

2. Definition

Biofilme entstehen, wenn Mikroorganismen sich an Grenzflächen anlagern und dort wachsen [2. 2]. Sie bestehen aus funktionalen bakteriellen Konsortien, welche in eine Matrix aus extraplastidären Substanzen (EPS), der Glycocalyx eingelagert sind und aneinander und/oder an Oberflächen oder Grenzflächen haften [2. 1]. In die Glycocalyx können gleichermaßen weitere gelöste oder partikuläre Stoffe eingelagert sein.

Entsprechend dieser Definition können auch mikrobielle Aggregate (z.B. Belebtschlammflocken) und mikrobielle Populationen Innerhalb der Porenräume poröser Medien im weiteren Sinne als Biofilme betrachtet werden.

3. Die Bedeutung von Biofilmen in Natur und Technik

Die sessile Lebensweise, also das Wachstum auf abiotischen oder biotischen Oberflächen ist die älteste bislang bekannte Daseinsweise von Leben auf der Erde [3. 30]. Die ersten bekannten Funde datieren etwa 3,5 Mrd. Jahre zurück und sie zeigen versteinerte Biofilme in stromatolitischen Gesteinsformationen [3. 73]. Im weiteren Verlauf der Erdgeschichte haben sich im mikrobiellen Bewuchs von Oberflächen, den „microbial mats“ Mikroorganismen entwickelt, die zu einfachen Formen der Photosynthese befähigt waren. Sie werden für die Umstellung der Erdatmosphäre von anaeroben zu aeroben Verhältnissen verantwortlich gemacht [3. 81]. Durch Anheftung von Mikroorganismen an zerfallendes organisches Material und dessen teilweisen Abbau haben Biofilme auch entscheidend zur Bildung fossiler Brennstoffe beigetragen [3. 41] und wirken in geologischen Dimensionen bei der Verwitterung von Gesteinen mit [3. 24, 3. 48]. Auch heute noch spielen Microbial mats eine bedeutende Rolle z.B. bei der Fixierung von atmosphärischem CO₂ [3. 15].

In der Geschichte der Mikrobiologie wurden die Wechselwirkungen zwischen Mikroorganismen und Oberflächen erst spät erkannt. Obwohl bereits Anfang unseres Jahrhunderts erste Beobachtungen über stimulierende Effekte von Partikeln auf mikrobielles Wachstum beschrieben wurden, hat erst Zobell [3. 84] vor etwas mehr als 50 Jahren die Bedeutung des sessilen Wachstums von Mikroorganismen erkannt und begonnen, dieses systematisch zu untersuchen. In der klassischen Mikrobiologie wurde das sogenannte „Wandwachstum“ bei der submersen Kultivierung von Mikroorganismen eher als Störung betrachtet und blieb lange Zeit ein Randgebiet der mikrobiologischen Forschung [3. 30]. Daß die so entstandenen Biofilme andere Eigenschaften aufweisen als die üblicherweise verwendeten Suspensionskulturen, wurde lange Zeit wenig beachtet.

Erst in den sechziger und siebziger Jahren nahm das Interesse an der Erforschung des mikrobiellen Lebens in Biofilmen deutlich zu. An dieser Entwicklung haben vor allem zwei Forschungsgebiete wesentlichen Anteil. Dies waren zum einen die Forderungen nach geeigneten Methoden zur Eliminierung bakterieller Beläge im medizinischen und zahnmedizinischen Bereich und zum anderen die neuen Anforderungen an die Leistungsfähigkeit umwelttechnischer Verfahren.

In unserer heutigen Umwelt sind Biofilme ubiquitär. Es gibt praktisch keine Oberfläche, die nicht von Mikroorganismen besiedelt wird oder – unter geeigneten Bedingungen – besiedelt werden kann. Es sind auch keine Werkstoffe bekannt, die dauerhaft einer mikrobiellen Besiedelung widerstehen [3. 12]. Die Voraussetzungen für die Existenz von Biofilmen sind gering: Grenzflächen, Mikroorganismen, hinreichende Feuchtigkeit und Nährstoffe [3. 30]. Entsprechend weit ist die Spannweite der Existenzbedingungen für Mikroorganismen in Biofilmen. Auch extreme und eher lebensfeindliche Lebensräume können besiedelt werden. Einen Überblick über die Bedingungen, unter denen mikrobielles Leben angetroffen wird, gibt Flemming [3. 32] (Tabelle 3.1).

