

# Chemie mit Licht

INTRO-Vortrag zum Workshop  
„Lichtlabor Pflanze und künstliche Photosynthese“

Aktueller Stand  
Wiss.&Tech.

Lehre der NW  
Schule&Uni

Michael W. Tausch  
Schwerin, 2023



# Licht

## schon kurz nach der Geburt des Universums ...

**Urknall bei  $t = 0$**

vor ca.  $13,7 \cdot 10^9$  Jahren  
(Urknall = Singularität)

Planck-Ära („gesetzlos“):

bis  $10^{-43}$  s und  $10^{-35}$  m

$D = 10^{94}$  g/cm<sup>3</sup>;  $T = 10^{32}$  K

nach  $t = 1$  s;  $T = 10^{10}$  K

nach  $t = 10$  s;  $T = 10^9$  K

(H, He, Li; Plasma)

nach 380.000 Jahren: Entkopplung  
von Strahlung und Materie

nach 100 Mio Jahren: Entstehung  
erster Galaxien

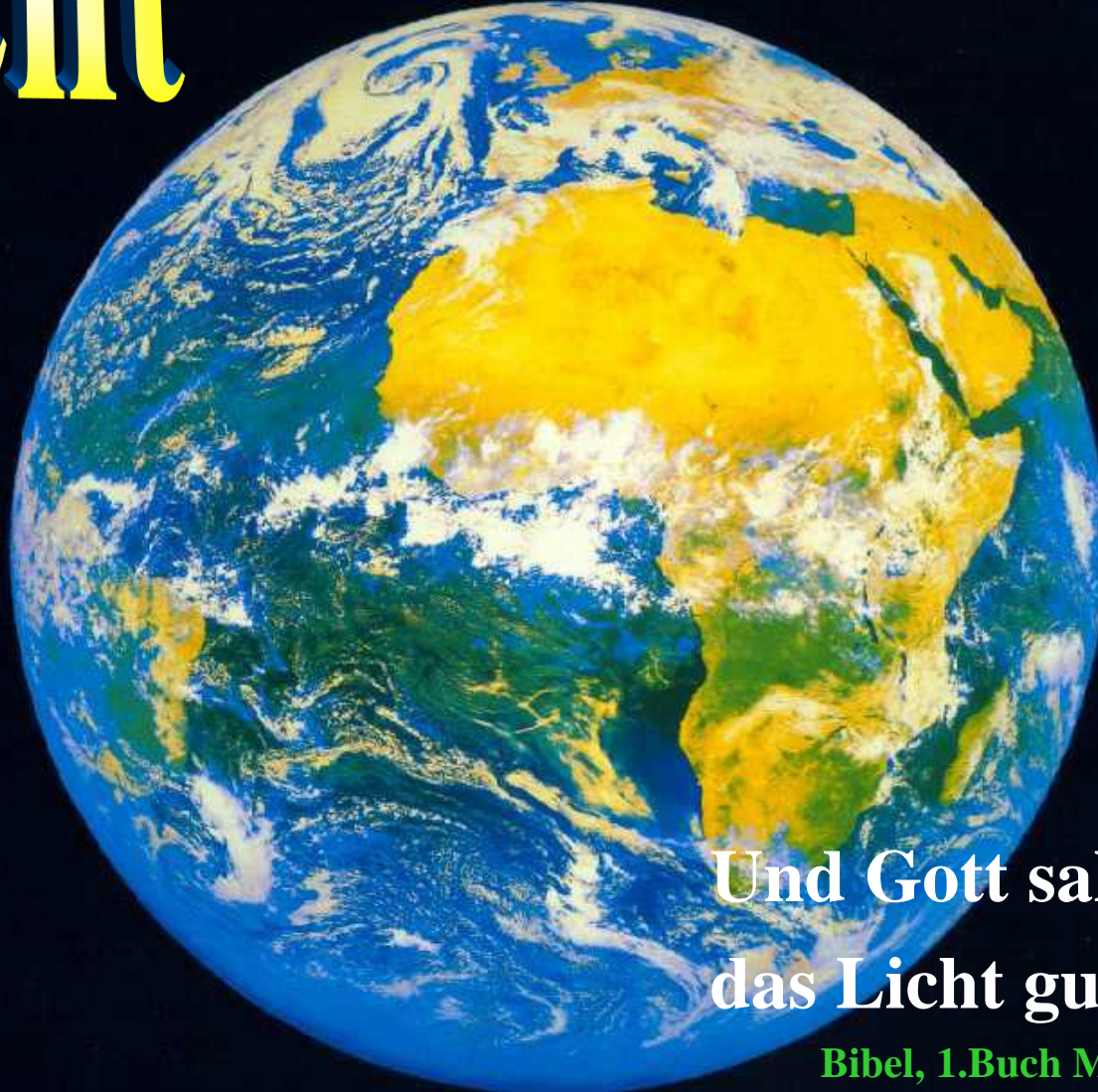
**Und Gott sprach:  
„Es werde Licht.“**

**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



**Antrieb von Chemie  
mit**



**Antrieb von Chemie  
mit**



**Rethinking  
Chemistry**



# Warum sind Photoprozesse relevant für Unterricht & Studium?



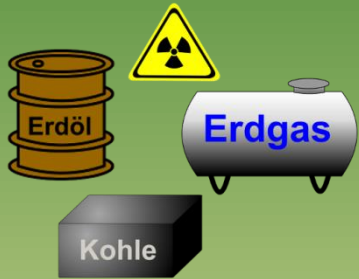
**Energie**  
**Klima**  
**Mobilität**  
**Wasser**  
**Ernährung**

## „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>

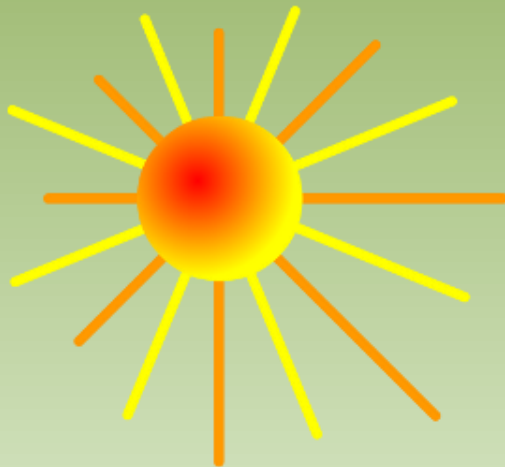


# $E(\text{Sonne/a}) = 100 \times \text{Weltreserven}$



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]

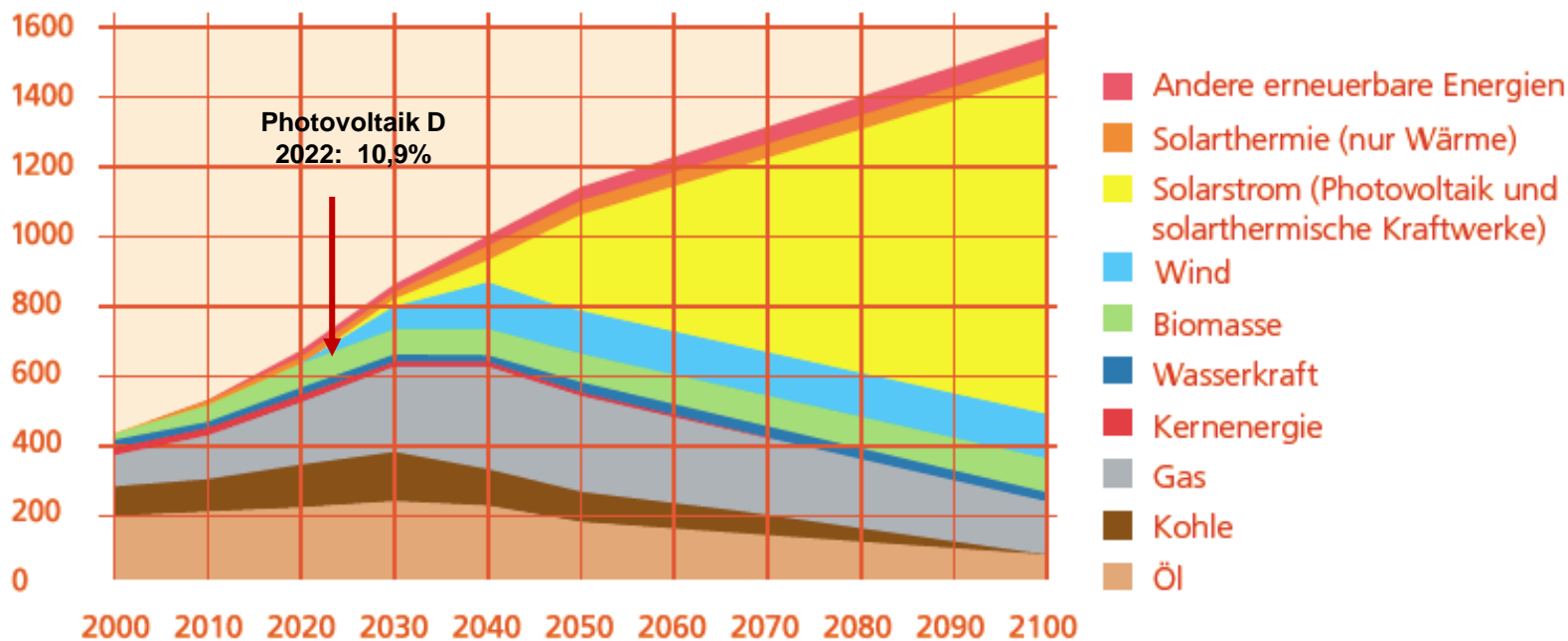
„Es ist eine wenig bekannte Tatsache, dass die Sonne uns jeden Tag den gesamten weltweiten Energiebedarf für acht Jahre liefert.“ [2]



# Globaler Energiemix bis 2100

## Immer mehr Strom von der Sonne

Jährlicher Primärenergieeinsatz  
(Etagoule pro Jahr)



