

Martin Quack

# WARUM PHYSIKALISCHE CHEMIE?



## 1. „PHYSIKALISCHE CHEMIE IST NICHT EIN ZWEIG DER CHEMIE – SIE IST DIE CHEMIE DER ZUKUNFT“ Wilhelm Ostwald, frei zitiert und rück- übersetzt nach Joel Hildebrand [1]

In einem Interview an der EUCHEMS-Tagung in Prag im August 2012 wurde von C. Remenyi die Frage aufgeworfen, ob denn die traditionelle Gliederung der Chemie in Anorganische, Organische und Physikalische Chemie (neben der Biochemie und der Technischen Chemie oder chemischen Technologie, die mancherorts als „Angewandte Physikalische Chemie“ bezeichnet wird) überhaupt noch zeitgemäß ist. Vielleicht wäre eine neue Gliederung der Chemie zweckmäßiger, charakterisiert zum Beispiel durch die Präfixe Nano-, Bio-, Öko-, oder Ähnliches, oder vielleicht auch der völlige Verzicht auf eine feinere Unterteilung des Gesamtgebietes der Chemie sinnvoller. Meine Antworten darauf sind vielgestaltig. Zum einen stellt sich diese Frage ja ähnlich schon bei der willkürlichen Aufteilung der Naturwissenschaften in Chemie, Physik und Biologie (etwa nach der frechen Schülerregel „Chemie ist, wenn es stinkt und kracht, Physik ist's, wenn die Sonne lacht und Bio, wenn man Kinder macht“). Es ist klar, dass es schon längst eigentlich *eine Naturwissenschaft* gibt, ohne strenge Grenzen zwischen den Gebieten. Aber wie bei den Weltmeeren, kann es doch sinnvoll sein, für eine erste Orientierung etwa den Atlantischen und Pazifischen Ozean zu unterscheiden, auch wenn es keine scharfe Grenze gibt. Ganz analog kann man dann auch an eine ähnliche Unterscheidung etwa von Physikalischer Chemie und Organischer Chemie denken.

Aber was ist dann Physikalische Chemie und warum betreibt man sie anders als etwa Organische und Anorganische Chemie? Von Studierenden höre ich gelegentlich die Charakterisierung „Physikalische Chemie ist ... schwierig!“. Dem antworte ich: „Das mag oft für beginnende Studierende gelten, aber die Physikalische Chemie ist nicht nur schwierig, sondern doch auch besonders schön! Man kann sie auch einfacher machen, aber dann ist sie eben nicht mehr so schön.“

Ganz ohne Scherz: Das wichtigste Charakteristikum der Physikalischen Chemie ist, dass sie an der Grenze zwischen Physik und Chemie beide Gebiete verbindet. Unter Einschluss

der Biophysikalischen Chemie, die ja auch Teil der Physikalischen Chemie ist, wird auch die Biologie eingeschlossen. Entscheidend in der Physikalischen Chemie ist also nicht die Abgrenzung, sondern die Grenzüberschreitung zwischen verschiedenen Bereichen der gesamten Naturwissenschaften. An der ETH Zürich gibt es einen Studiengang „Interdisziplinäre Naturwissenschaften“, der solche Grenzüberschreitungen in den Studienrichtungen „Physikalisch-Chemisch“ und „Biochemisch-Physikalisch“ schon zu Studienbeginn ermöglicht [2]. Wenn man nur den Aspekt der Grenzüberschreitung und Verbindung der Naturwissenschaften Physik – Chemie – Biologie (und weiterer wie Geologie etc.) betrachtet, dann wäre „Physikalische Chemie“ synonym mit „Gesamtnaturwissenschaften“, was nicht ganz falsch, aber auch nicht ganz richtig ist.

