Licht als kleinstes Reagenz und Werkzeug

H. Baumann, U. Ernst, M. Goez, A. Griesbeck, M. Oelgemöller, T. Oppenländer, M. Schlörholz, B. Strehmel

Grundlagenuntersuchungen zum Mechanismus kurzlebiger Zustände führen in der Photochemie zum Verständnis der Wirkprinzipien; von diesen Erkenntnissen profitieren die industriellen Anwendungen in Medizin, Chemikaliensynthese, Drucktechnik, chemische Trocknung sowie zur Reinigung und Entgiftung.

Literatur

1) *a) N. J. Turro,* Modern Molecular Photochemistry, *University Science Books, Sausalito, 1991;*
b) N. J. Turro, V. Ramamurthy, J. C. Sciano, Principles of Molecular Photochemistry. An Introduction, *University Science Books, Sausalito, 2009;*
c) H. G. O. Becker, Einführung in die Photochemie, *Deutscher Verlag der Wissenschaften, Berlin, 1983;*
d) D. Wöhrle, M. W. Tausch, W.-D. Stohrer, Photochemie. Konzepte. Methoden. Experimente, *Wiley-VCH, Weinheim, 1998;*
e) A. Griesbeck, M. Oelgemöller, F. Ghetti, CRC Handbook of Organic Photochemistry, *3rd Edition, CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, 2012;*
f) P. Klán, J. Wirz, Photochemistry of Organic Compounds. From Concepts to Practice, *Wiley, 2009;*
g) S. L. Murov, Handbook of Photochemistry, *Marcel Dekker, Inc., New York, 1973;*
h) V. Ramamurthy, Photochemistry in Organized & Constrained Media, *VCH Publishers, New York, 1991;*
i) H. Dürr, H. Bouas-Laurant, Photochromism. Molecules and Systems, *Elsevier, Amsterdam, 2003;*
j) J. Kagan, Organic Photochemistry, Principles and Applications, *Academic Press, London, 1993;*
k) H. Böttcher, J. Bendig, M. A. Fox, H. Hopf, H.-J. Timpe, Technical Applications of Photochemistry, *Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 1991.*

2) *a) T. Förster,* Fluoreszenz Organischer Verbindungen, *Vandenhoeck & Ruprecht, Göttingen, 1951;*
b) G. Herzberg, Molecular Spectra and Molecular Structure, *D. van Nostrand Company, Inc., Toronto, 1950;*
c) H. H. Jaffeé, M. Orchim, Theory and Applications of Ultraviolet Spectroscopy, *John Wiley & Sons, Inc., 1962;*
d) A. S. Davydov, Theory of Molecular Excitations, *McGraw-Hill Book Company, Inc., 1962, translated by M. Kasha and M. Oppenheimer, Jr;*
e) H. Suzuki, Electronic Absorption Spectra and Geometry of Organic Molecules, *Academic Press, London, 1967;*
f) A. Parker, Photoluminescence of Solutions, *Elsevier Publishing Company, Amsterdam, 1968,*
g) N. Mataga, T. Kubota, Molecular Interactions and Electronic Spectra, *Marcel Dekker, Inc., New York, 1970;*
h) M. Orchim, H. H. Jaffeé, Symmetry, Orbitals, and Spectra, *Wiley Interscience, New York, 1971;*
i) J. B. Birks, Organic Molecular Photophysics, *Vol. I+II, John Wiley and Sons, London, 1973;*
j) E. C. Lim, Excited States, *Academic press, New York, Vol. 1–4, 1974;*
k) D. Phillips, Polymer Photophysics, *Chapman and Hall, London, 1985;*
l) P. Prasad, Nanophotonics, *John Wiley & Sons, Hoboken, 2004;*
m) G. Lanzani, Photophysics of Molecular Materials, *Wiley-VCH, Weinheim, 2006;*
n) J. R. Lakowicz, Principles of Fluorescence Spectroscopy, *Springer, Berlin, 2006;*
o) G. Lanzani, The Photophysics behind Photovoltaics and Photonics, *Wiley-VCH, Weinheim, 2012;*
p) H. Mustroph, S. Ernst, Chem. Unserer Zeit *2011, 45, 256;*
q) J. Zhao, W. Wu, J. Sun, S. Guo, Chem. Soc. Rev. *2013,* 42, *5323.*

