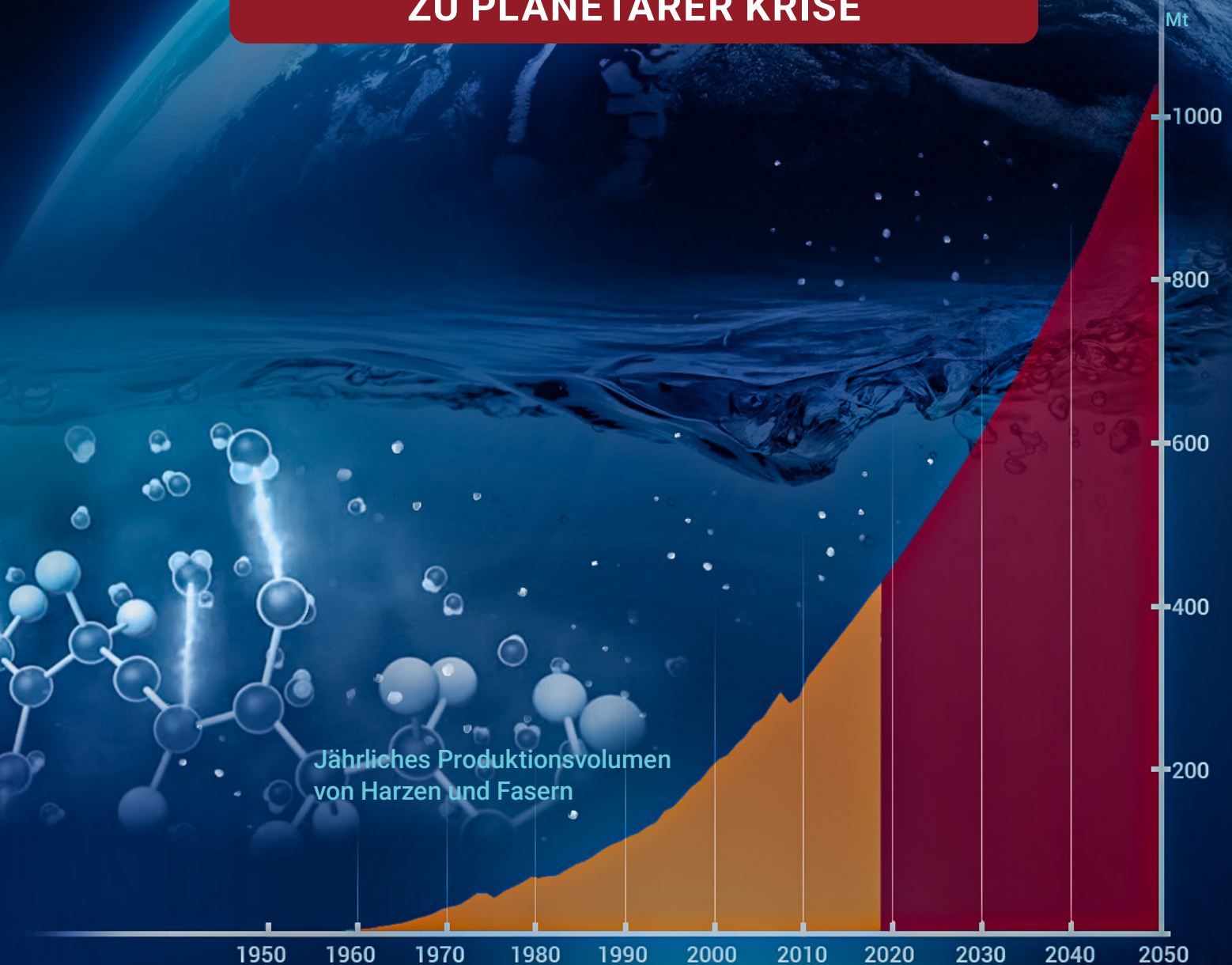


BERICHT

MIKROPLASTIK UND
NANOPLASTIK

NANOPLASTIK IN DER BIOSPHÄRE

VON MOLEKULARER EINWIRKUNG
ZU PLANETARER KRISE



BERICHT

NANOPLASTIK IN DER BIOSPHÄRE

VON MOLEKULARER EINWIRKUNG
ZU PLANETARER KRISE

AUTOREN



Internationale gesellschaftliche Bewegung ALLATRA

AKADEMISCHE KOOPERATION



UNIVERSIDAD
CATÓLICA
BOLIVIANA

Bolivianische Katholische Universität San Pablo (UCB),
Lehrstuhl für Umweltingenieurwissenschaften und wissenschaftliche Forschung



DICYT
Departamento de Investigación,
Ciencia y Tecnología - UAJMS.

Unabhängige Universität Juan Misael Saraceno (UAJMS),
Abteilung für Forschung, Wissenschaft und Technologie

IN ZUSAMMENARBEIT MIT



**CREATIVE
SOCIETY**

internationalem Projekt "Kreative Gesellschaft"

INHALTSVERZEICHNIS

ZUSAMMENFASSUNG	6
DIE FOLGEN DER PLASTIKVERSCHMUTZUNG. MIKRO- UND NANOPLASTIK (MNP) ALS NEUE FAKTOREN DER PLANETARISCHEN KRISE	8
Quantitative Schätzungen und Trends der globalen Produktion von Kunststoffabfällen	8
Großer Pazifischer Müllstrudel	11
Dynamik der Plastikakkumulation im Ozean	12
Entstehungsprozesse von Mikro- und Nanoplastikpartikeln	13
Ausbreitung von Mikro- und Nanoplastik im Ozean	15
Verbreitung von MNP in der Umwelt.....	19
UMWELT- UND KLIMAFOLGEN DER VERSCHMUTZUNG DURCH MIKRO- UND NANOPLASTIK	24
Wie MNP Ökosysteme auf molekularer Ebene zerstört	24
Auswirkungen von MNP auf Bodeneigenschaften und die Erosion von Ökosystemen	24
MNP in Lebensmitteln	27
Wälder als Akkumulatoren von MNP	32
Wie Nanoplastik die Fauna zerstört	32
Übertragung von MNP über die Nahrungsketten vom Plankton zum Menschen	36
Plastik tötet Meeresorganismen	38
Korallen in Gefahr: eine mikroskopische Bedrohung von globalem Ausmaß	41
Auswirkungen von MNP auf die Sauerstoffbilanz der Ökosysteme	43
AUSWIRKUNGEN VON MNP AUF DAS KLIMA	47
Funktionen des Ozeans	47
Veränderung des Temperaturmusters des Ozeans	50
Warum erwärmt sich der Ozean? Hypothese	54
Grundeigenschaften des Wassers	55
Einfluss der Wassereigenschaften auf Klima und Ökosysteme	59
Die Rolle von MNP bei der Veränderung der physikalischen Eigenschaften des Meerwassers	60
Konzentrationszonen von Mikro- und Nanoplastik im Ozean	63
Zusammenhang zwischen der elektrostatischen Ladung von MNP und atmosphärischen Phänomenen	64
Elektrische Ladungen in Wolken	66
Einfluss auf die Wolken- und Niederschlagsbildung	67
Die Rolle des MNP bei der Störung des Klimagleichgewichts des Planeten	69
Interaktion zwischen dem Ozean und dem Erdmagnetfeld	70
AUSWIRKUNGEN VON MIKRO- UND NANOPLASTIK AUF DIE GESUNDHEIT DER MENSCHEN	72
Mikro- und Nanoplastik als neuer Risikofaktor für Epidemien im 21. Jahrhundert	72
Molekulare Mechanismen der Toxizität von MNP. Schädigung von DNA, Mitochondrien und Zellmembranen	73
Beteiligung von MNP an den Mechanismen vorzeitiger Alterung und Onkogenese	85
Destabilisierung des Hormonsystems unter dem Einfluss von MNP	88
Elektrostatische Ladung von Nanoplastik als Schlüsselfaktor für seine erhöhte Toxizität für den Organismus des Menschen	94
Systemische Auswirkungen von MNP auf Organe und Funktionssysteme des Menschen	101
Schäden des Atmungssystems aufgrund des Einatmens von MNP.....	102

Neurotoxische Wirkungen von MNP. Schädigung des zentralen und peripheren Nervensystems	103
Die Rolle von MNP in der Pathogenese von kardiovaskulären Erkrankungen	114
Gastrointestinale Störungen aufgrund von MNP-Belastung	117
Auswirkungen von MNP auf das Immunsystem	119
Kanzerogene Eigenschaften von MNP. Mutationsmechanismen und Metastasenentwicklung	121
Auswirkungen von MNP auf den Kalziumstoffwechsel und die Knochenstruktur	123
Reproduktionsstörungen im Zusammenhang mit MNP-Belastung: Infertilität und erektile Dysfunktion	123
Das Eindringen von MNP durch die Plazentaschranke und seine Auswirkungen auf den sich entwickelnden Organismus	127
Postnatale Auswirkungen von Mikro- und Nanoplastik auf Säuglinge	129
Folgen der Einwirkung von MNP und der Zusammenhang des MNP mit angeborenen Anomalien	131
Schlussfolgerungen und Perspektiven. Ist es möglich, die Auswirkungen von MNP auf die Gesundheit des Menschen zu verringern?	134
ANALYSE AKTUELLER ANSÄTZE ZUR VERRINGERUNG DER PLASTIKVERSCHMUTZUNG	135
Technologien zur Entfernung großer Plastikteile aus aquatischen Ökosystemen	135
Aktuelle Methoden zur Entfernung von Mikro- und Nanoplastik	140
Erforschung der Wirkung des Wasserkochens auf die Entfernung von Mikroplastik: Wirksamkeit und Risiken	141
Pyrolyse als Methode zur Verwertung von Kunststoffen: Effizienz und Risiken	142
ANSÄTZE DER WISSENSCHAFTLICHEN GEMEINSCHAFT ALLATRA ZUR BEKÄMPFUNG DER MIKRO- UND NANOPLASTIK-PANDEMIE	143
Technologie der atmosphärischen Wassergeneratoren für die Säuberung des Ozeans von MNP.....	143
Wiederherstellung von Ökosystemen durch natürliche Filtration und atmosphärische Wassergeneratoren	144
Herausforderungen und Risiken im Zusammenhang mit dem Einsatz von atmosphärischen Wassergeneratoren	148
Innovativer wissenschaftlicher Ansatz zur Verringerung der Toxizität von Mikro- und Nanoplastik	149
FAKTOR X: DIE ROLLE VON MIKRO- UND NANOPLASTIK IN DER DYNAMIK DES ZYKLUS VON NATURKATASTROPHEN	152
Kann Mikro- und Nanoplastik im Ozean ein unerforschter Faktor X sein?	154
Vertikale Verteilung der Temperaturanomalien	154
Erforschung der Wärmequellen am Meeresboden	156
Die Rolle des geothermischen Wärmeflusses, tektonischer Prozesse und Vulkanismus am Meeresboden	157
Kurze Beschreibung des geodynamischen Modells der Klimaveränderung auf der Erde in der gegenwärtigen Zeitperiode	165
SCHLUSSFOLGERUNGEN: NANOPLASTIK IST EINE HERAUSFORDERUNG, DIE NICHT IGNORIERT WERDEN DARF	171
Quellenangaben.....	174

ZUSAMMENFASSUNG

"Wenn die Erde ein Tagebuch führen würde, würde sie mit schwarzer Tinte über das letzte Jahrhundert schreiben: 'Das Zeitalter des Plastiks'."

Von mikroskopisch kleinen Partikeln, die in die Zellen lebender Organismen eindringen, bis hin zu immens großen Müllinseln im Ozean, ist Plastik zu einem integralen Bestandteil der geologischen Chronik des Planeten geworden. Aber zu welchem Preis?

Jedes Jahr fallen weltweit mehr als 400 Millionen Tonnen Plastikabfälle an, von denen schätzungsweise 11 Millionen Tonnen in die Weltmeere gelangen. Bis heute haben sich über 200 Millionen Tonnen in den Ozeanen angesammelt. Die Analyse der Wasserproben aus der oberflächennahen Schicht des Ozeans ergab, dass die Plastikmasse die Masse des Zooplanktons um das Sechsfache übersteigt. Nach den Prognosen wird die Plastikmasse in den Ozeanen bis zum Jahr 2050 die Masse aller Fische übersteigen.

Der Zersetzungsprozess von Plastik dauert Hunderte oder sogar Tausende von Jahren, aber unter dem Einfluss von Wellen, Salzwasser und UV-Strahlen zerfällt es in kleine Partikel – Mikro- und Nanoplastik (MNP). Sie werden mit der Meeresluft und dem Niederschlag Tausende Kilometer weit getragen, durchqueren Länder, Kontinente und Ozeane, reichern sich in Wäldern an und sind in Lebensmitteln und Wasser enthalten. Mikroplastik findet sich sogar an so entlegenen Orten des Planeten wie dem Marianengraben und dem Mount Everest.

Dieser Bericht bietet eine eingehende analytische Bewertung der Einwirkung der Plastikverschmutzung auf die Umwelt, die Gesundheit des Menschen und die Beständigkeit lebenswichtiger Systeme der Gesellschaft. Im Bericht wird die Hypothese vorgestellt, nach der Mikro- und Nanoplastik Veränderungen der Wassereigenschaften bewirken, welche die Erwärmung der Ozeane beschleunigen und Naturkatastrophen verschlimmern könnten. Besonderes Augenmerk wird auf seine Rolle bei der Versauerung der Ozeane, der Destabilisierung der Nahrungsketten und der Bedrohung der biologischen Vielfalt gelegt. Es wird eine Hypothese über den Einfluss von Mikro- und Nanoplastik auf die Veränderung der Wassereigenschaften aufgestellt, was zur beschleunigten Erwärmung des Ozeans sowie zur Zunahme der Naturkatastrophen führt.

Eines der dringendsten und alarmierendsten Themen, die im Bericht angesprochen werden, sind die Einwirkungen von Mikro- und Nanoplastik auf die Gesundheit des Menschen. Plastikpartikel sind aufgrund ihrer geringen Größe in der Lage, biologische Barrieren zu überwinden und oxidativen Stress, DNA-Schäden, Entzündungsreaktionen und zelluläre Dysfunktionen zu verursachen. Besonderes Augenmerk wird auf den möglichen Zusammenhang zwischen der Einwirkung von MNP und der erhöhten Prävalenz von neurodegenerativen und neuropsychiatrischen Erkrankungen gelegt. Der Bericht verdeutlicht, dass die Auswirkungen von MNP auf den sich entwickelnden Organismus während der pränatalen und postnatalen Periode zu Beeinträchtigungen der kognitiven Funktionen und der psychischen Gesundheit führen kann, was für die Zukunft der Menschheit ein ernstes Problem darstellt.

Die Zunahme der durch Mikro- und Nanoplastik verursachten Krankheiten beeinträchtigt die Lebensqualität der Bevölkerung bereits heute deutlich, insbesondere in Regionen mit hoher Plastikverschmutzung.

Im Bericht werden Regionen genannt, die bereits jetzt zu hochgefährdeten Gebieten gehören, sowie diejenigen, die noch relativ sicher sind. Die Verschärfung der Situation in Verbindung mit dem Fehlen wirksamer Schutzmaßnahmen gegen diese Auswirkungen kann dazu führen, dass Menschen auf der Suche nach besseren Lebensbedingungen die durch Plastik verschmutzten Gebiete verlassen. Dies würde die Voraussetzungen für eine unkontrollierte Massenmigration schaffen, die wiederum die sozialen Spannungen erhöhen, die städtische Infrastruktur belasten und die Wirtschaft destabilisieren könnte.

So wird sich das ökologische Problem der Plastikverschmutzung allmählich zu einem makroökonomischen und geopolitischen Problem entwickeln.

Im Bericht wird die Notwendigkeit unterstrichen, sich mit dem Problem des Mikroplastiks zu befassen, sowie eine neue Perspektive auf dessen Verbreitung, Auswirkungen und Folgen geboten. Die Einzigartigkeit der Arbeit liegt in einem interdisziplinären Ansatz, bei dem die Daten über die physikalischen, chemischen und biologischen Aspekte der Plastikverschmutzung im Zusammenhang untersucht werden. Dies macht den Bericht für Forscher und Wissenschaftler einer Vielzahl von Disziplinen relevant, die daran interessiert sind, nachhaltige Lösungen für die sichere Zukunft der Menschheit und des Planeten zu entwickeln.

DIE FOLGEN DER PLASTIKVERSCHMUTZUNG: MIKRO- UND NANOPLASTIK (MNP) ALS NEUE FAKTOREN DER PLANETARISCHEN KRISE

Plastik ist zu einem festen Bestandteil des modernen Lebens geworden. Verpackungen, Geschirr, Kleidung, Schuhe, Hygieneartikel, Medizinprodukte, Verkehrsmittel und Kommunikationsmittel – die meisten Gegenstände, die den Menschen umgeben, sind aus Plastik hergestellt. Es existiert jedoch nicht nur in Form von großen Objekten, sondern auch in Form von mikroskopisch kleinen Partikeln, die von diesen Gegenständen freigesetzt werden – Mikro- und Nanoplastik. Mikroplastik sind Plastikpartikel, die kleiner als 5 mm sind und mit bloßem Auge sichtbar sind. Im Gegensatz dazu hat das Nanoplastik eine Größe von weniger als 1 Mikrometer (einem Millionstel Meter), wodurch die meisten dieser Partikel selbst unter einem Standardmikroskop nicht sichtbar sind.

Es gibt viele Arten von Plastikmaterialien, aber sie alle basieren auf Polymeren – natürlichen oder synthetischen Verbindungen, die aus großen, miteinander verbundenen Molekülen bestehen. Aufgrund ihrer einzigartigen chemischen Eigenschaften zeichnen sich Polymere durch eine hohe Haltbarkeit und Widerstandsfähigkeit gegen Einwirkung aus.

Daher ist Plastik aufgrund seiner Widerstandsfähigkeit, Vielseitigkeit und geringen Kosten zum Hauptmaterial für die Massenproduktion geworden, einschließlich Einwegartikel¹. Doch der falsche Umgang mit Plastikmüll hat Plastik zum umfangreichsten Umweltverschmutzer der Welt gemacht.

Quantitative Schätzungen und Trends der globalen Produktion von Kunststoffabfällen

Seit den 1950er Jahren wurden weltweit etwa 9,2 Milliarden Tonnen Kunststoffe hergestellt. Davon sind derzeit 2,9 Milliarden Tonnen im Umlauf, darunter 2,7 Milliarden Tonnen Primärplastik und etwa 0,2 Milliarden Tonnen recyceltes Material. Etwa 5,3 Milliarden Tonnen sind auf Mülldeponien gelandet, und 1 Milliarde Tonnen wurden verbrannt. Es ist auch bekannt, dass 1,75 bis 2,5 Milliarden Tonnen als "unsachgemäß entsorgt" gelten, was bedeutet, dass sie unkontrolliert in die Umwelt gelangt haben können (Abb. 1).

Bislang wurden den Kunststoffprodukten etwa 640 Millionen Tonnen zusätzliche Chemikalien zugesetzt². Nach Angaben des Umweltprogramms der Vereinten Nationen (UNEP)³, werden weltweit jährlich mehr als 400 Millionen Tonnen Kunststoffabfälle produziert.

¹Karlsruhe Institute of Technology. Blind spots in the monitoring of plastic waste https://www.kit.edu/karlsruhe/pi_2022_097_blind-spots-in-the-monitoring-of-plastic-waste.php (Abgerufen am 01.05.2025)

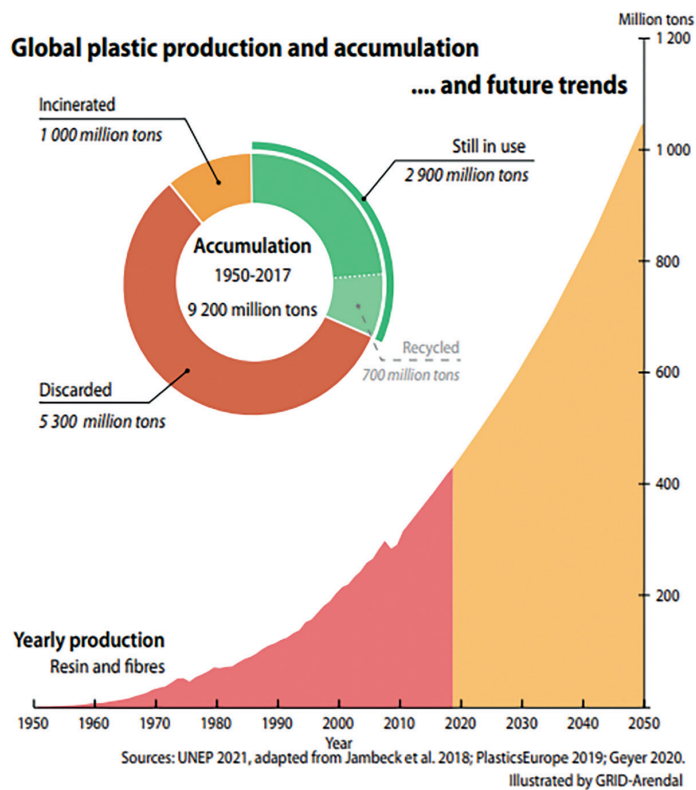


Abbildung 1. Weltweite Kunststoffproduktion, Akkumulation und zukünftige Trends.

Quelle: UNEP 2021, adapted from Jambeck et al. 2018; PlasticsEurope 2019; Geyer 2020. https://malaysia.un.org/sites/default/files/2022-02/POLSOLSum_1.pdf

Nur etwa 9 % der Kunststoffabfälle werden recycelt, 19 % werden verbrannt, und der Rest verbleibt in der Umwelt, u. a. auf Mülldeponien und in den Ozeanen⁴ (Abb. 2).

Disposal Method	Share (Global, 2023)
Recycled	9%
Incinerated	19%
Mismanaged	22%
Landfilled	49%

Abbildung 2. Jährliche Kunststoffabfälle nach Entsorgungsmethode, weltweit, 2000 bis 2023.

Quelle: Our World in Data <https://ourworldindata.org/grapher/plastic-fate>

Jedes Jahr gelangen etwa 11 Millionen Tonnen Plastik in die Weltmeere⁵, was mehr als einem Müllwagen mit Plastikmüll entspricht, der jede Minute in den Ozean gekippt wird.

²Schmidt, C. et al. A multidisciplinary perspective on the role of plastic pollution in the triple planetary crisis. Environment International 193, 109059 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.envint.2024.109059>

³United Nations Environment Programme (UNEP) Beat plastic pollution <https://www.unep.org/interactives/beat-plastic-pollution> (Abgerufen am 01.05.2025)

⁴How Much of the World's Plastic Waste Actually Gets Recycled? <https://www.visualcapitalist.com/how-much-plastic-gets-recycled> (Abgerufen am 01.05.2025)

⁵Jenna R. Jambeck et al., Plastic waste inputs from land into the ocean. Science 347, 768-771 (2015). <https://doi.org/10.1126/science.1260352>

Derzeit haben sich in den Ozeanen über 200 Millionen Tonnen großer Kunststoffabfälle (Makroplastik) und etwa 35 540 Tonnen Mikroplastik angesammelt⁶. Die Schätzungen der jährlichen Kunststoffabfälle, die von Land aus in aquatische Ökosysteme gelangen, variieren je nach Analysemethode. Bei einem "Business-as-usual"-Szenario (BAU) und Fehlen der erforderlichen Maßnahmen können sich die Mengen des Plastikmülls, der in Wasserökosysteme gelangt, fast verdreifachen – von 9-14 Millionen Tonnen im Jahr 2016 auf 23-37 Millionen Tonnen pro Jahr bis 2040.

Nach einer anderen Analysemethode kann sich die Abfallmenge mehr als verdoppeln: von 19-23 Millionen Tonnen im Jahr 2016 auf 53 Millionen Tonnen zum Jahr 2030⁷.

Forschungsergebnissen zufolge wird die Plastikmasse im Ozean bis zum Jahr 2050 bei der Beibehaltung bestehender Trends etwa 12 000 Millionen Tonnen betragen, was im Gewicht mit der gesamten Fischmasse im Ozean (etwa 10 000 Millionen Tonnen) vergleichbar ist⁹.

Je nach Art des Kunststoffs dauert es zwischen 100 und 1 000 Jahren, bis er sich zersetzt (Abb. 3). Im Ozean zersetzt sich Plastik viel langsamer und in den dunklen und kalten Tiefen des Meeres verlangsamt sich sein Abbauprozess noch weiter¹⁰.



⁶Eriksen, M. et al. Plastic Pollution in the World's Oceans: More than 5 Trillion Plastic Pieces Weighing over 250,000 Tons Afloat at Sea. PLoS ONE 9, e111913 (2014). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0111913>

⁷United Nations Environment Programme (2021). From Pollution to Solution: A global assessment of marine litter and plastic pollution. Nairobi. <https://www.unep.org/resources/pollution-solution-global-assessment-marine-litter-and-plastic-pollution> (Abgerufen am 01.05.2025)

⁸Geyer, R., Jambeck, J. R. & Law, K. L. Production, use, and fate of all plastics ever made. Sci. Adv. 3, e1700782 (2017). <https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782>

⁹Irigoin, X. et al. Large mesopelagic fishes biomass and trophic efficiency in the open ocean. Nat Commun 5, 3271 (2014). <https://doi.org/10.1038/ncomms4271>

¹⁰Barnes, D. K. A., Galgani, F., Thompson, R. C. & Barlaz, M. Accumulation and fragmentation of plastic debris in global environments. Phil. Trans. R. Soc. B 364, 1985–1998 (2009). <https://doi.org/10.1098/rstb.2008.0205>

Mit Ausnahme von Materialien, die verbrannt wurden, bleiben alle herkömmlichen Kunststoffe, die jemals in die Umwelt gelangt sind, unzersetzt in Form von ganzen Erzeugnissen oder Fragmenten¹¹. Dieser Müll verschwindet praktisch nicht, sondern sammelt sich weiter an. Die Situation ist vergleichbar mit einer Mülltonne, in die ständig neue Abfälle hineingeworfen, aber nie entfernt werden. Die Frage, was in einem Monat mit einer solchen Tonne passiert, verdeutlicht das Ausmaß des Problems der weltweiten Anhäufung von Plastikmüll.

Großer Pazifischer Müllstrudel

Plastikmüll, der sich in der Wassersäule und an der Oberfläche befindet, wird von den Meeresströmungen erfasst, in die zentralen Regionen des Ozeans getragen und bildet dort große Ansammlungen, die sogenannten "Müllinseln".

Der Great Pacific Garbage Patch stellt die größte Plastikansammlung auf dem Planeten dar und nimmt stetig zu (Abb. 4). Der Great Pacific Garbage Patch erstreckt sich über ein riesiges Gebiet zwischen Nordamerika und Japan. Beobachtungen zeigen, dass er 2018 etwa 1,6 Millionen Quadratkilometer umfasste¹², obwohl dieser Wert variieren kann.



Abbildung 4. Schematische Darstellung der Bildung vom Müllfleck im Pazifischen Ozean.

¹¹Barnes, D. K. A., Galgani, F., Thompson, R. C. & Barlaz, M. Accumulation and fragmentation of plastic debris in global environments. *Phil. Trans. R. Soc. B* 364, 1985–1998 (2009). <https://doi.org/10.1098/rstb.2008.0205>

¹²Lebreton, L., Slat, B., Ferrari, F. et al. Evidence that the Great Pacific Garbage Patch is rapidly accumulating plastic. *Sci Rep* 8, 4666 (2018). <https://doi.org/10.1038/s41598-018-22939-w>

Studien zeigen, dass bis zu 80 Prozent¹³ des Inhalts von Müllflecken aus Plastikmüll besteht¹⁴. Ein Müllfleck enthält mindestens 80 000 Tonnen Müll¹⁵. Dies ist jedoch nur der sichtbare Teil des Problems. Bis zu 94 % des Plastiks, das in den Ozean gelangt, setzt sich auf dem Meeresboden ab¹⁶. Dort kann sich eine erhebliche Menge an Müll ansammeln und unentdeckt bleiben.

Die genaue Größe des Great Pacific Garbage Patch ist nach wie vor unbekannt, da der Nordpazifikwirbel zu groß ist, um mit den derzeitigen technologischen Möglichkeiten umfassend wissenschaftlich untersucht zu werden.

Dynamik der Plastikakkumulation im Ozean

Instrumentelle Messungen zeigen eine exponentielle Zunahme des Volumens des Great Pacific Garbage Patch. Zwischen 2015 und 2022 ist die durchschnittliche Masse des Plastikmülls in dem Gebiet um den Faktor 5 gestiegen¹⁷. Besonders besorgniserregend ist die Tatsache, dass die Zahl der kleinen Plastikfragmente im selben Zeitraum um das Zehnfache gestiegen ist, was auf einen intensiven Fragmentierungsprozess großer Plastikobjekte hindeutet.

Der Great Pacific Garbage Patch bildet faktisch den siebten „Kontinent“ unseres Planeten. Anzumerken ist, dass dieses Phänomen nicht einmalig ist. Derzeit hat die wissenschaftliche Gemeinschaft fünf große Müllansammlungen im Weltozean identifiziert¹⁸: zwei im Atlantik, zwei im Pazifik und eine im Indischen Ozean¹⁹ (Abb. 5).

¹³Derraik, J. G. B. The pollution of the marine environment by plastic debris: a review. *Marine Pollution Bulletin* 44, 842–852 (2002). [https://doi.org/10.1016/S0025-326X\(02\)00220-5](https://doi.org/10.1016/S0025-326X(02)00220-5)

¹⁴Morishige, C., Donohue, M. J., Flint, E., Swenson, C. & Woolaway, C. Factors affecting marine debris deposition at French Frigate Shoals, Northwestern Hawaiian Islands Marine National Monument, 1990–2006. *Marine Pollution Bulletin* 54, 1162–1169 (2007). <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2007.04.014>

¹⁵Lebreton, L., Slat, B., Ferrari, F. et al. Evidence that the Great Pacific Garbage Patch is rapidly accumulating plastic. *Sci Rep* 8, 4666 (2018). <https://doi.org/10.1038/s41598-018-22939-w>

¹⁶Eunomia. Plastics in the Marine Environment. <https://eunomia.eco/reports/plastics-in-the-marine-environment>

¹⁷Lebreton, L. et al. Seven years into the North Pacific garbage patch: legacy plastic fragments rising disproportionately faster than larger floating objects. *Environ. Res. Lett.* 19, 124054 (2024). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ad78ed>

¹⁸Van Sebille, E., England, M. H. & Froyland, G. Origin, dynamics and evolution of ocean garbage patches from observed surface drifters. *Environ. Res. Lett.* 7, 044040 (2012). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/7/4/044040>

¹⁹Garbage Patches. Marine Debris Program. NOAA <https://marinedebris.noaa.gov/discover-marine-debris/garbage-patches> (Abgerufen am 01.05.2025)

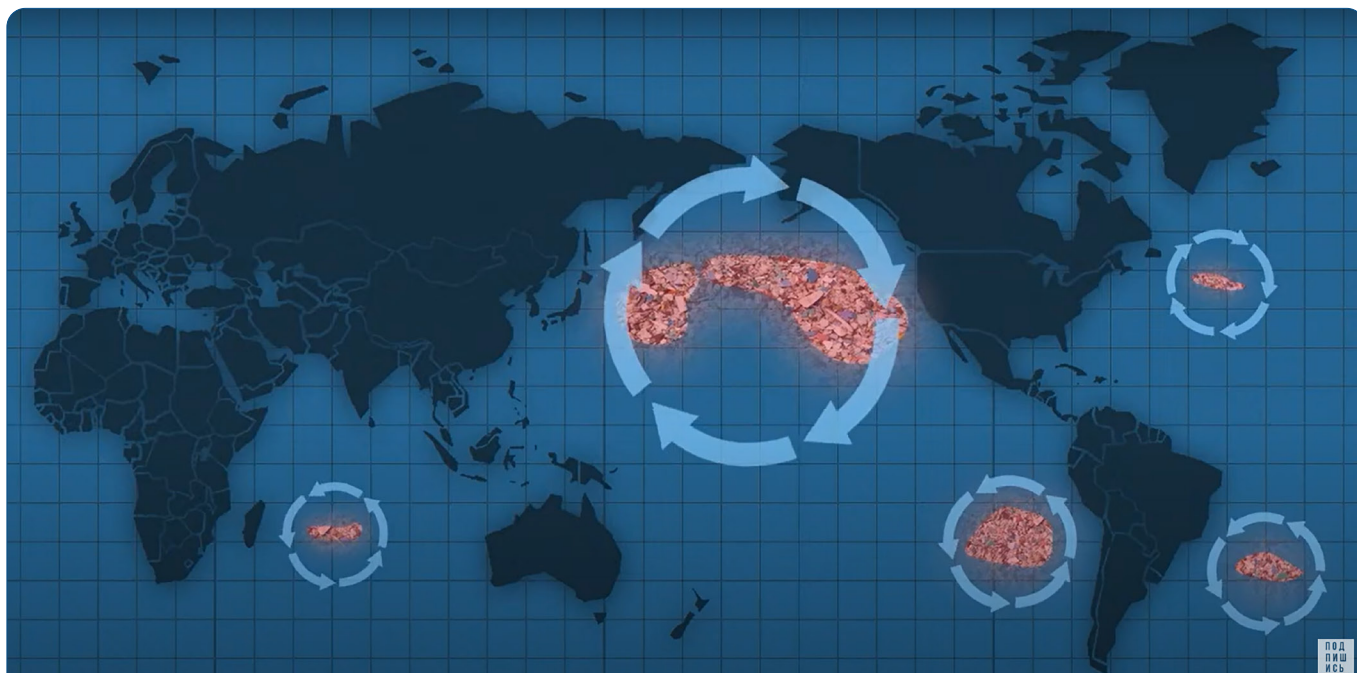


Abbildung 5. Schematische Darstellung von fünf großen Müllansammlungen in den Weltmeeren: zwei im Atlantik, zwei im Pazifik und eine im Indischen Ozean. In den Ozeanen zirkulieren Millionen Tonnen Plastik und andere von Menschen erzeugte Abfälle. Die Müllflecken wachsen in einem katastrophalen Tempo.

Entstehungsprozesse von Mikro- und Nanoplastikpartikeln

Plastikmüll ist sehr widerstandsfähig gegenüber biologischem Abbau, aber wenn er Wellen, Salzwasser und Sonneneinstrahlung ausgesetzt ist, zerfällt er in kleine Partikel – in Mikro- und Nanoplastik²⁰ –, die mit bloßen Auge nicht immer sichtbar sind. Diese Partikel behalten ihre Polymerstruktur bei²¹, und der Zersetzungsprozess setzt sich bis in den Nanobereich fort (Abb. 6-7). Infolgedessen wird Plastikmüll zu einem festen Bestandteil des Ökosystems unseres Planeten.

Darüber hinaus enthält Mikro- und Nanoplastik gefährliche Chemikalien, die während des Herstellungsprozesses von Plastik hinzugesetzt werden.

66

"Man weiß mittlerweile, dass rund 16 000 Chemikalien in Plastik vorkommen. Zu über 4 200 davon ist bekannt, dass sie in der Umwelt langlebig sind, sich in Lebewesen anreichern, über weite Strecken transportiert werden oder ein Gefährdungspotenzial von ihnen ausgeht", sagt Professor Annika Jahnke, Umweltchemikerin am Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung²².

²⁰Yu, R.-S. & Singh, S. Microplastic Pollution: Threats and Impacts on Global Marine Ecosystems. Sustainability 15, 13252 (2023). <https://doi.org/10.3390/su151713252>

²¹Barnes, D. K. A., Galgani, F., Thompson, R. C. & Barlaz, M. Accumulation and fragmentation of plastic debris in global environments. Phil. Trans. R. Soc. B 364, 1985–1998 (2009). <https://doi.org/10.1098/rstb.2008.0205>

²²Helmholtz Centre for Environmental Research - UFZ. Environmental Impacts of Plastics: Moving beyond the perspective on waste. https://www.ufz.de/index.php?en=36336&webc_pm=44/2024 (Abgerufen am 01.05.2025)

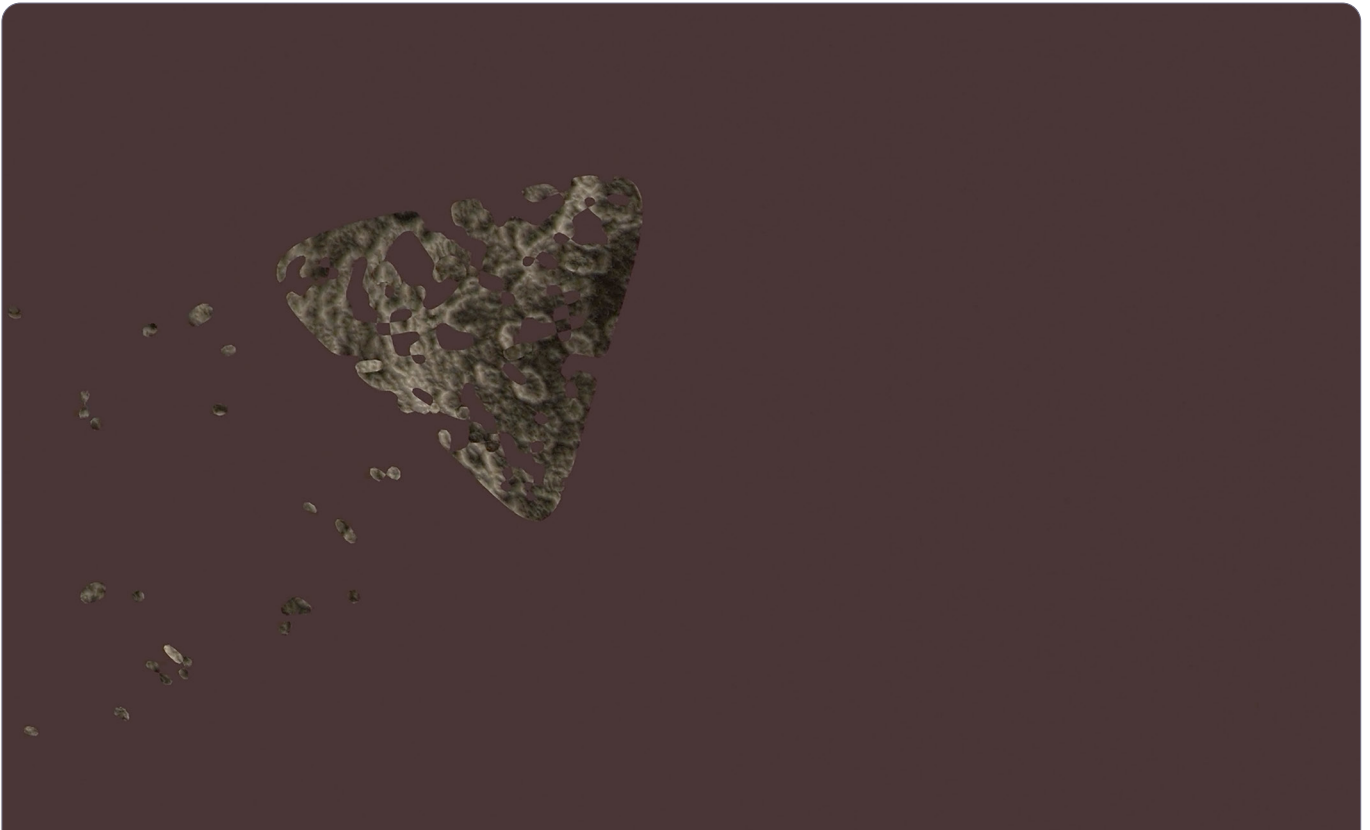
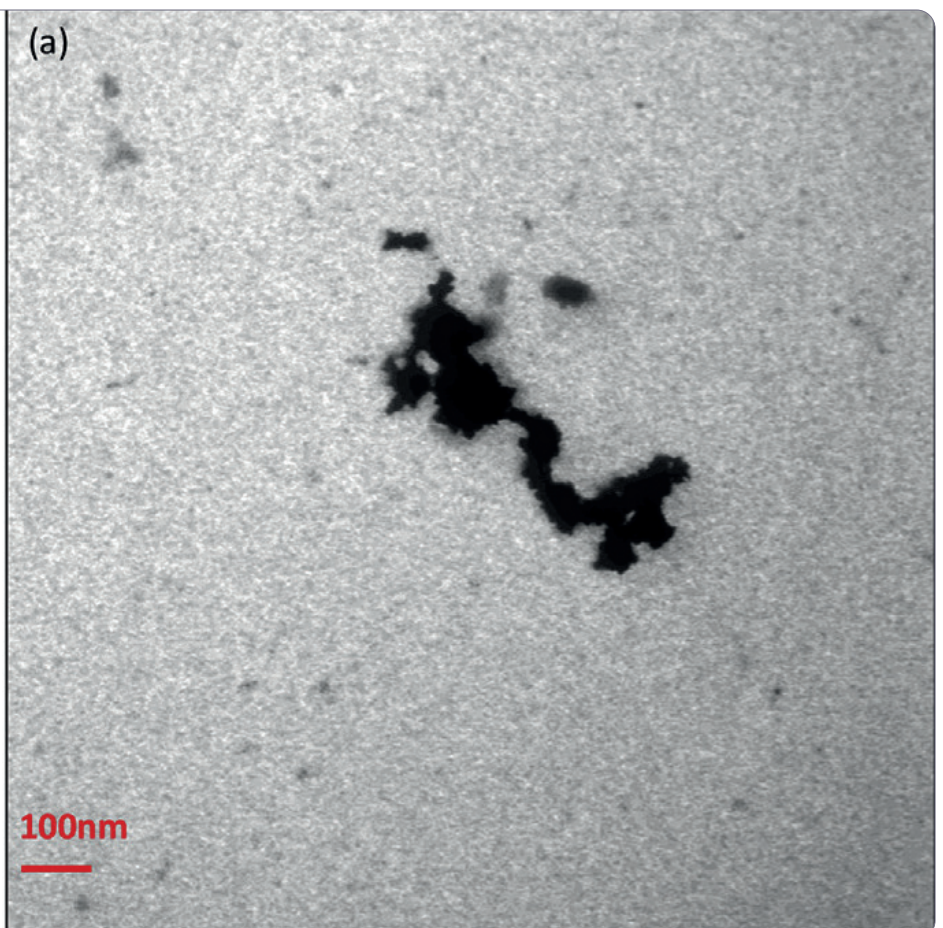


Abbildung 6. Schematische Darstellung des Prozesses der Fragmentierung von Plastikpartikeln zu Nanopartikeln unter Beibehaltung ihrer Polymerstruktur.

Abbildung 7. Transmissions-Elektronenmikroskopie von Polyethylen-Nanoplastik aus der Umgebung, das durch den Abbau von gealterten Mikroplastikpartikeln durch UV-Strahlung entstanden ist, gesammelt im Nordatlantik.

Quelle: Gigault, J. et al. Current opinion: What is a nanoplastic? Environmental Pollution 235, 1030–1034 (2018).
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.01.024>



Ausbreitung von Mikro- und Nanoplastik im Ozean

Die höchsten Konzentrationen von Plastik finden sich in Gebieten von Müllflecken. Diese ozeanischen Mülldeponien wirken wie Fabriken, in denen kontinuierlich Mikro- und Nanoplastik entsteht. Wie ein Virus, das sich über die Blutbahn ausbreitet, wird Mikroplastik von den Meeresströmungen über die Weltmeere getragen, was das globale Ausmaß des Problems verdeutlicht.

Trotz der technischen Schwierigkeiten beim Nachweis von Mikroplastik, die eine genaue Bestimmung der Menge an Mikroplastik in den Ozeanen erschweren, kann man anhand theoretischer Berechnungen das Ausmaß des Problems abschätzen.

Mikroplastik wurde in fast allen Meerwasserproben gefunden, und in einigen Regionen liegen die Konzentrationen um ein Zehnfaches über dem Durchschnitt.

Die Ozeanwirbel tragen zur weltweiten Verbreitung von Mikroplastik bei, auch in entlegene Regionen wie die Arktis. Die Untersuchungen der Eisbohrkerne haben gezeigt, dass die Verschmutzung durch Mikroplastik im Arktischen Ozean 100-mal höher ist als in den atlantischen Gewässern nördlich von Schottland oder in den Gewässern des Nordpazifikwirbels²³. Dies zeigt das Ausmaß des Problems und seinen grenzüberschreitenden Charakter.

Der Großteil der weltweiten Forschung zur Plastikverschmutzung der Meere konzentriert sich auf die Oberflächenschicht der Ozeane. Im Jahr 2019 befanden sich schätzungsweise zwischen 82 und 358 Billionen Plastikpartikel in der Oberflächenschicht des Ozeans²⁴.

Es gibt jedoch immer mehr Hinweise darauf, dass die Menge der Mikroplastikpartikel in den tiefen Ozeanschichten und in den Bodensedimenten unzählige Billionen erreicht²⁵.

Leichte Plastikteile schwimmen an der Oberfläche, während dichtere oder von Biota besiedelte Plastikteile auf den Meeresboden sinken²⁶. Schätzungen zufolge haben etwa 50 Prozent des Plastiks aus Hausmüll eine höhere Dichte als Meerwasser, was schnelles Absinken von Plastik begünstigt. Auf dem Meeresboden wird es durch Strömungen in der Tiefe verbreitet und sammelt sich in Mulden und Vertiefungen an. Mikroplastik wurde sogar an der tiefsten Stelle des Ozeans, am Grund des Marianengrabens, gefunden²⁷ (Abb. 8-9).

²³Obbard, R. W. et al. Global warming releases microplastic legacy frozen in Arctic Sea ice. *Earth's Future* 2, 315–320 (2014).
<https://doi.org/10.1002/2014EF000240>

²⁴Eriksen, M. et al. A growing plastic smog, now estimated to be over 170 trillion plastic particles afloat in the world's oceans—Urgent solutions required. *PLoS ONE* 18, e0281596 (2023). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0281596>

²⁵Eunomia. Plastics in the Marine Environment. <https://eunomia.eco/reports/plastics-in-the-marine-environment>

²⁶Lusher, A. (2015). Microplastics in the Marine Environment: Distribution, Interactions and Effects. In: Bergmann, M., Gutow, L., Klages, M. (eds) *Marine Anthropogenic Litter*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-16510-3_10

²⁷Peng, X. et al. Microplastics contaminate the deepest part of the world's ocean. *Geochem. Persp. Lett.* 9, 1–5 (2018).
<https://doi.org/10.7185/geochemlet.1829>

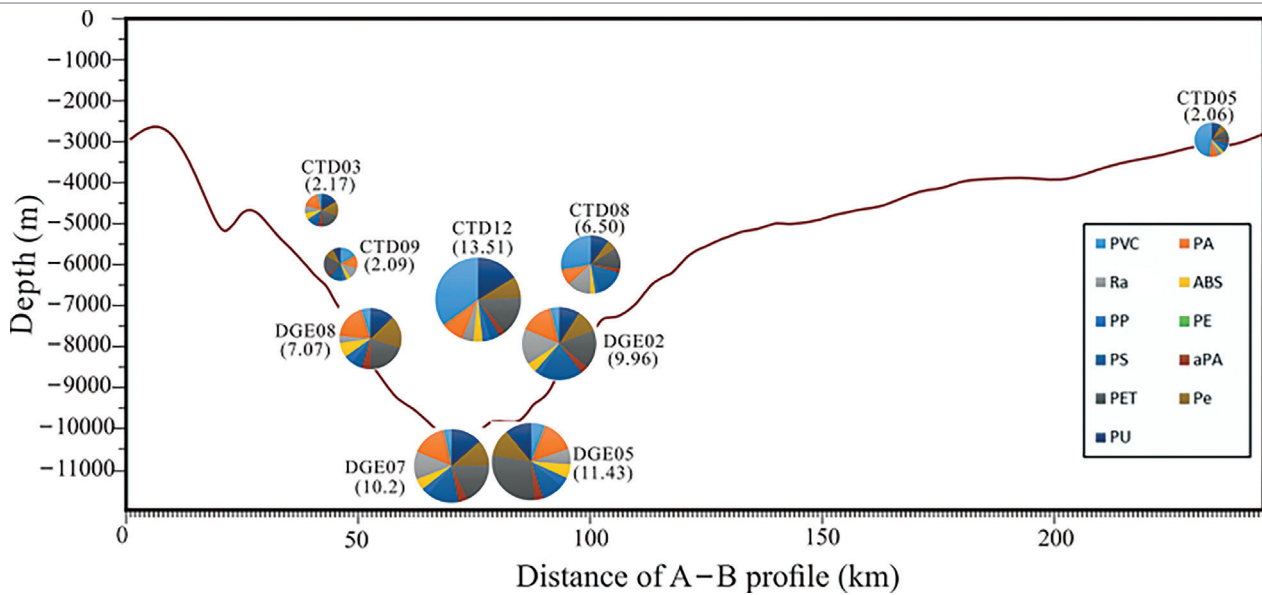


Abbildung 8. Das Prävalenz- und Zusammensetzungsprofil von Mikroplastik in Wasserproben aus dem Marianengraben. Die Kreisdiagramme zeigen die Zusammensetzung des Mikroplastiks und die Zahlen in Klammern die Prävalenz des Mikroplastiks in Einheiten Stückanzahl pro Liter. PVC (Polyvinylchlorid), PA (Polyamid), Ra (Viskose), ABS (Acrylnitril-Butadien-Styrol), PP (Polypropylen), PE (Polyethylen), PS (Polystyrol), aPA (aromatisches Polyamid), PET (Polyethylenterephthalat), Pe (Polyester), PU (Polyurethan). Die X-Achse entspricht der transversalen Linie vom Punkt A (12 °N, 142,5 °E) bis zum Punkt B (9,8 °N, 141,43 °E).

Quelle: Peng, X. et al. Microplastics contaminate the deepest part of the world's ocean. *Geochem. Persp. Let.* 9, 1–5 (2018). <https://doi.org/10.7185/geochemlet.1829>

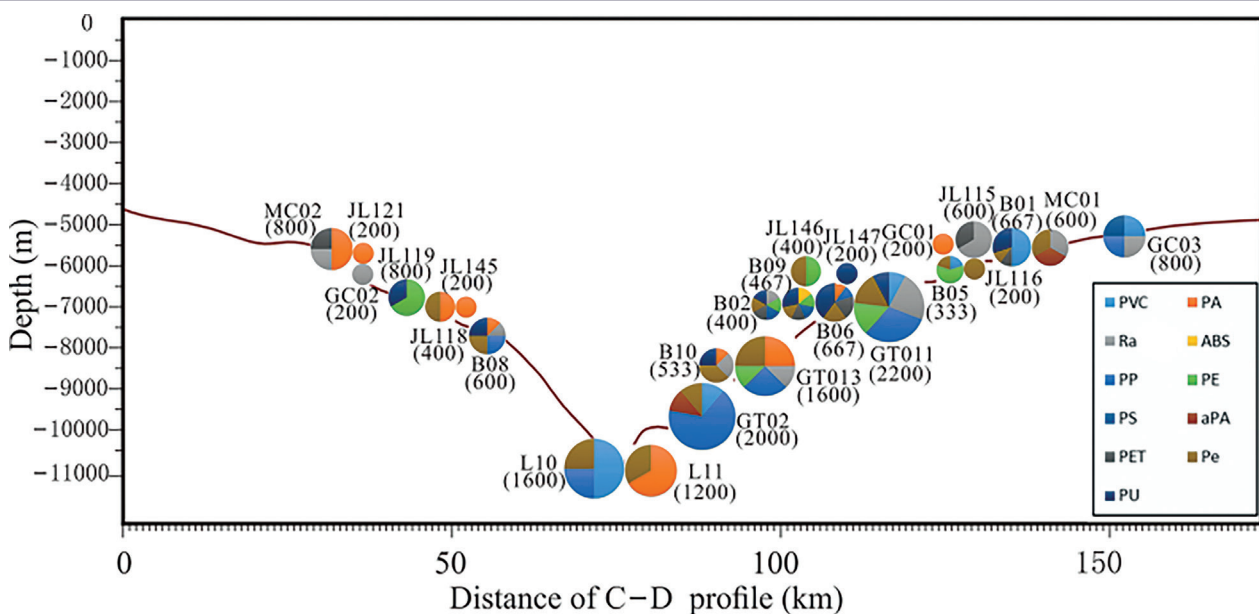


Abbildung 9: Das Prävalenz- und Zusammensetzungsprofil von Mikroplastik in Sedimentproben aus dem Marianengraben. Die Kreisdiagramme zeigen die Zusammensetzung des Mikroplastiks und die Zahlen in Klammern die Prävalenz des Mikroplastiks in Einheiten Stückanzahl pro Liter. PVC (Polyvinylchlorid), PA (Polyamid), Ra (Viskose), ABS (Acrylnitril-Butadien-Styrol), PP (Polypropylen), PE (Polyethylen), PS (Polystyrol), aPA (aromatisches Polyamid), PET (Polyethylenterephthalat), Pe (Polyester), PU (Polyurethan). Die X-Achse entspricht der transversalen Linie vom Punkt C (12 °N, 141,9 °E) bis zum Punkt D (10,5 °N, 141,3 °E).

Quelle: Peng, X. et al. Microplastics contaminate the deepest part of the world's ocean. *Geochem. Persp. Let.* 9, 1–5 (2018). <https://doi.org/10.7185/geochemlet.1829>

Hauptort der Mikroplastikansammlung ist nämlich nicht die Meeresoberfläche, sondern der tiefe Meeresboden. Nach und nach wird der gesamte Meeresboden mit einer Plastikschiicht bedeckt. Die Verschmutzung der Weltmeere durch Mikroplastik wird jedoch wahrscheinlich unterschätzt und die tatsächliche Situation könnte noch viel schlimmer sein. Darauf weist Melanie Bergmann, Biologin für Polar- und Meeresforschung am Alfred-Wegener-Institut (Deutschland), hin: "Nicht jeder verfügt über fortschrittliche und teure Probenahmegeräte." Sie schätzt, dass bis zu 90 Prozent der Mikroplastikpartikel im Meer bei der Verwendung von Standard- Probenahmemethoden unbemerkt bleiben können, da ihre Größe für die Erkennung zu klein ist²⁸ (Abb. 10).

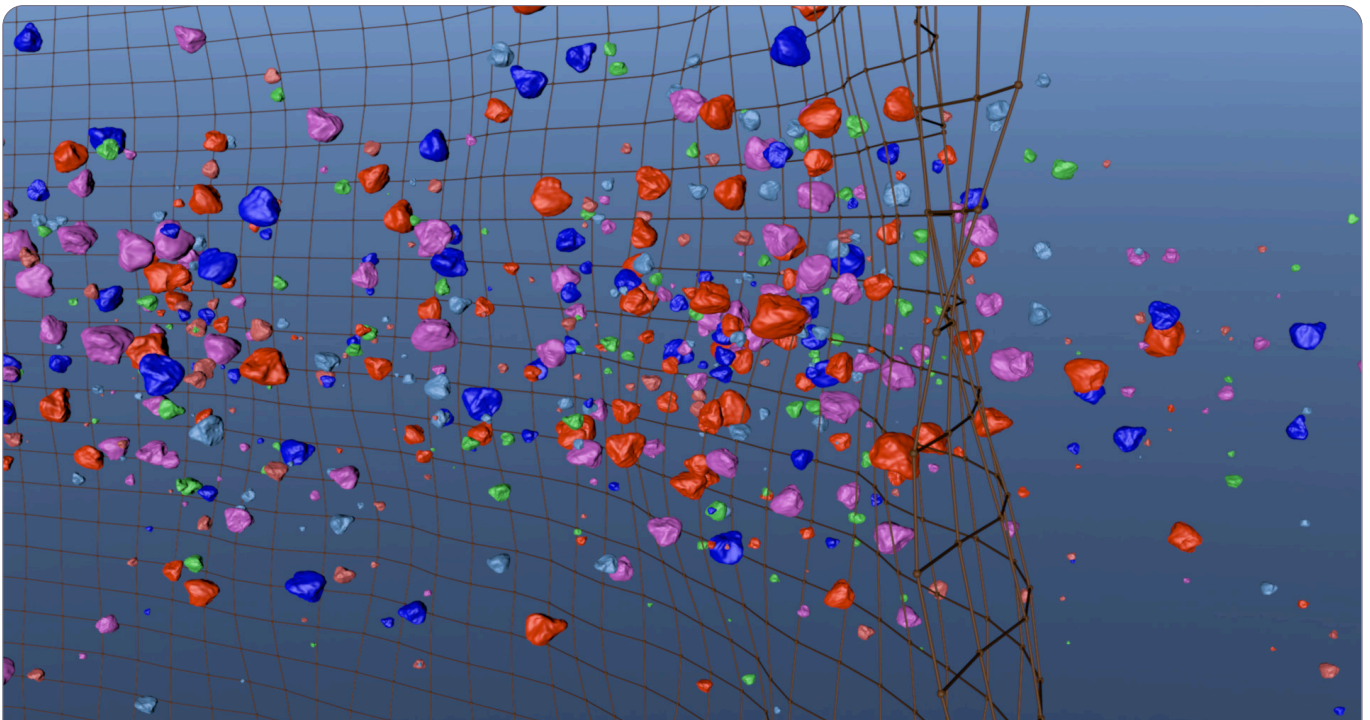


Abbildung 10. Schematische Darstellung mangelhafter Analysemethoden zum Auffangen von Mikro- und Nanoplastik.

²⁸Microplastics pose risk to ocean plankton, climate, other key Earth systems. Mongabay. <https://news.mongabay.com/2023/10/microplastics-pose-risk-to-ocean-plankton-climate-other-key-earth-systems>

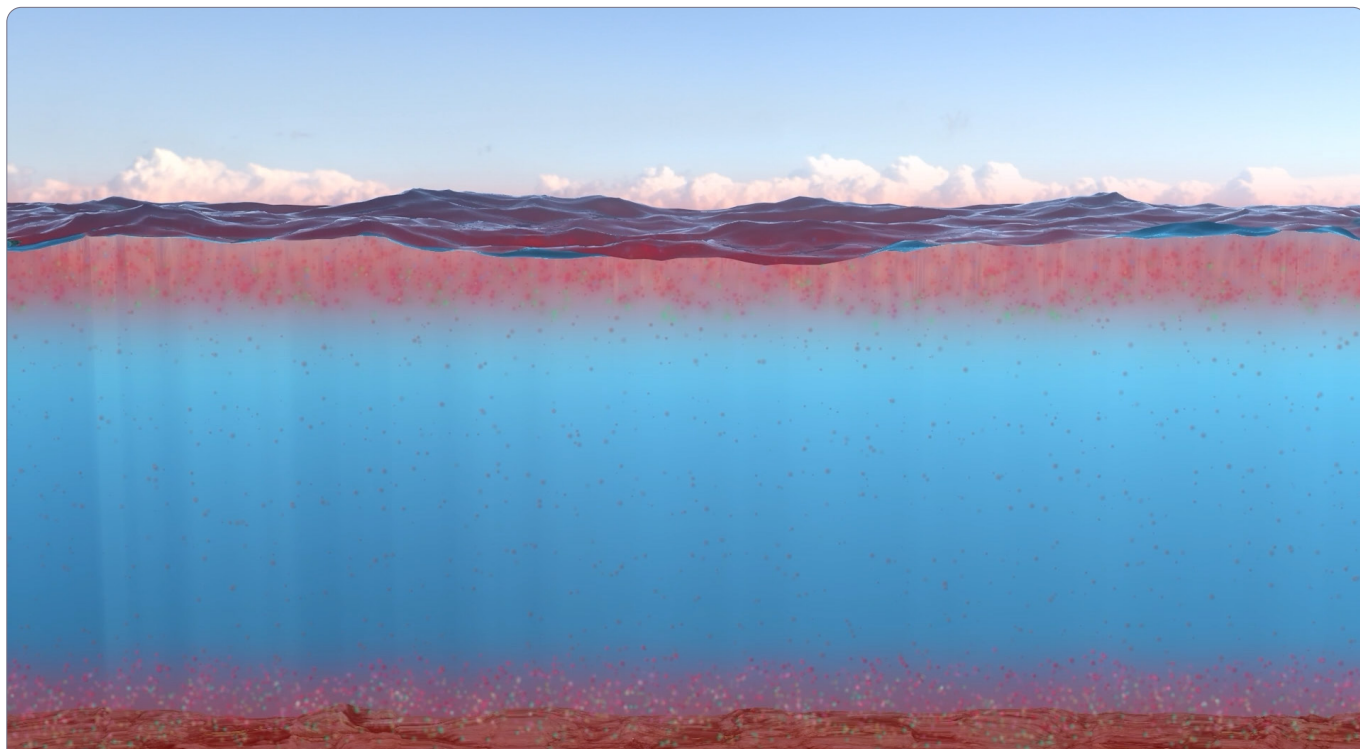


Abbildung 11. Schematische Darstellung der Oberflächen- und Bodenschichten von Mikro- und Nanoplastikverschmutzung.

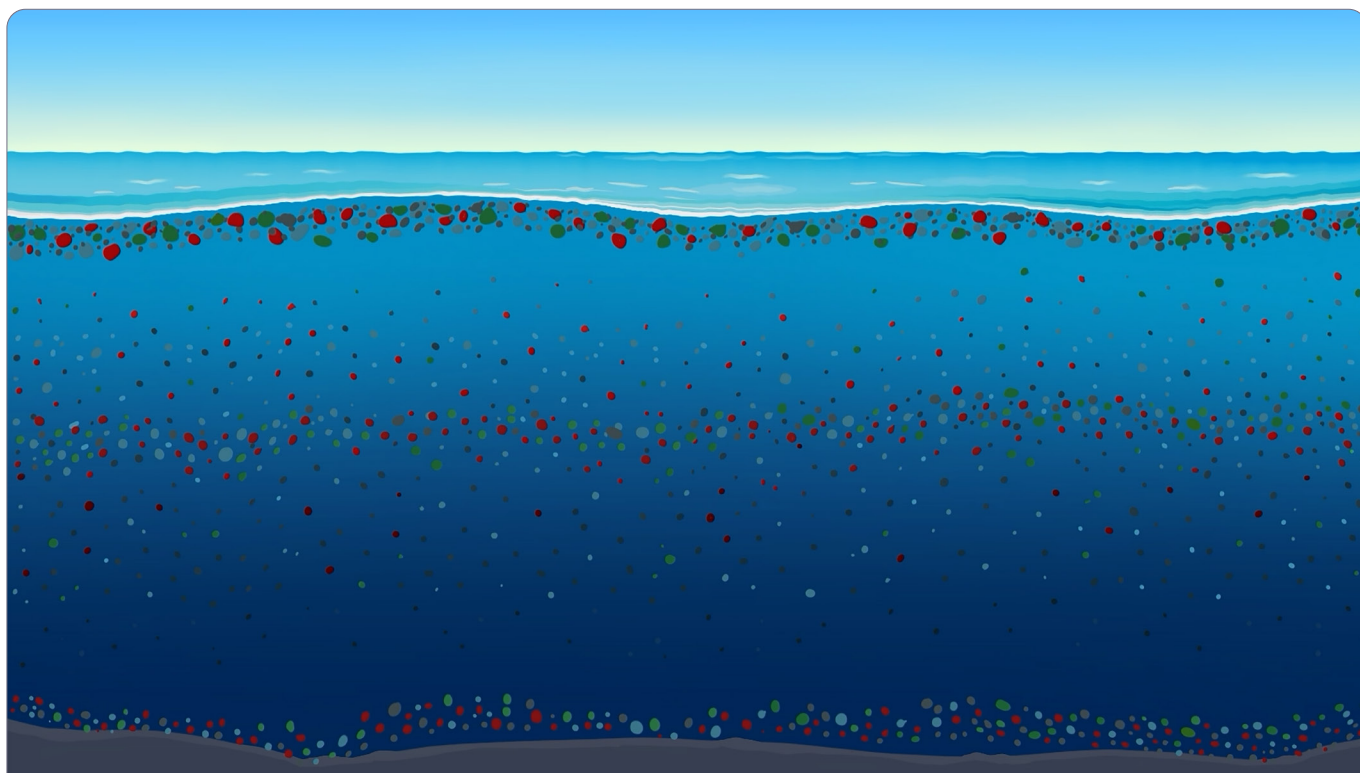


Abbildung 12. Schematische Darstellung der Anordnung von Mikro- und Nanoplastik in den Oberflächen- und Bodenschichten sowie in der Thermokline.

Neben den Oberflächen- und Bodenverschmutzungsschichten (Abb. 11) steigt die Konzentration von Mikro- und Nanoplastik im Bereich der Thermokline²⁹ (Abb. 12) – einer Wasserschicht, in der eine starke Temperaturänderung auftritt – deutlich an. Der hohe Dichtegradient in dieser Schicht begünstigt, dass Mikro- und Nanoplastikpartikel in diesen Zonen gefangen werden und dort lange Zeit verbleiben. Man kann sich den Ozean als einen Schichtkuchen vorstellen, bei dem jede Schicht eine eigene Temperatur und Dichte hat, und Mikroplastik sich an den Grenzen zwischen diesen Schichten ansammelt.

Darüber hinaus wird Mikroplastik durch lebende Organismen, die es aufnehmen, verdauen und ausscheiden, im Ozean verbreitet³⁰.

Verbreitung von MNP in der Umwelt

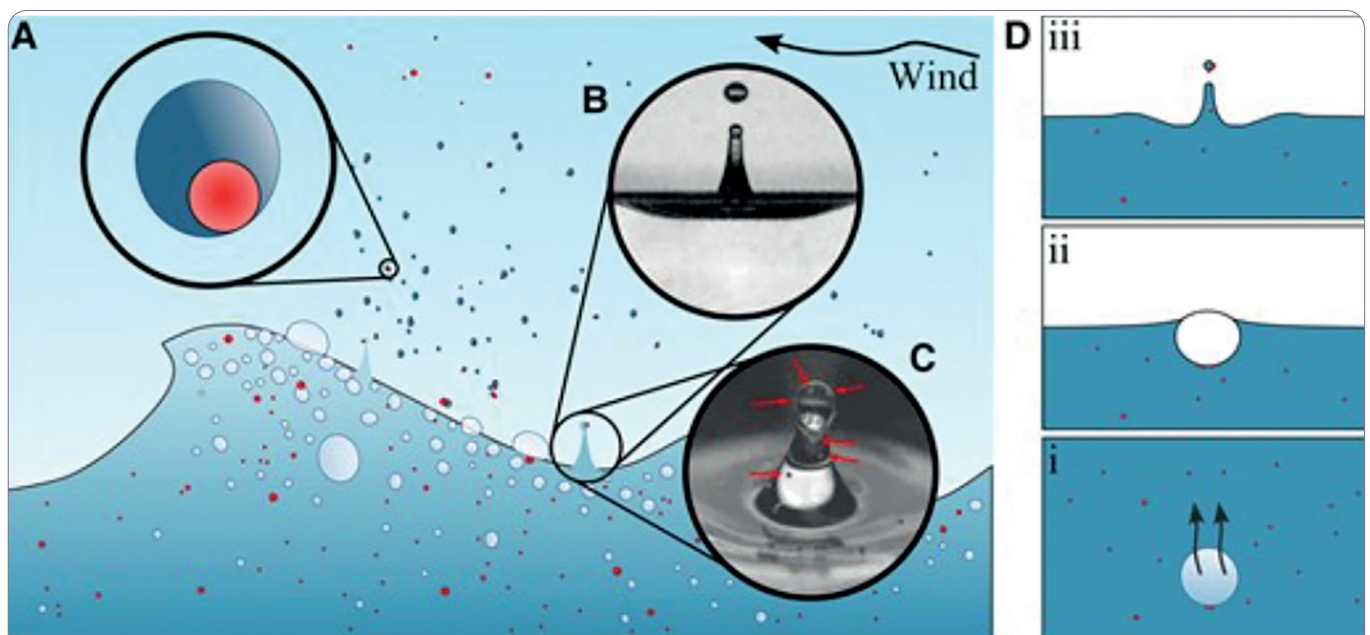


Abbildung 13. Abbildung der entsprechenden Prozesse bei der Freisetzung von Mikroplastik aus dem Ozean. A) Mikroplastik (rot / dunklere Farbe) im Ozean wird durch Meerwassertröpfchen in die Atmosphäre getragen. B) Platzens Bläschen erzeugen kleine Tropfen oder Aerosole wie beispielsweise Sprühtropfen. C) In der Flüssigkeit vorhandenes Mikroplastik kann in die sich bildenden Sprühtropfen gelangen. Die Pfeile zeigen Mikroplastikpartikel mit einer Größe von 100 µm an. Die entstehenden Tropfen können vom Wind aufgenommen werden und Mikroplastik in die Atmosphäre transportieren. Die Flüssigkeit verdunstet schließlich und lässt die Mikroplastikpartikel zurück. D) Die entsprechenden physikalischen Prozesse, die zur Freisetzung von Mikroplastik beim Platzen der Bläschen führen, beginnen mit dem Einschluss der Partikel beim Aufsteigen des Bläschens (Di) Nach dem Erreichen der Oberfläche. Dii) nimmt das Bläschen schließlich seine Gleichgewichtsform an, die beim Platzen Kapillarwellen an seiner Basis konzentriert und Sprühtropfen (Diii) bildet, die das Mikroplastikmaterial transportieren.

Quelle: Shaw, D. B., Li, Q., Nunes, J. K. & Deike, L. Ocean emission of microplastic. PNAS Nexus 2, pgad296 (2023). <https://doi.org/10.1093/pnasnexus/pgad296>

²⁹Tikhonova, D. A., Karetnikov, S. G., Ivanova, E. V. & Shalunova, E. P. The Vertical Distribution of Microplastics in the Water Column of Lake Ladoga. Water Resour 51, 146–153 (2024). <https://doi.org/10.1134/S009780782370063X>

³⁰Dawson, A. L. et al. Turning microplastics into nanoplastics through digestive fragmentation by Antarctic krill. Nat Commun 9, 1001 (2018). <https://doi.org/10.1038/s41467-018-03465-9>

Wenn Wasser verdunstet³¹, steigt Mikroplastik von der Ozeanoberfläche in die Atmosphäre auf³². Außerdem bildet die Kombination aus Gischt, Wind und Wellen Luftbläschen im Wasser, die Mikroplastik enthalten. Wenn die Bläschen platzen, werden die Partikel in die Atmosphäre freigesetzt (Abb. 13). Jedes Jahr werden allein durch die Meeresbrise etwa 136 000 Tonnen Mikroplastik³³ an die Küsten getragen.

Bis zu 25 Millionen Tonnen Mikro- und Nanoplastik pro Jahr werden durch Seeluft, Gischt, Schnee und Nebel über Tausende von Kilometern über Länder, Kontinente und Ozeane hinweg getragen.



"Luft ist ein viel dynamischeres Medium als Wasser. Mikro- und Nanoplastik kann so viel schneller in die wenigen bislang noch fast unberührten und entlegensten Bereiche unseres Planeten vordringen", sagt Dr. Melanie Bergmann, Biologin am Alfred-Wegener-Institut in Deutschland.

Dort angekommen, können die Partikel das Oberflächenklima und die Gesundheit der lokalen Ökosysteme beeinflussen³⁴. Mikroplastik wurde an einer Vielzahl von Orten gefunden, von der Meeresoberfläche bis zu Tiefseesedimenten, von Ackerland bis zu unseren höchsten Bergen sowie in Meereis, in Seen und Flüssen. Es wurde bei 1 300 Wasser- und Landtierarten nachgewiesen, von wirbellosen Tieren am unteren Ende der Nahrungskette bis hin zu den größten Raubtieren, und es gibt Hinweise auf Auswirkungen auf allen Ebenen der biologischen Organisation, von der zellulären Ebene bis hin zur Ökosystemebene. Mikroplastik ist in der Nahrung, die wir essen, im Wasser, das wir trinken, und in der Luft, die wir atmen, weit verbreitet (Abb. 14). Es wurde in vielen Geweben und Organen des menschlichen Körpers gefunden, und es gibt immer mehr Beweise für seine negativen Auswirkungen³⁵.

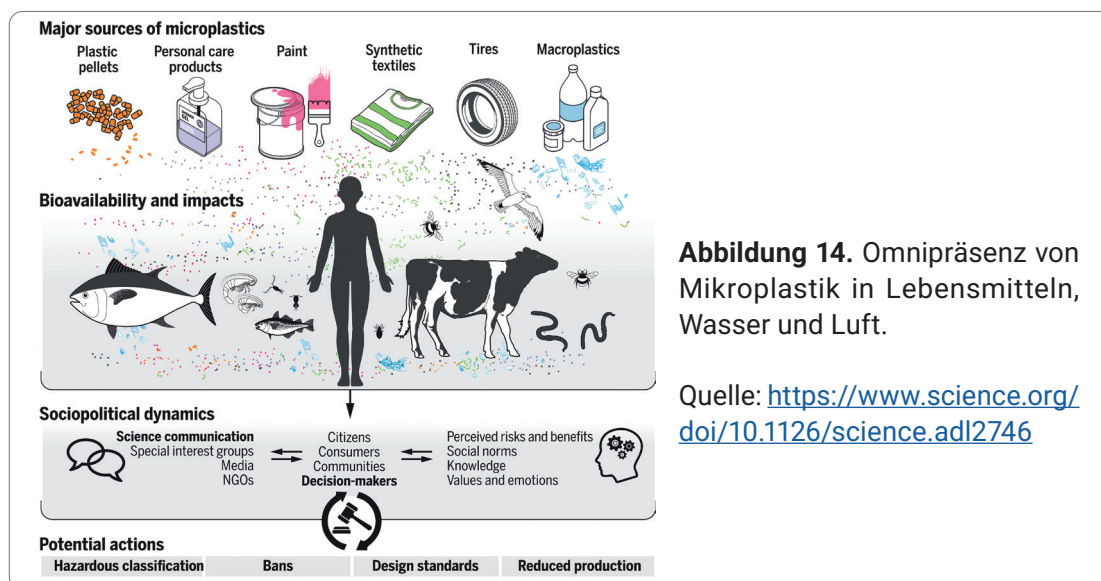


Abbildung 14. Omnipräsenz von Mikroplastik in Lebensmitteln, Wasser und Luft.

Quelle: <https://www.science.org/doi/10.1126/science.adl2746>

³¹Shaw, D. B., Li, Q., Nunes, J. K. & Deike, L. Ocean emission of microplastic. PNAS Nexus 2, pgad296 (2023). <https://doi.org/10.1093/pnasnexus/pgad296>

³²Deike, L., Reichl, B. G. & Paulot, F. A Mechanistic Sea Spray Generation Function Based on the Sea State and the Physics of Bubble Bursting. AGU Advances 3, e2022AV000750 (2022). <https://doi.org/10.1029/2022AV000750>

³³Allen, S. et al. Examination of the ocean as a source for atmospheric microplastics. PLoS ONE 15, e0232746 (2020). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0232746>

³⁴Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung. Mikro- und Nanoplastik aus der Atmosphäre belastet Meere <https://www.awi.de/ueber-uns/service/presse/presse-detailansicht/mikro-und-nanoplastik-aus-der-atmosphaere-belastet-meere.html> (Abgerufen am 01.05.2025)

³⁵Thompson, R. C. et al. Twenty years of microplastic pollution research—what have we learned? Science 386, eadl2746 (2024). <https://doi.org/10.1126/science.adl2746>

Somit kann die Übertragung in entlegene und sogar polare Regionen durch die Kombination aus atmosphärischen und marinen Übertragungswegen bedingt sein. Daher ist es wichtig, die Wechselwirkung zwischen der Atmosphäre und dem Ozean zu verstehen, um zu bestimmen, Partikel welcher Größen und in welchen Mengen transportiert werden.

So fand ein Forscherteam vor Kurzem in Wolken über Berggipfeln in Japan Kunststoffgranulat mit hydrophiler (wasseranziehender) Oberfläche³⁶. Die Forscher analysierten die Proben und kamen zu dem Schluss, dass niedrig gelegene und dichtere Wolken größere Mengen an Mikroplastik enthalten. Das Vorhandensein von Polymeren als Kondensationskerne spielt eine Schlüsselrolle bei der schnellen Wolkenbildung, was letztlich das gesamte Klima beeinflussen kann.

Die Plastikpartikel in den Wolken tragen dazu bei, mehr Wasser zu speichern, wodurch sich der Niederschlag verzögert. Wenn es dann zu regnen beginnt, wird der Niederschlag stärker, weil sich bis dahin mehr Wasser in den Wolken ansammelt. Außerdem hat Mikroplastik, das UV-Licht und Wasser aus den Wolken ausgesetzt war, eine rauere Oberfläche, was dazu beiträgt, dass sich mehr Blei, Quecksilber und sauerstoffhaltige Gruppen³⁷ auf seiner Oberfläche ansammeln.

Die Atmosphäre transportiert hauptsächlich kleine Mikroplastikpartikel, was sie zu einem viel schnelleren Transportweg macht, der zu erheblichen Ablagerungen in einer Vielzahl von Ökosystemen führen kann. Die Forschungsdaten zeigen, dass Wälder als Barrieren für durch Wind verbreitetes Mikroplastik fungieren. Blätter, Äste und Baumstämme fangen Mikroplastik ab, das sich auf ihren Oberflächen ablagert. Dies führt dazu, dass Mikroplastikpartikel, die durch Wind und Niederschlag übertragen werden, auf den Pflanzen verbleiben oder sich auf dem Boden ablagern.

Die eingeschränkte Belüftung unter dem dichten Blätterdach eines Waldes begünstigt die anhaltende Ansammlung dieser Partikel in Waldgebieten. Die Blätter der Baumkronen dienen als langfristiges Reservoir für Mikroplastik in der Luft³⁸. Untersuchungen haben gezeigt, dass zwischen Herbst 2017 und Sommer 2019 in 11 Naturparks und Naturschutzgebieten im Westen der USA mehr als 1 000 Tonnen Plastikpartikel mit dem Niederschlag niedergegangen sind. Diese Menge reicht aus, um 120 Millionen Plastikflaschen zu produzieren³⁹. In anderen Regionen der Welt ist die Situation ähnlich. So fangen beispielsweise Jocham-Eichenwälder (*Quercus serrata*) in Japan, die sich über eine Fläche von etwa 32 500 km² erstrecken, jedes Jahr etwa 420 Billionen Mikroplastikpartikel aus der Luft in ihren Kronen ein⁴⁰.

Im Gegensatz zu Wäldern sinkt in Städten ein Teil des Mikro- und Nanoplastiks zu Boden, begünstigt durch eine gute Durchlüftung und das Vorhandensein schwererer Partikel aus Autoabgasen und Industriesmog. Heute ist die Luft in Wäldern stärker mit Nanoplastik gesättigt als in Megastädten.

³⁶Wang, Y., Okochi, H., Tani, Y. et al. Airborne hydrophilic microplastics in cloud water at high altitudes and their role in cloud formation. *Environ Chem Lett* 21, 3055–3062 (2023). <https://doi.org/10.1007/s10311-023-01626-x>

³⁷Busse, H. L., Ariyasena, D. D., Orris, J. & Freedman, M. A. Pristine and Aged Microplastics Can Nucleate Ice through Immersion Freezing. *ACS EST Air* 1, 1579–1588 (2024). <https://doi.org/10.1021/acsestair.4c00146>

³⁸Sunaga, N., Okochi, H., Niida, Y. et al. Alkaline extraction yields a higher number of microplastics in forest canopy leaves: implication for microplastic storage. *Environ Chem Lett* 22, 1599–1606 (2024). <https://doi.org/10.1007/s10311-024-01725-3>

³⁹Brahney, J., Hallerud, M., Heim, E., Hahnenberger, M. & Sukumaran, S. Plastic rain in protected areas of the United States. *Science* 368, 1257–1260 (2020). <https://doi.org/10.1126/science.aaz5819>

⁴⁰Sunaga, N., Okochi, H., Niida, Y. & Miyazaki, A. Alkaline extraction yields a higher number of microplastics in forest canopy leaves: implication for microplastic storage. *Environ Chem Lett* 22, 1599–1606 (2024). <https://doi.org/10.1007/s10311-024-01725-3>

Die Welt hat sich verändert! Wenn Menschen heute im Ozean schwimmen, sich am Strand sonnen, entlang der Küste oder im Park joggen oder im Wald spazieren gehen, um ihre Gesundheit zu verbessern, setzen sie ihren Körper stattdessen zusätzlichem Mikroplastik aus. Mikroplastik aus Afrika und Nordamerika wurde in abgelegenen und scheinbar unberührten Gebieten wie den französischen Pyrenäen gefunden. Dies zeigt die weltweite Verbreitung von Mikroplastik, das durch Luftströme und Niederschläge transportiert wird und dabei große Entfernungen zurücklegt.

Mikro- und Nanoplastik gelangt durch Regenwasserabflüsse, industrielle Abwässer und Regenwasser, welches Partikel aus der Atmosphäre aufnimmt, in städtische Gewässer. So kann beispielsweise ein einziger Waschgang von synthetischen Stoffen bis zu 1,5 Millionen Mikroplastikpartikel ins Abwasser freisetzen⁴¹. Diese Partikel gelangen dann über das Abwasser in Flüsse und Meere, wo sie von Fischen und anderen Wasserorganismen aufgenommen werden. Durch die Analyse der in den Flüssen und der umgebenden Landschaft gefundenen Abfälle konnten die Forscher schätzen, dass allein zehn Flusssysteme zwischen 88 % und 95 % des Plastiks transportieren, das aus den Flüssen ins Meer gelangt⁴².

In einer anderen Studie überprüften Wissenschaftler die gängigen Annahmen über den Transport von Plastik in Flüssen und kamen zu dem Schluss, dass die tatsächliche Menge an Plastikmüll in Flüssen um 90 % höher sein könnte als bisher angenommen⁴³.

Plastik ist auch in den meisten großen Seen der Welt vorhanden. Die Dichte des Plastikmülls in Seen kann sogar höher sein als in den größten Müllflecken der Ozeane, und selbst Seen in unberührten Gebieten enthalten beträchtliche Mengen an Abfällen. Dies wurde in einer großen internationalen Studie unter der Leitung von Barbara Leoni und Veronica Nava von der Universität Mailand Bicocca bestätigt⁴⁴.

Laut dem Bericht des Umweltprogramms der Vereinten Nationen (UNEP) aus dem Jahr 2021 wurde Mikroplastik in allen untersuchten Süßgewässern, einschließlich Flüssen, Seen und Stauseen, gefunden⁴⁵. So fanden die Forscher heraus, dass jedes Jahr fast 10 000 Tonnen Plastikmüll aus den Vereinigten Staaten und Kanada in die Großen Seen gelangen⁴⁶.

Durch den Verzehr von Fisch und Meeresfrüchten gelangen Mikroplastikpartikel schließlich wieder zum Menschen zurück.

⁴¹De Falco, F., Di Pace, E., Cocca, M. & Avella, M. The contribution of washing processes of synthetic clothes to microplastic pollution. *Sci Rep* 9, 6633 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41598-019-43023-x>

⁴²Schmidt, C., Krauth, T. & Wagner, S. Export of Plastic Debris by Rivers into the Sea. *Environ. Sci. Technol.* 51, 12246–12253 (2017). <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b02368>

⁴³Valero, D., Belay, B. S., Moreno-Rodenas, A., Kramer, M. & Franca, M. J. The key role of surface tension in the transport and quantification of plastic pollution in rivers. *Water Research* 226, 119078 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.119078>

⁴⁴Nava, V., Chandra, S., Aherne, J. et al. Plastic debris in lakes and reservoirs. *Nature* 619, 317–322 (2023). <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06168-4>

⁴⁵United Nations Environment Programme. Monitoring Plastics in Rivers and Lakes: Guidelines for the Harmonization of Methodologies. (2020) <https://www.unep.org/resources/report/monitoring-plastics-rivers-and-lakes-guidelines-harmonization-methodologies>

⁴⁶Hoffman, M. J. & Hittinger, E. Inventory and transport of plastic debris in the Laurentian Great Lakes. *Marine Pollution Bulletin* 115, 273–281 (2017). <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.11.061>

Italienische Wissenschaftler stellten fest, dass auch Obst und Gemüse Millionen von Mikroplastikpartikeln enthalten. Große Konzentrationen dieser Partikel wurden in Äpfeln, Birnen, Karotten, Kartoffeln, Lattich und Brokkoli gefunden. Die Partikelkonzentration in Obst war 2-3 Mal höher als in Gemüse: von 52 000 Partikeln pro Gramm in Salat bis zu 223 000 in Äpfeln⁴⁷.

Im Rahmen der Forschung wurde festgestellt, dass 81 % von 159 weltweit entnommenen Leitungswasserproben Mikroplastik enthielten⁴⁸. Andere Studien bestätigen diese Ergebnisse und stellen fest, dass auch in Mineralwasser Mikroplastikpartikel vorhanden sind. Interessanterweise war die Anzahl der Partikel sowohl in Glasflaschen als auch in Flaschen aus Polyethylenterephthalat (PET) etwa gleich hoch, wobei die Anzahl der Partikel bis zu 6 292 pro Liter betrug^{49, 50, 51}.

Wissenschaftler der Universität Newcastle (Australien) führten eine Untersuchung⁵² durch, um zu ermitteln, wie viel Plastik ein Mensch heute im Durchschnitt zu sich nimmt. Die Ergebnisse zeigten, dass ein Mensch etwa 250 g Plastik pro Jahr zu sich nimmt, was 50 Plastiktüten entspricht⁵³.

⁴⁷Oliveri Conti, G. et al. Micro- and nano-plastics in edible fruit and vegetables. The first diet risks assessment for the general population. *Environmental Research* 187, 109677 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109677>

⁴⁸Kosuth, M., Mason, S. A. & Wattenberg, E. V. Anthropogenic contamination of tap water, beer, and sea salt. *PLoS ONE* 13, e0194970 (2018). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0194970>

⁴⁹Schymanski, D., Goldbeck, C., Humpf, H.-U. & Fürst, P. Analysis of microplastics in water by micro-Raman spectroscopy: Release of plastic particles from different packaging into mineral water. *Water Research* 129, 154–162 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.11.011>

⁵⁰Oßmann, B. E. et al. Small-sized microplastics and pigmented particles in bottled mineral water. *Water Research* 141, 307–316 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.05.027>

⁵¹Winiarska, E., Jutel, M. & Zemelka-Wiacek, M. The potential impact of nano- and microplastics on human health: Understanding human health risks. *Environmental Research* 251, 118535 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.118535>

⁵²University of Newcastle. Plastic ingestion by people could be equating to a credit card a week. <https://www.newcastle.edu.au/newsroom/featured/plastic-ingestion-by-people-could-be-equating-to-a-credit-card-a-week> (Accessed May 1, 2025)

⁵³Senathirajah, K. et al. Estimation of the mass of microplastics ingested – A pivotal first step towards human health risk assessment. *Journal of Hazardous Materials* 404, 124004 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124004>

UMWELT- UND KLIMAFOLGEN DER VERSCHMUTZUNG DURCH MIKRO- UND NANOPLASTIK

Wie MNP Ökosysteme auf molekularer Ebene zerstört

Plastikmüll ist überall: in den Ozeanen und Flüssen, im Boden, in der Luft und sogar in den Gletschern⁵⁴. Langfristige Beobachtungen bestätigen, dass Plastik im Gegensatz zu pflanzlichen und tierischen Substanzen keiner aktiven natürlichen Zersetzung unterliegt⁵⁵. Es verbleibt in der Umwelt, ohne an den natürlichen biologischen Abbauprozessen teilzunehmen. Da Plastik so konzipiert ist, dass es sich nicht zersetzt, ist es zu einem festen Bestandteil des globalen Ökosystems geworden. Diese Widerstandsfähigkeit, die ursprünglich als technologischer Erfolg angesehen wurde, führt heute zu einem erheblichen ökologischen Ungleichgewicht.

Bei der Herstellung von Kunststoffen werden mehr als 13 000 Chemikalien verwendet. Davon sind mehr als 3 200, darunter Monomere, Additive und Verarbeitungshilfsstoffe, aufgrund ihrer toxischen Eigenschaften potenziell gefährlich⁵⁶.

Auswirkungen von MNP auf Bodeneigenschaften und die Erosion von Ökosystemen

Untersuchungen zeigen, dass die Mikroplastikverschmutzung in ländlichen Ökosystemen – insbesondere in landwirtschaftlichen Böden – das Verschmutzungsniveau von Gewässern um das 4- bis 23-fache⁵⁷ übersteigen kann, was auf eine erhebliche Anreicherung von Plastik in Böden hinweist. Plastik reichert sich in Böden auf verschiedene Weise an, unter anderem durch Kläranlagen, Mulchen, atmosphärische Ablagerung und Produkte des täglichen Gebrauchs. Die unzählige Verwendung von Einwegplastikprodukten ist untrennbar mit einer schwerwiegenden Verunreinigung des Bodens mit Mikro- und Nanoplastik verbunden. Natürliche und anthropogene Faktoren tragen dazu bei⁵⁸, dass kleine Mikroplastikpartikel in den Boden eindringen und wichtige ökologische Prozesse beeinträchtigen⁵⁹.

Beobachtungen bestätigen die schädlichen Auswirkungen von Mikroplastik auf Ökosysteme, die die Struktur und Funktion von Mikroorganismen, Pflanzen und Böden beeinflussen (Abb. 15).

⁵⁴Hale, R. C., Seeley, M. E., La Guardia, M. J., Mai, L. & Zeng, E. Y. A Global Perspective on Microplastics. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 125, e2018JC014719 (2020). <https://doi.org/10.1029/2018JC014719>

⁵⁵Huang, S. et al. Plastic Waste Management Strategies and Their Environmental Aspects: A Scientometric Analysis and Comprehensive Review. *IJERPH* 19, 4556 (2022). <https://doi.org/10.3390/ijerph19084556>

⁵⁶United Nations Environment Programme. Chemicals in Plastics - A Technical Report (2023). <https://www.unep.org/resources/report/chemicals-plastics-technical-report> (Abgerufen am 01.05.2025)

⁵⁷Yu, H., Zhang, Y., Tan, W. & Zhang, Z. Microplastics as an Emerging Environmental Pollutant in Agricultural Soils: Effects on Ecosystems and Human Health. *Front. Environ. Sci.* 10, 855292 (2022). <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.855292>

⁵⁸Rillig, M. C., Ingrassia, R. & De Souza Machado, A. A. Microplastic Incorporation into Soil in Agroecosystems. *Front. Plant Sci.* 8, 1805 (2017). <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01805>

⁵⁹Shafea, L. et al. Microplastics in agroecosystems: A review of effects on soil biota and key soil functions. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 186, 5–22 (2023). <https://doi.org/10.1002/jpln.202200136>

Microplastics as an emerging threat to terrestrial ecosystems

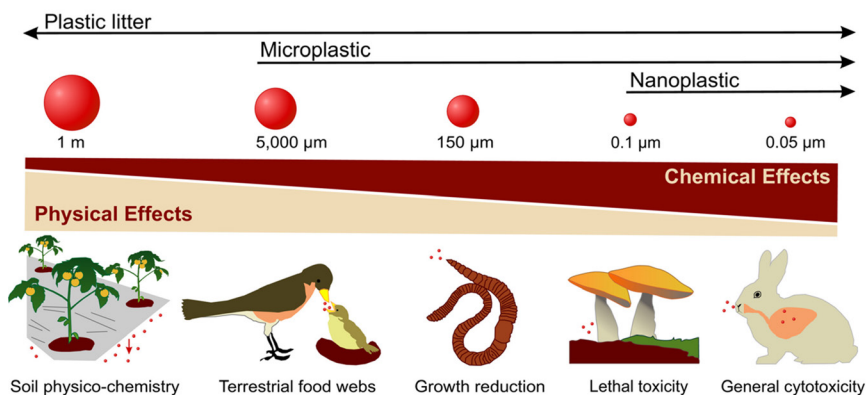


Abbildung 15. Mikroplastik als Auslöser für kombinierte physikalische und chemische Effekte.

Biogeochemie des Bodens in Verbindung mit landwirtschaftlichem Mulchen (Steinmetz et al., 2016), Verzehr durch Land- und Kontinentalvögel (Gil-Delgado et al., 2017; Holland et al., 2016; Zhao et al., 2016), vermindertes Regenwurmwachstum (Lwanga et al., 2016), tödliche Toxizität für Pilze (Miyazaki et al., 2014, 2015; Nomura et al., 2016), Lungenentzündung bei Säugetieren (Hamoir et al., 2003; Oberdorster, 2000; Schmid & Stoeger, 2016) und breite Zytotoxizität (Forte et al., 2016; Kato et al., 2003) von Nanoplastik.

Quelle: de Souza Machado, A. A., Kloas, W., Zarfl, C., Hempel, S. & Rillig, M. C. Microplastics as an emerging threat to terrestrial ecosystems. *Global Change Biology* 24, 1405–1416 (2018). <https://doi.org/10.1111/gcb.14020>

Die Ergebnisse einer Forschung der Chinesischen Akademie der Wissenschaften haben gezeigt, dass das Vorhandensein von Plastikfolien unterschiedlicher Größe im Boden die Wasserverdunstungsrate deutlich erhöht. Der Effekt ist besonders stark, wenn 2-Millimeter-Partikel hinzugefügt werden. Größere Plastikfragmente (5-10 mm) führen zu Rissen im Boden und zerstören seine strukturelle Integrität. Diese Daten deuten darauf hin, dass die Plastikverschmutzung den Wasserkreislauf im Boden stört, was das Wasserdefizit im Boden verschlimmert und den vertikalen Transport von Schadstoffen beeinflussen kann⁶⁰ (Abb. 16-17).

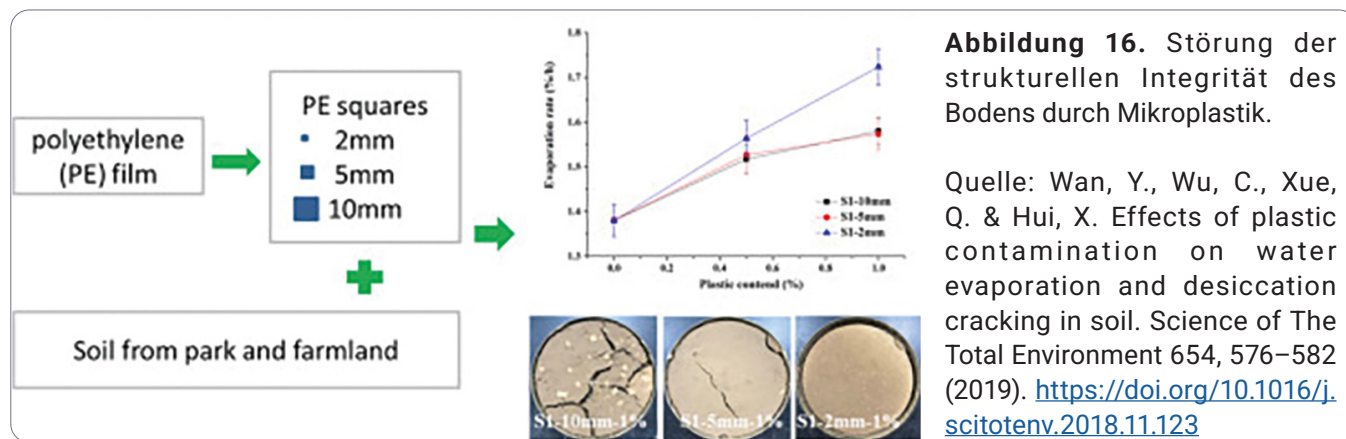


Abbildung 16. Störung der strukturellen Integrität des Bodens durch Mikroplastik.

Quelle: Wan, Y., Wu, C., Xue, Q. & Hui, X. Effects of plastic contamination on water evaporation and desiccation cracking in soil. *Science of The Total Environment* 654, 576–582 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.123>

⁶⁰Wan, Y., Wu, C., Xue, Q. & Hui, X. Effects of plastic contamination on water evaporation and desiccation cracking in soil. *Science of The Total Environment* 654, 576–582 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.123>

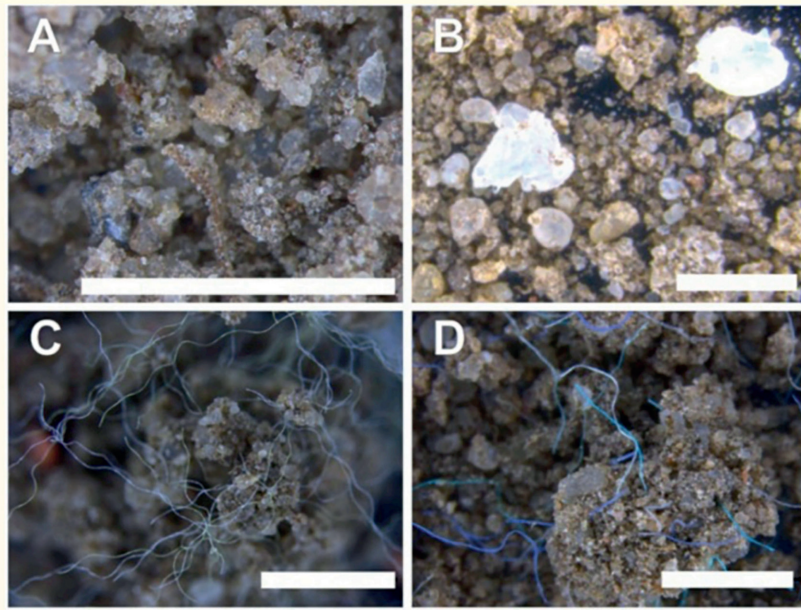


Abbildung 17. Integration von Mikroplastikpartikeln in die biophysikalische Umwelt des Bodens.

Die Struktur des Kontrollbodens (A) unterschied sich visuell unter dem Stereomikroskop nicht von dem mit Polyamidkügelchen kontaminierten Boden (SI S1D). Polyethylenfragmente (B) und Polyester- (C) oder Polyacrylfasern (D) führten zu visuell unterscheidbaren Bodenmerkmalen. Der weiße Streifen auf jedem Panell entspricht einer Größe von 1 mm.

Quelle: De Souza Machado, A. A. et al. Impacts of Microplastics on the Soil Biophysical Environment. *Environ. Sci. Technol.* 52, 9656–9665 (2018). <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b02212>

Untersuchungen bestätigen auch die negativen Auswirkungen von Plastik auf die Bodenbiota, eine vielfältige Gemeinschaft, die Mikroorganismen (z. B. Bakterien, Pilze) und Fauna (mikroskopische und makroskopische Tiere) umfasst. Diese Organismen interagieren miteinander, mit Pflanzenwurzeln und der Umwelt, und bilden dabei Bodennahrungsketten (Abb. 18), die für den Nährstoffkreislauf und die Pflanzengesundheit wichtig sind.

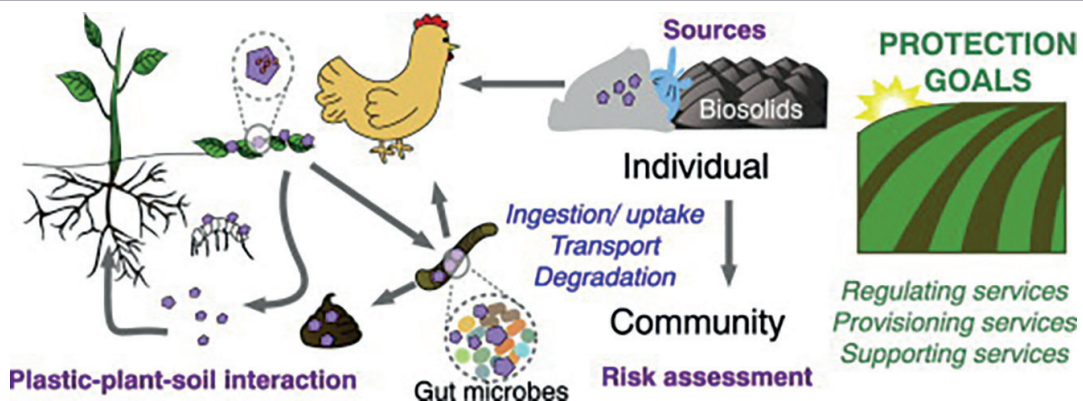


Abbildung 18. Schematische Darstellung der Bildung der Nahrungsketten im Boden.

Quelle: Ng, E.-L. et al. An overview of microplastic and nanoplastic pollution in agroecosystems. *Science of The Total Environment* 627, 1377–1388 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.01.341>

Verschiedene Landpflanzenarten dienen als Bioindikatoren für die Verschmutzung durch Mikroplastik. Die Analyse aller Proben ergab das Vorhandensein von Mikroplastikpartikeln und potenziell toxischen Elementen (Sb, As, Fe, Al, Se, Zn) in unterschiedlichen Konzentrationen⁶¹, was auf die mögliche Toxizität von Mikroplastik hinweist⁶².

Untersuchungen haben gezeigt, dass Polystyrolgranulat von dem Bodenorganismus *Caenorhabditis elegans* aufgenommen werden kann (Abb. 19); dies bedeutet auch, dass sich Polystyrolpartikel in der Nahrungskette im Boden anreichern können.⁶³

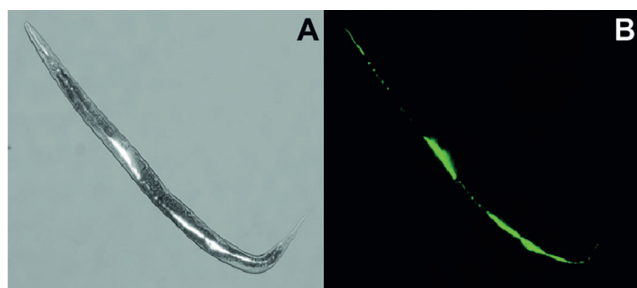


Abbildung 19. Hellfeldbilder (A) und Fluoreszenzbilder (B) eines erwachsenen Wurms *Caenorhabditis elegans*, der 0,5 µm große gelb-grüne Fluoreszenz-Mikrosphären 15 Minuten lang bei 20 °C akkumuliert hat. Die Fotos wurden mit einer 100-fachen Vergrößerung aufgenommen.

Quelle: Kiyama, Y., Miyahara, K. & Ohshima, Y. Active uptake of artificial particles in the nematode *Caenorhabditis elegans*. *Journal of Experimental Biology* 215, 1178–1183 (2012). <https://doi.org/10.1242/jeb.067199>

Die Bodenbiota ist nicht nur ein "biologischer Motor der Erde", sondern ein multifunktionales System, von dem alle Landökosysteme abhängen. Ihre Rolle bei der Erhaltung des Lebens auf dem Planeten ist mit der der Ozeane und der Atmosphäre vergleichbar, wie Forschungen von Bodenwissenschaftlern, Ökologen und Klimatologen bestätigen. Daher kann jede durch Toxizität verursachte Veränderung viele wichtige Bodenprozesse und die Nahrungskette beeinträchtigen und zum ökologischen Ungleichgewicht führen⁶⁴.

Die Daten deuten darauf hin, dass Mikroplastik sich aufgrund seiner geringen Größe, seiner großen spezifischen Fläche, seiner hohen Hydrophobizität und seiner Widerstandsfähigkeit gegenüber biologischem Abbau schnell an der Bodenoberfläche absetzen kann⁶⁵. Dies begünstigt seine leichte Aufnahme durch Organismen und die Anreicherung in ihnen, was eine potenzielle Gefahr für die menschliche Gesundheit darstellt. Dieser Prozess ist nicht auf die Bodenschicht beschränkt, sondern erstreckt sich auch auf Pflanzen, wo es seine schädliche Wirkung fortsetzt.

MNP in Lebensmitteln

Anthropogene Schadstoffe können erhebliche Auswirkungen auf Ökosysteme haben, insbesondere wenn sie von Pflanzen aufgenommen werden.

⁶¹Ng, E.-L. et al. An overview of microplastic and nanoplastic pollution in agroecosystems. *Science of The Total Environment* 627, 1377–1388 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.01.341>

⁶²Al Malki, J. S., Hussien, N. A., Tantawy, E. M., Khattab, Y. & Mohammadein, A. Terrestrial Biota as Bioindicators for Microplastics and Potentially Toxic Elements. *Coatings* 11, 1152 (2021). <https://doi.org/10.3390/coatings11101152>

⁶³Kiyama, Y., Miyahara, K. & Ohshima, Y. Active uptake of artificial particles in the nematode *Caenorhabditis elegans*. *Journal of Experimental Biology* 215, 1178–1183 (2012). <https://doi.org/10.1242/jeb.067199>

⁶⁴Al Malki, J. S., Hussien, N. A., Tantawy, E. M., Khattab, Y. & Mohammadein, A. Terrestrial Biota as Bioindicators for Microplastics and Potentially Toxic Elements. *Coatings* 11, 1152 (2021). <https://doi.org/10.3390/coatings11101152>

⁶⁵Sajjad, M. et al. Microplastics in the soil environment: A critical review. *Environmental Technology & Innovation* 27, 102408 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.eti.2022.102408>

Es hat sich bestätigt, dass MNP absorbiert und zu verschiedenen Pflanzenteilen transportiert werden kann. Forschungen deuten darauf hin, dass sich Mikroplastik über verschiedene Wege in Pflanzensystemen anreichert, und dadurch Pflanzen, landwirtschaftliche Kulturen und Lebensmittel beeinträchtigt.

