

Eine Substanz, zwei Flüssigkeiten

Markus Seidl, Katrin Amann-Winkel, Jürgen Bernard, Thomas Loerting

Immer noch wird kontrovers diskutiert, warum ausgerechnet Wasser das Molekül des Lebens ist und es sich im Vergleich mit anderen Flüssigkeiten so anomal verhält.

◆ Die Liste der bekannten Anomalien von Wasser wird Jahr für Jahr länger. Mittlerweile sind 72 Anomalien von Wasser bekannt, die es von anderen, den „einfachen“ Flüssigkeiten abheben.¹⁾ Die bekanntesten dieser Anomalien sind das Dichtemaximum im flüssigen Zustand bei 3,98°C und der Mpemba-Effekt, also dass heißes Wasser schneller als kaltes Wasser gefrieren kann.²⁾

Insbesondere im unterkühlten flüssigen Zustand unterhalb des Gefrierpunkts von 0°C treten die anomalen Eigenschaften des flüssigen Zustands deutlich hervor (Abbildung 1). So zeigt etwa die Schallgeschwindigkeit im Wasser ein Minimum knapp unter 0°C. In einfachen Flüssigkeiten sinken die isobare Wärmekapazität C_p sowie die isotherme Kompressibilität κ_T stetig mit sinkender Temperatur. Dies gilt auch für warmes Wasser. Im kalten Wasser hingegen zeigt sich ein flaches Temperaturminimum, gefolgt von einem starken Anstieg im unterkühlten Wasser. Die Messdaten bis –38°C zeigen gar einen exponentiellen Anstieg, der eine Divergenz bei –45°C vermuten lässt. Unterhalb von –38°C gefriert selbst hochreines Wasser sehr schnell, sodass diese Temperatur als homogene Nukleationstemperatur T_H bekannt ist.

Was ist der Ursprung dieses außergewöhnlichen Verhaltens? Ein divergierendes C_p ist bei Reinsubstanzen nicht ungewöhnlich und wird als kritischer Punkt bezeichnet

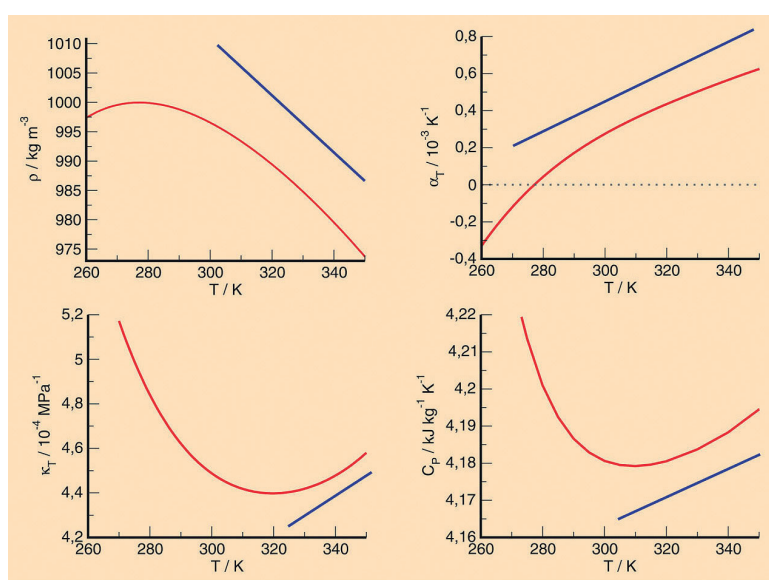


Abb. 1. Vergleich der Eigenschaften von Wasser (rote Kurven) mit jenen von einfachen Flüssigkeiten (blaue Kurven) bei Umgebungsdruck. Im unterkühlten Wasser ist das anomale Verhalten am deutlichsten.