Tabelle 3.1: Spannweite mikrobieller Existenz in Biofilmen nach Flemming [3. 32]

Milieufaktor	Spannweite
Temperatur	von -12°C (kalte salzhaltige Lösungen) bis >110°C (heiße Schwefelquellen im Meer)
pH-Bereich	von 0 (<i>Thiobacillus ferrooxidans</i>) bis >13 (<i>Plectonema nostocoum</i> , Natronbakterien)
Hydrostatischer Druck	von 0 bis > 1400 bar („barophile Bakterien“)
Redoxpotential	von – 450 mV (methanogene Bakterien) bis +850 mV (Eisenbakterien)
Salinität	von 0 (aqua bidest.) bis zu gesättigten Salzlösungen (obligat halophile Bakterien in Salzseen)
Nährstoffangebot	von > 10 µg/l C _{org.} (Systeme mit hochreinem Wasser) bis Leben direkt auf Nährstoffquellen
Oberflächenmaterialien	Metalle, Beton, Kunststoffe, Glas, Mineralien, Öle, pflanzliche und tierische Gewebe
Strahlenbelastung	Biofilme auf Quarzhüllen von UV-Lampen Biofilme auf radioaktivem Material (> 500 krad)
Biozidkonzentrationen	>2 mg/l freies Chlor Biofilme in Desinfektionsmittelleitungen

Biofilme spielen eine entscheidende Rolle bei der Selbstreinigung von Gewässern und Böden. In aquatischen Ökosystemen sind Mikroorganismen die ersten, die neue Habitate kolonisieren. Ihnen folgen Mikroalgen und Invertebraten.

In Auswertung detaillierter Analysen von zahlreichen aquatischen Systemen kamen Costerton et al. [3. 20] zu dem Ergebnis, daß in nahezu allen natürlichen Ökosystemen Biofilme die dominante Daseinsweise des mikrobiellen Lebens sowohl im Hinblick auf die Zahl der Organismen, als auch hinsichtlich ihrer metabolischen Aktivität darstellen. Der weitaus größte Teil der Mikroorganismen auf der Erde lebt offensichtlich an Oberflächen gebunden, und zwar im Boden, in Sedimenten, in Gesteinsporen und auf Schwebstoffen im Wasser. Auch in der Grenzflächenschicht zwischen Wasser und Luft bilden sich Biofilme in Form von Microlayer, Kamnhäuten oder Schwimmschichten.

Das Leben in Biofilmen bietet für Mikroorganismen offensichtlich eine Reihe von Vorteilen gegenüber der Existenz als Einzelorganismen in suspendiertem Zustand. So können in der gelartigen Matrix Nährstoffe angereichert werden. Gleichzeitig bietet der Biofilm einen gewissen Schutz vor hydraulischen Belastungen, pH-Schwankungen, osmotischem Streß und Bioziden. Die Existenz verschiedener Organismen auf engem Raum und in engem Kontakt bildet einen Pool genetischer Information mit der Möglichkeit zum Gentransfer. Die vorhandenen Mikrokonsortien sind zur konzertierten Aktion verschiedener Spezialisten z.B. bei der Nutzung schwer abbaubarer Substrate befähigt. Gleichzeitig können für bestimmte Gruppen ökologische Nischen durch lokal veränderte Umweltbedingungen (z.B. anaerobe Bereiche in tieferen Biofilmschichten) entstehen. Zonen verminderter Diffusion verhindern einen schnellen Abtransport abbaubarer Stoffwechselprodukte, die dann als Nährstoffe für andere Bakterienarten zur Verfügung stehen. Auch der Verlust extrazellulärer Enzyme an die Wasserphase wird durch das Vorhandensein der EPS vermindert. Verschiedentlich wurde auch die Fixierung und Stabilisierung extrazellulärer Enzyme in der Biofilmmatrix beschrieben [3. 34].

Besonders unter oligotrophen Bedingungen stellt die Bildung von Biofilmen eine wichtige Überlebensstrategie dar. Auch heute noch können viele natürliche Wässer weltweit als oligotroph bezeichnet werden, d.h. sie haben einen Nährstofffluß von weniger als $1 \text{ mg C}_{\text{org.}} / \text{l} \cdot \text{d}$. Die Besiedelung von Oberflächen unter solchen oligotrophen Bedingungen erfolgt in einer charakteristischen zeitlichen Abfolge. Zuerst siedeln sich wenige anspruchslose Arten (wie z.B. einige Pseudomonaden) [3. 30] an und bilden einen Biofilm. Durch ihre Fähigkeit, dem Medium Nährstoffe zu entziehen, diese in der Gelmatrix lokal zu akkumulieren und sie durch Zellwachstum im Biofilm zu fixieren, bieten sie mit der Zeit auch solchen Arten eine ökologische Nische, die unter dem vorhandenen Nährstoffangebot sonst nicht wachsen könnten. Diese leben dann als Destruenten von der Biomasse der ursprünglichen Flora [3. 12].

