

Jan Hendrik Bredehöft

Helfen Kometen uns, den Ursprung des Lebens zu verstehen?

Kometen sind kleine Körper im Sonnensystem, die aus dem Eis und Staub der protoplanetaren Scheibe entstanden sind. Sie enthalten damit das älteste unveränderte Material des Sonnensystems und enthalten womöglich noch Eis und Staub aus der ursprünglichen interstellaren Wolke, deren Kollaps unsere Sonne und die Planeten entstehen ließ. [1] Das Eis, aus dem Kometen bestehen, ist im Wesentlichen Wassereis, in dem einige Prozent andere Moleküle eingeschlossen sind. Es handelt sich damit um ein primitives Eis, das aber durchaus strahlungsgetrieben chemischen Änderungsprozessen unterliegt. So konnte das COSAC Instrument [2], das 2014 mit ROSETTAs Landeeinheit Philae auf dem Kern des Kometen

67P/Churyumov-Gerassimenko abgesetzt wurde, [3] neben den einfachen Molekülen H_2O , CH_4 , CO und NH_3 auch schwerere, komplexere Moleküle wie Formamid oder Acetaldehyd finden, die als Additionsprodukte zweier einfacher Ausgangsverbindungen gedeutet werden können. [4, 5] Zu diesen Produkten der zweiten Generation kommen noch solche hinzu, die durch weitere Folge-Reaktionen gebildet werden, wie zum Beispiel Ethyl-Methylether und Ethylenglycol. [6]

Die Reaktionen, die zu den nachgewiesenen Molekülen führen, können wir im Labor nachstellen und die Reaktionspfade, die zu diesen einfachen organischen Molekülen führen, aufklären. [8] Dazu werden in einer Ultrahochvakuum-Kammer bei 30 K Substanzen kondensiert und mit langsamen Elektronen bestrahlt. Dieser Elektronenstrahl hat die gleiche Energie, die durch ionisierende Strahlung freigesetzte Sekundärelektronen typischerweise haben. Die Produkte der dadurch ausgelösten Reaktionen werden durch langsames Aufheizen der Probe nach und nach in die Gasphase gebracht, wo sie massenspektrometrisch identifiziert werden. Durch Bestimmung der Energieabhängigkeit der Bildung von Produkten und Nebenprodukten kann so (unter gelegentlicher Zuhilfenahme von quantenchemischen Rechnungen) ein detailliertes Bild der verantwortlichen Reaktionsmechanismen erstellt werden. [7] Durch Vergleich von Laborexperimenten mit den Daten, die durch direkte Beobachtung von Kometen gewonnen wurden, können Hinweise darauf gefunden werden, welche anderen Moleküle wir auf Kometen ebenfalls erwarten würden, auch wenn diese aufgrund ihrer zu geringen Menge oder ihres zu geringen Dampfdrucks dort nicht direkt nachgewiesen werden können. Die Chemie der Kometen ist zwar noch lange nicht erschöpfend erforscht, es gibt aber genügend Erkenntnisse und experimentelle Möglichkeiten ein kohärentes, wenn auch noch lückenhaftes Bild dieser Kometen-Chemie zu zeichnen.

Die Frage, ob und wie diese Moleküle im Zusammenhang mit der Entstehung des Lebens auf der Erde und womöglich anderswo stehen, ist allerdings weit weniger leicht zu beantworten. Es wird davon ausgegangen, dass in der frühesten Erdgeschichte im Rahmen des „Late Heavy Bombardment“ sehr große Mengen an Eis und Staub durch Kometen, Asteroiden und andere kleine Körper auf die noch jungen Planeten des Sonnensystems gelangten. Diese kleineren Körper könnten signifikante Mengen an Wasser und auch organischer Verbindungen auf die Erde gebracht haben. [9, 10] Eine direkte Verbindungslinie zwischen den auf Kometen gefundenen chemischen Verbindungen und dem organischen Inventar der frühen Erde, das für die Entstehung des Lebens zur Verfügung stand, kann aber nicht so ohne Weiteres gezogen werden.

