

Jahrgang 15 · Heft 4 · November 1984 · H 6592 F

Fach-Zeitschriften bei Friedrich in Velber in Zusammenarbeit mit Klett, 3016 Seelze

CTU

DER CHEMIE-
UNTERRICHT

Gasgesetze

Spiegelbildsymmetrie und Paritätserhaltung

von Markus Eiswirth und Robert Schwankner

„Das Zimmer, das du hinter dem Glas siehst – das ist genau wie unser Wohnzimmer,
nur ist alles verkehrt herum.“

(Lewis Carroll: Alice hinter den Spiegeln)

1 Einleitung

Auffallende Asymmetrien finden sich in der belebten Natur. Zum Beispiel besitzen fast alle Schnecken ein rechtsgewundenes Haus. Linksgewundene Schnecken (Abb. 1) treten als Mutanten auf, sind jedoch extrem selten. Da nur Schnecken mit gleichsinniger Windung sich paaren können, ist es sehr unwahrscheinlich, daß die wenigen linksgewundenen Exemplare einen Partner zur Vermehrung finden.

Im molekularen Bereich stößt man auf noch auffallendere Asymmetrien. So bestehen Proteine, die Grundsubstanzen aller Lebewesen, ausschließlich aus asymmetrischen L-Aminosäuren, nie aus den spiegelbildlichen D-Formen. (Lebewesen benutzen zwar D-Aminosäuren für bestimmte spezielle Zwecke, in Proteinen wurden jedoch keine gefunden.)



Abb. 1: Seltenes Exemplar einer linksgewundenen Schnecke (Photo: E. Tröger, Freiburg)

2 Das PCT-Theorem

Man sagt ganz allgemein, ein Gegenstand oder ein Prozeß besitzt Symmetrie, wenn man „etwas mit ihm machen kann“, ohne daß er sich ändert.

Ist der Zustand eines (quantenmechanischen) Systems durch die Wellenfunktion ψ gegeben, so heißt ψ symmetrisch bezüglich der Operation A, wenn

$$A \psi = \psi, \quad (1)$$

antisymmetrisch, wenn

$$A \psi = -\psi, \quad (2)$$

ansonsten besitzt der Zustand keine Symmetrie bezüglich A.

Man betrachte als Beispiel die Koordinateninversion i in einem Atom. i kommutiert* in diesem Fall mit dem Hamilton-Operator H des Zentralfeldes. Wendet man daher i auf die Eigenfunktionen von H an, so muß $i\psi$ ebenfalls eine Eigenfunktion von H zu demselben Eigenwert E sein.

$$\begin{aligned} H \psi &= E \psi \\ H i \psi &= E i \psi \end{aligned} \quad (3)$$

Daraus folgt direkt, daß

$$i \psi = \pm \psi \quad (4)$$

sein muß.

* Zwei Operatoren A und B kommutieren (vertauschen) miteinander, wenn $AB\psi = BA\psi$

Zustände, für die das (+) Zeichen in Gl. 4 gilt, sind von gerader (g), solche, bei denen ein Vorzeichenwechsel auftritt, von ungerader Parität (u).

Unter dem Einfluß elektromagnetischer Strahlung (das elektrische Feld ist ein polarer Vektor und somit von ungerader Parität) kann ein Elektron von einem Niveau gerader in eines ungerader Parität befördert werden oder umgekehrt (g-u- bzw. u-g-Übergang), während g-g- und u-u-Übergänge elektrisch-dipol-verboden sind, da die gesamte Parität erhalten bleiben muß. Gleiches gilt für alle zentrosymmetrischen Moleküle (wie trans-ClHC=CHCl), wohingegen bei nichtzentrosymmetrischen Teilchen (z. B. cis-ClHC=CHCl) die Parität keine gute Quantenzahl ist, da i nicht mit dem betreffenden Hamilton-Operator kommutiert und die Zustände somit keine definierte Parität besitzen.

Paritätsbetrachtungen spielen in der Spektroskopie eine große Rolle, da mit ihrer Hilfe Auswahlregeln in einfacher und anschaulicher Weise abgeleitet werden können.

