



Co-funded by
the European Union

Die Reinigungstruppe der Natur: Wie Mikroben Umweltverschmutzung beseitigen



BIO4YOU
AR 2.0

BIO-INSPIRED STEM TOPICS FOR ENGAGING YOUNG GENERATIONS
THANKS TO THE USE OF AUGMENTED REALITY

Project Number: KA220-BW-23-30-126516

"Funded by the European Union. Views and opinions expressed are however those of the author(s) only and do not necessarily reflect those of the European Union or the European Education and Culture Executive Agency (EACEA). Neither the European Union nor EACEA can be held responsible for them."

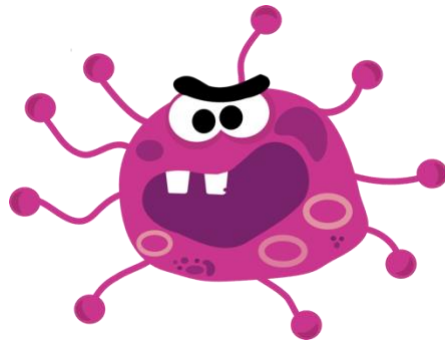




INHALTSVERZEICHNIS

· Einleitung.....	2
· Was sind Mikroben?.....	3
· Die Bedeutung von Mikroben.....	4
· Umweltverschmutzungsprobleme.....	5
· Die Rolle von Mikroben bei der Beseitigung von Umweltverschmutzung.....	7
· Einführung in die biologische Sanierung.....	10
· Wie Mikroben Schadstoffe „fressen“ oder abbauen.....	11
· Beispiele für mikrobielle biologische Sanierung.....	12
· Mikrobielle Sanierung.....	13
· Natürliche Abbauprozesse.....	16
· Fallstudien.....	17
· Biotechnologie und die Zukunft.....	18
· Augmented Reality in Aktion: Erforschung der mikrobiellen Sanierung.....	20
· Implementierung von AR in der Ausbildung zur mikrobiellen Bioremediation.....	21
· Fazit.....	23
· Ressourcen.....	25





Allgemeines Thema des Lernpfads	Mikrobielle Bioremediation und Umweltinnovation
Spezifischer Name der Lerneinheit	Die Reinigungstruppe der Natur: Wie Mikroben Umweltverschmutzung beseitigen
Zielgruppe	14–18 Jahre
Voraussetzungen für Lernende	Grundkenntnisse in Biologie, Chemie und Umweltwissenschaften
Beschreibung der Lerneinheit	Diese Einheit führt in das Konzept der biologischen Sanierung ein und zeigt, wie Mikroben zur Reinigung verschmutzter Umgebungen eingesetzt werden. Die Lernenden beschäftigen sich anhand interaktiver Inhalte und AR-Simulationen mit der Vielfalt der Mikroorganismen, verschiedenen Arten von Verschmutzung und Reinigungsmethoden.
Beteiligte Fächer	Biologie, Chemie, Umweltwissenschaften, Technologie
Stichworte	Mikroben, biologische Sanierung, Umweltverschmutzung, Nachhaltigkeit, AR, Innovation, Umweltwissenschaften
Erwerbbare Schlüsselkompetenzen, Fähigkeiten und Kenntnisse	Verständnis der Rolle von Mikroben bei der Beseitigung von Umweltverschmutzung, Bewertung realer Fälle von biologischer Sanierung, Anwendung von AR-Tools zur Visualisierung mikrobieller Aktivitäten und Entwicklung von Lösungen für Umweltprobleme.
Verwendete Ressourcen und didaktische Hilfsmittel	Wissenschaftliche Artikel, AR-Plattformen (Assemblr EDU, Merge Cube), interaktive Simulationen, Fallstudienunterlagen, mikrobiologische Datenbanken
Bewertungskriterien und Beurteilung	Bewertung durch interaktive AR-basierte Simulationen, Verständnis der Funktionen





von Mikroorganismen, Fallanalyse und von
den Lernenden erstellte visuelle Erklärungen
oder Projekte

Einleitung

Die biologische Sanierung ist eine vielversprechende Lösung im Kampf gegen Umweltverschmutzung. Im Wesentlichen nutzt sie die natürlichen Fähigkeiten von Mikroorganismen zur Reinigung kontaminierter Standorte und bietet einen innovativen und oft wirtschaftlichen Ansatz für einige der kritischsten ökologischen Probleme unserer Zeit. Durch den Einsatz von Bakterien, Pilzen oder Pflanzen verändert die biologische Sanierung unseren Umgang mit Schadstoffen, von Ölverschmutzungen bis hin zu giftigen Schwermetallen, da unser Verständnis dieser natürlichen Systeme ständig wächst.

Das Konzept ist relativ einfach: Mikroorganismen, winzige, aber mächtige Lebensformen, verfügen über einzigartige Stoffwechselwege, die es ihnen ermöglichen, schädliche Substanzen abzubauen oder in weniger giftige Verbindungen umzuwandeln. In verschmutzten Umgebungen können diese Organismen gefördert oder ergänzt werden, um den Abbau von Schadstoffen zu beschleunigen und so zur Wiederherstellung des ökologischen Gleichgewichts beizutragen.

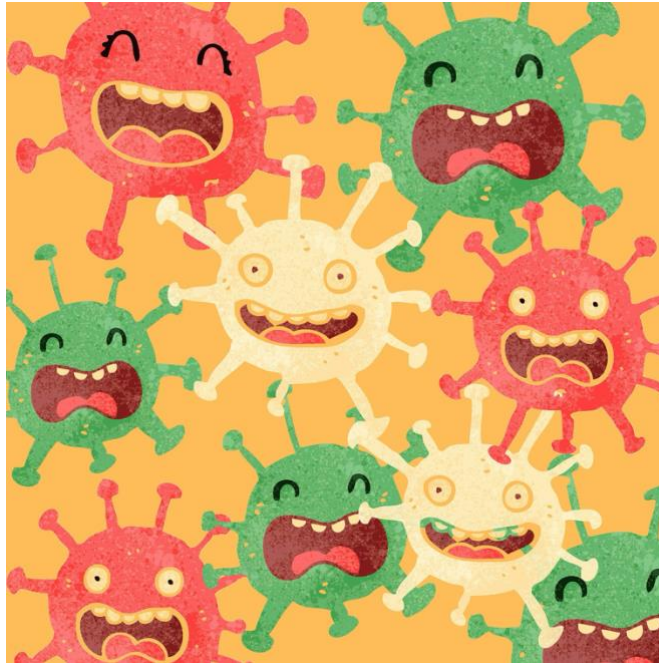
Ein bekanntes Beispiel ist die Beseitigung von Ölverschmutzungen. Die Katastrophe der Exxon Valdez im Jahr 1989 machte die verheerenden Auswirkungen solcher Vorfälle deutlich und weckte gleichzeitig das Interesse an der biologischen Sanierung. Wissenschaftler haben entdeckt, dass bestimmte Bakterien, wie beispielsweise *Alcanivorax borkumensis*, sich auf natürliche Weise von Kohlenwasserstoffen ernähren, die in Rohöl enthalten sind. Durch die Einführung dieser Mikroben an den Orten der Verschmutzung oder die Förderung ihres Wachstums durch zusätzliche Nährstoffe können die Reinigungsbemühungen erheblich verbessert und sowohl die unmittelbaren als auch die langfristigen Umweltschäden reduziert werden.

Über Öl hinaus ist die biologische Sanierung auch bei der Bekämpfung der Verschmutzung durch Schwermetalle praktikabel. Industrielle Aktivitäten hinterlassen oft gefährliche Elemente wie Blei, Quecksilber und Cadmium, die sowohl für Ökosysteme als auch für die menschliche Gesundheit eine Gefahr darstellen. Bestimmte Bakterien und Pilze, sogenannte Biosorbentien, können diese Metalle an ihre Zellstrukturen binden, wodurch sie weniger giftig und leichter aus der Umwelt zu entfernen sind (Hartman, 2024).



Was sind Mikroben?

Mikroben oder Mikroorganismen sind mikroskopisch kleine Lebensformen, die mit bloßem Auge normalerweise nicht sichtbar sind. Sie sind unglaublich vielfältig und bewohnen praktisch jede Umgebung auf der Erde, von Tiefseequellen bis zum menschlichen Körper. Mikroben spielen eine wesentliche Rolle in Ökosystemen, für die menschliche Gesundheit und in verschiedenen industriellen Prozessen.



Wichtige Arten von Mikroben:

1. Bakterien: Einzellige Organismen ohne Zellkern (Prokaryoten). Sie weisen eine Vielzahl von Formen und Stoffwechselfähigkeiten auf. Bakterien sind allgegenwärtig und kommen im Boden, im Wasser und als Teil des menschlichen Mikrobioms vor. Während einige Bakterien pathogen sind, sind viele nützlich und unterstützen Prozesse wie die Verdauung und den Nährstoffkreislauf.
2. Archaea: Archaea sind ebenfalls einzellige Prokaryoten, unterscheiden sich jedoch von Bakterien in ihrer genetischen Ausstattung und Membranzusammensetzung. Sie sind dafür bekannt, dass sie in extremen Umgebungen wie heißen Quellen und Salzseen gedeihen, kommen aber auch in gewöhnlicheren Lebensräumen vor, darunter im menschlichen Darm. Archaea spielen eine Rolle bei Prozessen wie der Methanproduktion und dem Stickstoffkreislauf (https://en.wikipedia.org/wiki/Archaea?utm_source=chatgpt.com).
3. Pilze: Zu dieser Gruppe gehören Hefen, Schimmelpilze und Speisepilze. Pilze sind eukaryotische Organismen (mit einem Zellkern), die einzellig oder mehrzellig sein





können. Sie sind wichtige Zersetzer in Ökosystemen, bauen organische Stoffe ab und finden Anwendung in der Lebensmittelproduktion und Medizin.

4. **Protisten:** Eine vielfältige Gruppe von meist einzelligen eukaryotischen Organismen. Zu den Protisten gehören Protozoen und bestimmte Arten von Algen. Sie bewohnen verschiedene Lebensräume, von Süßwasser- bis zu Meeresökosystemen, und spielen eine Rolle im Nährstoffkreislauf und als Teil des Nahrungsnetzes.
5. **Viren:** Zellfreie Gebilde, die aus genetischem Material (DNA oder RNA) bestehen, das von einer Proteinhülle umgeben ist. Viren benötigen eine Wirtszelle, um sich zu vermehren, und sind dafür bekannt, dass sie Krankheiten bei Menschen, Tieren und Pflanzen verursachen. Obwohl sie nicht nach allen Definitionen als „lebendig“ gelten, werden sie in der Mikrobiologie intensiv untersucht (https://www.britannica.com/science/microbiology/Types-of-microorganisms?utm_source=chatgpt.com).

