

## 6 Anhang

### 6.1 Literaturverzeichnis

- [1] P. Würfel, Physik der Solarzellen (Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, 2000)
- [2] [www.iea.org](http://www.iea.org).
- [3] Shell AG, <http://www.shell.de>.
- [4] B. O'Regan und M. Grätzel, Nature 353 (1991) 373.
- [5] K. Zweibel, Photovoltaic Insider's Report XII (1993).
- [6] H. Tributsch, Berichte der Bunsen Gesellschaft 81 (1977) 361-368.
- [7] H. Tributsch und J. C. Bennett, Journal of Electroanalytical Chemistry 81 (1977) 97-111.
- [8] H. Tributsch, Farady Diskussions 70 (1980) 189.
- [9] F. Fan, H. S. White, B. L. Wheeler und A. J. Bard, J. Am. Chem. Soc. 102 (1980) 5142-5148.
- [10] H. Tributsch, Solar Energy Materials 1 (1979) 257.
- [11] R. Tenne und A. Wold, Appl. Phys. Lett. 47 (1985) 707-709.
- [12] O. N. Srivastava und G. Prasad, J. Phys. D: Appl. Phys. 21 (1988) 1028-1030.
- [13] F. Baumgartner, [www.ntb.ch/files/0/2772/thin\\_film\\_oct\\_99\\_baumgartner.pdf](http://www.ntb.ch/files/0/2772/thin_film_oct_99_baumgartner.pdf).
- [14] V. Weiss, W. Bohne, J. Röhrich, E. Strub, U. Bloeck, I. Sieber, K. Ellmer, R. Mientus und F. Porsch, Journal of Applied Physics 95 (2004) 7665.
- [15] J. Pütz, Nasschemische Aufbringung von MoS<sub>x</sub>-Dünnschichten über Alkyldiammonium-tetrathiomolybdate, Dissertation (Universität des Saarlandes, Saarbrücken, 2002).
- [16] G. Schlichthorl, Untersuchung der Ladungsträgerkinetik in photoelektrochemische Systemen mit lichtinduzierter Mikrowellenreflektion, Dissertation (Freie Universität, Berlin, 1991).
- [17] H. Tributsch, G. Schlichthorl und L. Elstner, Electrochimica Acta 38 (1993) 141-152.
- [18] G. Schlichthorl und H. Tributsch, Electrochimica Acta 37 (1992) 919-931.
- [19] F. Wunsch, Untersuchung der Ladungsträgerkinetik energiewandelnder Halbleitergrenzflächen mittels kombinierter Mikrowellenreflexions- und Photostrommessungen, Dissertation (Technische Universität, Berlin, 1997).
- [20] H. Tributsch, Structur and bonding 49 (1982) 127.
- [21] H. Wise, Polyhedron 5 (1986) 145-150.
- [22] F. Wypych, T. Weber und R. Prins, Chem. Mater. 10 (1998) 723-727.
- [23] J. Bauer und F. Tvrz, Der Kosmos Mineralienführer (Gondron Verlag, Bindlach, 1993) 131.
- [24] A. R. Landsdown, Molybdenum Disulphide Lubrication, 1 ed. (Elsevier, Amsterdam, 1999)
- [25] H. Bergmann, B. Czeska, I. Haas, B. Mohsin und K.-H. Wandner, Mo - Molybdenum, Compounds with S. (Springer-Verlag, Berlin, 1992; Vol. B7)
- [26] A. B. Seddon, S. N. B. Hodgson und M. G. Scott, J. Mater. Sci. 26 (1991) 2599-2602.

- [27] B. V. A. Goetzenberger, J. Knobloch, *Sonnenenergie: Photovoltaic* (Teuber, Stuttgart, 1994)
- [28] W. Schottky, *Zeitschrift f. Physik* **113** (1939) 367.
- [29] R. Memming, *Semiconductor Electrochemistry* (Wiley-VCH, Weinheim, 2001)
- [30] M. Etman und M. Neumann-Spallart, *Journal of Electroanalytical Chemistry* **169** (1989) 411-422.
- [31] J. Bardeen, *Phys. Rev.* **71** (1947) 717.
- [32] L. J. Brillson, *Surf. Sci. Reports* **2** (1982) 123.
- [33] M. S. Tyagi, *Introduction to Semiconductor Materials and Devices* (John Wiley & Sons, New York, 1991) 275.
- [34] J. H. Werner und U. Rau, *Silicon-Based Millimeter-Wave Devices*; (edited by J. F. Luy und P. Russer); Springer (Berlin, 1994); 93-96.
- [35] R. A. Marcus, *Ann. Rev. Phys. Chem.* **15** (1964) 155.
- [36] H. Gerischer, (Academic Press, New York, 1970; Vol. 4 A) 463.
- [37] V. G. Levich, (Wiley Interscience, New York, 1966; Vol. 4) 249.
- [38] H. Gerischer, *Z. Phys. Chem.* **26** (1960) 232.
- [39] H. Gerischer, *Z. Phys. Chem.* **27** (1961) 48.
- [40] R. Memming, (Plenum Press, New York, 1983; Vol. 7) 529.
- [41] H.-J. Lewerenz und H. Jungblut, *Photovoltaik* (Springer Verlag, Berlin, 1995)
- [42] R. Tenne, A. Wold und D. Mahalu, *Phys. Rev. B* **38** (1988) 38.
- [43] W. Kautek, H. Tributsch und H. Gerischer, *J. Electroanal. Chem.* **127** (1980) 2471.
- [44] *Microwave (Photo)electrochemistry*; H. Tributsch, Ed.; Kluwer Academic/Plenum Publishers, 1999; Vol. 33, 435-522.
- [45] G. Petermann, H. Tributsch und G. Bogomolni., *J. Chem. Phys.* **78** (1982) 1579-1584.
- [46] W. W. Gärtner, *Phys. Rev.* **116** (1959) 4292.
- [47] F. Levy und A. M. Goldberg, *Philos. Mag.* **32** (1975) 367.
- [48] J. A. Wilson und A. D. Yoffe, *Adv. Phys.* **18** (1969) 193.
- [49] R. V. Kasowski, *Phys. Rev. Lett.* **30** (1973) 1175-1178.
- [50] R. Coehoorn, C. Haas, J. Dijkstra, C. J. Flipse, R. A. d. Groot und A. Wold, *Phys Rev B Condens Matter.* **35** (1987) 6195-6202.
- [51] W. Jaegermann und T. Mayer, *Surface Science* **335** (1995) 343-352.
- [52] W. Jaegermann, *Surface Studies of Layered Materials in Relation to Energy Converting Interfaces. in Photoelectrochemistry and Photovoltaics of Layered Semiconductors*; (edited by A. Aruchamy); Kluwer Academic Publishers (Dordrecht, 1992); 195.
- [53] D. Haneman und H. Tributsch, *Chemical Physics Letters* **216** (1993) 81-86.
- [54] E. Bucher, *Solid state junctions of layered semiconductors in Photoelectrochemistry and Photovoltaics of Layered Semiconductors*; (edited by A. Aruchamy); Kluwer Academic Publishers (Dordrecht, 1992); 1.
- [55] M. K. Agarwal und G. H. Yousefi, *J. Mat. Sci. Lett.* **9** (1990) 686-687.
- [56] W. Kautek, *J. Phys. Chem.* **30** (1980) 519.
- [57] W. Kautek, *Solid State Physics* **15** (1982) L519.

