

# Polymer Additive – Ein zweischneidiges Schwert für die Zuverlässigkeit von Photovoltaikmodulen

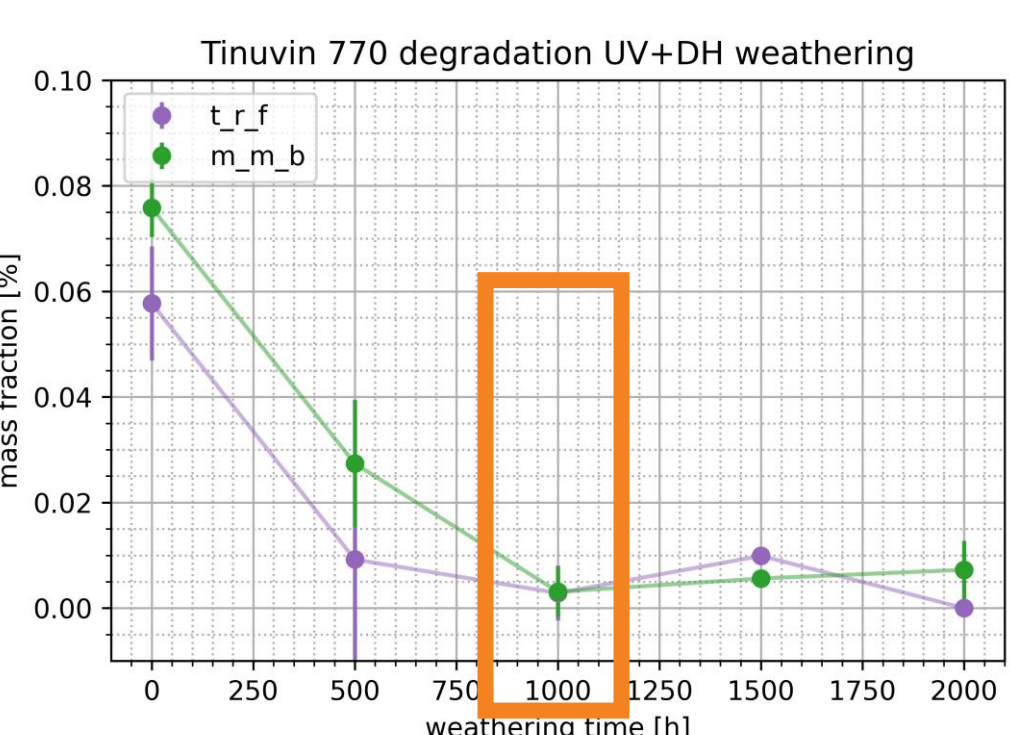
Robert Heidrich, Michael Wendt, Anton Mordvinkin, Ralph Gottschalg

## Problemstellung | Polymeradditive beeinflussen die Degradation von Solarmodulen ...

### Degradation und Interaktion der Polymeradditive

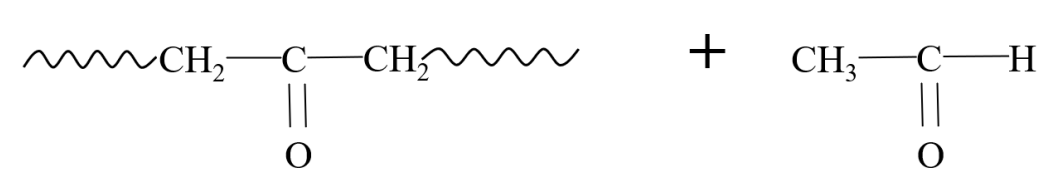
### Degradation des Verkapselungs-materials

### Makroskopische Degradation des Solarmoduls

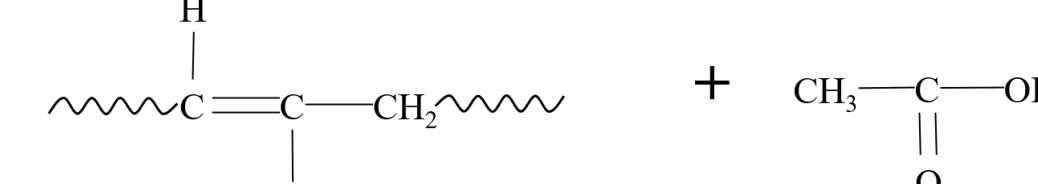


Quantifizierung des UV Stabilisators in künstlich gealterten Mini-Modulen [1, 2].

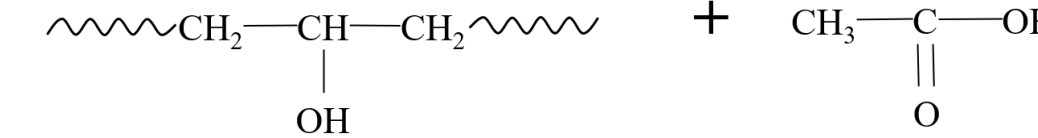
Norrish Type III (UV induziert)