Ein klassisches Beispiel für die Ausbildung von Biofilmen in natürlichen aquatischen Medien ist der Bewuchs an Schiffsrümpfen. Der mikrobielle Biofilm bildet hier die entscheidende Voraussetzung für die Ansiedlung von höheren Organismen, wie Algen

oder Muscheln. Da die Erhöhung des Reibungswiderstandes durch den Bewuchs zu erheblichen Einbußen bei der Geschwindigkeit bzw. zu entsprechenden Mehraufwendungen für Treibstoff führt [3. 14], wurden in der Vergangenheit erhebliche Anstrengungen unternommen, um den Oberflächen der Schiffsrümpfe weitgehend antibakterielle Eigenschaften zu verleihen. Dazu wurden den Anstrichen vor allem bakterizide Substanzen, wie Tributylzinn (TBT) beigemischt. Wie Ergebnisse aktueller Untersuchungen zeigen, blieb der Einsatz dieser Bakterizide insbesondere bei TBT jedoch nicht ohne Auswirkungen auf die natürliche Umwelt [3. 62, 3. 82]. Die Suche nach Alternativen besitzt daher gerade auf diesem Gebiet eine hohe aktuelle Brisanz.

Auch in höchst oligotrophen Umgebungen, wie bidestilliertem Wasser und Reinstwasseranlagen werden Mikroorganismen in Form von Biofilmen festgestellt [3. 58]. Die Entwicklung von Biofilmen in solchen Anlagen kann zu erheblichen Störungen und zu Einschränkungen der Wasserqualität führen. Diese unerwünschte Ausbildung von mikrobiellen Belägen wird allgemein als „Biofouling“ bezeichnet [3. 13]. Biofouling tritt in allen Wasser führenden Systemen auf und kann zur Beeinträchtigung von Gewinnung, Aufbereitung, Transport, Lagerung und Nutzung von Wasser beitragen [3. 33]. Durch Biofouling wird die Leistungsfähigkeit von Anlagen verringert und die Lebensdauer von Anlagenteilen z.T. erheblich verkürzt. So können Biofilme in Rohrleitungen durch Erhöhung des Reibungswiderstandes und Verminderung der Querschnittsfläche deren Transportkapazität wesentlich vermindern. Der dabei auftretende Bewuchs erreicht eine Dicke von teilweise mehreren Zentimetern und kann bei geringen Querschnitten auch zum vollständigen Verschließen von Rohrleitungen und Schläuchen führen. Durch abgerissene Biofilmteile und Belege entstehen zusätzlich ernste Sicherheitsprobleme durch Verstopfungen an Pumpen, Ventilen und Grenzwertgebern [3. 66, 3. 68].

Auf Grund ihrer Struktur beeinträchtigen Biofilme auch die Effektivität von Wärmetauschern. Dabei macht sich nicht nur der höhere Reibungswiderstand bemerkbar. Durch Verringerung des konvektiven Wärmetransportes hin zur Metalloberfläche wird auch der Wärmeaustausch mit der Umgebung erheblich eingeschränkt [3. 16].

Besondere Aufmerksamkeit erlangte das Problem des Biofouling bei Ultrafiltrations- und Umkehrosmoseanlagen. Die Ausbildung gelartiger Biofilmschichten auf der Membran verhindert hier die direkte tangentielle Anströmung der Oberfläche. Dadurch kommt es zu einer Konzentrationspolarisation auf der Rohwasserseite, wodurch der transmembrane Druck ansteigt, die Permeatausbeute sinkt und schließlich auch die Salzurückhaltung verschlechtert wird [3. 69]. Mikrobielle Beläge auf Membranen können bis zur vollständigen und irreversiblen „Verblockung“ führen.