Grafik: R. Ludwig, D. Paschek, Chem. Unserer Zeit, 2005, 39, 164

(Abbildung 2, S. 112). An diesem Punkt treten Fluktuationen auf allen Längenskalen auf, sodass kein Licht die Substanz durchdringen kann und diese undurchsichtig wird – es kommt zur kritischen Opaleszenz (Abbildung 2, Foto b). Dieser Punkt markiert das Ende der Siedepunktskurve. Ab diesem Punkt sind Flüssigkeit und Gas nicht mehr unterscheidbar; oberhalb dieses Punktes spricht man vom überkritischen Fluid (Abbildung 2, Foto c). Bei Kohlendioxid liegt der kritische Punkt bei 74 bar und 31°C, bei Wasser bei 221 bar und 374°C. In überkritischem Wasser lösen sich keine Salze mehr, stattdessen aber apolare Lösungsmittel, die für gewöhnlich mit Wasser unmischbar

sind. Doch der kritische Punkt am Ende der Siedepunktskurve ist viel zu weit von –45°C entfernt, um die Divergenz von C_p bei Atmosphärendruck zu erklären. →

◆ QUERGELESEN

- » Wasser kann zwei flüssige Phasen bilden: eine hochdichte (HDL) und eine niedrigdichte Flüssigkeit (LDL).
- » Der experimentelle Nachweis ist schwierig, denn die ungewollte Kristallisation zu Eis setzt Laborexperimenten an realem flüssigen Wasser häufig ein abruptes Ende.
- » Neue Experimente zeigen, dass der hochdichte, flüssige Zustand bei Umgebungsdruck erreichbar ist und sich bis zu mehreren Tagen metastabil halten lässt.

Basierend auf Simulationen schlugen Poole et al. im Jahr 1992 vor, dass es im Phasendiagramm von Wasser eine weitere, bis dato übersehene Gleichgewichtskurve geben müsse.³⁾ Statt eines Gleichgewichts zwischen Gas und Flüssigkeit handele es sich dabei aber um ein Gleichgewicht zweier Flüssigkeiten: einer hochdichten (HDL) und einer niedrigdichten Flüssigkeit (LDL). Wie die Siedepunktskurve würde diese Flüssig-flüssig-Gleichgewichtskurve in einem kritischen Punkt enden (Abbildung 3). Für viele Wassermodelle liegt der zweite kritische Punkt bei zirka -50°C , teils leicht unter Atmosphärendruck, teils nahe dabei und teils bei erhöhtem Druck. Es gibt aber auch viele Wassermo-

delle, die diesen zweiten kritischen Punkt nicht zeigen.⁴⁾

Die Frage, ob ein solcher zweiter kritischer Punkt für reales Wasser eine Rolle spielt, ist noch ungeklärt. Wenn ja, dann wäre Wasser bei Standardbedingungen als überkritisches Fluid aufzufassen, das schnell zwischen hoch- und niederdichten Strukturen fluktuiert. Zudem müsste sich Wasser bei entsprechend tiefen Temperaturen spontan entmischen und eine Phasengrenze bilden: Die leichte Komponente (LDL) schwämme dann auf der schweren (HDL).

Die Idee, flüssiges Wasser als Zweiphasengemisch aufzufassen, ist durchaus nicht neu. Schon Harold Whiting (1884) und Wilhelm Conrad Röntgen (1892) postulierten, um das Dichtemaximum zu erklären, dass flüssiges Wasser selbst bei Raumtemperatur ein Gemisch aus leichten Eisstrukturen und schweren Flüssigkeitsstrukturen sei. Ähnliche Ideen verfolgten auch Zeitgenossen wie Raoult, Vernon, van Laar oder Sutherland. Diese erachteten Wassermomere oder Wasserdimere als leichte Komponente und Wassertrimere oder Wassertetramere als schwere Komponenten. Diese Vorstellung widerlegten die bahnbrechenden röntgenographischen Arbeiten zur Struktur von flüssigem Wasser von Bernal und Fowler im Jahr 1933.⁵⁾ Sie zeigten, dass jedes einzelne Wassermolekül über Wasserstoffbrücken mit vier Nachbarmolekülen verknüpft ist. Die Ideen von Whiting und Röntgen hingegen hatten knapp 100 Jahre lang Bestand, bis zur Hypothese eines Flüssig-flüssig-Gleichgewichts von Poole et al.³⁾

aber Laborexperimenten an realem, flüssigen Wasser unterhalb des Gefrierpunkts auf der Zeitskala von Minuten und Stunden häufig ein abruptes Ende. Im Temperaturbereich bis zirka -10°C lässt sich selbst eine Literflasche Wasser im Gefrierschrank für einige Zeit im metastabilen, unterkühlten Zustand halten. Unterhalb von -38°C (T_H) kristallisiert aber auch keimfreies Wasser in Millisekunden oder schneller (Abbildung 3). Dies macht es beinahe unmöglich, die Hypothese des zweiten, flüssig-flüssig-kritischen Punkts experimentell zu überprüfen.