Bedeutung von Mikroben

Mikroorganismen sind für das Leben auf der Erde von grundlegender Bedeutung und spielen eine entscheidende Rolle in Umweltprozessen, der menschlichen Gesundheit und der Biotechnologie.

1. Bedeutung für die Umwelt

- **Nährstoffkreislauf:** Mikroben sind für biogeochemische Kreisläufe wie den Stickstoff-, Kohlenstoff- und Schwefelkreislauf unverzichtbar, da sie die Umwandlung und Bewegung dieser Elemente durch Ökosysteme erleichtern (preprints.org).
- **Bioremediation:** Bestimmte Mikroben können Umweltgifte wie Kohlenwasserstoffe und Schwermetalle abbauen und sind daher für die Sanierung kontaminierter Standorte von unschätzbarem Wert.

2. Menschliche Gesundheit

- **Funktion des Mikrobioms:** Das menschliche Mikrobiom, das aus Billionen von Mikroben besteht, ist für die Verdauung, die Entwicklung des Immunsystems und den Schutz vor Krankheitserregern von entscheidender Bedeutung. Störungen in dieser mikrobiellen Gemeinschaft stehen mit verschiedenen Krankheiten in Zusammenhang (pmc.ncbi.nlm.nih.gov).
- **Krankheitsprävention und -therapie:** Fortschritte im Verständnis des Mikrobioms haben zu neuartigen therapeutischen Ansätzen geführt, darunter die Modulation des Mikrobioms zur Behandlung oder Vorbeugung von Krankheiten (nature.com).

3. Biotechnologische Anwendungen

- **Industrielle Prozesse:** Mikroben werden in der Biotechnologie zur Herstellung von Antibiotika, Enzymen, Biokraftstoffen und fermentierten Lebensmitteln eingesetzt. Ihre Stoffwechselkapazitäten werden in verschiedenen Industriezweigen genutzt.
- **Gentechnik:** Genetisch veränderte Mikroben werden für bestimmte Aufgaben entwickelt, wie z. B. die Herstellung therapeutischer Wirkstoffe oder den Abbau von Umweltgiften, was ihre Vielseitigkeit in der Biotechnologie unterstreicht.



Umweltverschmutzungsprobleme

Arten der Umweltverschmutzung



Abb. 1: Umweltverschmutzung, Quelle:
<https://gosharpener.com/blogs/710991/Environmental->

Luftverschmutzung

Luftverschmutzung bezeichnet das Vorhandensein schädlicher Substanzen in der Erdatmosphäre, darunter Gase, Partikel und biologische Moleküle, die die menschliche Gesundheit und die Umwelt gefährden können. Häufige Schadstoffe wie Kohlenmonoxid, Stickoxide, Schwefeldioxid, Ozon und Feinstaub stammen oft aus der Verbrennung fossiler Brennstoffe im Verkehr, in der Industrie und bei der Stromerzeugung. Die Folgen reichen von Atemwegserkrankungen und Herz-Kreislauf-Problemen bis hin zu Umweltzerstörung wie saurem Regen und globaler Erwärmung.

Wasserverschmutzung

Wasserverschmutzung ist die Verunreinigung von Gewässern wie Flüssen, Seen, Ozeanen und Grundwasser, wodurch diese für den menschlichen Gebrauch ungeeignet und für Wasserlebewesen schädlich werden. Sie wird in der Regel durch die Einleitung von Schadstoffen wie Industrieabfällen, Abwässern, Pestiziden, Kunststoffen und Schwermetallen in Gewässer verursacht. Diese Verschmutzung führt zu einer Reihe von Problemen, darunter





durch Wasser übertragene Krankheiten, die Zerstörung von Ökosystemen und die Verringerung der Verfügbarkeit von Trinkwasser.

Bodenverschmutzung

Bodenverschmutzung umfasst die Verschlechterung der Bodenqualität durch giftige Chemikalien, Schwermetalle und Abfallstoffe, die die Gesundheit und Produktivität des Bodens beeinträchtigen. Zu den Ursachen zählen industrielle Aktivitäten, Agrarchemikalien, unsachgemäße Abfallentsorgung und Bergbau. Kontaminierter Boden kann die Lebensmittelsicherheit, das Pflanzenwachstum und die Grundwasserqualität beeinträchtigen und gleichzeitig direkte Risiken für die Gesundheit von Mensch und Tier darstellen.

Lärmbelastung

Lärmbelastung ist ein übermäßiger oder störender Geräuschpegel in der Umgebung, der normale Aktivitäten und das Wohlbefinden beeinträchtigt. Sie entsteht hauptsächlich durch Verkehr, Bauarbeiten, industrielle Prozesse und Stadtentwicklung. Chronische Belastung durch hohe Lärmpegel wird mit einer Reihe von Gesundheitsproblemen in Verbindung gebracht, darunter Hörverlust, Schlafstörungen, erhöhter Stress und beeinträchtigte kognitive Leistungsfähigkeit, insbesondere bei Kindern.

Lichtverschmutzung

Lichtverschmutzung bezeichnet übermäßiges oder fehlgeleitetes künstliches Licht, das den Nachthimmel erhellt und die natürliche Dunkelheit stört. Sie entsteht in erster Linie durch Straßenbeleuchtung, Werbetafeln, Gebäude und öffentliche Plätze in städtischen Gebieten. Lichtverschmutzung beeinträchtigt nicht nur die Sichtbarkeit von Sternen, sondern stört auch das Verhalten von Wildtieren und den Tagesrhythmus des Menschen, was zu einem ökologischen Ungleichgewicht und schlafbezogenen Gesundheitsproblemen führt.

Thermische Verschmutzung

Wärmeverschmutzung entsteht, wenn Industriebetriebe erwärmtes Wasser oder Luft in die natürliche Umwelt, insbesondere in Gewässer, einleiten und dadurch das Temperaturgleichgewicht verändern. Typische Verursacher sind Kraftwerke, Produktionsstätten und Raffinerien. Die erhöhten Temperaturen senken den Sauerstoffgehalt im Wasser, schädigen empfindliche Wasserorganismen und können zu einem Verlust der Artenvielfalt und zu Algenblüten führen, wodurch aquatische Ökosysteme gestört werden.

Radioaktive Verschmutzung

Radioaktive Verschmutzung ist die Kontamination der Umwelt durch radioaktive Substanzen, entweder durch unbeabsichtigte Freisetzungen, unsachgemäße Abfallentsorgung oder natürliche Ereignisse. Häufige Quellen sind Kernkraftwerke, medizinische und





Forschungseinrichtungen sowie frühere Atomwaffentests. Diese Art der Verschmutzung birgt langfristige Risiken für die menschliche Gesundheit und die Ökosysteme, darunter Krebs, genetische Mutationen und anhaltende Umweltverschmutzung.

Die Rolle von Mikroorganismen bei der Beseitigung von Umweltverschmutzung

Mikroorganismen spielen eine wichtige und natürliche Rolle bei der Minderung der Umweltverschmutzung durch einen Prozess, der als biologische Sanierung bekannt ist, bei dem Bakterien, Pilze, Algen oder Archaeen schädliche Schadstoffe abbauen, umwandeln oder immobilisieren. Diese Mikroben sind sehr anpassungsfähig und können in verschiedenen Umgebungen, einschließlich kontaminierter Luft, Wasser und Böden, gedeihen. In aquatischen Systemen können Bakterien wie *Pseudomonas* und Algen wie *Chlorella vulgaris* Ölverbindungen abbauen, Schwermetalle entfernen und überschüssige Nährstoffe absorbieren, wodurch sie zur Wiederherstellung der Wasserqualität beitragen (UNEP, 2021). Bei der Bodensanierung bauen bestimmte Mikroben komplexe Kohlenwasserstoffe, Pestizide und sogar Schwermetalle ab, während Pilze wie *Phanerochaete chrysosporium* persistente organische Schadstoffe zersetzen (FAO, 2021). Luftreinigungssysteme, darunter Biofilter und Bioscrubber, nutzen mikrobielle Gemeinschaften, um flüchtige organische Verbindungen und Ammoniak aus Industrieabgasen zu entfernen (EPA, 2023). Darüber hinaus haben Fortschritte in der mikrobiellen Biotechnologie die Entwicklung von Mikrobenstämmen ermöglicht, die bestimmte Schadstoffe mit erhöhter Effizienz bekämpfen. Die ökologischen Vorteile der mikrobiellen Reinigung reduzieren nicht nur die Abhängigkeit von chemischen oder mechanischen Eingriffen, sondern fördern auch ein nachhaltiges Umweltmanagement. Daher werden Mikroben zunehmend als wichtige Verbündete im Kampf gegen die Umweltverschmutzung und für eine langfristige ökologische Wiederherstellung anerkannt.

Methoden zur Beseitigung von Luftverschmutzung

Luftverschmutzung wird durch mechanische Filterung, chemische Neutralisierung und zunehmend auch durch biologische Methoden gemindert. Technologien wie Elektrofilter und Gaswäscher entfernen Partikel und Gase aus Industrieemissionen, während Katalysatoren Fahrzeugschadstoffe reduzieren. Biofiltrationssysteme, die mikrobielle Gemeinschaften zur Verstoffwechselung von Luftschadstoffen wie VOCs und Schwefelverbindungen nutzen, bieten eine nachhaltige Alternative zu chemischen Behandlungen. Diese biologischen Systeme sind besonders wirksam bei der Behandlung von Geruchsemissionen aus Abwasser- und Kompostieranlagen (Deshusses, 1997).





Methoden zur Beseitigung von Wasserverschmutzung

Die Reinigung von Wasserverschmutzungen umfasst mehrstufige Behandlungsprozesse, die physikalische Trennung, chemische Desinfektion und biologischen Abbau kombinieren. Durch Sedimentation und Membranfiltration werden Feststoffe entfernt, während durch Ozonisierung und Koagulation Krankheitserreger und Schwermetalle beseitigt werden. Biologische Behandlungsverfahren wie Belebtschlamm- und Biofilmreaktoren nutzen die mikrobielle Aktivität, um organische Stoffe und Nährstoffe zu zersetzen. Mikrobielle Brennstoffzellen wurden ebenfalls untersucht, um gleichzeitig Abwasser zu behandeln und Strom zu erzeugen, was innovative Anwendungen mit doppeltem Zweck demonstriert (Logan et al., 2006).

