

Der **NACHGEDACHT.** Ursprung der Tiere

**Fossilien und
die Kambrische
Explosion**

Woher kommt die Vielfalt der Lebewesen?

Diese Frage stellen sich Biologen bereits seit langer Zeit. Während die **Begründer** der Biologie als Wissenschaftszweig noch davon ausgingen, dass ein **Schöpfer** Tiere und Pflanzen erschaffen hat, veränderte sich diese Sichtweise mit dem Gründungsvater der modernen Evolutionstheorie.



Schöpfer ...



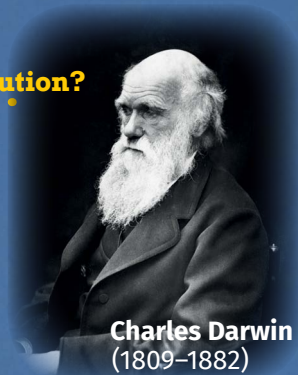
... oder Evolution?

Charles Darwin

entwickelte in der Mitte des 19. Jahrhunderts seine **Selektionstheorie** (Selektion = Auslese). Er ging davon aus, dass Lebewesen, die besser an ihre Umwelt angepasst sind,

mehr Nachkommen hervorbringen konnten und sich deshalb langfristig durchsetzten. Zufällige Änderungen, die im 20. Jahrhundert als **Mutationen** (genetische Erbgutänderungen) bezeichnet wurden, sollen schrittweise kleine Änderungen hervorgebracht haben, die sich anschließend innerhalb einer Art verbreiteten. So haben sich beispielsweise **Rotkehlchen** im Laufe der Zeit immer mehr in ihrem Verhalten an uns Menschen angepasst und sind als sogenannte Kulturfollower besonders erfolgreich.

Auch heute noch ist die **gängigste Vorstellung** in der **Evolutionsbiologie**, dass sich Urahnen der Tiere über viele Jahrmillionen **in kleinen Schritten** verändert haben und so allmählich die heute bekannte Vielfalt an Tiergruppen hervorgebracht wurde.



Charles Darwin
(1809–1882)

Sollte Darwins Vorstellung stimmen,

dann müsste sie sich in den **Fossilien**, d. h. in den versteinerten Lebensformen der Tierwelt, widerspiegeln.

Von zentralem Interesse sind dabei die **ältesten geologischen Schichten**, in denen Fossilien heute **bekannter Tiergruppen** erstmals auftreten. Bis auf sehr wenige Ausnahmen handelt es sich dabei um die Schichten des **Kambriums**. Das Kambrium markiert den Beginn des sogenannten „Erdaltertums“ und liegt in der Regel einige Hundert bis einige Tausend Meter unter den darüberliegenden, jüngeren Schichten. Konventionell werden sie auf 487 bis 539 Millionen Isotopenjahre¹ datiert.

Unterhalb des Kambriums sind zwar ebenfalls Fossilien zu finden, doch dies sind fast ausschließlich Einzeller und meist fremdartige Lebensformen, deren Zugehörigkeit zum Tierreich nicht abschließend geklärt ist. **Das Kambrium ist somit die entscheidende Schicht für die Entstehung der Tiergruppen.**

Die Schichten des Kambriums überliefern fossil erhaltene Lebewesen aus **allen bekannten Tierstämmen**, die **Hartteile** besitzen. Dazu gehören z. B. Gliederfüßer, Weichtiere, Stachelhäuter und auch Chordatiere (darunter als erste Wirbeltiere auch kieferlose Fische). Zudem erscheinen hier bereits **komplexe Organe**, Sinnesorgane und Gliedmaßen mit Gelenken in **vollständig ausgebildeter Form**.²

¹ **Isotopenjahre** werden durch den radioaktiven Zerfall verschiedener Elemente errechnet und sind daher theoretische Jahre, deren reale Dauer aufgrund fehlender Eichung so weit zurück in der Vergangenheit nicht bekannt ist.

Trilobiten sind eine ausgestorbene Klasse meeresbewohnender Gliederfüßer, die häufig als Fossilien aus dem Kambrium erhalten sind.