Dennoch gibt es einige Hinweise für eine Flüssig-flüssig-Separation. Dazu zählt insbesondere die Polymorphie von Wasser, also die Existenz zweier nichtkristalliner Festkörper, die sich sprunghaft und reversibel ineinander überführen lassen (roter und grüner Bereich in Abbildung 3). Um solches amorphes Eis herzustellen, braucht es Methoden, den kristallinen Zustand bei tiefen Temperaturen zu umgehen. Eine dieser Methoden entdeckten Mishima et al. im Jahr 1984.⁶⁾ Sie machten sich eine weitere Anomalie des Wassers zunutze: die negative Steigung der Schmelzkurve. Eis lässt sich deshalb etwa bei -1°C durch Druckerhöhung schmelzen. Mishima et al. komprimierten Eis bei -196°C auf über 12000 bar (1200 MPa), kreuzten die extrapolierte Schmelzlinie von Eis (gestrichelte Linie in Abbildung 2) und wandelten hexagonales Eis in einen nichtkristallinen, amorphen Festkörper um, das hochdichte amorphe Eis (HDA). Beim Entlasten bleibt der amorphe Zustand erhalten, und deshalb lässt sich HDA auch bei Umgebungsdruck untersuchen. Dieser Vorgang des druckinduzierten Amorphisierens ist sehr selten. Für fast alle Substanzen gilt, dass bei Druckerhöhung der umgekehrte Vorgang spontan abläuft: Ein amorpher Festkörper kristallisiert. Interessanterweise lassen sich nur Substanzen amorphisieren, deren Schmelzlinie eine negative Stei-

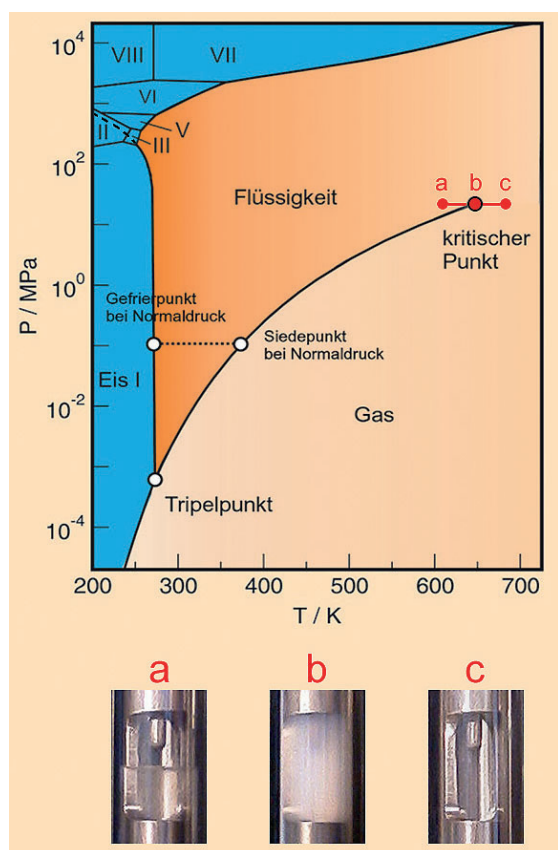


Abb. 2. Oben: Phasendiagramm von Wasser, das ausschließlich die thermodynamisch stabilsten Phasen ausweist: verschiedene, stabile kristalline Eisphasen (blau), stabile Flüssigkeit (dunkelorange) und das stabile Gas (hellorange). Metastabile Phasen (metastabiles kristallines Eis, amorphes Eis, HDL, LDL) sind nicht ausgewiesen, können aber experimentell hergestellt, über Wochen und Monate stabil gehalten und charakterisiert werden. Unten: Verhalten von Gas und Flüssigkeit in der Nähe des kritischen Punkts im Druckreaktor.