Methoden zur Beseitigung von Bodenverschmutzungen

Bei der Sanierung von Bodenverschmutzungen kommen Strategien wie Aushub, chemische Immobilisierung und biologische Verfahren zum Einsatz. Besonders wirksam sind biologische Sanierungsverfahren, bei denen einheimische oder eingeführte Mikroben zum Abbau von Kohlenwasserstoffen, Lösungsmitteln und Pestiziden eingesetzt werden. Die Phytosanierung, die durch rhizosphärenassoziierte Mikroben unterstützt wird, bietet eine umweltfreundliche Lösung, indem sie die Aufnahme oder den Abbau von Schadstoffen durch Wechselwirkungen zwischen Pflanzen und Mikroben fördert. Jüngste Studien belegen den Erfolg mikrobieller Konsortien beim Abbau polyzyklischer aromatischer Kohlenwasserstoffe (PAK) in komplex kontaminierten Böden (Meckenstock et al., 2015).

Methoden zur Minderung von Lärmbelästigung

Lärmbelästigung kann im Gegensatz zu chemischen Schadstoffen nicht beseitigt werden, sondern muss durch Planung und Technik gemindert werden. Zu den Strategien gehören Schallschutzwände, schallabsorbierende Baumaterialien und städtische Grünflächen, die den Umgebungslärmpegel reduzieren. Vegetation und Boden, die von gesunden mikrobiellen Gemeinschaften profitieren, spielen eine passive, aber unterstützende Rolle bei der Lärmreduzierung, indem sie Oberflächen weicher machen und Schallenergie absorbieren. Eine Studie zum Thema Stadtwaldgestaltung hat gezeigt, dass die Integration dichter Vegetation den Lärm in städtischen Umgebungen um bis zu 10 dB reduzieren kann (Fang & Ling, 2003).

Methoden zur Reduzierung der Lichtverschmutzung

Die Reduzierung der Lichtverschmutzung erfordert eine intelligente Lichtplanung und Stadtplanung, um unnötige künstliche Beleuchtung zu minimieren. Techniken wie die Verwendung von Vollabschirmungsleuchten, Bewegungssensoren und warmweißen LEDs tragen dazu bei, Himmelsglühen und Blendung zu begrenzen. Obwohl mikrobielle Aktivitäten die Lichtverschmutzung nicht direkt reduzieren, kommt die Minimierung künstlichen Lichts nachtaktiven Ökosystemen zugute, die auf mikrobiell reiche Böden und natürliche Lichtzyklen angewiesen sind. Untersuchungen zeigen, dass künstliche Beleuchtung nachtaktive Bestäubungsnetzwerke und mikrobielle Aktivitäten in Bodenkrusten stört (Knop et al., 2017).





Methoden zur Minderung der thermischen Verschmutzung

Thermische Verschmutzung, insbesondere durch industrielle Einleitungen in Gewässer, wird durch technische Kühlsysteme wie Kühlteiche und Kühltürme bewältigt. Neue natürliche Systeme wie künstlich angelegte Feuchtgebiete nutzen thermisch tolerante Mikroben, um nicht nur die Temperatur zu regulieren, sondern auch Schadstoffe in erwärmten Abwässern abzubauen. Eine Studie von Vymazal (2011) betont die Verwendung von künstlich angelegten Feuchtgebieten zur kombinierten Entfernung von Nährstoffen und zur Temperaturabsenkung in der Abwasserbehandlung.

Methoden zur Beseitigung radioaktiver Verschmutzung

Die Sanierung radioaktiver Kontamination umfasst die Eindämmung, Verglasung und zunehmend auch die biologische Stabilisierung. Einige Mikroben, wie *Deinococcus radiodurans* und uranreduzierende Geobacter-Arten, weisen eine Strahlenresistenz auf und können die Löslichkeit oder Mobilität von Radionukliden verändern. Diese Organismen werden hinsichtlich ihrer Rolle bei der langfristigen biologischen Sanierung von Atommülllagern untersucht. Jüngste Forschungen von Fredrickson et al. (2004) haben eine vielversprechende mikrobielle Reduktion von Uran unter anaeroben Bedingungen gezeigt, wodurch dessen Mobilität im Grundwasser eingeschränkt wird.

Tabelle 1. Arten von Umweltverschmutzung und zugehörige

Art der Verschmutzung	Mikrobielle Reinigungsmethode	Beispielmikroben
Luft	Biofiltration, Bioskrubber	Pseudomonas, Bacillus, Aspergillus
Wasser	Belebtschlamm, Bioaugmentation, Algen	Nitrosomonas, P. putida, Chlorella
Boden	Bioremediation, Mykoremediation	Phanerochaete, Bacillus, Rhizobium
Lärm	Keine direkte Rolle	—
Licht	Keine direkte Rolle	—
Thermisch	Indirekt (thermophile Mikroben)	Thermus aquaticus, B. stearothermophilus
Radioaktiv	Experimentell (strahlenresistente Mikroben)	Deinococcus radiodurans, radiotrophe Pilze



Einführung in die biologische Sanierung

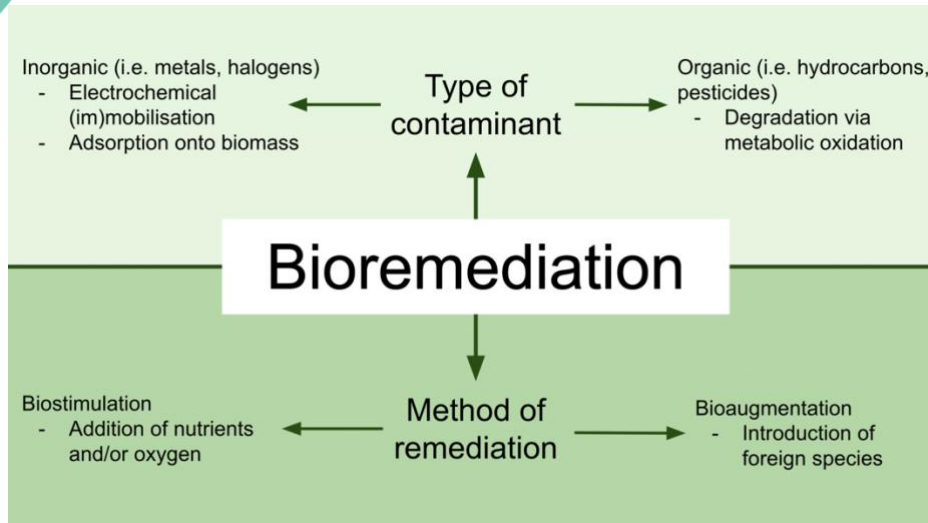
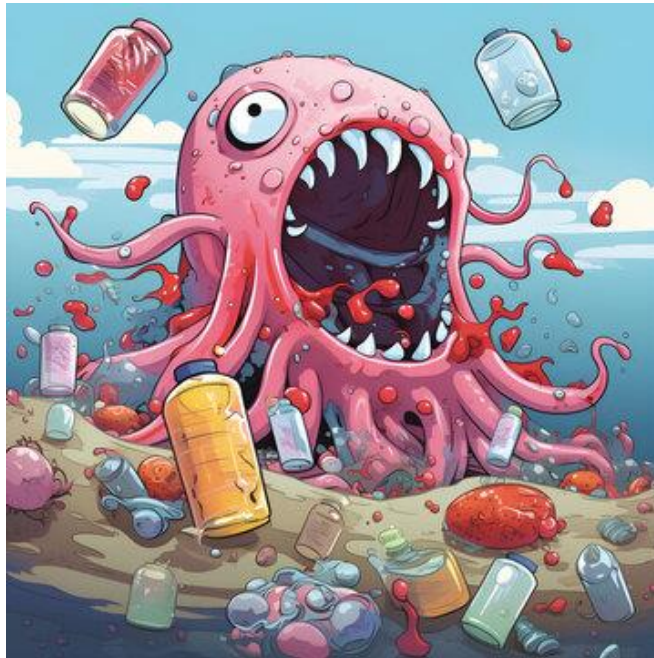


Abb. 2: Bioremediation, Quelle: <https://tinyurl.com/pbdykp7a>

Die biologische Sanierung ist ein nachhaltiger und biologisch orientierter Ansatz, bei dem lebende Mikroorganismen, vor allem Bakterien, Pilze, Algen und Archaea, eingesetzt werden, um Umweltgifte abzubauen, zu entgiften oder in weniger schädliche Formen umzuwandeln. Obwohl die biologische Sanierung traditionell mit Bodenverschmutzung in Verbindung gebracht wird, hat sie sich in einem breiten Spektrum von Umweltkontexten als wirksam erwiesen, darunter kontaminiertes Wasser, verschmutzte Luft und sogar radioaktive Abfalllagerstätten. In Wassersystemen werden beispielsweise ölabbauende Bakterien und nährstoffverbrauchende Algen eingesetzt, um Ölverschmutzungen und eutrophierte Seen zu reinigen. Bei der Luftreinigung nutzen Biofilter mikrobielle Biofilme, um flüchtige organische Verbindungen (VOCs) und schwefelhaltige Gase aus Industrieabgasen zu binden und biologisch abzubauen. Darüber hinaus ist die radioaktive biologische Sanierung ein aufstrebendes Gebiet, in dem extremophile Mikroben wie *Geobacter* und *Deinococcus radiodurans* auf ihre Fähigkeit hin untersucht werden, radioaktive Elemente zu immobilisieren oder umzuwandeln. Der zunehmende Einsatz von mikrobiellen Konsortien und gentechnisch veränderten Stämmen hat das Potenzial der biologischen Sanierung für komplexe und schwer abbaubare Schadstoffe weiter erweitert. Laut Singh und Strong (2022) hat die Integration von Omics-Technologien und Bioinformatik-Tools die Spezifität, Geschwindigkeit und Skalierbarkeit mikrobieller Interventionen bei der Umweltsanierung erheblich verbessert. Angesichts der zunehmenden globalen Herausforderungen durch Umweltverschmutzung bietet die biologische Sanierung eine kostengünstige, energiearme und ökologisch restaurative Alternative zu herkömmlichen chemischen und mechanischen Sanierungsmethoden.



Wie Mikroben Schadstoffe „fressen“ oder abbauen



Mikroorganismen sind in der Lage, Schadstoffe durch Stoffwechselprozesse abzubauen, bei denen die Schadstoffe als Energie-, Kohlenstoff- oder Nährstoffquelle dienen. Dieser biologische Abbau findet statt, wenn Mikroben Enzyme absondern, die toxische Substanzen chemisch verändern und sie in einfachere, weniger schädliche Verbindungen umwandeln. Beispielsweise können kohlenwasserstoffabbauende Bakterien wie *Pseudomonas*, *Alcanivorax* und *Mycobacterium* Ölkomponenten verstoffwechseln, indem sie diese während der aeroben Atmung zu Kohlendioxid und Wasser oxidieren. Unter anaeroben Bedingungen können bestimmte Bakterien Schadstoffe auch als alternative Elektronenakzeptoren nutzen, wodurch sie Verbindungen wie Nitrate, chlorierte Lösungsmittel oder Schwermetalle abbauen können.

