

Literaturverzeichnis

- [Aha2001] A. Aharoni, B. Hou, N. Friedman, M Ottolenghi, I. Pousso, S. Ruhman, M. Sheves, T. Ye, Q. Zhong, *Biochemistry (Moscow)* **66**, 1210 (2001).
- [Atk2000] G. H. Atkinson, L. Ujj, Y. Zhou, *J. Phys. Chem. A* **104**, 4130 (2000).
- [Ber1990] R. van den Berg, Du-Jeon-Jang, H. C. Bitting, M. A. El-Sayed, *Biophys. J.* **58**, 135 (1990).
- [Bir1990] R. R: Birge, *Biochim. Biophys. Acta*, **1016**, 293 (1990).
- [Bra1982] M. Braiman, R. Mathies, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **79**, 403 (1982).
- [Bra1991] T. L. Brack, G. H. Atkinson, *J. Phys. Chem.* **95**, 2351 (1991).
- [Cer1997] G. Cerullo, M. Nisoli, S. De Silvestri, *Appl. Phys. Lett.* **71**, 3616 (1997).
- [Cur1985] B. Curry, I. Palings, A. D. Broek, J. A. Pardoen, J. Lugtenburg, R. Mathies, *Advances in Infrared and Raman Spectroscopy* **12**, 115 (1985).
- [Dil1995] R. Diller, S. Maiti, G. C. Walker, B. R. Cowen, R. Pippenger, R. A. Bogomolni, R. M. Hochstrasser, *Chemical Physics Letters* **241**, 109 (1995).
- [Dil1998] R. Diller, *Chem. Phys. Lett.* **295**, 47 (1998).
- [Dob1988] J. Dobler, W. Zinth, W. Kaiser, D. Oesterhelt, *Chemical Physics Letters* **144**, 215 (1988).
- [Doi1991] S. J. Doig, P. J. Reid, R. A. Mathies, *J. Phys. Chem.* **95**, 6372 (1991).
- [Dzi1996] R. Dziewior, R. Diller, *Ber. Bunsenges. Phys. Chem.* **100**, 2103 (1996).
- [Edm1999] K. Edmann, P. Nollert, A. Royant, H. Berhali, E. Pebay-Peyroula, J.Hajdu, R. Neutze, E. M. Landau, *Nature* **401**, 822 (1999).
- [Gai1997] F. Gai, J. Cooper McDonald, P. A. Anfinrud, *J. Am. Chem. Soc.* **119**, 6201 (1997).
- [Gai1998] F. Gai, K. C. Hasson, J. Cooper McDonald, P. A. Anfinrud, *Science* **279**, 1886 (1998).
- [Gar1997] M. Garavelli, P. Celani, F. Bernardi, M. A. Robb, M. Olivucci, *J. Am. Chem. Soc.* **119**, 6891 (1997).

- [Gar1999] M. Garavelli, F. Negri, M. Olivucci, *J. Am. Chem. Soc.* **121**, 1023 (1999).
- [Hah2000] S. Hahn, G. Stock, *J. Phys. Chem. B* **104**, 1146 (2000).
- [Hak1992] H. Haken, H. C. Wolf, *Molekülphysik und Quantenchemie* (Springer-Verlag Berlin Heidelberg) 171 (1992).
- [Ham1994] P. Hamm, Dissertation, München 1994.
- [Ham1995] P. Hamm, *Chemical Physics* **200**, 415 (1995).
- [Ham1997a] P. Hamm, S. M. Ohline, W. Zinth, *J. Chem. Phys.* **106**, 519 (1997).
- [Ham1997b] P. Hamm, M. Zurek, T. Röschinger, H. Patzelt, D. Oesterhelt, W. Zinth, *Chemical Physics Letters* **268**, 180 (1997).
- [Ham1997c] P. Hamm, M. Lim, R. M. Hochstrasser, *J. Chem. Phys.* **107**, 10523 (1997).
- [Ham2000] P. Hamm, R. A. Kaindl, J. Stenger, *Optics Letters* **25**, 1798 (2000).
- [Har1996] G. Haran, K. Wynne, A. Xie, Q. He, M. Chance, R. M. Hochstrasser, *Chem. Phys. Lett.* **261**, 389 (1996).
- [Has1996] K. C. Hasson, F. Gai, P. A. Anfinrud, *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* **93**, 15124 (1996).
- [Hay2002] S. Hayashi, E. Tajkhorshid, K. Schulten, *Biophysical Journal* **83**, 1281 (2002).
- [Hen1992] E. R. Henry, J. Hofrichter, *Methods in Enzymology* **210**, 129 (1992).
- [Her2002] J. Herbst, K. Heyne, R. Diller, *Science* **297**, 822 (2002).
- [Hey2000] K. Heyne, Dissertation, Berlin 2000.
- [Jof1988] M. Joffre, D. Hulin, A. Migus, A. Antonetti, C. Benoit à la Guillaume, N. Peyghambarian, M. Lindberg, S. W. Koch, *Optics Lett.* **13**, 276 (1988).
- [Kan1993] H. Kandori, K. Yoshihara, K. Tomioka, H. Sasabe, Y. Schichida, *Chem. Phys. Lett.* **211**, 385 (1993).
- [Kob1998] T. Kobayashi, M. Kim, M. Taiji, *J. Phys. Chem. B* **102**, 272 (1998).
- [Kob2001] T. Kobayashi, T. Saito, H. Ohtani, *Nature* **414**, 531 (2001).
- [Log1997] S. L. Logunov, M. A. El-Sayed, *J. Phys. Chem B.* **101**, 6629 (1997).