Grafik nach R. Ludwig, D. Paschek, Chem. Unserer Zeit, 2005, 39, 164;

Fotos: Sven Horstmann

Problem Kristallisation

◆ In den Simulationen spielt Kristallisation beim Abkühlen von Wassermolekülen kaum eine Rolle, da innerhalb der Simulationszeit von wenigen Nanosekunden homogene Nukleation nur äußerst selten zu beobachten ist. Die ungewollte Kristallisation von Eis setzt

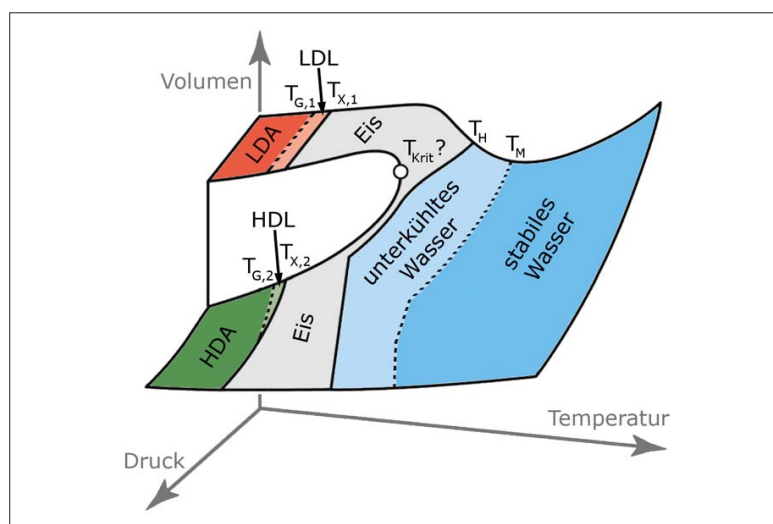


Abb. 3. Phasendiagramm von nicht-kristallinem Wasser. Dargestellt sind die beiden amorphen Formen LDA und HDA und die beiden Flüssigkeiten LDL und HDL. Die Glasübergangstemperaturen $T_{G,1}$ und $T_{G,2}$ trennen die amorphen, festen Formen von den tief unterkühlten Flüssigkeiten. Oberhalb von den Kristallisationstemperaturen $T_{x,1}$ und $T_{x,2}$ kristallisieren die beiden Flüssigkeiten. Im Niemandsland (graue Zone „Eis“), begrenzt durch T_x und die homogene Nukleationstemperatur T_h , sind derzeit keine nicht-kristallinen Phasen von Wasser experimentell zugänglich. Dort ist ein zweiter kritischer Punkt T_{krit} postuliert.

Adaptiert von Mishima, *Proc. Jpn. Acad., Ser. B*, 2010, 86, 165

gung hat oder die ein Dichtemaximum im flüssigen Zustand zeigen. Dazu zählt neben Wasser auch SiO_2 .

Noch spannender ist der Phasenübergang beim Aufwärmen von HDA bei Niederdruckbedingungen. Im Gegensatz zu anderen amorphen Festkörpern kristallisiert HDA nicht, sondern wandelt sich plötzlich bei einer definierten

Temperatur in einen weiteren, niederdichten amorphen Festkörper (LDA) um.⁷⁾ LDA ist etwa 25 Prozent weniger dicht als HDA (Abbildung 3).⁷⁾ Der scharfe Phasenübergang äußert sich bei Umgebungsdruck durch ein Aufplatzen von HDA („Popcorn-Effekt“, Abbildung 4, S. 114). Der Phasenübergang lässt sich im Druckzylinder reversibel gestalten: Komprimiert

und dekomprimiert man das amorphe Eis bei zirka -135°C , wandeln sich die beiden nichtkristallinen Formen von Eis ineinander um.⁸⁾

Amorphes Eis als Glas

◆ LDA und HDA lassen sich als Tieftemperatur-Manifestationen der beiden entmischten flüssigen Phasen von Wasser, LDL und HDL, auffassen. Die Existenz dieser beiden Formen ist daher ein Hinweis auf das von Poole et al. postulierte Zweiflüssigkeitsmodell.³⁾ Um flüssiges Wasser mit einer Dichte von $1,00\text{ g}\cdot\text{mL}^{-1}$ als Mischung von LDL sowie HDL zu beschreiben, ist es notwendig, dass eines leichter und eines schwerer ist. In der Tat beträgt die Dichte von LDL etwa $0,93\text{ g}\cdot\text{mL}^{-1}$ und die Dichte von HDL etwa $1,15\text{ g}\cdot\text{mL}^{-1}$. Flüssiges Wasser bei Raumtemperatur bestünde demnach aus einer Mischung von einem Drittel HDL und zwei Dritteln LDL.