Quelle: WBGU (Wiss. Beirat Globale Umweltveränderungen) des BMBF; September 2013





# 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

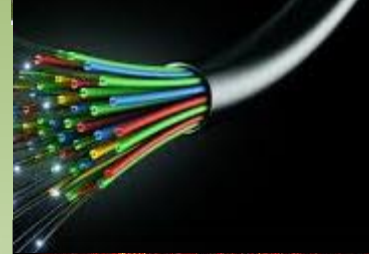
## Life Science:

- 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**

**INFORMATIK**

**PHYSIK**

**LEDs, OLEDs, Photovoltaik und Photogalvanik**

**Photoreaktor Atmosphäre**

Digitalisierung mit photoaktiven molekularen Schaltern



# Licht in der Lehre der MINT-Fächer

## Interdisziplinär - Experimentbasiert - Lehrplankonform



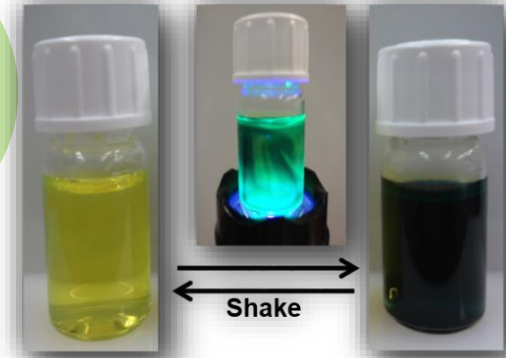
H<sub>2</sub> in der PBB - 1-Topfzelle

### Künstliche Photosynthese

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

### Kohlenstoffkreislauf

Modell-experimente zum biochemischen Kreislauf Photosynthese & Zellatmung



PBB - Basisexperiment

### Photovoltaik

Anorganische Organische und Hybride Solarzellen



TiO<sub>2</sub> - 1-Topfzelle

# MINT Fächer

im 21. Jahrhundert

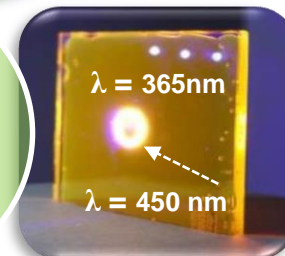
INFORMATIK

### INHIBIT-Gate

Input 1 (λ <sub>365 nm</sub> )	Input 2 (λ <sub>450 nm</sub> )	Output (EM <sub>615 nm</sub> )
0	0	0
1	0	1
0	1	0
1	1	0

### Molekulare Logik & Nano-Motoren

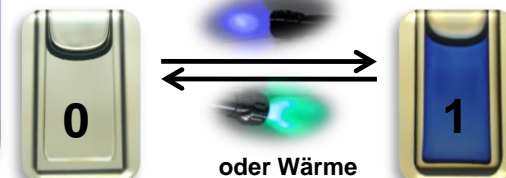
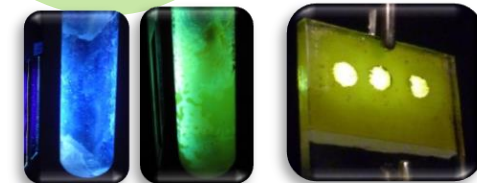
Photoaktive molekulare Schalter & Materialien



Modellexperiment zum RESOLFT - Konzept

### LICHTenergie Konversion & Speicherung

Lumineszenz & Photoreaktionen allgemein



Lumineszenz & Photoreaktionen



# Licht in der Lehre der MINT-Fächer

## Warum hat die Chemie Vorreiterfunktion?



Demo-Set

Photo-Cat

### Künstliche Photosynthese

Photokatalytische Herstellung von „grünem“ Wasserstoff & Reduktion von  $\text{CO}_2$

### Kohlenstoffkreislauf

Modell-experimente zum Kreislauf Photosynthese & Zellatmung



Basis-Set

Photo-Cat

### Photovoltaik

Anorganische, Organische & Hybride Solarzellen



CheMTiO<sub>2</sub>



OrganicPhoto Electronics

# MINT Fächer

im 21. Jahrhundert

### INFORMATIK

### Molekulare Logik & Nano-Motoren

Photoaktive molekulare Schalter & Materialien



### LICHTenergie Konversion & Speicherung

Lumineszenz & Photoreaktionen allgemein



Photo-Mol

Chemie beschreibt die Wechselwirkung von Licht mit Stoffen anhand 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.

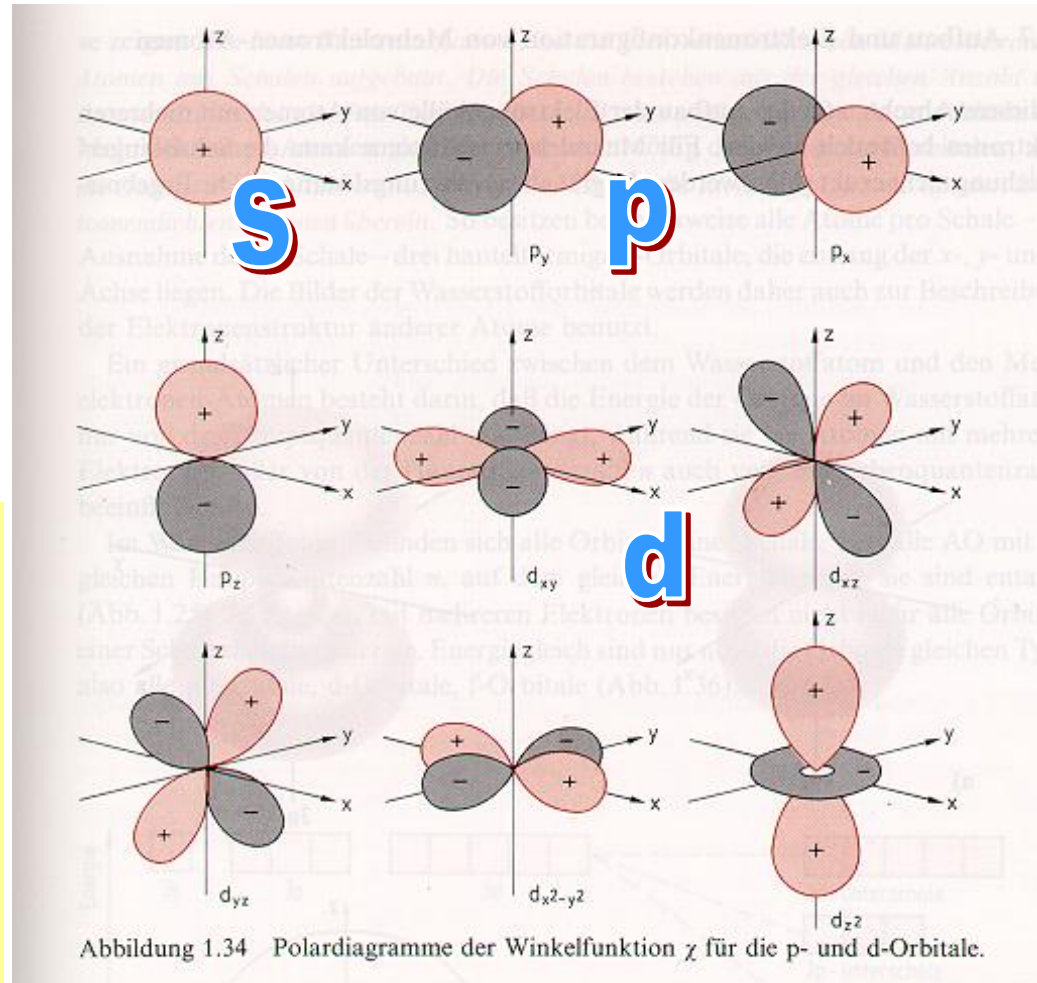


Abbildung 1.34 Polardiagramme der Winkelfunktion  $\chi$  für die p- und d-Orbitale.





