

WWW. KNIFFELIX.DE

BEGLEITMATERIAL ZUR EXPERIMENTIERWEBSITE WWW.KNIFFELIX.DE ZUM THEMA

Produktive Biofilm Systeme



FÖRDERER	KOOPERIERENDE FORSCHUNGSINSTITUTE		ZIELGRUPPE
Funded by  Deutsche Forschungsgemeinschaft German Research Foundation	 www.gescher-lab.de	 www.technical-biocatalysis.com	Alter ab 12-99+ Einzelinteressierte Schulklassen StudentInnen Kooperierende
		TUHH Technische Universität Hamburg	

www.kniffelix.de ist die kostenlose Mitmach-Experimentierwebsite, erstellt von der Nachwuchsinitiative KinderForscher an der TUHH. Ziel der Initiative ist Wissenschaft, Technik und Forschung allgemeinverständlich für jeden zugänglich zu machen: Vom Alltag, über das Experimentieren zur Forschung und Berufsorientierung.

Kniffelix.de ist ausgezeichnet mit dem Seitenstark Gütesiegel für empfehlenswerte digitale Kindermedien.

Dieses Material von KinderForscher an der TUHH steht unter der internationalen CC-Lizenz Namensnennung – nicht kommerziell – Weitergabe unter gleichen Bedingungen 4.0, siehe: <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>

Autoren:

Dr. Rosvita Milo-Rieks, Gesine Liese, Julia Husung
Hamburg 2026

Prof. Dr. Johannes Gescher

¹Institut für Technische Mikrobiologie

Kasernenstraße 12, Gebäude F, 21073 Hamburg
johannes.gescher@tuhh.de
<https://www.gescher-lab.de>

KinderForscher an der TUHH

Am Irrgarten 3-9, Gebäude Q, 21073 Hamburg
Tel. (040) 30601-4082
gesine.liese@kinderforscher.de
rosvita.milo-rieke@kinderforscher.de
www.kinderforscher.de

Eine Arbeitsgruppe von

Prof. Dr. Andreas Liese

¹Institut für Technische Biokatalyse

Denickestr. 15, Gebäude K, 21073 Hamburg
liese@tuhh.de
www.technical-biocatalysis.com

Wir bedanken uns für die finanzielle Unterstützung der Deutschen Forschungsgemeinschaft – DFG – German Research Foundation

Inhaltsverzeichnis der Begleitunterlagen

	Seite
Wissensbox I: Was ist ein Biofilm	
1. Wo findet man Biofilme?	4
2. Was sind Biofilme?	4
3. Woraus bestehen Biofilme und wie sind sie aufgebaut?	5
4. Wieso sind Biofilme für Forschende interessant?	6
Wissensbox II: Entstehung und Aufbau von Biofilmen	
1. Entstehung von Biofilmen	7
2. Phasen der Entstehung	7
3. Aufbau von Biofilmen	9
4. Kurz zusammengefasst	10
Wissensbox III Biotechnologie und Produktive Biofilm Systeme	
1. Biotechnologische Prozesse	11
2. Produktive Biofilm Systeme	
3. ...	
4. ...	12
Wissensbox IV:	
Experiment:	

Wissensbox I: Was sind Biofilme



Biofilme sind Euch allen an vielen Orten begegnet, aber ihr wusstet vermutlich nicht genau, was das ist, woraus sie bestehen oder wie man sie nennt.

WO FINDET MAN BIOFILME IM ALLTAG?

Biofilme entstehen gerne überall dort, wo es feucht ist und haften sich fest an den Untergrund. Es sind faszinierende gelartige dünne Filme, in der zahlreiche Kleinstlebewesen/Mikroorganismen in einer Gemeinschaft organisiert zusammenleben. In unserer Natur bevorzugen Mikroorganismen diese Art von Lebensgemeinschaften, da sie viele Vorteile bringen. Im Alltag bist Du Biofilmen wahrscheinlich schon an folgenden Orten begegnet (Abb. 1):

- **In unserem Darm:** Hier leben „gute“ Bakterien im gelartigen Biofilm und unterstützen bei der Verdauung unserer Nahrung, um all die wichtigen Bestandteile, die uns gesund hält, herauszulösen. Falsche Ernährung kann dazu führen, dass sich ungünstige Bakterien vermehren und dadurch Beschwerden verursachen
- **Im Mund:** Auf den Zähnen entsteht Plaque – ein Biofilm, der bei schlechter Zahnpflege Karies verursachen kann
- **In deiner Trinkflasche:** Wenn Wasserbehälter nicht gründlich gereinigt werden, bildet sich ein schleimiger Film aus Mikroorganismen
- **Auf Steinen und Holz:** Auf Steinen oder Holz, die in Flüssen und Seen von Wasser überspült werden, bilden sich leicht Biofilme. Man kann auf diesen schleimigen Schichten leicht ausrutschen.

☞ **Was alle diese Biofilme gemeinsam haben – sie entstehen als schleimige Schicht, wenn es feucht ist und die Mikroorganismen von den Oberflächen nicht entfernt werden. Hat sich erstmal ein Biofilm gebildet, ist er schwer zu entfernen.**

Forschende möchten herausfinden, wie Biofilme die Kleinstlebewesen schützen, um diese Vorteile bei der technischen Verwendung von Mikroorganismen auszunutzen.

WAS SIND BIOFILME?

Bei Biofilmen handelt es sich zumeist um eine Lebensgemeinschaft von unterschiedlichen Mikroorganismen, wie Bakterien, Pilze oder Algen, die von einer gelartigen wasserspeichernden Schicht umschlossen sind. Durch den Wasserspeicher im Biofilm sind die Mikroorganismen besser vor dem Austrocknen geschützt, da Wasser/ Feuchtigkeit zum Überleben und Wachsen von Mikroorganismen unentbehrlich ist. Biofilme werden gebildet, nachdem sich Mikroorganismen in kleinen Gruppen auf einer Oberfläche festsetzen. Diese Oberflächen können beispielsweise Zähne, Steine im Wasser, oder deine Trinkflasche sein. Nachdem sich einige Mikroorganismen angeheftet haben, gesellen sich weitere Mikroorganismen hinzu. Einige von Ihnen beginnen einen gelartigen Film abzusondern. Dieser Film umgibt alle Organismen wie eine Schutzschicht. Das hat für alle Vorteile: Der wasserreiche Biofilm schützt die Mikroorganismen vor starken Änderungen der Außenwelt,



Abbildung 1: Unterschiedliche Arten von Biofilmen

so dass Wasser und die Versorgungswege auch bei schlechteren Umgebungsbedingungen bestehen bleiben.