Pilze wie *Phanerochaete chrysosporium* sind in der Lage, persistente organische Schadstoffe wie Pestizide und Farbstoffe abzubauen, indem sie ligninolytische Enzyme produzieren, die komplexe Moleküle in kleinere Fragmente zerlegen. Einige Mikroben wandeln Schwermetalle durch Redoxreaktionen sogar in unlösliche Formen um und immobilisieren sie so im Boden oder Sediment. Umweltfaktoren wie pH-Wert, Temperatur, Sauerstoffverfügbarkeit und das Vorhandensein von Co-Substraten beeinflussen diese Prozesse. Nach neuesten Erkenntnissen von Ghosal et al. (2016) funktionieren mikrobielle Gemeinschaften oft effektiver als Konsortien, in denen verschiedene Arten synergistisch zusammenwirken, um komplexe Schadstoffgemische effizienter abzubauen als einzelne Stämme. Diese biologischen Mechanismen sind sowohl für natürliche als auch für technische Bioremediationssysteme von zentraler Bedeutung und machen Mikroben zu unverzichtbaren Wirkstoffen bei der nachhaltigen Behandlung von Umweltverschmutzungen.





Beispiele für mikrobielle biologische Sanierung

Pseudomonas und Ölabbau

Arten der Gattung *Pseudomonas*, insbesondere *Pseudomonas aeruginosa*, sind für ihre Fähigkeit bekannt, in Rohöl enthaltene Kohlenwasserstoffe abzubauen. Diese Bakterien produzieren biologische Tenside, die Öl emulgieren und so dessen Bioverfügbarkeit für den mikrobiellen Abbau erhöhen. Jüngste Studien haben gezeigt, dass die gemeinsame Kultivierung von *P. aeruginosa* mit *Bacillus subtilis* die Effizienz des Rohölabbaus erhöht und eine Entfernung von bis zu 63,05 % der Ölkomponenten erreicht. pmc.ncbi.nlm.nih.gov/frontiersin.org

Ideonella sakaiensis und ihre Fähigkeit, Plastik zu zersetzen

Ideonella sakaiensis ist ein Bakterium, das Polyethylenterephthalat (PET) abbauen kann, einen häufig in Flaschen und Verpackungen verwendeten Kunststoff. Es scheidet ein Enzym namens PETase aus, das PET in seine Monomere Terephthalsäure und Ethylenglykol zerlegt, die das Bakterium dann für sein Wachstum nutzt. Jüngste Forschungen konzentrieren sich darauf, die Effizienz von PETase durch Gentechnik zu steigern, um die Abbaurate von Kunststoff zu verbessern. en.wikipedia.org

Geobacter-Arten und Metallreinigung

Mitglieder der Gattung *Geobacter*, wie beispielsweise *Geobacter metallireducens*, sind für ihre Fähigkeit bekannt, Schwermetalle wie Uran und Chrom in kontaminierten Umgebungen zu reduzieren und zu immobilisieren. Diese Bakterien übertragen während ihrer Stoffwechselprozesse Elektronen auf Metallionen und wandeln lösliche toxische Metalle in unlösliche Formen um, die aus der Lösung ausfallen und dadurch ihre Mobilität und Bioverfügbarkeit verringern.

Vielfältige Techniken der biologischen Sanierung

Es gibt viele Möglichkeiten, die biologische Sanierung einzusetzen, jeweils für unterschiedliche Schadstoffe und Orte:

- Phytoremediation – Pflanzen helfen dabei, Schadstoffe aus Boden, Wasser und Luft zu entfernen.
- Mikrobielle Sanierung – Mikroben zersetzen Schadstoffe und wandeln sie in sicherere Substanzen um.
- Mykoremediation – Pilze werden zur Beseitigung vieler Arten von Schadstoffen eingesetzt.
- Biomanipulation – Tiere wie Fische helfen bei der Reinigung verschmutzter Gewässer.

Diese Methoden bieten viele Möglichkeiten zur Lösung von Umweltproblemen. Sie zeigen, wie die Natur uns bei der Reinigung helfen kann (<https://editverse.com/bioremediation-using-nature-to-clean-up-pollution/>).





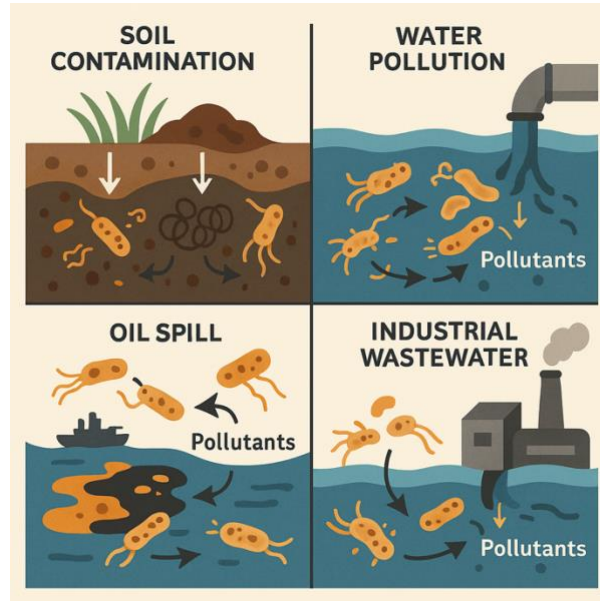
Tabelle 2. Techniken der biologischen Sanierung

Bioremediationstechnik	Beschreibung	Beispiele
Phytosanierung	Pflanzen helfen dabei, Schadstoffe aus Boden, Wasser und Luft zu entfernen.	Rhizofiltration, Phytoextraktion, Phytostimulation, Phytostabilisierung
Mikrobielle Sanierung	Mikroben zersetzen Schadstoffe und wandeln sie in unbedenklichere Stoffe um.	Biostimulation, Bioaugmentation, intrinsische Bioremediation
Mykoremediation	Pilze werden zur Beseitigung von Schadstoffen wie Schwermetallen und Öl eingesetzt.	Pilzlicher Abbau von Schwermetallen, Kohlenwasserstoffen und organischen Verbindungen
Biomanipulation	Tiere wie Fische helfen bei der Reinigung verschmutzter Gewässer.	Einsatz von Fischen zur Bekämpfung von Algenblüten und zur Verbesserung der Wasserqualität

Mikrobielle Sanierung

Mikroben sind mikroskopisch kleine Organismen, die in zwei bedeutende Lebensbereiche eingeteilt werden: Archaea und Eubakterien. Sie umfassen eine Vielzahl von Lebensformen, darunter Primärproduzenten, die Licht oder chemische Verbindungen in Energie umwandeln, sowie Heterotrophe und Zersetzer, die für ihre Ernährung auf externe Quellen angewiesen sind. Mikroben sind in der Natur allgegenwärtig und kommen in praktisch jeder Umgebung auf der Erde vor.





Diese winzigen Organismen spielen eine wichtige Rolle im Leben des Menschen. Sie helfen bei der Beseitigung von Schadstoffen, verbessern die Bodenfruchtbarkeit, tragen zum Fortschritt in der Lebensmitteltechnologie bei und synthetisieren wichtige Nährstoffe, die unsere Gesundheit unterstützen. In den meisten Fällen leben wir mit Mikroben zusammen, ohne uns ihrer Anwesenheit bewusst zu sein.

Während viele Mikroben Schutzfunktionen erfüllen, beispielsweise indem sie uns vor schädlichen Krankheitserregern schützen, können andere negative Auswirkungen haben. Sie können Krankheitsausbrüche verursachen, Lebensmittel verderben oder zur Zersetzung und Verwesung von Materialien beitragen (Postgate, 2003).

Strategien und Technologien zur mikrobiellen Sanierung

Die mikrobielle Sanierung ist eine Art von Sanierungsmethode, bei der die natürlichen Funktionen von Mikroben im Boden genutzt werden, um Schadstoffe ungiftig zu machen. Sie umfasst in der Regel Bioaugmentation und Biostimulation. Aufgrund ihrer geringen Menge und ihrer geringen Abbauleistung werden einheimische Mikroben

in einer mitverschmutzten Umgebung ständig durch die Toxizität der Schadstoffe eingeschränkt. Bei der Bioaugmentation werden obligat abbauende Bakterien mit Stämmen kombiniert, die mehreren Schwermetallen (HMs) standhalten können, um die Zielschadstoffe zu beseitigen (Abb. 3). Die Biostimulation verbessert die Bodenqualität durch die Zugabe von Wachstumshormonen und Nährstoffen, um die Entwicklung der lokalen Mikroflora zu fördern. Im Folgenden werden jedoch verschiedene mikrobielle Technologien zur Sanierung diskutiert.





Abbildung 3 – In-vitro-Mechanismen der bakteriellen Bioremediation in der verschmutzten Umwelt, Quelle: Sharma et al., 2022

- In-situ-Techniken für die biologische Sanierung

Bei dieser Sanierung muss der verschmutzte Boden nicht mehr ausgehoben und zu externen Behandlungsanlagen transportiert werden, wodurch die Beeinträchtigung des Bodens verringert, die Exposition der Helfer und der Bevölkerung gegenüber Giftstoffen minimiert und möglicherweise die Behandlungskosten gesenkt werden. Die Durchlässigkeit des Bodens, die Tiefe der Verschmutzung, die Temperatur und die wahrscheinliche chemische Tiefenauswaschung sind wichtige Feldmerkmale, die berücksichtigt werden müssen (Fasani et al., 2018). Die In-situ-Sanierung von Schadstoffen ist in Abbildung 4 dargestellt.

