

Perspektiven aus der Umweltbioverfahrenstechnik

Prof. Dr. Peter Kunz, Mannheim

1 Überblick und Zielsetzung

Umweltschutz ist nicht allein Abwasserreinigung, Abluft- oder Abfallbehandlung; Umweltschutz ist Kreislaufwirtschaft unter Verwendung der geringstmöglichen Energie. Die Natur hat es über Jahrtausende geschafft, einen solchen Kreislauf aufzubauen, der über Produktion und Konsumtion abläuft, ohne daß größere Abfallberge entstehen. Diesen Kreislauf sollte sich eigentlich unsere hochentwickelte Zivilisation, als die wir sie immer bezeichnen, zum Vorbild nehmen (s. Bild 1). Allerdings wäre es verfehlt, daraus zu schließen: Biologie ist grundsätzlich gut und Chemie schlecht! Mikrobielle Stoffwechselprodukte können nämlich toxischer sein als ihre Ausgangsprodukte; auch mikrobiell werden Dioxine produziert. Schließlich sollte man auch nicht die emissionslose Produktion vor Augen haben: Sie wäre unsinnig, weil der natürliche Kreislauf auf „Abprodukte“ angewiesen ist und weil „emissionslos“ – abgesehen davon, daß ein 100%iger Stoffumsatz unmöglich ist und jede Annäherung daran in der Regel mit hohem Energieeinsatz erkauft wird – die Entropie steigert.

Im allgemeinen unterstellt man den biologischen Techniken ein hohes Maß an Umweltverträglichkeit, wenn man einmal die Angst vor der Gentechnik außen vor läßt. Dies ist zwar nicht grundsätzlich so – über die biogene Bildung von Furanen und Dioxinen in aeroben Medien durch Peroxidasesysteme ist in der Literatur bereits berichtet worden [2] – doch darf man im wesentlichen davon ausgehen, daß es für mikrobielle Produkte auch mikrobielle Abbaewege geben muß [3]. Ziel der Arbeiten des Verfassers ist es, Gedanken der Kreislauftechnik in die Produktion hineinzutragen und ihnen Taten folgen zu lassen. Anliegen dieses Beitrages ist es, über die Methoden dazu anhand von Beispielen überblicksmäßig zu berichten und ein Szenario aufzuspannen, das die Leser zu eigenen Aktivitäten auf diesem Gebiet anregen möchte.

2 Mikroorganismen im produktiven Bereich

Abgesehen von den klassischen Fermentationen, darf man getrost behaupten, daß Mikroorganismen im produktiven Bereich bislang absolut ungern gesehen sind: Der zunehmende Einsatz antimikrobieller Verbindungen (aufgrund der Hinwendung zu abbaubareren Ausgangsstoffen) beweist, daß Mikroorganismen eher bekämpft werden, als daß man mit ihnen zusammenarbeitet. Ausgangspunkt vieler alternativer Arbeiten des Verfassers sind gerade jene Bereiche, in denen Biozide eingesetzt werden. Das Auftreten

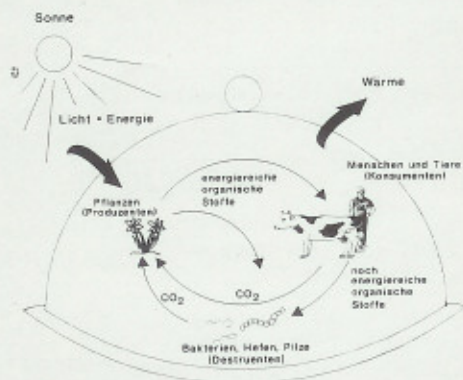


Bild 1. Der Kohlenstoff-Kreislauf in der Natur [1]

von Mikroorganismen im produktiven Bereich ist ein deutlicher Hinweis darauf, daß unter den meist extremen Prozeßbedingungen immer noch Organismen – meist spezialisierte – leben können. In verschiedenen Anwendungsfällen kann man sich dieses Spezialistentum unmittelbar zunutze machen und die Mikroorganismen oder deren Produkte die Arbeit der Roh- und Hilfsstoffe verrichten lassen:

Grundzüge des Einsatzes von Mikroorganismen im produktiven Bereich

1. Mikroorganismen – nicht nur autotrophe, auch heterotrophe – produzieren diverse Stoffe:
 - „Abfälle“, die Wertstoffe sind (Alkohol, Biogas usw.)
 - Enzyme, die Substanzen transformieren (Lipase)
 - Wirkungsvermittler, die Substanzen erst verfügbar machen (Tenside, Schwefelsäure usw.)
 - Speichersubstanzen (Ferritin, Lipide usw.)
 - Wirkungsverzögerer (Komplexverbindungen, Sulfide)
 2. Mikroorganismen konditionieren ihre Umgebung:
 - Oberflächenladungen (Biofilmbildung)
 - Versäuerungsreaktionen
 - Antibiotika (Organismenabwehr, Symbiose)
 3. Mikroorganismen akkumulieren:
 - Schwermetalle und chlorierte Kohlenwasserstoffe
 - hydrophobe Verbindungen
- Voraussetzung ist jedoch, daß die mikrobielle Produktion nicht dem Zufall überlassen bleibt, sondern gezielt eingesetzt wird. Hilfsstoffe, wie Tenside oder Lösungsmittel, dienen dazu, Schmutz von Oberflächen abzulösen. Verschmutzte Hilfsstoffe werden ver-

worfen, teilweise auch regeneriert, stellen aber irgendwann einen Rückstand dar, der zumeist teurer als Schlamm oder Sonderabfall entsorgt werden muß. Mikroorganismen können durchaus die Funktion der Tenside unterstützen oder übernehmen, man muß hierfür nur die entsprechenden Systeme schaffen.

3 Verminderung von Emissionen

Die konkrete Frage lautet also: Können Mikroorganismen bereits bei der Emissionsvermeidung helfen? Das heißt, kann durch den Einsatz von Mikroorganismen im produktiven oder im Dienstleistungsbereich auf Stoffe verzichtet werden, die sonst in die Umwelt gelangen würden.

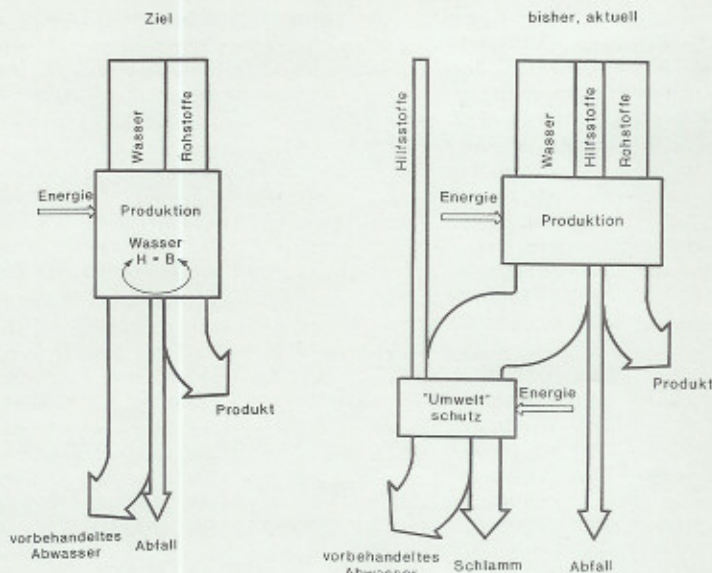
Was sind Emissionen? Man kann hierunter alle Stoffkomponenten aus einem Anwendungsbereich verstehen, die dem „unerwünschten“ Output einer Produktion (Stoffverlust) zuzurechnen sind. Es gibt mittelbare und unmittelbare Emissionen; mittelbar sind beispielsweise die CO₂-Emissionen aus Kraftwerksfeuerungen, die bei der Energieumwandlung für die Stromerzeugung entstehen. Aus der Übersicht in Abschnitt 4 wird ersichtlich, daß mit Hilfe von Mikroorganismen durchaus Emissionen dadurch begrenzt werden können, daß anstelle synthetischer Hilfsmittel mikrobielle Produkte oder Mikroorganismen direkt eingesetzt werden. Ein im Augenblick vielleicht noch mehr einer Wunschvorstellung gleichkommendes Produktionssystem zeigt Bild 2: Hilfsstoffe werden durch mikrobielle Systeme ersetzt; Wasser und mikrobiell-produzierte Stoffe werden im Kreislauf geführt, Mikroorganismen sorgen für die Regeneration der Hilfsstoffe und wachsen auf den Ausgangsstoffen, teilweise muß die produzierte Biomasse ausgeschleust und weiterbehandelt werden.