Doch lässt sich dies auch beweisen? Sind die beiden Flüssigkeiten HDL und LDL experimentell zugänglich? Amorphe Festkörper wie Fensterglas sind immobilisierte Flüssigkeiten und werden beim Aufwärmen immer weicher und erreichen an der Glasübergangstemperatur T_G den mobilen, flüssigen

◆ Glasübergangstemperatur bestimmen

Experimentell lässt sich die Glasübergangstemperatur T_G anhand verschiedener Methoden feststellen.

Sehr häufig wird die Wärmekapazität C_p kalorimetrisch verfolgt. Im immobilen, amorphen Zustand ist C_p klein, ähnlich wie in einem kristallinen Festkörper. Sobald die Moleküle jedoch bei T_G auf der Zeitskala des Experiments beweglich werden, stehen zusätzliche Translations- und Rotationsfreiheitsgrade zur Verfügung. Dies äußert sich in einem stufenartigen Anstieg von C_p . Da es sich beim Glasübergang um einen kontinuierlichen,

schleichend verlaufenden Prozess handelt, wird bei T_G keine latente Wärme umgesetzt. Dies unterscheidet den Glasübergang vom Schmelzen eines kristallinen Materials, das scharf und unter Konsumation latenter Wärme vonstatten geht.

Auch Dilatometrie, also die Messung der Ausdehnung der Probe, eignet sich ausgezeichnet, um T_G zu bestimmen: Sowohl der thermische Ausdehnungskoeffizient als auch die isotherme Kompressibilität unterscheiden sich im festen und im flüssigen Zustand. Bei T_G kommt es daher zu einer stu-

fenartigen Änderung dieser beiden Eigenschaften, die sich durch Messungen des Volumens als Funktion der Temperatur oder des Drucks feststellen lassen.

Die Beweglichkeit der Moleküle bei T_G ist mit Relaxationsmethoden feststellbar, etwa über dielektrische Relaxation oder über NMR-Spin-Gitter-Relaxation. Üblicherweise wird T_G als jene Temperatur definiert, bei der die Relaxationszeit 100 Sekunden beträgt. Schließlich kann T_G auch mit mechanischen Methoden aufgrund des Erweichens des Materials festgestellt werden.

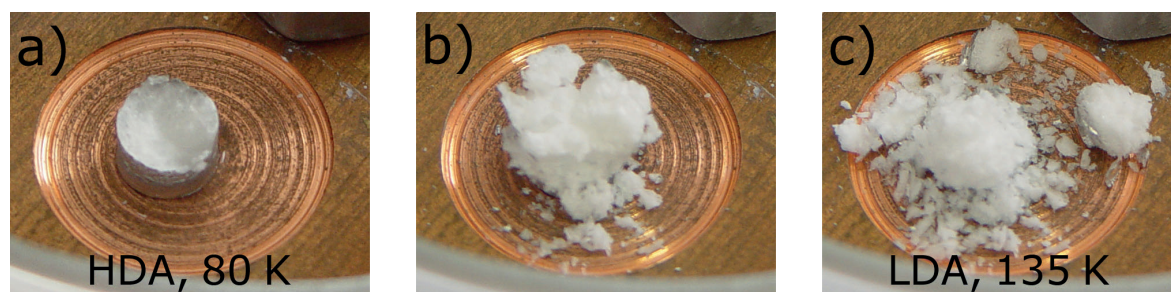


Abb. 4. Der Popcorn-Effekt: Hochdichtes amorphes Eis HDA (a) wandelt sich beim Aufwärmen bei einer definierten Temperatur (b) spontan in niederdichtes amorphes Eis LDA (c) um.

Fotos: Loerting et al.