(Bild: Adobe Stock)

² Einen guten **Überblick** zum wissenschaftlichen Stand zur Kambrischen Explosion bietet: <https://www.wort-und-wissen.org/artikel/zur-neueren-diskussion-ueber-die-kambrische-explosion/>



Einordnung der Lebewesen

Wichtig zu wissen ist, dass **Stämme** im Tierreich die **höchste** Ebene an **Verschiedenartigkeit** im Bauplan der Lebewesen darstellen. So gehören etwa Siebenpunkt-Marienkäfer zum **Stamm** der Gliederfüßer (Arthropoden) und unterscheiden sich damit im grundlegenden Körperbau maximal von beispielsweise Hausmäusen, die zum Stamm der Chordatiere (Unterstamm: Wirbeltiere) zählen. Marienkäfer als Gliederfüßer haben ein Außenskelett aus Chitin, während Mäuse ein Innenskelett haben.

Etwas ähnlicher sind sich Tiere derselben **Klasse**, wie beispielsweise Hausmäuse und Hausschweine, die beide zur Klasse der Säugetiere gehören. Innerhalb derselben **Ordnung** wird die Ähnlichkeit noch größer: Europäischer Biber und Hausmaus gehören zur Ordnung der Nagetiere, aber zu jeweils unterschiedlichen **Familien** – den Bibern bzw. den Langschwanzmäusen.

Innerhalb der Familie der Langschwanzmäuse gibt es verschiedene **Gattungen**, wie etwa die Gattung der Ratten und die Gattung der Mäuse. Innerhalb der Gattung der Mäuse mit rund 40 verschiedenen **Arten** stellt die uns bekannte Hausmaus nur eine einzige Art dar.



Siebenpunkt-Marienkäfer
→ Außenskelett



Schädel einer Hausmaus
→ Innenskelett



Stamm: Chordatiere



Klasse: Säugetiere



Ordnung: Nagetiere



Familie: Langschwanzmäuse



Gattung: Mäuse



Art: Hausmaus

Fossile Hinweise für die Evolution?

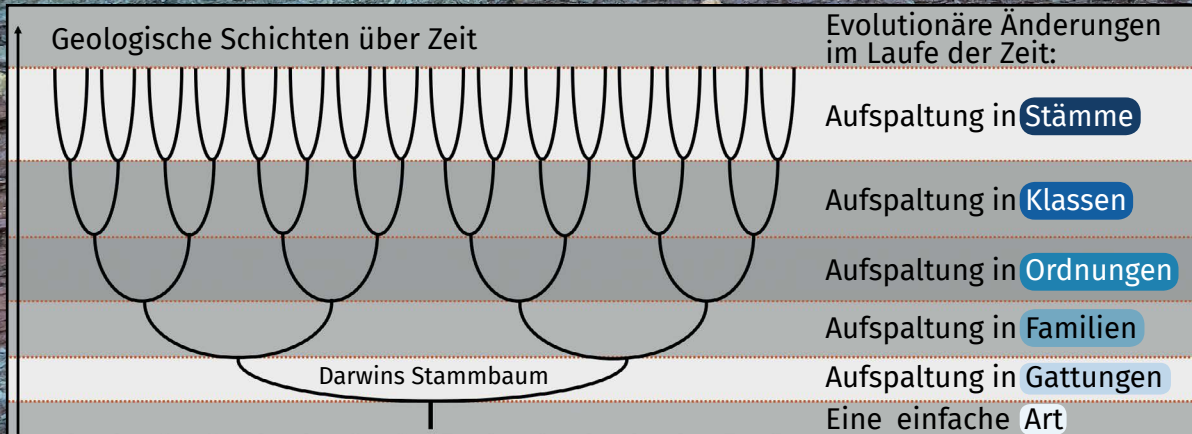
Was wäre nun typischerweise die Erwartung an die Fossilien, wenn **schrittweise Evolution** stattgefunden hätte?

In den geologischen Schichten sollte man **zuerst Fossilien** einer einfachen Art finden, die sich **im Laufe der Zeit** in vielen kleinen Schritten zunächst in verschiedene Gattungen, dann in Familien, später Ordnungen, schließlich Klassen und schlussendlich in Stämme **aufgespaltet** hat.

Da die **Bauplanunterschiede umso größer** werden, je **höher die systematische Ebene** ist, müsste der Prozess auf höheren Ebenen entsprechend **mehr Zeit** in Anspruch nehmen. So sollte sich die Aufspaltung in verschiedene Gattungen deutlich schneller vollziehen als die Aufspaltung in verschiedene Stämme.

Zwischen diesen verschiedenen Gruppen sollten sich zudem **Übergangsformen** oder Bindeglieder finden lassen, welche die jeweiligen Gruppen durch kleine evolutionäre Änderungen miteinander verbinden.