Nanoplastik ist aufgrund seiner geringen Größe in der Lage, direkt in das Pflanzengewebe einzudringen⁶⁶. Pflanzen nehmen Nanoplastik aus der Nährstoffumgebung auf, und es wird dann durch das Xylem, ein System leitender Gefäße, die Wasser und Nährstoffe von den Wurzeln zu den Stängeln und Blättern transportieren, zu den oberirdischen Teilen transportiert.

Mikroplastik, das sich auf den Blättern absetzt, dringt durch die Spaltöffnungen ein und kann über die Gefäßbündel zu den Wurzeln gelangen. Sowohl Mikro- als auch Nanoplastik hat toxische Wirkung auf physiologische Prozesse und enzymatische Aktivitäten von Nutzpflanzen⁶⁷ (Abb. 20).

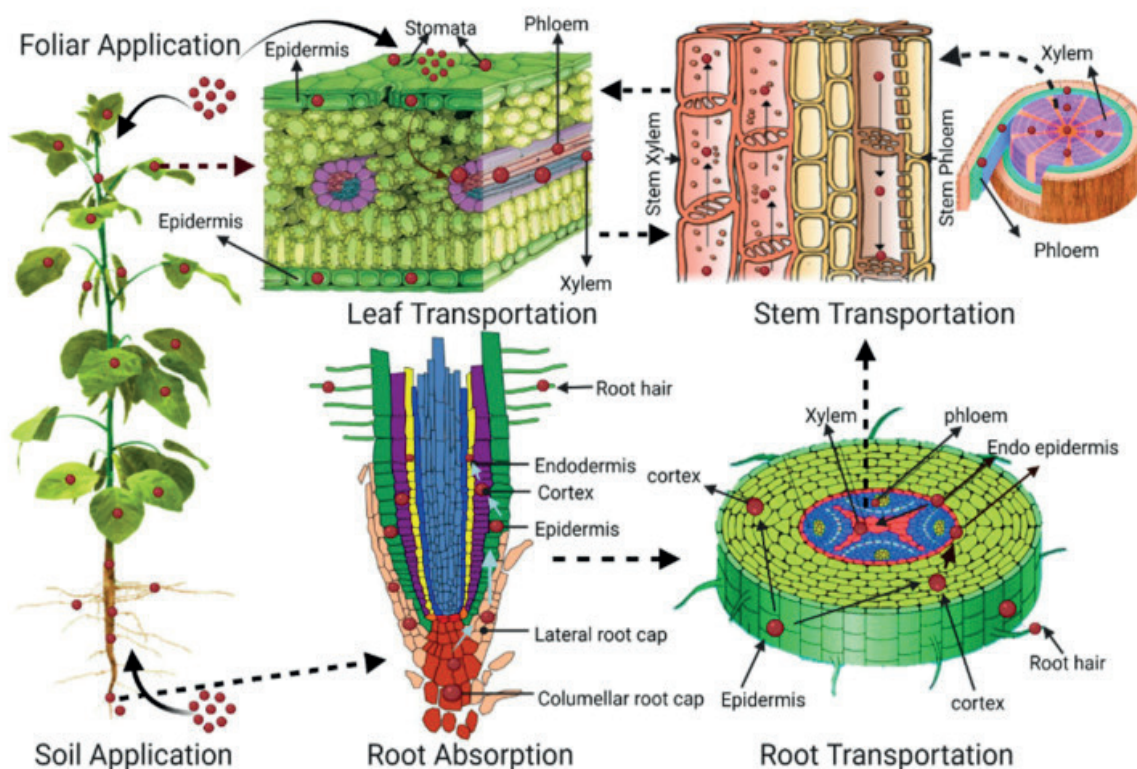


Abbildung 20. Mechanismen der Aufnahme von Mikro- und Nanoplastik durch Pflanzen.

Mechanismus der Aufnahme von Plastik durch Pflanzen, wenn es durch die Wurzel aus dem Boden aufgenommen wird; Transportwege von der Wurzel zum Stamm sowie Transport vom Stamm zu Blättern und Früchten. Blattapplikation zeigt das Eindringen von Plastik durch Stomata der Blätter und den anschließenden Transport zu anderen Pflanzenteilen. Der durchgezogene Pfeil zeigt die Eintrittsmöglichkeit des Plastiks für die Pflanze an, der gestrichelte Pfeil den Transport innerhalb der Pflanze.

Quelle: Azeem, I. et al. Uptake and Accumulation of Nano/Microplastics in Plants: A Critical Review. *Nanomaterials* 11, 2935 (2021). <https://doi.org/10.3390/nano11112935>

⁶⁶Hasan, M. M. et al. Impact of microplastics on terrestrial ecosystems: A plant-centric perspective. *Environmental Pollution and Management* 1, 223–234 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.epm.2024.11.002>

⁶⁷Azeem, I. et al. Uptake and Accumulation of Nano/Microplastics in Plants: A Critical Review. *Nanomaterials* 11, 2935 (2021). <https://doi.org/10.3390/nano11112935>

Das Wassertransportsystem in Pflanzen ist in der Lage, Nanoplastik schnell in Stängel, Blätter und möglicherweise Früchte zu transportieren. Untersuchungen an Tabakpflanzen (*Nicotiana tabacum*) zeigen, dass Nanoplastik mit einer Größe von 100 nm nicht in die Pflanzenzellen eindringt, während Partikel mit einer Größe von 20 bis 40 nm ungehindert von den Pflanzenzellen aufgenommen werden⁶⁸.

Darüber hinaus haben manche Plastikpartikel eigene Oberflächenladungen, die ihre Adsorption in Pflanzenwurzeln durch elektrostatische Anziehung verstärken und die Nährstoffmobilisierung oder Photosyntheseprozesse beeinträchtigen können⁶⁹. Die Wahrscheinlichkeit, in die Wurzelrinde einzudringen, ist für negativ geladene Mikroplastikpartikel größer⁷⁰. In Agrarökosystemen, die stark mit Plastikpartikeln verunreinigt sind, kommt es zu einer Verlangsamung des Pflanzenwachstums⁷¹ und der Pflanzenentwicklung sowie zu kurzfristigen und vorübergehenden Auswirkungen auf die Keimungsgeschwindigkeit und die Wurzelentwicklung⁷².

Untersuchungen bestätigen das Vorhandensein von Mikroplastik in handelsüblichem Honig, der sowohl industriell als auch lokal hergestellt wird. Anschließende Analysen ergaben ein breites Vorkommen von Mikroplastik in den Blüten verschiedener Pflanzenarten^{73, 74}.

Der Zustand der Bienenpopulationen hat sich in den letzten Jahren weltweit dramatisch verschlechtert. Forschungsergebnisse deuten darauf hin, dass eine unterschätzte Ursache hierfür die Umweltverschmutzung durch Mikroplastik (MP) und Nanoplastik (NP) sein könnte. Forschungen haben gezeigt, dass Bienen Mikroplastik aus der Luft, dem Wasser, den Pflanzen und dem Boden "einsammeln" und dann in den Bienenstock tragen. Bienen sammeln Nektar und Pollen von Pflanzen sowie Wasser aus natürlichen Quellen und alle diese Milieus enthalten bereits Mikroplastik. Die Borsten am Körper der Bienen dienen als "Fänger" für die Partikel. Plastikpartikel sammeln sich auch an den Beinen an, besonders in den Falten und zwischen den Segmenten, da die Beine mit Pflanzenoberflächen, Erde, Wasser sowie mit dem Bienenstock in Berührung kommen.



*"Die Honigbiene ist ein sehr guter biologischer Indikator für die Umweltverschmutzung, weil sie allorts präsent ist, mit Borsten bedeckt ist, die Verunreinigungen und Partikel aus der Luft abfangen, empfindlich auf Schadstoffe reagiert, sehr mobil ist und einen großen Flugradius hat."*⁷⁵

⁶⁸Bandmann, V., Müller, J. D., Köhler, T. & Homann, U. Uptake of fluorescent nano beads into BY2-cells involves clathrin-dependent and clathrin-independent endocytosis. *FEBS Letters* 586, 3626–3632 (2012). <https://doi.org/10.1016/j.febslet.2012.08.008>

⁶⁹Lian, J. et al. Do polystyrene nanoplastics affect the toxicity of cadmium to wheat (*Triticum aestivum* L.)? *Environmental Pollution* 263, 114498 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114498>

⁷⁰Li, W. et al. Uptake and effect of carboxyl-modified polystyrene microplastics on cotton plants. *Journal of Hazardous Materials* 466, 133581 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.133581>

⁷¹Azeem, I. et al. Uptake and Accumulation of Nano/Microplastics in Plants: A Critical Review. *Nanomaterials* 11, 2935 (2021). <https://doi.org/10.3390/nano11112935>

⁷²Bosker, T., Bouwman, L. J., Brun, N. R., Behrens, P. & Vijver, M. G. Microplastics accumulate on pores in seed capsule and delay germination and root growth of the terrestrial vascular plant *Lepidium sativum*. *Chemosphere* 226, 774–781 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.03.163>

⁷³Liebezeit, G. & and Liebezeit, E. Non-pollen particulates in honey and sugar. *Food Additives & Contaminants: Part A* 30, 2136–2140, 2013. <https://doi.org/10.1080/19440049.2013.843025>

⁷⁴Basaran, B. et al. Microplastics in honey from Türkiye: Occurrence, characteristic, human exposure, and risk assessment. *Journal of Food Composition and Analysis* 135, 106646 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2024.106646>

⁷⁵Alma, A. M., de Groot, G. S. & Buteler, M. Microplastics incorporated by honeybees from food are transferred to honey, wax and larvae. *Environmental Pollution* 320, 121078 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.121078>

Mikro- und Nanoplastik gelangt in den Bienenkörper auch durch die Kutikula (äußere Körperhülle). Einmal im Bienenkörper angekommen, dauert es drei Tage, bis die Plastikpartikel das Gehirn erreichen, was zu einer Beeinträchtigung des Gedächtnisses, der Orientierung und der kognitiven Funktionen führt, die für die Nahrungssuche und Navigation entscheidend sind. Die Wirkung von Mikroplastik auf das Gehirn führt auch zu vermindertem Erinnerungsvermögen. Dies ist von entscheidender Bedeutung, da Bienen sich an vertrauten Orientierungspunkten im Raum orientieren. Nanoplastik im Gehirn der Bienen führt auch dazu, dass sie sich nicht mehr merken können, wo sich Nektarquellen befinden, schlechter auf Blütendüfte reagieren und den Weg zurück zum Bienenstock nicht mehr finden. Diese kognitiven Störungen verringern unmittelbar die Bestäubungsleistung und können das gesamte Bienenvolk destabilisieren⁷⁶.

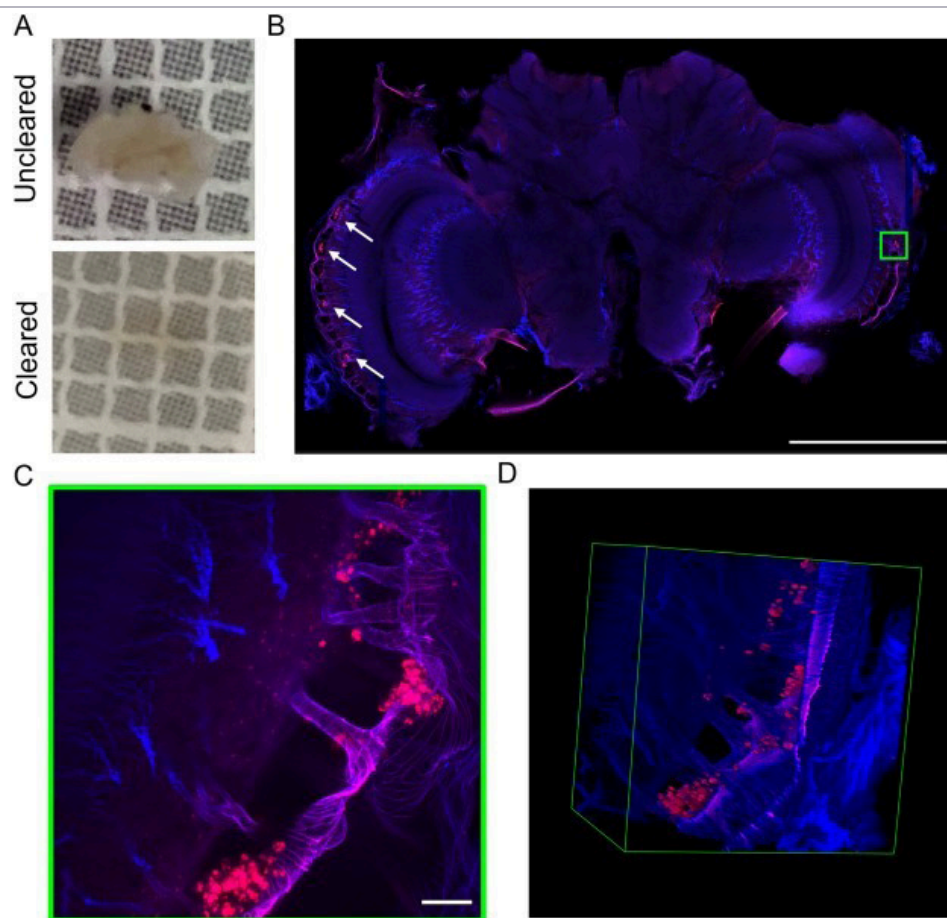


Abbildung 21. Nachweis signifikanter Mengen von Mikroplastik im Gehirn von Honigbienen.

A) Fotos des seziierten Gehirns vor und nach der iDISCO-Beleuchtung.

B) Einzelner optischer Schnitt (~200 µm Tiefe) einer 3D-Rekonstruktion des gesamten Gehirns, erstellt mit Hilfe der Zwei-Photonen-Fluoreszenzmikroskopie mit einem 10×-Objektiv, mit einer Auflösung von $0,51 \times 0,51 \times 2 \mu\text{m}^3$. In Blau dargestellt ist die Autofluoreszenz des Gewebes, in Rot dargestellt ist Mikroplastik mit roter Fluoreszenz (gekennzeichnet durch weiße Pfeile). Maßstabsleiste: 1000 µm.

(C) Hochauflösender Ausschnitt der grün markierten Region aus dem Bild B, aufgenommen mit einem 63×-Objektiv. Das Bild ist eine Maximalintensitätsprojektion einer 150 µm tiefen Schichtreihe mit einer Auflösung von $0,17 \times 0,17 \times 1 \mu\text{m}^3$. Maßstabsleiste: 20 µm.

(D) 3D-Visualisierung der in C dargestellten Schichtreihe. Abmessungen: $170 \times 170 \times 150 \mu\text{m}^3$.

Quelle: Pasquini, E. et al. Microplastics reach the brain and interfere with honey bee cognition. Science of The Total Environment 912, 169362 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169362>

⁷⁶Pasquini, E. et al. Microplastics reach the brain and interfere with honey bee cognition. Science of The Total Environment 912, 169362 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169362>

Durch das Eindringen in den Körper der Biene verursacht das Nanoplastik auch Darmschäden, schwächt das Immunsystem und erhöht die Anfälligkeit für Viren, was zum Tod von Bienen führen kann, selbst wenn keine akute Plastiktoxizität vorliegt^{75, 77}. Darüber hinaus reichern sich Plastikfragmente nicht nur in Bienen, sondern auch in Honig, Wachs und Larven an, wodurch ein geschlossener Kreislauf der Plastikverschmutzung im Bienenstock entsteht⁷⁵.

Dies hat potenziell schwerwiegende Folgen nicht nur für die Bienen, sondern auch für die Nahrungsmittelsicherheit. Bienen sind die wichtigsten Bestäuber und ihr Rückgang wirkt sich direkt auf die Ernteerträge aus.

Hirnschäden, Gewichtsverlust und Schwächung des Immunsystems führen zu einer verminderten Bestäubungsaktivität, die laut Warnungen von Wissenschaftlern die Krise der weltweiten Nahrungsmittelproduktion verschärfen kann⁷⁷. Bienen fungieren als aktive Bioindikatoren für Umweltverschmutzung, und Mikroplastik wird bereits in beträchtlichen Mengen in Honig gefunden, unabhängig vom Herkunftsland⁷⁸.

Außerdem verringert die Belastung durch Mikroplastik den Gesamtchlorophyllgehalt um 5,63-17,42 %, was zu einem Verlust der weltweiten Produktion von Reis, Weizen und Mais führt. Dieser Verlust beläuft sich auf 4,11-13,52 % des Gesamtjahresertrages dieser Kulturen weltweit, was erhebliche Auswirkungen auf die Lebensmittelsicherheit hat⁷⁹.

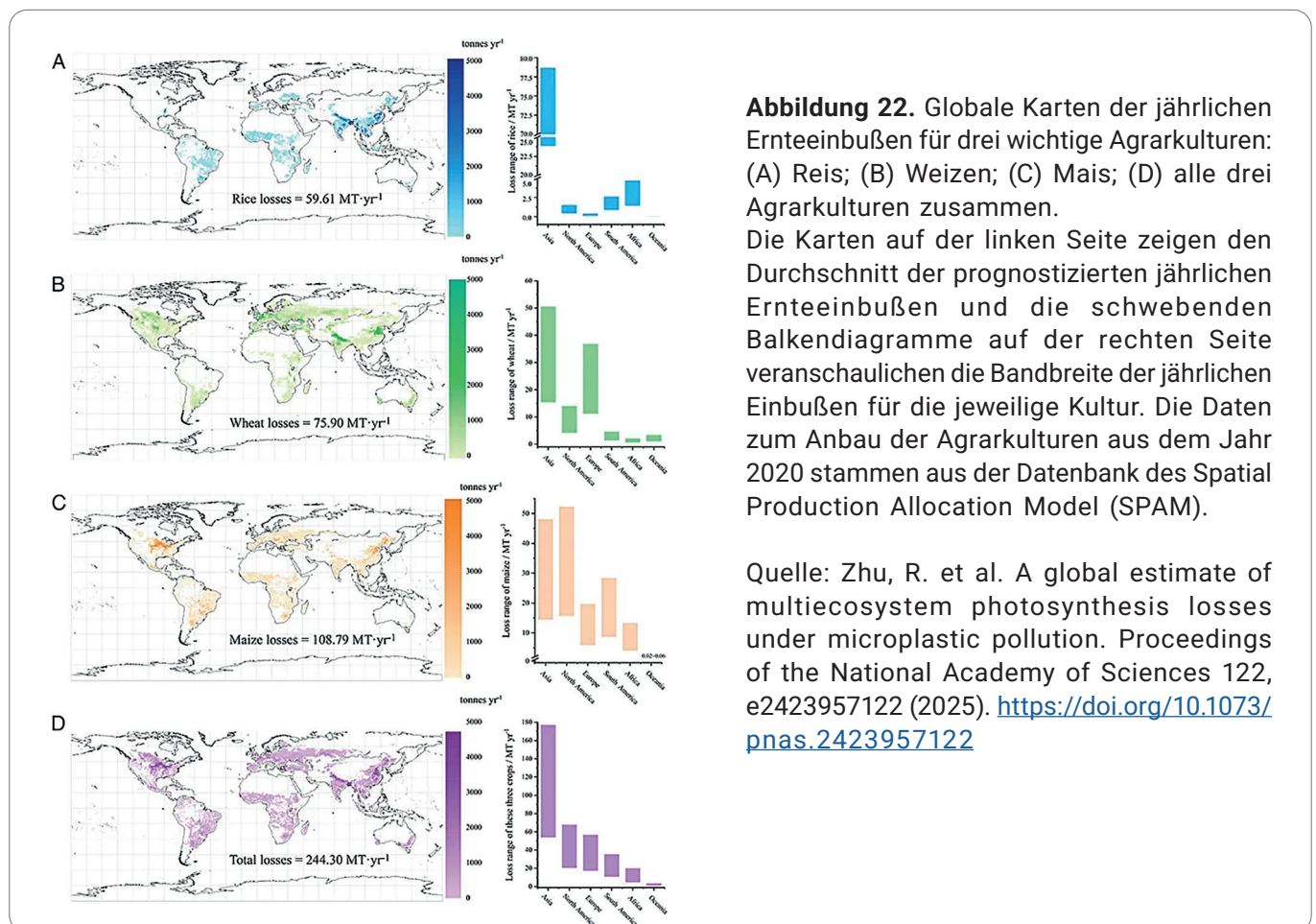


Abbildung 22. Globale Karten der jährlichen Ernteeinbußen für drei wichtige Agrarkulturen: (A) Reis; (B) Weizen; (C) Mais; (D) alle drei Agrarkulturen zusammen.

Die Karten auf der linken Seite zeigen den Durchschnitt der prognostizierten jährlichen Ernteeinbußen und die schwebenden Balkendiagramme auf der rechten Seite veranschaulichen die Bandbreite der jährlichen Einbußen für die jeweilige Kultur. Die Daten zum Anbau der Agrarkulturen aus dem Jahr 2020 stammen aus der Datenbank des Spatial Production Allocation Model (SPAM).

Quelle: Zhu, R. et al. A global estimate of multiccosystem photosynthesis losses under microplastic pollution. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 122, e2423957122 (2025). <https://doi.org/10.1073/pnas.2423957122>

⁷⁷Sheng, D., Jing, S., He, X., Klein, A.-M., Köhler, H.-R. & Wanger, T. C. Plastic pollution in agricultural landscapes: an overlooked threat to pollination, biocontrol and food security. *Nature Communications* 15, 8413 (2024).

⁷⁸Al Naggar, Y. A., Sayes, C. M., Collom, J. C., Ayorinde, T., Qi, S., El-Seedi, H. R., Paxton, R. J. & Wang, K. Chronic exposure to polystyrene microplastic fragments has no effect on honey bee survival, but reduces feeding rate and body weight. *Toxics* 11, 100 (2023)

⁷⁹Zhu, R. et al. A global estimate of multiccosystem photosynthesis losses under microplastic pollution. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 122, e2423957122 (2025). <https://doi.org/10.1073/pnas.2423957122>

Wälder als Akkumulatoren von MNP

Analysen ergaben das Vorhandensein von Nanoplastik in Wurzeln, Stängeln, Blättern und Nadeln über alle untersuchten Konzentrationen und Zeitintervalle hinweg. Die Konzentrationen von Nanoplastik in den Wurzeln waren mindestens 10-mal höher als in den oberirdischen Teilen.

Die Verschmutzung durch Plastik wirkt sich negativ auf die Funktionsweise sowohl immergrüner Nadel- als auch Laubbaumarten aus, verursacht oxidativen Stress und verringert die Effizienz der Photosynthese, was zu einem verlangsamten Wachstum und sogar zum Absterben der Pflanze führen kann. Untersuchungen zeigen, dass Störungen in den Phasen der Photosynthese zu einer Akkumulation von überschüssiger Lichtenergie führen, die, ohne in chemische Energie umgewandelt zu werden, photooxidativen Stress und Schäden am Pflanzengewebe verursacht. Um sich zu schützen, aktivieren die Pflanzen photoprotektive Mechanismen, bei denen die Carotinoide die überschüssige Energie in Form von Wärme abstrahlen⁸⁰.

Durch die Störung der Photosynthese, die Verursachung von oxidativem Stress und die Verringerung der physiologischen Aktivität der Pflanzen erhöht die Plastikverschmutzung die Anfälligkeit der Ökosysteme gegenüber Klimaveränderungen. Diese Ergebnisse verdeutlichen das Ausmaß der Auswirkungen der Plastikverschmutzung auf Pflanzengemeinschaften, was wiederum Fragen zu den Auswirkungen auf Landtiere aufwirft, die von diesen Ökosystemen abhängen.

Wie Nanoplastik die Fauna zerstört

Zahlreiche Untersuchungen zeigten, dass die Anhäufung von Mikro- und Nanoplastik in der Umwelt, auch in Pflanzen, Auswirkungen auf die Entwicklung der Viehbestände hat⁸¹ und sich auf die Nahrungsketten und die Tiergesundheit auswirkt. Beobachtungen in einem Milchviehbetrieb in Italien zeigten, dass alle Heuproben von Weidelgras Mikroplastik enthielten⁸². Bei einer Untersuchung in Indien wurde in 100 % der Futterproben für Milchkühe eine Verunreinigung mit Mikroplastik aus Polyethylenterephthalat festgestellt, wobei die Konzentrationen zwischen 89 und 326 µg/kg lagen⁸³.

Analysen bestätigten das Vorhandensein von Mikroplastik in der Follikelflüssigkeit von Rindern⁸⁴, in Milch⁸⁵, Schafkot⁸⁶, Fleisch und Blut von Tieren⁸⁷, was auf eine erhebliche Belastung von Wiederkäuern hinweist. Die Daten deuten darauf hin, dass 50 - 60 % der Fremdkörper, die in geschlachteten Tieren⁸⁸, einschließlich kleiner Wiederkäuer wie Ziegen und Schafe, gefunden wurden, aus Kunststoff bestehen. Außerdem wurde Mikroplastik in den inneren Geweben von städtischen Hunden und Katzen⁸⁹, in den Därmen von Hausenten⁹⁰ und im Lungengewebe von Schweinen gefunden⁹¹.

⁸⁰Murazzi, M. E., Pradel, A., Schefer, R. B., Gessler, A. & Mitrano, D. M. Uptake and physiological impacts of nanoplastics in trees with divergent water use strategies. *Environ. Sci.: Nano* 11, 3574–3584 (2024). <https://doi.org/10.1039/D4EN00286E>

⁸¹Borreani, G. & Tabacco, E. 9 - Plastics in Animal Production. in *A Guide to the Manufacture, Performance, and Potential of Plastics in Agriculture* (ed. Orzolek, M. D.) 145–185 (Elsevier, 2017). <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102170-5.00009-9>

⁸²Glorio Patrucco, S., Rivoira, L., Bruzzoniti, M. C., Barbera, S. & Tassone, S. Development and application of a novel extraction protocol for the monitoring of microplastic contamination in widely consumed ruminant feeds. *Science of The Total Environment* 947, 174493 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.174493>

⁸³Maganti, S. S. & Akkina, R. C. Detection and characterisation of microplastics in animal feed. *ojafr* 13, 348–356 (2023). <https://doi.org/10.51227/ojafr.2023.50>

Diese Untersuchungen bestätigen, dass Mikroplastik für Tiere nicht nur an sich schädlich ist, sondern auch durch die bei der Herstellung verwendeten Zusatzstoffe und durch Schadstoffe, die das Plastik aus der Umwelt absorbiert, wodurch Schäden im unterschiedlichen Ausmaß verursacht werden⁹². Beobachtungen zeigen, dass Mikroplastik bei Tieren toxische Wirkungen hervorruft, darunter oxidativen Stress, Darmschäden, Immuntoxizität sowie Reproduktionstoxizität und Neurotoxizität⁹³ (Abb. 23). Darüber hinaus fungiert Mikroplastik als Träger für Schadstoffe wie Schwermetalle, Antibiotika, persistente organische Verbindungen und Pestizide, was die potenziellen Risiken für Ökosysteme, Gesundheit der Tiere und Menschen erhöht⁹⁴.

⁸⁴Grechi, N. et al. Microplastics are present in women's and cows' follicular fluid and polystyrene microplastics compromise bovine oocyte function in vitro. *eLife* 12, (2023). <https://doi.org/10.7554/eLife.86791.1>

⁸⁵Da Costa Filho, P. A. et al. Detection and characterization of small-sized microplastics ($\geq 5 \mu\text{m}$) in milk products. *Sci Rep* 11, 24046 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41598-021-03458-7>

⁸⁶Beriot, N., Peek, J., Zornoza, R., Geissen, V. & Huerta Lwanga, E. Low density-microplastics detected in sheep faeces and soil: A case study from the intensive vegetable farming in Southeast Spain. *Science of The Total Environment* 755, 142653 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142653>

⁸⁷van der Veen, I., van Mourik, L.M., van Velzen, M.J.M., Groenewoud, Q.R., & Leslie, H.A. Plastic particles in livestock feed, milk, meat and blood: A pilot study. Report EH22-01, 29 April 2022. <https://vakbladvoedingsindustrie.nl/storage/app/media/Rapporten/rapporten%202022/07-juli/VOE-2022-JUL-PLASTICSOUF.pdf> (Abgerufen am 01.05.2025)

⁸⁸Galyon, H. et al. Long-term in situ ruminal degradation of biodegradable polymers in Holstein dairy cattle. *JDS Communications* 4, 70–74 (2023). <https://doi.org/10.3168/jdsc.2022-0319>

⁸⁹Prata, J. C. et al. Microplastics in Internal Tissues of Companion Animals from Urban Environments. *Animals* 12, 1979 (2022). <https://doi.org/10.3390/ani12151979>

⁹⁰Susanti, R., Yuniastuti, A. & Fibriana, F. The Evidence of Microplastic Contamination in Central Javanese Local Ducks from Intensive Animal Husbandry. *Water Air Soil Pollut* 232, 178 (2021). <https://doi.org/10.1007/s11270-021-05142-y>

⁹¹Li, H. et al. Detection of microplastics in domestic and fetal pigs' lung tissue in natural environment: A preliminary study. *Environmental Research* 216, 114623 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.114623>

⁹²Brennecke, D., Duarte, B., Paiva, F., Caçador, I. & Canning-Clode, J. Microplastics as vector for heavy metal contamination from the marine environment. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 178, 189–195 (2016). <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2015.12.003>

⁹³Su, M. et al. Toxicity Mechanisms of Microplastic and Its Effects on Ruminant Production: A Review. *Biomolecules* 15, 462 (2025). <https://doi.org/10.3390/biom15040462>

⁹⁴Campanale, C., Massarelli, C., Savino, I., Locaputo, V. & Uricchio, V. F. A Detailed Review Study on Potential Effects of Microplastics and Additives of Concern on Human Health. *IJERPH* 17, 1212 (2020). <https://doi.org/10.3390/ijerph17041212>

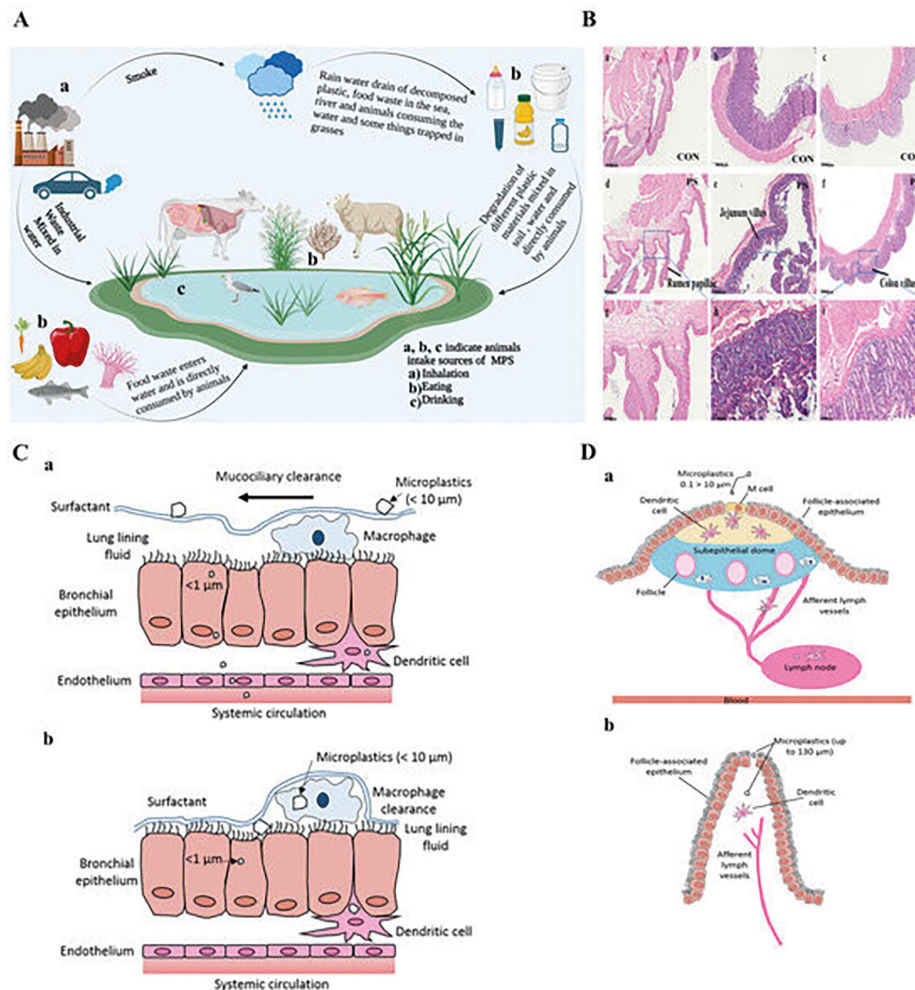


Abbildung 23. Schematische Darstellung der Aufnahmewege von Mikroplastik bei Tieren und dessen Auswirkungen auf ihren Gastrointestinaltrakt.

(A) Wege der Aufnahme von Mikroplastik (MP) in den Organismus von Tieren.

(B) Zustand des Gastrointestinaltrakts vor und nach der Exposition mit Polystyrol-Partikeln.

Mit Hämatoxylin-Eosin (H&E) gefärbte Gewebeproben des Pansens (a), des Dünndarms (b) und des Dickdarms (c) in der Kontrollgruppe (CON group).

(d) Mit H&E gefärbte Gewebeprobe des Pansens der Gruppe nach der Zufuhr von kleinen Polystyrol-Partikeln (S-PS).

(e) Mit H&E gefärbte Gewebeprobe des Jejunums der Gruppe nach der Zufuhr von großen Polystyrol-Partikeln (L-PS).

(f) Mit H&E gefärbte Gewebeprobe des Dickdarms der Gruppe nach der Zufuhr von großen Polystyrol-Partikeln (L-PS).

(g-i) Partiiell vergrößerte Bilder, die jeweils den Abbildungen (d–f) entsprechen.

(C) Mögliche Mechanismen der Aufnahme und Ausscheidung von Mikroplastik (im Größenbereich von 0,1 bis 10 µm) in der Lunge:

(a) Es besteht ein geringeres Risiko, dass Lungenflüssigkeiten (Surfactant und Schleim) Mikroplastikpartikel in die unteren Atemwege (Zentralbereich der Lunge) verlagern, wo die Lungenmembran dicker ist. Die Ziliarschleimhaut (Mukosa) transportiert Partikeln >1 µm ab. Partikel <1 µm können über das Epithel aufgenommen werden.

(b) Wenn sich das Mikroplastik aufgrund seines aerodynamischen Durchmessers tief in der Lunge absetzen kann, kann es eine dünnere Schicht der Lungenflüssigkeit durchdringen und mit dem Epithel in Kontakt kommen, wo es sich durch Diffusion oder aktive zelluläre Aufnahme ausbreitet.

(D) Mögliche Wege der Aufnahme von Mikroplastik aus dem Gastrointestinaltrakt (GIT):

(a) Aufnahme von Mikroplastik (mit einer Größe von 0,1 bis 10 µm) aus dem Lumen des Gastrointestinaltrakts durch Endozytose über die Peyer'schen M-Zellen der Sammellymphknoten. Die M-Zellen selektieren und transportieren die Partikel aus dem Darmlumen in das lymphatische Gewebe der Schleimhaut.

(b) Mikroplastik wird durch parazelluläre Absorption aus dem Darmlumen aufgenommen. Nicht abbaubare Partikel wie Mikroplastik können durch schwache Verbindungsstellen im einschichtigen Epithel mechanisch in das darunter liegende Gewebe aufgenommen werden. Dendritische Zellen sind in der Lage, diese Partikel aufzufangen und sie zu den darunter liegenden Lymphgefäßen und Venen zu transportieren. Sie können in sekundären Geweben, einschließlich Leber, Muskeln und Gehirn, transportiert werden.

Quelle: Su, M. et al. Toxicity Mechanisms of Microplastic and Its Effects on Ruminant Production: A Review. Biomolecules 15, 462 (2025). <https://doi.org/10.3390/biom15040462>

Ergebnisse aus Beobachtungen deuten darauf hin, dass wilde Tiere Kunststoffabfälle mit Nahrung verwechseln. Dies führt dazu, dass sich Kunststoffabfälle in ihrem Darm ansammeln. In Simbabwe⁹⁵ und Sri Lanka⁹⁶ verendeten Elefanten, die sich auf offenen Mülldeponien aufhielten, durch Ingestion von Plastik.. Im japanischen Nara-Park starben wilde Hirsche an Komplikationen, verursacht durch den Verzehr von Kunststoffabfällen, die von Touristen zurückgelassen wurden⁹⁷. Eine Untersuchung von mehr als 30 000 Kamelen in der Nähe von Dubai in den Vereinigten Arabischen Emiraten ergab, dass 1 Prozent der Tiere vermutlich an Plastik, das sich in ihrem Verdauungstrakt angesammelt hatte, starben⁹⁸.

Wissenschaftler führten den Begriff "Polybezoar" ein, um eine dichte Masse unverdaulicher Materialien wie Plastik, Seile, Abfall und Salzablagerungen zu beschreiben, die ein steinartiges Konkrement im Magen oder Darm bilden, insbesondere bei Wiederkäuern. Der Begriff setzt sich aus "poly" (viele) und "bezoar" (steinartiges Gebilde) zusammen. Beobachtungen bestätigen, dass Polybezoare zum Verschluss des Gastrointestinaltrakts, Sepsis durch bakterielle Überwucherung, Dehydrierung und Unterernährung führen (Abb. 24).

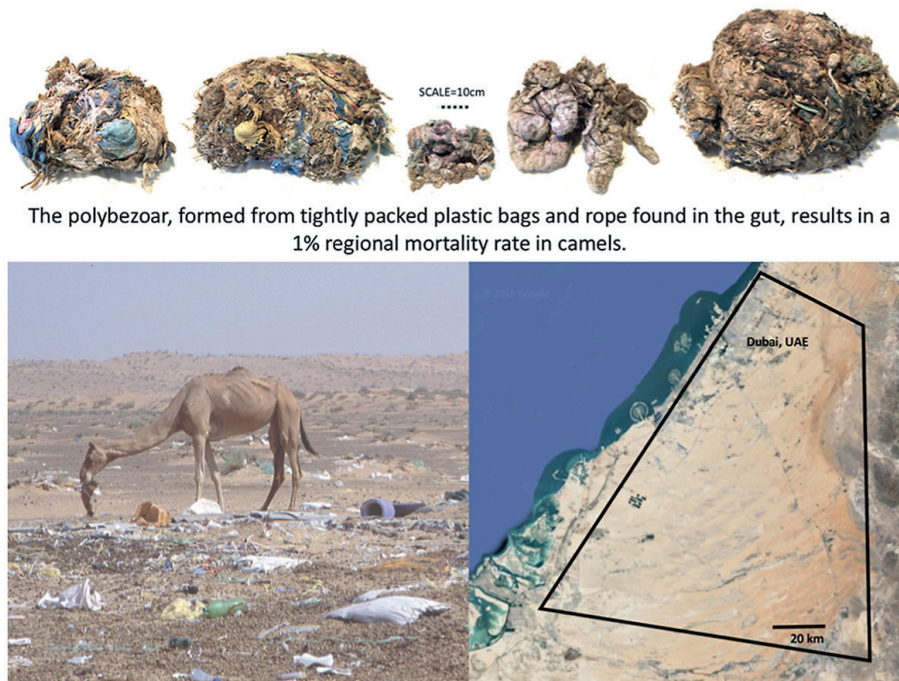


Abbildung 24. Polybezoare, die in toten Kamelen in der Wüste in der Nähe von Dubai gefunden wurden. Das größte Exemplar, das in der neuen Untersuchung analysiert wurde, wog fast 64 kg (141 Pfund).

Quelle: Eriksen, M., Lusher, A., Nixon, M. & Wernery, U. The plight of camels eating plastic waste. Journal of Arid Environments 185, 104374 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2020.104374>

⁹⁵Breton, J. L. Visitation patterns of African elephants (*Loxodonta africana*) to a rubbish dumpsite in Victoria Falls, Zimbabwe. *Pachyderm* 60, 45–54 (2019). <https://doi.org/10.69649/pachyderm.v60i.30>

⁹⁶Animal Survival International. Sri Lankan Elephants Die After Eating Plastic From Rubbish Dumps. (2020) <https://animalsurvival.org/habitat-loss/sri-lankan-elephants-die-after-eating-plastic-from-rubbish-dumps> (Abgerufen am 01.05.2025)

⁹⁷Agence France-Presse. Japan's famous Nara deer dying from eating plastic bags. *The Guardian*. <https://www.theguardian.com/world/2019/jul/10/japans-famous-nara-deer-dying-from-eating-plastic-bags> (Abgerufen am 01.05.2025)

⁹⁸Eriksen, M., Lusher, A., Nixon, M. & Wernery, U. The plight of camels eating plastic waste. *Journal of Arid Environments* 185, 104374 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2020.104374>

Übertragung von MNP über die Nahrungsketten vom Plankton zum Menschen

Die Anhäufung von Kunststoff im Meer hat erhebliche negative Auswirkungen auf die Meeresökosysteme. Wissenschaftliche Beobachtungen der letzten vier Jahrzehnte haben Mikroplastik in praktisch allen marinen Lebensräumen weltweit nachgewiesen⁹⁹. Untersuchungen bestätigen, dass Kunststoffmüll die biologische Vielfalt der Meere bedroht und mindestens 690 Arten, darunter Wale, Tümmler, Seevögel, Schildkröten, Fische und Krustentiere, sind davon betroffen¹⁰⁰. Durch die Aufnahme von Plastik sind die Tiere zusätzlichen Giftstoffen ausgesetzt. Chemikalien aus Kunststoffen gelangen nach dem Verzehr in den Körper und wandern über die Nahrungskette von der Beute zum Räuber. Die Folgen des Verfangens oder Verschluckens reichen von letal bis subletal und führen zu Ernährungsstörungen, Verdauungsproblemen, Unterernährung, Krankheiten, verminderter Fortpflanzungsfähigkeit, verzögertem Wachstum und verkürzter Lebenserwartung¹⁰¹. Aufgrund seiner geringen Größe wird Mikroplastik vom Plankton aufgenommen, einem wichtigen Glied in der marinen Nahrungskette. Plankton wird von vielen Meereslebewesen verzehrt, und diejenigen, die sich nicht direkt davon ernähren, fressen Organismen, die sich vom Plankton ernähren. Auf diese Weise wird Mikroplastik in die Nahrungsketten integriert (Abb. 25-26).

Im Jahr 1999 ergab eine Analyse von Oberflächenwasserproben im Nordpazifikwirbel, dass die Masse des Plastiks die Masse des Zooplanktons, der Hauptnahrungsquelle des Ökosystems, um das Sechsfache überstieg¹⁰², was unterstreicht, dass es mehr Plastik im Ozean gibt als Lebewesen.

Berechnungen auf der Grundlage von Beobachtungsdaten zeigen, dass die Konzentration von Mikroplastik mit der Fischgröße zunimmt. Die Daten zeigen, dass das größte Tier, der Wal, täglich bis zu 43,6 kg Plastik aufnimmt, wobei 98,5 Prozent dieser Menge über die Nahrung und nicht direkt aus dem Wasser kommen, da Mikroplastik bereits in den Beutefischen enthalten ist¹⁰³.

⁹⁹Ivar Do Sul, J. A. & Costa, M. F. The present and future of microplastic pollution in the marine environment. *Environmental Pollution* 185, 352–364 (2014). <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.10.036>

¹⁰⁰O'Hanlon, N. J., James, N. A., Masden, E. A. & Bond, A. L. Seabirds and marine plastic debris in the northeastern Atlantic: A synthesis and recommendations for monitoring and research. *Environmental Pollution* 231, 1291–1301 (2017). <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.08.101>

¹⁰¹Ocean Blue Project. Plastic Pollution in the Ocean: How Many Animals Die from Pollution? (2021) <https://oceanblueproject.org/wp-content/uploads/2023/02/how-many-animals-die-from-plastic-pollution-ocean-blue-report.pdf> (Abgerufen am 01.05.2025).

¹⁰²Moore, C. J., Moore, S. L., Leecaster, M. K. & Weisberg, S. B. A Comparison of Plastic and Plankton in the North Pacific Central Gyre. *Marine Pollution Bulletin* 42, 1297–1300 (2001). [https://doi.org/10.1016/S0025-326X\(01\)00114-X](https://doi.org/10.1016/S0025-326X(01)00114-X)

¹⁰³Kahane-Rapport, S. R. et al. Field measurements reveal exposure risk to microplastic ingestion by filter-feeding megafauna. *Nat Commun* 13, 6327 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41467-022-33334-5>

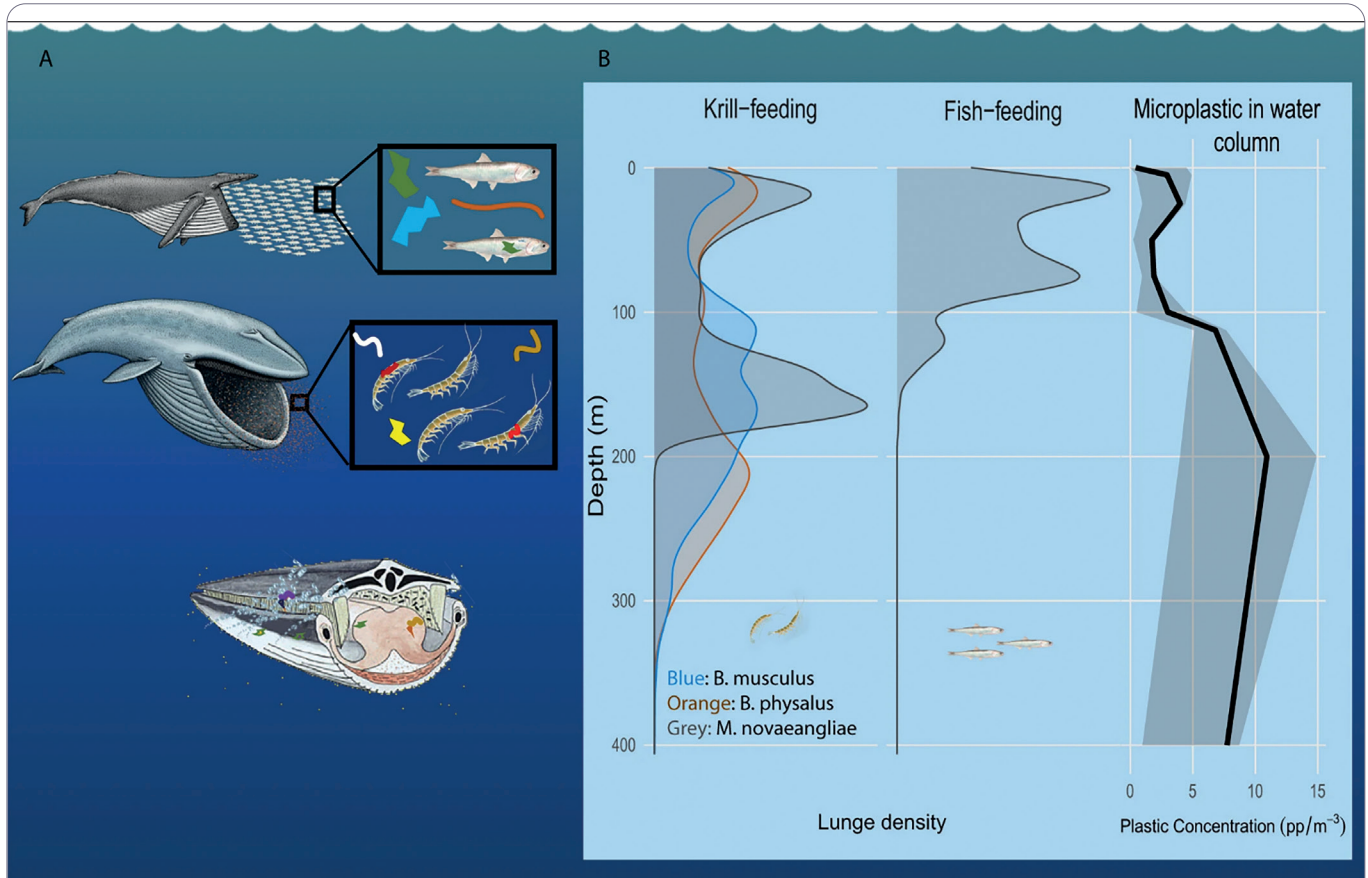


Abbildung 25. Tiefe der Nahrungssuche von Finnwalen bezogen auf Konzentration von Mikroplastik in der Wassersäule.

a - Von Walen pro Tag aufgenommenes Plastik, modelliert als Summe (i) des aus dem Wasser gefilterten Plastiks pro Tag und (ii) des von der Beute verzehrten Plastiks pro Tag. Die Spanne des möglichen Risikos der Plastikaufnahme: niedrig, mittel und hoch, da einige Variablen auf unvollständigen Daten basieren; b - Tiefe des Fallouts aus der Monterey Bay, der dem Tiefenprofil der Konzentration von Plastik in der Monterey Bay entspricht. Die Wale und Beutetiere wurden von Alex Boersma illustriert, und das Schnitt-Filtrationsdiagramm wurde von Scott Landry vom Centre for Coastal Studies erstellt.

Quelle: Kahane-Rapport, S. R. et al. Field measurements reveal exposure risk to microplastic ingestion by filter-feeding megafauna. Nat Commun 13, 6327 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41467-022-33334-5>

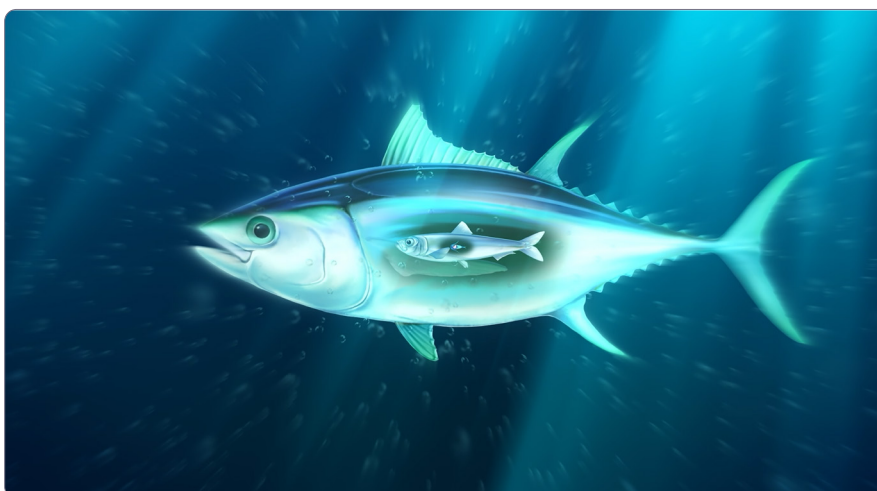


Abbildung 26. Schematische Darstellung des Eindringens von Plastik in Nahrungsketten

Plastik tötet Meeresorganismen

Durch die Verschmutzung sterben jedes Jahr etwa 1 Million Seevögel und 100 000 Meeressäuger¹⁰⁴. Beobachtungen bestätigen den Zusammenhang zwischen verschluckten Abfällen und der Sterblichkeit von Seevögeln. Eine Untersuchung von 1 733 Exemplaren aus 51 Arten ergab, dass 557 Vögel (32,1 %) Meeresmüll in sich trugen, der zwischen 1 und 40 Gegenstände mit einem Höchstgewicht von 3 340 mg und einem Volumen von 3 621 mm³ umfasste¹⁰⁵.

Außerdem wurde nachgewiesen, dass einige Kunststoffe Dimethylsulfid freisetzen – eine Chemikalie, die das olfaktorische Signal nachahmt, mit dem Seevögel Nahrung identifizieren¹⁰⁶. Neue Forschungen ergaben außerdem, dass die Plastikaufnahme bei Küken zu Nieren-, Leber- und Magenschäden sowie zu Hirnschäden führt, die der Alzheimer-Krankheit ähneln. Dies unterstreicht die verheerenden Auswirkungen der Plastikverschmutzung auf die Meeresfauna¹⁰⁷. Kunststoffpartikel wurden in allen sieben Schildkrötenarten in drei Ozeanbecken gefunden¹⁰⁸ (Abb. 27).

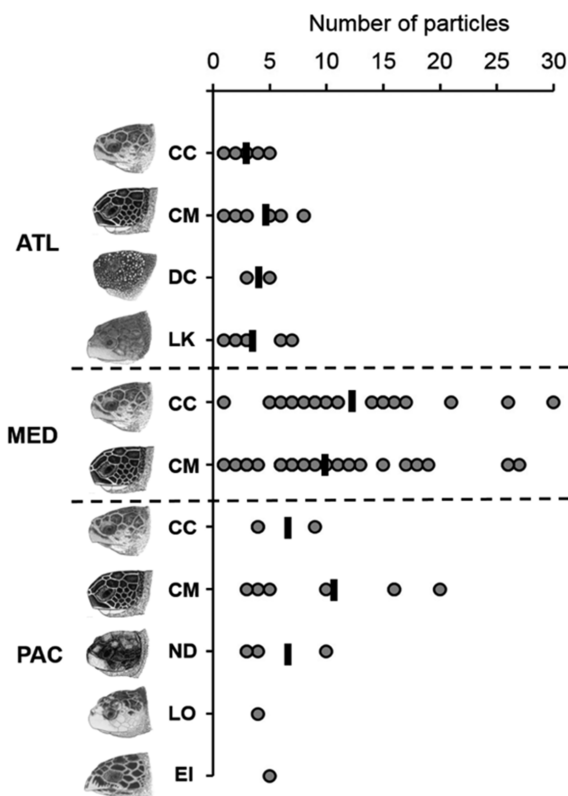


Abbildung 27. Aufnahme von synthetischen Mikropartikeln durch alle Meeresschildkrötenarten aus drei Ozeanbecken. Gesamtzahl der in jeder 100-ml-Teilprobe identifizierten Partikel für jede Art in jedem Ozeanbecken. Die schwarze Linie zeigt die durchschnittliche Anzahl der Partikel. Die Abbildungen der Köpfe von Seeschildkröten wurden mit Genehmigung von WIDECAST verwendet; die Originalzeichnungen stammen von Tom McFarland.

Quelle: Duncan, E. M. et al. Microplastic ingestion ubiquitous in marine turtles. *Global Change Biology* 25, 744–752 (2019). <https://doi.org/10.1111/gcb.14519>

¹⁰⁴WWF-Australia. How many birds die from plastic pollution? <https://www.wwf.org.au/blogs/how-many-birds-die-from-plastic-pollution> (Abgerufen am 01.05.2025)

¹⁰⁵Roman, L., Hardesty, B. D., Hindell, M. A. & Wilcox, C. A quantitative analysis linking seabird mortality and marine debris ingestion. *Sci Rep* 9, 3202 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41598-018-36585-9>

¹⁰⁶Savoca, M. S., Wohlfel, M. E., Ebeler, S. E. & Nevitt, G. A. Marine plastic debris emits a keystone infochemical for olfactory foraging seabirds. *Sci. Adv.* 2, e1600395 (2016). <https://doi.org/10.1126/sciadv.1600395>

¹⁰⁷De Jersey, A. M. et al. Seabirds in crisis: Plastic ingestion induces proteomic signatures of multiorgan failure and neurodegeneration. *Sci. Adv.* 11, eads0834 (2025). <https://doi.org/10.1126/sciadv.ads0834>

¹⁰⁸Duncan, E. M. et al. Microplastic ingestion ubiquitous in marine turtles. *Global Change Biology* 25, 744–752 (2019). <https://doi.org/10.1111/gcb.14519>

Untersuchungen von 171 774 Exemplaren von 555 Meeresfischarten zeigen, dass 386 Fischarten, darunter 210 kommerziell bedeutende Arten, Plastikmüll verzehren¹⁰⁹. Es wurde festgestellt, dass die Häufigkeit der Aufnahme von Mikroplastik durch Fische 26 % beträgt und sich in den letzten zehn Jahren verdoppelt hat (Abb. 28). Analysen ergaben eine positive Korrelation zwischen der Plastikmenge in Oberflächengewässern (Abb. 29) und dessen Verzehr durch Meeresorganismen (Abb. 30).

Laboruntersuchungen zeigen, dass Kunststoffverbindungen, die in die Fischgewebe eindringen, die Aktivität der Fische verringern, die Leberfunktion beeinträchtigen, das Gehirn schädigen, das Wachstum hemmen und die Fortpflanzungsfunktion verschlechtern^{109, 110, 111}.

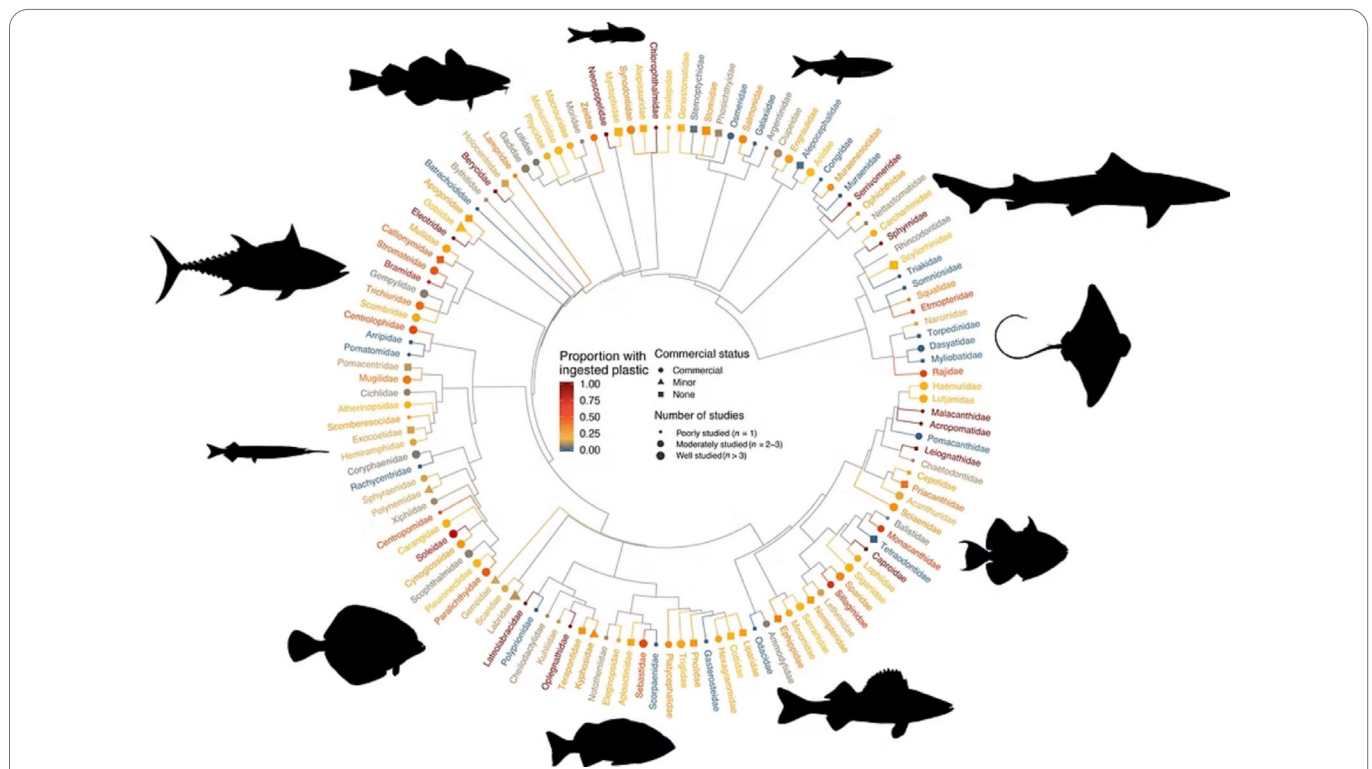


Abbildung 28. Fischfamilien und Aufnahme von Plastik.

Phylogenetische Beziehungen von Meeresfischfamilien ($n = 131$), gefärbt nach der Häufigkeit der Aufnahme von Plastik. Die Form jeder Spitze gibt den Anteil der Arten innerhalb der Familie im Datensatz an, die zu kommerziellen Zwecken gefangen werden (0 – keine zu kommerziellen Zwecken gefangenen Arten; vernachlässigbar – 25 % zu kommerziellen Zwecken gefangene Arten; kommerziell – über 25 % zu kommerziellen Zwecken gefangene Arten). Die Größe des oberen Bereichs gibt die Anzahl der Untersuchungen an, die für Arten dieser Familie durchgeführt wurden. Dadurch werden 15 gut untersuchte Familien ($n > 10$ Exemplare, > 2 Arten) mit Häufigkeit der Plastikaufnahme (Häufigkeit des Vorkommens von Plastik [FO] $> 0,25$) hervorgehoben; 67 Fischfamilien mit dokumentierten Fällen von Verschlucken des Plastiks werden zu kommerziellen Zwecken gefangen.

Quelle: Savoca, M. S., McInturf, A. G. & Hazen, E. L. Plastic ingestion by marine fish is widespread and increasing. *Global Change Biology* 27, 2188–2199 (2021). <https://doi.org/10.1111/gcb.15533>

¹⁰⁹Savoca, M. S., McInturf, A. G. & Hazen, E. L. Plastic ingestion by marine fish is widespread and increasing. *Global Change Biology* 27, 2188–2199 (2021). <https://doi.org/10.1111/gcb.15533>

¹¹⁰Nanthini devi, K., Raju, P., Santhanam, P. & Perumal, P. Impacts of microplastics on marine organisms: Present perspectives and the way forward. *Egyptian Journal of Aquatic Research* 48, 205–209 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.ejar.2022.03.001>

¹¹¹Avio, C. G., Gorb, S. & Regoli, F. Experimental development of a new protocol for extraction and characterization of microplastics in fish tissues: First observations in commercial species from Adriatic Sea. *Marine Environmental Research* 111, 18–26 (2015). <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2015.06.014>

Microplastics in the surface ocean, 1950 to 2050

Our World
in Data

Microplastics are buoyant plastic materials smaller than 0.5 centimeters in diameter. Future global accumulation in the surface ocean is shown under three plastic emissions scenarios: (1) emissions to the oceans stop in 2020; (2) stagnate at 2020 rates; or (3) continue to grow until 2050 in line with historical plastic production rates.

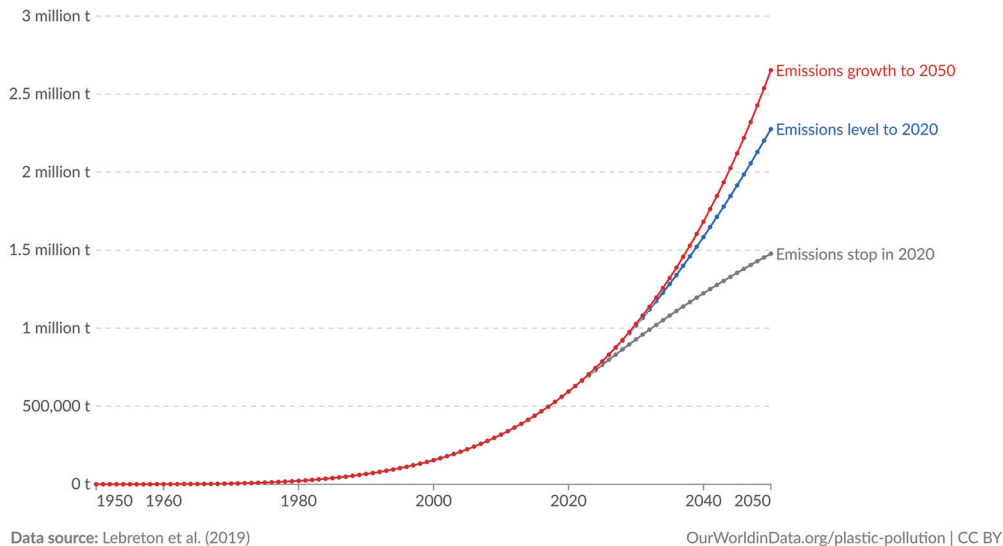


Abbildung 29. Grafik der Zunahme von Mikroplastik an der Ozeanoberfläche mit Prognose bis zum Jahr 2050.

Quelle: <https://ourworldindata.org/grapher/microplastics-in-ocean> (Abgerufen am 01.05.2025)

Datenquelle: Lebreton, L., Egger, M. & Slat, B. A global mass budget for positively buoyant macroplastic debris in the ocean. Sci Rep 9, 12922 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41598-019-49413-5>

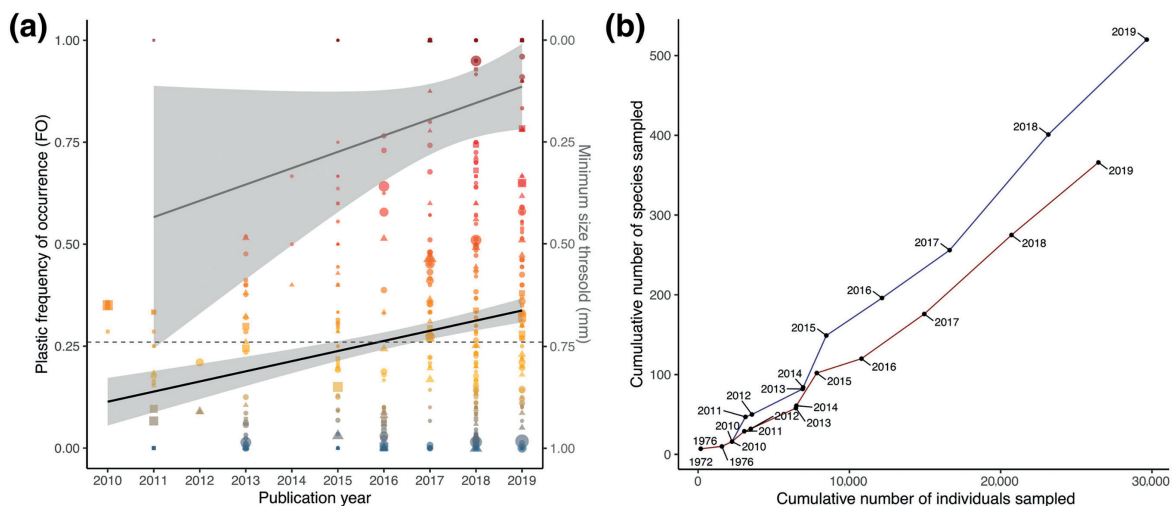


Abbildung 30. Zeitbezogene Trends der Plastikaufnahme durch Fische. (a) Die obere graue Linie zeigt, dass seit 2011 ein Trend zum Nachweis immer kleinerer Partikel besteht. Die untere schwarze Linie zeigt einen Anstieg der Häufigkeit des Vorkommens von Plastik (FO) bei allen Fischarten von 2010 bis 2019. In diesem Zeitraum stieg die Häufigkeit der Plastikaufnahme um 2,4 % pro Jahr deutlich an. Die horizontale gestrichelte Linie stellt eine Häufigkeit des Vorkommens von Plastik (FO) von 0,26 dar, also die durchschnittliche Häufigkeit des Plastikaufnahme von Fischen weltweit. (b) Artenakkumulationskurve, wobei die blaue Linie die kumulative Anzahl der im Laufe der Zeit untersuchten Arten darstellt, einschließlich der Arten, die mit und ohne aufgenommenes Plastik gefunden wurden, und die rote Linie nur die Arten mit aufgenommenem Plastik repräsentiert. Das Fehlen einer Asymptote auf der roten Linie weist auf eine hohe Wahrscheinlichkeit hin, dass es in den kommenden Jahren weitere Arten geben wird, die Plastik aufnehmen werden.

Quelle: Savoca, M. S., McInturf, A. G. & Hazen, E. L. Plastic ingestion by marine fish is widespread and increasing. Global Change Biology 27, 2188–2199 (2021). <https://doi.org/10.1111/gcb.15533>

Korallen in Gefahr: eine mikroskopische Bedrohung von globalem Ausmaß

Die Plastikverschmutzung stellt eine zunehmende Bedrohung für Korallenriffe dar, da Plastik in die Nahrungsketten eindringt und die Ausbreitung von Krankheiten sowie die Zerstörung der Riffgemeinschaften begünstigt. Bei der Analyse wurde in 77 von 84 untersuchten Riffen, einschließlich isolierter Atolle im Zentralpazifik, anthropogen bedingter Müll festgestellt¹¹². Bei fünf der sechs untersuchten Arten wurden negative gesundheitliche Auswirkungen¹¹³ wie Verfärbungen und Gewebsnekrosen nachgewiesen¹¹⁴ (Abb. 31).

Größere Plastikfragmente begünstigen die Übertragung von Krankheiten und mechanische Verletzungen, wodurch die Korallen anfälliger für Krankheitserreger werden¹¹⁵. Diese Einwirkungen beeinträchtigen das Mikrobiom des Skeletts, das eine Schlüsselrolle bei der Erhaltung gesunder Korallenkolonien spielt¹¹⁶ (Abb. 32). Studien zeigen auch, dass Biofilme auf Mikroplastik, sogenannte „Plastisphären“¹¹⁴, eine Dysbiose im Mikrobiom der Korallen verursachen können¹¹⁷.

Der Kontakt mit Plastik erhöht das Risiko von Korallenkrankheiten von 4 % auf 89 % (Abb. 33). Das Absterben von Korallenriffen hat erhebliche Auswirkungen auf den Rückgang der biologischen Vielfalt, da sie Lebensraum für ein Viertel der Meeresarten bieten¹¹⁵.

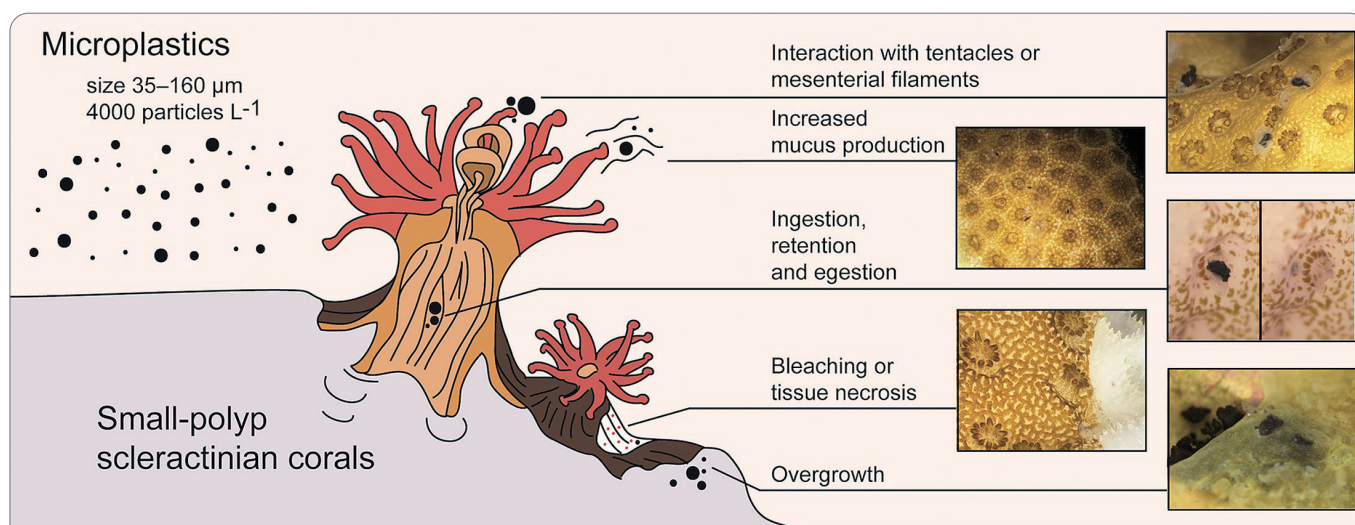


Abbildung 31. Auswirkungen von Plastik auf den Gesundheitszustand von Korallenriffen.

Korallen können auf Kunststoffpartikel mit verschiedenen Schutzmechanismen reagieren (z. B. Ziliartätigkeit, Schleimproduktion oder Gewebeausdehnung), Partikelrückhaltung durch Überwucherung oder Ausscheidung von falsch aufgenommenen Partikeln.

Quelle: Reichert, J., Schellenberg, J., Schubert, P. & Wilke, T. Responses of reef building corals to microplastic exposure. *Environmental Pollution* 237, 955–960 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.11.006>

¹¹²Pinheiro, H. T. et al. Plastic pollution on the world's coral reefs. *Nature* 619, 311–316 (2023). <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06113-5>

¹¹³Reichert, J., Schellenberg, J., Schubert, P. & Wilke, T. Responses of reef building corals to microplastic exposure. *Environmental Pollution* 237, 955–960 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.11.006>

¹¹⁴Pantos, O. Microplastics: impacts on corals and other reef organisms. *Emerging Topics in Life Sciences* 6, 81–93 (2022). <https://doi.org/10.1042/ETLS20210236>

¹¹⁵Lamb, J. B. et al. Plastic waste associated with disease on coral reefs. *Science* 359, 460–462 (2018). <https://doi.org/10.1126/science.aar3320>

¹¹⁶Corinaldesi, C., Canensi, S., Dell'Anno, A. et al. Multiple impacts of microplastics can threaten marine habitat-forming species. *Commun Biol* 4, 431 (2021). <https://doi.org/10.1038/s42003-021-01961-1>

¹¹⁷Lear, G., Kingsbury, J.M., Franchini, S. et al. Plastics and the microbiome: impacts and solutions. *Environmental Microbiome* 16, 2 (2021). <https://doi.org/10.1186/s40793-020-00371-w>

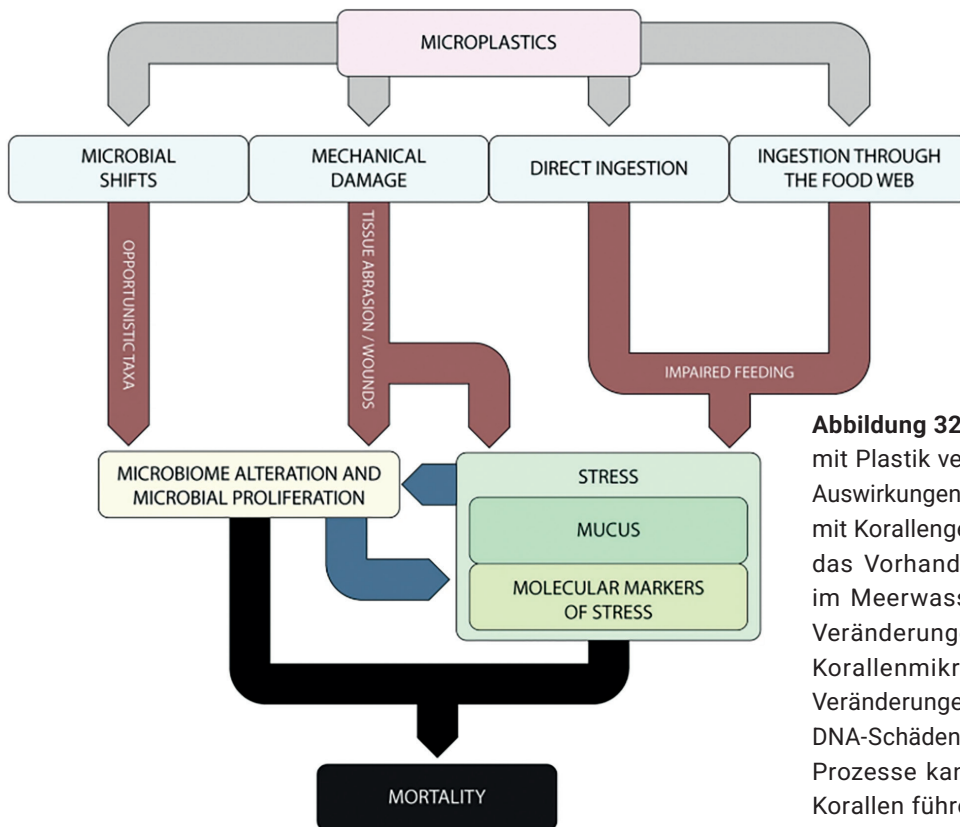


Abbildung 32. Auswirkungen, die durch Kontakt mit Plastik verursacht werden.

Auswirkungen durch Ingestion, physischen Kontakt mit Korallengewebe und mikrobielle Reaktion auf das Vorhandensein von Mikroplastikpartikeln im Meerwasser. Es wurde über nachfolgende Veränderungen in der Zusammensetzung des Korallenmikrobioms und Stress in Form von Veränderungen der Genexpression und oxidativen DNA-Schäden berichtet. Die Kombination all dieser Prozesse kann schließlich zum Absterben der Korallen führen.

Quelle: Canensi, S., Dell'Anno, A. et al. Multiple impacts of microplastics can threaten marine habitat-forming species. *Commun Biol* 4, 431 (2021).

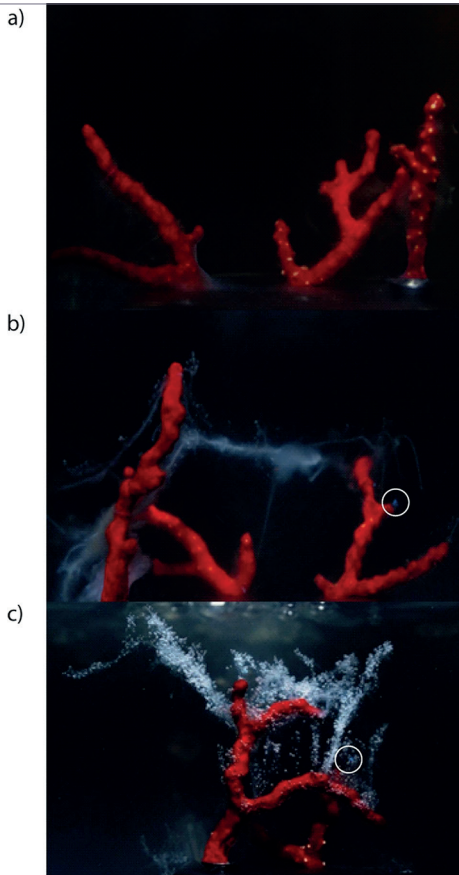


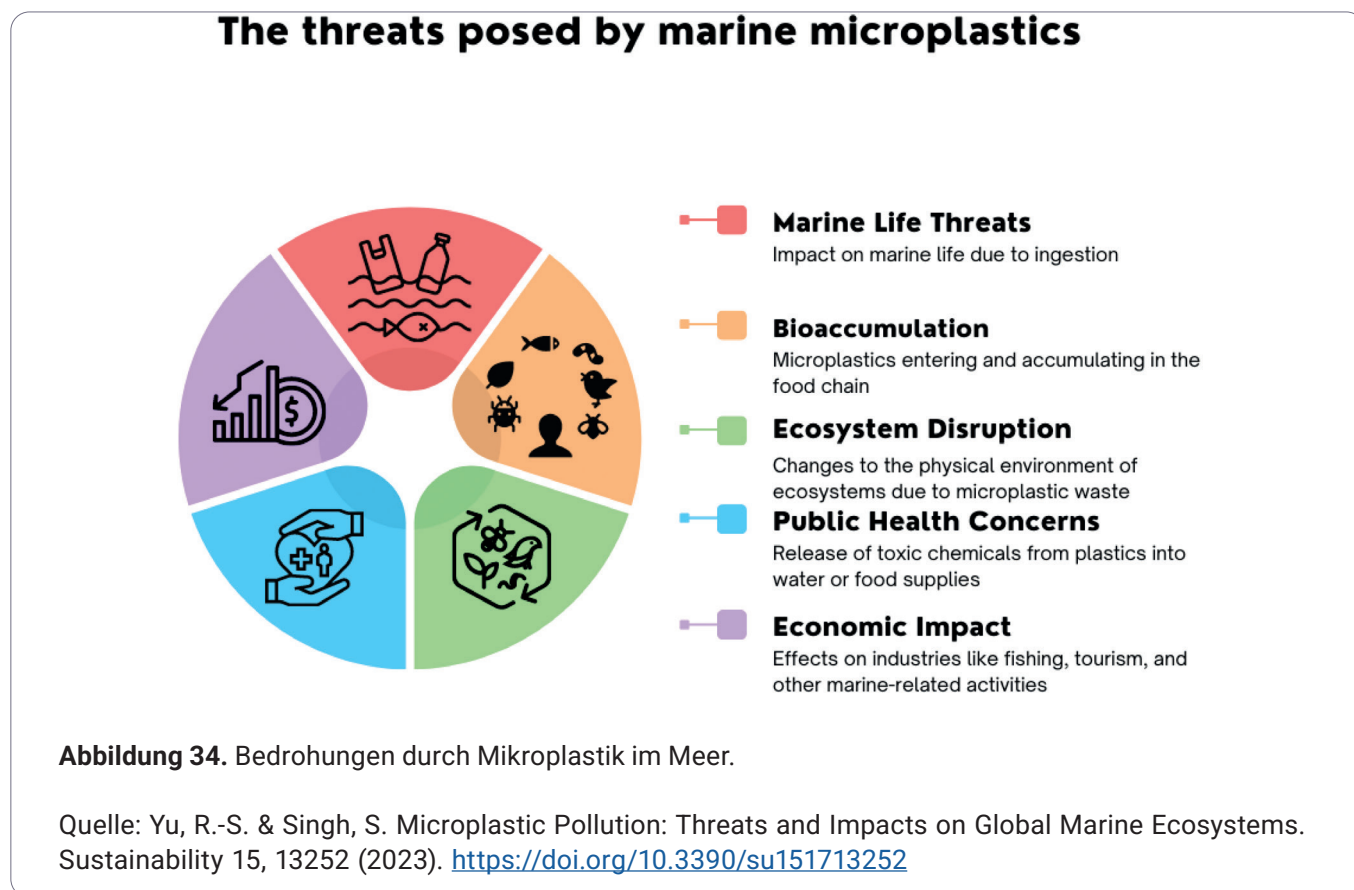
Abbildung 33. Die Schleimsekretion steigt mit zunehmender Konzentration von Mikroplastikpartikeln:

a - geringe, b - mittlere und c - hohe Konzentration von Mikroplastikpartikeln. Die Schleimsekretion steigt mit zunehmender Konzentration von Mikroplastikpartikeln. Weiße Kreise zeigen Mikroplastikpartikel an, die vom Schleim eingeschlossen sind (Polyethylenpartikel).

Quelle: Corinaldesi, C., Canensi, S., Dell'Anno, A. et al. Multiple impacts of microplastics can threaten marine habitat-forming species. *Commun Biol* 4, 431 (2021). <https://doi.org/10.1038/s42003-021-01961-1>

Auswirkungen von MNP auf die Sauerstoffbilanz der Ökosysteme

Beobachtungen zeigen, dass Kunststoffzerfall in der Umwelt hauptsächlich durch Sonnenstrahlung verursacht wird. Dieser Prozess verändert die chemische Zusammensetzung und Struktur der Kunststoffe. Untersuchungen bestätigen, dass sonnenlichtinduzierte Reaktionen die Auslaugung gelöster organischer Verbindungen erhöhen, was die Biogeochemie des Meerwassers beeinflusst und das Wachstum heterotropher Bakterien anregt¹¹⁸ (Abb. 34).



Jahrelange Forschung hat gezeigt, dass die chemischen Verbindungen, die von Kunststoffen bei der Zersetzung ins Meerwasser abgegeben werden, entweder aus dem Material selbst oder aus Zusatzstoffen stammen, die dem Polymer Farbe oder Stabilität verleihen. Einige dieser Verbindungen sind organische Säuren, was ihre Rolle bei der Senkung des pH-Werts erklärt. So verstärkt das Plastik die Versauerung des Ozeans (Abb. 35), und dies wiederum kann das Funktionieren der natürlichen Systeme der Erde erheblich beeinträchtigen¹¹⁹.

¹¹⁸Yu, R.-S. & Singh, S. Microplastic Pollution: Threats and Impacts on Global Marine Ecosystems. Sustainability 15, 13252 (2023). <https://doi.org/10.3390/su151713252>

¹¹⁹Romera-Castillo, C. et al. Abiotic plastic leaching contributes to ocean acidification. Science of The Total Environment 854, 158683 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158683>

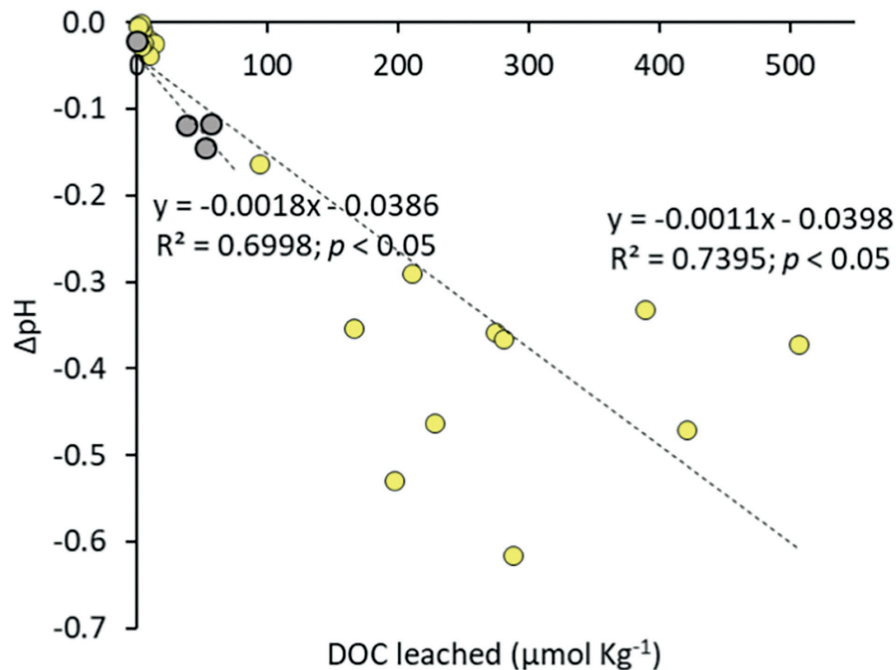


Abbildung 35. Die Beziehungen zwischen pH-Änderung und dem gelösten organischen Kohlenstoff (DOC), das aus Kunststoff ausgelaugt wurde, sind für jede einzelne wiederholte Probe aller Experimente auf das Diagramm aufgetragen. Kontrollproben ohne Kunststoff für jeden Versuch sind ebenfalls einbezogen. Die gelben Punkte entsprechen den bestrahlten Anwendungen und die grauen Punkte entsprechen den dunklen Anwendungen.

Quelle: Romera-Castillo, C. et al. Abiotic plastic leaching contributes to ocean acidification. Science of The Total Environment 854, 158683 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158683>



"Dank dieser Forschung konnten wir nachweisen, dass die Zersetzung von Plastik in stark mit Plastik verschmutzten Bereichen der Meeresoberfläche zu einer pH-Absenkung um bis zu 0,5 pH-Einheiten führen wird, was mit der pH-Absenkung vergleichbar ist, die in den schlimmsten Szenarien der anthropogenen Emissionen bis zum Ende des 21. Jahrhunderts erwartet wird", erklärt Cristina Romera-Castillo, Forscherin am Institut für Meereswissenschaften (ICM-CSIC) (Abb. 36)¹²⁰.

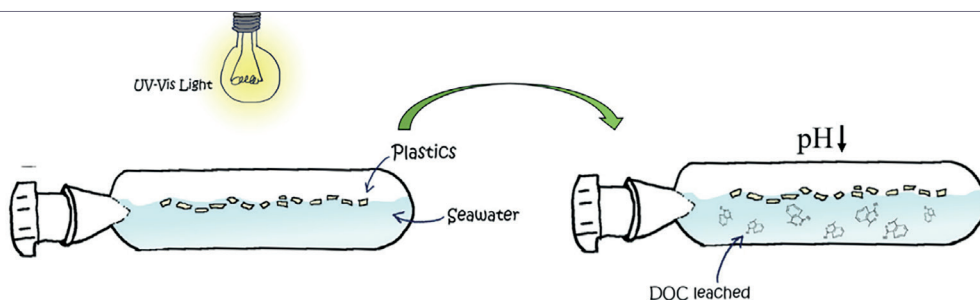


Abbildung 36. Die Auslaugung von Kunststoffen kann den pH-Wert des Meerwassers um bis zu 0,5 Einheiten senken.

Quelle: Romera-Castillo, C. et al. Abiotic plastic leaching contributes to ocean acidification. Science of The Total Environment 854, 158683 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158683>

¹²⁰Institute of Marine Sciences (ICM-CSIC). Plastic degradation in the ocean contributes to its acidification. <https://www.icm.csic.es/en/news/plastic-degradation-ocean-contributes-its-acidification> (Abgerufen am 01.05.2025)

Die Versauerung des Ozeans ist eine Störung der Meeresumwelt, eine anhaltende und zunehmende Umweltbelastung¹²¹. Die Folgen für die Ökosysteme entfalten sich über Jahrzehnte, Jahrhunderte und darüber hinaus. Beobachtungen bestätigen den Rückgang der biologischen Vielfalt in Küstensystemen aufgrund des sinkenden pH-Werts^{122, 123}. Dies verringert die Widerstandsfähigkeit der Ökosysteme und gefährdet wichtige Funktionen wie Lebensräume, Nährstoffkreislauf und Kohlenstoffspeicherung¹²³.

Untersuchungen zeigen, dass Muscheln (*Mytilus edulis*) bei einer Versauerung des Ozeans langsamer wachsen und geringere Überlebensraten aufweisen (Abb. 37). Dadurch verringert sich ihr Bestand und damit auch das Vermögen, Wasser zu filtern und die Qualität der Küstenumwelt zu erhalten¹²⁴.

Die aktuellen pH-Werte an der Meeresoberfläche sind beispiellos für die letzten 26 000 Jahre¹²⁵. Dieser Prozess hat erhebliche Auswirkungen auf Korallenriffe, Tiefsee-Ökosysteme und Wasserökosysteme in hohen Breiten, die von einzigartigen Arten abhängen. Diese Arten spielen eine unverzichtbare Rolle und ihr Aussterben stört wichtige Ökosystemfunktionen, da es keine analogen Arten gibt, die sie ersetzen könnten¹²⁶.

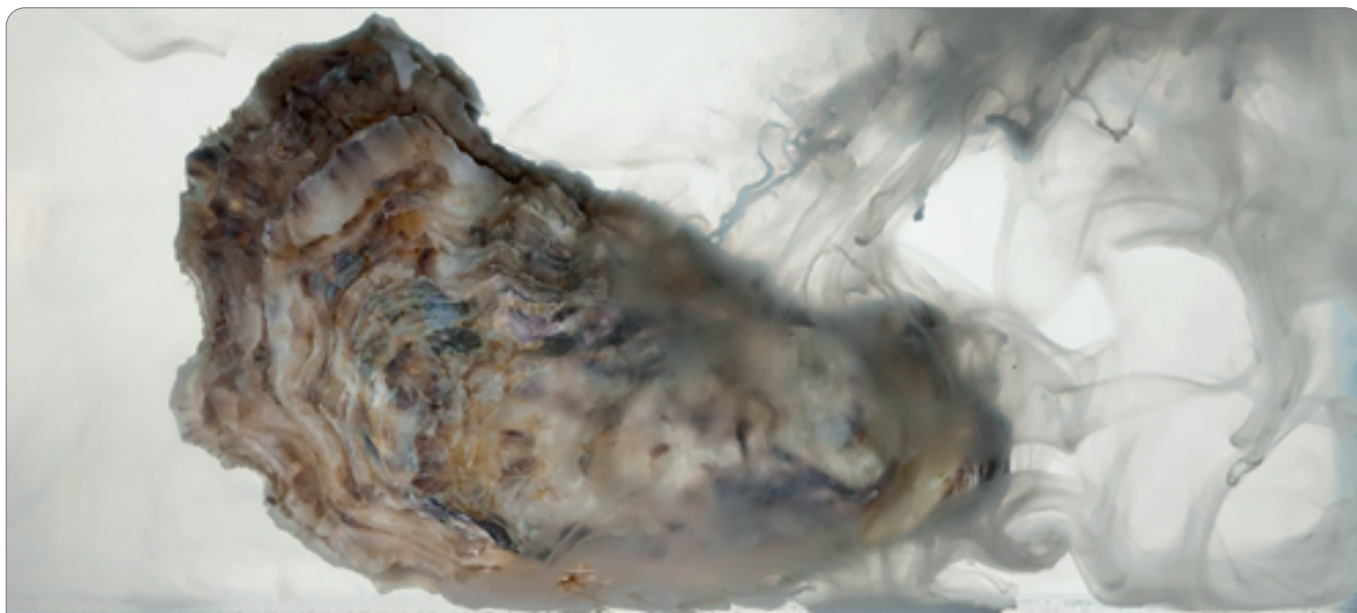


Abbildung 37: Eine pazifische Auster in der Austernzucht Whiskey Creek in Oregon lässt trübe Spermaflüssigkeit aus. In einigen Küstengewässern hat die Versauerung bereits ein ernstes Ausmaß erreicht; hier sind dadurch die Zuchterträge um die Hälfte gesunken, da das Wachstum der Austernlarven sich verlangsamte.

Quelle: <https://www.nationalgeographic.com/magazine/article/ocean-acidification>

¹²¹Scott C. Doney, D. Shallin Busch, Sarah R. Cooley and Kristy J. Kroeker. The Impacts of Ocean Acidification on Marine Ecosystems and Reliant Human Communities. Annual Review of Environment and Resources 45, 83–112 (2020). <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-012320-083019>

¹²²Hall-Spencer, J. M. & Harvey, B. P. Ocean acidification impacts on coastal ecosystem services due to habitat degradation. Emerging Topics in Life Sciences 3, 197–206 (2019). <https://doi.org/10.1042/ETLS20180117>

¹²³James P. Barry, Stephen Widdicombe, and Jason M. Hall-Spencer. Effects of ocean acidification on marine biodiversity and ecosystem function. Ocean acidification, edited by Jean-Pierre Gattuso, Lina Hansson. Oxford, Oxford University Press, 2011. <https://books.google.com.ua/books?id=8yjNFxkALjIC&pg=PA192>

¹²⁴Broszeit, S., Hattam, C. & Beaumont, N. Bioremediation of waste under ocean acidification: Reviewing the role of *Mytilus edulis*. Marine Pollution Bulletin 103, 5–14 (2016). <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.12.040>

¹²⁵The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Climate Change 2021: The Physical Science Basis. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1> (Abgerufen am 01.05.2025)

¹²⁶James P. Barry, Stephen Widdicombe, and Jason M. Hall-Spencer. Effects of ocean acidification on marine biodiversity and ecosystem function. Ocean acidification, edited by Jean-Pierre Gattuso, Lina Hansson. Oxford, Oxford University Press, 2011. <https://books.google.com.ua/books?id=8yjNFxkALjIC&pg=PA192>

Die Zahl der Austern und Muscheln nimmt entlang von Gradienten mit sinkender Karbonat-Sättigung deutlich ab. Die Versauerung der Ozeane kann den Bestand an Austern und die Ökosystemleistungen, die sie in freier Wildbahn erbringen, verringern und auch ihre Qualität als Meeresfrüchte verschlechtern.

Untersuchungen bestätigen signifikante negative Auswirkungen von Mikroplastik auf biologische Parameter von Mikroalgen wie Wachstum¹²⁷, Chlorophyllgehalt, photosynthetische Aktivität und Gehalt an reaktiven Sauerstoffspezies^{128, 129}.

Der Forschung zufolge führt die Mikroplastikbelastung bei Meeres- und Süßwasseralgen zu einem globalen Rückgang der Photosynthese um 7,05-12,12 %¹³⁰. Die Photosynthese ist bekanntlich der wichtigste Prozess auf der Erde, bei dem molekularer Sauerstoff (O₂) entsteht, der an die Atmosphäre abgegeben wird.

Darüber hinaus verändert Mikroplastik in Meeressedimenten die mikrobiellen Gemeinschaften und stört den Stickstoffkreislauf, wodurch vom Menschen verursachte Probleme wie toxische Algenblüten potentiell verschlimmert werden. Veränderungen in den Plankton-Gemeinschaften an der Meeresoberfläche können die Deoxygenierung (Verringerung des Sauerstoffgehaltes im Wasser) verstärken und Meeresorganismen den Sauerstoff entziehen¹³¹.

Die Daten zeigen, dass der Ozean zwischen 1960 und 2010 2 % seines gelösten Sauerstoffs verloren hat, was auf steigende Wassertemperaturen und die Anhäufung von Schadstoffen zurückzuführen ist, darunter Abwässer aus Industrie, Haushalten und Landwirtschaft¹³². Der Rückgang des Sauerstoffgehalts führt zur Bildung von toten Zonen – Bereichen des Ozeans, in denen die Meeresflora und Fauna fast vollständig verschwunden sind. Beobachtungen zeigen, dass es in den 1960er Jahren 45 tote Zonen in den Weltmeeren gab, während die Zahl bis 2011 auf etwa 700 angestiegen ist¹³³. Nach den auf der UNDP-Website veröffentlichten Daten hat sich die Zahl der toten Zonen seit den 1960er Jahren alle zehn Jahre verdoppelt. Ausgehend von diesem Trend kann mit großer Sicherheit davon ausgegangen werden, dass die Zahl im Jahr 2025 auf 1 500 ansteigen kann¹³⁴.

Die Plastikverschmutzung beeinträchtigt viele Prozesse im Erdsystem. Den Forschungen zufolge kann dies akute Umweltprobleme wie den Verlust der biologischen Vielfalt und die Klimaveränderung verschlimmern¹³⁵.

¹²⁷Nanthini devi, K., Raju, P., Santhanam, P. & Perumal, P. Impacts of microplastics on marine organisms: Present perspectives and the way forward. *Egyptian Journal of Aquatic Research* 48, 205–209 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.ejar.2022.03.001>

¹²⁸Wu, Y. et al. Effect of microplastics exposure on the photosynthesis system of freshwater algae. *Journal of Hazardous Materials* 374, 219–227 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.04.039>

¹²⁹Sarkar, P., Xavier, K. A. M., Shukla, S. P. & Rathu Bhuvanewari, G. Nanoplastic exposure inhibits growth, photosynthetic pigment synthesis and oxidative enzymes in microalgae: A new threat to primary producers in aquatic environment. *Journal of Hazardous Materials Advances* 17, 100613 (2025). <https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2025.100613>

¹³⁰Zhu, R. et al. A global estimate of multiccosystem photosynthesis losses under microplastic pollution. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 122, e2423957122 (2025). <https://doi.org/10.1073/pnas.2423957122>

¹³¹Microplastics pose risk to ocean plankton, climate, other key Earth systems. Mongabay. (2023) <https://news.mongabay.com/2023/10/microplastics-pose-risk-to-ocean-plankton-climate-other-key-earth-systems> (Accessed May 1, 2025)

¹³²Bhuiyan, M. M. U. et al. Oxygen decline in the coastal ocean over the twenty-first century: Driving forces, trends, and impacts. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering* 9, 100621 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2024.100621>

¹³³The International Union for Conservation of Nature (IUCN). Ocean deoxygenation. <https://iucn.org/resources/issues-brief/ocean-deoxygenation> (Abgerufen am 01.05.2025)

¹³⁴United Nations Development Programme. Ocean hypoxia: Dead zones. <https://www.undp.org/publications/issue-brief-ocean-hypoxia-dead-zones> (Abgerufen am 01.05.2025)

¹³⁵Villarrubia-Gómez, P., Carney Almroth, B., Eriksen, M., Ryberg, M. & Cornell, S. E. Plastics pollution exacerbates the impacts of all planetary boundaries. *One Earth* 7, 2119–2138 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2024.10.017>

AUSWIRKUNGEN VON MNP AUF DAS KLIMA

Funktionen des Ozeans

Der Ozean spielt eine Schlüsselrolle bei der Aufrechterhaltung des Klimagleichgewichts des Planeten, da er als natürliche „Klimaanlage“ dient. Seine einzigartige Fähigkeit, Wärme zu speichern und allmählich wieder abzugeben, trägt dazu bei, Temperaturschwankungen auf dem Planeten abzumildern. Schon eine zehn Meter dicke Schicht Ozeanwasser kann mehr Wärme aufnehmen als die gesamte Erdatmosphäre (Abb. 38). Dadurch werden Temperaturschwankungen sowohl während der Tages- und Nachtzeiten (Abb. 39) als auch saisonal im Sommer und Winter reduziert.

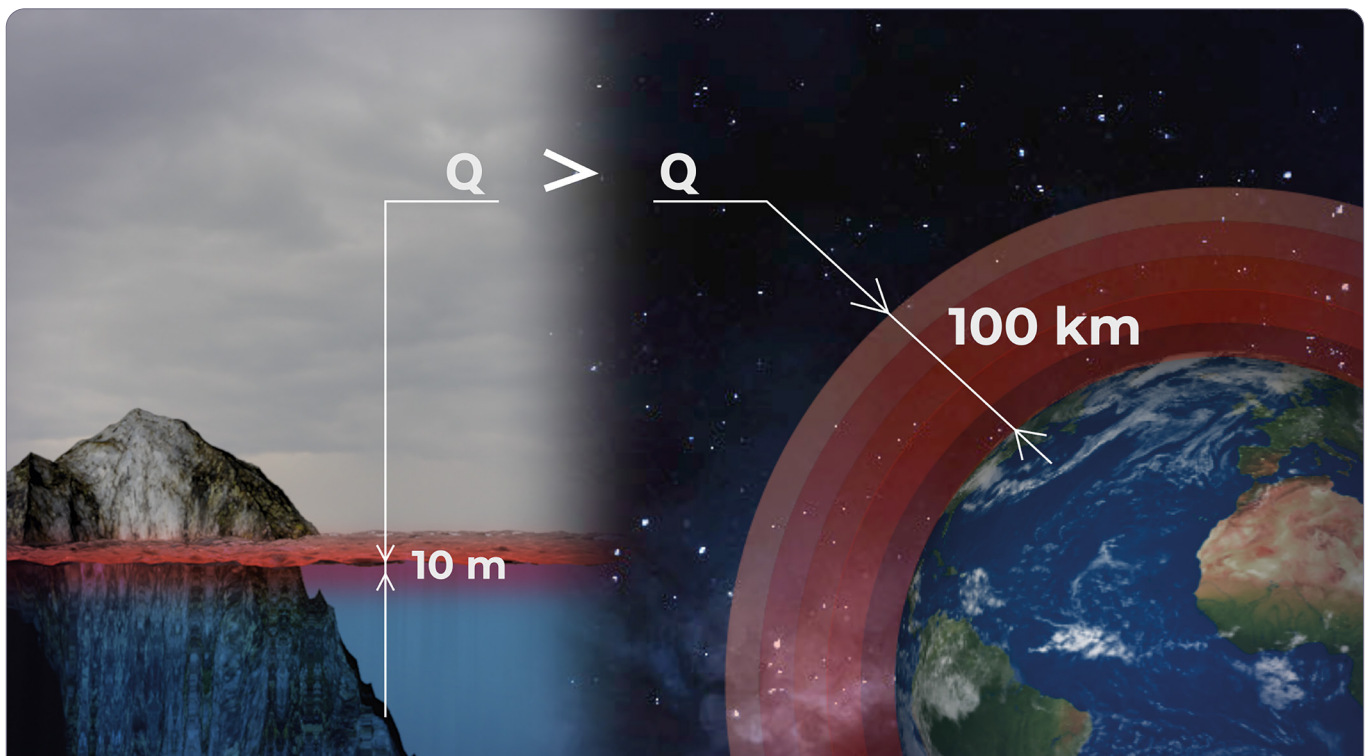


Abbildung 38. Schematische Darstellung der vergleichbaren Wärmespeicherfähigkeit von Ozean und Atmosphäre.

