

# Anaerobtechnik

Abwasser-, Schlamm- und Reststoffbehandlung, Biogasgewinnung

Bearbeitet von

Karl-Heinz Rosenwinkel, Helmut Kroiss, Norbert Dichtl, Carl-Franz Seyfried, Peter Weiland

3. neubearbeitete Auflage 2015. Buch. XVI, 840 S. Gebunden

ISBN 978 3 642 24894 8

Format (B x L): 16,8 x 24 cm

Gewicht: 1598 g

[Weitere Fachgebiete > Technik > Umwelttechnik: Allgemeines > Abwasseraufbereitung, Abwasserwasserentsorgung](#)

Zu [Inhaltsverzeichnis](#)

schnell und portofrei erhältlich bei

**beck-shop.de**  
DIE FACHBUCHHANDLUNG

Die Online-Fachbuchhandlung beck-shop.de ist spezialisiert auf Fachbücher, insbesondere Recht, Steuern und Wirtschaft. Im Sortiment finden Sie alle Medien (Bücher, Zeitschriften, CDs, eBooks, etc.) aller Verlage. Ergänzt wird das Programm durch Services wie Neuerscheinungsdienst oder Zusammenstellungen von Büchern zu Sonderpreisen. Der Shop führt mehr als 8 Millionen Produkte.

---

# Grundlagen anaerober Prozesse

# 2

Claudia Gallert, Josef Winter und Karl Svardal

## Inhaltsverzeichnis

2.1	Mikrobielle Grundlagen der Methangärung (Claudia Gallert, Josef Winter) .....	20
2.1.1	Einleitung .....	20
2.1.1.1	Energiegewinn bei aeroben und anaeroben mikrobiellen Umsetzungen .....	21
2.1.1.2	Thermodynamik .....	24
2.1.1.3	Massen- und Energiebilanz .....	26
2.1.2	Anaerobe Nahrungskette .....	28
2.1.2.1	Hydrolyse von Biopolymeren .....	29
2.1.2.2	Fermentation von Monomeren .....	32
2.1.2.3	Acetogenese der Gärprodukte .....	35
2.1.2.4	Methanogenese .....	38
2.1.3	Biogasquantifizierung .....	44
2.1.4	Einflussfaktoren auf die Methangärung .....	46
2.1.4.1	Verdopplungszeit und Wachstumsraten .....	47
2.1.4.2	Schlammrückführung und Verweilzeit .....	48
2.1.4.3	Homogenisierung/Durchmischung .....	50
2.1.4.4	Räumliche Nähe und syntrophe Wechselbeziehungen .....	51
2.1.4.5	pH-Wert .....	51
2.1.4.6	Betriebstemperatur .....	52
2.1.4.7	Sauerstoffgehalt und Redoxpotenzial .....	53
2.2	Chemische Grundlagen anaerober Prozesse (Karl Svardal) .....	53
2.2.1	Chemische Gleichgewichte .....	53
2.2.1.1	Löslichkeit von Gasen .....	54
2.2.1.2	Dissoziationsgleichgewichte schwacher Säuren und Basen .....	55
2.2.1.3	Dissoziationsgleichgewichte schwer löslicher Salze (Löslichkeitsprodukt) .....	60
2.2.2	Chemische Parameter und deren Bedeutung bei der anaeroben Abwasserreinigung .....	62
2.2.2.1	Der chemische Sauerstoff Bedarf (CSB) .....	62
2.2.2.2	TOC .....	63

---

2.2.2.3	BSB <sub>5</sub> .....	64
2.2.2.4	Stickstoffverbindungen .....	64
2.2.2.5	Phosphorverbindungen .....	66
2.2.2.6	Schwefelverbindungen .....	66
2.2.2.7	Säurekapazität (Alkalinität) .....	67
2.2.2.8	Wasserdampfflüchtige organische Fettsäuren .....	70
2.2.2.9	Calcium .....	70
2.2.2.10	Faulgaskomponenten .....	70
2.2.3	Chemische Umwandlung des organischen Kohlenstoffs unter anaeroben Bedingungen .....	71
2.2.4	Bilanzierung des Anaerobreaktors .....	73
2.2.4.1	CSB-Bilanz .....	75
2.2.4.2	Schwefelbilanz .....	77
Literatur	.....	77

---

Claudia Gallert (✉)

Hochschule Emden/Leer, FB Technik/Abteilung Mikrobiologie-Biotechnologie,

Emden, Deutschland

E-Mail: Claudia.Gallert@hs-emden-leer.de

Josef Winter

Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Institut für Ingenieurbiologie und Biotechnologie des Abwassers, Karlsruhe, Deutschland