3) *a) L. Marcu, P. M. W. French, D. S. Elson,* Fluorescence Lifetime Spectroscopy and Imaging: Principles and Applications in Biomedical Diagnostics, *CRC Press, Boca Raton, 2014;*
b) R. B. Thompson, Fluorescence Sensors and Biosensors, *CRC press, Boca Raton, 2005;*
c) S. Udenfriend, Fluorescence Assay in Biology and Medicine, *Academic Press, New York, 1962.*

4) *a) M. Schäferling,* Angew. Chem. *2012,* 124, *3590;*
b) C. Wu, D. T. Chiu, Angew. Chem. *2013,* 125, *3164;*
c) X.-A. Ton, B. Tse Sum Bui, M. Resmini, P. Bonomi, I.Dika, O. Soppera, K. Haupt, Angew. Chem. *2013, 125, 8475;*
d) A. P. de Silva, J. Eilers, G. Zlokarnik, Proc. Natl. Acad. Sci. USA *1999,* 96, *8336;*
e) A. W. Czarnik, J.-P. Desvergne, Chemosensors for Ion and Molecule Recognition, *Kluwer, Dordrecht, 1999;*
f) A. P. de Silva, H. Q. N. Gunaratne, T. Gunnlaugsson, A. J. M. Huxley, C. P. McCoy, J. T. Rademacher, T. E. Rice, Chem. Rev. *1997,* 97, *1515;*
g) W.-H. Li, J. Llopis, M. Whitney, G. Zlokarnik, R. Y. Tsien, Nature *1998,* 392, *936;*
h) R. Y. Tsien, Ann. Rev. Neurosci. *1989,* 12, *227.*

5) *a) A. E. Siegrist, C. Eckhardt, J. Kaschig, E. Schmidt,* Optical Brighteners, Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, *Wiley-VCH, Weinheim, 2003;*
b) G. Booth, H. Zollinger, K. McLaren, K. Sharples, A. Westwell, Dyes, General Survey, Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, *Wiley-VCH, Weinheim, 2000;*
c) R. Hamprecht, A. Westerkamp, Disperse Dyes, Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, *Wiley-VCH, Weinheim, 2000;*
d) H. Müller, W. Müller, M. Wehner, H. Liewald, Artists' Colors, Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, *Wiley-VCH, Weinheim, 2006;*
e) M. Colditz, E. Kunkel, K.-H. Bohne, Drawing and Writing Materials, Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, *Wiley-VCH, Weinheim, 2000.*

6) *a) D. Hertel, C. D. Müller, K. Meerholz,* Chem. Unserer Zeit *2005*, 39, *336;*
b) X.-H. Zhu, J. Peng, Y. Caoa, J. Roncali, Chem. Soc. Rev. *2011*, 40, *3509;*
c) K. Kori, J. Suzuki, M. Takamura, J. Tanaka, T. Yoshida, Y. Tsumoto, Mitsubishi Heavy Industr. Techn. Rev. *2012*, 49, *47;*
d) S. Kappaun, C. Slugovc, E. J. W. List, Int. J. Mol. Sci. *2008*, 9, *1527;*
e) S. Reineke, F. Lindner, G. Schwartz, N. Seidler, K. Walzer, B. Lüssem, K. Leo, Nature *2009*, 459, *234;*
f) B. Geffroy, P. le Roy C. Prat, Polymer International *2006*, 55, *572;*
g) J. Wu, M. Agrawal, H. A. Becerril, Z. Bao, Z. Liu, Y. Chen, P. Peumans, ACS Nano, 2010, 4, 43;
h) J. N. Moorthy, P. Natarajan, P. Venkatakrishnan, D.-F. Huang, T. J. Chow, Org. Lett. *2007*, 9, *5215;*
i) K. T. Kamtekar, A. P. Monkman, M. R. Bryce, Adv. Mater. *2010*, 22, *572.*

7) *a) Förderverbund "Trock-o-dil", Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), FKZ 13N10011;*
b) H. Pitz, DE102006011858, 2006; c) B. Beier, Laser Technik Journal *2011*, 8, *34;*
d) J. Neukum, Laser Technik Journal *2011*, 8, *22.*

8) *a) H. Baumann,* Chem. Unserer Zeit *2014, zur Publikation angenommen;*
b) W. Fraß, Chem. Unserer Zeit *1983*, 17, *10–20 und 33–40;*
c) H. W. Vollmann, Angew. Chem. *1980*, 92, *95;*
d) H.-J. Timpe, Materialwissenschaft und Werkstofftechnik *2001*, 10, *785;*
d) B. Strehmel, D. Keil, S. Ernst, K. Reiner, H. Lindauer H. Baumann, Z. Phys. Chem. *2014*, 228, *129–153.*