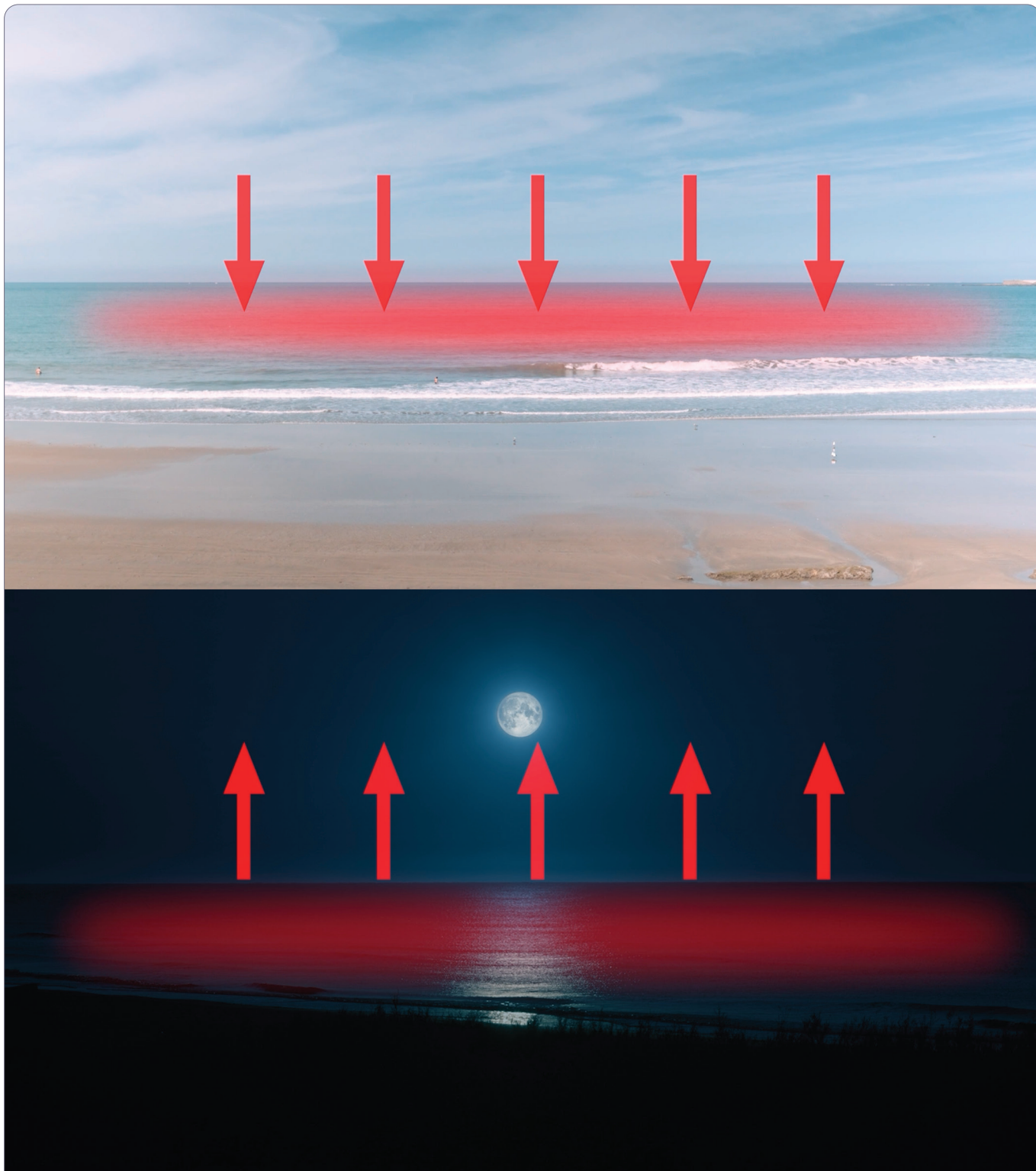


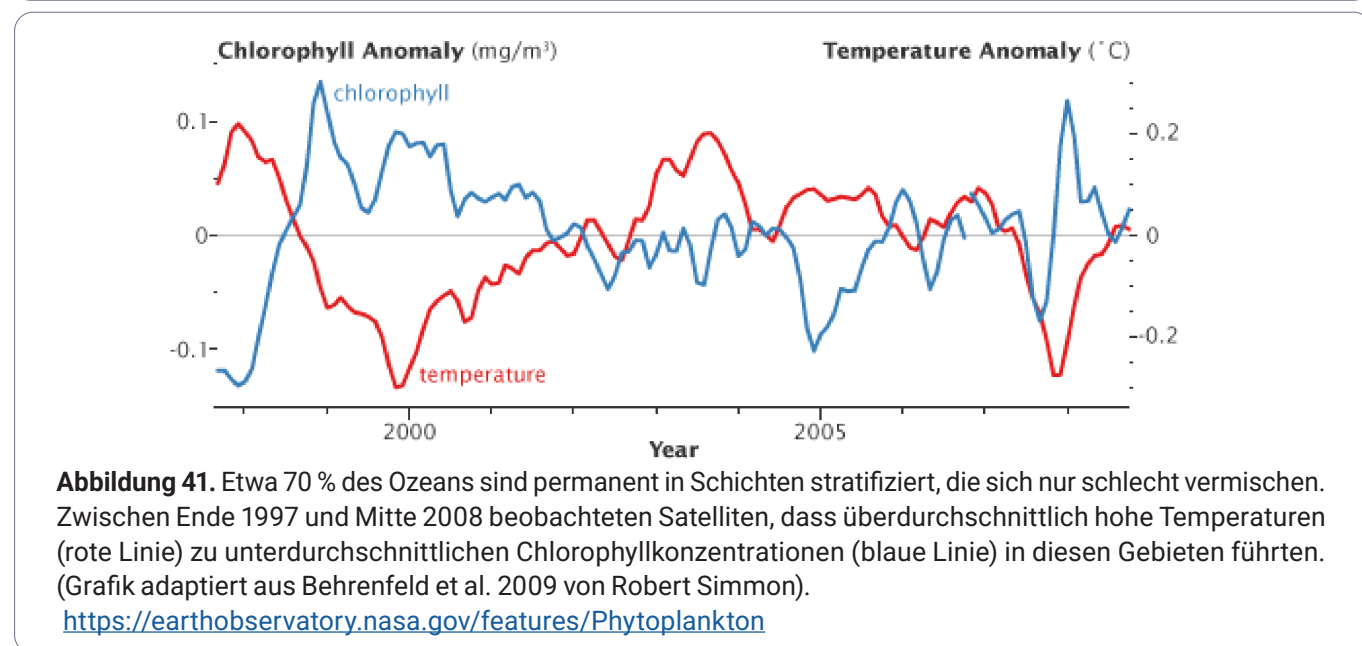
Abbildung 3. Schematische Darstellung des tageszeitlichen Wärmeaustauschs: Der Ozean nimmt tagsüber Wärme auf und gibt sie nachts wieder ab, wodurch Schwankungen der Lufttemperatur geglättet werden.

Meeresströmungen transportieren warmes Wasser aus den Tropen in kältere Regionen, z. B. in nördliche Breitengrade. Dies trägt zur Milderung des Klimas in den Küstenregionen bei. Kalte Strömungen hingegen bringen kühleres Wasser zurück zum Äquator. Auf diese Weise reguliert der Ozean das Klima auf dem Planeten.

Der Ozean hat einen erheblichen Einfluss auf die atmosphärischen Prozesse und spielt eine Schlüsselrolle bei der Bildung von Wolken und Niederschlägen. Jeden Tag verdunsten riesige Mengen Wasser von seiner Oberfläche, die dann zu Wolken kondensieren und als Regen oder Schnee auf die Erde zurückkehren. Dieser Prozess ist wichtig, um die Wasserressourcen von Flüssen, Seen und Böden mit frischem Wasser zu versorgen.

Mikroskopisch kleine Algen im Ozean, wie das Phytoplankton (Abb. 40), produzieren mehr als 50 Prozent des Sauerstoffs¹³⁶.

Viele chemische und biologische Modelle des Ozeans sagen voraus, dass die Produktivität des Phytoplanktons mit der Erwärmung der Meeresoberfläche als Reaktion auf die zunehmenden Treibhausgase in der Atmosphäre zurückgehen wird^{137, 138} (Abb. 41).



¹³⁶NOAA. How much oxygen comes from the ocean? <https://oceanservice.noaa.gov/facts/ocean-oxygen.html> (Abgerufen am 01.05.2025)

¹³⁷Boyce, D. G., Lewis, M. R. & Worm, B. Global phytoplankton decline over the past century. Nature 466, 591–596 (2010). <https://doi.org/10.1038/nature09268>

¹³⁸Bopp, L. et al. Multiple stressors of ocean ecosystems in the 21st century: projections with CMIP5 models. Biogeosciences 10, 6225–6245 (2013). <https://doi.org/10.5194/bg-10-6225-2013>

Veränderung des Temperaturmusters des Ozeans

Der Bericht über den Zustand des Weltozeans aus dem Jahr 2024 zeigt ein alarmierendes Bild – eine beispiellose Erwärmung des Ozeans. Untersuchungen zeigen, dass die Temperaturen der Ozeane zwischen 1960 und 1986 stetig angestiegen sind. Dieser Prozess hat sich jedoch in den letzten Jahrzehnten um das Doppelte beschleunigt¹³⁹ (Abb. 42).

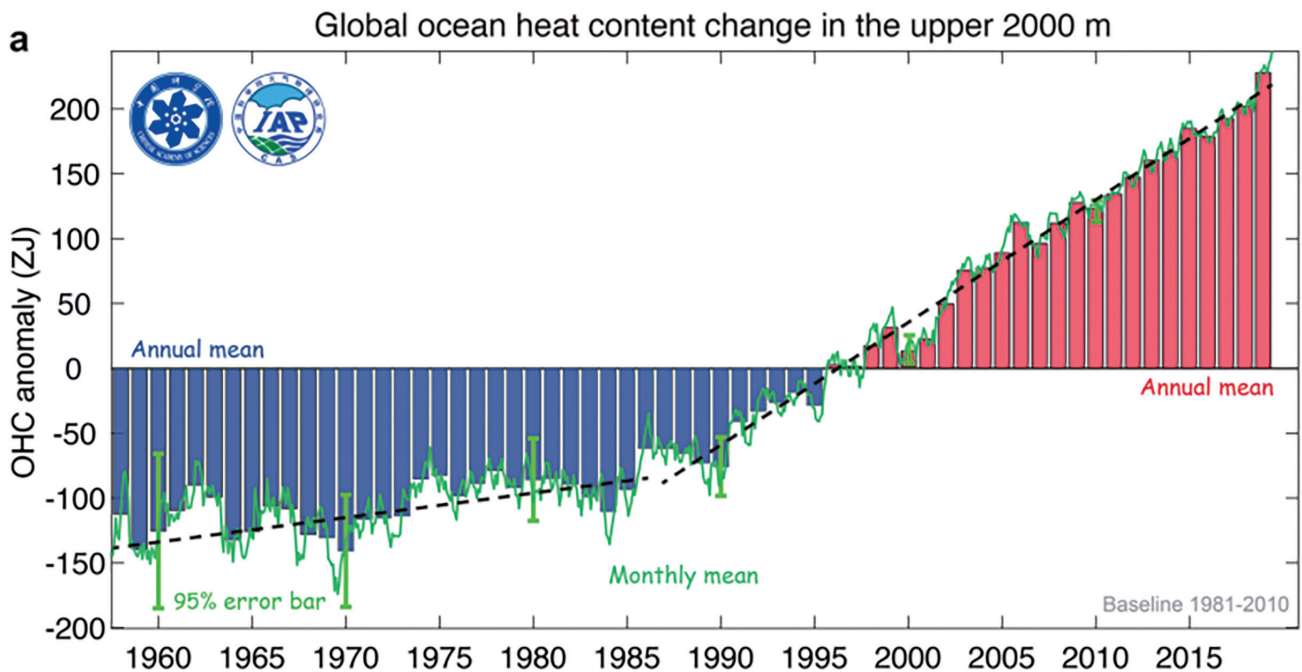


Abbildung 42. Veränderungen des Wärmeinhalts in den oberen 2 000 Metern des Weltozeans.

Quelle: Cheng, L., Abraham, J., Zhu, J., Trenberth, K. E., Fasullo, J., Boyer, T., Locarnini, R., Zhang, B., Yu, F., Wan, L., Chen, X., Song, X., Liu, Y., & Mann, M. E. (2020). Record-Setting Ocean Warmth Continued in

2023 war das wärmste Jahr seit Beginn der Aufzeichnungen und übertraf den bisherigen Rekord aus dem Jahr 2016. Auch bei der Oberflächentemperatur des Ozeans wurde ein absoluter Rekord registriert¹⁴⁰. Dieser Trend setzte sich fort – das Jahr 2024 brach die Rekorde von 2023 (Abb. 43) und wurde zum wärmsten Jahr seit Beginn der Aufzeichnungen¹⁴¹. In diesem Zeitraum erreichten die Oberflächentemperaturen des Ozeans in 15 aufeinanderfolgenden Monaten Rekordwerte, was das Fortdauern der beobachteten Erwärmung unterstreicht.

¹³⁹Cheng, L., Abraham, J., Zhu, J. et al. Record-Setting Ocean Warmth Continued in 2019. Adv. Atmos. Sci. 37, 137–142 (2020). <https://doi.org/10.1007/s00376-020-9283-7>

¹⁴⁰NOAA. Earth had its warmest year on record; Upper-ocean heat content was record high while Antarctic sea ice was record low. <https://www.ncei.noaa.gov/news/global-climate-202312> (Abgerufen am 01.05.2025).

¹⁴¹World Meteorological Organization (WMO) confirms 2024 as warmest year on record at about 1.55°C above pre-industrial level. <https://wmo.int/news/media-centre/wmo-confirms-2024-warmest-year-record-about-155degc-above-pre-industrial-level> (Abgerufen am 01.05.2025)

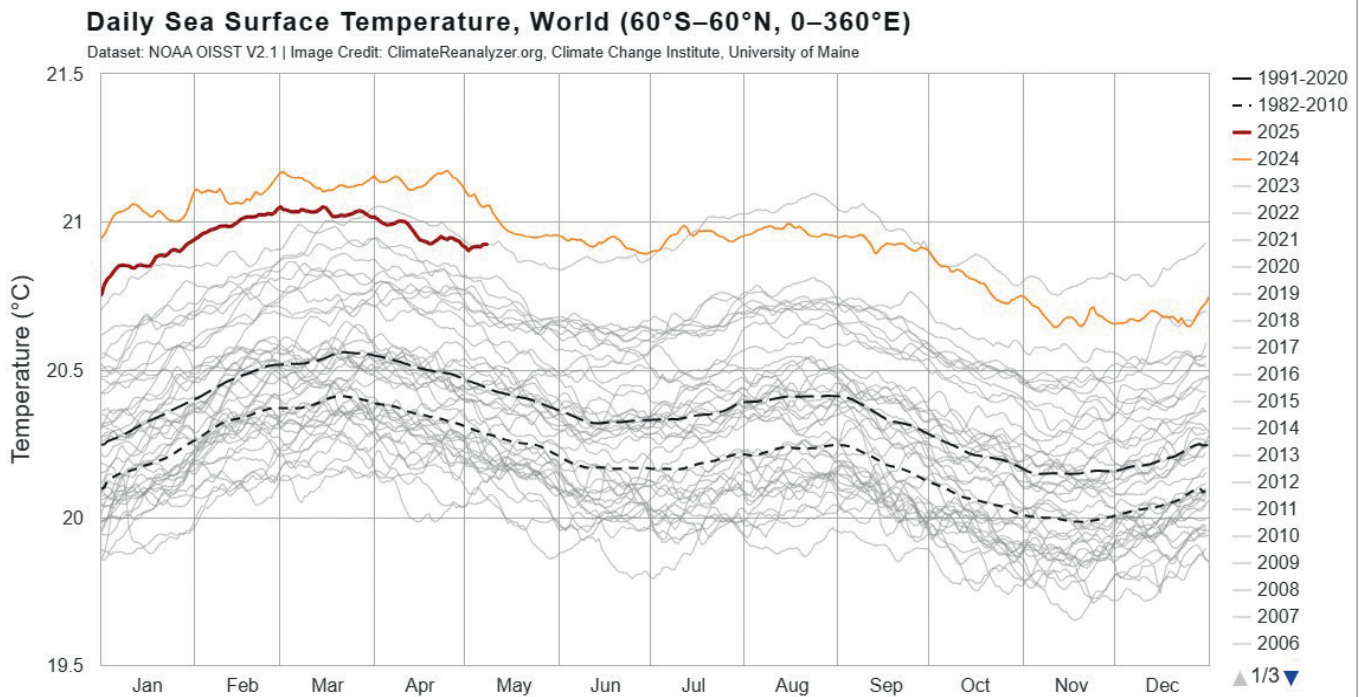


Abbildung 43. Tägliche Werte der Oberflächentemperatur des Ozeans: eine grafische Darstellung der Veränderungen der Temperatur oberer Ozeansicht, die saisonale Schwankungen nach Jahren zeigt.

Quelle: NOAA OISST V2.11 Image Credit: Climate [Reanalyzer.org](https://climate.reanalyzer.org), Climate Change Institute, University of Maine https://climate.reanalyzer.org/clim/sst_daily/?dm_id=world2

Zum ersten Mal in der Geschichte überstieg die Jahresdurchschnittstemperatur das vorindustrielle Niveau um $1,5\text{ °C}$ ¹⁴² (Abb. 44). Nach Ansicht von Experten stellt dieser Indikator eine kritische Schwelle dar, ab der große klimatische Naturkatastrophen für die Menschheit zu erwarten sind¹⁴³.

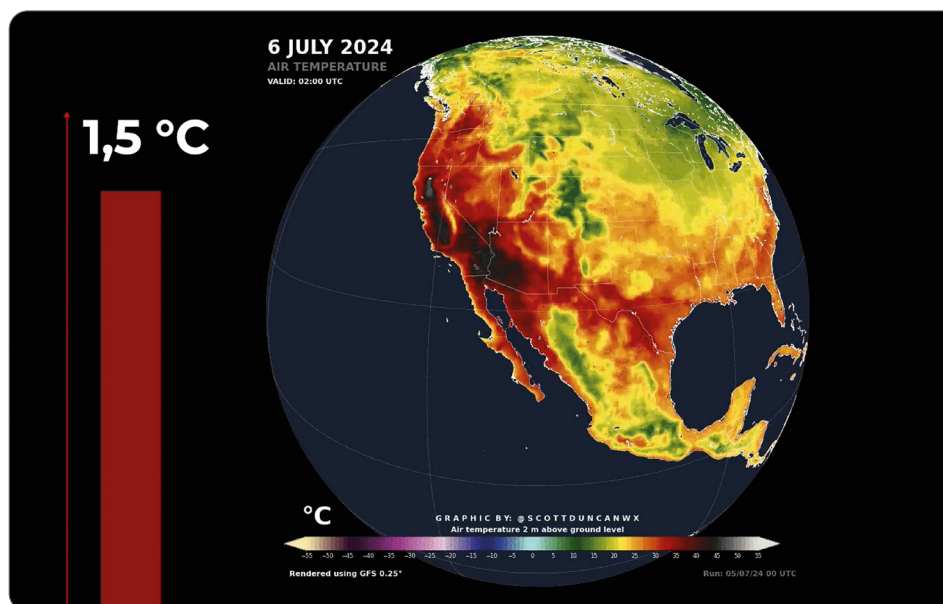


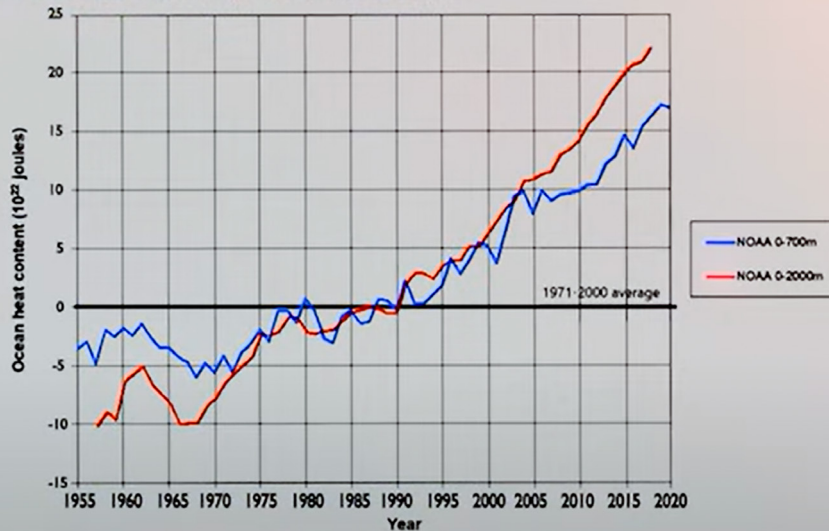
Abbildung 44. Schematische Darstellung der Klimaschwelle: Im Jahr 2024 überschreitet die Jahresdurchschnittstemperatur erstmals die Schwelle von $1,5\text{ °C}$ im Vergleich zum vorindustriellen Niveau.

¹⁴²World Meteorological Organization (WMO). State of the Global Climate 2024. <https://wmo.int/publication-series/state-of-global-climate-2024> (Abgerufen am 01.05.2025).

¹⁴³IPCC. Global Warming of 1.5 °C . (Cambridge University Press, 2022). <https://doi.org/10.1017/9781009157940> (Abgerufen am 01.05.2025)

Dieser Temperaturanstieg wurde für die Mitte des 21. Jahrhunderts erwartet¹⁴⁴, aber diese Schwelle wurde bereits überschritten. Nach Schätzungen der UNO könnte die globale Temperatur in diesem Jahrhundert um fast 3 °C steigen, wenn sich die derzeitigen Trends fortsetzen¹⁴⁴.

Figure TD-5. Ocean Heat Content in the Top 700 Meters and the Top 2,000 Meters in the NOAA Data Sets, 1955–2020, with Standard Errors



Data source: NOAA data portal: www.nodc.noaa.gov/OC5/3M_HEAT_CONTENT.

Abbildung 45. Wärmeinhalt des Ozeans in den oberen 700 Metern und den oberen 2000 Metern. NOAA-Datensätze, 1955–2020, standardisiert.

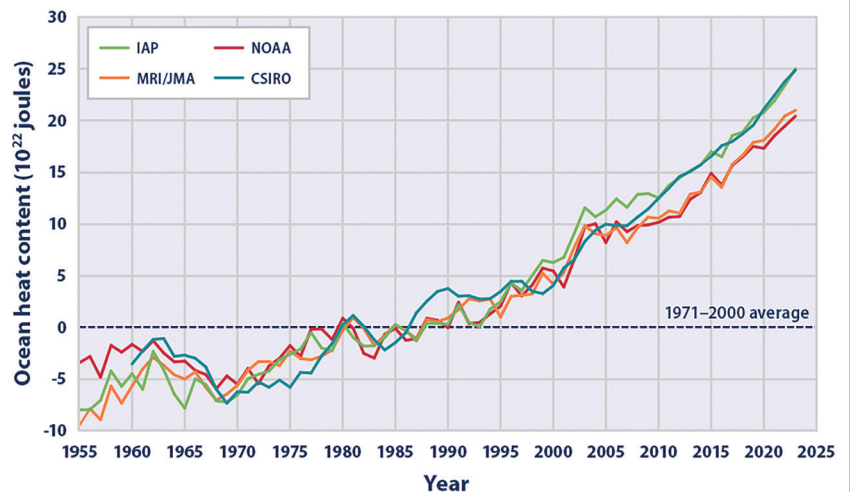
Quelle: NOAA data portal
www.nodc.noaa.gov/OC5/3M_HEAT_CONTENT

Abbildung 46.

Dieses Diagramm zeigt die Veränderungen des Wärmeinhalts der oberen 700 Meter der Weltmeere von 1955 bis 2023. Der Wärmeinhalt des Ozeans wird in Joule - einer Energieeinheit - gemessen und mit dem Durchschnittswert für den Zeitraum 1971–2000 verglichen, der zur Orientierung auf Null festgelegt ist. Die Wahl eines anderen Bezugszeitraums ändert nichts an der Form der Daten im Zeitverlauf. Die Linien wurden unabhängig voneinander von Regierungsorganisationen in vier Ländern mit unterschiedlichen Methoden berechnet:

der US National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), der Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation of Australia (CSIRO), dem Institute of Atmospheric Physics of China (IAP) und dem Meteorological Research Institute of the Japan Meteorological Agency (MRI/JMA).

Quelle: CSIRO, 2024;5 IAP, 2024;6 MRI/JMA, 2024;7 NOAA, 20248



¹⁴⁴The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Climate Change 2021: The Physical Science Basis <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>

In den letzten 60 Jahren haben sich die Ozeane in mittleren Tiefen 15-mal schneller erwärmt als in den vorangegangenen 10 000 Jahren¹⁴⁵ (Abb. 45-46). Dies zeigt, dass die globale Erwärmung nicht nur die oberen Wasserschichten betrifft, sondern auch die tieferen Regionen des Ozeans, in die das Sonnenlicht nicht eindringt. Die Erwärmung des Wassers in solchen Tiefen erfordert enorme Energie, was das Ausmaß des Problems verdeutlicht. Nach wissenschaftlichen Schätzungen müsste ein Jahr lang jede Sekunde die Energie freigesetzt werden, die der Detonation von 7 Atombomben entspricht, damit sich der Ozean im derzeitigen Tempo erwärmt¹⁴⁶, – kolossale Zahlen, die die Frage aufwerfen, woher diese Energie kommt.

Steigende Wassertemperaturen führen unweigerlich zu einem Anstieg des Meeresspiegels, der ganze Küstenregionen zu verschlingen droht. In den letzten zwei Jahrhunderten ist der Meeresspiegel um 21 cm gestiegen, und allein in den letzten 30 Jahren um 10,1 cm¹⁴⁷. Die derzeitige Steigerungsrate ist 2,5-mal höher als zuvor, und dieser Trend wird sich fortsetzen. Wenn sich die Situation nicht ändert, werden Millionen Menschen zu Flüchtlingen, die gezwungen sein werden, ihre Häuser zu verlassen und weit weg von der Küste Zuflucht zu suchen.

"Der Anstieg, den wir im Jahr 2024 verzeichneten, war höher als erwartet", sagte Josh Willis, ein Forscher für Meeresspiegel am Jet Propulsion Laboratory der NASA in Südkalifornien. *"Jedes Jahr unterscheidet sich ein wenig, aber es ist klar, dass der Meeresspiegel weiter ansteigt, und die Steigerungsrate beschleunigt sich immer mehr"*¹⁴⁸ (Abb. 47).

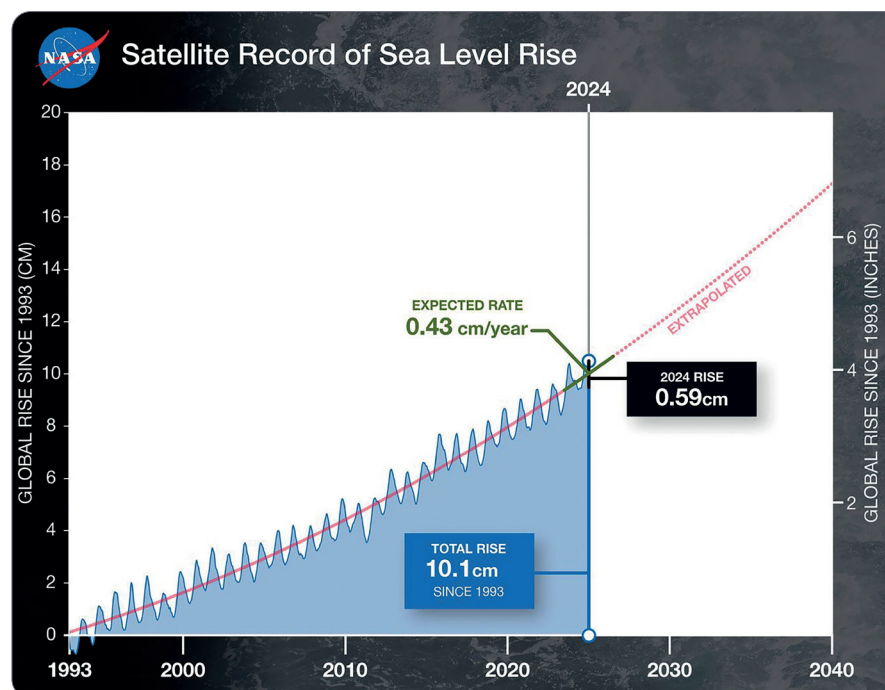


Abbildung 47. Dieses Diagramm zeigt den durchschnittlichen Weltmeerspiegel (in Blau dargestellt) seit 1993, gemessen von einer Reihe von fünf Satelliten. Die durchgezogene rote Linie zeigt den Verlauf dieses Anstiegs, der sich in den letzten drei Jahrzehnten mehr als verdoppelt hat. Die gestrichelte rote Linie projiziert den künftigen Anstieg des Meeresspiegels. Bildnachweis: NASA/JPL-Caltech.

Quelle: NASA. NASA Analysis Shows Unexpected Amount of Sea Level Rise in 2024 <https://sealevel.nasa.gov/news/282/nasa-analysis-shows-unexpected-amount-of-sea-level-rise-in-2024>

Die Erwärmung der Ozeane führt auch zu häufigeren und intensiveren extremen Wetterereignissen wie Überschwemmungen, Taifunen und anormalen Regenfällen. Diese Veränderungen bedrohen die Ökosysteme des Planeten und das Leben von Milliarden Menschen, und sie werden von Jahr zu Jahr spürbarer.

¹⁴⁵Rosenthal, Y., Linsley, B. K., & Oppo, D. W. (2013). Pacific Ocean Heat Content During the Past 10,000 Years. *Science*, 342(6158), 617–621. <https://doi.org/10.1126/science.1240837>; Oppo, D. (2013, October 31). Is Global Heating Hiding Out in the Oceans? <https://www.earth.columbia.edu/articles/view/3130> (Abgerufen am 01.05.2025).

¹⁴⁶Cheng, L. et al. Another Year of Record Heat for the Oceans. *Adv. Atmos. Sci.* 40, 963–974 (2023). <https://doi.org/10.1007/s00376-023-2385-2>

¹⁴⁷NASA. Tracking 30 Years of Sea Level Rise <https://earthobservatory.nasa.gov/images/150192/tracking-30-years-of-sea-level-rise> (Abgerufen am 01.05.2025).

¹⁴⁸NASA. NASA Analysis Shows Unexpected Amount of Sea Level Rise in 2024 <https://sealevel.nasa.gov/news/282/nasa-analysis-shows-unexpected-amount-of-sea-level-rise-in-2024> (Abgerufen am 01.05.2025)

Warum erwärmt sich der Ozean? Hypothese

Die wichtigsten feststehenden Faktoren, die die Erwärmung des Ozeans beeinflussen, sind Treibhausgase wie CO₂, die die Wärme in der Atmosphäre binden und die Temperatur der oberen Schichten des Ozeans erhöhen. Es gibt jedoch auch andere Faktoren, die diesen Prozess erheblich beeinflussen können. Der zusätzliche Faktor der Erwärmung der Ozeane wird auch im Kapitel "FAKTOR X: DIE ROLLE VON MIKRO- UND NANOPLASTIK IN DER DYNAMIK DES ZYKLUS VON NATURKATASTROPHEN" behandelt.

Seit der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts hat die Menge an Plastik in den Ozeanen dramatisch zugenommen, was mit einer Periode beschleunigter industrieller Entwicklung und Massenproduktion von Kunststoffprodukten zusammenfällt (Abb. 48).

Zwischen 1960 und 2019 wurde auch eine Veränderung der Meerestemperatur beobachtet. Das Diagramm (Abb. 49) zeigt einen parallelen Anstieg der durchschnittlichen Oberflächentemperatur der Ozeane, der ebenfalls seit Mitte des zwanzigsten Jahrhunderts zu beobachten ist.

Vergleicht man die beiden Diagramme (Abb. 48-49), so lässt sich ein Zusammenhang zwischen der Zunahme der Konzentration von Plastik in den Ozeanen und dem Anstieg der Wassertemperatur erkennen. Dies deutet darauf hin, dass die Plastikverschmutzung der Ozeane einer der wichtigsten, aber unzureichend erforschten Faktoren sein könnte, der die Erwärmung der Meeresgewässer beeinflusst.

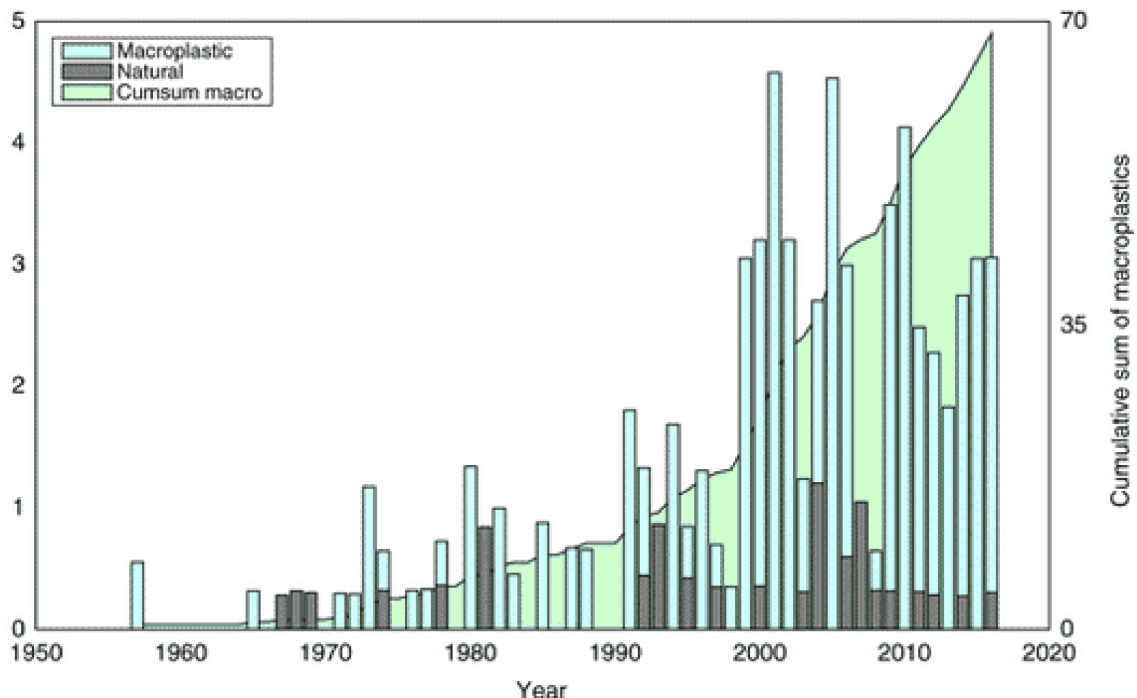


Abbildung 48. Diagramm der zunehmenden Konzentration von Plastik in den Ozeanen in den letzten Jahrzehnten. Gesamtmenge an Makroplastik im Ozean und jährliche Werte.

Quelle: Ostle, C., Thompson, R.C., Broughton, D. et al. The rise in ocean plastics evidenced from a 60-year time series. Nature Communications, 10, 1622 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41467-019-09506-1>

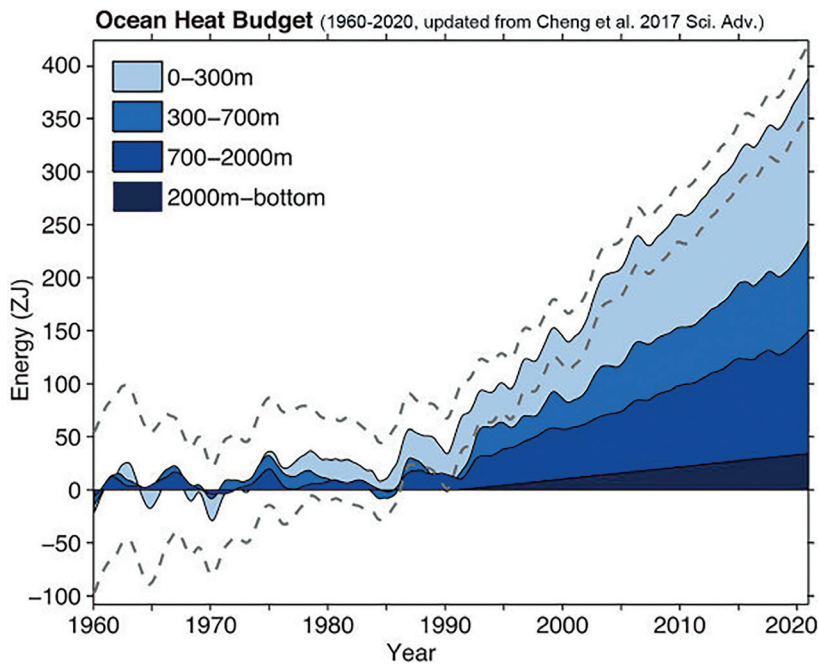


Abbildung 49. Graphische Darstellung der Veränderung der Temperatur der Weltmeere im gleichen Zeitraum (1960-2019).

Quelle: (Purkey and Johnson, 2010; with data update Cheng et al., 2017) Cheng, L. et al. Record-Setting Ocean Warmth Continued in 2019. Adv. Atmos. Sci. 37, 137-142 (2020). <https://doi.org/10.1007/s00376-020-9283-7>

Um dies weiter zu erforschen, ist es wichtig zu verstehen, ob Plastik die physikalischen Eigenschaften des Meerwassers, wie Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität, beeinflussen kann. Und könnten diese Veränderungen zu einem Anstieg der Ozeantemperatur beitragen? Um diese Prozesse besser zu verstehen, werden wir uns mit den Grundeigenschaften des Wassers und seinen Wechselwirkungen mit Schadstoffen befassen.

Grundeigenschaften des Wassers

Das Wassermolekül hat eine symmetrische V-Form, bei der die beiden Wasserstoffatome auf einer Seite gegenüber dem größeren Sauerstoffatom angeordnet sind (Abb. 50).

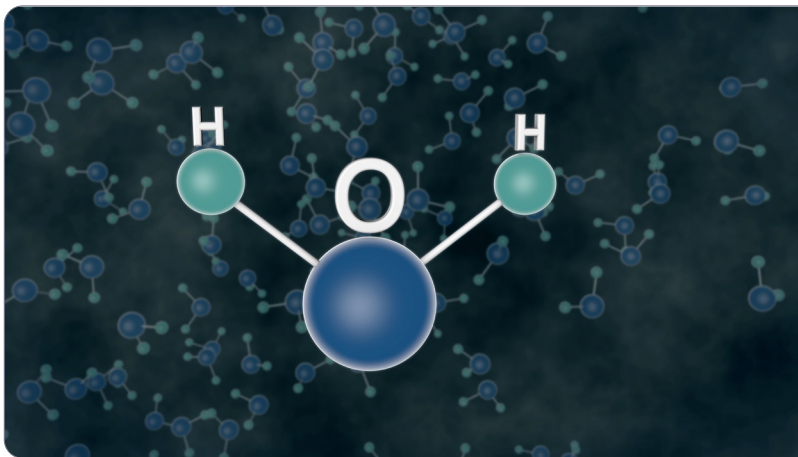


Abbildung 50. Schematische Darstellung eines Wassermoleküls: zwei Wasserstoffatome (H) sind mit einem Sauerstoffatom (O) in einem Winkel von $\sim 104,5^\circ$ verbunden und bilden einen Dipol mit positiver und negativer Ladungen.

Diese Struktur unterscheidet sich von linearen Molekülen wie CO_2 , bei denen alle Atome in einer Kette angeordnet sind. Die einzigartige Form des Wassermoleküls macht es für zahlreiche Prozesse auf der Erde unerlässlich.

Die Eigenschaften der Wassermoleküle ermöglichen es dem Wasser, bei Temperaturen flüssig zu bleiben, bei denen andere dreiatomige Moleküle normalerweise gasförmig werden (Abb. 51).

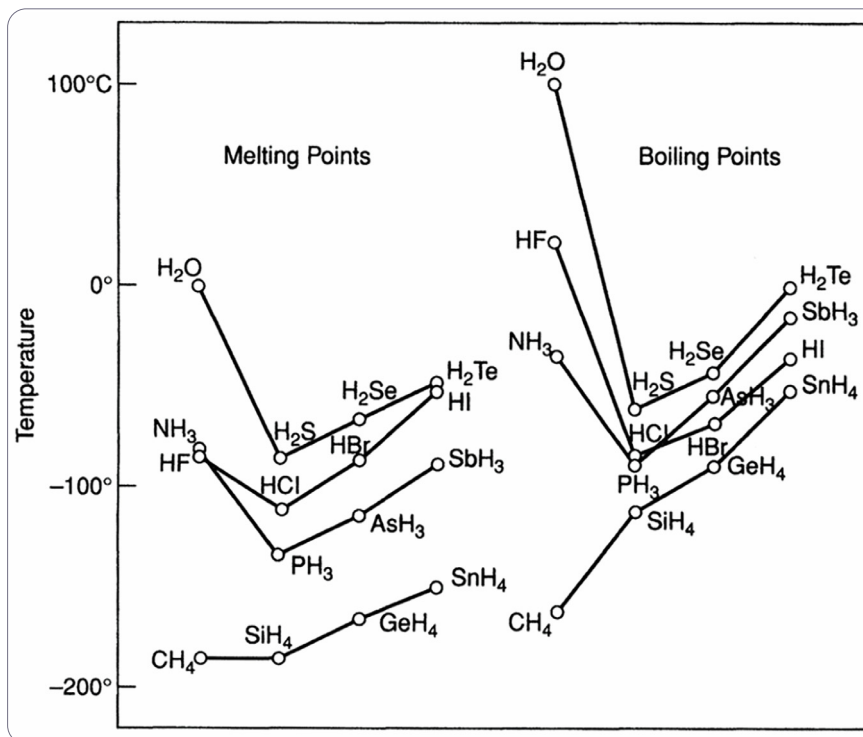


Abbildung 51. Schmelz- (links) und Siedetemperaturen (rechts) von isoelektronischen Folgen der Hydridmoleküle. Die Temperaturen für Wasser sind wesentlich höher als die, die durch Extrapolation der Temperaturen ähnlicher Verbindungen ermittelt wurden.

Quelle: Pauling, L. The Nature of the Chemical Bond, 3rd edn, Chapter 12-2 (Cornell Univ. Press, 1960).

Dies ist auf Wasserstoffbrückenbindungen¹⁴⁹ zurückzuführen, die die Wassermoleküle zu einer starken und geordneten Struktur verbinden.

Die meisten Wasserstoffbrückenbindungen verfügen über schwache Anziehungskräfte mit Bindungsstärken, die etwa ein Zehntel derjenigen einer normalen kovalenten Bindung betragen. Dennoch sind sie sehr wichtig. Ohne sie würden alle Holzkonstruktionen zusammenbrechen, Zement zerbröckeln, Ozeane verdampfen und alle Lebewesen sich in leblose Materie auflösen¹⁵⁰.

Daher hat Wasser die Fähigkeit, Cluster zu bilden, was seine anomalen Eigenschaften erklärt (Abb. 52-53). Wassercluster können mehr als 95 % des Wasserstoffbindungsnetzes ausmachen, wobei einige Cluster Tausende von Molekülen maximal umfassen und sich über mehr als 3,0 nm ausdehnen¹⁵¹.

¹⁴⁹ Pauling, L. The Nature of the Chemical Bond, 3rd edn, Chapter 12-2 (Cornell Univ. Press, 1960).

¹⁵⁰ Jeffrey, G. A. An Introduction to Hydrogen Bonding (Oxford University Press, New York, 1997). <https://books.google.com/books?vid=ISBN0195095499>

¹⁵¹ Gao, Y., Fang, H., Ni, K. & Feng, Y. Water clusters and density fluctuations in liquid water based on extended hierarchical clustering methods. Sci Rep 12, 8036 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41598-022-11947-6>

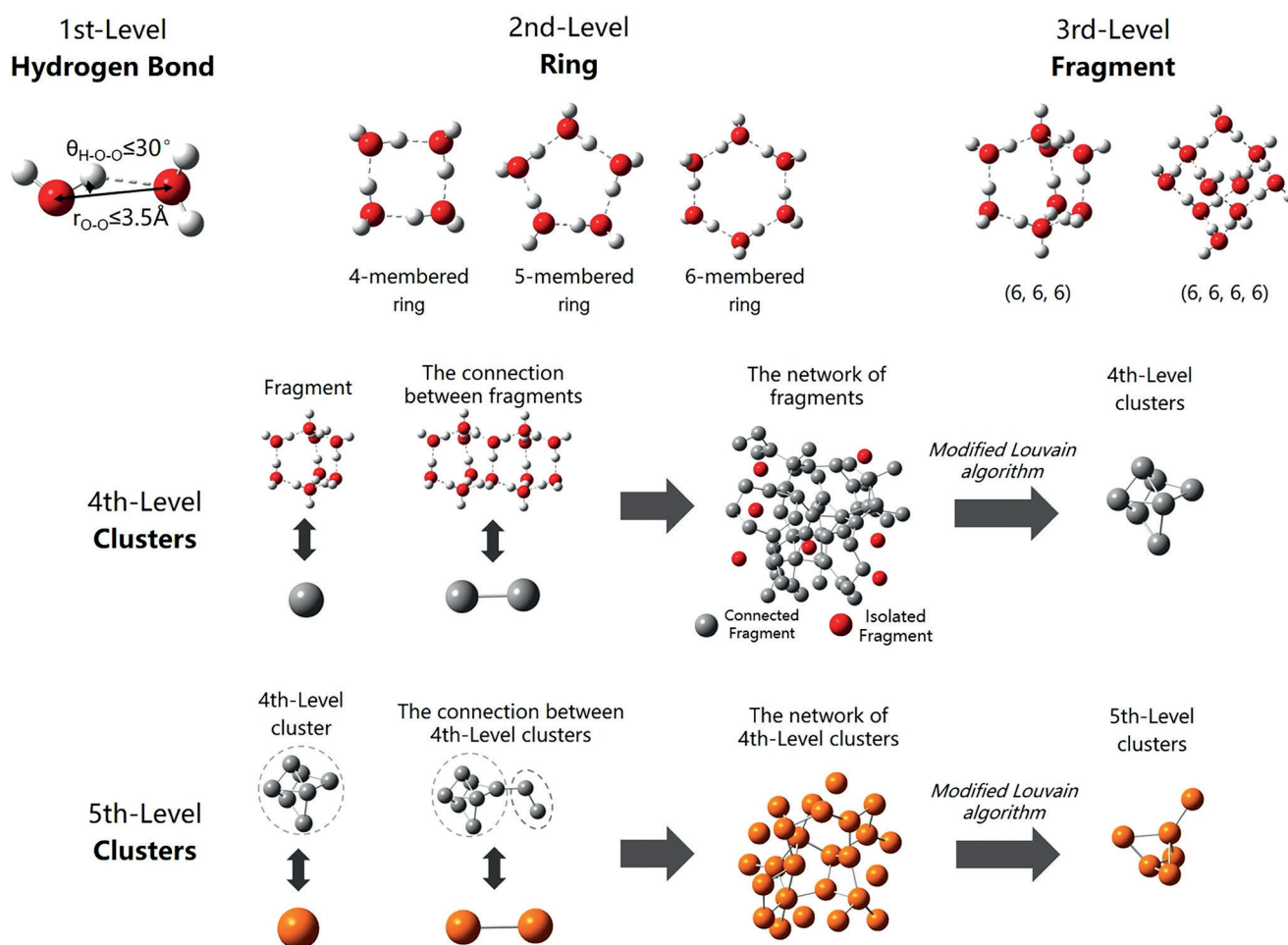


Abbildung 52. Schematische Darstellung der hierarchischen Clusterbildung.

Wasserstoffbindungen, Ringe und Fragmente werden als Strukturen der ersten, zweiten und dritten Ebene betrachtet, bei denen es sich aus chemischer Sicht um Kugel-Stab-Modelle handelt, und rote und weiße Kugeln stehen für Sauerstoff- bzw. Wasserstoffatome. Die durchgezogenen und gestrichelten Linien bezeichnen kovalente O-H-Bindungen bzw. Wasserstoffbrückenbindungen. Die Cluster der vierten und fünften Ebenen sind topologisch dargestellt. Die Kugeln stellen die Struktur der letzten Ebenen dar. Die Strukturen in der Abbildung sind nur eine Auswahl unter den vom Clustering-Algorithmus in Betracht gezogenen Elementen.

Quelle: Gao, Y., Fang, H. & Ni, K. A hierarchical clustering method of hydrogen bond networks in liquid water undergoing shear flow. Sci Rep 11, 9542 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41598-021-88810-7>

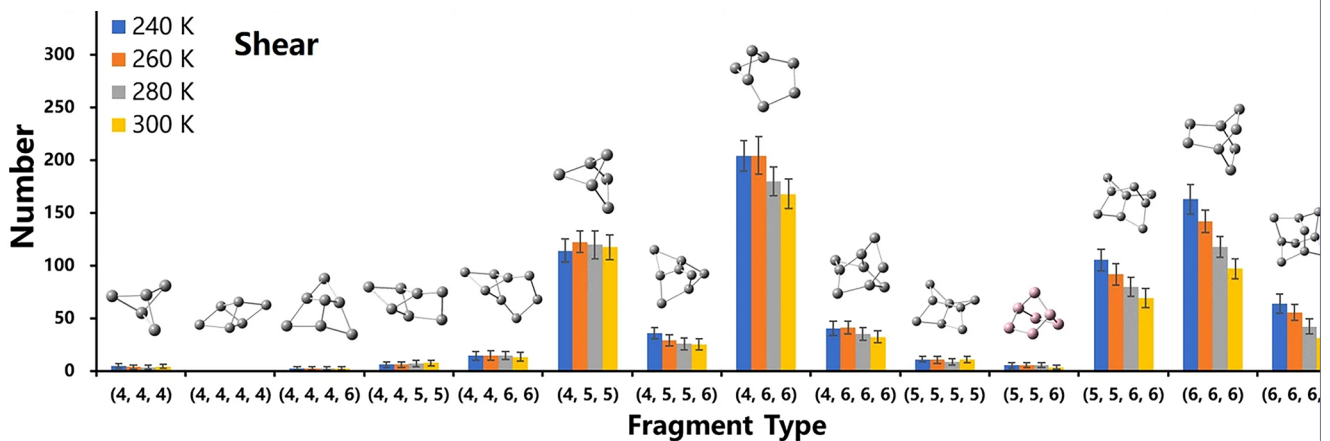


Abbildung 53. Verteilung der hierarchischen Strukturen auf den Ebenen 1, 2 und 3 des Netzwerkes in verschiedenen Fällen. (a) Verteilung der Wasserstoffbrückenbindungen (Strukturen der 1. Ebene) bei verschiedenen Temperaturen. (b) Verteilung der Ringe (Strukturen der 2. Ebene) bei verschiedenen Temperaturen. (c) Verteilung der Fragmente (Strukturen der 3. Ebene) bei verschiedenen Temperaturen. Beachten Sie, dass (4, 4, 4) ein Symbol für ein Fragment mit drei viergliedrigen Ringen ist.

Quelle: Gao, Y., Fang, H. & Ni, K. A hierarchical clustering method of hydrogen bond networks in liquid water undergoing shear flow. Sci Rep 11, 9542 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41598-021-88810-7>

Wärmekapazität, Wärmeleitfähigkeit und Dichte des Wassers und ihre funktionelle Bedeutung

1. Hohe Wärmekapazität des Wassers

Wasser hat unter normalen Bedingungen die höchste spezifische Wärmekapazität unter den Flüssigkeiten und Feststoffen, die nur von einigen Gasen wie Wasserstoff übertroffen wird¹⁵². Das bedeutet, dass es bei relativ geringen Änderungen seiner eigenen Temperatur große Mengen an Wärmeenergie aufnehmen, speichern und übertragen kann.

Die Wärmekapazität des Wassers wird durch die Wärmeleistung bestimmt, die erforderlich ist, um die Temperatur von 1 g Wasser um 1 °C zu erhöhen, und beträgt unter Standardbedingungen etwa 4,18 J/(g·°C). Diese Eigenschaft ist ein Schlüsselfaktor bei der Klimaregulierung: Das Wasser in den Ozeanen speichert tagsüber Wärme und gibt sie nachts langsam wieder ab. Im Sommer nimmt der Ozean überschüssige Wärme auf und gibt sie im Winter allmählich wieder ab, wodurch er wie ein riesengroßer Thermostat wirkt und die Temperaturschwankungen auf dem Planeten abmildert.

2. Wärmeleitfähigkeit des Wassers

Wasser hat im Vergleich zu Metallen eine relativ geringe Wärmeleitfähigkeit, die jedoch höher ist als die vieler anderer Flüssigkeiten. Die Wärmeleitfähigkeit spiegelt die Fähigkeit einer Substanz wider, Wärme von einem Teil der Substanz auf einen anderen zu übertragen, ohne die Masse der Substanz selbst zu bewegen. Die Wärmeleitfähigkeit von Wasser beträgt unter Standardbedingungen (25 °C) etwa 0,6 W/(m·K), was es zu einem effektiven Wärmeleiter bei natürlichen Prozessen wie der Wärmeverteilung in Ozeanen und anderen Gewässern macht.

¹⁵²Lide, D. R. (ed.) CRC Handbook of Chemistry and Physics, 85th edn (CRC Press, 2004).

Beobachtungen zeigen, dass die Wärmeleitfähigkeit des Wassers mit zunehmender Temperatur bis zu einem bestimmten Punkt zunimmt¹⁵². Darüber hinaus kann dieser Wert bei Vorhandensein von Verunreinigungen oder gelösten Stoffen variieren^{153, 154}. Diese Eigenschaften wirken sich auf die Wärmeverteilung im Wasser aus, was für das Verständnis der Wechselwirkungen zwischen dem Ozean und der Atmosphäre von entscheidender Bedeutung ist.

3. Anomales Verhalten der Wasserdichte

Im Gegensatz zu den meisten Substanzen verhält sich die Dichte von Wasser bei Temperaturänderungen ungewöhnlich. Bei einer Abkühlung auf 4 °C nimmt seine Dichte zu, aber bei einer weiteren Abkühlung (von 4 °C auf 0 °C) beginnt seine Dichte zu sinken (Abb. 54). Wenn Wasser gefriert, nimmt seine Dichte um 8-9 % ab. Dies erklärt, warum Eis nicht sinkt, sondern an der Oberfläche bleibt. Dieses Phänomen ist für das Leben in Gewässern von entscheidender Bedeutung, da das Eis das Wasser und die Lebewesen vor dem vollständigen Gefrieren schützt und verhindert, dass das gesamte Wasser bis zum Grund gefriert.

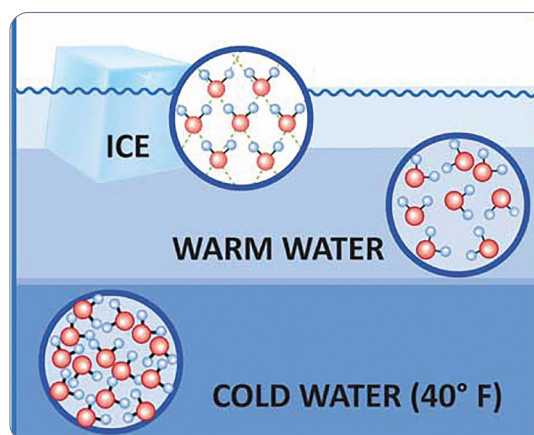


Abbildung 54. Schematische Darstellung der Änderung der Wasserdichte beim Abkühlen: Beim Abkühlen rücken die Wassermoleküle enger zusammen, wodurch ihre Dichte zunimmt und bei 4 °C ein Maximum erreicht. Bei weiterer Abkühlung beginnen die Wasserstoffbrückenbindungen zu dominieren und die Wassermoleküle bilden eine kristalline Eisstruktur, was zur Ausdehnung des Wassers und Verringerung der Dichte des Eises führt, das etwa 10 % weniger dicht ist als flüssiges Wasser.

Quelle: <https://askascientistblog.wordpress.com/2015/11/04/if-molecules-in-colder-things-get-denser-why-does-ice-float/>

Einfluss der Wassereigenschaften auf Klima und Ökosysteme

Änderungen der Wassertemperatur können die Wärmebilanz des Weltozeans und seine Fähigkeit, Wärme zu speichern und zu übertragen, erheblich beeinflussen. Dies wiederum wird sich auf das Klimasystem der Erde auswirken.

So spielen die physikalisch-chemischen Eigenschaften des Wassers, insbesondere seine Wärmekapazität und Wärmeleitfähigkeit, eine wichtige Rolle bei der Aufrechterhaltung des ökologischen Gleichgewichts auf der Erde und der Regulierung der klimatischen Prozesse (Abb. 55).

¹⁵²Lide, D. R. (ed.) CRC Handbook of Chemistry and Physics, 85th edn (CRC Press, 2004).

¹⁵³Sharqawy, M. H., Lienhard, J. H. & Zubair, S. M. Thermophysical properties of seawater: a review of existing correlations and data. Desalination and Water Treatment 16, 354–380 (2010). <https://doi.org/10.5004/dwt.2010.1079>

¹⁵⁴Jamieson, D. T. & Tudhope, J. S. Physical properties of sea water solutions: thermal conductivity. Desalination 8, 393–401 (1970). [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(00\)80240-4](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(00)80240-4)

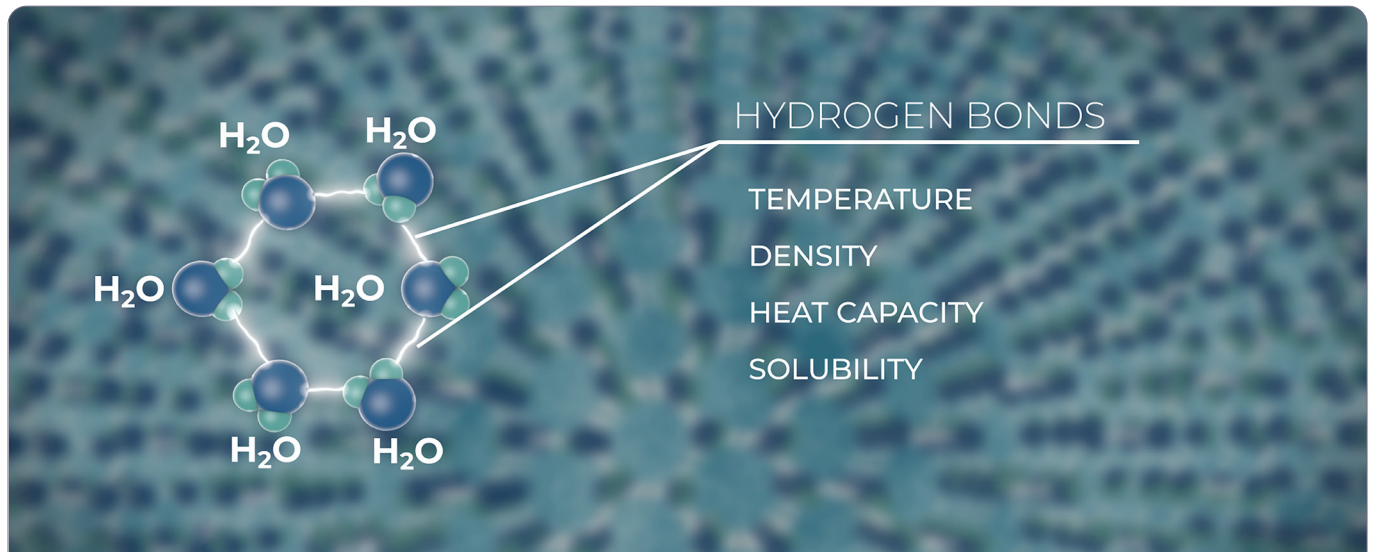


Abbildung 55. Schematische Darstellung der Wasserstoffbrückenbindungen in Wassermolekülen und ihres Einflusses auf wichtige Eigenschaften des Wassers: Wasserstoffbrückenbindungen tragen zu der hohen Wärmekapazität des Wassers bei, die es ihm ermöglicht, Wärme effizient zu absorbieren und zu speichern. Diese Bindungen bestimmen auch die Wasserdichte, die bei 4 °C am höchsten ist, und seine Fähigkeit, polare und ionische Stoffe zu lösen, was Wasser zu einem universellen Lösungsmittel macht.

Die Rolle von MNP bei der Veränderung der physikalischen Eigenschaften des Meerwassers

Plastik, ein Produkt der Erdölindustrie, zersetzt sich in der Natur nicht, sondern zerfällt in kleinere Partikel wie Mikro- und Nanoplastik¹⁵⁵. Diese Partikel, insbesondere Nanoplastik, können erhebliche Auswirkungen auf die physikalisch-chemischen Eigenschaften des Wassers haben, was wiederum Ökosysteme und Klimaprozesse beeinträchtigen kann. Bei Nanoplastik handelt es sich um Partikel in Nanometergröße, was kleiner als die Größe eines Virus ist (Abb. 56).

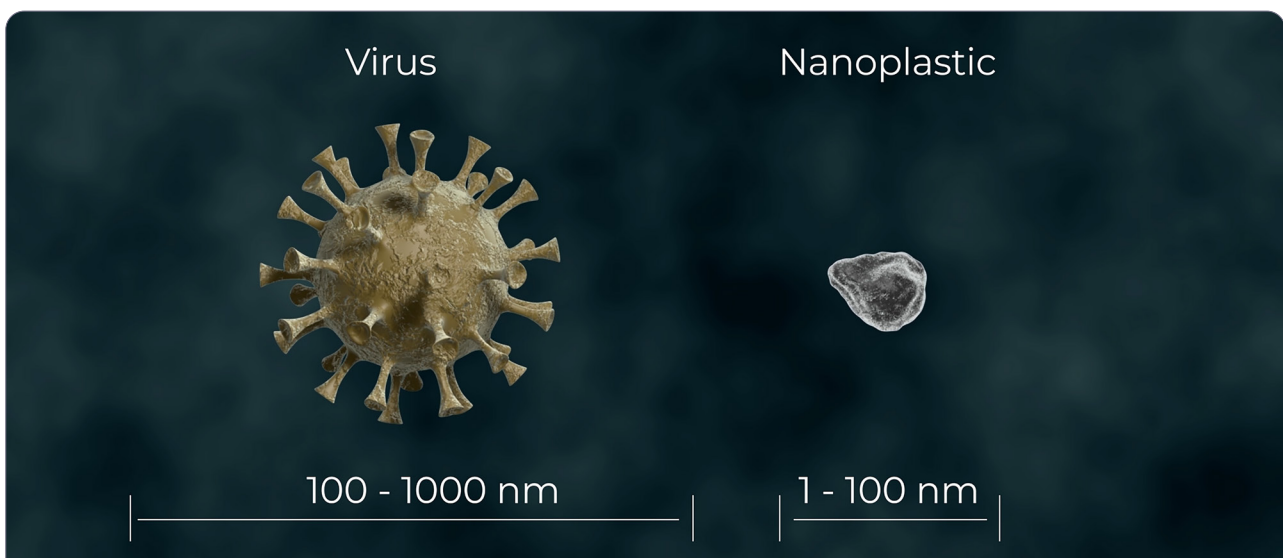


Abbildung 56. Schematischer Vergleich der Größe eines Virus und eines Nanoplastikpartikels.

¹⁵⁵Yu, R.-S. & Singh, S. Microplastic Pollution: Threats and Impacts on Global Marine Ecosystems. Sustainability 15, 13252 (2023). <https://doi.org/10.3390/su151713252>

Nanoplastik aus Nylon (Polyamid), der Stickstoff und Sauerstoff enthält, kann beispielsweise Wasserstoffbrückenbindungen mit Wasser bilden¹⁵⁶. Wenn Nanoplastikpartikel ins Wasser gelangen, stören sie die geordnete Struktur des Wassers, die auf den Wasserstoffbrückenbindungen zwischen den Wassermolekülen beruht, was seine physikalisch-chemischen Eigenschaften verändern kann (Abb. 57). Beispielsweise verlieren die Wassermoleküle an Beweglichkeit, was ihre Fähigkeit zur effektiven Teilnahme an Wärmetauschprozessen verringert. Darüber hinaus können sich Nanoplastikpartikel in wässrigen Lösungen, die verschiedene Substanzen enthalten, elektrisch aufladen¹⁵⁷.

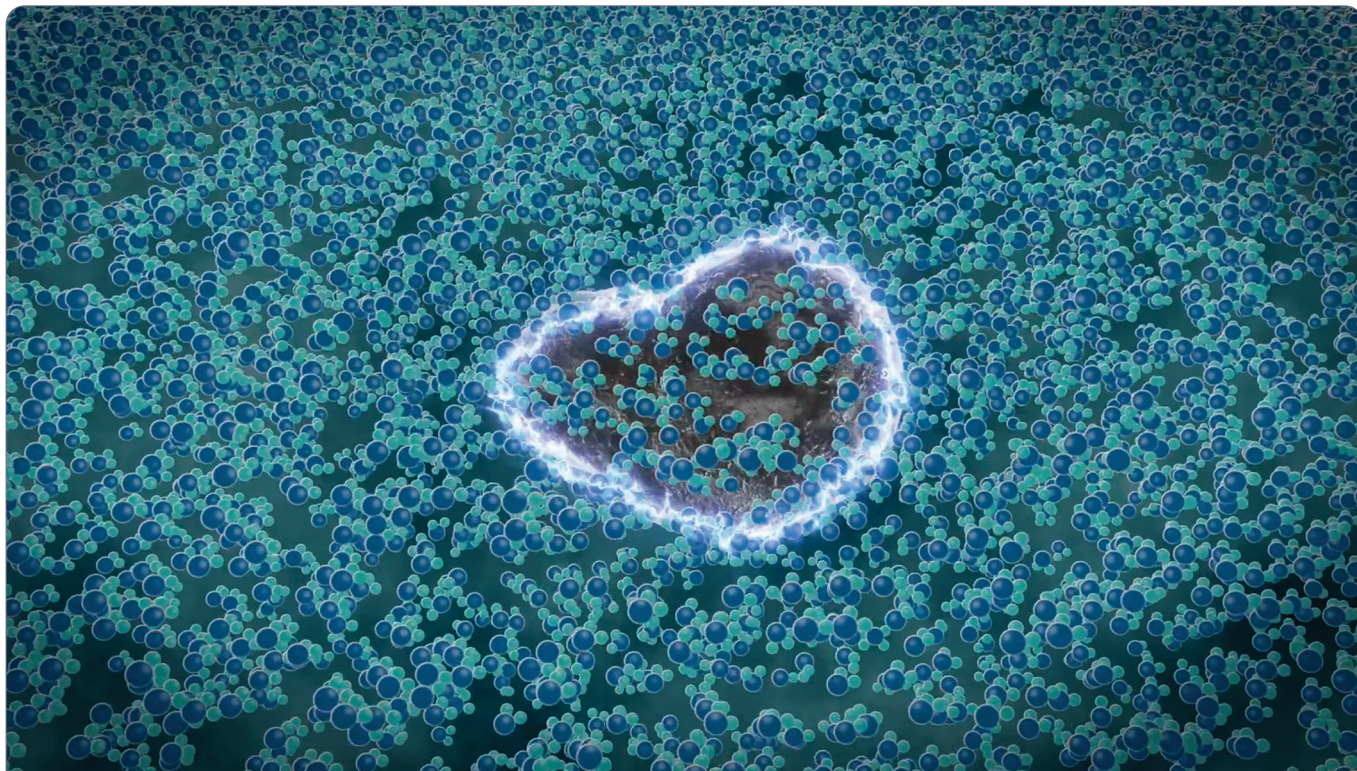


Abbildung 57. Schematische Darstellung geladener Nanoplastikpartikel in Wasser: Wenn sie instabilem Wassermilieu ausgesetzt sind – wie dem Vorhandensein organischer oder synthetischer Verunreinigungen, Änderungen des pH-Werts, der Temperatur oder des Salzgehalts – wird die Oberfläche des Nanoplastiks potenziell aktiv und ist in der Lage, in aquatischer Umgebung elektrische Ladungen zu erzeugen.

Quelle: Rahman, A. M. N. A. A. et al. A review of microplastic surface interactions in water and potential capturing methods. *Water Science and Engineering* 17, 361–370 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.wse.2023.11.008>

Dies ist auf chemische Veränderungen an der Oberfläche, wie z. B. Oxidation, sowie auf die Adsorption von Ionen wie Natrium (Na^+) und Chlor (Cl^-) im Meerwasser zurückzuführen. Geladene Nanoplastikpartikel, die von Ionen umgeben sind, ziehen Wassermoleküle an und bilden eine Hydrathülle um sich herum¹⁵⁸ (Abb. 58).

¹⁵⁶Iyeva, N. P. Chemical Analysis of Microplastics and Nanoplastics: Challenges, Advanced Methods, and Perspectives. *Chem. Rev.* 121, 11886–11936 (2021). <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.1c00178>

¹⁵⁷Rahman, A. M. N. A. A. et al. A review of microplastic surface interactions in water and potential capturing methods. *Water Science and Engineering* 17, 361–370 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.wse.2023.11.008>

¹⁵⁸Chen, Y. et al. Electrolytes induce long-range orientational order and free energy changes in the H-bond network of bulk water. *Sci. Adv.* 2, e1501891 (2016). <https://doi.org/10.1126/sciadv.1501891>

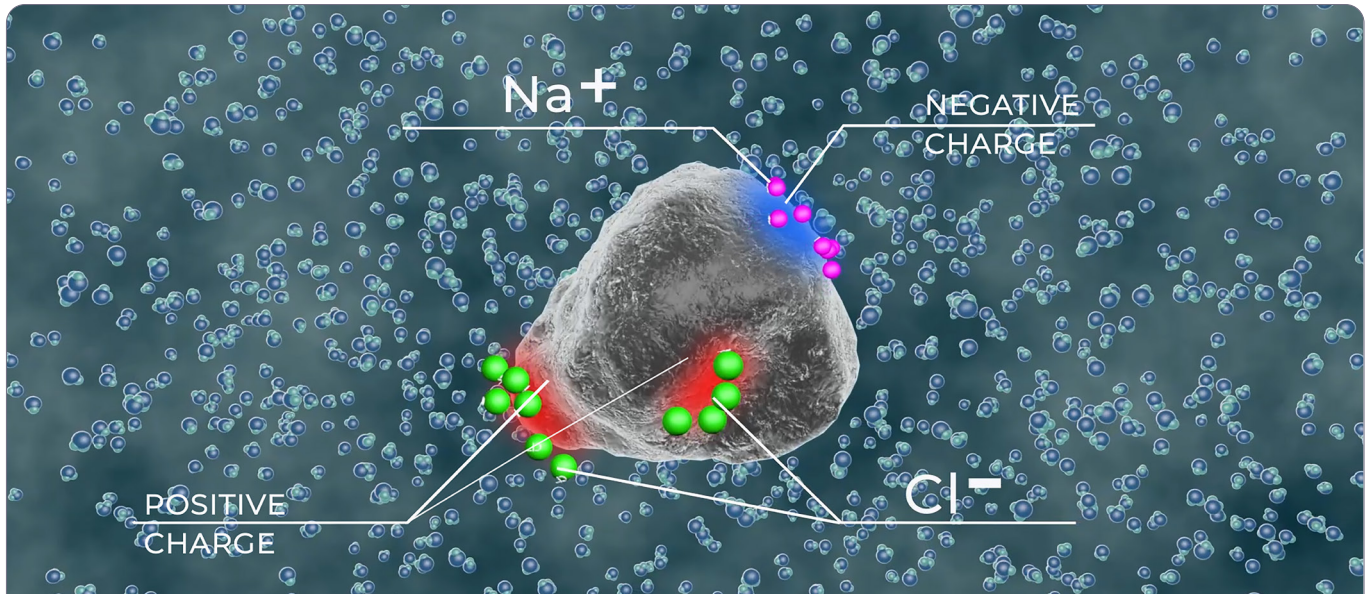


Abbildung 58. Schematische Darstellung einer Hydratschicht, die sich um geladene Nanoplastikpartikel bildet: Bei diesem Prozess ziehen die Nanopartikel aufgrund ihrer Ladung Ionen an, was die Bildung von Wassermolekülen um sie herum begünstigt, wodurch eine schützende Hydrathülle entsteht.

Quelle: Chen, Y. et al. Electrolytes induce long-range orientational order and free energy changes in the H-bond network of bulk water. *Sci. Adv.* 2, e1501891 (2016). <https://doi.org/10.1126/sciadv.1501891>

Forscher der Technischen Hochschule in Lausanne (EPFL) wollten herausfinden, wie groß diese Hydrathülle bei Ionen ist, d.h. wie viele Wassermoleküle auf ein Ion reagieren. Es stellte sich heraus, dass ein Ion etwa eine Million umgebende Wassermoleküle beeinflussen kann. Dieser Effekt wird noch verstärkt, wenn das Partikel eine große Oberflächenladung und eine hohe Konzentration an adsorbierten Ionen aufweist. Infolgedessen kann ein einziges Nanoplastikpartikel die Eigenschaften von Millionen Wassermolekülen verändern¹⁵⁸ (Abb. 59). Die in der Hydrathülle gebundenen Moleküle sind weniger mobil¹⁵⁹. Infolgedessen verringert sich die Wärmekapazität

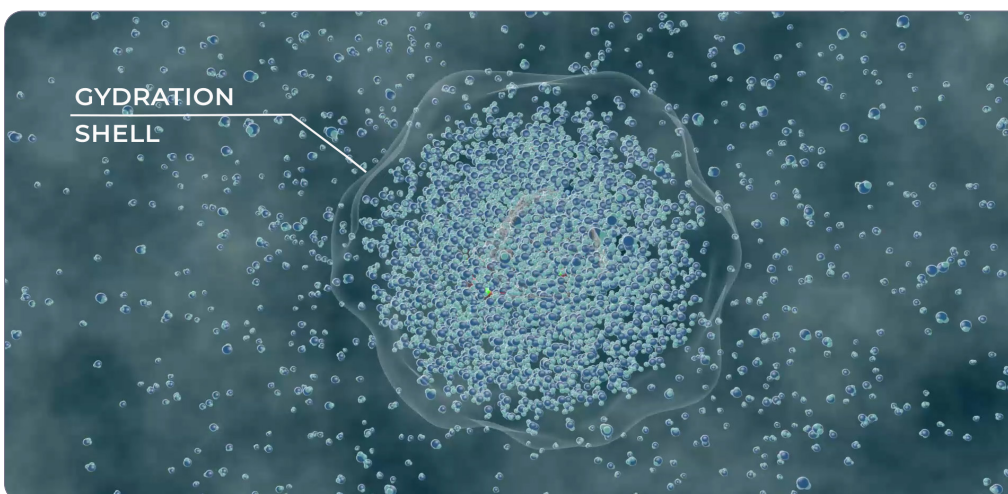


Abbildung 59. Schematische Darstellung der Hydrathülle um einen Nanoplastikpartikel.

¹⁵⁸Chen, Y. et al. Electrolytes induce long-range orientational order and free energy changes in the H-bond network of bulk water. *Sci. Adv.* 2, e1501891 (2016). <https://doi.org/10.1126/sciadv.1501891>

¹⁵⁹Laage, D., Elsaesser, T. & Hynes, J. T. Water Dynamics in the Hydration Shells of Biomolecules. *Chem. Rev.* 117, 10694–10725 (2017). <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.6b00765>

¹⁶⁰Chew, T., Daik, R. & Hamid, M. Thermal Conductivity and Specific Heat Capacity of Dodecylbenzenesulfonic Acid-Doped Polyaniline Particles—Water Based Nanofluid. *Polymers* 7, 1221–1231 (2015). <https://doi.org/10.3390/polym7071221>

¹⁶¹Riazi, H. et al. Specific heat control of nanofluids: A critical review. *International Journal of Thermal Sciences* 107, 25–38 (2016). <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2016.03.024>

Die Störung der Struktur der Wasserstoffbrücken führt auch zu einer Verringerung der Wärmeleitfähigkeit¹⁶². Infolgedessen kann das Wasser in der Nähe des Nanoplastiks weiterhin erwärmt bleiben, da es seine Fähigkeit, Wärme effektiv zu übertragen, verliert.

Konzentrationszonen von Mikro- und Nanoplastik im Ozean

Mikro- und Nanoplastik kann durch Strömungen im gesamten Ozean verteilt werden, und dichtere Partikel oder kontaminiertes Plastik kann sich auf dem Meeresboden ablagern. Die Anhäufung von Nanoplastik wurde auch in Bereichen der Thermokline beobachtet, einer Übergangsschicht, die sich zwischen dem warmen Oberflächenwasser und kälteren tieferen Schichten befindet¹⁶³ (Abb. 60).

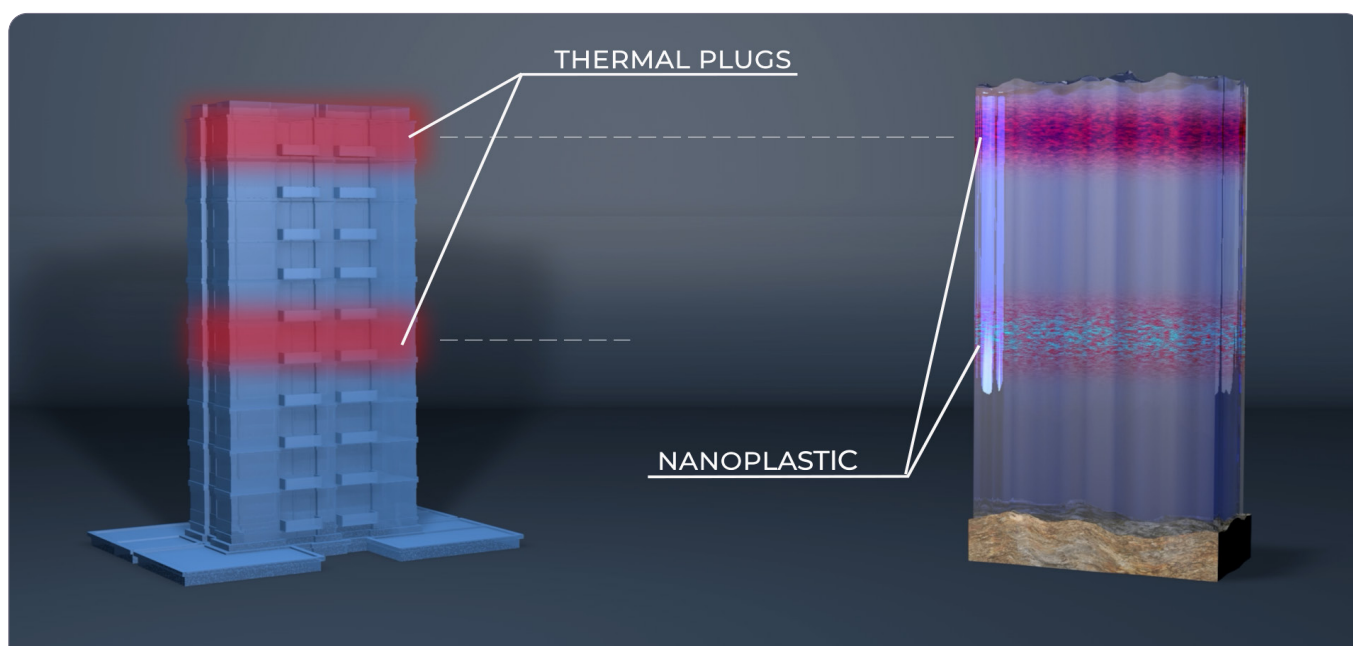


Abbildung 60. Die Darstellung zeigt einen bildlichen Vergleich der Konzentrationszonen von Mikro- und Nanoplastik im Ozean mit einem mehrstöckigen Gebäude mit Wärmestaus im fünften und zehnten Stock. Diese Staus stören den normalen Wärmeaustausch, und anstatt gleichmäßiger Verteilung, staut sich die Wärme in diesen Stockwerken. Eine Wärmebildkamera wird zeigen, dass die Temperatur im Inneren des Gebäudes viel höher ist als im gleichen Gebäude ohne Wärmestaus. In ähnlicher Weise stört Nanoplastik im Wasser die natürlichen Wärmeaustauschmechanismen, indem es "Wärmestaus" im Meer verursacht.

Die Zunahme der Konzentration von Nanoplastik in den Ozeanen kann zu Veränderungen im globalen Wärmehaushalt führen. Dies kann den Anstieg der Ozeantemperatur beeinflussen und damit die Klimaveränderungen verursachen. Es ist wichtig zu beachten, dass selbst kleine Mengen an Nanoplastik erhebliche Auswirkungen auf die Ökosysteme haben können. Der Anstieg der Oberflächentemperatur der Ozeane beschleunigt die Fragmentierung von Plastikmüll in Mikro- und Nanoplastik (Abb. 61). Das Ergebnis ist ein Anstieg der Menge dieser Partikel, die zusammen mit Wasserdampf in die Atmosphäre gelangen. Das Vorhandensein von Mikro- und Nanoplastik in der Atmosphäre trägt zu ihrer zusätzlichen Erwärmung bei, was wiederum die Erwärmung des Ozeans verstärkt. So entsteht ein Teufelskreis, in dem sich die Prozesse gegenseitig verstärken.

¹⁶²Berger Bioucas, F. E. et al. Effective Thermal Conductivity of Nanofluids: Measurement and Prediction. Int J Thermophys 41, 55 (2020). <https://doi.org/10.1007/s10765-020-2621-2>

¹⁶³Tikhonova, D. A., Karetnikov, S. G., Ivanova, E. V. & Shalunova, E. P. The Vertical Distribution of Microplastics in the Water Column of Lake Ladoga. Water Resour 51, 146–153 (2024). <https://doi.org/10.1134/S009780782370063X>

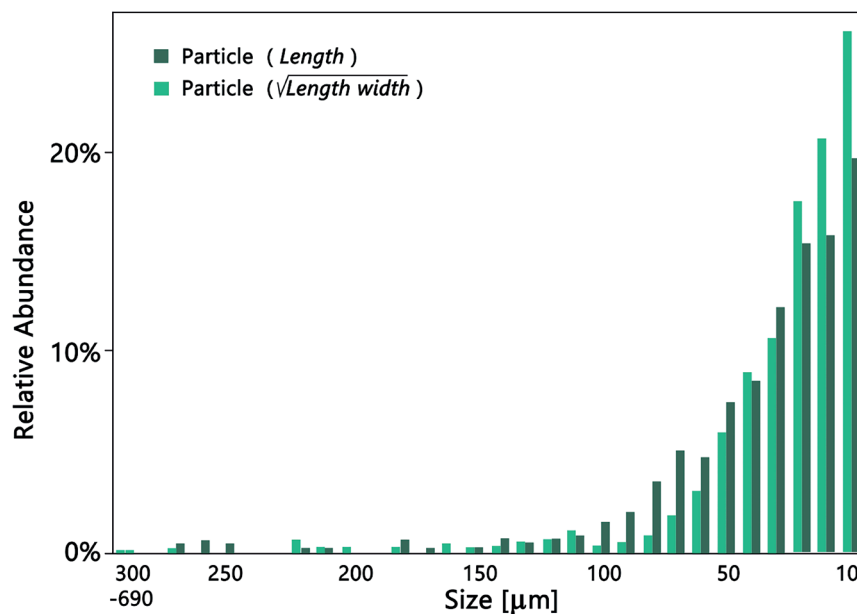


Abbildung 61. Relative Größenverteilung der Mikroplastikpartikel für alle untersuchten Stationen (np = 543). Die Bilder zeigen die kleinsten (rechts) und größten (links) MP-Partikel, die durch Raman-Mikrospektrometrie nachgewiesen und bestätigt wurden.

Quelle: Enders, K., Lenz, R., Stedmon, C. A. & Nielsen, T. G. Abundance, size and polymer composition of marine microplastics $\geq 10 \mu\text{m}$ in the Atlantic Ocean and their modelled vertical distribution. Marine Pollution Bulletin 100, 70–81 (2015). <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.09.027>

Zusammenhang zwischen der elektrostatischen Ladung von MNP und atmosphärischen Phänomenen

Mikro- und Nanoplastik gelangt auf unterschiedlichen Wegen in die Atmosphäre. Der Wasserdampf, der von der Oberfläche der Ozeane und anderer Gewässer aufsteigt, trägt die Mikropartikel in die Luft¹⁶⁴. Auf Kontinenten sind Fabriken, Müllverbrennungsanlagen und Mülldeponien die Hauptquellen für atmosphärisches Plastik. Darüber hinaus wird Mikroplastik in die Luft freigesetzt, wenn landwirtschaftliche Düngemittel und Plastikmulch austrocknen und vom Wind verstreut werden. Mikroplastikpartikel werden durch Abrieb der Autoreifen freigesetzt.

Diese und viele andere Quellen tragen erheblich zur Verschmutzung der Atmosphäre bei. Diese Prozesse tragen zur Anhäufung und Ausbreitung von Mikroplastik in der Atmosphäre bei, was zu ernsthaften ökologischen und klimatischen Bedrohungen führt. Nach dem Eintritt in die Atmosphäre können Mikro- und Nanoplastikpartikel als Kondensationskerne für Wasserdampf dienen. Je mehr solcher Kerne, desto schneller kondensiert der Wasserdampf zu Tröpfchen. Mikroplastik in der Luft wurde in Wolkenwasserproben nachgewiesen, die auf Berggipfeln in Japan gesammelt wurden¹⁶⁵ (Abb. 62).

¹⁶⁴Shaw, D. B., Li, Q., Nunes, J. K. & Deike, L. Ocean emission of microplastic. PNAS Nexus 2, pgad296 (2023). <https://doi.org/10.1093/pnasnexus/pgad296>

¹⁶⁵Wang, Y. et al. Airborne hydrophilic microplastics in cloud water at high altitudes and their role in cloud formation. Environ Chem Lett 21, 3055–3062 (2023). <https://doi.org/10.1007/s10311-023-01626-x>

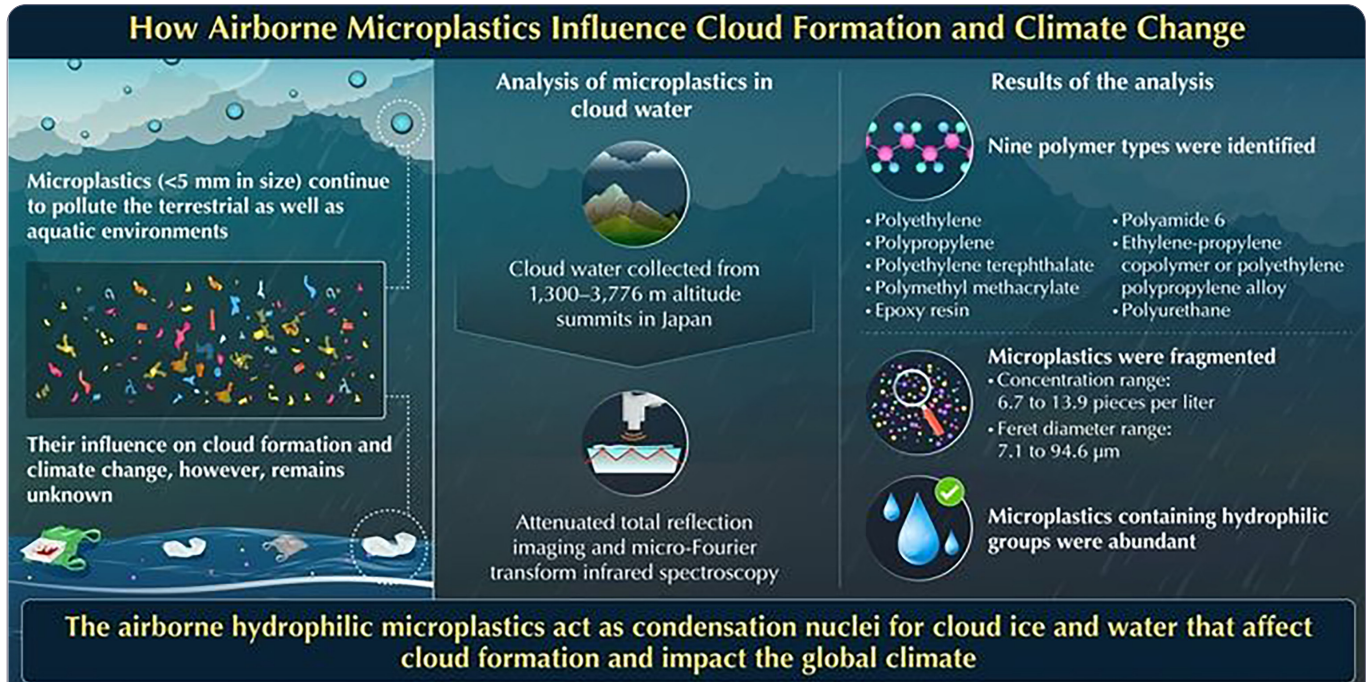


Abbildung 62. Luftübertragene hydrophile Mikroplastikpartikel in Wolkenwasserproben in großen Höhen und ihre Rolle bei der Wolkenbildung.

Quelle: Hiroshi Okochi from Waseda University

<https://www.sustainableplastics.com/news/scientists-find-microplastics-clouds-above-mount-fuji>

66

"In einer verschmutzten Umgebung mit vielen Aerosolpartikeln wie Mikroplastik verteilt sich das gesamte Wasser auf diese vielen Aerosolpartikel und bildet kleinere Tröpfchen um jedes Partikel. Wenn es mehr Tropfen gibt, fällt weniger Niederschlag. Da die Tropfen aber nur fallen, wenn sie groß genug sind, sammelt sich in der Wolke mehr Wasser. Infolgedessen kommt es zu stärkeren Niederschlägen", so Miriam Friedman, Professorin für Chemie am Institut für Meteorologie und Atmosphärenwissenschaften der Pennsylvania State University¹⁶⁶.

Dies erklärt, warum es in den letzten Jahren in verschiedenen Regionen zu anomalen Niederschlägen kommt.

¹⁶⁶The Pennsylvania State University Research. Microplastics impact cloud formation, likely affecting weather and climate. (2024)
<https://www.psu.edu/news/research/story/microplastics-impact-cloud-formation-likely-affecting-weather-and-climate>

Elektrische Ladungen in Wolken

Die Erdatmosphäre ist ein komplexes elektrisches System, in dem Wassermoleküle eine wichtige Rolle spielen. Seit Benjamin Franklin 1752 erstmals nachwies, dass die Atmosphäre elektrisiert ist und Gewitter elektrischer Natur sind, ist es klar geworden, dass Wasser in Form von Dampf, Flüssigkeit und Eis eine Schlüsselrolle in diesen Prozessen spielt. Wasser in seiner reinen Form ist neutral, aber bei Phasenübergängen wie Schmelzen und Gefrieren und bei Zusammenstößen von Molekülen kann es Ionen auf andere Teilchen übertragen, was zu elektrischen Effekten führt.

In der Atmosphäre führen Zusammenstöße zwischen Eiskristallen, unterkühlten Wassertropfen und anderen Teilchen in Gegenwart natürlicher elektrischer Felder zu einer Ladungstrennung. Dieser Prozess spielt eine Schlüsselrolle bei der Bildung von atmosphärischer Elektrizität, einschließlich Gewitterwolken. Dieses Phänomen ist wichtig für die Bildung von Wolken und Niederschlag. Geladene Tropfen werden voneinander angezogen, was den Prozess ihrer Zusammenführung zu größeren Tropfen beschleunigt und schließlich zur Bildung von Wolken führt, die Niederschläge wie Regen, Schnee oder Hagel erzeugen können.



"Ladungen sind extrem wichtig, und im Prozess der Wolkenbildung bedeuten sie so ziemlich alles. Und wir haben herausgefunden, dass Ladungen eine Schlüsselrolle spielen", sagte Dr. Gerald H. Pollack, Professor für Bioengineering an der University of Washington sowie Chefredakteur und Gründer der interdisziplinären Forschungszeitschrift WATER¹⁶⁷.

Im Jahr 1843 entdeckte Michael Faraday, dass Elektrizität durch die Reibung von Wassertropfen an Metall entsteht, wodurch das Wasser aufgeladen wird. Diese Entdeckung führte zu weiteren Forschungen über die Aufladung von Wasser durch Reibung, Phasenübergänge und Kontaktelektrisierung sowie zu Versuchen, diesen Effekt zur Schaffung neuer Energiequellen zu nutzen.

Es ist bekannt, dass feuchte Luft die Oberflächenladung neutralisieren kann, indem sie einen Wasserfilm bildet, der es den Ionen ermöglicht, sich zu bewegen und die gespeicherte Ladung zu zerstreuen. In einigen Fällen können jedoch Oberflächen, die Wasser adsorbieren, Ladungen aus der feuchten Atmosphäre akkumulieren, was sich ebenfalls auf den elektrischen Zustand der Umgebung auswirkt¹⁶⁸. Forschungen haben gezeigt, dass sich Schwermetalle leicht an Mikroplastik haften können und dass diese Kombination die Ökosysteme des Planeten potenziell schädigen kann.

¹⁶⁷AllatRa TV. Anthropogenic factor in the oceans' demise: Popular science film. Time 55:00, (2025).

<https://allatra.tv/en/video/anthropogenic-factor-in-the-oceans-demise-popular-science-film> (Abgerufen am 01.05.2025).

¹⁶⁸Lax, J. Y., Price, C. & Saaroni, H. On the Spontaneous Build-Up of Voltage between Dissimilar Metals Under High Relative Humidity Conditions. Sci Rep 10, 7642 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41598-020-64409-2>

Außerdem kann Mikroplastik und das Stoffgemisch auf seiner Oberfläche nicht nur an anderen Schadstoffen haften, sondern auch miteinander interagieren und ihre chemischen Eigenschaften verändern¹⁶⁹. Wenn Mikro- und Nanoplastikpartikel in die Atmosphäre gelangen, können sie das empfindliche Gleichgewicht der atmosphärischen Prozesse stören. Plastikpartikel können eine Ladung tragen, die die Anziehungskraft polarer Wassermoleküle verstärkt und die Bildung von Tropfen fördert. Plastikpartikel werden nicht zu gewöhnlichen Kondensationskernen wie Pollen, Meersalz oder Ruß, sondern können von den Tropfen viel effektiver aufgenommen werden als neutrale Teilchen¹⁷⁰.

Das bedeutet, dass sich Wassertropfen schneller um geladene Teilchen herum bilden, was die Wolkenstruktur beeinflusst und zur Bildung großer Tropfen und sogar ungewöhnlich großer Eiskristalle führen kann¹⁷¹. So fand ein Forscherteam kürzlich in Wolken auf Berggipfeln in Japan Kunststoffgranulat mit einer superhydrophilen Oberfläche¹⁷².

Einfluss auf die Wolken- und Niederschlagsbildung

Mikroplastik kann sich auf Niederschlagsmuster, Wettervorhersagen, Klimamodelle und sogar auf die Flugsicherheit auswirken, indem es die Wolkenbildung durch Eiskristalle in der Atmosphäre beeinflusst.

Eine Untersuchung¹⁷³ ergab, dass Wassertropfen mit Mikroplastik bei 4-10 °C höheren Temperaturen gefrieren als solche ohne Mikroplastik, d. h. in niedrigeren Höhen. Normalerweise würde ein Wassertropfen ohne jegliche Verunreinigungen bei etwa -38 °C gefrieren. Im Falle des Mikroplastiks gefrieren jedoch 50 % der Tropfen bei -18 °C bis -24 °C, je nach Art des Kunststoffs.

Wassertropfen, die Mikroplastik enthalten, gefrieren schneller und bilden größere Eispartikel. Diese Partikel werden durch aufsteigende Luftströmungen nach oben getragen, wiederholt mit Eisschichten bedeckt und fallen dann auf die Erde. Dieses Phänomen kann dazu führen, dass die Größe von Hagelkörnern zunimmt (Abb. 63-64), ihre zerstörerische Wirkung verstärkt und der Prozess der Eiswolkenbildung aktiviert wird. Infolgedessen ändern sich die Häufigkeit und Intensität der Niederschläge, einschließlich Regen- und Schneefälle. Dies kann zu Kaskadeneffekten mit Auswirkungen auf das Klima, den Wasserkreislauf und die Ökosysteme führen.

¹⁶⁹Ho, W.-K. et al. Sorption Behavior, Speciation, and Toxicity of Microplastic-Bound Chromium in Multisolute Systems. Environ. Sci. Technol. Lett. 10, 27–32 (2023). <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.2c00689>

¹⁷⁰Harrison, R. G. Atmospheric electricity and cloud microphysics <https://cds.cern.ch/record/557170/files/p75.pdf> (Abgerufen am 01.05.2025).

¹⁷¹The Pennsylvania State University News. Microplastics impact cloud formation, likely affecting weather and climate. (2024) <https://www.psu.edu/news/research/story/microplastics-impact-cloud-formation-likely-affecting-weather-and-climate> (Abgerufen am 01.05.2025).

¹⁷²Wang, Y., Okochi, H., Tani, Y. et al. Airborne hydrophilic microplastics in cloud water at high altitudes and their role in cloud formation. Environ Chem Lett 21, 3055–3062 (2023). <https://doi.org/10.1007/s10311-023-01626-x>

¹⁷³Busse, H. L., Ariyasena, D. Dh., Orris J. & Freedman, M. Ar. Pristine and Aged Microplastics Can Nucleate Ice through Immersion Freezing. ACS ES&T Air 1, 1579–1588 (2024). <https://doi.org/10.1021/acsestair.4c00146>

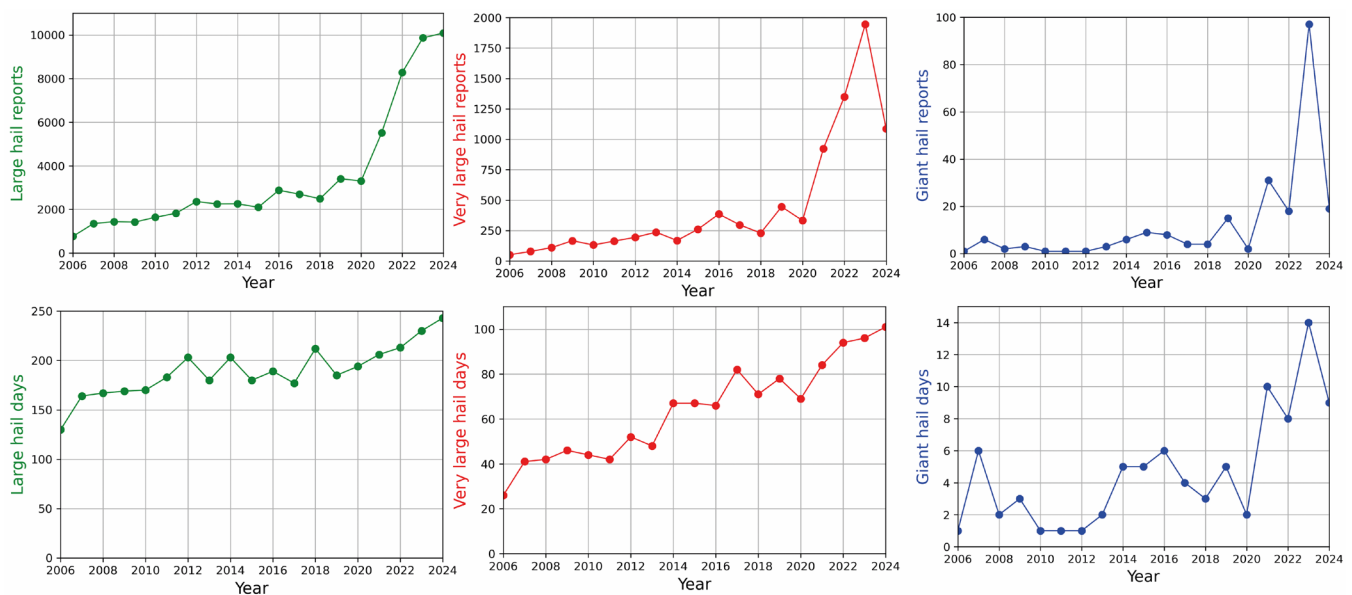


Abbildung 63. Anzahl der Meldungen und Tage mit großem (2+ cm), sehr großem (5+ cm) und riesigem (10+ cm) Hagel zwischen 2006 und 2024.

Quelle: European Severe Storms Laboratory. Hailstorms of 2024 <https://www.essl.org/cms/hailstorms-of-2024/>

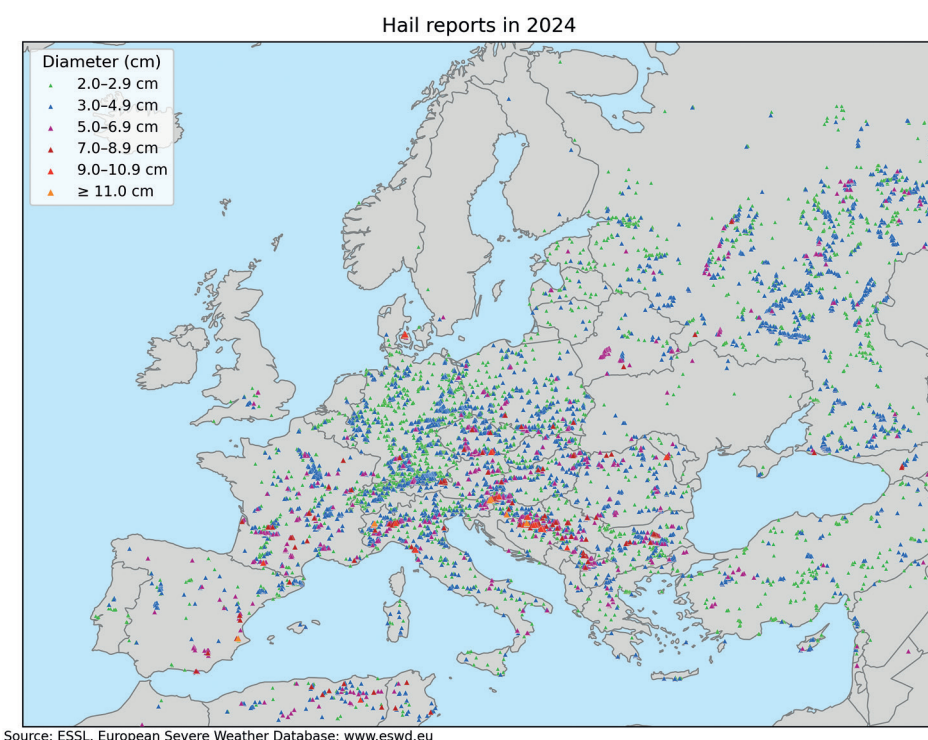


Abbildung 64. Räumliche Verteilung der Meldungen über große Hagelunwetter in Europa und angrenzenden Gebieten im Jahr 2024.

Quelle: European Severe Storms Laboratory. Hailstorms of 2024 <https://www.essl.org/cms/hailstorms-of-2024/>

Wenn Nanoplastikpartikel in der Atmosphäre vorhanden sind, bilden sich Wolken in niedrigeren Höhen, in der Regel unterhalb von 2 Kilometern. Dies führt dazu, dass die Wolken weniger beweglich sind, was die normale Verteilung der Niederschläge beeinträchtigt. Dies kann in einigen Regionen zu Trockenheit und in anderen zu übermäßigen Niederschlägen führen.

Die Rolle des MNP bei der Störung des Klimagleichgewichts des Planeten

Dichtere Wolken beginnen, die Wärme in den unteren Schichten der Atmosphäre wie eine Decke einzuschließen, wobei sie einen Teil der Wärmestrahlung absorbieren und an die Erdoberfläche zurückgeben. Dies verringert das Entweichen der Wärme in den Weltraum und trägt zur Erwärmung der Atmosphäre bei. Steigende Temperaturen fördern die zusätzliche Wasserverdunstung aus den Ozeanen, und mehr Feuchtigkeit in der Atmosphäre führt zu einer weiteren Erwärmung. Es ist ein Teufelskreis. Anzumerken ist, dass mit jedem Grad Erwärmung die Menge an Feuchtigkeit in der Luft um etwa 7 %¹⁷⁴ und die Häufigkeit von Blitzen um 12 % zunimmt¹⁷⁵.



Kevin Trenberth, renommierter Klimatologe am US National Center for Atmospheric Research (NCAR) und Hauptautor der IPCC-Berichte, stellt fest: *"Die Kombination aus erhöhter Temperatur und erhöhter Wasserdampfkonzentration in der Atmosphäre führt zu derer größeren Instabilität. Dies führt zu verstärkter Konvektion und mehr Stürmen. Einige dieser Stürme, die stärksten, entwickeln sich zu Gewitterstürmen. Unter diesen Bedingungen steigt die Gefahr von schweren Gewittern.*

Wenn sich Gewitter zusammenfügen und interagieren, wie es bei tropischen Stürmen geschieht, können sie sich zu stärkeren Hurrikanen entwickeln. All diese Faktoren summieren sich und erhöhen das Risiko von Stürmen, schweren Gewittern, insbesondere von Superzellen, die Hagel erzeugen und an manchen Orten unter den entsprechenden Bedingungen auch Tornados hervorbringen können."

Die extreme Erwärmung der Ozeane, überschüssige Elektrizität und Wärme in der Atmosphäre verschärfen die Klimasituation und verursachen verheerendere Wetterereignisse wie schwere Gewitter, Hurrikans, Blitze und Sprites.

Plastik in der Atmosphäre verschmutzt nicht nur die Umwelt, sondern verändert auch die Klimaprozesse, indem es die Bildung von Wolken und Niederschlägen beeinflusst. Es erhöht die elektrostatische Ladung in der Atmosphäre, beschleunigt die Kondensation von Wasserdampf und beeinflusst die Wolkendichte, was zu einer erhöhten Intensität von Stürmen, Gewittern und anderen zerstörerischen Naturphänomenen führen kann. Wir stehen an der Schwelle zum Verständnis der umfangreichen Folgen dieser Auswirkungen auf das Klima, die dringende und umfassende Maßnahmen zur Verringerung der Verschmutzung der Ozeane und der Atmosphäre durch Plastikpartikel erfordern.