- [Loh1991] R. Lohrmann, I. Grieger, M. Stockburger, *J. Phys. Chem.* **95**, 1993 (1991).
- [Lue1999] H. Luecke, B. Schobert, H. T. Richter, J. P. Cartailier, J. K. Lanyi, *J. Mol. Biol.* **291**, 899 (1999).
- [Mat1988] R. Mathies, B. Cruz, W. Pollard, C. Shank, *Science* **240**, 777 (1988).
- [Pol1986] H.-J. Pollard, M. A. Franz, W. Zinth, W. Kaiser, E. Kölling, D. Oesterhelt, *Biophys. J.* **49**, 651 (1986).
- [Rim1973] L. Rimai, M. E. Heyde, D. Gill, *J. Am. Chem. Soc.* **95**, 4493 (1973).
- [Röd1999a] C. Rödig, I. Chizhov, O. Weidlich, F. Siebert, *Biophys. J.* **76**, 2687 (1999).
- [Röd1999b] C. Rödig, H. Georg, F. Siebert, I. Rousso, M. Sheves, *Laser Chem.*, **9**, 169 (1999).
- [Rot1984] K. J. Rothschild, H. Marrero, M. Braiman, R. Mathies, *Photochemistry and Photobiology* **40**, 675 (1984).
- [Rou1998] I. Rousso, Y. Gat, A. Lewis, M. Sheves, M. Ottolenghi, *Biophys. J.* **75**, 413 (1998).
- [Sch1989] G. Schneider, R. Diller, M. Stockburger, *Chem. Phys.* **131**, 17 (1989).
- [Sei1994] F. Seifert, V. Petrov, M. Woerner, *Optics Letters* **19**, 2009 (1994).
- [Sie1983] F. Siebert, W. Mäntele, *Eur. J. Biochem.* **130**, 565 (1983).
- [Smi1987] S. O. Smith, M. S. Braiman, A. B. Myers, J. A. Pardo, J. M. L. Courtin, C. Winkel, J. Lugtenburg, R. A. Mathies, *J. Am. Chem. Soc.* **109**, 3108 (1987).
- [Son1998] L. Song, M. A. El-Sayed, *J. Am. Chem. Soc.* **120**, 8889 (1998).
- [Tit1990] J. Tittor, D. Oesterhelt, *FEBS Lett.* **263**, 269 (1990).
- [Ujj2000] L. Ujj, Y. Zhou, M. Sheves, M. Ottolenghi, S. Ruhman, G. H. Atkinson, *J. Am. Chem. Soc.* **122**, 96 (2000).
- [Wan1994] Q. Wang, R. W. Schoenlein, L. A. Peteanu, R. A. Mathies, C. V. Shank, *Science* **266**, 422 (1994).
- [Wil1997] T. Wilhelm, J. Piel, E. Riedle, *Opt. Lett.* **22**, 1494 (1997).
- [Wyn1995] K. Wynne, R. M. Hochstrasser, *Chem. Phys.* **193**, 211 (1995).
- [Ye1999] T. Ye, N. Friedman, Y. Gat, G. H. Atkinson, M. Sheves, M. Ottolenghi,

- S. Ruhman, *J. Phys. Chem. B* **103**, 5122 (1999).
- [Ye2001] T. Ye, B. Hou, E. Gershgoren, M. Ottolenghi, N. Friedman, M. Sheves, S. Ruhman, *Ultrafast Phenomena XII*, Springer Series in Chem. Phys. **66**, 683 (2001).
- [Zin2001] W. Zinth, A. Sieg, P. Huppmann, T. Blankenhorn, D. Oesterhelt, M. Nonella, *Ultrafast Phenomena XII*, Springer Series in Chem. Phys. **66**, 680 (2001).
- [Zur1996] M. Zurek, Dissertation, München 1996.

