

# Chemie mit Licht

Angeregte Zustände für anregende Chemie

Aktueller Stand  
Wiss.&Tech.

Lehre der NW  
Schule&Uni

2011/05/25 12:26 AM

Michael W. Tausch, Bergische Universität Wuppertal, 2023

# Licht

**schon kurz nach dem  
Urknall des Universums ...**

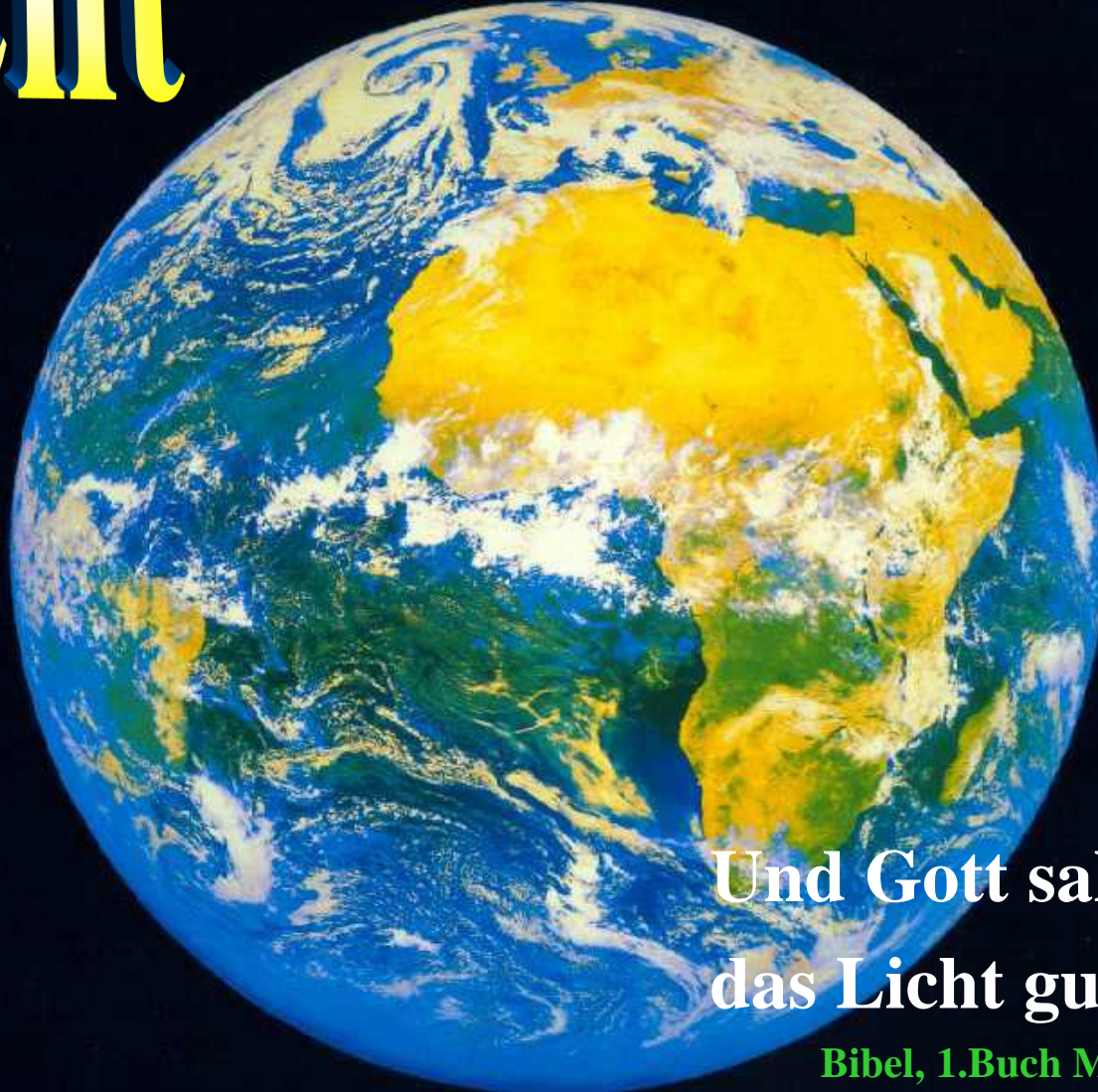


**Und Gott sprach:  
„Es werde Licht.“**

**Bibel, 1.Buch Mose, Vers 3**

# Licht

eine Voraussetzung für das  
Leben auf der Erde



Und Gott sah, daß  
das Licht gut war

Bibel, 1.Buch Mose, Vers 4





# Warum sind Photoprozesse relevant für Unterricht & Studium?



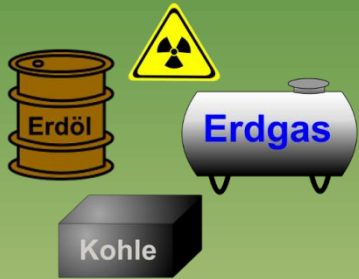
**Energie**  
**Klima**  
**Mobilität**  
**Wasser**  
**Ernährung**

## „Erneuerbare Energien“

<b>Solar:</b>	<b>100 000 TW</b>
<b>Wind:</b>	<b>14 TW</b>
<b>Ocean Currents:</b>	<b>0.7 TW</b>
<b>Biomass:</b>	<b>5-7 TW</b>
<b>Hydroelectric:</b>	<b>1.2 TW</b>
<b>Geothermal:</b>	<b>1.9 TW</b>

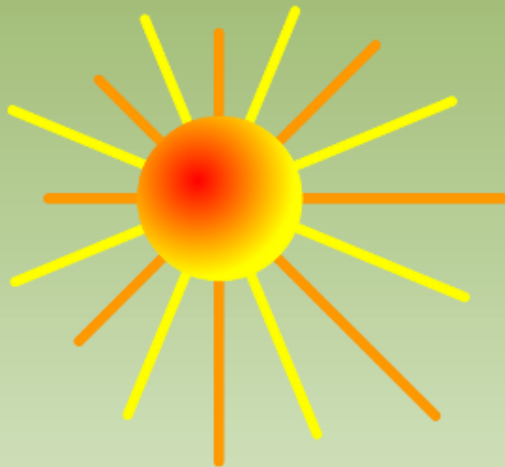


# $E(\text{Sonne/a}) = 100 \times \text{Weltreserven}$



Globale Reserven (Erdöl, Erdgas, Kohle und Uran)

$2,5 \cdot 10^{22} \text{ J}$



Jährliche Solareinstrahlung

$2,8 \cdot 10^{24} \text{ J}$

$\cdot 100$

[1]

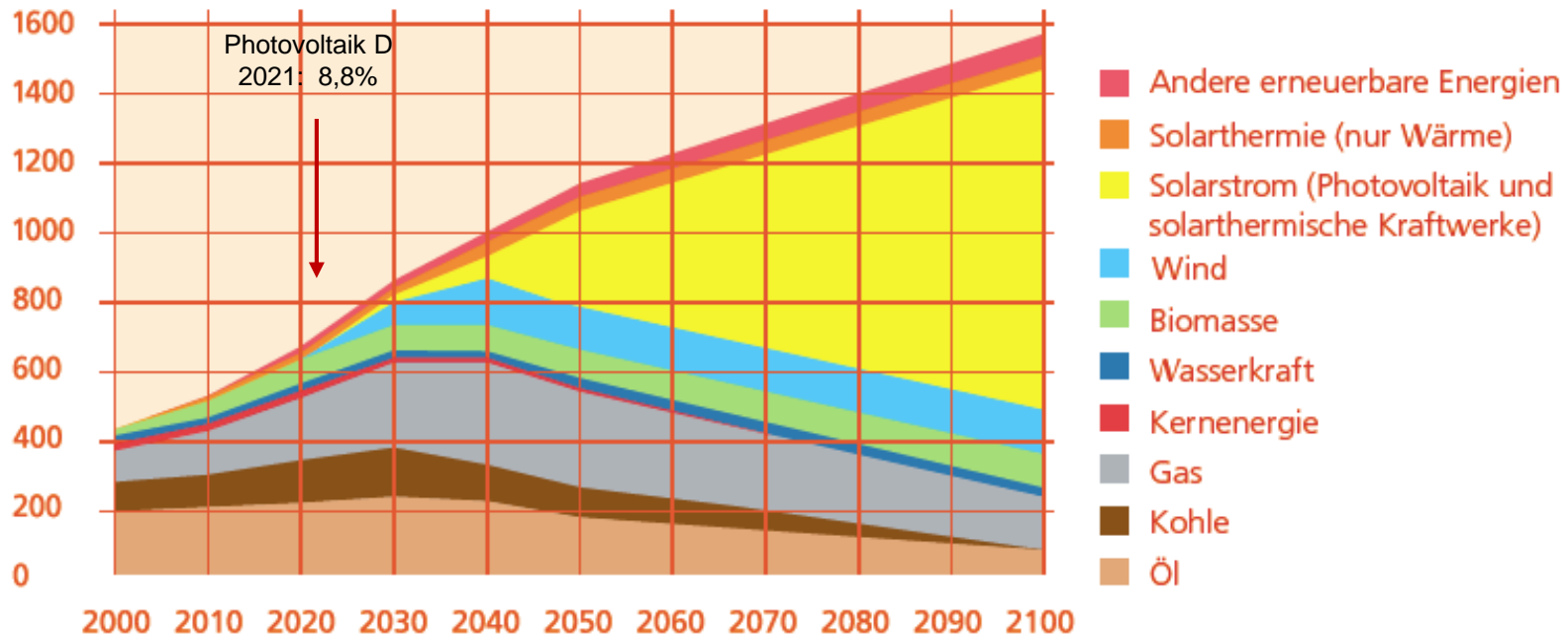
„Es ist eine wenig bekannte Tatsache, dass die Sonne uns jeden Tag den gesamten weltweiten Energiebedarf für acht Jahre liefert.“ [2]



# Globaler Energiemix bis 2100

## Immer mehr Strom von der Sonne

Jährlicher Primärenergieeinsatz  
(Etagoule pro Jahr)





# Photoprozesse

haben Schlüsselfunktionen bei

**Energieeffizienz, z.B.:**

- in LED's und OLED's
- in Solarreaktoren
- in Klimaanlage mit photochromen und elektrochromen Fenstern
- in phototechnischen Verfahren

**Konversion von Solarlicht  
in elektrische Energie, z.B.:**

- in photovoltaischen Zellen
- in photoelektrochemischen Zellen
- in Fluoreszenzkollektoren

**Chemische Energiespeicher aus  
 $H_2O$ ,  $CO_2$  und Solarlicht, z.B.:**

- Wasserstoff, Methan, Methanol ...
- Benzin, Diesel, Kerosin ..