Der Inversionsoperator i ist äquivalent zu einer Rotation um 180° gefolgt von einer Spiegelung an einer Ebene senkrecht zur Rotationsachse. Aufgrund der Isotropie des Raumes bezüglich Rotationen (die in engem Zusammenhang mit der Erhaltung des Drehimpulses steht) bedeutet Paritätserhaltung somit nichts anderes als Invarianz bezüglich Spiegelung. Mit anderen Worten, das Spiegelbild eines physikalischen Prozesses muß ein möglicher und ebenso wahrscheinlicher Vorgang sein (Abb. 2).

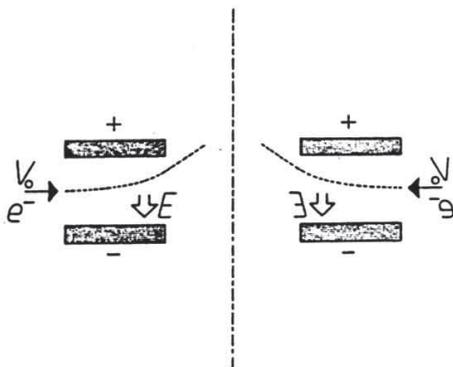


Abb. 2: Flugbahn eines Elektrons in einem elektrischen Feld. Der Vorgang ist invariant gegenüber einer Spiegelung.

Man glaubte lange Zeit, daß die Inversion (bzw. Spiegelung) eine absolute Symmetrie der Natur darstellt; d. h. eine „Spiegelwelt“ wäre physikalisch nicht von der ursprünglichen Welt zu unterscheiden, und es wäre unmöglich, eine absolute Definition von rechts und links zu geben. Übliche Angaben wie „rechtsherum bedeutet im Uhrzeigersinn“ sind nutzlos, da sie auf Konventionen beruhen. Einem Wissenschaftler in einem weit entfernten Son-

nensystem könnte man per Funk die Begriffe rechts und links auf diese Art nicht übermitteln.

1956 wiesen Lee und Yang (1, 2) darauf hin, daß die Paritätshaltung bei Prozessen der schwachen Wechselwirkung nicht bestätigt war. Weitere Experimente wurden durchgeführt (3, 4), die eindeutig zeigten, daß die Parität beim Zerfall von π -Mesonen und beim β -Zerfall von Atomkernen nicht erhalten wird.

Werden die Spins von [^{60}Co]Kobalt-Kernen durch ein Magnetfeld bei tiefer Temperatur entlang einer Achse ausgerichtet, so werden die β -Teilchen bevorzugt in einer Richtung emittiert (Abb. 3), während das Spiegelbild nicht beobachtet wird (5). Damit könnte man unserem extraterrestrischen Physiker mitteilen, was wir unter rechts und links verstehen. Er müßte lediglich das genannte Experiment durchführen.

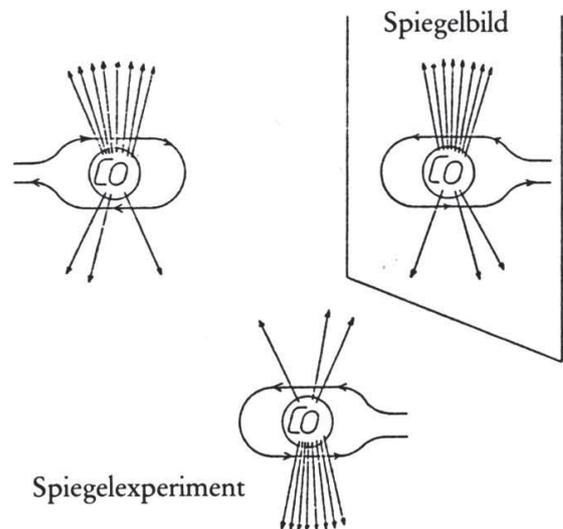


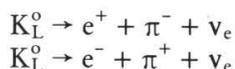
Abb. 3: β -Zerfall von [^{60}Co] Kobalt zur Absolutfestlegung von rechts und links. Blickt man aus der Richtung, in die die β -Teilchen bevorzugt emittiert werden, auf die Kobalt-Probe, so fließt der Strom in der Schleife, durch den das Magnetfeld hervorgerufen wird, rechts herum.