E-Mail: Josef.Winter@kit.edu

Karl Svardal

Technische Universität Wien, Institut für Wassergüte,

Ressourcenmanagement und Abfallwirtschaft, Wien, Österreich

E-Mail: svardal@iwig.tuwien.ac.at

---

## 2.1 Mikrobielle Grundlagen der Methangärung

Claudia Gallert, Josef Winter

### 2.1.1 Einleitung

Die gesamte Biomasse auf der Erde entsteht durch Kohlendioxid-Fixierung bei der Photosynthese von Pflanzen und aquatischen Mikroorganismen. Sie dient Tieren oder dem Menschen als Nahrungsquelle. Die Re-Mineralisation pflanzlicher und tierischer Reststoffe zu CO<sub>2</sub> erfolgt durch Mikroorganismen und kann unter aeroben bzw. anaeroben Bedingungen stattfinden. Unter aeroben Bedingungen werden abgestorbene pflanzliche und tierische Reststoffe mit Sauerstoff zu Kohlendioxid und Wasser mineralisiert, wobei auch Ammonium und Sulfid hauptsächlich aus dem Eiweißabbau und Phosphat aus dem Abbau phosphathaltiger Zellkomponenten freigesetzt werden. Unter anoxischen bzw. anaeroben Bedingungen, wenn kein Sauerstoff als terminaler Elektronenakzeptor für Re-

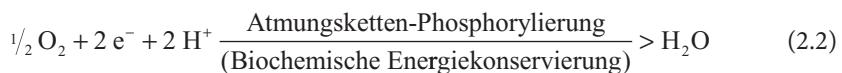
duktionsäquivalente zur Verfügung steht, werden die Elektronen auf andere Elektronenakzeptoren wie z. B. Nitrat, Eisen, Mangan, Sulfat oder Carbonat übertragen. Sind unter anaeroben Bedingungen auch diese anorganischen Elektronenakzeptoren nicht verfügbar, werden die Elektronen auf organische Zwischenprodukte des Stoffwechsels übertragen und es entstehen Gärprodukte wie z. B. Milchsäure aus Pyruvat oder n-Butyrat und Alkohole aus Acetat. Diese Gärprodukte sind „reduzierter“ als ihre aus dem Stoffwechsel stammenden organischen Elektronenakzeptoren. Gärungen werden nach den dominierenden Abbauprodukten benannt, so z. B. Milchsäuregärung bei der Yoghurt-, Buttermilch- oder Silageherstellung, alkoholische Gärung bei der Bier- oder Weinbereitung bzw. der technischen Alkoholherstellung und Propionsäure- oder Buttersäuregärung im Pansen von Rindern, in Anaerobreaktoren (Faulbehältern) von Kläranlagen oder in industriellen und landwirtschaftlichen Biogasanlagen. Gärungen sind wichtig für die Haltbarmachung von Lebens- und Futtermitteln, sie sind aber auch die entscheidenden Prozesse für den anaeroben Abbau von Biomasse zu Sumpf-, Faul- oder Biogas im Anschluss an die Hydrolyse von pflanzlichen oder tierischen Biopolymeren. Bei einigen Gärungen, z. B. der Buttersäuregärung wird neben Butyrat und  $\text{CO}_2$  bereits molekularer Wasserstoff gebildet und ausgeschieden. Weiterer Wasserstoff entsteht bei der Acetogenese von Propionat, Butyrat, und höheren Fettsäuren, die aber nur bei sehr niedrigem Wasserstoffpartialdruck zu Acetat und  $\text{CO}_2$  umgesetzt werden können. Für einen vollständigen Abbau von z. B. Butyrat müssen Methanbakterien den Wasserstoff mit  $\text{CO}_2$  und auch das Acetat zu Methan umsetzen. Wasserstoff hat über den Partialdruck eine zentrale Regelfunktion für den anaeroben Abbau organischer Substanzen zu Biogas.

### 2.1.1.1 Energiegewinn bei aeroben und anaeroben mikrobiellen Umsetzungen

Die Substrate für den aeroben oder anaeroben Abbau bestehen zum großen Teil aus unlöslichen Biopolymeren von Kohlenhydraten, Proteinen und Fetten, die durch mikrobielle Exoenzyme energieneutral bzw. mit wenig Energieaufwand zu den monomeren Bausteinen umgesetzt werden. Grundlegende Prozesse für den weiteren aeroben bzw. anaeroben mikrobiellen Abbau der Monomere von Kohlenhydraten sind Glykolyse, Pyruvatdecarboxylation und Acetatoxidation. Für den Eiweißabbau ist nach der proteolytischen Spaltung zu Aminosäuren eine Desaminierung und für manche Aminosäuren eine Sulfidabspaltung, für den Fettabbau nach Lipolyse die  $\beta$ -Oxidation von langkettigen Fettsäuren nötig. Diese Prozesse können ohne direkte Sauerstoffbeteiligung beim aeroben und anaeroben Abbau gleichermaßen ablaufen, wobei die frei werdenden Reduktionsäquivalente ( $[2 \text{ H}] \leftrightarrow 2 \text{ e}^- + 2 \text{ H}^+$ ) von **Wasserstoff-übertragenden Coenzymen** aufgenommen werden. Ein bei allen Organismen anzutreffendes H-übertragendes Coenzym ist Nicotinadenindinucleotid ( $\text{NAD}^+$ ), das zwei bei mikrobiellen Oxidationsreaktionen entstehende Elektronen und zwei Protonen aufnehmen (Gl. 2.1) und für Reduktionsreaktionen in umgekehrter Richtung wieder abgeben kann.