## Energie im 21. Jh.







# Photoprozesse

haben Schlüsselfunktionen

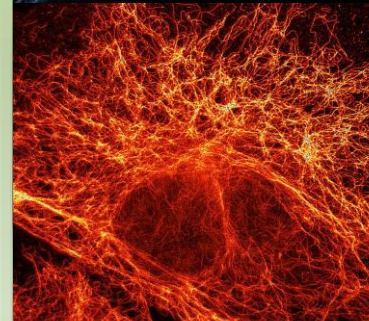
## Life Science:

- im Photoreaktor Atmosphäre
- im Photoreaktor Blatt
- im Photoreaktor Auge
- im Photoreaktor Haut
- in der medizinischen Diagnostik
- in der medizinischen Therapie

## Material Science:

- Photokatalysatoren für die Synthese von „grünen“ Brennstoffen und Grundchemikalien
- Materialien für die Mikroelektronik und Sensorik
- Materialien für Photovoltaik, LED's und OLED's
- Materialien für digitale Logik und Kommunikation
- Molekulare Schalter für Nano-Motoren
- Photoaktive Moleküle für Mikro- und Nanoskopie

**Chemie im 21. Jh.**





# In welches Schulfach gehören die Photoprozesse?



# Photoprozesse in der Lehre der MINT-Fächer

Experimentbasiert - Lehrplankonform - Interdisziplinär



Farbige Stoffe, Photoreaktionen und Photokatalyse in Labor, Technik und belebter Natur

**MINT Fächer**  
im 21. Jahrhundert

**CHEMIE**

**BIOLOGIE**

**GEOGRAPHIE**

**PHYSIK**

**INFORMATIK**

**LEDs, Photovoltaik und Photogalvanik**

**Photoreaktor Atmosphäre**

Digitalisierung mit photoaktiven molekularen Schaltern



# Photoprozesse in der Lehre der MINT-Fächer



## Warum hat die Chemie Vorreiterfunktion?

### Künstliche Photosynthese

Photokatalytische Herstellung von „grünem“ Wasserstoff & Reduktion von CO<sub>2</sub>



### Kohlenstoffkreislauf

Modell-experimente zum Kreislauf Photosynthese & Zellatmung



Basis-Set



Demo-Set

Photo-Cat

# MINT Fächer

im 21. Jahrhundert

CHEMIE

BIOLOGIE

PHYSIK

GEOGRAPHIE

INFORMATIK

### Photovoltaik

Anorganische, Organische & Hybride Solarzellen

CheMTiO<sub>2</sub>



Organic Photo Electronics

### LICHTenergie Konversion & Speicherung

Lumineszenz & Photoreaktionen allgemein



Photo-Mol

### Molekulare Logik & Nano-Motoren

Photoaktive molekulare Schalter & Materialien



Chemie beschreibt die Wechselwirkung von Licht mit Stoffen mithilfe von Elementarprozessen bei der Interaktion von Photonen mit Molekülen und anderen Teilchenverbänden



# Photoprozesse - wie viel Theorie?



$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial z^2} + \frac{8\pi^2 m}{h^2} (E - V) \Psi = 0$$

**Born-Oppenheimer  
Approximation, 1927**

**Wellenfunktion  $\Psi$  und  
Schrödinger-Gleichung**  
Erwin Schrödinger 1926

## Orbitale ...

... sind Lösungen der Schrödinger-Gleichung, d.h. Wellenfunktionen  $\Psi$ . Aus  $\Psi^2$  lassen sich Aufenthaltswahrscheinlichkeiten für Elektronen in bestimmten Raumbereichen des Atoms berechnen. In der Chemie hat sich für Raumbereiche mit großen Aufenthaltswahrscheinlichkeiten (>90%) der Begriff „Orbitale“ eingebürgert.

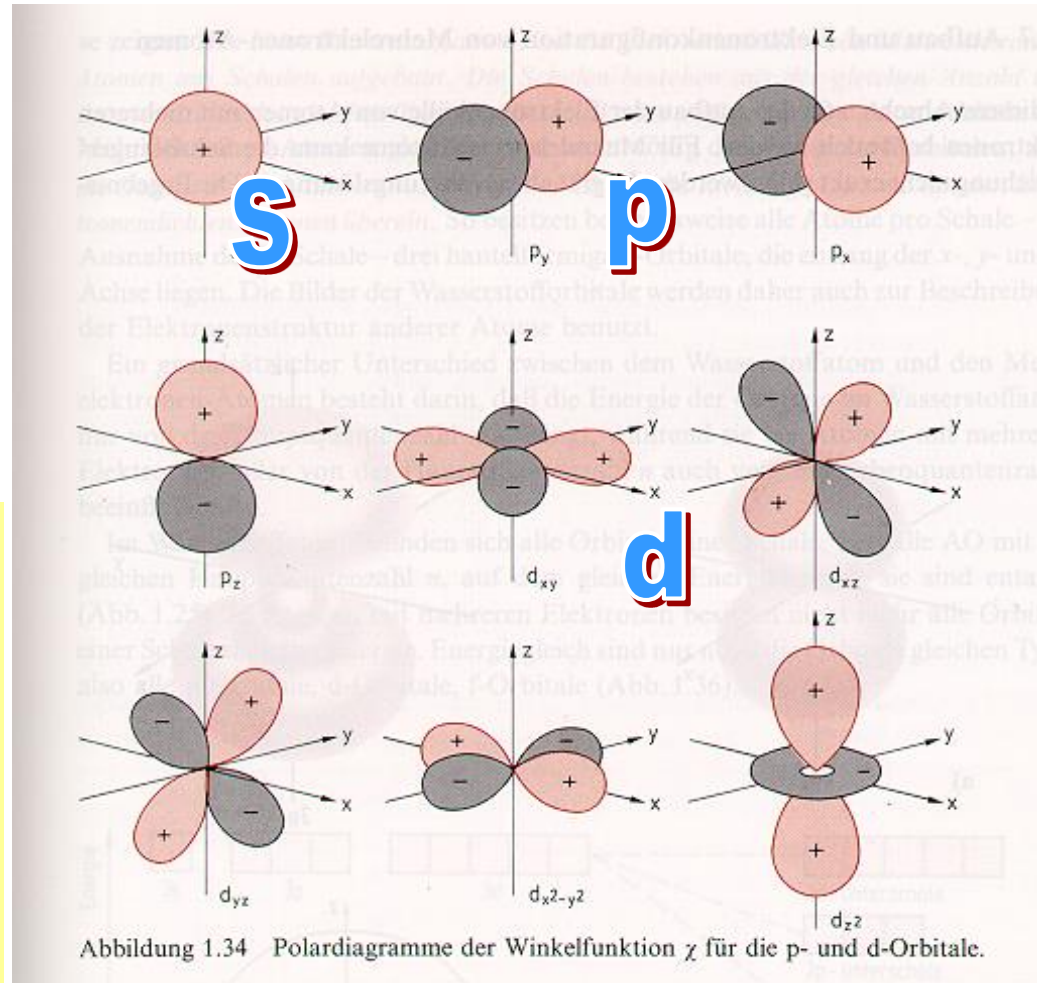


Abbildung 1.34 Polardiagramme der Winkelfunktion  $\chi$  für die p- und d-Orbitale.



# Angeregte Zustände

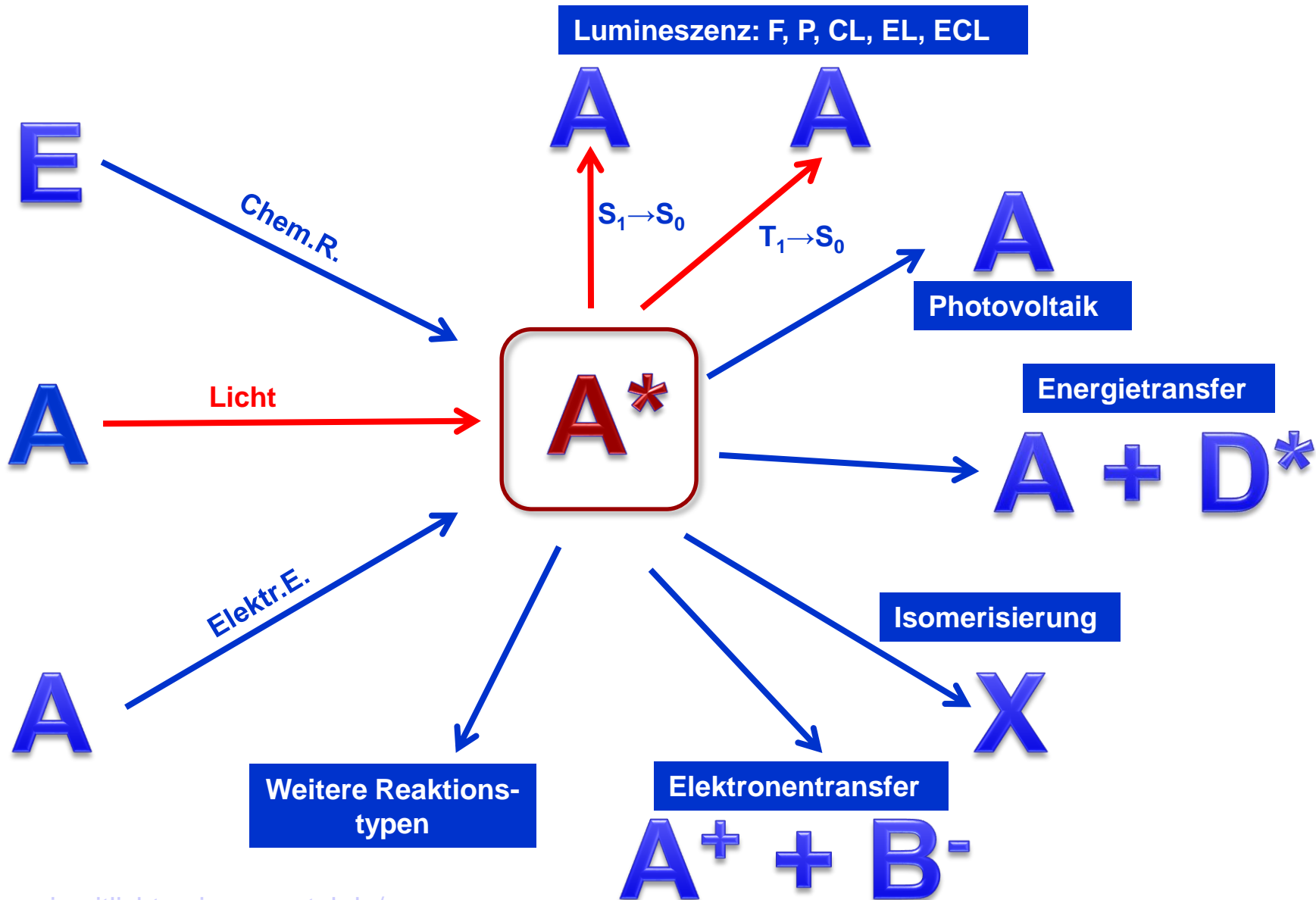
**Paradigma (Grundannahme → Denkmuster):**

„The „photo“ part of molecular photochemistry is a historical prefix and is now too restrictive.