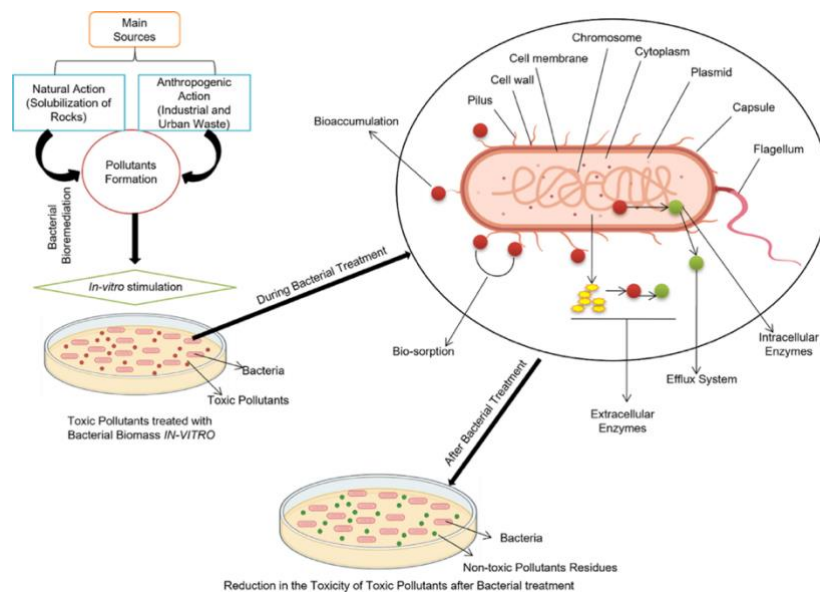


Abbildung 4. Mikrobielle Bioremediation zur Sanierung kontaminierter Standorte durch *In-situ*- und *Ex-situ*-Sanierung, Quelle: Sharma et al., 2022





Mikroben bauen keine nennenswerten Schadstoffe ab, sondern beeinflussen deren physikalisch-chemische Eigenschaften (Sharma et al., 2021f; Sharma et al., 2021g). Die Sanierungskomponente umfasst die intrazelluläre Akkumulation, die weitere Bildung von Zellkomplexen sowie Oxidations-Reduktions- oder Präzipitationsberechnungen. Gefährliche Schwermetalle sind in industriellen Prozessen weit verbreitet und stellen erhebliche Umweltverschmutzungen dar. Die molekulare Filtration zur Extraktion von Metallen aus minderwertigen Materialien war einfach und erfolgreich (Dhaliwal et al., 2020). *Pseudomonas* sp., *Bacillus* sp., *Torulopsis bombicola*, *Desulfuromonas palmitatis* und andere Mikroorganismen können mechanische Abfälle und Klärschlamm entgiften und mit Schwermetallen (HMs) belastete Rückstände und Böden sanieren (Priya und Nagan, 2015). Mikrobielle Biomasse verfügt über vielfältige Biosorptionsfähigkeiten, wobei es grundlegende Unterschiede zwischen den einzelnen Arten gibt. Ihre außergewöhnliche Biosorptionsfähigkeit ist auf ein höheres Volumen-Oberflächen-Verhältnis und die wahrscheinlichen Stellen komplexer chemischer Adsorption, vor allem auf Zellmembranen, zurückzuführen (Li et al., 2019). Mikroorganismen sind in Mischkulturen häufig widerstandsfähiger und halten länger. Pflanzenkonsortien sind daher metabolisch dominant für die Biosorption von Metallen und eignen sich daher für großtechnische Anwendungen. Allerdings, da die Biosorptionskapazität jeder Mikroorganismenzelle variiert, ist sie von den spezifischen Behandlungs- und Testbedingungen abhängig (Dhaliwal et al., 2020).

Natürliche Abbauprozesse

Kontaminanten werden durch biologischen Abbau (natürliche Abbauprozesse) in eine weniger gefährliche Form umgewandelt oder immobilisiert. Diese Umwandlungs- und Immobilisierungsmechanismen werden in erster Linie durch den biologischen Abbau von Mikroorganismen und in geringerem Maße durch Wechselwirkungen mit natürlich vorkommenden chemischen und geologischen Medien sorption verursacht. Dieser Mechanismus ist spezifisch für den Schadstoff und wurde als Ansatz für die Behandlung von Kraftstoffkomponenten wie BTEX (Benzol, Toluol, Ethylbenzol und Xylol) zugelassen, jedoch nicht für zahlreiche andere Klassen (Ganiyu et al., 2022). Die für die natürliche Abbauprozesse erforderliche Dauer variiert stark je nach den örtlichen Gegebenheiten. Viele kontaminierte Standorte erfordern möglicherweise keine umfangreiche Sanierungsstrategie, und die biologische Abbau ist sowohl kostengünstig als auch effizient. In der Praxis haben die Vereinigten Staaten eine Reihe von biologischen Sanierungsansätzen erfolgreich eingesetzt, deren Kosten etwa 80 bis 90 % unter denen alternativer Reinigungstechnologien auf chemischer und physikalischer Basis liegen. Die Ausgaben nach der Sanierung sind deutlich geringer, und die Störung des Standorts ist minimal. Industrielle und umweltbezogene Biotechnologien begünstigen ebenfalls neuartige Ansätze, die zu Verfahren führen, bei denen saubere Technologien eingesetzt werden, um den Ertrag zu maximieren und gleichzeitig weniger Rückstände zu erzeugen (Rhea und Clark, 2022). Da die meisten Böden oligotroph sind oder die notwendigen Mikroben fehlen, ist die biologische Abbau allein in vielen Fällen unzureichend und zeitaufwändig.



Diese Techniken der Gen- und Stoffwechseltechnik können den biologischen Sanierungsprozess unterstützen (Liang et al., 2020). Für die Genbearbeitung sowie die Stoffwechseltechnik sind schadstoffbewohnende Bakterien ein idealer Kandidat, da sie eingesetzt werden, um unter den stressigen Bedingungen verschiedener toxischer, schwer abbaubarer und nicht abbaubarer Xenobiotika zu überleben und Schutz zu finden. Darüber hinaus scheint das Verständnis des Stoffwechselwegs für die Analyse der mikrobiellen biologischen Sanierung von entscheidender Bedeutung zu sein (Plewniak et al., 2018). Abbildung 5 veranschaulicht die Rolle der Stoffwechselrekonstruktion bei der synthetischen biologischen Sanierung, wobei sowohl In-situ- als auch Ex-situ-Verfahren zur Behandlung gefährlicher Schadstoffe eingesetzt werden.

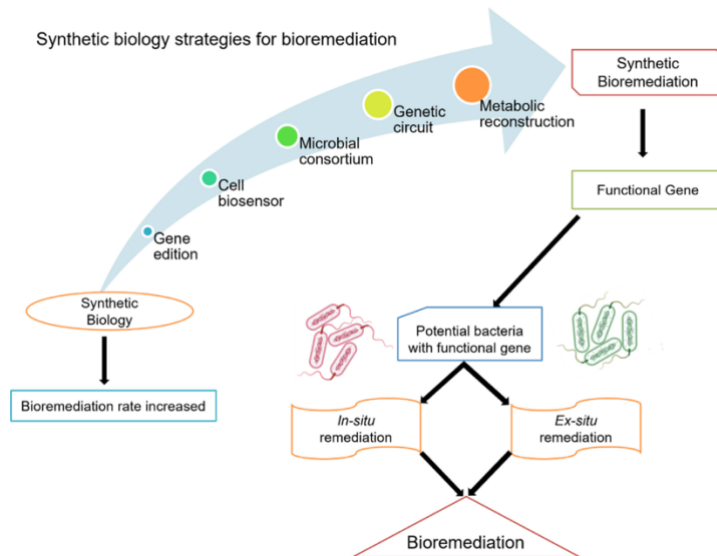


Abbildung 5. Rolle der metabolischen Rekonstruktion bei der synthetischen biologischen Sanierung über In-situ- und Ex-situ-Verfahren zur biologischen Sanierung gefährlicher Schadstoffe

Fallstudien

Ölpest durch Deepwater Horizon (2010, Golf von Mexiko)

Bei der Deepwater-Horizon-Katastrophe gelangten etwa 134 Millionen Gallonen Rohöl in den Golf von Mexiko, was diese Ölkatastrophe zu einer der größten Meeresverschmutzungen in der Geschichte macht. In der Folge vermehrten sich einheimische Meeresbakterien, insbesondere Arten der Gattungen *Alcanivorax* und *Cycloclasticus*, und spielten eine entscheidende Rolle beim Abbau der Kohlenwasserstoffe. Diese Mikroben nutzten das Öl als Kohlenstoffquelle und reduzierten so wirksam die Umweltauswirkungen der Ölkatastrophe. Von der Gulf of Mexico Research Initiative (GoMRI) finanzierte Forschungsarbeiten lieferten Erkenntnisse über die Genomik von Mikroorganismen und die Reaktionen auf die biologische Sanierung von Kohlenwasserstoffen in marinen Ökosystemen.

Plastikverschmutzung in den Ozeanen

Plastikmüll, insbesondere Mikroplastik, ist in Meeresumgebungen allgegenwärtig geworden und stellt eine Bedrohung für das Leben im Meer und die menschliche Gesundheit dar. Um dieses Problem anzugehen, werden innovative biologische Sanierungsansätze erforscht:





Gemeinschaftsinitiativen: In Kerala, Indien, hat die Fischergemeinde Munambam das Projekt „Drive to Recover Ocean Plastic“ (DROP) ins Leben gerufen. Über 600 Fischerboote beteiligen sich daran, indem sie während ihrer Fahrten Plastikmüll sammeln, wodurch allein in den Jahren 2024–25 22.000 kg Plastik zurückgewonnen werden konnten. timesofindia.indiatimes.com

Mikrobielle Lösungen: Forschungen haben plastikabbauende Pilze identifiziert, die in der Lage sind, synthetische Polymere wie Polyurethan abzubauen. Diese Pilze könnten in kontrollierten Umgebungen, wie z. B. Kläranlagen, eingesetzt werden, um die Plastikverschmutzung zu verringern. reuters.com+1 bassconnections.duke.edu+1

Schwermetallverseuchung in Bergbaugebieten

Bergbauaktivitäten führen häufig zu einer Schwermetallbelastung der umliegenden Böden und Gewässer. Strategien zur biologischen Sanierung unter Einsatz von Mikroben haben sich als vielversprechend für die Minderung dieser Schadstoffe erwiesen:

Blei-Zink-Mine am Berg Qixia, China: Studien haben eine starke Schwermetallverschmutzung in den Böden rund um die Mine aufgezeigt. Mikrobielle Gemeinschaften, darunter Sphingomonas- und Pseudomonas-Arten, zeigten Resistenz gegen Schwermetalle und trugen zur Bodensanierung bei. pubs.rsc.org

Tar Creek Superfund Site, USA: Ein innovatives biologisches Sanierungssystem wurde implementiert, um mit Blei, Zink, Cadmium und Eisen aus stillgelegten Minen kontaminiertes Grundwasser zu behandeln. Das System nutzt eine Reihe von Teichen mit aeroben und anaeroben Bakterienbehandlungen, wodurch die Schwermetallkonzentrationen im Wasser erheblich reduziert werden.