4 Beispiel: mikrobielle Entfettung von Oberflächen

Die Reinigung von technischen Oberflächen von Schmierstoffen aus Umformungsarbeiten und von Korrosionsschutzmitteln ist im Bereich des Anlagenbaus ein unerläßlicher Vorbearbeitungsschritt vor einer weiteren Bearbeitung; gereinigt werden Metalle, Metallbleche, Leiterplatten, Kunststoffe aber auch Keramiken. Infolge der potentiellen Gefährdung der Mitarbeiter und der Umwelt durch chlorierte und fluorierte Verbindungen findet augenblicklich eine Verlagerung des Reinigungsprozesses auf wäßrige Systeme statt. Das Produkt dieses Prozesses ist ein Gemisch aus Reinigungsmitteln und abgelösten Ölen, respektive Fetten, und den anderen genannten Komponenten, die von der Werkstückoberfläche abgelöst wurden. Im Gegensatz zur Lösemittel-Reinigung, bei der das Reinigungsmittel abdestilliert werden kann und die abgelösten Stoffe in konzentrierter Form vorliegen, entstehen bei wäßrigen Reinigungsschritten alkalische oder saure Abwässer, die nur zum Teil über Aufbereitungsmaßnahmen rezykliert werden können und deshalb heute ein erhebliches Entsorgungsproblem darstellen.

Von daher lag es nahe (s. Bild 2) zu überprüfen, ob durch Einsatz von Mikroorganismen die Umweltbelastungen bzw. die Maßnah-

Bild 2. Gegenüberstellung eines konventionellen Produktionssystems und eines mit mikrobieller Hilfsstoffproduktion



men zur Emissionsbegrenzung reduziert werden, wenn sie bereits im Reinigungsprozeß eingreifen und nicht erst end of pipe in einer biologisch arbeitenden Kläranlage. Dadurch können Chemikalien eingespart oder ganz ersetzt werden.

Aus der Literatur [4] ist bekannt, daß Mikroorganismen Kohlenwasserstoffe aus natürlichen Quellen als Nährstoffe erkennen und darauf wachsen können – Alkane finden sich u.a. in der pflanzlichen Cuticula und im Bienenwachs, Aromaten in einer Vielzahl pflanzlicher Produkte; sie werden auch von Mikroorganismen gebildet. Wenn solche Verbindungen natürlich aufgebaut werden, darf man auch damit rechnen, daß sich im Lauf der Evolution Mechanismen zum Abbau dieser Substanzen entwickelt haben. Allerdings:

- Höhere Konzentrationen können toxisch wirken.
- Abbauprodukte, z. B. die Undekansäure, können toxisch sein.
- Eine geringe Löslichkeit bedeutet eine hohe Persistenz.
- Öltröpfchen weisen eine kleine Oberfläche, aber ein großes Volumen in Newtonschen Flüssigkeiten auf.
- Ein hoher Sauerstoffpartialdruck ist zum Abbau erforderlich.

Dem Mikrobiologen steht aber eine Vielzahl fettspaltender und ölabbauender Mikroorganismen zur Auswahl.

Über den Abbau von aliphatischen und aromatischen Kohlenwasserstoffen wird in jüngster Zeit sehr viel berichtet, insbesondere im Zusammenhang mit der Bodenansäuerung [5], [6]. Der Abbau von Kohlenwasserstoffen erfolgt intrazellulär; bei wasserunlöslichen Kohlenwasserstoffen erfolgt ein direkter Kontakt der lipophilen Zellwand an die Öltröpfchen. Einige Hefen und Bakterien sind darüber hinaus dazu befähigt, biologisch synthetisierte Tenside zum Emulgieren der Kohlenwasserstoffe zu bilden. Ein Wachstum von Mikroorganismen in Öltröpfchen ist bei ausreichender Diffusion von O_2 sowie bei Anwesenheit von Wasser – bei 2% ist Öl wasser gesättigt – und Mineralstoffen möglich.

Der Bakterienstamm *Pseudomonas spec.* (ATCC 21808 [7]) weist gegenüber vielen anderen Kohlenwasserstoff-Abbauern sogar ein

Temperaturoptimum um $50\text{ }^\circ\text{C}$ und ein pH-Optimum um 10 auf, bei dem er noch eine aktive und stabile Lipase in das umgebende Medium abgibt; d. h., er kann sogar in Kombination mit konventionellen Systemen eingesetzt werden. Detaillierte Ausführungen sind bei Kunz [1] nachzulesen.