Darwins Erwartungen bezüglich der Evolution im Tierreich können wie folgt illustriert werden:



Die Fossilüberlieferung weicht aber deutlich von Darwins Erwartungen ab, wie wir auf den nächsten Seiten sehen werden.

Die Fossilüberlieferung zeigt das evolutionär erwartete Bild gerade nicht!

Im **Kambrium** treten plötzlich viele verschiedene Tierstämme auf – und damit Lebewesen mit völlig unterschiedlichen Körperbauplänen – die fossil **nahezu gleichzeitig** in Erscheinung treten. Auch **Charles Darwin** kannte bereits Teile dieser Fossilüberlieferung aus dem Kambrium. Er fragte daher:

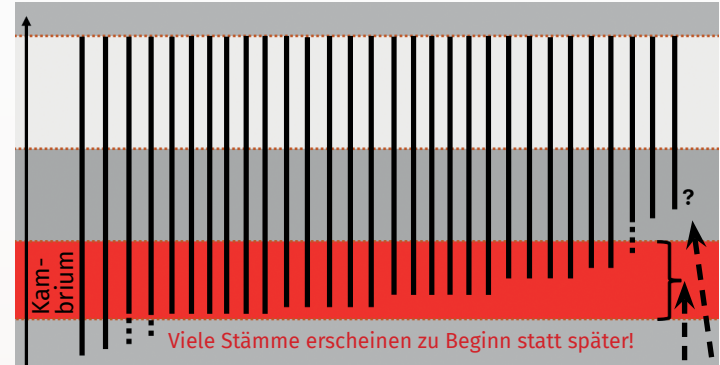
„Wenn Arten aus anderen Arten durch unmerkbar kleine Abstufungen entstanden sind, **warum sehen wir nicht überall unzählige Übergangsformen?** Warum bietet nicht die ganze Natur ein Mischmasch von Formen statt der wohl begrenzt scheinenden Arten dar?“

(Darwin 1860,
https://de.wikisource.org/wiki/Entstehung_der_Arten/Sechstes_Kapitel)



Doch welche Ergebnisse hat die Forschung seitdem geliefert? Sind mehr Übergangsformen aufgetaucht, oder hat sich das geologisch abrupte Auftreten der Fossilien im Kambrium seitdem sogar noch verschärft?

Tatsächliches Erscheinen der verschiedenartigen Fossilien im Tierreich:



Die Grafik orientiert sich an:
Erwin DH (2020) The origin of animal body plans: a view from fossil evidence and the regulatory genome. Development 147 (4): dev182899, <https://doi.org/10.1242/dev.182899>

Aufspaltung in ca. 25 **Stämme** allein im **Kambrium**; darunter max. 2 bis 4 mögliche Vorläufer

Danach treten keine neuen fossilen Tierstämme mehr auf – mit Ausnahme von ein bis drei Fällen im Ordovizium.

Bis heute sprechen Wissenschaftler wie Erwin & Valentine (2013) von einer „**Kambrischen Explosion**“, weil Tierstämme und Tierklassen – die erst- bzw. zweithöchste Ebene im Tierreich – aus evolutionärer Sicht „**explosiv**“ und **abrupt** innerhalb weniger Millionen Isotopenjahre erschienen. Die zentrale Phase der Kambrischen Explosion dauerte dabei nur etwa **5 bis 10 Millionen Isotopenjahre**. In dieser kurzen Zeitspanne traten viele verschiedene Stämme und Klassen auf (vgl. Ohno 1996; Carroll 2000; Valentine et al. 1999; Valentine 2002; Bell 1997; Vavouri & Lehner 2009).

Typische fossile, wirbellose Tiere des Kambriums:

Pirania

Anomalocaris

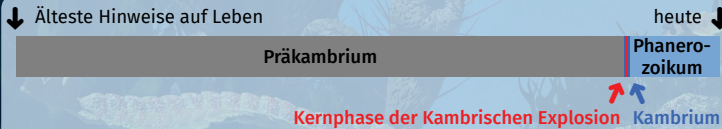
Opabinia

Dinomischus

Hallucigenia

Bild: Adobe Stock

Evolutionäre Zeitleiste:



Um die Zeitverhältnisse einzuordnen: **5 bis 10 Millionen Isotopenjahre** in der Hauptphase der Kambrischen Explosion entsprechen lediglich etwa **0,1 bis 0,2 Promille** der fossilen Geschichte des Lebens gemäß den Vorstellungen der Evolutionsbiologen! Normalerweise würde sich in einem solchen geologischen Zeitraum aus einer Ursprungsform höchstens eine geringe Zahl neuer Arten abspalten – aber keinesfalls Dutzende Klassen oder gar Stämme.