It is now clear that electronically excited states of molecules are the heart of all photoprocesses. The excited state is in fact an electronic isomer of the ground state.“

N. J. Turro,  
Modern Molecular Photochemistry.  
Benjamin/Cummings, N.Y. (1978)





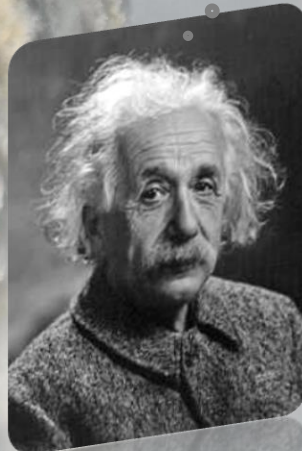


# Chemie mit Licht

Aktueller Stand  
Wiss.&Tech.

Lehre der NW  
Schule&Uni

$$E = mc^2$$



„Ein hübsches Experiment  
ist oft wertvoller als  
zwanzig in der  
Gedankenretorte  
erbrütete Formeln“

A. Einstein 1955

**2011/05/25 12:26 AM**

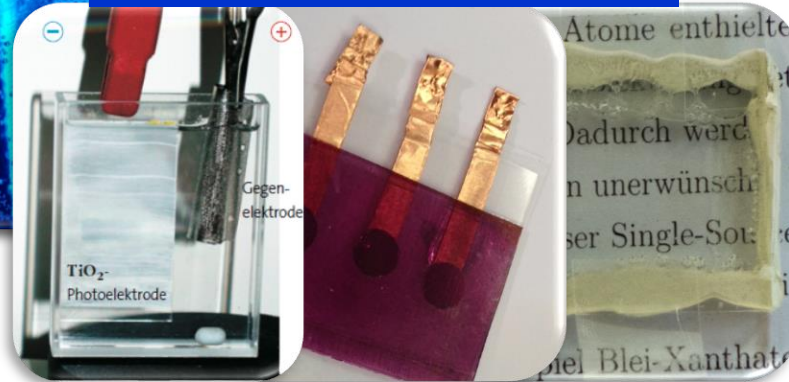
Michael W. Tausch, Bergische Universität Wuppertal, 2022



Lumineszenz: F, P, CL, EL, ECL



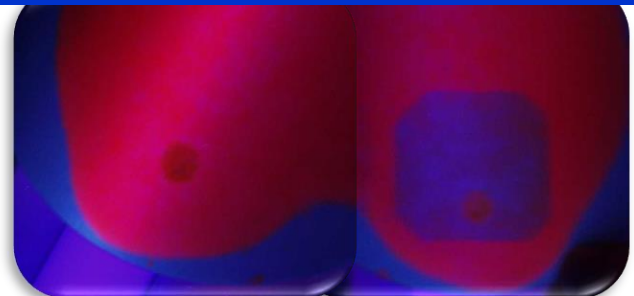
Anorg. & Org. Photovoltazellen



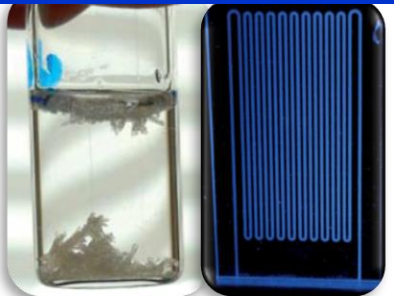
**A**  $\xrightarrow{\text{Licht}}$  **A\***  
oder andere Energie

**A\***

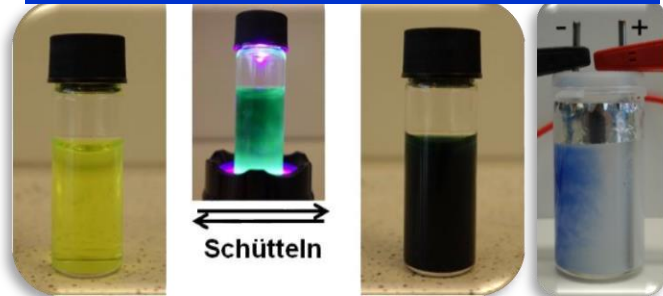
Energietransfer/ Photosensibilisierung



Weitere Reaktionen



Elektronentransfer / Photoredox



Isomerisierung (E/Z und andere)





# Photochemie - Didaktik-Team

Duisburg und Wuppertal seit 1995



**Michael W. Tausch**



**Claudia Bohrmann-Linde**



**Simone Kröger**



**Amitabh Banerji**



**Yasemin Gökkus**



**Nico Meuter**



**Diana Zeller**



**Rebecca Grandrath**



**René Krämer**



**Heiko Hoffmann**



**Melanie Zepp**



**Ibeth Rendon**



**Sebastian Spinnen**



**Maria Heffen**



**Richard Kremer**



**Ralf-Peter Schmitz**



**Julian Venzlaff**



**Nuno Pereira Vaz**



## Tutorial-Format

**Dialog** zwischen zwei jungen Menschen, einem nw-interessierten Laien  
und einem(r) didaktisch forschenden Photochemiker(in)



### Was ist ein Photon?

Teilchen-Welle  
Dualismus



### Ein chemisches Chamäleon

Molekulare Umgebung  
und Solvatochromie



### Ungleiche Gleichgewichte

Thermodynamisches Gleichgewicht  
Vs. photostationärer Zustand



### Underground-Minigolf

Photolumineszenz -  
Farbe durch Lichtemission



### An und Aus mit Licht

Ein photoaktiver  
Molekularer Schalter

Niklas Drude  
Nuno Pereira Vaz  
Claudia Bohrmann-Linde  
Sebastian Spinnen  
Yasemin Yurdanur  
Nico Meuter

Idee und Buch  
Michael Tausch



# **Photochemische Experimente & Konzepte für Unterricht & Studium in MINT-Fächern**

# Lumineszenz



OLED-Display



OLED-Fernseher

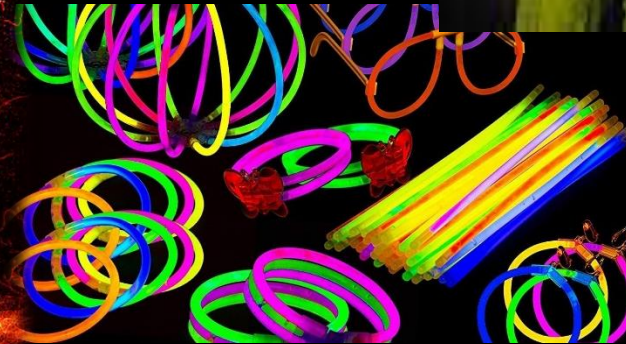


Fluoreszierende  
Sicherheitskleidung



Stefan Hell  
NP Chemie 2014

Superauflösende Mikro- und  
Nanoskopie (< 200 nm)



Chemolumineszenz in Knicklichtern



Biolumineszenz  
im Leuchtkäfer



# Farben und Leuchtfarben Fluoreszenz

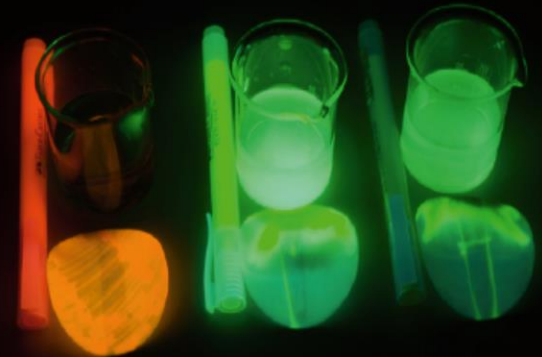
bei Tageslicht



Stoffe und Stoffeigenschaften  
Farbe - (k)eine Stoffeigenschaft

Geeignet  
auch für die  
Sek. I

im UVLicht



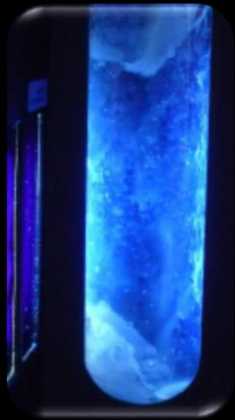
Weinender  
Kastanienzweig

Textmarker

# Photo- Elektro- & Chemolumineszenz

## Experimente zum Energiestufenmodell

Fluoreszenz



Phosphoreszenz



Elektrolumineszenz



Schütteln mit Luft



... Einleiten von  
Stickstoff



... Einleiten von  
Sauerstoff

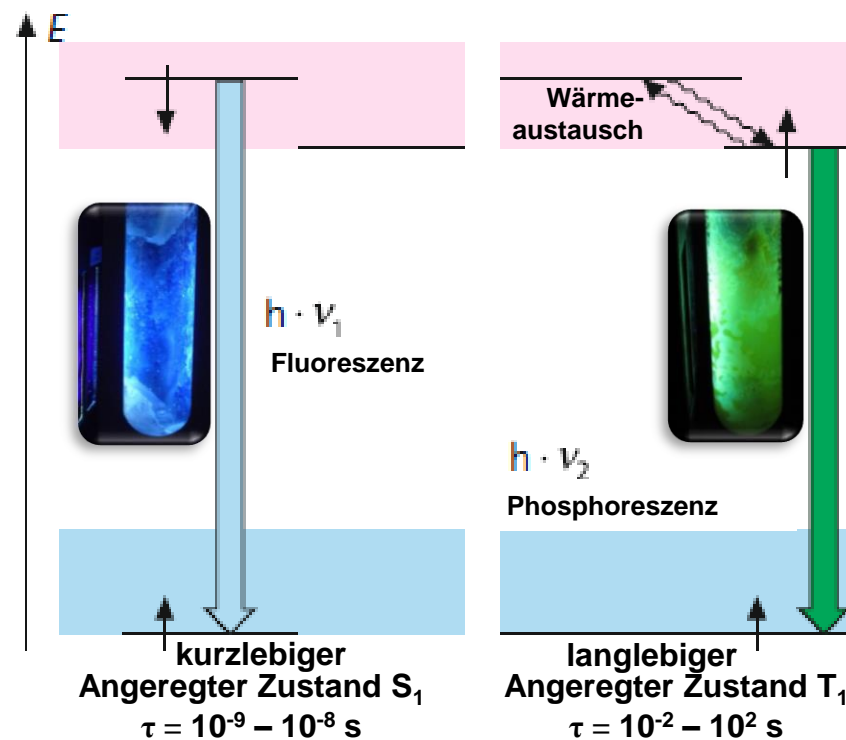
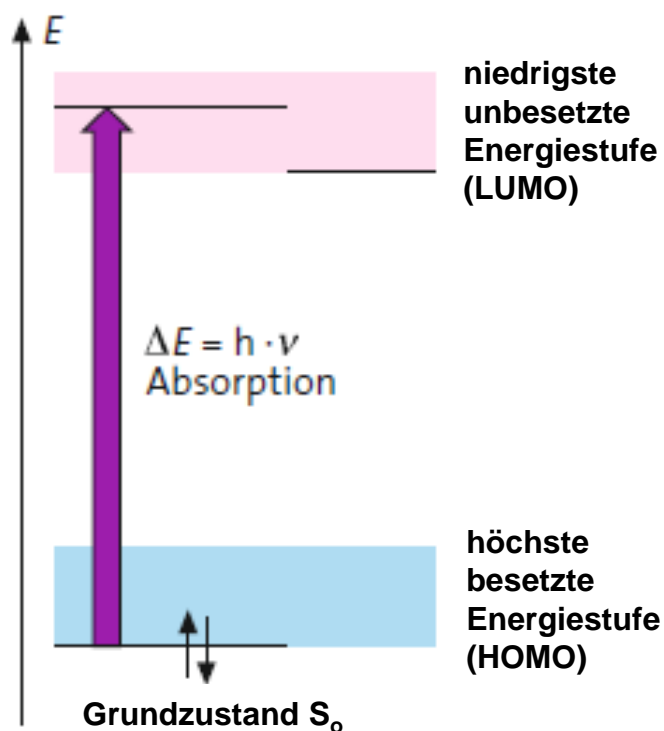