- [58] R. Tenne, A. Wold und M. S. Wrighton, *J. El. Chem. Soc.* **129** (1982).
- [59] W. Kautek, H. Gerischer und H. Tributsch, *Ber. Bunsenges. Phys. Chem.* **83** (1979) 1000-1008.
- [60] M. S. Antonious, M. Etman und M. Savy, *Journal of Electroanalytical Chemistry* **242** (1988) 191-202.
- [61] H. J. Iewerenz, H. Gerischer und M. Luebke, *J. Electrochem. Soc.* **131** (1984) 100-104.
- [62] W. Kautek und H. Gerischer, *Electrochimica Acta* **26** (1981) 1771-1778.
- [63] F. Decker und B. Scrosati, in *Photoelectrochemistry and Photovoltaics of Layered Semiconductors*; (edited by A. Aruchamy); Vol. 14 Kluwer Academic Publishers (Dordrecht, 1992); 121-154.
- [64] B. A. Parkinson, T. E. Furtak, D. C. Canfield, K. Kam und G. Kline, *Discussions of the Faraday Society* **70** (1980) 233.
- [65] G. Kline, K. Kam und B. A. Parkinson, *Solar Energy Materials* **4** (1981) 301-308.
- [66] G. Razzini, M. Lazzari, L. P. Bicelli, F. Levy, L. De Angelis, F. Galluzzi, E. Scafe, L. Fornarini und B. Scrosati, *Journal of Power Sources* **6** (1981) 371-382.
- [67] H. Tributsch, *J. Electrochem. Soc.* **133** (1986) 339.
- [68] C. Levy und R. Tenne, Modifiacion of surface properties of layered semiconductors in *Photoelectrochemistry and Photovoltaics of Layered Semiconductors*; (edited by A. Aruchamy); Vol. 14 Kluwer Academic Publishers (Dordrecht, 1992); 155.
- [69] A. J. Bard und F. Fan, *J. Electrochem. Soc.* **128** (1980) 945.
- [70] G. Razzini, *Journal of Power Sources* **7** (1982) 275-280.
- [71] H. Gerischer, *J. Electroanal. Chem.* **150** (1983) 553.
- [72] P. Salvador und G. Campet, *Phys. Rev. B* **38** (1988) 9881.
- [73] R. Tenne, W. Spahni, G. Calzaferri und A. Wold, *Journal of Electroanalytical Chemistry* **189** (1985) 247-256.
- [74] R. Tenne und G. Hodes, *Appl. Phys. Lett.* **37** (1980) 428-430.
- [75] R. Tenne, R. Haak und R. Triboulet, *Ber. Bunsenges. Phys. Chem.* **91** (1987) 597-599.
- [76] A. M. C. P. Salvador, A. Mir, *J. Phys. Chem.* **100** (1996) 760-768.
- [77] A. M. Chaparro, P. Salvador und A. Mir, *Journal of Electroanalytical Chemistry* **422** (1997) 35-44.
- [78] A. J. Bard und H. S. White, *J. Electrochem. Soc.* **129** (1982) 265.
- [79] G. Djemal und N. Müller, *Solar Energy Materials* **5** (1981) 403.
- [80] S. J. Lippard und J. M. Berg, *Bioanorganische Chemie* (Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg; Berlin; Oxford, 1995)
- [81] I. Daizadeh, D. M. Medvedev und A. A. Stuchebrukhov, *Mol Biol Evol* **19** (2002) 406-415.
- [82] Y. Tian, M. Shioda, S. Kasahara, T. Okajima, L. Mao, T. Hisabori und T. Ohsaka, *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - General Subjects* **1569** (2002) 151-158.
- [83] T. Rajh, A. E. Ostafin, O. I. Micic, D. M. Tiede und M. C. Thurnauer, *J. Phys.*