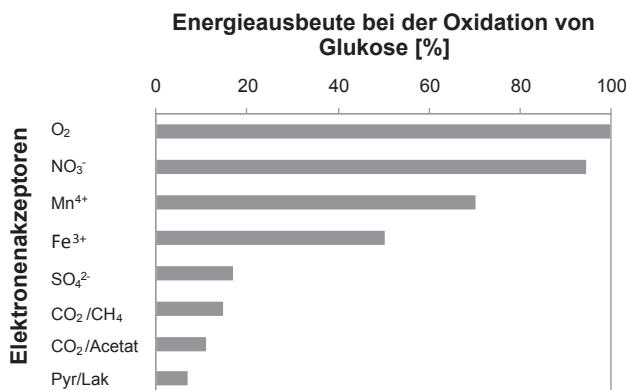
Aerobe Mikroorganismen haben gegenüber den Anaerobiern den großen Vorteil, dass sie die bei der Glykolyse von Kohlenhydraten und bei der Pyruvatdecarboxylation auf  $\text{NAD}^+$  übertragenen Reduktionsäquivalente sowie die bei der Oxidation des Acetats zu  $\text{CO}_2$  im Citronensäurezyklus (TCA-Zyklus) auf  $\text{NAD}^+$  oder Flavinadenindinucleotid (FAD) übertragenen Reduktionsäquivalente über die **Atmungskette** unter Energiekonservierung via oxidativer Phosphorylierung umsetzen können (Gl. 2.2). Für den membrangebundenen Elektronentransport in der Atmungskette erfolgt zuerst eine Ladungstrennung des Wasserstoffs [H] der reduzierten Coenzyme in Elektronen und Protonen. Die Elektronen durchlaufen die kaskadenartige Anordnung von Elektronenkarriern (z. B. Cytochrome, Flavoproteine) in der Atmungskette, bevor sie mit Protonen und Sauerstoff zu Wasser reagieren (Gl. 2.2).



Durch die Ladungstrennung entsteht ein Protonengradient in der Membran, dessen Energie mittels ATPase durch Bildung von ATP aus ADP und  $\text{P}_i$  konserviert werden kann. Das ATP dient als Energielieferant für Wachstum, Vermehrung, Beweglichkeit und die Aufrechterhaltung der notwendigen Lebensvorgänge in der Zelle. Die beim Abbau von organischen Substanzen erzielbare Energieausbeute hängt von der Art der Substrate und von vielen weiteren Faktoren ab. Ausgehend von einem Mol Hexose (180 g Glukose = 2870 kJ) können bei der vollständigen Mineralisation zu  $\text{CO}_2$  und Wasser ca. 2/3 des Energiegehaltes unter Bildung von maximal 38 Mol ATP (ca. 50 kJ/mol Phosphoanhydridbindung des ATPs) konserviert werden. Ca. 1/3 der Energie der Hexose geht als Reaktionswärme verloren. Die beim aeroben Abbau von Kohlenhydraten über Glykolyse, Pyruvatdecarboxylation und Acetatoxidation gebildeten Reduktionsäquivalente werden auf die Coenzyme  $\text{NAD}^+$  und FAD übertragen. Diese speisen die Elektronen dann auf unterschiedlichem Energieniveau in die Atmungskette ein. Die Energiedifferenz beim Elektronentransport von zwei Elektronen des  $\text{NADH}/\text{H}^+$  bzw. des  $\text{FADH}_2$  zum terminalen Elektronenakzeptor  $\text{O}_2$  reicht für die Bildung von 3 Mol ATP bzw. von 2 Mol ATP über Atmungsketten-Phosphorylierung aus. Durch die „portionsweise“ Konservierung von Energie beim Elektronentransport in der Atmungskette läuft die aus der Chemie bekannte „Knallgasreaktion“ moderat und nicht explosionsartig ab (Gl. 2.2).