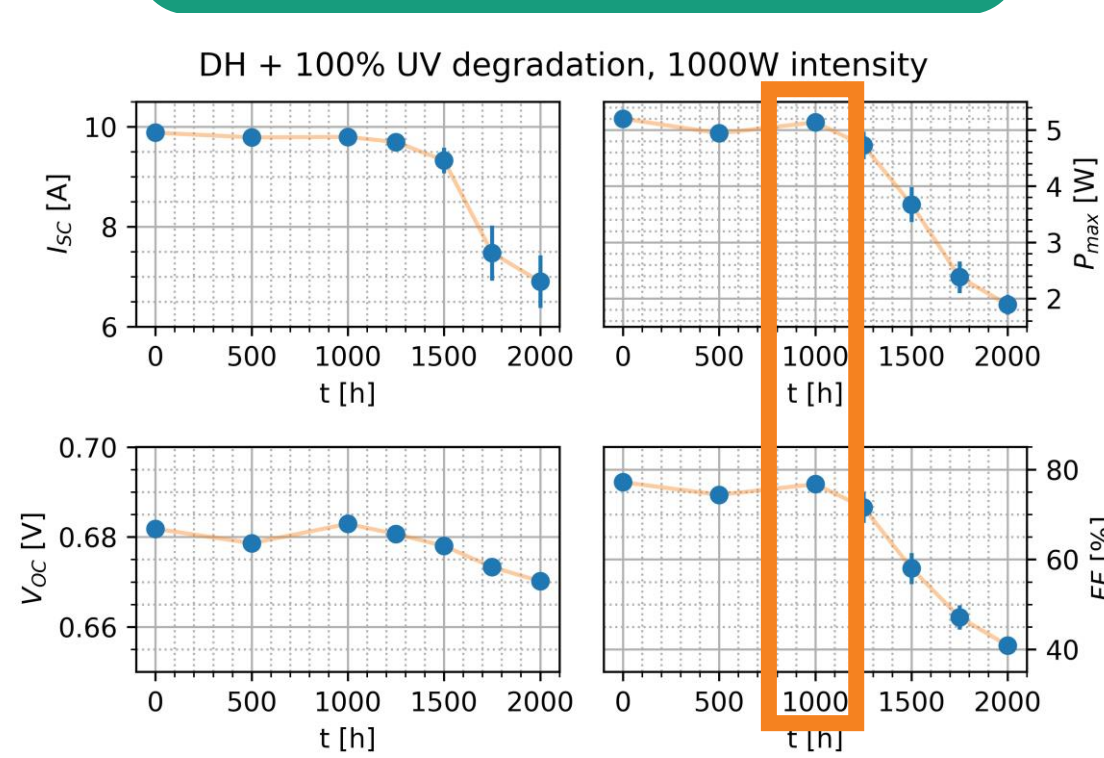
Norrish Type II (UV induziert)



Hydrolysis (H<sub>2</sub>O + T induziert)



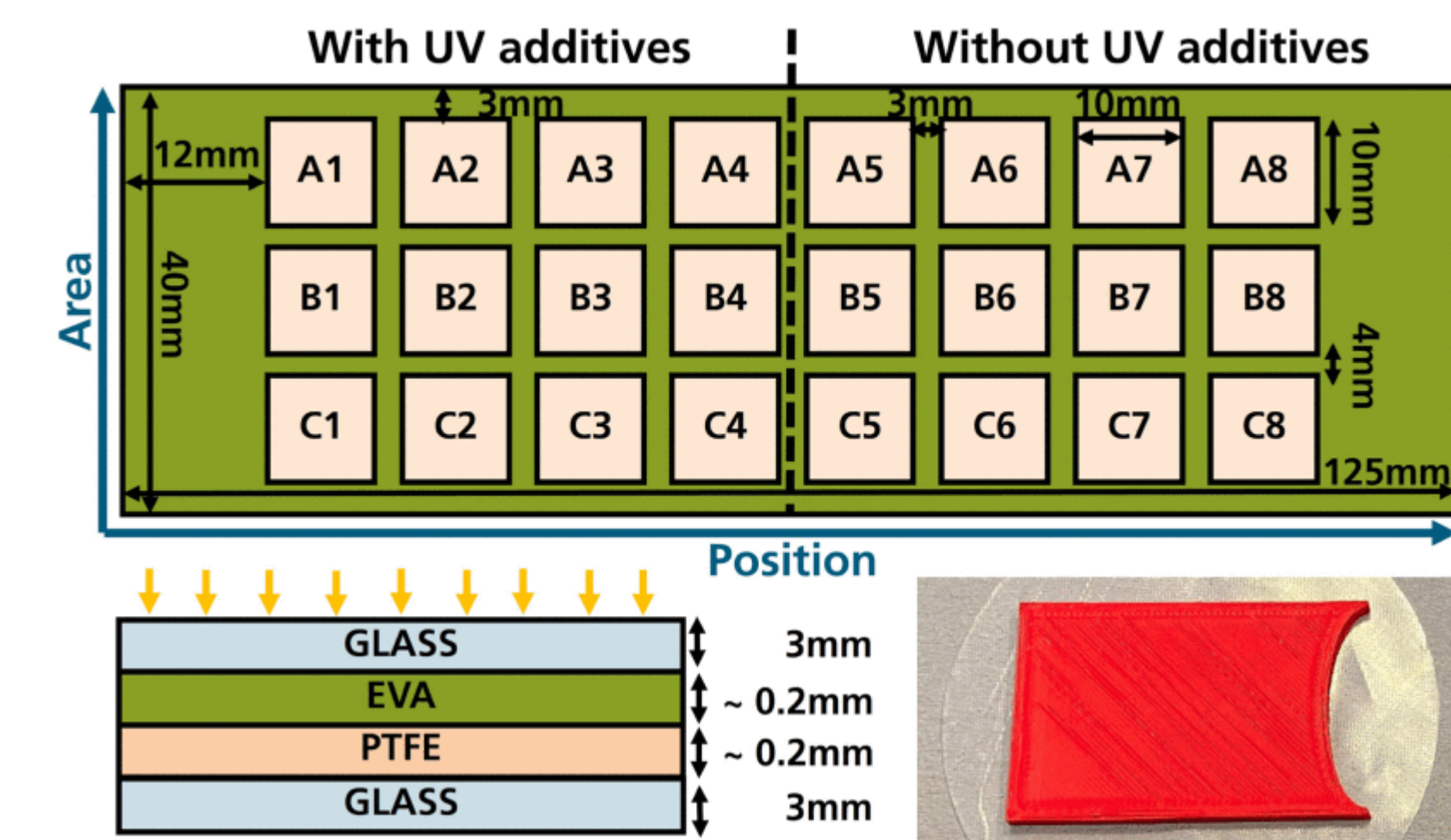
Mögliche Degradationsreaktionen von Ethylen-Vinylacetat Copolymer (EVA) [3, 4].



Elektrische Parameter gealterter Mini-Module → der UV Stabilisator war nach 1000h vollständig verbraucht [1].