Insgesamt treten im Kambrium **alle Tierstämme** mit Hartteilen auf. Von den 19 der 33 bekannten Tierstämme mit nur Weichteilen treten allein 15 im kambrischen Fundgebiet „Burgess Schiefer“ in Kanada auf!

Zu den im **Kambrium vertretenen Tierstämmen** gehören z. B. Schwämme (Porifera), Hohltiere (Coelenterata), Ringelwürmer (Annelida), Armfüßer (Brachiopoda), Gliederfüßer (Arthropoda), Weichtiere (Mollusca), Stachelhäuter (Echinodermata) und auch Chordatiere.

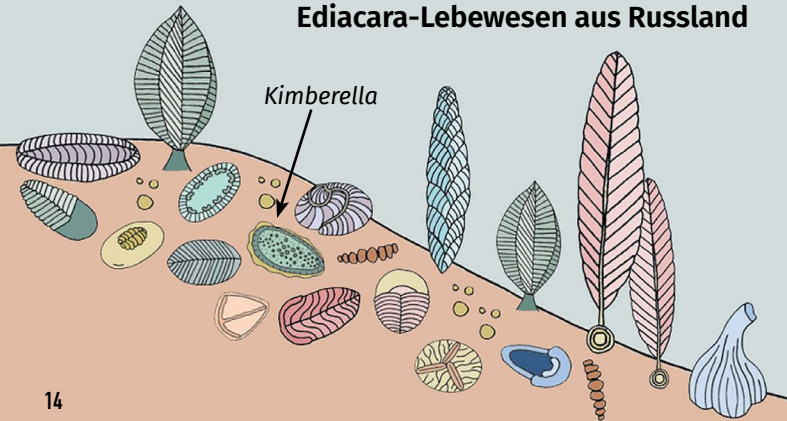
Fossil erscheinen im Kambrium **extrem vielfältige Ökosysteme** in komplexer Form plötzlich – und enden ebenso abrupt. Bemerkenswert ist, dass all diese Tierstämme zu Beginn ihres fossilen Auftretens meist in verschiedene, deutlich abgrenzbare Untergruppen (Klassen) aufgespalten und geographisch meist weit verbreitet waren (Cooper & Fortey 1998, 152). **Auch das spricht gegen die Erwartungen der Evolutionsbiologie.**

1 Briggs DEG (2015) The Cambrian explosion. Current Biology 25: 19, <https://doi.org/10.1016/j.cub.2015.04.047>.

Ältere Formen des Präkambriums repräsentieren eigene Baupläne und **eignen sich** daher – von wenigen möglichen Ausnahmen abgesehen – **kaum als evolutionäre Vorläufer**. Auch Evolutionsbiologen räumen dies ein:

- „Es gibt **kaum** Fossilien, welche auf **Verbindungen** zwischen den Stämmen hinweisen“ (Fortey et al. 1996, 23).
- „Organismen mit den charakteristischen Bauplänen, die wir von den heute lebenden Stämmen kennen, erscheinen **abrupt** im Fossilbericht, viele von ihnen in einem engen geologischen Zeitfenster von vielleicht 5 bis 10 Millionen Jahren. ... **Keiner** dieser Stämme kann über fossile Zwischenformen zu einer Vorläufergruppe **zurückverfolgt** werden“ (Valentine 2004, 37).
- „Insgesamt implizieren die kambrischen Fossilien eine **Explosion** von Bauplänen, die zugrundeliegenden **Ursachen** bleiben jedoch **unsicher**“ (Valentine 2004, 194).

Ediacara-Lebewesen aus Russland



- „Innerhalb von 15 Millionen Jahren des Erscheinens der [modernen] ... Gruppen der Tierstämme mit Hartteilen als wesentlichem Bestandteil sind mindestens **80 % der Skelett-Designelemente**, die unter heutigen und ausgestorbenen marinen Vielzellern bekannt sind, **genutzt worden**“ (Thomas et al. 2000, 1239).

Auch die rätselhaften Lebewesen der **Ediacara-Fauna**, die unterhalb des Kambriums auftreten, liefern so gut wie keine evolutionär passenden **Bindeglieder**.