Das zu Anfang erwähnte Zitat von Ostwald stammt aus der Gründungszeit der Physikalischen Chemie, die J. Hildebrand noch als junger Mann miterlebt hat und in seinem Artikel so lebhaft und anschaulich schildert [1]. In dieser Zeit wurden auch die beiden großen wissenschaftlichen Gesellschaften der Physikalischen Chemie gegründet, die Faraday Society und die Bunsen-Gesellschaft [3]. Die Namensgeber der beiden Gesellschaften sind selbst nicht eigentlich als Physikochemiker zu bezeichnen, sie wirkten in einer Zeit vor der Aufspaltung in Teildisziplinen und können noch als „Gesamtnaturwissenschaftler“ gelten, worauf Bunsen selbst auch gerne explizit hingewiesen hat (siehe Zitate in [4]).

## 2. DIE SPRACHE DER PHYSIKALISCHEN CHEMIE

Wenn wir nun nach den Gemeinsamkeiten innerhalb der neu geschaffenen Gemeinschaft der Physikalischen Chemie fragen, so ist wie bei anderen Gemeinschaften die gemeinsame physikalisch-chemisch-naturwissenschaftliche Sprache als wichtiges Charakteristikum zu nennen. Sie ist in den frühen Jahren etwa in der von van't Hoff und Ostwald neu gegründeten Zeitschrift für Physikalische Chemie [1] und den Lehrbüchern von J. H. van't Hoff [5] und Jean Perrin [6] definiert worden. Auch das „Lehrbuch der Kosmischen Physik“ von S. Arrhenius ist recht eigentlich ein Lehrbuch der Physikalischen Chemie mit Blick auf die Geologie und Astrophysik [7], eine auch heute äußerst aktuelle Zielsetzung. Hinshelwood hat 50 Jahre später einen besonders klaren Einblick in die Sprache der Physikalischen Chemie gegeben [8]. Die heutige Sprache der Physikalischen Chemie ist im „Grünen Buch“ der IUPAC niedergelegt [9], von dem wir einen vierseitigen Kurzauszug auf Deutsch zum nützlichen Gebrauch der Leser des Bunsen-Magazins im vorliegenden Heft abdrucken [10]. Es fällt sofort auf, dass diese Sprache mehrheitlich physikalisch-mathematisch geprägt ist und gemäß dem frühen Lehrbuch van't Hoff's insbesondere die Theoretische Chemie einschließt [5]. Thermodynamik, Kinetik, Spektroskopie, Elektrizität, Magnetismus, alles

Prof. Dr. Dr. h. c. Martin Quack  
ETH Zürich  
Laboratorium für Physikalische Chemie  
Wolfgang-Pauli-Strasse 10, CH-8093 Zürich, Schweiz  
Tel.: +41 44 632 44 21, Fax: +41 44 632 10 21  
E-Mail: Martin@Quack.ch

auch als Gebiete der Physik zu identifizieren, sind Kerngebiete der Physikalischen Chemie und definieren die gemeinsame Sprache, nicht zu vergessen die Elektrochemie, die unserer Gesellschaft ursprünglich ihren Namen gab [3]. Über die zentrale Rolle der Spektroskopie in der Physikalischen Chemie habe ich schon anlässlich des doppelten Jubiläums von Bunsen und Kirchhoff geschrieben [4]. Hier will ich nur anmerken, das wir im kommenden Jahr 2013 das 100jährige Jubiläum der großartigen Entdeckung einer neuen Atommechanik durch Niels Bohr auf der Grundlage der Spektren des Wasserstoffatoms feiern werden, einer der bedeutendsten Beiträge der Spektroskopie als Teil der physikalischen Chemie zu den Naturwissenschaften und unserem Verständnis der Welt [11-14] (siehe auch [14-16] für weitere Lektüre hierzu).