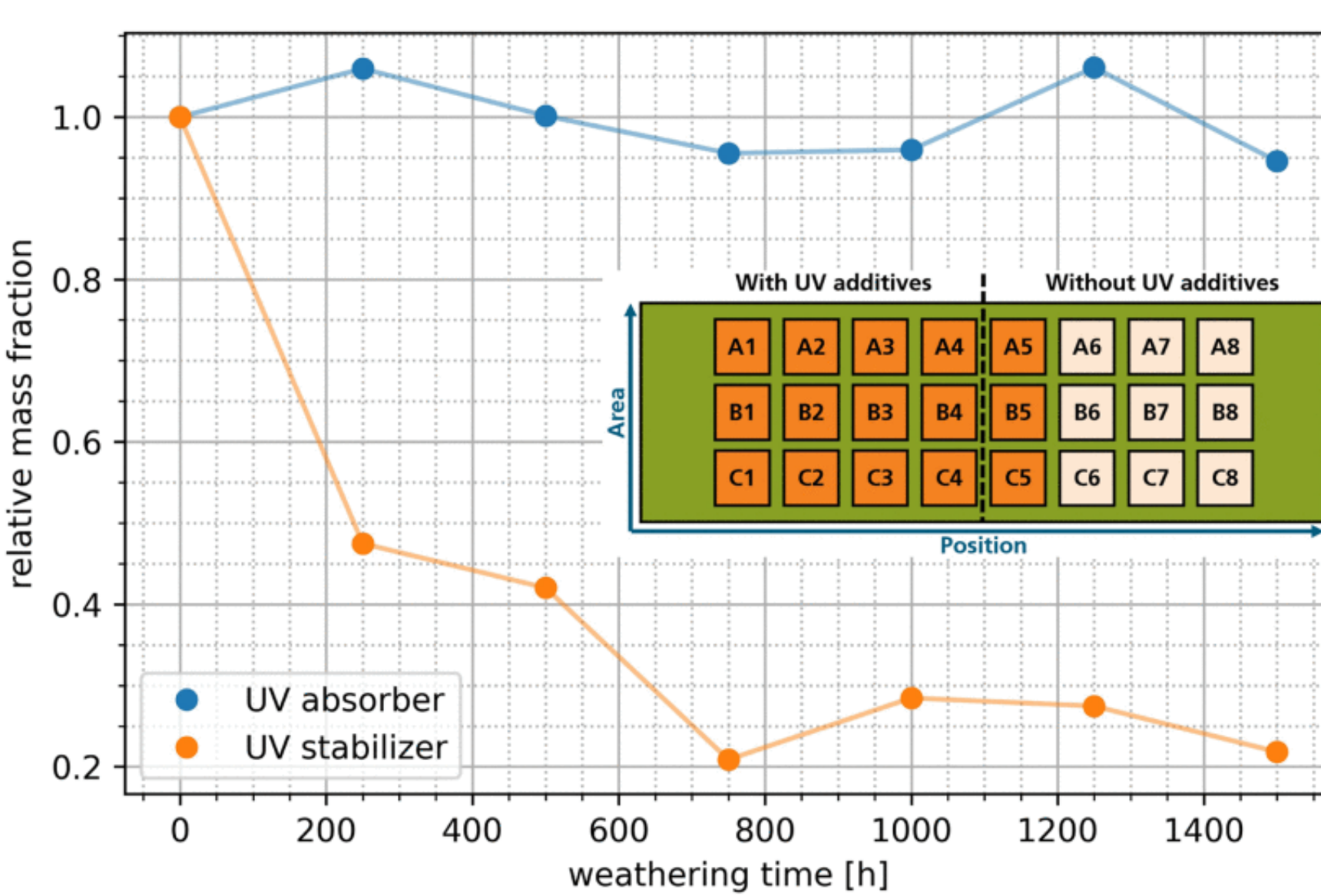
## ... doch wie wechselwirken stabilisierende Additive?

- Glaslamine mit Ethylen Vinylacetat Copolymer (EVA) Encapsulant und UV-Additivgradient wurden unter IEC 62788-7-2 A3 Bedingungen künstlich gealtert [5]
- Interaktionspotential der Additive und deren Einfluss auf das Alterungsverhalten der Lamine soll erforscht werden



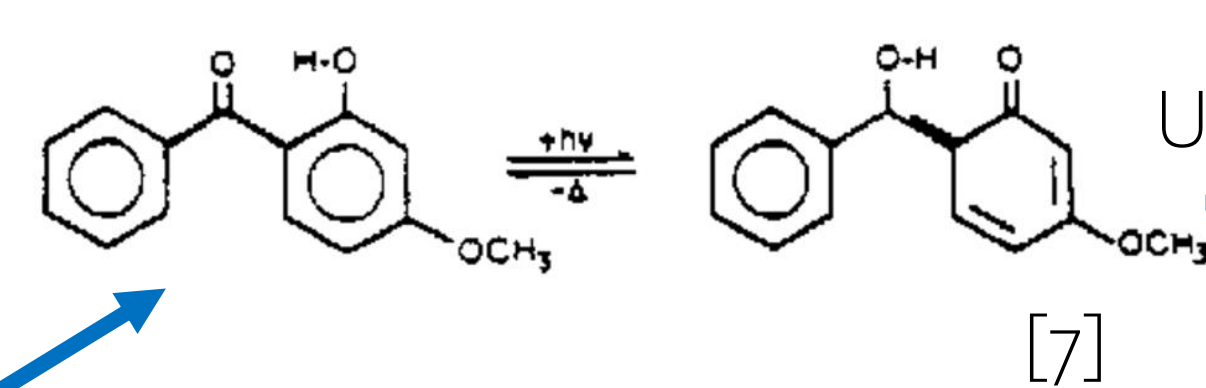
Schematischer Probenaufbau mit 24 Entnahmestellen für PY-GCMS und FTIR Charakterisierung [6].