Biotechnologie und die Zukunft

Verbesserung von Mikroben für die Umweltsanierung

Fortschritte in der Biotechnologie haben es Wissenschaftlern ermöglicht, Mikroorganismen gentechnisch so zu verändern, dass sie Umweltgifte besser abbauen können. Techniken wie CRISPR-Cas9 ermöglichen präzise Modifikationen des mikrobiellen Genoms, wodurch deren Stoffwechselwege für den Abbau komplexer Schadstoffe verbessert werden. So wurden beispielsweise Pseudomonas putida, Bacillus subtilis und Escherichia coli so verändert, dass sie Enzyme wie Cytochrom P450 und Dioxygenasen überexprimieren, was zu einem beschleunigten Abbau organischer Schadstoffe führt. mdpi.com researchgate.net

Darüber hinaus nutzen Tools wie XenoBug, das von Forschern am IISER Bhopal entwickelt wurde, maschinelles Lernen, um bakterielle Enzyme vorherzusagen, die in der Lage sind, verschiedene Schadstoffe abzubauen, und so die Identifizierung wirksamer mikrobieller Stämme für Bioremediationsmaßnahmen zu optimieren. timesofindia.indiatimes.com





Ethische und ökologische Überlegungen

Gentechnisch veränderte Mikroben bieten zwar vielversprechende Lösungen für die Sanierung von Umweltverschmutzungen, ihr Einsatz wirft jedoch mehrere ethische und ökologische Bedenken auf:

- Ökologische Auswirkungen: Die Freisetzung gentechnisch veränderter Organismen in die Umwelt könnte bestehende Ökosysteme stören und möglicherweise zu unbeabsichtigten Folgen wie der Verdrängung einheimischer Mikroorganismen oder dem horizontalen Gentransfer auf Nichtzielarten führen. pollution.sustainability-directory.com
- Herausforderungen beim biologischen Containment: Es ist von entscheidender Bedeutung, sicherzustellen, dass gentechnisch veränderte Mikroben nicht über ihre vorgesehenen Anwendungsbereiche hinaus bestehen bleiben. Strategien für ein intrinsisches biologisches Containment befinden sich noch in der Entwicklung, und ihre Wirksamkeit unter realen Bedingungen ist noch ungewiss. nature.com
- Gerechtigkeit und Zugang: Die Vorteile von Technologien zur biologischen Sanierung müssen allen Gemeinschaften zugänglich sein, insbesondere denen, die überproportional von Umweltverschmutzung betroffen sind. Es besteht die Gefahr, dass proprietäre Technologien den Zugang für benachteiligte Regionen einschränken und damit Umweltungerechtigkeiten verschärfen. pollution.sustainability-directory.com
- Festlegung von Sanierungszielen: Die Definition dessen, was eine „saubere“ oder „sanierte“ Umwelt ausmacht, ist subjektiv und kann je nach Interessengruppe variieren. Es ist wichtig, die Gemeinden in die Festlegung von Sanierungszielen einzubeziehen, um sicherzustellen, dass die biologischen Sanierungsmaßnahmen mit den lokalen Werten und Bedürfnissen in Einklang stehen. pollution.sustainability-directory.com

Zukunftspotenzial grüner Technologien

Die Integration der Biotechnologie in die Umweltsanierung ist vielversprechend für die Entwicklung nachhaltiger und effizienter Sanierungsstrategien:

- Synthetische Biologie und gezielte Evolution: Durch den Einsatz von synthetischer Biologie und gezielter Evolution können Wissenschaftler Mikroben mit verbesserten Fähigkeiten zum Abbau von Schadstoffen entwickeln und so maßgeschneiderte Lösungen für bestimmte Kontaminationsszenarien anbieten.
- Nanobiologische Sanierung: Durch die Kombination von Nanotechnologie und mikrobieller Sanierung können die Wirksamkeit und Effizienz von biologischen Sanierungsmitteln verbessert werden, wodurch Schadstoffe präziser bekämpft werden können. prism.sustainability-directory.com
- Mikrobielle Brennstoffzellen (MFCs): MFCs nutzen die Stoffwechselaktivitäten von Mikroben, um Strom zu erzeugen und gleichzeitig organische Schadstoffe abzubauen, was einen doppelten Nutzen in Form von Energieerzeugung und Umweltsanierung bietet. en.wikipedia.org
- Mikrobielle Elektrolyse zur Kohlenstoffabscheidung (MECC): Diese Technologie nutzt Mikroben, um während der Abwasserbehandlung Kohlendioxid abzuscheiden, es in stabile mineralische Formen umzuwandeln und so zur Kohlenstoffbindung beizutragen. en.wikipedia.org





Mit dem Fortschritt dieser Technologien wird die interdisziplinäre Zusammenarbeit zwischen Mikrobiologen, Umweltwissenschaftlern, Ethikern und politischen Entscheidungsträgern unerlässlich sein, um sicherzustellen, dass biotechnologische Lösungen für die Umweltverschmutzung wirksam, ethisch und gerecht sind.

Augmented Reality in Aktion: Erforschung der mikrobiellen Reinigung

Stellen Sie sich vor, Sie könnten mikroskopisch kleine Mikroben sichtbar machen, beobachten, wie sie mit Schadstoffen interagieren, und ihnen bei der Beseitigung von Ölverschmutzungen oder Plastikmüll zusehen – und das alles in Ihrer unmittelbaren Umgebung. Diese immersive Erfahrung wird durch Augmented Reality (AR) ermöglicht, eine Technologie, die digitale Inhalte über Geräte wie Smartphones, Tablets oder AR-Brillen in die reale Welt einblendet.

Jüngste Studien haben die Wirksamkeit von AR bei der Verbesserung des naturwissenschaftlichen Unterrichts hervorgehoben. Untersuchungen von Arici (2024) haben gezeigt, dass AR-Technologie das Umweltbewusstsein und positives Verhalten fördert und somit ein wertvolles Instrument im naturwissenschaftlichen Unterricht ist.

Im Bereich der Mikrobiologie wurde AR effektiv eingesetzt, um das Erlernen komplexer Prozesse zu erleichtern. Eine Studie von Herlina et al. (2024) entwickelte einen AR-basierten Leitfaden für mikrobiologische Praktika, der das Verständnis und Engagement der Studierenden erheblich verbesserte, indem er ihnen die Interaktion mit 3D-Modellen von Viren und anderen Mikroorganismen ermöglichte.

In diesem Abschnitt lernen Sie nicht nur die bemerkenswerten Fähigkeiten von Mikroben bei der Umweltsanierung kennen, sondern können auch durch Augmented-Reality-Erlebnisse (AR) mit ihnen interagieren. Diese Aktivitäten sollen abstrakte wissenschaftliche Konzepte greifbar machen, Ihr Verständnis für mikrobielle Prozesse verbessern und zu innovativem Denken über nachhaltige Lösungen für Umweltverschmutzung anregen.

„Augmented Reality in Aktion: Erkundung der mikrobiellen Sanierung“ ist ein Bildungskonzept, das neue Technologien mit Umweltwissenschaften verbindet, um die unsichtbaren Prozesse der mikrobiellen Bioremediation sichtbar und interaktiv zu machen. Die mikrobielle Sanierung, auch als Bioremediation bekannt, bezeichnet den Einsatz von Mikroorganismen wie Bakterien, Pilzen und Algen, um gefährliche Schadstoffe abzubauen oder in weniger schädliche Formen umzuwandeln. Dieser Prozess spielt eine entscheidende Rolle bei der Bewältigung von Umweltproblemen wie Ölverschmutzungen, Schwermetallkontaminationen und Plastikverschmutzung. Beispielsweise werden *Pseudomonas*- und *Bacillus*-Arten häufig zum Abbau von Kohlenwasserstoffen eingesetzt, während *Deinococcus radiodurans* ein bemerkenswertes Potenzial bei der Beseitigung radioaktiver Abfälle gezeigt hat (Gadd, 2010; Varjani, 2017). Die Integration von Augmented Reality (AR) in diesen Kontext bietet ein neuartiges pädagogisches Instrument zur Visualisierung komplexer biologischer Wechselwirkungen, die mit bloßem Auge nicht wahrnehmbar sind. AR kann verschmutzte Umgebungen simulieren, mikrobielle Aktivitäten in Echtzeit anzeigen und den Lernenden die Möglichkeit geben, mit verschiedenen Strategien der biologischen Sanierung zu interagieren, wodurch sowohl das Verständnis als auch das Engagement gefördert werden. Untersuchungen von Bacca et al. (2014) und Dunleavy et al. (2009) zeigen, dass AR das Erfahrungslernen unterstützt, indem es abstrakte wissenschaftliche Prozesse zugänglicher und einprägsamer macht. Pädagogische AR-Anwendungen wie Unity mit Vuforia, JigSpace oder Assemblr EDU können genutzt werden, um dynamische Simulationen der Reaktionen von Mikroorganismen auf





Umweltgifte zu erstellen. Dieser Ansatz bereichert nicht nur die wissenschaftliche Bildung, sondern regt die Schüler auch dazu an, kritisch über nachhaltige Lösungen und die Rolle der Biotechnologie im Umweltschutz nachzudenken. Die Kombination von AR und mikrobieller Bioremediation bietet eine leistungsstarke interdisziplinäre Lernerfahrung, die auf den von Singh und Chandra (2019) in ihrer Untersuchung der Biotechnologie zur Bekämpfung der Umweltverschmutzung dargelegten Prinzipien basiert und durch den grundlegenden Rahmen gestützt wird, den Crawford und Crawford in ihrer Arbeit zu den Prinzipien und Anwendungen der Bioremediation geschaffen haben.

Implementierung von AR in der Ausbildung zur mikrobiellen Bioremediation

Entwurf von AR-basierten Lernaktivitäten

Augmented Reality (AR) bietet immersive Erfahrungen, die das Verständnis mikrobieller Bioremediationsprozesse verbessern können. Durch die Überlagerung digitaler Informationen mit realen Umgebungen kann AR abstrakte Konzepte greifbar machen. So können Schüler beispielsweise visualisieren, wie bestimmte Mikroben mit Schadstoffen interagieren, den Abbauprozess beobachten und die Auswirkungen auf die Umwelt verstehen.

Jüngste Studien haben die Wirksamkeit von AR in der naturwissenschaftlichen Ausbildung gezeigt. Eine systematische Überprüfung hat hervorgehoben, dass AR-Anwendungen in der Umweltbildung das Verständnis der Schüler für komplexe Konzepte erheblich verbessern, das Engagement steigern und das Umweltbewusstsein fördern. In ähnlicher Weise hat die Forschung in der mikrobiologischen Ausbildung gezeigt, dass AR-basierte Tools das Verständnis und das Interesse der Schüler für das Thema verbessern können. matter.ejmste.com/academic.oup.com

Wissenschaftliche Begründung, Integration in den Unterricht und Tools

Mikrobielle Bioremediation ist der Prozess der Verwendung von Mikroorganismen zum Abbau, zur Umwandlung oder zur Entfernung von Schadstoffen aus der Umwelt, einschließlich Boden, Grundwasser und Meeresökosystemen. Während die Bioremediation für eine nachhaltige Bekämpfung der Umweltverschmutzung unerlässlich ist, stellt ihre Vermittlung aufgrund der unsichtbaren und komplexen mikrobiellen Wechselwirkungen eine große Herausforderung dar. Augmented Reality (AR) bietet als immersive Technologie eine einzigartige Möglichkeit, das Verständnis und die Vermittlung mikrobieller Bioremediationsprozesse zu verbessern. Durch interaktive Visualisierungen, räumliche Überlagerungen und Echtzeit-Datenintegrationen überbrückt AR die Kluft zwischen abstraktem mikrobiologischem Wissen und Erfahrungslernen (Bacca et al., 2014; Beck et al., 2022).