Abkürzungsverzeichnis

ADC	Analog-Digital Converter
BBO	beta-Bariumborat
bR	Protein Bakteriorhodopsin
BR*	Heißer all-trans-Schwingungszustand
BR ₅₇₀	Lichtadaptierter Ausgangszustand des Photozyklus von bR mit Absorptionsmaximum bei 570 nm, Retinalchromophor in der all-trans-Konfiguration
C	Kohlenstoff
C=C	C=C-Doppelbindung, Ethylenbindung
C=NH	Doppelbindung der Schiffischen Base an den Retinalchromophor
CARS	Coherent Anti Stokes Raman Scattering
CPA	Chirped Pulse Amplifier
DFG	Difference Frequency Generation
FC	Franck-Condon
FIZ	Freier Induktionszerfall
fs	Femtosekunden
FT	Fourier Transformation
FWHM	Full Width at Half Maximum
HOOP	Hydrogen Out Of Plane Vibration
IR	Infrarotes Licht
J	erstes Photozyklusintermediat
K	zweites Photozyklusintermediat
MIR	mittleres Infrarot
NIR	Nahinfrarot
NMR	Nuclear Magnetic Resonance
NOPA	Non collinear Optical Parametric Amplifier
ns	Nanosekunde
OD	Optische Dichte
OPA	Optical Parametric Amplifier
ps	Pikosekunden
PSBR	protoniertes Schiff Base Retinal
RMS	Root Mean Square
RR	Resonanz-Raman
S ₁	erster elektronisch angeregter Singulettzustand
SB	Schiffische Base

SVD	Single-Value Decomposition
v	Schwingungsquantenzahl
VIS	Licht im sichtbarem Spektralbereich
wt	Wildtyp

Publikationen

Veröffentlichte Artikel

J. Herbst, K. Heyne and R. Diller,

Femtosecond Infrared Spectroscopy of Bacteriorhodopsin Chromophore Isomerization.

Science **297**, 822 - 825 (2002).

(Diese Veröffentlichung ist ein Ausschnitt der Doktorarbeit. Schwerpunkt ist der Zeitpunkt der Isomerisierung.)

J. Herbst, K. Heyne, M. Sheves, M. Ottolenghi, N. Friedman and R. Diller,

Photoinduced Response of all-trans-locked Retinal reconstituted Bacteriorhodopsin, studied by Ultrafast Infrared Vibrational Spectroscopy (in Vorbereitung).

K. Heyne, J. Herbst, B. Dominguez-Herradon, U. Alexiev and R. Diller,

Reaction Control in Bacteriorhodopsin: Impact of Arg82 and Asp85 on the Fast Retinal Isomerization, studied in the Second Site Revertant Arg82Ala/Gly231Cys and Various Purple and Blue Forms of Bacteriorhodopsin.

J. Phys. Chem. B. **104**, 6053 - 6058 (2000).

K. Heyne, J. Herbst, D. Stehlik, B. Esteban, T. Lamparter, J. Hughes and R. Diller,

Ultrafast Dynamics of Phytochrome from the Cyanobacterium *Synechocystis*, reconstituted with Phycocyanobilin and Phycoerythrobilin.

Biophys. J. **82**, 1004 - 1016 (2001).

B. Hessling, J. Herbst, R. Rammelsberg and K. Gerwert,

Fourier Transform Infrared Double-Flash Experiments Resolve Bacteriorhodopsin's M_1 to M_2 Transition.

Biophys. J. **73**, 2071 - 2080 (1997).

Konferenzberichte / Proceedings

J. Herbst, K. Heyne and R. Diller,

Primary Processes in the Photoisomerization of Bacteriorhodopsin studied by Femtosecond Infrared Spectroscopy. Proceedings of the Vth Femtochemistry Conference, Toledo, Spain 2001: Femtochemistry and Femtobiology, (A. Douhal and J. Santamaria, eds.) 764 - 770 World Scientific (2002).

R. Diller, J. Herbst, K. Heyne, M. Ottolenghi, N. Friedman and M. Sheves,
Vibrational Dynamics upon photoexcitation of native bacteriorhodopsin (bR) and of the all-trans - locked bR5.12.