Die Ausbildung von Biofilmen führt jedoch nicht nur zur Einschränkung der Funktion technischer Anlagen. Mikrobielle Beläge sind in vielen Fällen auch direkt an der Alterung und Zerstörung der von ihnen besiedelten Materialien beteiligt. Die Eigenschaft von Biofilmen, Wasser zu binden, Stoffwechselprodukte (z.B. organische und anorganische Säuren, Chelat- und Komplexbildner, Exoenzyme) zu erzeugen und u.U. auch Bestandteile ihrer Unterlage als Nährstoff zu verwenden, führt regelmäßig zu erheblichen Schäden an Kunststoffen, mineralischen Baumaterialien und Metallen. So können Mikroorganismen durch den Abbau von Polymerbestandteilen und Zusätzen (z.B. Weichmachern) zur Alterung und Versprödung von Kunststoffen beitragen [3. 10]. Auch die Bildung von verschiedenen Säuren durch Mikroorganismen kann Schädigungen von Kunststoffen verursachen [3. 1].

Die Bildung von Säuren ist gleichfalls eine wesentliche Ursache für mikrobiell verursachte Schäden an mineralischen Werkstoffen. Auf der Oberfläche der Baustoffe können sich epilithische Biofilme ausbilden, die durch Nährstoffe aus der Luft versorgt werden. Durch Ausscheidung von anorganischen (lithoautotrophe Bakterien) bzw. organischen Säuren (chemoorganotrophe Mikroorganismen) wird dabei karbonatisches Bindematerial aufgelöst und so das Gesteinsgefüge geschwächt [3. 71]. Von den anorganischen Säuren sind dabei vor allem Schwefelsäure und Salpetersäure von Bedeutung. Als Verursacher der Bildung von Schwefelsäure wurden hauptsächlich Organismen der Gattung *Thiobacillus* [3. 72] identifiziert. Die Akkumulation von Salpetersäure erfolgt durch verschiedene Nitrifikanten wie *Nitrosomonas*, *Nitrosovibrio* und *Nitrobacter* [3. 5]. Als wichtige organische Säuren wurden u.a. Acetat, Gluconat, Oxalat, Citrat und Succinat festgestellt. Die chelatisierende Wirkung vieler organischer Säuren und die Ausscheidung weiterer komplexbildender Substanzen (z.B. Aminosäuren und Zuckersäuren) führt zusätzlich zu einer Mobilisierung von Metallen, wodurch die Stabilität der Baumaterialien weiter geschwächt wird.

Die mineralzerstörende Wirkung von Biofilmen beschränkt sich jedoch nicht nur auf die Oberfläche der betroffenen Materialien. Mit Hilfe der EPS füllen Biofilme auch die Porenräume von Gesteinen und Mineralien aus und reichern so in der Tiefe des Materials Wasser an, welches bei Temperaturänderungen zu starken mechanischen Beanspruchungen führt [3. 31].

Biofilme sind in erheblichem Umfang auch an der Korrosion von Metallen beteiligt. Diese Wirkungen werden als mikrobiell induzierte Korrosion (MIC) oder Biokorrosion bezeichnet. Die MIC kann nahezu alle Metalle betreffen, einschließlich der als bakterientoxisch bekannten Schwermetalle. Außer Titan und Nickel-Cadmium ist praktisch kein Metall gegen Korrosion unter der Einwirkung von Mikroorganismen resistent [3. 31].

Korrosion ist kein primär mikrobieller Prozeß, sondern sie findet auch ohne das Zutun von Mikroorganismen unter abiotischen Bedingungen statt. Dabei werden Atome der Metalloberfläche durch elektrochemische Grenzflächenprozesse in ionische Form überführt. Die ablaufenden Reaktionen werden durch lokale Heterogenitäten, durch Redoxverhältnisse, durch den pH-Wert, durch die Konzentration an Elektrolyten und die Weiterreaktion primärer Korrosionsprodukte beeinflusst. Diese Faktoren können jedoch durch mikrobielle Aktivitäten maßgeblich verändert werden. Die Struktur der gelartigen Beläge auf der Metalloberfläche ermöglicht die Bildung von Diffusionsbarrieren und Konzentrationszellen für Stoffwechsel- und Korrosionsprodukte. Damit können Mikroorganismen Korrosion induzieren. Sie greifen jedoch auch in die Kinetik der Korrosionsprozesse ein [3. 9, 3. 33]. Die dabei ablaufenden Mechanismen sind je nach Umweltbedingungen und beteiligten Organismen unterschiedlich.