Durch feste Anhaftung der Biofilme an den Untergrund (dem sog. Substratum), wird es den Mikroorganismen ermöglicht in der Nähe von guten Lebensbedingungen zu bleiben und nicht weggespült zu werden. Man kann sich das so ähnlich vorstellen, wie vor langer Zeit bei der Entstehung von Siedlungen. Umherziehende Nomadenstämme haben sich dort niedergelassen und Siedlungen gebaut, wo man gute Lebensbedingungen und Wasser gefunden hat. Durch Anbau von Nahrung und Arbeitsteilung konnte man sich besser versorgen und konnte an einem Ort bleiben.

WORAUS BESTEHEN BIOFILME?

Die schützende Biofilmschicht, in der die Mikroorganismen leben, nennen die Forschenden auch extrazelluläre polymere Substanz (EPS). Der Name klingt kompliziert, lässt sich aber einfach erklären:

- „extrazellulär“ bedeutet „außerhalb der Zellen“
- „polymer“ heißt „aus vielen kleinen Bausteinen aufgebaut“

Die EPS ist demzufolge die Substanz, die die Mikroorganismen außerhalb der Zelle, also extrazellulär, umhüllt. Dieser Film wird in bestimmten Organismen produziert und nach außen als gelartige Substanz in die Umgebung abgegeben. Die EPS setzt sich vor allem aus unterschiedlichen Zuckerbausteinen zusammen, die zu langen Ketten verknüpft werden und ein netzartiges Gerüst bilden. In diesem Netzwerk sind auch Eiweißbausteine und Erbinformationen in Form von extrazellulärer DNA eingelagert (**Abb. 2**) und viel Wasser gespeichert. Man kann sich diese Schicht wie ein klebriges Schutzgerüst vorstellen, das die Mikroorganismen zusammenhält. Forschende nennen diese Gesamtstruktur auch Matrix (das bedeutet hier so viel wie „Grundgerüst“).

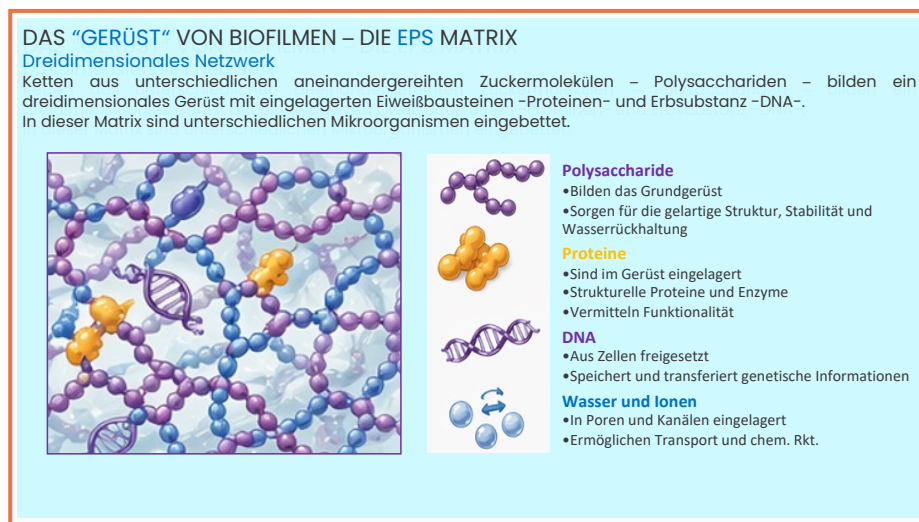


Abbildung 2: Vereinfachter schematischer Aufbau der Gelmatrix (Bild: erstellt nach eigenen Vorgaben durch ChatGPT)

WIE SIND BIOFILME AUFGEBAUT?

Biofilme sind häufig komplex mit dreidimensionaler Architektur, wobei die Gelmatrix die räumlichen Strukturen bildet, in der sich unterschiedliche Bereiche befinden. Beispielsweise findet man Zonen mit verschiedenen Sauerstoffgehalten und mit unterschiedlicher Lichtdurchlässigkeit. Durch die Gelmatrix verlaufen feine Kanäle, ähnlich wie kleine Straßen, oder wie feine Wasseradern. Durch diese Kanäle gelangen Wasser und Nährstoffe hinein und Abfallstoffe werden abtransportiert. Den Biofilm kann man sich gut wie eine kleine Siedlung vorstellen: Es gibt Ver- und Entsorgungssysteme und verschiedene „Lebensbereiche“ für

unterschiedliche Mikroorganismenarten. Entsprechend den Bedürfnissen nach Nährstoffen, Sauerstoff oder Licht besiedeln Mikroorganismen unterschiedliche Zonen im Biofilm und halten sich dort bevorzugt auf (**Abb. 3**).



Abbildung 3: Biofilmarchitektur mit unterschiedlichen Zonen im Querschnitt

Dadurch, dass die Gelschicht die Mikroorganismen umschließt, schützt sie sie vor extremen Einflüssen, wie Trockenheit, dem Angriff anderer Mikroorganismen oder Fressfeinden und sogar vor einigen Chemikalien und Antibiotika. Die räumliche Nähe einzelner Spezies zueinander innerhalb der wasserhaltigen Gelschicht vermittelt einen guten Austausch unterschiedlicher Substanzen und gewährleistet die Versorgung mit Nährstoffen und den Abtransport von Abfallstoffen. Darüber hinaus ermöglicht die Biofilmschicht eine Kommunikation der Mikroorganismen untereinander. In einem kleinen Video ist das Leben im Biofilm unterhaltsam veranschaulicht. (<https://www.ufz.de/index.php?en=42201>).

WARUM SIND BIOFILME FÜR DIE FORSCHUNG INTERESSANT?

Stabile und nahezu gleichbleibende Lebensbedingungen in Biofilmen, eine hohe Zahl von Mikroorganismen auf kleinem Raum und geringer Wasserbedarf machen Biofilme für die Forschung besonders interessant. Forschende möchten gerne mit Biofilmen chemische Produkte für unseren Alltag, wie Kunststoffe oder Medikamentenrohstoffe herstellen. Man geht davon aus, dass man mit Biofilmproduktionsanlagen viel günstiger und umweltfreundlicher produzieren könnte als in chemischen Anlagen.

Warum sind Biofilme für die Forschung interessant?



Wasserspeicher
Die Matrix kann viel Wasser speichern – wie ein Schwamm. So bleibt der Biofilm lange feucht.





Stabil & widerstandsfähig
Biofilme schützen die Mikroorganismen vor Veränderungen in der Umwelt und vor vielen Reinigungs- oder Desinfektionsmitteln.





Hohe Zellzahl
Auf engem Raum können sehr viele Mikroorganismen leben und sich vermehren. Das macht Biofilme sehr leistungsfähig.