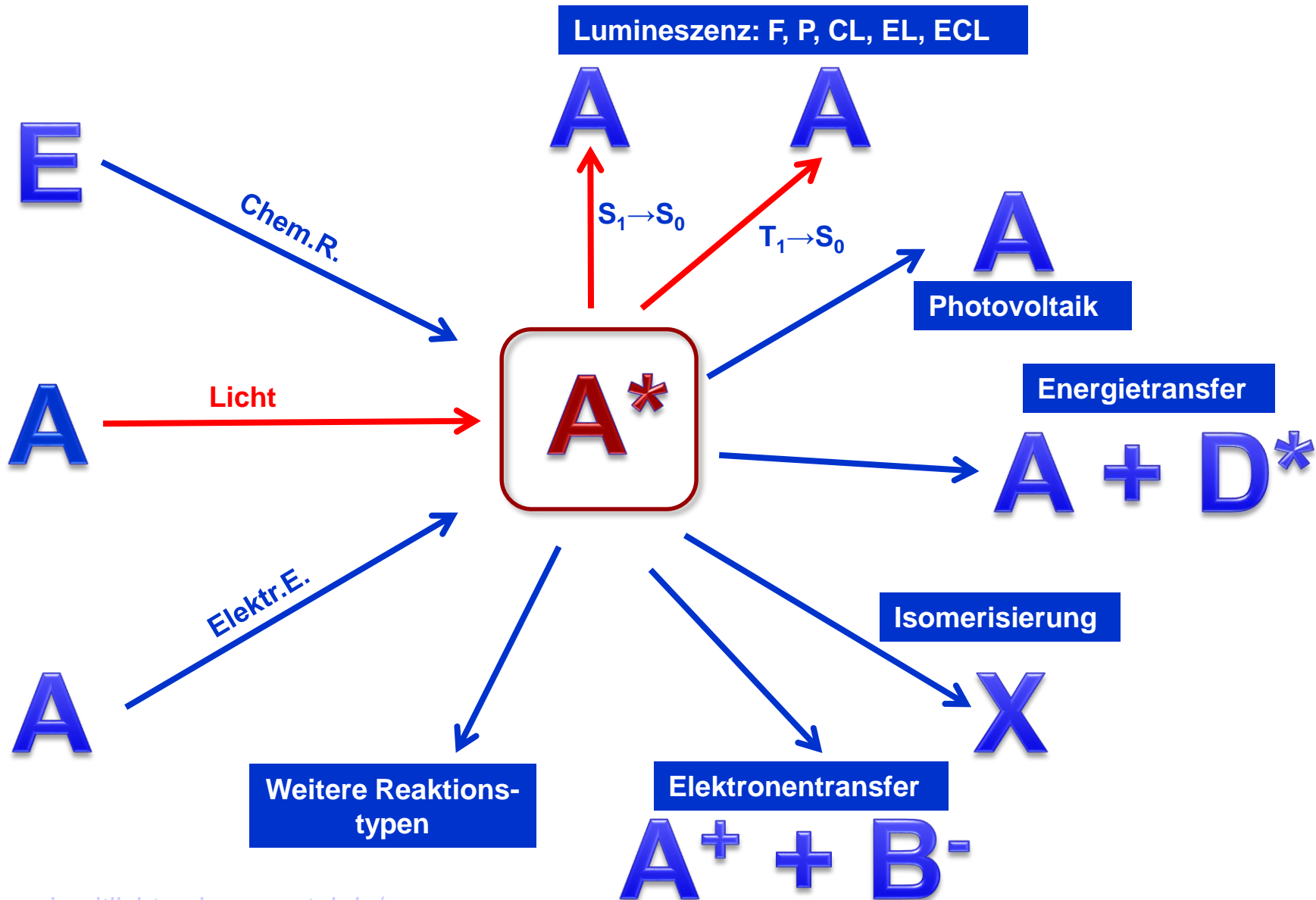
# Angeregte Zustände

**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.“

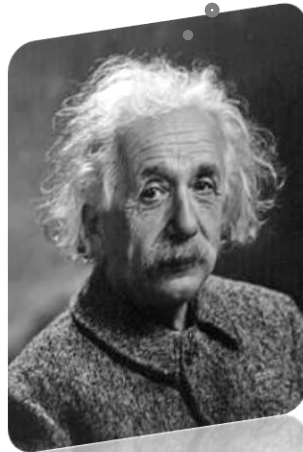
N. J. Turro,  
Modern Molecular Photochemistry.  
Benjamin/Cummings, N.Y. (1978)







$$E = mc^2$$



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

A. Einstein 1955

## Wie ist ein „hübsches“ Experiment?

- attraktiv & schön
- sicher & clean
- schnell & einfach
- erhältlich & günstig
- nachhaltig & relevant
- didaktisch prägnant
- wissenschaftlich konsistent



# 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**



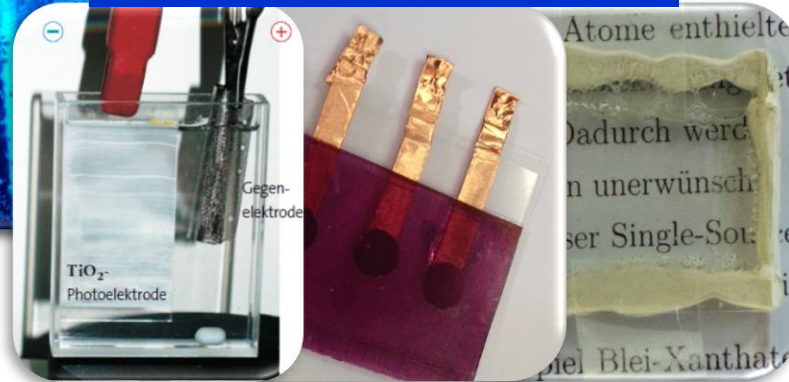
**Nuno Pereira Vaz**



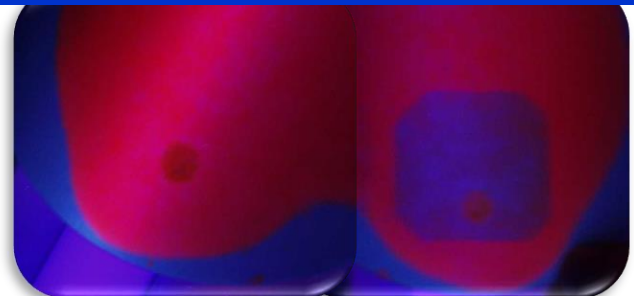
Lumineszenz: F, P, CL, EL, ECL



Anorg. & Org. Photovoltazellen

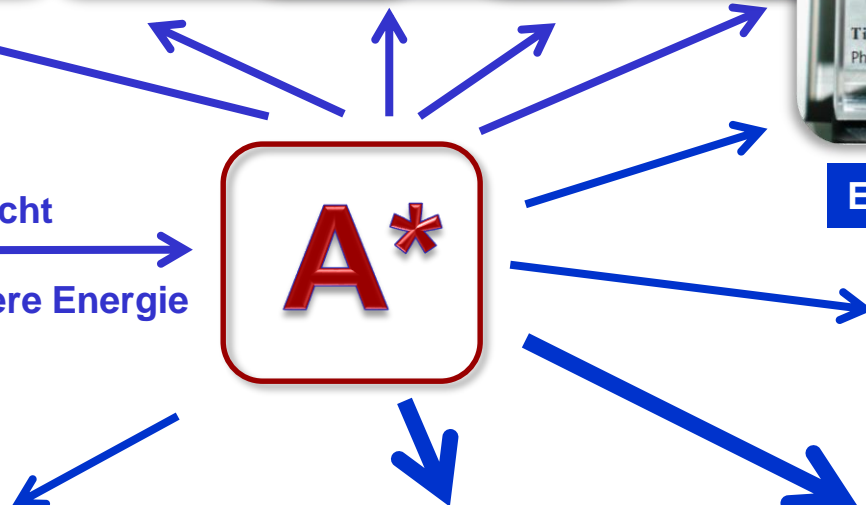


Energietransfer/ Photosensibilisierung



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

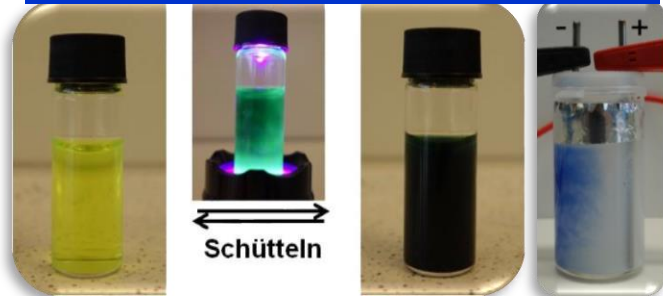
**A\***



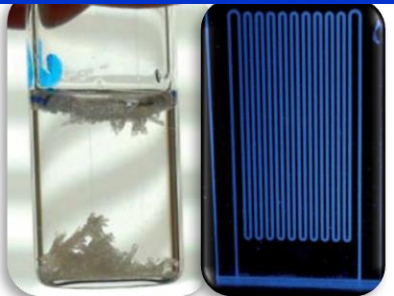
Isomerisierung (E/Z und andere)



Elektronentransfer / Photoredox



Weitere Reaktionen





# Experimente und Energienstufenmodell

für den Unterricht von:

- **Lumineszenz & Farbe**
- **Photochromie, Solvatochromie & Gleichgewichte**
- **Photovoltaische Solarzellen**
- **Photo-Redoxreaktionen & Photokatalyse**  
(Workshop nach dem INTRO-Vortrag)



# Farben und Leuchtfarben Fluoreszenz

bei Tageslicht



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

Geeignet  
auch für die  
Sek. I

im UVLicht



**Weinender  
Kastanienzweig**

**Textmarker**



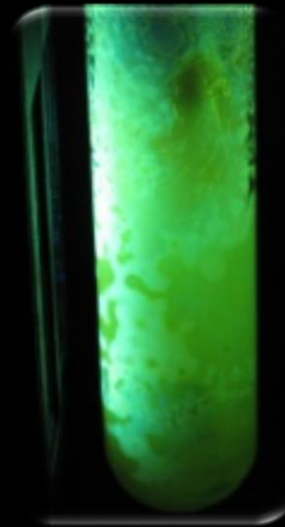
# Photolumineszenz

## Experimente zum Energiestufenmodell

Fluoreszenz



Phosphoreszenz

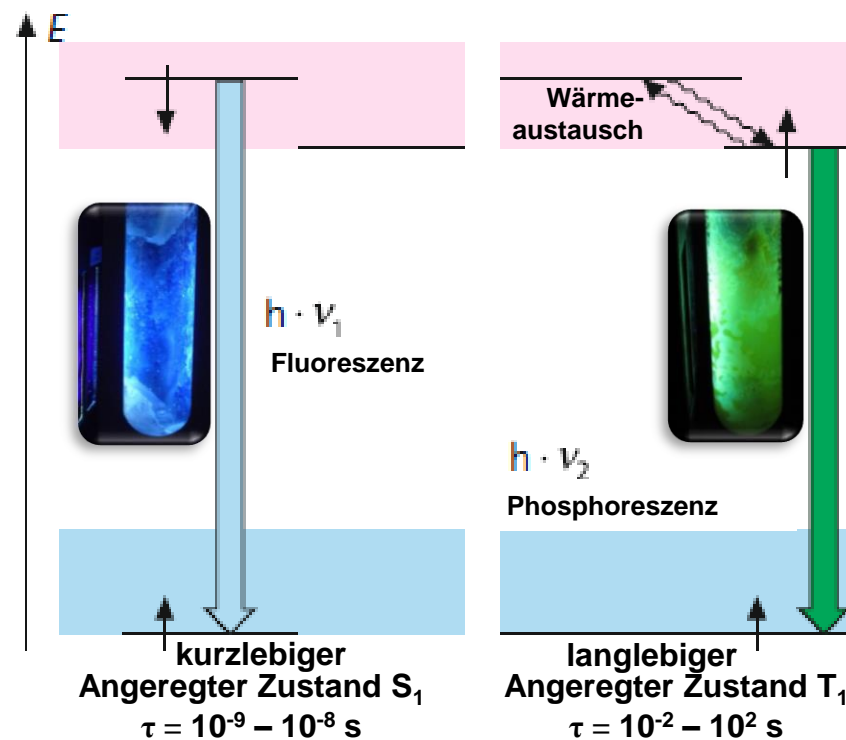
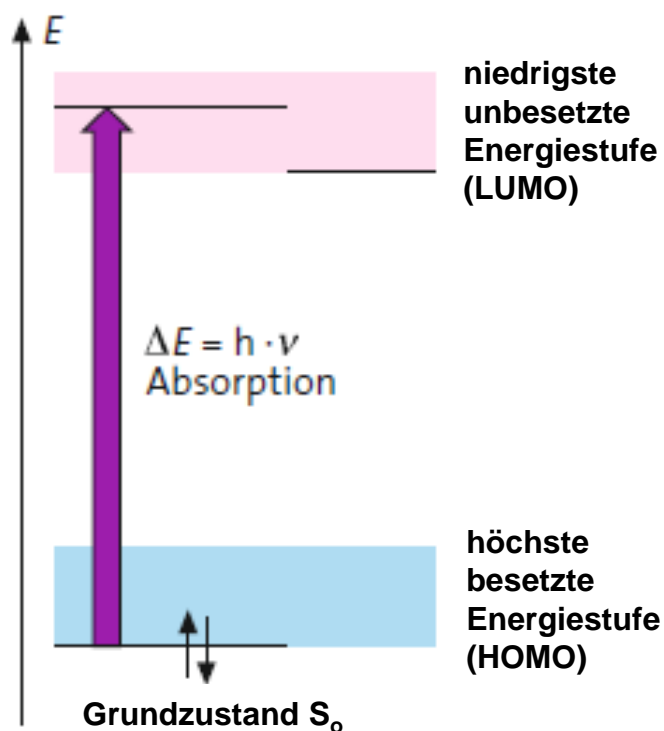




