



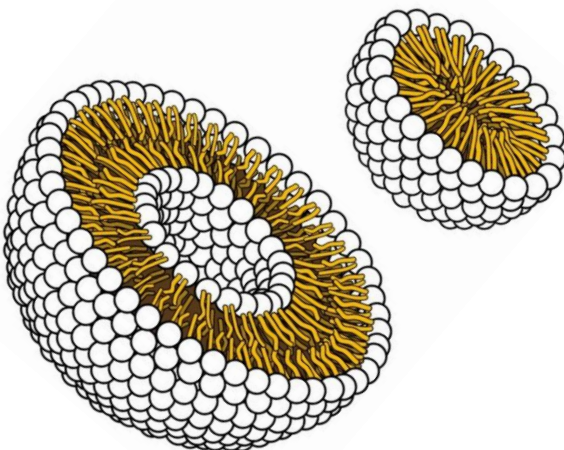
Komplexe Moleküle schaffen komplexe Prozesse

Mit Bezug zu Physik und Biochemie für die Oberstufe

Aus der Reihe **FIDS!** - **Forschung in die Schule!**
Fakultät für Physik der LMU München

Zusammenarbeit von:
Dr. Pascal Eitner und Prof. Dr. Juan Gaviria

Dr. Cecilia Scorza
Koordinatorin



Materialien

Wissenschaftliche Hintergründe

Aktivitäten und Aufgaben

Anwendungen in der aktuellen Forschung

Zielsetzung

Welche universellen Prinzipien führten dazu, dass sich einzelne Moleküle zu dreidimensionalen Strukturen zusammenfügten? Welche Prozesse begünstigten die Entstehung eines Stoffwechsels, bevor es lebende Zellen gab, in denen er stattfinden konnte?

Physikalische Prozesse wie der Aufbau thermischer Gradienten, die Aufkonzentrierung von Molekülen, und andere Ungleichgewichte schufen neue Strukturen und setzten eine frühe Form des Stoffwechsels in Gang. Das Ergebnis dieser Prozesse war weder planbar noch vorherbestimmt und ergab auf jeder Stufe neuartige, unvorhergesehene Erweiterungen der bisherigen Stoffwechselprozesse.

Ehemals unabhängige Reaktionen vernetzten sich zu neuen komplexen chemischen Abläufen. Es entstanden Polymere unterschiedlicher Bauart, die schon in einer Weise miteinander interagierten, wie sie es später auch in lebenden Zellen tun würden. Die chemische Evolution führte zu der Schwelle, an der präbiotische Abläufe zu Prozessen wurden, die das Leben in Gang setzten.

Diesen Akteuren und Prozessen wollen wir in diesem Modul näherkommen.

Inhaltsverzeichnis

4.1 Die Materie organisiert sich selbst	4
4.2 RNA-Welt	6
4.3 Eine Händigkeit setzt sich durch.....	7
4.4 Proteine werden zu vielseitigen Werkzeugen	8
Aktivitäten	10
Aktivität 1 - Der chemische Garten: Selbstorganisierte Muster werden zu dauerhaften Strukturen.	10
Aktivität 2 - Fertigung eines tRNA-Papiermodells.....	121
Literaturquellen.....	144
Bildnachweis.....	144

4.1 Die Materie organisiert sich selbst

Bereits bevor das Leben entstand, konnte die Materie auf der Erde immer komplexere Formen annehmen. Aus niedermolekularen Vorstufen entstanden Makromoleküle mit unterschiedlich reaktiven Bereichen, die sich untereinander so ausgerichtet haben, dass räumliche Strukturen im Nanometerbereich ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$) entstanden. Die treibende Kraft hinter diesen Veränderungen war damals wie heute das Prinzip der Selbstorganisation. Darunter versteht man in der Biochemie eine gerichtete Abfolge von Ereignissen, die aufgrund von zwischenmolekularen Wechselwirkungen (z. B. elektrische Anziehung) zur Entstehung höherer, dreidimensionaler Anordnungen beiträgt, ohne dass diese Vorgänge von zentraler Stelle gesteuert werden!

Wenn das ordnende Prinzip auf den speziellen Eigenschaften der Bauteile wie beispielsweise ihrer Ladung beruht, lassen sich die Vorgänge der Selbstorganisation mit chemischen und physikalischen Gesetzmäßigkeiten erklären. So wachsen Kristalle, indem sich in einer Lösung aus vollkommen ungeordneten Bestandteilen von selbst Bausteine am Kristall anlagern und an der Kristalloberfläche einen präzisen Platz einnehmen. Die Ladungsverhältnisse und Geometrie der Bestandteile geben deren zukünftige Lage im Kristall meist zwingend vor. Das genaue Ergebnis eines Selbstorganisationsprozesses ist jedoch nicht vorhersehbar: So gleicht kein Kristall dem anderen, auch wenn sie nach den gleichen Prinzipien entstehen und nachher die gleichen Eigenschaften haben.