- Die vermeintliche **Zuordnung von Ediacara-Fossilien** zu heute lebenden Tierstämmen ist „**fantasiereich**“ (Erwin & Valentine 2013, 128).
- „Die evolutionären **Beziehungen** zwischen **Ediacara-Gruppen** und kambrischen Tieren bleiben **unklar**“ (Xiao 2008).
- Es „sind nur wenige **vorkambrische Fossilien** erhalten, die aber von der gegenwärtigen Natur so sehr abweichen, dass uns eine **Interpretation schwer** fällt. ... Dagegen können die **kambrischen Tiere** in aller Regel sehr wohl den **heute lebenden Stämmen** zugeordnet werden“ (Zrzavý et al. 2009, 210).
- „Obwohl das **Ediacarium** voller organischer Formen ist, ist es bemerkenswerterweise **schwach** bestückt **mit tierischen Vorfahren**; außer den Schwämmen konnte nur *Kimberella* eine breite Akzeptanz als Vielzeller erreichen, möglicherweise als weichtier-artiger Vielzeller“ (Peterson et al. 2009, 737).

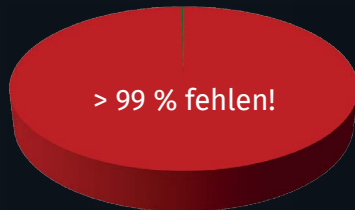
Nach Eden R, Manica A & Mitchell EG (2022) Metacommunity analyses show an increase in ecological specialisation throughout the Ediacaran period. *PLoS Biol* 20(5): e3001289. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.3001289>. CC BY 4.0. Wikimedia

Gibt es ausreichende Erklärungen von Evolutionsbiologen für dieses Phänomen?

Auch viele heutige Evolutionsbiologen sind sich bewusst, dass die **Kambrische Explosion** ein schwerwiegendes **Argument gegen eine natürliche und vor allem schrittweise Evolution** der Lebewesen darstellt. Daher wurden **drei Gegenargumente** entwickelt.

1 Wissenschaftler argumentieren oft, die Erhaltungsbedingungen seien im Kambrium schlecht gewesen. Dieses Argument ist aber nicht haltbar, da von verschiedenen Orten weltweit erstaunlich detaillierte, zum Teil mikroskopisch auswertbare Fossilien im Kambrium und oberen Präkambrium vorliegen. Dieses Argument überzeugt also nicht. Auch der Verweis auf einen angeblich generell sehr unvollständigen Fossilbericht hilft nicht weiter: Wären heutige evolutionäre Modelle korrekt, müsste die Fossilüberlieferung in Bezug auf die erwarteten Arten zu **99 % bis sogar 99,997 % unvollständig** sein!¹ Die Daten stützen dies allerdings nicht annähernd. Es ist auch nicht zu erwarten, dass sich entsprechende Befunde um Größenordnungen ändern werden. Kurzum: **Die fossilen Daten passen nicht zu den Erwartungen der Evolutionsbiologen.**

¹ Vgl. <https://genesis-net.de/x-erdgeschichte/1-7/lueckenhafte-fossilueberlieferung/>



2 Evolutionsbiologen verweisen oft darauf, dass sich im Laufe des Kambriums verschiedene geologische oder ökologische Lebensbedingungen verändert hätten, die Vorteile für evolutionär neu erworbene Eigenschaften bereitgestellt hätten. Das Problem an hypothetischen geologischen und ökologischen Auslösern ist, dass sie nicht erklären, wie sich eine neue und funktionale Struktur (wie ein neues Organ, z. B. ein Auge) überhaupt erst entwickeln konnte. Schließlich hat ein Lebewesen erst dann einen Überlebensvorteil von einer neuen Struktur, wenn diese **schon funktioniert**. Ein rein potenzieller zukünftiger Nutzen ist nichts, was bei aktuell und völlig zufällig wirkenden Naturprozessen bzw. Evolutionsfaktoren (wie Selektion und Mutation) irgendeine Rolle spielt. **In die Zukunft planen und vorausschauend hilfreiche Anpassungen bereitstellen kann hingegen nur ein intelligenter Schöpfer.**

fossiler Trilobit



3 Weiterhin behaupten manche Evolutionsbiologen, dass durch Neuverschaltungen von bereits vorhandenen Genen plötzlich neue komplexe Strukturen und Organe entstehen könnten – statt in kleinen Schritten. Diese Behauptungen sind jedoch rein spekulativ.

