

Mikrobe des Jahres 2021

Methanothermobacter – bedeutungsvoll für Wasser, Energie, Klima

HARALD ENGELHARDT
MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR BIOCHEMIE, MARTINSRIED

Methanogenic microbes live secretly in a kind of “parallel universe”, without light and oxygen. We can approach these microbes only by scientific means, but they are already of practical value for us and could – if we do not take care of efficient climate protection – even be of noticeable impact for our future world.

DOI: 10.1007/s12268-021-1529-1
© Der Autor 2021

■ *Methanothermobacter*, die Mikrobe des Jahres 2021, gehört zu den Methanogenen, die einfache Kohlenstoffverbindungen zu Methan (CH_4) umwandeln und daraus ihre Stoffwechselenergie beziehen. Dazu benötigt *Methanothermobacter* lediglich Wasserstoff (H_2), CO_2 , etwa 200 Gene und eine sauerstofffreie (anaerobe) Umgebung [1]. Um auch den letzten für sie giftigen O_2 -Molekülen zu entgehen, entwickelten die Methanogenen eigens ein leistungsfähiges Enzym, das O_2 zu H_2O entschärft (F_{420}H_2 -Oxidase) [2].

In den Anfängen des Lebens auf der Erde vor etwa 3,8 Milliarden Jahren lebten archaische Mikroben in einer O_2 -freien Welt. Diese Archaeen, von denen *Methanothermobacter* abstammt, entwickelten Eigenschaften und Stoffwechselvarianten, die sich von jenen des zweiten großen Zweigs der Prokaryoten, den Bakterien, unterscheiden. Erst die Cyanobakterien erwarben die Fähigkeit, über Photosynthese Sauerstoff zu bilden. Er wurde in geochemischen Reaktionen gebunden, ehe vor etwa 2,3 Milliarden Jahren der atmosphä-

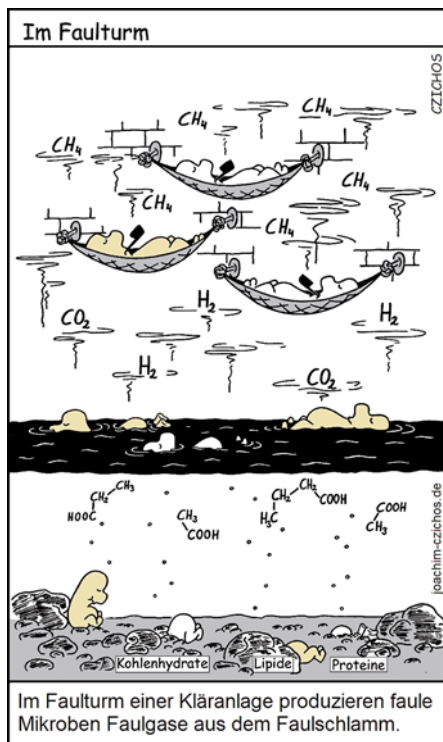
rische O_2 -Gehalt deutlich anstieg. Seitdem überdauern Anaerobier wie die Methanbildner in verbliebenen O_2 -freien Lebensräumen. Heute finden wir methanogene Archaeen in anaeroben Bereichen von Böden, Feuchtgebieten, Sedimenten von Gewässern und Meeren und im Verdauungstrakt von Tieren und Mensch (Abb. 1). *Methanothermobacter* selbst ist wärmeliebend (bei etwa 60°C) und wurde im Faulschlamm von Kläranlagen entdeckt [1].

Sauberes Abwasser dank methanogener Mikroben

Jährlich fallen weltweit etwa 10^3 km^3 Abwasser an – das rund 20fache Volumen des Bodensees. In industrialisierten Ländern gelangt das Abwasser zum großen Teil wieder gereinigt in den Wasserkreislauf zurück und trägt zum Erhalt einer hohen Wasser- und Trinkwasserqualität bei. Abgesehen von mechanischer Säuberung und chemischer Fällung von Phosphaten klären vor allem Mikroorganismen (Bakterien, Archaeen,



▲ Abb. 1: Typische Lebensräume methanbildender Archaeen.