Eine bedeutende Rolle bei der Biokorrosion spielen sulfatreduzierende Bakterien. Sie gelten als Leitorganismen für das Vorliegen von MIC. Sulfatreduzierende Bakterien produzieren in großem Umfang Sulfide, welche durch Ausfällung von schwerlöslichen Metallsulfiden die anodische Dissoziation der Metalle beschleunigen [3. 63]. Die gleichzeitig entstehenden H^+ Ionen bewirken eine kathodische Depolarisation. Durch das Vorhandensein von Biofilmen wird zusätzlich die Kathodenoberfläche erheblich vergrößert. Die damit verbundene Erhöhung der Stromdichte an der Anode beschleunigt die Korrosion. Bei der korrosiven Wirkung der Sulfatreduzierer wird das Zusammenwirken verschiedener Organismen in mikrobiellen Konsortien besonders deutlich. Die sulfatreduzierenden Bakterien (z.B. der Gattungen *Desulfibrio*, *Desulfobacter*) sind obligat anaerob. Viele Arten weisen zusätzlich ein begrenztes Nährstoffspektrum auf (bevorzugt kurzkettige organische Säuren und Alkohole). Sie sind deshalb in hohem Maße abhängig von anderen Organismen des Biofilmes, welche geeignete organische Nährstoffe bereitstellen und benötigen für ihre Entwicklung eine intakte Biofilmstruktur, die den notwendigen Stoffaustausch ermöglicht [3. 23].

Auch säurebildende Bakterien verursachen MIC. Durch starke lokale pH-Absenkung im Biofilm wird die kathodische Reduktion von Wasserstoffionen stark begünstigt. Zusätzlich besitzen organische Säuren eine komplexierende Wirkung auf die Metallionen und beschleunigen so die anodische Depolarisierung.

Komplexierende Eigenschaften besitzen auch verschiedene Bestandteile der EPS (z.B. einige saure Polysaccharide). Durch die unterschiedliche Wirkung der EPS verschiedener Organismen können Konzentrationsgradienten der Metallionen an der Metalloberfläche entstehen. Die Strukturiertheit des Biofilmes ermöglicht auch Gradienten der Sauerstoffkonzentration, des Redoxpotentials und von verschiedenen Korrosions-

produkten. Damit werden Voraussetzungen für die Korrosion auch widerstandsfähiger Materialien wie Kupfer und einiger Edelstähle geschaffen [3. 3].

Neben technischen Problemen können Biofilme insbesondere bei Trinkwasser auch die ästhetische oder gar die hygienische Qualität des Produktes beeinträchtigen. Mikroorganismen, die in geringer Zahl bei der Herstellung im Wasser verbleiben, siedeln sich an Rohrleitungswänden an und bilden Biofilme [3. 59, 3. 60]. Diese Biofilme erwiesen sich in vielen Fällen als Habitat für verschiedene pathogene Keime [3. 52, 3. 32]. So wurden u.a. Mycobakterien, Klebsiellen, Legionellen, sowie E. coli bzw. coliforme Keime in mikrobiellen Belägen von Trinkwasserleitungssystemen nachgewiesen [3. 31, 3. 45]. Jedoch tragen auch nicht pathogene Organismen durch kontinuierliche Abgabe oder stoßweisen Abriß von Belagfetzen zur Minderung der Wasserqualität bei.

Um den Aufwuchs von Mikroorganismen während des Transportes in Trinkwasserleitungen zu begrenzen, werden dem Wasser häufig antibakterielle Wirkstoffe, z.B. Chlor beigemischt [3. 38]. Die Minderung von Belägen oder auch die Beseitigung von pathogenen Organismen in Trink- und Brauchwasserleitungen wird jedoch erheblich erschwert durch die Tatsache, daß Bakterien in Biofilmen in vielen Fällen eine wesentlich höhere Resistenz gegenüber bakteriziden Wirkstoffen aufweisen als planktonisch lebende Organismen der gleichen Art. So fanden LeChevallier et al. [3. 51] in Biofilmen eine bis zu 3000fach höhere Resistenz gegenüber freiem Chlor als bei vergleichbaren Organismen in freier Suspension. Diese herausragende Resistenz gegenüber den verschiedensten antimikrobiellen Agenzien ist seit langem bekannt und vielfach beschrieben worden [3. 38, 3. 53, 3. 67]. Sie wird durch eine Reihe unterschiedlicher Mechanismen bedingt, die sich aus der Struktur des Biofilmes und seiner heterogenen Zusammensetzung ergeben [3. 35]. Einen Überblick über die verschiedenen Wirkmechanismen geben Foley und Gilbert [3. 35]. Sie werden im wesentlichen durch zwei Modelle widergespiegelt. Dies ist zum einem das sogenannte Reaktions-Diffusions-Modell [3. 18, 3. 78]. Dieses Modell geht davon aus, daß antibakterielle Wirkstoffe auf ihrem Weg durch den Biofilm aufgrund einer verminderten Diffusionsgeschwindigkeit im Vergleich zur freien Wasserphase wesentlich langsamer transportiert werden. Gleichzeitig können sie während des Transportes sukzessive abgebaut oder deaktiviert werden. Dabei wird die Beteiligung von extrazellulären Polysacchariden und Exoenzymen diskutiert [3. 35, 3. 39]. Das verwendete Modell schließt auch die feste Adsorption der Wirkstoffe an Biofilmkomponenten ein.