## Additivwechselwirkungen | Diffusion und Interaktion der verwendeten Additive



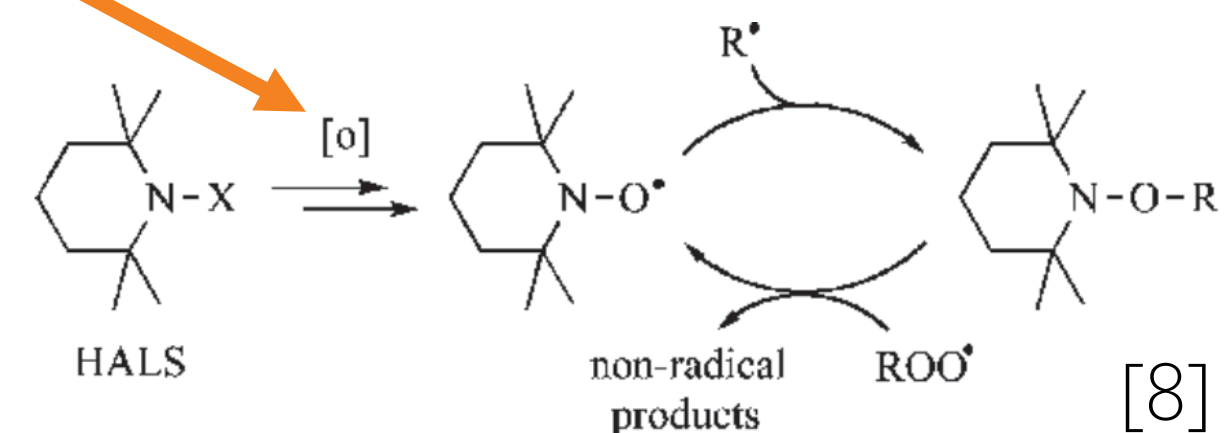
Mittlerer UV Additivgehalt der Positionen 1 bis 5 in Abhängigkeit der Bewitterungszeit [6].

### UV Absorber: Reversible Keto-Enol Tautomerie



[7]

### UV Stabilisator: Irreversibler Denisov Zyklus



UV Stabilisatorkonzentration nimmt ab

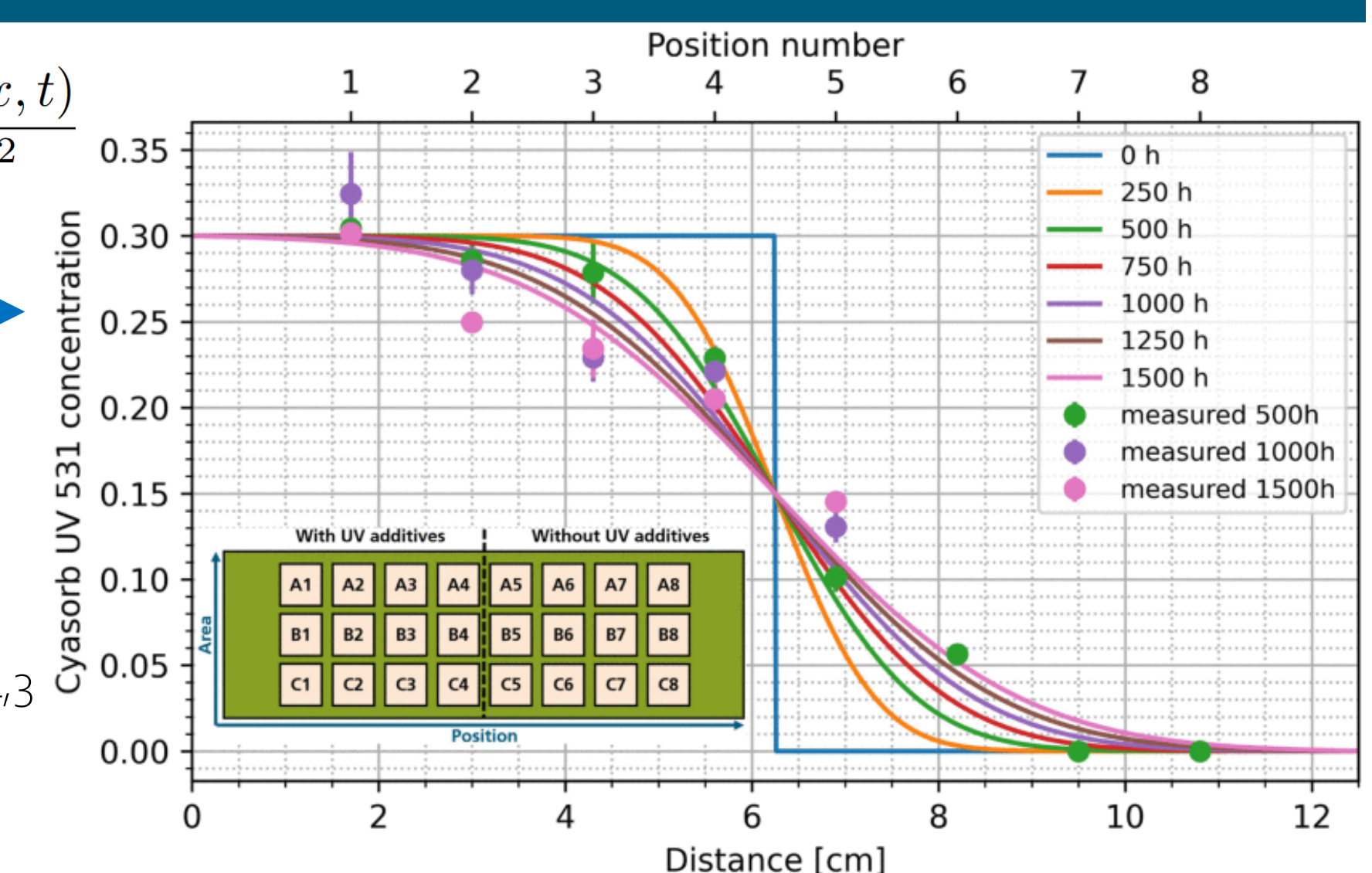
Wechselwirkung mit Radikalen

$$\frac{\partial u(x,t)}{\partial t} = D \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x^2}$$

