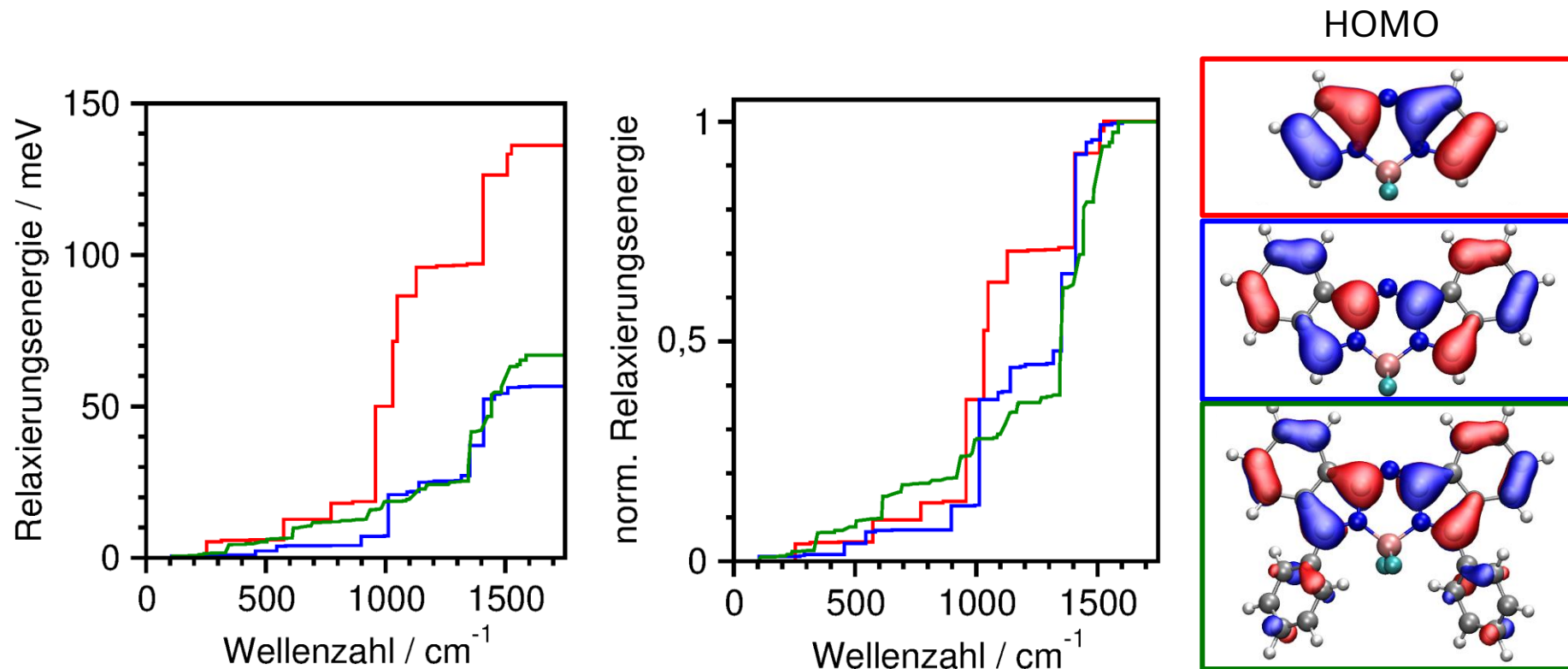
Ergänzung durch Materialsimulationen

- Einzelmolekülstudien: Verbindung von Geometrie, Dynamik und Elektronischer Struktur



Ergänzung durch Materialsimulationen

- Einzelmolekülstudien: Verbindung von Geometrie, Dynamik und Elektronischer Struktur