Durch weitere Messungen wurde festgestellt, daß die Zerfallselektronen von unpolarisierten Kernen longitudinal polarisiert sind und sich bevorzugt wie linksgewundene Schrauben verhalten (5), d. h. ihr Spin ist antiparallel zu ihrem Impuls. Durch Inversion erhält man „rechtshändige“ Elektronen, die nicht in gleicher Menge beobachtet werden. Dagegen findet man überwiegend „rechtshändige“ Teilchen in β^+ -Zerfällen.

Wigner schlug daher vor (6), die Inversion als Symmetrieoperation fallenzulassen und statt dessen Inversion und gleichzeitige Überführung aller Teilchen in ihre Antiteilchen (Ladungskonjugation C) als verallgemeinerte Operation anzunehmen (PC-Theorem). Die kombinierte Operation iC transfor-

miert z. B. „linkshändige“ Elektronen in „rechtshändige“ Positronen. Die PC-Symmetrie wird somit beim β -Zerfall nicht verletzt. Dies bedeutet jedoch, daß ein Physiker in einer fernen Galaxie, die ganz aus Antimaterie besteht, die Begriffe rechts und links nach der in Abb. 3 gegebenen Definition verwechseln würde. Zur Klärung ist es zusätzlich erforderlich festzustellen, aus welcher Art Materie seine Milchstraße zusammengesetzt ist.

Seit 1964 besteht auch aus dieser Situation ein Ausweg. In diesem Jahr entdeckten Cronin, Fitch et al. (7) eine seltene Zerfallsart des elektrisch neutralen K_L^0 (in ein π -Meson, ein Elektron [Positron] und ein [Anti-]Neutrino) können durch die PC-Transformation ineinander übergeführt werden:



Wenn das PC-Theorem gilt, müssen beide Zerfallsraten exakt gleich sein. Das Experiment ergab jedoch, daß der erste Prozeß etwa um ein halbes Prozent häufiger vorkommt als der zweite.

Somit ist es unter Zuhilfenahme des β -Zerfalls und des K_L^0 -Mesons möglich, eine absolute Definition nicht nur von rechts und links, sondern auch von Materie und Antimaterie anzugeben. Unser hypothetischer Physiker müßte dazu feststellen, ob die Teilchen, die beim häufigeren Zerfall des K_L^0 entstehen, mit den β -Teilchen von [^{60}Co] Kobalt zerstrahlen (Elektron-Positron-Paarvernichtung). Ist dies der Fall, so besteht er aus Materie und seine wie in Abb. 3 gewonnenen Definitionen sind korrekt. Findet keine Paarvernichtung statt, so emittiert sein [^{60}Co] Positronen; er lebt in einer Galaxie aus Antimaterie und muß die erhaltenen Definitionen von rechts und links vertauschen. Man erkennt, daß in diesem Fall die naheliegende Lösung, ihm eine auf der Erde konstruierte Uhr in einem Raumschiff zu schicken, unmöglich wäre, da diese sofort in einer gigantischen Explosion vernichtet würde, sobald sie die aus Antimaterie aufgebaute Galaxie erreicht.

Es soll noch erwähnt werden, daß ein Theorem entdeckt wurde, das unter sehr allgemeinen Annahmen zeigt, daß die physikalischen Gesetze invariant sind gegenüber der kombinierten PC-Operation und gleichzeitiger Zeitumkehr T. (Schwinger-Lüders-Pauli- oder PCT-Theorem (8)). Man glaubt, daß die PCT-Invarianz eine absolute Symmetrie der Natur darstellt, und es gibt keinen Hinweis darauf, daß sie verletzt würde.