- Chem. 100 (1996) 4538-4545.
- [84] T. Rajh und M. Thurnauer, Semiconductor assisted metal deposition for nanolithography applications The University of Chicago, (United States of America, 2001) 6,271,130.
- [85] F. Mauge, J. Lamotte, N. S. Nesterenko, O. Manoilova und A. A. Tsyganenko, *Catalysis Today* 70 (2001) 271-284.
- [86] A. A. Tsyganenko, F. Can, A. Travert und F. Mauge, *Applied Catalysis A: General* 268 (2004) 189-197.
- [87] F. Marken, A. Neudeck und A. M. Bond, Cyclic Voltammetry in *Electroanalytical Methods: Guide to Experiments and Applications*; (edited by F. Scholz); Springer-Verlag (New York, 2002).
- [88] J. Heinze, *Angew. Chem.* 96 (1984) 832.
- [89] A. J. Bard und L. R. Faulkner, *Electrochemical Methods. Fundamentals and Applications* (Wiley, New York, 1980)
- [90] K. Heyrovsky, *Principles of Polarography* (Academic Press, New York, 1966)
- [91] ISL, <http://www.hmi.de/isl/ana/erda-1.html>.
- [92] J. R. Tesmer und M. Nastasi, *Handbook of Modern Ion Beam Materials Analysis* (Materials Research Society, Pittsburg, 1995)
- [93] L. J. van der Pauw, *Philips Technical Review* 26 (1958/59) 220.
- [94] E. Benavente, M. A. Santa Ana, F. Mendizabal und G. Gonzalez, *Coordination Chemistry Reviews* 224 (2002) 87-109.
- [95] G. A. Scholz und R. F. Frindt, *Materials Research Bulletin* 15 (1980) 1703-1716.
- [96] S. Srivastava, *Materials Research Bulletin* 26 (1991) 631-639.
- [97] R. Paul, *Halbleiterphysik* (Dr. Alfred Hüthig Verlag, Heidelberg, 1975)
- [98] A. Barkschat, Investigation of interfaces characterized by metal-centered electron transfer using electrochemical imaging techniques, Dissertation (Freie University, Berlin, 2004).
- [99] S. M. Ahmed, *Electrochimica Acta* 27 (1982) 707-712.
- [100] H. Tributsch, *Structure and bonding* 49 (1982) 127-175.
- [101] W. Jaegermann und D. Schmeißer, *Surf. Sci. Reports* 165 (1986) 143.
- [102] H. Gerischer und W. Kautek, *J. Electroanal. Chem.* 137 (1982) 239.
- [103] A. M. Bond, *Electroanalysis* 13 (2001) 1475.
- [104] T. Liu, *J. Am. Chem. Soc.* 124 (2002) 10942.
- [105] A. J. McEvoy, M. Etman und M. Hemming, *Journal of Electroanalytical Chemistry* 190 (1985) 225-241.
- [106] M. J. McKelvy und W. S. Glaunsinger, *Annual Review of Physical Chemistry* 41 (1990) 497.
- [107] N. Imanishi, M. Toyoda, Y. Takeda und O. Yamamoto, *Solid State Ionics* 58 (1992) 333-338.
- [108] Fernando Mendizábal, María Angélica Santa Ana, Eglantina Benavente und G. González, *Journal of the Chilean Chemical Society* 48 (2003).
- [109] G. Razzini und L. P. Bicelli, *Surf. Technol.* 20 (1983) 383.
- [110] H. Tributsch, *Electronic Structure, Coordination Photoelectrochemical*

Pathways and Quantum Energy Conversion by layered Transition Metal Dichalcogenides in *Photoelectrochemistry and Photovoltaics of Layered Semiconductors*; (edited by A. Aruchamy); Vol. 14 Kluwer Academic Publishers (Dordrecht, 1992); 83-119.

- [111] N. Lewis und A. Fajador, *Science* 274 (1996) 968.
- [112] B. Müller, M. Schubert und C. Oughourlian, *Materials and Corrosion* 51 (2000) 642.

## 6.2 verwendete Chemikalien, Materialien und technische Geräte

### 6.2.1 Materialien:

- Silber Epoxyd-2-Komponentenkleber von Panacol (Elecolit 3025)
- Indium Gallium Eutektikum am Hahn-Meitner-Institut hergestellt
- Platinpaste von SPI supplies; 569 East Gay Street, West Chester, PA 19380, USA; <http://www.2spi.com/>
- Epoxydkleber: Araldit Rapid, Zweikomponenten-Alleskleber auf Epoxidharzbasis.
- Srintec 901: besitzt bei der Verarbeitung eine fließfähige Konsistenz und vernetzt zu einem hochdispersiven roten Siliconkautschuk.

### 6.2.2 Chemikalien:

- **Acetonitril** von Petrochem (HPLC grade, 99,9%).
- **p-Benzochinone** (M=108 g/Mol) von Merck (p.a.).
- **p-Hydroydrochinone** (M= 110 g/Mol) von Janssen Chemika (p.a.).
- **L-Cystein** (M=121 g/Mol) von Fluka (Mikro select >99,5).

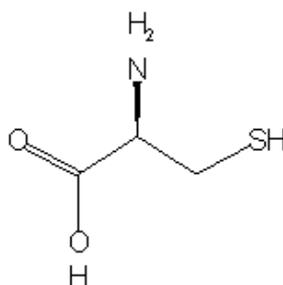


Abb. 90 L-Cystein

- **Natriumdodecylsulfat** (M=288 g/Mol) von Fluka (p.a.)

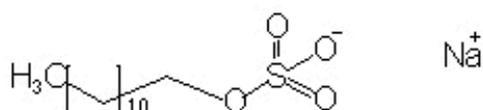


Abb. 91 Natriumdodecylsulfat

- **EDTA**, (M=336 g/Mol) Ethylendiamintetraacetatdinatriumsalz von Aldrich
- **Eisen(III)chlorid** (M=162 g/Mol) von Merck (98 %)
- **Eisen(II)chlorid Tetrahydrat** (M=198 g/Mol) von Fluka (98 %)
- **Ferrocen** (M=186 g/Mol) von Fluka (purum 98 %)
- **Hexacyanoferrat** (rotes und gelbes Blutlaugensalz)
  - $K_3[Fe(CN)_6]$  (Kaliumferricyanid) (M=329 g/Mol) von Merck (p.a.)
  - $K_4[Fe(CN)_6]$  (Kaliumferrocyanid) (M=422 g/Mol) Trihydrat von Merck (p.a.).
- **Iod** (M=254 g/Mol) von Ferak (doppelt sublimiert).
- **Kaliumiodid** (M=166 g/Mol) von Merck (p.a.).
- **Kaliumsulfat** (M=174 g/Mol) von Merck (p.a.).
- **Methionin** (M=149 g/Mol) von Fluka (Mikro select >99,5 %).

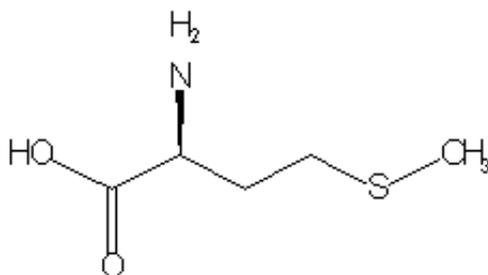


Abb. 92 Methionin

- **Molybdän(VI)oxid** (M=144 g/Mol) von Aldrich (99,5 %)
- **NAT (Tris(carboxymethyl)amine)** (M=191 g/Mol) von Aldrich (99 %).