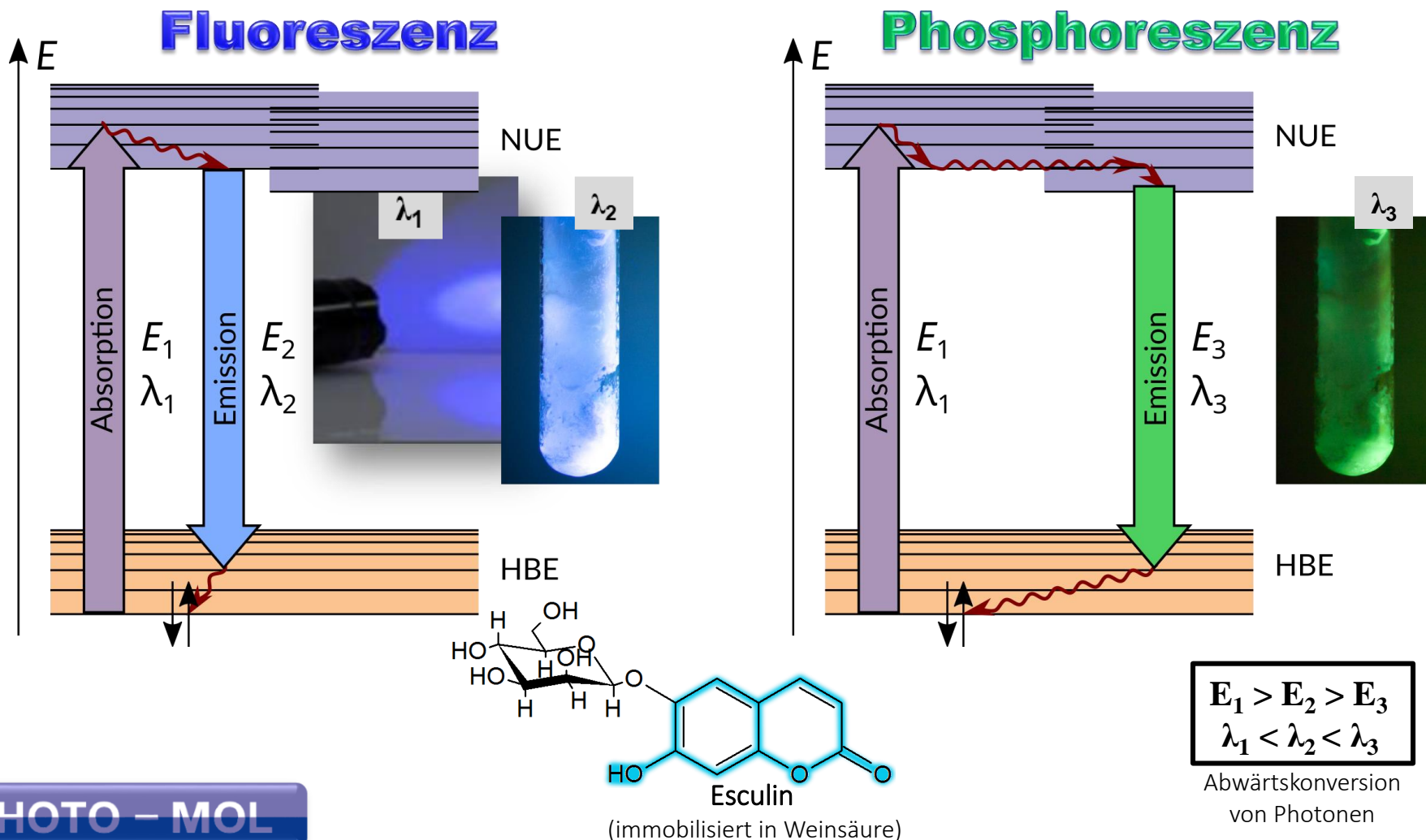
**Paradigma:** „ ... der elektronisch angeregte Zustand ist das Herz aller  
Photoprozesse .“

N. J. Turro, 1978

## Das Energiestufenmodell – Ein Schlüsselkonzept in der Chemie



# Photolumineszenz





## Fluoreszenz & Phosphoreszenz

### UV Taschenlampe 12 UV LED 12W Flashlight 395nm für 7,99 €\* .

Auf Lager · Marke: DIPON®12 UV LED 12 W UV Taschenlampe 12 UV LED 12 Watt UV FlashlightLeistungsstarke hochwertig verarbeitete UV LED Taschenlampe bestehend aus 12 UV LED mit ..

<https://www.google.com/search?client=firefox-b-d&q=multicolor+led+taschenlampe>



### Esculin - Bezugsquelle

Carl Roth Deutschland

Best.-Nr. 8704.1

CAS Nr. 66778-17-4

EG-Nr. 208-517-5

5G      23,50 €

Folgender Link führt zu dem Produkt:

<https://www.carlroth.com/de/de/naehrmedienzusaetze/esculin-sesquihydrat/p/8704.1>



# Chemo- Bio- & Elektrolumineszenz

## Experimente zum Energiestufenmodell

### Chemolumineszenz

Schütteln mit Luft



... Einleiten von  
Stickstoff



... Einleiten von  
Sauerstoff



### Biolumineszenz



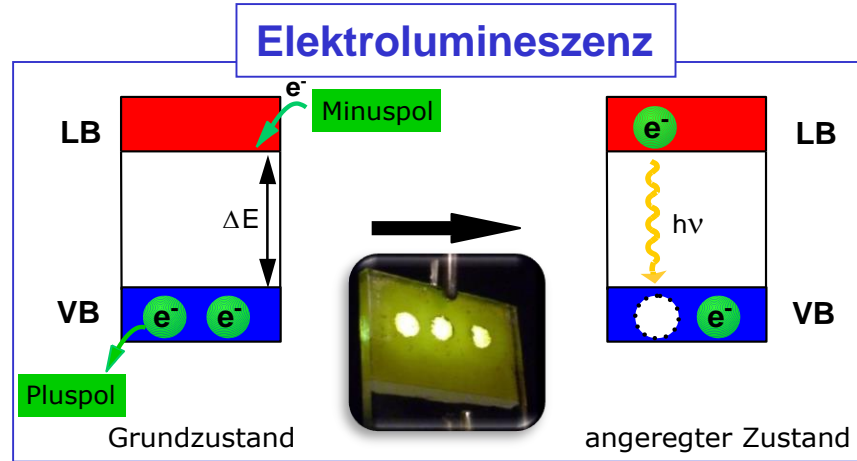
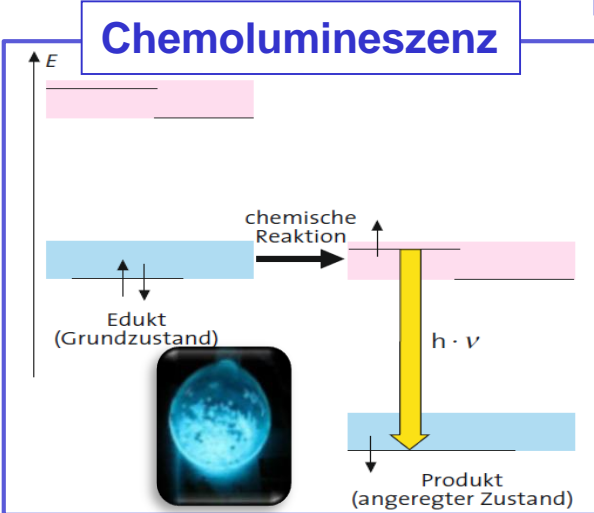
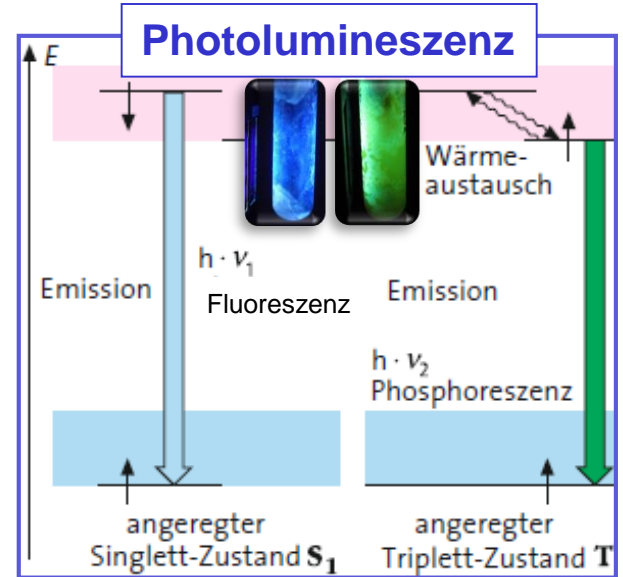
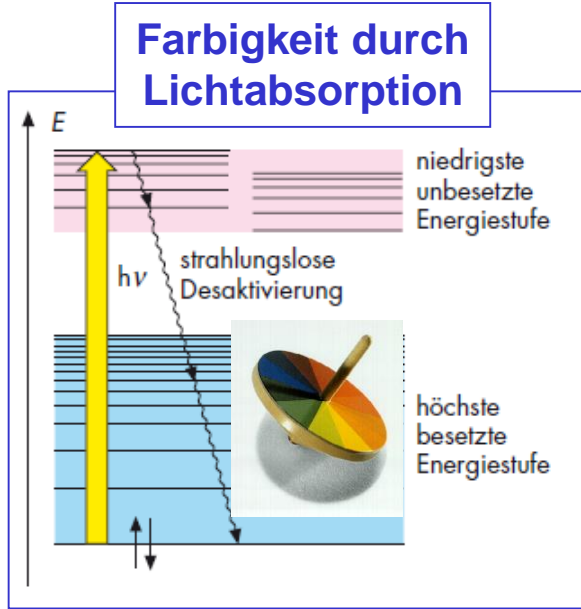
### Elektrolumineszenz