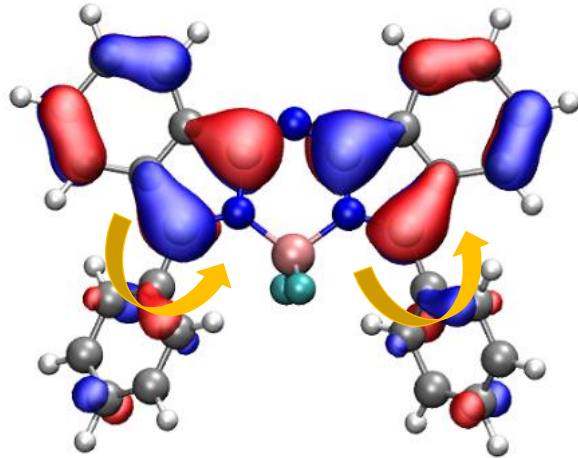


[Schellhammer et al. Chem. Mater. (2017)]

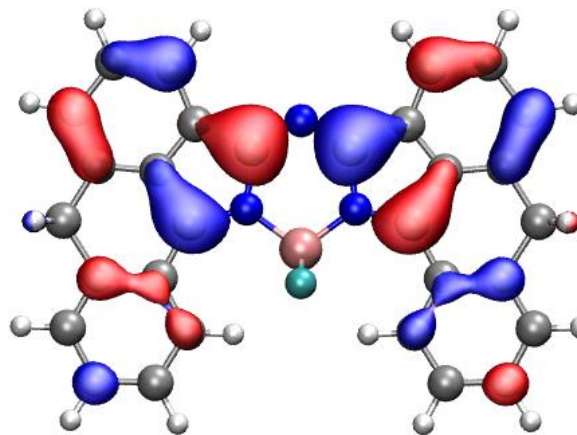
Ergänzung durch Materialsimulationen

- Einzelmolekülstudien: Zielgerichtete Ableitung von optimierten Designstrategien

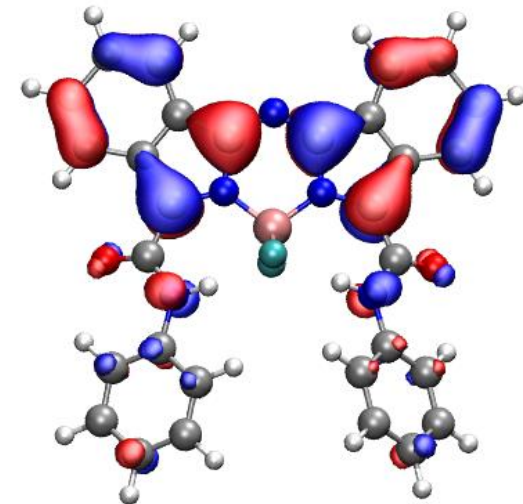
Ausgangspunkt:
Ph₂-benz-*aza*-BODIPY
 $\Lambda = 70$ meV