In Lebewesen gibt es vielfältige Beispiele für Selbstorganisationsprozesse. So ergibt sich etwa der Zusammenschluss von Lipiden in wässriger Lösung aus der Tatsache, dass Wasser ein elektrischer Dipol ist, während Lipide keine elektrische Polarität aufweisen (Abbildung 1). Deshalb tendieren Lipidmoleküle in wässriger Lösung immer dazu, sich neben anderen Lipiden anzuordnen; man nennt diese Eigenschaft „lipophil“. Alle polaren oder geladenen Teilchen dagegen durchmischen sich mit Wasser; man nennt diese Eigenschaft „hydrophil“. Proteine, die sich in einer Lipidschicht wie der Zellmembran verankern, verfügen

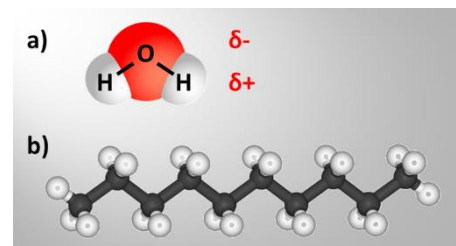


Abb. 1: a) Wasser ist ein elektrischer Dipol (Molekül mit Partialladung: Der Sauerstoff ist partiell negativ geladen). b) Ein Alkan als Bestandteil von Fettsäuren ist ungeladen. (Grafik: P. Eitner)

deshalb über einen lipophilen Teil ihrer Aminosäurekette, der sich dann automatisch in die Membran einfügen kann. Viele langkettige Biomoleküle (Proteine, Nukleinsäuren u. a.) können sich dank Selbstorganisation aus Monomeren bilden, sofern ein passendes Enzym vorhanden ist. So bilden sich beispielsweise Teile des Zellskeletts wie die röhrenförmigen Mikrotubuli aus den monomeren Bestandteilen

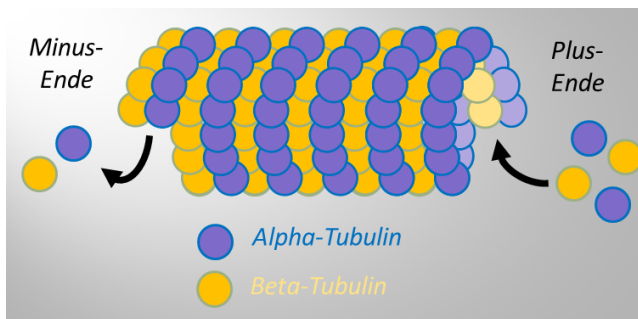


Abb. 2: Mikrotubulus-Bildung. Am Plus-Ende binden automatisch neue Tubulin-Bausteine, während sie am Minus-Ende vor dem Abbau geschützt werden müssen, damit ein Mikrotubulus wachsen kann. (Grafik: P. Eitner)

Alpha- und Beta-Tubulin, ohne dass eine übergeordnete Instanz sie zusammensetzen muss (Abbildung 2). Entscheidend ist allein die Dynamik von Anbau (Polymerisation am Plus-Ende) und Abbau (Hydrolyse am Minus-Ende), die natürlich durch weitere Moleküle reguliert werden kann – je nachdem, ob die Proteinröhrchen auf- oder abgebaut werden müssen. Mikrotubuli haben in lebenden Zellen vielfältige Funktionen wie Formgebung, Fortbewegung, intrazellulären Transport und Zellteilung. Selbst

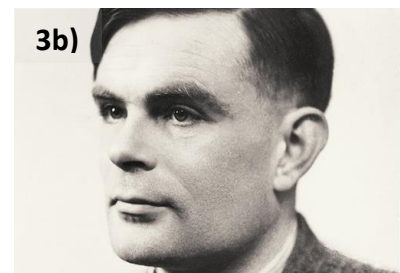
die Entwicklung eines Embryos beruht in großen Teilen auf der Selbstorganisation der Zellen (Modul 7.3), weil sich die Differenzierung der Gewebe aus erbgleichen Stammzellen aus einem Konzentrationsgradienten von Wachstumsfaktoren ergibt.

Auch wenn noch nicht alle Mechanismen entschlüsselt sind, so scheint sogar die räumliche Organisation des Erbguts zu einem großen Teil auf Selbstorganisation zu beruhen. Die Bildung eines langen Fadens aus einzelnen Nukleotiden, die Basenpaarung aufgrund von passenden Wasserstoffbrücken, die Ausbildung von sogenannten Haarnadelschleifen durch korrespondierende Basensequenzen sowie die Aufknäuelung des Erbgutes nach bestimmten Mustern und Hierarchiestufen benötigen keine „lenkende Hand“. Wahrscheinlich kann das Prinzip der Selbstorganisation die Fähigkeit des Lebens vorwegnehmen, sich selber zu erschaffen. Eines der vielversprechendsten Modelle in dieser Richtung ist die RNA – ein Biomolekül, das Information speichern und gleichzeitig die Polymerisation eines neuen RNA-Moleküls katalysieren kann.

Turing und die Feenkreise



Feenkreise sind auffällige Vegetationsmuster im australischen Outback, die durch *Triodia*-Gräser gebildet werden (Abbildung 3a). Die bis zu vier Meter großen Grasinseln sorgen nach einem der seltenen Regenereignisse für einen nur langsamen Wasserabfluss und bedecken das trockene Land nach einem bestimmten Muster. Die Musterbildung erfolgt dabei nach einem Prinzip, das der britische Mathematiker Alan Turing (Abbildung 3b) 1952 postuliert hat. Es besagt, dass zufällige Störungen und ein „Reaktions-Diffusions“-Mechanismus in bestimmten Systemen ausreichen, um spontan stark gemusterte Strukturen entstehen zu lassen. Vom Leopardenfell bis zu Wolkenstreifen am Himmel wirken hier selbstorganisierende Kräfte: Dazu müssen nur zwei diffusionsfähige Substanzen miteinander wechselwirken. Mit Drohne und Multispektralkamera haben Wissenschaftler untersucht, wie die nur in Australien heimischen *Triodia*-Gräser wachsen [2]. Wie aus den Daten hervorgeht, beruht die Anordnung der australischen Feenkreise auf Rückkopplungen zwischen der Biomasse der Gräser und dem vorhandenen Wasser in den Pflanzeninseln. Damit können komplexe Strukturen und Musterbildungsprozesse wie Sandrippel oder Vegetationsmuster durch Wechselwirkungen von zwei Komponenten auf molekularer Ebene erklärt werden. Auch wenn die genaue Ausprägung der Muster nicht vorhersagbar ist, lässt sich das Prinzip des Musters auf die Selbstorganisation zurückführen.