# Energiestufenmodell: Lumineszenz und Farbe

**Chemisches Basiskonzept**

Das Konzept vom Grundzustand und elektronisch angeregten Zuständen



# Lumineszenz und Farbe

Alltag - Natur - Technik - Wissenschaft



OLED-Display



OLED-Fernseher

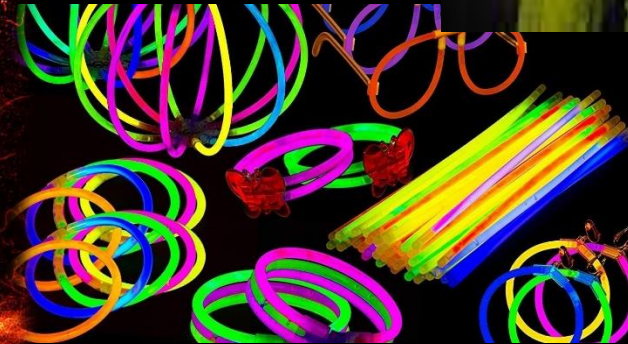


Fluoreszierende  
Sicherheitskleidung



Stefan Hell  
NP Chemie 2014

Superauflösende Mikro- und  
Nanoskopie (< 200 nm)



Chemolumineszenz in Knicklichtern



Biolumineszenz  
im Leuchtkafer

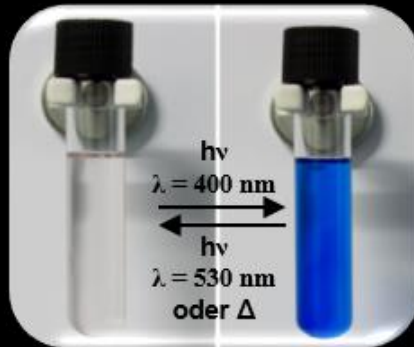
**Che & Phy & Bio & Inf**

# Photochromie, Solvatochromie & Gleichgewichte

## Experimente zum Energiestufenmodell

### Photochromie

reversible Farbschaltung mit Licht



### Solvatochromie

gleicher Stoff - verschiedene Lösemittel



Ethanol

Aceton

Toluol

Geeignet  
auch für die  
Sek. I

**Stoffe und Stoff-  
eigenschaften**  
Farbe - (k)eine  
Stoffeigenschaft

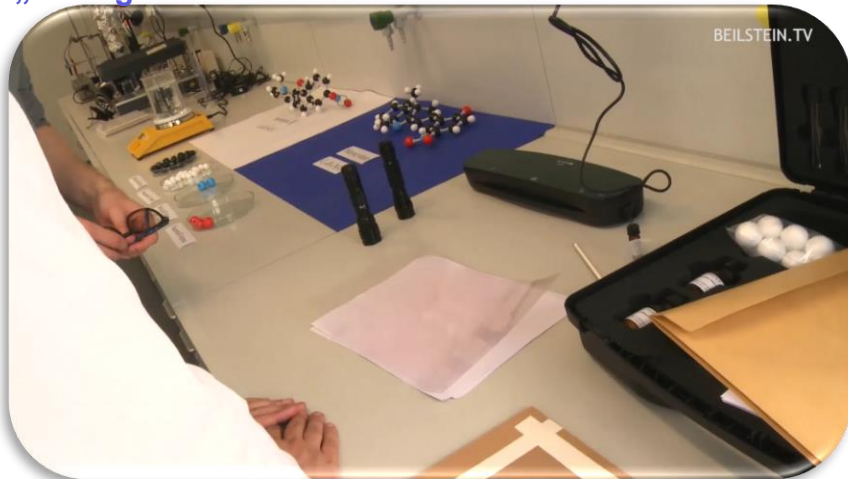
**Chemische Reaktion**  
Stoff- und Energie-  
umwandlung  
Wärme, ... Licht



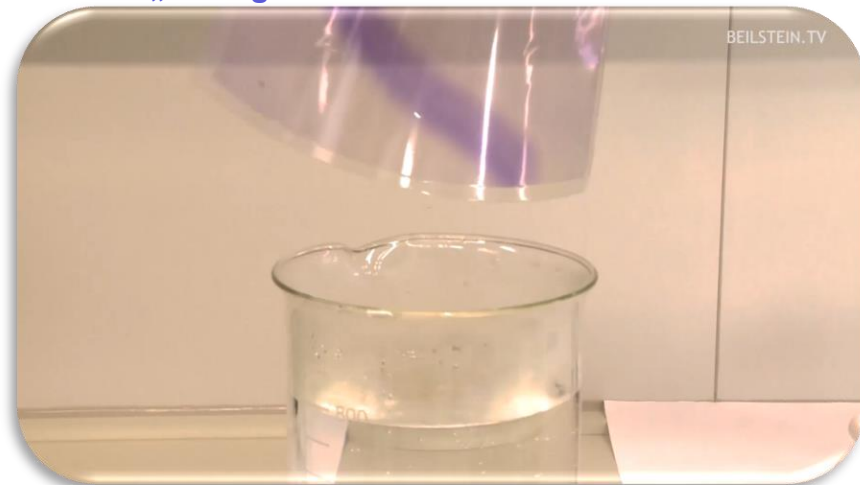
„Intelligente“ Folie

## Spiropyran - ein didaktisches Juwel

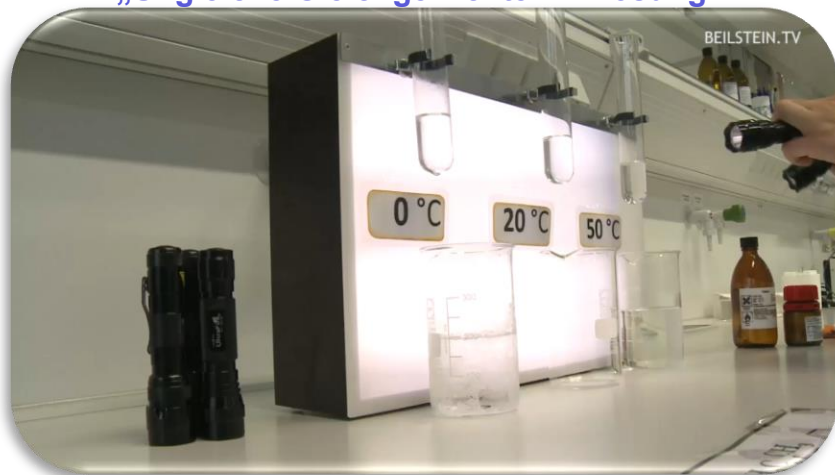
„Intelligente Folie“: Schreiben und Löschen mit Licht