UV Absorberkonzentration konstant

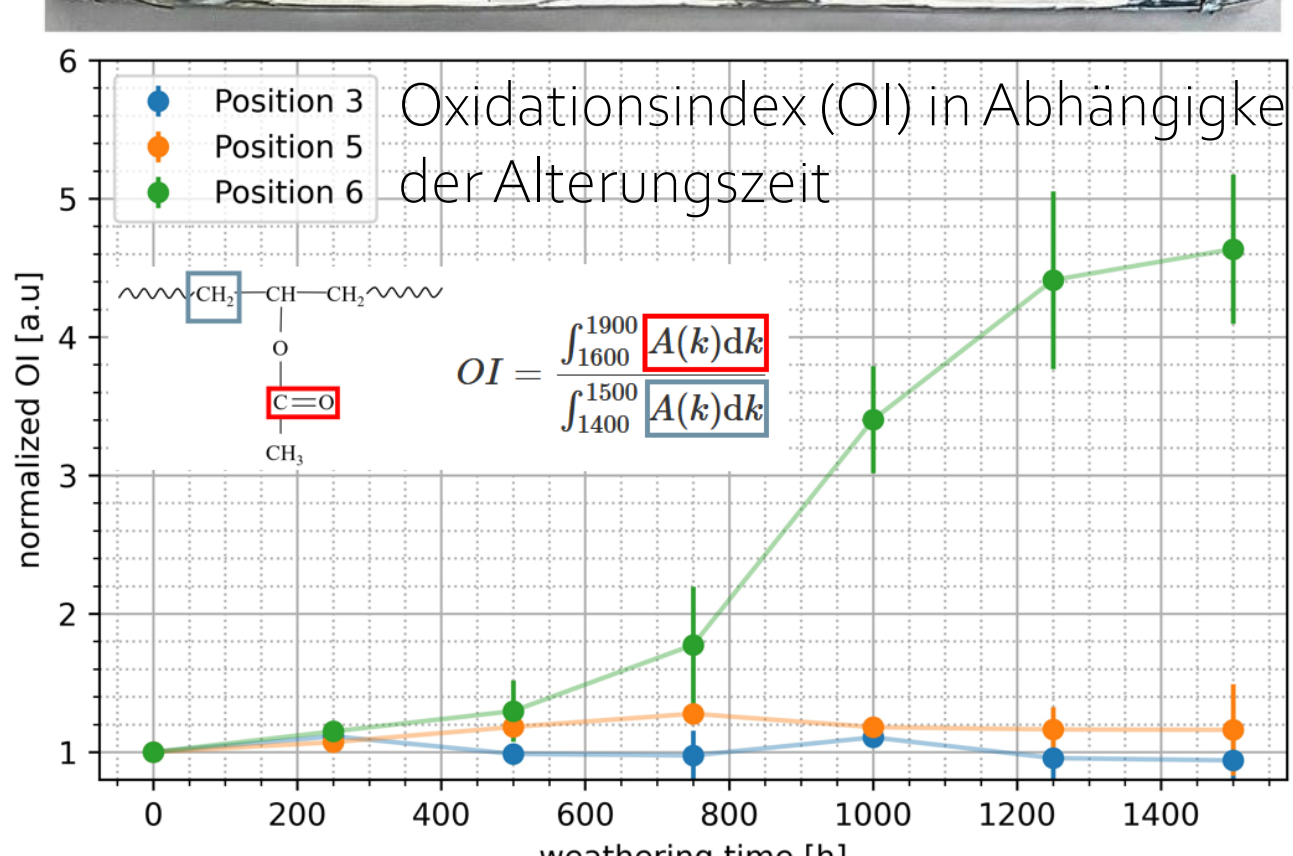
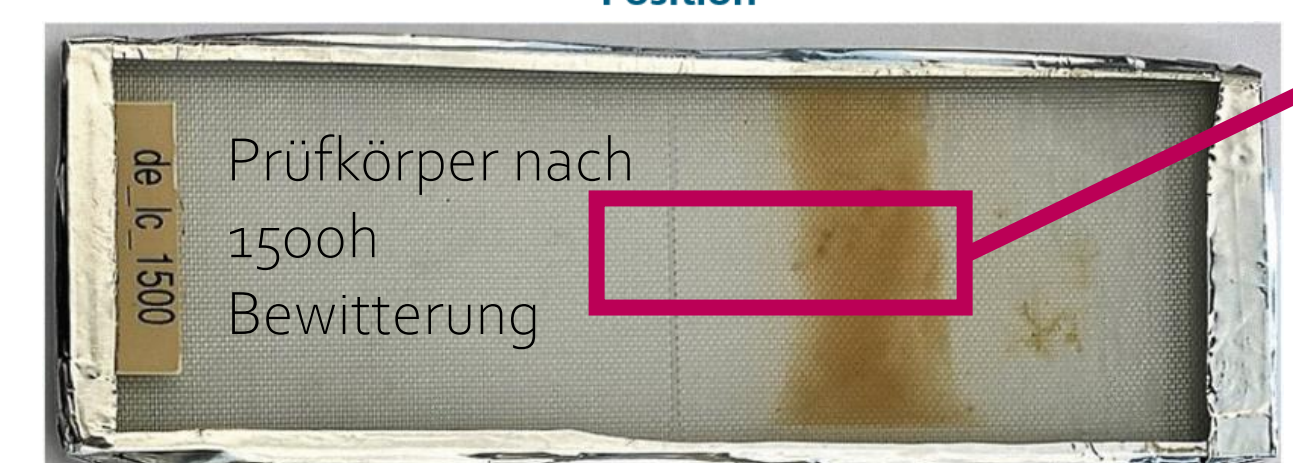
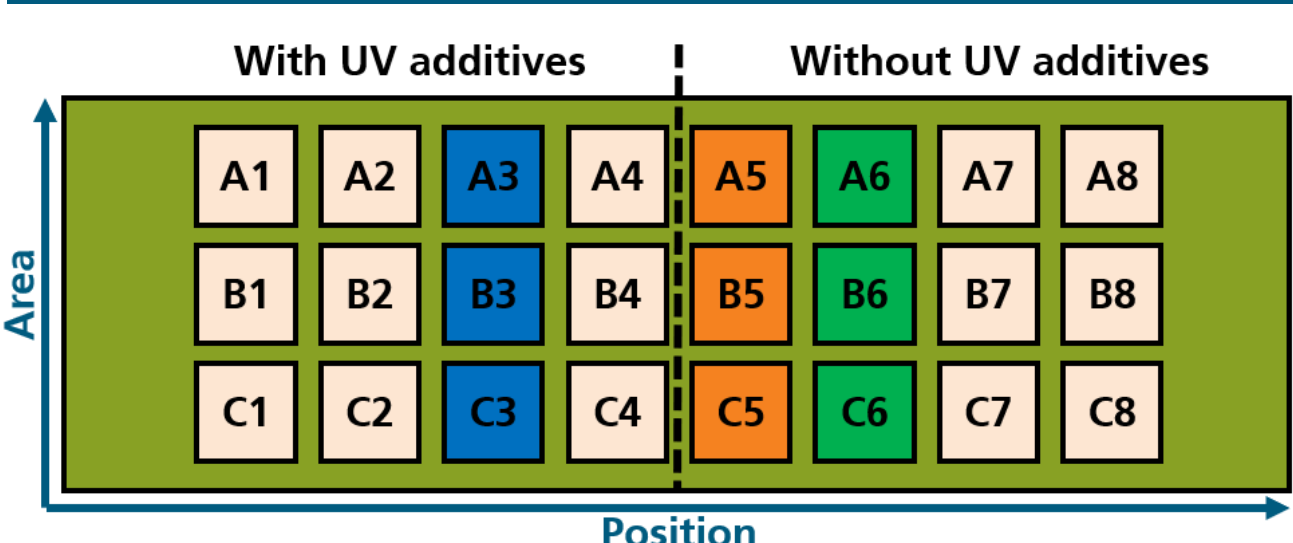
Fick'sche Diffusion