Ich will diesen Abschnitt zur Sprache der Physikalischen Chemie mit einem kurzen Vermerk zur Verwendung der deutschen Sprache als „transnationaler“ Sprache der Deutschen Bunsen-Gesellschaft für Physikalische Chemie ergänzen, die ja traditionell nicht durch die staatlichen Grenzen, sondern durch Sprachgrenzen definiert wurde und Fachvertreterinnen und -vertreter aus Österreich und der Schweiz in den Leitungsgremien der DBG einschließt. Eine Verwendung der deutschen Sprache hat im Dialog mit der Öffentlichkeit und den Schulen auch heute noch Wert [10], auch wenn wir die „Berichte der Bunsen-Gesellschaft für Physikalische Chemie“ zugunsten der gemeinsamen Zeitschrift PCCP aufgegeben haben, unter Verwendung der internationalen Wissenschaftssprache Englisch. Die „Angewandte Chemie“ ist eine der wenigen zweisprachig Deutsch und Englisch erscheinenden Zeitschriften und ein ausgesprochener Ausnahmeerfolg auf dem Gebiet der Chemie insgesamt (das immerhin auch die Physikalische Chemie einschließt). Mit Blick auf die Internationalisierung der Wissenschaft und die Tatsache, dass die DBG heute weltweit die einzige unabhängige Gesellschaft für Physikalische Chemie ist, könnte man allerdings auch daran denken, die Bunsen-Gesellschaft als prinzipiell internationale Gesellschaft zu etablieren, sicher noch keine Entscheidung, die jetzt fällig ist, aber vielleicht doch in Zukunft. Heute ist sicher der Erfolg der jährlichen Bunsen-Tagungen ein Zeichen für die Notwendigkeit eines Familientreffens mit der gemeinsamen Sprache der Physikalischen Chemie. Die Offenheit dieser Familie ist gekennzeichnet durch freundschaftliche Beziehungen mit Gesellschaften von Physikern (wie der Deutschen Physikalischen Gesellschaft) ebenso wie von Chemikern (wie der Gesellschaft Deutscher Chemiker und der Schweizerischen Chemischen Gesellschaft). Es ist übrigens bemerkenswert, dass große Teile der Formelsprache der physikalischen Chemie vom Kern her international sind, beginnend mit den Elementsymbolen: Die japanische Übersetzung des „grünen Buches“ weicht zwar in Schrift und Wort für die Begriffe von der englischen Originalausgabe erheblich ab, die Formeln sind dagegen gleich [17]. Hier gibt es eine Verwandtschaft (bezogen auf die Internationalität) zu den Notensymbolen der Musik, die ja auch sprachunabhängig sind.

### 3. PHYSIKALISCHE CHEMIE UND GROßE FRAGEN

Der Begriff der Physikalischen Chemie als grenzüberschreitendes Gebiet lässt sich auch so verstehen, dass sie uns an die Grenzen unseres Wissens und der heutigen naturwissenschaftlich-technischen Möglichkeiten führt. Ich will mit Blick auf die

Zukunft einige der großen Fragen erwähnen, wo die Physikalische Chemie besonders zur Beantwortung und Lösung beitragen kann. Hier ist zum einen das große Menschheitsproblem des Klimawandels zu nennen [18]. Sowohl bei seiner Vorhersage [19] als auch bei seiner zu erhoffenden Verhinderung oder Begrenzung kann die Physikalisch-Chemische Forschung wesentlich beitragen. Wenn die Menschheit sich entschließt, Wege zur Vermeidung von Treibhausgasen wie CO<sub>2</sub> zu beschreiten, was bisher allerdings nicht der Fall ist [18], wäre die Rolle der physikalischen Chemie zentral.

1. Hier gibt es die Suche nach neuen Primärenergien, wo in erster Linie Solarenergie zu nennen ist, als solarthermische Energie, Photovoltaik oder photoelektrochemisch stets ausgeprägt physikalisch-chemisch. Vermutlich werden auch die hier benötigten Energiespeicher physikalisch-chemisch begründet sein.
2. Eine weitere Option in der Vermeidung von Treibhausgasen ist die Erhöhung der Energieeffizienz. Etwa über elektrochemische Prozesse oder die Verbesserung von Verbrennungsprozessen kann hier die Physikalische Chemie zentral beitragen.
3. Der dritte Weg wäre die Verwendung fossiler Brennstoffe mit definitiver Abscheidung von CO<sub>2</sub>, am besten durch dauerhafte Mineralisierung. Die Entwicklung eines gangbaren physikalisch-chemischen Prozesses könnte hier in Zukunft vielleicht entscheidend zur Problemlösung beitragen, wenn hier auch offensichtlich noch ungeklärte Fragen zu beantworten sind [20].