3 Spontane Symmetriebrechung

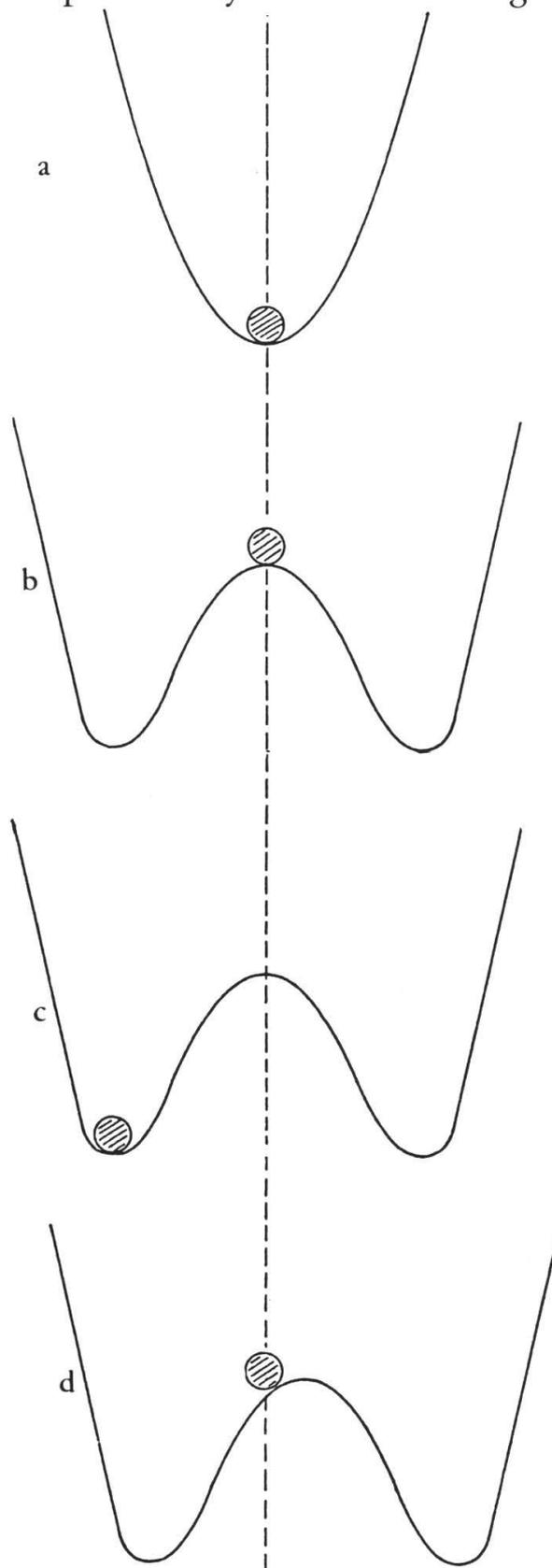


Abb. 4: Mechanisches Modell zur spontanen Symmetriebrechung

Auch aus vollständig symmetrischen Situationen können unsymmetrische Zustände resultieren, wie in Abb. 4 dargestellt. Abb. 4a ist symmetrisch (in Bezug auf Spiegelung an der eingezeichneten Achse) und stabil. Dagegen besitzt 4b die gleiche Symmetrie, ist jedoch instabil. Die Kugel kann mit gleicher Wahrscheinlichkeit nach rechts oder links rollen; sie wird aber in einem der beiden Täler ankommen. Die Symmetrie des Ausgangszustandes ist jetzt „versteckt“ (4c). Einen solchen Vorgang bezeichnet man als spontane Symmetriebrechung.

Hier liegt auch die Erklärung dafür, warum in der Natur fast nur rechtsgewundene Schnecken vorkommen. Eine Population, die aus gleichen Mengen der beiden Formen besteht, wäre evolutionär nicht stabil. Eine kleine zufällige Schwankung der Häufigkeit zugunsten einer Form erhöht die Vermehrungschancen dieser Form, so daß auch eine ursprünglich geringe Störung sich selbst verstärkt

und letztlich zum praktisch ausschließlichen Vorhandensein nur einer Schneckenart führt.

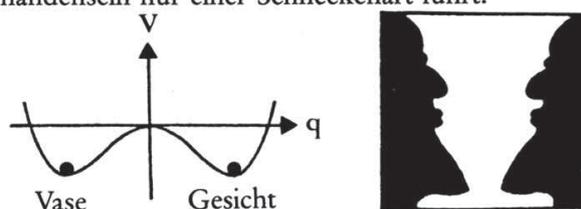


Abb. 5: Symmetriebrechung beim Sehvermögen (9).

Ein weiteres interessantes Beispiel ist in Abb. 5 dargestellt (9). Je nachdem, ob man die schwarze oder die weiße Fläche als Vordergrund auffaßt, erkennt man zwei Gesichter oder eine Vase.

Es ist auch möglich, daß der ursprüngliche Zustand nicht ganz symmetrisch ist, wie in Abb. 4d. In der Praxis ist es häufig schwierig, zwischen streng symmetrischen und geringfügig „verzerrten“ Situationen zu unterscheiden.