▲ **Abb. 2:** *Methanothermobacter* und Verwandte sorgen vor allem im Faultrum von Kläranlagen für die Reduktion von CO_2 zu Methan, das als Energieträger wiederverwendet wird. Bild: Joachim Czichos, <https://joachim-czichos.de>.

Pilze und Protozoen) unser Abwasser und sorgen für den Abbau organischer Verunreinigungen (Proteine, Lipide, Zuckerverbindungen) zu einfachen Verbindungen. Dies geschieht im Belebtschlammbecken durch aerobe Organismen und anaerob im Klärschlamm von Kläranlagen, die letzte Abbaustufe insbesondere im Faultrum. Hier wandeln *Methanothermobacter* und Verwandte vorwiegend CO_2 mit H_2 zu CH_4 um (**Abb. 2**). Das Faulgas (CH_4 , CO_2 , wenig H_2 und H_2S) wird als Energieträger verwendet und gege-

benenfalls gereinigt, der durch die Vergärung in der Masse reduzierte und entwässerte Faulschlamm verbrannt. Optimierte Stämme von *Methanothermobacter* dienen seit kurzem auch der rückstandsfreien Produktion „grünen“ Methans (Biogas, chemisch wie Erdgas) aus CO_2 und H_2 , das man klimafreundlich aus H_2O gewinnt [1]. Aber auch auf andere Weise werden methanogene Archaeen „gezielt“ eingesetzt. So wirft man etwa in manchen Regionen Afrikas – vermutlich aus praktischer Erfahrung – zur Inbetriebnahme einfacher Kläranlagen ein totes Weidetier in das Klärbecken und beimpft dadurch mit den Anaerobiern des Magen-Darm-Trakts die Anlage.

Einfluss auf das Klima

Methanogene Mikroben kommen weltweit vor (**Abb. 1**), doch mittlerweile sind ihre Habitate stark vom Menschen beeinflusst. Dies ist von Bedeutung, denn methanogene Archaeen geben ihr Stoffwechselprodukt an die Umwelt ab, und Methan ist ein stark wirkendes Treibhausgas. CH_4 -Moleküle nehmen etwa zehnmal so viel Wärmestrahlung in der Atmosphäre auf wie die gleiche Anzahl CO_2 -Moleküle (berechnet über einen Zeitraum von 100 Jahren) und übertragen entsprechend mehr Wärmeenergie (**Tab. 1**).

Die Entwicklungsgeschichte des Lebens auf der Erde hat davon profitiert. Methanbildende Mikroben bestimmten das archaische Klima mit, noch ehe O_2 in die Atmosphäre gelangte. Die damals hohe CH_4 -Konzentration von etwa 0,1 Prozent trug neben CO_2 mit zur Erwärmung der Gashölle bei und verhinderte bei noch nicht voll entwickelter Sonnenstrahlung eine permanente Vereisung der Erde, die sonst die Evolution der Biosphäre beeinträchtigt hätte. Den in der jüngeren Erdgeschichte relativ stabilen Effekt der Klimagase stören allerdings im Zuge der

Industrialisierung und des Wachstums der Weltbevölkerung steigende Emissionen von CO_2 , CH_4 und N_2O . Ihre Konzentrationen sind heute höher als sie in den letzten 650.000 bis 800.000 Jahren jemals waren. So hat sich der Methangehalt unserer Luft seit 100 Jahren etwa verdoppelt, und er steigt weiter an (**Abb. 3**, [3]). Ist dies das alleinige Werk methanbildender Archaeen? Zwei Beispiele vermitteln einen Einblick in die Zusammenhänge.