9) *D. Rehm, A. Weller,* Berichte der Bunsengesellschaft für physikalische Chemie *1969*, 73, *834.*

10) *a) R. A. Marcus,* J. Chem. Phys. *1956*, 24, *966; b) R. A. Marcus,* Angew. Chem. *1993*, 105, *1161; c) G. Grampp,* Angew. Chem. *1993*, 105, *724.*

11) *B. Strehmel,* Nachr. Chem. *2014*, 62, *128*

12) *F.-K. Bruder, R. Hagen, T. Rölle, M.-S. Weiser, T. Fäcke,* Angew. Chem. *2011*, 123, *4646.*

13) *C. W. Hull, US 4575330, UVP, Inc, 1986.*

14) *a) N. B. Cramer, J. W. Stansbury, C. N. Bowman,* J. Dent. Res. *2012*, 90, *402;*
b) K. Ikemura, T. Endo, Dent. Mat. J. *2010*, 29, *481;*
c) A. Stepuk, D. Mohn, R. N. Grass, M. Zehnder, K. W. Krämer, F. Pellé, A. Ferrier, W. J. Stark, Dent. Mat. *2012*, 28, *304.*

15) *a) R. Schwalm,* UV Coatings: Basics, Recent Developments and New Applications, *Elsvier Science, Amsterdam, 2006;*
b) T. Brock, M. Grotekleas, P. Mischke, B. Strehmel, Lehrbuch der Lacktechnologie, *Vincentz Network, Hannover, 2012, 4. Auflage;*
c) P. Glockner, Radiation curing. Coating and printing inks, *Vincentz Network GmbH & Co. KG, Hannover, 2008.*

16) *C. A. Bignozzi,* Photocatalysis, *Springer, Berlin, 2011.*

17) *a) T. Oppenländer,* Photochemical Purification of Water and Air. Advanced Oxidation Processes (AOPs): Principles, Reaction Mechanism, Reactor Concepts. *2003, Weinheim: Wiley-VCH;*
b) K.H. Pfoertner, T. Oppenländer, in Ullmann´s Encyclopedia of Industrial Chemistry. *2012, Wiley-VCH, Weinheim;*
c) X. Li, J. Ma, G. Liu, J. Fang, S. Yue, Y. Guan, L. Chen, X. Liu, Environ. Sci. Technol. *2012*, 46, *7342–7349;*
d) Y. Peng, S. He, J. Wang, W. Gong, Radiat. Phys. Chem. *2012*, 81, *1629–1633;*
e) Advanced Oxidation Processes for Water and Wastewater Treatment [Hrsg.: S. Parsons], *2004, IWA Publishing: London;*
*e) T. Oppenländer, i*n CRC Handbook of Photochemistry and Photobiology [Hrsg.: A. Griesbeck, M. Oelgemoeller, F. Ghetti], *3rd Ed., Vol. 1, 2012, CRC Press: Boca Raton. p. 21–48.*

18) *G. N. Bosio, T. Breitenbach, J. Parisi, M. Reigosa, F. H. Blaikie, B. W. Pedersen, E. F. F. Mártire, D. O. Silva, P. R. Ogilby,* J. Am. Chem. Soc. *2013*, 135, *272–279.*

19) *a) C.-R. Wang, T. Luo, Q.-B. Lu,* Phys. Chem. Chem. Phys. *2008*, 10, *4463–4470;*
b) K. R. Siefermann, Y. Liu, E. Lugovoy, O. Link, M. Faubel, U. Buck, B. Winter, B. Abel, Nat. Chem. *2010*, 2, *274–279;*
c) J. Nguyen, Y. Ma, T. Luo, R. G. Bristow, D. A. Jaffray, Q.-B. Lu, Proc. Natl. Acad. Sci. USA *2011*, 108, *11778–11783;*
d) M. Goez, B. H. M. Hussein, Angew. Chem. Int. Ed. *2003*, 42, *1659–1661;*
e) M. Goez, B. H. M. Hussein, Phys. Chem. Chem. Phys. *2004*, 6, *5490– 5497.*

20) *M. Goez, D. von Ramin-Marro,* Chem. Phys. Lett. *2007*, 447, *352–357.*

21) *N. K. Goel, R. Joshi, Y. K. Bhardwaj, L. Varshney,* Radiat. Phys. Chem. *2013*, 92, *66–70.*

22) *a) X. Li, J. Ma, G. Liu, J. Fang, S. Yue, Y. Guan, L. Chen, X. Liu,* Environ. Sci. Technol. *2012*, 46, *7342–7349;*
b) Y. Peng, S. He, J. Wang, W. Gong, Radiat. Phys. Chem. *2012*, 81, *1629–1633.*