Ultrafast Phenomena XIII (eds. R. J. D. Miller, M. M. Murnane, N. F. Scherer, A. M. Weiner) Springer Series in Chemical Physics, Berlin (2002).

Konferenzbeiträge (Vortrag / Poster)

J. Herbst, K. Heyne, B. Dominguez-Herradon, U. Alexiev and R. Diller,
pH-Abhängigkeit der ultraschnellen trans-cis-Isomerisierung von Bakteriorhodopsin.
Frühjahrstagung der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, Heidelberg 1999.

J. Herbst, K. Heyne and R. Diller,
Direct characterization of the retinal all-trans to 13-cis photoisomerization in bacteriorhodopsin by ultrafast IR vibrational spectroscopy.
46th Ann. Meeting of the Biophys. Society, San Francisco 2002. *Biophys. J.* **82**, 1105, (2002).

K. Heyne, J. Herbst, U. Alexiev and R. Diller,
The first steps of the perturbed photoreaction of bacteriorhodopsin in the blue form studied by fs time resolved IR-spectroscopy.
46th Ann. Meeting of the Biophys. Society, San Francisco 2002. *Biophys. J.* **82**, 1098 (2002).

J. Herbst, K. Heyne and R. Diller,
Untersuchung der photoinduzierten Primärprozesse in Bakteriorhodopsin mittels Femtosekunden-Infrarotspektroskopie.
Bunsentagung der Deutschen Bunsengesellschaft für physikalische Chemie, Potsdam 2002.

Danksagung

Ich möchte hiermit allen Personen herzlich danken, die auf unterschiedlichste Art und Weise zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Professor D. Stehlik und Dr. habil. Rolf Diller danke ich für die Möglichkeit diese Arbeit zu erstellen und für die gute wissenschaftliche Unterstützung.

Ich möchte meinem Leiter Rolf Diller für die erfolgreiche Zusammenarbeit und intensive Betreuung sehr danken. Seine Erfahrung in der fs-Spektroskopie wurde gut transferiert, wodurch ich für die Problemlösungen innerhalb meiner Arbeit viele clevere Tipps erhalten habe. Ich wünsche ihm viel Erfolg bei seiner Professur an der Universität Kaiserslautern.

Die positive Arbeitsatmosphäre (oder das gute "Signal-zu-Rausch-Verhältnis") in unserer kleinen Drei-Personen-Arbeitsgruppe, machten die Phasen, in der viel Ausdauer und Geduld nötig war, einfach. Der "dritte Mann" im Labor war Karsten Heyne. Ihm danke ich für die fruchtbare Zusammenarbeit und für die engagierten Diskussionen. Seinem Nachfolger Frank Peters sei gedankt für so manchen langen Messabend im Labor, wodurch er zum Datenumfang beigetragen hat. Ihm wünsche ich bei seiner Promotion gutes Gelingen.

Der Arbeitsgruppe von Professor Schwentner sei an dieser Stelle herzlich gedankt für die unkomplizierte Teilung der Lasersysteme. Im Besonderen möchte ich Mathias Bargheer und Markus Gühr für die hilfreichen Vorschläge und die freundschaftliche Atmosphäre im Labor danken.

Der guten Zusammenarbeit mit der Arbeitsgruppe von Professor Heyn habe ich die Versorgung mit ausgezeichneter bR-Wildtyp-Suspension zu verdanken, die von Ingrid Wallat hergestellt wurde. Ulrike Alexiev danke ich für die Zusammenarbeit bei der Photozykluscharakterisierung und für so manchen Tipp zum bR.

Mudi Sheves sei herzlichst gedankt für die Herstellung der bR5.12-Suspension und die gute Kooperation.

Der Elektronikwerkstatt möchte ich danken für ihre Hilfe bei der Entwicklung und den Bau der Vorverstärker.

Als ich im Sommer 1998 die Promotion begonnen habe, bin ich herzlich in der Arbeitsgruppe Stehlik/Vieht aufgenommen worden. Hiermit nochmals allen Mitgliedern der Arbeitsgruppe für die gute Atmosphäre gedankt, besonders Roswitha Brunn für so manchen leckeren Weihnachtskeks und für ihre Hilfe bei diesem und jenem.

Bei meinem Vater bedanke ich mich für die Korrektur der Dissertation. Der Familie und meinen Freunden danke ich für das gute Umfeld. Ganz Groß danke ich meiner Freundin Andrea für die viele Geduld und Ausdauer bei der Korrektur der Arbeit und für die beste Unterstützung, die sie mir während dieser Zeit zukommen ließ.