

# MBZ als zukünftiger Baustein energieeffizienter Kläranlagen

- Erfahrungen, Potenziale, Herausforderungen -

Heinz Hiegemann, Manfred Lübken, Marc Wichern

Förderung:

Ministerium für Klimaschutz, Umwelt,  
Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz  
des Landes Nordrhein-Westfalen



Fachliche Begleitung:

Landesamt für Natur,  
Umwelt und Verbraucherschutz  
Nordrhein-Westfalen



# 1. Funktionsweise: membranlose Einkammer-MBZ mit Luftkathode

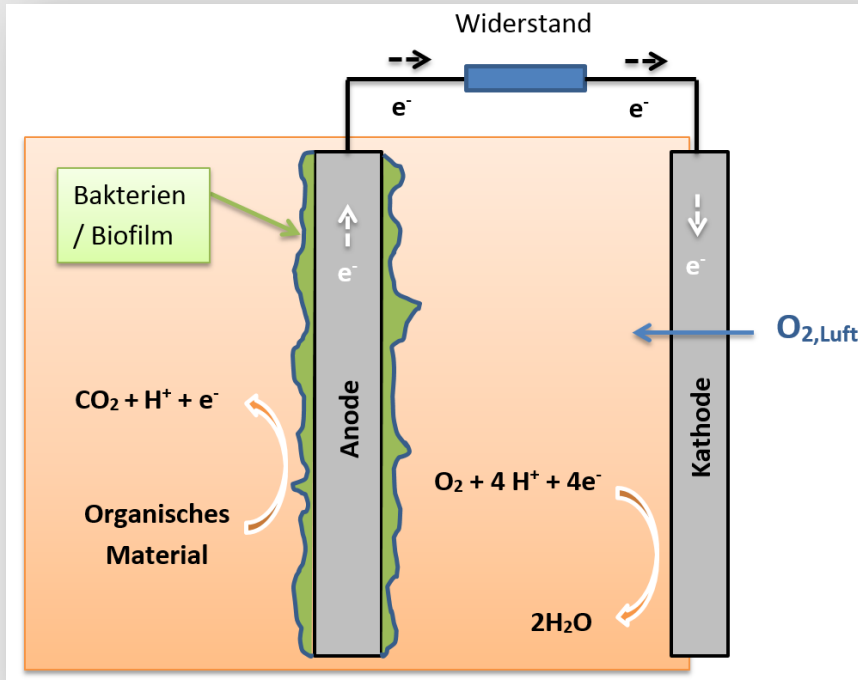


Abb.:Prinzipsskizze Einkammerr-MBZ

- Keine Membran  
→ PTFE-Diffusionsschicht
- Keine aktive Belüftung

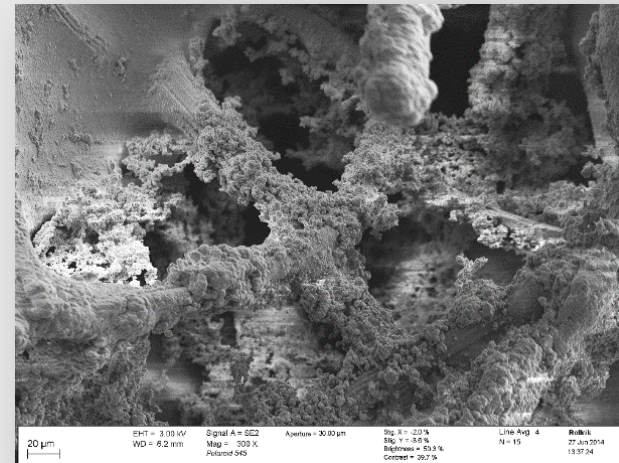


Abb.: REM-Aufnahme Graphitfasern mit Biofilm

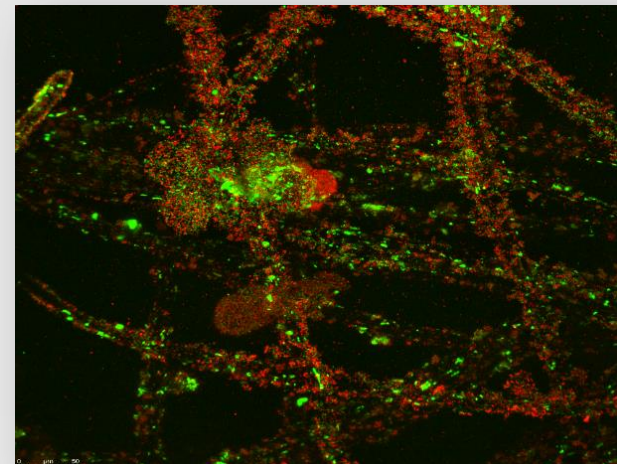
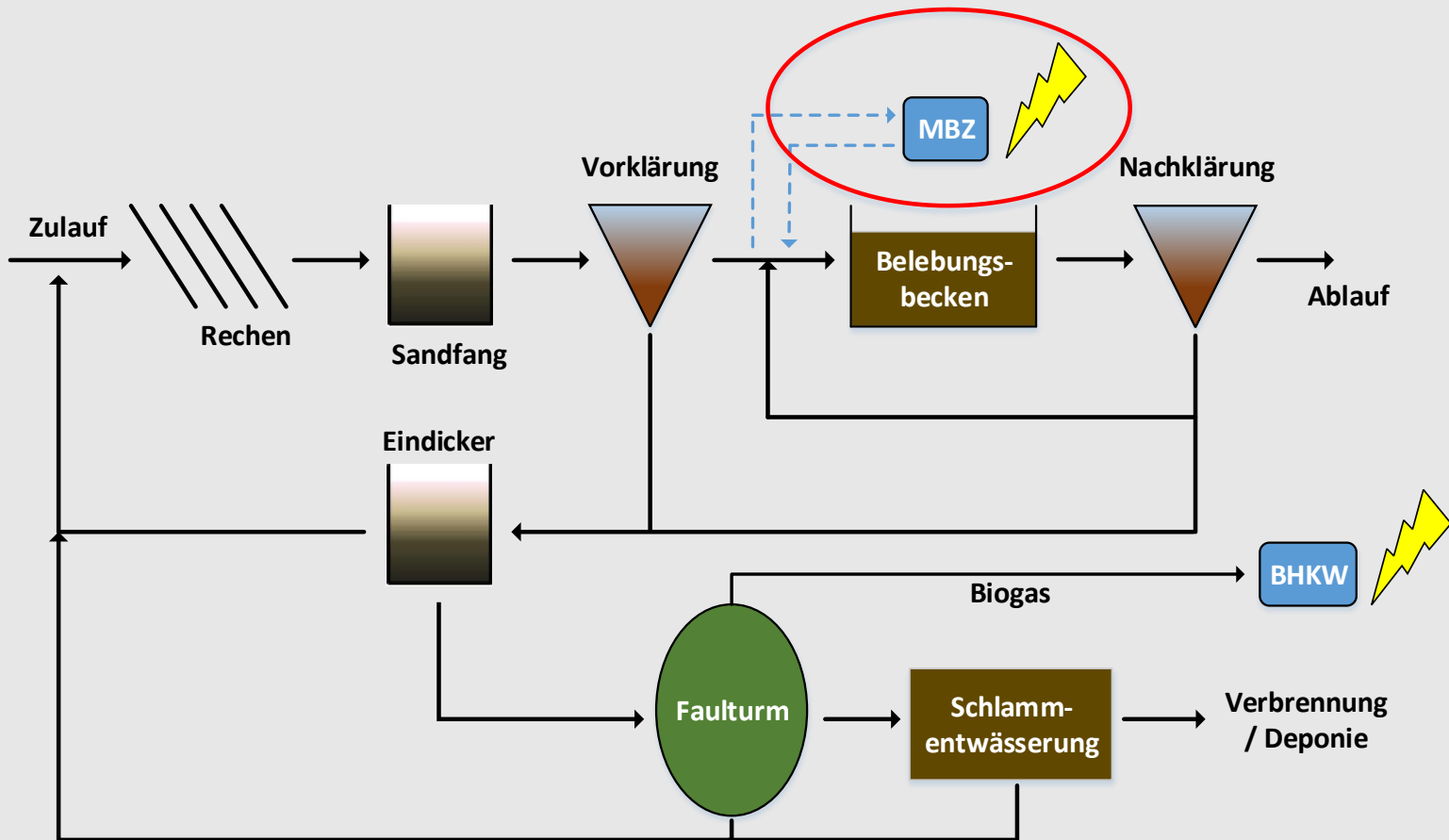


Abb.:CLSM-Aufnahme Graphitfasern mit Biofilm (rot: Zellen; grün: EPS)

