

WISSEN

TECHNIK · FORSCHUNG · UMWELT · MENSCH

ZAHL DES TAGES

80

Prozent der Prozesse, an denen Künstliche Intelligenz beteiligt ist, müssen von Menschen überwacht werden. Damit die Maschinen das Richtige lernen. Warum sollte es bei Maschinen anders sein als beim Menschen?

Der hohe Sauerstoffgehalt in der Atmosphäre revolutionierte das Leben. Zuerst freigesetzt haben das Atemgas die Cyanobakterien. Sie ruinierten sich dabei fast selber. *Von Christian Gruber*

Das Landleben begann mit den Pflanzen. Vorher war die Erde wüst und leer – aber nur aus menschlicher Sicht. In den Ozeanen wimmelten vor 2,4 Milliarden Jahren zahllose Einzeller herum. Darunter Cyanobakterien, Blaualgen, die gelernt hatten, das Licht der Sonne zu nutzen und daraus Energie zu gewinnen. Die Begrünung der Kontinente ist dagegen gerade einmal 450 bis 500 Millionen Jahre alt. Beinahe 90 Prozent der Evolution fand nicht über dem Wasser statt, sondern unter der Oberfläche.

Das Verdauungsgas, das die Cyanobakterien in die Atmosphäre entließen, war Gift für die anderen Mitbewohner auf dem Planeten: Sauerstoff.

Eine halbe Ewigkeit lang passierte so gut wie nichts auf dem Planeten – die langweilige Milliarde.

Denn das Leben vor der Photosynthese war an eine Kohlendioxid-Stickstoff-Atmosphäre angepasst oder kam mit Methan- und Schwefelschloten bestens zurecht.

Aber der Sauerstoff tat auch den Cyanobakterien selber nicht wirklich gut, sagt eine neue Theorie. Ungefähr zwei Milliarden Jahre lang stieg nämlich der Sauerstoffgehalt auf dem Planeten nicht über 2 Prozent. Die „langweilige Milliarde“, hat die Forschung diese Epoche getauft, in der scheinbar nichts groß passierte. Erst als die Pflanzen die Kontinente zu erobern begannen, reicherte sich die Luft sehr schnell mit dem für die Tierwelt atembaren Gas an und erreichte schließlich seine heutigen 21 Prozent.

Erklärungen, warum es in der Atmosphäre so lange einen Stillstand gab, der auch das höhere Leben ausbremste, hat die Wissenschaft einige hervorgebracht. Eine davon ist, dass Elemente wie Eisen oder Schwefel den Sauerstoff der Einzeller kontinuierlich aufsaugten bis gesättigte Verbindungen entstanden waren.

Eine andere besagt, den Cyanobakterien fehlte es an wichtigen Spurenelementen, sodass ihr Stoffwechsel auf Sparflamme fuhr und sie sich nicht beliebig vermehren konnten, was die Sauerstoffherstellung begrenzte. Und eine dritte Theorie nimmt an, dass frühe, einfache Meerestiere erst die dichten Einzellermatten im Ozean abweiden mussten, damit mehr Licht in die Tiefe fiel und die Blaualgen aktiver werden konnten.

Zwar mögen derartige Einflüsse in einzelnen Meeresregionen und in bestimmten Phasen der Erdgeschichte eine Rolle gespielt haben, räumen die Biologen John Allen, Brenda Thake und William Martin ein. Aber im planetaren Maßstab wären solche Faktoren nicht entscheidend gewesen. Fehl-

Licht und Luft schaden dem Stoffwechsel, wenn man ein Einzeller ist, der Stickstoff braucht.

lende Spurenelemente etwa wie das enzymatisch wichtige Schwermetall Molybdän hätten zwar den Ausstoß jedes einzelnen Bakteriums begrenzt, aber auf die Dauer nicht die Sauerstoffkonzentration in der Luft.

Weil außerdem Wasser im Überfluss zur Verfügung stand, aus dem die Einzeller Kohlendioxid destillieren konnten, um Photosynthese zu betreiben, haben der Düsseldorfer Universitätsprofessor Martin und seine beiden britischen Kollegen nach einem anderen plausiblen Grund für die langweilige Milliarde gesucht.

Und ihn gefunden: Die Cyanobakterien blockierten sich mit ihrem Sau-



Und die Erde war wüst und leer

erstoffausstoß selbst, weil das freierwerdende Atemgas ein wichtiges Enzym außer Gefecht setzte, das die Einzeller für seine Herstellung brauchten, schreiben die Forscher im Fachblatt „Trends in Plant Science“. Der Fluch der guten Tat, um es mal im Namen aller Nachgeborenen zu sagen.

Der metallhaltige Enzymkomplex, den die Cyanobakterien für die Sauerstoffherstellung benutzen, heißt Nitrogenase. Er verändert den Stickstoff, der normalerweise als dickfelliger, lustloser, atomarer Zwilling N₂ daherkommt. Dank des Enzyms kann der Stoffwechsel mit dem Stickstoff arbeiten. Der ganze Vorgang nennt sich Stickstofffixierung.