Nutzung in der Forschung
Forschende möchten Mikroorganismen in Biofilmen gezielt „trainieren“, um nützliche Stoffe (Chemikalien) herzustellen, z. B. für Medikamente, Biokunststoffe oder nachhaltige Produkte.



Abbildung 4: Vorteile von Biofilmen für die Biotechnologie. (Bild nach eigenen Vorgaben erstellt von ChatGPT).

Wissenschaftler im Forschungsprojekt „Productive Biofilm Systems“ SPP 2494/DFG forschen daran, wie man spezialisierte Mikroorganismen in Biofilmen gezielt nutzen kann

Verstehen wir Biofilme besser, können wir sie gezielt für uns nutzen, um umweltfreundlichere und kostengünstigere Anwendungen in der Biotechnologie und für die chemischen Industrie zu entwickeln, in Einklang mit den Nachhaltigkeitszielen der Vereinten Nationen/UN.



Wissensbox II: Entstehung und Aufbau von Biofilmen

Wie man im vorangegangenen Abschnitt erfahren konnte, entstehen Biofilme, wenn sich Mikroorganismen, vor allem Bakterien, Pilze und Algen an eine Oberfläche/Grenzflächen anlagern und dort zu strukturierten Gemeinschaften heranwachsen und miteinander „zusammenarbeiten“. Biofilme sind als Lebensgemeinschaft von Mikroorganismen in der Natur vorherrschend. Über 99 % aller Mikroorganismen leben in der Natur in Aggregaten oder Biofilmen und nicht als frei bewegliche Einzelzellen. Die Biofilmbildung ist ein regulierter Prozess, der durch das Zusammenwirken unterschiedlicher Parameter wie Umweltfaktoren, Oberflächeneigenschaften und genetischen Programmen der Mikroorganismen gesteuert wird.

ENTSTEHUNG VON BIOFILMEN

Die Entstehung und Verbreitung von Biofilmen lassen sich in vier Phasen gliedern:

1. Induktionszeit

Anheftung (1); EPS-Bildung und langsame Wachstumsphase (1.1) bis zum Beginn des exponentiellen Wachstums

2. Exponentielle Wachstumsphase

Wachstum mit rascher Zunahme der Biofilmdicke

3. Plateauphase

ein Gleichgewicht zwischen Wachstum, Stoffwechsel-aktivität und Ablösung von Zellen

4. Verbreitung: In der letzten Phase kommt es zur Ablösung einzelner Bereiche und damit zur Verbreitung des Biofilms.

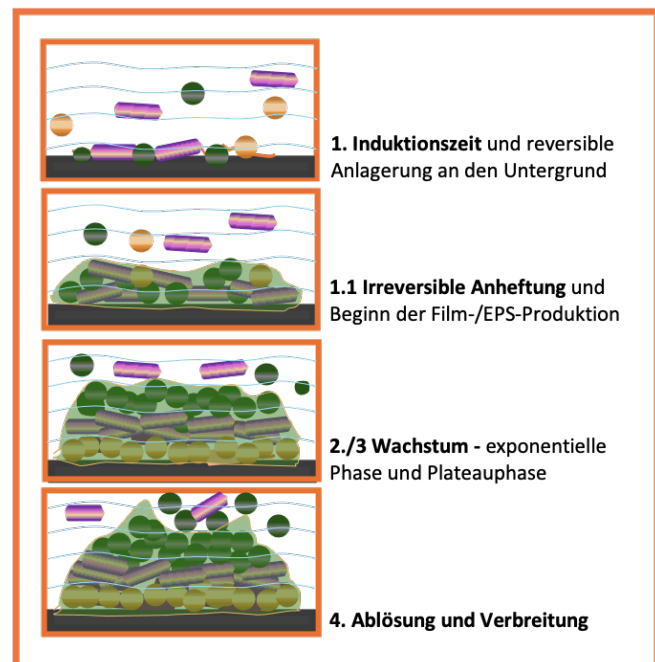


Abbildung 1: Schematische Darstellung Biofilmbildung, unterteilt in die einzelnen Phasen.

1. Induktionszeit und reversible Anlagerung

Die Entwicklung eines Biofilms beginnt mit der sogenannten Induktionszeit. In dieser Phase treffen vereinzelte Zellen auf eine Oberfläche und heften sich zunächst reversibel, also wieder ablösbar, an. In dieser Region der bereits angehefteten Zellen lagern sich weitere Mikroorganismen an. Die Bindung der Mikroorganismen an die Oberfläche erfolgt über physikalische Anziehungskräfte. Die Dauer der Induktionszeit hängt stark von Umweltparametern wie Nährstoffverfügbarkeit, Temperatur, pH-Wert oder Strömungsbedingungen ab.

1.1. Irreversible Anheftung und Beginn der EPS-Produktion

Wird der Untergrund und die Anwesenheit anderer Mikroorganismen als geeignet erkannt, folgt die irreversible, also „nicht umkehrbare“ Anheftung, die durch besondere Strukturen auf der Zelloberfläche ermöglicht wird. Gleichzeitig beginnen die unterschiedlichen Zellen miteinander zu kommunizieren, wodurch

einige Mikroorganismen mit der Produktion der extrazellulären polymeren Substanzen (EPS) beginnen. Die Ausbildung der Matrix sorgt nun dafür, dass der Biofilm mit seinen unterschiedlichen Mikroorganismen strukturell zusammenbleibt und geschützt wird. In dieser Phase sind die unterschiedlichen Mikroorganismen noch vereinzelt in einer dünnen Schicht auf der Oberfläche angeheftet.

2. Wachstum

Nachdem sich die ersten Organismen am Untergrund angeheftet haben, bilden sie eine dünne Schicht aus, in der die Organismen dicht nebeneinander, aber noch nicht räumlich ausgedehnt übereinander liegen. Diese einzelnen Zellen vermehren sich unter günstigen Bedingungen, so dass aus ihnen kleine Mikrokolonien entstehen. Währenddessen produzieren einige Organismen weiter den Gelfilm, so dass die neu entstehenden Zellen umhüllt werden und in den Biofilm integriert werden. Es entstehen dreidimensionalen Strukturen, die von Wasserkanälen durchzogen sind. Diese Kanäle ermöglichen den Transport von Sauerstoff, Nährstoffen und Stoffwechselprodukten und sind entscheidend für die funktionelle Organisation des Biofilms.

3. Plateauphase

In der Plateauphase ist der Biofilm vollständig ausgereift. Die EPS-Matrix ist maximal ausgebildet, und die Stoffwechselaktivität ist räumlich unterschiedlich aufgeteilt. Die Ausgestaltung der unterschiedlichen Zonen, wo jeweils bestimmte Mikroorganismen bevorzugt wachsen, ist jetzt an seinem Optimum angelangt und die Zellzahl an Mikroorganismen hat sein Maximum erreicht.