## 2. Ort des Einsatzes von MBZ auf Kläranlagen



### 3. MBZ Up-Scaling – Stand der Technik

Tabelle: Erfahrungen aus der MBZ-Forschung mit Abwasser im Liter-Maßstab

MBZ-Design	Vol. [L]	Anode	Substrat (CSB-Konz.) [mg/L]	Kathode/ Katalysator	Max. LD [mW/m <sup>2</sup> <sub>Kat</sub> ]	Max. LD [W/m <sup>3</sup> ]	Quelle
SC* (Multi-elektroden)	250	64x GFB**	Häusliches AW (333)	2x Kohlenstoff-gewebe/ Pt	47	0,46	FENG et al. (2014)
SC (Multi-Module)	90	5 Module a' 12 GFB	Brauerei-Abwasser (3317)	10 x Edelstahl/Aktivkohle	171	0,14	DONG et al. (2015)
SC (Multi-elektrode)	16	GAC*** + 12x Graphitstab	Ablauf Vorklärung (100 – 500)	12x Kohlenstoffgewebe/ Pt	213	n.a.****	JIANG et al. (2011)
SC (Multi-elektrode)	5	Graphitfilz	Ablauf Vorklärung (108)	6x Kohlenstoffgewebe/ Pt	149	n.a.	YU et al. (2012)

\*SC: single-chamber; \*\*GFB: Graphite fiber brush; \*\*\*GAC: Granular Activated Carbon; \*\*\*\*n.a.: keine Angabe

- MBZ-Forschung hauptsächlich im Labormaßstab (2 – 200mL)
- Nur sehr wenige MBZ-Studien im Liter-Maßstab, welche mit realem Abwasser betrieben werden

## 4. Fragestellungen im Betrieb

- Welchen **Einfluss** haben unveränderbare Parameter wie **Temperatur, Leitfähigkeit, Abwasserzusammensetzung**?
- Wie ist die **Betriebsstabilität** der MBZ ?
- Einfluss der MBZ auf **Belebung + Faulung**?
  - Überschussschlammproduktion,  $O_2$ -Bedarf
  - $CH_4$ -Produktion, Energiebilanz
- Wie gehen wir mit den **geringen CSB-Konzentrationen** im Abwasser um?
  - keine hohe CSB-Elimination in MBZ möglich
  - max. 10 – 20% Elimination
  - hohe substratbezogene Energierückgewinnung notwendig  
(NER – Normalized Energy Recovery [ $kWh_{el}/kg_{CSBabb}$ ])



## 5. Pilotanlage KA Bottrop (Emschergenossenschaft)

KA Bottrop



Vorklärung



Abb.:Betriebsgebäude MBZ

Abb.:Foto KA Bottrop (EGLV)

Belebungsbecken



Abb.:11,2-L-MBZ



Abb.:45-L-MBZ-System

## 5. Pilotanlage KA Bottrop

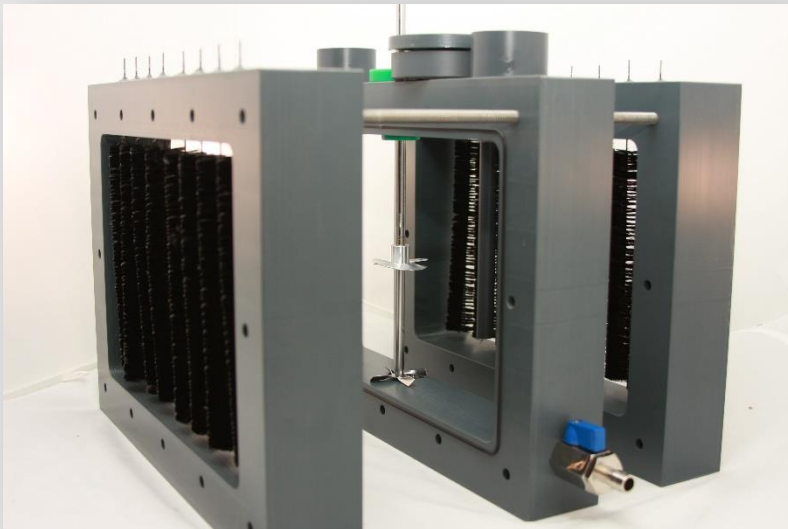
### Aufbau der untersuchten MBZ

4x 11,2L Einkammer-MBZ:

→ Je 2x 600cm<sup>2</sup> Kathode

(Kohlenstoffgewebe + PTFE- Diffusionsschicht + 0,5 mg Pt/cm<sup>2</sup>)

→ Je Kathode 8x GFB (d = 2,5cm, L = 18cm)



Online-Messsonden:  
pH, Leitfähigkeit, Sauerstoff

Vollautomatische Prozesssteuerung  
(Batch-Modus) und Probenahme

Abb.: Aufbau der Versuchs-MBZ

## 5. Pilotanlage KA Bottrop

### Betriebsdaten

- Inokulation ohne Zusatzstoffe (100 % uneingedickter PS)
- 3 unterschiedliche Belastungen
- Gewünschte CSB-Elimination bei HRT < 22 Std
- Stickstoff und AFS-Elimination größer als erwartet

Tabelle: Betriebsergebnisse der MBZ und Abwasserzusammensetzung

<b>Zeitraum</b>	<b>04.05.2015 – 01.06.2015</b>	<b>01.06.2015 – 15.07.2015</b>	<b>15.07.2015 – 31.07.2015</b>
<b>HRT [h]</b>	44	22	12
<b>Temp. [°C]</b>	17,2	21,4	21,8
<b>LF [mS/cm]</b>	3,0	4,2	4,2
<b>CSB<sub>Zu</sub> [mg/L]</b>	195	118	127
<b>CSB<sub>eli</sub> [%]</b>	67	24	14
<b>N<sub>ges,eli</sub> [%]</b>	57	28	9
<b>AFS<sub>eli</sub> [%]</b>	60	40	10



## 5. Pilotanlage KA Bottrop

### Ist der AFS-Abbau zeitlich möglich?

Ja, es ist davon auszugehen, dass bei 20°C und 12h Aufenthaltszeit weitgehend der schwer abbaubare CSB hydrolysiert wird.

$$\Delta X_S = \lambda_{Milieu} \cdot k_H \cdot \frac{X_S}{k_x + X_S / X_H} \cdot V_{BB}$$

### Ist der Stickstoffabbau möglich?

Klassischer Stickstoffabbau ist zuerst sauerstofflimitiert.

$$B_A = \frac{D_{O_2}}{z} \cdot (c_{S,O_2} - c_{O_2,Reaktor})$$

Man kann bei 20°C von etwa 2-10 g<sub>O<sub>2</sub></sub>/(m<sup>2</sup>\*d) ausgehen, je nach Grenzschichtdicke. Damit ist ein klassischer N-Abbau möglich aber unwahrscheinlich.