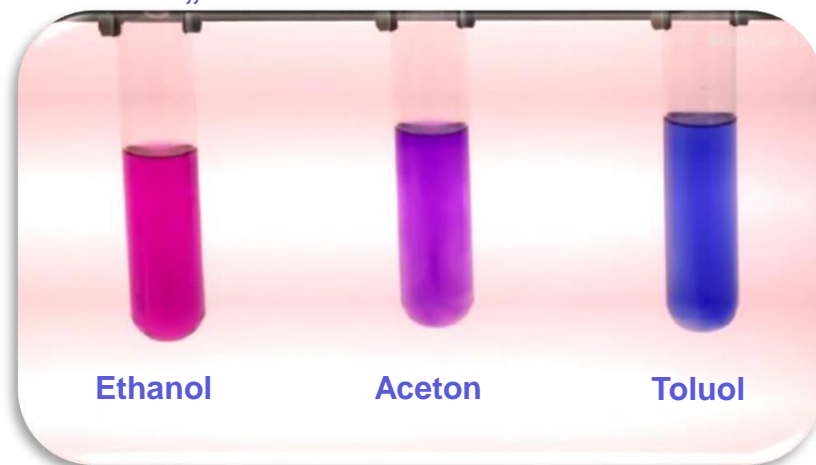
„Intelligente Folie“: Löschen mit Wärme



„Ungleiche Gleichgewichte“ in Lösung

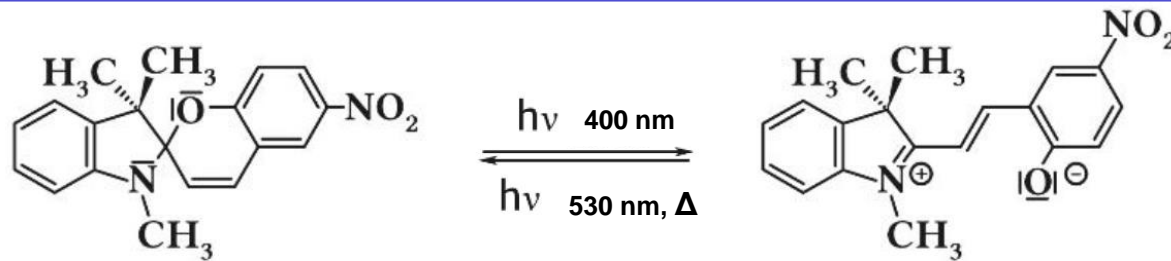


„Ein chemisches Chamäleon“

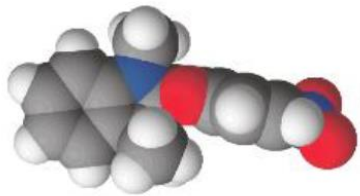




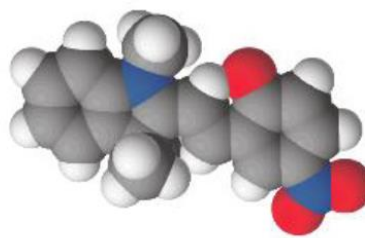
# Spiropyran - ein didaktisches Juwel



Spiropyran



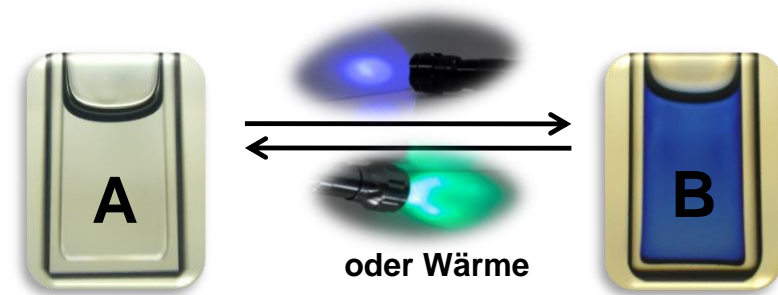
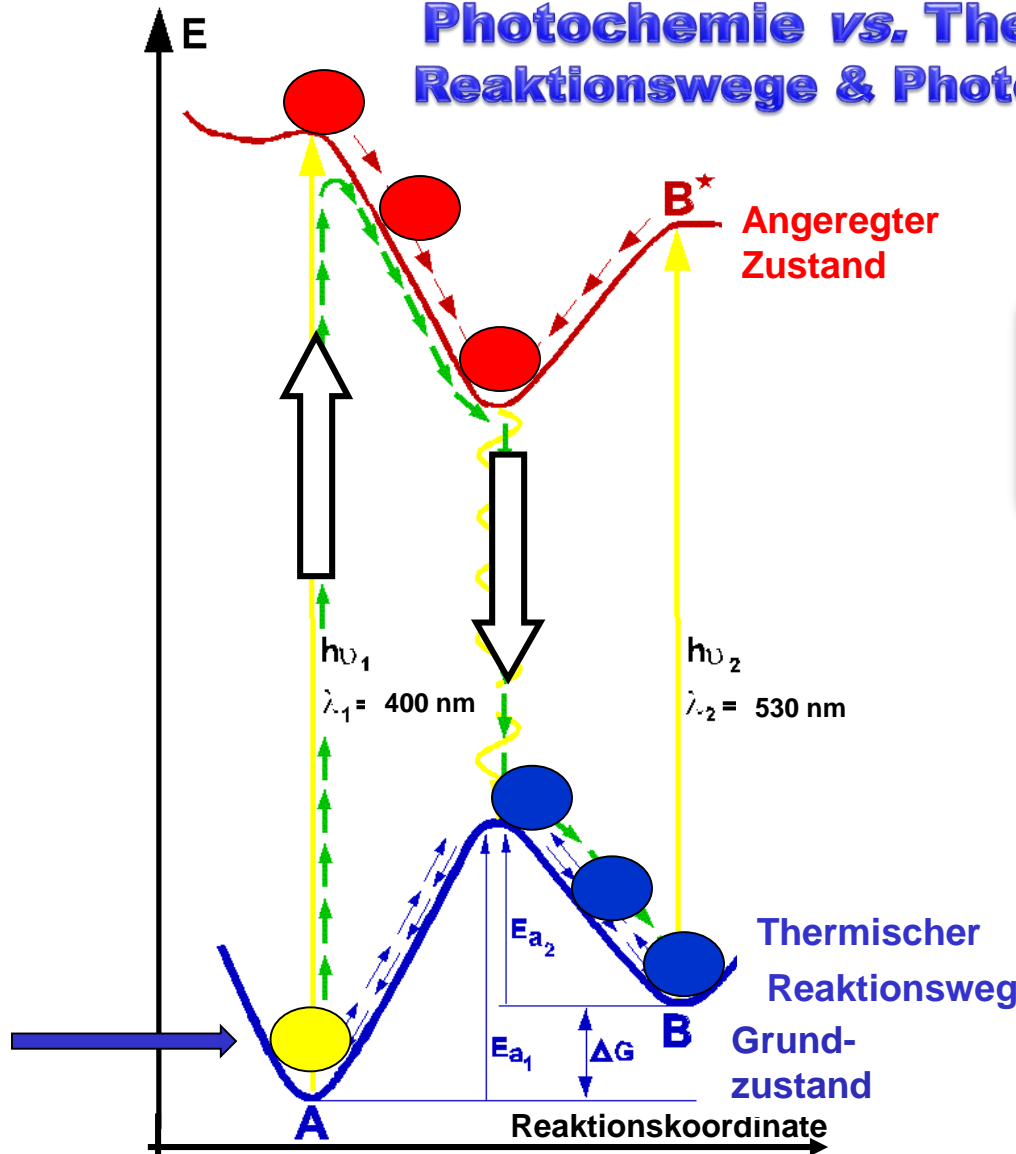
Merocyanin



## Adressierbare Lehrinhalte in der Sek. II:

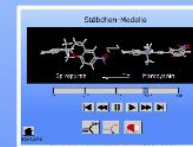
- ⇒ Molekulare Schalter; ⇒ Photochromie; ⇒ Solvatochromie; ⇒ AIE;
- ⇒ Relation: Molekülstruktur / Lichtabsorption und -emission / Farbe;
- ⇒ Reaktionswege photochemischer und thermischer Reaktionen;
- ⇒ Abhängigkeit: Reaktionsgeschwindigkeit / Temperatur
- ⇒ Thermodynamisches Gleichgewicht vs. Photostationarität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

## Photochemie vs. Thermochemie Reaktionswege & Photostationarität

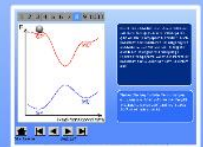


### Photo-steady state

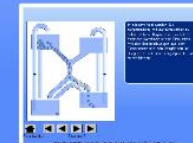
Exploration  
of the concept  
with the  
substance  
spiropyrane



Molecular structures  
of spiropyrane/merocyanine



Energy profile  
of the reaction

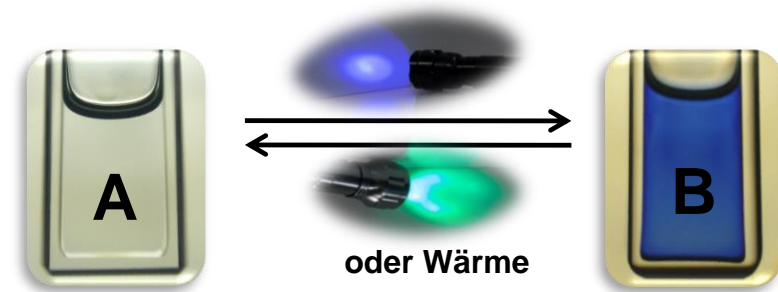
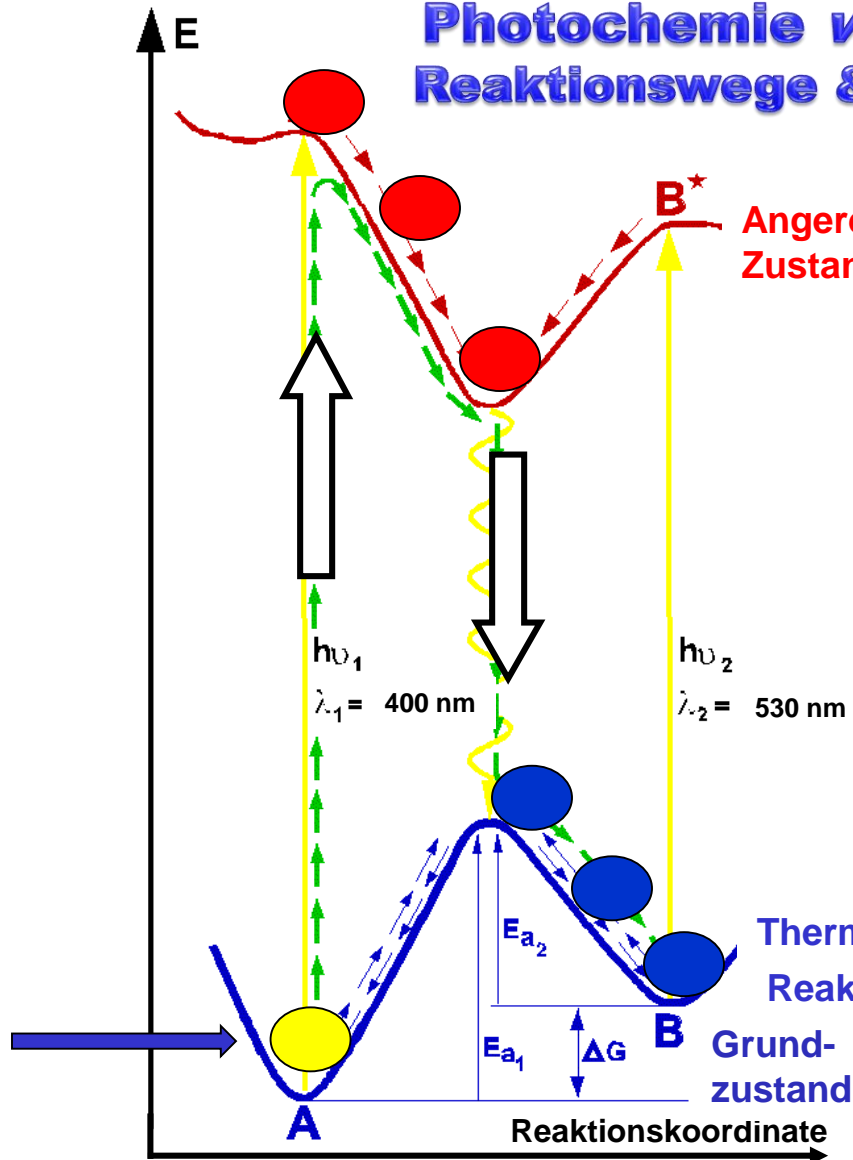