4.2 Die RNA-Welt

Wer war zuerst da, die Henne oder das Ei? Dieses Dilemma ist im Zusammenhang mit dem Ursprung des Lebens schon oft angesprochen worden. Die Entdeckung von RNA-Molekülen mit katalytischer Funktion, die in einem einzigen Molekül Informationsspeicher und Enzymfunktion vereinen, liefert möglicherweise eine Antwort. Zurzeit favorisieren Wissenschaftler die Hypothese einer RNA-Welt, die der heutigen Welt, in der Informationsspeicher und Katalyse auf DNA und Proteine aufgeteilt sind, vorausging. Ribozyme erfüllen in dieser RNA-Welt eine Vielzahl von Funktionen: Von der Synthese von

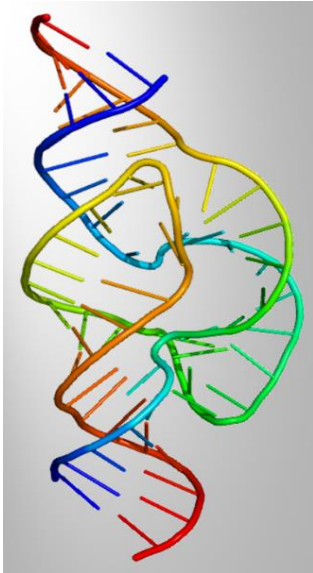


Abb. 4: Das Hammerhai-Ribozym kann RNA gezielt schneiden und wieder zusammensetzen. (Grafik: William G. Scott)

Metaboliten über die Energieumwandlung bis hin zur Selbstreplikation. Noch heute können Ribozyme experimentell dazu gebracht werden, eine große Vielzahl an chemischen Reaktionen zu katalysieren. Die meisten dieser Reaktionen spielen jedoch in modernen Zellen keine Rolle mehr. Die katalytische Kompetenz von Ribozymen war vermutlich auf einem frühen, anoxischen Planeten, der reich an zweiwertigem Eisen (Fe^{2+}) war, größer als heute. Durch das große Oxidationsereignis (Kapitel 5.5), bei dem Sauerstoff in großen Mengen in die Atmosphäre gelangte, wurde Fe^{2+} zu Fe^{3+} oxidiert und stand deshalb nicht mehr für Katalyseprozesse zur Verfügung. Heutige Enzyme nutzen deshalb häufiger das ebenfalls zweiwertige Magnesium-Ion (Mg^{2+}) für die Katalyse. Ribozyme wie das nach dem Raubfischkopf benannte Hammerhai-Ribozym (Abbildung 4), die heute noch grundlegende Reaktionen in Gang setzen, gelten als molekulare Fossilien aus der RNA-Welt. Die Tatsache, dass derartige RNA-Moleküle bei Lebewesen universell verbreitet sind, deutet darauf hin, dass sie schon in der Frühzeit des Lebens entstanden sind.

Wie aber ist der Übergang von der reinen RNA-Welt zur heutigen Welt mit DNA, RNA und Protein erfolgt? Eine viel zitierte Hypothese [5] besagt, dass die katalytische Funktion der Ribozyme zunächst auf Ribonukleoproteine – eine Kombination aus RNA und Proteinen – und schließlich auf proteinbasierte Enzyme übertragen wurde. Andere schlagen vor [6], dass Ribozyme begannen, mit bereits vorhandenen Aminosäuren und Peptiden zu interagieren. Mit der Zeit wurden viele Ribozyme durch andere Moleküle ersetzt und verschwanden, darunter vor allem Ribozyme, die eine Rolle im Stoffwechsel spielten. Ein Ribozym, das überdauert hat und noch immer universell bei allen Lebewesen vorkommt, ist das Ribosom, an dem die Proteine produziert werden.

Die RNA-Welt ist aber nicht die einzige Hypothese, mit Hilfe derer man die Entstehung des Lebens zu erklären versucht. Eine alternative These postuliert, dass zuerst das Peptidyl-Transferase-Zentrum des Ribosoms entstanden ist. An dieser Stelle des Enzyms wird während der Proteinsynthese die bestehende Kette aus Aminosäuren auf die nachrückende tRNA übertragen und somit das wachsende Peptid verlängert. In diesem Szenario hätte eine Kombination aus RNA und Protein am Anfang des Lebens gestanden. Auch der durch die Entdeckung der Archaeen bekannt gewordene Wissenschaftler Carl Woese vermutete, dass RNA und Protein frühzeitig miteinander interagiert haben. Er war auch davon überzeugt, dass das Ribosom und damit die Translation – also die Umwandlung von RNA in Protein – älter ist als Transkription und DNA-Replikation, die beide eine Umschrift von Nukleotiden in Nukleotide darstellen. In diesem Modell förderten die Vorfahren der Polypeptide die chemische Evolution der Polynukleotidvorfahren und umgekehrt: RNA synthetisierte immer Proteine und Proteine synthetisierten immer RNA, wodurch sich eine Ko-Abhängigkeit ergab.