Diffusion des UV Absorbers → nach 500h ist bereits 1/3 der Initialkonzentration ca. 1,3 cm in Position 5 migriert [6].

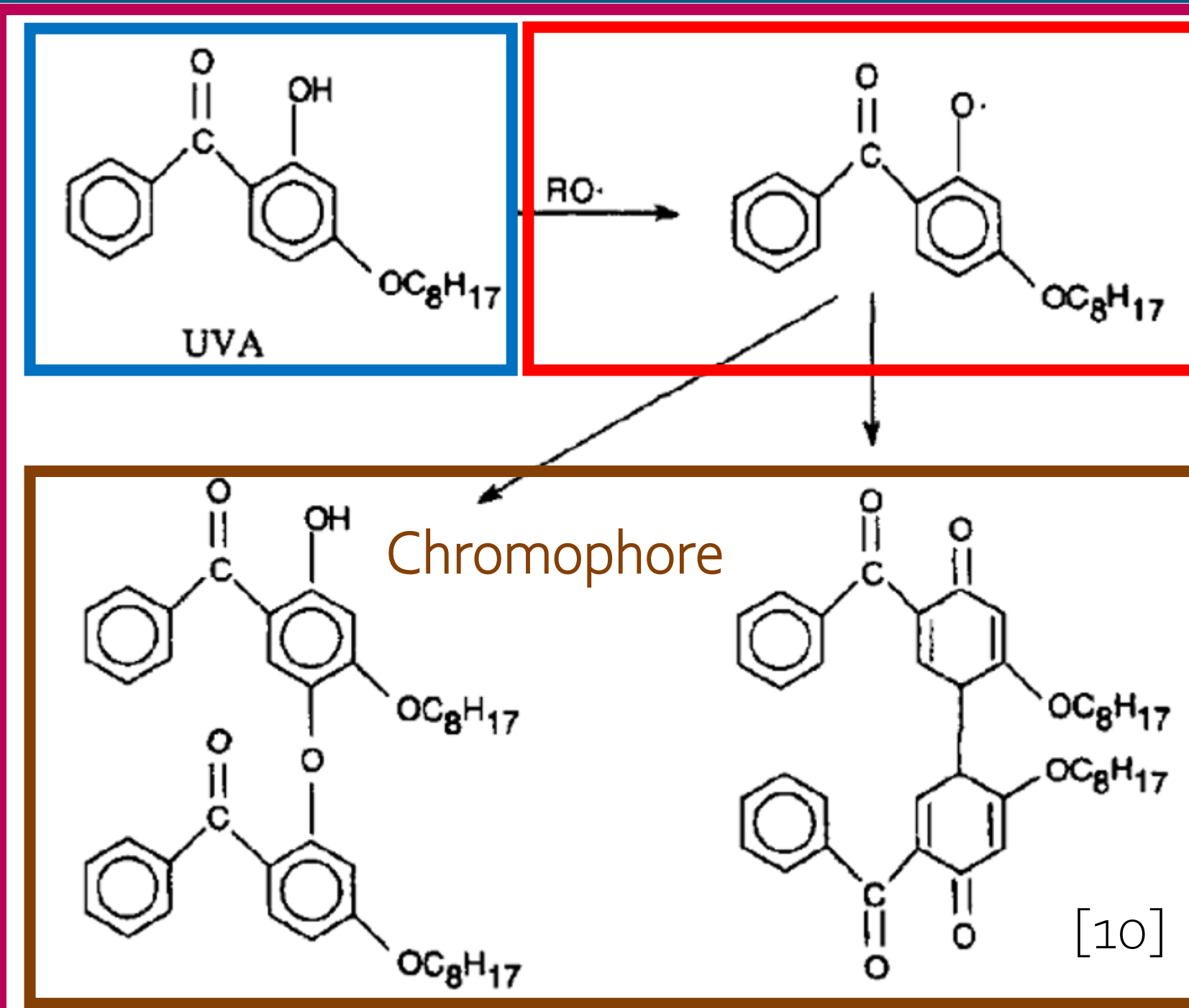