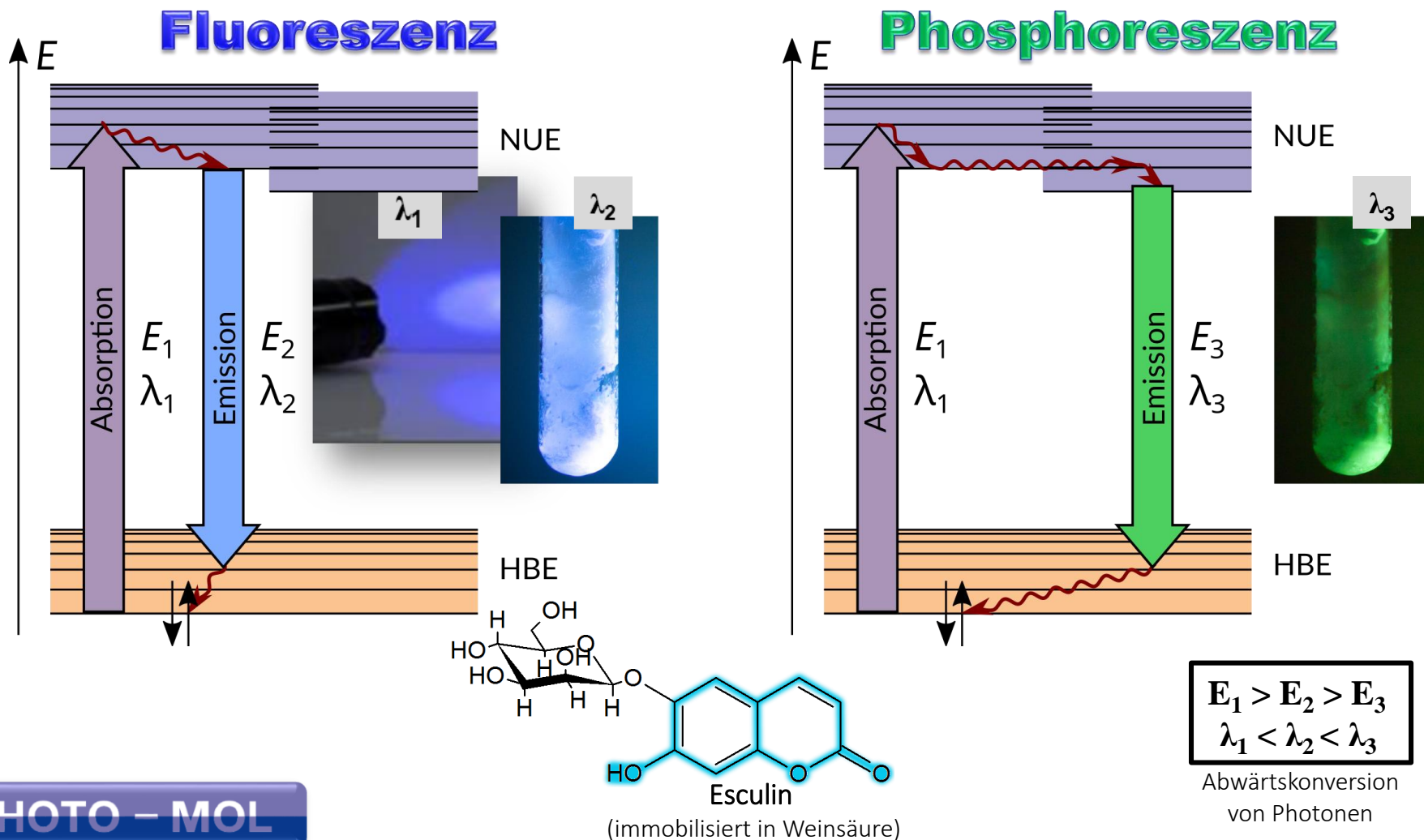
**Paradigma:** „ ... der elektronisch angeregte Zustand ist das Herz aller  
Photoprozesse .“

N. J. Turro, 1978

## Das Energiestufenmodell – Ein Schlüsselkonzept in der Chemie



# Photolumineszenz

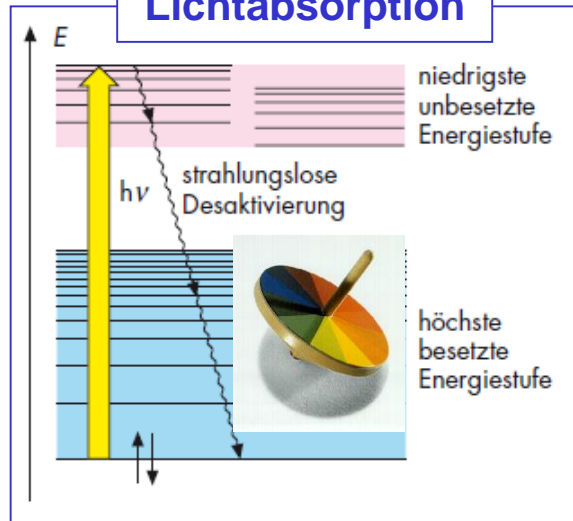


# Energiestufenmodell: Lumineszenz und Farbe

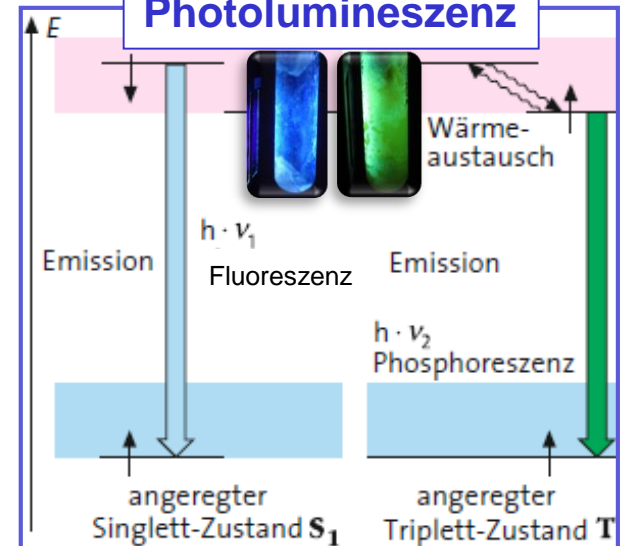
## Chemisches Basiskonzept

Das Konzept vom Grundzustand und elektronisch angeregten Zuständen

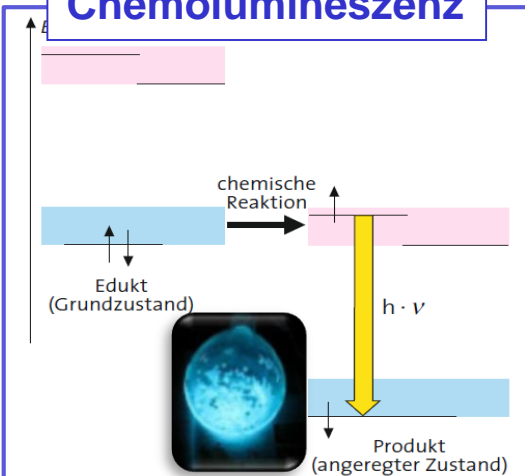
## Farbigkeit durch Lichtabsorption



## Photolumineszenz



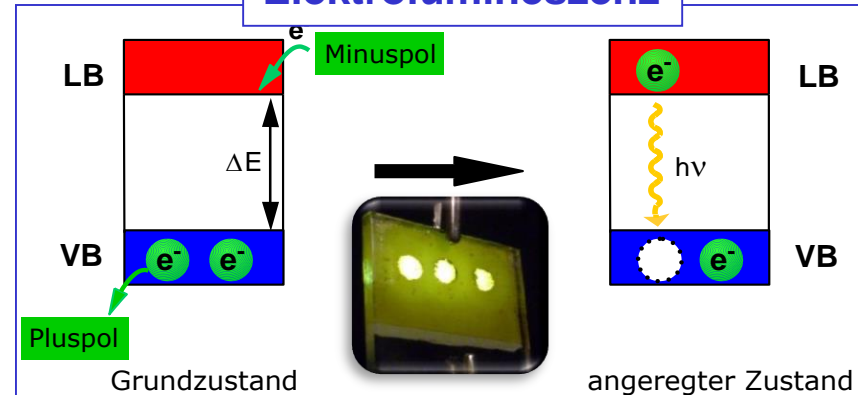
## Chemolumineszenz



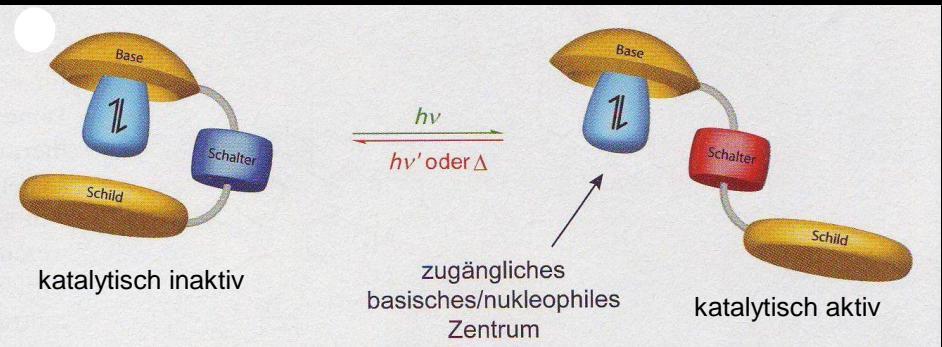
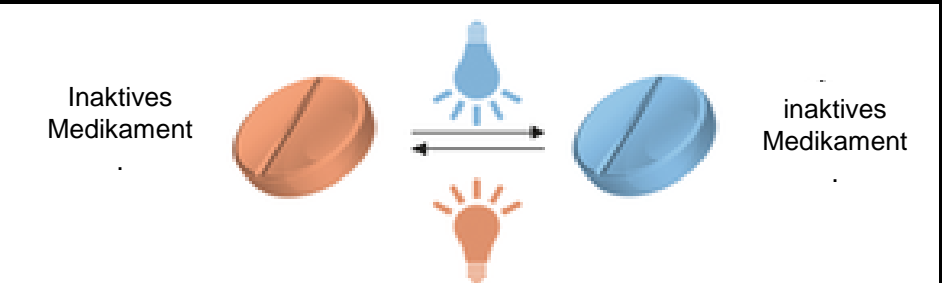
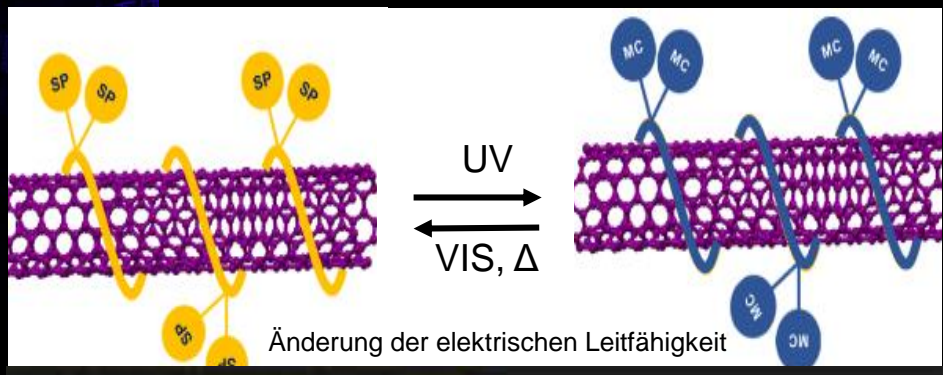
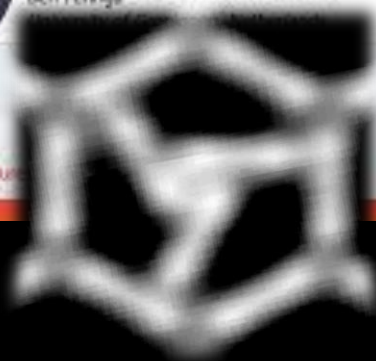
## Elektrochemolumineszenz