4.3 Eine Händigkeit setzt sich durch

Es fällt immer wieder auf, dass alle Organismen in fundamentalen Fragen des Stoffwechsels die gleichen Prinzipien nutzen. Ob Speicherung und Verarbeitung von genetischer Information, Freisetzung chemischer Energie aus Nährstoffen oder Strahlung – immer werden bewährte Mechanismen verwendet, obwohl prinzipiell auch andere möglich wären. Dasselbe gilt für die räumliche Anordnung der meisten Biomoleküle: Aminosäuren, Zucker und Nukleotide tauchen weltweit nur in einer von zwei möglichen Varianten auf. Dieses Phänomen, das man bei allen Organismen findet, nennt sich Homochiralität (Abbildung 5).



Abb. 5: Das Schlüssel-Schloss-Prinzip sorgt dafür, dass nur zueinander passende Edukte miteinander reagieren können. (Grafik: P. Eitner)

Betrachten wir unsere Hände (*griech. cheiros* = Hand), erkennen wir sofort, dass die beiden zwar fast gleich sind, sich aber nicht ineinander überführen lassen. Sie verhalten sich eher wie Objekt und Spiegelbild – in der Chemie nennt man diese beiden Formen Enantiomere. Chirale Moleküle entstehen, wenn ein zentrales Kohlenstoffatom asymmetrische Bindungspartner hat, die entweder „rechts“ oder „links“ vom Zentralatom angeordnet sind. Enantiomere stimmen in fast allen physikalischen und chemischen Eigenschaften (Molare Masse, Summenformel, Aussehen, Schmelz- und Siedepunkt, allgemeine Reaktivität) überein. Unterschiede finden sich beim Absorptionsverhalten von polarisiertem Licht und bei der Reaktion mit anderen Enantiomeren. Und genauso wie ein linker Handschuh nicht auf eine rechte Hand passt, hängt das Reaktionsvermögen entscheidend davon ab, ob die Enantiomere auf ihre passenden Gegenstücke treffen oder stattdessen auf deren spiegelbildliche Formen.

Dabei gibt es meist keine zwingenden physikalischen oder chemischen Gründe für die grundsätzliche Bevorzugung einer bestimmten räumlichen Anordnung. Biomoleküle lassen sich prinzipiell sowohl mit rechtshändigen (D- oder R-Formen) als auch mit linkshändigen (S- oder L-Formen) Bausteinen herstellen. Woran liegt es aber, dass alle lebenden Zellen nur L-Aminosäuren und D-Zucker enthalten, und dass die DNA immer eine rechtsgängige Doppelhelix ist (Abbildung 6)? Was steckt hinter dieser durchgängigen Bevorzugung einer bestimmten Händigkeit bei Biomolekülen? Gibt es eine Erklärung für diese Homochiralität?

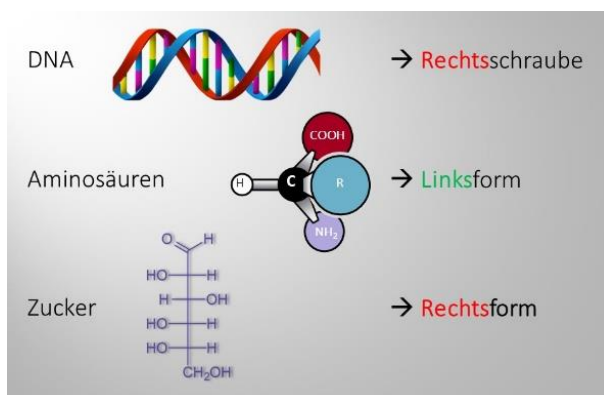


Abb. 6: Viele Biomoleküle kommen in Lebewesen nur mit einer bestimmten Händigkeit vor. (Grafik: P. Eitner)

Wie so oft in der Biologie, könnte die Antwort in der Evolution zu finden sein. Wenn die ersten Zellen zufällig nur aus Biomolekülen einer bestimmten Händigkeit aufgebaut waren, werden sie genau diese Eigenschaft an ihre Nachkommen weitergegeben haben – frei nach dem Motto: „*Never change a winning team*“ („*Stelle niemals eine funktionierende Mannschaft um*“). Möglicherweise konnten sich die ersten Zellvorläufer nur aus bestimmten Enantiomeren zusammensetzen, weil schon damals ein Ungleichgewicht zwischen „Rechts“ und „Links“ bestand [3]. Denkbar ist, dass bestimmte Enantiomere – präbiotisch – schneller entstanden sind als ihre Spiegelbilder. Das setzt

eine Katalyse voraus, die spezifisch die Bildung eines der beiden Enantiomere fördert, was nur funktioniert, wenn der Katalysator selbst asymmetrisch gebaut ist.

Organokatalysatoren als Schlüssel zur Homochiralität?

Schon mehrfach wurde gezeigt, dass sich komplexe organische Moleküle aus einfachen anorganischen Vorstufen herstellen lassen, wie sie in der Uratmosphäre vorhanden gewesen sein mussten. So entstanden aus symmetrischen Molekülen Verbindungen, die eine Händigkeit aufweisen. Ein Ungleichgewicht der Enantiomere könnte auf ebenfalls chiralen Katalysatoren beruhen.