Einer der Hauptvorteile von AR ist die Möglichkeit, unsichtbare mikrobielle Aktivitäten zu visualisieren. Mithilfe von 3D-Simulationen können Lernende beobachten, wie Bakterienstämme wie *Alcanivorax borkumensis* oder *Pseudomonas putida* auf Schadstoffe wie Kohlenwasserstoffe oder Schwermetalle reagieren (Vidali, 2001). Diese Simulationen können den Verlauf der biologischen Sanierung im Laufe der Zeit veranschaulichen und zeigen, wie Umweltfaktoren (z. B. Temperatur, Nährstoffgehalt, Sauerstoffverfügbarkeit) die mikrobielle Leistung beeinflussen (Dunleavy & Dede, 2014). Diese Interaktivität verbessert das Behalten von Konzepten und das Engagement der Lernenden und ermöglicht aktives Experimentieren in virtuellen Umgebungen.

Darüber hinaus bietet AR erhebliche Vorteile beim räumlichen Lernen. Durch die Projektion mikrobieller Prozesse auf reale Räume, wie beispielsweise Querschnitte von kontaminierten





Böden oder aquatischen Umgebungen, erhalten die Studierenden von „“ ein tieferes Verständnis der räumlichen Dynamik und der Wechselwirkungen zwischen Mikroben und Schadstoffen (Martínez-García et al., 2020). Da der direkte Zugang zu verschmutzten Standorten oder lebenden Mikroben oft unsicher oder unpraktisch ist, dient AR als sicheres Simulationswerkzeug, das gefährliche Szenarien ohne reale Risiken nachbildet (Bacca et al., 2014).

Anwendungsfälle im Bildungsbereich

- AR-Simulation eines Ölteppichs im Labor: Mit Meta Quest oder mobilen Geräten setzen die Schüler virtuelle Mikroben auf Ölteppichen ein und beobachten den Abbau unter verschiedenen Bedingungen.
- Interaktive Karte zur Bodensanierung: Mit HoloLens-basierter AR können Lernende mehrschichtige Bodenmodelle erkunden, die die Ausbreitung von Schadstoffen und die Besiedlung durch Mikroben zeigen (Gadd, 2010).
- Echtzeit-Sensor + AR-Dashboard: Umweltsensoren verfolgen den Schadstoffgehalt; AR-Overlays zeigen mikrobielle Reaktionen und verknüpfen Daten mit biologischen Funktionen (Martínez-García et al., 2020).
- 3D-App „Microbial Explorer“: Die Schüler scannen QR-Codes, um detaillierte Modelle von Bakterien zu aktivieren, die Zellstrukturen und die Rolle beim biologischen Abbau hervorheben (Beck et al., 2022).

Diese Anwendungen werden durch leicht zugängliche Tools und Plattformen wie Unity 3D, AR Foundation, ARKit/ARCore und 3D-Modellierungssoftware wie Blender und Sketchfab unterstützt. Hardware wie Microsoft HoloLens und Meta Quest 3 ermöglicht immersive Echtzeit-Erlebnisse, die immer erschwinglicher und skalierbarer werden.

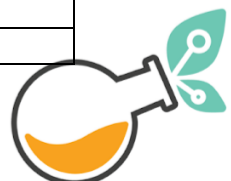
Integration in den Lehrplan

AR kann in Umweltwissenschaften, Biotechnologie oder Mikrobiologiekursen an Gymnasien, Universitäten oder Berufsschulen eingeführt werden. Zu den wirksamen pädagogischen Strategien gehören:

- Forschendes Lernen: Ermutigt die Schüler, Variablen in virtuellen Bioremediation-Umgebungen zu testen.
- Spielbasiertes Lernen: Steigert die Motivation durch Missionen oder Herausforderungen zur Problemlösung.
- Umgedrehter Unterricht: Die Schüler erkunden AR-Module vor dem Unterricht und wenden die Konzepte während der Diskussion an.

Die Vorteile von AR in diesem Zusammenhang sind nachfolgend zusammengefasst:

Vorteil	Beschreibung
Immersion	Realistische, interaktive Simulationen von Sanierungsumgebungen
Beibehaltung	Multisensorisches Lernen verbessert das Verständnis und die Erinnerung
Zugänglichkeit	Portabel und skalierbar für digitale Geräte
Anpassung	Simulationen können auf lokale Schadstoffe, Ökosysteme oder Mikroben zugeschnitten werden
Zusammenarbeit	Unterstützt Teamlernen und gemeinsame AR-Umgebungen





Zukünftige Entwicklungen könnten KI-gesteuerte AR-Tutoring-Systeme, sensorintegrierte Visualisierungen und cloudbasierte AR-Lernplattformen umfassen, wodurch die Zugänglichkeit und Anpassungsfähigkeit über Disziplinen und Standorte hinweg weiter verbessert wird.

Fazit

Augmented Reality ist ein leistungsstarkes Bildungsinstrument zur Verbesserung des Lernens im Bereich der mikrobiellen Bioremediation. Durch die Umwandlung unsichtbarer biologischer Prozesse in sichtbare, interaktive und manipulierbare Erfahrungen hilft AR den Lernenden, komplexe Umweltinteraktionen zu verstehen, die mit traditionellen Methoden oft nicht zugänglich sind. Es ermöglicht die sichere Simulation realer Szenarien, verbessert das Engagement durch interaktives Lernen und unterstützt die Wissensspeicherung durch räumliches und visuelles Denken.

Mit der Weiterentwicklung der immersiven Technologie wird AR zu einem festen Bestandteil der Umweltbildung und -aufklärung werden, insbesondere bei der Förderung nachhaltiger Praktiken, interdisziplinären Lernens und wissenschaftlicher Neugier. Ob im Klassenzimmer, im Labor oder in der Öffentlichkeit – AR kann eine Generation von Lernenden hervorbringen, die besser gerüstet ist, um Umweltverschmutzung zu verstehen und durch biologische und ökologische Lösungen zu bekämpfen.

Phase	Beschreibung
Erkunden	Untersuchen Sie, wie Mikroben Umweltverschmutzung durch biologische Sanierung beseitigen und wie dies in realen Szenarien angewendet wird.
	- Inhaltsentwicklung: Erstellen Sie Bildungsinhalte, die Biologie, Umweltwissenschaften und Technologien im Zusammenhang mit der mikrobiellen Reinigung miteinander verbinden.
	- Bedarfsanalyse: Ermitteln Sie das Verständnis der Lernenden in Bezug auf Umweltverschmutzung, Mikroorganismen und ökologische Sanierung, um einen effektiven Unterricht zu gestalten.
Durchführung	- Umsetzung des Lehrplans: Präsentieren Sie interaktive Lektionen zu Verschmutzungsarten, mikrobieller Wirkung und Mechanismen der biologischen Sanierung mithilfe von AR-Tools.
	- Interaktive Übungen: Verwenden Sie AR-Apps (z. B. Curiscope Virtuali-Tee, Merge Cube), um verschmutzte Umgebungen und mikrobielle Aktivitäten zu simulieren.
	- Feedback-Erfassung: Erfassen Sie die Beobachtungen und Rückmeldungen der Schüler zu virtuellen Sanierungen und Simulationen des Verhaltens von Mikroorganismen, um die Lernerfahrungen zu optimieren.
Verbesserung	- AR-Integration: Wenden Sie AR an, um verschmutzte Ökosysteme, mikrobielle Kolonien und deren Verschmutzungsabbauprozesse zu visualisieren.
	- Interaktives Lernen: Lassen Sie die Schüler die Effizienz virtueller Mikroorganismen testen, indem Sie Schadstoffe einbringen und die Reinigungsergebnisse messen.



**Gamifizierte Inhalte:**

- **Punkte und Abzeichen:** Verdienen Sie Belohnungen für das Identifizieren von Verschmutzungsarten, das Simulieren effektiver Reinigungen oder das Optimieren mikrobieller Aktivitäten.
- **Ranglisten:** Bewerten Sie die Leistung in zeitlich begrenzten Herausforderungen zur Reinigung virtueller verschmutzter Standorte.
- **Aufgaben und Levels:** Schalte immer komplexere Stufen frei, von der Identifizierung von Schadstoffen bis hin zum Management ganzer Sanierungsökosysteme.
- **Belohnungen für Erkundungen:** Verstecken Sie Mikrobenarten oder Hinweise zur Sanierung in AR-Umgebungen, um zu tiefergehenden Untersuchungen anzuregen.
- **Kollaborative gamifizierte Aufgaben:** Teams arbeiten zusammen, um mithilfe mikrobieller Strategien großflächige AR-basierte Umweltkatastrophen zu bekämpfen.

AR-basierte Bewertungen:

- Bewerten Sie das Verständnis, indem Sie die Schüler mit AR-Technologie Missionen zur Beseitigung von Umweltverschmutzungen absolvieren lassen und die Ergebnisse mit Vorher-Nachher-Analysen dokumentieren.





Referenzen

Arici, F. (2024). Untersuchung der Wirksamkeit von Augmented-Reality-Technologie im naturwissenschaftlichen Unterricht in Bezug auf Umweltkompetenz, Selbstregulierung und Motivation zum Lernen von Naturwissenschaften. *International Journal of Human–Computer Interaction*, 40(24), 8476–8496. <https://doi.org/10.1080/10447318.2024.2310921>

Bacca, J., Baldiris, S., Fabregat, R., Graf, S. & Kinshuk. (2014). Augmented-Reality-Trends in der Bildung: Eine systematische Übersicht über Forschung und Anwendungen. *Educational Technology & Society*, 17(4), 133–149.

Beck, D. A. C., Pope, R. K. und McNicholas, P. J. (2022). Die unsichtbare Welt enthüllt: Augmented Reality für die mikrobiologische Ausbildung. *Journal of Microbiology & Biology Education*, 23(1), e00143-21.

Boopathy, R. (2021). Biologische Behandlung von Luftschadstoffen: Eine Übersicht. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 20, 457–472. <https://doi.org/10.1007/s11157-021-09555-9>.

Crawford, R. L. und Crawford, D. L. (1996). *Bioremediation: Principles and Applications*. Cambridge University Press.

Deshusses, M. A. (1997). Biologische Abluftbehandlung in Biofiltern. *Fortschritte in der Biotechnologie*, 13(3), 239–248.