Der Zellanteil in einem ausgewachsenen Biofilm beträgt aufgrund des hohen Wasseranteils meist 2–5 % der Gesamtmasse. Die EPS-Matrix mit seinem sehr hohen Wasserbindungsvermögen ist damit der dominierende strukturelle Bestandteil des Biofilms. Schaut man nur auf die organischen Anteile des Biofilms (ohne Wasser und mineralischen Anteil), so kann der Anteil an Mikroorganismen je nach Art und Wachstumsbedingungen zwischen 10 % und 90 % betragen, was sehr hoch ist. Es bedeutet, dass die in einem Biofilm eine sehr hohe Anzahl von Mikroorganismen auf kleinem Raum leben können, was für die Forschung besonders interessant ist.

4. Ablösung und Verbreitung

In der letzten Phase lösen sich einzelne Zellen oder Zellaggregate aus dem Biofilm. Werden Biofilmstrukturen sehr groß, kommt es zur Ablösung bestimmter Anteile des Biofilms. Die Ablösung kann aktiv reguliert sein oder durch äußere Einflüsse wie Strömung oder Nährstoffmangel ausgelöst werden. Die Dispersionsphase ermöglicht die Verbreitung und nachfolgend die Besiedlung neuer Oberflächen und schließt den Entwicklungszyklus ab.

AUFBAU VON BIOFILMEN

Innerhalb eines einzigen Biofilms bilden sich aufgrund physiko-/chemischer und biochemischer Faktoren unterschiedliche mikrobielle Zonen aus. Physikalische Faktoren, wie Wasserhaushalt und Druck, Temperatur und Lichteinfall/Lichtdurchlässigkeit, Gasdruck, chemische Einflussgrößen, Sauerstoffgehalt, Wassergehalt, das Verhältnis von Kohlenstoff, Stickstoff und Phosphor und pH-Wert und biochemische Faktoren, wie das Nährstoffangebot, Stoffwechselprodukte prägen die einzelnen Zonen.

Gradienten im Biofilm

Ein entscheidendes Merkmal dieser außergewöhnlichen Lebensräume ist die Aus-bildung von sogenannten Gradienten, also einer Konzentrationsänderung bestimmter Stoffe innerhalb eines definierten Bereiches. Konzentrationen von Sauerstoff, Kohlen-dioxid, Nährstoffen, Lichtphotonen, Wasser etc. ändern sich innerhalb des Biofilms. Bereits über wenige Mikrometer hinweg können sich in einem Biofilm starke Konzentrationsänderungen also Gradienten ausbilden.

An der Grenzschicht zwischen Biofilm und dem umgebenden Medium herrschen meist sauerstoffreiche Bedingungen. Sauerstoff und Nährstoffe aus dem Medium in den Biofilm hinein.

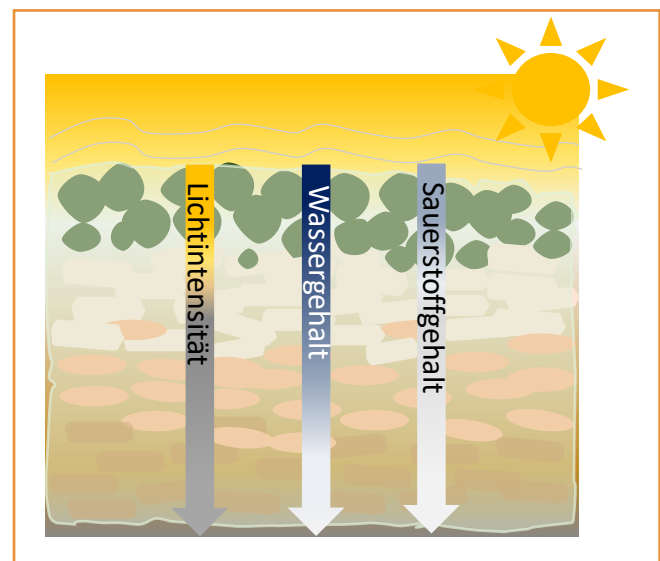


Abbildung 2: Beispiel für die Änderung der Konzentrationen, dem sog. Gradientenverlauf, in unterschiedlichen Schichttiefen für Licht und Sauerstoff

Unterschiedliche Gradienten

Sauerstoff

Sauerstoff ist für einige Mikroorganismen überlebenswichtig, während andere Organismen keinen Sauerstoff vertragen. Der Sauerstoffgehalt sinkt rasch ab, je weiter man von dem äußeren Bereich in das Innere des Films hineingelangt. Sogenannte aerobe Mikroorganismen, die Sauerstoff zum Wachsen und für oxidative Stoffwechselwege benötigen, siedeln sich im äußeren Bereich des Films an. Im Inneren des Films und vor allem an der Anhaftungsgrenzfläche zum Substratum herrscht reduzierendes, oft vollständig sauerstofffreies, Mikromilieu.

Wasser

Die Verfügbarkeit von Wasser ist für die Mikroorganismen lebensentscheidend und variiert innerhalb der Matrix. Die Polysaccharidmatrix ist in der Lage große Mengen an Wasser zu speichern, so dass der Wassergehalt auf über 95% ansteigen kann. Die EPS ist aus verschiedenen Schichten aufgebaut. Diese Bereiche unterscheiden sich in ihrem Wassergehalt und der Durchlässigkeit, also der Permeabilität für verschiedene Stoffe. Während die äußeren Zonen stärker durchströmt werden und einen intensiven Stoffaustausch ermöglichen, können dichter gepackte Strukturen im Inneren des Biofilms den Transport größerer Moleküle einschränken. Neuesten Ergebnissen zu Folge deutet vieles darauf hin, dass Wasser maßgeblich die räumliche Struktur im Biofilm mitgestalten.

Licht

In Biofilmen, die Licht ausgesetzt sind, bilden sich sogenannte phototrophe Zonen. Mikroorganismen, wie Cyanobakterien, Algen oder phototrophe Bakterien können das einfallende Licht zur Energiegewinnung und Aufbau von Nährstoffen nutzen. Diese Organismen siedeln bevorzugt an der Biofilmoberfläche oder in lichtdurchlässigen EPS-Bereichen.

Bei der Photosynthese wird Lichtenergie genutzt, um aus CO₂ und Wasser Zucker/Glucose herzustellen. Dabei entsteht auch Sauerstoff. Mit dem freiwerdenden Gas Sauerstoff, der aus dem gelartigen Biofilm nicht sofort entweichen kann, beeinflusst die Photosynthese wiederum die chemischen Gradienten. Tagsüber steigt die Sauerstoffbildung und damit der Sauerstoffgehalt in Folge der Photosynthese in den oberen Schichten stark an.