¹⁷⁴NASA. Steamy relationships: How atmospheric water vapor amplifies Earth's greenhouse effect. (2022)

<https://science.nasa.gov/earth/climate-change/steamy-relationships-how-atmospheric-water-vapor-amplifies-earths-greenhouse-effect>

¹⁷⁵ Romps, D. M., Seeley, J. T., Vollaro, D. & Molinari, J. Projected increase in lightning strikes in the United States due to global warming. Science 346, 851–854 (2014). <https://doi.org/10.1126/science.1259100>

Interaktion zwischen dem Ozean und dem Erdmagnetfeld

Die Ozeane bedecken etwa 70 % der Erdoberfläche und sind nicht nur riesige Wasserspeicher, sondern auch wichtige Elemente in den komplexen elektrischen Prozessen des Planeten. Sie interagieren mit dem Magnetfeld der Erde und nehmen an den elektromagnetischen Prozessen des Planeten teil.

Das Erdmagnetfeld schützt die Oberfläche des Planeten vor Sonnenwind und kosmischer Strahlung und wirkt wie ein natürlicher Schutzschild. Ohne dieses Feld würde die Atmosphäre zerstört werden. Das geomagnetische Feld wird im Erdinneren erzeugt, wo sich der flüssige äußere Kern aus Metallen um einen festen inneren Kern bewegt, wodurch ein natürlicher Generator entsteht – ein Prozess, der Geodynamo genannt wird (Abb. 65).

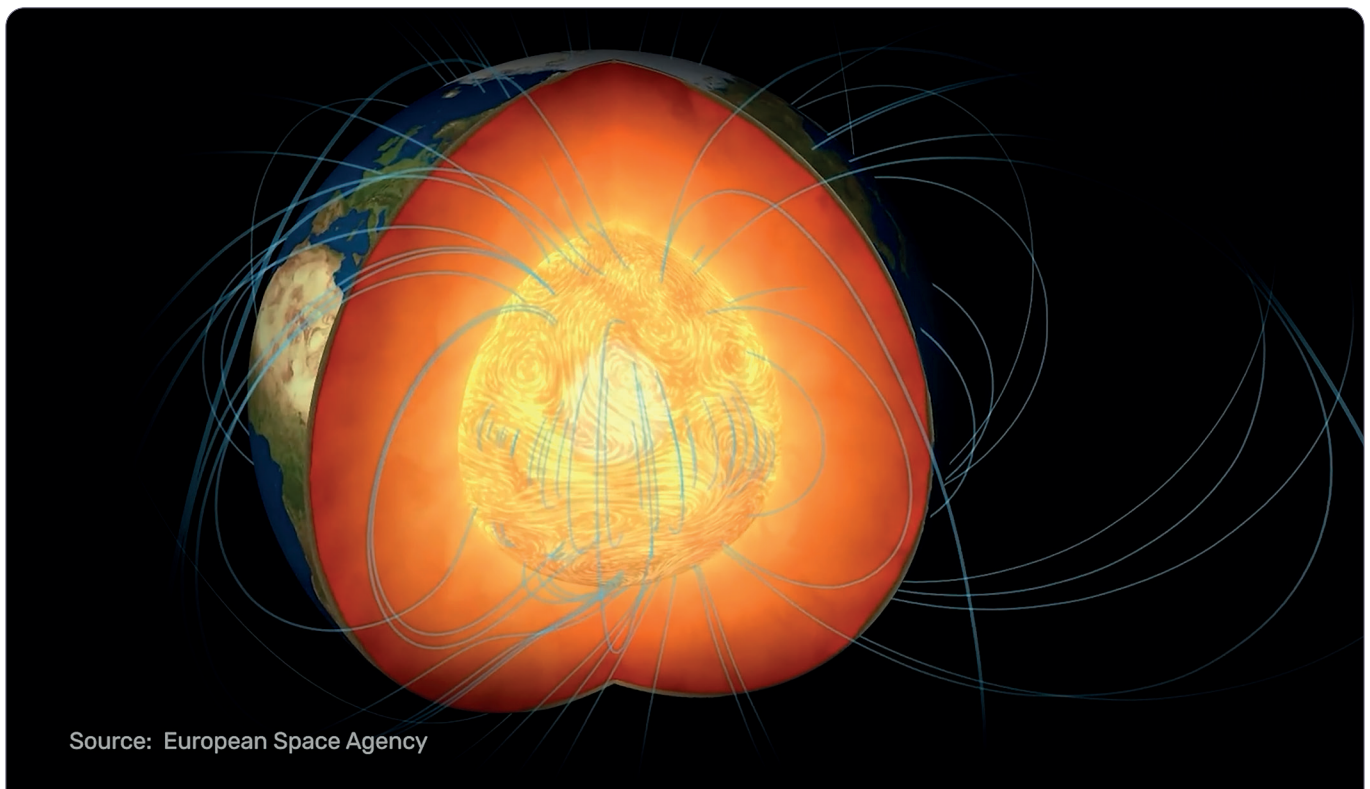


Abbildung 65. Schematische Darstellung des Entstehungsprozesses des Erdmagnetfeldes: Der flüssige äußere Erdkern rotiert um den festen inneren Erdkern und bildet einen natürlichen Generator, bekannt als Geodynamo, der das Magnetfeld des Planeten erzeugt.

Quelle: European Space Agency (ESA) <https://www.esa.int/>

Das Magnetfeld der Erde interagiert mit elektrischen Phänomenen in den Ozeanen und der Atmosphäre. Das Meerwasser hat aufgrund seines Salzgehalts und der darin gelösten Ionen eine hohe elektrische Leitfähigkeit, wodurch es elektrische Ströme leiten kann. Diese Ströme interagieren wiederum mit dem Magnetfeld und erzeugen komplexe elektromagnetische Prozesse, die eine Rolle bei der Dynamik des Magnetfeldes des Planeten spielen.

Wie bereits erwähnt, kann die Verschmutzung der Ozeane, insbesondere durch Mikro- und Nanoplastik, die chemischen und elektrischen Eigenschaften des Wassers verändern. Je höher die Schadstoffkonzentration ist, desto mehr werden die natürlichen elektromagnetischen Prozesse gestört.

Wenn verunreinigtes Wasser verdunstet, können mikroskopisch kleine Tröpfchen und Aerosole Mikro- und Nanoplastik, Schwermetalle und andere Stoffe in die Atmosphäre transportieren¹⁷⁶, was lokale elektromagnetische Prozesse beeinflussen kann. Das ist vergleichbar damit, wie ein metallischer Gegenstand, der sich in der Nähe eines Magneten befindet, die Verteilung des Magnetfeldes verändert und dessen Stärke in einem bestimmten Bereich abschwächt.

Die Auswirkungen der Verschmutzung des Ozeans auf das Erdmagnetfeld müssen weiter untersucht werden, insbesondere im Zusammenhang mit den globalen Klimaveränderungen. Das Verständnis dieser Prozesse kann helfen, ihre potenziellen Auswirkungen auf das Klimasystem und die Ökosysteme des Planeten zu bewerten.



¹⁷⁶Ho, W.-K. et al. Sorption Behavior, Speciation, and Toxicity of Microplastic-Bound Chromium in Multisolute Systems. Environ. Sci. Technol. Lett. 10, 27–32 (2023). <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.2c00689>

AUSWIRKUNGEN VON MIKRO- UND NANO- PLASTIK AUF DIE GESUNDHEIT DER MENSCHEN



"Plastik verschmutzt nicht nur unsere Ozeane und Gewässer und tötet Meerestiere – es befindet sich in uns allen, wir können der Verwendung des Plastiks nicht entkommen. Um dieser Krise entgegenzuwirken, sind weltweite Maßnahmen dringend notwendig."

Marco Lambertini
Generaldirektor von WWF International

Mikro- und Nanoplastik als neuer Risikofaktor für Epidemien im 21. Jahrhundert

In den letzten 30 Jahren wird ein kontinuierlicher Anstieg von Herzinfarkten, Schlaganfällen, Krebserkrankungen, Diabetes, Allergien und entzündlichen Darmerkrankungen beobachtet. Eine Schwächung des Immunsystems ist sowohl bei Kindern als auch bei Erwachsenen weltweit zu verzeichnen. Die Infertilität nimmt zu. Trotz der begrenzten Datenlage über die Anzahl unfruchtbarer Menschen und Paare sind nach Schätzungen der Weltgesundheitsorganisation bereits etwa 17,5 % der erwachsenen Bevölkerung¹⁷⁷ von Unfruchtbarkeit betroffen, d. h. etwa jeder sechste Mensch weltweit.

Seit 2010 wird ein Rückgang der intellektuellen Fähigkeiten der Menschen beobachtet. Selbst in entwickelten Ländern können 25 % der Erwachsenen grundlegende mathematische Aufgaben nicht bewältigen; in den USA beispielsweise liegt dieser Anteil bei 35 %. Die Fähigkeit zur Konzentration, zum logischen Denken und zur Lösung einfacher Aufgaben nimmt ab. Verschiedene Formen von Demenz und kognitiven Störungen nehmen zu¹⁷⁸.

Die Zunahme psychischer Störungen übertrifft die Zunahme somatischer Erkrankungen¹⁷⁹. Angststörungen, Autismus, Depressionen und bipolare Störungen, Aufmerksamkeitsdefizit-Hyperaktivitätsstörung (ADHS) erreichen pandemische Ausmaße.

Immer mehr Daten deuten auf eine Beteiligung von Mikro- und Nanoplastik an der Entstehung verschiedener Krankheiten hin.

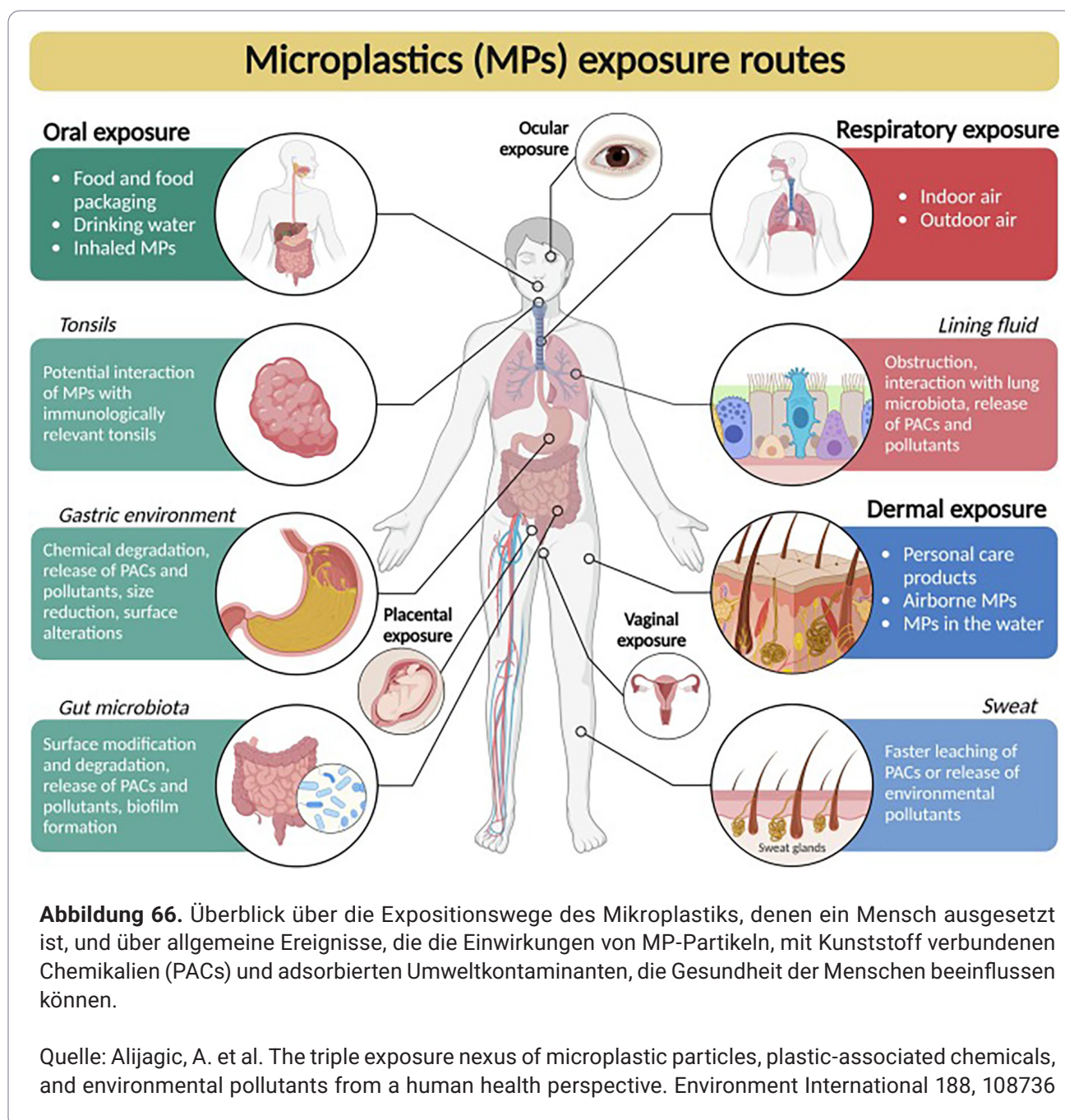
¹⁷⁷ World Health Organization. 1 in 6 people globally affected by infertility. (2023) <https://www.who.int/news/item/04-04-2023-1-in-6-people-globally-affected-by-infertility> (Abgerufen am 01.05.2025).

¹⁷⁸ Financial Times. Have humans passed peak brain power? <https://www.ft.com/content/a8016c64-63b7-458b-a371-e0e1c54a13fc> (Abgerufen am 01.05.2025).

¹⁷⁹ Ipsos. Ipsos Health Service Report 2024: Mental Health seen as the biggest Health issue. (2024) <https://www.ipsos.com/en/ipsos-health-service-report> (Abgerufen am 01.05.2025).

Molekulare Mechanismen der Toxizität von MNP. Schädigung von DNA, Mitochondrien und Zellmembranen

Mikro- und Nanoplastik ist eine der am weitesten verbreiteten Formen der anthropogenen Umweltverschmutzung. Aufgrund ihrer physikalisch-chemischen Eigenschaften können Kunststoffpartikel über große Entfernungen transportiert werden und dabei geographische und ökologische Barrieren überwinden. Die Hauptwege, über die Mikro- und Nanoplastik in den menschlichen Körper gelangt, sind ihre Aufnahme über Wasser und Nahrung, Einatmen mit der Luft und Eindringen durch die Haut¹⁸⁰ (Abb. 66).



¹⁸⁰Bora, S. S. et al. Microplastics and human health: unveiling the gut microbiome disruption and chronic disease risks. Front. Cell. Infect. Microbiol. 14, 1492759 (2024). <https://doi.org/10.3389/fcimb.2024.1492759>

Wie im Abschnitt *"DIE FOLGEN DER PLASTIKVERSCHMUTZUNG: MIKRO- UND NANOPLASTIK (MNP) ALS NEUE FAKTOREN DER PLANETARISCHEN KRISE"* erwähnt, stellt die Meeresumwelt eine bedeutende Quelle für sekundäres Mikroplastik dar. Schätzungen zufolge transportiert die Meeresbrise jährlich etwa 136.000 Tonnen Mikroplastik in die Küstengebiete. Darüber hinaus werden offene Gewässer in urbanisierten Gebieten, einschließlich Abwasser- und Regenwassersysteme, zu bedeutenden Zentren für die Ansammlung und weitere Verbreitung von Kunststoffpartikeln, deren Menge die bisherigen Schätzungen um 90 % übersteigen kann.

Lebensmittel sind ein wichtiger Weg, über den MNP in den menschlichen Körper gelangt. Pflanzen können Nanoplastik über ihr Wurzelsystem aufnehmen und anreichern: Bei der Bewässerung oder bei Niederschlägen dringen die Partikel in den Boden ein und werden zusammen mit dem Wasser aufgenommen, wandern durch das Xylem und reichern sich in Blättern und Früchten an¹⁸¹. Der höchste Gehalt an Plastikpartikeln wurde in Äpfeln, Birnen, Karotten und Brokkoli festgestellt.

Meeresfrüchte sind auch ein Weg, wie MNP übertragen wird. Die Aufnahme von Mikroplastik durch Meeresorganismen wird auf allen trophischen Ebenen beobachtet. Laut einer Studie der Newcastle University nimmt ein Durchschnittsbürger pro Jahr bis zu 250 Gramm Mikroplastik zu sich – das sind etwa 5 Gramm pro Woche, was dem Gewicht einer Plastikkreditkarte entspricht. Darüber hinaus können beim Erhitzen von Kunststoffbehältern, einschließlich Verpackungen für Babynahrung, in Mikrowellen mehr als 2 Milliarden Nanopartikel und 4 Millionen Mikropartikel Plastik pro Quadratzentimeter Oberfläche in die Lebensmittel freigesetzt werden.

Mikroplastik ist in großem Umfang im Trinkwasser enthalten. Untersuchungen zeigen, dass bis zu 90 % der Leitungswasserproben in den USA MNP-Partikel enthalten. Die Hauptwege, über die es in die Wassersysteme gelangt, sind Abwässer, Industrieabfälle und Niederschläge, die aus der Luft aufgefangenes Plastik enthalten. Wenn verschmutztes Wasser verdunstet, können Plastikpartikel in die Atmosphäre aufsteigen und dann mit Regen oder Schnee wieder herunterfallen. Im Rahmen einer Studie, die in 11 Nationalparks der USA durchgeführt wurde, wurden innerhalb von 14 Monaten über 1 000 Tonnen Plastikpartikel, die mit Niederschlägen niedergingen, gemessen – eine Menge, die für die Herstellung von 120 Millionen Plastikflaschen ausreicht.

Die Verbreitung von MNP über Aerosole gilt als einer der gefährlichsten Wege der Belastung für den Menschen. Plastikpartikel steigen von den Oberflächen der Meere und Gewässer auf, werden durch Luftmassen transportiert und werden zu einem Bestandteil des atmosphärischen Aerosols. Schätzungen zufolge kann ein Erwachsener in einer Großstadt während eines zweistündigen Spaziergangs bis zu 106 000 Mikroplastikpartikel einatmen, und in Gebieten in der Nähe von Gewässern steigt diese Zahl um das Zehnfache.

¹⁸¹Azeem, I. et al. Uptake and Accumulation of Nano/Microplastics in Plants: A Critical Review. *Nanomaterials* 11, 2935 (2021). <https://doi.org/10.3390/nano11112935>

Eine neue Studie, die auf der Konferenz des American College of Cardiology (ACC.25) vorgestellt wurde, stellte fest, dass eine höhere Belastung durch Mikroplastik, das unbeabsichtigt aufgenommen oder eingeatmet werden kann, mit einer erhöhten Verbreitung chronischer nichtinfektiöser Erkrankungen verbunden ist. Die Studie zeigte, dass in Gemeinden entlang der Ost- und Westküste des Golfs sowie an einigen Seeufern in den USA höhere Konzentrationen von Mikroplastik in der Umwelt mit einer erhöhten Verbreitung chronischer nichtinfektiöser Erkrankungen wie Bluthochdruck, Diabetes und Schlaganfall verbunden sind.



"Diese Studie liefert erste Hinweise darauf, dass die Belastung durch Mikroplastik Auswirkungen auf die Gesundheit des kardiovaskulären Systems hat, insbesondere auf chronische, nicht infektiöse Erkrankungen wie Bluthochdruck, Diabetes und Schlaganfall", sagte Sai Rahul Ponnana, Magister, wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Case Western Reserve School of Medicine in Ohio und Hauptautor der Studie. "Als wir 154 verschiedene sozioökonomische und ökologische Merkmale in unsere Analyse einbezogen haben, hätten wir nicht erwartet, dass Mikroplastik unter den Top 10 der Faktoren für die Vorhersage der Verbreitung chronischer nichtinfektiöser Erkrankungen rangieren würde"¹⁸².

Mikro- und Nanoplastik kann biologische Barrieren wie Darm, Lunge, Gehirn und Plazenta durchdringen¹⁸³. Mikroplastik, das Süßwasser oder Meerwasser ausgesetzt war, dringt durch das Absetzen von Biomolekülen auf seiner Oberfläche leichter in die Zellen (Abb. 67) ein. Diese Biomoleküle bilden eine Beschichtung, die das Eindringen des Mikroplastiks in den Verdauungstrakt und seine Aufnahme in das Gewebe erleichtert. Diese Beschichtung wirkt wie ein Mechanismus, der das Eindringen von Plastik in die Zellen erleichtert, ähnlich wie ein Trojanisches Pferd¹⁸⁴.

¹⁸²American College of Cardiology. New evidence links microplastics with chronic disease. (2025)

<https://www.acc.org/About-ACC/Press-Releases/2025/03/25/10/19/New-Evidence-Links-Microplastics-with-Chronic-Disease> (Abgerufen am 01.05.2025).

¹⁸³Alqahtani, S., Alqahtani, S., Saquib, Q. & Mohiddin, F. Toxicological impact of microplastics and nanoplastics on humans: understanding the mechanistic aspect of the interaction. Front. Toxicol. 5, 1193386 (2023). <https://doi.org/10.3389/ftox.2023.1193386>

¹⁸⁴Ramsperger, A. F. R. M. et al. Environmental exposure enhances the internalization of microplastic particles into cells. Sci. Adv. 6, eabd1211 (2020). <https://doi.org/10.1126/sciadv.abd1211>

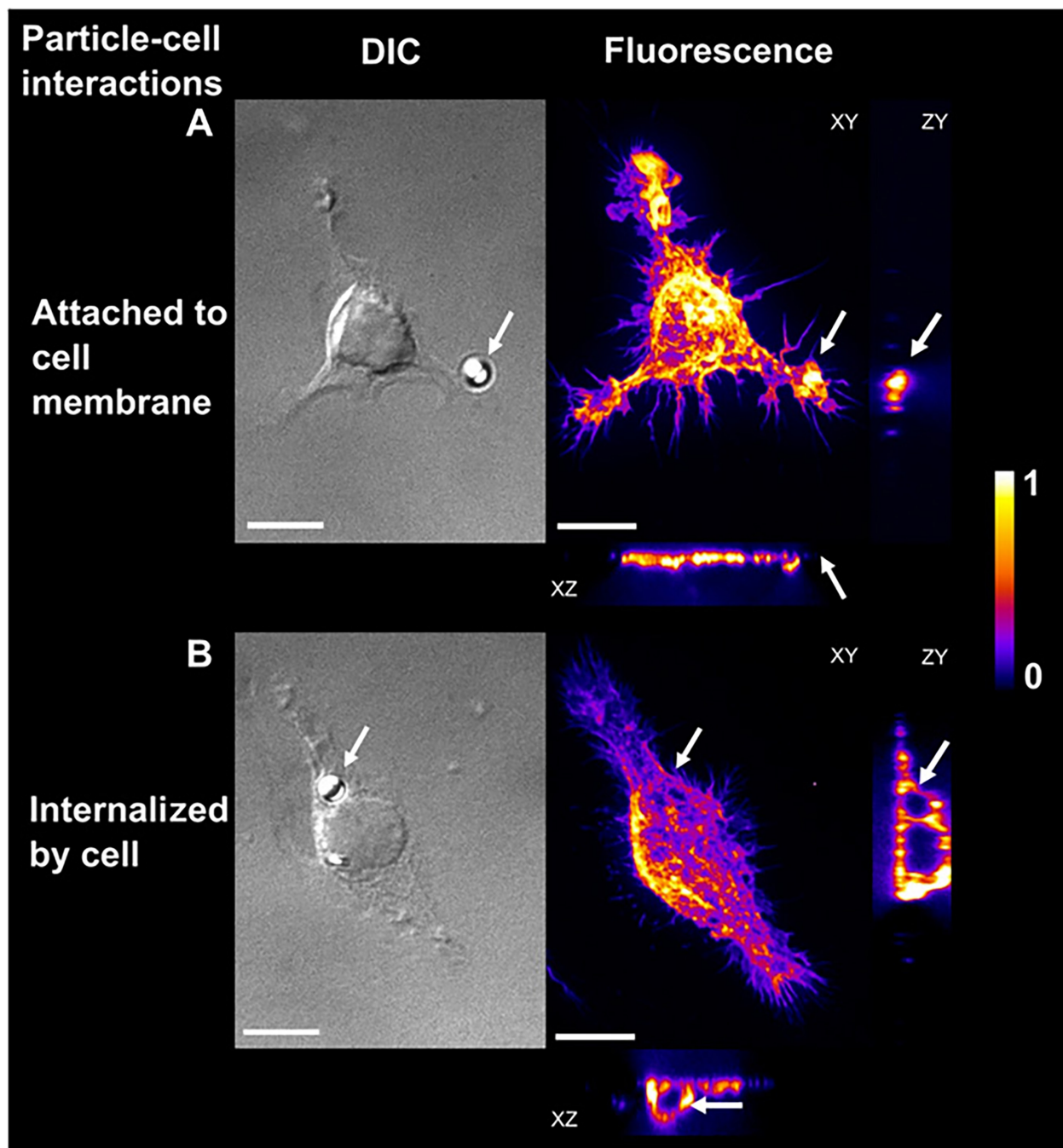


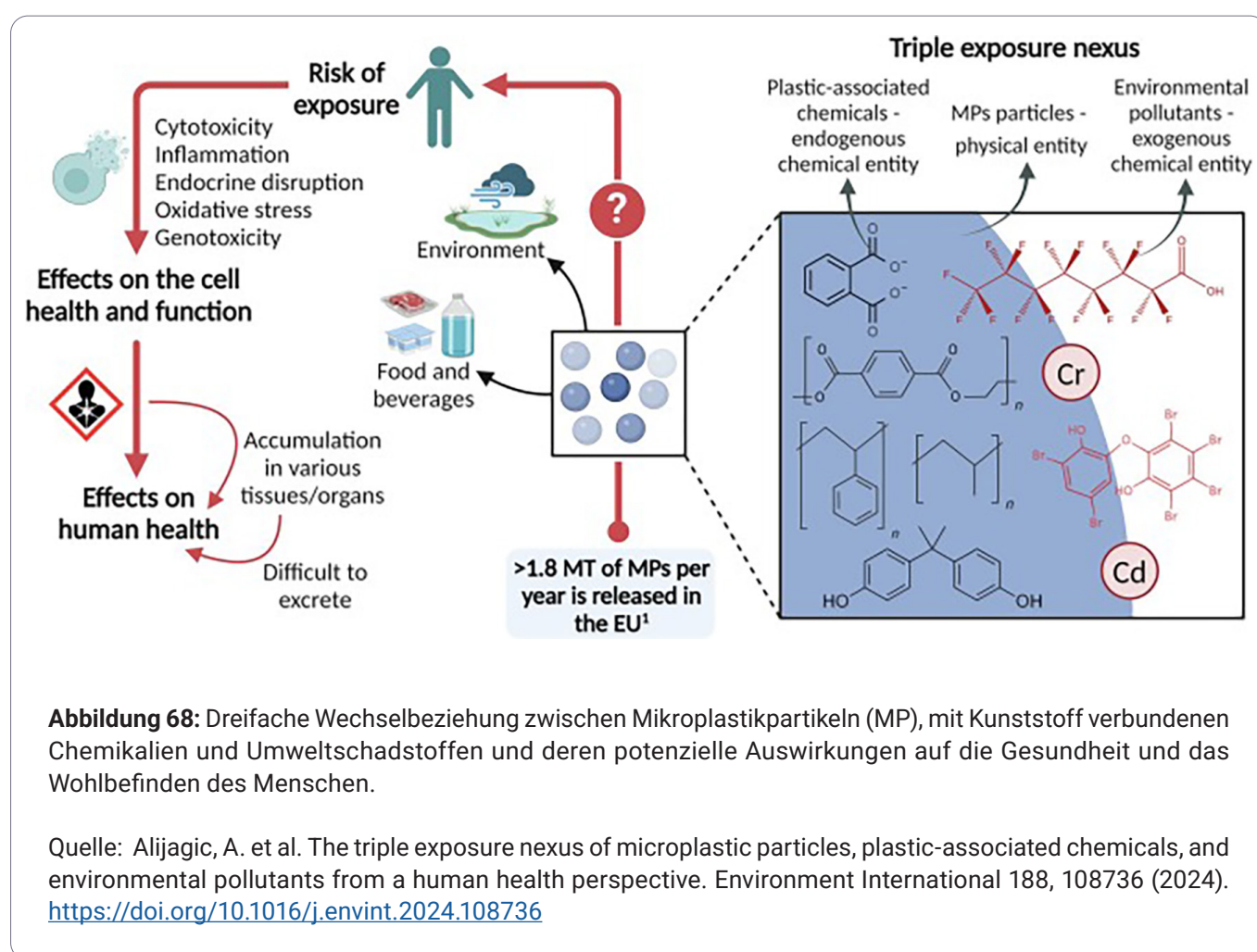
Abbildung 67. Bilder der Interaktionen zwischen Zelle und Mikroplastikpartikeln, die 2 Wochen lang Süßwasser ausgesetzt waren.

DIC: Differentialinterferenzkontrast-Mikroskopbilder der Wechselwirkungen zwischen Partikeln und Zellen. Fluoreszenz: Konfokale Bilder einer rotierenden Zellscheibe mit fluoreszenzmarkiertem fadenförmigen Aktin (Bild in falschen Farben, maximale Intensitätsprojektion, die bedingte Einheiten anzeigt). Die XY-, YZ- und XZ-Projektionen dreidimensionaler konfokaler Bilder ermöglichen es, die an Zellmembranen gebundene Mikroplastikpartikel (A) und die internalisierten Mikroplastikpartikel (B) zu differenzieren. Pfeile zeigen die Position der Mikroplastikpartikel an. Maßstabsbalken: 10 µm.

Quelle: Ramsperger, A. F. R. M. et al. Environmental exposure enhances the internalization of microplastic particles into cells. Sci. Adv. 6, eabd1211 (2020). <https://doi.org/10.1126/sciadv.abd1211>

Die Toxizität von Mikroplastik hängt von vielen Faktoren ab: Größe, Form, Oberflächenladung, Verwitterungsgrad, Einwirkungsdauer, Zusammensetzung der Zusatzstoffe und anderen Eigenschaften¹⁸⁵. Kleinere Partikel dringen leichter in die Zellen ein und verursachen einen stärkeren oxidativen Stress. Die Oberflächenladung von Mikroplastik ist ein wichtiger Parameter, der die Effizienz der Zellaufnahme bestimmt (beeinflusst die Adhäsion). Darüber hinaus besteht Mikroplastik aus Polymeren und verschiedenen Zusatzstoffen, die seine negativen Auswirkungen verstärken¹⁸³.

Mikro- und Nanoplastikpartikel, chemische Verbindungen im Kunststoff und Umweltschadstoffe, die der Kunststoff an sich bindet, haben komplexe¹⁸⁶ negative Auswirkungen auf die Gesundheit der Menschen (Abb. 68) und stellen eine erhebliche Gefahr dar.



¹⁸⁵Li, Y. et al. Potential Health Impact of Microplastics: A Review of Environmental Distribution, Human Exposure, and Toxic Effects. *Environ. Health* 1, 249–257 (2023). <https://doi.org/10.1021/envhealth.3c00052>

¹⁸⁶ Alijagic, A. et al. The triple exposure nexus of microplastic particles, plastic-associated chemicals, and environmental pollutants from a human health perspective. *Environment International* 188, 108736 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.envint.2024.108736>

1 Gramm Mikroplastik kann bis zu 24 000 Nanogramm stabiler organischer Schadstoffe enthalten¹⁸⁷. Diese Substanzen sind hochgiftig, reichern sich im Körper an und können selbst in geringen Konzentrationen Schaden anrichten.

Mikroplastik kann andere Schadstoffe noch schädlicher machen¹⁸⁸, da Mikroplastik und die Mischung von Substanzen auf seiner Oberfläche nicht nur an anderen Schadstoffen haften bleiben, sondern auch miteinander interagieren und deren chemische Eigenschaften verändern können.

Studien zeigen, dass die Belastung durch Mikro- und Nanoplastik bei verschiedenen biologischen Organismen schwere toxische Einwirkungen verursacht, und zwar auf:

- **Makromoleküle:** DNA-Schäden, Störungen der Genexpression und Veränderungen in der DNA-Transkription.
- **Zellen und Organellen:** Störung der Zellteilung, Zytotoxizität, Apoptose, oxidativer Stress, Dysregulation des Metabolismus und Erhöhung der intrazellulären Kalziumkonzentration.
- **Gewebe:** Entzündungsprozesse, Fibrose, Osteolyse des Knochengewebes.
- **Organe:** Immunreaktionen, Organfunktionsstörungen, Neurotoxizität, Karzinogenese, Veränderungen des Stoffwechsels und des Energiehaushalts.
- **Tiere und Menschen:** Verringerung der Fruchtbarkeit, Wachstumsverlangsamung, Depopulation.

Diese Effekte unterstreichen die vielschichtigen Auswirkungen von Mikro- und Nanoplastik auf biologische Systeme¹⁸⁹.

Zellfunktionsstörungen

Die Zerstörung des Organismus unter dem Einfluss von MNP beginnt auf zellulärer Ebene¹⁹⁰.

MNP interagiert mit Zellmembranen über verschiedene Mechanismen, darunter Wasserstoff- und Halogenbindungen sowie hydrophobe, Van-der-Waals- und elektrostatische Wechselwirkungen. Als destabilisierender Faktor beeinträchtigt MNP die Integrität und Funktion von Zellmembranen (Abb. 69).

¹⁸⁷ Shanwei Government. Content on environmental health. Microplastics found in the human body for the first time, are they harmful to health? Here's the answer. https://www.shanwei.gov.cn/swbj/467/503/content/post_550539.html (Abgerufen am 01.05.2025).

¹⁸⁸ Ho, W.-K. et al. Sorption Behavior, Speciation, and Toxicity of Microplastic-Bound Chromium in Multisolute Systems. Environ. Sci. Technol. Lett. 10, 27–32 (2023). <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.2c00689>

¹⁸⁹ Kaushik, A., Singh, A., Kumar Gupta, V. & Mishra, Y. K. Nano/micro-plastic, an invisible threat getting into the brain. Chemosphere 361, 142380 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.142380>

¹⁹⁰ Khan, A. & Jia, Z. Recent insights into uptake, toxicity, and molecular targets of microplastics and nanoplastics relevant to human health impacts. iScience 26, 106061 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.isci.2023.106061>

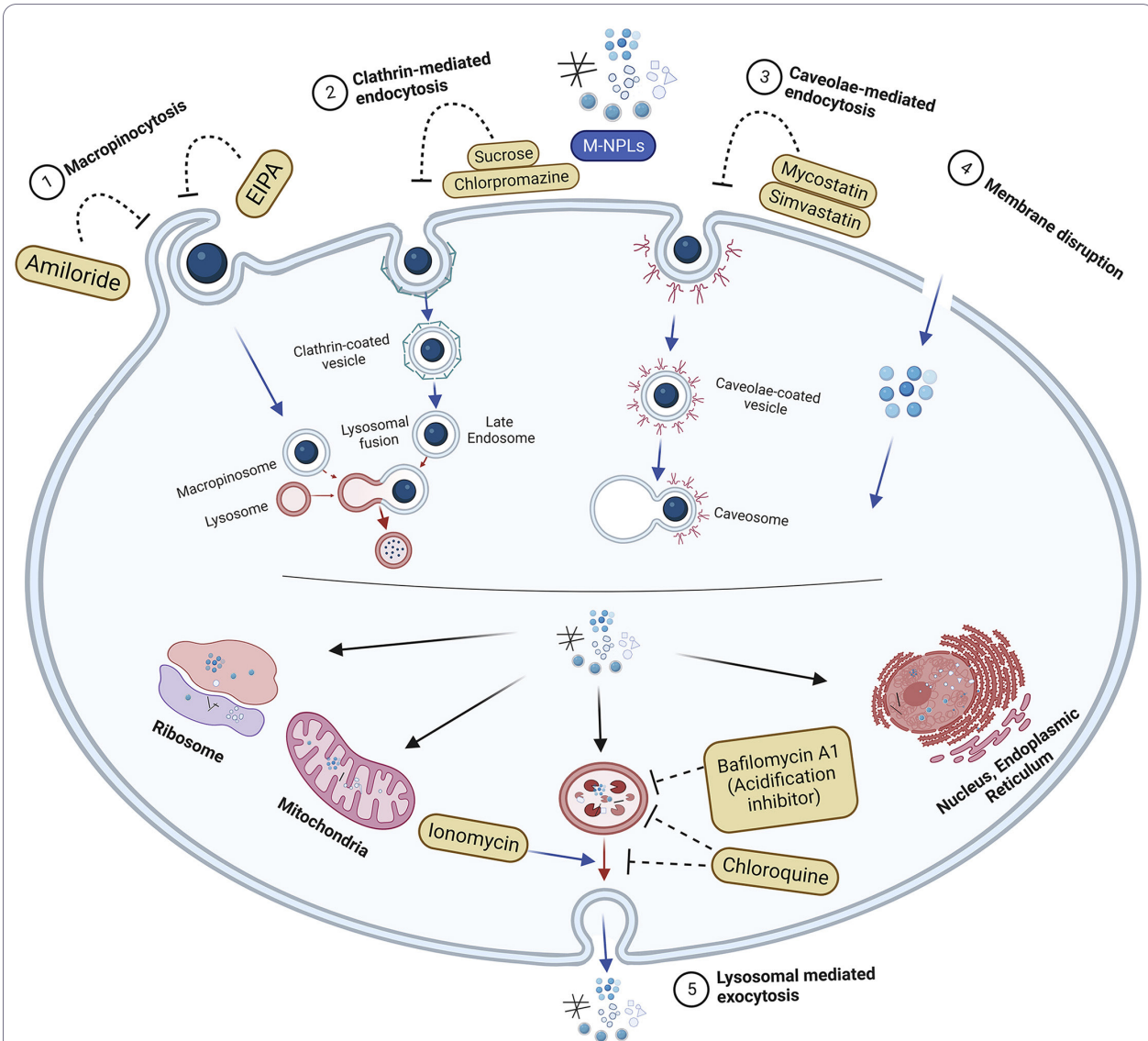


Abbildung 69. Zelluläre Aufnahme und Freisetzung von Mikro- und Nanoplastik (M-NPLs). M-NPL nutzt verschiedene Arten der Endozytose:

(1) Makropinozytose, (2) Clathrin-vermittelte Endozytose, (3) Caveolae-vermittelte Endozytose und Zerstörung der Zellmembran, um in das Innere zu gelangen. M-NPL werden aus den Zellen durch 4) lysosomal vermittelte Endozytose freigesetzt.

Quelle: Khan, A. & Jia, Z. Recent insights into uptake, toxicity, and molecular targets of microplastics and nanoplastics relevant to human health impacts. *iScience* 26, 106061 (2023).

<https://doi.org/10.1016/j.isci.2023.106061>

Dank ihrer geringen Größe kann MNP leicht in menschliche Zellen eindringen (Abb. 70). Seine geringe Größe und die auf MNP akkumulierte elektrostatische Ladung bedingen ihre systemische Wirkung auf den Organismus¹⁹¹.

¹⁹¹Casella, C. & Ballaz, S. J. Genotoxic and neurotoxic potential of intracellular nanoplastics: A review. *Journal of Applied Toxicology* 44, 1657–1678 (2024).
<https://doi.org/10.1002/jat.4598>

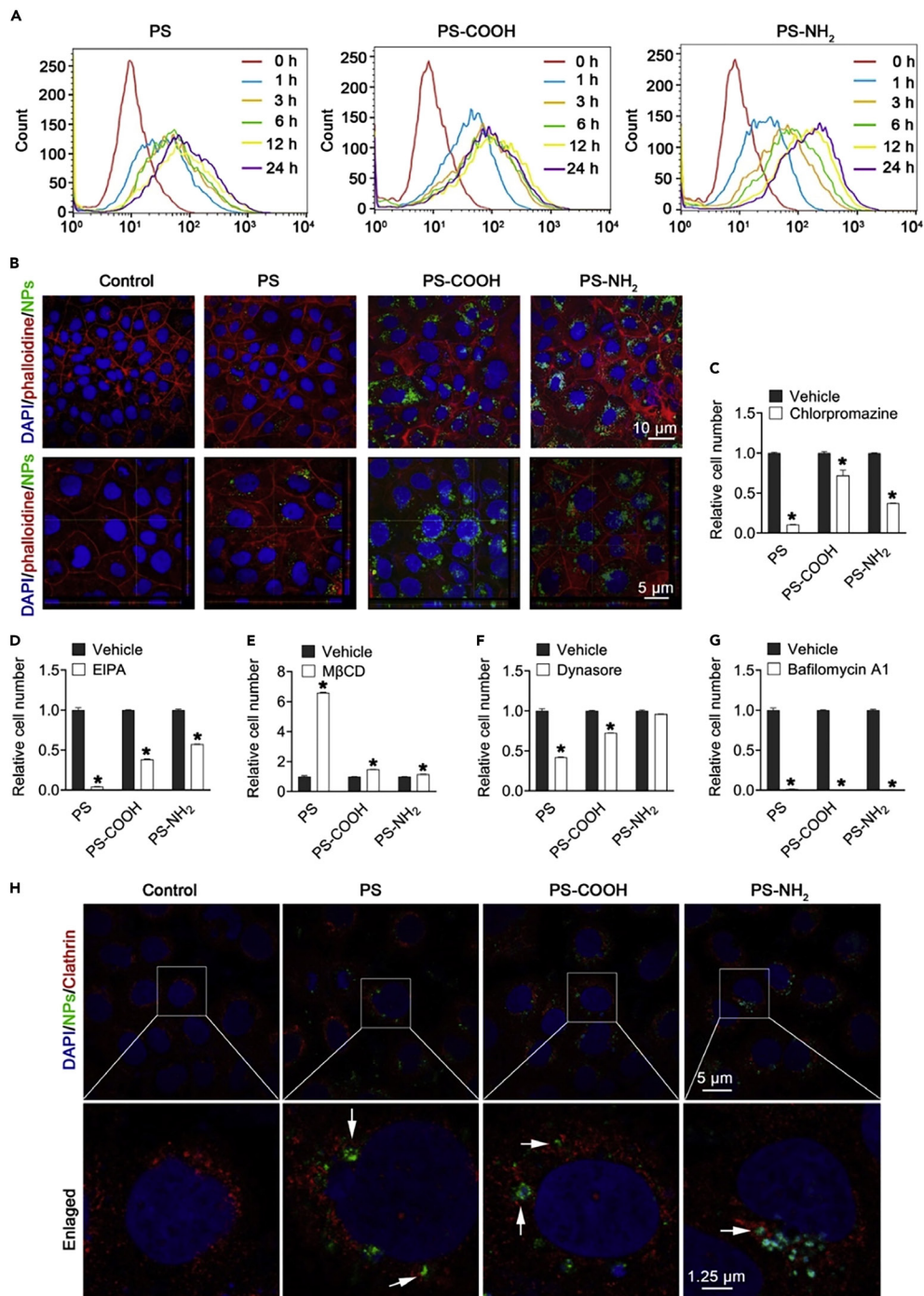


Abbildung 70. Caco-2-Zellen, die NP internalisieren.

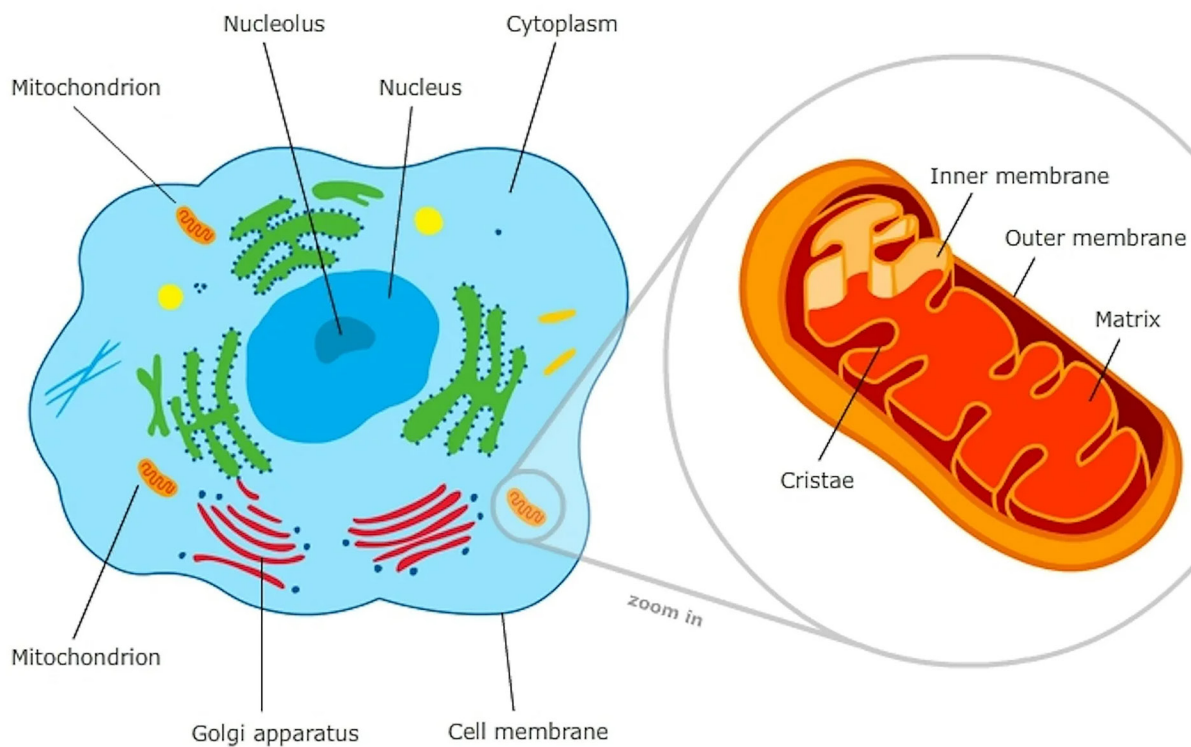
(A–G) Analyse der Internalisation von NP durch Caco-2-Zellen mittels Durchflusszytometrie (A) und Konfokalmikroskopie (B). Durchflusszytometrie-Analyse von Caco-2-Zellen, die zuvor 1 Stunde lang mit Chlorpromazin (C), EIPA (D), MβCD (E), Dynasore (F) und Bafilomycin A1 (G) behandelt wurden, gefolgt von einer 24-stündigen Bearbeitung mit NP. Lokalisierung von NP in Clathrin-vermittelten Vesikeln, untersucht mittels konfokaler Mikroskopie (H).

Quelle: Khan, A. & Jia, Z. Recent insights into uptake, toxicity, and molecular targets of microplastics and nanoplastics relevant to human health impacts. *iScience* 26, 106061 (2023).

<https://doi.org/10.1016/j.isci.2023.106061>

Der entscheidende Punkt der zerstörerischen Wirkung auf zellulärer Ebene ist die Schädigung der Zellmembranen, Mitochondrien und die Zerstörung der DNA. Elektrostatisch geladene Mikro- und Nanoplastikpartikel können das Membranpotenzial von Zellen, insbesondere von Neuronen, destabilisieren und spontane elektrische Signale, Störungen bei der Informationsübertragung zwischen Zellen oder den Zelltod verursachen.

Im Inneren der Zelle sind die Mitochondrien von der zerstörerischen Wirkung am stärksten betroffen, sie sind die wichtigsten Organellen, die das Überleben und die Regeneration der Zelle gewährleisten (Abb. 71). Mitochondrien erfüllen neben ihrer Rolle als "Kraftwerke" multifunktionale Aufgaben, die die Gesundheit des Organismus, die Stressresistenz, die Entwicklung chronischer Krankheiten und Alterungsprozesse bestimmen.



© 2007-2011 The University of Waikato | www.sciencelearn.org.nz

Abbildung 71. Schematische Darstellung einer Zelle und ihrer Mitochondrien.

Die korrekte Funktion der Mitochondrien ist für das Überleben der Zellen, die Homöostase und die Bioenergetik von entscheidender Bedeutung. Die Struktur und Funktion der Mitochondrien wird durch ein mitochondriales Qualitätskontrollsystem aufrechterhalten, das aus den Prozessen der mitochondrialen Biogenese, der mitochondrialen Dynamik (Fusion/Teilung), der Mitophagie und der mitochondrialen Unfolded Protein Response (UPR MT) besteht. Eine Dysfunktion und/oder Schädigung der Mitochondrien steht im Zusammenhang mit der Entstehung und dem Fortschreiten verschiedener Erkrankungen des Menschen, darunter neurodegenerative, kardiovaskuläre und altersbedingte Erkrankungen, Diabetes und Krebs. Umweltstress und Schadstoffe können die Empfindlichkeit der Mitochondrien gegenüber Schäden erhöhen, was zu einer mitochondrialen Dysfunktion führt. Es gibt immer mehr Hinweise darauf, dass Nanoplastik und Mikroplastik die Gesundheit und Funktion der Mitochondrien beeinflussen. Es wurde berichtet, dass MNP oxidativen Stress und die Produktion aktiver Sauerstoffformen verursacht, was letztendlich das Potenzial der Mitochondrienmembran verändert. MNP kann biologische Barrieren im Organismus des Menschen überwinden und von Zellen aufgenommen werden, wodurch es potentiell die mitochondriale Dynamik, Bioenergetik und Signalwege verändert und so den Zellstoffwechsel und die Zellfunktion beeinflusst.

Angesichts der entscheidenden Rolle der Mitochondrien für die Gesundheit der Zellen und des Organismus stellt MNP eine erhebliche Gefahr für die Gesundheit und Funktion der Mitochondrien dar. Aktuelle Daten unterstreichen die Dringlichkeit einer Lösung des umfassenden Problems der Verschmutzung durch MNP, nicht nur zum Schutz der Umwelt, sondern auch für die Gesundheit der Menschen¹⁹².

Mitochondrien synthetisieren ATP – ein universelles Energiemolekül, das alle biologischen Prozesse versorgt: von Muskelkontraktionen und der Übertragung von Nervenimpulsen bis hin zur Hormonsynthese und Zellteilung. Mitochondrien sind am Stoffwechsel von Kohlenhydraten, Fetten und Aminosäuren beteiligt und erhalten den Stoffwechselhaushalt des Körpers aufrecht.

Mitochondrien kontrollieren den Zelltod (Apoptose) – einen äußerst wichtigen Prozess, der die Ansammlung beschädigter oder potenziell gefährlicher Zellen verhindert. Störungen in diesem System stehen im Zusammenhang mit der Entwicklung von onkologischen, autoimmunen und neurodegenerativen Erkrankungen. Mitochondrien spielen eine führende Rolle beim antioxidativen Schutz, indem sie den Gehalt an reaktiven Sauerstoffspezies (ROS) regulieren. Bei Störungen in diesem System kommt es zu einer Anhäufung von Schäden, einer Beschleunigung des Alterungsprozesses und einem erhöhten Risiko für chronische Entzündungen und Erkrankungen (Abb. 72).

¹⁹²Yöntem, F. D. & Ahabab, M. A. Mitochondria as a target of micro- and nanoplastic toxicity. Cambridge Prisms: Plastics 2, e6 (2024).
<https://doi.org/10.1017/plc.2024.6>

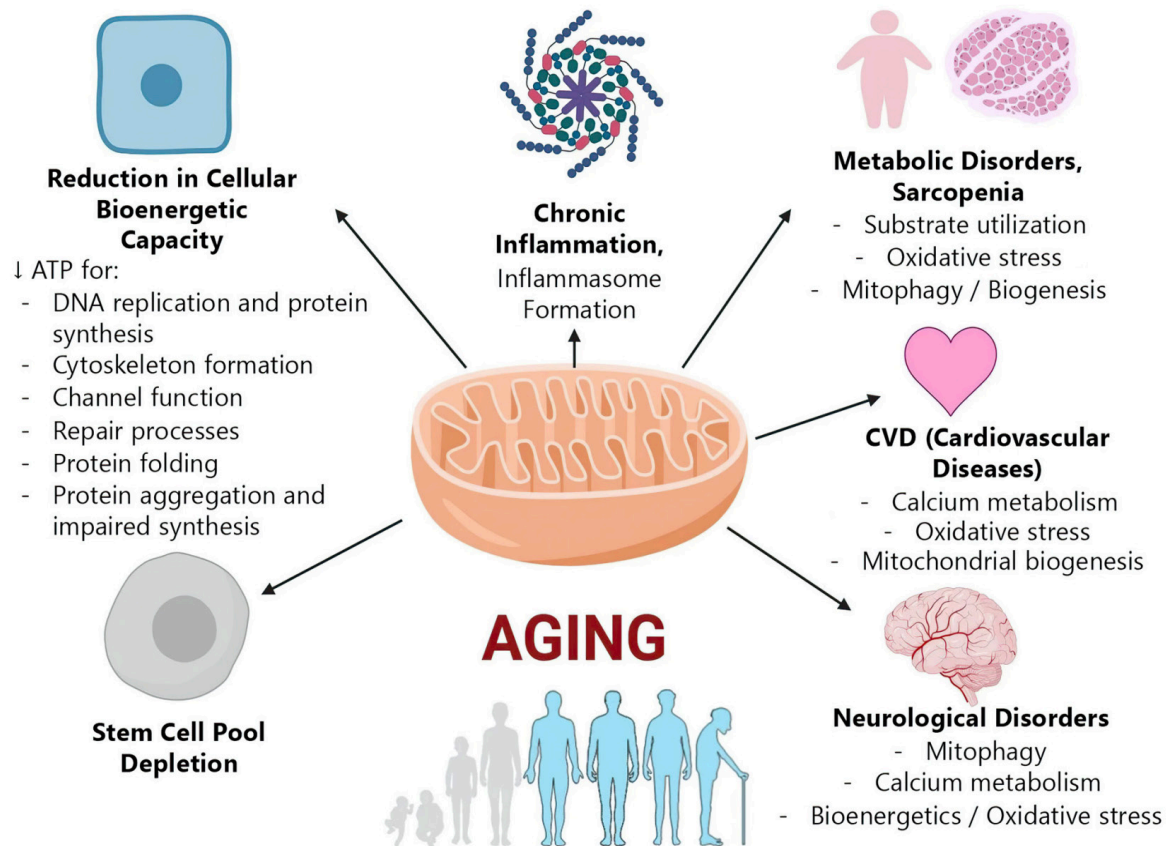


Abbildung 72. Eine durch Umweltverschmutzung verursachte Funktionsstörung der Mitochondrien kann zu verschiedenen Erkrankungen führen.

Quelle: Borisova, O. Mitochondria medicine. Open Longevity. (2019) https://openlongevity.org/mitochondria_medicine_1 (Abgerufen am 01.05.2025)

Mitochondrien haben ihre eigene DNA, die über die mütterliche Linie vererbt wird, was sie zu einzigartigen Verursachern bei Erbkrankheiten macht. Sie regulieren die Aktivität der Kerngene und die Anpassung der Zellen an Veränderungen in der äußeren Umgebung. Außerdem sind Mitochondrien an der Synthese von Steroidhormonen wie Cortisol, Östrogen und Testosteron beteiligt. Gerade die Störung der Mitochondrienfunktionen infolge der Einwirkung von Nanoplastik liegt einer Kaskade pathologischer Prozesse zugrunde, die zu schweren und potenziell irreversiblen Folgen sowohl für die Funktion einzelner Organe und Systeme als auch für den gesamten Organismus führen können (Tabelle 1).

Neurologische Erkrankungen	Parkinson-Krankheit, Alzheimer-Krankheit, Amyotrophe Lateralsklerose (ALS), Epilepsie, Migräne, Mitochondriale Enzephalomyopathien (z. B. MELAS-Syndrom)
Herz-Kreislauf-Erkrankungen	Kardiomyopathien, Herzinsuffizienz, Atherosklerose (durch oxidativen Stress)
Immun- und Entzündungserkrankungen	Autoimmunerkrankungen (z. B. Systemischer Lupus Erythematodes), chronische Entzündungszustände (durch Dysfunktion von ROS und Zytokin-Signalübertragung)
Stoffwechselstörungen	Diabetes mellitus Typ 2, Adipositas, metabolisches Syndrom, Störungen des Fettsäuren- und Laktatstoffwechsels
Onkologische Erkrankungen	Bei mitochondrialer Dysfunktion besteht ein erhöhtes Risiko für Mutationen und maligne Transformation der Zellen
Muskelerkrankungen	Mitochondriale Myopathien, chronische Muskelschwäche und Müdigkeit
Erkrankungen der Sinnesorgane	Retinitis pigmentosa, Lebersche hereditäre Optikusneuropathie (vererbte Erkrankung, die zu Sehverlust führt)
Genetische mitochondriale Syndrome	Leigh-Syndrom, Kearns-Sayre-Syndrom, Barth-Syndrom

Tabelle 1. Übersicht über einige Erkrankungen, die einen Zusammenhang mit mitochondrialer Dysfunktion haben.

Beteiligung von MNP an den Mechanismen vorzeitiger Alterung und Onkogenese

Die Einwirkung von Nanoplastik kann vorzeitige Alterung verursachen, indem es in die Arbeit der Mitochondrien eingreift und die genetischen Programme des Organismus stört. Eine Schädigung der Mitochondrien führt zu einer übermäßigen Produktion reaktiver Sauerstoffspezies, die oxidativen Stress verursachen. Dies zerstört die DNA, stört die genetische Stabilität, aktiviert Entzündungen und beschleunigt die Gewebeeralterung. Darüber hinaus trägt Nanoplastik zur Verkürzung der Telomere bei, was die Teilungsfähigkeit der Zellen einschränkt.



"Wir konnten zeigen, dass bei Menschen sogar eine einzelne Veränderung im Nukleotid der mitochondrialen DNA, die mit einer Verschlechterung der mitochondrialen Funktion und kindlichen mitochondrialen Erkrankungen in Verbindung steht, die Alterungsprozesse beschleunigen kann", sagte Dr. med. Taosheng Huang, PhD, Professor und Leiter der Abteilung für Genetik in der pädiatrischen Fachabteilung der Jacobs School of Medicine and Biomedical Sciences der UB. "Wir haben festgestellt, dass reaktive Sauerstoffverbindungen aufgrund einer schlechten Funktion der Mitochondrien im Laufe der Zeit zu einer erhöhten DNA-Schädigungsrate führen"¹⁹³.

Epigenetische Alterung umfasst Veränderungen in der Genregulation, die auf der Ebene der DNA-Modifikationen (Ein-/Ausschalten von Genen) stattfinden, ohne die DNA selbst zu verändern. Es handelt sich um einen feinen "molekularen Timer", der gemessen werden kann und der schneller oder langsamer als die normale Alterung ablaufen kann. Eine hohe Aktivität der mitochondrialen DNA ist mit einer beschleunigten epigenetischen Alterung verbunden. Bei manchen Menschen kann das biologische Alter der Zellen bereits im Alter von 20 bis 30 Jahren deutlich über dem chronologischen Alter liegen. Das heißt, der Körper altert schneller als er sollte.

Bei Menschen mit mitochondrialen Störungen treten bereits in jungen Jahren häufig altersbedingte Krankheiten auf, wie z. B. Demenz, Herz-Kreislauf-Erkrankungen, Arrhythmien und Herzinsuffizienz. Schottische Wissenschaftler haben festgestellt, dass je später ein Mensch geboren wurde, desto höher ist sein Risiko, bis zum Alter von 50 Jahren zu erkranken. Beispielsweise haben Menschen, die zwischen 1956 und 1960 geboren wurden, im Durchschnitt mehr Krankheiten als diejenigen, die früher geboren wurden – zwischen 1951 und 1955 oder zwischen 1946 und 1950¹⁹⁴ (Abb. 73).

¹⁹³Medindia. Study unravels how mitochondrial dysfunction leads to premature aging. (2022) <https://www.medindia.net/news/study-unravels-how-mitochondrial-dysfunction-leads-to-premature-aging-208364-1.htm> (Abgerufen am 01.05.2025).

¹⁹⁴Ribe, E., Cezard, G. I., Marshall, A. & Keenan, K. Younger but sicker? Cohort trends in disease accumulation among middle-aged and older adults in Scotland using health-linked data from the Scottish Longitudinal Study. European Journal of Public Health 34, 696–703 (2024). <https://doi.org/10.1093/eurpub/ckae062>

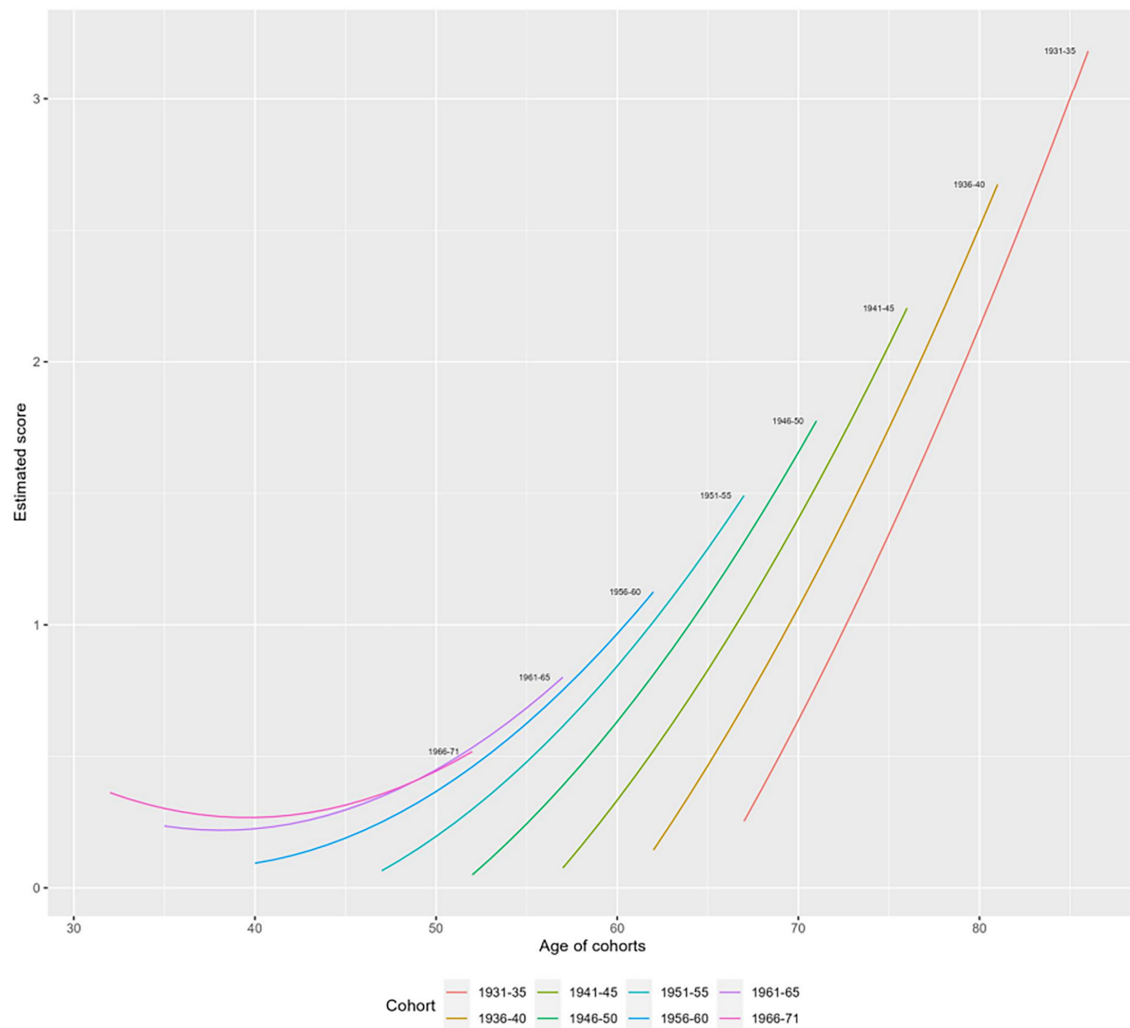


Abbildung 73. Prognostizierte Multimorbiditätsraten nach Kohorte und Alter (basierend auf den Schätzungen von Modell 1 in der ergänzenden **Tabelle S3**).

Quelle: Scottish Longitudinal Study. Cohort trends in disease accumulation among middle-aged and older adults in Scotland using health-linked data from the Scottish Longitudinal Study. *European Journal of Public Health* 34, 696–703 (2024). <https://doi.org/10.1093/eurpub/ckae062>

Mitochondriale DNA-Mutationen bei Alterung und Krebs

Die Schlüsselmechanismen, die der Alterung und der Krebsentwicklung zugrunde liegen, sind weitgehend identisch. Eine der zentralen Verbindungen ist die Störung der Funktion der Mitochondrien – der für die Energieerzeugung zuständigen Zellorganellen. Mit zunehmendem Alter häufen sich in Geweben des Menschen Mutationen der mitochondrialen DNA (mtDNA), und ähnliche Veränderungen werden seit langem bei verschiedenen Krebsarten festgestellt¹⁹⁵.

Wenn eine Mutation in einer Zelle auftritt, kann dies die Funktionsweise der Zelle verändern. Die Zelle beginnt zum Beispiel schneller zu wachsen und sich zu teilen, stirbt nicht, auch wenn sie es sollte, wird für das Immunsystem "unsichtbar" und kann besser mit Sauerstoff- oder Nährstoffmangel umgehen.

Solche Zellen haben einen Vorteil gegenüber normalen Zellen – sie leben länger, teilen sich häufiger, füllen mehr Raum aus und beginnen, andere zu dominieren. Sobald sich solche Zellen in ausreichender Anzahl angesammelt haben, beginnt möglicherweise das Tumorwachstum.

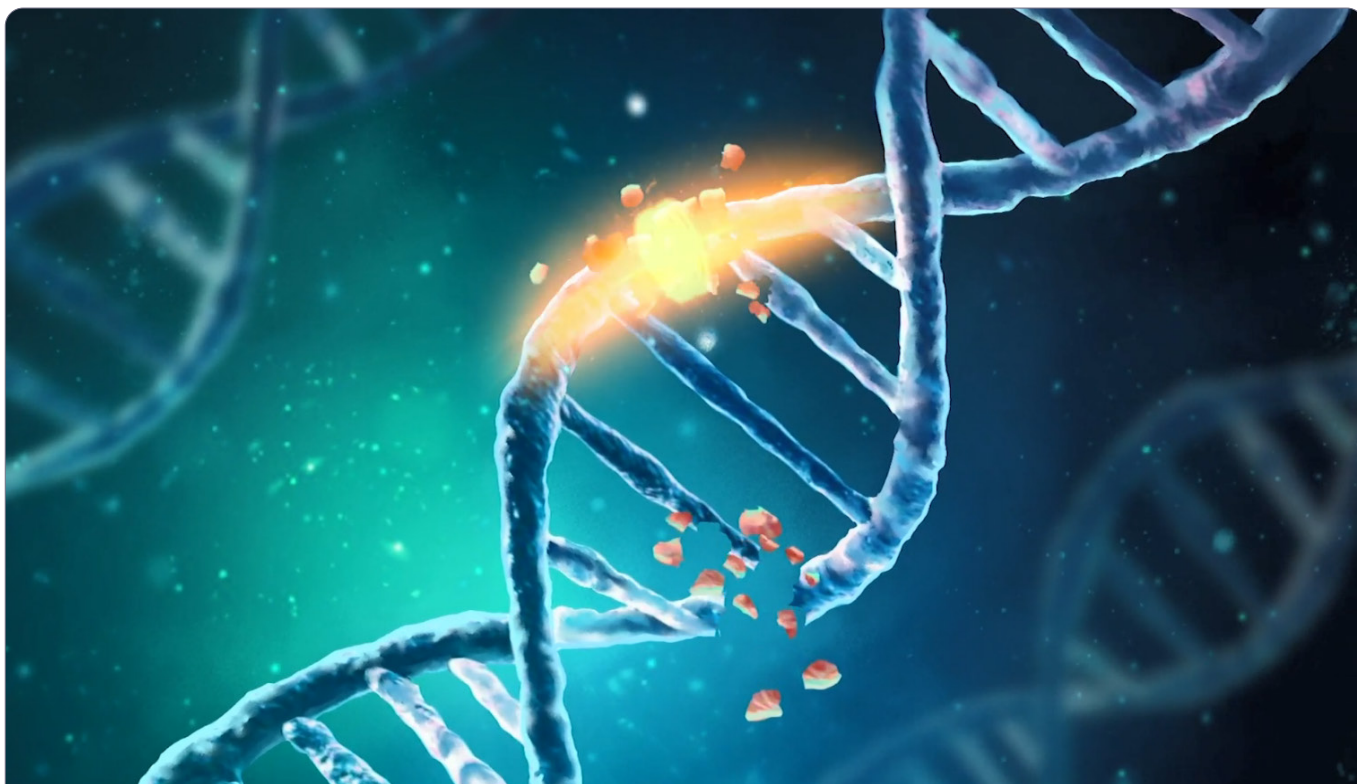


Abbildung 74. DNA-Schäden, die zu Mutationen führen.

Postmitotische Zellen wie Neuronen, Kardiomyozyten und einige Muskelzellen sind besonders anfällig für mitochondriale Schäden. Sie teilen sich nicht, so dass die mit dem Alter angesammelten Mutationen, insbesondere in der mitochondrialen DNA (Abb. 74), ein Leben lang in der Zelle bleiben.

¹⁹⁵Smith, A. L. M., Whitehall, J. C. & Greaves, L. C. Mitochondrial DNA mutations in ageing and cancer. *Molecular Oncology* 16, 3276–3294 (2022).
<https://doi.org/10.1002/1878-0261.13291>

Postmitotische Zellen sind sehr aktiv: Neuronen verbrauchen viel Energie, um Signale zu übertragen, und Herzmuskelzellen kontrahieren sich lebenslang, was bedeutet, dass die Mitochondrien am Limit arbeiten und große Mengen an reaktiven Sauerstoffspezies (ROS) produzieren. Die reaktiven Sauerstoffverbindungen schädigen die Mitochondrien, was die Produktion neuer ROS erhöht und einen Teufelskreis der Schädigung in Gang setzt. Die Schäden häufen sich, was zur Auslösung pathologischer Prozesse (z. B. neurodegenerativer, kardiovaskulärer und onkologischer Erkrankungen) und sogar zum Tod führen kann.

Vielleicht erklärt dies, warum Herz-Kreislauf-Erkrankungen, Herzinfarkte, Schlaganfälle und Krebs die häufigsten Todesursachen unter allen anderen Krankheiten sind. Und die toxische Wirkung von Nanoplastik auf den Organismus des Menschen, die in den letzten 10 bis 20 Jahren um ein Vielfaches zugenommen hat, erklärt, warum sich diese Erkrankungen verjüngt, pandemische Ausmaße angenommen haben und jedes Jahr mehrere zehn Millionen Menschenleben fordern. Denn Nanoplastik zerstört vor allem die Arbeit der Mitochondrien, verursacht oxidativen Stress und Mutationen der mitochondrialen und nuklearen DNA.

Destabilisierung des Hormonsystems unter dem Einfluss von MNP

Bei der Herstellung von Kunststoffen werden Chemikalien verwendet, die das endokrine System und den Hormonhaushalt stören. Sie können die Wirkung natürlicher Hormone nachahmen, blockieren oder verändern, was zu verschiedenen gesundheitlichen Problemen führen kann.

Im Organismus des Menschen wurden über 3 000 Chemikalien nachgewiesen, die bei Herstellung der Plastikverpackungen verwendet werden¹⁹⁶. Etwa 100 dieser Chemikalien werden als hochgefährlich für die Gesundheit der Menschen eingestuft.

Bisphenol

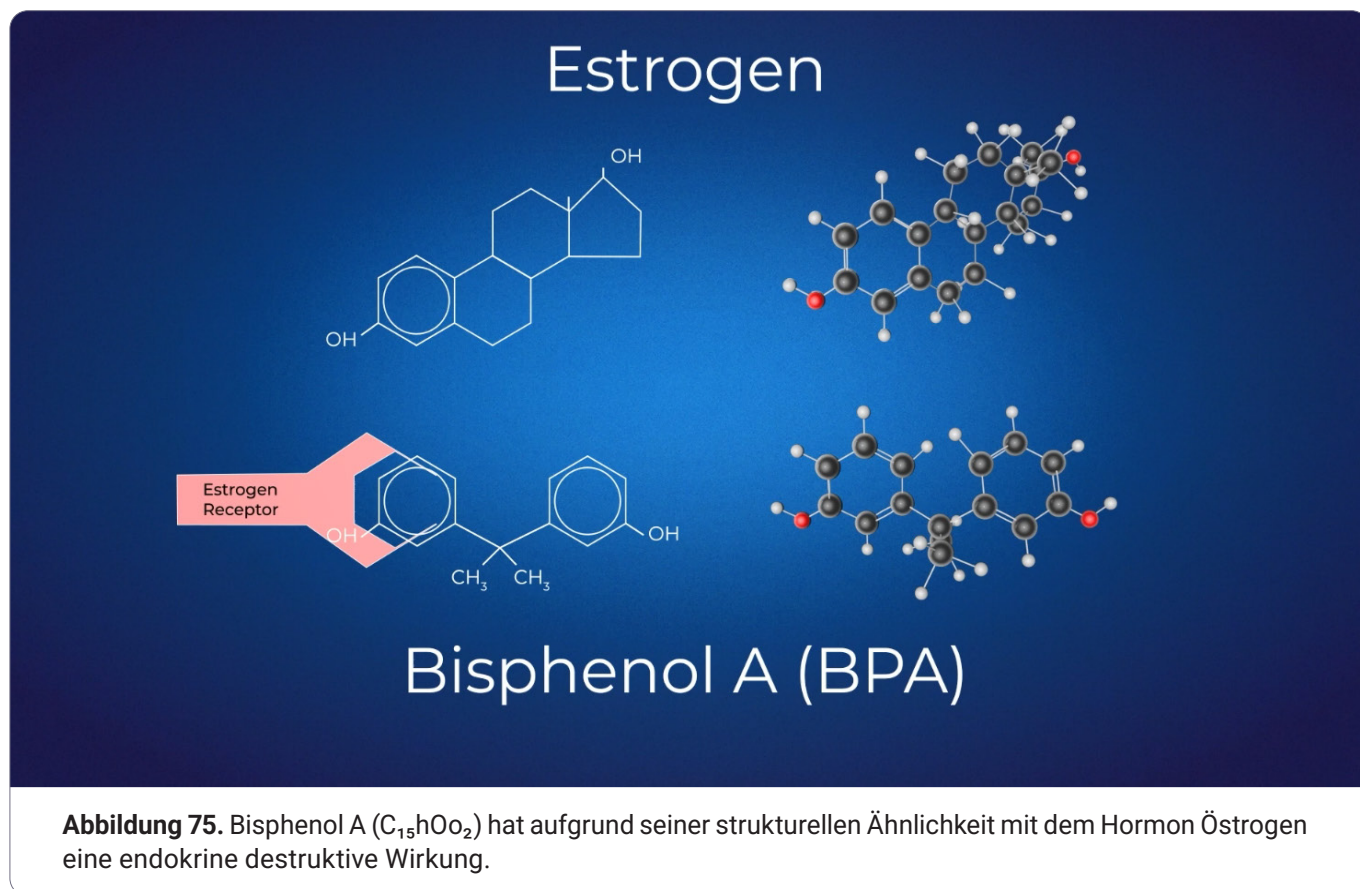
Bisphenol A (BPA) ist ein synthetischer Weichmacher, der bei der Herstellung von Polycarbonatkunststoff (Flaschen, Behälter), Epoxidharzen (Innenbeschichtung von Konservendosen) und Medizinprodukten breit verwendet wird.

Beim Erhitzen geht BPA in Lebensmittel und Getränke über.



"BPA wirkt wie ein 'unkontrolliertes' Hormon und verdrängt ein natürliches Hormon, das normalerweise an diesem Weg beteiligt ist", sagte Professor Ian Ray, ein Experte für Umweltchemikalien von der School of Chemistry der Universität Melbourne¹⁹⁷ (Abb. 75).

¹⁹⁶Geueke, B. et al. Evidence for widespread human exposure to food contact chemicals. J Expo Sci Environ Epidemiol 1–12 (2024).
<https://doi.org/10.1038/s41370-024-00718-2>



Jährlich werden weltweit acht Millionen Tonnen Bisphenol A hergestellt, und jedes Jahr werden 100 Tonnen davon in die Biosphäre freigesetzt¹⁹⁸.

Studien zeigen, dass BPA und sein Ersatzstoff, Bisphenol S (BPS), die Koordination von Erregungs- und Hemmungssignalen im Nervensystem stören¹⁹⁹. Beide Verbindungen lösen in hohen Konzentrationen ähnliche pathologische Wirkungen aus (Abb. 76). Experimente mit Gehirnzellen haben gezeigt, dass selbst geringe Dosen von BPA/BPS, bei einer Einwirkzeit von einem Monat die chemische und elektrische Übertragung von Signalen über Synapsen verändern²⁰⁰.

¹⁹⁷New Atlas. Autism in boys linked to common plastic exposure in the womb. (2024) <https://newatlas.com/health-wellbeing/prenatal-bisphenol-a-bpa-autism-boys> (Abgerufen am 01.05.2025).

¹⁹⁸Global Industry Analysts. Bisphenol A: Global strategic business report. Research and Markets. (2025) https://www.researchandmarkets.com/reports/1227819/bisphenol_a_global_strategic_business_report (Abgerufen am 01.05.2025).

¹⁹⁹Glausiusz, J. Toxicology: The plastics puzzle. Nature 508, 306–308 (2014). <https://doi.org/10.1038/508306a>

²⁰⁰News-Medical. Plasticizers can impair important brain functions in humans. (2021) <https://www.news-medical.net/news/20210412/Plasticizers-can-impair-important-brain-functions-in-humans.aspx> (Abgerufen am 01.05.2025).

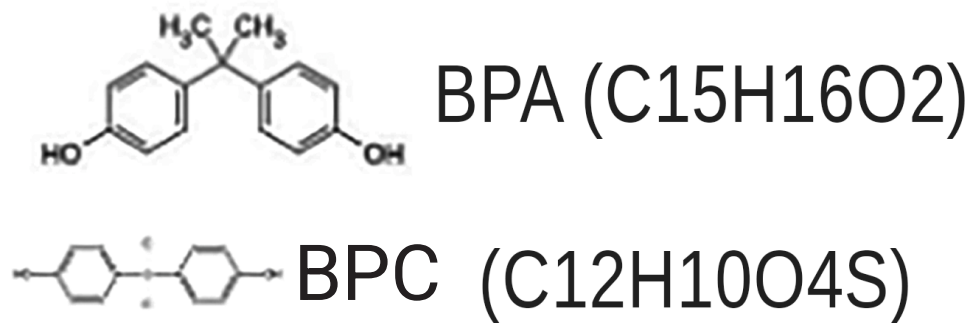


Abbildung 76. Molekulare Strukturen und chemische Formeln von Bisphenol A (BPA) und Bisphenol S (BPS).

Eine Studie aus dem Jahr 2023 ergab, dass Kinder mit einer Aufmerksamkeitsdefizit-Hyperaktivitätsstörung (ADHS) höhere Werte von Bisphenol A und Phthalat aufwiesen als Kinder ohne diese Störung²⁰¹.

Wissenschaftler des Florey Institute of Neuroscience and Mental Health in Melbourne haben festgestellt, dass bei Jungen, deren Mütter in den letzten Monaten der Schwangerschaft einen hohen BPA-Spiegel hatten, ein um das Sechsfache erhöhtes Risiko hatten, bis zum Alter von 11 Jahren an Autismus zu erkranken²⁰².



"BPA kann die hormongesteuerte Entwicklung des Gehirns von männlichen Föten auf verschiedene Weise stören, unter anderem durch die Hemmung des Schlüsselenzyms Aromatase, das die Neurohormone steuert und für die Entwicklung des Gehirns von männlichen Föten besonders wichtig ist", sagte Professorin Ponsonby.

Die Hemmung des Enzyms Aromatase könnte das Geschlechterungleichgewicht bei Autismus erklären: 4-5 Jungen zu 1 Mädchen²⁰³. Die Mädchen erkrankten an Autismus seltener, aber er tritt bei ihnen in einer schwereren Form auf²⁰⁴.

Bisphenol A (BPA) trägt auch zu Diabetes mellitus Typ 2 bei, indem es Hyperglykämie und Insulinresistenz verursacht²⁰⁵. Die Sterblichkeit durch Diabetes mellitus nimmt weltweit stetig zu (Abb. 77).

²⁰¹EarthDay.org. Babies vs. Plastics Report. (2023) <https://www.earthday.org/babies-vs-plastics-what-every-parent-should-know> (Abgerufen am 01.05.2025)

²⁰²Symeonides, C., Vacy, K., Thomson, S. et al. Male autism spectrum disorder is linked to brain aromatase disruption by prenatal BPA in multimodal investigations and 10HDA ameliorates the related mouse phenotype. Nat Commun 15, 6367 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41467-024-48897-8>

²⁰³Zeidan, J. et al. Global prevalence of autism: A systematic review update. Autism Research 15, 778–790 (2022). <https://doi.org/10.1002/aur.2696>

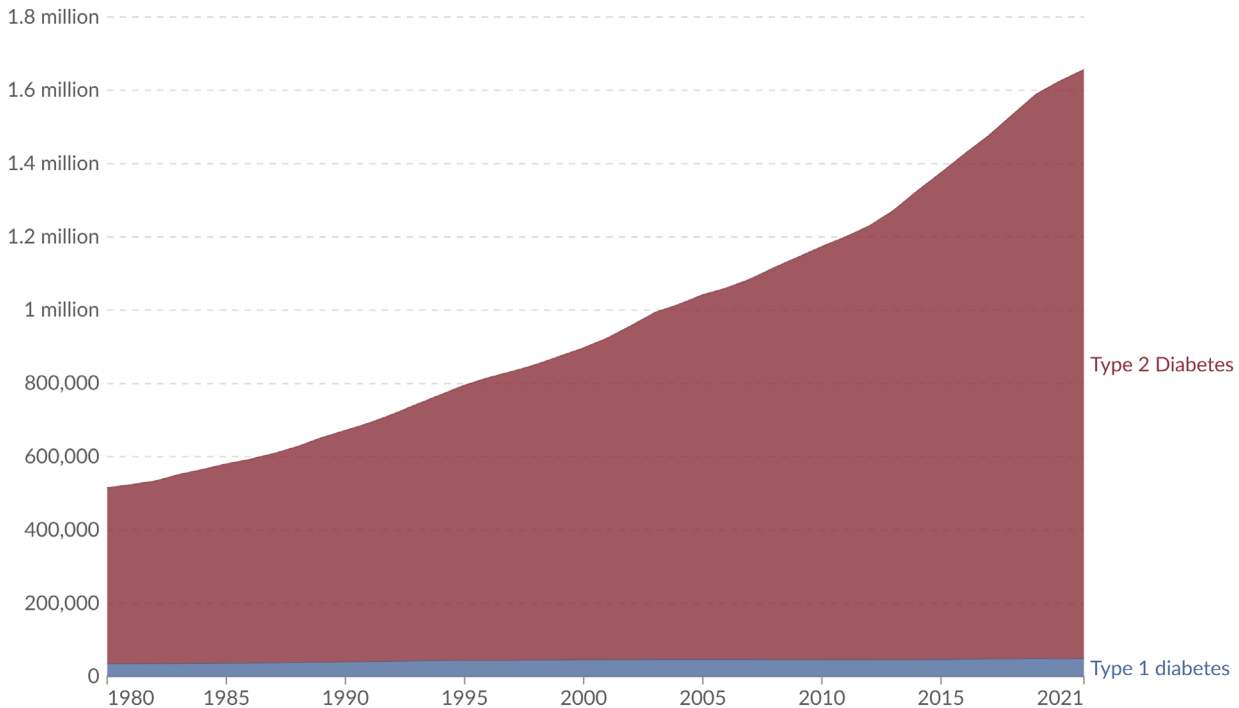
²⁰⁴Frazier, T. W., Georgiades, S., Bishop, S. L. & Hardan, A. Y. Behavioral and Cognitive Characteristics of Females and Males With Autism in the Simons Simplex Collection. Journal of the American Academy of Child & Adolescent Psychiatry 53, 329–340.e3 (2014). <https://doi.org/10.1016/j.jaac.2013.12.004>

²⁰⁵Sun, Q. et al. Association of Urinary Concentrations of Bisphenol A and Phthalate Metabolites with Risk of Type 2 Diabetes: A Prospective Investigation in the Nurses' Health Study (NHS) and NHSII Cohorts. Environ Health Perspect 122, 616–623 (2014). <https://doi.org/10.1289/ehp.1307201>

Deaths from diabetes, by type, World, 1980 to 2021

Our World
in Data

Annual deaths from diabetes. Type 1 diabetes is an autoimmune disease, where cells making insulin are destroyed; Type 2 diabetes is insulin resistance. Both types lead to high levels of glucose in blood.



Data source: IHME, Global Burden of Disease (2024)

OurWorldinData.org/causes-of-death | CC BY

Abbildung 77. Sterblichkeit durch Diabetes mellitus nach Typ, weltweit. 1980-2021.

Quelle: <https://ourworldindata.org/grapher/deaths-from-diabetes-by-type>

Phthalate

Phthalate sind eine Gruppe chemischer Verbindungen, die hauptsächlich als Weichmacher verwendet werden, d. h. Stoffe, die Kunststoffe wie Polyvinylchlorid (PVC) flexibler, weicher und haltbarer machen.

Phthalate sind in der Industrie und im Haushalt weit verbreitet, aber ihre Fähigkeit, das endokrine System zu beeinträchtigen, gibt Anlass zur Sorge²⁰⁶.

Phthalate sind keine Hormone, können aber Wirkung von Androgenen (z. B. von Testosteron) hemmen, die für die männliche Entwicklung besonders wichtig sind. Bei der Einwirkung von Phthalaten kommt es zu einer verminderten Beweglichkeit der Spermien und Anomalien in der Entwicklung von Geschlechtsorganen (z. B. Kryptorchismus bei Neugeborenen). Bei Männern, bei denen Unfruchtbarkeit diagnostiziert wurde, wurden höhere Konzentrationen von Phthalaten festgestellt.

²⁰⁶Arrigo, F., Impellitteri, F., Piccione, G. & Faggio, C. Phthalates and their effects on human health: Focus on erythrocytes and the reproductive system. Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology & Pharmacology 270, 109645 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.cbpc.2023.109645>

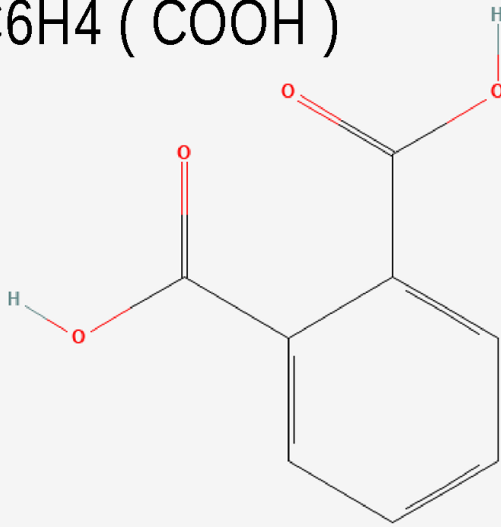
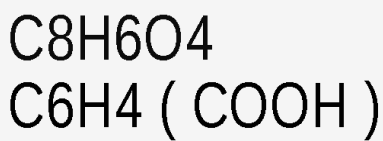


Abbildung 78. Darstellung chemischer Strukturen.

Quelle: National Center for Biotechnology Information. Bisphenol A, 2D Structure. PubChem. <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/1017#section=2D-Structure> (Abgerufen am 01.05.2025).

Bei Frauen kommt es zu Menstruationszyklusstörungen, erhöhtem Risiko von Fehlgeburten und Frühgeburten. Die Einwirkung auf den Fötus während der Schwangerschaft kann zu Verzögerung der Gehirnerweichung führen und folglich zu einem niedrigeren IQ und Verhaltensstörungen²⁰⁷.

Wissenschaftler haben einen kausalen Zusammenhang zwischen Phthalaten aus der Umwelt (giftige Chemikalien, die in alltäglichen Konsumgütern enthalten sind) und dem verstärkten Wachstum von Uterusfibromyomen, den häufigsten Tumoren bei Frauen, nachgewiesen²⁰⁸.

Die Einwirkung von in Kunststoffen enthaltenen Phthalaten erhöht das Krebsrisiko bei Kindern um 20 %, wobei die Zahl der bösartigen Knochentumoren um das Dreifache und die Zahl der Lymphome um das Zweifache ansteigt²⁰⁹.

Eine Studie, an der mehr als 5 000 amerikanische Mütter teilnahmen, ergab, dass Phthalate mit dem Risiko eines niedrigen Geburtsgewichts und einer Frühgeburt in Verbindung stehen²¹⁰. Diese Faktoren erhöhen die Wahrscheinlichkeit des Kindstodes moderat und können auch die schulischen Leistungen der Kinder beeinträchtigen und das Risiko von Herzkrankheiten und Diabetes sowie psychischen Störungen wie Autismus und ADHS²¹¹ bei Kindern erhöhen.

²⁰⁷ Welch, B. M. et al. Associations Between Prenatal Urinary Biomarkers of Phthalate Exposure and Preterm Birth: A Pooled Study of 16 US Cohorts. *JAMA Pediatrics* 176, 895–905 (2022). <https://doi.org/10.1001/jamapediatrics.2022.2252>

²⁰⁸ Iizuka, T. et al. Mono-(2-ethyl-5-hydroxyhexyl) phthalate promotes uterine leiomyoma cell survival through tryptophan-kynurenine-AHR pathway activation. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 119, e2208886119 (2022). <https://doi.org/10.1073/pnas.2208886119>

²⁰⁹ Ahern, T. P. et al. Medication-Associated Phthalate Exposure and Childhood Cancer Incidence. *JNCI: Journal of the National Cancer Institute* 114, 885–894 (2022). <https://doi.org/10.1093/jnci/djac045>

²¹⁰ Trasande, L. et al. Prenatal phthalate exposure and adverse birth outcomes in the USA: a prospective analysis of births and estimates of attributable burden and costs. *The Lancet Planetary Health* Volume 8, Issue 2, e74–e85 (2024). [https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(23\)00270-X](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(23)00270-X)

²¹¹ Baker, B. H. et al. Ultra-processed and fast food consumption, exposure to phthalates during pregnancy, and socioeconomic disparities in phthalate exposures. *Environment International* 183, 108427 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.envint.2024.108427>

Chemische Zusätze in Kunststoffen tragen zur Entwicklung von Adipositas bei²¹². Nach Angaben der WHO hat sich die Adipositasrate zwischen 1990 und 2020 bei Erwachsenen mehr als verdoppelt und bei Jugendlichen vervierfacht²¹³.

Adipositas-Trends bei Erwachsenen und Jugendlichen in den Vereinigten Staaten (Abb. 79-80).

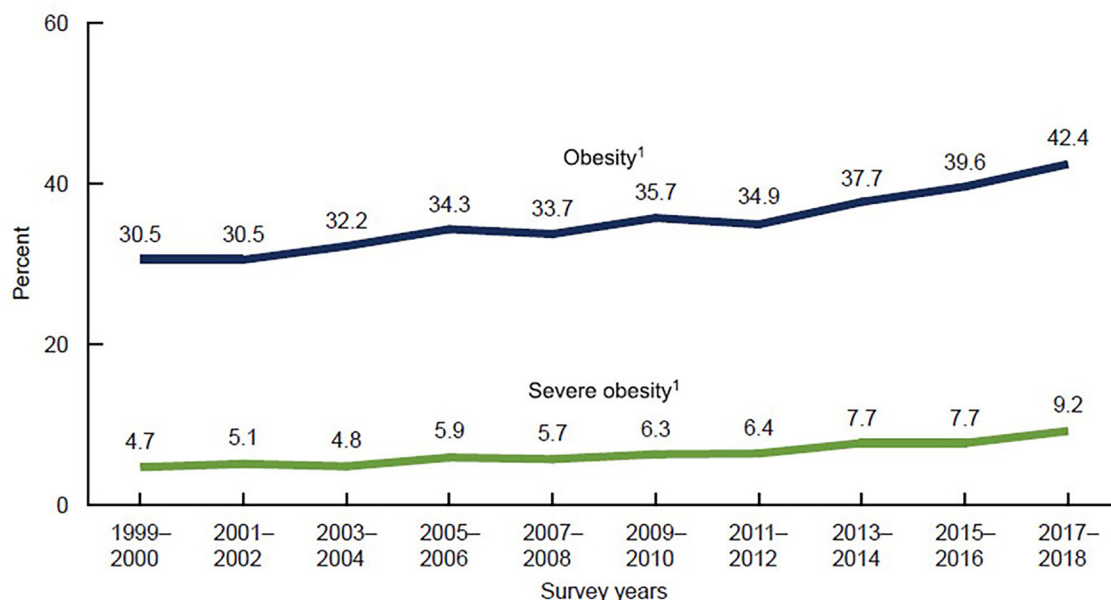


Abbildung 79. Trends in der Prävalenz von Adipositas und schwerer Adipositas bei Erwachsenen im Alter von 20 Jahren und älter, alterskorrigiert: Vereinigte Staaten, 1999-2000-2017-2018.

Quelle: National Institute of Diabetes and Digestive and Kidney Diseases. Overweight & Obesity Statistics. NIDDK (2021) <https://www.niddk.nih.gov/health-information/health-statistics/overweight-obesity> (Abgerufen am 01.05.2025).

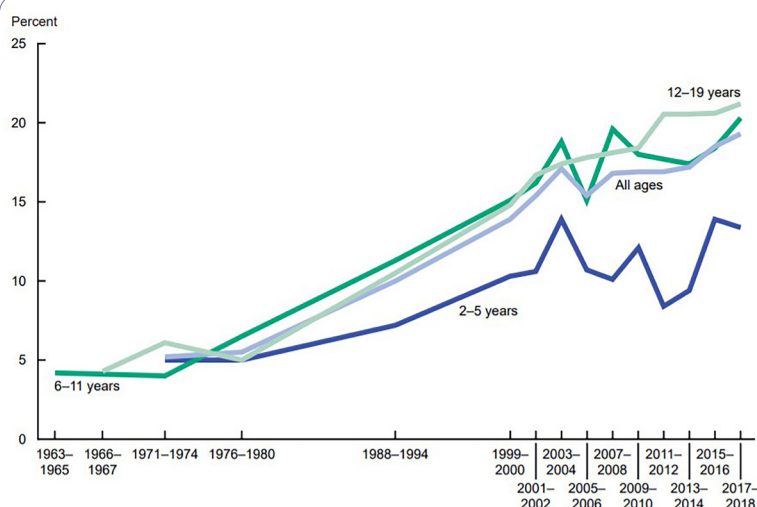


Abbildung 80. Adipositas-Trends bei Kindern und Jugendlichen im Alter von 2-19 Jahren, nach Alter: Vereinigte Staaten, 1963-1965 bis 2017-2018.

Quelle: National Institute of Diabetes and Digestive and Kidney Diseases. Overweight & Obesity Statistics. NIDDK (2021) <https://www.niddk.nih.gov/health-information/health-statistics/overweight-obesity> (Abgerufen am 01.05.2025).

²¹²Völker, J., Ashcroft, F., Vedøy, Å., Zimmermann, L. & Wagner, M. Adipogenic Activity of Chemicals Used in Plastic Consumer Products. Environ. Sci. Technol. 56, 2487–2496 (2022). <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c06316>

²¹³World Health Organization. Obesity and overweight. WHO Fact Sheets. (2025) <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/obesity-and-overweight> (Abgerufen am 01.05.2025).

Elektrostatische Ladung von Nanoplastik als Schlüsselfaktor für seine erhöhte Toxizität für den Organismus des Menschen

Der menschliche Körper produziert ständig bioelektrische Energie. Alle physiologischen Prozesse, von der Herztätigkeit über die Sinneswahrnehmung bis hin zu höheren kognitiven Funktionen, werden durch chemische Reaktionen angetrieben, die durch die Bewegung elektrischer Ladungen ausgelöst werden. Die intra- und extrazellulären Flüssigkeiten, in denen sich Proteine befinden, bestehen überwiegend aus Wasser, das elektrische Dipolkräfte besitzt. Daher spielen elektrostatische Wechselwirkungen, einschließlich Wasserstoffbrücken, Ionenbindungen und hydrophober Verpackung, eine Schlüsselrolle bei der Bildung von zellulären Proteinstrukturen, die für ihre Funktion und folglich für die Aufrechterhaltung der Aktivität des Organismus notwendig sind²¹⁴.

Die Bioelektrizität spielt eine direkte Rolle bei der Zellfunktion durch die Wechselwirkung von Ionenkanälen und Membranpotentialen. Jede Zelle hält eine elektrische Differenz zwischen ihrer inneren und äußeren Umgebung aufrecht, das Ruhemembranpotential, das durch den Unterschied in der Konzentration von Ionen innerhalb und außerhalb der Zelle entsteht (Abb. 81). Zu den wichtigsten Arten von Ionenkanälen im Organismus des Menschen gehören Natrium-, Kalium-, Calcium- und Chloridkanäle. Diese Kanäle erfüllen zusammen mit dem Membranpotential Schlüsselfunktionen verschiedener Zelltypen. (Abb. 82, 83).

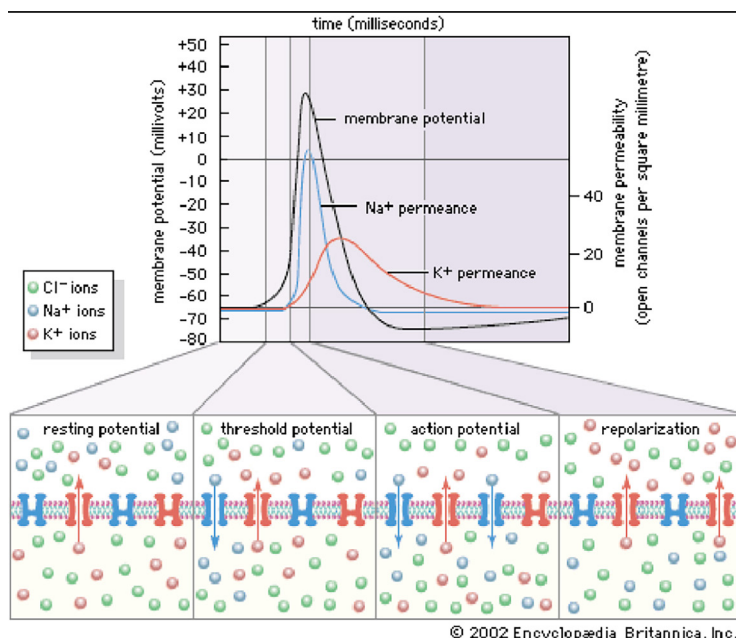


Abbildung 81. Ionenpermeabilität und Aktionspotential.

Veränderungen der Ionenpermeabilität, die dem Aktionspotential zugrunde liegen. Das elektrische Potenzial ist links in Millivolt, die Ionenpermeabilität rechts in offenen Kanälen pro Quadratmillimeter angegeben. Beim Ruhepotential liegt das Membranpotential nahe bei EK, dem Gleichgewichtspotential K⁺. Wenn sich die Natriumkanäle öffnen, depolarisiert sich die Membran. Wenn die Depolarisation ein Schwellenpotential erreicht, wird ein Aktionspotential ausgelöst. Die Entstehung des Aktionspotentials bringt das Membranpotential näher an ENa, an das Gleichgewichtspotential Na⁺. Wenn sich die Natriumkanäle schließen (Verringerung der Permeabilität von Na⁺) und die Kaliumkanäle öffnen (Erhöhung der Permeabilität von K⁺), wird die Membran repolarisiert.

Quelle: Encyclopædia Britannica. Neuron. Britannica. (2025). <https://www.britannica.com/science/neuron>

²¹⁴Azim Premji University. The Biology of Electricity: How electricity is critical to the functioning of the human body. (2022) <https://azimpremjiuniversity.edu.in/news/2022/the-biology-of-electricity> (Abgerufen am 01.05.2025).

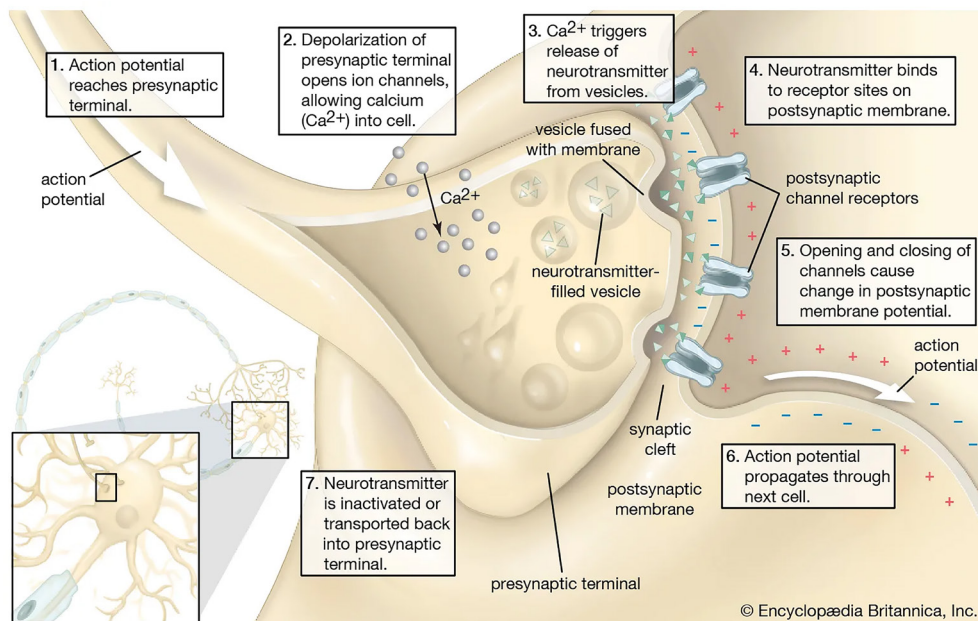


Abbildung 82. Synapse - chemische Weiterleitung eines Nervenimpulses an die Synapse.

Das Eintreffen eines Nervenimpulses am präsynaptischen Ende stimuliert die Freisetzung von Neurotransmittern in den synaptischen Spalt. Die Bindung von Neurotransmittern an Rezeptoren auf der postsynaptischen Membran stimuliert die Regeneration des Aktionspotenzials im postsynaptischen Neuron.

Quelle: Encyclopædia Britannica. Neuron. Britannica. (2025). <https://www.britannica.com/science/neuron> (Abgerufen am 01.05.2025).

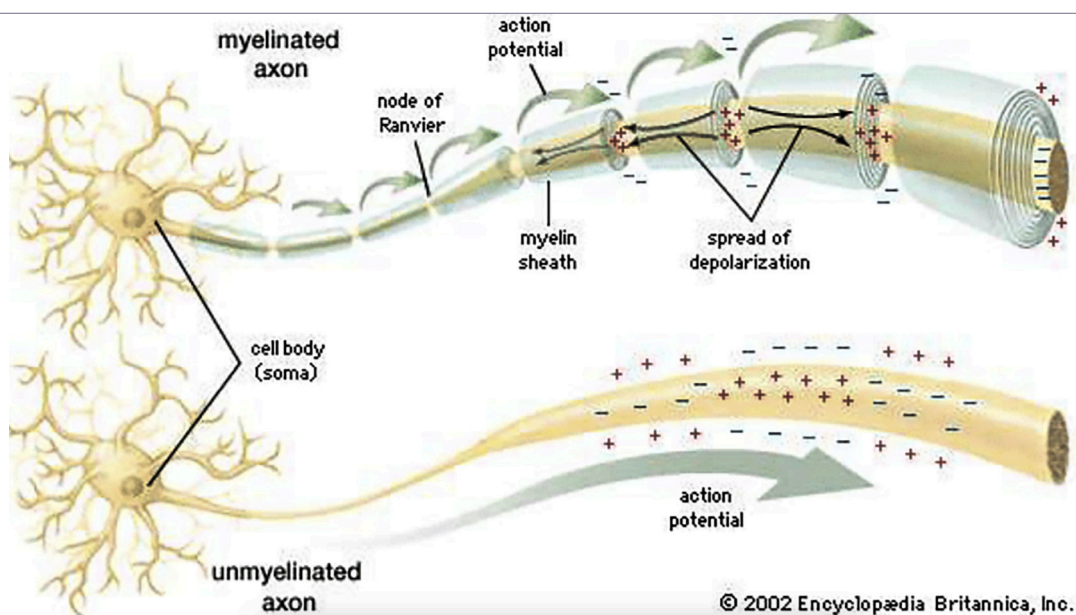


Abbildung 83. Neuron - Leitung des Aktionspotentials.