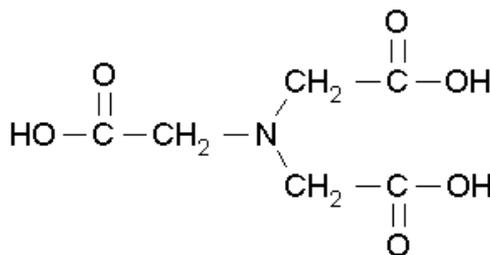


Abb. 93 NTA

- **Natron- und Kalilauge** beide von Merck.
- **1-Octanthiol** (Dichte<sup>20</sup>: 0,84 g/cm<sup>3</sup>, M= 146 g/Mol) von Aldrich (98 %).
- **Perchlorsäure** (Dichte<sup>15</sup>: 1,53 g/cm<sup>3</sup>) von Merck.
- **Schwefelsäure** (Dichte<sup>20</sup>: 1 g/cm<sup>3</sup>) von Merck.
- **TBAP** (Tetra-n-butylammoniumperchlorate) (M=341 g/Mol) von Merck (p.a.)
- **Natriumthiocyanat** (M=81 g/Mol) von Aldrich (98 %)
- **Tween 20** (Poly-n-oxyethylenesorbitan-monolaureate, n ca. 20) (Dichte<sup>25</sup>: 1.1 g/cm<sup>3</sup>, M=1222 g/Mol) von Aldrich ().

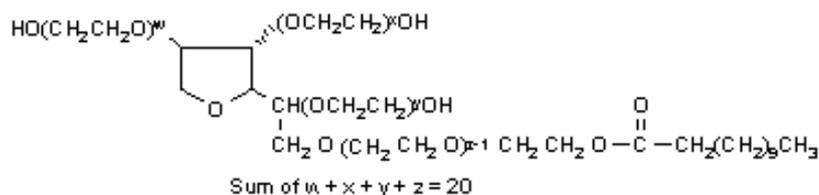


Abb. 94 Tween 20

- **Tween 80** (Poly-n-oxyethylenesorbitan-monooleate, n ca. 20) (Dichte<sup>25</sup>: 1.1 g/cm<sup>3</sup>) von Fluka.

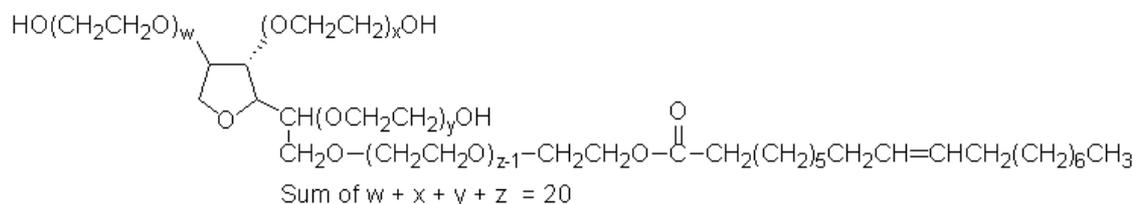


Abb. 95 Tween 80

- **Tween 85** (Poly-n-oxyethylenesorbitan-trioleate, n ca. 20) (Dichte<sup>25</sup>: 1.1 g/cm<sup>3</sup>) von Aldrich.

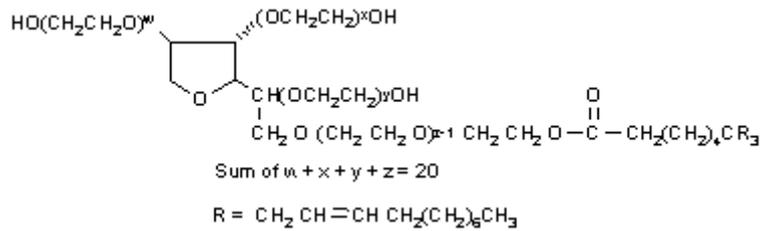


Abb. 96 Tween 85

### 6.2.3 technische Geräte:

#### Verwendete LEDs und Lampen:

- Laser Diode Controller von Profile, Model LDC 200m mit:
  - 626 nm LED von Conrad: superhelle LED: Nr. 186597-14 mit 6500 mcd
  - 875 nm LED von Conrad: Nr. 185809-14
- Schott KL 1500 mit halogen reflector lamp HLX 64634 EFR 15 V, 150 W, 3200 K von Osram.
- Xenonlampe, 450 Watt, XBO/W von Osram.

#### Potentiostat:

- Modell :POS 73 von Bank

#### Lock In:

- Modell DSP830 von Stanford Research System
- Modell 5205 von EG&G

#### Mikrowellenquelle:

- Millimeter Oszillator Company, Model 28MT100-35 S/N 105  
verwendeter Bereich: 36000 Hz (160 mW)

#### 6.2.4 Kristallchargen:

- c12 Ampulle Ø 20, 2, 190mm Transportmittel I<sub>2</sub> (7.3mg/cm<sup>3</sup>), 2 g MoS<sub>2</sub> + 25 mg MoO<sub>3</sub>
- r5: Ampulle Ø 30, 2, 110mm, Transportmittel Br<sub>2</sub>, 2 g MoS<sub>2</sub> + MoO<sub>3</sub> (25mg) Temperaturgradient 930/890°C
- r9: Ampulle Ø 30, 2, 75mm, 2 g MoS<sub>2</sub> + MoO<sub>3</sub> (25mg) Transportmittel Br<sub>2</sub>; Temperaturgradient 930/890°C
- r12: Ampulle Ø 30, 2, 75mm, 2 g MoS<sub>2</sub> + MoO<sub>3</sub> (25.7mg) Transportmittel Br<sub>2</sub>; Temperaturgradient 900/850°C
- r14: Ampulle Ø 30, 2, 75mm, 2 g MoS<sub>2</sub> + MoO<sub>3</sub> (28mg) Transportmittel Br<sub>2</sub>; Temperaturgradient 900/850°C
- r15: Ampulle Ø 30, 2, 75mm, 2 g MoS<sub>2</sub> + MoO<sub>2</sub> (26mg) Transportmittel Br<sub>2</sub>; Temperaturgradient 900/850°C