# 5. Pilotanlage KA Bottrop

## Betriebsdaten

## Korrelation zwischen Leitfähigkeit, Temperatur und Leistungsdichte

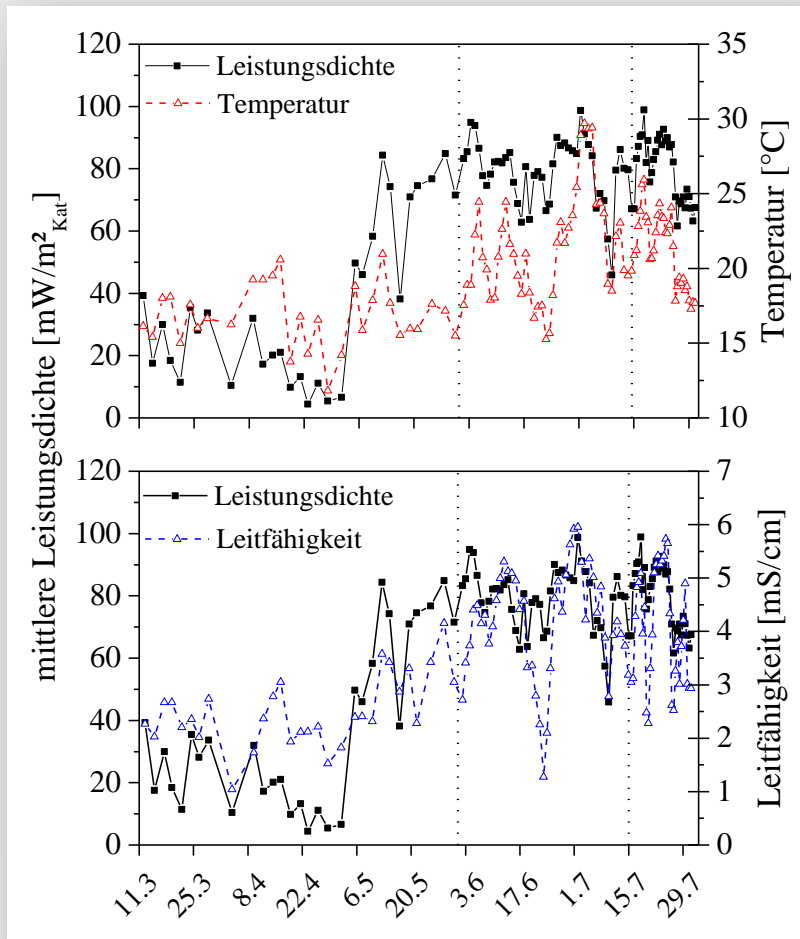


Abb.:Leistungsdichte in Abh. der Temperatur und der LF

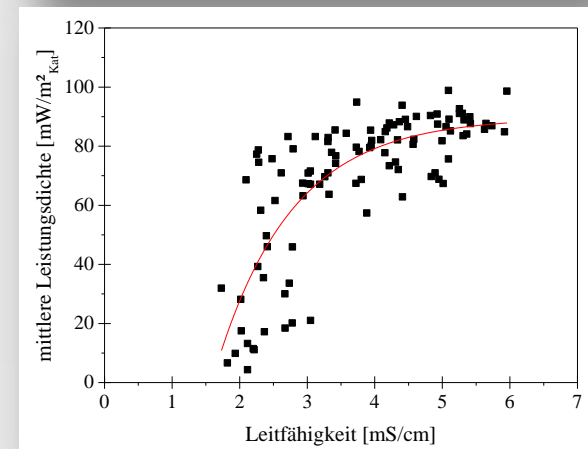
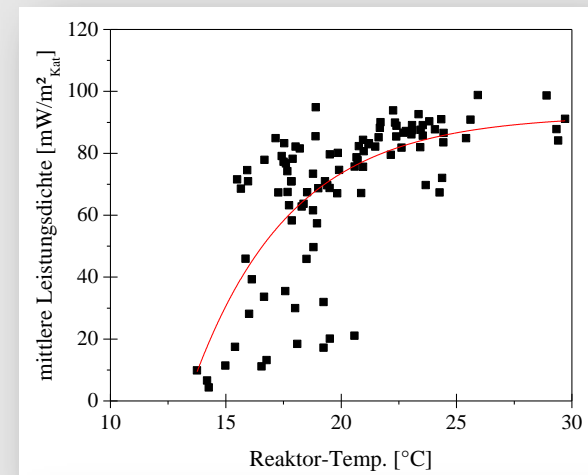


Abb.:Leistungsdichte korrelierend über Temperatur und LF

## 5. Pilotanlage KA Bottrop

### Betriebsdaten

Was können wir aus der Temperaturkurve ableiten?