In einem myelinisierten Axon verhindert die Myelinscheide, dass lokaler Strom (kleine schwarze Pfeile) durch die Membran fließt. Dadurch wird der Strom gezwungen, die Nervenfasern hinunter zu den nicht myelinisierten Ranvier-Schnürringen zu fließen, die eine hohe Konzentration von Ionenkanälen aufweisen. Bei einer Stimulation leiten diese Ionenkanäle das Aktionspotential (große grüne Pfeile) an den nächsten Knoten weiter. Auf diese Weise springt das Aktionspotential entlang der Faser, während es sich an jeder Schnürring regeneriert, ein Prozess, der als Erregungsleitung bezeichnet wird. In einem nicht-myelinisierten Axon breitet sich das Aktionspotential entlang der gesamten Membran aus und schwächt sich ab, während es durch die Membran zurück in die ursprünglich depolarisierte Region diffundiert.

Quelle: Encyclopædia Britannica. Neuron. Britannica. (2025). <https://www.britannica.com/science/neuron> (Abgerufen am 01.05.2025).

Die im Organismus des Menschen auftretende Bioelektrizität (zum Beispiel bei Muskelarbeit oder der Leitung von Nervenimpulsen) schadet dem Menschen nicht, da sie ein natürlicher Teil physiologischer Prozesse ist. Aber Mikro- und Nanoplastik, das in den Körper gelangt, bringt eine elektrostatische Ladung mit sich, die es lange Zeit halten kann. Und genau diese Ladung kann der Gesundheit schaden, indem sie alle biologischen Prozesse stört.

Nanoplastik sind Plastikpartikel, die kleiner als 1 Mikrometer sind, die aufgrund ihrer einzigartigen Struktur die Fähigkeit haben, sich elektrostatisch aufzuladen, was sie zu einem Objekt intensiver Aufmerksamkeit für die Wissenschaft macht.

Wenn Mikro- und Nanoplastikpartikel durch den triboelektrischen Effekt (durch Kontakt und Reibung mit anderen Oberflächen) elektrisiert werden, erhalten sie eine elektrostatische Ladung, entweder positive oder negative. Diese Ladung wirkt sich darauf aus, wie sich die Partikel im Körper und in der Umwelt verhalten.

Die einzigartige Struktur von Nanoplastikpartikeln ermöglicht es ihnen, Schadstoffe, Ionen und organische Moleküle zu adsorbieren, was ihre Rolle als Überträger von Toxinen in Ökosystemen verstärkt^{215, 216}.

Die chemische Zusammensetzung des Nanoplastiks spielt eine wichtige Rolle bei der Bestimmung seiner elektrostatischen Eigenschaften: Polymere wie Polystyrol (PS), Polyethylen (PE) oder Polypropylen (PP) enthalten häufig funktionelle Gruppen: Carboxyl- (-COOH), Sulfat- (-SO₃H) oder Aminogruppen (-NH₂), die je nach Umgebungsbedingungen ionisiert werden können. Eine in der Zeitschrift *Langmuir* veröffentlichte Studie zeigte beispielsweise, dass Polystyrol-Nanopartikel mit Carboxylgruppen (PS-COOH) ein negatives und Aminogruppen (PS-NH₂) ein positives Zeta-Potential haben, was den Einfluss von Funktionsgruppen auf die Ladung des Nanoplastiks bestätigt²¹⁷.

Der Prozess der Ladungsakkumulation ist nicht nur auf die chemischen Eigenschaften beschränkt. Bei der Herstellung oder bei mechanischen Belastungen wie Reibung kann sich Nanoplastik durch Kontaktelektrifizierung aufladen. Untersuchungen an Plastikbehältern ergaben, dass Polystyrol in der Lage ist, eine Ladung von bis zu -10 kV zu akkumulieren, die über lange Zeiträume anhält und entgegengesetzt geladene Partikel wie Staub oder Bakteriensporen anzieht²¹⁸. Darüber hinaus ermöglichen Variationen in der Struktur des Polymers – z. B. das Vorhandensein polarer Gruppen – dem Nanoplastik, je nach pH-Wert der Umgebung sowohl positive als auch negative Ladungen aufzuweisen. In saurem Milieu können Aminogruppen den Partikeln eine positive Ladung verleihen, während in alkalischem Milieu aufgrund von Carboxylgruppen negative Ladungen überwiegen, wie Untersuchungen an Pflanzen der *Arabidopsis thaliana* bestätigen²¹⁹.

²¹⁵Raj, P. K., Sonne, C., Brown, R. J. C., Younis, S. A. & Kim, K.-H. Adsorption of environmental contaminants on micro- and nano-scale plastic polymers and the influence of weathering processes on their adsorptive attributes. *Journal of Hazardous Materials* 427, 127903 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127903>

²¹⁶Zhang, W. et al. The mechanism for adsorption of Cr(VI) ions by PE microplastics in ternary system of natural water environment. *Environmental Pollution* 257, 113440 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113440>

²¹⁷Perini, D. A. et al. Surface-Functionalized Polystyrene Nanoparticles Alter the Transmembrane Potential via Ion-Selective Pores Maintaining Global Bilayer Integrity. *Langmuir* 38, 14837–14849 (2022). <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.2c02487>

²¹⁸Baribo, L. E., Avens, J. S. & O'Neill, R. D. Effect of Electrostatic Charge on the Contamination of Plastic Food Containers by Airborne Bacterial Spores. *Applied Microbiology* 14, 905–913 (1966). <https://doi.org/10.1128/am.14.6.905-913.1966>

²¹⁹Sun, X.D., Yuan, X.Z., Jia, Y. et al. Differentially charged nanoplastics demonstrate distinct accumulation in *Arabidopsis thaliana*. *Nat. Nanotechnol.* 15, 755–760 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41565-020-0707-4>

Das Verständnis der Struktur von Nanoplastik und seinen elektrostatischen Eigenschaften offenbart also nicht nur seine physikalische Natur, sondern schafft auch die Grundlage für die Analyse, wie sich diese Partikel auf Ökosysteme und Organismen auswirken können, was im Zusammenhang mit ihren pathogenen Mechanismen später eingehender erörtert wird.

Aufgrund seiner hohen dielektrischen Permeabilität (Fähigkeit, elektrische Ladungen zu halten) akkumuliert das Nanoplastik, nachdem es in den Körper gelangt, weiterhin neue schädliche Ladungen, die normalerweise durch die natürlichen leitfähigen Systeme des Körpers neutralisiert oder zerstreut werden.

Dies stört die Selbstregulationsprozesse des Körpers und stellt aufgrund längerer Belastung gegenüber anormer elektrostatischer Energie ein Risiko für Zellstrukturen dar.

Um das Ausmaß der Bedrohung durch das Eindringen von Nanoplastik in den Körper zu verstehen, können wir einen Blick auf die bioelektrischen Systeme des Körpers werfen – komplexe Mechanismen, bei denen elektrische Impulse als Sprache der intrazellulären Kommunikation dienen.

Jede Bewegung und jeder Gedanke wird durch unsichtbare Signale ermöglicht, die Befehle an Zellen übermitteln. Neuronen tauschen Informationen durch elektrische Impulse aus, Muskeln kontrahieren sich als Reaktion auf diese Signale, und das Gehirn verarbeitet die Daten mithilfe einer Kombination aus bioelektrischen und chemischen Prozessen. Selbst Atmung, Reflexe, Sehen und Hören hängen von winzigen elektrischen Entladungen ab, die das Funktionieren der Organe regulieren.

Diese unsichtbaren Ströme, perfektioniert in Millionen von Jahren der Evolution, verwandeln bioelektrische Impulse in die Sprache des Lebens. Doch ihre Harmonie wird durch Fremdelemente gestört – mikroskopisch kleine Nanoplastikpartikel.

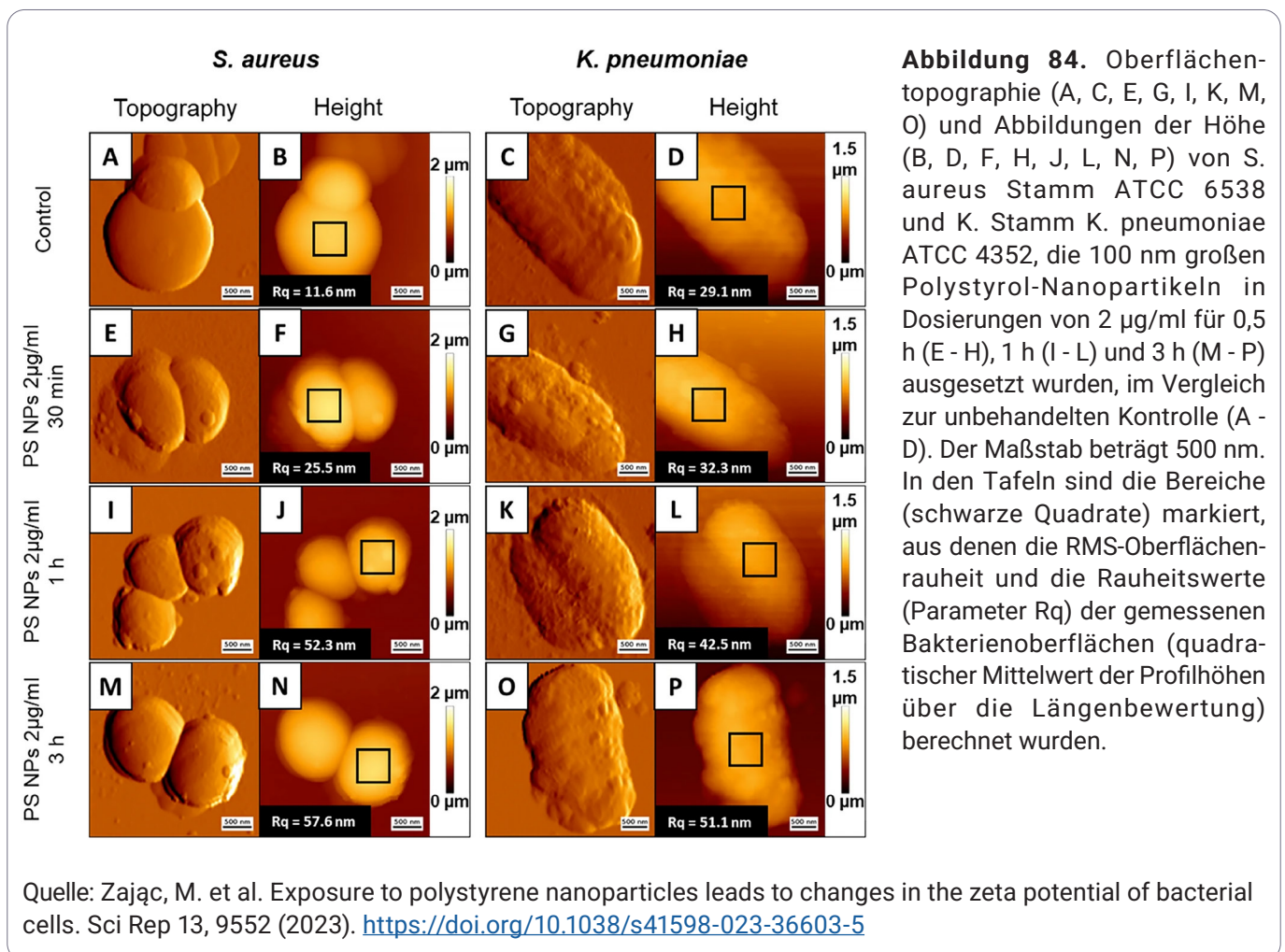
Wenn Nanoplastik in den Körper gelangt, kann es Ionen adsorbieren und Zonen mit anomaler elektrischer Leitfähigkeit bilden, wodurch das natürliche Ionengleichgewicht und die Prozesse der Neutralisierung lokaler Ladungen, die durch die intrazelluläre Flüssigkeit reguliert werden, gestört werden. Die Adsorption von Ionen an der Oberfläche von Nanoplastik führt zu einer Akkumulation elektrostatischer Ladungen auf diesen Partikeln. Dieses Phänomen kann oxidativen Stress durch die Bildung reaktiver Sauerstoffspezies (ROS) hervorrufen und die elektrochemische Kommunikation zwischen den Zellen stören, was sich negativ auf deren Funktionen auswirkt.

Dies wird durch die Studie²²⁰ bestätigt, bei der Polystyrolpartikel mit einer Größe von 100 nm, selbst in Gegenwart von Natriumionen (Na^+), trotz ihrer negativen Ladung stabil blieben und auf der Bakterienoberfläche adsorbiert wurden. So zeigten Experimente mit *Staphylococcus aureus* und *Klebsiella pneumoniae*, dass Nanoplastik das Zeta-Potential der Zellen erheblich verändert, was ihrer Oberfläche eine stärkere negative Ladung verleiht und dadurch das natürliche elektrostatische Gleichgewicht stört.

²²⁰Zajac, M. et al. Exposure to polystyrene nanoparticles leads to changes in the zeta potential of bacterial cells. Sci Rep 13, 9552 (2023). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-36603-5>

Geladene Nanoplastikpartikel können die elektrischen Felder um die Zellen herum beeinflussen und so die Signalübertragung stören. Dies ist vergleichbar mit Störungen in der Funkkommunikation: Statt klarer Befehle gibt es ein chaotisches Rauschen, das die Zellen am Informationsaustausch hindert. Obwohl die direkten Auswirkungen auf Nervenzellen in der Studie nicht untersucht wurden und Schlussfolgerungen über die Auswirkungen auf den Menschen vorläufig sind und weitere Forschung erfordern, deutet die Veränderung der Oberflächenladung von Bakterien darauf hin, dass Nanoplastik die elektrochemischen Eigenschaften von Membranen verändern kann. Bei Konzentrationen von mehr als 64 Mikrogramm pro Millimeter verursachten die Polystyrolpartikel beispielsweise erhebliche Verschiebungen des Zeta-Potentials, wodurch Ionenkanäle oder Rezeptoren, die für die intrazelluläre Kommunikation wichtig sind, gestört werden könnten.

Die Fähigkeit von Nanopartikeln an Oberflächen zu "haften", wie die Rasterkraftmikroskopie-Aufnahmen in der oben genannten Studie zeigen (Abb. 84), birgt das Risiko einer Langzeitbelastung. Partikel, die sich in Geweben ablagern, können anhaltende elektrostatische Anomalien bilden, die durch Natrium- und Kaliumionen nicht vollständig neutralisiert werden können, insbesondere wenn Nanoplastik in Zellen eindringt und die Schutzmechanismen der intrazellulären Flüssigkeit umgeht.



Die Gefahr einer pathogenen Aufladung von Nanoplastik besteht auch darin, dass es zu elektrischen Störungen in der Umgebung von Immunzellen kommen kann. Dies wird durch die Studie²²¹ bestätigt, in der gezeigt wurde, dass positiv geladenes Nanoplastik (PS-NH²) die Lebensfähigkeit von Immunzellen und die Stabilität der lysosomalen Membranen im Vergleich zu negativ geladenem (PS-COOH) deutlich verringert, was auf die Bedeutung der Ladung bei der Interaktion mit Zellen hinweist.

Elektrostatisch geladene MNP-Partikel haben eine erhöhte Fähigkeit, an Zellmembranen, Geweben und anderen biologischen Oberflächen adsorbiert zu werden, indem sie buchstäblich an ihnen haften – dies erhöht das Risiko mechanischer und chemischer Schäden an Zellen und beeinträchtigt deren Struktur und Funktion.

Die elektrostatische Aufladung kann das Durchdringen von MNP-Partikeln durch komplexe biologische Barrieren wie die Blut-Hirn-Schranke oder die Plazentaschranke erleichtern. Infolgedessen können Toxine das Gehirn oder den Fötus erreichen, was das Risiko neurotoxischer Wirkungen und intrauteriner Entwicklungsstörungen erhöht.

Der elektrostatische Einfluss von Nanoplastik kann die Struktur und Funktion von Proteinen, Ionenkanälen und Zellrezeptoren stören, was wiederum zu Störungen bei der Signalübertragung zwischen Zellen führt, oxidativen Stress auslöst und die Immunabwehr des Körpers schwächt.

Diese Veränderungen können eine Kaskade von pathologischen Prozessen auslösen, darunter chronische Entzündungen, neurodegenerative Störungen, die Entwicklung bösartiger Tumore und systemische Funktionsstörungen im Körper, wodurch sich das Risiko schwerer Erkrankungen erheblich erhöht.

Die Akkumulierung elektrostatischer Ladung auf Nanoplastik ist also nicht nur ein physikalisches Phänomen, sondern ein Mechanismus, der die Gefahren von MNP erhöht. Vor allem, wenn man bedenkt, dass die elektrostatische Ladung auf MNP sehr lange erhalten bleiben kann und die Mikro- und Nanoplastikpartikel selbst aus dem Körper praktisch nicht ausgeschieden werden.

Die Erforschung dieses Phänomens ist derzeit von entscheidender Bedeutung, da es zu einem Verständnis führt, wie die auf Nanoplastik akkumulierten Ladungen pathogener Elektrizität eine makroskopische Bedrohung für das Leben der menschlichen Spezies als solches werden können.

Bis vor kurzem wurde angenommen, dass die Basis der Zellenergetik – der Protonentransfer – ausschließlich durch chemische Prozesse bestimmt wird: Protonen galten als Teilchen, die von einem Wassermolekül zum anderen "springen". Eine neue Studie, die in den Proceedings of the National Academy of Sciences veröffentlicht wurde, ändert diese Ansicht jedoch grundlegend. Es stellte sich heraus, dass der Protonentransport in lebenden Organismen nicht nur von chemischen Eigenschaften abhängt, sondern auch von Quanteneigenschaften, und zwar vom Elektronenspin und der Chiralität biologischer Moleküle (Abb. 85).

²²¹Murano, C., Bergami, E., Liberatori, G., Palumbo, A. & Corsi, I. Interplay Between Nanoplastics and the Immune System of the Mediterranean Sea Urchin *Paracentrotus lividus*. *Front. Mar. Sci.* 8, 647394 (2021). <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.647394>

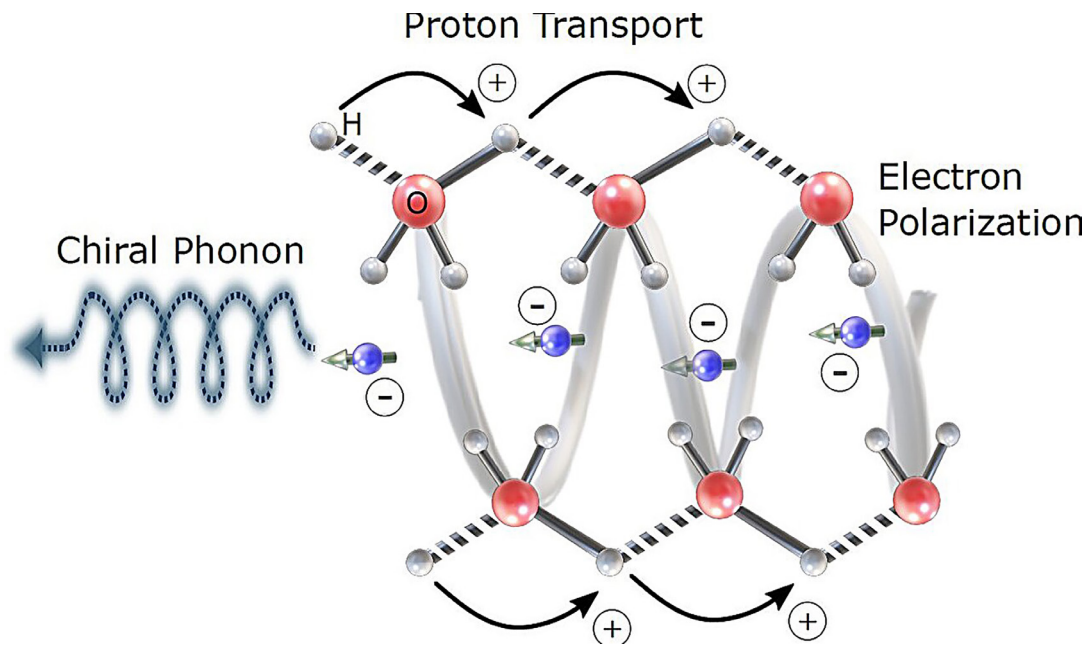


Abbildung 85. Schematisches vereinfachtes Modell. Der Protonentransport wird in chiralen Medien von einer Elektronenpolarisation begleitet. Aufgrund des CISS-Effekts erzeugt diese elektrische Polarisation eine Spinpolarisation. Die Drehimpulserhaltung erzeugt chirale Phononen, die den Protonentransport verstärken.

Quelle: Goren, N. et al. Coupling between electrons' spin and proton transfer in chiral biological crystals. PNAS 122, e2500584122 (2025). <https://doi.org/10.1073/pnas.2500584122>

Eine von Wissenschaftlern der Hebrew University of Jerusalem durchgeführte Studie hat gezeigt: In Proteinen wie Lysozym wird der Protonentransfer deutlich beschleunigt, wenn Elektronen mit dem "richtigen" Spin zugeführt werden, und umgekehrt gehemmt, wenn der entgegengesetzte Spin angewendet wird. Dies ist darauf zurückzuführen, dass sich Protonen und Elektronen in lebenden Systemen wie ein kohärenter Quantenmechanismus verhalten. Selbst minimale Änderungen ihrer Spinausrichtung können sich auf grundlegende Prozesse auswirken: auf die Energieproduktion, den Stoffwechsel und die Regulierung innerhalb der Zelle.



Studienleiter Naam Goren erklärte: *"Unsere Ergebnisse zeigen, dass die Art und Weise, wie sich Protonen in biologischen Systemen bewegen, nicht nur die Chemie, sondern auch die Quantenphysik betrifft."* Das bedeutet, dass selbst die geringsten Störungen der elektrischen Ladung oder der magnetischen Ausrichtung den Zellstoffwechsel, die Energieproduktion und den allgemeinen Gesundheitszustand beeinflussen können²²².

²²²[Phys.org](https://phys.org). Quantum effects in proteins: How tiny particles coordinate energy transfer inside cells. (2025)

<https://phys.org/news/2025-05-quantum-effects-proteins-tiny-particles.html> (Abgerufen am 01.05.2025).

Systemische Auswirkungen von MNP auf Organe und Funktionssysteme des Menschen

Nach dem Eindringen in den menschlichen Körper gelangt MNP über den Blutkreislauf in alle Organe und Gewebe (Abb. 86). Plastikpartikel wurden im menschlichen Blut, im Herz- und Knochengewebe, im Gehirn, in der Plazenta, in der Lunge, in der Leber und in anderen Organen nachgewiesen²²³.

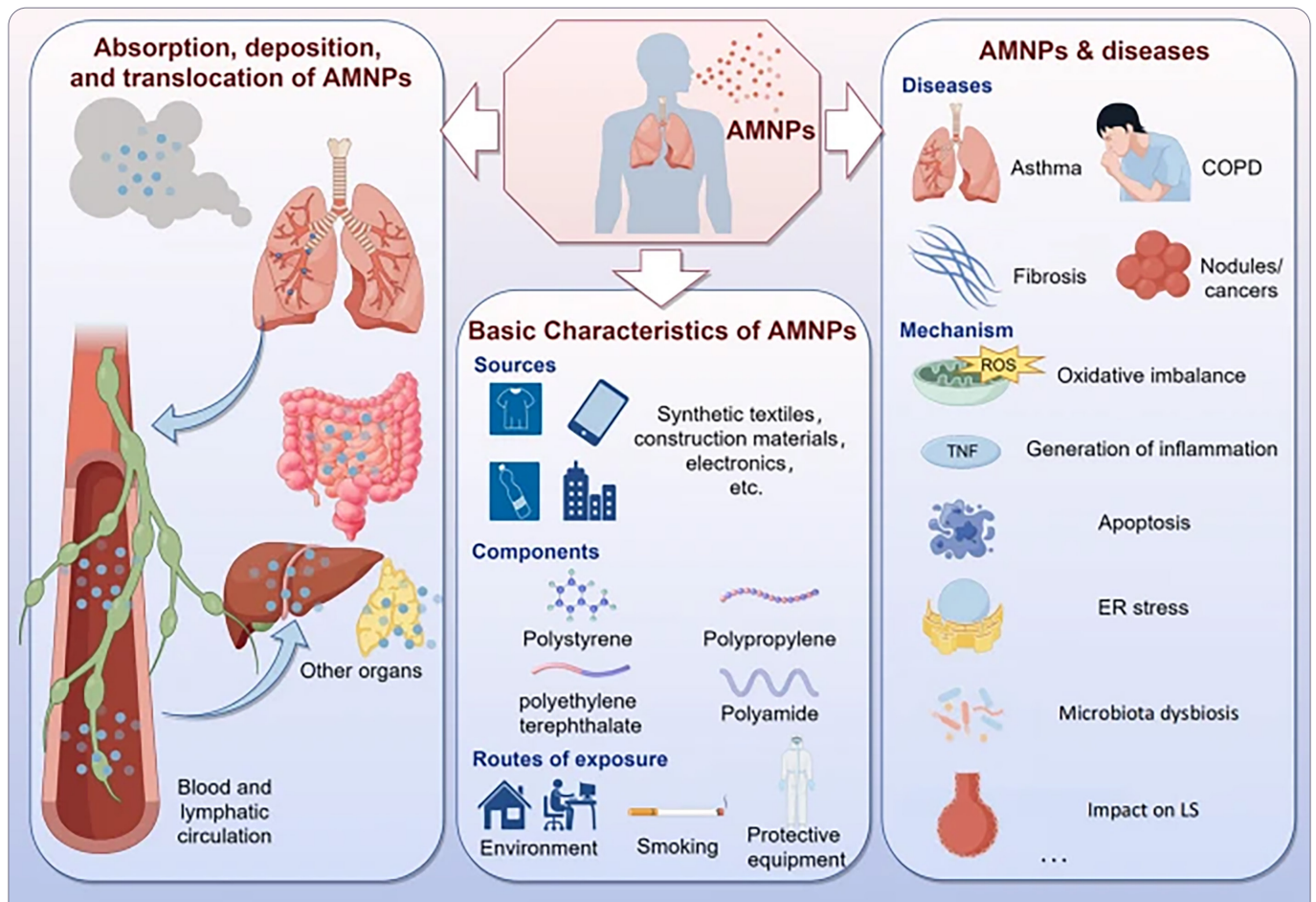


Abbildung 86. Das Eindringen von MNP über die Atemwege und seine toxischen Auswirkungen auf den menschlichen Körper.

Quelle: Gou, Z., Wu, H., Li, S., Liu, Z. & Zhang, Y. Airborne micro and nanoplastics: emerging causes of respiratory diseases. *Particle and Fibre Toxicology* 21, 50 (2024). <https://doi.org/10.1186/s12989-024-00613-6>

²²³Khan, A. & Jia, Z. Recent insights into uptake, toxicity, and molecular targets of microplastics and nanoplastics relevant to human health impacts. *iScience* 26, 106061 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.isci.2023.106061>

Schäden des Atmungssystems aufgrund des Einatmens von MNP

Einer der Hauptwege, über den MNP in den menschlichen Körper gelangt, ist die Atmung.

Eine Studie chinesischer Wissenschaftler²²⁴ ergab, dass Erwachsene während eines zweistündigen Aufenthalts im Freien etwa 106 000 Mikroplastikpartikel einatmen und Kinder etwa 73 700. Partikel, die kleiner als 0,1 μm sind, können sich im Endeffekt aufgrund ihrer thermodynamischen Eigenschaften im gesamten Atemtrakt (von den oberen Atemwegen bis zu den Alveolen) effizient ablagern²²⁵. Die Lunge hat eine große alveoläre Oberfläche (ca. 150 m^2) und eine dünne Gewebe-Schranke (weniger als 1 μm), so dass NP leicht in den Blutkreislauf eindringen kann (Abb. 87). In 13 von 20 Proben menschlichen Lungengewebes wurde Mikroplastik nachgewiesen²²⁶.

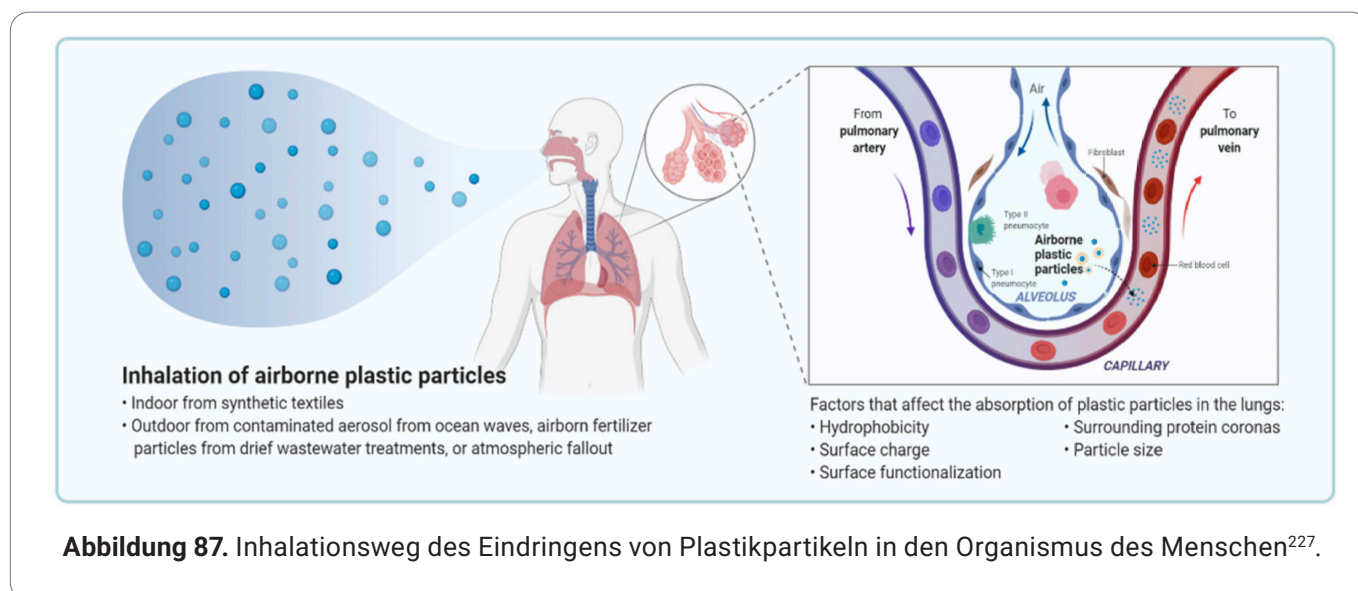


Abbildung 87. Inhalationsweg des Eindringens von Plastikpartikeln in den Organismus des Menschen²²⁷.

In einer Studie an 22 Patienten mit Lungenerkrankungen wurde in allen Sputumproben Mikroplastik nachgewiesen²²⁸, wobei die Werte zwischen 18,75 und 91,75 Partikeln/10 ml lagen²²⁹. Ein Zusammenhang zwischen allergischer Rhinitis und Mikroplastik wurde ebenfalls festgestellt²³⁰.

MNP steht in engem Zusammenhang mit dem Ausbruch und der Entwicklung verschiedener Atemwegserkrankungen, darunter Asthma, Lungenfibrose, chronische obstruktive Lungenerkrankungen und Tumore²²⁹. Eine Studie zeigte, dass 97 % der Proben von bösartigen Lungentumoren Mikroplastikfasern enthielten²³¹.

²²⁴Peking University Center for Environmental Science and Engineering. Prof. Yi Huang's team made new progress in atmospheric microplastic distribution and its human health risk. CESE. (2022) <https://cese.pku.edu.cn/kycg/156506.htm> (Abgerufen am 01.05.2025).

²²⁵Gou, Z., Wu, H., Li, S., Liu, Z. & Zhang, Y. Airborne micro- and nanoplastics: emerging causes of respiratory diseases. Particle and Fibre Toxicology 21, 50 (2024). <https://doi.org/10.1186/s12989-024-00613-6>

²²⁶Amato-Lourenço, L. F. et al. Presence of airborne microplastics in human lung tissue. Journal of Hazardous Materials 416, 126124 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126124>

²²⁷Yee, M. S.-L. et al. Impact of Microplastics and Nanoplastics on Human Health. Nanomaterials 11, 496 (2021). <https://doi.org/10.3390/nano11020496>

²²⁸Huang, S. et al. Detection and Analysis of Microplastics in Human Sputum. Environ. Sci. Technol. 56, 2476–2486 (2022). <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c03859>

²²⁹Xu, M. et al. Internalization and toxicity: A preliminary study of effects of nanoplastic particles on human lung epithelial cell. Science of The Total Environment 694, 133794 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.133794>

²³⁰Tuna, A., Taş, B.M., Başaran Kankılıç, G. et al. Detection of microplastics in patients with allergic rhinitis. Eur Arch Otorhinolaryngol 280, 5363–5367 (2023). <https://doi.org/10.1007/s00405-023-08105-7>

²³¹Dris, R. et al. A first overview of textile fibers, including microplastics, in indoor and outdoor environments. Environmental Pollution 221, 453–458 (2017). <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.12.013>

Zu den möglichen Mechanismen gehören oxidativer Stress, Entzündungen und Beeinträchtigung der Lungenmikrobiota. MNP kann Entzündungen im Lungengewebe auslösen²³².

Einem WHO-Bericht zufolge sind Infektionen der unteren Atemwege derzeit die tödlichste Infektionskrankheit weltweit und stehen an fünfter Stelle aller Todesursachen²³³. Und die Zahl der Todesfälle durch Larynxkarzinom, Bronchialkarzinom und Lungenkarzinom ist gestiegen und diese gehören zu den sechsthäufigsten Todesursachen.

Neurotoxische Wirkungen von MNP. Schädigung des zentralen und peripheren Nervensystems

Studien bestätigen, dass neurologische Störungen weltweit die Hauptursache für körperliche und kognitive Behinderungen sind und derzeit etwa 3,4 Milliarden Menschen betreffen. Die absolute Zahl der Patienten ist in den letzten 30 Jahren erheblich gestiegen²³⁴. Darüber hinaus wird erwartet, dass sich die Häufigkeit chronischer neurodegenerativer Erkrankungen in den nächsten zwei Jahrzehnten mindestens verdoppeln wird. Nach Angaben der WHO leidet jeder achte Mensch auf der Welt an einer psychischen Störung²³⁵.

Die Prävalenz bipolarer Störungen bei Jugendlichen und jungen Erwachsenen ist weltweit von 79,21 pro 100 000 Einwohner im Jahr 1990 auf 84,97 pro 100 000 Einwohner im Jahr 2019 gestiegen²³⁶. In den letzten drei Jahrzehnten hat die Erkrankungshäufigkeit sowohl bei Männern als auch bei Frauen zugenommen (Abb. 88). Untersuchungen zeigen, dass psychische Störungen bei Kindern und Jugendlichen in den letzten Jahren zunahmen. Laut dem Nationalen Bericht über Qualität und Unterschiede im Gesundheitswesen aus dem Jahr 2022 stieg die Zahl der Besuche in Notaufnahmen wegen psychischer Erkrankungen bei Kindern im Alter von 0 bis 17 Jahren zwischen 2016 und 2019 von 784,1 auf 869,3 pro 100 000 Einwohner. Darüber hinaus stieg die Selbstmordrate bei Menschen im Alter ab 12 Jahren im Zeitraum von 2008 bis 2020 um 16 % – von 14,0 auf 16,3 pro 100 000 Einwohner²³⁷.

Einem Bericht der Krankenkasse Blue Cross Blue Shield zufolge ist die Zahl der Diagnosen von klinischen Depressionen, auch bekannt als Major Depression, seit 2013 um 33 % gestiegen. Einige Quellen sagen bereits voraus, dass Depressionen bis zum Jahr 2030 die Hauptursache für die verkürzte Lebenserwartung und Tod sein werden. Frauen und Männer, die an Depressionen leiden, können laut dem Bericht im Durchschnitt bis zu 9,6 Lebensjahre bei guter Gesundheit verlieren²³⁸.

²³²Bengalli, R. et al. Characterization of microparticles derived from waste plastics and their bio-interaction with human lung A549 cells. *Journal of Applied Toxicology* 42, 2030–2044 (2022). <https://doi.org/10.1002/jat.4372>

²³³World Health Organization. The top 10 causes of death. WHO Fact Sheets. (2024) <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/the-top-10-causes-of-death> (Abgerufen am 01.05.2025).

²³⁴Van Schependom, J. & D'haeseleer, M. Advances in Neurodegenerative Diseases. *Journal of Clinical Medicine* 12, 1709 (2023). <https://doi.org/10.3390/jcm12051709>

²³⁵World Health Organization. Mental disorders. WHO Fact Sheets. (2022) <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/mental-disorders> (Abgerufen am 01.05.2025).

²³⁶Zhong, Y. et al. Global, regional and national burdens of bipolar disorders in adolescents and young adults: a trend analysis from 1990 to 2019. *Gen Psych* 37, e101255 (2024). <https://doi.org/10.1136/gpsych-2023-101255>

²³⁷U.S. Department Of Health And Human Services. 2022 National Healthcare Quality and Disparities Report. Rockville, MD: Agency for Healthcare Research and Quality. (2022) <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK587174> (Abgerufen am 01.05.2025).

²³⁸Lépine, J.-P. & Brolley, M. The increasing burden of depression. *NDT* 7, 3–7 (2011). <https://doi.org/10.2147/NDT.S19617>

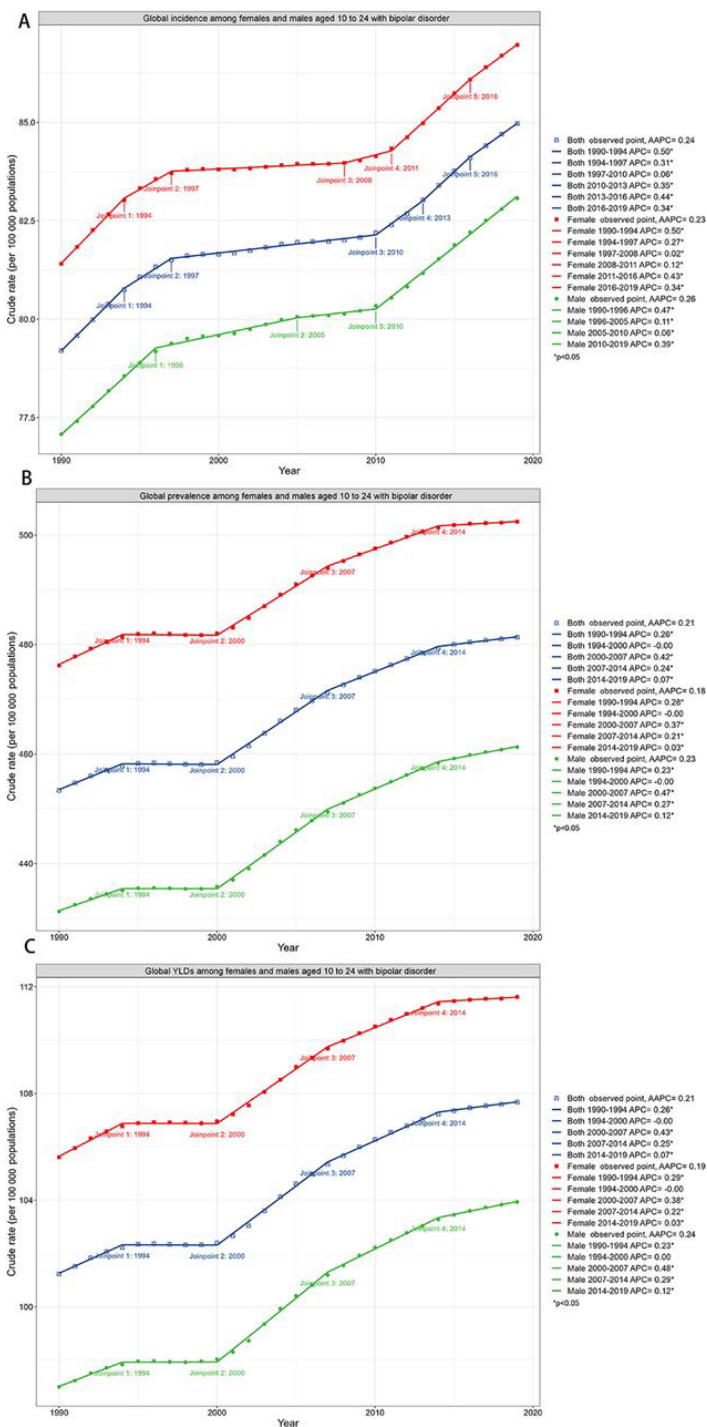


Abbildung 88. Regressionsanalyse der Verbindungspunkte für die globale Inzidenz der bipolaren Störung, die Prävalenz und die gelebten Jahre mit Behinderung (YLDs) bei allen Jugendlichen und jungen Erwachsenen im Alter von 10 bis 24 Jahren im Zeitraum von 1990 bis 2019.

* $p < 0,05$; AAPC – durchschnittliche jährliche prozentuale Veränderung; APC – jährliche prozentuale Veränderung; YLDs – gelebte Jahre mit Behinderung.

Quelle: Zhong, Y. et al. Global, regional and national burdens of bipolar disorders in adolescents and young adults: a trend analysis from 1990 to 2019. *Gen Psych* 37, e101255 (2024). <https://doi.org/10.1136/gpsych-2023-101255>

Die Zahl der Diagnosen der Aufmerksamkeitsdefizit-Hyperaktivitätsstörung (ADHS) hat in den letzten Jahrzehnten stetig zugenommen. Nationale Umfragen der US-Bevölkerung zeigen einen Anstieg der Prävalenz von 6,1 % auf 10,2 % in einem Zeitraum von 20 Jahren von 1997 bis 2016²³⁹ (Abb. 89).

Eine Studie aus dem Jahr 2023, die 31 Länder erfasste, ergab, dass das Niveau der Lese-, Schreib- und Rechenkenntnisse sinkt²⁴⁰ (Abb. 90).

²³⁹Xu, G., Strathearn, L., Liu, B., Yang, B. & Bao, W. Twenty-Year Trends in Diagnosed Attention-Deficit/Hyperactivity Disorder Among US Children and Adolescents, 1997-2016. *JAMA Network Open* 1, e181471 (2018). <https://doi.org/10.1001/jamanetworkopen.2018.1471>

²⁴⁰Organisation for Economic Co-operation and Development. Do adults have the skills they need to thrive in a changing world? OECD Publications. (2024) https://www.oecd.org/en/publications/do-adults-have-the-skills-they-need-to-thrive-in-a-changing-world_b263dc5d-en.html (Abgerufen am 01.05.2025).

Percent of children with a parent-reported ADHD diagnosis

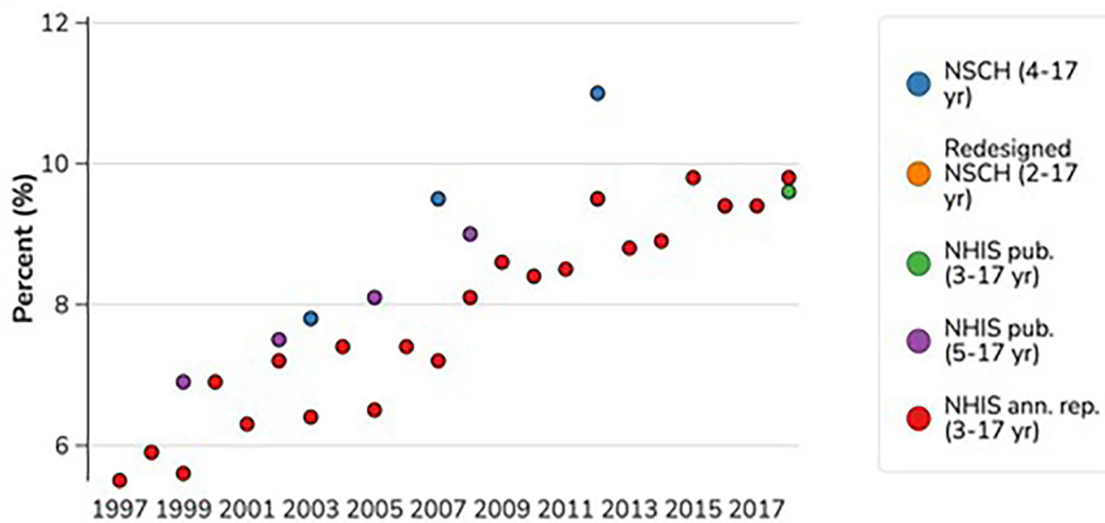


Abbildung 89. Grafik des Anstiegs der ADHS-Prävalenz im Zeitraum von 1997 bis 2016.

Quelle: Xu, G., Strathearn, L., Liu, B., Yang, B. & Bao, W. Twenty-Year Trends in Diagnosed Attention-Deficit/Hyperactivity Disorder Among US Children and Adolescents, 1997–2016. JAMA Network Open 1, e181471

Performance in reasoning and problem-solving tests is declining

Average scores on assessments across different domains in high-income countries (teen and adult scores use different scales)

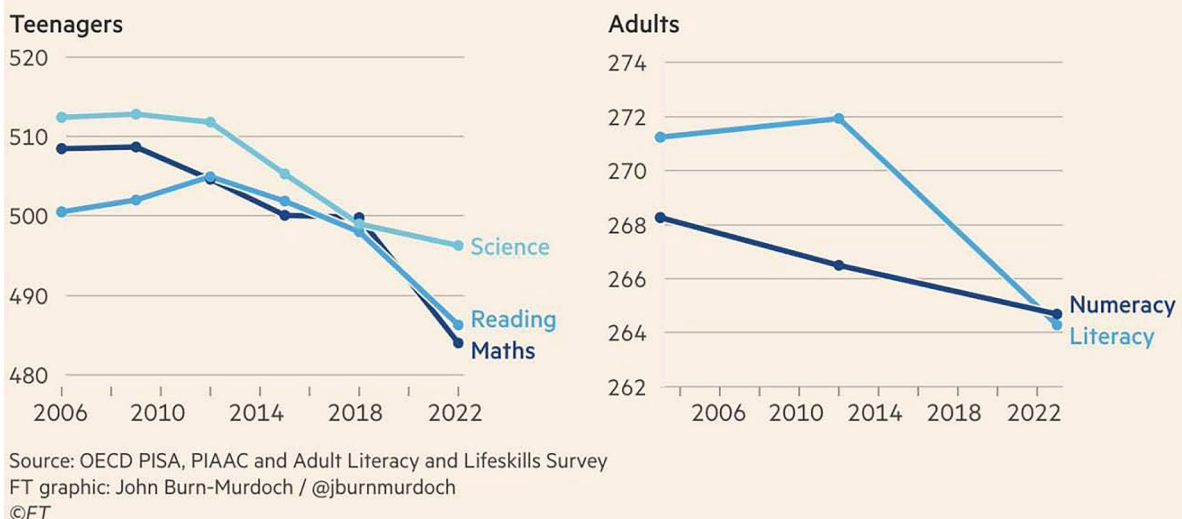


Abbildung 90. Die Leistung bei Logik- und Aufgabenlösungstests nimmt ab.

Quelle: OECD PISA, PIAAC and Adult Literacy and Lifeskills Survey FT graphic: John-Murdoch / @jburnmurdoch

Steigende Trends bei neurodegenerativen und neuropsychiatrischen Erkrankungen korrelieren eindeutig mit der zunehmenden Menge an Plastik in der Umwelt (Abb. 96-97).

Die höchsten Konzentrationen von NP wurden in Hirngewebe der Menschen festgestellt – 7 bis 30 Mal höher als die Konzentrationen in Leber oder Nieren und Hirngewebeproben von Menschen, bei denen Demenz diagnostiziert wurde, wiesen eine noch höhere Konzentration von MNP auf, und zwar bis zu 10 Mal höher verglichen mit Hirngewebe von Menschen ohne Demenz²⁴¹ (Abb. 91).

Die überwiegende Anzahl der Partikel im Gehirn waren winzige Polyethylen-Fragmente oder -Flocken – eines der am häufigsten verwendeten Kunststoffe für Verpackungsherstellung.

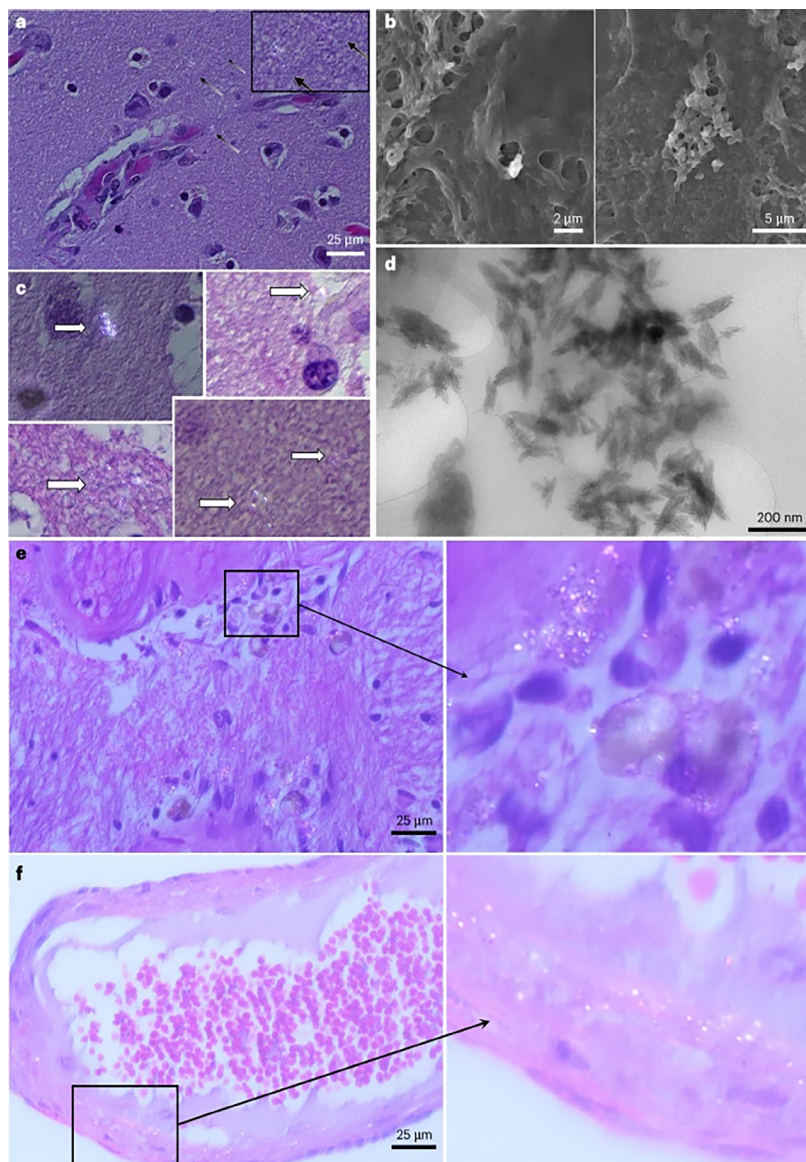


Abbildung 91. Mikroskopie mit Polarisationswellen

(a) schwarze Pfeile zeigen refraktäre Einschlüsse an; zur Verdeutlichung ist eine digitale Vergrößerung eingefügt und SEM (b) Sichtfelder sind 15,4 und 20,1 µm breit) wurden für das Scannen der Hirnprobenschnitten verstorbener Menschen verwendet. (c) große (>1 µm) Einschlüsse wurden nicht beobachtet; zusätzliche Beispiele der Polarisationswelle sind hervorgehoben (weiße Pfeile zeigen refraktäre Einschlüsse im Submikronbereich an). Die begrenzte Auflösung bei dieser Technologie führte dazu, dass für die Untersuchung der Granulatrextrakte, die für Py-GC/MS verwendet werden, TEM (Transmissionselektronenmikroskopie) angewendet wurde. (d) TEM-Beispielbilder, die zahllose feste Partikel als Fragmente oder Flocken nach der Dispersion zeigen, mit Größen von meist <200 nm Länge und <40 nm Breite. (e), (f) Die Polarisationsmikroskopie zeigt deutlich mehr refraktäre Einschlüsse in Fällen von Demenz, insbesondere in Bereichen mit gleichzeitiger Ansammlung von Immunzellen (e) und entlang von Gefäßwänden (f).

Alle Aufnahmen wurden von Hirngewebeproben einer kleiner Untergruppe verstorbener Menschen gemacht (n = 10 für Normalfälle; n = 3 für Demenzfälle), um visuelle Beweise zur Unterstützung der analytischen Chemie zu liefern.

Quelle: Nihart, A.J., Garcia, M.A., El Hayek, E. et al. Bioaccumulation of microplastics in decedent human brains. Nat Med 31, 1114–1119 (2025). <https://doi.org/10.1038/s41591-024-03453-1>

²⁴¹Nihart, A.J., Garcia, M.A., El Hayek, E. et al. Bioaccumulation of microplastics in decedent human brains. Nat Med 31, 1114–1119 (2025). <https://doi.org/10.1038/s41591-024-03453-1>

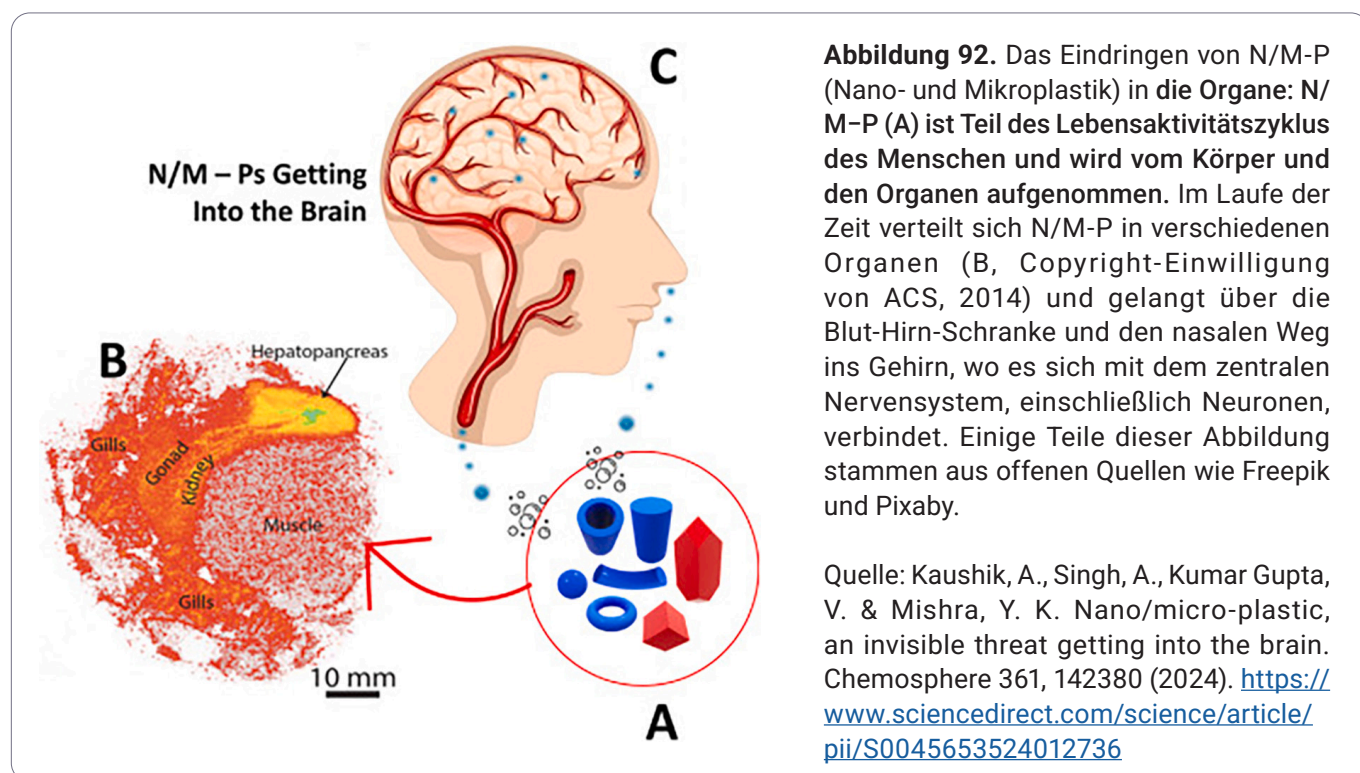
Neue Daten bestätigen, dass zwischen 2016 und 2024, also innerhalb von 8 Jahren, der Plastikgehalt im Gehirn um 50 % zugenommen hat²⁴¹.



"Bei gesunden Menschen im Alter von 45 bis 50 Jahren fanden wir durchschnittlich 4 900 Mikrogramm Plastikpartikel pro Gramm Hirngewebe. (...) Das entspricht einem ganzen Plastiklöffel. Ungefähr so viel Mikroplastik befindet sich in unserem Gehirn. Das bedeutet, dass unser Gehirn heute zu 99,5 Prozent aus Hirngewebe besteht und der Rest aus Plastik", so der leitende Forscher Matthew Campen von der University of New Mexico²⁴².

Angesichts der Zunahme von Plastikpartikeln in der Atmosphäre, im Wasser und in der Nahrung kann man davon ausgehen, dass die Menge an Nanoplastik in unserem Körper nur noch zunehmen wird. Wenn sich diese Tendenz fortsetzt, könnte der Plastikgehalt im Gehirn innerhalb der nächsten vier Jahre um weitere 50 % zunehmen.

MNP gelangt ins Gehirn über das Blut, indem es die Blut-Hirn-Schranke (BHS) überwindet, sowie über die Riechnerven beim Atmen (Abb. 92).



²⁴¹Nihart, A.J., Garcia, M.A., El Hayek, E. et al. Bioaccumulation of microplastics in decedent human brains. Nat Med 31, 1114–1119 (2025). <https://doi.org/10.1038/s41591-024-03453-1>

²⁴²VRT NWS. Brain contains "full plastic spoonful" of microplastics. (2025) <https://www.vrt.be/vrtnws/nl/2025/02/04/microplastics-in-de-hersenen> (Abgerufen am 01.05.2025).

Die Blut-Hirn-Schranke ist ein spezialisiertes physiologisches System, das den Transport von Substanzen aus dem Blutkreislauf in das zentrale Nervensystem reguliert (Abb. 93). Sie lässt selektiv Nährstoffe und Sauerstoff durch und blockiert das Eindringen von Toxinen und Pathogenen (Abb. 94). Dieser Mechanismus bietet einen wichtigen Schutz für das Gehirn, indem er die Homöostase der neuronalen Umgebung aufrechterhält.

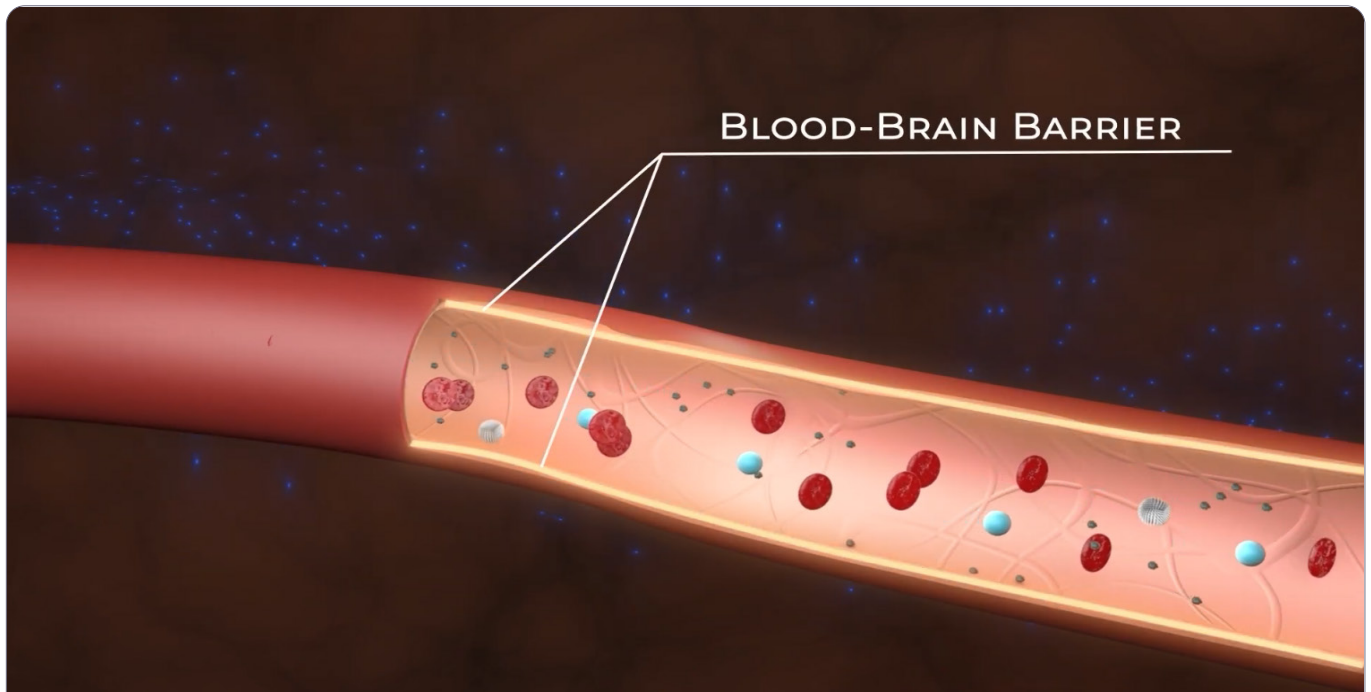


Abbildung 93. Schematische Darstellung eines zerebralen Blutgefäßes.

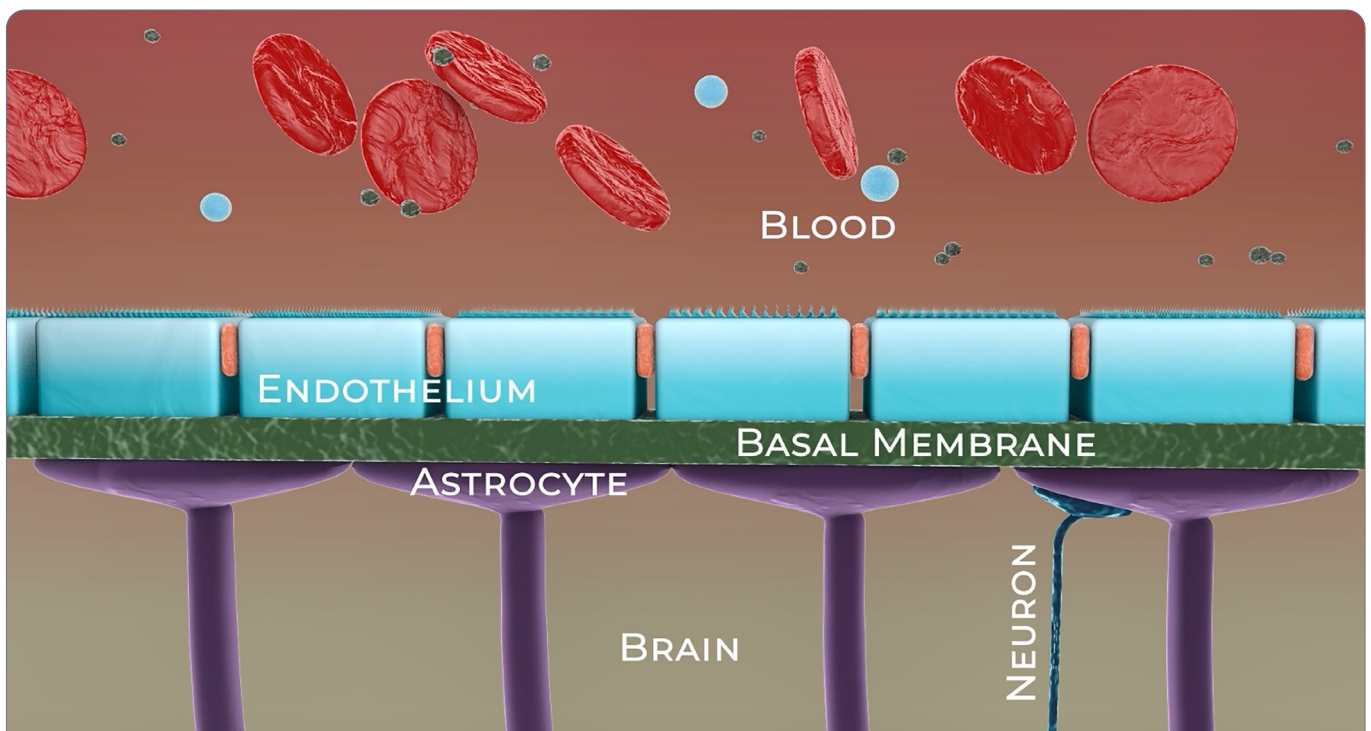


Abbildung 94. Schematische Darstellung der Blut-Hirn-Schranke.

Nanoplastikpartikel können aufgrund ihrer Submikron-Größe und ihrer physikalisch-chemischen Eigenschaften innerhalb von nur 2 Stunden, nachdem sie in den Körper gelangen, in das Gehirn eindringen²⁴³.

Wenn sie eingeatmet werden, gelangen die Nanoplastikpartikel über die Riechnerven direkt in die Gehirnregion, die für die Geruchswahrnehmung zuständig ist²⁴⁴ (Abb. 95). Somit ist der Weg zum Gehirn kürzer und direkter als zu anderen Organen.



Abbildung 95. Eindringen von NP durch den Riechnerv ins Gehirn.

Wenn Nanoplastik in das Gehirn eindringt, stört es die Arbeit der Gehirnzellen – der Neuronen. Forschungen haben gezeigt, dass die Oberflächeneigenschaften und die elektrische Ladung von Nanopartikeln ihre Interaktion mit Neuronen und die Übertragung von Nervenimpulsen signifikant beeinflussen können.

Die elektrostatische Ladung von Nanoplastik ermöglicht es, nach dem Eindringen ungehindert in die Funktion jeder Zelle im menschlichen Körper einzugreifen, oxidativen Stress und chronische Entzündungen zu verursachen, die Funktion der Mitochondrien zu beeinträchtigen und möglicherweise zu ihrer vollständigen Zerstörung und zum Zelltod zu führen.

Die Untersuchung²⁴⁵ zeigte, dass negativ geladene Nanopartikel eine Depolarisierung der Neuronenmembran bewirken können, was zu einer Veränderung deren elektrischen Aktivität führt.

²⁴³Kopatz, V. et al. Micro- and Nanoplastics Breach the Blood–Brain Barrier (BBB): Biomolecular Corona’s Role Revealed. *Nanomaterials* 13, 1404 (2023). <https://doi.org/10.3390/nano13081404>

²⁴⁴Amato-Lourenço, L. F. et al. Microplastics in the Olfactory Bulb of the Human Brain. *JAMA Netw Open* 7, e2440018 (2024). <https://doi.org/10.1001/jamanetworkopen.2024.40018>

²⁴⁵Dante, S. et al. Selective Targeting of Neurons with Inorganic Nanoparticles: Revealing the Crucial Role of Nanoparticle Surface Charge. *ACS Nano* 11, 6630–6640 (2017). <https://doi.org/10.1021/acs.nano.7b00397>

Das Experiment zeigte, dass negativ geladene Nanoplastikpartikel sich selektiv an Neuronen binden, die aktiv an der Übertragung von Nervenimpulsen beteiligt sind. Sie hafteten an Zellkörpern der Neuronen, Axonen, Dendriten und synaptischen Spalten, während Gliazellen, die keine elektrische Aktivität aufweisen, nicht mit Nanoplastikpartikeln interagierten.

Das heißt, die elektrische Aktivität der Neuronen ist der Hauptauslöser für die Bindung des negativ geladenen Nanoplastiks an die Zellmembran.

Forschungen zufolge neigt Mikro- und Nanoplastik dazu, sich in der lipidreichen Myelinscheide der Gehirnneuronen anzureichern, die die Neuronen umgibt und die Weiterleitung von Nervensignalen gewährleistet²⁴⁶. Nanoplastik führt zur Zerstörung der Myelinscheide von Axonen^{247, 248}, wodurch die Übertragung von Nervenimpulsen zwischen Neuronen gestört wird.

Auswirkungen von Nanoplastik auf Neuronen

Nanoplastik kann Neuronen durch folgende Mechanismen beeinflussen:

1. Wirkung auf das Membranpotenzial der Neuronen

Neuronen funktionieren basierend auf der Differenz des elektrischen Potenzials an ihren Membranen (etwa -70 mV im Ruhezustand), die durch Ionengradienten (Na^+ , K^+ , Cl^- usw.) und die Aktivität von Ionenkanälen entsteht. Gelangt ein Nanoplastikteilchen mit einer elektrischen Ladung in die Nähe der Membran eines Neurons, kann es das elektrische Feld verändern und das Membranpotenzial destabilisieren. Dies kann zu einer Depolarisierung oder Hyperpolarisierung und im schlimmsten Fall zu einer spontanen Aktivierung des Neurons oder einer Signalblockierung führen.

2. Elektrostatische Wechselwirkung mit Ionenkanälen

Ionenkanäle in der Membran eines Neurons enthalten geladene Aminosäuren, insbesondere an den "Toren" des Kanals. Ein Teilchen mit einer starken negativen oder positiven Ladung kann mit diesen Stellen elektrostatisch interagieren, wodurch sich die Konfiguration des Kanals ändert. Dies kann dazu führen, dass der Kanal blockiert oder falsch aktiviert wird, wodurch die normale Funktion des Neurons gestört wird.

3. Störung der Synapsenfunktion

Synapsenfunktion hängt von präziser Aktivität von Ca^{2+} -, Na^+ -Ionen und Neurotransmittern ab²⁴⁹. Elektrostatisch geladene Nanoplastikpartikel können die Freisetzung von Neurotransmittern stören oder ein falsches Signal erzeugen, was zu Fehlfunktionen bei der Übertragung von Nervenimpulsen führen kann.

²⁴⁶Peking University Center for Environmental Science and Engineering. Prof. Yi Huang's team made new progress in atmospheric microplastic distribution and its human health risk. CESE. (2022) <https://cese.pku.edu.cn/kycg/156506.htm> (Abgerufen am 01.05.2025).

²⁴⁷Kim, D. Y. et al. Effects of Microplastic Accumulation on Neuronal Death After Global Cerebral Ischemia. Cells 14, 241 (2025). <https://doi.org/10.3390/cells14040241>

²⁴⁸Zhang, Y. et al. Selective bioaccumulation of polystyrene nanoplastics in fetal rat brain and damage to myelin development. Ecotoxicology and Environmental Safety 278, 116393 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2024.116393>

²⁴⁹Moiniafshari, K. et al. A perspective on the potential impact of microplastics and nanoplastics on the human central nervous system. Environmental Science: Nano 12, 1809–1820 (2025). <https://doi.org/10.1039/D4EN01017E>

4. Oxidativer Stress und Entzündungen

Geladene Nanoplastikpartikel können einen Anstieg der reaktiven Sauerstoffspezies verursachen, was zu oxidativem Stress führt. Oxidativer Stress in Neuronen tritt auf, wenn reaktive Sauerstoffspezies die Fähigkeit der Zelle, sie zu neutralisieren, übersteigen. Dies führt zu Schäden an der DNA, an zellulären Strukturen wie Membranen, Proteinen und Mitochondrien, wodurch die normale Funktion der Neuronen gestört wird. Infolgedessen verliert die Zelle ihre Fähigkeit, Nervenimpulse effizient zu übertragen, was zu ihrer Degradierung und schließlich zum Absterben führt. Da Neuronen nur eine begrenzte Regenerationsfähigkeit haben, sind die durch oxidativen Stress verursachten Schäden oft irreversibel und können zu einer zunehmenden Verschlechterung von Gedächtnis, Aufmerksamkeit und anderen kognitiven Funktionen führen.

5. Auswirkung auf die Mitochondrienfunktion

Nanoplastik mit elektrostatischer positiver Ladung kann nach dem Eindringen in die Zelle in den Mitochondrien akkumuliert werden und ihr Membranpotential stören. Dadurch wird die Funktion der Atmungskette gestört, es kommt zu Elektronenfreisetzung, die mit Sauerstoff interagieren und aktive Sauerstoffformen bilden, insbesondere Superoxid-Anionen. Ihre übermäßige Akkumulierung erhöht den oxidativen Stress und kann zu einer Schädigung der Zellstrukturen führen.

6. Mutationen in Mitochondrien

Nanoplastikpartikel können die mitochondriale DNA schädigen, wodurch die normale mitochondriale Funktion gestört wird. Dies beeinträchtigt wichtige zelluläre Prozesse wie die Energieerzeugung, die Kontrolle von oxidativem Stress, den programmierten Zelltod und den Stoffwechsel. Störungen in diesen Systemen können Bedingungen schaffen, die zur Entwicklung von Erkrankungen führen.

7. Reaktive Eigenschaften der Oberfläche von Nanoplastik

Die hohe spezifische Oberfläche von Nanoplastik ist einer der Hauptfaktoren für seine hohe chemische Aktivität und seine Fähigkeit, die Bildung aktiver Sauerstoffformen zu induzieren. Im Vergleich zu Mikroplastik haben Nanopartikel eine Oberfläche mit einer Masseinheit, die zehn- oder sogar hundertmal größer ist, was ihre Wechselwirkung mit Biomolekülen und der Umwelt erheblich verstärkt.

Eine elektrostatische Ladung auf den Plastikpartikeln kann die Funktion von Neuronen stören, indem die Übertragung von Nervenimpulsen blockiert oder verzerrt wird. Dies führt zu Fehlfunktionen des Nervensystems und kann eine Vielzahl von pathologischen Zuständen im Organismus verursachen. Dies zeigt sich in verschiedenen neurologischen, vegetativen, kognitiven und psychischen Störungen (Tabelle 2).

Die Einwirkung von Nanoplastik auf Nervenzellen führt zu einer Vielzahl von Erkrankungen: Multiple Sklerose, amyotrophe Lateralsklerose, Alzheimer- und Parkinson-Krankheit, Autoimmunkrankheiten, Epilepsie, ischämischer und hämorrhagischer Schlaganfall, Depressionen, Angstzustände und kognitive Störungen, Schizophrenie, bipolare Störungen, Autismus und andere.

Kategorie	Manifestation	Ursache / Mechanismus
Motorische Störungen	Lähmung	Störung der Übertragung motorischer Nervenimpulse vom zentralen Nervensystem auf die Muskeln
	Krampfanfälle	Ungleichgewicht zwischen erregenden und hemmenden neuronalen Signalen
	Verlust von Empfindungen	Fehlfunktion in den sensorischen Nervenbahnen, die Informationen von den Rezeptoren zum Gehirn übertragen
	Beeinträchtigung der Koordination	Schädigung der zerebellären oder spinalen Leitungsbahnen
Sensorische Beeinträchtigungen	Sprach-, Seh- und Hörstörungen	Schädigung der Nervenbahnen, die mit den sensorischen und motorischen Zentren des Gehirns verbunden sind
Vegetative Störungen	Dysfunktion von Atmung, Herzfrequenz und Verdauung	Funktionsstörung des autonomen (vegetativen) Nervensystems
	Beeinträchtigung der Thermoregulation und Funktionsstörungen der inneren Organe	Funktionsstörungen in autonomen Regulationszentren
Kognitive Störungen	Gedächtnis- und Aufmerksamkeitsstörungen	Strukturelle oder funktionelle Veränderungen in der Großhirnrinde
	Bewusstseinsstörungen, Koma	Schädigung der Retikulärformation des Gehirns, die eine Schlüsselrolle bei der Regulierung von Wachsein und Bewusstseinszustand spielt

Tabelle 2. Spektrum der pathologischen Zustände, die durch die Einwirkung von Nanoplastik auf Neuronen verursacht werden.

Mikro- und Nanoplastik als Risikofaktor für Autismus-Spektrum-Störungen

Mit der zunehmenden Umweltverschmutzung durch Kunststoffe ist auch die Prävalenz von Autismus-Spektrum-Störungen (ASS) gestiegen (Abb. 96, 97).

The Rising Prevalence of Autism in the U.S. from 1970 to 2023

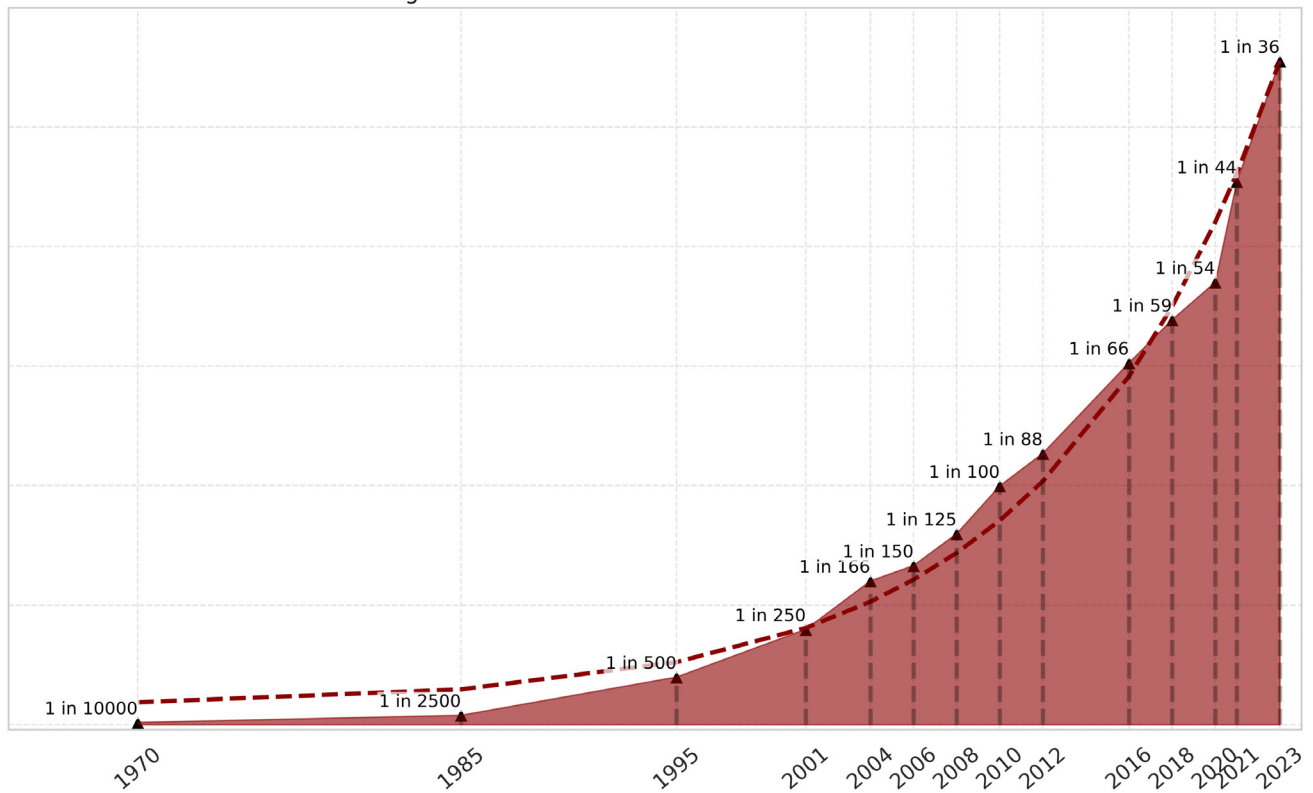


Abbildung 96. Anstieg der Autismus-Prävalenz in den Vereinigten Staaten im Zeitraum von 1970 bis 2023.

Quelle: Rogers, T. The political economy of autism. Substack. <https://tobyrogers.substack.com/p/the-political-economy-of-autism> (Abgerufen am 01.05.2025)

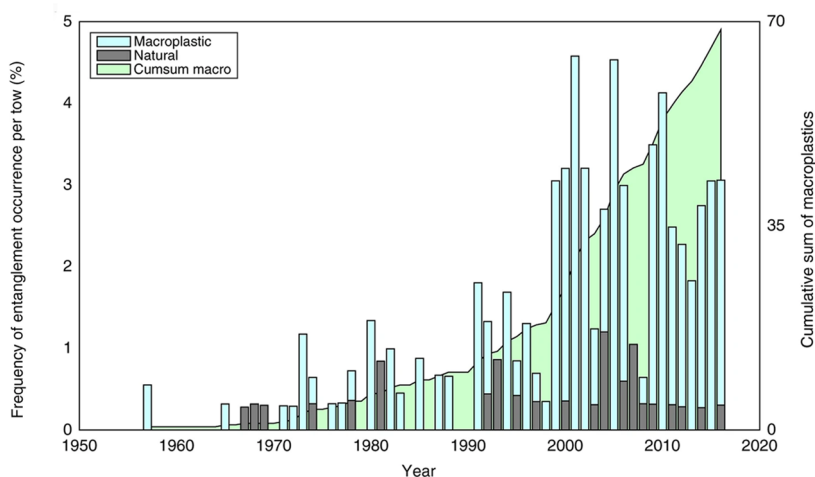


Abbildung 97. Zunahme der Plastikmenge im Ozean im Zeitraum von 1957 bis 2020.

Quelle: Ostle, C. et al. The rise in ocean plastics evidenced from a 60-year time series. Nat Commun 10, 1622 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41467-019-09506-1>

In den Vereinigten Staaten wurde bei einem von 36 Kindern eine ASS diagnostiziert (nach Schätzungen des CDC's Autism and Developmental Disorders Monitoring Network (ADDM)). Den Daten für das Jahr 2020 zufolge ist die Zahl der Autismusfälle seit 2000 um 317 % gestiegen^{250, 251}.

Das Nervensystem des Menschen entwickelt sich im Embryonalstadium und in den ersten Lebensjahren. Untersuchungen weisen auf einen möglichen Zusammenhang zwischen der Einwirkung von Mikro- und Nanoplastik und der Entwicklung von ASS hin. Experimentelle Daten koreanischer Wissenschaftler zeigen, dass die pränatale und postnatale Einwirkung von MNP zu neurologischen Entwicklungsstörungen beitragen kann²⁵².

Eine Studie über die molekularen Auswirkungen von Polystyrol-Nanoplastik auf menschliche neurale Stammzellen hat gezeigt, dass die Einwirkung von Nanoplastik zu Gewebeschäden und Erkrankungen im Zusammenhang mit neurologischer Entwicklung führen kann²⁵³.

Forschungen an Nagetieren²⁵⁴ bestätigten, dass die Belastung der Mutter mit Mikro- und Nanoplastik während der Schwangerschaft und Stillzeit die Neurogenese im Hippocampus der Nachkommen stören und zu einer Verringerung des Volumens von Gehirnstrukturen, einschließlich des motorischen Kortex, des Hippocampus, des Hypothalamus, der Medulla oblongata und des Bulbus olfactorius führen kann.

Es ist bekannt, dass Veränderungen in der Struktur und Funktion von Proteinen des Nervengewebes bei der Entstehung zahlreicher Erkrankungen, einschließlich Autismus²⁵⁵, eine besondere Rolle spielen.

Jüngste Forschungen haben gezeigt, dass Nanoplastik mit Proteinen hauptsächlich durch schwache Bindungen wie hydrophobe Wechselwirkungen, Wasserstoffbrücken, Van-der-Waals-Kräfte und elektrostatische Kräfte interagiert²⁵⁶. Dies führt zu strukturellen Verformungen der Proteinmoleküle und beeinträchtigt ihre Funktionalität. Angesichts der Rolle von Proteinen bei der Bildung neuronaler Netze und der synaptischen Übertragung können solche Veränderungen die Entwicklung von ASS beeinflussen.

Die Rolle von MNP in der Pathogenese von kardiovaskulären Erkrankungen

Plastikpartikel können nicht nur im Blutkreislauf zirkulieren, sondern sich auch an den Gefäßwänden ablagern und eine Kaskade pathologischer Veränderungen auslösen. Der Nachweis von Mikroplastik in atherosklerotischen Plaques ist besonders alarmierend²⁵⁷.

²⁵⁰Autism Parenting Magazine. Autism Statistics You Need To Know in 2024. (2025) <https://www.autismparentingmagazine.com/autism-statistics> (Abgerufen am 01.05.2025).

²⁵¹Centers for Disease Control and Prevention. Autism Prevalence Higher, According to Data from 11 ADDM Communities. <https://www.cdc.gov/media/releases/2023/p0323-autism.html> (Abgerufen am 01.05.2025).

²⁵²Zaheer, J. et al. Pre/post-natal exposure to microplastic as a potential risk factor for autism spectrum disorder. *Environment International* 161, 107121 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.envint.2022.107121>

²⁵³Martin-Folgar, R. et al. Molecular effects of polystyrene nanoplastics on human neural stem cells. *PLOS ONE* 19, e0295816 (2024). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0295816>

²⁵⁴Kim, N.-H., Choo, H.-I. & Lee, Y.-A. Effect of nanoplastic intake on the dopamine system during the development of male mice. *Neuroscience* 555, 11–22 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2024.07.018>

²⁵⁵Panisi, C. & Marini, M. Dynamic and Systemic Perspective in Autism Spectrum Disorders: A Change of Gaze in Research Opens to A New Landscape of Needs and Solutions. *Brain Sciences* 12, 250 (2022). <https://doi.org/10.3390/brainsci12020250>

²⁵⁶Windheim, J. et al. Micro- and Nanoplastics' Effects on Protein Folding and Amyloidosis. *International Journal of Molecular Sciences* 23, 10329 (2022). <https://doi.org/10.3390/ijms231810329>

Eine kürzlich durchgeführte Studie zeigte, dass Patienten mit Mikroplastikablagerungen in den Halsschlagadern ein 4,5-fach höheres Risiko für Herzinfarkt, Schlaganfall und Tod aufwiesen. Dies deutet darauf hin, dass Plastikfragmente aktiv an der Bildung und Destabilisierung von atherosklerotischen Plaques beteiligt sind und deren Ruptur sowie eine Thrombenbildung provozieren²⁵⁸. MNP stört auch die Integrität des Endothels, einer wichtigen Zellschicht, die die innere Oberfläche der Blutgefäße auskleidet und für die Regulierung des Gefäßtonus, die Verhinderung von Thrombosen und Entzündungsreaktionen verantwortlich ist. Die Schädigung des Endothels durch Plastikpartikel führt zu chronischen Entzündungen und einem erhöhten Thromboserisiko, was in den herz- und hirnversorgenden Arterien eine besondere Gefahr darstellt²⁵⁹. Mikroplastik interagiert mit Blutzellen wie Thrombozyten und Erythrozyten. Es fördert die Thrombozytenaggregation und löst so den Prozess der Thrombenbildung aus. Darüber hinaus kann die Mikroplastikoberfläche mechanische Zellschäden verursachen und Gerinnungskaskaden aktivieren, was langfristig zu chronischer Hyperkoagulabilität und mikrovaskulären Störungen führen kann.

Immunzellen sind in der Lage, Mikroplastikpartikel einzuhüllen, aber sie verfügen nicht über Mechanismen, um sie vollständig abzubauen, was zur Verformung und Vergrößerung der Zellen führt. Die Anhäufung dieser veränderten Zellen in den kleinen Gefäßen des Gehirns trägt zur Bildung von Mikrothromben bei, wodurch die Blutzufuhr zum Gehirn unterbrochen wird und das Risiko eines Schlaganfalls, auch im jungen Alter, steigt²⁶⁰. Die chronische Verringerung der Sauerstoffversorgung des Gehirns (Hypoxie) führt zum Absterben von Neuronen und zur Entwicklung neurodegenerativer Veränderungen, einschließlich der Atrophie des Gehirngewebes²⁶¹. Bei längerer Einwirkung können diese Prozesse zu einer Verringerung des Volumens einzelner Gehirnstrukturen führen.

Aufgrund seiner elektrostatischen Ladung interagiert MNP aktiv mit Zellmembranen und stört deren elektrisches Potenzial. Dies wiederum wirkt sich auf die Gefäßkontraktilität, Übertragung von Signalen in Myozyten und den Herzrhythmus aus. Die Sterblichkeit aufgrund von kardiovaskulären Erkrankungen nimmt weltweit stetig zu (Abb. 98). Besondere Aufmerksamkeit sollte man dem plötzlichen Herztod bei jungen Menschen zwischen 25 und 44 Jahren widmen²⁶² (Abb. 99). Das ist einer der führenden Todesursachen in den USA. In den letzten zwei Jahrzehnten ist die Anzahl der Fälle dramatisch angestiegen. In Anbetracht der Verbreitung von MNP kann seine mögliche Rolle bei diesen tragischen Ereignissen nicht ausgeschlossen werden.

²⁵⁷Liu, S. et al. Microplastics in three types of human arteries detected by pyrolysis-gas chromatography/mass spectrometry (Py-GC/MS). *Journal of Hazardous Materials* 469, 133855 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.133855>

²⁵⁸Marfella, R. et al. Microplastics and Nanoplastics in Atheromas and Cardiovascular Events. *N Engl J Med* 390, 900–910 (2024). <https://doi.org/10.1056/NEJMoa2309822>

²⁵⁹Rajendran, D. & Chandrasekaran, N. Journey of micronanoplastics with blood components. *RSC Adv.* 13, 31435–31459 (2023). <https://doi.org/10.1039/D3RA05620A>

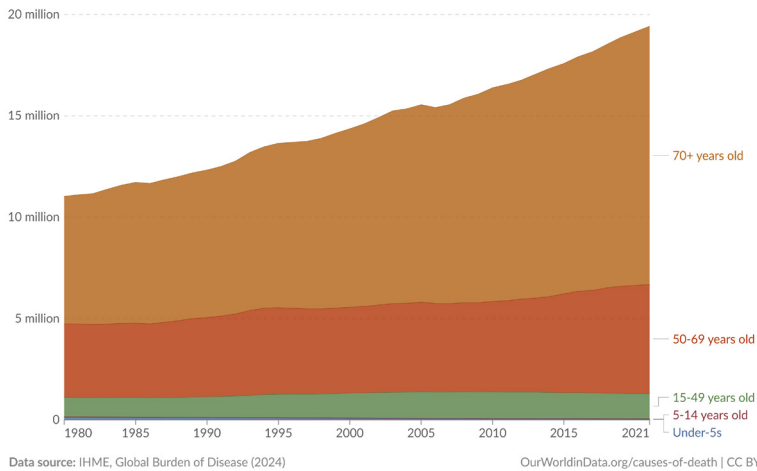
²⁶⁰Huang, H. et al. Microplastics in the bloodstream can induce cerebral thrombosis by causing cell obstruction and lead to neurobehavioral abnormalities. *Sci. Adv.* 11, eadr8243 (2025). <https://doi.org/10.1126/sciadv.adr8243>

²⁶¹Kaushik, A., Singh, A., Kumar Gupta, V. & Mishra, Y. K. Nano/micro-plastic, an invisible threat getting into the brain. *Chemosphere* 361, 142380 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.142380>

²⁶²Zuin, M. et al. Trends in Sudden Cardiac Death Among Adults Aged 25 to 44 Years in the United States: An Analysis of 2 Large US Databases. *JAHA* 14, e035722 (2025). <https://doi.org/10.1161/JAHA.124.035722>

Number of deaths from cardiovascular diseases by age, World

Estimated annual number of deaths from cardiovascular diseases¹ in each age group. Estimates come with wide uncertainties especially for countries with poor vital registration².



- Cardiovascular disease:** Cardiovascular diseases cover all diseases of the heart and blood vessels – including heart attacks and strokes, atherosclerosis, ischemic heart disease, hypertensive diseases, cardiomyopathy, rheumatic heart disease, and more. They tend to develop gradually with age, especially when people have risk factors like high blood pressure, smoking, alcohol use, poor diet, and air pollution.
- Civil Registration and Vital Statistics system:** A Civil Registration and Vital Statistics system (CRVS) is an administrative system in a country that manages information on births, marriages, deaths and divorces. It generates and stores 'vital records' and legal documents such as birth certificates and death certificates. You can read more about how deaths are registered around the world in our article: [How are causes of death registered around the world?](#)

Abbildung 98. Anzahl der Todesfälle durch kardiovaskuläre Erkrankungen nach Alter, weltweit.

Quelle: Our World in Data
<https://ourworldindata.org/grapher/cardiovascular-disease-deaths-by-age>

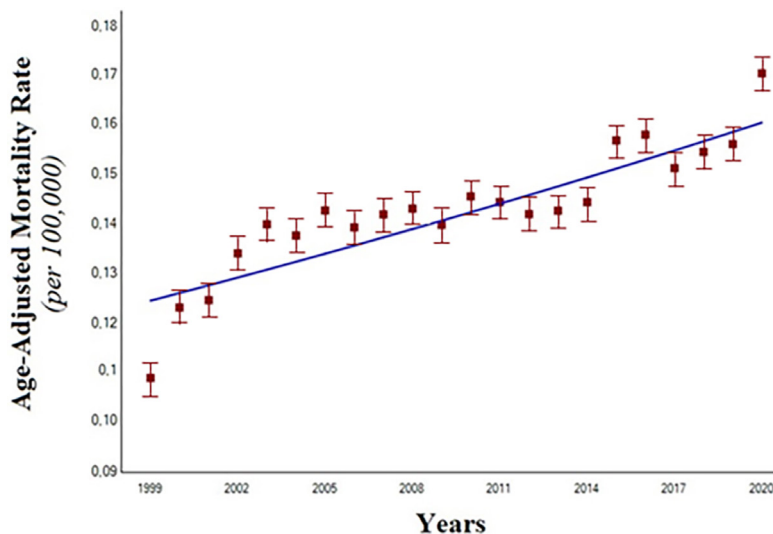


Abbildung 99. Entwicklung der altersspezifischen Mortalitätsrate aufgrund des plötzlichen Herztodes mit entsprechenden 95-prozentigen Konfidenzintervallen bei jungen Erwachsenen in den Vereinigten Staaten im Alter von 25 bis 44 Jahren, im Zeitraum von 1999 bis 2020.

Quelle: Zuin, M. et al. Trends in Sudden Cardiac Death Among Adults Aged 25 to 44 Years in the United States: An Analysis of 2 Large US Databases. *JAHA* 14, e035722 (2025). <https://doi.org/10.1161/JAHA.124.035722>

Ein weiteres großes Problem ist die Zunahme des plötzlichen Kindstodes (SIDS). Allein in den USA stieg die Rate dieses Syndroms zwischen 2019 und 2020 um 15 % und rückte damit vom vierten auf den dritten Platz der Ursachen von Todesfällen bei Kindern im ersten Lebensjahr²⁶³. Obwohl die Ursachen für SIDS noch nicht vollständig geklärt sind, vermuten viele Wissenschaftler, dass Faktoren, die die Regulierung des Herzrhythmus und des Gefäßtonus bei Säuglingen stören, eine wichtige Rolle spielen könnten. Ein wahrscheinlicher Risikofaktor ist Nanoplastik, das die Plazenta durchdringen und sich in den Geweben des sich entwickelnden Organismus anreichern kann. Immer mehr Wissenschaftler sind sich einig, dass Nanoplastik einer der Hauptkandidaten für die Rolle des "unsichtbaren Killers" ist.

²⁶³Shapiro-Mendoza, C. K. et al. Sudden Unexpected Infant Deaths: 2015–2020. *Pediatrics* 151, e2022058820 (2023). <https://doi.org/10.1542/peds.2022-058820>

Das Herz als eines der Organe mit dem höchsten Energieverbrauch hängt entscheidend von der effizienten Funktion der Mitochondrien ab, die es mit Energie versorgen. Die Einwirkung von Mikroplastikpartikeln stört die mitochondrialen Prozesse, was zu einem Energiedefizit im Myokard und folglich zu einer Beeinträchtigung der Herzfunktion führen kann.

Gastrointestinale Störungen aufgrund von MNP-Belastung

Der Darm ist das größte Immunorgan des Menschen. Er enthält etwa 70 % aller Immunzellen, etwa 500 Millionen Neuronen und mehr als 100 Billionen Mikroorganismen²⁶⁴. Die intestinale Mikrobiota spielt eine Schlüsselrolle bei der Aufrechterhaltung des Immunsystems. Ein Ungleichgewicht in der Mikrobiota kann die Immunität schwächen und zum Auftreten einer Vielzahl von Erkrankungen beitragen.

Wegen seines dichten neuronalen Netztes und seiner Fähigkeit, mit dem zentralen Nervensystem zu interagieren, wird der Darm oft als "zweites Gehirn" bezeichnet²⁶⁵. Der Austausch komplexer biochemischer Signale zwischen dem Gehirn und dem Darm wird als „Darm-Hirn-Achse“ bezeichnet und spielt eine wichtige Rolle bei der Regulierung sowohl des körperlichen als auch des psycho-emotionalen Zustands (Abb. 100).

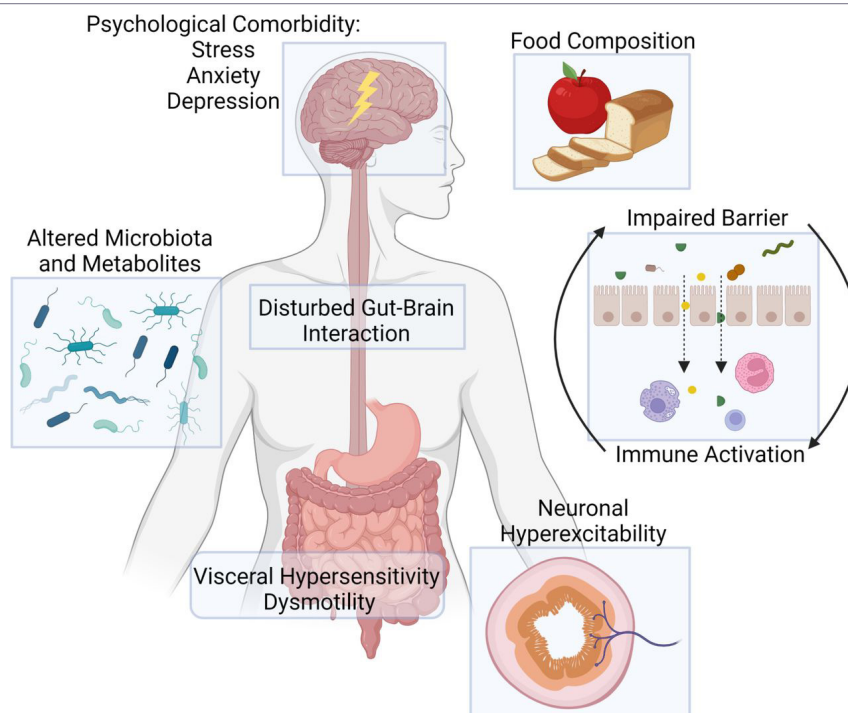


Abbildung 100: Pathophysiologische Mechanismen bei Störungen der Interaktion zwischen Darm und Gehirn.

Quelle: Vanuytsel, T., Bercik, P. & Boeckxstaens, G. Understanding neuroimmune interactions in disorders of gut–brain interaction: from functional to immune-mediated disorders. *Gut* 72, 787–798 (2023).

<https://doi.org/10.1136/gutjnl-2020-320633>

²⁶⁴Sofield, C. E., Anderton, R. S. & Gorecki, A. M. Mind over Microplastics: Exploring Microplastic-Induced Gut Disruption and Gut-Brain-Axis Consequences. *Current Issues in Molecular Biology* 46, 4186–4202 (2024). <https://doi.org/10.3390/cimb46050256>

²⁶⁵Jiefang Daily. Intestine is the second brain? It can also communicate with multiple organs in both directions | New People - Health News. (2025) <https://www.jfdaily.com/staticsg/res/html/web/newsDetail.html?id=866347> (Abgerufen am 01.05.2025).

Eine gesunde Darmbarriere verhindert das Eindringen von Keimen und Fremdpartikel aus dem Darmlumen in den Blutkreislauf²⁶⁵. Mikro- und Nanoplastik stört diesen Schutz, indem es die Permeabilität der Darmwand erhöht. Infolgedessen kommt es sowohl im Darm als auch in anderen Organen zu Entzündungen, was zur Abschwächung der Immunität führt²⁶⁶. Gleichzeitig beeinflusst MNP die Zusammensetzung der Darmmikrobiota und verursacht ein Ungleichgewicht zwischen nützlichen und pathogenen Mikroorganismen. Dies stört die Verdauungsprozesse, verringert die Fähigkeit des Organismus, Nahrungsmittelallergene abzubauen, und erhöht das Risiko der Entwicklung von Nahrungsmittelallergien²⁶⁷.

Dies führt zu einem Teufelskreis: Plastik stört die Mikrobiota, erhöht die Entzündung und die Permeabilität der Darmwände, Toxine, Bakterien und Plastik selbst gelangen dadurch ins Blut. Deren Eindringen ins Blut löst Immunreaktionen aus, die zu chronischen Entzündungen im gesamten Organismus führen. Aus dem Blut gelangen Giftstoffe, Bakterien und Nanoplastik über die Blut-Hirn-Schranke ins Gehirn und lösen dort Entzündungsreaktionen aus. Diese Prozesse stören wiederum die Regulierung der Immunreaktion, verstärken die Stressreaktion des Organismus und können sich über neuroendokrine Mechanismen negativ auf die Mikrobiota auswirken, wodurch sich der Teufelskreis der Darm-Hirn-Achse schließt.

Eine Störung der Interaktion zwischen dem Darmmikrobiom und dem zentralen Nervensystem steht in direktem Zusammenhang mit neurologischen Störungen. So wurde bei Kindern mit Autismus-Spektrum-Störungen ein ausgeprägtes Ungleichgewicht der Mikrobiota festgestellt, was sowohl durch mikrobiologische Analysen als auch durch die Bewertung der Funktionen des Verdauungssystems bestätigt wird²⁶⁸.

Untersuchungen von Patienten mit entzündlichen Darmerkrankungen zeigen eine positive Korrelation zwischen dem Schweregrad der Erkrankung und der Konzentration von Mikroplastik im Stuhl. Patienten mit entzündlichen Darmerkrankungen weisen höhere Mikroplastikwerte (41,8 Partikel/g) als gesunde Menschen (28,0 Partikel/g) auf. Außerdem wurde bei diesen Patienten eine signifikante Anhäufung von Mikroplastik in ulzerierenden Läsionen der Enddarmschleimhaut festgestellt²⁶⁹.

Darüber hinaus behält Mikroplastik, das im Darm verbleibt, seine schädliche Wirkung noch lange nach dem ersten Eindringen in den Körper.

²⁶⁴Sofield, C. E., Anderton, R. S. & Gorecki, A. M. Mind over Microplastics: Exploring Microplastic-Induced Gut Disruption and Gut-Brain-Axis Consequences. *Current Issues in Molecular Biology* 46, 4186–4202 (2024). <https://doi.org/10.3390/cimb46050256>

²⁶⁶Winiarska, E., Jutel, M. & Zemelka-Wiacek, M. The potential impact of nano- and microplastics on human health: Understanding human health risks. *Environmental Research* 251, 118535 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.118535>

²⁶⁷ScienceDirect. Food allergy. ScienceDirect Topics. <https://www.sciencedirect.com/topics/pharmacology-toxicology-and-pharmaceutical-science/food-allergy> (Abgerufen am 01.05.2025).

²⁶⁸Su, Q., Wong, O.W.H., Lu, W. et al. Multikingdom and functional gut microbiota markers for autism spectrum disorder. *Nat Microbiol* 9, 2344–2355 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41564-024-01739-1>

²⁶⁹ScienceDirect. Inflammatory bowel disease. ScienceDirect Topics. <https://www.sciencedirect.com/topics/pharmacology-toxicology-and-pharmaceutical-science/inflammatory-bowel-disease> (Abgerufen am 01.05.2025).

Auswirkungen von MNP auf das Immunsystem

MNP stört die Immunantwort des Körpers und schafft so die Voraussetzungen für die Vermehrung von Pathogenen. Geladene MNP-Partikel ziehen andere Moleküle wie Toxine, Schwermetallsalze, Bakterien und Viren leichter an (Abb. 101). Dies macht die MNP-Partikel zu einer Art "Transportplattform" für toxische Verbindungen und erhöht deren biologische Aktivität und Toxizität. Die elektrostatische Ladung von Nanoplastik ist eine Art Energetisierung oder "Batterie", dank derer Bakterien und Viren länger lebensfähig bleiben.

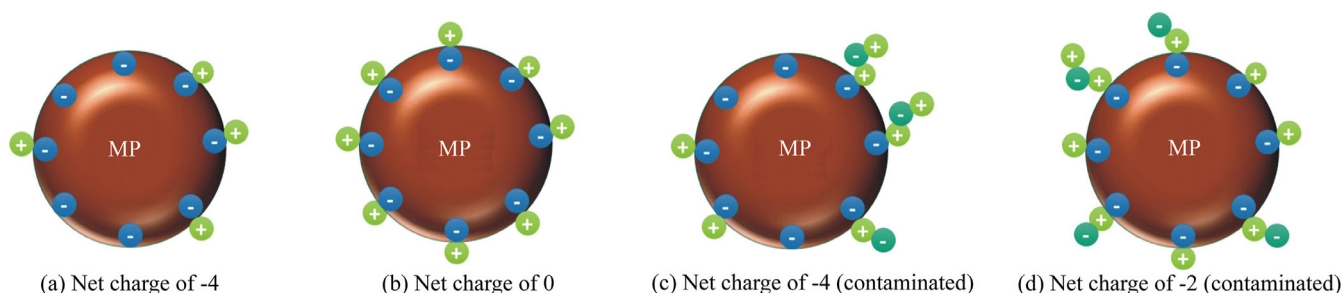


Abbildung 101. Veranschaulichung der Auswirkungen der Oberflächenladungen von Mikroplastik, die durch Wasserkontamination verursacht werden.