### 6.3 Abbildungsverzeichnis

Abb. 1 Wirkungsgrade verschiedener Solarzellen [13].	1
Abb. 2 Struktur, Kristallsymmetrie und Energieverteilung der d-Zustände einiger Schichtgitterverbindungen nach [20].	5
Abb. 3 Darstellung eines Schichtgitters der VI Nebengruppe mit Bindungsabständen und möglichen Besetzungslücken zwischen den Van-der-Waals-Schichten [21].	6
Abb. 4 Ein auf Quarzgestein natürlich gewachsener MoS <sub>2</sub> Kristall. Deutlich zu erkennen die hexagonale Kristallstruktur (rot umrandet) [23].	7
Abb. 5 Energieabhängigkeit der a) Zustandsdichte b) der Fermiverteilung und c) der Ladungsträgerkonzentrationen in einem intrinsischen Halbleiter (aus [27]).	10
Abb. 6: Energieschema a) der Donorzustandsdichte, b) die Lage des Fermi-Niveaus und c) die Ladungsträgerkonzentration eines n-Halbleiters (aus [27]).	10
Abb. 7 Angleichung der Fermi-Niveaus bei Kontakt von Metall und Halbleiter.	14
Abb. 8 Bildung eines Kontaktes zwischen Metall und Halbleiter mit ähnlichen Lagen des Fermi-Niveaus.	15
Abb. 9 Darstellung eines Rückkontaktes eines hochdotierten Halbleiters mit einem Metall.	15
Abb. 10 Einstellung des Kontaktes zwischen einem Metall und ein Halbleiter mit vielen Oberflächenzuständen.	16
Abb. 11 Kontakt zwischen einem p- und einem n-Halbleiter (aus [27]).	16
Abb. 12 Verteilung der Zustandsdichte des Redoxelektrolyten. Bei Kontakt mit einem Halbleiter gleicht sich das Fermi-Niveau der Halbleiters dem E <sub>R,O</sub> an.	21
Abb. 13 Energetische Lage der Bänder einiger Halbleiter und der Redoxpotentiale gegen die Vakuumenergie und gegen die NHE Scala (leicht modifiziert aus [41]).	22
Abb. 14 Bildung der quasi-Fermi-Niveaus unter Belichtung.	23
Abb. 15 Hier sind die Verschiedenen Prozesse die nach Generation der Ladungsträger einsetzen dargestellt (nach [16]).	24
Abb. 16 Mechanismen die zum Abbau der gebildeten Überschussladungsträger führen.	25
Abb. 17 Geometrische Einteilung eines n-Halbleiters. Rot eingezeichnet der angenäherte Verlauf des elektrischen Feldes in der Raumladungszone nach (II.35)	27
Abb. 18 Elektromagnetisches Spektrum.	34
Abb. 19 Wechselwirkung und Reflektion der Mikrowellenstrahlung	36
Abb. 20 Prinzip der (gechoppten) modulierten Anregung.	37
Abb. 21 Quantenausbeuten von p-Wolframdiselenid bei 626 nm Beleuchtung (1,5 mW/cm <sup>2</sup> ) in Eisen(III) in 0,5 M Schwefelsäure.	40
Abb. 22 Berechnete Eindringtiefe der Belichtung für verschiedene Absorptionskoeffizienten nach dem Lambert-Beerschen-Gesetz.	41
Abb. 23 Quantenausbeute bei 875 nm Anregungswellenlänge (0,9 mW/ cm <sup>2</sup> ) bzw. bei 626 nm Anregungswellenlänge (0,9 mW/ cm <sup>2</sup> ) mit 0,25 M Eisen(II)/Eisen(III) in 0,5 M Schwefelsäure und einer Vorschubgeschwindigkeit von 20 mV/s.	42
Abb. 24 Verschiedene Verlustprozesse von Ladungsträgern an Oberflächenzuständen. 1) Transport	

von Elektronen über Defekte in der Rasumladungszone. 2) Rekombination in der Raumladungszone und 3) Einfangen von Ladungsträgern (trappen) von Ladungsträgern (aus [41]).....	44
Abb. 25 Darstellung der Ablenkung von lichtinduzierten Minoritätsladungsträgern eines n-Schichtgitterhalbleiters. $c_{\perp}$ und $c_{\parallel}$ stellen die Minoritätsladungsträgerkonzentrationen dar (aus [41]).....	45
Abb. 26 Adsorption von A) 1,2 Diphenylphosphinoethan, B) Phenylisocyanid und C) Dimethyldithiocarbamat an ungesättigten Molybdänbindungen (aus [64]) .....	46
Abb. 27 Semi-Intercalation von tertiär-Buthyl-pyridin (aus [64]) .....	47
Abb. 28 links: Kristall über der Eintrittsöffnung für die Mikrowellenreflexion. rechts: fertige photoelektrochemische Zelle.....	51
Abb. 29 Messanordnung für den Rückkontakttest. Kontakt 1 sollte mit einem Material hergestellt werden, b .....	52
Abb. 30 Das Hydrochinone/ Chinone Redoxsystem.....	54
Abb. 31 Eine typische CV Kurve mit a) Potentialänderung, b) Antwortsignal gegen die Zeit und c) Antwortsignal gegen das angelegte Potential. ....	56
Abb. 32 Schematischer Aufbau einer DEMS Messzelle, mit Arbeitselektrode (WE), Gegenelektrode (CE), Referenzelektrode (REF) und Massenspektrometer (MS). ....	58
Abb. 33 Aufbau der elektrochemische Zelle für kombinierte Mikrowellenreflexions- und photoelektrochemische Messungen.....	61
Abb. 34 Apparativer Aufbau für die kombinatorische Messung von Photostrom und Mikrowellenreflexion. Der Strahlengang der Mikrowellenstrahlung ist rot eingezeichnet. ....	61
Abb. 35 Herleitung der Bragg Bedingung. ....	63
Abb. 36 Prinzip der ERDA [91].....	64
Abb. 37 Messanordnung für die Hall-Spannung.....	67
Abb. 38 Methode nach Van Der Pauw.....	68
Abb. 39 Kontakttest vom synthetischen Kristall R5 im Metall(1)/Halbleiter/Metall(2) Anordnung mit Metall(1): Platin (ca. 25 mm <sup>2</sup> ) und Metall(2):Platin (5 mm <sup>2</sup> ). $R= 12,5 \Omega\text{cm}^2$ .....	71
Abb. 40 Kontakttest vom synthetischen Kristall c12 im Metall(1)/Halbleiter/Metall(2) Anordnung mit Metall(1): Platin (ca. 30 mm <sup>2</sup> ) und Metall(2):Platin (6 mm <sup>2</sup> ). $R= 9,9 \Omega\text{cm}^2$ .....	72
Abb. 41 Rückkontakttest eines natürlichen MoS <sub>2</sub> Kristalls mit verschiedenen Kontaktmaterialien. ....	73
Abb. 42 AFM Aufnahme eines synthetischen Kristalls. Deutlich zu erkennen Kristallabbruchkanten an denen sich die dangling bonds befinden.....	79
Abb. 43 TEM Aufnahme einer Schraubversetzung auf der Kristalloberfläche. (EHT 1kV) .....	80
Abb. 44 Oberfläche eines synthetischen MoS <sub>2</sub> Kristalls mit Tween 80 modifiziert. An den Stufen lagert sich diese Verbindung bevorzugt an. ....	81
Abb. 45 Strom/Spannungskurve eines natürlichen Kristalls (SPI) in 0,5 Kaliumsulfatlösung. Vorschubgeschwindigkeit (2 mV/s) bei einer Elektrodenoberfläche von 12 mm <sup>2</sup> und einer zweiminütigen anodischen Vorpolarisierung bei 1,2 V vs. SCE. ....	83
Abb. 46 Strom/Spannungskurve desselben Kristalls unter analogen Bedingungen wie in Abb. 45 mit	