Das technische Konzept für die mikrobielle Entfettung beruht nun darauf, bereits am Entstehungsort Fette und Öle im wesentlichen zu Kohlendioxid und Wasser umzusetzen und die bisher erforderlichen Reinigungschemikalien zu ersetzen. Dazu sind allerdings aufgrund der verhältnismäßig geringen spezifischen Stoffwechselleistungen der Mikroorganismen hohe Biomassekonzentrationen erforderlich.

Da es für den Praktiker zunächst noch unvorstellbar ist, seine Oberflächen mikrobiell direkt zu reinigen, lag es nahe, eine Membrantrennanlage mit mikroporösen Strukturen einzusetzen (Bild 3), die das Entfettungs-/Entölungsbad vom Bioreaktor trennt. Das ab-

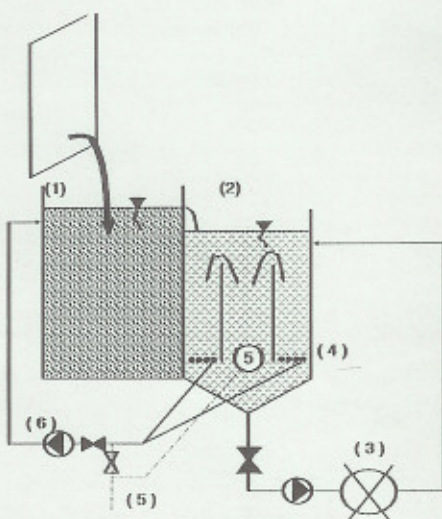


Bild 3. Anlagenschema zur mikrobiellen Entfettung von technischen Oberflächen [9]. Entfettungsbad (1), Vorspüle und Bioreaktor (2), Zellaufschlußanlage (3), Filtrationsanlage (4), Belüftungseinrichtung (5), Kreislaufpumpe (6).

gelöste Fett bzw. Öl gelangt über einen Überlauf in den Bioreaktor, während die mikrobiellen Wirkstoffkomponenten über die Membran in das Aktivbad permeieren können, nicht aber die Biomasse. Die Filtrationsanlage entspricht einer Sterilfiltration. Das Konzept wird untersucht.

5 Spezialisten-Recycling-Anlage

Wenn man biologische Abwasserreinigungsanlagen biologisch steuern will, müssen mikrobiologische Stoffwechsellvorgänge gezielt beeinflusst werden. Dazu kann man Limitierungen aufheben (Sauerstoffpartialdruck ändern) oder zulassen (Flockenwachstum steigern) oder auch Mikroorganismen gezielt einsetzen und fördern. Problematisch ist, daß in der Konkurrenzsituation zwischen schnell- und langsamwachsenden Mikroorganismen in offenen Systemen, wie sie z. B. kommunale Kläranlagen darstellen, die eher langsam wachsenden Spezialisten überwuchert werden. Die Spezialisten sind aber notwendig für die inzwischen geforderten geringen CSB-Ablaufkonzentrationen. Die Dosierung von Spezialbakterien ist lediglich in wenigen Fällen und wohl kaum in größeren Klärsystemen erfolgversprechend (vgl. [8]). Die sukzessive mikrobielle Förderung von Spezialisten in zwei- oder mehrstufigen Kläranlagen mit getrenntem Schlammkreislauf – nicht zu verwechseln mit Kaskaden – ist eine der wenigen diesbezüglichen Maßnahmen; sie läuft aber herkömmlich ungesteuert ab: Die Mikroorganismen der zweiten Stufe bekommen das ab, was die erste übriggelassen hat.

Eine biologische Steuerung in einem einstufigen System war die Aufgabe für die nachstehend wiedergegebene Lösung: Bildhaft gesprochen werden die Spezialisten in einen „Käfig“ gesperrt, damit man sie, wenn man sie nun schon einmal kultiviert hat, immer wieder nutzen kann. Um aber der oben erwähnten Überwucherung Herr zu werden, die gerade das Problem der getauchten Festbetten darstellt, muß der Käfig eben immer wieder „sauber“ gemacht werden!