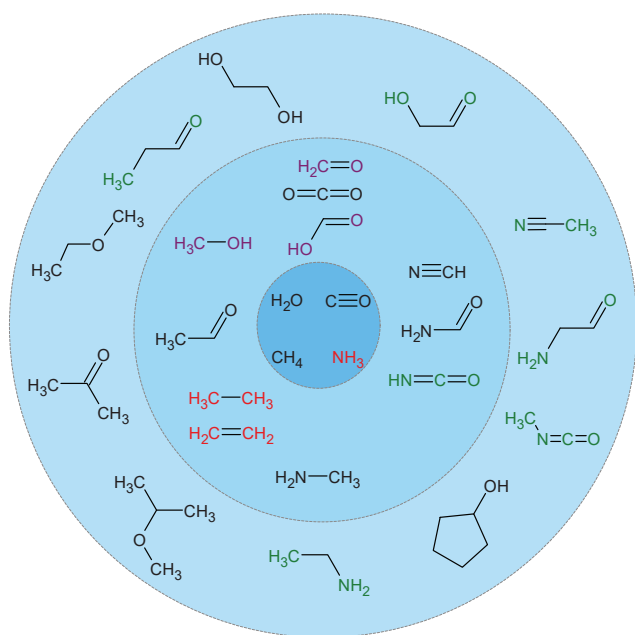


Abb. 1: Organisches Inventar des Kometen 67P/Churyumov-Gerassimenko. Im inneren Ring die primitiven Moleküle, im zweiten Ring die Additionsprodukte, im äußeren Ring Produkte weiterführender Reaktionen. Moleküle in schwarz aus Leseigneur *et al.* 2022 [5], Moleküle in grün aus Goesmann *et al.* 2015 [4], Moleküle in lila wurden nicht direkt identifiziert, ihre Bildung ist aber in Laborversuchen unter Kometenbedingungen gezeigt [7]. Moleküle in rot wurden nicht direkt nachgewiesen, ihre Reaktionsprodukte jedoch schon.

PD Dr. rer. nat. Jan Hendrik Bredehöft
 Universität Bremen
 Institut für Angewandte und Physikalische Chemie
 Fachbereich 02 Biologie/Chemie, NW2 B1230
 Leobener Straße 5, 28359 Bremen
 Tel. 0421 218-63201, Fax 0421 218-63188
 jhbredehoeft@uni-bremen.de
www.uni-bremen.de

DOI-Nr.: 10.26125/zwrt-6459

Beim Transport von Material aus dem äußeren Sonnensystem wird dies von der Sonne immer stärker erwärmt, bis es erst zu Sublimationsprozessen von Molekülen kommt bis schließlich zu den aus Eis und vor allem Staub gespeisten Eruptionen, die den Kometen in Sonnennähe ihren charakteristischen Schweif verleihen. Im Zuge dieser Prozesse kann es besonders bei sehr kleinen Körpern wie Fragmenten von Kometen oder interstellaren Staubpartikeln zu Verlust von sehr leicht flüchtigen Verbindungen wie CO, N₂ und Methan kommen, während vormals aufgrund der sehr niedrigen Temperaturen immobilisierte Radikale plötzlich diffundieren und reagieren können. Bei den dann eintretenden exothermen Reaktionen kann die freigesetzte Reaktionswärme zu explosiven Desorptionseignissen führen, die wiederum organisches Material aus der kondensierten Phase freisetzen, welches verloren geht. Beim Eintritt in die Atmosphäre eines Planeten und bei einem Einschlag auf dessen Oberfläche schließlich treten Schockereignisse auf, die extreme Temperaturen erreichen. Dies kann einerseits zu Schocksynthesen führen, bei denen komplexe organische Verbindungen entstehen [11], andererseits aber auch zu Pyrolyse von bereits vorhandenen Verbindungen. Es steht außer Frage, dass große Mengen an Kohlenstoff auf die junge Erde gelangt sind. Es ist jedoch stark zu bezweifeln, dass diese Kohlenstoffverbindungen genau die Gestalt hatten, die man in Kometen identifiziert hat. Auch ist das Problem der (lokalen) Konzentrationen, die groß genug sein müssen, um primitive Systeme mittels der Mechanismen der chemischen Evolution zu komplexeren werden zu lassen, größtenteils ungelöst. Material, das mehr oder weniger stark verändert in den globalen Ur-Ozean fällt, wird durch Transportprozesse sehr schnell sehr weit verteilt und verdünnt.

Warum schauen wir uns dann trotzdem Kometen an? Zum einen natürlich, weil Kometen *per se* interessant sind. Selbst wenn wir im Jahr 2050 irgendwann einmal mit Sicherheit wissen, wie das Leben auf der Erde entstanden ist, und wir dann womöglich mit Sicherheit ausschließen können, dass Kometen irgendetwas damit zu tun gehabt haben, wäre das Studium von Kometen und damit dem sehr frühen Sonnensystem spannend. Eine genaue Inventarisierung von Kometen kann uns allerdings auch sehr wohl dabei helfen, die Ausgangsbedingungen für einen Ursprung des Lebens zu verstehen. Das Studium der Kometen-Chemie kann uns ein Verständnis von „natürlich“ auftretenden organischen Molekülen vermitteln, wenn man auf die Hilfe dessen verzichtet, was man gemeinhin unter dem Begriff „Natur“ versteht: den Lebewesen. (Womöglich mitlesende Geologen mögen mir diese Behauptung nachsehen.) Unser Verständnis von „Natur“ ist extrem eng mit dem Leben verbunden. Wer am Wochenende zum Ausgleich für stressige Arbeit ein Naturerlebnis sucht, wird wohl viel eher einen Waldspaziergang „im Grünen“ meinen, als eine völlig lebenslose Geröllwüste. (Auch hier könnten Geologen anderer Meinung sein). In der Chemie gilt als wichtigster Grundsatz, dass alle Systeme einem Minimum der freien Enthalpie entgegenstreben ($\Delta G < 0$). Dies ist die eigentliche Natur der Chemie. Diese außerhalb des Labors zu beobachten, ohne dass irgendein Lebewesen mit irgendwelchen Enzymen „magisch dazwischenpfuscht“ und beispielsweise Enantiomere trennt, ist auf einem Planeten, der so dermaßen von Leben durchdrungen ist wie die Erde, nicht ganz einfach. Die Untersuchung