MoO <sub>3</sub> ohne Vorpolarisierung. ....	84
Abb. 47 Natürlicher Kristall SPI: A) Darstellung der Strom/Spannungskurve (drei Zyklen) gegen die Zeit. Die Bereiche der anodischen Zersetzung (schwarze Pfeile) und der kathodischen Wasserstoffbildung (rote Pfeile) sind eingezeichnet. B) Simultan zu den Strom/Spannungskurven detektierte gasförmige Produkte. (Messung in 0,5 M Schwefelsäure mit 20 mV/s Vorschubgeschwindigkeit gegen NHE. Hier wurde mit dem angelegten Potential teilweise stehen geblieben.) .....	87
Abb. 48 Natürlicher Kristall (Australien) in 0,5 M Schwefelsäure. Nur die Fläche parallel zur c-Achse des Kristalls ist dem Elektrolyt exponiert. oben: Strom/Spannungskurve. unten: Detektierte gasförmige Zersetzungsprodukte. (Vorschubgeschwindigkeit 20 mV/s gegen NHE).....	88
Abb. 49 Tantaldisulfid in 0,5 M Schwefelsäure. oben: Strom/Spannungskurve. unten: Detektierte gasförmige Zersetzungsprodukte. Deutlich zu erkennen die kathodische Schwefelwassertstoffbildung. (Vorschubgeschwindigkeit 20 mV/s gegen NHE).....	89
Abb. 50 Titandisulfid in 0,5 M Schwefelsäure. oben: Strom/Spannungskurve. unten: Detektierte gasförmige Zersetzungsprodukte. (Vorschubgeschwindigkeit 20 mV/s gegen NHE).....	90
Abb. 51 Hysterese einer photoelektrochemischen Strom/Spannungskurve in 0,5 M Kaliumsulfat mit 0,1 M Fe(II)/(III). 1 Hinzyklus; 2 Rückzyklus. Anregung 626 nm (0.7 mW/cm <sup>2</sup> ) bei einer Vorschubgeschwindigkeit von 20 mV/s. ....	93
Abb. 52 Photodegradation eines natürlichen Kristalls in 0,5 M Kaliumsulfat. Messungen nach einem, 20 und 50 Zyklen bei einer Vorschubgeschwindigkeit von 5 mV/s und unter hoher Beleuchtungsdichte (Halogen Weisslicht: 8,2 mW/cm <sup>2</sup> ). ....	94
Abb. 53 Der Potentialrücklauf aus Abb. 52. ....	94
Abb. 54 Angriffspunkt für das Photoätzen einer Schichtgitterverbindung.....	95
Abb. 55 synthetischer Kristall R5 unter Halogenbeleuchtung (8,7 mW/cm <sup>2</sup> ) bei pH=2 und pH=14 in 0,5 M Kaliumsulfatlösung.....	96
Abb. 56 Photoätzen eines synth. MoS <sub>2</sub> Kristalls (R5, 9 mm <sup>2</sup> ) mit Perchlorsäure bei 1,2 V und einer Beleuchtung von 626 nm (0,5 mW/cm <sup>2</sup> ). Inset stellt den Photoätzprozess nach 35 min dar. ....	97
Abb. 57 Probe R5 vor und nach dem Photoätzprozess (900 s bei 1,2 V in 1 N HClO <sub>4</sub> bei 0,5 mW/cm <sup>2</sup> mit 626 nm Anregung). Diese Messung wurde in 0,5 M Kaliumsulfat mit 0,1/0,001 M KI/I <sub>2</sub> bei 626 nm Anregung (0,5 mW/cm <sup>2</sup> ) und 20 mV/s Vorschub durchgeführt. ....	98
Abb. 58 Änderung der Konzentration des Redoxelektrolyten bei 1,2 V vs. SCE und gleichzeitige Änderung des Photostromes (—) und der Mikrowellenreflexion (--) bei 626 nm Beleuchtung in Iod/ Iodid. ....	99
Abb. 59 c12 in 0,005 M Hexacyanoferrat und 0,25 M Hexacyanoferrat. 626 nm Beleuchtungsintensität (0,7 mW/cm <sup>2</sup> ) Vorschubgeschwindigkeit 30 mV/s.....	101
Abb. 60 p-WSe <sub>2</sub> in 0,5 M Schwefelsäure mit unterschiedlichen Fe <sup>2+</sup> /Fe <sup>3+</sup> Konzentrationen bei 1,5 mW/cm <sup>2</sup> Anregungsdichte und einer Vorschubgeschwindigkeit von 20 mV/s. ....	102
Abb. 61 Neuskalierung der Mikrowellenreflexion aus Abb. 60 für hohe Eisen(III) Konzentrationen. ..	103
Abb. 62 p-WSe <sub>2</sub> in 0,5 M Schwefelsäure mit 0,05 M Fe <sup>2+</sup> /Fe <sup>3+</sup> bei 626 nm (1,6 mW/cm <sup>2</sup> ) und einer Vorschubgeschwindigkeit von 20 mV/s (selbe Probe wie in Abb. 60, jedoch mit geschädigter	