Simulation based on  
discrete particle model



Simulation based on  
continuous matter model


## Photochemie vs. Thermochemie Reaktionswege & Photostationarität



Photostationärer Zustand 

Stoffmengenverteilung

64%  36%

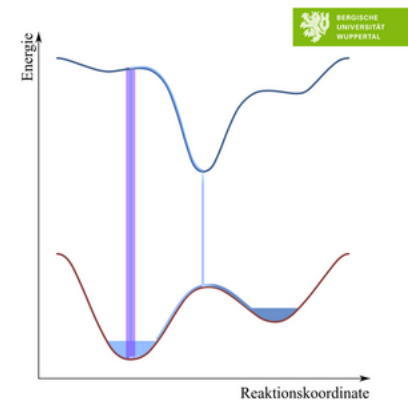
 Animation abspielen

Gleichgewichtsbeeinflussung

Temperatur  26 °C

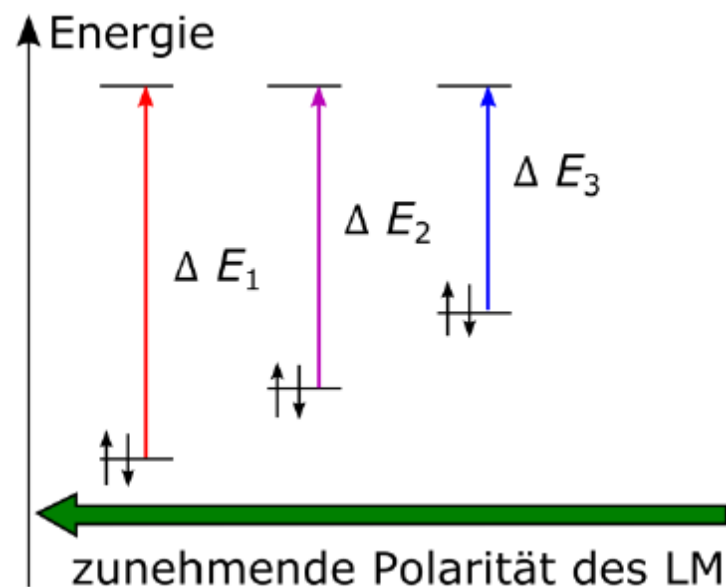
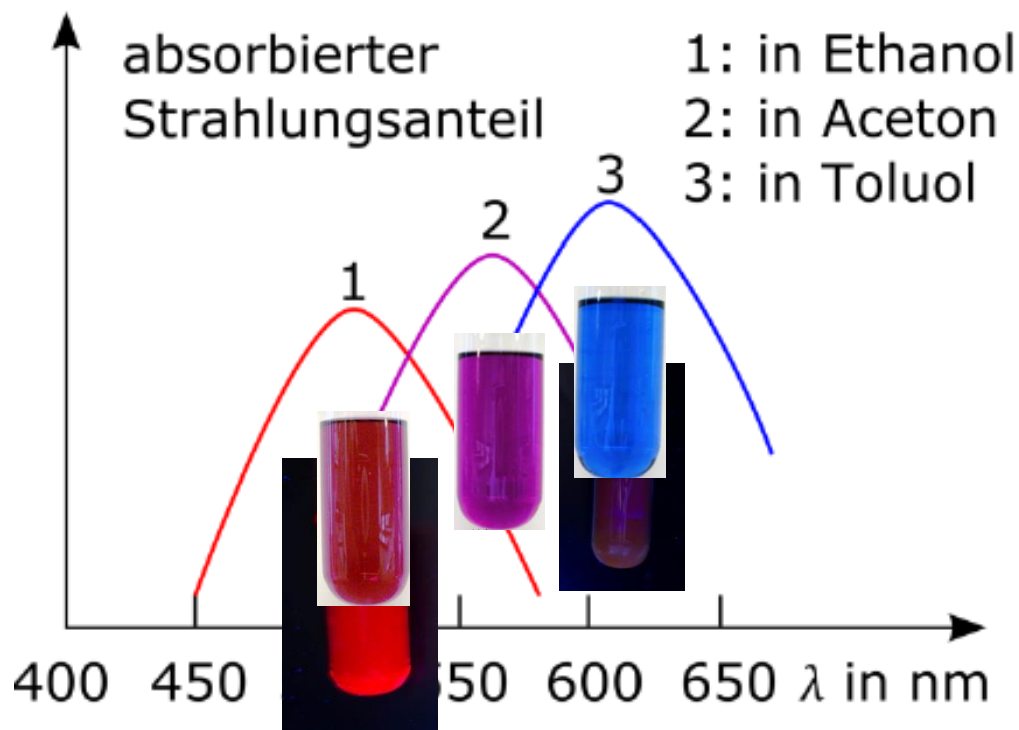
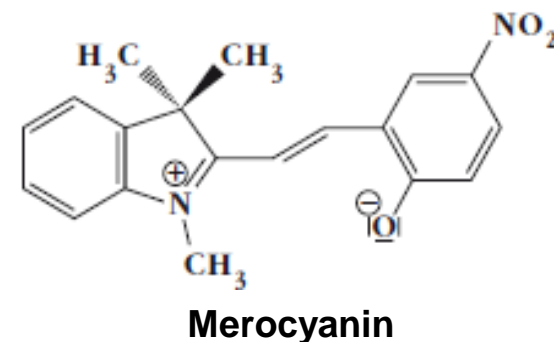
 Bestrahlung mit  $\lambda = 400 \text{ nm}$

 Bestrahlung mit  $\lambda = 532 \text{ nm}$



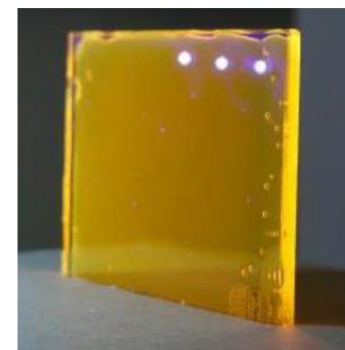
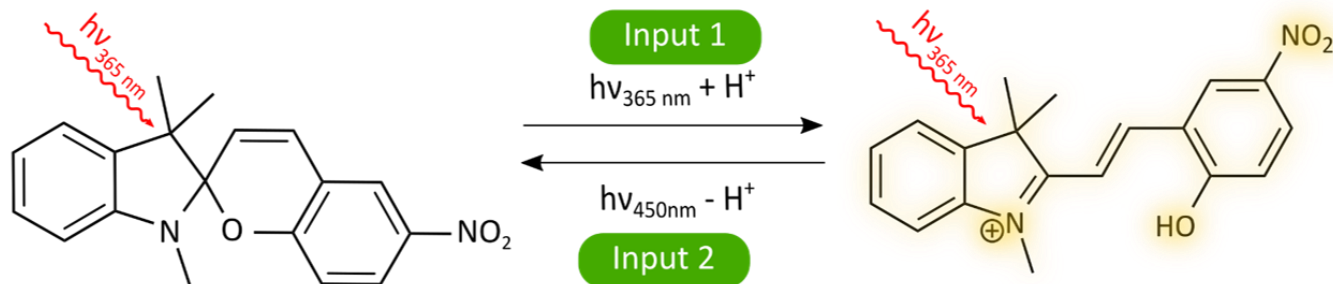
# Die Nano-Umgebung macht's