## Elektrolumineszenz



# Molekulare Schalter & Nano-Motoren

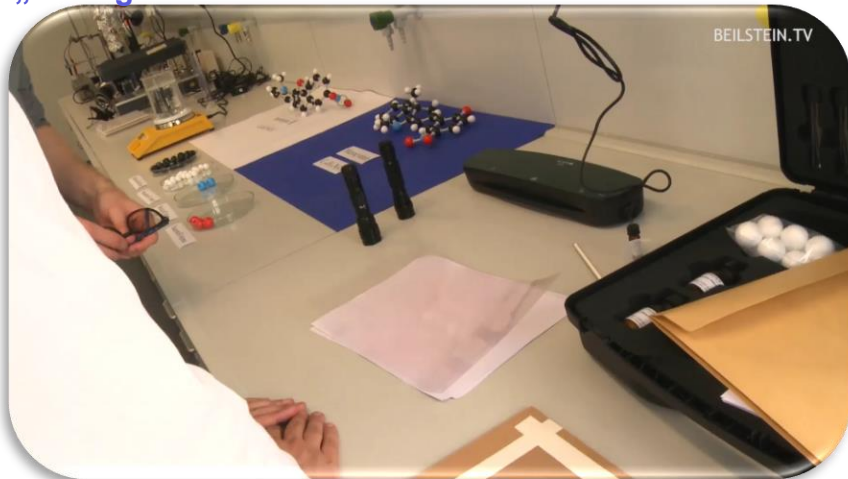
# Molekulare Schalter & Nano-Motoren



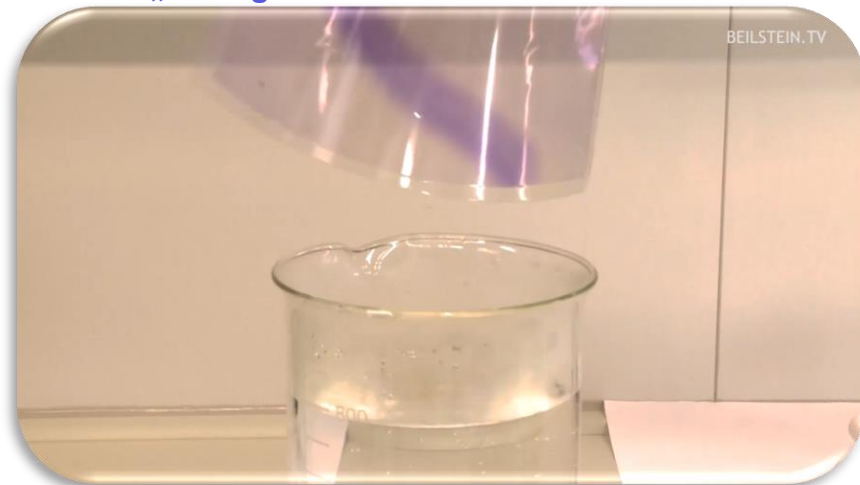


## Spiropyran - ein didaktisches Juwel

„Intelligente Folie“: Schreiben und Löschen mit Licht



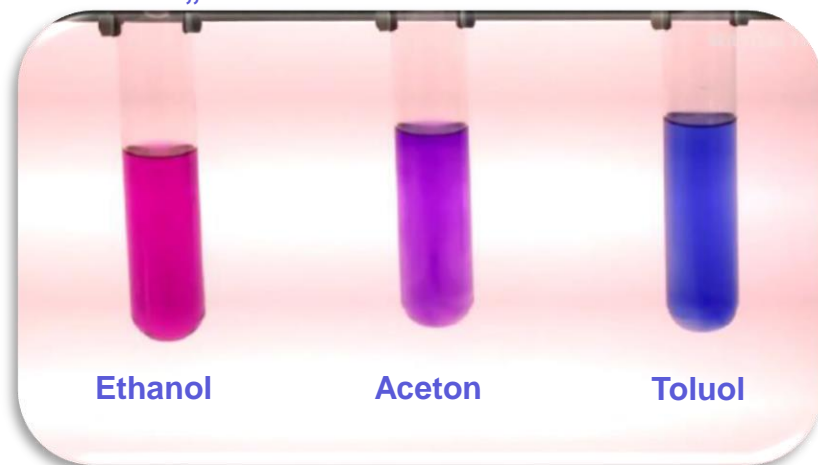
„Intelligente Folie“: Löschen mit Wärme



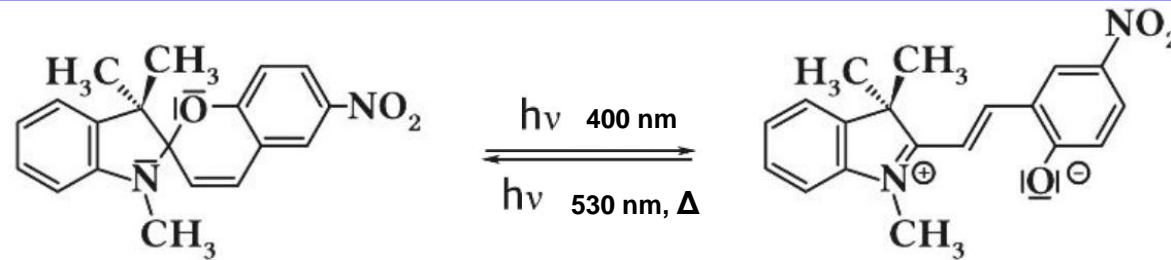
„Ungleiche Gleichgewichte“ in Lösung



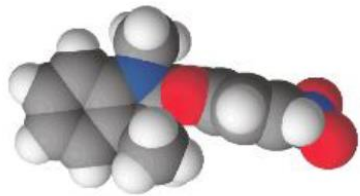
„Ein chemisches Chamäleon“



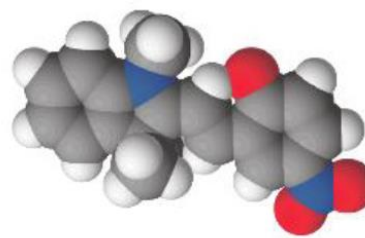
# Spiropyran - ein didaktisches Juwel



Spiropyran



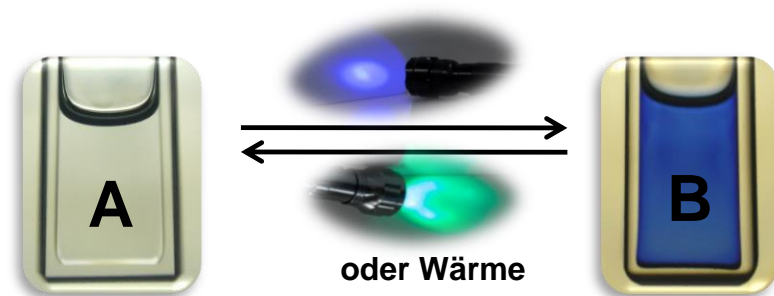
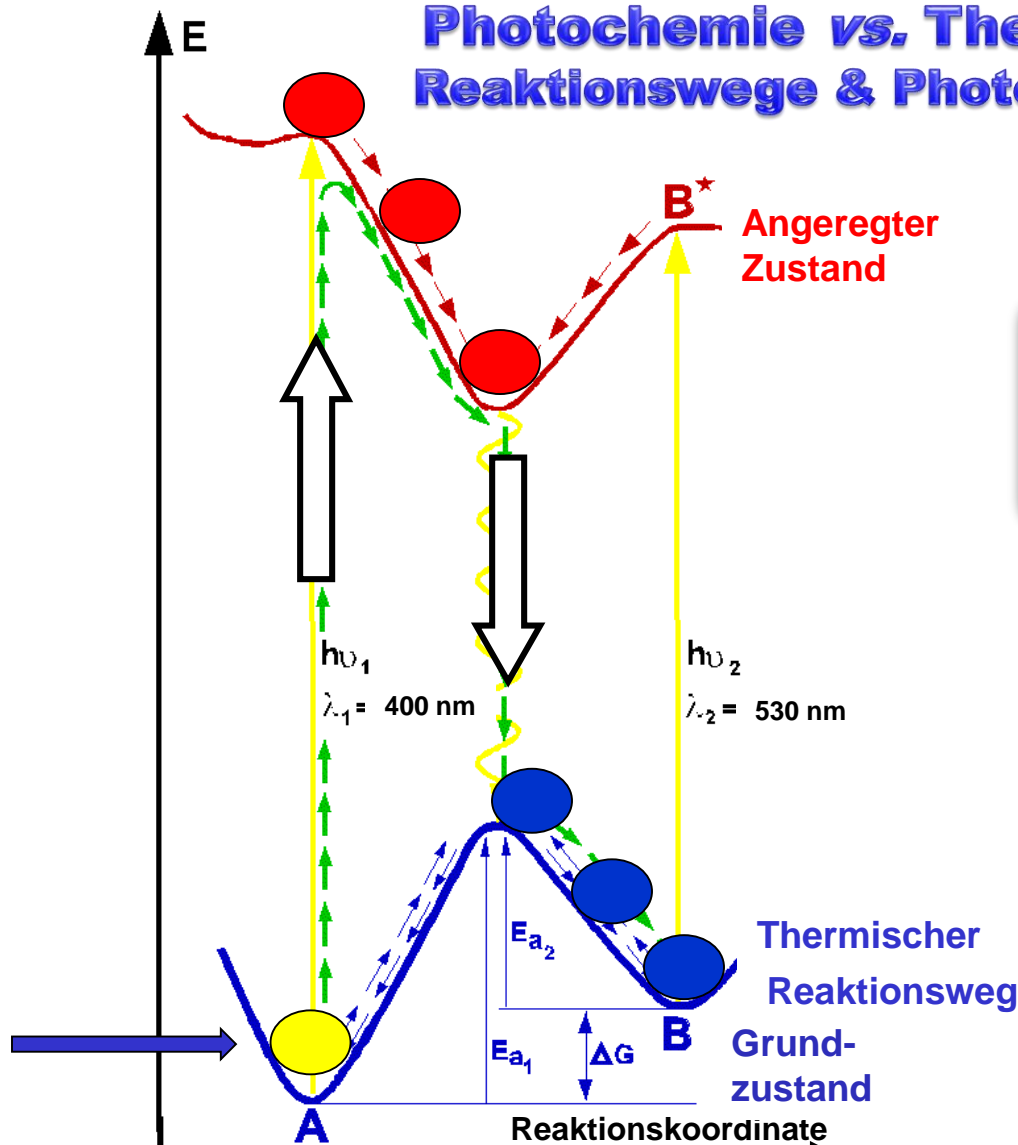
Merocyanin