Dhaliwal, S.S., Singh, J., Taneja, P.K., Mandal, A., 2020. Sanierungstechniken zur Entfernung von Schwermetallen aus Böden, die durch verschiedene Quellen kontaminiert sind: eine Übersicht. *Environmental Science and Pollution Research* 27 (2), 1319– 1333.

Dunleavy, M., & Dede, C. (2014). Augmented Reality im Unterricht. In J. M. Spector et al. (Hrsg.), *Handbook of Research on Educational Communications and Technology* (S. 735–745). Springer.

Dunleavy, M., Dede, C., & Mitchell, R. (2009). Möglichkeiten und Grenzen immersiver partizipativer Augmented-Reality-Simulationen für das Lehren und Lernen. *Journal of Science Education and Technology*, 18(1), 7–22. <https://doi.org/10.1007/s10956-008-9119-1>

Fang, C. F., & Ling, D. L. (2003). Untersuchung der Lärmreduzierung durch Baumgürtel. *Landschafts- und Stadtplanung*, 63(4), 187–195.

Fasani, E., Manara, A., Martini, F., Furini, A., DalCorso, G., 2018. Das Potenzial der Gentechnik bei Pflanzen für die Sanierung von mit Schwermetallen kontaminierten Böden. *Pflanze, Zelle und Umwelt* 41 (5), 1201–1232 .

Ernährungs- und Landwirtschaftsorganisation der Vereinten Nationen (FAO). (2021). Bodenverschmutzung: Eine verborgene Realität. Abgerufen unter: <https://www.fao.org/documents/card/en/c/19183EN>





Fredrickson, J. K., Zachara, J. M., Kennedy, D. W. et al. (2004). *Geobacter metallireducens* reduziert Uran und fördert dessen Immobilisierung. *Environmental Science & Technology*, 38(7), 2149–2154.

Gadd, G. M. (2010). Metalle, Mineralien und Mikroben: Geomikrobiologie und biologische Sanierung. *Mikrobiologie*, 156(3), 609–643. <https://doi.org/10.1099/mic.0.037143-0>

Ganiyu, S.O., Sable, S., El-Din, M.G., 2022. Fortgeschrittene Oxidationsprozesse für den Abbau gelöster organischer Stoffe in Produktionswasser: Eine Übersicht über Prozessleistung, Abbaukinetik und Abbauwege. *Chemical Engineering Journal* 429, S. 132492.

Ghosal, D., Ghosh, S., Dutta, T. K. und Ahn, Y. (2016). Aktueller Wissensstand zum mikrobiellen Abbau polyzyklischer aromatischer Kohlenwasserstoffe (PAK): Eine Übersicht. *Frontiers in Microbiology*, 7, 1369. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2016.01369>

Hartman A (2024). Bioremediation: Die umweltbewusste Reinigungsstrategie der Natur. *Adv Genet Eng.*13:282.

Haritash, A. K., & Kaushik, C. P. (2009). Aspekte des biologischen Abbaus polyzyklischer aromatischer Kohlenwasserstoffe (PAK): Eine Übersicht. *Journal of Hazardous Materials*, 169(1–3), 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.03.137>.

Herlina.M, Fitriani.A, Lubis.R. (2024). Entwicklung eines mikrobiologischen Praxisleitfadens auf Basis von Augmented-Reality-Technologie für Virusmaterial, DOI: 10.35445/alishlah.v16i4.4952

Knop, E., Zoller, L., Ryser, R., et al. (2017). Künstliches Licht in der Nacht als neue Bedrohung für die Bestäubung. *Nature*, 548(7666), 206–209.

Kumar, M., & Gopal, M. (2021). Mikrobielle Bioremediation: Ein nachhaltiges Instrument zur Umweltsanierung. *Environmental Technology & Innovation*, 23, 101693. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101693>.

Li, C., Zhou, K., Qin, W., Tian, C., Qi, M., Yan, X., Han, W., 2019. Ein Überblick über die Schwermetallbelastung im Boden: Auswirkungen, Quellen und Sanierungstechniken. *Boden- und Sedimentverschmutzung: Eine internationale Fachzeitschrift* 28 (4), 380–394.

Liang, Y., Jiao, S., Wang, M., Yu, H., Shen, Z., 2020. Ein CRISPR/Cas9-basiertes Genom-Editierungssystem für *Rhodococcus ruber* TH. *Metabolic Engineering* 57, 13–22.

Logan, B. E., Hamelers, B., Rozendal, R., et al. (2006). Mikrobielle Brennstoffzellen: Methodik und Technologie. *Umweltwissenschaft und Technologie*, 40(17), 5181–5192.

Martínez-García, M., Andrés, M. A., & Andreu, A. (2020). Das Unsichtbare sichtbar machen: Einsatz immersiver Technologien zur Förderung des Umweltschutzes. *Frontiers in Environmental Science*, 8, 23.

Meckenstock, R. U., Elsner, M., Griebler, C., et al. (2015). Biologischer Abbau: Aktualisierung der Konzepte zur Kontrolle der mikrobiellen Sanierung kontaminierter Grundwasserleiter. *Environmental Science & Technology*, 49(12), 7073–7081.





Plewniak, F., Crognale, S., Rossetti, S., Bertin, P.N., 2018. Ein genomischer Ausblick auf die biologische Sanierung: der Fall der Arsenentfernung. *Frontiers in Microbiology* 9, S. 820.

Pointing, S. B. (2001). Durchführbarkeit der biologischen Sanierung durch Weißfäulepilze. *Angewandte Mikrobiologie und Biotechnologie*, 57(1–2), 20–33. <https://doi.org/10.1007/s002530100754>

Priya, A.K., Nagan, S., 2015. Sanierung von Schwermetallen aus Galvanikabwässern unter Verwendung von Bakterienstämmen in einem Aufwärtsstrom-Immobilisierungssäulenreaktor. *Journal of Pure and Applied Microbiology* 9 (2), 1411–1416.

Rhea, L.K., Clark, C., 2022. Management großer verdünnter Plumes von Chloroethenen und 1,4-Dioxan durch überwachte natürliche Abbauprozesse (MNA) und MNA-Verstärkung. *Remediation Journal*.

Sharma, P, Bano.A, Pratap Singh.S, Kishore Dubey. N, Chandra. R, Iqbal.H.M.N.(2022) Jüngste Fortschritte bei mikrobiell unterstützten Sanierungsstrategien für toxische Schadstoffe

Sharma, P., Kumar, S., 2021f. Bioremediation von Schwermetallen aus Industrieabwässern durch Endophyten und deren Stoffwechselaktivität: Jüngste Fortschritte. *Bioresource Technology* 339, 125589 .

Sharma, P., Kumar, S., Pandey, A., 2021g. Bioremediationstechniken zur Sanierung von Metallschadstoffen unter Verwendung metagenomischer Ansätze: eine Übersicht. *Journal of Environmental Chemical Engineering* 9 (4), S. 105684.

Singh, R., & Strong, P. J. (2022). Bioremediation: Aktuelle Anwendungen und neue Trends. *Frontiers in Microbiology*, 13, 872695. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.872695>.

Singh, J., & Chandra, R. (2019). Biotechnologie zur Bekämpfung der Umweltverschmutzung. *Environmental Chemistry Letters*, 17, 1335–1355. <https://doi.org/10.1007/s10311-019-00865-6>

Umweltprogramm der Vereinten Nationen (UNEP, 2021), Ernährungs- und Landwirtschaftsorganisation (FAO, 2021), US-Umweltschutzbehörde (EPA, 2023)

Umweltprogramm der Vereinten Nationen (UNEP, 2021). Wasserverschmutzung. Abgerufen unter: <https://www.unep.org/explore-topics/water/what-we-do/addressing-water-pollution>

US-Umweltschutzbehörde (EPA). (2023). Bioreaktoren und Biofilter zur Luftreinhaltung. Abgerufen unter: <https://www.epa.gov/air-research/bioreactors-and-biofilters-air-pollution-control>

Varjani, S. J. (2017). Mikrobieller Abbau von Erdölkohlenwasserstoffen. *Bioresource Technology*, 223, 277–286. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.10.037>

Vidali, M. (2001). Bioremediation. Ein Überblick. *Pure and Applied Chemistry*, 73(7), 1163–1172.





Vymazal, J. (2011). Konstruierte Feuchtgebiete zur Abwasserbehandlung: fünf Jahrzehnte Erfahrung. *Environmental Science & Technology*, 45(1), 61–69.

Zeyaulah, M., et al. (2023). Fortschritte bei biologischen Sanierungsansätzen: Jüngste Entwicklungen und Zukunftsaussichten. *Umweltwissenschaft und Verschmutzungsforschung*. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-27790-z>.

https://en.wikipedia.org/wiki/Archaea?utm_source=chatgpt.com

https://www.britannica.com/science/microbiology/Types-of-microorganisms?utm_source=chatgpt.com

preprints.org

pmc.ncbi.nlm.nih.gov

nature.com

https://gosharpener.com/blogs/710991/Environmental-Pollution?lang=de_de

<https://www.who.int/health-topics/air-pollution>

<https://www.unep.org/explore-topics/water/what-we-do/addressing-water-pollution>

<https://www.fao.org/documents/card/en/c/I9183EN>

<https://www.who.int/europe/publications/i/item/9789289053563>

<https://www.darksky.org/light-pollution/>

<https://www.epa.gov/nps/nonpoint-source-urban-areas>

<https://www.iaea.org/topics/radioactive-contamination>

pmc.ncbi.nlm.nih.gov/frontiersin.org

en.wikipedia.org

<https://editverse.com/bioremediation-using-nature-to-clean-up-pollution/>

wired.com/tos.org+1wired.com+1

timesofindia.indiatimes.com

reuters.com+1bassconnections.duke.edu+1





pubs.rsc.org

mdpi.comresearchgate.net

pollution.sustainability-directory.com

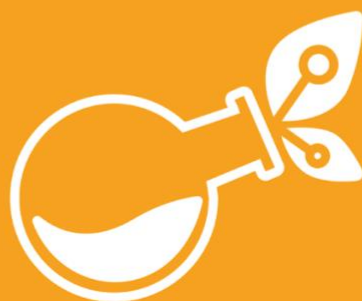
prism.sustainability-directory.com

ejmste.comacademic.oup.com





Co-funded by
the European Union



BIOS4YOU AR 2.0

BIO-INSPIRED STEM TOPICS FOR ENGAGING YOUNG GENERATIONS
THANKS TO THE USE OF AUGMENTED REALITY



Project Number: KA220-BW-23-30-126516

*Funded by the European Union. Views and opinions expressed are however those of the author(s) only and do not necessarily reflect those of the European Union or the European Education and Culture Executive Agency (EACEA). Neither the European Union nor EACEA can be held responsible for them.