Das Zusammenspiel der Mikroorganismen, wie beispielsweise die Steuerung der Bildung von EPS, wird durch Zellkommunikationswege mit Hilfe chemischer und elektrischer Signale ermöglicht. Die Zellkommunikation kann man sich ähnlich wie die Kommunikation in unserem Körper vorstellen. Gehirn, Organe, Muskeln stehen permanent in Verbindung, um Atmung, Bewegung und Stoffwechselvorgänge am Laufen zu halten. Die Kommunikation in Biofilmen ist ebenfalls erstaunlich komplex und nicht bis in alle Einzelheiten aufgeklärt.

Kurz zusammengefasst

In Biofilmen entstehen durch dreidimensionale, wasserhaltiger EPS-Gel Filme winzigste komplexe Lebensräume für Mikroorganismen. Die Gelmatrix wirkt nicht nur als stabiles Gerüst, sondern auch als selektiver Filter, der den Transport von Molekülen reguliert und damit die Ausbildung funktioneller Zonen unterstützt. Die Gelmatrix dient als Wasserspeicher, Ver- und Entsorgungsweg und Kommunikationsnetz auf mikroskopisch kleinstem Raum. Innerhalb des Films finden sich verschiedenen Konzentrationen an Nährstoffen, Licht-, Sauerstoff und Wassergehalten. Das wehrhafte dreidimensionale Bauwerk bietet Schutz vor extremen Veränderungen. Abhängig von den Umweltbedingungen werden von bestimmten Mikroorganismen unterschiedlich zusammengesetzte Gel Filme gebildet. Genetische Programme steuern die Bildung der unterschiedlichen Strukturen. Forschungsergebnisse zeigen, dass insbesondere die biochemische Zusammensetzung des Films und die damit einhergehende strukturelle Vielfalt der Gelmatrix entscheidend ist für die Ausbildung dieser Mikrolebensräume.

Für Forschende und für die Industrie sind Biofilmsysteme von besonderem Interesse, da die äußerst stabil sind und die Eigenschaft haben auf äußere Einflüsse zu reagieren. Man möchte mit Hilfe von Biofilmen umweltfreundlichere biotechnologische Methoden zur Produktion von Grundstoffen für die Medikamentenherstellung und für Alltagsprodukte finden und damit eine Alternative zu rein chemischen Verfahren und erdölbasierten Rohstoffen zu entwickeln (Abb.: 3).

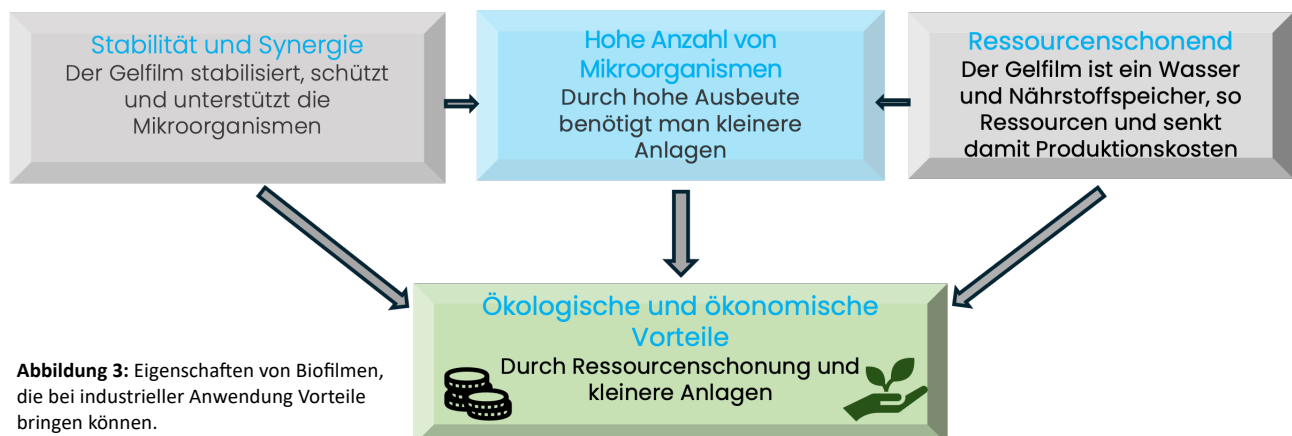


Abbildung 3: Eigenschaften von Biofilmen, die bei industrieller Anwendung Vorteile bringen können.

Wissensbox III: Biotechnologie und produktive Biofilmsysteme

Biotechnologische Prozesse (Querverweis auf Kniffelix/Berufsorientierung)

Biotechnologische Verfahren nutzen biologische Prozesse aus, um bestimmte Ausgangsstoffe biochemisch in ein gewünschtes Produkt umzuwandeln. Im Unterschied zu rein chemischen Verfahren setzt die Biotechnologie auf die Umwandlung von Stoffen mit Hilfe natürlicher Systeme, wie Mikroorganismen oder Enzyme. Enzyme wirken als sogenannte Biokatalysatoren: Sie ermöglichen chemische Reaktionen meist unter viel milderen Bedingungen als die klassischen chemischen Reaktionswege, die häufig viel Energie oder starke Chemikalien benötigen. In lebenden Organismen, wie beispielsweise in unserem Körper, laufen ununterbrochen Millionen biochemische Reaktionen ab, bei nur ca. 36 °C und unter sehr milden Bedingungen. Damit ist unser Organismus auch eine große biochemische Fabrik, durch deren Reaktionsprodukte uns ein Leben ermöglicht wird. Würde man diese Prozesse in einer Chemiefabrik nachahmen, wären viele teure, komplexe Anlagen nötig, die viel Energie und Ressourcen verbrauchen würden. Genau deshalb nutzt die Biotechnologie die besonderen Fähigkeiten biologischer Systeme, um effizient und ressourcenschonend zu arbeiten.

Bereits vor Tausenden von Jahren nutzten Menschen biochemische Prozesse bei der Herstellung von Lebensmitteln aus. Hefen und Milchsäurebakterien wurden zur Herstellung von Essig, Joghurt, Bier und Wein eingesetzt. Heute geht die Biotechnologie weit darüber hinaus: Mikroorganismen oder ihre Bestandteile werden teilweise gezielt verändert und optimiert, damit sie bestimmte Stoffe besonders effizient produzieren können. Auf diese Weise entstehen moderne Produkte wie Impfstoffe, Krebsmedikamente, Waschmittelenzyme, Kunststoffe, Chemikalien aus nachwachsenden Rohstoffen oder andere wichtige biotechnologische Erzeugnisse, die in Medizin, Industrie und Alltag eine große Rolle spielen.