Experimentell konnte bisher nicht gezeigt werden, dass auf diese Weise tatsächlich neue Bauplanelemente entstehen. Zudem funktionieren Gene in der Regel auch nicht als eigenständige Einheiten, sondern sind meist in komplexen Gen-Regulations-Netzwerken miteinander verschaltet. Zufällige Neuverschaltungen an solch komplexen Gennetzwerken führen daher erwartungsgemäß eher zu schweren Schädigungen. Wie dieser Mechanismus im Detail funktionieren könnte, wurde bislang nicht überzeugend vorgeschlagen. Der Genetiker John F. McDonald (1983, 92f) bezeichnet das Problem bereits als

„Das Große Darwin’sche Paradoxon“:

Geringfügige Änderungen sind zwar selektierbar (bringen einen Überlebensvorteil), ermöglichen jedoch nicht die Entstehung völlig neuer Baupläne.

Symbolbild der DNA (des Erbguts)



Pikaia gracilens aus dem mittleren Kambrium (ca. 510 Millionen Isotopenjahre) gilt als ein früher Vertreter der Chordatiere (Tiere mit einem von einem Achsenstab ausgehenden Innenskelett). Allerdings bleibt die Frage: **Wie können solche neuen Baupläne von selbst entstehen?**

Auch Darwin (1876) räumt offen ein:

„Auf die Frage, warum wir keine reichen fossilen Ablagerungen finden, die zu diesen angenommenen frühesten Perioden vor dem kambrischen System gehören, kann ich keine befriedigende Antwort geben.“



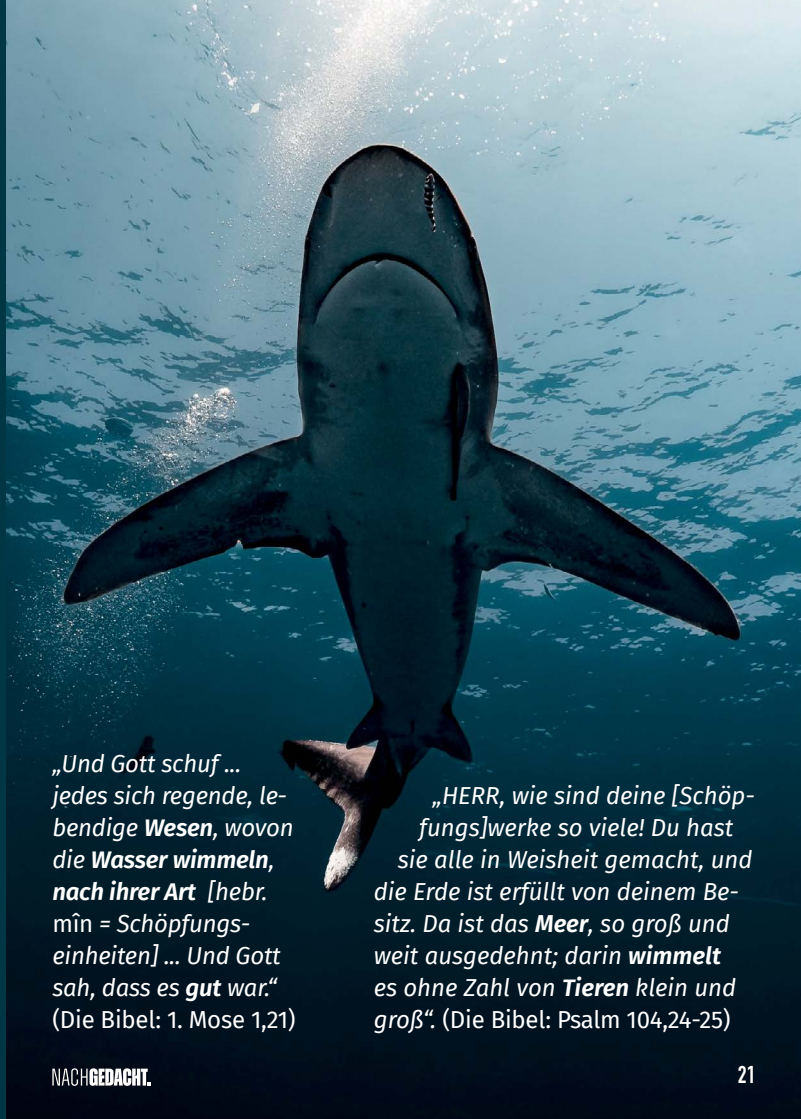
Bilder: Adobe Stock &
KI-Bild von C. Darwin