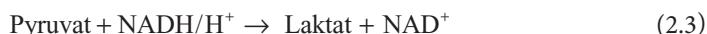
Die große Energieausbeute von 38 Mol ATP hat ihre Ursache in der Differenz der Redoxpotenziale ( $\Delta E^\circ$ ) der Redoxpaare  $\frac{1}{2} \text{O}_2/\text{H}_2\text{O}$  (+0,82 V),  $\text{NAD}^+/\text{NADH}/\text{H}^+$  (-0,32 V) bzw.  $\text{FAD}/\text{FADH}_2$  (-0,22 V) bei  $\text{pH} \pm 7$  im Cytoplasma. Steht kein Sauerstoff für die Aufnahme von Elektronen zur Verfügung, ergibt sich die Energieausbeute aus der Differenz der Redoxpotenziale der stattdessen vorhandenen **alternativen Redoxpaare** wie  $\text{NO}_3^-/\text{N}_2$  bei der Denitrifikation (+0,74 V),  $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$  bei der Eisenatmung (+0,76 V bzw. +0,2 V bei  $\text{pH } 7$ ),  $\text{SO}_4^{2-}/\text{H}_2\text{S}$  bei der Sulfatreduktion (-0,22 V) oder  $\text{CO}_2/\text{CH}_4$  bzw.  $\text{CO}_2/\text{Acetat}$  bei der Carbonatreduktion (-0,24 V bzw. -0,28 V), wobei die Energieausbeute mit sin-

**Abb. 2.1** Vergleich der Energieausbeute bei der Oxidation von Glukose mit verschiedenen Elektronenakzeptoren. Die Gibbs-Energie beträgt bei der aeroben Veratmung von Glukose – 2870 kJ/mol (=100 %). Für die Berechnung der Energieausbeute bei der Eisenreduktion wurde ein  $E^0$  von 0,2 V (neutraler pH) angenommen. (Pyr/Lak = Pyruvat/Laktat)



kendem  $\Delta E^0$  abnimmt. Die Energieausbeuten bei der „Veratmung“ von Glukose mit verschiedenen Elektronenakzeptoren unterscheiden sich um den Faktor 10 (Abb. 2.1).

Stehen keine „externen“ anorganischen Elektronenakzeptoren aus dem umgebenden Milieu zur Verfügung, so wird bei den gärenden Mikroorganismen ein im Stoffwechsel entstandenes reduzierbares Zwischenprodukt als „interner Elektronenakzeptor“ mit einer spezifischen Dehydrogenase reduziert. Bei der Milchsäuregärung ist dies Pyruvat, das mit NADH/H<sup>+</sup> unter Katalyse einer L- oder D-Laktat-Dehydrogenase zu L- oder D-Laktat reduziert und aus der Zelle ausgeschleust wird (Gl. 2.3).



Da gärende Mikroorganismen keine der Atmungskette von aeroben Bakterien vergleichbare und ähnlich effiziente Energiekonservierung durch Elektronentransport-Phosphorylierung haben, muss Energie hauptsächlich durch **Substratketten-Phosphorylierung** (max. 4 Mol ATP pro mol Glukose beim Abbau zu Acetat) konserviert und für Wachstum bereit gehalten werden. Ein Gärer muss daher sehr viel mehr Substrat durchsetzen (Abb. 2.1), um auf die Energieausbeute eines aeroben Bakteriums zu kommen.

Als Alternative zur Elektronentransport-Phosphorylierung kann bei einigen anaeroben Mikroorganismen zur Regeneration von reduzierten Coenzymen der „gebundene“ Wasserstoff [H] als molekularer Wasserstoff (H<sub>2</sub>) freigesetzt werden. So werden z. B. bei Clostridien oder *Eubacterium* spec. die bei der Decarboxylierung von Pyruvat durch Pyruvat-Ferredoxin-Oxidoreduktase freiwerdenden Reduktionsäquivalente auf Ferredoxin übertragen. Da das Redoxpotenzial von Ferredoxin bei pH 7 etwa dem der Wasserstoffelektrode entspricht ( $\Delta E^0 = -0,45$  V für Fd<sub>red</sub>/Fd<sub>ox</sub> im Vergleich zu  $\Delta E^0 = -0,42$  V für 2H<sup>+</sup>/H<sub>2</sub>), kann der Wasserstoff selbst bei erhöhtem Wasserstoffpartialdruck molekular freigesetzt werden. Wird Wasserstoff dagegen im Stoffwechsel auf NAD<sup>+</sup> übertragen, so kann eine Freisetzung nur über Ferredoxin unter Beteiligung einer Hydrogenase (H<sub>2</sub>-Ferredoxin-Oxidoreduktase) erfolgen (Gl. 2.4a, b).



Die Wasserstoffübertragung von  $\text{NADH}/\text{H}^+$  auf  $\text{Fd} \cdot \text{H}_2$  (2.4a) ist thermodynamisch nur bei sehr niedrigem Wasserstoffpartialdruck ( $p_{\text{H}_2}$ ) möglich. Der niedrige  $p_{\text{H}_2}$  kann durch **Syntrophie**, d. h. effizienten Verbrauch des von Gärern produzierten Wasserstoffs durch Methanbakterien oder Sulfatreduzierern erreicht werden (siehe auch 2.1.2.3).