4

Chirale Moleküle und optische Aktivität

Objekte, die mit ihrem Spiegelbild nicht deckungsgleich sind, bezeichnet man nach Kelvin (1893) als chiral (grch. cheir = Hand) (Abb. 6). Chiralität ist die Folge eines Mangels an Symmetrie: Jedes Objekt, das weder eine Symmetrieebene noch ein Inversionszentrum noch eine Drehspiegelachse besitzt, ist chiral.

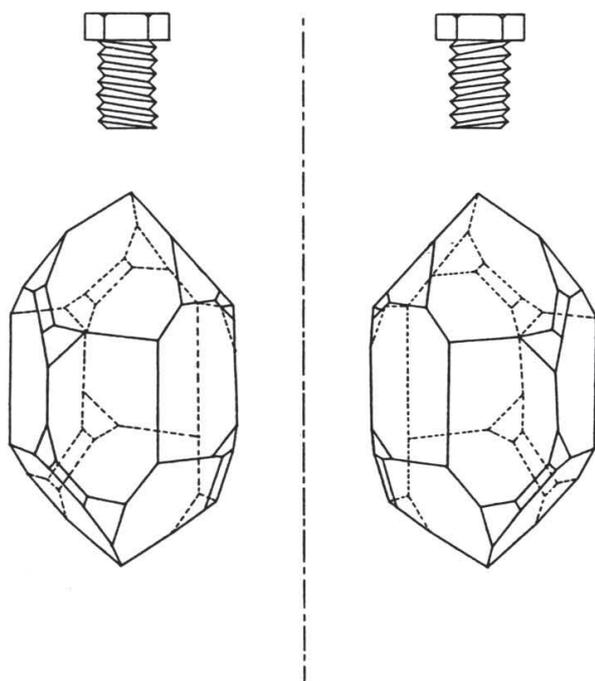


Abb. 6: Chirale Objekte: Schrauben, Quarz-Kristalle.

Die Synthese chiraler Moleküle aus achiralen Vorstufen führt in Abwesenheit anderer chiraler Einflüsse (z. B. Katalysatoren) immer zu einem racemischen Gemisch (1:1) der beiden Konfigurationen, die zueinander spiegelbildlich (enantiomer) sind (Abb. 7).

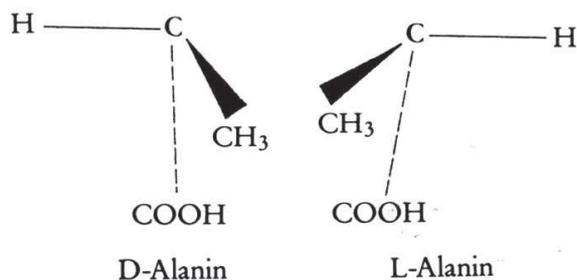


Abb. 7: L- und D-Enantiomer von α -Alanin.

Völlig anders ist die Situation in der belebten Natur. Die Grundbausteine des Lebens, die Proteine, bestehen aus langen Ketten von α -Aminosäuren und zwar ausschließlich aus den L-Isomeren.

Chirale Substanzen können leicht nachgewiesen werden, da sie die Schwingungsebene linear polarisierten Lichtes drehen; sie sind optisch aktiv. Zwei Enantiomere drehen die Ebene um denselben Betrag in entgegengesetzte Richtung, so daß sich die Effekte in einem racemischen Gemisch aufheben.

Die Frage, warum in der Natur bevorzugt eine Form vorkommt, ist somit gleichbedeutend mit der

Frage nach dem Ursprung der optischen Aktivität.

Soweit bekannt, wäre ein Lebewesen, das gänzlich aus D-Aminosäuren aufgebaut ist, ebenfalls möglich. (Die gesamte Chemie läßt sich auf elektromagnetische Wechselwirkungen zurückführen, die inversionsinvariant sind.) Dagegen nimmt man an, daß ein Gemisch aus D- und L-Isomeren die Lebensfunktionen nicht sicherstellen könnte, da ein Organismus vergiftet werden kann, wenn zu viele D-Aminosäuren an ihn verfüttert werden. Dies bedeutet, daß die symmetrische Situation instabil ist. Zu Beginn der Evolution mußte sich daher die entstehende Biosphäre auf der Erde für eine Variante entscheiden (spontane Symmetriebrechung).