Menschengemacht: Methan aus Reisfeldern und Kuhmägen

Natürliche Süßgewässer geben Methan ab, wenn ihre Sedimente sauerstofffrei werden und sich dort Anaerobier vermehren. Die Emissionen betragen 2001 weltweit etwa $5 \cdot 10^6$ Tonnen Kohlenstoff pro Jahr (**Tab. 2**, [4]). Zur gleichen Zeit entwichen gefluteten Reisfeldern rund $80 \cdot 10^6$ t C/a, also etwa 16-mal so viel. Wiederkäuer kultivieren in ihren spezialisierten Mägen eine hohe Dichte methanbildender Mikroben und entlassen das Gas in die Umwelt. Wildlebende Wiederkäuer produzieren etwa ebenso viel Methan wie Süßgewässer, domestizierte Wiederkäuer wie Nassreisfelder (**Tab. 2**). Die Methanbildung ist jeweils biogen, aber durch menschlichen Einfluss enorm erhöht. Überboten wird sie zudem von der Förderung und Verbrennung fossiler Energieträger.

Die gesteigerte Methanemission (**Abb. 3**) beschäftigt, neben dem CO_2 - und N_2O -Gehalt, zunehmend die Klimaforschung, denn Methan macht inzwischen einen merklichen Teil des von Menschen verursachten Treibhauseffekts aus (**Tab. 1**). Die Forscher treiben dabei Rückkopplungseffekte um, die sie bisher nicht oder nur unzureichend in Klimamodelle aufnehmen können: Wie wirken Methan und andere Klimagase auf die Klimaerwärmung, diese auf die Biogeochemie und

Tab. 1: Relativer Effekt atmosphärischer Klimagase.

Gas	atmosphärischer Anteil (ppm) ¹	global warming potential (GWP) ²	„molares GWP“ ³	Quelle	Anteil am anthropogen verursachten Treibhauseffekt (%) ¹
CO_2	410	1	1	natürlich, anthropogen	≈ 60
CH_4	1,85	28	10	natürlich, anthropogen	≈ 20
N_2O	0,33	265	265	überwiegend anthropogen (Agrarwirtschaft)	6–9
FxCyHz[NS]^4		2–23.500		ausschließlich anthropogen	≈ 10

¹ Daten aus <https://de.wikipedia.org/wiki/Treibhausgas> (30.11.2020)

² Daten aus dem Fifth Assessment Report des IPCC, <https://www.ipcc.ch/working-group/wg1/>, relativ zu CO_2 und bezogen auf 100 Jahre ohne Berücksichtigung von Rückkopplungseffekten; GWP bezieht sich auf die Masse der Gase

³ „GWP“ bezogen auf molare Menge (pro Molekül)

⁴ >75 verschiedene Fluorkohlenwasserstoffe; [NS] einige enthalten Stickstoff und/oder Schwefel; Datenquelle siehe ²

Tab. 2: Quellen und Senken von Methan (Daten aus [4]).

Natürliche Quellen	10 ⁶ t/a ¹	anthropogene Quellen	10 ⁶ t/a ¹	Senken	10 ⁶ t/a ¹
Feuchtgebiete	145	Verbrennung fossiler Energieträger	110	Troposphäre (OH) ²	510
Termiten	20	Nassreisböden	80	Stratosphäre (OH*, O*, Cl) ²	40
Methanhydrat	10	domestizierte Wiederkäuer	80	methanotrophe Mikroben	30
Ozeane	5	Verbrennung von Biomasse	40		
Süßgewässer	5	Deponien	40		
wilde Wiederkäuer	5	tierische Ausscheidungen	30		
		kommunale Klärschlämme	25		

¹ geschätzte mittlere Beträge

² Chemische Umwandlungen führen zu begrenzter Verweildauer des Methans in der Atmosphäre.

Ökologie von Böden und Gewässern und mit welchen Konsequenzen für die Emission von Methan und anderen Klimagasen? Hier spielen Feuchtgebiete eine bedeutende Rolle – denn sie stellen die weitaus größte natürliche Quelle biogenen Methans. Hinzu kommen die zunehmend tauenden Permafrostböden, in denen Methanhydrat und riesige Vorräte Kohlenstoffs in pflanzlicher Biomasse (ca. $1,3 \cdot 10^{12}$ t C) gespeichert sind [5].

Wie bedrohlich sind tauende Dauerfrostböden?