### 2.1.1.2 Thermodynamik

Die Methangärung ist sowohl in naturbelassenen Ökosystemen wie auch in gesteuerten Methanreaktoren für die Abwasser- und Abfallbehandlung ein mikrobiologischer Prozess mit einer komplexen Reaktionskette, die bei unlöslichen Biopolymeren beginnt und bis zur Biogasfreisetzung reicht. Ohne Kenntnis der thermodynamischen Zusammenhänge der aufeinanderfolgenden Reaktionen und der dafür erforderlichen Bedingungen ist eine Steuerung zur Prozessoptimierung in Anaerobreaktoren nicht möglich. Bei allen Reaktionen entstehen Produkte mit einer geringeren Energie als die Ausgangssubstrate. Die Energie differenz wird zum Teil konserviert und für Wachstum genutzt oder als Wärme freigesetzt. Um vorhersagen zu können, ob eine Reaktion unter den gegebenen Voraussetzungen in der gewünschten Richtung abläuft, ist die Kenntnis der Temperatur, des pH-Wertes, der Salinität, des Redoxpotenzials und der Reaktionsprodukte (Gl. 2.5a) von Bedeutung. Da biologische Reaktionen fast immer reversibel sind, sind Edukt- und Produktkonzentrationen von der Gleichgewichtskonstante  $K_{\text{Gl}}$  für die vorliegenden Reaktionsbedingungen abhängig (Gl. 2.5b).



$\text{A}, \text{B}$  = Edukte;

$\text{C}, \text{D}$  = Produkte

$a, b, c, d$  = Anzahl der Reaktanden

$$K_{\text{Gl}} = \frac{(\text{C})^c \times (\text{D})^d}{(\text{A})^a \times (\text{B})^b} \quad (2.5\text{b})$$

Nach dem zweiten Hauptsatz der Thermodynamik ist ein System nur dann in der Lage, Arbeit zu verrichten, wenn die Änderung der **freien Energie**  $\Delta G$  negativ ist (für  $p$ ,  $V$ ,  $T$ =konstant). Die freie Energie  $\Delta G$  kann nach Gleichung 2.6 berechnet werden:

$$\Delta G = \Delta G^0' + RT \ln K_{\text{Gl}} \quad (2.6)$$

$R$  = allgemeine Gaskonstante,  $8,31 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$

$T$  = absolute Temperatur in  $^{\circ}\text{K}$

$K_{\text{Gl}}$  = Gleichgewichtskonstante

Dabei bedeutet  $\Delta G^0'$  die Änderung der freien Energie unter Standardbedingungen, d. h. bei 25°C (298°K) und einer Konzentration von 1 mol L<sup>-1</sup>, mit Ausnahme der Konzentration von H<sup>+</sup>-Ionen: Diese sollte 10<sup>-7</sup> mol L<sup>-1</sup> betragen, da die meisten biologischen Reaktionen bei einem pH-Wert um 7 ablaufen.  $\Delta G^0'$  ist für jede Reaktion eine Konstante. Der zweite Term in Gl. 2.6 ist eine Variable die von der Gleichgewichtskonstanten  $K_{\text{Gl}}$  und somit von der Konzentration der beteiligten Reaktionspartner abhängig ist. Die Ermittlung der  $\Delta G^0'$ -Werte erfolgt gemäß folgender Beziehung (Gl. 2.7):

$$\Delta G^0' = \Sigma \Delta G^0'_{\text{Produkte}} - \Sigma \Delta G^0'_{\text{Edukte}} \quad (2.7)$$

Für viele biochemische Reaktionen ist der  $\Delta G^0'$ -Wert experimentell ermittelt und in Tabellenwerken zusammengetragen worden (z. B. Thauer et al. 1977). Reaktionen mit einem positiven  $\Delta G^0'$  sind **endergone** Reaktionen, die mit einem negativen  $\Delta G^0'$  sind **exergone** Reaktionen. Da Reaktionen gemäß dem zweiten Hauptsatz der Thermodynamik nur dann spontan ablaufen, wenn  $\Delta G < 0$  ist, und  $\Delta G^0'$  eine feste Größe ist, kann die Reaktionsrichtung nur durch Veränderung von  $K_{\text{Gl}}$  in Gl. 2.6 beeinflusst werden.

Das Redoxpotenzial  $E^0'$  unter Standardbedingungen (25°C,  $c=1$  mol L<sup>-1</sup>, pH 7) beschreibt die Tendenz einer Substanz, oxidiert bzw. reduziert zu werden. Das Redoxpotenzial für das Redoxpaar 2 H<sup>+</sup>/H<sub>2</sub> beträgt -0,42 V, für das Redoxpaar NAD<sup>+</sup>/NADH/H<sup>+</sup> -0,32 V. Mithilfe der Nernst-Gleichung (Gl. 2.8) ist es möglich, die Änderung der freien Energie  $\Delta G^0'$  einer Reaktion zu berechnen.