Zustand. Für Normalglas (Natronglas) liegt T_G bei zirka 700°C . Oberhalb von T_G nimmt die Viskosität stark ab, bis schließlich die Formstabilität des Festkörpers verloren geht. Dies nutzen Glasbläser aus, um die Glasschmelze in Form zu bringen. Tatsächlich arbeiten Glasbläser bei Temperaturen von 100 bis 200°C oberhalb von T_G , aber deutlich unterhalb des Schmelzpunkts T_M des Oxidgemenges. Oxidische Gläser werden also im metastabilen Zustand der unterkühlten Schmelze bearbeitet. Stimmt die Vorstellung von LDA und HDA als immobilisierte, glasartige Zustände von H_2O , so müssen auch diese beim Aufwärmen einen Glasübergang zeigen und bei T_G in den metastabilen Zustand der unterkühlten Flüssigkeit übergehen. Wenn das Zweiflüssigkeitsmodell zutrifft, muss jede der bei-

den amorphen Formen individuelles Verhalten und eine voneinander unabhängige Glasübergangstemperatur zeigen.

Der Glasübergang von LDA wurde bereits vor etwa 25 Jahren bei -137°C entdeckt⁹⁾ und nach langer Kontroverse auch bestätigt.¹⁰⁾ Erst oberhalb dieser Temperatur findet ein Isotopenaustausch zwischen H_2O - und D_2O -Schichten statt und kann ein dünner Metallstempel mit wenig Kraft eine zentimeterdicke Probe von LDL durchdringen. LDL kristallisiert schließlich bei -122°C , sodass ein Temperaturfenster von 15°C Breite zur Verfügung steht, in dem hochviskoses LDL bis zu mehreren Tagen metastabil bleibt.¹¹⁾ In diesem Temperaturfenster steht damit ein Tieftemperaturlösungsmittel zur Verfügung, in dem genauso wie in Wasser bei Standardbedingungen chemische Reaktionen ablaufen.

Naturgemäß laufen chemische Reaktionen bei Kryobedingungen viel langsamer ab als bei Raumtemperatur. Daher lassen sich schnelle und ultraschnelle chemische Reaktionen im Lösungsmittel LDL gleichsam in Zeitlupe studieren. Insbesondere sind so sehr kurzlebige Zustände zugänglich, für deren Studium bei Raumtemperatur Techniken wie Femtosekunden-spektroskopie nötig wären.

Beispielsweise zerfällt wässrige Kohlensäure, $\text{H}_2\text{CO}_3(\text{aq})$, bei Raumtemperatur sehr schnell und bildet dabei Kohlendioxid. Unter Kryobedingungen in LDL entsteht die Kohlensäure durch Protonierung von Carbonat, zerfällt aber nicht. Wie in der organischen Chemie das Lösungsmittel am Rotationsver-

dampfer kann auch das Kryolösungsmittel durch Anlegen eines Unterdrucks abgezogen werden. So sind die Reaktionsprodukte zugänglich, im genannten Fall die kristalline Kohlensäure $\text{H}_2\text{CO}_3(\text{s})$, die bis zur Verwendung dieser Kryotechnik als nicht isolierbar galt.¹²⁾

Der HDL-Zustand

◆ Der Glasübergang von HDA war lange Zeit unbekannt. Erst unsere neueren, in Kooperation mit Gerhard Zifferer (Universität Wien) sowie mit Roland Böhmer (TU Dortmund) entstandenen Arbeiten machen hochdichtes, flüssiges Wasser (HDL) zugänglich. Zuerst zeigten wir, dass HDL unter Hochdruckbedingungen erreichbar ist.¹³⁾ Danach wiesen wir nach, dass HDL auch bei Umgebungsdruck erhältlich ist und sich bis zu mehreren Tagen metastabil halten lässt. Dessen T_G liegt bei -157°C und damit nochmals um 20°C tiefer als jener von LDL.¹⁴⁾ Wasser hat also nicht nur einen Glasübergang, sondern ist die erste Substanz mit einem nachgewiesenen zweiten Glasübergang. Zudem ist HDL der kälteste flüssige Zustand von Bulk-Wasser, der jemals erhalten werden konnte. Er bleibt bei Umgebungsdruck bis zu etwa -137°C metastabil, bevor er den Dichtesprung in die niederdichte Flüssigkeit LDL erfährt. HDL unterscheidet sich nicht nur durch die 25 Prozent größere Dichte von LDL. Bei gleicher Temperatur bewegen sich die Moleküle in HDL um drei Größenordnungen schneller als in LDL, und die Viskosität von HDL sinkt mit steigen-