Eine andere Theorie geht davon aus, daß durch die räumliche Heterogenität im Biofilm auch der Wachstumszustand der einzelnen Zellen deutlich variiert. Viele Organismen

weisen darüber hinaus deutlich geringere Wachstums- und Vermehrungsraten auf, als in suspendierter Kultur. Auch völlig inaktive Zellen können vorhanden sein. Demzufolge sind auch die Umsatzraten mit antimikrobiellen Substanzen teilweise stark vermindert, wodurch die Einwirkzeiten für eine ausreichende Wirkung deutlich verlängert werden.

Die erhebliche Resistenz von Bakterien in Biofilmen führt in zunehmendem Maße zu medizinischen Problemen. Seit längerem bekannt ist die Übertragung von Infektionskrankheiten durch Ansiedlung von pathogenen Organismen (z.B. *Legionella pneumophila*) in wasserführenden Armaturen [3. 70]. Intensiv diskutiert wird die Bedeutung von Biofilmen auch für die Etablierung und Ausbreitung von antibiotikaresistenten Bakterienstämmen in medizinischen Einrichtungen. Das Vorhandensein eines subinhibitorischen Levels antibiotischer Wirkstoffe in der Tiefe des Biofilmes erzeugt einen Selektionsdruck auf die Organismen, welcher letztendlich zur Entwicklung resistenterer Phänotypen, sowie zur Selektion und Expression von Resistenzplasmiden beiträgt [3. 35]. Durch diese Selektion antibiotikaresistenter Typen erlangen auch bisher als harmlos geltende Bakterienarten klinische Relevanz. Biofilme auf Implantaten, Prothesen oder Kathedern führen zu chronischen Infektionen und Bakteriämien. Solche „Biofilminfektionen“ können in vielen Fällen aufgrund der erhöhten Resistenz auch durch solche Antibiotika nicht behandelt werden, die für diese Bakterien in Suspension eine ausreichende Wirksamkeit zeigen [3. 19].

Besondere Aufmerksamkeit erlangten Biofilme im Zusammenhang mit der Entstehung des dentalen Plaques in der Zahnmedizin. Bereits frühzeitig wurde der Zusammenhang von mikrobiellen Ablagerungen auf der Zahnoberfläche und der Entstehung von Karies erkannt. Entsprechend hoch ist der Anteil, den Forschungsarbeiten über die Entstehung von Biofilmen auf Zahnoberflächen zum Verständnis der Biofilmbildung allgemein beigetragen haben [3. 8].

Die Beschäftigung mit der Entstehung und Struktur von Biofilmen wurde in der Vergangenheit vor allem durch zwei Forschungsgebiete geprägt. Dies waren zum einen die bereits dargestellten unerwünschten Wirkungen mikrobieller Ablagerungen. Zum anderen werden Biofilme aber auch seit mehreren Jahrzehnten erfolgreich und in zunehmendem Maße in der Umwelttechnologie eingesetzt. Gerade jene Eigenschaften, die bei unerwünschten Biofilmen zu erheblichen Problemen führen, ermöglichen in der biotechnologischen Anwendung herausragende Leistungen.

Ein wesentlicher Vorteil wurde zunächst in der vergleichsweise einfachen Entkopplung von hydraulischer Verweilzeit des Substrates und der mittleren statistischen Verweilzeit

der Mikroorganismen, dem Schlammalter, gesehen [3. 17]. Häufig wird dabei auch eine absolute Erhöhung der Biomassedichte diskutiert [3. 6, 3. 27, 3. 29]. Jedoch ist gerade bei Hochleistungsanlagen die absolute Biomassekonzentration in den Reaktoren in vielen Fällen vergleichbar oder gar geringer als bei konventionellen Anlagen mit suspendierten Organismen [3. 65, 3. 77, 3. 79]. Hohe Biofilmdicken ($>100\ \mu\text{m}$) erwiesen sich wegen der verminderten Nährstoffversorgung in der Tiefe des Filmes, wegen des erhöhten Diffusionswiderstandes [3. 2, 3. 74] und der möglichen Verblockung freier Strömungskanäle [3. 83] sogar eher als nachteilig für die Leistungsfähigkeit der Reaktoren. Aber auch bei vergleichbaren Biomassekonzentrationen werden mit Biofilmreaktoren z.T. erheblich größere Raum-Zeit-Ausbeuten erzielt, als dies mit konventionellen Belebtschlammanlagen der Fall ist [3. 22, 3. 46]. Dies ermöglicht die Realisierung kompakterer Bauformen mit geringerem Raumbedarf und z.T. auch verminderten Kostenaufwendungen. In verschiedenen Fällen wurden überlastete und erweiterungsbedürftige Abwasserbehandlungsanlagen durch den Einsatz von Biofilmträgern stabilisiert und damit die Leistungsfähigkeit der vorhandenen baulichen Substanz ohne nennenswerte zusätzliche Kosten deutlich erhöht [3. 25, 3. 75].