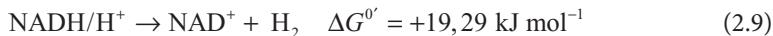
$$\Delta G^0' = -nF \times \Delta E^0' \quad (2.8)$$

$n$  = Anzahl der übertragenen Elektronen

$F$  = Faraday-Konstante (96,48 kJ V<sup>-1</sup> mol<sup>-1</sup>)

$\Delta E^0'$  = Differenz von  $E^0'$  des Elektronenakzeptors minus  $E^0'$  des Elektronendonators

Setzt man die bekannten Größen für die Freisetzung von molekularem Wasserstoff aus NADH + H<sup>+</sup> (Gl. 2.9) in die Nernst-Gleichung ein, so errechnet sich ein  $\Delta G^0'$  von +19,29 kJ/mol. Die Reaktion ist endergon und kann unter Standardbedingungen nicht ablaufen.



Erst wenn durch Wasserstoff-verbrauchende Reaktionen H<sub>2</sub> entfernt wird, d. h. ein niedriger Wasserstoffpartialdruck p<sub>H<sub>2</sub></sub> vorliegt, wird die Reaktion exergon und verläuft in der mit dem Pfeil angegebenen Richtung. Mit Gleichung 2.10 kann der p<sub>H<sub>2</sub></sub> berechnet werden, bei dem die freie Energie  $\Delta G$  negativ wird (Conrad et al. 1986). Die Freisetzung von H<sub>2</sub> aus NADH/H<sup>+</sup> wird bei einem p<sub>H<sub>2</sub></sub>\* von <4,1 × 10<sup>-4</sup> bar (41 Pa) möglich.

$$\log p_{H_2}^* = \log p_{H_2} - \frac{\Delta G}{n \times 2,303 RT} \quad (2.10)$$

$\log p_{H_2}$  = aktueller  $pH_2$

$n$  = stöchiometrische Anzahl von  $H_2$

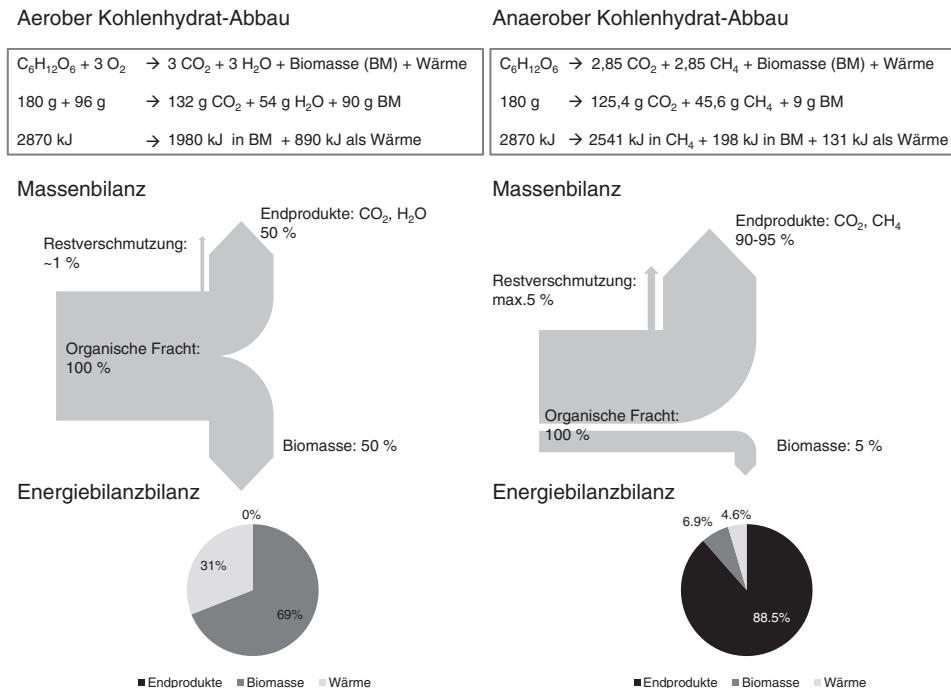
$\log p_{H_2}^*$  =  $p_{H_2}$ , bei dem  $\Delta G^0' < 0$

### 2.1.1.3 Massen- und Energiebilanz

Wie in Abschn. 2.1.1.1 beschrieben unterscheidet sich die Energieausbeute von mikrobiellen aeroben bzw. anaeroben Abbauvorgängen von organischen Verbindungen um ein Vielfaches. Der hohe Energiegewinn bei der Re-Oxidation der reduzierten Wasserstoffüberträger NADH/ $H^+$  oder FADH<sub>2</sub> über die Atmungskette von aeroben Bakterien fehlt den anaeroben Bakterien. Dies macht sich in einem deutlich geringeren Biomassewachstum sowie in einer viel geringeren Wärmeentwicklung bemerkbar. Bei der aeroben Stabilisierung von Abwässern sind die Substratproportionen, die für Energieerzeugung und als C-Quelle für das Wachstum genutzt werden abhängig davon, ob viel Substrat verfügbar ist wie in einer Hochlastbelebung (Substratüberschuss für die Bakterien) oder ob wenig Substrat verfügbar ist wie in einer Schwachlastbelebung (Substratlimitierung für die Bakterien).