Quelle: Rahman, A. M. N. A. A. et al. A review of microplastic surface interactions in water and potential capturing methods. *Water Science and Engineering* 17, 361–370 (2024).

<https://doi.org/10.1016/j.wse.2023.11.008>

Darüber hinaus können die geladenen Mikro- und Nanoplastikpartikel länger in Wasser und Luft verbleiben, leichter in Aerosole aufsteigen und in die Atemwege gelangen, was das Risiko ihres Eindringens in den Organismus des Menschen erhöht. Die kombinierten Auswirkungen von MNP auf das Mikrobiom, Pathogene und das Immunsystem stellen komplexe Risiken für die Gesundheit dar. Immunzellen, die mit Mikroplastik in Berührung kommen, sterben etwa dreimal schneller ab als solche, die keinen Kontakt mit Mikroplastik hatten²⁷⁰.

Mikroplastikpartikel sind in der Lage, Viren durch elektrostatische und hydrophobe Wechselwirkungen an ihrer Oberfläche zu adsorbieren und so deren Lebensfähigkeit zu verlängern²⁷¹.

²⁷⁰Plastics News. Study highlights health hazards of microplastics. (2019) <https://www.plasticsnews.com/news/study-highlights-health-hazards-microplastics> (Abgerufen am 01.05.2025).

²⁷¹Moresco, V. et al. Binding, recovery, and infectiousness of enveloped and non-enveloped viruses associated with plastic pollution in surface water. *Environmental Pollution* 308, 119594 (2022).

Auf der Oberfläche von Mikroplastik befindliche Viren können bis zu drei Tage lang aktiv bleiben, das ist ausreichend, um z. B. von Kläranlagen zu Stränden zu gelangen²⁷². Mikroplastik erleichtert die Ausbreitung von Krankheitserregern und kann deren genetische Rekombination erleichtern. Untersuchungen zufolge beeinträchtigen Plastikpartikel nicht nur die Wirkung von Medikamenten, sondern können auch die Entwicklung von antibiotikaresistenten Keimen fördern²⁷³.

Geladene MNP-Partikel dienen als Plattform für die mikrobielle Besiedelung²⁷⁴. Bakterien und Pilze, die die elektrostatischen Felder von Nanoplastik nutzen, zeigen ein beschleunigtes Wachstum. Forschungen an Daphnien haben ergeben, dass die Einwirkung von Nanoplastik oxidativen Stress auslöst und Pilzinfektionen um das 11-fache erhöht (insbesondere Metschnikowia-Arten)²⁷⁵. Dies korreliert mit der globalen Ausbreitung und dem resistenten Verlauf von Mykosen, die von der WHO als wachsende Bedrohung der öffentlichen Gesundheit bezeichnet werden.



"Pilzinfektionen, die aus dem Schatten der bakteriellen Antibiotikaresistenzpandemie hervortreten, nehmen zu und werden immer resistenter gegen Behandlungen, was weltweit zu einem Problem für die öffentliche Gesundheit wird", sagte Dr. Hanan Balkhi, stellvertretende WHO-Generaldirektorin in Fragen der Antibiotikaresistenz²⁷⁶.

Pilzmetaboliten, die in Gegenwart von MNP freigesetzt werden, werden mit Tumorwachstum²⁷⁷ und chronischen Entzündungen assoziiert. Pilz-DNA wurde in einigen Krebsarten nachgewiesen, was auf eine mögliche Rolle von MNP bei der Karzinogenese hindeutet²⁷⁸.

²⁷²University of Stirling. Hitch-hiking viruses can survive on microplastics in freshwater, new study finds. (2022) <https://www.stir.ac.uk/news/2022/june-2022-news/hitch-hiking-viruses-can-survive-on-microplastics-in-freshwater-new-study-finds> (Abgerufen am 01.05.2025).

²⁷³Dick, L. et al. The adsorption of drugs on nanoplastics has severe biological impact. Sci Rep 14, 25853 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-75785-4>

²⁷⁴Rahman, A. M. N. A. A. et al. A review of microplastic surface interactions in water and potential capturing methods. Water Science and Engineering 17, 361–370 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.wse.2023.11.008>

²⁷⁵Manzi, F., Schlösser, P., Owczarz, A. & Wolinska, J. Polystyrene nanoplastics differentially influence the outcome of infection by two microparasites of the host Daphnia magna. Phil. Trans. R. Soc. B 378, 20220013 (2023). <https://doi.org/10.1098/rstb.2022.0013>

²⁷⁶World Health Organization. WHO releases first-ever list of health-threatening fungi. (2022) <https://www.who.int/news/item/25-10-2022-who-releases-first-ever-list-of-health-threatening-fungi> (Abgerufen am 01.05.2025).

²⁷⁷Aykut, B., Pushalkar, S., Chen, R. et al. The fungal mycobiome promotes pancreatic oncogenesis via activation of MBL. Nature 574, 264–267 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1608-2>

²⁷⁸Dohlman, A. B. et al. A pan-cancer mycobiome analysis reveals fungal involvement in gastrointestinal and lung tumors. Cell 185, 3807–3822.e12 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.cell.2022.09.015>

Kanzerogene Eigenschaften von MNP. Mutationsmechanismen und Metastasenentwicklung

Nach den oben dargestellten Informationen ist Mikro- und Nanoplastik aufgrund seiner negativen Auswirkungen auf zellulärer und systemischer Ebene ein signifikanter Faktor bei der Entwicklung von Malignomen.

Untersuchungen zeigen, dass Mikro- und Nanoplastik eine Rolle als versteckter Katalysator für die Krebsentwicklung spielen kann, indem es die Zellmigration und die Metastasierung fördert²⁷⁹. Es wurde auch festgestellt, dass MNP-Partikel lange Zeit in den Zellen verbleiben und während der Zellteilung auf Tochterzellen übertragen werden können.

Die Sterblichkeit durch Krebserkrankungen nimmt derzeit weltweit weiter zu (Abb. 102). Prognosen zufolge wird die Zahl der neuen Krebsfälle bis zum Jahr 2050 um 77 % steigen²⁸⁰.

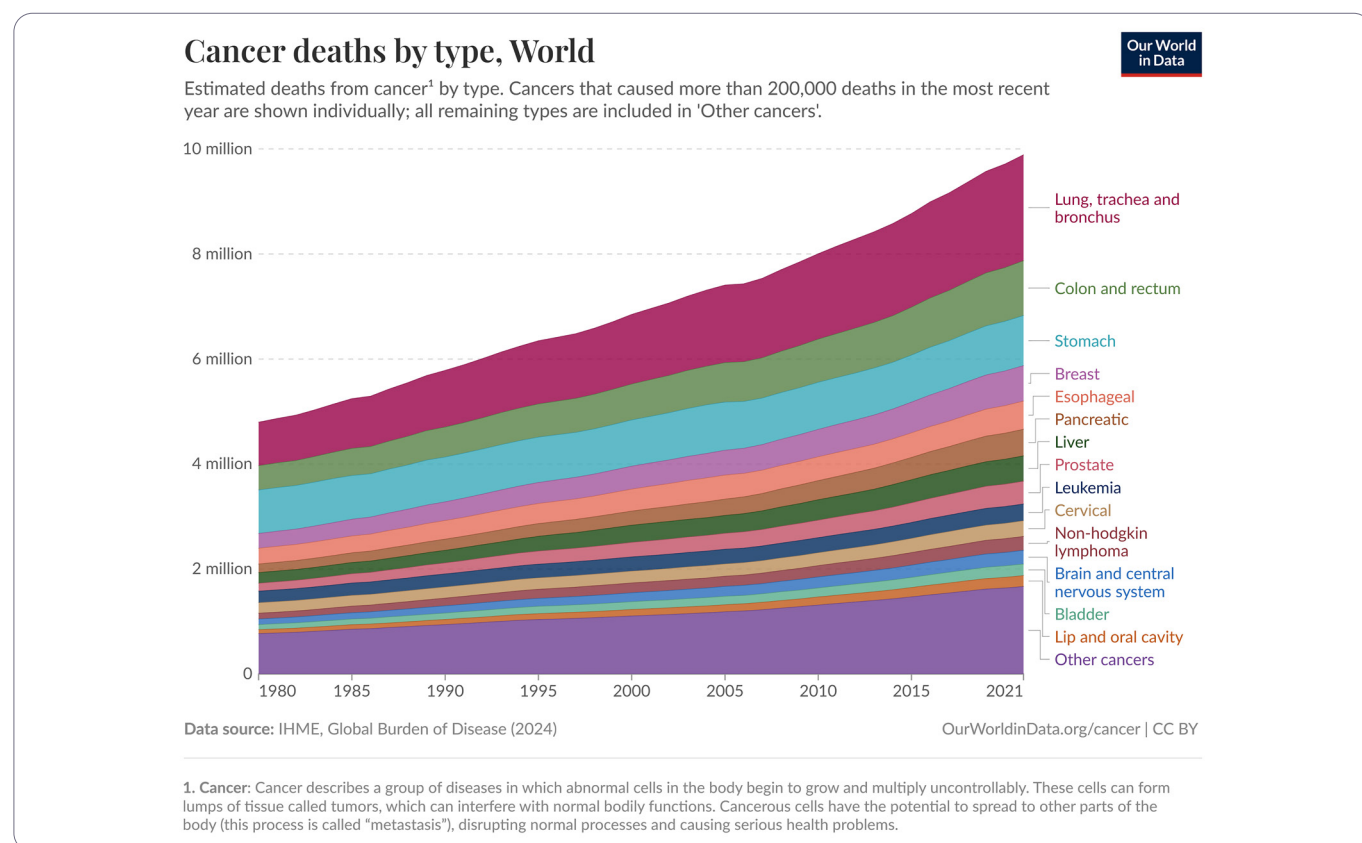


Abbildung 102. Krebstodesfälle nach Art, weltweit.

Quelle: Our World in Data – <https://ourworldindata.org/grapher/cancer-deaths-by-type-grouped>

²⁷⁹Brynzak-Schreiber, E. et al. Microplastics role in cell migration and distribution during cancer cell division. *Chemosphere* 353, 141463 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.141463>

²⁸⁰World Health Organization. Global cancer burden growing, amidst mounting need for services. (2024) <https://www.who.int/news/item/01-02-2024-global-cancer-burden-growing-amidst-mounting-need-for-services> (Abgerufen am 01.05.2025).

Auswirkungen von MNP auf den Kalziumstoffwechsel und die Knochenstruktur

Plastikpartikel können sogar in den Bewegungsapparat eindringen (Abb. 103). Dort, wo ein präzises Gleichgewicht zwischen Zerstörung und Aufbau besteht, wo Knochen täglich erneuert werden, Gelenke Reibung dämpfen und Muskeln Bewegung und Wärme aufrechterhalten, kann Mikroplastik – auch aufgrund seiner elektrostatischen Ladung – Baumoleküle ersetzen und langsame, zerstörerische Prozesse auslösen.

Untersuchungen zeigen, dass Mikroplastik in der Lage ist, in das Knochengewebe einzudringen, wo es aufgrund seiner Molekularstruktur Kalzium und andere für den Knochenstoffwechsel notwendige Mineralien nachahmen kann. Infolgedessen kann Plastik vom Körper fälschlicherweise für ein Knochenaufbaumaterial gehalten werden. Der Körper beginnt buchstäblich, Knochen aus Plastik zu "bauen".

Diese Störung der molekularen Erkennung ist mit einer Reihe negativer Folgen verbunden: Mikroplastik kann die Funktion von Osteoblasten und Osteoklasten beeinträchtigen, den Kalzium- und Phosphorstoffwechsel stören und so zur Entstehung von Osteoporose beitragen. Es werden Entzündungskaskaden ausgelöst, die Genexpression wird beeinträchtigt, und das Knochengewebe verliert an Dichte und Festigkeit. Darüber hinaus kann das Vorhandensein von Nanoplastik chronische Entzündungen verursachen, die Gelenkknorpel und Knochengewebe schädigen, was mit einem erhöhten Risiko für Osteoarthritis, chronischen Schmerzen und Bewegungseinschränkungen einhergeht^{281, 282}.

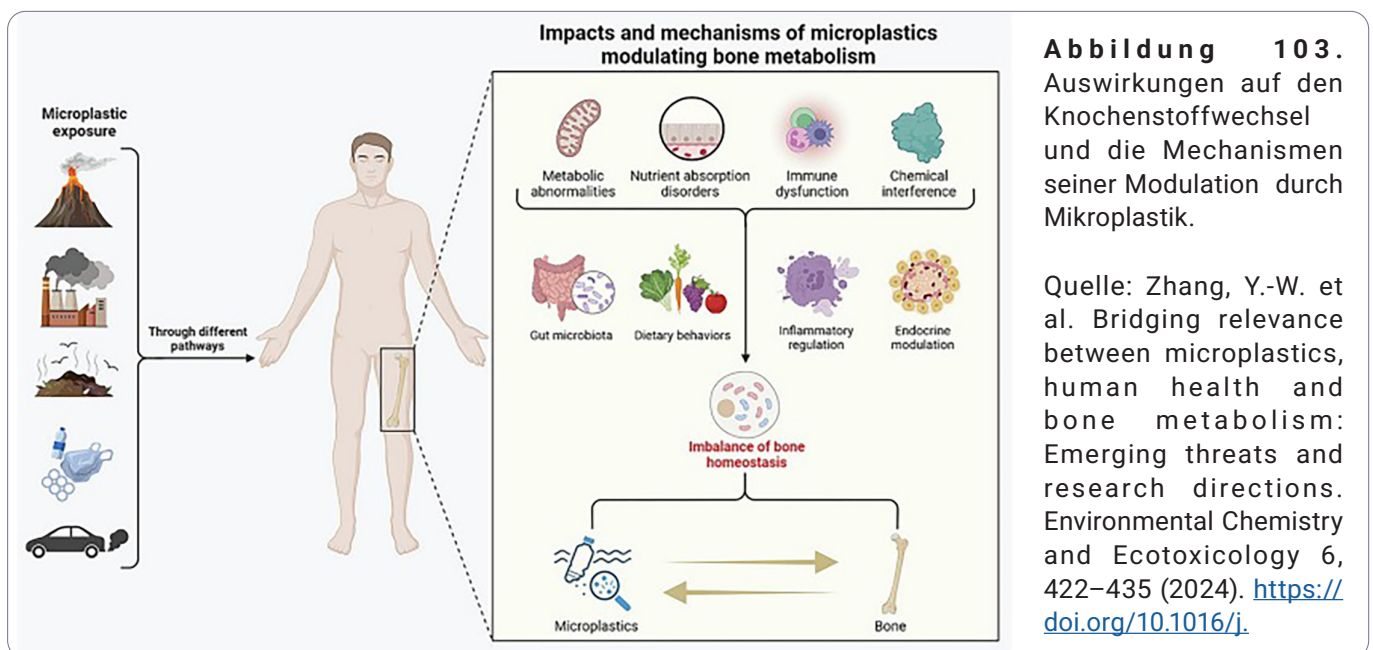


Abbildung 103. Auswirkungen auf den Knochenstoffwechsel und die Mechanismen seiner Modulation durch Mikroplastik.

Quelle: Zhang, Y.-W. et al. Bridging relevance between microplastics, human health and bone metabolism: Emerging threats and research directions. *Environmental Chemistry and Ecotoxicology* 6, 422–435 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.enceco.2024.08.006>

²⁸¹Zhang, Y.-W. et al. Bridging relevance between microplastics, human health and bone metabolism: Emerging threats and research directions. *Environmental Chemistry and Ecotoxicology* 6, 422–435 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.enceco.2024.08.006>

²⁸²China Environment News. Microplastics "secretly attack" the human body, how much damage can they cause? (2025) <https://cenews.com.cn/news.html?aid=1205048> (Abgerufen am 01.05.2025).

In einer Studie an Nagetieren wurde nachgewiesen, dass die Zahl der Osteoblasten bei Mäusen, die Polystyrol-Mikroplastik mit der Nahrung erhalten haben, deutlich reduziert war²⁸².

Eine nicht geringere Gefahr stellt Plastik auch für die Skelettmuskulatur dar. Studien zeigen, dass Nanoplastik in der Lage ist, in Muskelzellen einzudringen und die Arbeit der Mitochondrien zu stören. Dies führt zu Energiemangel und zur Aktivierung aggressiver Formen reaktiver Sauerstoffspezies, was die Zellalterung beschleunigt, die Erholung der Muskeln nach Belastung beeinträchtigt und zu Muskelatrophie beiträgt. Besonders gefährdet sind ältere Menschen und Patienten mit chronischen Erkrankungen.

Mikro- und Nanoplastik reichert sich im Knochenmark an²⁸³ und stört die Bildung von Stammzellen (hämatopoetischen und mesenchymalen)²⁸⁴, aus denen sich Erythrozyten, Leukozyten, Thrombozyten, Osteozyten, Chondrozyten und Adipozyten bilden. Ihre Funktionsstörung verursacht systemische Schäden im Körper.

Reproduktionsstörungen im Zusammenhang mit MNP-Belastung: Infertilität und erektile Dysfunktion

Verminderung der Fertilität

Prognosen zufolge könnte die Weltbevölkerung völlig unfruchtbar werden²⁸⁵. Noch 2018 forderte eine Gruppe führender Ärzte und Wissenschaftler auf dem XIII. Internationalen Symposium für Spermatologie in Stockholm die Regierungen auf, die abnehmende männliche Fertilität als ernstes gesellschaftliches Problem des Gesundheitswesens und die Bedeutung der männlichen reproduktiven Gesundheit für das Überleben der menschlichen Spezies anzuerkennen²⁸⁶.

Entgegen der gängigen Meinung wird die reproduktive Gesundheit nicht nur durch das hormonelle Gleichgewicht, die Vererbung und den Lebensstil bestimmt. Immer mehr wissenschaftliche Untersuchungen weisen auf die entscheidende Rolle der Mitochondrien in den Prozessen der Empfängnis und der Embryonalentwicklung hin. Diese kleinen Organellen, die für die Erzeugung der für alle Lebensprozesse erforderlichen Energie verantwortlich sind, spielen eine entscheidende Rolle für die Fertilität sowohl von Männern als auch von Frauen, und ihre Bedeutung für die reproduktive Funktion des Menschen geht noch viel weiter.

Störungen der Mitochondrien können sowohl bei Frauen als auch bei Männern eine Ursache für Unfruchtbarkeit sein. Bei Männern sind die Mitochondrien, die sich im Mittelstück der Spermazellen befinden, dafür verantwortlich, dass die für die Befruchtung erforderliche Beweglichkeit gegeben ist.

²⁸²World Health Organization. Global cancer burden growing, amidst mounting need for services. (2024)

<https://www.who.int/news/item/01-02-2024-global-cancer-burden-growing-amidst-mounting-need-for-services> (Abgerufen am 01.05.2025).

²⁸³Guo, X. et al. Discovery and analysis of microplastics in human bone marrow. Journal of Hazardous Materials 477, 135266 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.135266>

²⁸⁴Sun, R. et al. Preliminary study on impacts of polystyrene microplastics on the hematological system and gene expression in bone marrow cells of mice. Ecotoxicology and Environmental Safety 218, 112296 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112296>

²⁸⁵The Guardian. Shanna Swan: 'Most couples may have to use assisted reproduction by 2045'. (2021) <https://www.theguardian.com/society/2021/mar/28/shanna-swann-fertility-reproduction-count-down> (Accessed May 1, 2025).

²⁸⁶Levine, H. et al. Male reproductive health statement (XIIIth international symposium on Spermatology, may 9th–12th 2018, Stockholm, Sweden. Basic Clin. Androl. 28, 13 (2018). <https://doi.org/10.1186/s12610-018-0077-z>

Die Fehlfunktion der Mitochondrien verringert die Beweglichkeit der Spermien und kann zu Anomalien führen. In Untersuchungen chinesischer Wissenschaftler wurde in allen Spermaproben Mikroplastik festgestellt – im Durchschnitt zwei Partikel mit einer Größe von bis zu 7 µm, am häufigsten Polystyrol²⁸⁷. Das Vorhandensein von Mikroplastik wird mit morphologischen Anomalien der Spermien und einer Verkürzung der Telomere in Verbindung gebracht. Aufgrund seiner mikroskopischen Größe und seiner Ladung ist Nanoplastik in der Lage, die Blut-Hoden-Schranke zu überwinden und in die Geschlechtsorgane einzudringen und deren Funktionen zu beeinträchtigen.

Besonders besorgniserregend ist die beobachtete Tendenz eines Rückgangs der Gesamtspermienzahl bei Männern um 62,3 % im Zeitraum von 1973 bis 2018²⁸⁸ (Abb. 104).

Sperm count is declining at an accelerated pace globally

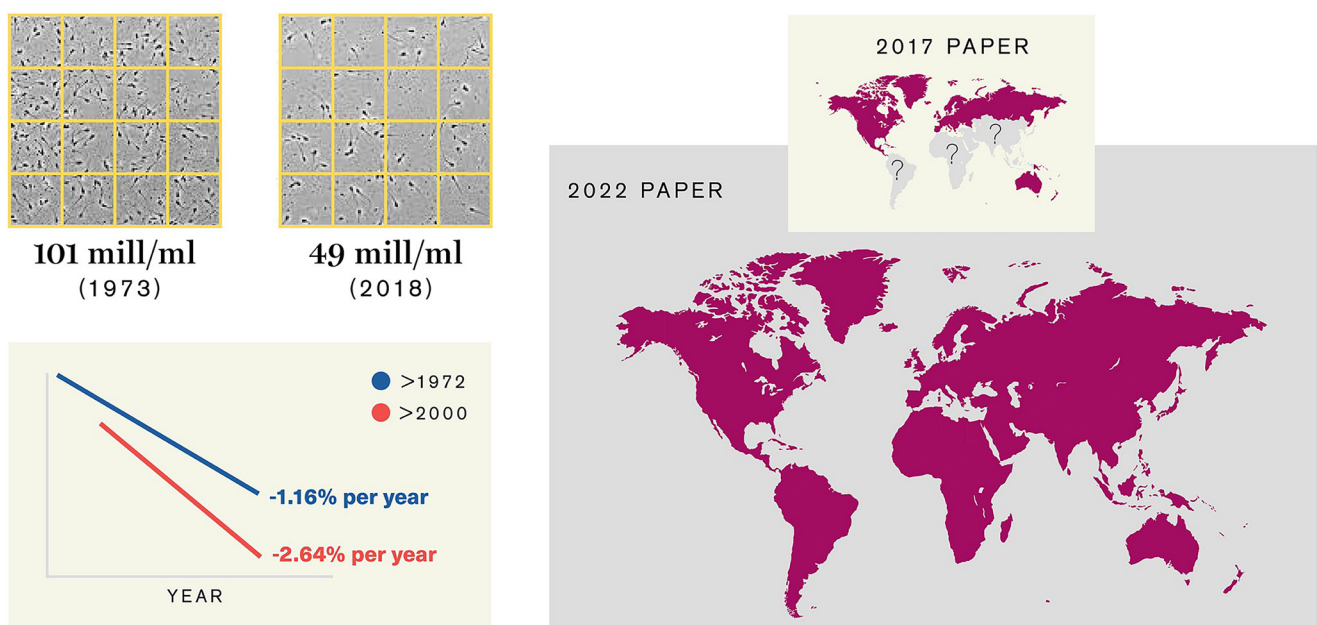


Abbildung 104. Grafische Darstellung – die Zahl der Spermien nimmt weltweit in beschleunigtem Tempo ab.

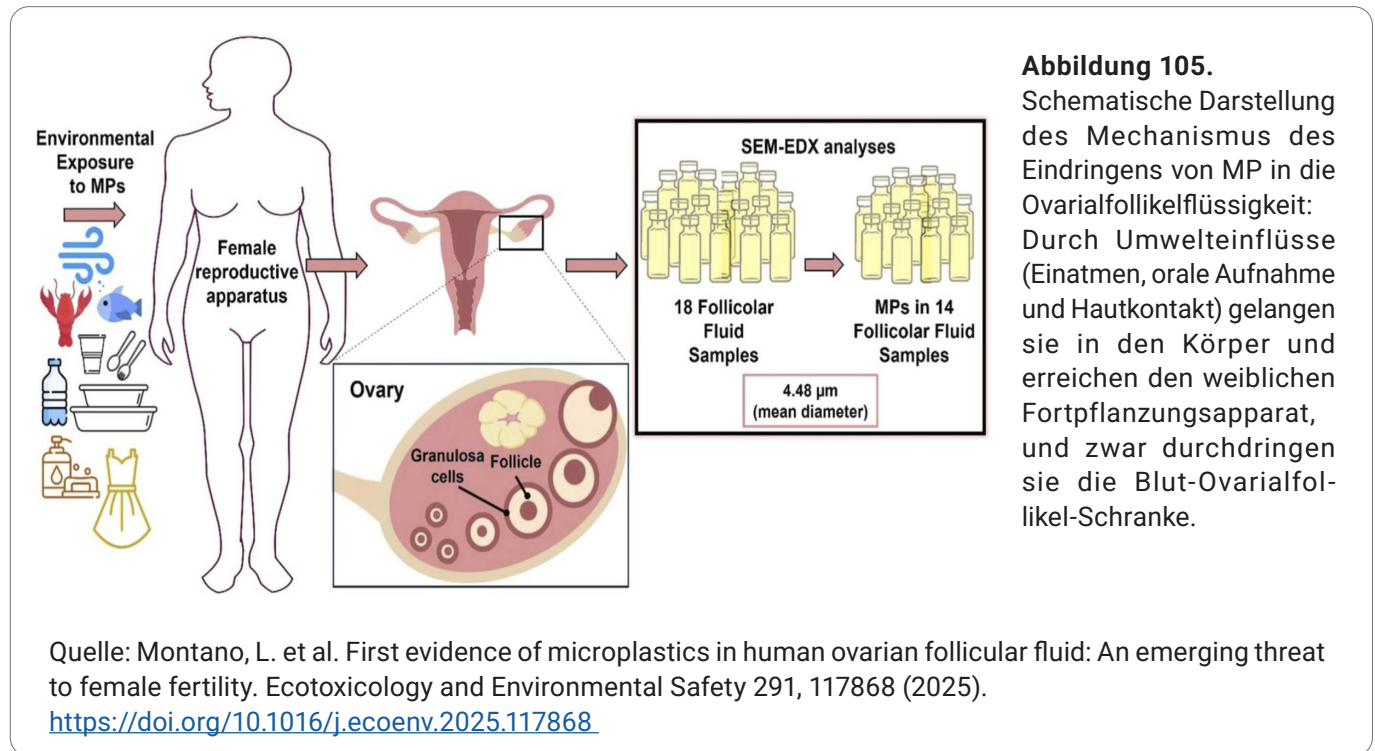
Quelle: Levine, H. et al. Temporal trends in sperm count: a systematic review and meta-regression analysis of samples collected globally in the 20th and 21st centuries. *Human Reproduction Update* 29, 157–176 (2023). <https://doi.org/10.1093/humupd/dmac035>

Die Fertilität wird von vielen Faktoren beeinflusst, aber es besteht zunehmend Einigkeit darüber, dass chemische Verbindungen in Kunststoffen eine Schlüsselrolle in diesem Prozess spielen. Phthalate, die zur Weichmachung von Kunststoffen verwendet werden, stören den Hormonhaushalt, verringern die Libido und können zu vorzeitiger Pubertät und Hodenfehlfunktionen beitragen.

²⁸⁷Li, N. et al. Prevalence and implications of microplastic contaminants in general human seminal fluid: A Raman spectroscopic study. *Science of The Total Environment* 937, 173522 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173522>

²⁸⁸Levine, H. et al. Temporal trends in sperm count: a systematic review and meta-regression analysis of samples collected globally in the 20th and 21st centuries. *Human Reproduction Update* 29, 157–176 (2023). <https://doi.org/10.1093/humupd/dmac035>

Ebenso beunruhigend ist die Situation in Bezug auf die weibliche Fertilität. Eine Untersuchung aus dem Jahr 2025 stellte bei 14 von 18 untersuchten Frauen Mikroplastikpartikel in Follikelflüssigkeit, im Durchschnitt über 2 000 Partikel pro Milliliter, die meisten davon hatten einen Durchmesser unter 5 μm ²⁸⁹ (Abb. 105).



Diese Ergebnisse deuten darauf hin, dass Plastikpartikel die Blut-Ovarialfollikel-Schranke überwinden können. Auf zellulärer Ebene kann Mikro- und Nanoplastik die DNA schädigen, die Zellteilung stören und Entzündungen hervorrufen. Es wurde nachgewiesen, dass MNP die Hormonregulierung stört, die Plazentafunktion beeinträchtigt, die Angiogenese beeinflusst und mit der Entwicklung von Uterusmyomen in Verbindung steht.

Erektile Dysfunktion (ED)

Die Ergebnisse einer landesweiten Studie in Japan haben gezeigt, dass die erektile Funktion und die sexuelle Aktivität bei der jüngeren Generation abnehmen²⁹⁰. Eine Erection Hardness Score-basierte Bewertung ergab eine Prävalenz der erektilen Dysfunktion von 30,9 %, von der etwa 14 Millionen Männer betroffen sind, und dass das sexuelle Verlangen, die Erektionsstärke, der Orgasmus und die Zufriedenheit bei jungen japanischen Männern, insbesondere im Alter von 20 bis 24 Jahren, geringer waren als erwartet, dabei verschlechtern sich diese Faktoren tendenziell mit dem zunehmenden Alter. Tatsächlich lag die Prävalenzrate in der Altersgruppe der 20- bis 24-Jährigen bei 26,6 % und entsprach damit fast der Prävalenz in der Altersgruppe der 50- bis 54-Jährigen (27,8 %) (Abb. 106, 107).

²⁸⁹Montano, L. et al. First evidence of microplastics in human ovarian follicular fluid: An emerging threat to female fertility. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 291, 117868 (2025). <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2025.117868>

²⁹⁰Tsujimura, A. et al. Erectile Function and Sexual Activity Are Declining in the Younger Generation: Results from a National Survey in Japan. *The World Journal of Men's Health* 43, 239–248 (2025). <https://doi.org/10.5534/wjmh.240137>

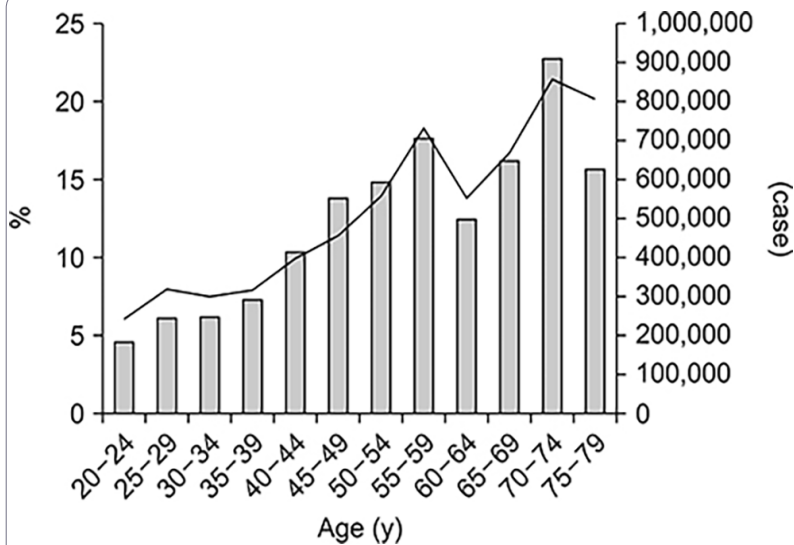


Abbildung 106. Prävalenz und Anzahl der Patienten mit erektiler Dysfunktion, evaluiert anhand der Verbreitung der erektilen Dysfunktion (ED), berechnet anhand der Frage "Leiden Sie an ED?".

Quelle: Tsujimura, A. et al. Erectile Function and Sexual Activity Are Declining in the Younger Generation: Results from a National Survey in Japan. The World Journal of Men's Health 43, 239–248 (2025).

<https://doi.org/10.5534/wjmh.240137>

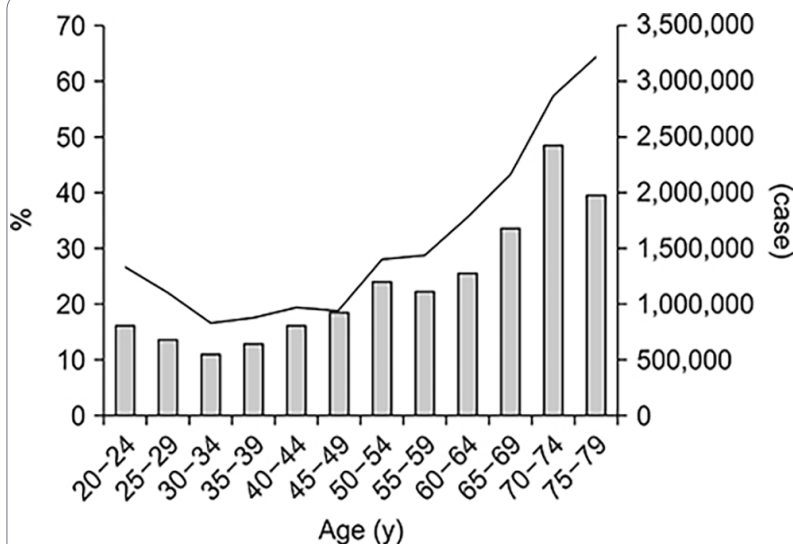


Abbildung 107. Diagramm, das die Prävalenz und die Anzahl der Patienten mit erektiler Dysfunktion veranschaulicht, die anhand der Erektionsstärke-Skala bewertet wurde.

Quelle: Tsujimura, A. et al. Erectile Function and Sexual Activity Are Declining in the Younger Generation: Results from a National Survey in Japan. The World Journal of Men's Health 43, 239–248 (2025).

<https://doi.org/10.5534/wjmh.240137>

In Japans erster offizieller nationaler Umfrage zur sexuellen Funktion, die 1998 durchgeführt wurde, wurde ermittelt, dass etwa 11,3 Millionen Männer an mäßiger bis vollständiger ED leiden. Darüber hinaus enthüllte landesweite Umfragen zur männlichen Unfruchtbarkeit in Japan aus den Jahren 1996 und 2015 erschreckende Daten. In der Studie aus dem Jahr 2015 waren 13,5 % der Männer von Unfruchtbarkeit betroffen, die auf ED als Ursache zurückzuführen war, das sind fast viermal mehr als 1996.

Die Gesamtheit aktueller wissenschaftlicher Daten deutet darauf hin, dass Mikro- und Nanoplastik im Körper eine der verborgenen, aber bedeutenden Ursachen für eine Verschlechterung reproduktiver Gesundheit ist. Diese Partikel dringen in die Geschlechtsorgane ein, stören die mitochondriale Funktion, verursachen Entzündungen, hormonelle Störungen und DNA-Schäden und verringern die Beweglichkeit und die morphologische Qualität der Spermien. Sie finden sich in Spermien und Follikelflüssigkeit, was darauf hindeutet, dass sie biologische Barrieren überwinden und tiefgreifende systemische Auswirkungen haben. All dies gefährdet nicht nur die Gesundheit des Einzelnen, sondern auch die Zukunft der Fortpflanzungsfähigkeit der Menschheit als Ganzes.

Das Eindringen von MNP durch die Plazentaschranke und seine Auswirkungen auf den sich entwickelnden Organismus

Pränatale Auswirkungen von Mikro- und Nanoplastik auf den Fötus

Schwangere Frauen sind besonders anfällig für die Einwirkung von Mikroplastik²⁹¹. Durch das Eindringen in den Körper der Mutter können Plastikpartikel den Fötus über die Plazenta erreichen, die Sekretion von schwangerschaftsregulierenden Hormonen stören und das Risiko für Frühgeburten, Fehlgeburten und fetale Entwicklungsstörungen erhöhen (Abb. 108). Im Jahr 2020 wurden schätzungsweise 13,4 Millionen Babys (1 von 10) zu früh geboren (<37 Wochen), was nach wie vor die Hauptursache für Kindersterblichkeit ist. Die überlebenden Kinder haben ein erhöhtes Risiko für schwere Erkrankungen und chronische Leiden²⁹².

Das sich entwickelnde Hormonsystem der Kinder ist auch äußerst empfindlich gegenüber Chemikalien in Kunststoffen, die Hormone nachahmen oder blockieren können²⁹³ (Abb. 109). Die Belastung mit MNP auf Säuglinge kann sogar über die Muttermilch erfolgen. Darüber hinaus kann Nanoplastik verzögerte Auswirkungen haben, indem es die Keimzellenbildung im Kindes- und Jugendalter stört, was die Fruchtbarkeit im Erwachsenenalter verringert.

Die Plazentaschranke spielt eine Schlüsselrolle bei der Regulierung des Stoffwechsels zwischen Mutter und Fötus und schützt ihn vor schädlichen Substanzen. Studien zeigen jedoch, dass Mikro- und Nanoplastik die Plazentaschranke durchdringen kann.

Im Jahr 2020 wurde in einer von Antonio Ragusa geleiteten Studie mit Hilfe der Raman-Mikrospektroskopie (einer auf der Lichtstreuungsanalyse basierenden Technik zur Bestimmung der chemischen Zusammensetzung von Materialien) Mikroplastik bei vier von sechs Frauen mit einem normalen Schwangerschaftsverlauf nachgewiesen. Die Proben enthielten 12 Partikel mit einer Größe von 5-10 µm, darunter Polypropylen und Pigmente, die in Kosmetika, Farben, Klebstoffen und Hygieneprodukten verwendet werden²⁹⁴.

²⁹¹Dugershaw-Kurzer, B. et al. Nanoparticles Dysregulate the Human Placental Secretome with Consequences on Angiogenesis and Vascularization. *Advanced Science* 11, 2401060 (2024). <https://doi.org/10.1002/adv.202401060>

²⁹²World Health Organization. 1 in 10 babies worldwide are born early, with major impacts on health and survival. (2023) <https://www.who.int/news/item/06-10-2023-1-in-10-babies-worldwide-are-born-early--with-major-impacts-on-health-and-survival> (Abgerufen am 01.05.2025).

²⁹³Sharma, R. K. et al. Impact of Microplastics on Pregnancy and Fetal Development: A Systematic Review. *Cureus* 16, e60712 (2024). <https://doi.org/10.7759/cureus.60712>

²⁹⁴Ragusa, A. et al. Plasticenta: First evidence of microplastics in human placenta. *Environment International* 146, 106274 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106274>

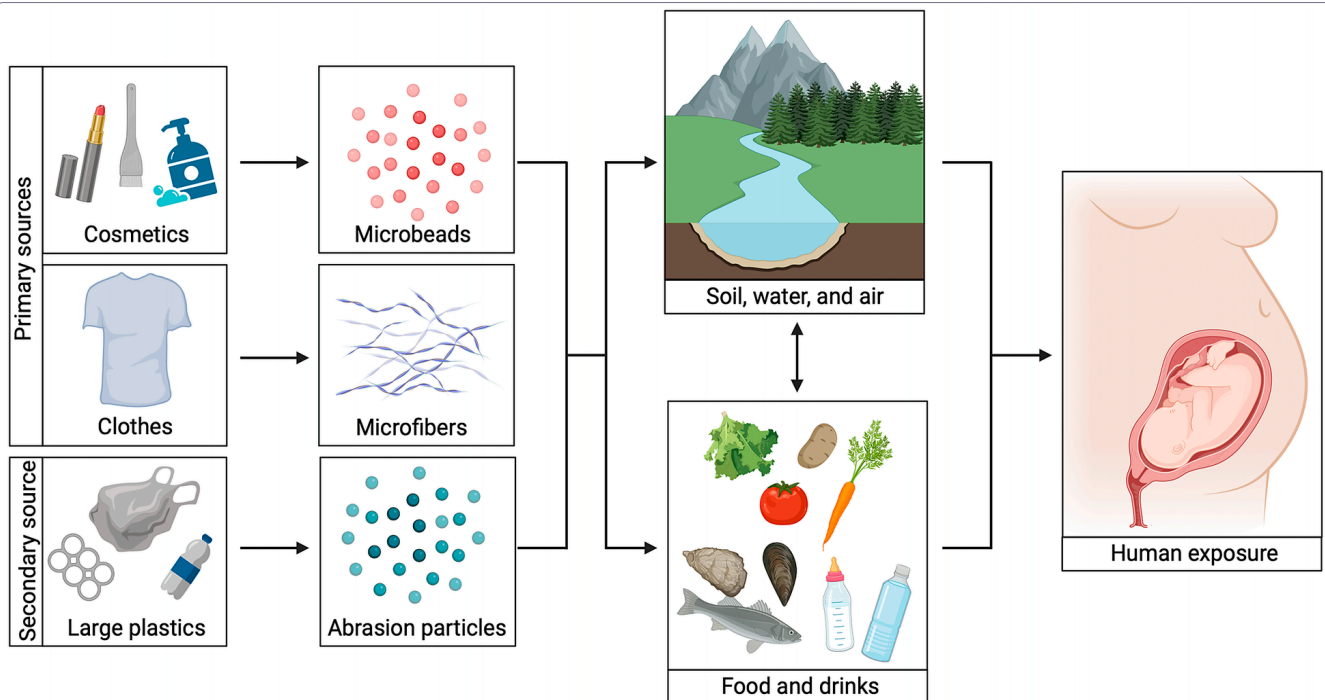


Abbildung 108. Das Gelingen von Mikroplastik in den Körper der Mutter.

Quelle: Hofstede, L. T., Vasse, G. F. & Melgert, B. N. Microplastics: A threat for developing and repairing organs? Cambridge Prisms: Plastics 1, e19 (2023). <https://doi.org/10.1017/plc.2023.19>

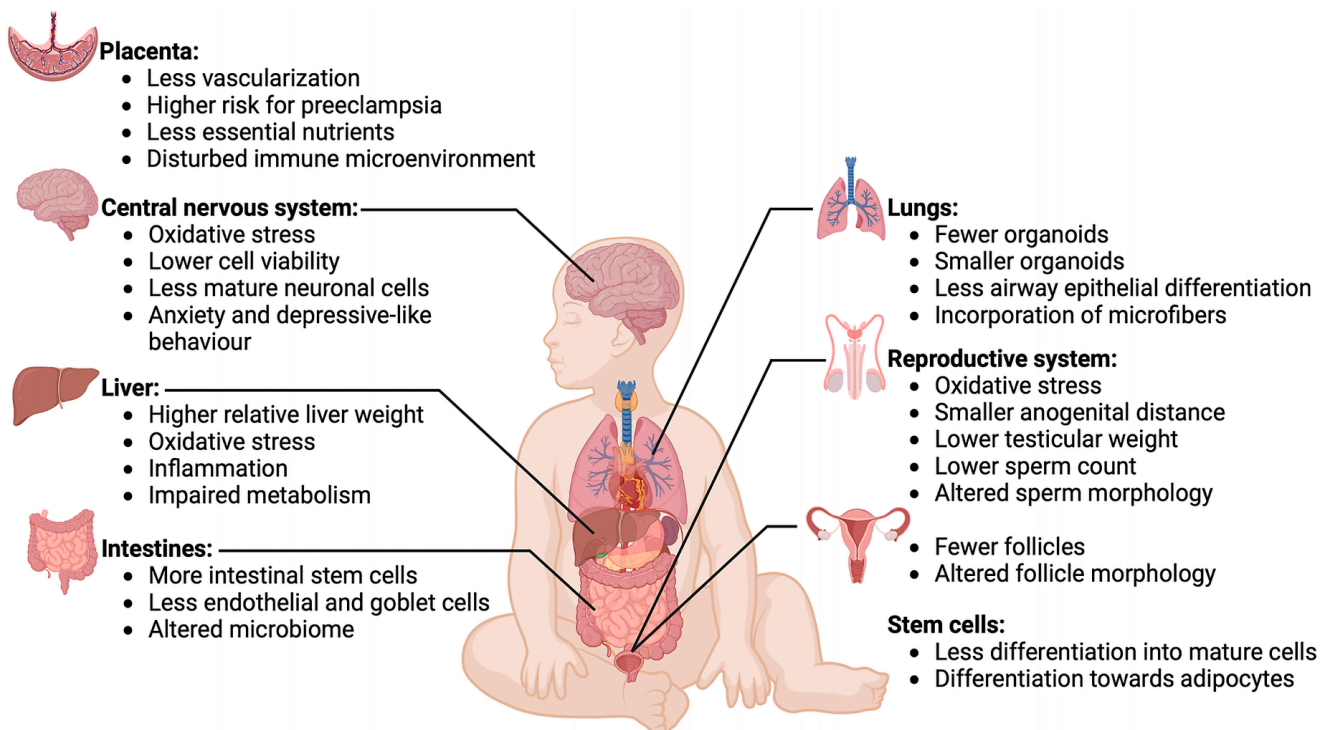


Abbildung 109. Einwirkung von Mikroplastik auf verschiedene Organe und Gewebe des sich entwickelnden Fötus.

Quelle: Hofstede, L. T., Vasse, G. F. & Melgert, B. N. Microplastics: A threat for developing and repairing organs? Cambridge Prisms: Plastics 1, e19 (2023). <https://doi.org/10.1017/plc.2023.19>

Eine von der Universität New Mexico durchgeführte Studie ergab, dass die Konzentrationen von Mikroplastik und Nanoplastik in den Plazenten von Frühgeborenen höher waren als in denen von Termingeborenen. Die Analyse von 158 Plazenten mit Hilfe der Massenspektrometrie ergab, dass Frauen, die zu früh entbunden hatten, eine größere Akkumulierung von Plastikpartikeln aufwiesen²⁹⁵.



"Nanopartikel scheinen sich indirekt auf das Kind im Mutterleib auszuwirken, indem sie über Botenstoffe die Angiogenese hemmen", sagt die Biologin Tina Bürki²⁹⁶.

Polystyrol-Nanopartikel können beim Fötus eine Störung der Gehirnentwicklung, insbesondere kognitive Defizite, verursachen²⁹⁷. Forschungen zufolge kann die Einwirkung von Mikroplastik während der Schwangerschaft und in den ersten Lebensmonaten irreversible Veränderungen des Fortpflanzungs- und Zentralnervensystems bei Nachkommen verschiedener Spezies hervorrufen²⁹⁸.

Postnatale Auswirkungen von Mikro- und Nanoplastik auf Säuglinge

Neugeborene sind einer ständigen Aufnahme von MNP aus der Umwelt ausgesetzt. Laut einer Studie aus dem Jahr 2020²⁹⁹ können Babys bis zu 4,5 Millionen Plastikpartikel pro Tag allein durch die verabreichte Nahrung aus Polypropylenflaschen aufnehmen, die den Großteil der weltweit verwendeten Babyflaschen ausmachen.

Säuglinge können Mikroplastik auch mit der Muttermilch aufnehmen. Im Jahr 2022 wurde bei Analysen der Muttermilch von 34 gesunden Frauen in 76 % der Proben Mikroplastik nachgewiesen³⁰⁰ (Abb. 110). MNP kann eine verzögerte Wirkung haben, indem es die Keimzellenbildung im Kindes- und Jugendalter stört, was die Fruchtbarkeit im Erwachsenenalter verringert.

²⁹⁵Jochum, M. et al. Elevated Micro- and Nanoplastics Detected in Preterm Human Placentae. Preprint (2025). <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-5903715/v1>

²⁹⁶Federal Office of Public Health. Impact of pollution on embryonic development - Nanoparticles: Risk for babies in the womb. FOPH. (2024) <https://www.bit.admin.ch/en/nsb?id=101285> (Abgerufen am 01.05.2025).

²⁹⁷Jeong, B. et al. Maternal exposure to polystyrene nanoplastics causes brain abnormalities in progeny. Journal of Hazardous Materials 426, 127815 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127815>

²⁹⁸Sharma, R. K. et al. Impact of Microplastics on Pregnancy and Fetal Development: A Systematic Review. Cureus 16, e60712 (2024). <https://doi.org/10.7759/cureus.60712>

²⁹⁹Li, D., Shi, Y., Yang, L. et al. Microplastic release from the degradation of polypropylene feeding bottles during infant formula preparation. Nat Food 1, 746–754 (2020). <https://doi.org/10.1038/s43016-020-00171-y>

³⁰⁰Ragusa, A. et al. Raman Microspectroscopy Detection and Characterisation of Microplastics in Human Breastmilk. Polymers 14, 2700 (2022). <https://doi.org/10.3390/polym14132700>

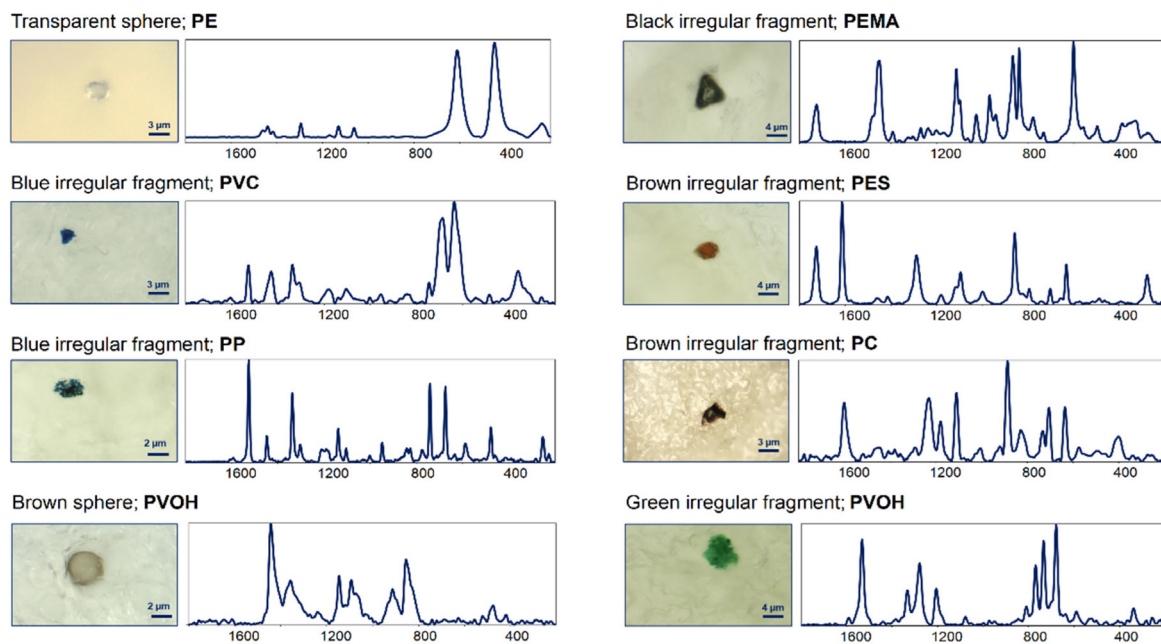


Abbildung 110. Mikrofotografien und Raman-Spektren. (Wellenzahlen, cm^{-1} einiger ausgewählter Mikroplastikarten, die in den untersuchten Muttermilchproben entdeckt wurden.)

PE – Polyethylen; PVC – Polyvinylchlorid; PP – Polypropylen; PVAL – Polyvinylalkohol; PEVA – Poly(ethylenovinylacetat); PEMA – Poly(ethylmethacryat); PES – Polyester sowie PC – Polycarbonat.

Quelle: Ragusa, A. et al. Raman Microspectroscopy Detection and Characterisation of Microplastics in Human Breastmilk. *Polymers* 14, 2700 (2022). <https://doi.org/10.3390/polym14132700>

Weitere Daten zeigen, dass der MNP-Gehalt im Stuhl von Säuglingen 14 Mal höher ist als bei Erwachsenen³⁰¹.

Nanoplastik und darin enthaltene Chemikalien stören die molekularen Strukturen und die Funktionalität der Muttermilch. Diese Verbindungen können die in menschlicher Muttermilch und Säuglingsnahrung enthaltenen Proteine verändern, was im späteren Leben zu Entwicklungsproblemen führen kann^{302, 303}.

Hohe Konzentrationen von MNP haben kumulative toxische Auswirkungen auf den sich entwickelnden Organismus. Nanoplastik, das in Zellen eindringt, kann strukturelle Schäden an der DNA verursachen und Stoffwechselprozesse stören. Diese Auswirkungen erhöhen das Risiko genetischer Mutationen und langfristiger Pathologien, was die Gesundheit künftiger Generationen bedroht.

³⁰¹Zhang, J., Wang, L., Trasande, L. & Kannan, K. Occurrence of Polyethylene Terephthalate and Polycarbonate Microplastics in Infant and Adult Feces. *Environ. Sci. Technol. Lett.* 8, 989–994 (2021). <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.1c00559>

³⁰²Yadav, A., Vuković, L. & Narayan, M. An Atomic and Molecular Insight into How PFOA Reduces α -Helicity, Compromises Substrate Binding, and Creates Binding Pockets in a Model Globular Protein. *J. Am. Chem. Soc.* 146, 12766–12777 (2024). <https://doi.org/10.1021/jacs.4c02934>

³⁰³Karim, A. et al. Interfacial Interactions between Nanoplastics and Biological Systems: toward an Atomic and Molecular Understanding of Plastics-Driven Biological Dyshomeostasis. *ACS Appl. Mater. Interfaces* 16, 25740–25756 (2024). <https://doi.org/10.1021/acsami.4c03008>

Folgen der Einwirkung von MNP und der Zusammenhang des MNP mit angeborenen Anomalien

Zusätzlich zu seiner Eigenschaft, in Gewebe und Zellen einzudringen, hat MNP eine weitere, ziemlich gefährliche Eigenschaft: Es kann an künftige Generationen "vererbt" werden. Bei der Zellteilung werden Fragmente von Mikro- und Nanoplastik von Zelle zu Zelle weitergegeben. Unter anderem können sie aufgrund ihrer geringen Größe und der statischen Ladung leicht die Plazentaschranke überwinden und in die Gewebe und Zellen des Fötus eindringen, was verheerende Auswirkungen auf den sich entwickelnden Organismus hat. Und vor allem führt Mikro- und Nanoplastik, wie in dem Bericht wiederholt betont wurde, zu mitochondrialer Dysfunktion.

Eine kürzlich durchgeführte randomisierte Mendel-Studie lieferte deutliche Hinweise auf einen kausalen Zusammenhang zwischen der Expression mitochondrialer Proteine und dem Risiko angeborener Anomalien. In der Studie wurden genetische Varianten als instrumentelle Variablen verwendet, um die mit Beobachtungsdaten typischerweise verbundenen Verzerrungen zu reduzieren. Unter den 66 mitochondrialen Proteinmerkmalen wurden signifikante Zusammenhänge mit Fehlbildungen des Herzens, des Ohrs, des Nervensystems, des Urogenitalsystems und der Extremitäten nachgewiesen. Dies unterstützt die Hypothese einer Schlüsselrolle der mitochondrialen Aktivität bei der embryonalen Morphogenese³⁰⁴. Die Mutationen der mitochondrialen DNA (mtDNA), sowohl vererbt als auch de novo, verursachen eine Vielzahl von klinischen Syndromen: MELAS, MERRF, NARP, Leigh-Syndrom, und andere. Sie betreffen hauptsächlich Organe mit hohem Energieverbrauch: Herz, Gehirn, Muskeln, Augen. Die Übertragung erfolgt ausschließlich über die mütterliche Linie, was auf den oozytären Ursprung der Mitochondrien zurückzuführen ist (Abb. 111). Solche Erkrankungen manifestieren sich oft schon in jungen Jahren und sind durch schwere neurologische und metabolische Störungen gekennzeichnet.

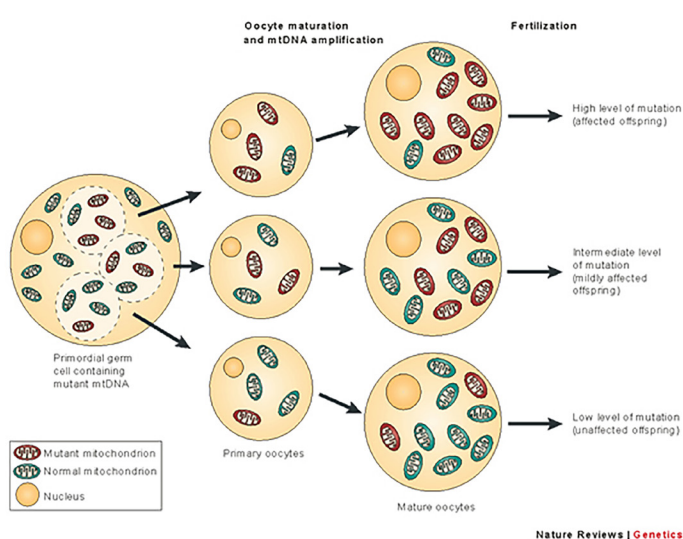


Abbildung 111. Mitochondrialer genetischer Flaschenhals. Während der Entwicklung von primären Oozyten wird eine bestimmte Anzahl von mitochondrialen DNA-Molekülen (mtDNA) in jede Eizelle übertragen. Die Reifung der Eizelle ist mit einer schnellen Replikation dieser mtDNA-Population verbunden. Dieses Restriktion-Amplifikation-Ereignis kann zu einer zufälligen Verschiebung der mtDNA-Mutationslast zwischen den Generationen führen und ist verantwortlich für die unterschiedlichen Mengen an mutierter mtDNA, die bei betroffenen Nachkommen von Müttern mit pathogenen mtDNA-Mutationen beobachtet werden. Mitochondrien mit mutierter mtDNA sind in Rot dargestellt, Mitochondrien mit normaler mtDNA sind in Grün dargestellt.

Quelle: Taylor, R., Turnbull, D. Mitochondrial DNA mutations in human disease. *Nat Rev Genet* 6, 389–402 (2005). <https://doi.org/10.1038/nrg1606>

³⁰⁴Li, X. et al. Mitochondrial proteins and congenital birth defect risk: a mendelian randomization study. *BMC Pregnancy Childbirth* 25, 444 (2025). <https://doi.org/10.1186/s12884-025-07562-8>

Kinder mit mitochondrialen Störungen leiden häufig unter Entwicklungsverzögerungen, Muskelschwäche, kognitiven Beeinträchtigungen und Koordinationsstörungen. Das Kearns-Sayre-Syndrom, das Barth-Syndrom, die Alpers-Krankheit und andere Störungen können zu schwerwiegenden Folgen bis hin zu Behinderungen oder zum Tod führen.

In den vergangenen zwei Jahrzehnten haben Ärzte einen alarmierenden Anstieg von angeborenen Fehlbildungen bei Neugeborenen festgestellt. Allein in China hat sich die Häufigkeit solcher Fehlbildungen von 99,15 pro 10 000 Geburten im Jahr 2005 auf 290,27 pro 10 000 im Jahr 2022 fast verdreifacht³⁰⁵ (Abb. 112). Eine ähnliche Dynamik wird auch in anderen Ländern beobachtet. Die Gründe für diesen Anstieg sind vielschichtig, aber immer mehr wissenschaftliche Erkenntnisse deuten auf eine neue, schnell zunehmende Bedrohung hin: Mikro- und insbesondere Nanoplastik ist in der Lage, in embryonales Gewebe einzudringen und die Bildung von Organen und biologischen Systemen zu beeinträchtigen.

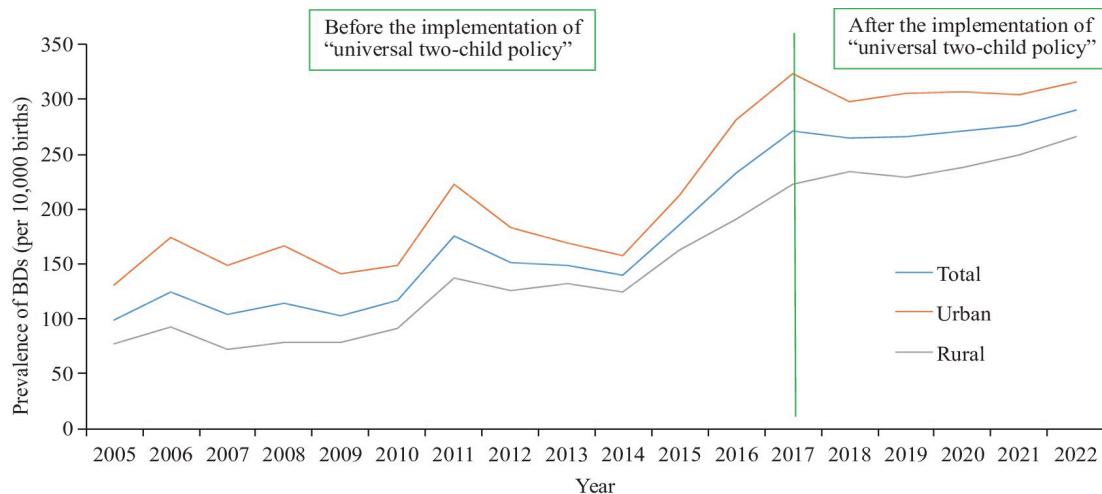


Abbildung 112. Prävalenz von angeborenen Fehlbildungen zwischen städtischen und ländlichen Gebieten im Zeitraum von 2005 bis 2020.

Quelle: Wei, W. et al. Analyzing the Trends and Causes of Birth Defects – Jinan City, Shandong Province, China, 2005–2022. CCDCW 5, 978–983 (2023). <https://doi.org/10.46234/ccdcw2023.184>

Die elektrostatische Ladung von Nanoplastik ist besonders gefährlich in embryonalem Gewebe, wo bereits ein einziger Fehler zu einer Entwicklungsanomalie führen kann. Solche Partikel haften verstärkt an Zelloberflächen, einschließlich der Zellen der Neuralleiste, die bei der Bildung von Herz, Blutgefäßen und kraniofazialer Strukturen eine entscheidende Rolle spielen. In Experimenten an Hühnerembryonen verursachte Nanoplastik schwere Missbildungen, darunter Defekte am Herzen und an großen Gefäßen. Eine der sich am schnellsten ausbreitenden Anomalien ist die Gastroschisis, eine Fehlbildung der vorderen Bauchwand, bei der die Bauchorgane des Fötus durch einen Bauchwanddefekt aus dem Bauchraum fallen (Abb. 113, 114, 115). Internationalen Daten zufolge ist die Prävalenz dieser Fehlbildung in den letzten drei Jahrzehnten um 161 % gestiegen. Bei Kindern, deren Mütter unter 20 Jahre alt sind, hat sich die Prävalenz dieser Fehlbildung vervielfacht³⁰⁶. Es wird vermutet, dass Nanoplastik die Entwicklung der Bauchdecke in der Frühschwangerschaft (4-8 Wochen) stört, was zu Entzündungen und zur Bildung einer Bauchspalte führt.

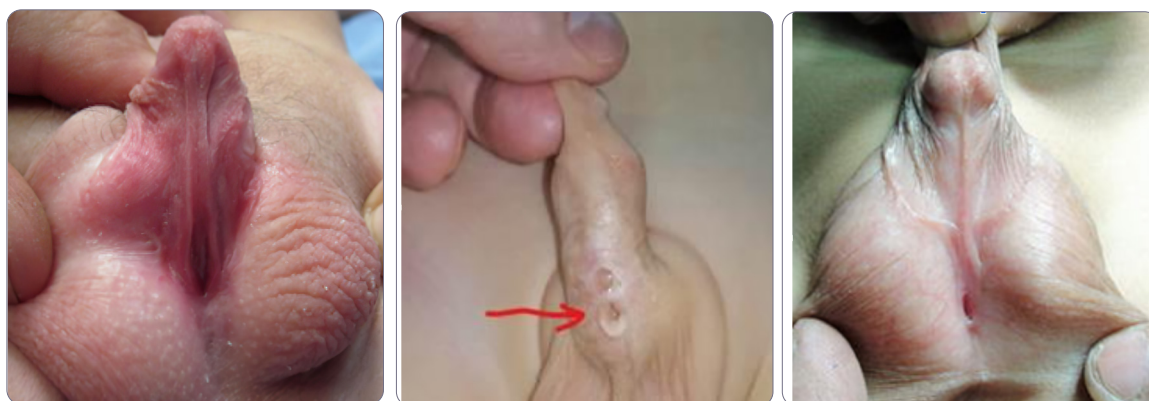
³⁰⁵Wei, W. et al. Analyzing the Trends and Causes of Birth Defects – Jinan City, Shandong Province, China, 2005–2022. CCDCW 5, 978–983 (2023). <https://doi.org/10.46234/ccdcw2023.184>

³⁰⁶Feldkamp, M. L. et al. Gastroschisis prevalence patterns in 27 surveillance programs from 24 countries, International Clearinghouse for Birth Defects Surveillance and Research, 1980–2017. Birth Defects Research 116, e2306 (2024). <https://doi.org/10.1002/bdr2.2306>



Abbildungen 113 - 115. Gastroschisis.

Eine weitere Fehlbildung - die Hypospadie - eine Anomalie, bei der sich die Harnröhre bei Jungen an der falschen Stelle öffnet³⁰⁷, hat ebenfalls einen stetigen Anstieg zu verzeichnen (Abb. 116, 117, 118). In den Vereinigten Staaten beispielsweise stieg die Inzidenz von Hypospadie im Zeitraum von 1997 bis 2018 um etwa 1,06 Fälle pro 1 000 männliche Lebendgeburten (von 6,1 auf 7,16 pro 1 000), was einem Anstieg von etwa 17 % entspricht³⁰⁸. Studien an Tiermodellen haben gezeigt, dass die Einwirkung von Phthalaten, die häufig in Mikroplastik enthalten sind, die Testosteronsynthese bei männlichen Föten stört.



Abbildungen 116–118. Hypospadie.

Diese Substanzen, die sich an der geladenen Oberfläche des Nanoplastiks anhaften, werden leicht in den Blutkreislauf und die Plazenta transportiert und verstärken die Hormonverschiebungen während der kritischen Phasen der Geschlechtsdifferenzierung. Vor diesem Hintergrund ist ein Anstieg der Inzidenz von Down-Syndrom, anderen Trisomien, atrioventrikulären Herzfehlern und anderen schwerwiegenden Störungen von 12,78 pro 10 000 Lebendgeburten im Zeitraum 1999-2001 auf 15,55 pro 10 000 im Zeitraum 2016-2020 zu verzeichnen³⁰⁹.

Gleichzeitig wird eine Zunahme neuropsychologischer Probleme bei Kindern beobachtet, darunter Angststörungen und kognitive Defizite. Obwohl ein direkter kausaler Zusammenhang mit Mikroplastik noch untersucht wird, lassen bekannte Mechanismen – Entzündung, epigenetische Modulation, mitochondriale Dysfunktion – vermuten, dass dies einer der Faktoren ist^{307, 310}.

³⁰⁷Chen, M. J., Karaviti, L. P., Roth, D. R. & Schlomer, B. J. Birth prevalence of hypospadias and hypospadias risk factors in newborn males in the United States from 1997 to 2012. *Journal of Pediatric Urology* 14, 425.e1-425.e7 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.jpurol.2018.08.024>

³⁰⁸Lavoie, C. et al. Comparing the incidence of hypospadias across the United States: A contemporary analysis. *Journal of Pediatric Urology* 21, 627–632 (2025). <https://doi.org/10.1016/j.jpurol.2025.01.002>

³⁰⁹Stallings, E. B. et al. National population-based estimates for major birth defects, 2016–2020. *Birth Defects Research* 116, e2301 (2024). <https://doi.org/10.1002/bdr2.2301>

³¹⁰Zhang, Y., Wang, J., Yang, H. & Guan, Y. The potential mechanisms underlying phthalate-induced hypospadias: a systematic review of rodent model studies. *Front. Endocrinol.* 15, (2024). <https://doi.org/10.3389/fendo.2024.1490011>

Schlussfolgerungen und Perspektiven. Ist es möglich, die Auswirkungen von MNP auf die Gesundheit des Menschen zu verringern?

Die Analyse aggregierter Daten zeigt, dass Nanoplastik einen bedeutenden und unterschätzten Risikofaktor für die Gesundheit des Menschen darstellt. Die derzeitigen wissenschaftlichen Erkenntnisse deuten stark darauf hin, dass Nanoplastik ein wesentlicher Bestandteil der globalen toxischen Belastung auf den menschlichen Organismus ist. Aufgrund seiner Fähigkeit, biologische Barrieren zu überwinden und sich in verschiedenen Geweben wie Gehirn, Herz, Lunge und Plazenta anzureichern, hat MNP toxische Auswirkungen auf molekularer, zellulärer und systemischer Ebene. Zusammen mit chemischen Zusatzstoffen und adsorbierten Umweltschadstoffen wird Plastik zu einem Faktor, der chronische Entzündungen, oxidativen Stress, mitochondriale Dysfunktion und DNA-Mutationen auslösen kann – Prozesse, die einer Vielzahl von Erkrankungen zugrunde liegen, darunter neurodegenerative Erkrankungen, Krebs, Herz-Kreislauf-, endokrine und Autoimmunerkrankungen. Besonders besorgniserregend ist die Tatsache, dass die MNP-Partikel aus dem Körper praktisch nicht ausgeschieden werden, sich mit zunehmendem Alter im Körper anreichern und ihre kumulative Wirkung verstärken.

Aktuelle Erkenntnisse bestätigen, dass es keine Möglichkeit gibt, den Kontakt mit MNP zu vermeiden: Es ist in der Luft, im Wasser, in der Nahrung und sogar in den Zellen der Tiere und Pflanzen, die wir verzehren, enthalten. Die Einwirkung von Plastikpartikeln ist somit allgegenwärtig und kontinuierlich – von der intrauterinen Entwicklung bis zu späteren Lebensabschnitten. Besonders gefährlich ist die Inhalation, bei der Nanopartikel die Blut-Hirn-Schranke umgehen und direkt in das Hirngewebe eindringen, was das zentrale Nervensystem zu einem besonders gefährdeten Angriffspunkt macht.

Ein zusätzliches biologisches Risiko geht von der elektrostatischen Aktivität der MNP-Partikel aus, die ihre Wechselwirkung mit biologischen Strukturen verstärkt und zu einer Störung der Homöostase beiträgt. Ihre potenzielle Rolle beim Transport von Krankheitserregern und antibiotikaresistenten Mikroorganismen wird ebenfalls festgestellt, was dem Problem der Mikro- und Nanoplastikverschmutzung einen interdisziplinären Charakter verleiht, der Ökologie, Toxikologie, Immunologie, Neurologie und Reproduktionsmedizin betrifft.

Als Teil der Strategie zur Bekämpfung der Bedrohung durch MNP ist eine der von ALLATRA vorgeschlagenen strategischen Richtungen die Entwicklung der Methoden zur Neutralisierung oder Abschirmung der elektrostatischen Ladung von Nanoplastik. Die Verringerung der elektrostatischen Aktivität solcher Partikel kann ihre Schädlichkeit deutlich verringern und ihre Anreicherung im Körper verlangsamen. Die Autoren des Berichts schätzen, dass Methoden zur Abschirmung oder Neutralisierung der Ladung das mit MNP verbundene potenzielle Risiko um mindestens 50 % reduzieren können. Dies verschafft die nötige Zeit, um umfassendere Strategien zur Diagnostik, Prophylaxe und Ausleitung von MNP aus dem Organismus zu entwickeln. In diesem Zusammenhang ist die weitere Forschung in den Bereichen Biophysik, Nanotechnologien und molekularer Toxikologie von besonderer Bedeutung.

Trotz der zunehmenden Zahl wissenschaftlicher Veröffentlichungen zu diesem Thema sind die Auswirkungen von MNP auf die Gesundheit des Menschen noch immer unzureichend untersucht und werden bei der Ausarbeitung von Gesundheits- und Umweltschutzstrategien kaum berücksichtigt. Angesichts des Ausmaßes der Plastikverschmutzung, der biologischen Aktivität der Partikel und der potenziell irreversiblen Folgen ihrer Auswirkungen muss dieser Bereich von der wissenschaftlichen Gemeinschaft und den Gesundheitsbehörden vorrangig behandelt, die Daten systematisiert, Risikobewertungsstandards entwickelt und die zwischenstaatliche und internationale wissenschaftliche Zusammenarbeit ausgebaut werden.

ANALYSE AKTUELLER ANSÄTZE ZUR VERRINGERUNG DER PLASTIKVERSCHMUTZUNG

Technologien zur Entfernung großer Plastikteile aus aquatischen Ökosystemen

Initiativen zur Eindämmung der Meeresverschmutzung fokussieren sich weitgehend darauf, sichtbare große Abfälle von der Wasseroberfläche zu entfernen. Eines der größten Projekte zum Einsammeln von Plastik und anderen Arten von schwimmenden Abfällen ist bisher die Initiative The Ocean Cleanup. Ihre schwimmenden Systeme fangen den auf der Oberfläche schwimmenden Müll ein (Abb. 119), der dann sortiert und für die weitere Verwertung bzw. Entsorgung vorbereitet wird.

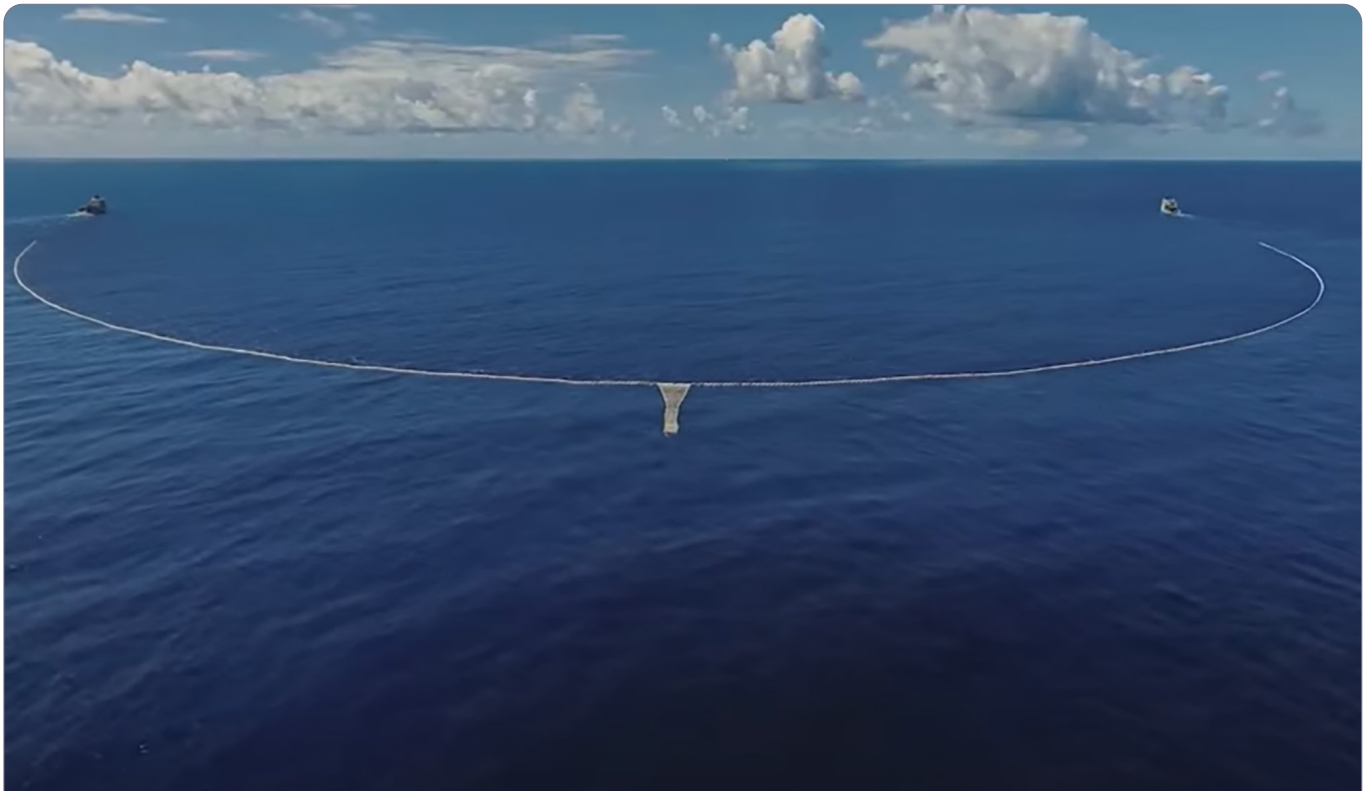


Abbildung 119. Das Bild zeigt die Ocean Cleanup-Technologie im Einsatz. Eine lange U-förmige schwimmende Barriere aus robustem Material sammelt Plastikmüll an der Meeresoberfläche ein.

Quelle: The Ocean Cleanup. Cleaning up plastic pollution from the oceans. <https://theoceancleanup.com> (Abgerufen am 01.05.2025).

Obwohl diese Methode als vielversprechend gilt, müssen einige Aspekte beachtet werden, die Aufmerksamkeit erfordern:

1. Das Einsammeln von Müll erfolgt nicht selektiv und zusammen mit Plastik werden lebende Organismen wie mikroskopisch kleine Algen, Fischlarven und Quallen eingefangen. Derzeit gibt es keine quantitativen Schätzungen über die Menge des unbeabsichtigten Fangs, aber die potenzielle großflächige Entnahme dieser Organismen könnte negative Auswirkungen auf die Meeresökosysteme haben, da die natürlichen Nahrungsketten unterbrochen werden. Trotz der Maßnahmen, die zum Schutz der Meeresbewohner ergriffen wurden, bleibt das Problem ungelöst.

2. Aktivisten setzen sich für die Säuberung der Ozeane ein, aber die Bemühungen reichen nicht aus, um bedeutende Ergebnisse zu erzielen.

Bis November 2024 hat die Initiative The Ocean Cleanup etwa 20 000 Tonnen Plastikmüll aus den Weltmeeren entfernt. Dies ist sicherlich ein bedeutendes Ergebnis. Im Zusammenhang mit dem globalen Problem macht es jedoch nur 0,01 % der geschätzten 200 Millionen Tonnen Plastik aus, die sich derzeit im Ozean befinden. Der Zufluss neuer Abfälle, der auf etwa 11 Millionen Tonnen jährlich geschätzt wird, muss ebenfalls berücksichtigt werden (Abb. 120). Diese Zahlen verdeutlichen die Unverhältnismäßigkeit der Anstrengungen zur Säuberung im Vergleich zum Ausmaß des Problems.

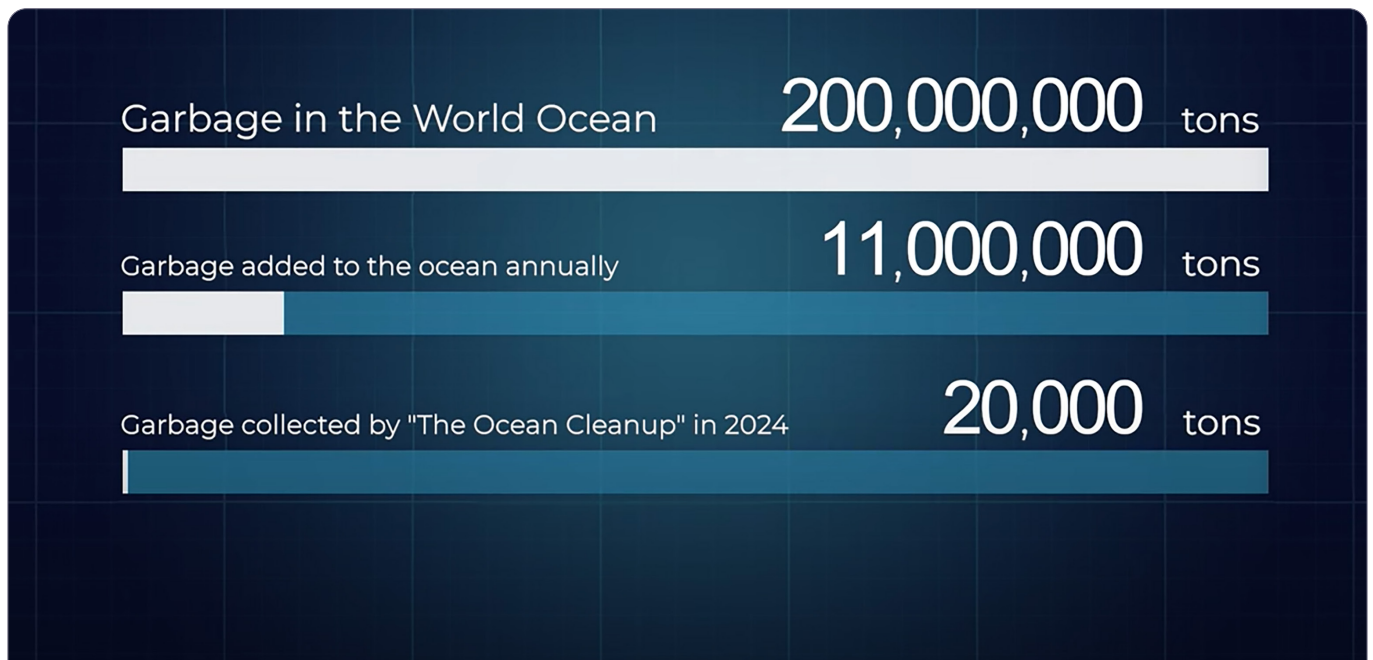


Abbildung 120. Das Diagramm vergleicht drei wichtige Messwerte zur Plastikverschmutzung in den Ozeanen: die Menge an schwimmendem Plastikmüll, die Menge an Plastik, die jedes Jahr in den Ozean gekippt wird, und die Menge an Plastik, die von The Ocean Cleanup entfernt wird.

Quelle: The Ocean Cleanup. <https://theoceancleanup.com> (Abgerufen am 1.05.2025).

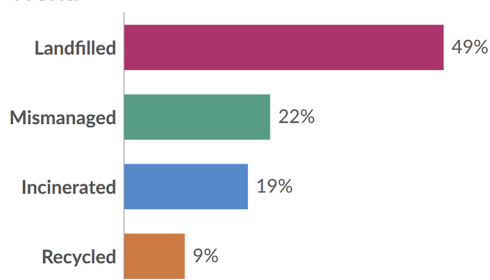
3. Die Wiederverwertung von gesammeltem Plastik ist nach wie vor ein zentrales Thema. Die derzeitigen weltweiten Recyclingraten für Plastikabfall betragen nicht mehr als 9 % (Abb. 121). Infolgedessen ist es sehr wahrscheinlich, dass ein erheblicher Teil des gesammelten Plastiks auf Deponien landet, was das Problem der Umweltverschmutzung langfristig nicht löst.

Share of plastic waste that is recycled, landfilled, incinerated and mismanaged, 2019

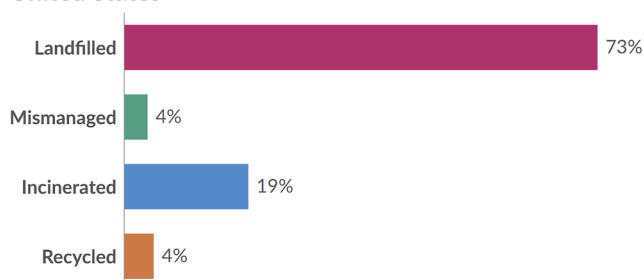
Our World in Data

Mismanaged plastic waste includes materials burned in open pits, dumped into seas or open waters, or disposed of in unsanitary landfills and dumpsites.

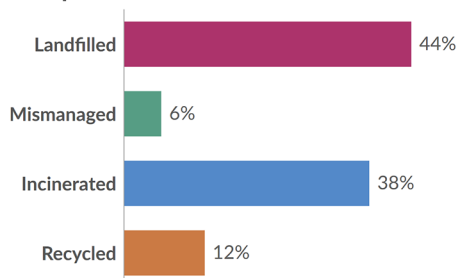
World



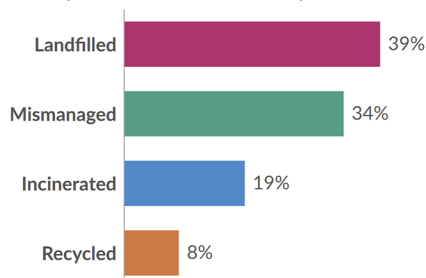
United States



Europe



Asia (excl. China and India)



Data source: OECD (2023)

OurWorldinData.org/plastic-pollution | CC BY

Note: Regional aggregates were calculated by Our World in Data and are based on those specified by the OECD¹.

1. OECD regions: The definitions of regions, as stipulated by the OECD, are: - Other OECD America: Chile, Colombia, Costa Rica, Mexico - OECD EU countries: Austria, Belgium, Czech Republic, Denmark, Estonia, Finland, France, Germany, Greece, Hungary, Ireland, Italy, Latvia, Lithuania, Luxembourg, Netherlands, Poland, Portugal, Slovak Republic, Slovenia, Spain, Sweden - OECD Non-EU countries: Iceland, Israel, Norway, Switzerland, Turkey, United Kingdom - OECD Oceania: Australia, New Zealand - OECD Asia: Japan, Korea - Latin America: Non-OECD Latin American and Caribbean countries - Other EU: Bulgaria, Croatia, Cyprus, Malta, Romania - Other Eurasia: Non-OECD European and Caspian countries, including Russian Federation - Middle East & North Africa: Algeria, Bahrain, Egypt, Iraq, Islamic Rep. of Iran, Kuwait, Lebanon, Libya, Morocco, Oman, Qatar, Saudi Arabia, Tunisia, United Arab Emirates, Syrian Arab Rep., Western Sahara, Yemen - Other Africa: Sub-Saharan Africa - China: People's Republic of China, Hong Kong (China) - Other non-OECD Asia: Other non-OECD Asian and Pacific countries

Abbildung 121. Anteil des Plastikmülls, der im Jahr 2019 recycelt, deponiert, verbrannt und unsachgemäß entsorgt wurde. Zu den unsachgemäß entsorgten Plastikabfällen gehören Materialien, die in offenen Gruben verbrannt, in Meeren oder offenen Gewässern entsorgt oder in gesundheitsschädlichen Deponien und Abfallhalden abgeladen werden.

Quelle: OECD (2023). Note: Regional aggregates were calculated by Our World in Data and are based on those specified by the OECD. [OurWorldinData.org/plastic-pollution](https://ourworldindata.org/plastic-pollution) | CC BY
<https://ourworldindata.org/grapher/share-plastic-fate?time=2019..latest>

Darüber hinaus ist die Säuberung des Ozeans mit erheblichen finanziellen Kosten verbunden. Die Entfernung des Großen Pazifischen Müllflecks von den Küstengewässern irgendwelcher Staaten schafft beispielsweise eine Situation, in der kein einzelner Staat eindeutig für die Finanzierung oder Durchführung der Säuberungsmaßnahmen verantwortlich ist. Laut Charles Moore dem Ozeanograph, Forscher und Entdecker des des Großen Pazifischen Müllflecks, würde eine umfassende Entfernung des Großen Pazifischen Müllflecks "jedes Land in den Ruin treiben", das eine solche Anstrengung unternehmen würde. Es sei darauf hingewiesen, dass in den Weltmeeren fünf derartige Müllansammlungen festgestellt wurden (Abb. 122), was das Problem noch verschärft.

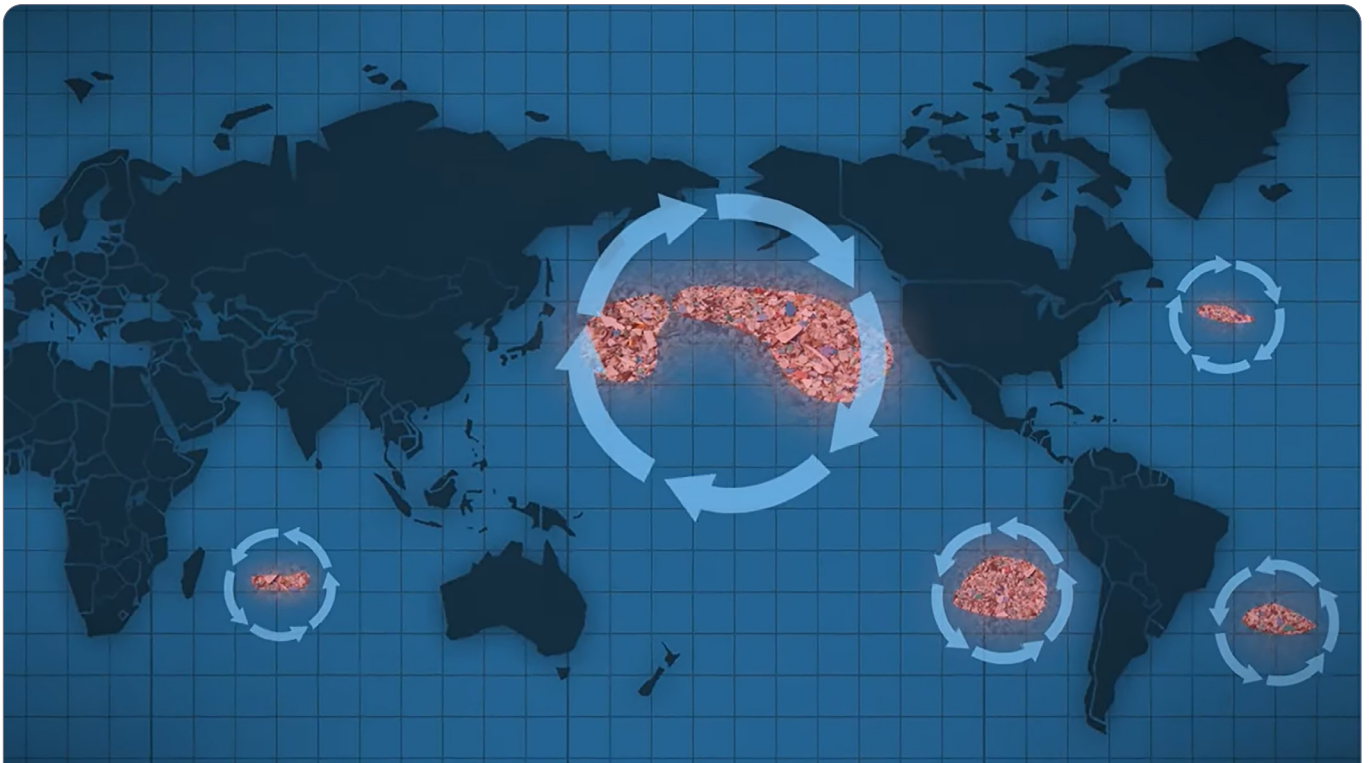


Abbildung 122. Schematische Darstellung der Standorte der fünf großen Müllinseln in den Weltmeeren.

Es ist wichtig, anzumerken, dass der sichtbare große Müll nur einen Teil des Gesamtproblems der Plastikverschmutzung im Meer darstellt. Laut Melanie Bergmann, Meeresbiologin am Alfred-Wegener-Institut: "geht es nur um Plastik an der Meeresoberfläche, und das ist nur ein kleiner Teil, weniger als 1 % dessen, was sich tatsächlich im Ozean befindet".

Da Plastik in Mikro- und Nanopartikel zerfällt, wird die Aufgabe, den Ozean von dieser Art der Verschmutzung zu reinigen, erheblich komplizierter. Einige experimentelle Technologien zur Entfernung von Mikroplastik aus dem Wasser gibt es bereits. So haben Forscher der Universität Sichuan einen winzigen Roboterfisch (Abb. 123) entwickelt, der in der Lage ist, in Gewässern zu schwimmen und die in seiner Nähe frei schwimmenden Plastikpartikel zu adsorbieren³¹¹. Dieser 13 mm große bionische Roboter sammelt Mikroplastikpartikel aufgrund starker chemischer Bindungen und elektrostatischer Wechselwirkungen zwischen seinen Gehäusematerialien und Mikroplastikkomponenten wie organischen Farbstoffen, Antibiotika und Schwermetallen effizient ein.

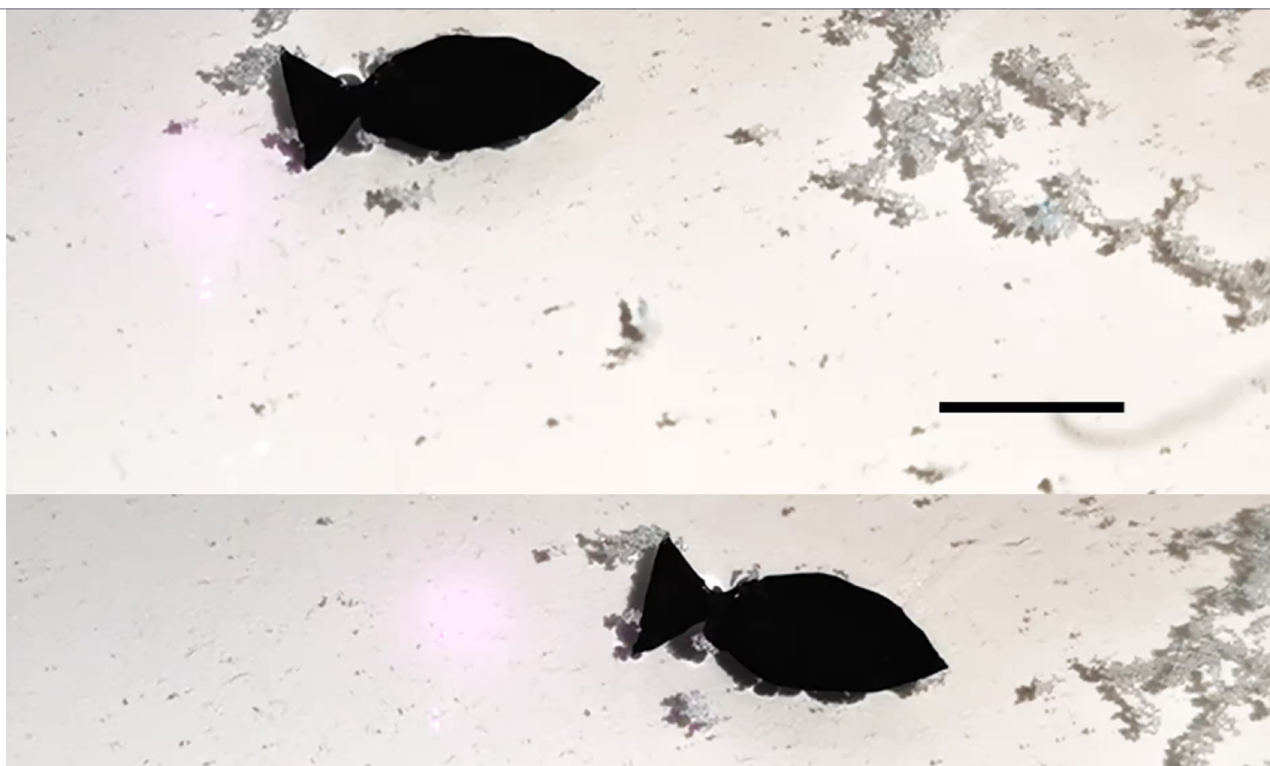


Abbildung 123. Das Bild zeigt einen winzigen Roboterfisch, der von Forschern der Universität Sichuan entwickelt wurde. Das kompakte Gerät, das einem echten Fisch ähnelt, schwimmt im Wasser und adsorbiert aktiv frei schwimmende Mikroplastikpartikel auf.

<https://www.theguardian.com/environment/2022/jun/22/scientists-unveil-bionic-robo-fish-to-remove-microplastics-from-seas>

Doch trotz dieser Innovationen ist die praktische Anwendung solcher Technologien auf globaler Ebene derzeit begrenzt. Miniroboter adsorbieren Mikroplastik in ihrer unmittelbaren Umgebung, so dass der Prozess lokal begrenzt ist; selbst in großen Mengen sind sie nicht in der Lage, die unermessliche Weite des Ozeans abzudecken. Darüber hinaus können sie selbst Teil der Nahrungskette werden. Auch die Fähigkeit der Roboter, unter den komplexen Bedingungen des Ozeans (Strömungen, Wasserdruck, Salzgehalt) zu funktionieren, ist ungewiss. Folglich sind die bestehenden Lösungen noch nicht effizient genug und stehen vor großen Schwierigkeiten im Hinblick auf ihre Verbreitung.

³¹¹Wang, Y. et al. Robust, Healable, Self-Locomotive Integrated Robots Enabled by Noncovalent Assembled Gradient Nanostructure. *Nano Lett.* 22, 5409–5419 (2022). <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.2c01375>

Aktuelle Methoden zur Entfernung von Mikro- und Nanoplastik

Das Potenzial des Einsatzes von Mikroorganismen, insbesondere von Bakterien, für den enzymatischen Abbau synthetischer Polymere, vor allem von Polyethylenterephthalat (PET), wird zunehmend in Betracht gezogen. Diese Technologie wird als potenziell umweltfreundliche Alternative zur herkömmlichen Methode der Entsorgung von Plastikmüll – der Verbrennung – angepriesen. Die bisher gesammelten empirischen Daten lassen jedoch Zweifel an ihrer Effizienz, Sicherheit und Anwendbarkeit im industriellen Ausmaß zu.

Im Jahr 2016 entdeckte ein Team japanischer Wissenschaftler unter der Leitung von Shosuke Oda das Bakterium *Ideonella sakaiensis*, das in der Lage ist, Polyethylenterephthalat durch die Produktion von zwei Enzymen, PETase und MHETase, abzubauen. Dies war ein wichtiges Ereignis in der Mikrobiologie³¹². Labortests zeigten jedoch, dass der Abbauprozess extrem langsam ist: Die Bakterien benötigten unter optimalen Bedingungen etwa sieben Wochen, um eine 20 g schwere Plastikfolie abzubauen. Es liegt auf der Hand, dass eine solche Recycling-Effizienz nicht als zufriedenstellend für die Lösung des Problems der Plastikverschmutzung angesehen werden kann. Angesichts der weltweiten Verschmutzung, bei der jedes Jahr Millionen von Tonnen Plastik in die Umwelt gelangen, ist ein solches Tempo vergleichbar mit dem Versuch, den Ozean mit einem Teelöffel auszuschöpfen.

Die wissenschaftlichen Bemühungen konzentrierten sich auf die Modifizierung des Enzyms PETase, welches das Bakterium zum Abbau von Kunststoffen verwendet. Wie die Forscher jedoch selbst einräumen, befindet sich das Enzym von *Ideonella sakaiensis* in einem frühen Stadium der Evolution. Seine Wirksamkeit ist gering, seine Stabilität ist begrenzt, und die Reaktionsbeschleunigung erfordert Temperaturen, die in der Natur nicht vorkommen. Auch die Gentechnik kann noch nicht vorhersagen, welche Mutationen tatsächlich zu einer Verbesserung führen werden. Es ist eine Sache von "zwei Schritten vorwärts, einem Schritt zurück", wie Elizabeth Bell vom US National Renewable Energy Laboratory es bezeichnete.

Darüber hinaus kann nicht jede Plastikart enzymatisch abgebaut werden. Nur bestimmte Arten von Kunststoffen (z. B. PET) sind theoretisch für einen solchen Abbau geeignet. Polyethylen, Polypropylen und andere häufig verwendete Materialien bleiben für Mikroorganismen praktisch nicht abbaubar. Und die meisten Kunststoffe sind laut den Wissenschaftlern der Zeitschrift "Nature" zu energieintensiv für einen effektiven biochemischen Abbau.

Selbst wenn man sich vorstellt, dass eine solche hochwirksame Mikrobe auftauchen wird, gibt es eine weitaus beunruhigendere Frage: Kann sie ohne Gefahr in die Umwelt freigesetzt werden? **Jedes gentechnisch veränderte Bakterium ist eine potenzielle Quelle für eine Umweltkatastrophe. Gegenwärtig ist die Freisetzung solcher Organismen in die freie Natur in fast allen Ländern streng reglementiert oder ganz verboten.**

³¹²Yoshida, S. et al. A bacterium that degrades and assimilates poly(ethylene terephthalate). Science 351, 1196–1199 (2016). <https://doi.org/10.1126/science.aad6359>

Die Gründe dafür sind offensichtlich: Es ist nicht bekannt, wie sich das Bakterium nach "Erfüllung seiner Aufgabe" verhalten wird. Wird es möglicherweise anfangen, andere wichtige organische Verbindungen zu zerstören? Wird es andere Mikroben verdrängen? Wird es möglicherweise zu Mutationen mit Folgen, die noch unvorhersehbarer sind, führen? So könnte ein Umweltproblem leicht durch ein anderes abgelöst werden, das viel unvorhersehbarer und zerstörerischer sein kann.

Trotz der unbestrittenen Bedeutung der Grundlagenforschung auf dem Gebiet des bakteriellen Abbaus von Kunststoffen kann diese Technologie zum gegenwärtigen Zeitpunkt nicht als wirksame, skalierbare und sichere Lösung für das Problem der Plastikverschmutzung angesehen werden.

Erforschung der Wirkung des Wasserkochens auf die Entfernung von Mikroplastik: Wirksamkeit und Risiken

Experten für Biomedizintechnik und Mikroplastikforschung von der Medizinischen Universität Guangzhou und der Universität Jinan (China) führten eine Studie durch³¹³. Das Experiment sollte die Wirkung des Wasserkochens mit hohem Kalziumsalzgehalt (hartem Wasser) auf die Entfernung von Mikroplastik erforschen.

Für die Erforschung wurden Proben von Leitungswasser unterschiedlicher Härte aus der Stadt Guangzhou entnommen. Dem Wasser wurden drei Arten von Plastikpartikeln zugesetzt: Polystyrol, Polyethylen und Polypropylen mit einer Größe von 0,1 bis 150 Mikrometern. Das Wasser wurde 5 Minuten lang gekocht und nach dem Abkühlen wurde der Restgehalt an Mikroplastik gemessen.

Beim Kochen in hartem, mit Kalziumsalzen gesättigtem Wasser bildet sich unlösliches Kalziumkarbonat (CaCO_3), der so genannte Kalk. Die Forscher stellten die Hypothese auf, dass sich Mikroplastikpartikel an Kalziumkarbonatkristalle binden und sedimentieren können, was die Verringerung der Mikroplastikkonzentration nach dem Kochen des Wassers erklärt.

Die Reinigungswirkung war am höchsten in Proben mit hohem Härtegrad (300 mg CaCO_3 pro Liter), in denen durch das Kochen bis zu 90 % Mikroplastik aus dem Wasser entfernt wurden. In Proben mit weichem Wasser (weniger als 60 mg CaCO_3 pro Liter) war die Wirkung deutlich geringer: nur 25 % der Plastikpartikel wurden entfernt.

Trotz einiger positiver Auswirkungen des Kochens von hartem Wasser kommt jedoch ein wichtiges Problem auf: die Möglichkeit, dass Mikro- und Nanoplastik in die Luft gelangt. Beim Wasserkochen entsteht Wasserdampf, mit dem Mikroplastikpartikel in die Luft gelangen. Das Einatmen solcher Partikel stellt eine größere Gefahr dar als die Aufnahme mit der Nahrung oder dem Wasser.

³¹³Yu, Z., Wang, J.-J., Liu, L.-Y., Li, Z. & Zeng, E. Y. Drinking Boiled Tap Water Reduces Human Intake of Nanoplastics and Microplastics. *Environ. Sci. Technol. Lett.* 11, 273–279 (2024). <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.4c00081>

Studien zeigen, dass Nanoplastik beim Einatmen innerhalb von zwei Stunden in das Gehirn eindringen kann, und bei der Aufnahme über den Verdauungstrakt wird Mikroplastik teilweise ausgeschieden. Das Eindringen des Plastiks ins Gehirn ist mit langfristigen Risiken verbunden, da solche Partikel aus dem Hirngewebe nicht ausgeschieden werden können.

Die Methode des Kochens von Wasser erhöht also potenziell das Risiko der Luftverschmutzung durch Mikroplastik, was für die Gesundheit des Menschen gefährlicher sein kann. Dies unterstreicht die Notwendigkeit, sicherere und wirksamere Wasserreinigungsmethoden zu entwickeln.

Pyrolyse als Methode zur Verwertung von Kunststoffen: Effizienz und Risiken

Die Pyrolyse ist eine der Technologien zur Verarbeitung von Kunststoffabfällen, die auf der thermischen Zersetzung von Kunststoffen bei hohen Temperaturen in einer Umgebung mit begrenzter Sauerstoffzufuhr beruht. Das Verfahren wird in der Regel bei Temperaturen von 300 bis 800 °C durchgeführt und erzeugt gasförmige und flüssige Kohlenwasserstoffverbindungen sowie einen festen Kohlenstoffrückstand.

Bei der Hochtemperaturzersetzung werden die Polymerketten des Kunststoffs aufgespalten, so dass ein Gemisch aus Kohlenwasserstoffen entsteht, das als Treibstoff verwendet werden kann. Diese Methode ist jedoch ebenso wie die herkömmliche Plastikverbrennung mit erheblichen Umweltrisiken aufgrund der Freisetzung von Nanoplastik verbunden.