Hohe Raum-Zeit-Ausbeuten wurden mit trägerfixierten Organismen auch auf dem Gebiet der weitergehenden Abwasserbehandlung, insbesondere bei der biologischen Stickstoffelimination mittels Nitrifikation und Denitrifikation beschrieben. So erzielten Garrido et al. [3. 37] mit einem Biofilm-Airlift-Suspensions-Reaktor eine mehr als 99%ige Ammoniumoxidation bei einer Raumbelastung von $5\ \text{kg}/\text{m}^3\cdot\text{d}$. Ein von McDonald [3. 57] untersuchter Wirbelschicht-Biofilm-Reaktor im technischen Maßstab ($7500\ \text{m}^3/\text{d}$) wurde für eine N-Eliminationsleistung von $3\ \text{kg}/\text{m}^3\cdot\text{d}$ ausgelegt und erreichte bei dieser Belastung stabil eine Nitrat-Elimination zwischen 95 % und 100 %. Im Vergleich mit konventionellen Systemen, die N-Eliminationsraten von kaum mehr als $0,2\ \text{kg}/\text{m}^3\cdot\text{d}$ erreichen, ergibt sich somit für diese konkrete Anlage eine Leistungssteigerung auf das 10-15fache.

Obwohl die Prozesse Nitrifikation und Denitrifikation sehr unterschiedliche Umweltbedingungen verlangen und deshalb normalerweise räumlich oder zeitlich getrennt realisiert werden, wurden Biofilme auch bereits für eine recht effektive quasi simultane Prozeßführung verwendet, bei der Nitrifikation und Denitrifikation gleichzeitig, jedoch in unterschiedlichen Kompartimenten des gleichen Biofilmpartikels ablaufen [3. 11].

Besondere Beachtung erlangten Biofilmtechnologien für den Abbau von Verbindungen, die unter konventionellen Bedingungen als biologisch schwer oder nicht abbaubar gelten [3. 76]. Da viele dieser Substanzen nur durch das Zusammenwirken verschiedener Organismenarten mineralisiert werden können, besitzen Biofilme gerade auf diesem

Gebiet besondere Vorteile. Die Ausbildung hochspezialisierter Mikrokonsortien erlaubt ein enges und konzertiertes Zusammenwirken unterschiedlicher Mikroorganismen beim Abbau solcher persistenter Verbindungen. So wurden u.a. für heterozyklische Aromaten [3. 44] oder auch polycyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAH) [3. 47] mit Biofilntechnologien deutlich bessere Abbauleistungen erzielt, als mit konventionellen Verfahren. Auch zahlreiche andere wäßrige Medien mit persistenten Inhaltsstoffen, wie Sickerwasser aus Deponien, Abwässer der chemischen Industrie oder kontaminierte Grundwässer können durch Verwendung immobilisierter Organismen mit hoher Effektivität behandelt werden [3. 43, 3. 54, 3. 55].

Für die technische Anwendung von Interesse ist neben der hohen Leistungsfähigkeit der Technologie auch die herausragende Stabilität gegenüber sogenannten Stoßbelastungen, die durch extreme Anstiege der Substratkonzentration oder schnelle Änderungen der Zusammensetzung des Substrates, aber auch durch Einträge toxischer Stoffe oder starke pH-Schwankungen verursacht werden können [3. 4, 3. 40, 3. 50].