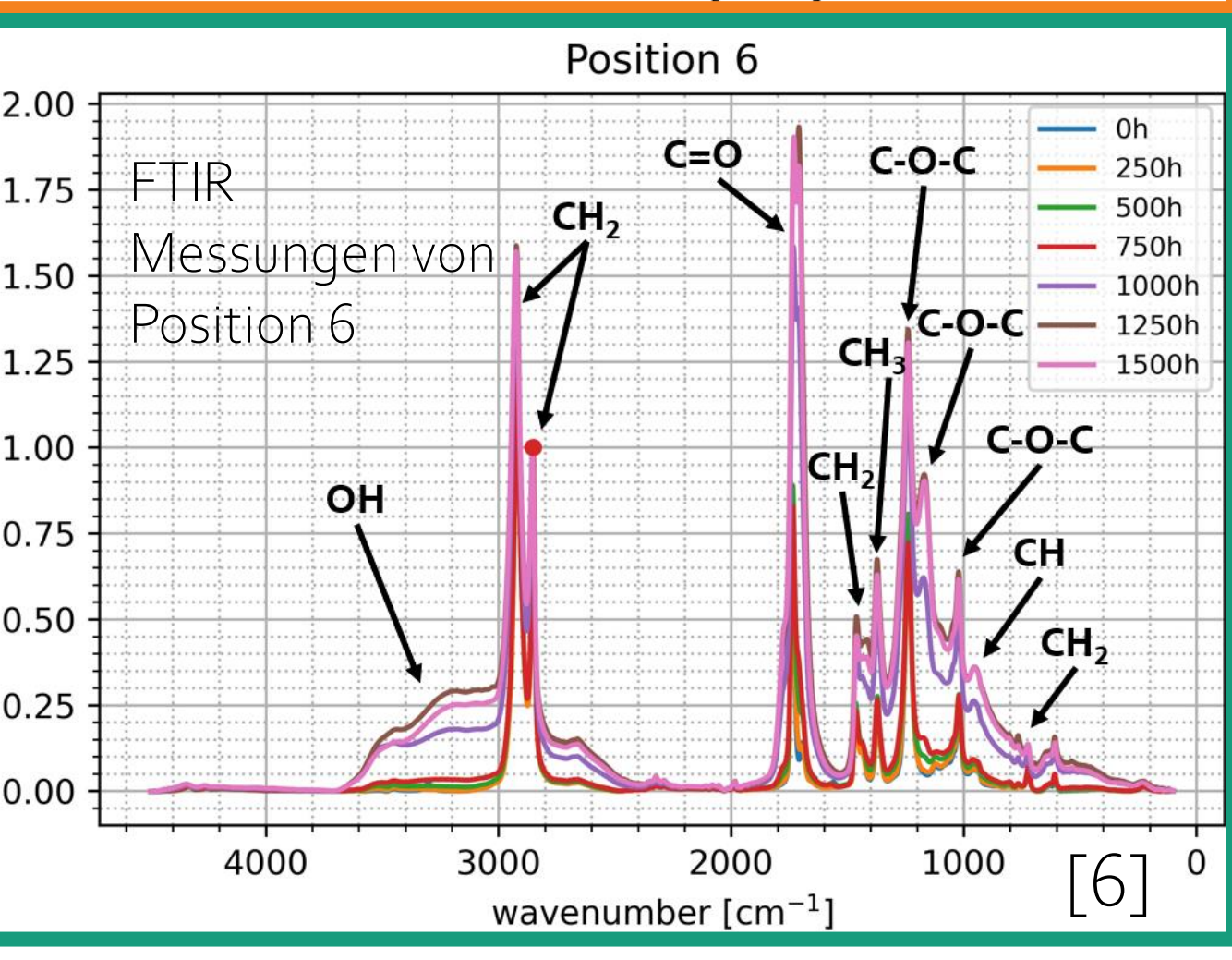
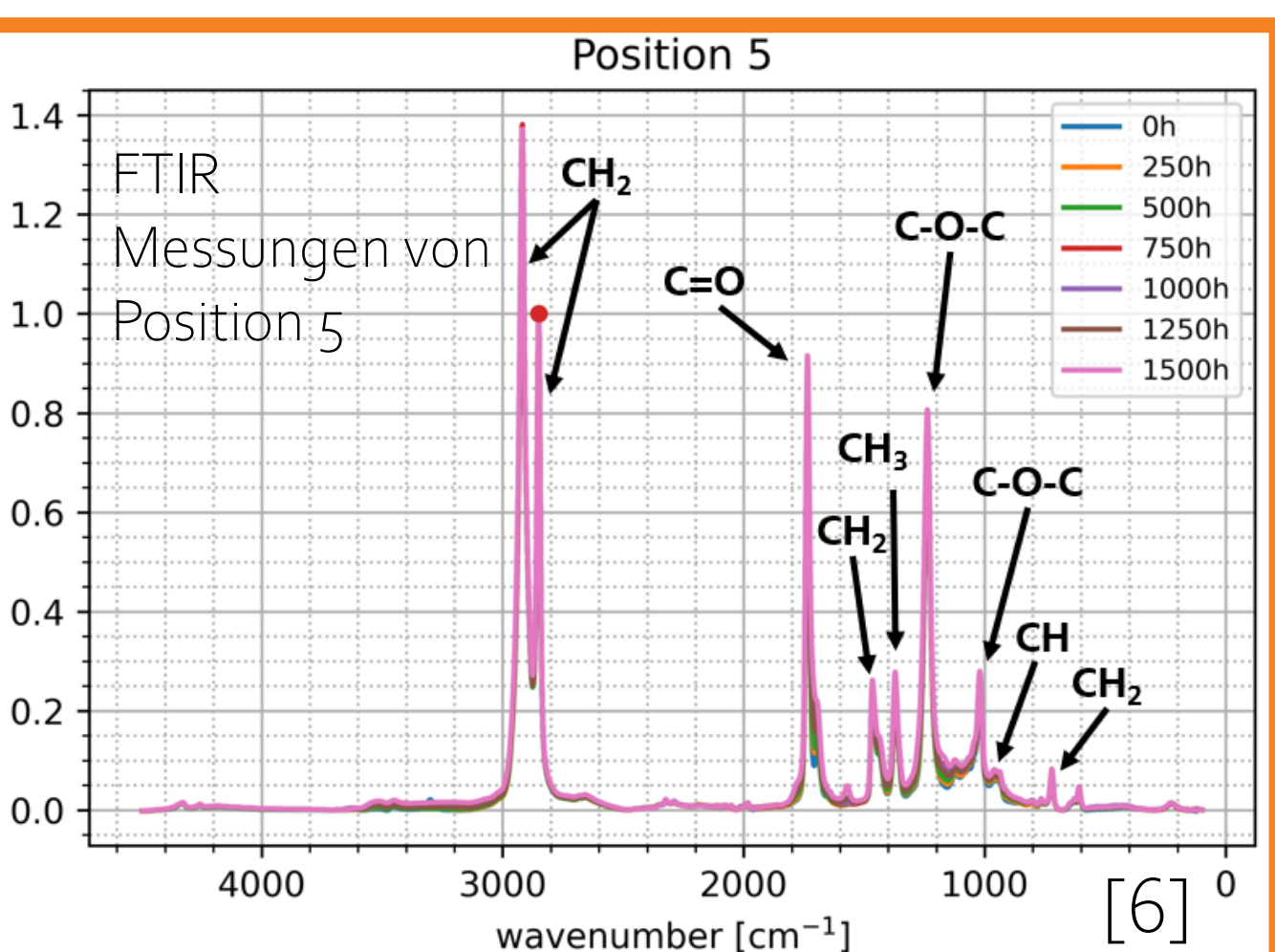
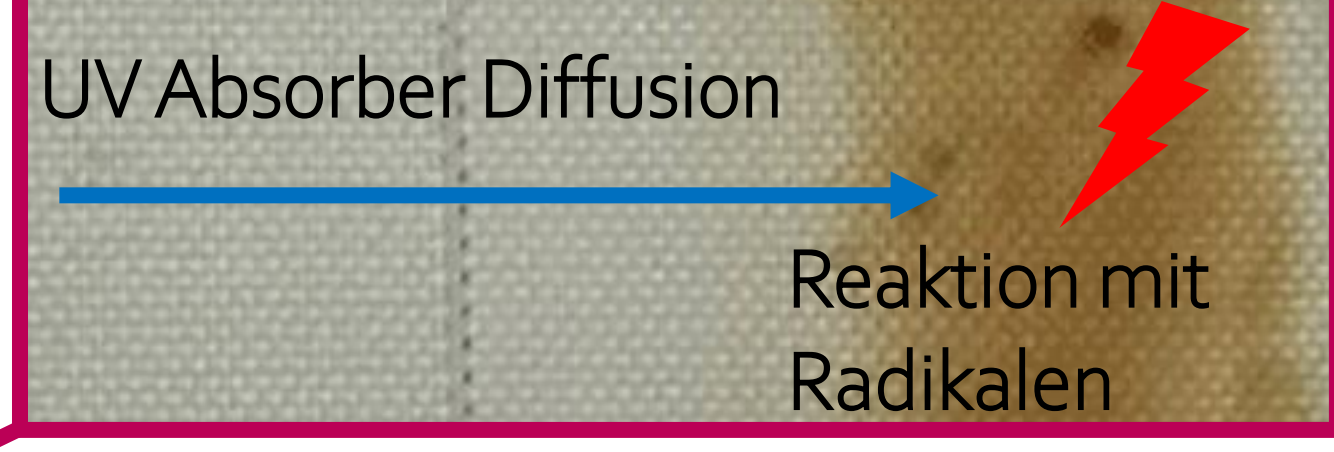