der Kometen-Chemie bietet eine Möglichkeit, die Art von Natur zu studieren, die vor dem Ursprung des Lebens existierte. Dabei handelt es sich aber nur auf den ersten Blick um eine spezifische Kometen-Chemie. Bei der Untersuchung der Chemie von Kometen stößt man immer wieder auf Reaktionsmechanismen, die gar nicht so „kometisch“ sind, sondern auf wohl bekannte und gut verstandene Mechanismen aus der organischen Chemie der Radikale zurückgeführt werden können.

Diese Reaktionen laufen nicht nur auf Kometen ab, sondern sind universell „natürlich“. Auch geochemisch (und eben nicht geobiochemisch) sind ähnliche Prozesse denkbar. Es sind in 4.4 Milliarden Jahren alten Quarzeinschlüssen organische Verbindungen entdeckt worden, die höchstwahrscheinlich aus einer Zeit stammen, die vor dem Ursprung des Lebens auf der Erde liegt. [12] Die dort identifizierten Verbindungen sind durch Hydrothermalsynthese entstanden. Auch hier galt strikt $\Delta G < 0$, ohne Hilfe von Enzymen oder Ähnlichem. Die analysierten Proben ähneln in ihrer Zusammensetzung den bereits beschriebenen natürlichen aber lebensfreien Proben aus den Kometen. Um in einer durch und durch belebten Welt auf Proben zu stoßen, die von einer Natur ohne Leben zeugen, müssen wir uns weit vom Hier und Jetzt entfernen. Entweder gehen wir weit in der Zeit zurück durch Analyse von extrem alten Gesteinsformationen, oder sehr weit von der Erde weg, durch Analyse von Kometen. Das chemische Inventar von Kometen gibt uns daher Hinweise, welche Substanzen für den Ausgangspunkt der chemischen Evolution zur Verfügung gestanden haben könnten, auch wenn sie nicht von himmlischen Boten gebracht wurden, sondern in der Tiefe der Erde gewachsen sind.

Referenzen

- [1] Greenberg, M. 1998, *Astron. Astrophys.*, **330(1)**, 375-380
- [2] Goesmann, F., Rosenbauer, H., Roll, R., et al. 2007, *Space Sci. Rev.*, **128**, 257
- [3] Biele, J., Ulamec, S., Maibaum, M., et al. 2015, *Science*, **349**, 9816
- [4] Goesmann, F., Rosenbauer, H., Bredehöft, J.-H., et al. 2015, *Science*, **349**, 0689
- [5] Leseigneur, G., Bredehöft, J.H., Gautier, T., et al. 2022, *Angew. Chem. Int. Ed.*, Accepted Manuscript.
- [6] Leseigneur, G., Bredehöft, J.H., Gautier, T., et al. 2022, *Chem-PlusChem*, Accepted Manuscript
- [7] Schmidt, F., Bormann, T., Mues, M.P., et al. 2022, *Atoms*, **10**, 25
- [8] Bredehöft, J.H. 2016, *Bunsen-Magazin*, **18(5)**, 160-167
- [9] Chyba, C., Sagan, C. 1992, *Nature*, **355**, 125–132
- [10] Ehrenfreund, P., et al. 2002, *Rep. Prog. Phys.*, **65**, 1427–1487.
- [11] Martins, Z., Price, M., Goldman, N. et al. 2013, *Nat. Geosci.*, **6**, 1045–1049
- [12] Schreiber, U., Mayer, C., Schmitz, O.J. et al. 2017, *PLoS ONE*, **12**, e0177570

PD Dr. Jan Hendrik Bredehöft

Jan Hendrik Bredehöft ist ein Physiko-Chemiker in der größten Stadt an der Weser. Er wurde 1979 in der größten Stadt an der deutschen Nordseeküste geboren und promovierte nach einem Diplom in Chemie mit regelmäßigen Forschungsaufenthalten in der zweitgrößten Stadt an der dänischen Ostseeküste und der größten Stadt am Ufer der Seine 2007 zum „Ursprung der Homochiralität am Beispiel der Aminosäuren“. Es schlossen sich Post-Doc Aufenthalte in einer englischen Großstadt komplett ohne Küste (aber mit einem sehr niedlichen kleinen Fluss namens River Ouzel) und der größten Küstenstadt Nordirlands an, bevor er an die Weser zurückkehrte, wo er sich 2017 mit der Arbeit „Prebiotic Synthesis of Small Biomolecules and the Origin of Life“ habilitierte. Seitdem leitet er an der dortigen Uni das Forschungsgebiet Astrochemie. Trotz dermaßen viel Wasser in seinem Lebenslauf und seinem Studienobjekt, dem Kometeneis, mag er es eigentlich lieber warm und trocken.