Die Methanemissionen natürlicher Feuchtgebiete wären kein Problem (sie gibt es ja schon lange), wenn nicht die Trockenlegung von Mooren, der Abbau von Torf und die

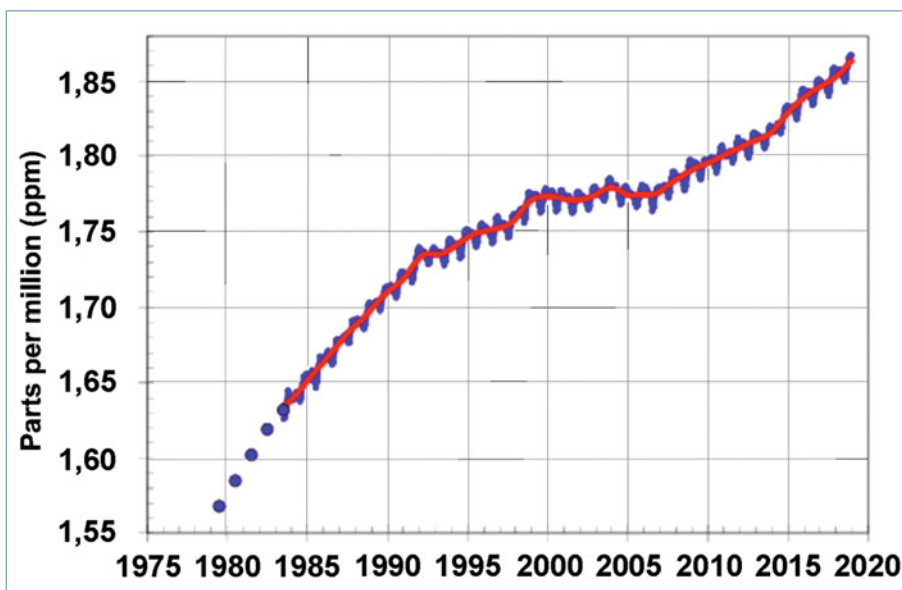
gestörten Wasserstände Einfluss auf die Mikrobengesellschaften nehmen und die fortschreitende Erderwärmung die mikrobiellen Aktivitäten befeuern würden [6, 7]. Sorgen bereitet besonders der tauende Permafrostboden. Modelle, die einen direkten Zusammenhang zwischen Erderwärmung und Methanemission annehmen, kommen zu bedrohlichen Ergebnissen [8]. Doch es zeigt sich, dass die Reaktion der Mikroben im tauenden Permafrost von komplexen Bedingungen abhängt. Eine langjährige Laborstudie mit Permafrostproben ergab eine heterogene Methanentwicklung je nach oxischen Verhältnissen und mit zum Teil jahrelanger Verzögerung [9]. Eine jüngste Untersuchung offenbart, dass nur die anaerobe CO₂-Ent-

wicklung mit dem C- und N-Gehalt des Bodens korreliert, nicht jedoch die CH₄-Abgabe [5]. Sie hängt vielmehr davon ab, ob in dem paläontologischen Zeitalter der Entstehung des Permafrostbodens dort methanogene Archaeen existierten und in welchem Ausmaß sie sich heute wieder im Boden entwickeln können. Die Methanbildung im tauenden Permafrost ist mit einfachen Modellen also nicht nachzubilden, und die derzeit verfügbaren Hochrechnungen vermitteln noch kein realistisches Szenario.

Öffnen wir die Büchse der Pandora?

Methanogene Archaeen könnten zur Klimaerwärmung beitragen; genaue Zusammenhänge muss die Forschung aber noch aufdecken. Allerdings ist die biogene CH₄-Entwicklung nicht ursächlich für das Problem. Erst mit der bereits wirksamen Klimaerwärmung durch anthropogene Eingriffe beginnen die Permafrostböden zu tauen und lassen die im Kälteschlaf eingeschlossenen Mikroben wieder aktiv werden. Die Mikrobe des Jahres 2021 soll deshalb auch darauf aufmerksam machen, dass wir im Begriff sein könnten, mit fortschreitender Klimaerwärmung eine verborgene Büchse der Pandora zu öffnen. Mikroben halten an entscheidenden Stellen den globalen Stoffkreislauf in Gang und im Gleichgewicht; methanogene Archaeen und darunter *Methanothermobacter* zählen dazu. Werden die seit vielen Jahrtausenden ausgewogenen Verhältnisse aber massiv gestört, so reagieren auch Mikroorganismen. Das müssen wir beachten.