GDCh-Kurs
Grundlagen der Allgemeinen und Anorganischen Chemie für Mitarbeiter aus Produktion und Technik (948/15)
17. - 20. März 2015, Bad Dürkheim
 Leitung: OStR Rüdiger Hocker

Highlights:
 Verständnis für chemische Zusammenhänge
 Eindrucksvolle Experimente
 Großtechnische Produktionsverfahren
 Chemie und Umwelt
 Ohne größere chemische Vorkenntnisse

Anmeldung/Information:
 Tel.: 069/7917-291
 E-Mail: fb@gdch.de
 www.gdch.de/fortbildung

der Temperatur schneller als jene von LDL.¹⁴⁾ Die Wassermoleküle selbst sind, wie von Bernal und Fowler vorausgesagt, tetraedisch koordiniert (erste Hydrathülle). Die höhere Dichte in HDL resultiert aus einem teilweisen Kollaps der zweiten Hydrathülle, der ein H₂O-Molekül in Richtung der ersten Hydrathülle verschiebt („interstitielles Molekül“). Dadurch sind die Wassermoleküle im HDL gespannt und reaktiver als jene im LDL.

Wasser im Weltall

◆ Während wir auf der Erde hauptsächlich kristallines Eis in Form von Schnee, Eisschilden oder Gletschereis kennen, ist kristallines Eis im Weltall die Ausnahme. Tatsächlich liegt der größte Teil der molekularen Materie im Weltall als amorphes Eis vor, etwa in interstellaren Wolken (Abbildung 5), auf Kometen oder auf den Saturn-Ringen. Auch der Komet 67P, Tschurjumow-Gerassimenko, der durch die Rosetta-Mission der ESA berühmt wurde, besteht zum größten Teil aus amorphem Eis. In dessen Mikroporen sind verschiedene flüchtige Moleküle wie CO₂, CO, NH₃, SO₂ oder HCOOH gespeichert. Bei der Annäherung an die Sonne kollabieren zuerst die Mikroporen im Eis, bevor das Wasser schließlich in den hochviskosen LDL-Zustand übergeht. Welche chemischen Reaktionen in dieser

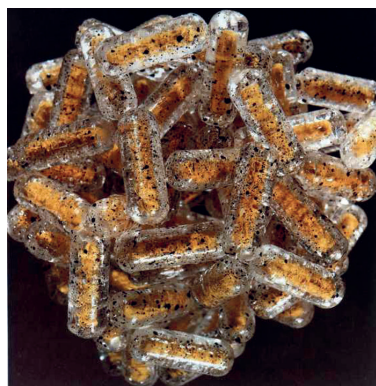


Abb. 5. Agglomeration von Staubkörnern (bestehend aus C oder Si), umhüllt von amorphem Eis als Modell für interstellaren Staub.
Foto: Leiden Observatory

Umgebung ablaufen und welche komplexen Syntheseprodukte entstehen, ist Gegenstand aktueller Forschung. So war eines der Hauptziele für die Rosetta-Mission die Frage nach der Existenz von Aminosäuren auf Kometen. Die Erkundung der Kometen und Kometenschweife erreichte mit der Rosetta-Mission einen Meilenstein, steht aber dennoch erst am Anfang.

Tieftemperatur-Lösungsmittel für die Chemie?

◆ Die Fortschritte in den letzten Jahren wirken wie ein Startschuss für die Untersuchung der Kryochemie in hochviskosem flüssigen Wasser. Es stehen nun zwei verschiedene, flüssige Tieftemperatur-Lösungsmittel von H₂O zur Verfügung. LDL und insbesondere HDL könnten als reaktive Lösungsmittel eingesetzt werden.

Haben die gespannten Wassermoleküle im HDL die Fähigkeit, stabile Moleküle wie CO₂ reaktiv zu machen? Welchen Einfluss haben die in LDL kürzlich identifizierten Quanteneffekte¹⁵⁾ auf die chemische Reaktivität? Kann das aktivierte Lösungsmittel sogar einen neuen Ansatz in der Katalyse bieten und den gängigen Metall- oder Oxidkatalysatoren Konkurrenz machen? Werden wir eines Tages großtechnische Synthesen im HDL-Kryosilo betreiben? Diese Fragen müssen die Forschungs- und Industrieprojekte von heute und morgen angehen.