In der Arbeitsgruppe von Prof. Oliver Trapp gehen die Wissenschaftler der Frage nach, welche organischen Katalysatoren diese Voraussetzungen erfüllen und wie sie zur Anreicherung eines Enantiomers führen. Sie stießen dabei auf eine Klasse besonderer Organokatalysatoren, die sich aus einfachen Bausteinen der frühen Erde und unter plausiblen Reaktionsbedingungen – hohe Konzentrationen, moderater Druck, mäßige Temperatur – bilden können (Abbildung 8). Die sogenannten Imidazolidin-4-Thione

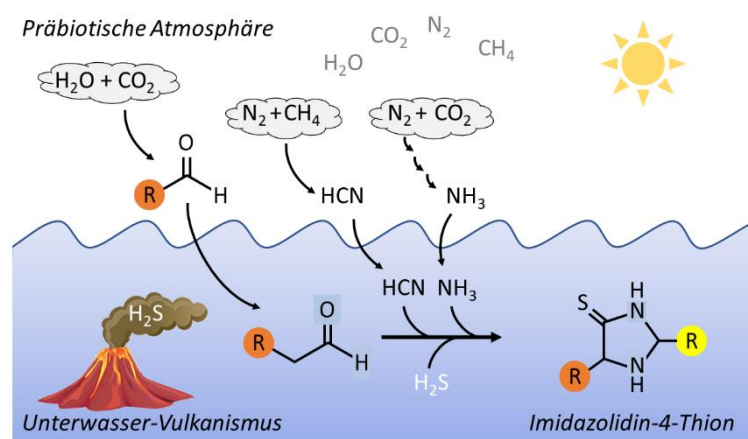


Abb. 7: Organokatalysatoren können aus einfachen Vorstufen entstehen, wie sie auf der frühen Erde vorhanden waren. Die organischen Reste (orange und gelb) hängen von den Aldehyden ab, aus denen sie entstanden sind. (Grafik: P. Eitner, verändert nach Closs et al.)

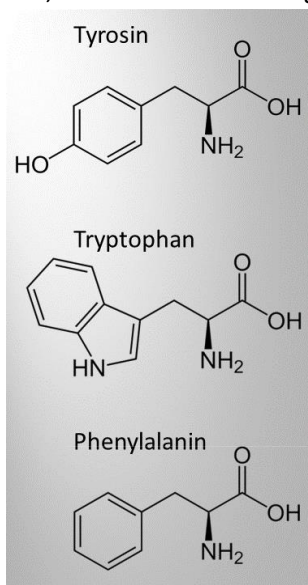
entstehen aus einer Mischung von einfachen Aldehyden und Ketonen in Gegenwart von Ammoniak (NH₃), Cyanid (HCN), und Schwefelwasserstoff (H₂S), wobei ein heteroaromatisches Ringsystem mit einer großen Bandbreite an Alkylresten entsteht. Aufgrund ihres chiralen Charakters fördern Imidazolidin-4-Thione die spezifische Anlagerung von Kohlenwasserstoffketten („Alkylierung“) an andere Aldehyde mit einer bevorzugten räumlichen Anordnung am Produkt, sodass selektiv ein Enantiomer im Überschuss entsteht. Damit zeigen die Wissenschaftler, wie die Homochiralität der Biomoleküle durch asymmetrische Katalysen unter den Bedingungen der frühen Erde entstanden sein könnte.

4.4 Proteine werden zu vielseitigen Werkzeugen

Proteine erfüllen in Zellen vielfältige Aufgaben: Sie sind Biokatalysator, Transporter, Kanal, Botenstoff, Sensor, Strukturgeber, Motor, Genregulator und vieles mehr. Diese Vielseitigkeit hat sich zwar erst mit den Organismen entwickelt, aber am Anfang stand ein Molekültyp mit fast unbegrenztem Potential. Das liegt einerseits an der Vielfalt seiner Bausteine – der Aminosäuren –, aber mehr noch an den Möglichkeiten, unterschiedliche, dreidimensionale Anordnungen zu bilden – mit reaktiven Taschen, beweglichen Elementen oder maßgeschneiderten Oberflächen. Das in der Biologie immer wieder anzutreffende Schlüssel-Schloss-Prinzip beinhaltet auf molekularer Ebene häufig die Wechselwirkung mit einem Eiweiß. Natürliche Eiweiße bestehen aus 20 Aminosäuren (die exotische Aminosäure Selenocystein kommt nur sehr selten dazu), die sich nur durch eine Seitenkette am zentralen Kohlenstoffatom unter-

scheiden. Aber zunächst einmal gibt es keinen zwingenden Grund, aus den vielen tausend Aminosäuren, die sich künstlich herstellen lassen, genau diese 20 (21) für die Proteinsynthese auszuwählen. Die chemischen Eigenschaften der Seitenketten wie Ladung, Größe oder Fettlöslichkeit lassen sich auch mit anderen Varianten erreichen.

Experimente haben außerdem gezeigt, dass nur 7 bis 13 der natürlichen Aminosäuren ausreichen, um eine stabile und funktionelle Proteinfaltung zu erlauben [7]. Wahrscheinlich wurden also nicht alle 20 bekannten Aminosäuren von Anfang an genutzt. Zunächst waren einfache Aminosäuren wie Alanin und Glycin im Einsatz, während komplexe Proteinbausteine mit aromatischen Resten wie Tyrosin und Tryptophan erst sehr spät dazukamen – wahrscheinlich sogar erst einige Zeit nach der Entstehung der ersten Zellen. Darauf deuten Analysen der Enzyme hin, die für die Beladung der jeweiligen tRNA-Moleküle mit Aminosäuren zuständig sind. Die erst spät von Lebewesen genutzten Aminosäuren müssen aber einen zusätzlichen Nutzen gehabt haben, der die Fitness der Zellen verbessert hat. Wie Untersuchungen gezeigt haben, erweisen sich die später aufgetauchten Aminosäuren als viel reaktiver gegenüber Radikalen, die durch Sauerstoff gebildet werden. Damit bieten sie sich für eine Schutzfunktion vor schädlichen