Methanothermobacter lebt nicht in der Permafrostregion und wird uns dort keine Probleme bereiten. Vielmehr nützt uns das Archaeon bei der Aufbereitung unseres Abwassers, unterstützt damit die Sicherung unserer Lebensqualität und liefert einen Energiespei-



▲ Abb. 3: Der Methangehalt der Erdatmosphäre in den letzten 40 Jahren. Der Stillstand des Anstiegs zwischen 2000 und 2006 geht vermutlich auf die zunehmende Trockenlegung von Feuchtgebieten zurück. Für den erneuten Anstieg nach 2007 könnte die Gasförderung durch Fracking mitverantwortlich sein. Seit 1880 hat der Methangehalt um fast 20 Prozent zugenommen, seit 1880 um etwa 120 Prozent [3]. (Quelle: www.esrl.noaa.gov/gmd/aggi/aggi.fig2.png (Ausschnitt))

cher, den wir leicht und variabel verwenden können. Das dürfen wir schätzen. ■

Literatur

- [1] Shima S, Thauer R (2021) Methanothermobacter – Biokatalysator für die Energiewende. *BIOspektrum* 1: 14–17 bzw. DOI 10.1007/s12268-021-1530-8
- [2] Engilberge S, Wagner T, Carpentier P et al. (2020) Krypton-derivatization highlights O₂-channeling in a four-electron reducing oxidase. *Chem Comm* 56: 10863–10866
- [3] Hmiel B, Petrenko VV, Dyonisius MN et al. (2020) Preindustrial ¹⁴CH₄ indicates greater anthropogenic fossil CH₄ emissions. *Nature* 578: 409–412
- [4] Crutzen PJ, Lelieveld J (2001) Human impact on atmosphere chemistry. *Annu Rev Earth Planet Sci* 29: 17–45
- [5] Holm S, Walz J, Horn F et al. (2020) Methanogenic response to long-term permafrost thaw is determined by paleoenvironment. *FEMS Microbiol Ecol* 96: fiae021
- [6] Naturschutzbund Deutschland (2012) Klimaschutz natürlich! Die Bedeutung von Mooren für Natur und Klima. www.nabu.de/imperia/md/content/nabude/naturschutz/moorschutz/klimaschutz-nat_rlich.pdf
- [7] Koffi EN, Bergamaschi P, Alkama R et al. (2020) An observation-constrained assessment of the climate sensitivity and future trajectories of wetland methane emissions. *Sci Adv* 6: eaay4444
- [8] Randers J, Golüke U (2020) An earth system model shows self-sustained melting of permafrost even if all man-made GHG emissions stop in 2020. *Sci Rep* 10: 18456

[9] Knoblauch C, Beer C, Liebner S et al. (2018) Methane production as key to the greenhouse gas budget of thawing permafrost. *Nat Climate Change* 8: 309–312

Funding note: Open Access funding enabled and organized by Projekt DEAL.
Open Access: Dieser Artikel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden. Die in diesem Artikel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen. Weitere Details zur Lizenz entnehmen Sie bitte der Lizenzinformation auf <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>.

Korrespondenzadresse:

Dr. Harald Engelhardt
 Max-Planck-Institut für Biochemie
 Am Klopferspitz 18
 D-82152 Martinsried
 engelhar@biochem.mpg.de
<http://mikrobe-des-jahres.de>

AUTOR



Harald Engelhardt

Jahrgang 1950. Biologiestudium und Promotion in Bonn. 1981–1982 Postdoc an der Universität Düsseldorf, ab 1983 am Max-Planck-Institut für Biochemie, Martinsried. Seit 1988 Leiter der Gruppe Mikrobielle Membran- und Zellwandproteine in der Abteilung Molekulare Strukturbiochemie, seit 2020 als wissenschaftlicher Gast.

Hier steht
eine Anzeige.

 Springer