Wir haben hier beispielhaft die Klimafrage als physikalisch-chemische Aufgabe erwähnt. Man könnte hier viele weitere Beispiele nennen, etwa die Entdeckung der Zerstörung der Ozonschicht durch die katalytischen kinetischen Prozesse, die durch den Transport der Fluorchlor(brom, -iod)kohlenwasserstoffe in die Stratosphäre angestoßen werden. Dies hat bekanntlich zum erfolgreichen Montreal-Protokoll und zum Nobelpreis für Crutzen, Molina und Rowland geführt, die wir ohne Weiteres auch als Physikochemiker erkennen. Hier ist ein Weg zur Lösung des Problems begonnen, wenn auch noch lange nicht vollendet. In Zukunft wird man auf weitere, bisher verborgene gefährliche Veränderungen der Umwelt durch Spurenstoffe achten. Dabei ist nicht nur an die Atmosphäre, sondern auch an die Hydrosphäre und Geosphäre zu denken. Langfristig könnte man von einem physikalisch-chemischen Management der Umwelt durch die Menschheit sprechen.

In eine ganz andere Richtung gehen die Fragen nach ungelösten Problemen in den Grundlagen der Naturwissenschaften. Auf einige von diesen habe ich in [16] hingewiesen. Eine der großen astrophysikalischen Fragen, die uns seit Jahrzehnten beschäftigt, ohne dass wir auch nur im Geringsten wissen, wie wir sie korrekt beantworten könnten, ist ganz klar die Frage nach der Natur der „dunklen Materie“, deren Beantwortung völlig offen ist und über die wir vielleicht auf physikalisch-chemischen (spektroskopischen?) Wegen etwas erfahren könnten neben Experimenten in der Hochenergiephysik. Vielleicht gibt es sogar eine verschlüsselte Beziehung dieser Frage zu einem weiteren „astrophysikalisch-chemischen“ Problem, der Frage nach der Homochiralität der Biopolymere des Lebens, in den L-Amino-

säuren, in den Proteinen und in D-Zuckern in der DNA [16, 21]. Die Frage nach der grundlegenden physikalisch-chemischen Quantendynamik der molekularen Chiralität ist vermutlich theoretisch geklärt, die experimentelle Prüfung steht aber noch aus [21, 22]. Sehr viel weiter entfernt sind wir von einer Beantwortung der Frage nach dem eigentlichen Ursprung der Irreversibilität in chemischen Prozessen, die oft irrtümlich als geklärt gilt [16, 21, 22]. Die Frage nach dem Ursprung des Lebens und den zugrundeliegenden Gesetzen, etwa im Sinne einer quantitativen physikalisch-chemischen Theorie des Darwinschen Prinzips, muss wohl noch als ungeklärt betrachtet werden, trotz interessanter Fortschritte [23, 24].

Viele grundlegende Fragen verbleiben im Bereich des Überganges zwischen mikroskopisch atomar-molekularer Materie und makroskopischen Phänomenen. Diese Fragen gehören zum Kernbereich der Physikalischen Chemie. Faraday hat im fortgeschrittenen Alter eine bedeutende Arbeit publiziert, die als ein Startpunkt der nanophysikalischen Chemie von Clustern (Goldclustern und Kolloiden) gesehen werden kann [25]. Die genaue spektroskopisch-mikroskopische Analyse solcher Systeme, ebenso wie großer Wasserstoffbrücken-gebundener Komplexe (kleiner Tröpfchen aus Wasser, Ammoniak oder des besonders einfachen Fluorwasserstoffs etwa) steht noch aus. Eine grundlegende Frage im Zwischenbereich zwischen mikroskopischen und makroskopischen Systemen bleibt bisher unbeantwortet: Gibt es Phänomene in diesem Übergang, die über die Gesetze der Quantenmechanik hinausgehen? Bisher haben wir keine Hinweise darauf, aber zukünftige Experimente in der Physikalischen Chemie sind denkbar [16, 31, 32], die Hinweise geben könnten (und mehr als das).