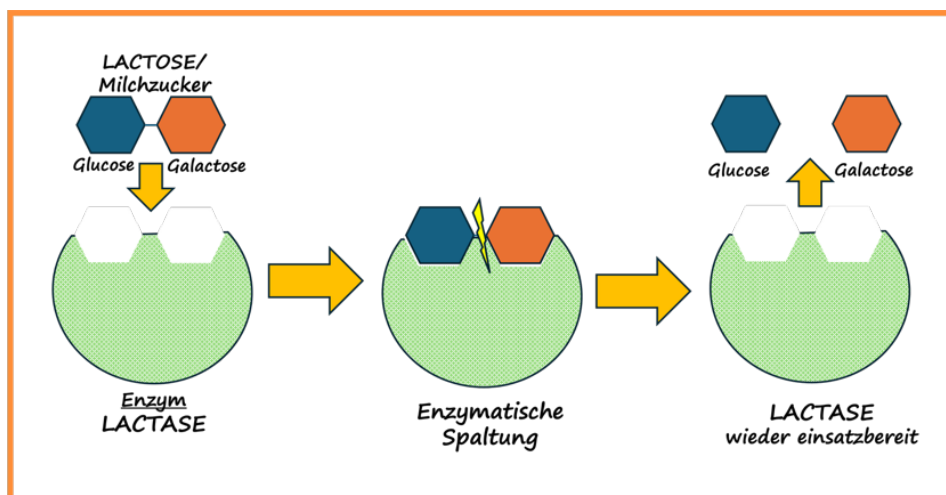
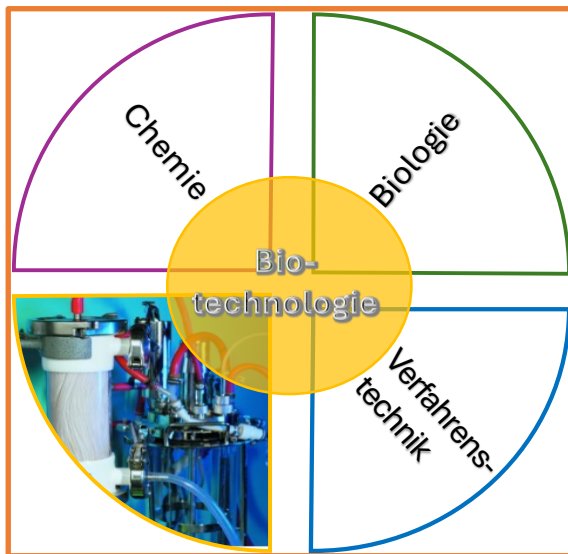


Abbildung 4: Beispiel für einen biotechnologischen Prozess: Herstellung laktosefreier Milch durch Spaltung von Milchzucker/Lactose in Kuhmilch

Ein Beispiel für ein biotechnologisches Verfahren ist die Herstellung von laktosefreier Milch. Menschen, die das Enzym Lactase nicht besitzen, um den in der Milch enthaltenen Milchzucker/Laktose zu spalten, vertragen keine normale Kuhmilch. Bei der Herstellung laktosefreier Milch wird das Enzym Lactase der Milch zugesetzt, um den Milchzucker in seine Bestandteile, der Glucose und Galactose zu spalten. Die Einzelbestandteile des Milchzuckers, die Glucose und Galactose, hingegen wird von den meisten Menschen vertragen (**Abb.: 4**).



Damit biologische Systeme für technische Zwecke eingesetzt werden können, braucht man Wissen aus mehreren Bereichen (**Abb.: 5**):

- **Biologie** – um Mikroorganismen und Enzyme zu verstehen, zu züchten und optimieren
- **Chemie** – um die Stoffumwandlungen zu erklären und steuern zu können
- **Ingenieurwissenschaften** – um Anlagen und Prozesse zu entwickeln

Biotechnologie ist deshalb ein interdisziplinäres Feld, bei dem diese drei Bereiche eng zusammenarbeiten.

Abbildung 5: Biotechnologie als interdisziplinäre Wissenschaft von Verfahrenstechnik, Biologie und Chemie.

Die Entwicklung neuer biotechnologischer Verfahren gehört damit nicht nur zu einem bedeutenden Teil der naturwissenschaftlichen Grundlagenforschung an, sondern ist auch ein zentraler Motor für Innovationen, die unsere Gesellschaft nachhaltig prägen. Sie reicht von der Gesundheitsversorgung über die Lebensmittelproduktion bis hin zum Umwelt- und Klimaschutz.

Mit dem Forschungsgebiet der produktiven Biofilmsysteme möchte man untersuchen, wie man biotechnologische Verfahren noch einfacher und ressourcenschonender durchführen könnte.

Produktive Biofilmsysteme SPP 2494

Die Deutsche Forschungsgesellschaft DFG fördert ein deutschlandweites Projekt mit 12 Forschungsinstituten, um herauszufinden, wie man Biofilme technologisch nutzen kann

Bei klassischen biotechnologischen Verfahren, bei denen man Mikroorganismen züchtet, arbeitet man oft in gerührten flüssigkeitsgefüllten Reaktionsbehältern (**Abb.: 6**), den sogenannten Fermentern. Man kann sich das wie einen großen fest verschlossenen Topf mit einem Rührer in der Mitte vorstellen, in den verschiedene Zuleitungen und Messeinrichtungen hineinführen. Änderungen der Bedingungen, wie Temperatur, Nahrungsquelle, Säure- oder Laugenzugabe werden über die Strömung schnell in das System transportiert und dabei verteilt. Die Mikroorganismen oder Enzyme „spüren“ diese Änderung sofort und reagieren. Bei ungünstigen Veränderungen ist die Reaktion negativ, was die Leistungsfähigkeit der biochemischen Synthese beeinträchtigen kann. Um das zu vermeiden, versucht man die Prozesse sehr genau und feinabgestimmt zu steuern. Die dafür benötigten Geräte und Einrichtungen sind technologisch meist teuer und man benötigt gut geschulte Mitarbeiter, die damit umgehen.

Die hohe Beständigkeit von Biofilmen würde empfindliche Prozesse stabiler machen und damit eine kostengünstigere und nachhaltigere Produktion ermöglichen. Dadurch, dass in einem Biofilm die Mikroorganismen geschützt werden, würden sie jede Veränderung nur indirekt und abgepuffert die Organismen treffen und nicht unmittelbar, wie in freier Lösung. Die Nachteile eines stabilen, langsam auf Veränderungen reagierenden Systems sind beispielsweise die Auswirkungen auf die Umsetzungs-raten. Langsamere Transportprozesse bedeuten auch weniger Produkt pro Zeiteinheit im Film, was einen Einfluss auf die sogenannte Produktionsrate, also Produktionsmenge pro Zeiteinheit hat. Diese Faktoren spielen in der industriellen Produktion eine große Rolle, da man in kurzer Zeit viel produzieren möchte. Um das Ziel zu

erreichen, könnte man beispielsweise entsprechend größere Systeme bauen, oder die Biofilmoberfläche durch Hohlraumstrukturen vergrößern.