---

Oberfläche).....	104
Abb. 63 Konzentrationsreihe der Probe R5 in Acetonitril (0,1 M TBAP) mit 626 nm Anregung (1 mW/cm <sup>2</sup> ) 1. Kein Redoxsystem 2. 0,001/0,1 Iod/Iodid 3. 0,005/0,5 Iod/Iodid (Vorschub 30 mV/s) .....	106
Abb. 64 Probe R5 in Acetonitril (0,1 M TBAP) mit 626 nm Anregung (1 mW/cm <sup>2</sup> ) 1. Kein Redoxsystem 2. + 5µl H <sub>2</sub> O (Vorschub 30 mV/s).....	107
Abb. 65 Probe R5 in Acetonitril (0,1 M TBAP) mit 626 nm Anregung (0,9 mW/cm <sup>2</sup> ) 1. 0,005 M/0,5 M Iod/Iodid 2. + 5µl H <sub>2</sub> O (Vorschub 30 mV/s).....	108
Abb. 66 Tween 80 .....	109
Abb. 67 XRD von Kristalliten der Charge R12, die mit verschiedenen Tween Verbindungen modifiziert wurden ([001] Reflex). .....	110
Abb. 68 XRD von modifiziertem mikrokristallinem Molybdändisulfid ([001] Reflex). .....	111
Abb. 69 Ein natürlicher Kristall (Australien) wurde zuerst mit Tween 80 und anschließend mit Tween 20 modifiziert. (Fläche parallel zur c-Achse 12 mm <sup>2</sup> , in 0,5 M Kaliumsulfat, Vorschubgeschwindigkeit 20 mV/s) .....	112
Abb. 70 Dunkelstrom eines natürlichen Kristalls (SPI), der mit Tween 80 modifiziert wurde (0,5 M Kaliumsulfatlösung, Vorschubgeschwindigkeit 20 mV/s bei einer Oberfläche von 25 mm <sup>2</sup> ) .....	113
Abb. 71 Photostrom und Mirkowellenreflexion von R5 in 0,5 M Kaliumsulfat nach Modifikation mit Tween 80 unter Halogenbeleuchtung (8,7 mW/cm <sup>2</sup> ) bei einer Vorschubgeschwindigkeit von 15 mV/s und einer Probenoberfläche von 14 mm <sup>2</sup> .....	114
Abb. 72 Kristall c12 nach Modifikation mit Tween 80 (15h) unter Halogenbeleuchtung (8,7 mW/cm <sup>2</sup> ) bei einer Vorschubgeschwindigkeit von 20 mV/s in 0,2 M Hexacyanoferratlösung.....	115
Abb. 73 Ethylendiamintetraessigsäure .....	116
Abb. 74 Dunkelströme nach Adsorption von EDTA (14 h) an einem natürlichen Kristall (SPI) in 0,5 M Kaliumsulfat (Vorschubgeschwindigkeit 10 mV/s bei einer Oberfläche von 25 mm <sup>2</sup> ).....	117
Abb. 75 R5 in 0,5 M K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> nach der Modifikation mit EDTA (12 h) bei einer Vorschubgeschwindigkeit von 20 mV/s und 626 nm Beleuchtung (0,8 mW/cm <sup>2</sup> ). .....	118
Abb. 76 Probe eines synthetischen Kristalls mit EDTA modifiziert (12 h) mit 0,1 M Hydrochinone in 0,5 M K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> bei einer Vorschubgeschwindigkeit von 10 mV/s und 626 nm Beleuchtung (1 mW/cm <sup>2</sup> ). .....	119
Abb. 77 L-Cystein.....	120
Abb. 78 Dunkelstromkennlinie eines natürlichen Kristalls in 0,5 M K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> bei dem nur die Fläche parallel zu der c-Achse den Elektrolyten exponiert wurde (Vorschubgeschwindigkeit 20 mV/s). .....	121
Abb. 79 XPS des 2p Schwefelpeaks von Cystein auf n-Molybdänditellurid. ....	122
Abb. 80 Photospannungsmessung eine natürlichen Kristalls vor und nach der Modifikation mit Cystein. ....	123
Abb. 81 natürlicher MoS <sub>2</sub> Kristall (SPI) der 14 h mit Cystein modifiziert wurde. Messung in 0,5 M Kaliumsulfatlösung mit 0,005 M Schwefelsäure. Vorschubgeschwindigkeit 20 mV/s bei einer Anregungsdichte von 8,7 mW/cm <sup>2</sup> mit Halogen Weisslicht. ....	124

Abb. 82 Wechselwirkungsmöglichkeiten von Cystein an Molybdändisulfid.....	125
Abb. 83 Photostrom und Mikrowellenreflexion eines natürlichen Kristalls (SPI) 0,1 M $K_3/K_4[Fe(CN)_6]$ in 0,5 M $K_2SO_4$ (Vorschub 20 mV/s, Xenon Lampe) .....	126
Abb. 84 Quantenausbeute bei 875 nm Anregungswellenlänge (0,9 mW/ $cm^2$ ) bzw. bei 626 nm Anregungswellenlänge (0,9 mW/ $cm^2$ ) mit 0,25 M Eisen(II)/Eisen(III) in 0,5 M Schwefelsäure und einer Vorschubgeschwindigkeit von 20 mV/s.....	127
Abb. 85 R12 in 0,5 M Kaliumsulfatlösung mit 0,3 M Hexacyanoferrat. 875 nm mit einer Intensität 0,88 mW/ $cm^2$ ( $2.7 \cdot 10^{15}$ ) bei einer Vorschubgeschwindigkeit von 20 mV/s .....	128
Abb. 86 Natürlicher Logarithmus der Mikrowellenreflexion aus Abb. 85. ....	130
Abb. 87 synthetische Kristall r15 bei 875 nm in 0,5 M Kaliumsulfat mit 0,001/0,1 M Iod/Iodid (0,4 mW/ $cm^2$ bei 20 mV/s Vorschub) und r15 bei 626 nm in 0,5 M Kaliumsulfat mit 0,0005/0,05 M Iod/Iodid (0,8 mW/ $cm^2$ ). ....	131
Abb. 88 Natürlicher Logarithmus der Mikrowellenreflexion aus Abb. 87 .....	132
Abb. 89 Berechnete Oberflächenkonzentration der Minoritätsladungsträger und Ladungstransferkonstante für Abb. 87 .....	133
Abb. 90 L-Cystein .....	145
Abb. 91 Natriumdodecylsulfat .....	146
Abb. 92 Methionin .....	146
Abb. 93 NTA.....	147
Abb. 94 Tween 20 .....	147
Abb. 95 Tween 80 .....	147
Abb. 96 Tween 85 .....	148