Kovalente Brücke
und Planarisierung
 $\Lambda = 51$ meV



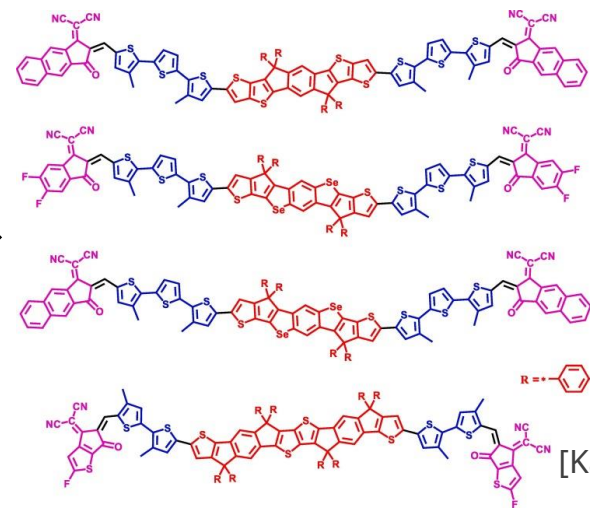
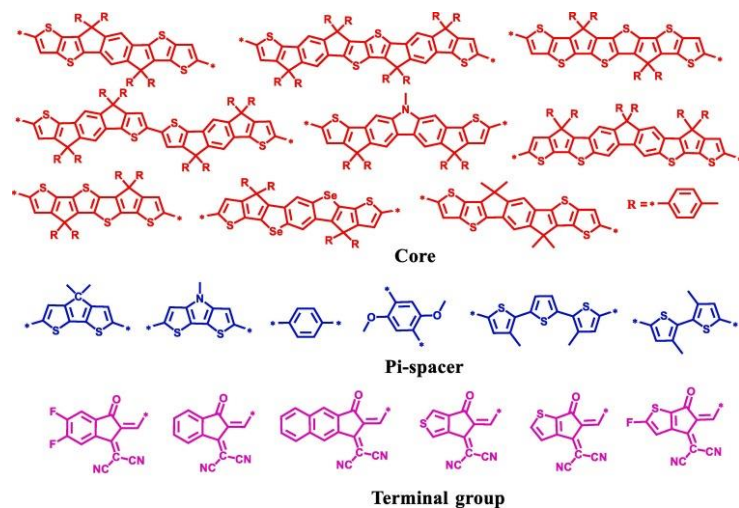
Intramolekulare
Wasserstoffbrücken
 $\Lambda = 52$ meV



[Schellhammer et al. Chem. Mater. 2017]

Ergänzung durch KI-erweiterte Materialsimulationen

- Maschinelles Lernen bietet vielfältige Chancen für die Organische Elektronik, z. B.
 - Methodische Verbesserungen:
z. B. Simulationsparameter ohne explizite Rechnungen
 - Verringerung des Rechenaufwands:
z. B. Bestimmung von Eigenschaften allein auf der Grundlage der Geometrien
 - Materialscreening & Extraktion empirischer Zusammenhänge:
z. B. Zusammenhang aus Energieniveaus, Molekülgröße und Reorganisationsenergien



Labtour

3 rotierende Gruppen:

1) PLTs

2) Labororganisation

3) Vakuumtechnik & Evaporation

Literatur- und Quellenverzeichnis

- Folie 3: <https://oiger.de/wp-content/uploads/TUD-IAP-Hans-Kleemann-16.jpg>
- Folie 7: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/c/c1/Klassieren.jpg/800px-Klassieren.jpg>
- Folie 8: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/41/C60a.png>
https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/49/Carbon_nanotube_diagram_6.jpg
https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/3/36/Phthalocyanine_Lead_Molecule_3D.webp/1003px-Phthalocyanine_Lead_Molecule_3D.webp.png?20240525100203
https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/e/e4/DNA_chemical_structure.svg
<https://www.maschinenbau-wissen.de/bilder/skripte/kunststofftechnik/PMMA-02.PNG>
- Folie 9: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/f/f8/Chinin.svg/375px-Chinin.svg.png>
https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/b/b2/Tonic_water_uv.jpg/330px-Tonic_water_uv.jpg
<https://www.maschinenbau-wissen.de/bilder/skripte/kunststofftechnik/PMMA-02.PNG>
https://www.ms-viscom.com/media/SlikeIT/Thumbs/Akrilne_pleksi_PMMA_plosce_prozorne_r.jpg
- Folie 10: <https://i.stack.imgur.com/nWjgj.gif>
- Folie 11: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/03/Conjugation_%26%E2%80%93Cross_Conjugation_V.1.png
https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/9/90/Benzene_Orbitals.svg/375px-Benzene_Orbitals.svg.png
- Folie 24: <https://www.inseto.co.uk/wp-content/uploads/2020/11/SpinCoat.png>
- Folie 45: https://www.hicenda.com/Uploads/image/20241122/20241122101037_33826.jpg
- Folie 46: <https://static4.arrow.com/-/media/arrow/images/dmapac/2023/arrowtimes/apr/0418-bd-fd-light-2.jpg?h=145&w=600&hash=D70386A91C7FC44A397584C6A521413F>