Um die komplexen Regulationsvorgänge in Biofilmen besser zu verstehen und auch die Grenzen der Systeme zu erkennen, sind Untersuchungen in allen Disziplinen notwendig. Biologen und Chemiker untersuchen beispielsweise die chemischen Reaktionen in Biofilmen, Kommunikationswege und genetischen Programmierungen der Mikroorganismen. Verfahrenstechniker überlegen sich Reaktoren und Steuerungselemente, um optimale Bedingungen in produktiven Biofilmen für die Synthese von den gewünschten chemischen Verbindungen zu entwickeln, sowohl im Versuchsaufbauten für die Forschung als auch die spätere Übertragung in ein größeres Produktionsvolumen in der Industrie.

Versuche müssen in der Forschung oft wiederholt werden, um genug verlässliche Ergebnisse zu erhalten, aus denen man verlässliche Aussagen ableiten kann. Apparaturen und die Bedingungen sollten daher stabil sein. Man sollte nur eine Sache verändern und beobachten, messen, welche Auswirkungen die Veränderung hat. Möchte man beispielsweise das Wachstum bestimmter Bakterien beobachten, sollte man nicht gleichzeitig die Temperatur, die Apparatur und den Nährstoff verändern. Man kann in solchen Fällen nicht genau, worauf beispielsweise eine bessere Umsetzung der Nahrung zurückzuführen wäre: auf die Temperatur, auf die Apparatur oder dem Nährstoff.

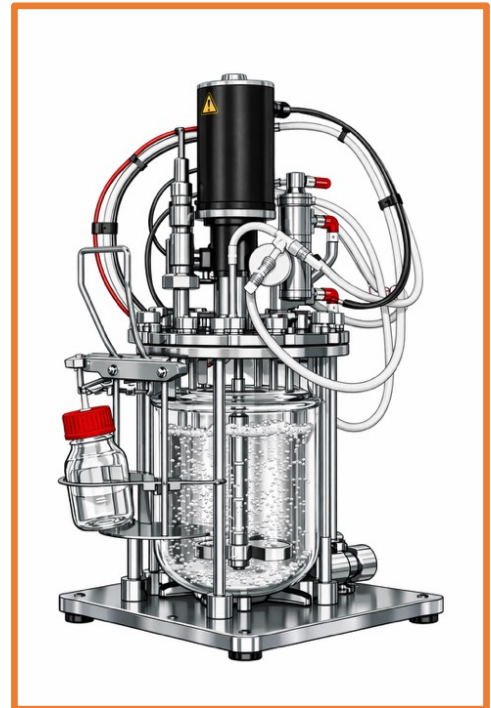


Abbildung 6: Beispiel eines Rührreaktors bzw. Fermenters

Die sogenannte Reproduzierbarkeit, also Wiederholbarkeit von Versuchen, bei der stets sehr ähnliche Ergebnisse erhalten werden, ist für die Forschung, aber auch später bei der industriellen Umsetzung sehr wichtig. Nur aus wiederholbaren Ergebnissen kann man verlässliche Aussagen für ein System ableiten und damit Prozesse gut steuern. Das ist wie bei einem Backrezept. Ein Rezept sollte alles genau beschreiben, so dass jedes Mal der gleiche Kuchen entsteht. Steht nicht die genaue Zuckermenge, oder nicht auf die genaue Ofentemperatur im Rezept und ich verändere es jedes Mal, werde ich unterschiedliche Kuchen backen. Kunden, die den Kuchen essen, würde ihn nicht wieder kaufen, da sie jedes Mal ein anderes Produkt erhalten. Oder wenn man sich vorstellen würde, dass ein Auto nicht immer nach rechts fährt, wenn man das Lenkrad nach rechts dreht. In so einem Fall kann man das Auto nicht kontrollieren, da es irgendwohin fährt, aber nicht nach rechts, wenn man das Lenkrad nach rechts dreht.

Bevor man also teure großtechnische Produktionsanlagen für den Einsatz von Biofilmen zur biochemischen Produktion entwickeln kann, ist es wichtig, dass man das komplexe Biofilmsystem genau untersucht und versteht, welche Faktoren einen Einfluss haben und wie sie gesteuert werden müssen. Man fängt im kleinen Labormaßstab an und sucht nach den richtigen Stellschrauben, bevor man in die größeren Maßstäbe, wie Technikums Maßstab und Produktionsmaßstab gehen kann. Forschung ist nicht immer vorhersehbar, so dass man mitunter länger sucht, um die richtigen Stellschrauben zu finden, oder manchmal sogar nicht alle Schrauben findet.

Forschungsprojekte aus dem Verbund

PET-Abbau – Technische Biokatalyse: Ein Forschungsprojekt am Institut der Technischen Biokatalyse der TUHH beschäftigt sich mit dem Thema Biocycling von PET. PET (Polyethylen Terephthalat) ist der Kunststoff, der in der Welt am häufigsten verwendet und in großen Mengen produziert wird. Aus diesem Material werden beispielsweise Getränkeflaschen und Textilien gefertigt. Ziel der Forschergruppe ist es, den Kunststoffabfall durch Mikroorganismen in seine Einzelbausteine aufzuspalten, um wieder hochwertige Produkte daraus herzustellen.

Um zu erforschen, ob bestimmte Mikroorganismen in Biofilmen auf PET wachsen und das PET abbauen können, wird eine dünne PET-Folie, die bei allen Versuchen genau gleich sein muss, als Boden einer Platte mit kleinen Vertiefungen/Mulden verwendet. In diese Mulden werden jeweils Bakterienarten hineingegeben. Mit einem Mikroskop und einem sogenannten Infrarotspektrometer wird nach einer bestimmten Zeit untersucht (**Abb.: 7**), ob die Organismen auf PET wachsen konnten. Da die Organismen nur PET als „Nahrung“ bekommen, können sie nur wachsen, wenn sie in der Lage sind PET abzubauen und als Nahrung zum Leben und Vermehren zu verwenden.