23) *M. Reckenthäler and A. G. Griesbeck,* Adv. Syn. Cat. *2013*, 355, *2727.*

24) *G. Ciamician,* Science *1912*, 36, *385.*

25) *P. Esser, B. Pohlmann, H. D. Scharf,* Angew. Chem. Int. Ed. Engl. *1994*, 33, *2009.*

26) *a) M. Oelgemöller, C. Jung, J. Mattay,* Pure Appl. Chem. *2007*, 79, *1939;*
b) M. Oelgemöller, C. Jung, J. Ortner, J. Mattay, E. Zimmermann, Green Chem. *2005*, 7, *35.*

27) *a) W. Ehrfeld, V. Hessel, H. Löwe,* Microreactors. New Technology for Modern Chemistry, *Wiley VCH, Weinheim, 2000;*
b) T. Wirth, Microreactors in Organic Chemistry and Catalysis. *Wiley VCH, Weinheim, 2013.*

28) *S. Werner, R. Seliger, H.; Rauter, F. Wissmann, EP2065387A2, 2009.*

29) *a) M. Oelgemöller,* Chem. Eng. Technol. *2012*, 35, *1144; b) M. Oelgemöller, O. Shvydkiv,* Molecules *2011*, 16, *7522.*

30) *a) A. Yavorskyy, O. Shvydkiv, N. Hoffmann, K. Nolan, M. Oelgemöller,* Org. Lett. *2012*, 14, *4342;*
b) M. Oelgemöller, N. Hoffmann, O. Shvydkiv, Austr. J. Chem. *2014*, 67, *337.*

31) *a) M. Levanon, E. Lurie, S. Malikov, O. Naigersik, L. Postel, EP 1208014, Kodak, 2004;*
b) J. Loccufier, S. Lingier, H. Janssens, EP 2159049, AGFA, 2012;
c) I. Kawauchi, H. Miyake, EP0909657, FUJI, 2003;
d) I. Kawauchi, I. Nakamura, FUJI FILM Research & Development 2005, 50, 48–51;
e) I. Kawauchi, I. Nakamura, EP 1433595, FUJI, 2007;
f) C. McCullough, K. Ray, TAGA Proceedings, 2005, 50119, 45.

32) *a) S. L. Corbiere, N. F. Haley, US 5372907, KODAK, 1994;*
b) T. Tao, J. Huang US6787281, KODAK, 2004.

33) *H. Kiphan,* Handbuch der Printmedien: Technologien und Produktionsverfahren, *Springer, Berlin, 2000.*

34) *a) M. Büschel, E. Beck, Photoinitiatoren für strahlungshärtende Beschichtungsmassen, DE 10 2007 053 198 A1, 2007;*
b) T. Brömme, J. Moebius, S. Schäfer, C. Schmitz, B. Strehmel, Eur. Coat. J. *2012*, 9, *20.*

35) *a) M. Sievers,* in Treatise on Water Science [Hrsg.: P. Wilderer], *2011, Elsevier: Oxford. p. 377;*
b) O. Legrini, E. Oliveros, A. M. Braun, Chem. Rev. *1993. 93, 671.*

36) *J. R. Bolton, C. A. Cotton,* The Ultraviolet Disinfection Handbook, *American Water Works Association, Denver, 2008.*

37) *J.R. Bolton,* IUVA News *2013*, 4, *16.*

38) *a) B. Eliasson, U. Kogelschatz,* Appl. Phys. B *1988*, 46, *299;*
b) E. Sosnin, V. Tarasenko, M. Lomaev, UV and VUV Excilamps, Physics, Technology, Application. *LAP lambert Academic Publishing, Saarbrücken, 2012,*

39) *M. G. Gonzalez, E. Oliveros, M. Wörner, A. M. Braun,* J. Photochem. Photobiol. C *2004*, 5, *225.*

40) *T. Oppenländer, G. Baum,* Chem. Ing. Tech. *1994*, 66, *1523.*

41) *E. Arany, T. Oppenländer, K. Gajda-Schrantz, A. Dombi,* Curr. Phys. Chem. *2012*, 2, *286.*

42) *A. Afzal, T. Oppenländer, J. R. Bolton, M. G. El-Din,* Water Res. *2010*, 44, *278.*

43) *D. Wang, T. Oppenländer, M. G. El-Din, J. R. Bolton,* Photochem. Photobiol. *2010*, 86, *176.*