## Adressierbare Lehrinhalte in der Sek. II:

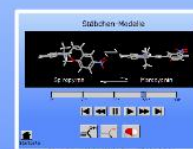
- ⇒ Molekulare Schalter; ⇒ Photochromie; ⇒ Solvatochromie; ⇒ AIE;
- ⇒ Relation: Molekülstruktur / Lichtabsorption und -emission / Farbe;
- ⇒ Reaktionswege photochemischer und thermischer Reaktionen;
- ⇒ Abhängigkeit: Reaktionsgeschwindigkeit / Temperatur
- ⇒ Thermodynamisches Gleichgewicht vs. Photostationarität ... ⇒ Molekulare Logik

## Photochemie vs. Thermochemie Reaktionswege & Photostationarität

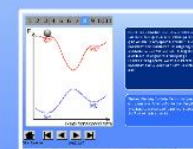


### Photo-steady state

Exploration  
of the concept  
with the  
substance  
spiropyrane



Molecular structures  
of spiropyrane/merocyanine



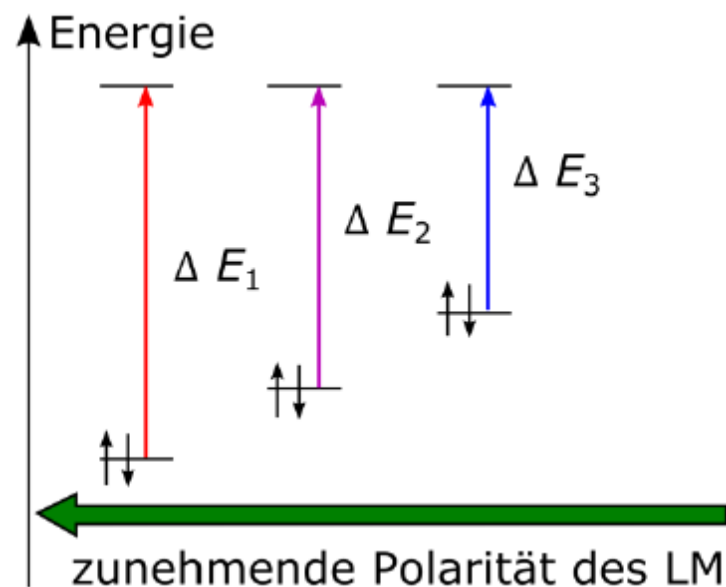
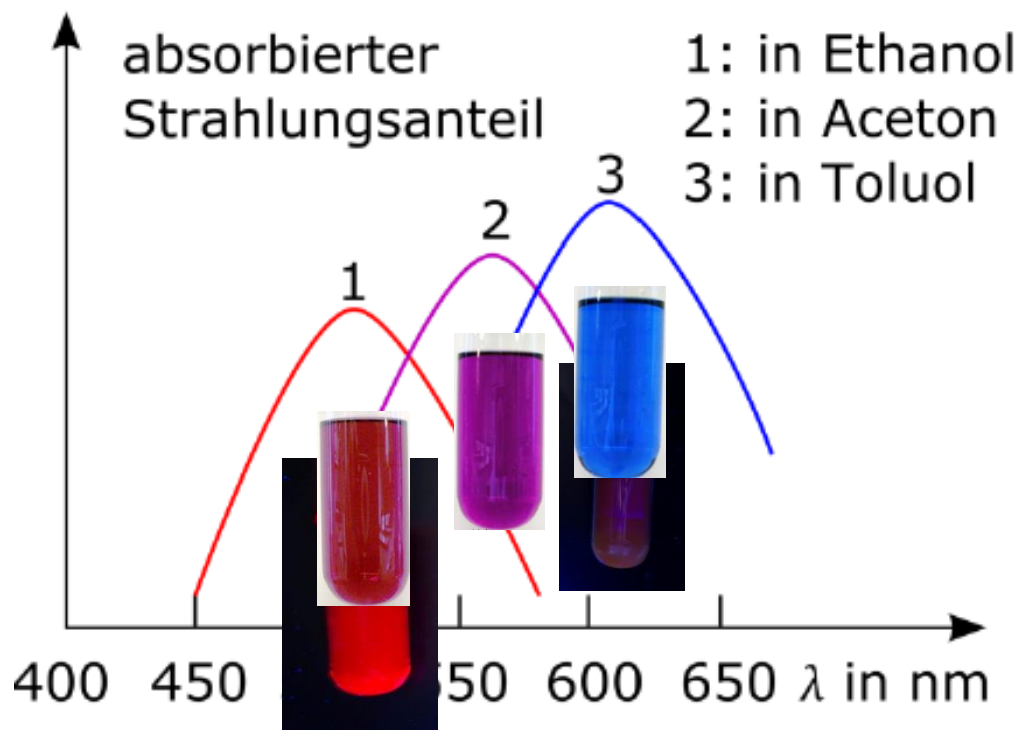
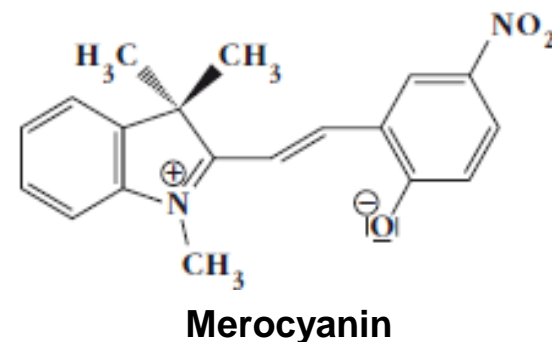
Energy profile  
of the reaction





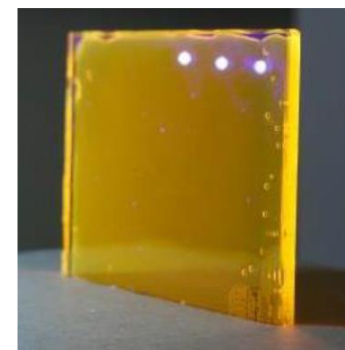
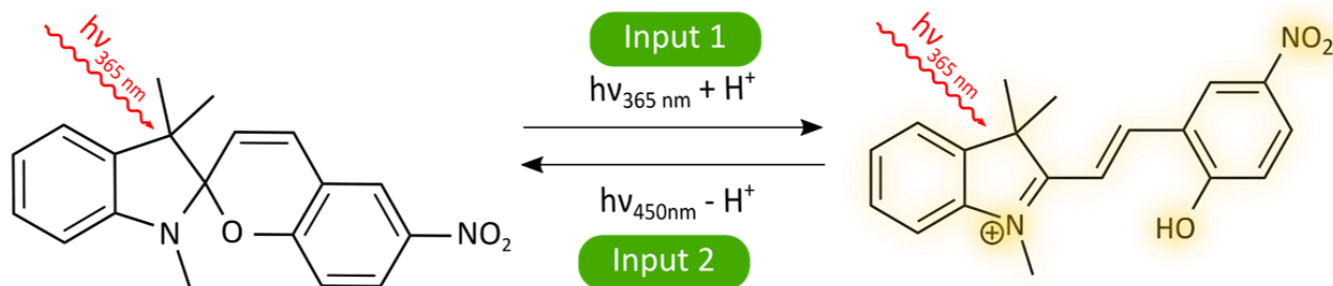
# Die Nano-Umgebung macht's

## Solvatochromie und Lumineszenz von Merocyanin in Lösung

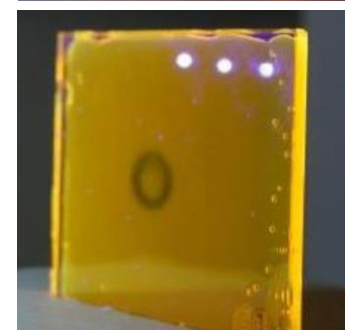
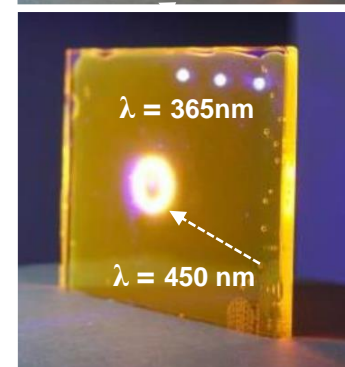
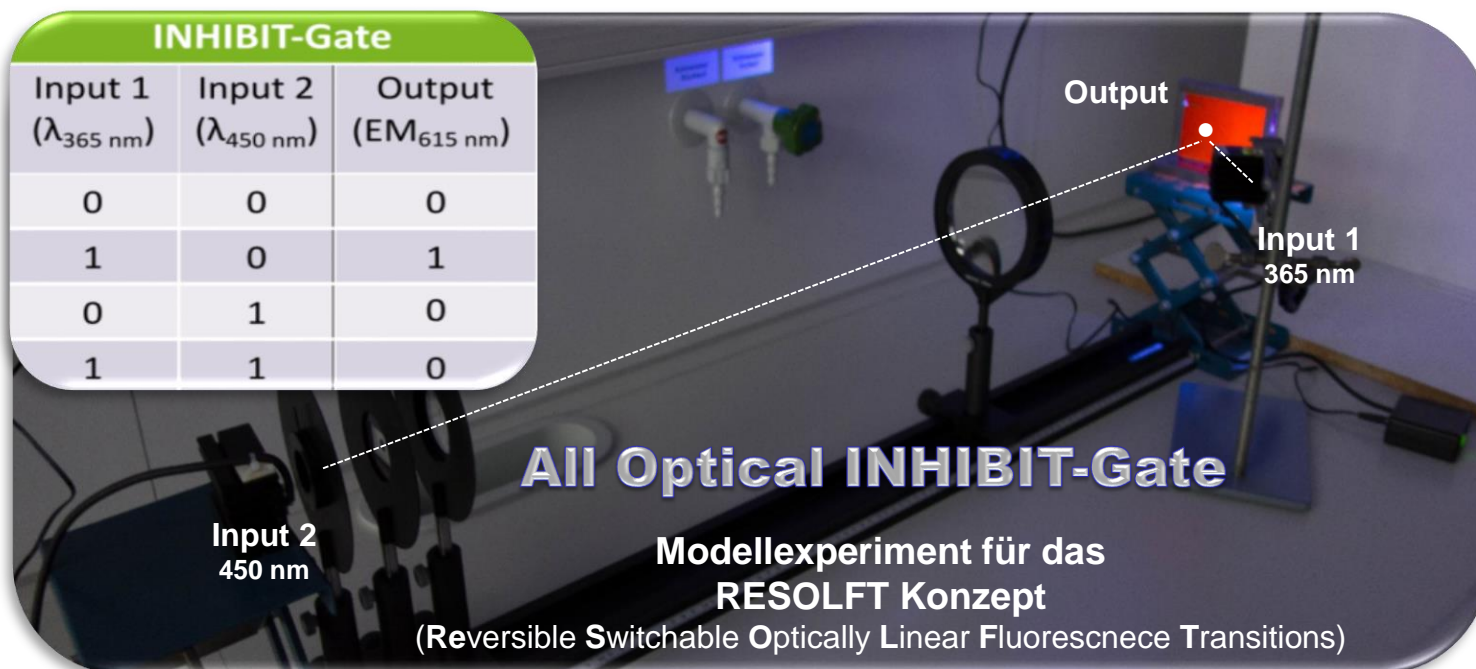