Biofilme gewährleisten nicht nur das Zusammenwirken unterschiedlicher Organismen in Form von Mikrokonsortien, sondern sie ermöglichen auch die nahezu simultane Kombination des biologischen Abbaus mit anderen, insbesondere chemischen und physiko-chemischen Wirkmechanismen. So schafft die adsorptive Anreicherung von Substraten die Voraussetzung dafür, daß auch Verbindungen aus vergleichsweise gering konzentrierten Lösungen mit genügend hohen Umsatzraten abgebaut werden können [3. 49, 3. 64]. An dieser adsorptiven Bindung von Substraten können sowohl die Biofilmmatrix selbst [3. 21], wie auch die eingesetzten Trägermaterialien [3. 42] beteiligt sein. Das hohe Adsorptionsvermögen für gering konzentrierte Substrate ist z.B. eine wichtige Voraussetzung für die Verwendung von Biofilmprozessen in der Abluftreinigung, wo z.B. Biofilter seit vielen Jahren zum Stand der Technik bei der Eliminierung organischer Schadstoffe gehören [3. 80].

Ein weiterer wichtiger Vorteil der Kopplung von Adsorption und biologischem Abbau ist die vergleichsweise hohe Geschwindigkeit, mit der Schadstoffe durch Adsorption gebunden werden können. Damit ermöglicht die adsorptive Bindung gerade in Abluftströmen, wo allgemein hohe Durchsätze bei geringer Konzentration der Inhaltsstoffe zu beherrschen sind, die erforderlichen kurzen Kontaktzeiten. Die zunächst adsorptiv gebundenen Schadstoffe können anschließend durch die wesentlich langsameren mikrobiellen Abbauprozesse mineralisiert werden.

Auch katalytische und biokatalytische Umsetzungen sind in Biofilmen möglich. Dies kann sowohl durch extrazelluläre Enzyme erfolgen, welche in die Biofilmmatrix ausgeschieden

werden, aber auch durch den gezielten Einsatz katalytisch aktiver Trägermaterialien [3. 56].

Auf Grund ihrer guten adsorptiven Eigenschaften eignen sich Biofilme auch für den Einsatz als Biosorber für nicht abbaubare Verbindungen. Dabei kommen sowohl Mechanismen der passiven Biosorption [3. 61], wie auch aktive Biosorptionsprozesse [3. 36] in Betracht. Durch Biosorption können z.T. erhebliche Anreicherungen realisiert werden. So erreichten Morper und Fürst [3. 61] mit einer anaeroben Schlammbettenanlage eine Kupferanreicherung auf bis zu 20 % der Biomasse. Bei eigenen Untersuchungen wurden mit einem Wirbelschichtreaktor für Blei Anreicherungen von bis zu 100 mg/g BTS festgestellt [3. 26]. Auch in der technischen Anwendung hat sich dieses Verfahren z.B. für die Rückgewinnung edler Metalle in der Mikroelektronik bewährt [3. 61].

Für die technische Umsetzung von Biofilmverfahren stehen eine Reihe von unterschiedlichen Prinzipien zur Verfügung. Der vermutlich älteste technisch genutzte Biofilmprozeß ist der Festbettreaktor in Form von Tropfkörpern. Auch Tauchkörper in Form von Scheiben oder Walzentauchkörpern sind seit mehreren Jahrzehnten im Einsatz. Leistungsfähiger aber mit größerem steuer- und regelungstechnischem Aufwand zu betreiben sind Wirbelschichtreaktoren und Airliftreaktoren. Für einzelne Aufgaben werden auch Membranreaktoren oder Verfahren unter Verwendung der Einschlußimmobilisierung verwendet. Einen Überblick über den aktuellen Stand geben Brower und Barford [3. 7], sowie Fitch et al. [3. 28].

4. Prinzipien für die Immobilisierung von Mikroorganismen

Die technische Nutzung der Leistungen immobilisierter Mikroorganismen setzt voraus, daß diese gezielt an Oberflächen gebunden werden können und stabile mikrobielle Populationen für die Realisierung der gewünschten Prozesse bereitgestellt werden. Dafür stehen grundsätzlich mehrere verschiedene Prinzipien zur Verfügung. Einen Überblick über mögliche Methoden der Immobilisierung gibt Abbildung 4.1.

Die verbreitetste Form der Immobilisierung von Mikroorganismen ist die Anlagerung an Oberflächen oder in den Poren der Trägermaterialien. Jedoch können Mikroorganismen auch durch Einschluß in geeigneten Materialien immobilisiert werden. Wachsende Bedeutung erlangt die Zellrückhaltung durch den Einsatz von Membranen. Letztlich stellen auch mikrobielle Zellaggregate und Belebtschlammflocken eine Form der Immobilisierung für Mikroorganismen dar. Einen Überblick über die Leistungen, welche mit unterschiedlichen Verfahren erzielt werden, geben u.a. Fitch et al. [4. 4]