Andererseits könnten dabei paritätsverletzende Phänomene eine Rolle gespielt haben, so daß die Ausgangssituation nicht ganz symmetrisch, sondern eher analog zu Abb. 4d war.

Die schwache Wechselwirkung zwischen Elektronen und Atomkernen führt theoretisch zu einer

Energiedifferenz zwischen zwei Enantiomeren. Diese ist jedoch so gering (10^{-13} eV (10)), daß kein Effekt auf Racemisierungsgleichgewichte feststellbar ist.

Eine andere Möglichkeit wäre, daß infolge der β -Aktivität der Erde ein Enantiomer gegenüber dem anderen diskriminiert wird, indem es entweder durch direkte Wechselwirkung mit den asymmetrischen (linkshändigen) β^- -Teilchen oder durch die entstehende zirkular polarisierte Bremsstrahlung (11) in einer stereoselektiven photochemischen Reaktion rascher zersetzt wird (Vester-Ulbricht-Hypothese (12, 13)). Zahlreiche Experimente zum Test dieser Hypothese wurden durchgeführt (14–24). Auf Grund der äußerst kleinen Effekte sind die Ergebnisse jedoch nicht eindeutig und durchaus umstritten, so daß die Frage, ob die molekulare Asymmetrie des Lebens auf der Erde Folge einer spontanen Symmetriebrechung ist oder bereits durch die Paritätsverletzung beim β^- -Zerfall determiniert war, noch nicht beantwortet werden kann.

Literatur

1. Lee, T. D., C. N. Yang: Phys. Rev. 104, 254 (1956)
2. Yang, C. N.: Science 127, 565 (1958)
3. Wu, C. S., E. Ambler, W. Hayward, D. D. Hoppes, R. P. Hudson: Phys. Rev. 105, 1413 (1957)
4. Garniss, R. L., L. M. Ledermann, W. Weinrich: Phys. Rev. 105, 1415 (1957)
5. Wu, C. S.: Rev. Mod. Phys. 31, 783 (1959)
6. Wigner: Rev. Mod. Phys. 29, 255 (1957)
7. Mulvey, J. H. (Hrsg.): The Nature of Matter, Clarendon Press, Oxford 1981
8. Lüders, G.: Vgl. Danske Videnskab. Selskab Mat.-fys. Medd., 28 (5) (1954)
9. Haken, H.: Synergetik — eine Einführung, Springer Verlag, Berlin — Heidelberg — New York — Tokyo 1983
10. Nordén, B.: J. Mol. Evol. 11, 313 (1978)
11. Goldhaber, M. L., M. L. Sunyar: Phys. Rev. 106, 826 (1957)
12. Vester, F., T. L. V. Ulbricht, H. Krauch: Die Naturwissenschaften 46, 68 (1959)
13. Ulbricht, T. L. V., F. Vester: Tetrahedron 18, 629 (1962)
14. Garay, A. S.: Nature 219, 338 (1968)
15. Bonner, W. A.: J. Mol. Evol. 4, 23 (1974)
16. Bonner, W. A., M. A. Van Dost, M. R. Yearian: Nature, 258, 419 (1975)
17. Darge, W., I. Larzkó, W. Thiemann: Nature 261, 522 (1976)
18. Bonner, W. A., R. M. Lemmon, H. P. Nayer: J. Org. Chem. 43, 522 (1978)
19. Bonner, W. A., R. M. Lemmon: Bioorganic Chemistry 7, 175 (1978)
20. Schwankner, R.: Laseranwendungen in der Experimentalchemie, München Wien, 1978
21. Sextl, G., R. Schwankner, M. Eiswirth: Biologie in unserer Zeit, 10, 23 (1980)
22. Bonner, W. A., N. E. Blair: Nature, 281, 150 (1979)
23. Blair, N. E., W. A. Bonner: J. Mol. Evol. 15, 21 (1980)
24. Eiswirth, M., R. Schwankner: J. Chem. Ed. (in Vorbereitung)

Markus Eiswirth und Robert Schwankner
Institut für Physikalische Chemie der Universität
München, Sophienstr. 11, 8000 München 2