Deshalb lag die Idee nahe, diesen Käfig nicht im Abwassersystem zu belassen, sondern ihn vielmehr immer wieder herauszuholen – den überwuchernden Bakterien Schleim abzulösen, da jedes Material, das in Abwasser eingetaucht wird, innerhalb von Stunden von heterotrophen Bakterien überwachsen wird. Weiterhin werden die Spezialisten reaktiviert und in einem separaten Behälter, dem Fermenter, wieder zum Wachstum angeregt. Die Spezialisten-Recycling-Anlage ist in Bild 4 im Fließschema gezeigt. Sie ist für Nitrifikanten, aber auch für andere Spezialisten, die meist in industriellen Kläranlagen benötigt werden, geeignet. Bei dem Käfig handelt es sich nahe liegenderweise um ein äußerlich besiedeltes, spezielles Trägermaterial, das schwebend sein muß. Eine der vorzugsweisen Eigenschaften ist, daß das Trägermaterial die Spezialisten mit zusätzlichen Nährstoffen versorgt.

Die Herausnahme der Träger kann bei Dotierung mit Eisenspänen magnetisch erfolgen, indem das Gemisch aus gereinigtem Abwasser und Schlamm, das den Überschußschlamm ausmacht, an einem Elektromagneten vorbeigeführt wird. Noch eleganter läßt sich der Träger über ein Rollsieb entfernen,

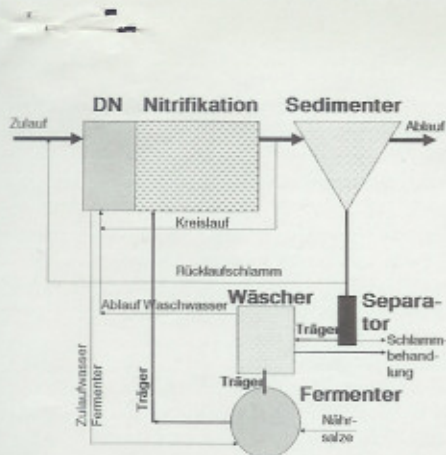


Bild 4. Fließschema der Spezialisten-Recycling-Anlage

bei dem bereits die an der Oberfläche der Träger gewachsenen heterotrophen Biofilme abgeschert werden. Anschließend gelangen die Träger noch in einen Wäscher, der ein günstiges Milieu für die Spezialisten, aber ein ungünstiges für die übrigen Heterotrophen schafft. Ein Teil der Träger wird mit Sicherheit aus dem System in die Schlammbehandlung ausgeschleust, da nicht alle Träger magnetisch erfaßt werden oder durch Volumenänderung durch das Sieb fallen. Dies ist aber nicht ungünstig – abgesehen davon, daß die Träger umweltneutral sind –, da auf diese Weise auch die Spezialisten-Population erneuert wird.

Die zurückgeführten und auch neue, noch unbenutzte Träger werden in einen Fermenter gegeben, der nur noch bei extremer Luftfeuchtigkeit trocken betrieben werden soll. Dieser Fermenter wird mit behandeltem Abwasser oder auch mit Rohwasser über ein Sprühsystem feucht gehalten. Dadurch werden die Spezialisten im selben Milieu gezüchtet, dem sie später ausgesetzt sind. Der Nitrifikanten-Fermenter oder ein ähnlich gearteter Spezialisten-Fermenter wird allein mit den Stoffen versorgt, die die Spezialisten in der biologischen Behandlungsanlage umsetzen sollen. Im Falle der Stickstoffoxidation sind das Ammoniumsalze.

● wesentliche Unterschied und Vorteil des beschriebenen Verfahrens gegenüber allen bisher bekannten Verfahren zur Oxidation von Stickstoff im Rahmen der Stickstoff-Eli-

mination aus Wasser ist darin zu sehen, daß die mit großem Aufwand kultivierten Spezialisten nicht mit dem übrigen Schlamm aus dem System ausgetragen werden und verlorengehen, sondern ständig im Kreis gefahren werden können. Wie vorgestellt, werden sie dabei so behandelt, daß sie sich regenerieren können. Ein weiterer entscheidender Vorteil des Verfahrens ist, daß die Nitrifikanten nahezu ungestört in ihrem Kultivationsmilieu auf dem Träger verbleiben und daß der Träger seinerseits eine Carbonatquelle sein kann, die das Milieu stark puffert. Mit diesem Verfahren hat man jederzeit die Spezialisten parat, wenn im Zulauf höhere Belastungen auftreten als die, die entsprechend der Nitrifikations- oder der sonstigen Spezialistenkapazität im System oxidiert werden könnten. Gleichzeitig muß die betreffende Anlage nicht mehr auf die genannten geringen Schlammbelastungen ausgebaut werden, da das Schlammalter der Belebtschlammflocken nicht mehr 10 Tage betragen muß.