Kurzum: Die Kambrische Explosion

zeigt bis heute, dass viele Tierstämme und Tierklassen mit völlig unterschiedlichen Bauplänen „**plötzlich**“ und ohne erkennbare Vorläufer im Fossilbericht erscheinen. Bislang sind keine evoluti-onären Erklärungen oder Mechanismen in Sicht, die dieses Problem aus Sicht des Darwinismus zufriedenstellend klären könnten. Im Gegenteil: **Je weiter die Forschung voranschreitet, umso mehr erhärtet sich der Befund, dass eine rein natürliche Erklärung zur Herkunft der Vielfalt des Lebens nicht in Aussicht ist.**

Es gibt jedoch eine logische und naheliegende **alternative Erklärung**: Die Vielfalt der Tiere ist nicht das Ergebnis zufälliger, zukunftsblinder Naturprozesse, sondern **das Werk eines unglaublich intelligenten Schöpfers**. Geniale Designmerkmale, wie etwa hochauflösende **Augen** bereits bei Gliederfüßern wie den Trilobiten im Kambrium (vgl. Schoenemann et al. 2017), sprechen dafür, dass dieser Schöpfer nicht nur über gewaltige Weisheit verfügt, sondern auch ein besonderes Interesse an seinen Geschöpfen hat.

Doch die Naturwissenschaft allein reicht nicht aus, um zu erkennen, **wer** dieser Schöpfergott genau ist. Dafür braucht es eine direkte **Offenbarung** Gottes selbst, wie sie uns **in der Bibel** begegnet. Dort wird Gottes Schöpfung von Meerestieren an vielen Stellen eindrucksvoll beschrieben.



„Und Gott schuf ... jedes sich regende, lebendige **Wesen**, wovon die **Wasser wimmeln**, **nach ihrer Art** [hebr. mîn = Schöpfungseinheiten] ... Und Gott sah, dass es **gut** war.“ (Die Bibel: 1. Mose 1,21)

„**HERR**, wie sind deine [Schöpfung]werke so viele! Du hast sie alle in Weisheit gemacht, und die Erde ist erfüllt von deinem Besitz. Da ist das **Meer**, so groß und weit ausgedehnt; darin **wimmelt** es ohne Zahl von **Tieren** klein und groß“. (Die Bibel: Psalm 104,24-25)

Unsere Verantwortung vor dem Schöpfer

Allerdings macht die Bibel auch deutlich, dass wir Menschen als Geschöpfe Gottes eine besondere **Verantwortung** Gott gegenüber tragen:

*„Was ist der **Mensch**, dass du an ihn gedenkst, und der Sohn des Menschen, dass du auf ihn achtest? ... Du hast ihn zum **Herrscher** über die Werke deiner Hände gemacht; alles hast du unter seine Füße gelegt: Schafe und Rinder allesamt, dazu auch die Tiere des Feldes; die Vögel des Himmels und **die Fische im Meer**, alles, was die Pfade der Meere durchzieht.“* (Die Bibel: Psalm 8,5-9)

Wenn Gott also auf alle seine Geschöpfe achtet – insbesondere auf uns Menschen – und möchte, dass wir **verantwortungsvoll** und gut miteinander und mit der Schöpfung umgehen, dann bedeutet das auch:

Gott ist nicht nur **Schöpfer**, sondern auch **Richter** seiner Geschöpfe.



Diese Erkenntnis lädt uns dazu ein, in der **Bibel nachzuforschen**, welchen **Rettungsweg** Gott für uns bereit hält. Die Bibel spricht offen davon, dass wir unserer Verantwortung Gott und Mitmenschen gegenüber nicht gerecht werden, weil wir lieber eigene Wege gehen – was sie **Sünde** nennt. Dies führt auch zu Schuld, für die wir Vergebung brauchen.