Wenn Plastik hohen Temperaturen ausgesetzt wird, zerfällt es in kleinste Partikel, darunter auch Nanoplastik (mit einer Größe von weniger als 100 Nanometern). Diese Partikel sind so klein, dass die derzeitigen Filtersysteme sie nicht vollständig auffangen können, so dass sie in die Atmosphäre gelangen.

Bei der Verbrennung von Plastik werden auch Dioxine und Furane freigesetzt, hochgiftige Verbindungen, die bekanntermaßen karzinogene Wirkung haben³¹⁴. Die Pyrolyse und Verbrennung von Plastik zur Treibstoffherstellung birgt daher ein erhebliches Risiko für Emissionen in die Atmosphäre, was nicht nur für die Umwelt, sondern auch für die Gesundheit der Menschen eine Gefahr darstellt. Diese Methode der Plastikentsorgung kann nicht als sichere und nachhaltige Lösung für das Problem der Umweltverschmutzung angesehen werden. Die Gesundheit und das Leben der Menschen sind der wahre Preis für diesen Treibstoff.

³¹⁴Baca, D. et al. Dioxins and plastic waste: A scientometric analysis and systematic literature review of the detection methods. *Environmental Advances* 13, 100439 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2023.100439>

ANSÄTZE DER WISSENSCHAFTLICHEN GEMEINSCHAFT ALLATRA ZUR BEKÄMPFUNG DER MIKRO- UND NANOPLASTIK-PANDEMIE

Technologie der atmosphärischen Wassergeneratoren für die Säuberung des Ozeans von MNP

Die Wiederherstellung des ökologischen Gleichgewichts erfordert großflächige Einführung innovativer Technologien wie atmosphärischer Wassergeneratoren (AWG). Heute gibt es eine breite Palette solcher Geräte, von Haushalts- bis zu Industriemodellen. Diese Geräte sind in der Lage, Trinkwasser aus der Luft zu erzeugen und Schadstoffe, einschließlich Mikroplastik, wirksam zu entfernen (Abb. 124). Das Wasser kann auch mineralisiert werden, um Geschmack und Qualität zu verbessern.

Das Funktionsprinzip der Generatoren beruht auf der Kondensation der in der Luft enthaltenen Feuchtigkeit.

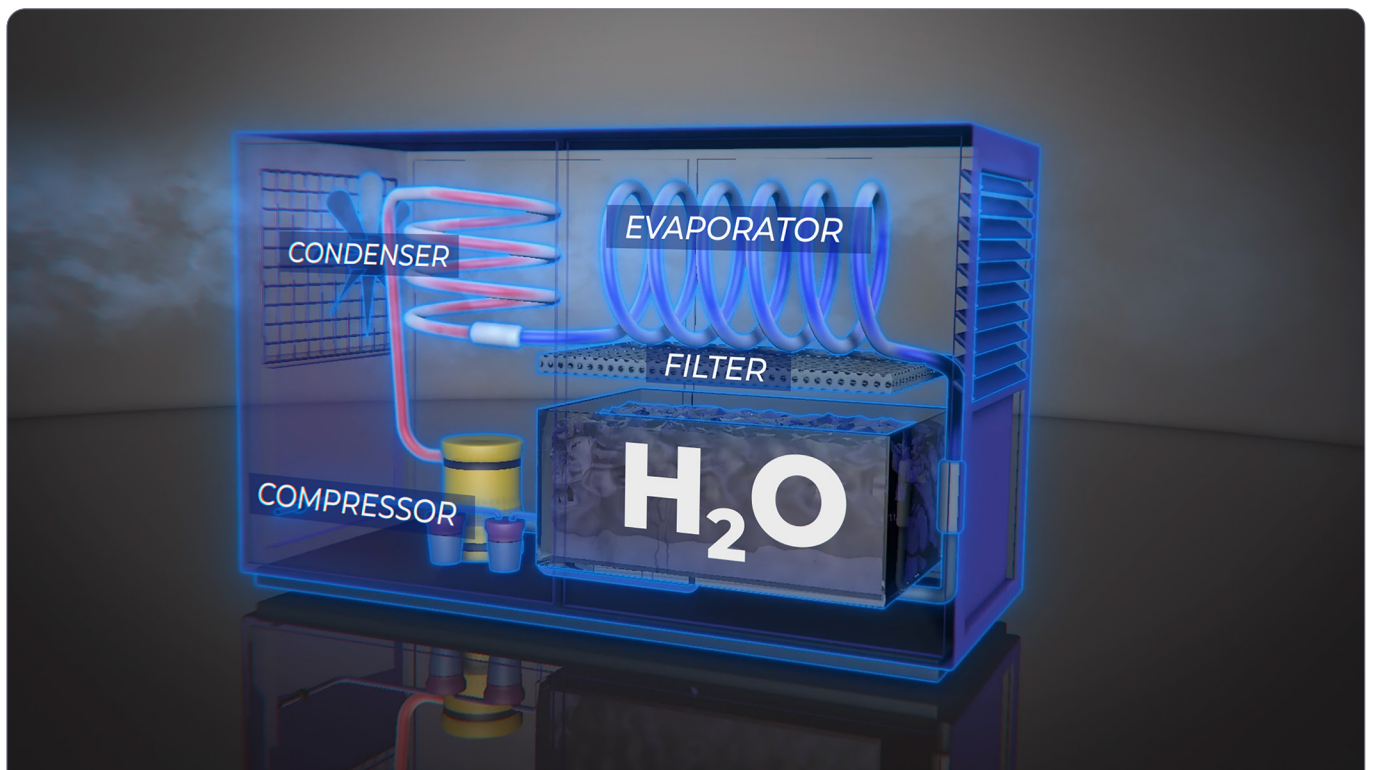


Abbildung 124. Die Abbildung zeigt eine schematische Darstellung eines atmosphärischen Wassergenerators, die seine Bestandteile und sein Funktionsprinzip veranschaulicht.

Es gibt 2 Haupttechnologien, die bei AWGs verwendet werden:

1. **Kondensationsbasierte Technologie.** Bei dieser Methode wird Umgebungsluft in das Gerät eingesaugt und einer gekühlten Oberfläche oder Kühlspirale ausgesetzt, wodurch der Dampf zu Wasser kondensiert. Dieser Prozess ist vergleichbar mit der Bildung von Feuchtigkeit auf einem kalten Gegenstand, der aus einem Gefrierschrank genommen wird. Kondensationsbasierte AWGs funktionieren am besten in warmen und feuchten Umgebungen.

2. **Adsorptionsbasierte Technologie.** Um Feuchtigkeit aus der Luft einzufangen, werden feuchtigkeitssadsorbierende Materialien wie Kieselgel, Zeolithe oder organische Metallrahmen verwendet. Das adsorbierte Wasser wird dann freigesetzt, wenn das Material erhitzt wird. Heute werden solche Anlagen lokal zur Trinkwasserversorgung der Bevölkerung eingesetzt, auch in Gebieten, die von klimabedingten Naturkatastrophen betroffen sind. Eine groß angelegte Anwendung von AWGs zur Deckung des Bedarfs sowohl der Industrie als auch der Bevölkerung könnte innerhalb weniger Jahre zu einer erheblichen Verringerung der Ozeanverschmutzung führen.

Heutzutage wird das Wasser für den häuslichen Gebrauch, einschließlich der Essenszubereitung, aus Gewässern entnommen, die oft einen hohen Gehalt an Mikro- und Nanoplastik aufweisen. Dieses Wasser trägt zur Anreicherung von Plastik im menschlichen Körper bei. Die Umstellung auf die Gewinnung von Wasser aus der Luft statt aus kontaminierten Quellen kann die Qualität des Wassers, das wir verbrauchen, erheblich verbessern.

Wiederherstellung von Ökosystemen durch natürliche Filtration und atmosphärische Wassergeneratoren

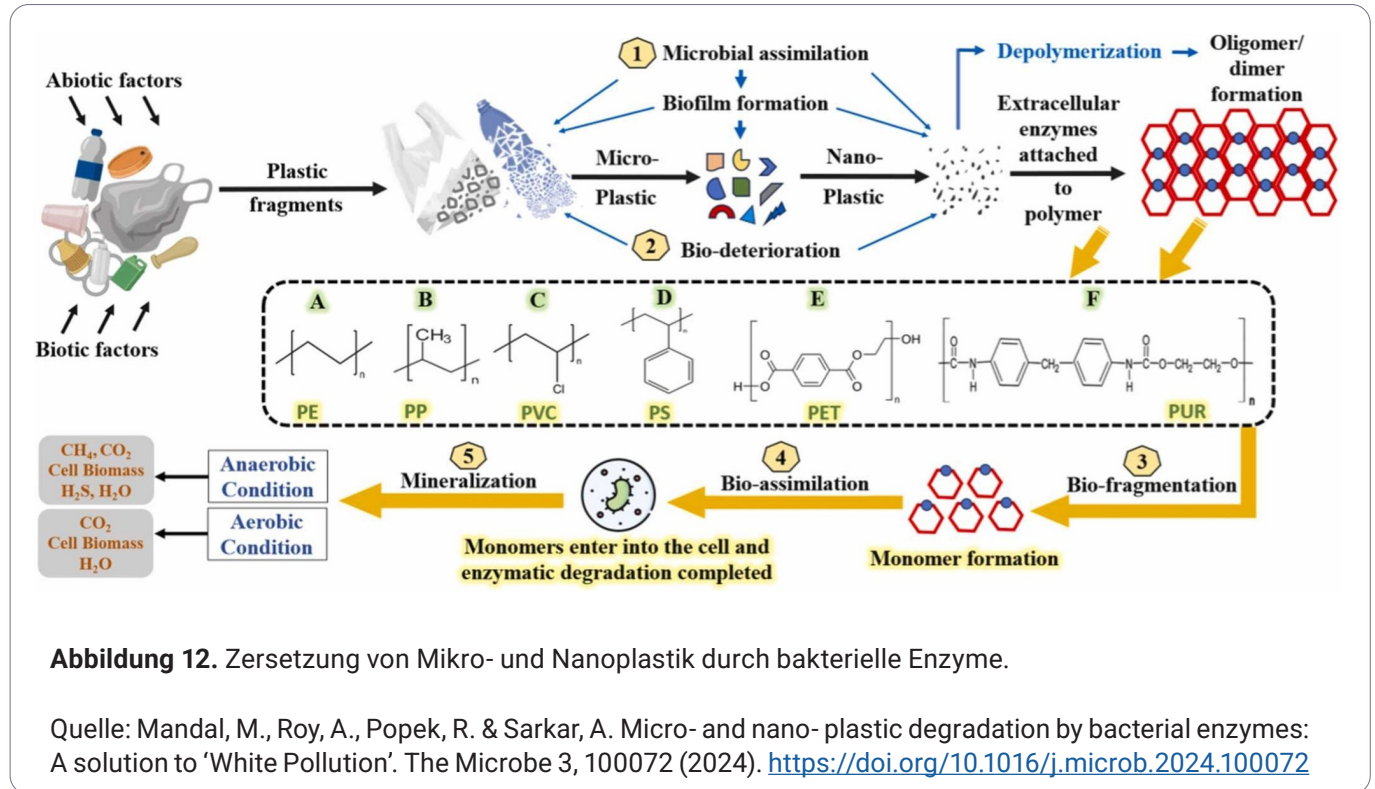
Um Mikroplastik wirksam aus verwendetem Wasser zu entfernen, müssen innovative Technologien, moderne Filtrations- und Assimilationsanlagen eingesetzt werden. Darüber hinaus ist es wichtig, die Kläranlagen so umzurüsten, dass das verwendete Wasser nach der Behandlung nicht in Gewässer, sondern in den Boden geleitet wird, da der Boden Mikroorganismen beherbergt, die von Natur aus fähig sind, Plastik abzubauen³¹⁵.

Diese Organismen unterscheiden sich deutlich von den gentechnisch veränderten oder künstlich unter Laborbedingungen erzeugten. Ihr Vorkommen in Ökosystemen ist natürlich, und sie weisen in diesen Umgebungen nicht die Merkmale invasiver Arten auf.

Forschungen³¹⁶ zeigen, dass eine Reihe im Boden lebender Mikroben, die in natürlichen Umgebungen beheimatet sind³¹⁷, eine erhebliche Effizienz beim Abbau von Polymeren³¹⁸ wie Polyethylen³¹⁹ und Polyethylenterephthalat aufweisen³²⁰. Beispielsweise wiesen die Pilze aus dem Stamm *Aspergillus oryzae* A5,1 die höchste Abbauaktivität auf: man konnte eine durchschnittliche Verringerung der Polyethylenmasse um $36,4 \pm 5,53$ % über 16 Wochen beobachten.

³¹⁵Park, S. Y. & Kim, C. G. Biodegradation of micro-polyethylene particles by bacterial colonization of a mixed microbial consortium isolated from a landfill site. *Chemosphere* 222, 527–533 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.01.159>

Die Fähigkeit von Mikroben, Polymere biologisch abzubauen, ist darauf zurückzuführen, dass sie Enzyme produzieren, die es ihnen ermöglichen, die komplexen molekularen Strukturen von Kunststoffen zu zersetzen³¹⁷.



Diese Daten, die durch experimentelle Beobachtungen bestätigt werden, weisen auf das Potenzial der Nutzung natürlicher mikrobieller Gemeinschaften zur Verringerung der Umweltverschmutzung durch Mikro- und Nanoplastik hin.

"Unter mehreren heute verfügbaren Methoden der Rekultivierung bietet die mikrobielle Rekultivierung die besten Aussichten für den Abbau oder die nachhaltige Entfernung von Mikroplastik aus der Umwelt", heißt es in der Übersichtsarbeit indischer Forscher³¹⁷.

³¹⁶Auta, H. S. et al. Enhanced microbial degradation of PET and PS microplastics under natural conditions in mangrove environment. Journal of Environmental Management 304, 114273 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.114273>

³¹⁷Mandal, M., Roy, A., Popek, R. & Sarkar, A. Micro- and nano- plastic degradation by bacterial enzymes: A solution to 'White Pollution'. The Microbe 3, 100072 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.microb.2024.100072>

³¹⁸Auta, H. S., Emenike, C. U., Jayanthi, B. & Fauziah, S. H. Growth kinetics and biodeterioration of polypropylene microplastics by Bacillus sp. and Rhodococcus sp. isolated from mangrove sediment. Marine Pollution Bulletin 127, 15–21 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.11.036>

³¹⁹Muhonja, C. N., Makonde, H., Magoma, G. & Imbuga, M. Biodegradability of polyethylene by bacteria and fungi from Dandora dumpsite Nairobi-Kenya. PLOS ONE 13, e0198446 (2018). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0198446>

³²⁰Yoshida, S. et al. A bacterium that degrades and assimilates poly(ethylene terephthalate). Science 351, 1196–1199 (2016). <https://doi.org/10.1126/science.aad6359>

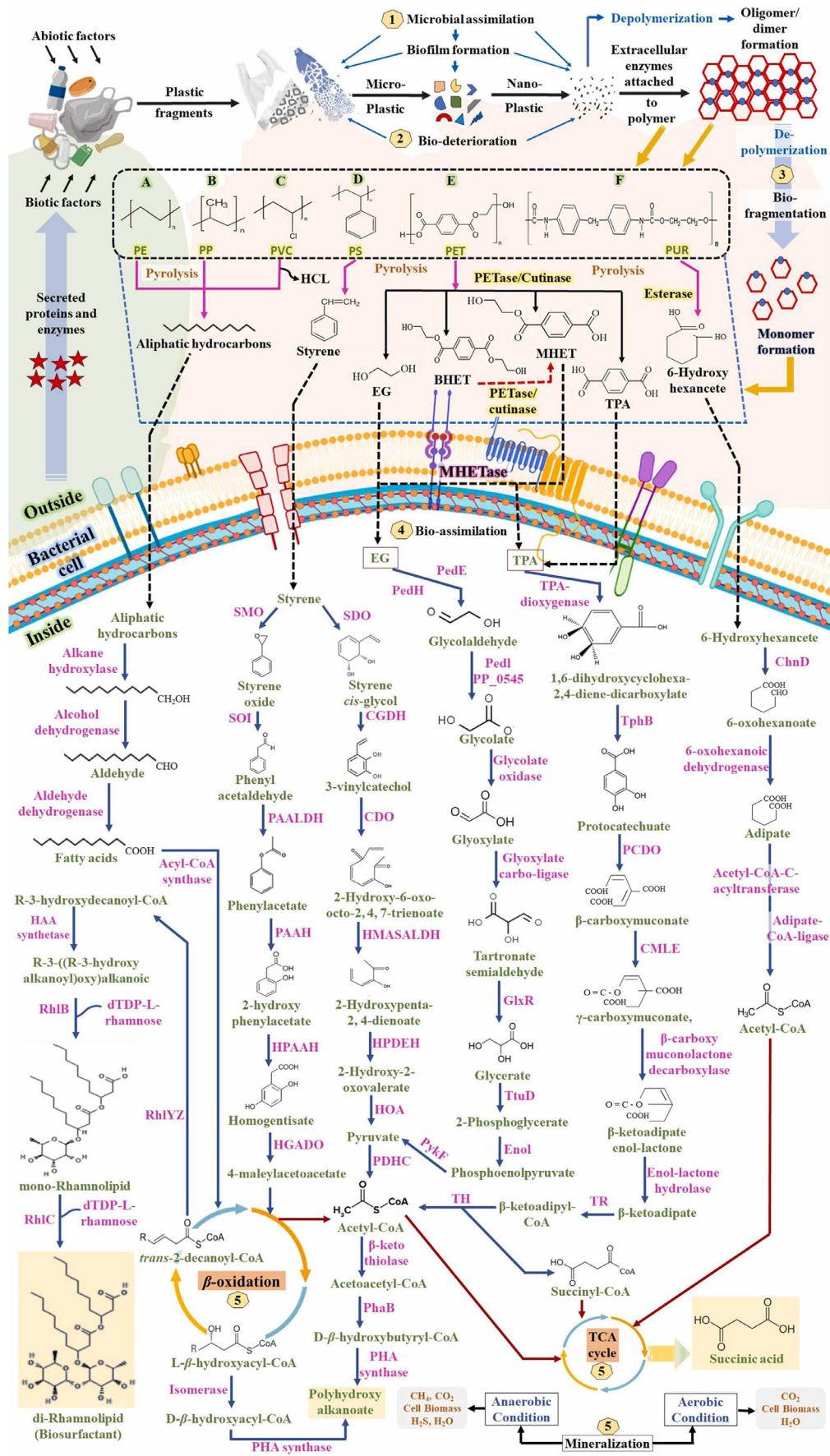


Abbildung 126. Plastikmüll zersetzt sich aufgrund verschiedener abiotischer und biotischer Faktoren in Mikro- und Nanopartikel.

Quelle: Mandal, M., Roy, A., Popek, R. & Sarkar, A. Micro- and nano- plastic degradation by bacterial enzymes: A solution to 'White Pollution'. The Microbe 3, 100072 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.microb.2024.100072>

Die Umstellung auf die Technologie der Wassergewinnung aus der Luft wird also die Qualität des Trinkwassers erheblich verbessern und in Verbindung mit der Technologie der Rekultivierung durch Mikroorganismen zu einer deutlichen Verringerung der Verschmutzung der Umwelt durch Mikro- und Nanoplastik beitragen.

In den oberen Bodenschichten bleibt die Konzentration von Plastik ebenso wie in Gewässern eine Zeit lang hoch. Wenn das Wasser jedoch in größere Tiefen vordringt, findet eine Selbstreinigung statt (Abb. 127). Im Boden lebende Mikroorganismen tragen zur Zersetzung kleiner Nanoplastikpartikel bei.

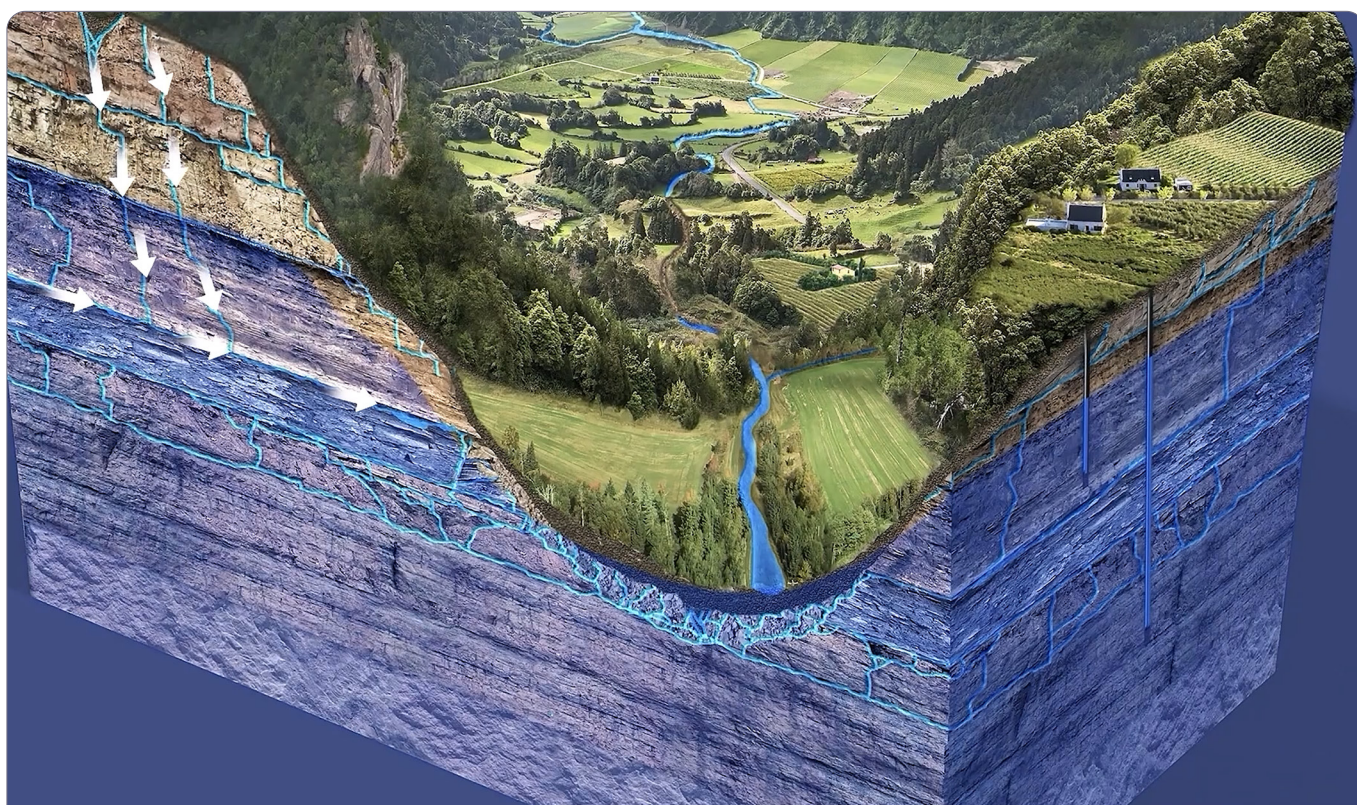


Abbildung 127. Schematische Darstellung der biologischen Reinigung von Abwasser, das durch geologische Schichten in den Boden geleitet wird. Die Pfeile zeigen den Weg des Abwassers durch die Boden- und Gesteinsschichten, wo Mikroorganismen und Filterelemente die Schadstoffe entfernen. Die Bodenschichten sind mit unterschiedlichen Farben gekennzeichnet: Erde in Braun, Sand und Kies in Grau.

Erhöhung der Menge des gereinigten und gefilterten Abwassers, das in den Boden geleitet wird, fördert das Wachstum von Mikroorganismen, einschließlich Bakterien, Pilzen und Archaeen, die eine grundlegende Rolle für einen gesunden Boden, den Nährstoffkreislauf und die Widerstandsfähigkeit des Ökosystems spielen. Das gereinigte Wasser wird dann in tiefere Schichten versickern und in die Ozeane zurückfließen.

Der Einsatz von atmosphärischen Wassergeneratoren in Wüstenregionen sowie die Rückführung von verwendetem Wasser in den Boden scheinen eine vielversprechende Lösung zur Überwindung der Wasserkrise und zur Bekämpfung der Wüstenbildung zu sein, da sie Prozesse in Gang setzen, die zur Wiederherstellung der Vegetation und der Ökosysteme beitragen³²¹. Der Einsatz von AWGs wird die Lebensqualität der lokalen Bevölkerung verbessern, indem das Problem der Trinkwasserknappheit gelöst wird.

In Kombination mit der mikrobiellen Rekultivierung kann der Einsatz von AWGs ein wichtiger Schritt in Richtung einer nachhaltigen Wasserbewirtschaftung und der Renaturierung degradierter Böden sein.

Ein vollständiger Übergang zu den AWGs schließt die Nutzung von atmosphärischem Wasser für den gesamten Bedarf der Bevölkerung, einschließlich Haushalte, Industrie und Landwirtschaft ein. Die Umsetzung dieser Technologie auf globaler Ebene wird zu einer intensiveren Verdunstung führen, was eine Abkühlung des Ozeans zur Folge haben und seine Reinigung beschleunigen wird. Darüber hinaus wird die Reduzierung überschüssiger Feuchtigkeit in der Atmosphäre durch AWGs die Intensität extremer Niederschlags- und Windereignisse verringern und die zerstörerischen Auswirkungen von Naturkatastrophen abmildern (weitere Informationen finden Sie im populärwissenschaftlichen Film "Wasser aus der Luft: Der Weg zur Rettung der Menschheit").

Herausforderungen und Risiken im Zusammenhang mit dem Einsatz von atmosphärischen Wassergeneratoren

Die globale Anwendung von AWGs hat jedoch auch eine Kehrseite. Das Hauptproblem liegt in der unzureichenden Bewertung der direkten Auswirkungen von AWGs auf die Gesundheit der Menschen. Es stimmt zwar, dass die Anwendung dieser Technologie zur Reinigung des Meerwassers und zur Verbesserung der Wärmeleitfähigkeit beitragen kann, aber eine groß angelegte Anwendung von AWGs kann auch zu einem erheblichen Anstieg der Konzentrationen von Nanoplastik in der Atmosphäre führen. Der Funktionsmechanismus von AGWs umfasst die Kondensation von Feuchtigkeit aus der Atmosphäre. Die Feuchtigkeit wird dann durch Verdunstung aus ozeanischen Gewässern wieder aufgefüllt. Da diese Gewässer hohe Konzentrationen an Mikroplastik und Nanoplastik enthalten, kann die bei diesem Prozess in die Atmosphäre abgegebene Feuchtigkeit kleinste Plastikpartikel transportieren. Daher könnte in Regionen, in denen diese Technologien eingesetzt werden, einschließlich großer Metropolen, die Konzentration von Nanoplastik in der Atemluft die gleichen Werte erreichen, wie sie derzeit in Küstenregionen zu verzeichnen sind. Dadurch besteht die Gefahr, dass die Konzentration von Nanoplastik in der Luft zunimmt, was eine Gefahr für die Gesundheit der Menschen darstellt. Das Einatmen von Nanoplastik trägt dazu bei, dass es sich im menschlichen Körper, auch im Gehirn, anreichert.

Und das ist der springende Punkt. Es ist wichtig zu verstehen, dass die ursprüngliche Idee, AWGs als Hilfsmittel zur Reinigung des Meerwassers einzusetzen, von ALLATRA-Wissenschaftlern vor über zwanzig Jahren vorgeschlagen wurde – zu einer Zeit, als die Konzentration von Mikroplastik in der Atmosphäre noch ziemlich niedrig war. Damals hätte das Einsetzen solcher Technologien tatsächlich greifbare ökologische Vorteile ohne ernsthafte Risiken für den Menschen bringen können. Heute hat sich die Situation jedoch dramatisch verändert.

³²¹Islam, W., Zeng, F., Alotaibi, M. O. & Khan, K. A. Unlocking the potential of soil microbes for sustainable desertification management. *Earth-Science Reviews* 252, 104738 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2024.104738>

Der umfangreiche Einsatz von AWGs unter heutigen Bedingungen wird im Gegenteil in erster Linie zu einem Anstieg der Konzentration von MNP in der Luft führen. Jetzt, wenn die MNP-Konzentration in der Atmosphäre bereits sehr hoch ist, könnte das Hinzufügen zusätzlicher Mengen durch AWGs für die Gesundheit der Menschen fatal werden.

So hat eine einst vielversprechende und innovative Technologie ihre Bedeutung verloren. Wir als Menschheit haben das entscheidende Zeitfenster verpasst, in dem AWGs als geeignete Lösung hätten dienen können. Der Zeitfaktor in Fragen des Klimas und der Umweltverschmutzung ist entscheidend. Was vor zwei Jahrzehnten die Gesundheit von Millionen Menschen hätte bewahren und den Planeten wirklich säubern können, stellt heute eine potenzielle Gefahr dar.

AWG ist nicht mehr eine Zukunftstechnologie, sondern eine Erinnerung an eine verpasste Möglichkeit. Unter den gegenwärtigen Bedingungen muss die Entwicklung von Verfahren zur Entfernung von MNP aus der Atmosphäre und dem menschlichen Körper Vorrang haben. Vor allem müssen wir uns Zeit verschaffen.

Innovativer wissenschaftlicher Ansatz zur Verringerung der Toxizität von Mikro- und Nanoplastik

Angesichts der vorgelegten Daten über die vielschichtigen und kumulativen Auswirkungen von Mikroplastik und insbesondere Nanoplastik auf die Gesundheit der Menschen wird deutlich: Die gegenwärtige Zivilisation steht vor einer ökologischen und biomedizinischen Herausforderung, die über die traditionellen Konzepte hinsichtlich der Umweltverschmutzung hinausgeht. Dieses Problem betrifft nicht nur einzelne Ökosysteme, sondern auch die Beständigkeit der Population des Homo sapiens auf lange Sicht.

Heute lagert sich praktisch das gesamte jemals produzierte Plastik – mehr als 9 Milliarden Tonnen – in der Umwelt an und zerfällt in Mikro- und Nanopartikel, die chemisch und biologisch hochaktiv sind. Mikro- und Nanoplastik findet sich im Boden, im Wasser, in der Luft und in allen wichtigen Nahrungsmittelkategorien – von Gemüse und Obst bis hin zu Fleisch, Fisch, Honig, Milch und Salz. Dies deutet darauf hin, dass Nanoplastik in alle Glieder der Nahrungsketten eindringt, was die herkömmliche Auffassung von "sicheren" oder "gesunden" Lebensmitteln erheblich verändert.

Der Weg, auf dem die Partikel in den menschlichen Körper gelangen, bestimmt weitgehend ihr biologisches Verhalten und ihre Verteilung. Während Plastik, das über den Verdauungstrakt aufgenommen wird, teilweise wieder ausgeschieden werden kann, ist der Weg über die Atemwege mit einem wesentlich höheren Risiko verbunden. Eingeatmetes Nanoplastik lagert sich im Lungengewebe ab, überwindet biologische Barrieren und kann das Gehirn direkt erreichen und sich dort anreichern. Gleichzeitig haben die Entgiftungsorgane (Leber, Nieren) keine wirksamen Mechanismen zur Erkennung und Eliminierung solcher Partikel.

Die höchste Konzentration an Mikroplastik wird in der Nähe von Gewässern, in Küstengebieten und in Waldgebieten festgestellt, insbesondere bei hoher Luftfeuchtigkeit und Temperatur.

In solchen Gebieten verbleibt Plastik länger, wird mit Aerosolen transportiert, verursacht oxidativen Stress bei Pflanzen und verringert die Effizienz photosynthetischer Prozesse. Ein Urlaub in Küstengebieten, der früher als gesundheitsfördernd angesehen wurde, ist heute mit einer zusätzlichen Belastung durch das Einatmen von MNP verbunden: Schätzungen zufolge kann die Menge des eingeatmeten Plastiks in der Nähe von offenen Gewässern um ein Vielfaches höher sein als in städtischen Gebieten.

Epidemiologische Untersuchungen zeigen einen starken Zusammenhang zwischen dem Grad der Verschmutzung durch MNP und der Prävalenz chronischer, nicht infektiöser Erkrankungen wie arterielle Hypertonie, Diabetes mellitus, Schlaganfall, Depression und kognitiven Störungen. Aufgrund seiner Fähigkeit, biologische Barrieren zu überwinden und sich in verschiedenen Geweben wie Gehirn, Herz, Lunge und Plazenta anzureichern, hat MNP toxische Auswirkungen auf molekularer, zellulärer und organischer Ebene. Das sich im Körper anreichende Plastik hat immunsuppressive, entzündliche und genotoxische Wirkungen. Trotz Fortschritte bei der Risikoermittlung wurden bis heute keine wirksamen Mechanismen zur Neutralisierung und Ausleitung von MNP aus dem Organismus des Menschen entwickelt.

Eine der wichtigsten Eigenschaften von Nanoplastik, die eine systemische biologische Wirkung hat, ist seine Fähigkeit, elektrostatische Ladungen aufrechtzuerhalten. Im Gegensatz zu inerten Partikeln interagiert Nanoplastik aktiv mit Zelloberflächen, Proteinen, Rezeptoren und sogar genetischem Material und bildet stabile Bindungen auf molekularer Ebene. Diese Eigenschaft verbessert nicht nur das Eindringen von Nanoplastikpartikeln durch biologische Barrieren, einschließlich der Blut-Hirn-Schranke, sondern erschwert auch ihre anschließende Ausscheidung, was zu einer längeren Verbleiben in Geweben, insbesondere im Gehirn, beiträgt. Die elektrostatische Wechselwirkung löst eine Kaskade zellulärer Störungen aus, einschließlich Membrandepolarisierung, mitochondrialer Dysfunktion, oxidativem Stress und Apoptose, was die Toxizität selbst bei minimalen Konzentrationen von Nanoplastikpartikeln deutlich erhöht.

Die Autoren dieses Berichts stellen die Hypothese auf, dass die Lösung dieses Problems – die Neutralisierung oder Abschirmung der elektrostatischen Ladung von Mikro- und Nanoplastik – ein grundlegender Durchbruch sein könnte, der die biologische Aktivität von Nanoplastik erheblich reduzieren und dessen Anreicherung in wichtigen Organen verlangsamen könnte. Die Autoren des Berichts schätzen, dass die Abschirmung oder Neutralisierung der elektrostatischen Ladung die potenziellen Gefahren von MNP um mindestens 50 % verringern könnte, weshalb dieser Forschungsbereich von entscheidender Bedeutung ist. Dies verschafft der wissenschaftlichen Gemeinschaft die notwendige Zeit, um umfassendere Ansätze zur Diagnostik, Entgiftung und Vorbeugung der durch MNP ausgelösten Effekte zu entwickeln. In dieser Hinsicht hat die Forschung in den Bereichen Biophysik, Nanomaterialien und molekulare Toxikologie Vorrang.

Verzögerungen bei der Bewältigung dieses Problems bedeutet eine Beschleunigung der Degradationsprozesse.

Parallel zu biomedizinischen Ansätzen ist eine wissenschaftlich fundierte Strategie für den sicheren Umgang mit Kunststoffabfällen dringend erforderlich. Die derzeitigen Entsorgungsverfahren sind nicht in der Lage, eine weitere Fragmentierung und die Freisetzung von Mikroplastik in die Biosphäre zu verhindern. Vor dem Hintergrund der Globalisierung muss eine internationale technologische Plattform für die Entwicklung, Umsetzung und Ausweitung sicherer Methoden des Sammelns von Plastik und dessen Recyclings entwickelt werden. Solche Maßnahmen können nur mit institutioneller Unterstützung, grenzüberschreitender Regulierung und wissenschaftlicher Diplomatie realisiert werden.

Die Sensibilisierung der wissenschaftlichen Gemeinschaft, der Vertreter des öffentlichen Gesundheitswesens und der breiten Öffentlichkeit ist von besonderer Bedeutung. Bis heute sind sich die meisten Menschen des Ausmaßes der Auswirkungen von MNP nicht bewusst und tragen weiterhin unwissentlich zu seiner Verbreitung bei.

Das Problem des Mikro- und Nanoplastiks ist also keine potentielle Bedrohung mehr, sie hat sich zum systemischen Risikofaktor entwickelt. Dieser Bereich erfordert die vorrangige Aufmerksamkeit der wissenschaftlichen Gemeinschaft und der Gesundheitsbehörden, eine Systematisierung von Daten, eine Entwicklung von Standards der Risikobewertung und eine Ausweitung der zwischenstaatlichen und internationalen Zusammenarbeit. Ein interdisziplinärer Ansatz, institutionelle Anerkennung und eine internationale Konsolidierung der Bemühungen sind erforderlich, um wirksame Lösungen zur kurz- und langfristigen Gewährleistung der biologischen Sicherheit zu entwickeln.

FAKTOR X: DIE ROLLE VON MIKRO- UND NANOPLASTIK IN DER DYNAMIK DES ZYKLUS VON NATURKATASTROPHEN

Wie im Kapitel "AUSWIRKUNGEN VON MNP AUF DAS KLIMA" erörtert, verringern Mikro- und Nanoplastikpartikel die Wärmeleitfähigkeit von Meeresgewässern, was zu einem Wärmestau im Ozean und folglich zu einem kritischen Anstieg der Ozeantemperaturen führt. Mikro- und Nanoplastik ist jedoch nicht selbst die Ursache für die Erwärmung des Ozeans.

Seit dem Frühjahr 2023 und über ein Jahr lang erreichte die durchschnittliche Oberflächentemperatur des Weltozeans täglich neue historische Höchstwerte – ein beispielloses Ereignis in der Geschichte der Beobachtungen (Abb. 128). Wissenschaftler in aller Welt äußern sich ernsthaft besorgt über diesen anomalen Anstieg.



Dr. Brian McNoldy, leitender Wissenschaftler an der School of Oceanology der Universität von Miami, stellt fest: *"Es geht nicht nur um Rekordtemperaturen des Ozeans, die wir seit einem Jahr erleben, sondern auch um das Ausmaß, in dem diese neuen Rekorde gebrochen werden. Die aktuellen Werte kommen nicht einmal annähernd an die vorherigen Rekordwerte heran"*³²².



Diese Besorgnis wird von Dr. Rob Larter, einem britischen Meeresgeophysiker, geteilt: *"Es ist wirklich alarmierend, auch weil ich von keinem Wissenschaftler eine überzeugende Erklärung dafür höre, warum es so eine große Abweichung gibt. Aber im Moment hat man den Eindruck, dass sich die Dinge viel stärker und schneller entwickeln, als wir erwartet haben"*³²³.

Nach Angaben der Klimaforschung prognostizieren die aktuellen Modelle einen allmählichen Anstieg der Oberflächentemperatur der Ozeane, aber die beobachtete Geschwindigkeit dieses Prozesses liegt weit über allen Prognosen. Wissenschaftler bestätigen zwar, dass die vom Menschen verursachte Klimaveränderung ein wichtiger Faktor ist, aber sie allein kann dieses beispiellose Phänomen nicht vollständig erklären.

³²²NBC News. '12 months of record ocean heat has scientists puzzled and concerned'. (2024)

<https://www.nbcnews.com/science/environment/oceans-record-hot-rcna143179>

³²³The New York Times. Scientists are freaking out about ocean temperatures. (2024)

<https://www.nytimes.com/2024/02/27/climate/scientists-are-freaking-out-about-ocean-temperatures.html> (Abgerufen am 01.05.2025).

Professor John Abraham von der University of St. Thomas, der sich mit der Erforschung der Meerestemperaturen befasst, wies darauf hin, dass es bisher unbekannte Faktoren gibt, die die langfristigen Veränderungen der Oberflächentemperaturen der Ozeane beeinflussen können³²². Er erklärte, dass diese Faktoren in früheren Prognosen nicht berücksichtigt wurden. Die Autoren dieses Berichts vermuten, dass es einen "Faktor X" gibt, der für eine zusätzliche Erwärmung des Ozeans und der Atmosphäre verantwortlich sein kann.

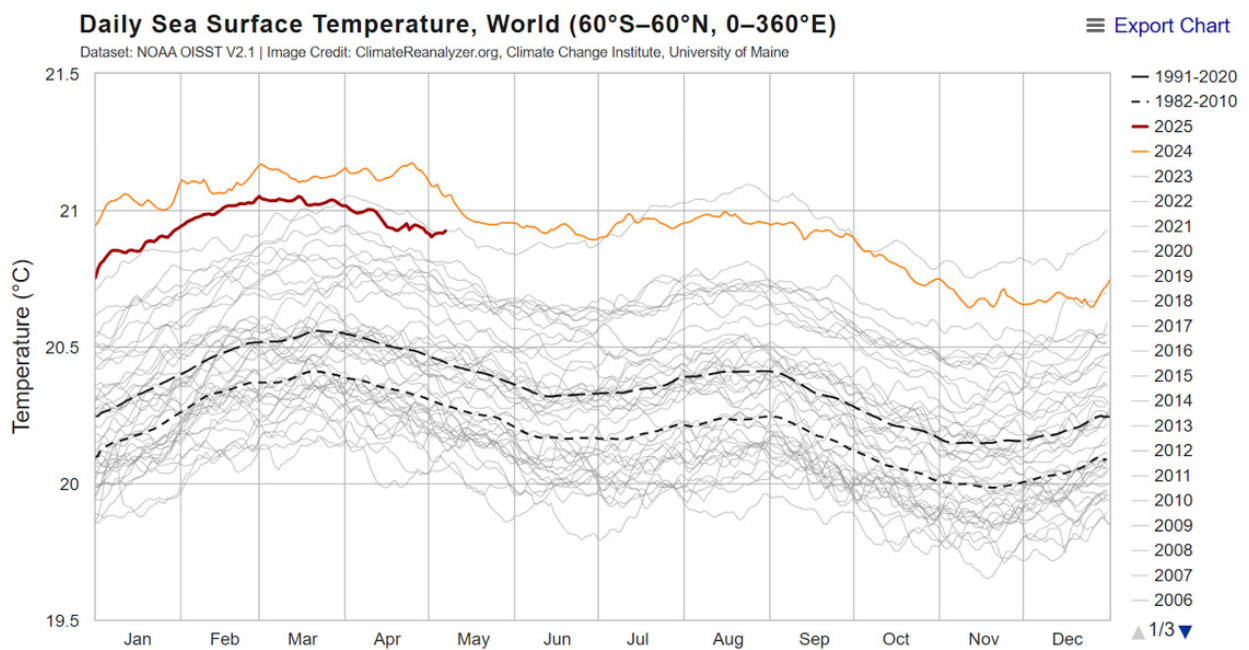


Abbildung 128. Durchschnittliche tägliche Oberflächentemperatur des Ozeans, 1981-2025.

Quelle: Dataset NOAA OISST V2.1 | Image source: [ClimateReanalyzer.org](https://climatereanalyzer.org), Climate Change Institute, University of Maine, Dataset NOAA OISST.

https://climatereanalyzer.org/clim/sst_daily/?dm_id=world2

³²²NBC News. '12 months of record ocean heat has scientists puzzled and concerned'. (2024)
<https://www.nbcnews.com/science/environment/oceans-record-hot-rcna143179>

Kann Mikro- und Nanoplastik im Ozean ein unerforschter Faktor X sein?

Die Analyse der Möglichkeit, dass Mikro- und Nanoplastik die Hauptursache für die derzeitige Erwärmung der Ozeane ist, offenbart einen gravierenden Widerspruch. Nanoplastik beeinträchtigt tatsächlich die Fähigkeit des Ozeans, Wärme abzuleiten. Allerdings erzeugt es keine Wärmeenergie, es verhindert lediglich ihre Ableitung aus dem Ozean.

In den letzten 60 Jahren haben sich die mittleren Ozeantiefen 15 Mal schneller erwärmt als in den vorangegangenen 10 000 Jahren^{324, 325} und dieser Prozess beschleunigt sich weiterhin. Diese Entwicklung nimmt von Jahr zu Jahr zu. Es ist eine enorme Energiemenge erforderlich, um die Temperatur in solchen Tiefen zu erhöhen, in die keine Sonnenstrahlen eindringen^{326, 327}.

Das Gelangen großer Mengen von Mikro- und Nanoplastik in den Ozean begann vor nicht allzu langer Zeit – vor etwa 30 Jahren, während die zunehmende Erwärmung der Ozeantiefen seit 60 Jahren beobachtet wird. Plastik kann also nicht den langfristigen und zunehmenden Erwärmungstrend in den mittleren Tiefen des Ozeans erklären, der lange vor der signifikanten Zufuhr dieser Schadstoffe in den Ozean begann. Auch die Sonneneinstrahlung kann diese Erwärmung nicht erklären, da die Sonnenstrahlen in die Tiefen bis zu 200 Metern eindringen. Das Wasser kann durch die Sonne infolge der Vermischung bis zu einer maximalen Tiefe von etwa 700 Metern erwärmt werden³²⁸. Für die Erwärmung der tieferen Schichten, in die die Sonnenstrahlen nicht eindringen, ist eine enorme Energiemenge erforderlich.

Das bedeutet, dass die im Ozean gespeicherte Wärme aus einer anderen Quelle stammen muss, und das Vorhandensein des Nanoplastiks im Wasser führt dazu, dass diese Wärme im Ozean "eingeschlossen" wird. Da die Erwärmung durch die Sonne die Gründe für den exponentiellen Anstieg der Ozeantemperaturen nicht erklärt, wurde eine Hypothese aufgestellt, dass es zusätzliche Quellen für die Ozeanerwärmung in verschiedenen Teilen des Ozeans gibt.

Vertikale Verteilung der Temperaturanomalien

Analysen der Daten des Programms Argo zu den globalen Temperaturschwankungen in verschiedenen Tiefen während der letzten zwei Jahrzehnte haben eine Reihe von Temperaturanomalien aufgedeckt, die mit dem traditionellen Modell der abwärts gerichteten Wärmeübertragung von der Oberfläche zu den tieferen Ozeanschichten nicht vereinbar sind^{329, 330}.

³²⁴Rosenthal, Y. et al. Pacific Ocean Heat Content During the Past 10,000 Years. *Science* 342, 617–621 (2013). <https://doi.org/10.1126/science.1240837>

³²⁵Columbia Climate School. 'Is Global Heating Hiding Out in the Oceans?'. (2013) <https://www.earth.columbia.edu/articles/view/3130> (Abgerufen am 10.05.2025).

³²⁶NOAA Ocean Service. 'How far does light travel in the ocean?'. (n.d.) https://oceanservice.noaa.gov/facts/light_travel.html (Abgerufen am 10.05.2025).

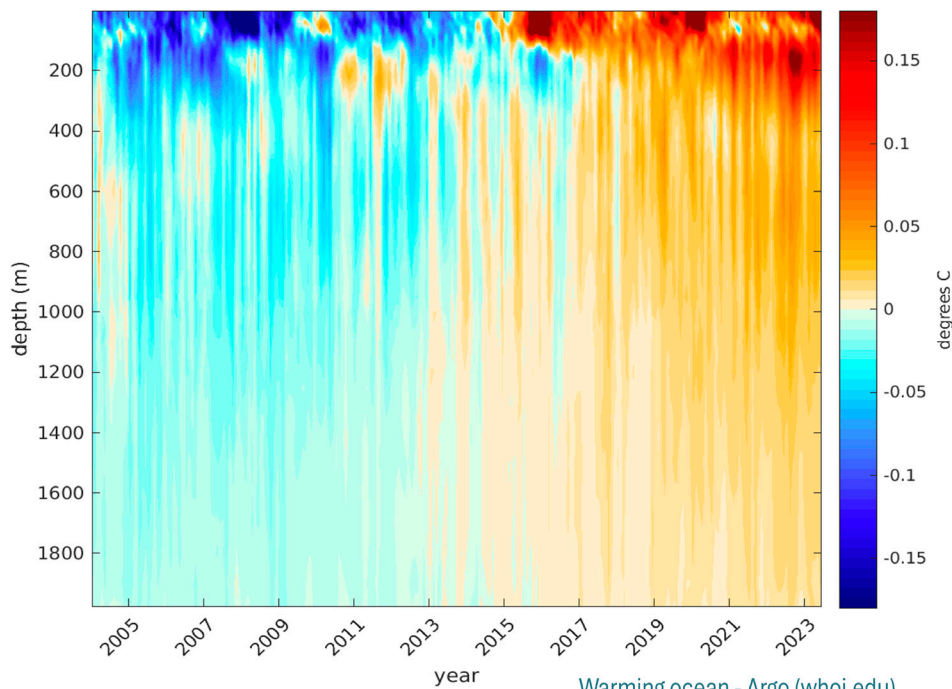
³²⁷NOAA Ocean Exploration. 'Marine Life'. (n.d.) <https://oceanexplorer.noaa.gov/explainers/marine-life.html> (Abgerufen am 10.05.2025).

³²⁸Climate.gov. 'The role of the ocean in tempering global warming'. (2014)

<https://www.climate.gov/news-features/blogs/enso/role-ocean-tempering-global-warming> (Abgerufen am 10.05.2025).

Es wurden statistisch signifikante Fälle von Temperaturgradienteninversion dokumentiert, die zeigen, dass sich wärmere Wassermassen unter relativ kühleren Oberflächenschichten befinden (Abb. 129). Eine solche Temperaturschichtung ist bei ausschließlich abwärts gerichteter Wärmeübertragung von der Oberfläche physikalisch unmöglich, da die Wärmeenergie nach den Gesetzen der Physik die dazwischen liegende kalte Schicht von oben nach unten nicht überwinden kann.

ARGO data shows temperature variations for various depths over the past 20 years.
Global average temperature anomaly



[Warming ocean - Argo \(who.edu\)](https://www.who.edu/site/argo/impacts/warming-ocean/)

Abbildung 129. Globale Anomalien der Ozeantemperatur in Tiefen von 0 bis 1.900 m seit 2004.

Quelle: Argo <https://www.who.edu/site/argo/impacts/warming-ocean/>

Neue Forschungsergebnisse von Wissenschaftlern der China Oceanology University³³¹ bestätigen die Erkenntnis, dass es thermische Anomalien in der Wassersäule gibt, die sich nicht an der Meeresoberfläche bemerkbar machen. Die Untersuchung ergab, dass ein Drittel der marinen Hitzewellen sich in keiner Weise an der Meeresoberfläche bemerkbar macht, und etwa die Hälfte von denen macht sich nicht in allen Phasen des Existenzzeitraums bemerkbar.

Die jährliche Zahl dieser Hitzewellen unter der Meeresoberfläche hat infolge der Erwärmung der Ozeane in den letzten drei Jahrzehnten erheblich zugenommen. Die Tatsache, dass ein erheblicher Teil der marinen Hitzewellen nicht an der Meeresoberfläche beobachtet wird, zeigt deutlich, dass sie nicht durch Wärme aus der Atmosphäre verursacht werden können.

³²⁹ Johnson, Gregory C., et al. "Argo-Two Decades: Global Oceanography, Revolutionized." Annual Review of Marine Science, vol. 14, 2022, pp. 379–403. <https://doi.org/10.1146/annurev-marine-022521-102008>.

³³⁰ Wong, Annie P. S., et al. "Argo Data 1999–2019: Two Million Temperature-Salinity Profiles and Subsurface Velocity Observations From a Global Array of Profiling Floats." Frontiers in Marine Science, vol. 7, 2020, article 700. <https://doi.org/10.3389/fmars.2020.00700>.

³³¹ Sun, D., Li, F., Jing, Z., Hu, S., & Zhang, B. (2023). Frequent marine heatwaves hidden below the surface of the global ocean. Nature Geoscience, 16(12), 1099–1104. <https://doi.org/10.1038/s41561-023-01325-w>

Erforschung der Wärmequellen am Meeresboden

Untersuchungen und regelmäßiges Monitoring der Temperatur am Ozeanboden sind bisher äußerst selten und begrenzt. Lange Zeit hat die Wissenschaft der Verfolgung von Veränderungen in solch extremen Tiefen keine Priorität eingeräumt. Moderne Überwachungssysteme, wie das ARGO-Bojenfeld, können nur Daten von 0,03 % der Ozeanfläche erfassen, und die meisten Bojen tauchen nur bis zur Hälfte der durchschnittlichen Tiefe, ohne den Ozeanboden zu erreichen³³².

Nur etwa 3 bis 3,5 % der Oberfläche des Ozeanbodens wurden vom Menschen tatsächlich erforscht³³³. Dies ist durch mehrere signifikante Herausforderungen bedingt. Erstens liegt der größte Teil der Weltmeere in den Tiefen zwischen 3 000 und 6 000 Metern. Die Entwicklung von Tauchbooten zur Erforschung der Tiefsee, die dem enormen Druck in einer Tiefe von bis zu 6 000 Metern standhalten können, erfordert enorme finanzielle und technische Ressourcen.

Zweitens sind die Expeditionen selbst äußerst aufwändig und kostspielig: Nur acht spezialisierte Forschungsgeräte wurden jemals für solche Erkundungen gebaut. Aus diesem Grund haben wir heute den Weltraum in einigen Aspekten sogar tiefer erforscht als die entlegensten Gebiete der Weltmeere.

Gleichzeitig wird immer deutlicher, dass geologische Prozesse am Meeresboden eine wichtige Rolle bei der Veränderung des Klimas und des Wärmehaushalts der Ozeane spielen können. Auf dem Ozeanboden gibt es Millionen einzigartiger geologischer Phänomene – Vulkane, Verwerfungen und hydrothermale Quellen mit enormer Energie. Aufgrund ihrer Unzugänglichkeit und der unzureichenden Überwachung ist das Ausmaß ihrer potenziellen Auswirkungen für die Wissenschaft jedoch immer noch ein großes Rätsel.

Gleichwohl werden weiterhin Untersuchungen des Meeresbodens durchgeführt, von denen einige auf eine Erwärmung des Wassers am Meeresboden hindeuten. So wurden beispielsweise in den beiden tiefsten Stellen des argentinischen Beckens³³⁴ in einer Tiefe von über 4 500 m signifikante Erwärmungstendenzen festgestellt: $0,02\text{ °C} \pm 0,01\text{ °C}$ pro Jahrzehnt im Zeitraum zwischen 2009 und 2019. Um ein solches Volumen von kaltem Wasser am Ozeanboden aufzuheizen, ist eine enorme Energiemenge erforderlich.

Unmittelbar vor der Küste der Westantarktis kommt es zu einer anomalen Erwärmung des Tiefenwassers des Weddellmeeres³³⁵, während die oberen 700 m des Wassers fast nicht erwärmt werden. In tieferen Schichten wird ein konstanter Temperaturanstieg beobachtet. Das Weddellmeer wird auf der einen Seite durch den Westantarktischen Graben und auf der anderen Seite durch den Mittelozeanischen Rücken mit den Südlichen Sandwichinseln umrandet.

³³²Argo Program. 'Mission'. (n.d.) <https://argo.ucsd.edu/about/mission/> (Abgerufen am 10.05.2025).

³³³Bell, Katherine L. C., et al. "How Little We've Seen: A Visual Coverage Estimate of the Deep Seafloor." *Science Advances*, vol. 11, no. 19, 2025, eadp8602. <https://doi.org/10.1126/sciadv.adp8602>.

³³⁴Meinen, C. S., Perez, R. C., Dong, S., Piola, A. R. & Campos, E. Observed Ocean Bottom Temperature Variability at Four Sites in the Northwestern Argentine Basin: Evidence of Decadal Deep/Abyssal Warming Amidst Hourly to Interannual Variability During 2009–2019. *Geophysical Research Letters* 47, e2020GL089093 (2020). <https://doi.org/10.1029/2020GL089093>

³³⁵Strass, V. H., Rohardt, G., Kanzow, T., Hoppema, M. & Boebel, O. Multidecadal warming and density loss in the Deep Weddell Sea, Antarctica. *Journal of Climate* 33, 9863–9881 (2020). <https://doi.org/10.1175/jcli-d-20-0271.1>

Die Rolle des geothermischen Wärmeflusses, tektonischer Prozesse und Vulkanismus am Meeresboden

Im Zusammenhang mit den beobachteten Erwärmungsanomalien in den tiefen Ozeanschichten, wo der Einfluss der Atmosphäre minimal ist, erscheint es logisch, den geothermischen Fluss aus dem Erdinneren als potenzielle Quelle zusätzlicher Wärme zu betrachten. Traditionell wird in Klimamodellen angenommen, dass der geothermische Fluss von unten konstant ist und etwa $0,09 \text{ W/m}^2$ (oder 90 mW/m^2) beträgt³³⁶, was um mehrere Größenordnungen geringer ist als die Sonneneinstrahlung^{337, 338}.

Die zunehmende Menge an wissenschaftlichen Daten weist jedoch auf die Bedeutung dieser unterschätzten Wärmequelle hin. Umfangreiche geothermische Untersuchungen haben gezeigt, dass der durch den Ozeanboden entweichende Wärmestrom vom Alter der ozeanischen Kruste abhängt: Er ist maximal in jungen Zonen der Ozeanbodenspreizung und minimal in alten Ozeanbecken³³⁹ (Abb. 130).

Solche lokalen Anomalien können die vertikale Verteilung der Wassertemperatur beeinflussen, die Thermokline schwächen und die Durchmischung der Wassermassen fördern, was sich auf die Zirkulation, die Bioproduktivität und sogar auf die Beständigkeit der Gletscher in zirkumpolaren Regionen auswirkt.

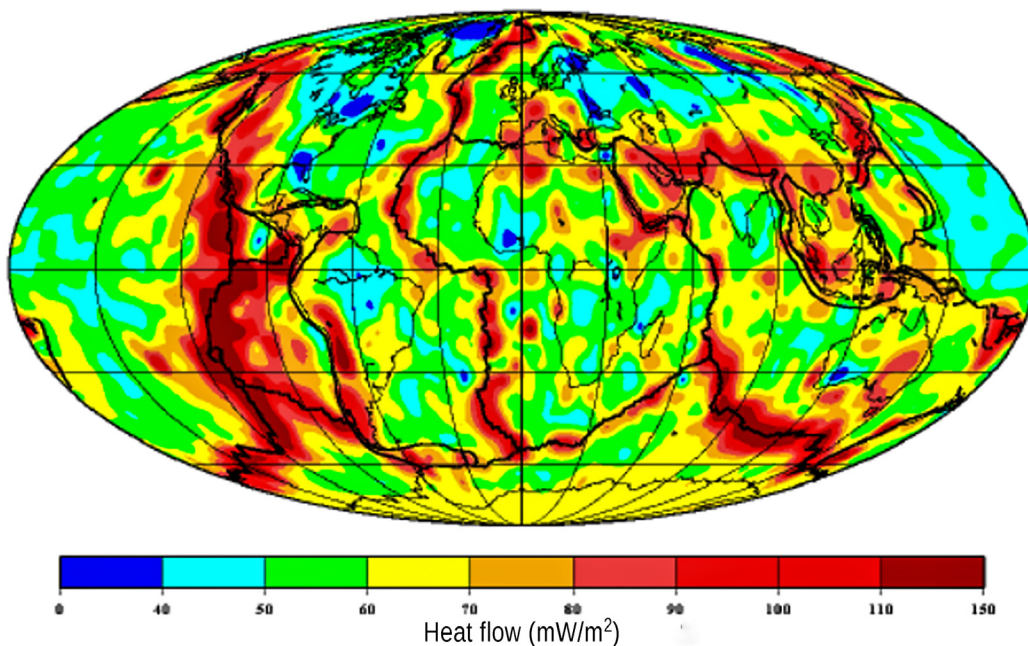


Abbildung 130. Globale Darstellung des Wärmeflusses basierend auf Beobachtungsdaten, ergänzt durch Schätzungen, die aus digitalen Karten und empirischen Korrelationen mit dem Alter abgeleitet wurden.

Illustration übernommen aus: Vieira F., Hamza V. M. Global Heat Flow: New Estimates Using Digital Maps and GIS Techniques // International Journal of Terrestrial Heat Flow and Applied Geothermics. 2018. Vol. 1, n. 1. pp. 6–13.

³³⁶Pollack, H. N., Hurter, S. J. & Johnson, J. R. Heat flow from the Earth's interior: Analysis of the global data set. Rev. Geophys. 31, 267–280 (1993).

<https://doi.org/10.1029/93RG01249>

³³⁷Kopp, G. & Lean, J. L. A New, Lower Value of Total Solar Irradiance: Evidence and Climate Significance. Geophysical Research Letters 38, L01706 (2011).

<https://doi.org/10.1029/2010GL045777>

³³⁸World Energy Council. World Energy Resources: Solar 2013. (2013) <https://www.worldenergy.org/publications> (Abgerufen am 10.05.2025).

³³⁹Khutorskoy, M. D., & Polyak, B. G. (2014). Reflection of contrasting geodynamic settings in the thermal field. Georesources, (2), 24–43.

Der geothermische Wärmefluss ist die Menge an Wärmeenergie, die aus dem Erdinneren durch eine Oberflächeneinheit pro Zeiteinheit fließt, gemessen in Milliwatt pro Quadratmeter (mW/m^2).

Während der durchschnittliche geothermische Wärmefluss für die Kontinente $40\text{--}60 \text{ mW}/\text{m}^2$ und für den Meeresgrund etwa $100 \text{ mW}/\text{m}^2$ beträgt, werden in einigen Regionen Werte gemessen, die um ein Vielfaches über diesen Werten liegen. Die extremsten Werte des geothermischen Wärmeflusses werden in tektonisch und vulkanisch aktiven Zonen beobachtet: Im mittelozeanischen Rücken und aktiven Grabenzonen kann der Wärmefluss beispielsweise $200\text{--}1\,000 \text{ mW}/\text{m}^2$ übersteigen³⁴⁰.

Besonders starker Wärmefluss wird in den Zonen hydrothermaler Felder beobachtet, d. h. in Zonen, in denen heiße Fluide unmittelbar auf den Meeresboden austreten, wo die Wassertemperaturen $350\text{--}400^\circ\text{C}$ erreichen. Diese Systeme bilden einzigartige Ökosysteme und verursachen lokale Anomalien des Wärmeflusses, die das thermische Regime des Bodenwassers erheblich beeinflussen.

Die wichtigste gut untersuchte Zone mit erhöhtem geothermischen Wärmefluss auf dem Meeresboden sind die Mittelozeanischen Rücken, bei denen es sich um Zonen lithosphärischer Plattenverschiebung handelt, in denen sich aktiv neue ozeanische Kruste bildet. Dieses globale System submariner Rücken hat eine Gesamtlänge von etwa $60\,000$ Kilometern³⁴¹ und umhüllt den gesamten Globus wie die Nähte eines Baseballs. Mittelozeanische Rücken zeichnen sich durch eine hohe Konzentration von hydrothermalen Quellen, submarinen Vulkanen und aktiven Verwerfungen aus, durch die erhebliche Mengen an Wärmeenergie aus dem Erdmantel in den Ozean fließen³⁴². In diesen Regionen ist der geothermische Wärmefluss $10\text{--}100$ -mal höher als im Durchschnitt am Meeresboden³³² und macht sie zu wichtigen Orten des Wärmeaustauschs zwischen dem Erdinneren und dem Weltozean.

Arthur Viterito, Professor an der University of Maryland, stellte fest, dass die Zahl der Erdbeben am Boden des Ozeans entlang der Mittelozeanischen Rücken seit 1995 zugenommen hat (Abb. 131)³⁴³. Mit einem Korrelationskoeffizienten von $0,7$ entspricht dieser Anstieg dem Anstieg der globalen Temperaturen. Korrelationskoeffizienten von $0,7$ entspricht dieser Anstieg dem globalen Temperaturanstieg, wobei dieser etwa zwei Jahre hinter dem Anstieg der seismischen Aktivität zurückbleibt. Die Zunahme der seismischen Aktivität in diesen Zonen steht im Zusammenhang mit dem Aufstieg des Magmas, das die neue ozeanische Kruste bildet.

³⁴⁰Polyak, B. G., & Khutorskoy, M. D. (2018). Heat flow from the Earth's interior as an indicator of deep-seated processes. *Georesources*, 20(4), Part 2, 366–376. <https://doi.org/10.18599/grs.2018.4.366-376>

³⁴¹LaFemina, P. C. Plate Tectonics and Volcanism. in *The Encyclopedia of Volcanoes* (ed. Sigurdsson, H.) 65–92 (Academic Press, 2015). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385938-9.00003-1>

³⁴²Baker, E. T. & German, C. R. On the Global Distribution of Hydrothermal Vent Fields. in *Mid-Ocean Ridges: Hydrothermal Interactions Between the Lithosphere and Oceans* (eds German, C. R., Lin, J. & Parson, L. M.) 245–266 (American Geophysical Union, 2004).

³³²Argo Program. 'Mission'. (n.d.) <https://argo.ucsd.edu/about/mission/> (Abgerufen am 10.05.2025).

³⁴³Viterito, A. 1995: An Important Inflection Point in Recent Geophysical History. *Int. J. Environ. Sci. Nat. Res.* 29, 556271 (2022). <https://doi.org/10.19080/IJESNR.2022.29.556271>

Increase in the Number of Earthquakes on the Ocean Floor Along Mid-Ocean Ridges

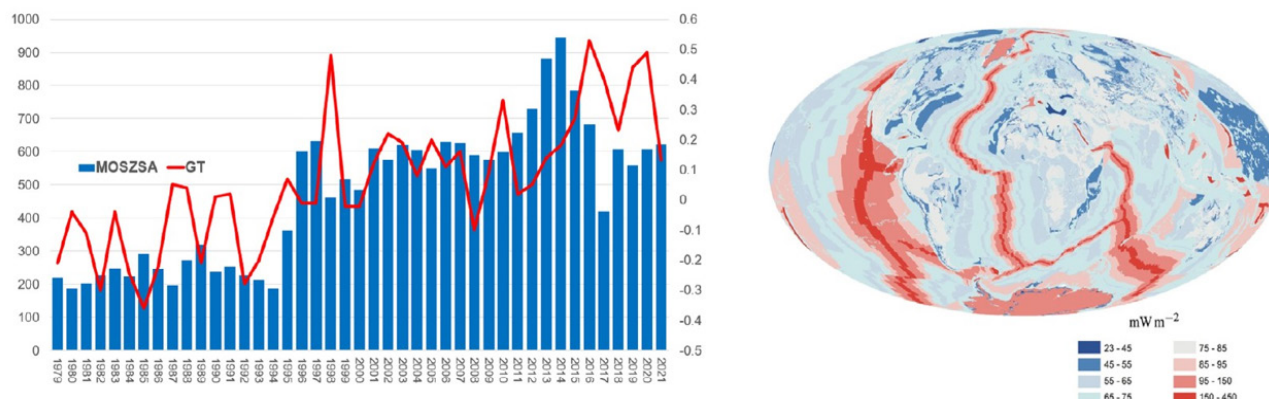


Abbildung 131. Zusammenhang zwischen dem Anstieg der Erdbebenanzahl der Stärke 4,0-6,0 am Meeresboden und der globalen atmosphärischen Temperaturen

Quelle: Viterito, A. (2022). "1995: An Important Inflection Point in Recent Geophysical History." *International Journal of Environmental Sciences & Natural Resources*, 29(5). <https://doi.org/10.19080/ijesnr.2022.29.556271>

Zwar gibt es keine direkten Messungen des Volumens des aufsteigenden Magmas, aber das globale seismische Überwachungsnetz ermöglicht es, das Ausmaß dieser Prozesse indirekt zu beurteilen, und zwar anhand der Zahl und Intensität seismischer Ereignisse, die unabhängig von der Menge der seismischen Daten zunehmen. Nach Viteritos Hypothese führt die seismische und vulkanische Aktivität entlang Mittelozeanischer Rücken zu einer Zunahme der hydrothermalen Emissionen und zur Erwärmung des Wassers, was wiederum zu Treibhausgasemissionen und zur Erwärmung der Atmosphäre führt. Prof. Viterito zeigt damit, dass sich die Ozeane nicht nur von oben erwärmen, sondern auch von unten – infolge geologischer Prozesse.

Unterwasservulkanismus kann auch eine wichtige Rolle bei der Bildung des Wärmeregimes des Ozeanbodens spielen. Derzeitige Erkenntnisse deuten darauf hin, dass etwa 75% aller Vulkanausbrüche auf der Erde unter Wasser stattfinden³⁴⁴. Früher ging man davon aus, dass Unterwassereruptionen mit einem langsamen Lavaausfluss stattfinden und explosive Eruptionen aufgrund des Drucks in der Wassersäule unmöglich seien. Daher nahm man an, dass Unterwasservulkane die Wassersäule nicht erwärmen können – die ausströmende Lava erstarrt fast sofort. Jüngste Forschungen haben jedoch unser Verständnis des Mechanismus der Ausbrüche von Unterwasservulkanen verändert.

Der Magmadruck beträgt 10 000 bis 30 000 bar, während der Druck in der Wassersäule an den tiefsten Stellen des Ozeans nur 1 000 bar beträgt. Bei einem Magmaausbruch kommt es zum sofortigen Aufkochen des Wassers und zum Zerfall von H_2O -Molekülen. Dabei bildet sich ein Gas-Wasser-Hohlraum mit einem Druck von Hunderten oder Tausenden Bar³⁴⁵, was zu starken explosiven Eruptionen führt.

³⁴⁴Crisp, J. A. Rates of magma emplacement and volcanic output. *J. Volc. Geotherm. Res.* 20, 177–211 (1984). [https://doi.org/10.1016/0377-0273\(84\)90039-8](https://doi.org/10.1016/0377-0273(84)90039-8)

³⁴⁵Lyons, J.J., Haney, M.M., Fee, D. et al. Infrasound from giant bubbles during explosive submarine eruptions. *Nat. Geosci.* 12, 952–958 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41561-019-0461-0>

Bei solchen Eruptionen werden Tephra und Hydrotherme freigesetzt – riesige Ströme überhitzten Wassers, deren Volumen bis zu 40 Millionen olympischen Schwimmbecken entsprechen kann. Solche Emissionen können das thermische Gleichgewicht des Ozeans nicht nur lokal, sondern auch global stören.

Im Rahmen einer Forschung der Universität Leeds wurden kilometerlange Felder vulkanischer Tephra auf dem Grund des Pazifischen Ozeans entdeckt³⁴⁶, was starke explosive Unterwassereruptionen bestätigt. Ein einziger Ausbruch dieser Art kann etwa 1 Terrawatt thermischer Energie freisetzen, was doppelt so viel ist wie der jährliche Energieverbrauch der Vereinigten Staaten.



Der Beitrag explosiver Eruptionen zur Erwärmung der Ozeane wird von Professor Bernd Zimanowski von der Julius-Maximilians-Universität in Bayern³⁴⁷ bestätigt:

*"Bei submarinen Lava-Eruptionen dauert es sehr lange, bis die Wärme der Lava auf das Wasser übertragen wird. Bei explosiven Eruptionen wird das Magma aber in feinste Partikel zerrissen. Das kann vielleicht so starke Wärmepulse erzeugen, dass die thermischen Ausgleichsströmungen in den Ozeanen lokal oder sogar global gestört werden"*³⁴⁸.

Heutigen Schätzungen zufolge liegt die Zahl der hydrothermal aktiven Unterwasserformationen zwischen 100 Tausend und 10 Millionen^{349, 350}, was darauf hindeutet, dass der Beitrag der hydrothermalen Aktivität zur Wärmebilanz des Ozeans wahrscheinlich unterschätzt wird. Explosive Magmaeruptionen führen zu starken thermischen Impulsen, die die Wärmeströme in den Ozeanen lokal unterbrechen können. Angesichts der Größe des Ozeans reichen jedoch selbst solch starke Unterwassereruptionen nicht aus, um ihn zu erwärmen. Vulkane sind nicht gleichmäßig verteilt, ihre Eruptionen sind episodisch, und ihre Energie reicht nicht aus, um den gesamten Ozean zu erwärmen. Aber sie kann ausreichen, um örtlich begrenzte Hitzewellen im Ozean zu erzeugen.

Ein besonderes Beispiel für solche lokalen thermischen Anomalien sind die marinen Hitzewellen, d. h. lokale Regionen im Ozean, in denen das Wasser über lange Zeit anormal warm bleibt. Man bezeichnet sie auch als Blobs. Dabei handelt es sich um riesige Bereiche des Oberflächenwassers mit ungewöhnlich hohen Temperaturen. Seit 1995 hat die Zahl der Blobs erheblich zugenommen³⁵¹ und sie treten in verschiedenen Teilen des Weltozeans immer häufiger auf, unter anderem vor den Küsten Neuseelands, Südwestafrikas und im südlichen Teil des Indischen Ozeans.

³⁴⁶Pegler, S.S., Ferguson, D.J. Rapid heat discharge during deep-sea eruptions generates megaplumes and disperses tephra. Nat Commun 12, 2292 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41467-021-22439-y>

³⁴⁷Dürrig, T., White, J.D.L., Murch, A.P. et al. Deep-sea eruptions boosted by induced fuel–coolant explosions. Nat. Geosci. 13, 498–503 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41561-020-0603-4>

³⁴⁸University of Würzburg. How Volcanoes Explode in the Deep Sea. (2020) <https://www.uni-wuerzburg.de/en/news-and-events/news/detail/news/how-volcanoes-explode-in-the-deep-sea> (Abgerufen am 01.05.2025).

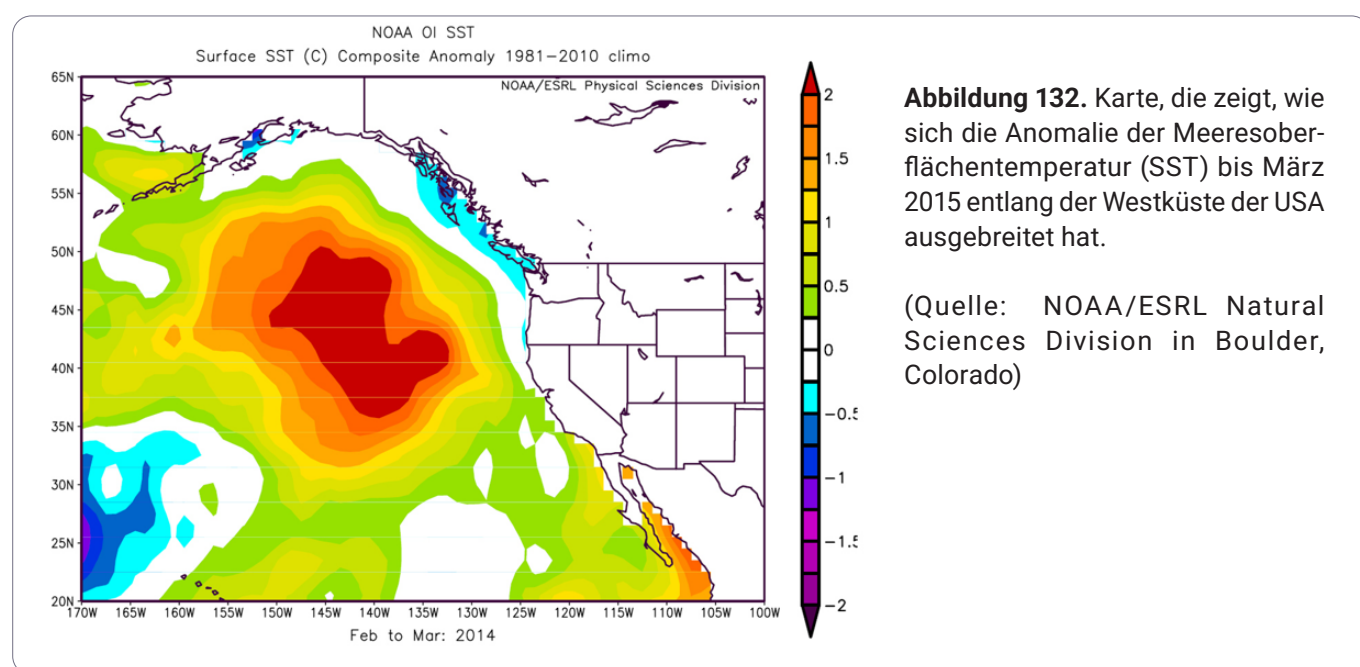
³⁴⁹Baker, E. T. et al. How many vent fields? New estimates of vent field populations on ocean ridges from precise mapping of hydrothermal discharge locations. Earth Planet. Sci. Lett. 449, 186–196 (2016). <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2016.05.031>

³⁵⁰Science News Explores. Seafloor hosts surprising number of deep-sea vents. (2016) <https://www.snexplores.org/article/seafloor-hosts-surprising-number-deep-sea-vents> (Abgerufen am 10.05.2025).

³⁵¹Laufkötter, C., Zscheischler, J. & Frölicher, T. L. High-impact marine heatwaves attributable to human-induced global warming. Science 369, 1621–1625 (2020). <https://doi.org/10.1126/science.aba0690>

Einer der bekanntesten und größten Blobs bildete sich 2013 im Golf von Alaska und breitete sich rasch über den Pazifik aus. Seine Fläche betrug mehr als 4 Mio. km² (was größer als die Gesamtfläche Indiens ist) und in einigen Bereichen lagen die Meeresoberflächentemperaturen um 5 bis 6 Grad Celsius über dem Durchschnitt (Abb. 132). Der Blob trieb durch den Ozean über einen Zeitraum von drei Jahren von Alaska bis Mexiko und hielt sich dort bis 2016. Dieses Phänomen hatte negative Auswirkungen auf das marine Ökosystem und das Klima in der Region.

Die Ursache für den Blob waren höchstwahrscheinlich aktiver Vulkanismus vor der Küste Alaskas sowie der Magma-Plume Cobb³⁵², wodurch sich das Wasser am Meeresboden erwärmte, das später in großen Mengen an die Oberfläche stieg.



Östlich von Neuseeland, im Südpazifik, erschien im Dezember 2019 ein Blob, dessen Temperatur an bestimmten Tagen 6 °C über dem Durchschnitt lag. Der Blob hatte eine Fläche von über 1 000 000 km², was 1,5 mal der Fläche von Texas und 4 mal der Fläche von Neuseeland entspricht (Abb. 133). Berichten zufolge handelte es sich um den größten Blob in den Weltmeeren zu dieser Zeit. Außerdem war der Blob das zweitgrößte Ereignis, das jemals in dieser Region beobachtet wurde.

³⁵²Chadwick, J., Keller, R., Kamenov, G., Yogodzinski, G. & Lupton, J. The Cobb hot spot: HIMU-DMM mixing and melting controlled by a progressively thinning lithospheric lid. *Geochem. Geophys. Geosyst.* 15, 3107–3122 (2014). <https://doi.org/10.1002/2014gc005334>

66

James Renwick, Professor für Geographie, Ökologie und Geowissenschaften an der Victoria University of Wellington, stellte fest:

*"Dies ist der größte Fleck anomaler Erwärmung auf dem Planeten, in dem eine überdurchschnittliche Erwärmung zu verzeichnen ist. In der Regel beträgt die Wassertemperatur dort etwa 15 °C, aber jetzt liegt sie bei etwa 20 °C"*³⁵³.

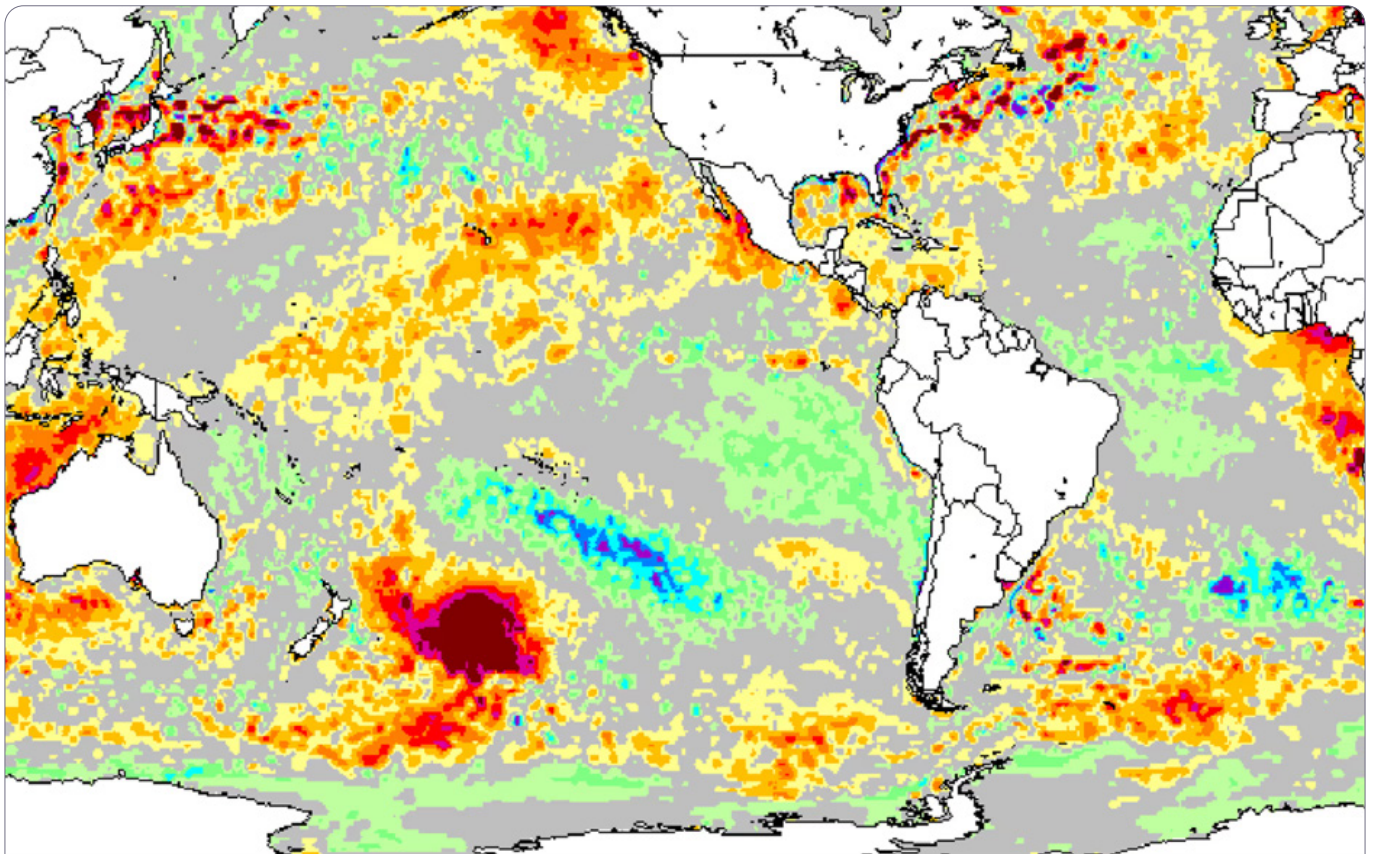


Abbildung 133. Anomalie der Meeresoberflächentemperatur im Südpazifik am 25. Dezember 2019.

Quelle: The Guardian. Hot blob: vast patch of warm water off New Zealand coast puzzles scientists. (2019)
<https://www.theguardian.com/world/2019/dec/27/hot-blob-vast-and-unusual-patch-of-warm-water-off-new-zealand-coast-puzzles-scientists> (Abgerufen am 11.05.2025).

Der wahrscheinliche Grund für die Bildung dieses Blobs war die Aktivität des uralten vulkanischen Plateaus vor der Küste Neuseelands³⁵⁴.

³⁵³The Guardian. Hot blob: vast patch of warm water off New Zealand coast puzzles scientists. (2019)
<https://www.theguardian.com/world/2019/dec/27/hot-blob-vast-and-unusual-patch-of-warm-water-off-new-zealand-coast-puzzles-scientists>
 (Abgerufen am 10.05.2025).

³⁵⁴Gase, A. et al. Subducting volcanoclastic-rich upper crust supplies fluids for shallow megathrust and slow slip. Sci. Adv. 9, eadh0150 (2023).
<https://doi.org/10.1126/sciadv.adh0150>

Ein weiteres konkretes Beispiel für den Einfluss der geothermischen Wärme auf den Temperaturanstieg der ozeanischen Gewässer aufgrund magmatischer Prozesse sind die Erwärmungsanomalien in den arktischen Meeren entlang der sibirischen Küste.

Laut einer Forschungsstudie aus dem Jahr 2022 erwärmt sich die sibirische Arktis fast viermal so schnell wie der globale Durchschnitt – ein Wert, der deutlich über den bisherigen Klimamodellen liegt und die Wissenschaftler völlig überrascht hat³⁵⁵ (Abb. 134).

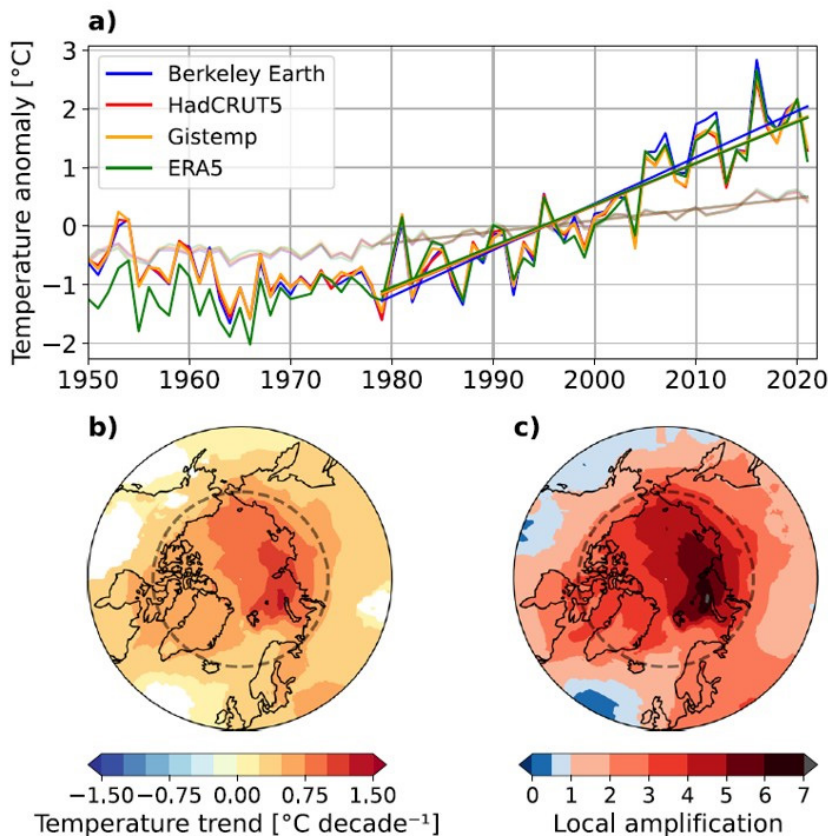


Abbildung 134. Entwicklung der Durchschnittsjahrestemperatur in der Arktis.

(a) Anomalien der Durchschnittsjahrestemperatur in der Arktis 66,5°-90°N (in dunklen Farben dargestellt) und weltweit (in helleren Farben dargestellt) für den Zeitraum 1950-2021, abgeleitet aus verschiedenen Beobachtungsdaten. Die Temperaturanomalien werden im Verhältnis zum Standardzeitraum von 30 Jahren 1981-2010 berechnet. Die gestrichelte Linie in den Diagrammen (b) und (c) kennzeichnet den Polarkreis (66,5°N).

Quelle: Rantanen, M., Karpechko, A.Y., Lipponen, A. et al. The Arctic has warmed nearly four times faster than the globe since 1979. *Commun Earth Environ* 3, 168 (2022).
<https://doi.org/10.1038/s43247-022-00498-3>

Genau in dieser Region der Welt, im Gebiet der Taimyr-Halbinsel, aktiviert sich der Sibirische Magma-Plume und steigt in demselben Gebiet rapide an, in dem vor 250 Millionen Jahren der Sibirische Trapp ausbrach. Und alles deutet darauf hin, dass der Plumekopf jetzt aktiv den ostsibirischen Kraton erodiert und das Magma sich unter seinem gesamten Gebiet ausbreitet (Abb. 135). Vorläufigen Schätzungen zufolge könnte die Fläche der sich ausbreitenden Magmaströme unter Sibirien einen Durchmesser von 2 500 bis 3 000 km erreichen, was mit der Fläche Australiens vergleichbar ist.

³⁵⁵Rantanen, M., Karpechko, A.Y., Lipponen, A. et al. The Arctic has warmed nearly four times faster than the globe since 1979. *Commun Earth Environ* 3, 168 (2022).
<https://doi.org/10.1038/s43247-022-00498-3>

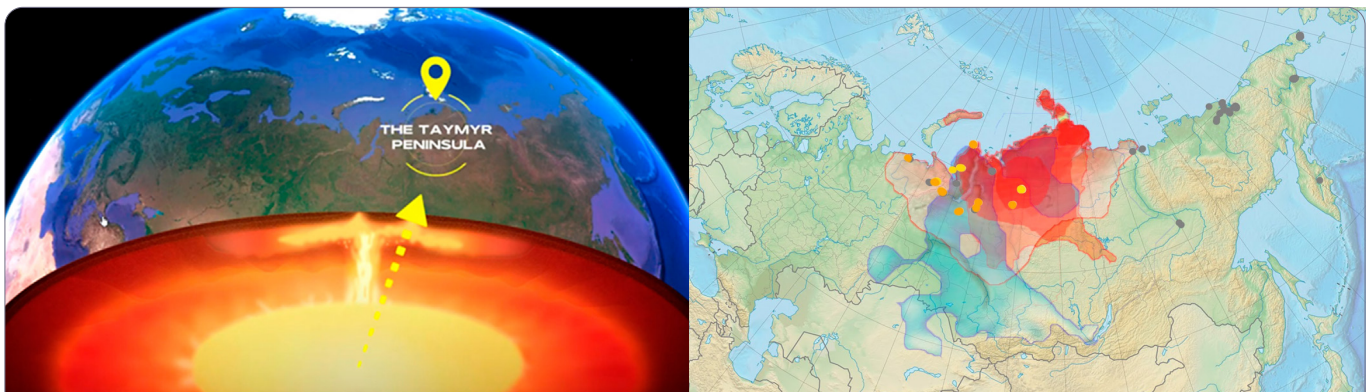


Abbildung 135. Die Lage des Plumes nach den Ergebnissen verschiedener Untersuchungen.

Es ist wichtig anzumerken, dass eine solch intensive Erwärmung der arktischen Meere gerade im Gebiet der Taymyr-Halbinsel auftritt. Eine solche Anomalie in der Ozeanzone Sibiriens kann dadurch erklärt werden, dass die ozeanische Kruste dünner ist und Wärme schneller leitet, und dass Wasser eine höhere Wärmekapazität als die Atmosphäre hat. Deshalb speichert das Ozeanwasser die Wärme des aufsteigenden Sibirischen Plumes, obwohl sich dieser unter der Kontinentalkruste in relativer Entfernung zur Küstenlinie befindet.



Weitere Informationen über den Sibirischen Magma-Plume und seine Auswirkungen auf das Klimasystem sowie über die Gefahren, die von dieser geologischen Struktur ausgehen, und über die Lösungswege des Problems, finden Sie in dem Bericht

**"ÜBER DEN DROHENDEN DURCHBRUCH DES
MAGMAPLUMES IN SIBIRIEN SOWIE ÜBER
DIE LÖSUNGSWEGE FÜR DIESES PROBLEM".**

Die Gesamtheit all dieser Daten deutet darauf hin, dass geologische Prozesse am Meeresboden ein wesentlicher Faktor für die globale Erwärmung sind. Die Zunahme seismischer und vulkanischer Aktivitäten am Meeresboden korreliert mit dem Anstieg der globalen Temperaturen, was auf eine mögliche Ursache-Wirkungs-Beziehung hinweist. Unterwassereruptionen, insbesondere explosiver Art, können starke thermische Impulse erzeugen, die den lokalen und sogar den globalen Wärmehaushalt stören.

Hydrothermale Systeme und vulkanische Prozesse bilden großräumige Anomalien wie z. B. Blobs, die sich deutlich auf marine Ökosysteme und das Klima auswirken, während magmatische Prozesse eine anomale Erwärmung der Arktischen Meere verursachen. Der Ozean wird also nicht nur von oben, unter dem Einfluss der Atmosphäre, aufgeheizt, sondern auch von unten, durch dynamische Prozesse im Erdinneren. Dies erfordert eine erneute Beurteilung der bestehenden Klimamodelle und eine eingehendere Erforschung der geologischen Unterwasseraktivität als wichtige Komponente der gesamten Wärmebilanz des Planeten.

Eine Frage ist jedoch von zentraler Bedeutung: Warum gibt es derzeit eine Zunahme magmatischer und tektonischer Prozesse auf der Erde?

Kurze Beschreibung des geodynamischen Modells der Klimaveränderung auf der Erde in der gegenwärtigen Zeitperiode

In den letzten 30 Jahren erlebt die Erde eine beispiellose und synchrone Zunahme nicht nur der Klimaveränderungen, sondern auch der Anomalien in allen Schichten des Planeten und seiner geophysikalischen Parameter. Diese Veränderungen nehmen exponentiell zu. Eine umfassende Analyse wissenschaftlicher Daten zeigt, dass der Hauptgrund dafür astronomische Zyklen sind, die sich alle 12 000 Jahre wiederholen.

Die Hypothese über den Einfluss kosmischer Faktoren wird dadurch bestätigt, dass ähnliche Veränderungen simultan auf der Erde und auf den anderen Planeten des Sonnensystems sowie ihren Trabanten stattfinden. So nehmen beispielsweise auf Uranus³⁵⁶, Jupiter³⁵⁷ und Venus³⁵⁸ die Windgeschwindigkeiten zu und die Hurrikanzonen weiten sich aus. Auf dem Mars schmelzen an den Polen die Eiskappen³⁵⁹ und die vulkanische Aktivität auf Venus³⁶⁰ und Mars nimmt weiter zu³⁶¹. Darüber hinaus nehmen die Beben auf dem Mars, einem toten Planeten, zu³⁶², was auf eine anomale Aktivität in seinem Inneren hindeutet.

Kritische Veränderungen im Erdsystem begannen sich 1995 zu manifestieren, als bedeutende geophysikalische Anomalien wie eine dramatische Beschleunigung der Erdrotation, eine Verschiebung der Erdachse und der Beginn der Drift des magnetischen Nordpols festgestellt wurden (Abb. 136).

³⁵⁶de Pater, I. et al. Record-breaking storm activity on Uranus in 2014. *Icarus* 252, 121-128 (2015). <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2015.01.008>

³⁵⁷Wong, M. H. et al. Evolution of the Horizontal Winds in Jupiter's Great Red Spot From One Jovian Year of HST/WFC3 Maps. *Geophysical Research Letters* 48, e2021GL093982 (2021). <https://doi.org/10.1029/2021GL093982>

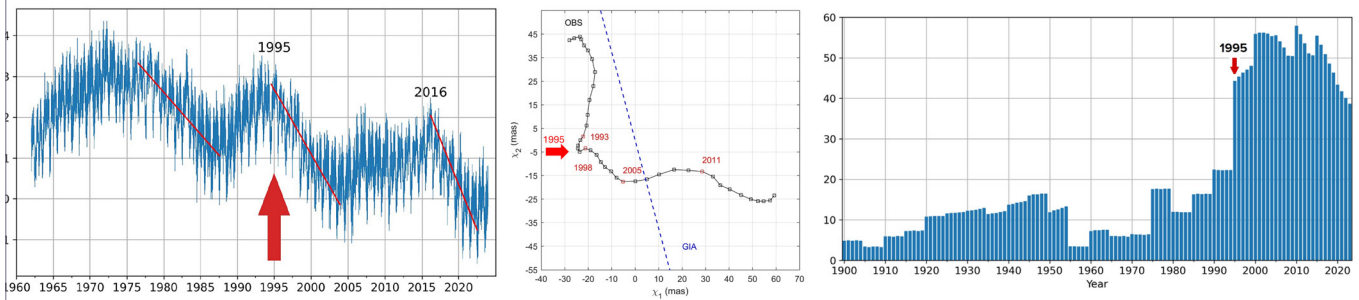
³⁵⁸Khatuntsev, I. V. et al. Cloud level winds from the Venus Express Monitoring Camera imaging. *Icarus* 226, 140–158 (2013). <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2013.05.018>

³⁵⁹Sori, M. M. & Bramson, A. M. Water on Mars, With a Grain of Salt: Local Heat Anomalies Are Required for Basal Melting of Ice at the South Pole Today. *Geophysical Research Letters* 46, 1222–1231 (2019). <https://doi.org/10.1029/2018GL080985>

³⁶⁰Encrenaz, T. et al. HDO and SO₂ thermal mapping on Venus - IV. Statistical analysis of the SO₂ plumes. *A&A* 623, A70 (2019). <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201833511>

³⁶¹Broquet, A. & Andrews-Hanna, J. C. Geophysical evidence for an active mantle plume underneath Elysium Planitia on Mars. *Nat Astron* (2022). [doi:10.1038/s41550-022-01836-3](https://doi.org/10.1038/s41550-022-01836-3) <https://doi.org/10.1038/s41550-022-01836-3>

³⁶²Fernando, B. et al. A Tectonic Origin for the Largest Marsquake Observed by InSight. *Geophysical Research Letters* 50, e2023GL103619 (2023). <https://doi.org/10.1029/2023GL103619>



Eine plötzliche und drastische Beschleunigung der Planetenrotation, aufgezeichnet durch das Erdorientierungszentrum des Pariser Observatoriums.

Quelle:

IERS Earth Orientation Center of the Paris Observatory. Length of Day – Earth orientation parameters. https://datacenter.iers.org/singlePlot.php?plot-name=EOPC04_14_62-NOW_IAU1980-LOD&id=223

Anomale Veränderungen der Erdrotationsachse: eine starke Änderung der Driftrichtung und die Zunahme der Geschwindigkeit ihrer Bewegung um das 17-fache.

Quelle: Deng, S., Liu, S., Mo, X., Jiang, L., & Bauer Gottwein, P. Polar Drift in the 1990s Explained by Terrestrial Water Storage Changes. Geophysical Research Letters, 48, e2020GL092114 (2021). <https://doi.org/10.1029/2020gl092114>

Die Drift des magnetischen Nordpols, der sich zuvor mit einer Geschwindigkeit von 10 km/Jahr bewegte, beschleunigte sich plötzlich auf 55 km/Jahr und änderte seine Trajektorie in Richtung der Taimyr-Halbinsel in Sibirien.

Quelle:

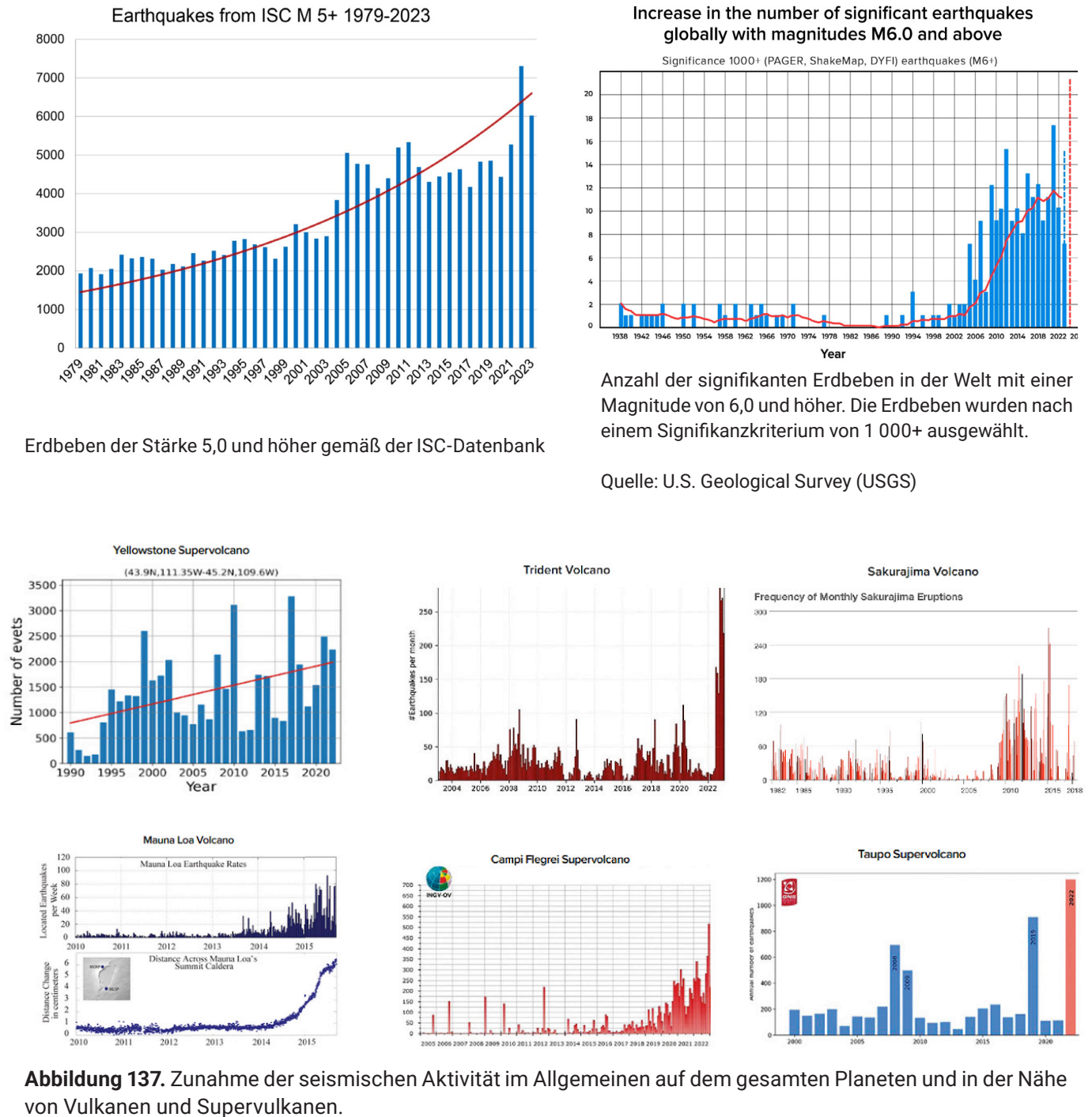
NOAA data on the position of the North Magnetic Pole <https://www.ncei.noaa.gov/products/wandering-geomagnetic-poles>

Abbildung 136. Veränderungen der geophysikalischen Parameter der Erde im Jahr 1995.

Diese Anomalien deuten auf tiefgreifende Veränderungen im Erdkern hin, die Quadrillionen mal mehr Energie erfordern, als die Menschheit in ihrer gesamten Zivilisationsgeschichte erzeugt hat. Die Ursache ist ein äußerer kosmischer Einfluss, der sich auf den Erdkern sowie auf die Kerne der anderen Planeten im Sonnensystem auswirkt. Dieser äußere Einfluss verstärkt das Schmelzen des Erdmantels, was den Aufstieg des Mantelmaterials in Richtung der Erdoberfläche bewirkt. Dadurch wird eine Kettenreaktion in Gang gesetzt: Vulkanische und seismische Aktivitäten nehmen zu, die Erwärmung des Erdinneren steigt, und Naturkatastrophen verstärken sich auf der ganzen Welt.

Seit 1995 ist ein deutlicher Anstieg der seismischen Aktivität zu verzeichnen, der sich durch eine Zunahme der Häufigkeit, Stärke und Energie der Erdbeben auszeichnet. Dieser Trend wird sowohl auf dem Land als auch in den Ozeanen beobachtet, auch in Regionen, in denen zuvor praktisch keine seismische Aktivität registriert wurde. All dies weist auf das globale Ausmaß der Veränderungen hin. Es ist wichtig festzustellen, dass der Anstieg der Zahl der Erdbeben der Stärke 5,0 und höher nicht auf eine erhöhte Empfindlichkeit der Messsysteme oder Sensoren zurückzuführen ist, sondern tatsächlich Veränderungen in der Geodynamik der Erde widerspiegelt. Gemäß den zusammengefassten Daten des Internationalen Seismologischen Zentrums hat die Anzahl solcher Erdbeben in den letzten 25 Jahren erheblich zugenommen und nimmt weiter zu (Abb. 137).

Auch in der Nähe von Vulkanen, einschließlich Supervulkane wie Yellowstone in den USA, die Phlegräischen Felder in Italien³⁶³ und Taupo in Neuseeland³⁶⁴ sowie andere Vulkane, die in früheren 12 000-Jahres-Zyklen ausbrachen, ist eine zunehmende seismische Aktivität zu beobachten (Abb. 137).