Ein viel einfacheres und offensichtliches Problem in diesem Übergang vom Mikroskopischen zum Makroskopischen ist mit dem sehr aktuellen Problem einer neuen Definition der Masseneinheit verknüpft. Von den heutigen Einheiten im SI-System verbleibt das Kilogramm als einziges definiert durch einen Prototypen (das „Urkilogramm“ in Paris). Diese sehr unbefriedigende Situation könnte auf natürliche Weise bereinigt werden, wenn wir durch genaues Abzählen einer geeigneten Zahl von Atomen mit einer passenden, reproduzierbaren experimentellen Anordnung einen Massen-Prototypen in verschiedenen Laboratorien unabhängig herstellen könnten. Die Einheit kg könnte dann über die Definition der Avogadro-Konstante als einer exakten Zahl definiert werden [16, 26] (siehe auch [33]). Es existieren andere Vorschläge zur Neudefinition der Masseneinheit kg [27-30], die Abzählmethode ist aber vielleicht die vom Konzept her einfachste. Bei einer Neudefinition des Kilogramms könnte man auch eine sprachliche Ungereimtheit bereinigen. Es ist die einzige SI-Grundeinheit, die ein Präfix (k für kilo = 1000) enthält, was unbefriedigend für die Kombination mit weiteren Präfixen ist. Ein „neues Kilogramm“ könnte man ohne Präfix z.B. als „Avog“ (nach Avogadro) bezeichnen und eine Zeitlang parallel zum Wort Kilogramm verwenden bis Akzeptanz erreicht ist.

Zum Abschluss der großen offenen Fragen kann hier noch ein höchst spekulativer Ansatz erwähnt werden. Wenn wir davon ausgehen, dass unsere Gedankenbildung, das Denken, im Gehirn durch molekulare, physikalisch-chemische Prozesse ausgelöst wird, ganz ähnlich wie die Wahrnehmung von Licht im

Auge durch eine einfache cis-trans-Isomerisierung ausgelöst wird, dann sollte auf dieser Grundlage ein physikalisch-chemisches Verständnis von Denkprozessen möglich sein. Zwar ist die Physikalische Chemie hier eventuell nicht hinreichend, aber wenigstens müssten die zugrundeliegenden Vorgänge den Rahmenbedingungen physikalisch-chemischer Gesetze genügen. Eine vielleicht überraschende Schlussfolgerung bei der Verfolgung eines solchen Konzeptes ergab sich in der Feststellung eines Widerspruchs zwischen unserer Vorstellung von der Willensfreiheit und den Grundlagen der Quantenmechanik [31]. Gelegentlich findet man (wohl irrtümlich) die gegenteilige Feststellung. Jedenfalls ist die genauere physikalisch-chemische Untersuchung solcher Fragen zweifellos eine der größten Herausforderungen für die Zukunft.

Ich habe hier nur wenige Beispiele aus vielen herausgreifen können, und auch diese nur andeutungsweise. Eine andere Auswahl wäre möglich, aber das macht schon deutlich, dass nicht nur vor hundert Jahren, sondern ebenso heute die Physikalische Chemie als lebendiges und vielfältiges Gebiet eine große Zukunft hat.

## QUELENNACHWEIS

- [1] J. H. Hildebrand, *Ann. Rev. Phys. Chem.* **1981**, 32, 1-24. Es lohnt, das Zitat vollständiger im Zusammenhang aus diesem sehr lesenswerten Artikel des bei Niederschrift 100jährigen Joel H. Hildebrand anzugeben: “On entering University of Pennsylvania, I enrolled in the College of Arts and Sciences, with a major in Physics and Chemistry, instead of the College of Chemistry ... .”

„When I became a graduate student, lecture courses that consisted of descriptive facts and recipes for separations bored me; my desire was to understand phenomena. I discovered physical chemistry on my own and was inspired. In an introduction written by Ostwald of Leipzig I read: “Physical chemistry is not a variety of chemistry; it is the chemistry of the future.” I was fascinated, and studied it with a will.”

„In July 1906, I embarked for Berlin, equipped with a thousand dollars by my father, a PhD degree, a reading knowledge of German, and a conviction that Ostwald was right.