## Solvatochromie und Lumineszenz von Merocyanin in Lösung

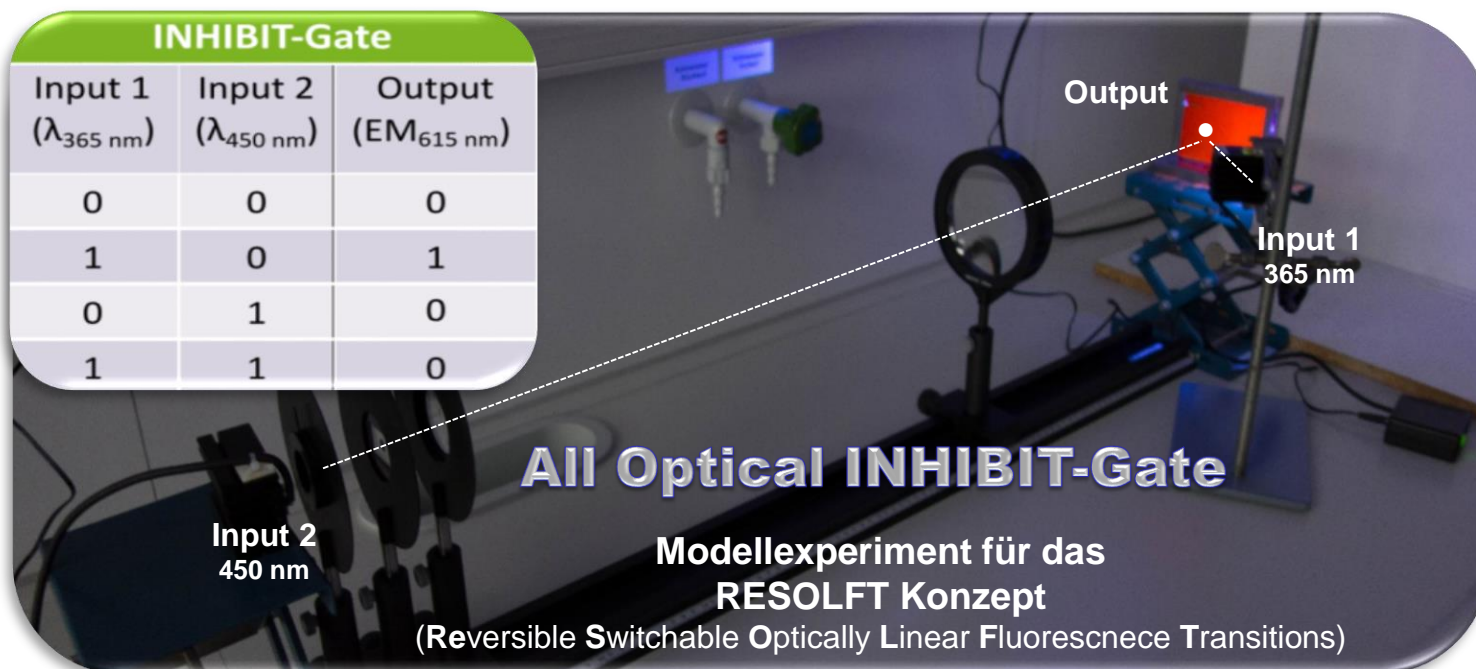


# Molekulare Logik mit SP/ME/MEH<sup>+</sup>

In Feststoffmatrix aus PMMA/TCA



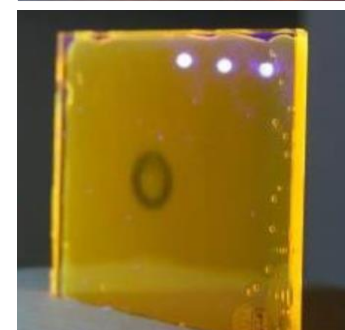
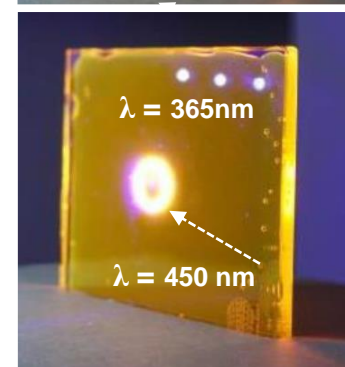
INHIBIT-Gate		
Input 1 ( $\lambda_{365\text{ nm}}$ )	Input 2 ( $\lambda_{450\text{ nm}}$ )	Output (EM <sub>615 nm</sub> )
0	0	0
1	0	1
0	1	0
1	1	0



All Optical INHIBIT-Gate

Modellexperiment für das  
RESOLFT Konzept

(Reversible Switchable Optically Linear Fluorescence Transitions)





## Molekulare Schalter mit Spiropyran

### Spiropyran - Bezugsquelle

TCI Deutschland

Artikel # T0344, CAS Nr. 1485-92-3 1Gramm für 69,00 €

Folgender Link führt zu dem Produkt:

<https://www.tcichemicals.com/DE/de/p/T0344>

### 4 in 1 LED Taschenlampe

900 Lumen, rotes, grünes & blaues Licht 19,95 €\*

<https://www.google.com/search?client=firefox-b-d&q=multicolor+led+taschenlampe>



### UV Taschenlampe 12 UV LED 12W

violettes Licht, 395nm 7,99 €\*

<https://www.google.com/search?client=firefox-b-d&q=uv+led+taschenlampe>

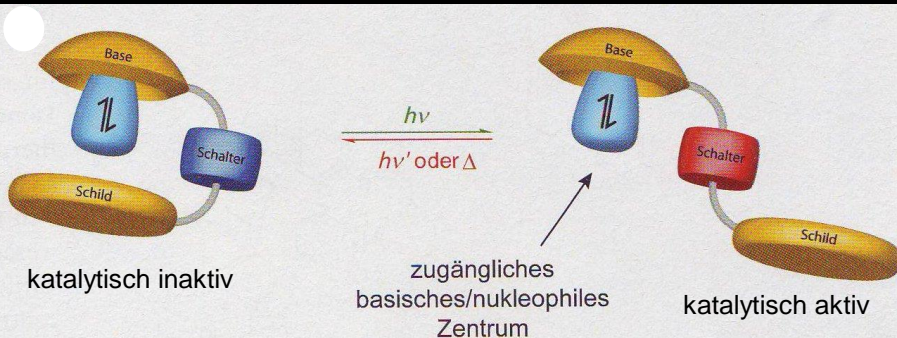
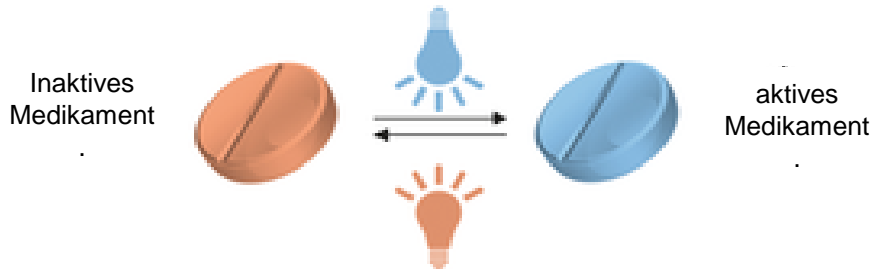
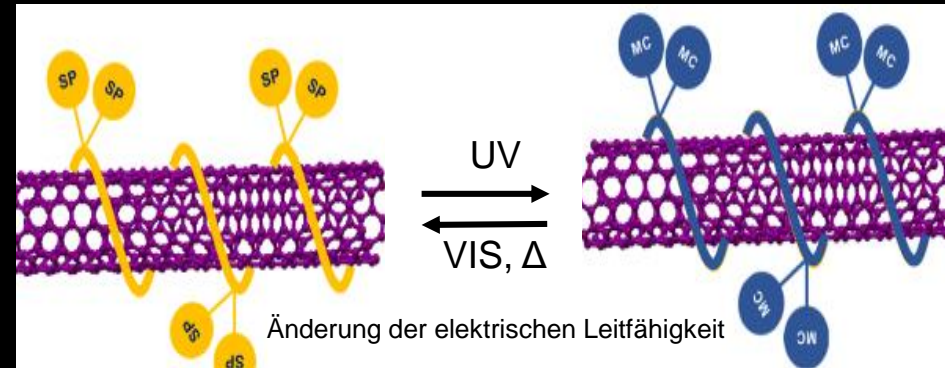


# Molekulare Schalter & Nano-Motoren

Natur - Technik - Wissenschaft



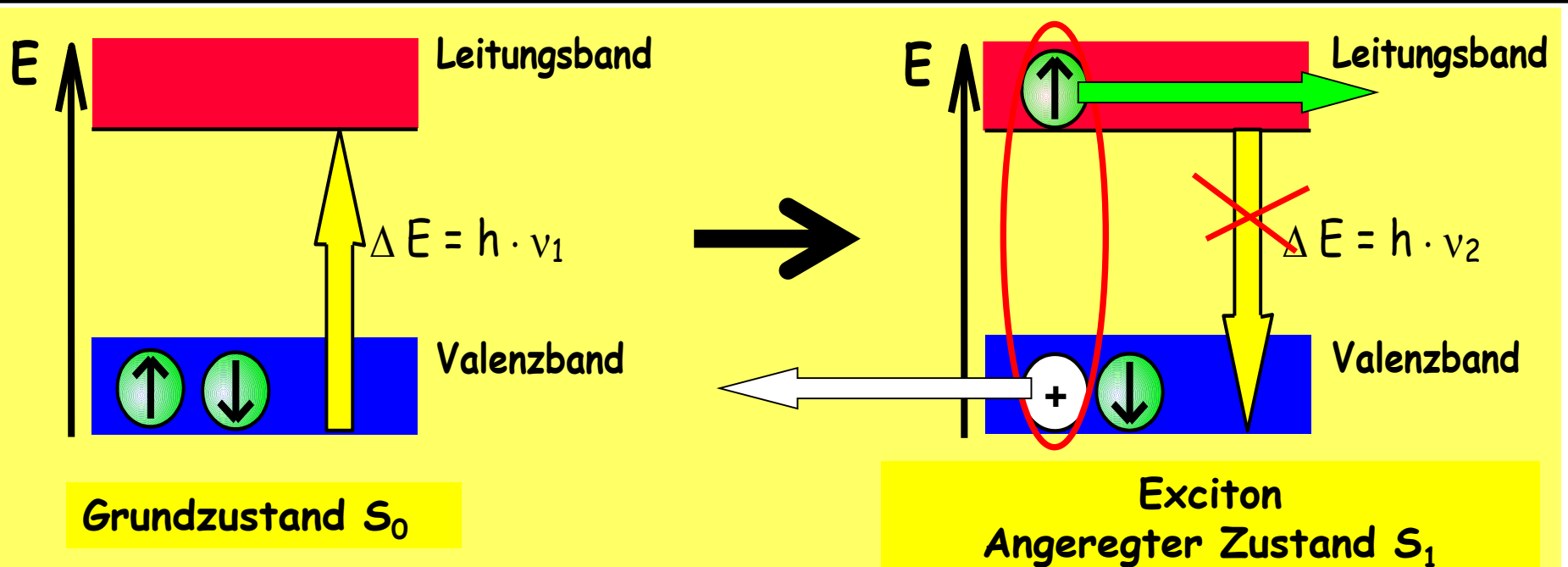
Molekulare Schalter  
ändern die Farbe des  
Chamäleons



Rotierender Nano-Motor

# Photovoltaik

Experimente und Energiestufenmodell zur Umwandlung von Licht in Strom





# Photovoltaik

Verschiedene Typen von Solarzellen in Anwendung und Forschung



Hybride Solarzellen mit  $\text{TiO}_2$



Anorganische Silizium-Solarzellen



Organische Solarzellen

# Photo-Redoxreaktionen & Photo-Katalyse



**Che & Bio & Phy & Geo**