Radikalen an. Tatsächlich wurden insbesondere Tyrosin, Tryptophan und Phenylalanin (Abbildung 8), die einen aromatischen Rest besitzen, zur Grundlage von Verbindungen (z. B. Ubi- und Plastochinon), die die schädlichen Sauerstoffradikale wie sie als Nebenprodukte von Stoffwechselprozessen entstehen, durch Redoxprozesse neutralisieren können. Natürlich mussten diese Aminosäuren bereits vor ihrem Einbau in Proteine existiert haben – möglicherweise handelte es sich um Nebenprodukt der Synthese der anderen Proteinbausteine. Da deren Abfolge in Form von Basentriplets in den Nukleinsäuren gespeichert ist, muss bei Hinzunahme neuer Aminosäuren der genetische Code erweitert worden sein (Kapitel 5.4). Eine weitere Voraussetzung war, dass die Erweiterung der Proteinbausteine die Funktion des Eiweißes nicht beeinträchtigt hat. Nur so konnten sich Proteine mit den neuen Aminosäuren langfristig durchsetzen.

Abb. 8: Diese Aminosäuren wurden erst spät zu Proteinbausteinen.
(Grafik: P. Eitner)

Bedenkt man, wie wichtig die räumliche Form für die Funktion der Eiweiße ist, stellen sich zu ihrer Evolution neue Fragen. Wie wird sichergestellt, dass sich Proteine, in die eine bestimmte Form auffalten? Kann eine Fehlfaltung repariert werden? Was passiert, wenn das nicht möglich ist? Klar ist, dass man die richtige Faltung der Aminosäurekette nicht dem Zufall überlassen kann. So muss es bei der Evolution funktionierender Proteine zu einem Ausleseprozess gekommen sein, der eine passende Faltung stabilisiert, während eine Fehlfaltung zum schnellen Zerfall des Moleküls geführt haben muss. In lebenden Zellen helfen meist andere Proteine, sogenannte Chaperone, dabei, die richtige Faltung zu erreichen. Oder braucht man dafür doch eine geheimnisvolle „Lebenskraft“ wie sie noch im 18. Jahrhundert von Wissenschaftlern postuliert wurde?

Aktivitäten

Aktivität 1 - Der chemische Garten: Selbstorganisierte Muster werden zu dauerhaften Strukturen.

Hintergrund:

Ein „Chemischer Garten“ ist ein Versuchsansatz, bei dem man Kristalle in einer Natriumsilikatlösung nach oben wachsen lässt. Da sich die Kristalle nach oben hin verästelnd können, ähneln sie optisch einer Pflanze. Der Versuchsansatz enthält zwei verschiedene Lösungen, an deren Grenze sich eine sogenannte „Membran“ bildet. Diese besteht aber nicht aus Lipiden wie eine Zellmembran. Stattdessen handelt es sich lediglich um eine Phasengrenze, die durch Dichte und Zusammensetzung der beiden beteiligten Flüssigkeiten gebildet wird. Außerdem ist die „Membran“ nur für Wasser durchlässig und nicht für Ionen. Tatsächlich ist diese dünne Grenzschicht aber der Ort, an dem die Kristalle wachsen. In der Natur finden sich solche halbdurchlässigen Grenzflächen in einer Reihe von Umgebungen. Weil sie für den Ursprung des Lebens eine besondere Rolle spielen, sind hydrothermale Schloten am Meeresboden die bestuntersuchten Beispiele für chemische Gärten.

Einen „Chemischen Garten“ kann man selber herstellen. Dafür werden große Kristalle von Schwermetallsalzen in eine Natriumsilikatlösung („Wasserglas“) gegeben. Die Metallionen lösen sich am Rand und verbinden sich mit den Silikationen, wonach sie sofort ausfallen. Dabei bilden sie eine gelartige, semipermeable Schicht, die das angelöste Metallsalz einschließt (Abbildung 1a). Nur kleine Wassermoleküle können die Grenzschicht passieren, nicht aber die positiv geladenen Metallionen, die vor allem wegen ihrer Hydrathülle zu sperrig sind. Daher kann nichts von innen nach außen gelangen, aber umgekehrt dringt Wasser nach innen (Abbildung 1b), sodass der Kegel anschwillt. Der sich aufbauende osmotische Druck bewirkt, dass sich die gelartige Grenzschicht aufbläht, bis sie an einer Stelle platzt. Ein Teil der Metallsalzlösung tritt aus und bildet wieder eine Schicht und so weiter (Abbildung 1c). Diese Schicht ist neuer und schwächer, so dass sie bei erneutem Druckanstieg ebenfalls zerbricht und sich der Prozess wiederholt. Die Konzentration der Schwermetallionen ist aufgrund des Wassereinstroms oben besonders klein und unten größer, so dass die Kristalle von unten nach oben wachsen. Weil