Van't Hoff had come to Berlin from Amsterdam and Nernst from Göttingen. I attended lectures by both men and took Nernst's laboratory course in physical chemistry. I was kindly treated by both of these famous men and by my student associates. A milestone in physical chemistry has been passed by the establishment of the *Zeitschrift für physikalische Chemie* in 1887 by van't Hoff and Ostwald, director of the Institute of Physical Chemistry of Leipzig. This journal became the principal source of information about solution theory. Volume 1: 481-501 (1887) contained van't Hoff's famous paper intitled, “The Role of Osmotic Pressure in the Analogy Between Solutions and Gases.”

- [2] M. Quack, *Naturwissenschaften! Warum überhaupt? Warum nicht?* in *Gegenworte*, Heft 26, “Zweckfreie Forschung”, Berlin-Brandenburgische Akademie der Wissenschaften, **2011**, pp. 28-35 sowie *Bulletin der Vereinigung der Schweizerischen Hochschuldozierenden VSH/AEU* **2011**, 37, 7-14 (Doktoratsfeierrede von 2004 in leicht unterschiedlichen Nachdruckversionen).
- [3] W. Jaenicke, *100 Jahre Bunsen-Gesellschaft 1894-1994*, Steinkopff Verlag, Darmstadt, **1994**.
- [4] M. Quack, *Bunsen-Magazin*, **2011**, 13, 1-2.