6 Entsorgung der produzierten Biomasse

Das Problem Biomasse besteht darin, daß heute aus einer konventionellen Schlammbehandlung ein Produkt „herauskommt“, das in günstigen Fällen 40% Feststoff- und 60% Wassergehalt aufweist, weil die Zellen nur unwesentlich zerstört werden und die Zellflüssigkeit gespeichert bleibt (vgl. [10]).

Auf der Basis dieser Überlegungen haben wir deshalb nach einem Verfahren gesucht, das in ausreichendem Maße die Zellhüllen zerstört, ohne daß eine wesentliche chemische Veränderung der Biomasse stattfindet. Aufgrund dieses Anforderungsprofils kam nur ein mechanisches Verfahren in Betracht, wie es in der Biotechnologie zur Aufarbeitung intrazellulärer Produkte angewendet wird. Die erfolgreiche Anwendung auf Klärschlämme ist inzwischen an verschiedenen Stellen nachgewiesen worden; die großtechnische Umsetzung erfolgt derzeit in einer halbtechnischen Kläranlage an der FHT Mannheim (gefördert durch den Projektträger Wasser-Abfall-Boden des Landes Baden-Württemberg) und in einem Modellklärwerk im Umweltpark Leipzig (gefördert durch einen Industriebetrieb):

Derzeitige Untersuchungen konzentrieren sich auf die Folgen der Rückführung von Zellbestandteilen, die im Rahmen der gezielten Denitrifikation als interne Kohlenstoffquelle für die Nitratreduktion genutzt werden.

7 Resümee

Der aufgespannte Bogen von der mikrobiellen direkten Umsetzung von Kohlenwasserstoffen bis hin zur Entsorgung in Form eines internen Kreislaufes sollte deutlich machen, daß Kreisprozesse mit Hilfe von Mikroorganismen auch in der Produktion zumindest denkbar sind und biotechnologische Denksätze bei der Optimierung der Abwasserbehandlung noch wenig genutzt werden. In Zusammenarbeit mit Mikrobiologen sind die vorgestellten Ansätze verfahrenstechnisch noch zu optimieren, um sie für die Praxis reif zu machen.

Literatur

- [1] Kunz, P.: Umweltbioverfahrenstechnik, Vieweg-Verlag, Wiesbaden 1992
- [2] Svenson, A.; Kjeller, L. O.; Rappe, C.: Enzyme mediated formation of 2, 3, 7, 8 tetrasubstituted chlorinated Dibenzodioxin and Dibenzofurans. Environ. Science Technology 23 (1989)
- [3] Rehm, H.-J.: Mikrobiologie und Biochemie der Kohlenwasserstoffe in Schweisfurth, R. (Hrsg.): Angewandte Mikrobiologie der Kohlenwasserstoffe in Industrie und Umwelt. expert-Verlag, Ehningen 1988, 1–16
- [4] Schlegel, H. G.: Allgemeine Mikrobiologie. Thieme-Verlag, 1985
- [5] Lingsen, F.: Mikrobieller Abbau von aromatischen Verbindungen. Jahrbuch Biotechnologie Band 2, Hanser-Verlag, München 1988, S. 297–318
- [6] Müller-Hurtig, R.; Wagner, F.: Mikrobieller Abbau von aliphatischen Kohlenwasserstoffen unter umweltrelevanten Aspekten. Jahrbuch Biotechnologie Band 3, Hanser-Verlag, München 1990, S. 337–350
- [7] Erdmann, H. et al.: Ausgewählte Beispiele für die Anwendung von Lipasen in der organisch präparativen Chemie. Jahrbuch Biotechnologie Band 3, Hanser-Verlag, München 1990, S. 353–378
- [8] Kunz, P. (Hrsg.): Gezüchtete Mikroorganismen in Abwasserreinigungsanlagen. Möglichkeiten und Grenzen. expert-Verlag, Ehningen 1992
- [9] Kunz, P.: Anlage und Verfahren zur mikrobiellen Entfettung von Oberflächen. P 42 09 052 C1; 1991
- [10] Kunz, P.: Neue Wege der Klärschlamm-Minimierung. abwassertechnik 44 (1993) 2, S. 33–40 ■