Die Suche nach geeigneten Mikroorganismen ist oft wie die Suche nach der Nadel im Heuhaufen. Je nachdem, ob die biochemischen Reaktionen sehr ähnlich sind, wie sie in lebenden Organismen ablaufen, oder menschengemachte Moleküle entstehen sollen, die in der Natur nicht vorkommen, kann die Suche einfacher, oder langwierig sein, oder bestimmte Transformationsschritte ähnlicher Enzyme erfordern. In der Regel suchen Biologen nach den passenden Mikroorganismen in der Natur und manchmal an Orten, wo bestimmte Problemstoffe deponiert werden. Die Natur und speziell Mikroorganismen sind sehr

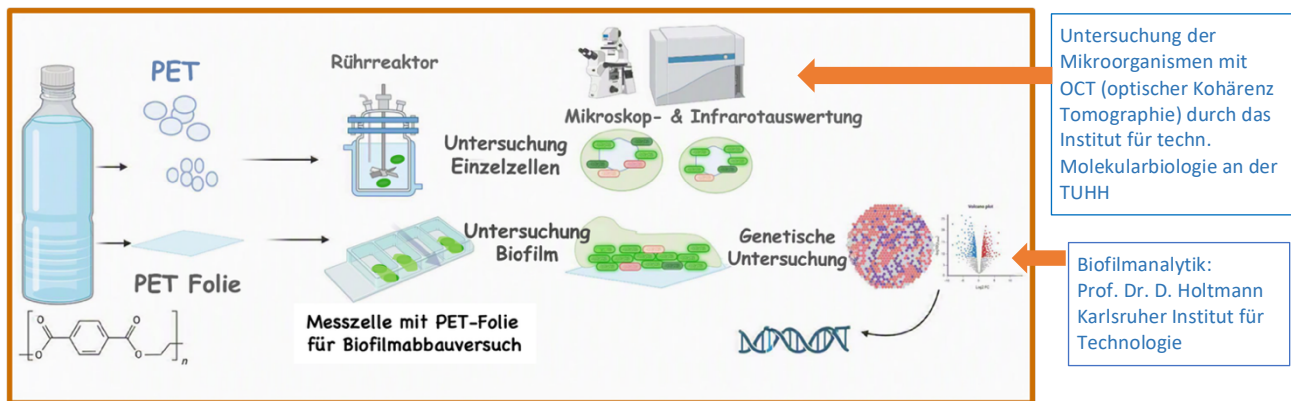


Abbildung 7: Forscher am Institut für technische Biokatalyse der TUHH untersuchen, ob bestimmte Bakterien in Biofilmen PET abbauen können und in ihre einzelnen Bestandteile zerlegen können, um diese wieder als Rohstoff einzusetzen.

anpassungsfähig, so dass sie nach vielen Generationen sogar von Menschen gemachte unnatürliche Stoffe verwerten können. Die Verwertung von PET durch Mikroorganismen, wie sie oben in **Abb.7** ist ein Beispiel dafür. Eine echte Herausforderung kann es für Biologen sein, die richtigen Bedingungen zu finden, unter denen dies entdeckten „Wildtypen“ im Labor gezüchtet werden können. Hat man geeignete Mikroorganismen und Anzuchtbedingungen gefunden, sucht man nach den Enzymen und Genen, die diese Stoffe umsetzen, um bessere und robustere Organismen zu züchten, die man auch in technischen Prozessen einsetzen kann. Die Suche nach den richtigen Organismen, den Wachstumsbedingungen und verantwortlichen Abbauwegen kann sehr viele Jahre dauern, weshalb Forschung viel Geduld und Geld erfordert. Wenn man jedoch erfolgreich gewesen ist, ist das ein großartiges Gefühl für die Forschenden.

Magnetische Biofilmstrukturen: In der Arbeitsgruppe der Technischen Mikrobiologie der TUHH untersucht die Möglichkeit einzelne Organismen an magnetische Partikel zu binden, um mit Hilfe von unterschiedlich angebrachten Magneten gezielt die dreidimensionalen Strukturen im Biofilm zu beeinflussen und dirigieren zu können (**siehe Abb.8.und 9:**). Die Biofilmarchitektur gezielt verändern zu können, hätte viele Vorteile.

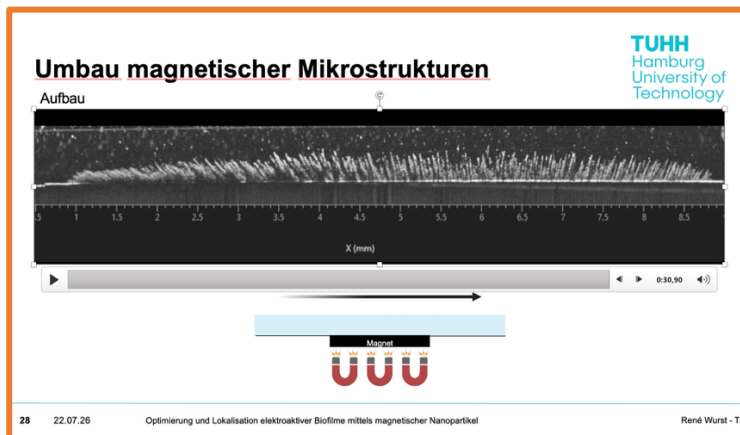


Abbildung 8 links:
Aufbau von
strahlenförmigen
Strukturen mit Hilfe
von magnetischen
Biofilmen.

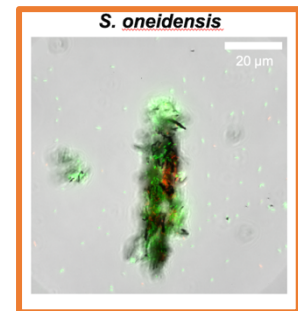


Abbildung 9 oben: Aufnahme
von Magnetpartikeln mit dem
Bakterium *S. oneidensis*
bewachsen. Dissertation:
Dr. René Wurst, 2026)

Weitere faszinierende Einsatzmöglichkeiten zur technologischen Weiterentwicklung werden untersucht: Beispielsweise möchte man herausfinden, wie man mit Hilfe von Biofilm bildenden Mikroorganismen Wasserstoff produzieren kann. Man verwendet spezielle Mikroorganismen, die Elektronen nach Außen abgeben und auf Elektroden/Anoden angebracht werden. Als Biokatalysatoren und Elektronenspender kann man mit ihrer Hilfe Wasserstoff durch Elektrolyse gewinnen.

Biofilmreaktoren: Zur Erforschung von produktiven Biofilmsystemen gehört die Entwicklung von geeigneten Reaktionsapparaturen dazu. An dieser Stelle sind Ingenieure gefragt, um zusammen mit Naturwissenschaftlern geeignete technische Lösungen zu entwickeln. Als ersten Schritt benötigt man Reaktoren im Labormaßstab, mit deren Hilfe man sehr gute Möglichkeiten hat die Biofilmbildung und die biochemische Umsetzung zu analysieren. Beispiele siehe Abbildungen unten (**Abb.10.und 11:**).



©UFZ

Abbildung 10.: Ausschnitt eines Glasreaktors mit Biofilm