UV induzierte Spaltung und Radikalisierung von während der Lamination unverbrauchten Vernetzungsperoxiden → Abnahme der UV Stabilisatorkonzentration [6].

## Polymerdegradation | Folgen der Additivwechselwirkung für das Verkapselungsmaterial



- Positionen 1-4 wurden durch die UV Additive vor Degradation geschützt
- Diffusion der UV Additive ermöglichte außerdem den effektiven Schutz von Position 5
- Positionen 6-8 sind vollständig degradiert



Chromophore

[10]

## Schlussfolgerungen

- Degradationsverhalten des Encapsulants wird maßgeblich durch die enthaltenen Additive bestimmt → **Folienzusammensetzung ist von entscheidender Bedeutung für die Zuverlässigkeit von PV Modulen**
- Additive diffundieren über große Distanzen (1,3 cm in 500h im Beispiel des UV Absorbers) und während des Betriebs auch in andere Schichten der Solarmodule
- Einfluss der Additivediffusion auf Modulebene nur ungenügend erforscht
- Wechselwirkungen der unbedingt erforderlichen Additive können zu unerwünschten Effekten führen:
  - Abbau des UV Stabilisators durch Reaktion mit Vernetzungsperoxiden
  - Browning des Encapsulants durch Reaktion des UV Absorbers mit Radikalen

[1] Heidrich, Robert, et al. *Polymer Testing* 118 (2023): 107933.  
[2] Heidrich, Robert, et al. *2023 IEEE 50th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*. IEEE, 2023.  
[3] Jin, Jing, et al. *Polymer degradation and stability* 95,5 (2010): 725-732.  
[4] Hara, Kohjiro, et al. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry* 404 (2021): 112891.  
[5] Heidrich, Robert, et al. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 266 (2024): 112674.  
[6] Heidrich, Robert, et al. *IEEE Journal of Photovoltaics* (2023).  
[7] Cortolano, Frank P. *Journal of Vinyl Technology* 15,2 (1993): 69-75.  
[8] Hodgson, Jennifer L., et al. *Macromolecules* 43,10 (2010): 4573-4583.  
[9] Galhardo, Eduardo, et al. *Journal of applied polymer science* 127,3 (2013): 1711-1716.  
[10] Klemchuk, Peter, et al. *Polymer degradation and stability* 55,3 (1997): 347-365.

## Kontakt

Robert Heidrich (Materialien und Prozesse)  
Tel. +49 345 5589 5124 | robert.heidrich@csp.fraunhofer.de  
Fraunhofer CSP  
Otto-Eißfeldt-Strasse 12 | 06120 Halle | Germany  
www.csp.fraunhofer.de