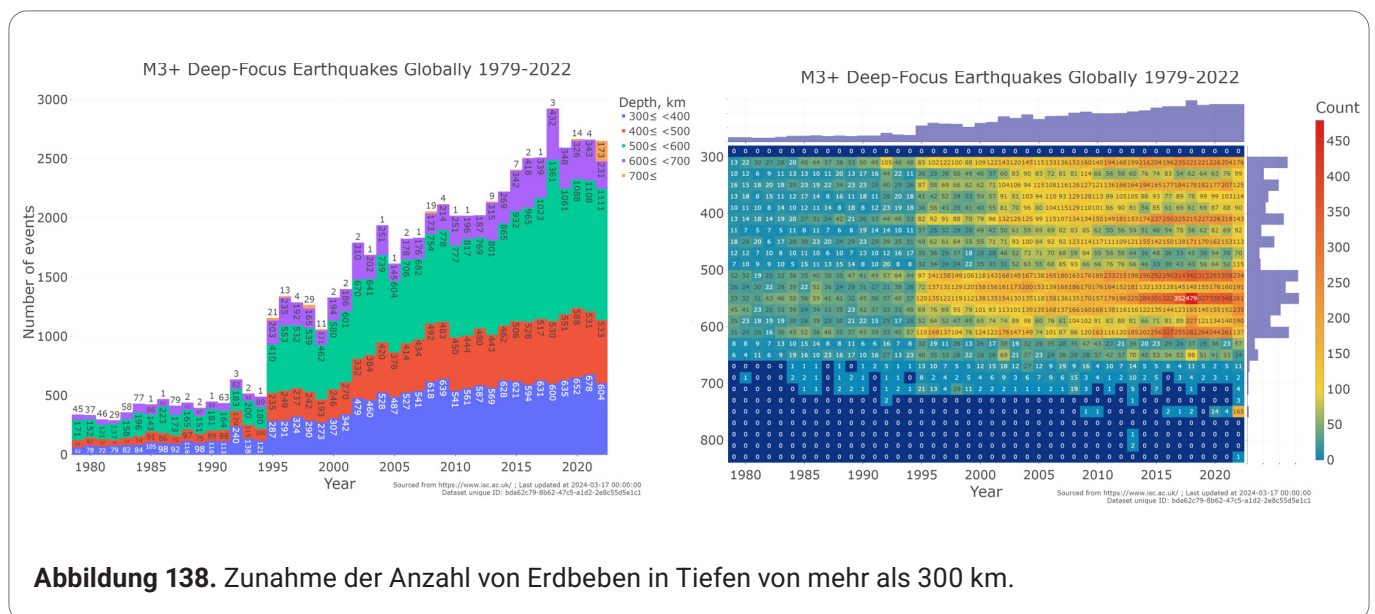
Vulkanausbrüche werden an immer mehr Tagen im Jahr registriert, und die ausgestoßene Lava hat oft anomale Eigenschaften: Sie hat eine deutlich höhere Temperatur und eine ungewöhnliche chemische Zusammensetzung, die für Magma aus den tiefen Schichten des Erdmantels charakteristisch ist.

³⁶³Fanpage.it. At Campi Flegrei 675 earthquakes in April 2023: it is the month with the most tremors in the last 20 years. (2023) <https://www.fanpage.it/napoli/campi-flegrei-675-terremoti-aprile-2023> (Abgerufen am 01.05.2025).

³⁶⁴GeoNet. Strong M5.6 earthquake consistent with continued minor volcanic unrest at Taupō. Volcanic Alert Level remains at Level 1. (2022) <https://www.geonet.org.nz/vabs/7tu66IDztDnlaYDG0LYSgl> (Abgerufen am 01.05.2025).

Besonders besorgniserregend ist die zunehmende Zahl von Tiefbeben, die in den Tiefen von über 300 km, und manchmal bis 750 km auftreten. Im Gegensatz zu typischen Erdbeben, die in der Erdkruste auftreten, haben diese Phänomene ihren Ursprung im Erdmantel, wo das Material in der Regel plastisch ist und sich eher wie Kunststoff verformt, als dass es bricht. Das macht die Natur dieser Erdbeben höchst ungewöhnlich.

Da diese Tiefbeben unter extremen Druck- und Temperaturbedingungen auftreten, sind sie vermutlich das Ergebnis gewaltiger Explosionen im Erdmantel. Ihre Energie ist vergleichbar mit der gleichzeitigen Detonation mehrerer Atombomben im Erdmantel. Darüber hinaus lösen Tiefbeben oft starke seismische Erschütterungen in der Erdkruste aus, die ihre zerstörerische Wirkung verstärken. Seit 1995 hat die Zahl dieser Tiefbeben stark zugenommen (Abb. 138), was mit anderen geodynamischen Anomalien zusammenfällt, die im selben Zeitraum begannen. Die Zunahme dieser Explosionen im Erdmantel deutet auf einen Anstieg der Energie im Inneren des Planeten und ein intensives Schmelzen des Erdmantels hin, was zu massiven vulkanischen Eruptionen führen kann.



Unter dem Einfluss von Zentrifugalkräften steigt geschmolzenes Magma im Erdmantel seit 1995 aktiv in Richtung Erdoberfläche auf, wodurch die Lithosphäre von innen her stärker als üblich erodiert und aufgeheizt wird. Dieser Magmaaufstieg verstärkt den geothermischen Fluss aus dem Erdinneren und aktiviert Magmaplumes unter den Gletschern der Westantarktis, Zentralgrönlands und Sibiriens. Infolgedessen begannen die Gletscher und der Permafrost von unten nach oben in beschleunigtem Tempo zu schmelzen^{365, 366, 367}.

Die Ursache für die Ozeanerwärmung ist also aufsteigendes Magma, das insbesondere die ozeanische Kruste erwärmt, die im Vergleich zur kontinentalen Kruste dünner und anfälliger ist.

³⁶⁵Rogozhina, I. et al. Melting at the base of the Greenland ice sheet explained by Iceland hotspot history. *Nature Geosci* 9, 366–369 (2016). <https://doi.org/10.1038/ngeo2689>

³⁶⁶Van Der Veen, C. J., Leftwich, T., Von Frese, R., Csatho, B. M. & Li, J. Subglacial topography and geothermal heat flux: Potential interactions with drainage of the Greenland ice sheet. *Geophysical Research Letters* 34, 2007GL030046 (2007). <https://doi.org/10.1029/2007GL030046>

³⁶⁷Dziadek, R., Ferraccioli, F. & Gohl, K. High geothermal heat flow beneath Thwaites Glacier in West Antarctica inferred from aeromagnetic data. *Commun Earth Environ* 2, 162 (2021). <https://doi.org/10.1038/s43247-021-00242-3>

Historische Nachweise aus geologischen und Eisbohrkernen zeigen, dass die Erde alle 12 000 Jahre solche katastrophalen Zyklen erlebt hat. Darüber hinaus waren diese planetarischen Katastrophen während jedes zweiten Zyklus – etwa alle 24 000 Jahre – verheerender (Abb. 139).

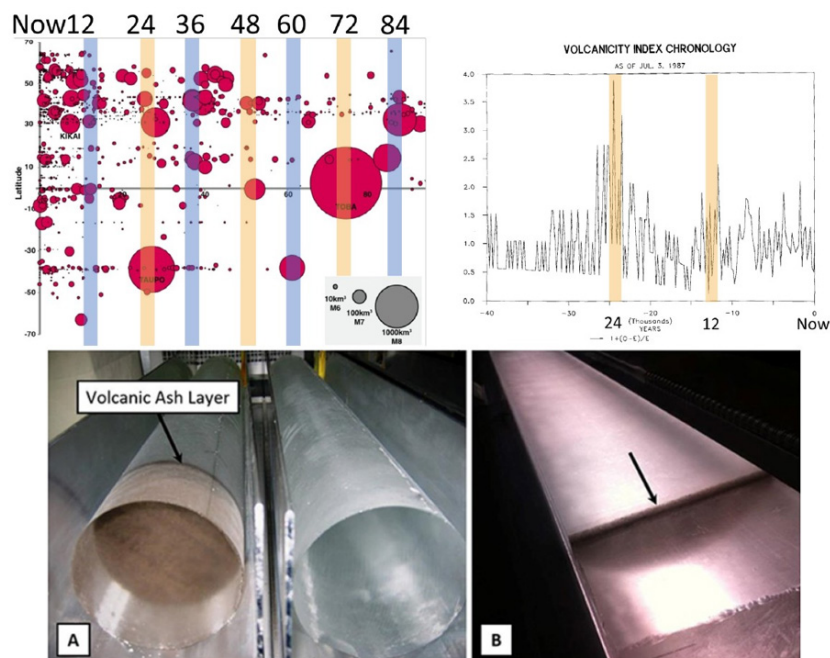


Abbildung 139. Die Diagramme zeigen, dass katastrophale vulkanische Aktivität alle 12 000 Jahre und noch stärkere Ereignisse alle 24 000 Jahre auftreten.

Quelle: Brown, S. K., Crosweller, H. S., Sparks, R. S.J., Cottrell, E., Deligne, N. I., Guerrero, N. O., Hobbs, L., Kiyosugi, K., Loughlin, S. C., Siebert, L., & Takarada, S. Characterisation of the Quaternary eruption record: analysis of the Large Magnitude Explosive Volcanic Eruptions (LaMEVE) database. *Journal of Applied Volcanology*, 3 (5) (2014). <https://doi.org/10.1186/2191-5040-3-5>
Bryson, R. A. Late quaternary volcanic modulation of Milankovitch climate forcing. *Theoretical and Applied Climatology*, 39, 115–125 (1989). <https://doi.org/10.1007/bf00868307>

Genau in einem solchen Zyklus befindet sich die Erde jetzt. Diesmal hat sich jedoch aufgrund der anthropogenen Verschmutzung der Ozeane mit Mikro- und Nanoplastik das thermische Ungleichgewicht im Erdmantel vergrößert, was zu einer Zunahme der Zahl von Tiefbeben, zur Bildung neuer Magmakammern und zur allgemeinen Instabilität des Planeten führt. Aus diesem Grund nehmen Naturkatastrophen jetzt viel schneller und stärker zu als in früheren Zyklen. Tatsächlich ist die Verschmutzung der Ozeane zum Hauptgrund dafür geworden, dass die Erde diesen Zyklus möglicherweise nicht überstehen kann. Es ist wichtig zu erkennen, dass die Lösung des Problems der Ozeanverschmutzung durch Mikro- und Nanoplastik die Entwicklung von Naturkatastrophen zwar verlangsamen, aber nicht aufhalten wird.



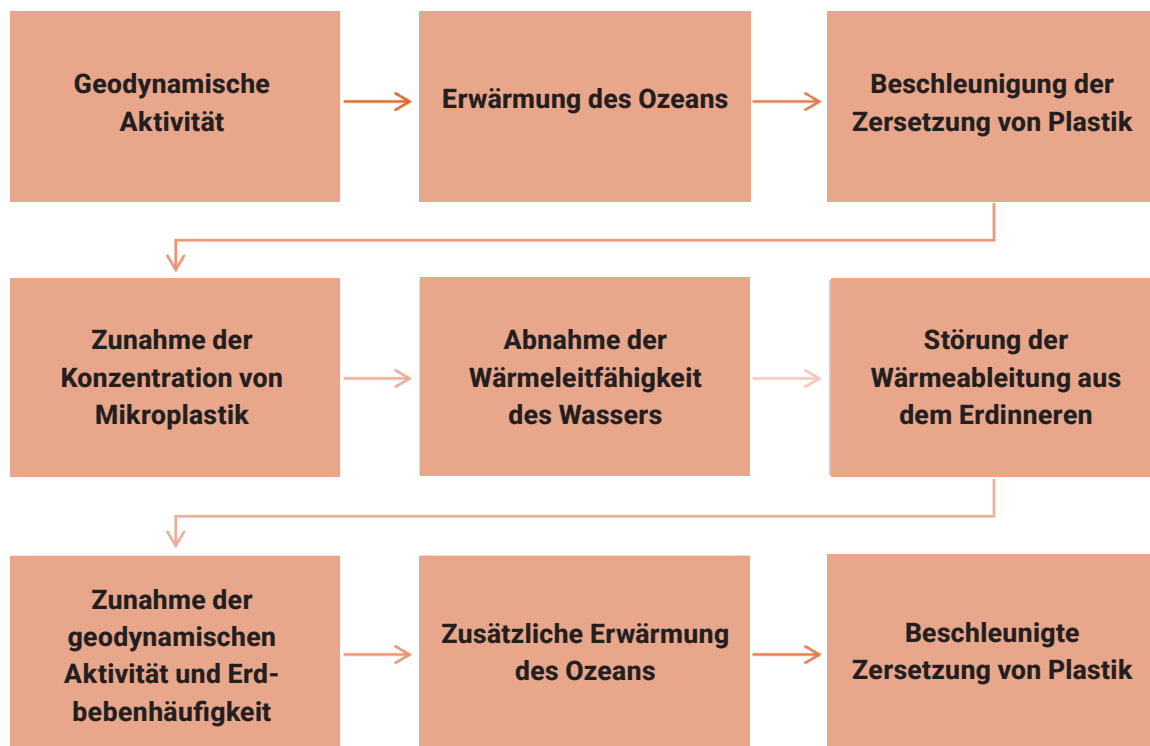
Mehr über die geodynamische Aktivierung des Erdinneren im gegenwärtigen Zeitraum, den 12 000-jährigen Zyklus der Naturkatastrophen und Lösungswege dieses Problems erfahren Sie in dem Bericht

"ÜBER DIE PROGRESSION DER NATURKATASTROPHEN AUF DER ERDE UND IHRE VERHEERENDEN FOLGEN"

Wie langjährige interdisziplinäre Forschungen zu den geodynamischen Veränderung im 12 000-jährigen Zyklus gezeigt haben, ist die Hauptursache für die Erwärmung des Ozeans aufsteigendes Magma, das insbesondere auf die ozeanische Kruste einwirkt, die dünner und anfälliger ist als die kontinentale Kruste. Die Verschmutzung der Weltmeere durch Plastik und die Anhäufung von Mikro- und Nanoplastikpartikeln wird zu einem kritischen Faktor, der die thermischen Eigenschaften des Ozeans verändert. Das Vorhandensein dieser synthetischen Partikel im Ozeanwasser verringert dessen Fähigkeit, Wärme zu leiten, erheblich, was die natürlichen Prozesse des Wärmeaustauschs zwischen den tiefen Ozeanschichten und der Oberfläche stört. Noch kritischer ist aber, dass MNP die Wärmeableitung von den Lithosphärenplatten beeinträchtigt. Unter den Bedingungen des Zyklus zunehmender geodynamischer Aktivität während des 12 000-jährigen Zyklus erhöht die kritische Veränderung der Wärmeübertragungsfunktion des Ozeanwassers nicht nur die Erwärmung des Ozeans und der Atmosphäre, sondern auch die Erwärmung des Erdinneren. Dies führt zu einem verstärkten Schmelzen des Erdmantels und infolgedessen zu einer noch stärkeren geodynamischen Aktivität.

Dies verursacht die Akkumulation überschüssiger Energie im Erdinneren, was zu einer Zunahme von Tiefbeben und einer beschleunigten Bildung neuer Magmakammern führt. Diese Prozesse verschärfen wiederum die Instabilität des Planeten und beschleunigen die Erwärmung der Ozeane.

Es entsteht ein gefährlicher geschlossener Kreislauf: Geodynamische Aktivität heizt den Ozean auf → die Erwärmung beschleunigt die Zersetzung von Plastik → die zunehmende Konzentration von Mikroplastik verringert die Wärmeleitfähigkeit des Wassers → die Wärmeableitung aus dem Erdinneren wird gestört → die geodynamische Aktivität und die Häufigkeit von Erdbeben nehmen zu → der Ozean heizt sich noch mehr auf und der Prozess der Zersetzung von Plastik in Mikro- und Nanopartikel beschleunigt sich.



Dies führt zu einer Zunahme der Häufigkeit und Intensität von extremen Wetterereignissen und Naturkatastrophen wie Überschwemmungen, Wirbelstürmen und Tropenstürmen, die inzwischen eine nie dagewesene Intensität erreichen.

Die Ozeanverschmutzung durch Mikro- und Nanoplastik verursacht also nicht nur erhebliche Schäden für die Gesundheit des Menschen, die Ökosysteme, die Biosphäre und das Klimasystem, sondern trägt auch zur verstärkten Erwärmung des Ozeans bei. Sie verschlimmert auch die bereits jetzt zerstörerischen Naturkatastrophen des 24 000-jährigen Zyklus, in den die Erde jetzt eingetreten ist. Dies stellt nicht nur für das Überleben der Menschheit, sondern auch für den Planeten Erde selbst ein noch nie dagewesenes Risiko dar.

Die Lösung der globalen Umwelt-, Klima- und geodynamischen Krise erfordert die internationale Zusammenarbeit von Wissenschaftlern verschiedener Disziplinen, um dringend ganzheitliche Maßnahmen zu entwickeln und umzusetzen. Diese Maßnahmen sollten nicht nur die Reinigung des Ozeans von Mikro- und Nanoplastik und die Verringerung seiner negativen Auswirkungen auf die Gesundheit des Menschen umfassen, sondern auch die Entwicklung grundlegender Lösungen zur Bewältigung geodynamischer Bedrohungen.

In folgenden Berichten können Sie sich über die vorgeschlagene Lösungswege informieren:



BERICHT

**"ÜBER DIE PROGRESSION DER
NATURKATASTROPHEN AUF DER ERDE
UND IHRE VERHEERENDEN FOLGEN"**



BERICHT

**"ÜBER DEN DROHENDEN DURCHBRUCH
DES MAGMAPLUMES IN SIBIRIEN
SOWIE ÜBER DIE LÖSUNGSWEGE
FÜR DIESES PROBLEM"**

SCHLUSSFOLGERUNGEN: NANOPLASTIK IST EINE HERAUSFORDERUNG, DIE NICHT IGNORIERT WERDEN DARF

Das Problem der Plastikverschmutzung, insbesondere in Form von Mikro- und Nanoplastik, geht über lokale Umweltauswirkungen hinaus und hat den Charakter einer multidimensionalen globalen Bedrohung angenommen. Jüngste Forschungsergebnisse bestätigen sowohl direkte als auch indirekte Auswirkungen von MNP auf das Klimasystem, die Stabilität der Ökosysteme und die Gesundheit des Menschen. Mikroplastikpartikel können in lebende Organismen eindringen, Entzündungsreaktionen hervorrufen, den Hormonhaushalt sowie die Funktionen des Immun- und Fortpflanzungssystems stören und die physikalischen und chemischen Eigenschaften der Umwelt – vom Meerwasser bis zur Atmosphäre – verändern.

Vor mehr als 10 Jahren stellten Vertreter der internationalen wissenschaftlichen Gemeinschaft ALLATRA die Hypothese auf, dass die Plastikverschmutzung zunehmend zu Klimaanomalien und zur Verschlechterung der öffentlichen Gesundheitsprobleme beiträgt. Heute werden diese Hypothesen durch unabhängige Studien führender wissenschaftlicher Institutionen bestätigt. Schnelle Erfassung von Daten über die ökologischen und biologischen Auswirkungen von MNP eröffnet neue Horizonte der Analyse, einschließlich der Veränderung von Klimamustern, der Veränderungen in der Hydrosphäre und der zunehmenden systemischen Risiken für die nachhaltige Entwicklung. Besonders besorgniserregend ist, dass selbst mikroskopisch kleine Konzentrationen von Nanoplastik Kaskadeneffekte in der Biosphäre und im Klimasystem auslösen können. Plastik ist nicht mehr nur fester Abfall, es wird zu einem aktiven Faktor für die Veränderung der Umwelt und des Organismus des Menschen. Die Folgen der Plastikverbreitung sind bereits spürbar. Das Problem von MNP betrifft nicht nur Ökologie und Medizin, sondern erfordert auch Überlegungen im Zusammenhang mit nationaler Sicherheit, Makroökonomie und internationalen Beziehungen.

Im Rahmen der Strategie zur Bekämpfung dieser Bedrohung hat die Bewegung ALLATRA zwei Hauptrichtungen vorgeschlagen, die sowohl ein angewandtes als auch ein prognostisches Potenzial aufweisen. Der erste ist die umfassende Umsetzung der Technologie der atmosphärischen Wassergeneratoren (AWG), die gleichzeitig das Problem der Süßwasserknappheit lösen und zur Reinigung der Atmosphäre und der Ozeane von Mikroplastikpartikeln beitragen kann. Bei der Umsetzung der AWG-Technologie müssen jedoch mögliche Risiken berücksichtigt werden, insbesondere erhöhte Konzentrationen von MNP in der Luft und die daraus resultierende Verstärkung seiner inhalatorischen Einwirkung auf den Menschen. Dies erfordert eine parallele Entwicklung von hocheffizienten Filter- und Schutzsystemen.

Die zweite strategische Richtung, die ebenfalls von ALLATRA vorgeschlagen wurde, ist die Entwicklung von Methoden zur Neutralisierung oder Abschirmung der elektrostatischen Ladung von Nanoplastik – einem der Hauptfaktoren seiner Toxizität. Geladene Nanoplastikpartikel interagieren aktiv mit Zellmembranen,

Proteinen und genetischem Material und bilden stabile molekulare Verbindungen. Solche Partikel durchdringen biologische Barrieren, einschließlich der Blut-Hirn-Schranke, reichern sich im Gewebe an und lösen eine Kaskade von Funktionsstörungen der Zellen aus – von oxidativem Stress bis hin zur Apoptose.

Die Verringerung der elektrostatischen Aktivität von Mikro- und Nanoplastik kann seine Schädlichkeit deutlich verringern und seine Anreicherung im Körper verlangsamen.

Die Autoren des Berichts schätzen, dass die Abschirmung oder Neutralisierung der elektrostatischen Ladung die potenzielle Gefahr von MNP um mindestens 50 % verringern kann, sodass dieser Forschungsbereich von entscheidender Bedeutung ist. Dies würde die notwendige Zeitspanne verschaffen, um umfassendere Strategien zur Diagnostik, Prophylaxe und Ausleitung von MNP aus dem menschlichen Organismus und zur Reinigung der Biosphäre zu entwickeln. In diesem Zusammenhang ist die Forschung in den Bereichen Biophysik, Nanotechnologien und molekularer Toxikologie von besonderer Bedeutung.

Eine effektive Reaktion auf die Bedrohung durch MNP erfordert daher einen globalen und multidisziplinären Ansatz und nicht punktuelle Maßnahmen. Eine Koordinierung der Bemühungen in den Bereichen Forschung, technologische Lösungen, Regulierung und internationale Zusammenarbeit ist notwendig. Die Verschmutzung durch Plastik sollte nicht nur als Umweltproblem im engeren Sinne betrachtet werden, sondern als eine systemische Herausforderung, die Gesundheit, Sicherheit, Ressourcensicherheit und die Belastbarkeit der sozialen Infrastruktur betrifft.

Die Einzigartigkeit dieses Berichts liegt in seinem interdisziplinären Ansatz, der Daten aus Physik, Chemie, Biologie und Medizin einbezieht. Diese Synthese ermöglicht es, das Problem des MNP als eine zivilisatorische Herausforderung zu betrachten, die Lösungen auf mehreren Ebenen erfordert. Gegenwärtig wird sich die Weltgemeinschaft allmählich des wahren Ausmaßes dieser Bedrohung bewusst. Zwar gibt es derzeit keine universelle Lösung, doch ist es gerade das Streben danach, eine solche zu finden, und die Entwicklung der wissenschaftlichen Zusammenarbeit, die den Weg zur Überwindung der Krise ebnen könnten. Die größte Herausforderung ist nicht das Fehlen einer Lösung, sondern die Fähigkeit, sie zu finden, bevor der Kipppunkt erreicht ist.

Quellenangaben

Agence France-Presse. Japan's famous Nara deer dying from eating plastic bags. The Guardian. <https://www.theguardian.com/world/2019/jul/10/japans-famous-nara-deer-dying-from-eating-plastic-bags> (Abgerufen am 01.05.2025).

Ahern, T. P. et al. Medication–Associated Phthalate Exposure and Childhood Cancer Incidence. JNCI: Journal of the National Cancer Institute 114, 885–894 (2022). <https://doi.org/10.1093/jnci/djac045>

Al Malki, J. S., Hussien, N. A., Tantawy, E. M., Khattab, Y. & Mohammadein, A. Terrestrial Biota as Bioindicators for Microplastics and Potentially Toxic Elements. Coatings 11, 1152 (2021). <https://doi.org/10.3390/coatings11101152>

Alfred Wegener Institute, Helmholtz Centre for Polar and Marine Research. Micro- and nanoplastic from the atmosphere is polluting the ocean. <https://www.awi.de/en/about-us/service/press/single-view/mikro-und-nanoplastik-aus-der-atmosphaere-belastet-meere.html> (Abgerufen am 01.05.2025).

Alijagic, A. et al. The triple exposure nexus of microplastic particles, plastic-associated chemicals, and environmental pollutants from a human health perspective. Environment International 188, 108736 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.envint.2024.108736>

AllatRa TV. Anthropogenic factor in the oceans' demise: Popular science film. Time 55:00, (2025). <https://allatra.tv/en/video/anthropogenic-factor-in-the-oceans-demise-popular-science-film> (Abgerufen am 01.05.2025).

Allen, S. et al. Examination of the ocean as a source for atmospheric microplastics. PLoS ONE 15, e0232746 (2020). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0232746>

Alqahtani, S., Alqahtani, S., Saquib, Q. & Mohiddin, F. Toxicological impact of microplastics and nanoplastics on humans: understanding the mechanistic aspect of the interaction. Front. Toxicol. 5, 1193386 (2023). <https://doi.org/10.3389/ftox.2023.1193386>

Amato-Lourenço, L. F. et al. Microplastics in the Olfactory Bulb of the Human Brain. JAMA Netw Open 7, e2440018 (2024). <https://doi.org/10.1001/jamanetworkopen.2024.40018>

Amato-Lourenço, L. F. et al. Presence of airborne microplastics in human lung tissue. Journal of Hazardous Materials 416, 126124 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126124>

American College of Cardiology. New evidence links microplastics with chronic disease. (2025) <https://www.acc.org/About-ACC/Press-Releases/2025/03/25/10/19/New-Evidence-Links-Microplastics-with-Chronic-Disease> (Abgerufen am 01.05.2025).

Animal Survival International. Sri Lankan Elephants Die After Eating Plastic From Rubbish Dumps. (2020) <https://animalsurvival.org/habitat-loss/sri-lankan-elephants-die-after-eating-plastic-from-rubbish-dumps> (Abgerufen am 01.05.2025).

Argo Program. 'Mission'. (n.d.) <https://argo.ucsd.edu/about/mission/> (Abgerufen am 10.05.2025).

Arrigo, F., Impellitteri, F., Piccione, G. & Faggio, C. Phthalates and their effects on human health: Focus on erythrocytes and the reproductive system. *Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology & Pharmacology* 270, 109645 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.cbpc.2023.109645>

Ask a Scientist Blog. If molecules in colder things get denser, why does ice float? WordPress. <https://askascientistblog.wordpress.com/2015/11/04/if-molecules-in-colder-things-get-denser-why-does-ice-float> (Abgerufen am 01.05.2025).

Auta, H. S. et al. Enhanced microbial degradation of PET and PS microplastics under natural conditions in mangrove environment. *Journal of Environmental Management* 304, 114273 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.114273>

Auta, H. S., Emenike, C. U., Jayanthi, B. & Fauziah, S. H. Growth kinetics and biodeterioration of polypropylene microplastics by *Bacillus* sp. and *Rhodococcus* sp. isolated from mangrove sediment. *Marine Pollution Bulletin* 127, 15–21 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.11.036>

Autism Parenting Magazine. Autism Statistics You Need To Know in 2024. (2025) <https://www.autismparentingmagazine.com/autism-statistics> (Abgerufen am 01.05.2025).

Avio, C. G., Gorbi, S. & Regoli, F. Experimental development of a new protocol for extraction and characterization of microplastics in fish tissues: First observations in commercial species from Adriatic Sea. *Marine Environmental Research* 111, 18–26 (2015). <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2015.06.014>

Aykut, B., Pushalkar, S., Chen, R. et al. The fungal mycobiome promotes pancreatic oncogenesis via activation of MBL. *Nature* 574, 264–267 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1608-2>

Azeem, I. et al. Uptake and Accumulation of Nano/Microplastics in Plants: A Critical Review. *Nanomaterials* 11, 2935 (2021). <https://doi.org/10.3390/nano11112935>

Azim Premji University. The Biology of Electricity: How electricity is critical to the functioning of the human body. (2022) <https://azimpremjiuniversity.edu.in/news/2022/the-biology-of-electricity> (Abgerufen am 01.05.2025).

Baker, B. H. et al. Ultra-processed and fast food consumption, exposure to phthalates during pregnancy, and socioeconomic disparities in phthalate exposures. *Environment International* 183, 108427 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.envint.2024.108427>

Baker, E. T. & German, C. R. On the Global Distribution of Hydrothermal Vent Fields. in *Mid-Ocean Ridges: Hydrothermal Interactions Between the Lithosphere and Oceans* (eds German, C. R., Lin, J. & Parson, L. M.) 245–266 (American Geophysical Union, 2004).

Baker, E. T. et al. How many vent fields? New estimates of vent field populations on ocean ridges from precise mapping of hydrothermal discharge locations. *Earth Planet. Sci. Lett.* 449, 186–196 (2016). <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2016.05.031>

- Bandmann, V., Müller, J. D., Köhler, T. & Homann, U. Uptake of fluorescent nano beads into BY2-cells involves clathrin-dependent and clathrin-independent endocytosis. *FEBS Letters* 586, 3626–3632 (2012). <https://doi.org/10.1016/j.febslet.2012.08.008>
- Baribo, L. E., Avens, J. S. & O'Neill, R. D. Effect of Electrostatic Charge on the Contamination of Plastic Food Containers by Airborne Bacterial Spores. *Applied Microbiology* 14, 905–913 (1966). <https://doi.org/10.1128/am.14.6.905-913.1966>
- Barnes, D. K. A., Galgani, F., Thompson, R. C. & Barlaz, M. Accumulation and fragmentation of plastic debris in global environments. *Phil. Trans. R. Soc. B* 364, 1985–1998 (2009). <https://doi.org/10.1098/rstb.2008.0205>
- Basaran, B. et al. Microplastics in honey from Türkiye: Occurrence, characteristic, human exposure, and risk assessment. *Journal of Food Composition and Analysis* 135, 106646 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2024.106646>
- Alma, A. M., de Groot, G. S. & Buteler, M. Microplastics incorporated by honeybees from food are transferred to honey, wax and larvae. *Environmental Pollution* 320, 121078 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.121078>
- Pasquini, E. et al. Microplastics reach the brain and interfere with honey bee cognition. *Science of The Total Environment* 912, 169362 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169362>
- Behrenfeld et al. 2009 by Robert Simmon <https://earthobservatory.nasa.gov/features/Phytoplankton> (Abgerufen am 01.05.2025).
- Bell, Katherine L. C., et al. "How Little We've Seen: A Visual Coverage Estimate of the Deep Seafloor." *Science Advances*, vol. 11, no. 19, 2025, eadp8602. <https://doi.org/10.1126/sciadv.adp8602>.
- Bengalli, R. et al. Characterization of microparticles derived from waste plastics and their bio-interaction with human lung A549 cells. *Journal of Applied Toxicology* 42, 2030–2044 (2022). <https://doi.org/10.1002/jat.4372>
- Berger Bioucas, F. E. et al. Effective Thermal Conductivity of Nanofluids: Measurement and Prediction. *Int J Thermophys* 41, 55 (2020). <https://doi.org/10.1007/s10765-020-2621-2>
- Beriot, N., Peek, J., Zornoza, R., Geissen, V. & Huerta Lwanga, E. Low density-microplastics detected in sheep faeces and soil: A case study from the intensive vegetable farming in Southeast Spain. *Science of The Total Environment* 755, 142653 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142653>
- Bhuiyan, M. M. U. et al. Oxygen declination in the coastal ocean over the twenty-first century: Driving forces, trends, and impacts. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering* 9, 100621 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2024.100621>
- Bopp, L. et al. Multiple stressors of ocean ecosystems in the 21st century: projections with CMIP5 models. *Biogeosciences* 10, 6225–6245 (2013). <https://doi.org/10.5194/bg-10-6225-2013>
- Borreani, G. & Tabacco, E. 9 - Plastics in Animal Production. in *A Guide to the Manufacture, Performance, and Potential of Plastics in Agriculture* (ed. Orzolek, M. D.) 145–185 (Elsevier, 2017). <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102170-5.00009-9>

- Bosker, T., Bouwman, L. J., Brun, N. R., Behrens, P. & Vijver, M. G. Microplastics accumulate on pores in seed capsule and delay germination and root growth of the terrestrial vascular plant *Lepidium sativum*. *Chemosphere* 226, 774–781 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.03.163>
- Boyce, D. G., Lewis, M. R. & Worm, B. Global phytoplankton decline over the past century. *Nature* 466, 591–596 (2010). <https://doi.org/10.1038/nature09268>
- Brahney, J., Hallerud, M., Heim, E., Hahnenberger, M. & Sukumaran, S. Plastic rain in protected areas of the United States. *Science* 368, 1257–1260 (2020). <https://doi.org/10.1126/science.aaz5819>
- Brennecke, D., Duarte, B., Paiva, F., Caçador, I. & Canning-Clode, J. Microplastics as vector for heavy metal contamination from the marine environment. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 178, 189–195 (2016). <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2015.12.003>
- Breton, J. L. Visitation patterns of African elephants (*Loxodonta africana*) to a rubbish dumpsite in Victoria Falls, Zimbabwe. *Pachyderm* 60, 45–54 (2019). <https://doi.org/10.69649/pachyderm.v60i.30>
- Broquet, A. & Andrews-Hanna, J. C. Geophysical evidence for an active mantle plume underneath Elysium Planitia on Mars. *Nat Astron* (2022). <https://doi.org/10.1038/s41550-022-01836-3>
- Broszeit, S., Hattam, C. & Beaumont, N. Bioremediation of waste under ocean acidification: Reviewing the role of *Mytilus edulis*. *Marine Pollution Bulletin* 103, 5–14 (2016). <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.12.040>
- Brown, S. K., Crosweller, H. S., Sparks, R. S.J., Cottrell, E., Deligne, N. I., Guerrero, N. O., Hobbs, L., Kiyosugi, K., Loughlin, S. C., Siebert, L., & Takarada, S. Characterisation of the Quaternary eruption record: analysis of the Large Magnitude Explosive Volcanic Eruptions (LaMEVE) database. *Journal of Applied Volcanology*, 3 (5) (2014). <https://doi.org/10.1186/2191-5040-3-5>
- Brynzak-Schreiber, E. et al. Microplastics role in cell migration and distribution during cancer cell division. *Chemosphere* 353, 141463 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.141463>
- Bryson, R. A.. Late quaternary volcanic modulation of Milankovitch climate forcing. *Theoretical and Applied Climatology*, 39, 115–125 (1989). <https://doi.org/10.1007/bf00868307>
- Busse, H. L., Ariyasena, D. D., Orris, J. & Freedman, M. A. Pristine and Aged Microplastics Can Nucleate Ice through Immersion Freezing. *ACS EST Air* 1, 1579–1588 (2024). <https://doi.org/10.1021/acsestair.4c00146>
- Campanale, C., Massarelli, C., Savino, I., Locaputo, V. & Uricchio, V. F. A Detailed Review Study on Potential Effects of Microplastics and Additives of Concern on Human Health. *IJERPH* 17, 1212 (2020). <https://doi.org/10.3390/ijerph17041212>
- Casella, C. & Ballaz, S. J. Genotoxic and neurotoxic potential of intracellular nanoplastics: A review. *Journal of Applied Toxicology* 44, 1657–1678 (2024). <https://doi.org/10.1002/jat.4598>
- Centers for Disease Control and Prevention. Autism Prevalence Higher, According to Data from 11 ADDM Communities. <https://www.cdc.gov/media/releases/2023/p0323-autism.html> (Abgerufen am 01.05.2025).

- Chadwick, J., Keller, R., Kamenov, G., Yogodzinski, G. & Lupton, J. The Cobb hot spot: HIMU-DMM mixing and melting controlled by a progressively thinning lithospheric lid. *Geochem. Geophys. Geosyst.* 15, 3107–3122 (2014). <https://doi.org/10.1002/2014gc005334>
- Chen, M. J., Karaviti, L. P., Roth, D. R. & Schlomer, B. J. Birth prevalence of hypospadias and hypospadias risk factors in newborn males in the United States from 1997 to 2012. *Journal of Pediatric Urology* 14, 425. e1-425.e7 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.jpuro.2018.08.024>
- Chen, Y. et al. Electrolytes induce long-range orientational order and free energy changes in the H-bond network of bulk water. *Sci. Adv.* 2, e1501891 (2016). <https://doi.org/10.1126/sciadv.1501891>
- Cheng, L. et al. Another Year of Record Heat for the Oceans. *Adv. Atmos. Sci.* 40, 963–974 (2023). <https://doi.org/10.1007/s00376-023-2385-2>
- Cheng, L., Abraham, J., Zhu, J. et al. Record-Setting Ocean Warmth Continued in 2019. *Adv. Atmos. Sci.* 37, 137–142 (2020). <https://doi.org/10.1007/s00376-020-9283-7>
- Chew, T., Daik, R. & Hamid, M. Thermal Conductivity and Specific Heat Capacity of Dodecylbenzenesulfonic Acid-Doped Polyaniline Particles—Water Based Nanofluid. *Polymers* 7, 1221–1231 (2015). <https://doi.org/10.3390/polym7071221>
- China Environment News. Microplastics "secretly attack" the human body, how much damage can they cause? (2025) <https://cenews.com.cn/news.html?aid=1205048> (Abgerufen am 01.05.2025).
- Climate.gov. 'The role of the ocean in tempering global warming'. (2014) <https://www.climate.gov/news-features/blogs/enso/role-ocean-tempering-global-warming> (Abgerufen am 10.05.2025).
- ClimateReanalyzer.org, Climate Change Institute, University of Maine, Dataset. NOAA OISST. https://climatereanalyzer.org/clim/sst_daily/?dm_id=world2 (Abgerufen am 01.05.2025).
- Columbia Climate School. 'Is Global Heating Hiding Out in the Oceans?'. (2013) <https://www.earth.columbia.edu/articles/view/3130> (Abgerufen am 10.05.2025).
- Corinaldesi, C., Canensi, S., Dell'Anno, A. et al. Multiple impacts of microplastics can threaten marine habitat-forming species. *Commun Biol* 4, 431 (2021). <https://doi.org/10.1038/s42003-021-01961-1>
- Crisp, J. A. Rates of magma emplacement and volcanic output. *J. Volc. Geotherm. Res.* 20, 177–211 (1984). [https://doi.org/10.1016/0377-0273\(84\)90039-8](https://doi.org/10.1016/0377-0273(84)90039-8)
- Da Costa Filho, P. A. et al. Detection and characterization of small-sized microplastics ($\geq 5 \mu\text{m}$) in milk products. *Sci Rep* 11, 24046 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41598-021-03458-7>
- Dante, S. et al. Selective Targeting of Neurons with Inorganic Nanoparticles: Revealing the Crucial Role of Nanoparticle Surface Charge. *ACS Nano* 11, 6630–6640 (2017). <https://doi.org/10.1021/acs.nano.7b00397>
- Dawson, A. L. et al. Turning microplastics into nanoplastics through digestive fragmentation by Antarctic krill. *Nat Commun* 9, 1001 (2018). <https://doi.org/10.1038/s41467-018-03465-9>

- De Falco, F., Di Pace, E., Cocca, M. & Avella, M. The contribution of washing processes of synthetic clothes to microplastic pollution. *Sci Rep* 9, 6633 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41598-019-43023-x>
- De Jersey, A. M. et al. Seabirds in crisis: Plastic ingestion induces proteomic signatures of multiorgan failure and neurodegeneration. *Sci. Adv.* 11, eads0834 (2025). <https://doi.org/10.1126/sciadv.ads0834>
- De Pater, I. et al. Record-breaking storm activity on Uranus in 2014. *Icarus* 252, 121–128 (2015). <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2015.01.008>
- De Souza Machado, A. A. et al. Impacts of Microplastics on the Soil Biophysical Environment. *Environ. Sci. Technol.* 52, 9656–9665 (2018). <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b02212>
- De Souza Machado, A. A., Kloas, W., Zarfl, C., Hempel, S. & Rillig, M. C. Microplastics as an emerging threat to terrestrial ecosystems. *Global Change Biology* 24, 1405–1416 (2018). <https://doi.org/10.1111/gcb.14020>
- Deike, L., Reichl, B. G. & Paulot, F. A Mechanistic Sea Spray Generation Function Based on the Sea State and the Physics of Bubble Bursting. *AGU Advances* 3, e2022AV000750 (2022). <https://doi.org/10.1029/2022AV000750>
- Deng, S., Liu, S., Mo, X., Jiang, L., & Bauer Gottwein, P. Polar Drift in the 1990s Explained by Terrestrial Water Storage Changes. *Geophysical Research Letters*, 48, e2020GL092114 (2021). <https://doi.org/10.1029/2020gl092114>
- Derraik, J. G. B. The pollution of the marine environment by plastic debris: a review. *Marine Pollution Bulletin* 44, 842–852 (2002). [https://doi.org/10.1016/S0025-326X\(02\)00220-5](https://doi.org/10.1016/S0025-326X(02)00220-5)
- Dick, L. et al. The adsorption of drugs on nanoplastics has severe biological impact. *Sci Rep* 14, 25853 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-75785-4>
- Dohlman, A. B. et al. A pan-cancer mycobiome analysis reveals fungal involvement in gastrointestinal and lung tumors. *Cell* 185, 3807–3822.e12 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.cell.2022.09.015>
- Dris, R. et al. A first overview of textile fibers, including microplastics, in indoor and outdoor environments. *Environmental Pollution* 221, 453–458 (2017). <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.12.013>
- Dugershaw-Kurzer, B. et al. Nanoparticles Dysregulate the Human Placental Secretome with Consequences on Angiogenesis and Vascularization. *Advanced Science* 11, 2401060 (2024). <https://doi.org/10.1002/advs.202401060>
- Duncan, E. M. et al. Microplastic ingestion ubiquitous in marine turtles. *Global Change Biology* 25, 744–752 (2019). <https://doi.org/10.1111/gcb.14519>
- Dürig, T., White, J.D.L., Murch, A.P. et al. Deep-sea eruptions boosted by induced fuel–coolant explosions. *Nat. Geosci.* 13, 498–503 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41561-020-0603-4>
- [EarthDay.org](https://www.earthday.org/babies-vs-plastics-what-every-parent-should-know). Babies vs. Plastics Report. (2023) <https://www.earthday.org/babies-vs-plastics-what-every-parent-should-know> (Abgerufen am 01.05.2025).

Encrenaz, T. et al. HDO and SO₂ thermal mapping on Venus - IV. Statistical analysis of the SO₂ plumes. A&A 623, A70 (2019). <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201833511>

Encyclopædia Britannica. Neuron. Britannica. (2025) <https://www.britannica.com/science/neuron> (Abgerufen am 01.05.2025).

Enders, K., Lenz, R., Stedmon, C. A. & Nielsen, T. G. Abundance, size and polymer composition of marine microplastics $\geq 10 \mu\text{m}$ in the Atlantic Ocean and their modelled vertical distribution. Marine Pollution Bulletin 100, 70–81 (2015). <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.09.027>

Eriksen, M. et al. A growing plastic smog, now estimated to be over 170 trillion plastic particles afloat in the world's oceans—Urgent solutions required. PLoS ONE 18, e0281596 (2023). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0281596>

Eriksen, M. et al. Plastic Pollution in the World's Oceans: More than 5 Trillion Plastic Pieces Weighing over 250,000 Tons Afloat at Sea. PLoS ONE 9, e111913 (2014). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0111913>

Eriksen, M., Lusher, A., Nixon, M. & Wernery, U. The plight of camels eating plastic waste. Journal of Arid Environments 185, 104374 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2020.104374>

Eunomia. Plastics in the Marine Environment. <https://eunomia.eco/reports/plastics-in-the-marine-environment> (Abgerufen am 01.05.2025).

European Severe Storms Laboratory. Hailstorms of 2024 <https://www.essl.org/cms/hailstorms-of-2024> (Abgerufen am 01.05.2025).

Fanpage.it. At Campi Flegrei 675 earthquakes in April 2023: it is the month with the most tremors in the last 20 years. (2023) <https://www.fanpage.it/napoli/campi-flegrei-675-terremoti-aprile-2023> (Abgerufen am 01.05.2025).

Federal Office of Public Health. Impact of pollution on embryonic development — Nanoparticles: Risk for babies in the womb. FOPH. (2024) <https://www.bit.admin.ch/en/nsb?id=101285> (Abgerufen am 01.05.2025).

Feldkamp, M. L. et al. Gastroschisis prevalence patterns in 27 surveillance programs from 24 countries, International Clearinghouse for Birth Defects Surveillance and Research, 1980–2017. Birth Defects Research 116, e2306 (2024). <https://doi.org/10.1002/bdr2.2306>

Fernando, B. et al. A Tectonic Origin for the Largest Marsquake Observed by InSight. Geophysical Research Letters 50, e2023GL103619 (2023). <https://doi.org/10.1029/2023GL103619>

Financial Times. Have humans passed peak brain power? <https://www.ft.com/content/a8016c64-63b7-458b-a371-e0e1c54a13fc> (Abgerufen am 01.05.2025).

Frazier, T. W., Georgiades, S., Bishop, S. L. & Hardan, A. Y. Behavioral and Cognitive Characteristics of Females and Males With Autism in the Simons Simplex Collection. Journal of the American Academy of Child & Adolescent Psychiatry 53, 329–340.e3 (2014). <https://doi.org/10.1016/j.jaac.2013.12.004>

- Galyon, H. et al. Long-term in situ ruminal degradation of biodegradable polymers in Holstein dairy cattle. *JDS Communications* 4, 70–74 (2023). <https://doi.org/10.3168/jdsc.2022-0319>
- Gao, Y., Fang, H. & Ni, K. A hierarchical clustering method of hydrogen bond networks in liquid water undergoing shear flow. *Sci Rep* 11, 9542 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41598-021-88810-7>
- Gao, Y., Fang, H., Ni, K. & Feng, Y. Water clusters and density fluctuations in liquid water based on extended hierarchical clustering methods. *Sci Rep* 12, 8036 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41598-022-11947-6>
- Garbage Patches. Marine Debris Program. NOAA <https://marinedebris.noaa.gov/discover-marine-debris/garbage-patches> (Abgerufen am 01.05.2025).
- Gase, A. et al. Subducting volcanoclastic-rich upper crust supplies fluids for shallow megathrust and slow slip. *Sci. Adv.* 9, eadh0150 (2023). <https://doi.org/10.1126/sciadv.adh0150>
- GeoNet. Strong M5.6 earthquake consistent with continued minor volcanic unrest at Taupō. Volcanic Alert Level remains at Level 1. (2022) <https://www.geonet.org.nz/vabs/7tu66lDztDnlaYDG0LYSgl> (Abgerufen am 01.05.2025).
- Geueke, B. et al. Evidence for widespread human exposure to food contact chemicals. *J Expo Sci Environ Epidemiol* 1–12 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41370-024-00718-2>
- Geyer, R., Jambeck, J. R. & Law, K. L. Production, use, and fate of all plastics ever made. *Sci. Adv.* 3, e1700782 (2017). <https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782>
- Gigault, J. et al. Current opinion: What is a nanoplastic? *Environmental Pollution* 235, 1030–1034 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.01.024>
- Glausiusz, J. Toxicology: The plastics puzzle. *Nature* 508, 306–308 (2014). <https://doi.org/10.1038/508306a>
- Glorio Patrucco, S., Rivoira, L., Bruzzoniti, M. C., Barbera, S. & Tassone, S. Development and application of a novel extraction protocol for the monitoring of microplastic contamination in widely consumed ruminant feeds. *Science of The Total Environment* 947, 174493 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.174493>
- Gou, Z., Wu, H., Li, S., Liu, Z. & Zhang, Y. Airborne micro- and nanoplastics: emerging causes of respiratory diseases. *Particle and Fibre Toxicology* 21, 50 (2024). <https://doi.org/10.1186/s12989-024-00613-6>
- Grechi, N. et al. Microplastics are present in women's and cows' follicular fluid and polystyrene microplastics compromise bovine oocyte function in vitro. *eLife* 12, (2023). <https://doi.org/10.7554/eLife.86791.1>
- Guo, X. et al. Discovery and analysis of microplastics in human bone marrow. *Journal of Hazardous Materials* 477, 135266 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.135266>
- Hale, R. C., Seeley, M. E., La Guardia, M. J., Mai, L. & Zeng, E. Y. A Global Perspective on Microplastics. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 125, e2018JC014719 (2020). <https://doi.org/10.1029/2018JC014719>

- Hall-Spencer, J. M. & Harvey, B. P. Ocean acidification impacts on coastal ecosystem services due to habitat degradation. *Emerging Topics in Life Sciences* 3, 197–206 (2019). <https://doi.org/10.1042/ETLS20180117>
- Harrison, R. G. Atmospheric electricity and cloud microphysics <https://cds.cern.ch/record/557170/files/p75.pdf> (Abgerufen am 01.05.2025).
- Hasan, M. M. et al. Impact of microplastics on terrestrial ecosystems: A plant-centric perspective. *Environmental Pollution and Management* 1, 223–234 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.epm.2024.11.002>
- Helmholtz Centre for Environmental Research - UFZ. Environmental Impacts of Plastics: Moving beyond the perspective on waste. https://www.ufz.de/index.php?en=36336&webc_pm=44/2024 (Abgerufen am 01.05.2025).
- Ho, W.-K. et al. Sorption Behavior, Speciation, and Toxicity of Microplastic-Bound Chromium in Multisolute Systems. *Environ. Sci. Technol. Lett.* 10, 27–32 (2023). <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.2c00689>
- Ho, W.-K. et al. Sorption Behavior, Speciation, and Toxicity of Microplastic-Bound Chromium in Multisolute Systems. *Environ. Sci. Technol. Lett.* 10, 27–32 (2023). <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.2c00689>
- Hoffman, M. J. & Hittinger, E. Inventory and transport of plastic debris in the Laurentian Great Lakes. *Marine Pollution Bulletin* 115, 273–281 (2017). <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.11.061>
- Hofstede, L. T., Vasse, G. F. & Melgert, B. N. Microplastics: A threat for developing and repairing organs? *Cambridge Prisms: Plastics* 1, e19 (2023). <https://doi.org/10.1017/plc.2023.19>
- How Much of the World's Plastic Waste Actually Gets Recycled? <https://www.visualcapitalist.com/how-much-plastic-gets-recycled> (Abgerufen am 01.05.2025).
- Huang, H. et al. Microplastics in the bloodstream can induce cerebral thrombosis by causing cell obstruction and lead to neurobehavioral abnormalities. *Sci. Adv.* 11, eadr8243 (2025). <https://doi.org/10.1126/sciadv.adr8243>
- Huang, S. et al. Detection and Analysis of Microplastics in Human Sputum. *Environ. Sci. Technol.* 56, 2476–2486 (2022). <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c03859>
- Huang, S. et al. Plastic Waste Management Strategies and Their Environmental Aspects: A Scientometric Analysis and Comprehensive Review. *IJERPH* 19, 4556 (2022). <https://doi.org/10.3390/ijerph19084556>
- IERS Earth Orientation Center of the Paris Observatory. Day length – Earth orientation parameters: https://datacenter.iers.org/singlePlot.php?plotname=EOPC04_14_62-NOW_IAU1980-LOD&id=223 (Abgerufen am 01.05.2025).

Iizuka, T. et al. Mono-(2-ethyl-5-hydroxyhexyl) phthalate promotes uterine leiomyoma cell survival through tryptophan-kynurenine-AHR pathway activation. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 119, e2208886119 (2022). <https://doi.org/10.1073/pnas.2208886119>

Institute of Marine Sciences (ICM-CSIC). Plastic degradation in the ocean contributes to its acidification. <https://www.icm.csic.es/en/news/plastic-degradation-ocean-contributes-its-acidification> (Abgerufen am 01.05.2025).

IPCC. Global Warming of 1.5°C. (Cambridge University Press, 2022). <https://doi.org/10.1017/9781009157940> (Abgerufen am 01.05.2025).

Irigoiien, X. et al. Large mesopelagic fishes biomass and trophic efficiency in the open ocean. *Nat Commun* 5, 3271 (2014). <https://doi.org/10.1038/ncomms4271>

Islam, W., Zeng, F., Alotaibi, M. O. & Khan, K. A. Unlocking the potential of soil microbes for sustainable desertification management. *Earth-Science Reviews* 252, 104738 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2024.104738>

Ivar Do Sul, J. A. & Costa, M. F. The present and future of microplastic pollution in the marine environment. *Environmental Pollution* 185, 352–364 (2014). <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.10.036>

Ivleva, N. P. Chemical Analysis of Microplastics and Nanoplastics: Challenges, Advanced Methods, and Perspectives. *Chem. Rev.* 121, 11886–11936 (2021). <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.1c00178>

James P. Barry, Stephen Widdicombe, and Jason M. Hall-Spencer. Effects of ocean acidification on marine biodiversity and ecosystem function. *Ocean acidification*, edited by Jean-Pierre Gattuso, Lina Hansson. Oxford, Oxford University Press, 2011. <https://books.google.com.ua/books?id=8yjNFxkALjIC&pg=PA192>

Jamieson, D. T. & Tudhope, J. S. Physical properties of sea water solutions: thermal conductivity. *Desalination* 8, 393–401 (1970). [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(00\)80240-4](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(00)80240-4)

Jeffrey, G. A. *An Introduction to Hydrogen Bonding* (Oxford University Press, New York, 1997). <https://books.google.com/books?vid=ISBN0195095499>

Jenna R. Jambeck et al., Plastic waste inputs from land into the ocean. *Science* 347, 768-771 (2015). <https://doi.org/10.1126/science.1260352>

Jeong, B. et al. Maternal exposure to polystyrene nanoplastics causes brain abnormalities in progeny. *Journal of Hazardous Materials* 426, 127815 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127815>

Jiefang Daily. Intestine is the second brain? It can also communicate with multiple organs in both directions | New People - Health News. (2025) <https://www.jfdaily.com/staticsg/res/html/web/newsDetail.html?id=866347> (Abgerufen am 01.05.2025).

Jochum, M. et al. Elevated Micro- and Nanoplastics Detected in Preterm Human Placentae. Preprint (2025). <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-5903715/v1>

- Johnson, Gregory C., et al. "Argo-Two Decades: Global Oceanography, Revolutionized." *Annual Review of Marine Science*, vol. 14, 2022, pp. 379–403. <https://doi.org/10.1146/annurev-marine-022521-102008>.
- Kahane-Rapport, S. R. et al. Field measurements reveal exposure risk to microplastic ingestion by filter-feeding megafauna. *Nat Commun* 13, 6327 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41467-022-33334-5>
- Karim, A. et al. Interfacial Interactions between Nanoplastics and Biological Systems: toward an Atomic and Molecular Understanding of Plastics-Driven Biological Dyshomeostasis. *ACS Appl. Mater. Interfaces* 16, 25740–25756 (2024). <https://doi.org/10.1021/acsami.4c03008>
- Karlsruhe Institute of Technology. Blind spots in the monitoring of plastic waste https://www.kit.edu/kit/english/pi_2022_097_blind-spots-in-the-monitoring-of-plastic-waste.php (Abgerufen am 01.05.2025).
- Kaushik, A., Singh, A., Kumar Gupta, V. & Mishra, Y. K. Nano/micro-plastic, an invisible threat getting into the brain. *Chemosphere* 361, 142380 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.142380>
- Khan, A. & Jia, Z. Recent insights into uptake, toxicity, and molecular targets of microplastics and nanoplastics relevant to human health impacts. *iScience* 26, 106061 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.isci.2023.106061>
- Khatuntsev, I. V. et al. Cloud level winds from the Venus Express Monitoring Camera imaging. *Icarus* 226, 140–158 (2013). <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2013.05.018>
- Khutorskoy, M. D., & Polyak, B. G. (2014). Reflection of contrasting geodynamic settings in the thermal field. *Georesources*, (2), 24–43.
- Kim, D. Y. et al. Effects of Microplastic Accumulation on Neuronal Death After Global Cerebral Ischemia. *Cells* 14, 241 (2025). <https://doi.org/10.3390/cells14040241>
- Kim, N.-H., Choo, H.-I. & Lee, Y.-A. Effect of nanoplastic intake on the dopamine system during the development of male mice. *Neuroscience* 555, 11–22 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2024.07.018>
- Kiyama, Y., Miyahara, K. & Ohshima, Y. Active uptake of artificial particles in the nematode *Caenorhabditis elegans*. *Journal of Experimental Biology* 215, 1178–1183 (2012). <https://doi.org/10.1242/jeb.067199>
- Kopatz, V. et al. Micro- and Nanoplastics Breach the Blood–Brain Barrier (BBB): Biomolecular Corona's Role Revealed. *Nanomaterials* 13, 1404 (2023). <https://doi.org/10.3390/nano13081404>
- Kopp, G. & Lean, J. L. A New, Lower Value of Total Solar Irradiance: Evidence and Climate Significance. *Geophysical Research Letters* 38, L01706 (2011). <https://doi.org/10.1029/2010GL045777>
- Kosuth, M., Mason, S. A. & Wattenberg, E. V. Anthropogenic contamination of tap water, beer, and sea salt. *PLoS ONE* 13, e0194970 (2018). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0194970>
- Laage, D., Elsaesser, T. & Hynes, J. T. Water Dynamics in the Hydration Shells of Biomolecules. *Chem. Rev.* 117, 10694–10725 (2017). <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.6b00765>

- LaFemina, P. C. Plate Tectonics and Volcanism. in *The Encyclopedia of Volcanoes* (ed. Sigurdsson, H.) 65–92 (Academic Press, 2015). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385938-9.00003-1>
- Lamb, J. B. et al. Plastic waste associated with disease on coral reefs. *Science* 359, 460–462 (2018). <https://doi.org/10.1126/science.aar3320>
- Laufkötter, C., Zscheischler, J. & Frölicher, T. L. High-impact marine heatwaves attributable to human-induced global warming. *Science* 369, 1621–1625 (2020). <https://doi.org/10.1126/science.aba0690>
- Lax, J. Y., Price, C. & Saaroni, H. On the Spontaneous Build-Up of Voltage between Dissimilar Metals Under High Relative Humidity Conditions. *Sci Rep* 10, 7642 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41598-020-64409-2>
- Lear, G., Kingsbury, J.M., Franchini, S. et al. Plastics and the microbiome: impacts and solutions. *Environmental Microbiome* 16, 2 (2021). <https://doi.org/10.1186/s40793-020-00371-w>
- Lebreton, L. et al. Seven years into the North Pacific garbage patch: legacy plastic fragments rising disproportionately faster than larger floating objects. *Environ. Res. Lett.* 19, 124054 (2024). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ad78ed>
- Lebreton, L., Egger, M. & Slat, B. A global mass budget for positively buoyant macroplastic debris in the ocean. *Sci Rep* 9, 12922 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41598-019-49413-5>
- Lebreton, L., Slat, B., Ferrari, F. et al. Evidence that the Great Pacific Garbage Patch is rapidly accumulating plastic. *Sci Rep* 8, 4666 (2018). <https://doi.org/10.1038/s41598-018-22939-w>
- Lépine, J.-P. & Briley, M. The increasing burden of depression. *NDT* 7, 3–7 (2011). <https://doi.org/10.2147/NDT.S19617>
- Levine, H. et al. Male reproductive health statement (XIIIth international symposium on Spermatology, may 9th–12th 2018, Stockholm, Sweden. *Basic Clin. Androl.* 28, 13 (2018). <https://doi.org/10.1186/s12610-018-0077-z>
- Levine, H. et al. Temporal trends in sperm count: a systematic review and meta-regression analysis of samples collected globally in the 20th and 21st centuries. *Human Reproduction Update* 29, 157–176 (2023). <https://doi.org/10.1093/humupd/dmac035>
- Li, D., Shi, Y., Yang, L. et al. Microplastic release from the degradation of polypropylene feeding bottles during infant formula preparation. *Nat Food* 1, 746–754 (2020). <https://doi.org/10.1038/s43016-020-00171-y>
- Li, H. et al. Detection of microplastics in domestic and fetal pigs' lung tissue in natural environment: A preliminary study. *Environmental Research* 216, 114623 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.114623>
- Li, N. et al. Prevalence and implications of microplastic contaminants in general human seminal fluid: A Raman spectroscopic study. *Science of The Total Environment* 937, 173522 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173522>
- Li, W. et al. Uptake and effect of carboxyl-modified polystyrene microplastics on cotton plants. *Journal of Hazardous Materials* 466, 133581 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.133581>

- Li, X. et al. Mitochondrial proteins and congenital birth defect risk: a mendelian randomization study. *BMC Pregnancy Childbirth* 25, 444 (2025). <https://doi.org/10.1186/s12884-025-07562-8>
- Li, Y. et al. Potential Health Impact of Microplastics: A Review of Environmental Distribution, Human Exposure, and Toxic Effects. *Environ. Health* 1, 249–257 (2023). <https://doi.org/10.1021/envhealth.3c00052>
- Lian, J. et al. Do polystyrene nanoplastics affect the toxicity of cadmium to wheat (*Triticum aestivum* L.)? *Environmental Pollution* 263, 114498 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114498>
- Lide, D. R. (ed.) *CRC Handbook of Chemistry and Physics*, 85th edn (CRC Press, 2004).
- Liebezeit, G. & and Liebezeit, E. Non-pollen particulates in honey and sugar. *Food Additives & Contaminants: Part A* 30, 2136–2140 (2013). <https://doi.org/10.1080/19440049.2013.843025>
- Liu, S. et al. Microplastics in three types of human arteries detected by pyrolysis-gas chromatography/mass spectrometry (Py-GC/MS). *Journal of Hazardous Materials* 469, 133855 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.133855>
- Lusher, A. (2015). Microplastics in the Marine Environment: Distribution, Interactions and Effects. In: Bergmann, M., Gutow, L., Klages, M. (eds) *Marine Anthropogenic Litter*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-16510-3_10
- Lyons, J.J., Haney, M.M., Fee, D. et al. Infrasound from giant bubbles during explosive submarine eruptions. *Nat. Geosci.* 12, 952–958 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41561-019-0461-0>
- Maganti, S. S. & Akkina, R. C. Detection and characterisation of microplastics in animal feed. *ojafr* 13, 348–356 (2023). <https://doi.org/10.51227/ojafr.2023.50>
- Mandal, M., Roy, A., Popek, R. & Sarkar, A. Micro- and nano- plastic degradation by bacterial enzymes: A solution to 'White Pollution'. *The Microbe* 3, 100072 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.microb.2024.100072>
- Manzi, F., Schlösser, P., Owczarz, A. & Wolinska, J. Polystyrene nanoplastics differentially influence the outcome of infection by two microparasites of the host *Daphnia magna*. *Phil. Trans. R. Soc. B* 378, 20220013 (2023). <https://doi.org/10.1098/rstb.2022.0013>
- Marfella, R. et al. Microplastics and Nanoplastics in Atheromas and Cardiovascular Events. *N Engl J Med* 390, 900–910 (2024). <https://doi.org/10.1056/NEJMoa2309822>
- Martin-Folgar, R. et al. Molecular effects of polystyrene nanoplastics on human neural stem cells. *PLOS ONE* 19, e0295816 (2024). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0295816>
- Medindia. Study unravels how mitochondrial dysfunction leads to premature aging. (2022) <https://www.medindia.net/news/study-unravels-how-mitochondrial-dysfunction-leads-to-premature-aging-208364-1.htm> (Abgerufen am 01.05.2025).

Meinen, C. S., Perez, R. C., Dong, S., Piola, A. R. & Campos, E. Observed Ocean Bottom Temperature Variability at Four Sites in the Northwestern Argentine Basin: Evidence of Decadal Deep/Abyssal Warming Amidst Hourly to Interannual Variability During 2009–2019. *Geophysical Research Letters* 47, e2020GL089093 (2020). <https://doi.org/10.1029/2020GL089093>

Microplastics pose risk to ocean plankton, climate, other key Earth systems. Mongabay. (2023) <https://news.mongabay.com/2023/10/microplastics-pose-risk-to-ocean-plankton-climate-other-key-earth-systems> (Abgerufen am 01.05.2025).

Moiniafshari, K. et al. A perspective on the potential impact of microplastics and nanoplastics on the human central nervous system. *Environmental Science: Nano* 12, 1809–1820 (2025). <https://doi.org/10.1039/D4EN01017E>

Montano, L. et al. First evidence of microplastics in human ovarian follicular fluid: An emerging threat to female fertility. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 291, 117868 (2025). <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2025.117868>

Moore, C. J., Moore, S. L., Leecaster, M. K. & Weisberg, S. B. A Comparison of Plastic and Plankton in the North Pacific Central Gyre. *Marine Pollution Bulletin* 42, 1297–1300 (2001). [https://doi.org/10.1016/S0025-326X\(01\)00114-X](https://doi.org/10.1016/S0025-326X(01)00114-X)

Moresco, V. et al. Binding, recovery, and infectiousness of enveloped and non-enveloped viruses associated with plastic pollution in surface water. *Environmental Pollution* 308, 119594 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.119594>

Morishige, C., Donohue, M. J., Flint, E., Swenson, C. & Woolaway, C. Factors affecting marine debris deposition at French Frigate Shoals, Northwestern Hawaiian Islands Marine National Monument, 1990–2006. *Marine Pollution Bulletin* 54, 1162–1169 (2007). <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2007.04.014>

Muhonja, C. N., Makonde, H., Magoma, G. & Imbuga, M. Biodegradability of polyethylene by bacteria and fungi from Dandora dumpsite Nairobi-Kenya. *PLOS ONE* 13, e0198446 (2018). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0198446>

Murano, C., Bergami, E., Liberatori, G., Palumbo, A. & Corsi, I. Interplay Between Nanoplastics and the Immune System of the Mediterranean Sea Urchin *Paracentrotus lividus*. *Front. Mar. Sci.* 8, 647394 (2021). <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.647394>

Murazzi, M. E., Pradel, A., Schefer, R. B., Gessler, A. & Mitrano, D. M. Uptake and physiological impacts of nanoplastics in trees with divergent water use strategies. *Environ. Sci.: Nano* 11, 3574–3584 (2024). <https://doi.org/10.1039/D4EN00286E>

Nanthini devi, K., Raju, P., Santhanam, P. & Perumal, P. Impacts of microplastics on marine organisms: Present perspectives and the way forward. *Egyptian Journal of Aquatic Research* 48, 205–209 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.ejar.2022.03.001>

Nanthini devi, K., Raju, P., Santhanam, P. & Perumal, P. Impacts of microplastics on marine organisms: Present perspectives and the way forward. *Egyptian Journal of Aquatic Research* 48, 205–209 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.ejar.2022.03.001>

NASA. NASA Analysis Shows Unexpected Amount of Sea Level Rise in 2024 <https://sealevel.nasa.gov/news/282/nasa-analysis-shows-unexpected-amount-of-sea-level-rise-in-2024> (Abgerufen am 01.05.2025).

NASA. Steamy relationships: How atmospheric water vapor amplifies Earth's greenhouse effect. (2022) <https://science.nasa.gov/earth/climate-change/steamy-relationships-how-atmospheric-water-vapor-amplifies-earths-greenhouse-effect> (Abgerufen am 01.05.2025).

NASA. Tracking 30 Years of Sea Level Rise <https://earthobservatory.nasa.gov/images/150192/tracking-30-years-of-sea-level-rise> (Abgerufen am 01.05.2025).

NASA. What are Phytoplankton? <https://earthobservatory.nasa.gov/features/Phytoplankton> (Abgerufen am 01.05.2025).

National Center for Biotechnology Information. Bisphenol A, 2D Structure. PubChem. <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/1017#section=2D-Structure> (Abgerufen am 01.05.2025).

National Institute of Diabetes and Digestive and Kidney Diseases. Overweight & obesity statistics. NIDDK. (2021) <https://www.niddk.nih.gov/health-information/health-statistics/overweight-obesity> (Abgerufen am 01.05.2025).

Nava, V., Chandra, S., Aherne, J. et al. Plastic debris in lakes and reservoirs. *Nature* 619, 317–322 (2023). <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06168-4>

NBC News. '12 months of record ocean heat has scientists puzzled and concerned'. (2024) <https://www.nbcnews.com/science/environment/oceans-record-hot-rcna143179> (Abgerufen am 10.05.2025).

NBC News. Oceans hit record-hot temperatures. (2024) <https://www.nbcnews.com/science/environment/oceans-record-hot-rcna143179> (Abgerufen am 01.05.2025).

New Atlas. Autism in boys linked to common plastic exposure in the womb. (2024) <https://newatlas.com/health-wellbeing/prenatal-bisphenol-a-bpa-autism-boys> (Abgerufen am 01.05.2025).

News-Medical. Plasticizers can impair important brain functions in humans. (2021) <https://www.news-medical.net/news/20210412/Plasticizers-can-impair-important-brain-functions-in-humans.aspx> (Abgerufen am 01.05.2025).

Ng, E.-L. et al. An overview of microplastic and nanoplastic pollution in agroecosystems. *Science of The Total Environment* 627, 1377–1388 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.01.341>

Nihart, A.J., Garcia, M.A., El Hayek, E. et al. Bioaccumulation of microplastics in decedent human brains. *Nat Med* 31, 1114–1119 (2025). <https://doi.org/10.1038/s41591-024-03453-1>

[Nippon.com](https://www.nippon.com/en/features/h00194). Japan's aging society. <https://www.nippon.com/en/features/h00194> (Abgerufen am 01.05.2025).

NOAA Ocean Exploration. 'Marine Life'. (n.d.) <https://oceanexplorer.noaa.gov/explainers/marine-life.html> (Abgerufen am 10.05.2025).

NOAA Ocean Service. 'How far does light travel in the ocean?'. (n.d.) https://oceanservice.noaa.gov/facts/light_travel.html (Abgerufen am 01.05.2025).

NOAA. Data on the position of the North Magnetic Pole. <https://www.ngdc.noaa.gov/geomag/data/poles/NP.xy> (Abgerufen am 01.05.2025).

NOAA. Earth had its warmest year on record; Upper-ocean heat content was record high while Antarctic sea ice was record low. <https://www.ncei.noaa.gov/news/global-climate-202312> (Abgerufen am 01.05.2025).

NOAA. How much oxygen comes from the ocean? <https://oceanservice.noaa.gov/facts/ocean-oxygen.html> (Abgerufen am 01.05.2025).

NOAA. Ocean heat content. www.nodc.noaa.gov/OC5/3M_HEAT_CONTENT (Abgerufen am 01.05.2025).

O'Hanlon, N. J., James, N. A., Masden, E. A. & Bond, A. L. Seabirds and marine plastic debris in the northeastern Atlantic: A synthesis and recommendations for monitoring and research. *Environmental Pollution* 231, 1291–1301 (2017). <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.08.101>

Obbard, R. W. et al. Global warming releases microplastic legacy frozen in Arctic Sea ice. *Earth's Future* 2, 315–320 (2014). <https://doi.org/10.1002/2014EF000240>

Ocean Blue Project. Plastic Pollution in the Ocean: How Many Animals Die from Pollution? (2021) <https://oceanblueproject.org/wp-content/uploads/2023/02/how-many-animals-die-from-plastic-pollution-ocean-blue-report.pdf> (Abgerufen am 01.05.2025).

OECD (2023) Note: Regional summary data was calculated by Our World in Data based on OECD-provided data. [OurWorldinData.org/plastic-pollution](https://ourworldindata.org/plastic-pollution) | CC BY <https://ourworldindata.org/grapher/share-plastic-fate?-time=2019..latest> (Abgerufen am 01.05.2025).

Oliveri Conti, G. et al. Micro- and nano-plastics in edible fruit and vegetables. The first diet risks assessment for the general population. *Environmental Research* 187, 109677 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109677>

Organisation for Economic Co-operation and Development. Do adults have the skills they need to thrive in a changing world? OECD Publications. (2024) https://www.oecd.org/en/publications/do-adults-have-the-skills-they-need-to-thrive-in-a-changing-world_b263dc5d-en.html (Abgerufen am 01.05.2025).

Oßmann, B. E. et al. Small-sized microplastics and pigmented particles in bottled mineral water. *Water Research* 141, 307–316 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.05.027>

Ostle, C. et al. The rise in ocean plastics evidenced from a 60-year time series. *Nat Commun* 10, 1622 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41467-019-09506-1>

Our World in Data. Annual plastic waste by disposal method, World, 2000 to 2019. <https://ourworldindata.org/grapher/plastic-fate> (Abgerufen am 01.05.2025).

Our World in Data. Cancer deaths by type, World. <https://ourworldindata.org/grapher/cancer-deaths-by-type-grouped> (Abgerufen am 01.05.2025).

Our World in Data. Deaths from diabetes by type 1980-2021. <https://ourworldindata.org/grapher/deaths-from-diabetes-by-type> (Abgerufen am 01.05.2025).

Our World in Data. Microplastics in the ocean. <https://ourworldindata.org/grapher/microplastics-in-ocean> (Abgerufen am 01.05.2025).

Our World in Data. Number of deaths from cardiovascular diseases by age, worldwide. <https://ourworldindata.org/grapher/cardiovascular-disease-deaths-by-age> (Abgerufen am 01.05.2025).

Panisi, C. & Marini, M. Dynamic and Systemic Perspective in Autism Spectrum Disorders: A Change of Gaze in Research Opens to A New Landscape of Needs and Solutions. *Brain Sciences* 12, 250 (2022). <https://doi.org/10.3390/brainsci12020250>

Pantos, O. Microplastics: impacts on corals and other reef organisms. *Emerging Topics in Life Sciences* 6, 81–93 (2022). <https://doi.org/10.1042/ETLS20210236>

Park, S. Y. & Kim, C. G. Biodegradation of micro-polyethylene particles by bacterial colonization of a mixed microbial consortium isolated from a landfill site. *Chemosphere* 222, 527–533 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.01.159>

Pauling, L. *The Nature of the Chemical Bond*, 3rd edn, Chapter 12-2 (Cornell Univ. Press, 1960).

Pegler, S.S., Ferguson, D.J. Rapid heat discharge during deep-sea eruptions generates megaplumes and disperses tephra. *Nat Commun* 12, 2292 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41467-021-22439-y>

Peking University Center for Environmental Science and Engineering. Prof. Yi Huang's team made new progress in atmospheric microplastic distribution and its human health risk. CESE. (2022) <https://cese.pku.edu.cn/kycg/156506.htm> (Abgerufen am 01.05.2025).

Peng, X. et al. Microplastics contaminate the deepest part of the world's ocean. *Geochem. Persp. Let.* 9, 1–5 (2018). <https://doi.org/10.7185/geochemlet.1829>

Perini, D. A. et al. Surface-Functionalized Polystyrene Nanoparticles Alter the Transmembrane Potential via Ion-Selective Pores Maintaining Global Bilayer Integrity. *Langmuir* 38, 14837–14849 (2022). <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.2c02487>

Polyak, B. G., & Khutorskoy, M. D. (2018). Heat flow from the Earth's interior as an indicator of deep-seated processes. *Georesources*, 20(4), Part 2, 366–376. <https://doi.org/10.18599/grs.2018.4.366-376>

[Phys.org](https://phys.org). Quantum effects in proteins: How tiny particles coordinate energy transfer inside cells. (2025) <https://phys.org/news/2025-05-quantum-effects-proteins-tiny-particles.html> (Abgerufen am 01.05.2025).

- Plastics News. Study highlights health hazards of microplastics. (2019) <https://www.plasticsnews.com/news/study-highlights-health-hazards-microplastics> (Abgerufen am 01.05.2025).
- Pinheiro, H. T. et al. Plastic pollution on the world's coral reefs. *Nature* 619, 311–316 (2023). <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06113-5>
- Pollack, H. N., Hurter, S. J. & Johnson, J. R. Heat flow from the Earth's interior: Analysis of the global data set. *Rev. Geophys.* 31, 267–280 (1993). <https://doi.org/10.1029/93RG01249>
- Prata, J. C. et al. Microplastics in Internal Tissues of Companion Animals from Urban Environments. *Animals* 12, 1979 (2022). <https://doi.org/10.3390/ani12151979>
- Ragusa, A. et al. Plasticenta: First evidence of microplastics in human placenta. *Environment International* 146, 106274 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106274>
- Ragusa, A. et al. Raman Microspectroscopy Detection and Characterisation of Microplastics in Human Breastmilk. *Polymers* 14, 2700 (2022). <https://doi.org/10.3390/polym14132700>
- Rahman, A. M. N. A. A. et al. A review of microplastic surface interactions in water and potential capturing methods. *Water Science and Engineering* 17, 361–370 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.wse.2023.11.008>
- Rai, P. K., Sonne, C., Brown, R. J. C., Younis, S. A. & Kim, K.-H. Adsorption of environmental contaminants on micro- and nano-scale plastic polymers and the influence of weathering processes on their adsorptive attributes. *Journal of Hazardous Materials* 427, 127903 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127903>
- Rajendran, D. & Chandrasekaran, N. Journey of micronanoplastics with blood components. *RSC Adv.* 13, 31435–31459 (2023). <https://doi.org/10.1039/D3RA05620A>
- Ramsperger, A. F. R. M. et al. Environmental exposure enhances the internalization of microplastic particles into cells. *Sci. Adv.* 6, eabd1211 (2020). <https://doi.org/10.1126/sciadv.abd1211>
- Rantanen, M., Karpechko, A.Y., Lipponen, A. et al. The Arctic has warmed nearly four times faster than the globe since 1979. *Commun Earth Environ* 3, 168 (2022). <https://doi.org/10.1038/s43247-022-00498-3>
- Reichert, J., Schellenberg, J., Schubert, P. & Wilke, T. Responses of reef building corals to microplastic exposure. *Environmental Pollution* 237, 955–960 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.11.006>
- Riazi, H. et al. Specific heat control of nanofluids: A critical review. *International Journal of Thermal Sciences* 107, 25–38 (2016). <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2016.03.024>
- Ribe, E., Cezard, G. I., Marshall, A. & Keenan, K. Younger but sicker? Cohort trends in disease accumulation among middle-aged and older adults in Scotland using health-linked data from the Scottish Longitudinal Study. *European Journal of Public Health* 34, 696–703 (2024). <https://doi.org/10.1093/eurpub/ckae062>
- Rillig, M. C., Ingraffia, R. & De Souza Machado, A. A. Microplastic Incorporation into Soil in Agroecosystems. *Front. Plant Sci.* 8, 1805 (2017). <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01805>

- Rogers, T. The political economy of autism. Substack. <https://tobyrogers.substack.com/p/the-political-economy-of-autism> (Abgerufen am 01.05.2025).
- Roman, L., Hardesty, B. D., Hindell, M. A. & Wilcox, C. A quantitative analysis linking seabird mortality and marine debris ingestion. *Sci Rep* 9, 3202 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41598-018-36585-9>
- Romera-Castillo, C. et al. Abiotic plastic leaching contributes to ocean acidification. *Science of The Total Environment* 854, 158683 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158683>
- Romps, D. M., Seeley, J. T., Vollaro, D. & Molinari, J. Projected increase in lightning strikes in the United States due to global warming. *Science* 346, 851–854 (2014). <https://doi.org/10.1126/science.1259100>
- Rosenthal, Y. et al. Pacific Ocean Heat Content During the Past 10,000 Years. *Science* 342, 617–621 (2013). <https://doi.org/10.1126/science.1240837>
- Rosenthal, Y., Linsley, B. K., & Oppo, D. W. (2013). Pacific Ocean Heat Content During the Past 10,000 Years. *Science*, 342(6158), 617–621. <https://doi.org/10.1126/science.1240837>; Oppo, D. (2013, October 31). Is Global Heating Hiding Out in the Oceans? <https://www.earth.columbia.edu/articles/view/3130> (Abgerufen am 01.05.2025).
- Rubin, B. S. Bisphenol A: An endocrine disruptor with widespread exposure and multiple effects. *The Journal of Steroid Biochemistry and Molecular Biology* 127, 27–34 (2011). <https://doi.org/10.1016/j.jsbmb.2011.05.002>
- Sajjad, M. et al. Microplastics in the soil environment: A critical review. *Environmental Technology & Innovation* 27, 102408 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.eti.2022.102408>
- Sarkar, P., Xavier, K. A. M., Shukla, S. P. & Rathi Bhuvaneswari, G. Nanoplastic exposure inhibits growth, photosynthetic pigment synthesis and oxidative enzymes in microalgae: A new threat to primary producers in aquatic environment. *Journal of Hazardous Materials Advances* 17, 100613 (2025). <https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2025.100613>
- Savoca, M. S., McInturf, A. G. & Hazen, E. L. Plastic ingestion by marine fish is widespread and increasing. *Global Change Biology* 27, 2188–2199 (2021). <https://doi.org/10.1111/gcb.15533>
- Savoca, M. S., Wohlfeil, M. E., Ebeler, S. E. & Nevitt, G. A. Marine plastic debris emits a keystone infochemical for olfactory foraging seabirds. *Sci. Adv.* 2, e1600395 (2016). <https://doi.org/10.1126/sciadv.1600395>
- Schmidt, C. et al. A multidisciplinary perspective on the role of plastic pollution in the triple planetary crisis. *Environment International* 193, 109059 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.envint.2024.109059>
- Schmidt, C., Krauth, T. & Wagner, S. Export of Plastic Debris by Rivers into the Sea. *Environ. Sci. Technol.* 51, 12246–12253 (2017). <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b02368>
- Schymanski, D., Goldbeck, C., Humpf, H.-U. & Fürst, P. Analysis of microplastics in water by micro-Raman spectroscopy: Release of plastic particles from different packaging into mineral water. *Water Research* 129, 154–162 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.11.011>

- Science News Explores. Seafloor hosts surprising number of deep-sea vents. (2016) <https://www.snexplores.org/article/seafloor-hosts-surprising-number-deep-sea-vents> (Abgerufen am 10.05.2025).
- ScienceDirect. Food allergy. ScienceDirect Topics. <https://www.sciencedirect.com/topics/pharmacology-toxicology-and-pharmaceutical-science/food-allergy> (Abgerufen am 01.05.2025).
- ScienceDirect. Inflammatory bowel disease. ScienceDirect Topics. <https://www.sciencedirect.com/topics/pharmacology-toxicology-and-pharmaceutical-science/inflammatory-bowel-disease> (Abgerufen am 01.05.2025).
- ScienceDirect. Ingestion. ScienceDirect Topics. <https://www.sciencedirect.com/topics/biochemistry-genetics-and-molecular-biology/ingestion> (Abgerufen am 01.05.2025).
- Scott C. Doney, D. Shallin Busch, Sarah R. Cooley and Kristy J. Kroeker. The Impacts of Ocean Acidification on Marine Ecosystems and Reliant Human Communities. *Annual Review of Environment and Resources* 45, 83–112 (2020). <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-012320-083019>
- Senathirajah, K. et al. Estimation of the mass of microplastics ingested – A pivotal first step towards human health risk assessment. *Journal of Hazardous Materials* 404, 124004 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124004>
- Shafea, L. et al. Microplastics in agroecosystems: A review of effects on soil biota and key soil functions. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 186, 5–22 (2023). <https://doi.org/10.1002/jpln.202200136>
- Shanwei Government. Content on environmental health. Microplastics found in the human body for the first time, are they harmful to health? Here's the answer. https://www.shanwei.gov.cn/swbj/467/503/content/post_550539.html (Abgerufen am 01.05.2025).
- Shapiro-Mendoza, C. K. et al. Sudden Unexpected Infant Deaths: 2015–2020. *Pediatrics* 151, e2022058820 (2023). <https://doi.org/10.1542/peds.2022-058820>
- Sharma, R. K. et al. Impact of Microplastics on Pregnancy and Fetal Development: A Systematic Review. *Cureus* 16, e60712 (2024). <https://doi.org/10.7759/cureus.60712>
- Sharqawy, M. H., Lienhard, J. H. & Zubair, S. M. Thermophysical properties of seawater: a review of existing correlations and data. *Desalination and Water Treatment* 16, 354–380 (2010). <https://doi.org/10.5004/dwt.2010.1079>
- Shaw, D. B., Li, Q., Nunes, J. K. & Deike, L. Ocean emission of microplastic. *PNAS Nexus* 2, pgad296 (2023). <https://doi.org/10.1093/pnasnexus/pgad296>
- Smith, A. L. M., Whitehall, J. C. & Greaves, L. C. Mitochondrial DNA mutations in ageing and cancer. *Molecular Oncology* 16, 3276–3294 (2022). <https://doi.org/10.1002/1878-0261.13291>
- Sofield, C. E., Anderton, R. S. & Gorecki, A. M. Mind over Microplastics: Exploring Microplastic-Induced Gut Disruption and Gut-Brain-Axis Consequences. *Current Issues in Molecular Biology* 46, 4186–4202 (2024). <https://doi.org/10.3390/cimb46050256>

- Sori, M. M. & Bramson, A. M. Water on Mars, With a Grain of Salt: Local Heat Anomalies Are Required for Basal Melting of Ice at the South Pole Today. *Geophysical Research Letters* 46, 1222–1231 (2019). <https://doi.org/10.1029/2018GL080985>
- Stallings, E. B. et al. National population-based estimates for major birth defects, 2016–2020. *Birth Defects Research* 116, e2301 (2024). <https://doi.org/10.1002/bdr2.2301>
- Strass, V. H., Rohardt, G., Kanzow, T., Hoppema, M. & Boebel, O. Multidecadal warming and density loss in the Deep Weddell Sea, Antarctica. *Journal of Climate* 33, 9863–9881 (2020). <https://doi.org/10.1175/jcli-d-20-0271.1>
- Su, M. et al. Toxicity Mechanisms of Microplastic and Its Effects on Ruminant Production: A Review. *Biomolecules* 15, 462 (2025). <https://doi.org/10.3390/biom15040462>
- Sun, D., Li, F., Jing, Z., Hu, S., & Zhang, B. (2023). Frequent marine heatwaves hidden below the surface of the global ocean. *Nature Geoscience*, 16(12), 1099–1104. <https://doi.org/10.1038/s41561-023-01325-w>
- Sun, Q. et al. Association of Urinary Concentrations of Bisphenol A and Phthalate Metabolites with Risk of Type 2 Diabetes: A Prospective Investigation in the Nurses' Health Study (NHS) and NHSII Cohorts. *Environ Health Perspect* 122, 616–623 (2014). <https://doi.org/10.1289/ehp.1307201>
- Sun, R. et al. Preliminary study on impacts of polystyrene microplastics on the hematological system and gene expression in bone marrow cells of mice. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 218, 112296 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112296>
- Sun, XD., Yuan, XZ., Jia, Y. et al. Differentially charged nanoplastics demonstrate distinct accumulation in *Arabidopsis thaliana*. *Nat. Nanotechnol.* 15, 755–760 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41565-020-0707-4>
- Sunaga, N., Okochi, H., Niida, Y. & Miyazaki, A. Alkaline extraction yields a higher number of microplastics in forest canopy leaves: implication for microplastic storage. *Environ Chem Lett* 22, 1599–1606 (2024). <https://doi.org/10.1007/s10311-024-01725-3>
- Susanti, R., Yuniastuti, A. & Fibriana, F. The Evidence of Microplastic Contamination in Central Javanese Local Ducks from Intensive Animal Husbandry. *Water Air Soil Pollut* 232, 178 (2021). <https://doi.org/10.1007/s11270-021-05142-y>
- Sustainable Plastics. Scientists find microplastics in clouds above Mount Fuji. Sustainable Plastics. <https://www.sustainableplastics.com/news/scientists-find-microplastics-clouds-above-mount-fuji> (Abgerufen am 01.05.2025).
- Symeonides, C., Vacy, K., Thomson, S. et al. Male autism spectrum disorder is linked to brain aromatase disruption by prenatal BPA in multimodal investigations and 10HDA ameliorates the related mouse phenotype. *Nat Commun* 15, 6367 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41467-024-48897-8>
- Taylor, R., Turnbull, D. Mitochondrial DNA mutations in human disease. *Nat Rev Genet* 6, 389–402 (2005). <https://doi.org/10.1038/nrg1606>

The Cool Down. 'Experts raise concerns about record-breaking phenomenon observed in Atlantic Ocean: 'It's just astonishing'. (2024) <https://www.thecooldown.com/outdoors/ocean-temperature-pollution-sudden-spike/> (Abgerufen am 10.05.2025)

The European Space Agency (ESA). <https://www.esa.int> (Abgerufen am 01.05.2025).

The Guardian. Autism could be diagnosed with stool sample, scientists say. <https://www.theguardian.com/science/article/2024/jul/08/autism-could-be-diagnosed-with-stool-sample-microbes-research> (Abgerufen am 01.05.2025).

The Guardian. Hot blob: vast patch of warm water off New Zealand coast puzzles scientists. (2019) <https://www.theguardian.com/world/2019/dec/27/hot-blob-vast-and-unusual-patch-of-warm-water-off-new-zealand-coast-puzzles-scientists> (Abgerufen am 10.05.2025).

The Guardian. Mental health overtakes cancer and obesity as Britons' biggest health worry. (2024) <https://www.theguardian.com/society/2024/sep/20/mental-health-overtakes-cancer-and-obesity-as-britons-biggest-health-worry> (Abgerufen am 01.05.2025).

The Guardian. Scientists unveil bionic robo-fish to remove microplastics from seas. <https://www.theguardian.com/environment/2022/jun/22/scientists-unveil-bionic-robo-fish-to-remove-microplastics-from-seas> (Abgerufen am 01.05.2025).

The Guardian. Shanna Swan: 'Most couples may have to use assisted reproduction by 2045'. (2021) <https://www.theguardian.com/society/2021/mar/28/shanna-swan-fertility-reproduction-count-down> (Abgerufen am 01.05.2025).

The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Climate Change 2021: The Physical Science Basis. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1> (Abgerufen am 01.05.2025).

The International Union for Conservation of Nature (IUCN). Ocean deoxygenation. <https://iucn.org/resources/issues-brief/ocean-deoxygenation> (Abgerufen am 01.05.2025).

The Ocean Foundation. Ocean conservation. The Ocean Foundation. <https://oceanfdn.org> (Abgerufen am 01.05.2025).

The Pennsylvania State University Research. Microplastics impact cloud formation, likely affecting weather and climate. (2024) <https://www.psu.edu/news/research/story/microplastics-impact-cloud-formation-likely-affecting-weather-and-climate> (Abgerufen am 01.05.2025).

Thompson, R. C. et al. Twenty years of microplastic pollution research—what have we learned? Science 386, eadl2746 (2024). <https://doi.org/10.1126/science.adl2746>

Tikhonova, D. A., Karetnikov, S. G., Ivanova, E. V. & Shalunova, E. P. The Vertical Distribution of Microplastics in the Water Column of Lake Ladoga. Water Resour 51, 146–153 (2024). <https://doi.org/10.1134/S009780782370063X>

Trasande, L. et al. Prenatal phthalate exposure and adverse birth outcomes in the USA: a prospective analysis of births and estimates of attributable burden and costs. The Lancet Planetary Health 8, e74–e85 (2024). [https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(23\)00270-X](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(23)00270-X)

Tsujimura, A. et al. Erectile Function and Sexual Activity Are Declining in the Younger Generation: Results from a National Survey in Japan. *The World Journal of Men's Health* 43, 239–248 (2025). <https://doi.org/10.5534/wjmh.240137>

Tuna, A., Taş, B.M., Başaran Kankılıç, G. et al. Detection of microplastics in patients with allergic rhinitis. *Eur Arch Otorhinolaryngol* 280, 5363–5367 (2023). <https://doi.org/10.1007/s00405-023-08105-7>

U.S. Department Of Health And Human Services. 2022 National Healthcare Quality and Disparities Report. Rockville, MD: Agency for Healthcare Research and Quality. (2022) <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK587174> (Abgerufen am 01.05.2025).

United Nations Development Programme. Ocean hypoxia: Dead zones. <https://www.undp.org/publications/issue-brief-ocean-hypoxia-dead-zones> (Abgerufen am 01.05.2025).

United Nations Environment Programme (2021). From Pollution to Solution: A global assessment of marine litter and plastic pollution. Nairobi. <https://www.unep.org/resources/pollution-solution-global-assessment-marine-litter-and-plastic-pollution> (Abgerufen am 01.05.2025)

United Nations Environment Programme (UNEP) Beat plastic pollution <https://www.unep.org/interactives/beat-plastic-pollution> (Abgerufen am 01.05.2025)

United Nations Environment Programme. Chemicals in Plastics - A Technical Report (2023). <https://www.unep.org/resources/report/chemicals-plastics-technical-report> (Abgerufen am 01.05.2025)

United Nations Environment Programme. Monitoring Plastics in Rivers and Lakes: Guidelines for the Harmonization of Methodologies. (2020) <https://www.unep.org/resources/report/monitoring-plastics-rivers-and-lakes-guidelines-harmonization-methodologies> (Abgerufen am 01.05.2025)

United Nations Environment Programme (UNEP). Beat plastic pollution <https://www.unep.org/interactives/beat-plastic-pollution> (Abgerufen am 01.05.2025)

United Nations Malaysia. Policy brief on solid waste management. UN Malaysia. https://malaysia.un.org/sites/default/files/2022-02/POLSOLSum_1.pdf (Abgerufen am 01.05.2025).

University of Newcastle. Plastic ingestion by people could be equating to a credit card a week. <https://www.newcastle.edu.au/newsroom/featured/plastic-ingestion-by-people-could-be-equating-to-a-credit-card-a-week> (Abgerufen am 01.05.2025)

University of Stirling. Hitch-hiking viruses can survive on microplastics in freshwater, new study finds. (2022) <https://www.stir.ac.uk/news/2022/june-2022-news/hitch-hiking-viruses-can-survive-on-microplastics-in-freshwater-new-study-finds> (Abgerufen am 01.05.2025).

- Valero, D., Belay, B. S., Moreno-Rodenas, A., Kramer, M. & Franca, M. J. The key role of surface tension in the transport and quantification of plastic pollution in rivers. *Water Research* 226, 119078 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.119078>
- Van der Veen, I., van Mourik, L.M., van Velzen, M.J.M., Groenewoud, Q.R., & Leslie, H.A. Plastic particles in livestock feed, milk, meat and blood: A pilot study. Report EH22-01, 29 April 2022. <https://vakbladvoeding-sindustrie.nl/storage/app/media/Rapporten/rapporten%202022/07-juli/VOE-2022-JUL-PLASTICSOUP.pdf> (Abgerufen am 01.05.2025)
- Van Schependom, J. & D'haeseleer, M. Advances in Neurodegenerative Diseases. *Journal of Clinical Medicine* 12, 1709 (2023). <https://doi.org/10.3390/jcm12051709>
- Van Sebille, E., England, M. H. & Froyland, G. Origin, dynamics and evolution of ocean garbage patches from observed surface drifters. *Environ. Res. Lett.* 7, 044040 (2012). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/7/4/044040>
- Vanuytsel, T., Bercik, P. & Boeckxstaens, G. Understanding neuroimmune interactions in disorders of gut–brain interaction: from functional to immune-mediated disorders. *Gut* 72, 787–798 (2023). <https://doi.org/10.1136/gutjnl-2020-320633>
- Vieira, F., & Hamza, V. M. Global heat flow: New estimates using digital maps and GIS techniques. *Int. J. Terr. Heat Flow Appl. Geotherm.* 1, 6–13 (2018).
- Villarrubia-Gómez, P., Carney Almroth, B., Eriksen, M., Ryberg, M. & Cornell, S. E. Plastics pollution exacerbates the impacts of all planetary boundaries. *One Earth* 7, 2119–2138 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2024.10.017>
- Viterito, A. 1995: An Important Inflection Point in Recent Geophysical History. *Int. J. Environ. Sci. Nat. Res.* 29, 556271 (2022). <https://doi.org/10.19080/IJESNR.2022.29.556271>
- Völker, J., Ashcroft, F., Vedøy, Å., Zimmermann, L. & Wagner, M. Adipogenic Activity of Chemicals Used in Plastic Consumer Products. *Environ. Sci. Technol.* 56, 2487–2496 (2022). <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c06316>
- VRT NWS. Brain contains “full plastic spoonful” of microplastics. (2025) <https://www.vrt.be/vrtnws/nl/2025/02/04/microplastics-in-de-hersenen> (Abgerufen am 01.05.2025).
- Wan, Y., Wu, C., Xue, Q. & Hui, X. Effects of plastic contamination on water evaporation and desiccation cracking in soil. *Science of The Total Environment* 654, 576–582 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.123>
- Wang, Y. et al. Airborne hydrophilic microplastics in cloud water at high altitudes and their role in cloud formation. *Environ Chem Lett* 21, 3055–3062 (2023). <https://doi.org/10.1007/s10311-023-01626-x>
- Wang, Y. et al. Robust, Healable, Self-Locomotive Integrated Robots Enabled by Noncovalent Assembled Gradient Nanostructure. *Nano Lett.* 22, 5409–5419 (2022). <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.2c01375>

Wang, Y., Okochi, H., Tani, Y. et al. Airborne hydrophilic microplastics in cloud water at high altitudes and their role in cloud formation. *Environ Chem Lett* 21, 3055–3062 (2023). <https://doi.org/10.1007/s10311-023-01626-x>

Wei, W. et al. Analyzing the Trends and Causes of Birth Defects — Jinan City, Shandong Province, China, 2005–2022. *CCDCW* 5, 978–983 (2023). <https://doi.org/10.46234/ccdcw2023.184>

Welch, B. M. et al. Associations Between Prenatal Urinary Biomarkers of Phthalate Exposure and Preterm Birth: A Pooled Study of 16 US Cohorts. *JAMA Pediatrics* 176, 895–905 (2022). <https://doi.org/10.1001/jamapediatrics.2022.2252>

Windheim, J. et al. Micro- and Nanoplastics' Effects on Protein Folding and Amyloidosis. *International Journal of Molecular Sciences* 23, 10329 (2022). <https://doi.org/10.3390/ijms231810329>

Winiarska, E., Jutel, M. & Zemelka-Wiacek, M. The potential impact of nano- and microplastics on human health: Understanding human health risks. *Environmental Research* 251, 118535 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.118535>

Wong, A. P. S. et al. Argo Data 1999–2019: Two Million Temperature-Salinity Profiles and Subsurface Velocity Observations From a Global Array of Profiling Floats. *Front. Mar. Sci.* 7, 00700 (2020). <https://doi.org/10.3389/fmars.2020.00700>

Wong, M. H. et al. Evolution of the Horizontal Winds in Jupiter's Great Red Spot From One Jovian Year of HST/WFC3 Maps. *Geophysical Research Letters* 48, e2021GL093982 (2021). <https://doi.org/10.1029/2021GL093982>

Woods Hole Oceanographic Institution. Warming ocean. WHOI Argo. <https://www2.whoi.edu/site/argo/impacts/warming-ocean> (Abgerufen am 01.05.2025).

World Energy Council. World Energy Resources: Solar 2013. (2013) <https://www.worldenergy.org/publications> (Abgerufen am 10.05.2025).

World Health Organization. 1 in 10 babies worldwide are born early, with major impacts on health and survival. (2023) <https://www.who.int/news/item/06-10-2023-1-in-10-babies-worldwide-are-born-early--with-major-impacts-on-health-and-survival> (Abgerufen am 01.05.2025).

World Health Organization. 1 in 6 people globally affected by infertility. (2023) <https://www.who.int/news/item/04-04-2023-1-in-6-people-globally-affected-by-infertility> (Abgerufen am 01.05.2025).

World Health Organization. Global cancer burden growing, amidst mounting need for services. (2024) <https://www.who.int/news/item/01-02-2024-global-cancer-burden-growing--amidst-mounting-need-for-services> (Abgerufen am 01.05.2025).

World Health Organization. Mental disorders. WHO Fact Sheets. (2022) <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/mental-disorders> (Abgerufen am 01.05.2025).

- World Health Organization. Obesity and overweight. WHO Fact Sheets. (2025) <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/obesity-and-overweight> (Abgerufen am 01.05.2025).
- World Health Organization. The top 10 causes of death. WHO Fact Sheets. (2024) <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/the-top-10-causes-of-death> (Abgerufen am 01.05.2025).
- World Health Organization. WHO releases first-ever list of health-threatening fungi. (2022) <https://www.who.int/news/item/25-10-2022-who-releases-first-ever-list-of-health-threatening-fungi> (Abgerufen am 01.05.2025).
- World Meteorological Organization (WMO) confirms 2024 as warmest year on record at about 1.55°C above pre-industrial level. <https://wmo.int/news/media-centre/wmo-confirms-2024-warmest-year-record-about-155degc-above-pre-industrial-level> (Abgerufen am 01.05.2025).
- World Meteorological Organization (WMO). State of the Global Climate 2024. <https://wmo.int/publication-series/state-of-global-climate-2024> (Abgerufen am 01.05.2025).
- Wu, Y. et al. Effect of microplastics exposure on the photosynthesis system of freshwater algae. *Journal of Hazardous Materials* 374, 219–227 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.04.039>
- WWF-Australia. How many birds die from plastic pollution? <https://wwf.org.au/blogs/how-many-birds-die-from-plastic-pollution> (Abgerufen am 01.05.2025).
- Xu, G., Strathearn, L., Liu, B., Yang, B. & Bao, W. Twenty-Year Trends in Diagnosed Attention-Deficit/Hyperactivity Disorder Among US Children and Adolescents, 1997-2016. *JAMA Network Open* 1, e181471 (2018). <https://doi.org/10.1001/jamanetworkopen.2018.1471>
- Xu, M. et al. Internalization and toxicity: A preliminary study of effects of nanoplastic particles on human lung epithelial cell. *Science of The Total Environment* 694, 133794 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.133794>
- Yadav, A., Vuković, L. & Narayan, M. An Atomic and Molecular Insight into How PFOA Reduces α -Helicity, Compromises Substrate Binding, and Creates Binding Pockets in a Model Globular Protein. *J. Am. Chem. Soc.* 146, 12766–12777 (2024). <https://doi.org/10.1021/jacs.4c02934>
- Yee, M. S.-L. et al. Impact of Microplastics and Nanoplastics on Human Health. *Nanomaterials* 11, 496 (2021). <https://doi.org/10.3390/nano11020496>
- Yöntem, F. D. & Ahbab, M. A. Mitochondria as a target of micro- and nanoplastic toxicity. *Cambridge Prisms: Plastics* 2, e6 (2024). <https://doi.org/10.1017/plc.2024.6>
- Yoshida, S. et al. A bacterium that degrades and assimilates poly(ethylene terephthalate). *Science* 351, 1196–1199 (2016). <https://doi.org/10.1126/science.aad6359>
- Yu, H., Zhang, Y., Tan, W. & Zhang, Z. Microplastics as an Emerging Environmental Pollutant in Agricultural Soils: Effects on Ecosystems and Human Health. *Front. Environ. Sci.* 10, 855292 (2022). <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.855292>

- Yu, R.-S. & Singh, S. Microplastic Pollution: Threats and Impacts on Global Marine Ecosystems. *Sustainability* 15, 13252 (2023). <https://doi.org/10.3390/su151713252>
- Zaheer, J. et al. Pre/post-natal exposure to microplastic as a potential risk factor for autism spectrum disorder. *Environment International* 161, 107121 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.envint.2022.107121>
- Zajac, M. et al. Exposure to polystyrene nanoparticles leads to changes in the zeta potential of bacterial cells. *Sci Rep* 13, 9552 (2023). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-36603-5>
- Zeidan, J. et al. Global prevalence of autism: A systematic review update. *Autism Research* 15, 778–790 (2022). <https://doi.org/10.1002/aur.2696>
- Zhang, J., Wang, L., Trasande, L. & Kannan, K. Occurrence of Polyethylene Terephthalate and Polycarbonate Microplastics in Infant and Adult Feces. *Environ. Sci. Technol. Lett.* 8, 989–994 (2021). <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.1c00559>
- Zhang, W. et al. The mechanism for adsorption of Cr(VI) ions by PE microplastics in ternary system of natural water environment. *Environmental Pollution* 257, 113440 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113440>
- Zhang, Y. et al. Selective bioaccumulation of polystyrene nanoplastics in fetal rat brain and damage to myelin development. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 278, 116393 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2024.116393>
- Zhang, Y., Wang, J., Yang, H. & Guan, Y. The potential mechanisms underlying phthalate-induced hypospadias: a systematic review of rodent model studies. *Front. Endocrinol.* 15, (2024). <https://doi.org/10.3389/fendo.2024.1490011>
- Zhang, Y.-W. et al. Bridging relevance between microplastics, human health and bone metabolism: Emerging threats and research directions. *Environmental Chemistry and Ecotoxicology* 6, 422–435 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.enceco.2024.08.006>
- Zhong, Y. et al. Global, regional and national burdens of bipolar disorders in adolescents and young adults: a trend analysis from 1990 to 2019. *Gen Psych* 37, e101255 (2024). <https://doi.org/10.1136/gpsych-2023-101255>
- Zhu, R. et al. A global estimate of multiecosystem photosynthesis losses under microplastic pollution. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 122, e2423957122 (2025). <https://doi.org/10.1073/pnas.2423957122>
- Zuin, M. et al. Trends in Sudden Cardiac Death Among Adults Aged 25 to 44 Years in the United States: An Analysis of 2 Large US Databases. *JAHA* 14, e035722 (2025). <https://doi.org/10.1161/JAHA.124.035722>