Literatur

- 1) M. Chaplin, *www.lsbu.ac.uk/water* (5.1.2015).
- 2) E. B. Mpemba, D. G. Osborne, *Phys. Educ.* 1969, 4, 172.
- 3) P. H. Poole, F. Sciortino, U. Essmann, H. E. Stanley, *Nature* 1992, 360, 324.
- 4) N. Giovambattista, K. Amann-Winkel, T. Loerting, *Adv. Chem. Phys.* 2013, 152, 139.
- 5) J. D. Bernal, R. H. Fowler, *J. Chem. Phys.* 1933, 1, 515.
- 6) O. Mishima, L. D. Calvert, E. Whalley, *Nature* 1984, 310, 393.
- 7) O. Mishima, L. D. Calvert, E. Whalley, *Nature* 1985, 314, 76.
- 8) O. Mishima, *J. Chem. Phys.* 1994, 100, 5910.

- 9) G. P. Johari, A. Hallbrucker, E. Mayer, *Nature* 1987, 330, 552.
- 10) I. Kohl, L. Bachmann, E. Mayer, A. Hallbrucker, T. Loerting, *Nature* 2005, 435, E1.
- 11) M. S. Elsaesser, K. Winkel, E. Mayer, T. Loerting, *Phys. Chem. Chem. Phys.* 2010, 12, 708.
- 12) W. Hage, A. Hallbrucker, E. Mayer, *J. Am. Chem. Soc.* 1993, 115, 8427.
- 13) M. Seidl, M. S. Elsaesser, K. Winkel, G. Zifferer, E. Mayer, T. Loerting, *Phys. Rev. B* 2011, 83, 100201.
- 14) K. Amann-Winkel, C. Gainaru, P. H. Handle, M. Seidl, H. Nelson, R. Böhmer, T. Loerting, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 2013, 110, 17720.
- 15) C. Gainaru, A. L. Agapov, V. Fuentes-Landete, K. Amann-Winkel, H. Nelson, K. W. Köster, A. I. Kolesnikov, V. N. Novikov, R. Richert, R. Böhmer, T. Loerting, A. P. Sokolov, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 2014, 111, 17402.

Markus Seidl studierte Chemie an den Universitäten Wien und Innsbruck. Seine Dissertation bei Thomas Loerting über den Glasübergang und das Kristallisationsverhalten von amorphem Eis und Tris-Naphthylbenzen wird er 2015 abschließen. Im Jahr 2012 verbrachte Seidl ein halbes Jahr in der Arbeitsgruppe von Mark D. Ediger an der University of Wisconsin-Madison.



Katrin Amann-Winkel studierte Physik an der TU Darmstadt und schloss ihre Promotion über amorphe Eisphasen im Jahr 2009 an der Universität Innsbruck ab. Dort forschte sie bis zum Jahr 2014; seit kurzem arbeitet sie als Postdoktorandin an der Universität Stockholm.



Jürgen Bernard studierte an der Universität Innsbruck Chemie. Im Jahr 2014 schloss er das Doktoratsstudium mit einer Arbeit über Kohlensäure ab. Derzeit arbeitet er im Rahmen eines Stipendiums des MPI für Chemische Energiekonversion (Mülheim an der Ruhr) gemeinsam mit den Professoren Robert Schlögl und Thomas Loerting an der Erforschung der Kryokatalyse.



Thomas Loerting ist seit dem Jahr 2008 Professor für physikalische Chemie an der Universität Innsbruck. Hauptforschungsgebiet ist Wasser und Eis sowie wässrige Lösungen und Clathrat-Hydrate unter extremen Bedingungen, insbesondere unter hohem Druck bzw. bei sehr tiefen Temperaturen. Er absolvierte Auslandsaufenthalte im Labor des Nobelpreisträgers Mario J. Molina am Massachusetts Institute of Technology sowie bei Roland Böhmer an der TU Dortmund.
thomas.loerting@uibk.ac.at