- [5] J. H. van't Hoff, Vorlesungen über theoretische und physikalische Chemie (3 Bände), Vieweg, Braunschweig, 1898.
- [6] J. Perrin, *Traité de Chimie Physique I, Les Principes*, Gauthier-Villars, Paris, **1903**.
- [7] S. Arrhenius, *Lehrbuch der kosmischen Physik*, Hirzel-Verlag, Leipzig, **1903**.
- [8] C. N. Hinshelwood, *The Structure of Physical Chemistry*, Clarendon Press, Oxford, **1951**.
- [9] E. R. Cohen, T. Cvitaš, J. G. Frey, B. Holmström, K. Kuchitsu, R. Marquardt, I. Mills, F. Pavese, M. Quack, J. Stohner, H. L. Strauss, M. Takami, A. J. Thor, *Quantities, Units and Symbols in Physical Chemistry, 3rd edition, third corrected printing*, IUPAC and Royal Society of Chemistry, RSC Publishing, Cambridge, **2011**.
- [10] J. Stohner, M. Quack, A Concise Summary of Quantities, Units and Symbols in Physical Chemistry, IUPAC & Royal Society of Chemistry, Cambridge, **2009**. Deutsche Übersetzung in *Bunsen-Magazin* 6(2012), Seiten 243-246
- [11] G. Kirchhoff and R. Bunsen, 1. Abhandlung Chemische Analyse durch Spectralbeobachtungen, *Poggend. Ann.* **1860**, *110*, 161-169. 2. Abhandlung *Poggend. Ann.* **1861**, *113*, 337-. Nachdruck in "Ostwalds Klassiker der Exakten Wissenschaften, Vol. 72 mit Kommentar von W. Ostwald, 2. Auflage Verl. Harri Deutsch, Thun and Frankfurt **1996**.
- [12] J. J. Balmer, Verhandlungen der Naturforschenden Gesellschaft Basel, **1885**, *7*, 548-560, 750-752.
- [13] N. Bohr, *Phil. Mag.*, **1913**, *26*, 1-25, 476-502, 857-875, *Nature*, **1913**, *92*, 231-232.
- [14] A. Pais, *Niels Bohr's times in physics, philosophy and polity*, Clarendon Press, Oxford, **1991**
- [15] F. Merkt, M. Quack, *Molecular Quantum Mechanics and Molecular Spectra, Molecular Symmetry, and Interaction of Matter with Radiation, in Handbook of High-Resolution Spectroscopy, Vol. 1*, Chapt. 1, pp. 1-55, (Eds.: M. Quack, F. Merkt), Wiley, Chichester, New York, **2011**.
- [16] M. Quack, *Frontiers in Spectroscopy, in Faraday Discussions, Vol. 150*, pp. 533-565, **2011**.
- [17] E. R. Cohen, T. Cvitaš, J. G. Frey, B. Holmström, K. Kuchitsu, R. Marquardt, I. Mills, F. Pavese, M. Quack, J. Stohner, H. L. Strauss, M. Takami, A. J. Thor, *Quantities, Units and Symbols in Physical Chemistry, Japanese Translation*, IUPAC and National Metrology Institute, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology and the Chemical Society of Japan, **2009**, ISBN 978-4-06-154359-1.
- [18] M. Quack, *Bunsen-Magazin*, **2011**, *13*, 138-143.
- [19] S. Arrhenius, *Philos Mag* **5** **1896**, *41*, 237-276.
- [20] M. Quack, Vortrag in *Brijuni, Brioni-Conference 2010 "Sustainable energy sources"*, 30 August - 3 September 2010, Brijuni Island, **2010**.
- [21] M. Quack, *Die Asymmetrie des Lebens und die Symmetrieverletzungen der Physik: Molekulare Paritätsverletzung und Chiralität, in Moleküle aus dem All?*, Chapt. 12, pp. 277 - 310, (Ed.: K. Al-Shamery), Wiley-VCH, Weinheim, **2011**.
- [22] M. Quack, *Fundamental Symmetries and Symmetry Violations from High Resolution Spectroscopy, in Handbook of High Resolution Spectroscopy, Vol. 1*, Chapt. 18, pp. 659-722, (Eds.: M. Quack, F. Merkt), Wiley, Chichester, New York, **2011**.
- [23] M. Eigen, *Natürliche Auslese - eine physikalische Gesetzmäßigkeit, in Moleküle aus dem All?*, Chapt. 10, pp. 225-242, (Ed.: K. Al-Shamery), Wiley-VCH, Weinheim, **2011**.
- [24] M. T. Reetz, *Die Evolutionsmaschine als Quelle für selektive Biokatalysatoren, in Moleküle aus dem All?*, Chapt. 11, pp. 241-273, (Ed.: K. Al-Shamery), Wiley-VCH, Weinheim, **2011**.
- [25] M. Faraday, *Philos. Trans. Roy. Soc. London*, **1857**, *147*, 145-181, Deutsche Übersetzung in "Ostwald's Klassiker, Nr. 214, Akademische Verlagsgesellschaft, Leipzig, **1925** (also reprinted in *Phil. Mag.* **14**, 401-417, and 512-539, **1858**).
- [26] M. Quack, *Unpublished document prepared for IUPAC commission I. 1. on Quantities, Units and Symbols in Physical Chemistry*, Lund **1989**, Lisbon **1993**, and Guildford **1995**.
- [27] I. Mills, P. J. Mohr, T. J. Quinn, B. N. Taylor, E. R. Williams, *Preprint*, **2011**.
- [28] P. De Bièvre, in *Accreditation and Quality Assurance: Journal for Quality, Comparability and Reliability in Chemical Measurement, Vol. 16*, Springer Berlin/Heidelberg, **2011**, pp. 117-120.
- [29] B. N. Taylor, *Metrologia*, **2009**, *46*, L16-L19.
- [30] Consultative Committee for Units (CCU), Report of the 20th meeting (14-16 September 2010) to the International Committee for Weights and Measures, Bureau International de Poids et Mesures, [www.bipm.org/utls/common/pdf/CCU20.pdf](http://www.bipm.org/utls/common/pdf/CCU20.pdf), **2010**.
- [31] M. Quack, *Time and Time Reversal Symmetry in Quantum Chemical Kinetics, in Fundamental World of Quantum Chemistry. A Tribute to the Memory of Per-Olov Löwdin, Vol. 3*, pp. 423-474, (Eds.: E. J. Brändas, E. S. Kryachko), Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, **2004**.
- [32] R. Penrose, "Richard R. Ernst Lecture", ETH Zürich, **2012**.
- [33] A. Pramann, O. Rienitz, D. Schiel, B. Güttler, *Bunsen-Magazin*, **2012**, *14*, 199.