Unter **Hochlastbedingungen** in einer Belebungsanlage bei kurzen hydraulischen Aufenthaltszeiten mit reichlich verfügbaren Substrat (unvollständiger Abbau  $\rightarrow$  hohe BSB<sub>5</sub>-Restkonzentrationen) reicht die im ATP konservierte Energie aus der Mineralisation von ca. 50 % der organischen Fracht zu CO<sub>2</sub> und H<sub>2</sub>O, um Intermediate der anderen 50 % des Substrates vor der Mineralisation für das Wachstum von Bakterien (=Überschusschlammproduktion) zu nutzen. Dies ist exemplarisch in Abb. 2.2a für den aeroben Kohlenhydrat-Abbau dargestellt. Die Energie aus der veratmeten 50 %-Fraktion der Kohlenhydrate (z. B. von Glukose) wird zu 69 % im ATP konserviert und dient dem Bakterienzuwachs, die restlichen 31 % gehen als Reaktionswärme verloren (Abb. 2.2a) und führen, wenn die Wärmeenergie nicht mit der Abluft ausgetragen wird, zur Selbsterwärmung. Die Respirationsprodukte CO<sub>2</sub> und H<sub>2</sub>O enthalten keine Energie mehr. Bei der Abwasserreinigung sind hohe C-Restkonzentrationen nicht akzeptabel, da der Ablauf die gesetzlich geforderten Grenzwerte für geklärtes Abwasser bei Einleitung in einen Vorfluter erfüllen muss. Die gegenüber einer Schwachlastbelebung deutlich erhöhte Menge an Überschusschlamm könnte grundsätzlich auch entwässert und in einem Faulbehälter behandelt werden, würde aber zusätzliche Kosten für die Entwässerung und eine separate Faulstufe verursachen. Insbesondere wegen des unvollständigen BSB<sub>5</sub>-Abbaus sollte eine Hochlastbelebung nur als effiziente, erste Reinigungsstufe vor einer Schwachlastbelebung eingesetzt werden.

Unter **Schwachlastbedingungen** mit deutlich längeren hydraulischen Aufenthaltszeiten als in einer Hochlastbelebung ist die C-Versorgung der Bakterien in Belebungsanlagen umsatzbegrenzend. Die aeroben Abwasserbakterien können nur im Zulaufbereich des Abwassers Reservestoffe einlagern, die sie unter Hungerbedingungen spätestens im Ablaufbereich durch endogene Atmung zum Überleben wieder mobilisieren müssen. Auf diese Weise werden in einem Schwachlastbelebungsbecken nicht nur 50 % des BSB<sub>5</sub> wie bei der



**Abb. 2.2** Unterschiede beim aeroben und anaeroben Abbau eines kohlenhydrathaltigen Abwassers. Neben den stöchiometrischen Umsatzgleichungen ist schematisch die Massen- und Energiebilanz unter aeroben Bedingungen (Hochlast-Bedingungen) a) und anaeroben Bedingungen b) dargestellt. Für die Energiebilanz wurde die Restverschmutzung nicht mit berücksichtigt. Der durchschnittliche Energiegehalt von Biomasse (BM) beträgt 22 kJ pro g TS

Hochlastbelebung, sondern bis zu 75 % des Ausgangs-BSB<sub>5</sub> mit Sauerstoff zu CO<sub>2</sub> und Wasser veratmet und es sind minimal nur 25 % des BSB<sub>5</sub> für die Biomassevermehrung bzw. Überschusschlammproduktion nutzbar. Der Mehrertrag an ATP aus dem höheren Anteil an veratmeter Glukose in Schwachlastbelebungsanlagen im Vergleich zu Hochlastbelebungsanlagen muss in den erhöhten Bedarf für den Erhaltungsstoffwechsel der Bakterien unter den vorliegenden „Hungerbedingungen“ investiert werden.