# Molekulare Logik mit SP/ME/MEH<sup>+</sup>

In Feststoffmatrix aus PMMA/TCA



INHIBIT-Gate		
Input 1 ( $\lambda_{365\text{ nm}}$ )	Input 2 ( $\lambda_{450\text{ nm}}$ )	Output (EM <sub>615 nm</sub> )
0	0	0
1	0	1
0	1	0
1	1	0



# Photovoltaik

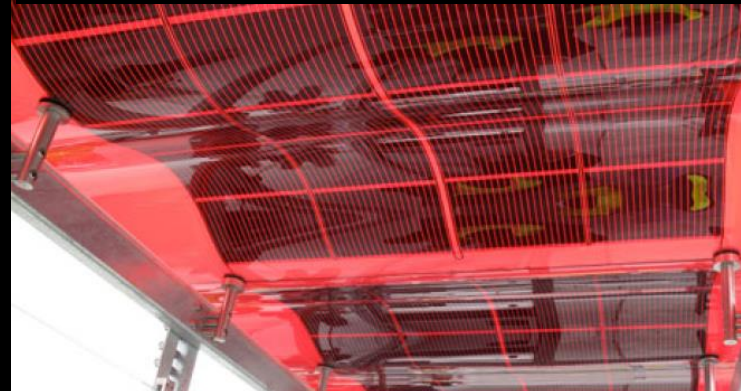


Michael  
Grätzel

Hybride Solarzellen mit  $\text{TiO}_2$



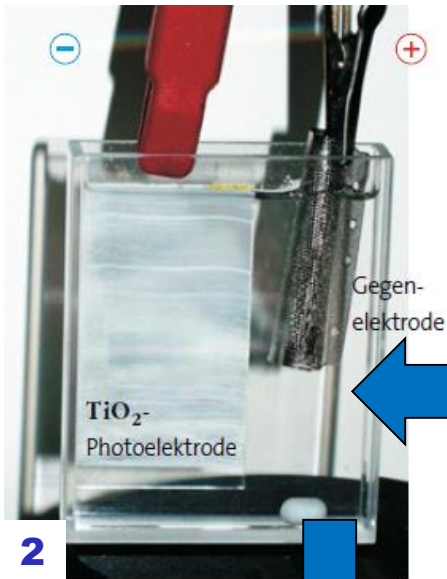
Anorganische Silizium-Solarzellen



Organische Solarzellen



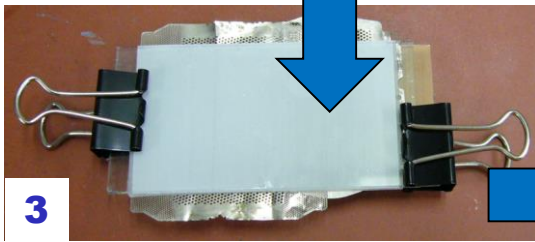
# Vom Daniell-Element zur TiO<sub>2</sub>-Solarzelle