Gott hat uns in unserer Gottesferne und mit unserem „Müll“ – unserer Sünde – nicht allein gelassen. Er hat sich entschieden, in **Jesus Christus** vor 2000 Jahren selbst auf die Erde zu kommen. Er lebte ein gutes, sündenfreies Leben. Daher konnte er als einziger geeigneter Stellvertreter **unsere Sünde an unserer Stelle tragen**, als er am **Kreuz** vor den Toren Jerusalems dafür starb. Am dritten Tag ist er **auferstanden** und hat damit den einzigen Ausweg aus Sünde und ewiger Trennung von Gott (= Hölle) ermöglicht. Seitdem gibt es ein Angebot für alle Menschen: **Wer seine Sünden vor Gott bekennt und daran glaubt, dass Jesus sie am Kreuz bezahlt hat, und wer Jesus nachfolgt, für den ist der Weg in den Himmel frei:**

*„Wenn du mit deinem Mund **Jesus als den Herrn bekennst** und in deinem Herzen glaubst, dass Gott ihn aus den Toten **auferweckt hat**, so wirst du gerettet.“*

(Die Bibel: Römer 10,9)



Fragen, auch kritische Anfragen, können Sie per E-Mail an uns richten über sg@wort-und-wissen.org
Weitere **Informationsmaterialien** können hier bestellt werden:
www.wort-und-wissen.org und www.ajh-info.de

NACHGEDACHT.

Wenn Sie Fragen haben oder mehr über den christlichen Glauben erfahren möchten, können Sie uns hier erreichen:

Die **Studiengemeinschaft Wort und Wissen** befasst sich mit Grundlagenforschung und Bildungsarbeit im Spannungsfeld „Naturwissenschaft und christlicher Glaube“.

Webseite: www.wort-und-wissen.org

W Studiengemeinschaft
W **WORD UND WISSEN** e.V.

Peter-Stein-Straße 4
D-72250 Freudenstadt
Telefon (07441) 5202705

Email: sg@wort-und-wissen.org

Autoren: Tobias Willert (Studium Medienkommunikation), Dr. Reinhard Junker (Studium Biologie, Mathematik & Theologie), Christopher D. Scholl (Studium Medieninformatik) und Benjamin Scholl (Studium Biologie & Sozialkunde)

Aktion: In jedes Haus e.V. ist eine Arbeitsgemeinschaft von Christen unterschiedlicher Gemeinden, die mit verschiedenen Medienangeboten zu Jesus Christus einladen.

Aktion: In jedes Haus

Telegrafienstraße 25
D-42477 Radevormwald
Telefon (02195) 9156-0
www.ajh-info.de

Literaturangaben

- Bell MA (1997) Origin of the metazoan phyla: Cambrian explosion or proterozoic slow burn. *Trends Ecol. Evol.* 12, 1–2.
- Carroll RL (2000) Towards a new evolutionary synthesis. *Trends Ecol. Evol.* 15, 27–32.
- Cooper A & Fortey R (1998) Evolutionary explosions and the phylogenetic fuse. *Trends Ecol. Evol.* 13, 151–156.
- Darwin CR (1876) *The origin of Species by Means of Natural Selection* (6. Aufl.), S. 286.
- Erwin DH & Valentine JW (2013) The Cambrian explosion. The construction of animal biodiversity. Greenwood Village, Colorado.
- Fortey RA, Briggs DEG & Wills MA (1996) The Cambrian evolutionary 'explosion': decoupling cladogenesis from morphological disparity. *Biol. J. Linn. Soc.* 57, 13–33.
- McDonald JF (1983) The molecular basis of adaptation: a critical review of relevant ideas and observations. *Annu. Rev. Ecol. Syst.* 14, 77–102.
- Ohno S (1996) The notion of the Cambrian pananimalia genome. *PNAS* 93, 8475–8478.
- Peterson KJ, Dietrich MR & McPeck MA (2009) MicroRNAs and metazoan macroevolution: insights into canalization, complexity, and the Cambrian explosion. *BioEssays* 31, 736–747.
- Schoenemann B, Pärnaste H & Clarkson ENK (2017) Structure and function of a compound eye, more than half a billion years old. *PNAS* 114, 13489–13494.
- Thomas RDK, Shearman RM & Stewart GW (2000) Evolutionary exploitation of design options by the first animals with hard skeletons. *Science* 288, 1239–1242.
- Valentine JW, Jablonski D & Erwin DH (1999) Fossils, molecules and embryos: new perspectives on the Cambrian explosion. *Development* 126, 851–859.
- Valentine JW (2002) Prelude to the Cambrian explosion. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* 30, 285–306.
- Valentine JW (2004) On the origin of phyla. Chicago and London.
- Vavouri T & Lehner B (2009) Conserved noncoding elements and the evolution of animal body plans. *BioEssays* 31, 727–735.
- Xiao S (2008) Rise and demise of ghostly animals. *Science* 319, 1618–1619.
- Zrzavý J, Storch D & Mihulka S (2009) *Evolution. Ein Lese-Lehrbuch*. Heidelberg.