## 6.4 Tabellenverzeichnis

Tab. 1 Einige grundlegende Materialparameter von MoS <sub>2</sub> aus [24-26].	8
Tab. 2 Einige ermittelte Werte der Durchtrittswiderstände mit verschiedenen Kontaktmaterialien.	73
Tab. 3 Ergebnisse der ERDA Messungen. (s) bedeutet an der Oberfläche und (bulk) im Volumen des Kristalls.	75
Tab. 4 Ergebnisse der Leitfähigkeits- und Hall-Messungen. In Klammern sind die Fehler der Messungen angegeben.	77
Tab. 5 Peakmaxima von den Strom/Spannungskurven aus Abb. 45 und Abb. 46.	84
Tab. 6 Änderung der Gitterkonstanten c durch die semi-Intercalation von Tween 20, Tween 80 und Tween 85.	110

## 6.5 Symbole und Konstanten

$\rho$	Spezifischer Widerstand [ $\Omega\text{cm}$ ]
$\mu$	elektrochemisches Potential
$\alpha$	Absorptionskoeffizient [ $\text{cm}^{-1}$ ]
$\tau$	Lebensdauer
$\sigma$	Leitfähigkeit [Siemens/cm]
$v$	Geschwindigkeit
$\mu_n / \mu_p$	Beweglichkeit von Elektronen oder Löchern
$c$	Lichtgeschwindigkeit
$c_{\text{ox}} / c_{\text{red}}$	Konzentration von Akzeptor und Donator
$D$	Diffusionskonstante
$E_C$ und $E_V$	Energie von Leitungs- und Valenzband
$I$	Strom [A]
$k$	Boltzmannkonstante
$k_{\text{ct}}$	Ladungstransferkonstante
$L$	Diffusionslänge der Löcher
$L_d$	Debye-Länge
MWR	Mikrowellenreflexion
$N_A$	Zustandsdichte an Akzeptoren
$N_C$	Zustandsdichte im Leitungsband
$N_D$	Zustandsdichte an Donatoren
$N_V$	Zustandsdichte im Valenzband

p und n	Löcher und Elektronen
QE	Externe Quantenausbeute
R	Widerstand oder allgemeine Gaskonstante
$s_{br}$ und $s_{sr}$	Volumen- und Oberflächenrekombination
T	Zeit [s]
U	Spannung
V	Spannung
W	Raumladungszonenbreite

R:	Allgemeine Gaskonstante	$8,314 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$
N	Avogadrosche Konstante	$6,022 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$
k:	Boltzmannsche Konstante	$1,381 \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$
q:	Elementare elektrische Ladung	$1,602 \times 10^{-19} \text{ C}$
F:	Faradaysche Konstante	$9,649 \times 10^4 \text{ C mol}^{-2}$
c:	Lichtgeschwindigkeit	$2,998 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$
h:	Plancksches Wirkungsquantum	$6,626 \times 10^{-34} \text{ J s}$

## 6.6 Danksagung

An erster Stelle gilt mein Dank Prof. Tributsch, der mir immer mit fachlichem Rat und Anregungen zur Seite stand. Er hat mir zu jeder Gelegenheit Mut und Unterstützung zukommen lassen. Auch das weit gefächerte Interesse für alles, was um uns herum in der Welt und Natur passiert, wirkt immer wieder ermutigend.

Dr. Donner danke ich sehr herzlich für die sofortige Übernahme dieser Arbeit als Zweitgutachterin und die folgenden netten Gespräche.

Die beiden Herrn, Dr. Marinus Kunst und Dr. Frank Wunsch, haben mir – jeder auf seine Art - so vielfältig geholfen, dass ich gar nicht wüsste wie ich diese Arbeit ohne sie hätte durchführen können. Frank danke ich schon allein dafür, dass er mich „genommen“ hat und mir kompromisslos, zu jeder Zeit und überhaupt immer wenn er konnte (oder auch nicht) Unterstützung, Rat, Tat und Hilfe zukommen ließ. Marinus danke ich herzlichst für das vielen Diskussionen, das nette Begrüßen am Morgen, das Kakaotrinken bei Wissenschaft und Weltgeschehen, sowie die aufbauenden Anrufe zu Hause.

Dr. Peter Bogdanoff danke ich für die vielen, vielen beantworteten Fragen und den ebenso vielen Spaß zusammen.

Dr. Fiechter und Dr. Tomm danke ich ebenfalls für die Unterstützung und, natürlich noch viel wichtiger, für die Kristalle, ohne die das hier gar nicht möglich gewesen wäre.

Iris Dorbant danke ich für die unauffällige und kompromisslose Hilfe und Unterstützung.

Herzlichen Dank auch Mirjam und Karin, die mir ebenfalls immer prompt und freundlich Unterstützung zukommen ließen.

Thomas danke ich für die Hilfe und das Verständnis, das anscheinend jeder in so einer Phase braucht.

Meinen Freunden und Mitbewohnern sowie meinen Eltern danke ich für Anteilnahme und tatkräftige Unterstützung.

Stefan Seeger danke ich hier noch namentlich, allen anderen müssen mir glauben, dass ich ihnen (auch ohne explizite Nennung) zutiefst dankbar bin.

## 6.7 Lebenslauf

**Name:** Thomas E. R. Moehl

**Geburtstag:** 08.12.1972

**Geburtsort:** Dortmund

### Schulbildung

1979 - 1985 Besuch der Rothenburg Grundschule in Berlin Steglitz

1985 - 1992 Besuch des Gymnasiums Königin Luise Stiftung in Berlin Dahlem

1988 - 1989 Einjähriger Aufenthalt in den USA in einer Gastfamilie und Besuch der J. P. McCasky High School in Lancaster, Pennsylvania

Sommer 1992 allgemeine Hochschulreife

### Hochschulbildung

1993 - 1997 Grundstudium der Chemie an der Freien Universität Berlin

1997 - 2000 Hauptstudium der Chemie an der Freien Universität Berlin

März 2000 – August 2000 Diplomarbeit in der Arbeitsgruppe von Prof. Tributsch am Hahn Meitner Institut Berlin mit dem Thema: "Vergleichende Untersuchungen von Sensibilisatoren in nanostrukturierten Injektionssolarzellen."

2000 studentische Hilfskraft am Hahn Meitner Institut

seit Februar 2002 Promotion am Hahn Meitner Institut