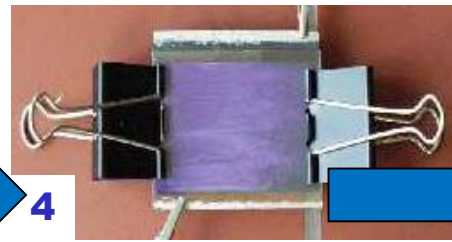
1-Topf-Zelle



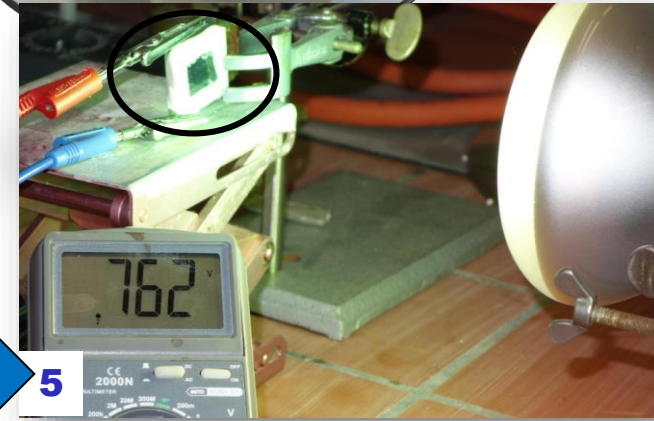
2-Topf-Zelle



Kompakt-Zelle

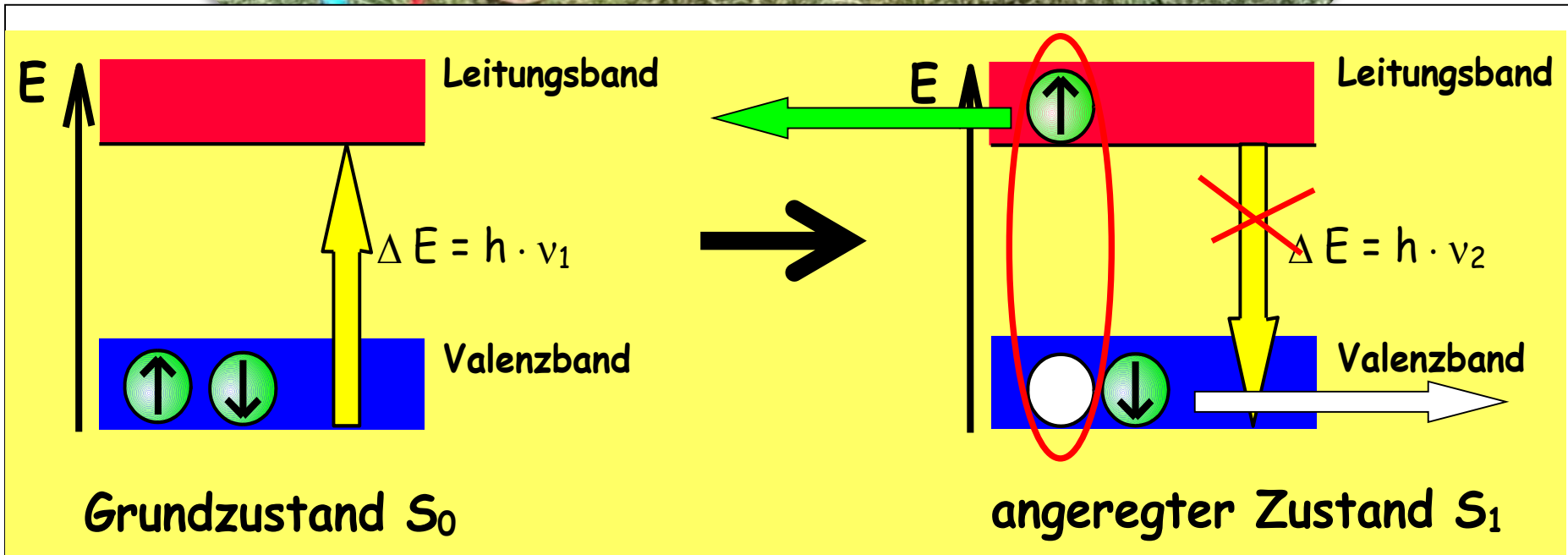


... sensibilisiert

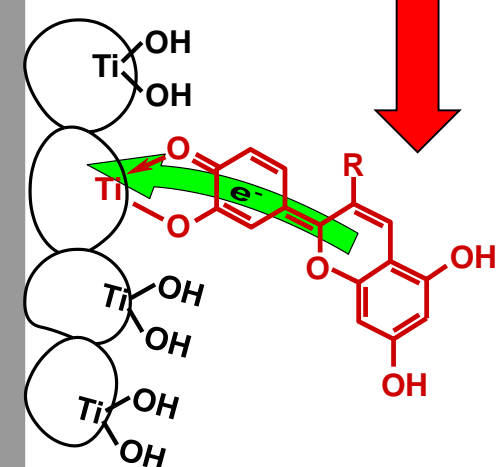
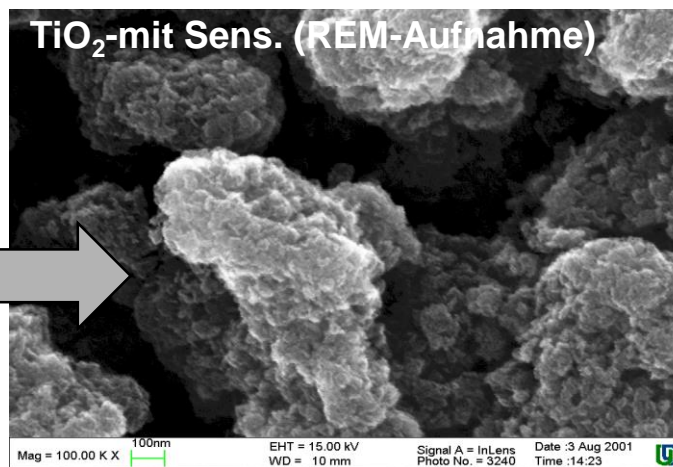
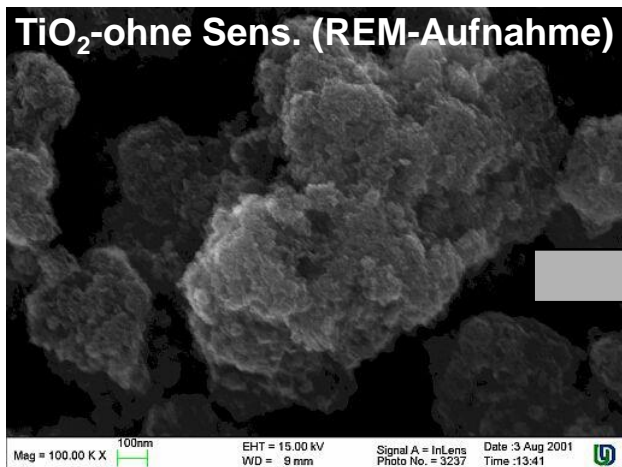
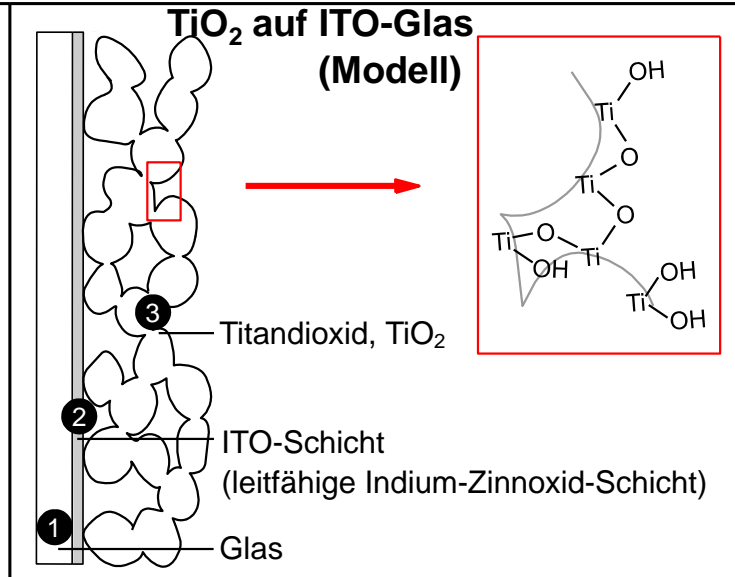
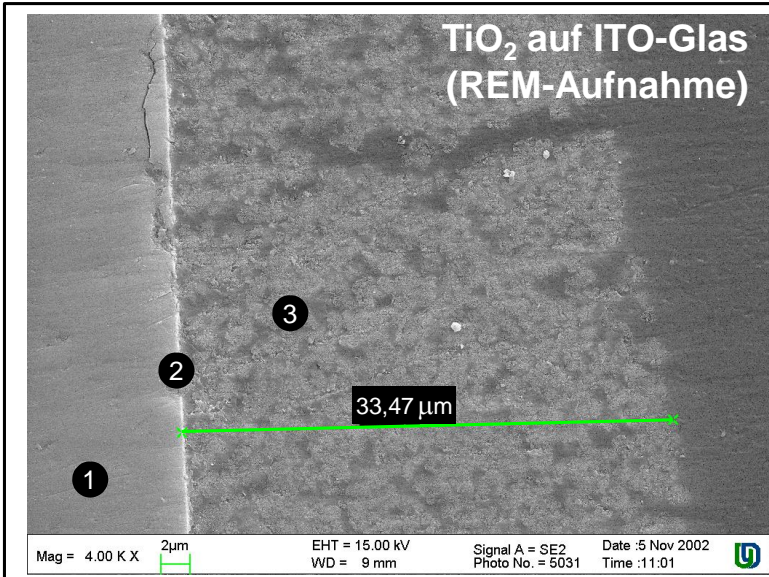


... transparent

# Angeregte Zustände für Photovoltaik



# TiO<sub>2</sub>-Zellen – ohne und mit Sensibilisatoren





# Organische Photovoltazellen OPV

## Experimente & Lehr-/Lernmaterialien

- i** Wie entsteht eine **Bandlücke** in konjugierten Polymeren?
- i** Wie können **Löcher** durch das Polymer wandern?
- i** Wie erfolgt der **Elektronen-Transport** durch die PCBM-Schicht?
- i** Was passiert, wenn ein **Exciton** nicht die **Donor**...

### Organische Photovoltaik

Solarzellen mit photoaktiver Schicht aus organischen Materialien

**Aufbau der Eigenbau-Solarzelle**

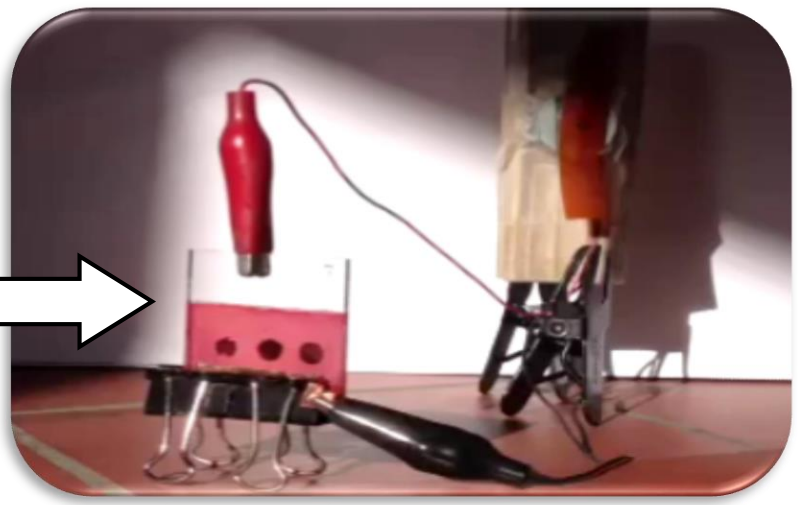
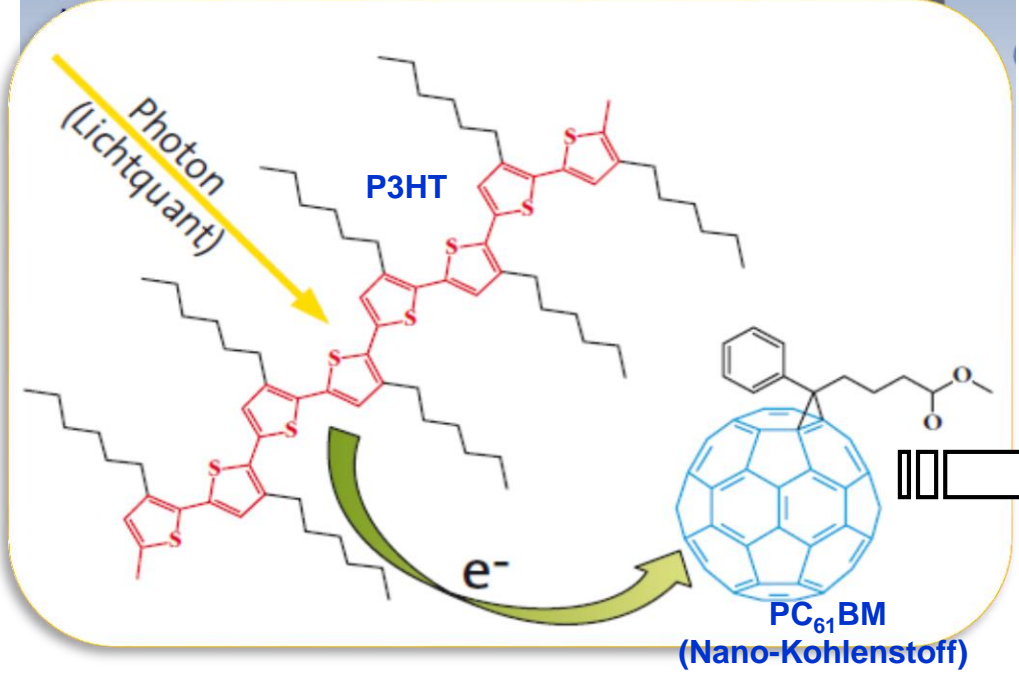
Schritt-für-Schritt-Darstellung des Aufbaus der Eigenbau-Solarzelle im Modell

**Funktionsmodell der Energieumwandlung**

Darstellung der Elementarprozesse in der photoaktiven Schicht - stark vereinfachtes Modell -

**Funktionsmodell der Energieumwandlung im Energieschema**

Darstellung der Elementarprozesse im Energieschema





Experimente-Konzepte-Materialien

## Lichtlabor Pflanze & Künstliche Photosynthese



Che & Bio & Phy & Geo & ...





# Wo können/sollen Photoprozesse ins Chemiecurriculum integriert werden?

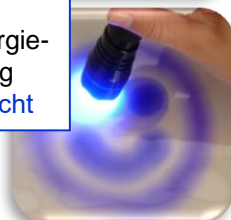
# Curriculare Einbindung

der Inhalte aus dem INTRO-Vortrag

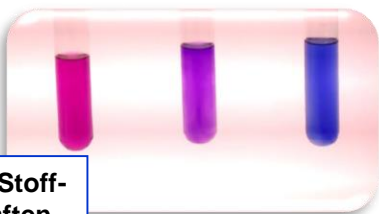


**Chemie, Sek. I**

**Chemische Reaktion**  
Stoff- und Energieumwandlung  
Wärme, ... Licht



**Stoffe und Stoffeigenschaften**  
Farbe - (k)eine Stoffeigenschaft

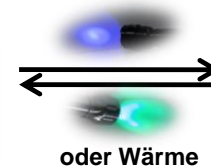


**Chemie, Sek. II**

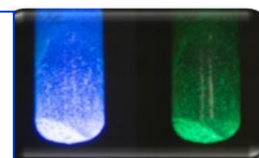
**Redoxreaktionen, Elektrochemie, (Photo)Galvanische Zellen**



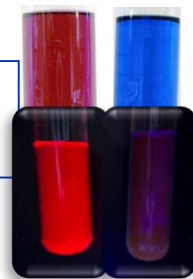
**Chemische Gleichgewichte**  
Isomere, molekulare Schalter  
photostationärer Zustand



**Energetik**  
Lumineszenz  
Lichtquanten,  $E=h\nu$   
Basiskonzept: A/A\*



**Aromaten, Farbstoffe**  
Funktionelle Farbstoffe  
Photo & Nano



**Kunststoffe (elektr. leitende)**  
OLEDs & OPV





- Experimente
- Filme & Videos
- Modelle & Animationen
- Experimentierkoffer, Materialiensets
- Kontexte & Anwendungen
- Vorträge & Workshops

<https://chemiemitlicht.uni-wuppertal.de/de/>  
 Prof. Dr. Michael W. Tausch

# Chemie mit Licht - Innovative Didaktik für Studium und Unterricht



Photo-Mol



Photo-Cat



ChEMTiO<sub>2</sub>



organic photo electronics


# Danke

**DFG** Deutsche  
Forschungsgemeinschaft



**BEILSTEIN INSTITUT**

Ministerium für  
Schule und Weiterbildung  
des Landes Nordrhein-Westfalen



**Bayer HealthCare**

**WACKER**



Prof. Dr. Claudia Bohrmann-  
Linde (W)  
Prof. Dr. Simone Kröger (MS)  
Prof. Dr. Amitabh Banerji (K)  
Dr. Ralf-Peter Schmitz  
Dr. Bernd Rohe  
Dr. René Krämer  
Dr. Maria Heffen  
Dr. Ibeth Rendon-Enriquez  
Dr. Heidrun Geller  
Dr. Melanie Zepp  
Dr. Nico Meuter  
Dr. Sebastian Spinnen  
Dr. Yasemin Yurdanur  
Dr. Heiko Hoffmann

Rainer Brunnert  
Richard Kremer  
Nuno Pereira Vaz

Ingrid Reisewitz-Swertz  
Renate Gärtig

Saskia Ruckebier u.v.a.