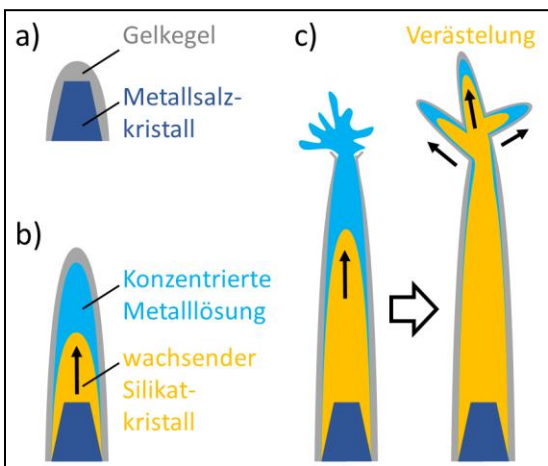


Abb. 1: Entwicklung einer porösen Säule in einer Silikatlösung. a) Ausbildung der gelartigen Grenzschicht. b) Einstrom von Wasser treibt den Kegel nach oben. c) Oben reißt die Grenzschicht auf, woraufhin eine neue Grenzschicht zur Verästelung des Kristalls führt. (Grafik: P. Eitner)

die Dichte der Metalllösung geringer ist als die der äußeren Silikatlösung, streben die Enden des Gelkegels nach oben. So entsteht der Eindruck einer wachsenden Struktur.

Material:

Ausrüstung	Chemikalien
<ul style="list-style-type: none">• Schutzbrille für die Handhabung der Natriumsilikatlösung und Einweghandschuhe (vorzugsweise Nitril)• Becherglas (500 cm³)• Uhrglas• Rührstab aus Glas• Pinzette• Ein Stück Pappe, um das Becherglas abzudecken• Natriumsilikatlösung (Wasserglas) (ÄTZEND)	<ul style="list-style-type: none">• Einige wenige Kristalle einiger Metallsulfate oder -nitrates wie z. B.:• Kobalt(II)nitrat (OXIDIEREND, SCHÄDLICH)• Eisen(III)nitrat (OXIDIEREND, REIZEND)• Magnesiumnitrat (OXIDIEREND)• Mangan(II)sulfat (SCHÄDLICH, UMWELTGEFÄHRDEND)• Heißes entionisiertes Wasser

Durchführung

1. Natriumsilikatlösung (ÄTZEND – Schutzbrille tragen) bis etwa 6 cm Höhe ins Becherglas eingießen.
2. Dieser Lösung heißes entionisiertes Wasser hinzufügen und mit einem Glasstab gut umrühren, bis die Endhöhe etwa 12 cm beträgt.
3. Weiter rühren, bis das Natriumsilikat und das Wasser gründlich vermischt sind und keine separaten Schichten mehr sichtbar sind.
4. Die Mischung ruhen lassen, bis die Flüssigkeit vollständig zum Stillstand gekommen ist.
5. Geben Sie von jedem Metallsalz ein oder zwei Kristalle mit einer Pinzette in die Flüssigkeit. Achten Sie dabei darauf, dass die Kristalle nicht zu dicht beieinander liegen.
6. Decken Sie das Becherglas mit einem Stück Pappe ab und lassen Sie es über Nacht stehen.

Aufgaben

1. Dokumentieren Sie die Kristalle in ihren Formen und Farben durch Abfotografieren. Erklären Sie, wodurch die verschiedenen Kristallfarben zustande kommen.

Die verschiedenen Schwermetalle absorbieren jeweils einen anderen Teil des Lichtes.

2. Äußern Sie eine begründete Vermutung, welches Aussehen die Kristalle in der Internationalen Raumstation (ISS) annehmen würden.

Auf der ISS herrscht Schwerelosigkeit. Wenn aber die Dichteunterschiede zwischen den Lösungen nicht mehr relevant für die Wachstumsrichtung sind, wachsen die Kristalle auch nicht mehr in die Höhe, sondern in alle Richtungen. Die Kristalle werden eine kugelige Form annehmen.

Aktivität 2 - Fertigung eines tRNA-Papiermodells

Hintergrund

Aufgrund ihrer Fähigkeit, gleichzeitig Informationen in einer linearen Sequenz zu speichern (Primärstruktur) und dank ihrer dreidimensionalen Konformation (Sekundär- und Tertiärstruktur) chemische Reaktionen zu katalysieren, gilt RNA als eines der Schlüsselmoleküle bei der Entstehung des Lebens. Die sogenannte Transfer-RNA (tRNA) übernimmt in der Genexpression die Funktion des Adapters, der die Information aus der Boten-RNA (mRNA) in eine Kette aus Proteinbausteinen (Aminosäuren) übersetzt. Auf diese Weise wird eine Sprache mit 4 Buchstaben (Basen) in eine Sprache mit 20 Buchstaben (Aminosäuren) übersetzt. Jedes tRNA-Molekül bindet an seinem Akzeptorarm eine spezifische Aminosäure, erkennt durch die Anticodon-Schleifenregion ein bestimmtes Basen-Triplett aus der mRNA und liefert die gebundene Aminosäure an die wachsende Peptidkette im Ribosom.

Durchführung:



Laden Sie die Datei herunter:

<https://cdn.rcsb.org/pdb101/learn/resources/trna/trna-model.pdf>

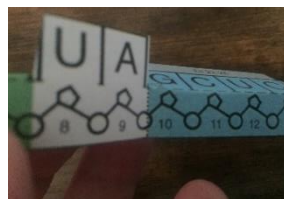
Ein Video mit einer Anleitung zur Faltung des RNA-Papiermodells findet sich auch unter <https://youtu.be/lw41sO1myKw>

(Die Protein-Data-Bank (PDB) ist ein englischsprachiges Online-Portal für Lehrer, Studenten und interessierte Laien, die etwas über Proteine und Nucleinsäuren lernen wollen. Das Kennenlernen der vielfältigen Formen und Funktionen dieser biologischen Makromoleküle hilft zu verstehen, wie die Molekularbiologie Nachbardisziplinen wie Medizin und Landwirtschaft befruchten kann. Nicht ohne Grund unterstützen viele große Forschungsförderungsinstitutionen dieses Online-Portal.)