„Aus Laboruntersuchungen von Cyanobakterien wissen wir, dass die Nitrogenase ab einem zweiprozentigen Sauerstoffgehalt nicht mehr arbeitet, da sie vom Sauerstoff zerstört wird“, erklärt Brenda Thake von der Londoner Queen Mary University. Und genau das sei in der Frühzeit des Lebens passiert, meinen die drei Wissenschaftler. Während die verschiedenen Einzeller im Lauf der Jahrmillarden insgesamt sechs Wege gefunden hätten, um sich mit lebenswichtigem Kohlenstoff zu versorgen, gebe

es beim Stickstoff genau eine Möglichkeit, nämlich die Nitrogenase. Sie sei ohne Alternative, argumentieren die Biologen. Es spreche also sehr viel dafür, dass die Sauerstoffunverträglichkeit des Enzyms die Ursache für die langweilige Milliarde war.

Inzwischen haben die Cyanobakterien das Problem im Griff: Moderne Arten setzen zum Beispiel auf spezialisierte Zellen, Heterocysten, in denen nur der Teil der Photosynthese abläuft, der noch keinen Sauerstoff produziert. Der andere Teil ist abgeschaltet. In diesem abgeschotteten Bereich kann Stickstoff verarbeitet werden, ohne dass das den Enzymen der Nitrogenase schadet.

Die Überreste solcher Spezialzellen finden sich aber erst in Gesteinsformationen ab dem Devon, dem Erdzeitalter, das vor ungefähr 419 Millionen Jahren begann, gibt das deutsch-britische Team zu bedenken. In dieser Epoche hatten die Pflanzen bereits angefangen, die Kontinente zu besiedeln und gigantische Mengen Sauerstoff freizusetzen, der sich schnell in der Atmosphäre und im Wasser anreicherte.

Insofern seien die Spezialzellen ein nachträglicher Schutzmechanismus

△ ZEITZEUGEN
Die Reste der ersten Siedler auf der Erde haben sich bis heute erhalten: als Stromatolithen (im Vordergrund). Diese Gesteine sind entstanden, als im Wasser lebende Mikroorganismen Sedimentpartikel einfingen und banden oder bei ihren Stoffwechselaktivitäten und während des Wachstums gelöste Stoffe herausholten.

FOTO: IMAGO-IMAGES/LEEMAGE

der Cyanobakterien gegen die hohen Sauerstoffgehalte jenseits der für sie gerade noch bewältigbaren 2 Prozent. Das ermöglichte es den Mikroorganismen trotz der grünen Vorherrschaft auf dem Planeten weiterhin Stickstoff auch bei Tageslicht zu gewinnen.

Dass die Spezialzellen tatsächlich erst eine spätere Erfindung der Evolution sind, darauf deutet auch eine vor Kurzem erschienene Untersuchung der Universität Kiel hin.

Aufrecht stehende Landpflanzen baden nicht wie Cyanobakterien im Wasser. Sie sind also nicht ständig der direkten Einwirkung derjenigen Flüssigkeit ausgesetzt, in der sie ihre Verdauungsreste abgeben und aus der sie sich gleichzeitig mit Nährstoffen versorgen. Das macht Pflanzen immun gegen die langweilige Milliarde. Die grüne Arbeitsteilung auf festem Boden trennt die Stickstoffgewinnung, die sauerstoffgeschützt in den Wurzeln passiert, vom Gasaustausch, der in den Blättern abläuft.

„Unsere Theorie ist die einzige, die die globalen Auswirkungen auf die Produktion von Sauerstoff über einen so langen Zeitraum berücksichtigt“, bekräftigt William Martin. „Und die

erklärt, warum es gelungen ist, das Sauerstoffniveau zu erreichen, das wir heute sehen und das die Evolution des Lebens auf der Erde befeuert.“

An Land im Licht und an der Luft wurden dann die Karten ohnehin noch einmal neu gemischt. Bakterien und Pflanzen begannen zusammenzuarbeiten und jeder machte das, was er am besten konnte: Das Grünzeug stellte über die Photosynthese Zucker her und gab einen Teil davon an seine Untermieter ab, die sich dafür um den Stickstoff kümmerten.

Ein besonders erfolgreiches Modell des gemeinsamen Wirtschaftens betreiben die Leguminosen, zu denen die Futtererbse, die Ackerbohne, der Klee oder die Lupine gehören. Sie leben in Symbiose mit verschiedenen Knöllchenbakterien, den Rhizobien, die an ihren Wurzeln wohnen.

Die Knöllchenbakterien können den Stickstoff aus der Luft binden und ihn in lösliche, für die Pflanzen verwertbare Nitrat- oder Ammoniumverbindungen umwandeln. Anders als bei anderen Nutzpflanzen muss man deshalb Hülsenfrüchte nicht mit Stickstoff düngen. Weshalb sie früher sehr häufig als Bodenverbesserer gepflanzt wurden.