Unter **anaeroben Bedingungen** ist die biochemische Energiekonservierung beim Abbau von Glukose im Vergleich zum aeroben Umsatz deutlich geringer, weil ATP nur durch Substratketten-Phosphorylierung bzw. durch stark verkürzte Elektronentransport-Phosphorylierung gebildet werden kann und der hohe Energieertrag aus der Elektronentransport-Phosphorylierung in der Atmungskette wegfällt. Bei der Methangärung entsteht über eine komplexe Abbau-Sequenz, an der hydrolytische, fermentative, acetogene und methanogene Bakterien partizipieren, letztendlich Biogas, das in hochbelasteten/schwachbelasteten Anaerobreaktoren aus ca. 90/95 % der umgesetzten Substratmenge gebildet wird. Bei hoher Schlammbelastung bzw. niedrigem Schlammalter werden ca. 10 % der umgesetzten C-Verbindungen als überschüssige Biomasse, bei niedriger Schlammbelastung bzw. hohem

Schlammalter nur ca. 5 % der verwerteten Substratmenge in die Überschussschlammbildung investiert (Abb. 2.2b). Die Energie der umgesetzten C-Substrate verbleibt in schwach belasteten Anaerobreaktoren zu 88,5 % im Methan und nur zu 6,9 % in der Schlammfraktion. Im Vergleich dazu wird bei aeroben Schwachlastverfahren fast 25 % der Energie für die Schlammproduktion (Biomassewachstum) investiert. Der Energieverlust bei anaeroben Schwachlastverfahren über Wärmefreisetzung beträgt „nur“ 4,6 % (Abb. 2.2b), was in schlecht isolierten und mit kurzer hydraulischer Haltezeit betriebenen Anaerobreaktoren nicht für die Einhaltung einer konstanten mesophilen Reaktortemperatur ausreicht.

Die geringe Energiedifferenz zwischen Ausgangssubstraten für die Methangärung und dem Methan im Bio- oder Faulgas ist der Grund für das vergleichsweise sehr schlechte Wachstum von anaeroben Bakterien gegenüber aeroben Bakterien und macht das Gärgas zu einem nutzbaren Energieträger. Methan muss, auch wenn die Menge für eine energetische Nutzung in kleinen Anlagen nicht ausreicht, wegen seiner klimaschädigenden Wirkung verbrannt/abgefackelt werden und darf nicht einfach in die Atmosphäre abgegeben werden. Eine diffuse und kaum oder nicht vermeidbare Immission von Methan in die Atmosphäre erfolgt z. B. bei der Massentierhaltung mit Schwemmentmistung, aus Hochmooren oder bei den nassen Anbauverfahren für Reis in tropischen Ländern.

Bei der Behandlung von kommunalem Abwasser müssen Ablaufgrenzwerte von z. B.  $< 15 \text{ mg BSB}_5 \text{ L}^{-1}$  bzw.  $< 75 \text{ mg L}^{-1}$  CSB in Kläranlagen eingehalten werden (AbwV 2009), die durch alleinige anaerobe Behandlung nicht zu erreichen sind. Die organische Restkonzentration des Schlammwassers nach der Schlamm-Wasserseparation des Ablaufes eines Anaerobreaktors ist in den meisten Fällen deutlich höher. Das Schlammwasser enthält außerdem häufig hohe Konzentrationen von Ammonium-Ionen (z. B. aus dem Abbau von Eiweiß) und muss in eine Belebungsanlage nicht nur zur vollständigen biologischen C-Elimination, sondern insbesondere auch zur Nitrifikation und Schwefelwasserstoff-Oxidation zurückgeleitet werden.

## 2.1.2 Anaerobe Nahrungskette

Global betrachtet wird ein größerer Anteil von toter pflanzlicher und tierischer Biomasse aerob durch Mikroorganismen in die Ausgangskomponenten  $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$  zersetzt als anaerob zu Faulgas, Biogas oder Sumpfgas umgewandelt wird. Der aerobe Umsatz kann ohne technische Sauerstoffzufuhr submers in flachen Teichen, Seen und Totgewässern von Flüssen oder mit künstlicher Belüftung in belüfteten Abwasserteichen oder Belebungsbecken von Kläranlagen bzw. im Wasserfilm bei der Kompostierung von organischem Material oder im Biofilm von Tropfkörpern geschehen. Voraussetzung ist eine ausreichende Sauerstoffversorgung (minimal  $0,4 \text{ mg L}^{-1}$ ) durch ungehinderte Diffusion aus der Atmosphäre in Abwasserteichen, durch aktive Belüftung in Belebungsbecken oder durch Schaffung von lockeren Schütt-Strukturen für den Luftzutritt bei der Kompostierung oder durch den Kamin-Effekt in Tropfkörpern.

Für den anaeroben Abbau muss Sauerstoff ausgeschlossen werden. Während eine Vielzahl aerober Mikroorganismen Biopolymere und andere komplexe organische Verbin-



<http://www.springer.com/978-3-642-24894-8>

Anaerobtechnik

Abwasser-, Schlamm- und Reststoffbehandlung,

Biogasgewinnung

Rosenwinkel, K.-H.; Kroiss, H.; Dichtl, N.; Seyfried, C.-F.;

Weiland, P. (Hrsg.)

2015, XVI, 844 S. 250 Abb., Hardcover

ISBN: 978-3-642-24894-8