I. Die Primärstruktur

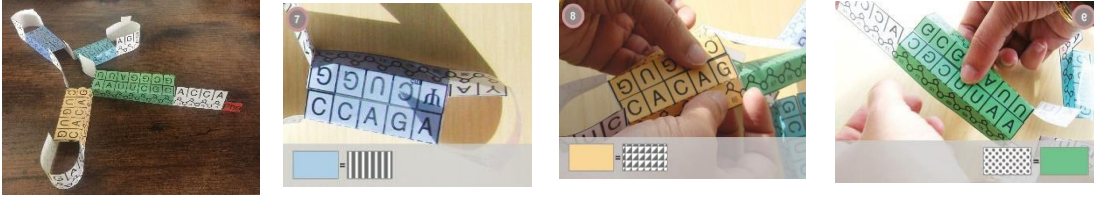


1. Schneiden Sie jedes Stück so aus, dass die grauen Laschen intakt bleiben.
2. Die Stücke werden gemäß der Nukleotid-Nummerierung zu einem langen Streifen zusammengeführt. Die grauen Laschen dienen zum Aneinanderkleben.
3. Machen Sie Schlitze zwischen jeder Doppellinie (16 insgesamt). Achten Sie darauf, nicht durch den gesamten Streifen zu schneiden.



4. An den horizontalen gestrichelten Linien wird die Sequenz zurückgefaltet ("Bergfalte").
5. Auf den kleinen vertikalen gepunkteten Linien wird eingefaltet ("Talfalte").

II. Die Sekundärstruktur



6. Bringen Sie farbige/gemusterte Abschnitte zusammen und kleben Sie sie so ab, dass die graue Lasche ausgeblendet wird. Es ist wichtig, dass Sie die Basen in der folgenden Reihenfolge zusammenfügen:

1: 10-13 mit 25-22 2: 25-31 mit 43-39 3: 49-53 mit 65-61 4: 1-7 mit 72-66

7. Beachten Sie die nahezu perfekte Basenpaarung (G:C und A:U). An diesem Punkt ist das Modell kleblattförmig – es handelt sich um die Sekundärstruktur der tRNA. Jede farbige Region repräsentiert die Regionen mit komplementärer Basenpaarung, die zu einem Doppelstrang führen.

II Die Tertiärstruktur



8. Bringen Sie die Basen G19 und C56 (gelb gefärbt) zu einem Basenpaar zusammen – verbergen Sie die graue Lasche, indem Sie sie mit Klebeband unterkleben. Dies bildet den Anfang der tRNA-Tertiärstruktur – die umgekehrte L-Form.

Weitere Details der Tertiärstruktur der tRNA finden sich unter:
<https://pdb101.rcsb.org/learn/paper-models/trna-activity-page>

Aufgaben

1. Baue das Papiermodell!
2. Benenne die Sequenz des Anticodons in dieser tRNA sowie das dadurch erkannte Codon. Identifiziere außerdem die kodierte Aminosäure.

5'-GAA-3' = 3'-AAG-5' (tRNA), 5'-UUC-3' (mRNA), Phenylalanin (Phe)

3. Beschreibe die Formen, die sich aus der Auffaltung in die Sekundär- und Tertiärstruktur ergeben.

Sekundärstruktur: „Kleblattform“, Tertiärstruktur: „Ellenbogenform“

4. Erklären Sie, welcher Vorgang dafür sorgt, dass eine tRNA ihre dazugehörige Aminosäure bindet.

Es ist das Enzym (Aminoacyl-tRNA-Synthetase), das die richtige tRNA mit der dazugehörigen Aminosäure verbindet.

Literaturquellen

- [1] Gargoud M, López-García P, Montmerle T, Pascal R (2009) *Young Sun. Early Earth and the Origins of Life*, Springer Verlag.
- [2] Getzin S, et al. (2020) Bridging ecology and physics: Australian fairy circles regenerate following model assumptions on ecohydrological feedbacks. *Journal of Ecology*.
<https://doi.org/10.1111/1365-2745.13493>.
- [3] Eitner P (2020). Rechts vor links? Die Händigkeit des Lebens. *Biologie in Unserer Zeit*, 50(2), 110–115. <https://doi.org/10.1002/biuz.202010700>
- [4] Closs AC, Fuks E, Bechtel M, Trapp O (2020) Prebiotically plausible organocatalysts enabling a selective photoredox alpha-alkylation of aldehydes on the early earth, *Chem. Eur. J*, 26 : 10702–10706
- [5] Poole AM, Jeffares DC, Penny D (1998) The path from the RNA world. *J Mol Evol* 46:1–17.
<https://doi.org/10.1007/PL00006275>
- [6] Cech TR (2009). *Crawling Out of the RNA World*. *Cell*. Elsevier B.V.
<https://doi.org/10.1016/j.cell.2009.02.002>
- [7] Granold M, Hajieva P, Tosa MI, Irimie FD, Moosmann B (2018) Modern diversification of the amino acid repertoire driven by oxygen. *Proc nat acad sci US*. 2018; 115 (1): 41-46

Bildnachweis:

Titelseite: Complex organic molecules, known as polycyclic aromatic hydrocarbons NASA/JPL-Caltech/T. Pyle (SSC).