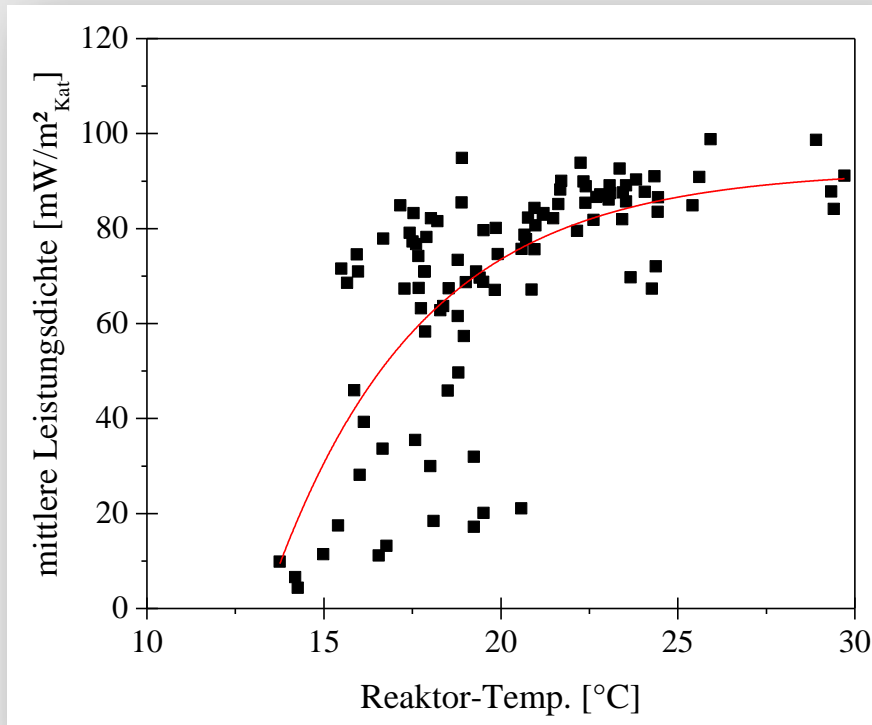


Abb.: Leistungsdichte korrelierend über Temperatur

Exponentielle Temperaturabhängigkeit Diffusionskoeffizient: 2,5%/°C

Exponentielle Temperaturabhängigkeit anaerobe Hydrolyse: 6,9%/°C

==> nicht diffusionslimitiert

## 5. Pilotanlage KA Bottrop

### Betriebsdaten

### Energierückgewinnung und Coulomb'sche Effizienz

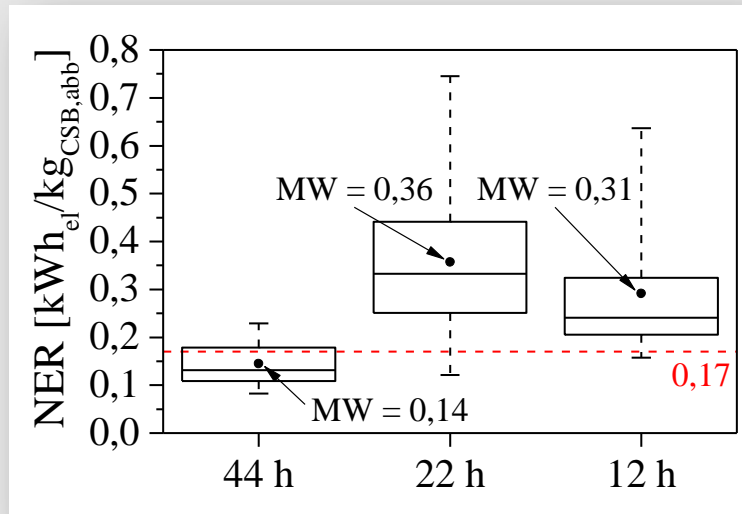


Abb.: Stromproduktion in Abh. des abgebauten CSBs

- Beste Ergebnisse bei HRT = 22 Std  
→ kein Substratmangel
- schwankende Leistung der einzelnen MBZ
- Trotz relativ geringer Leistungsdichten:  
→ NER und CE über dem Durchschnitt publizierter Werte für kommunales AW  
[z.B. DONG et al., 2015; FENG et al., 2014; GE et al., 2014]

## 5. Pilotanlage KA Bottrop

### Betriebsdaten

### Energierückgewinnung und Coulomb'sche Effizienz

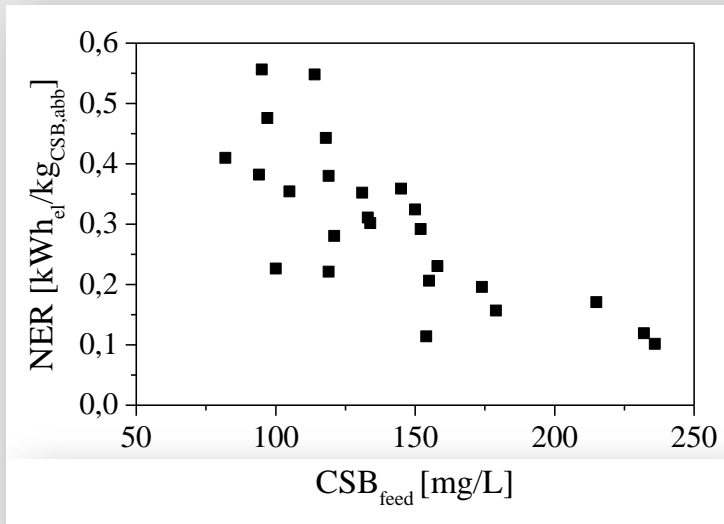


Abb.: Stromproduktion in Abh. des zulaufenden CSBs

**Unerwartet:**  
Negativer Zusammenhang zwischen CSB-Zulauf-Konz. und Energierückgewinnung / Effizienz

## 6. Statische Bilanzierung Modell-KA, 63.500 EW

### Randbedingungen

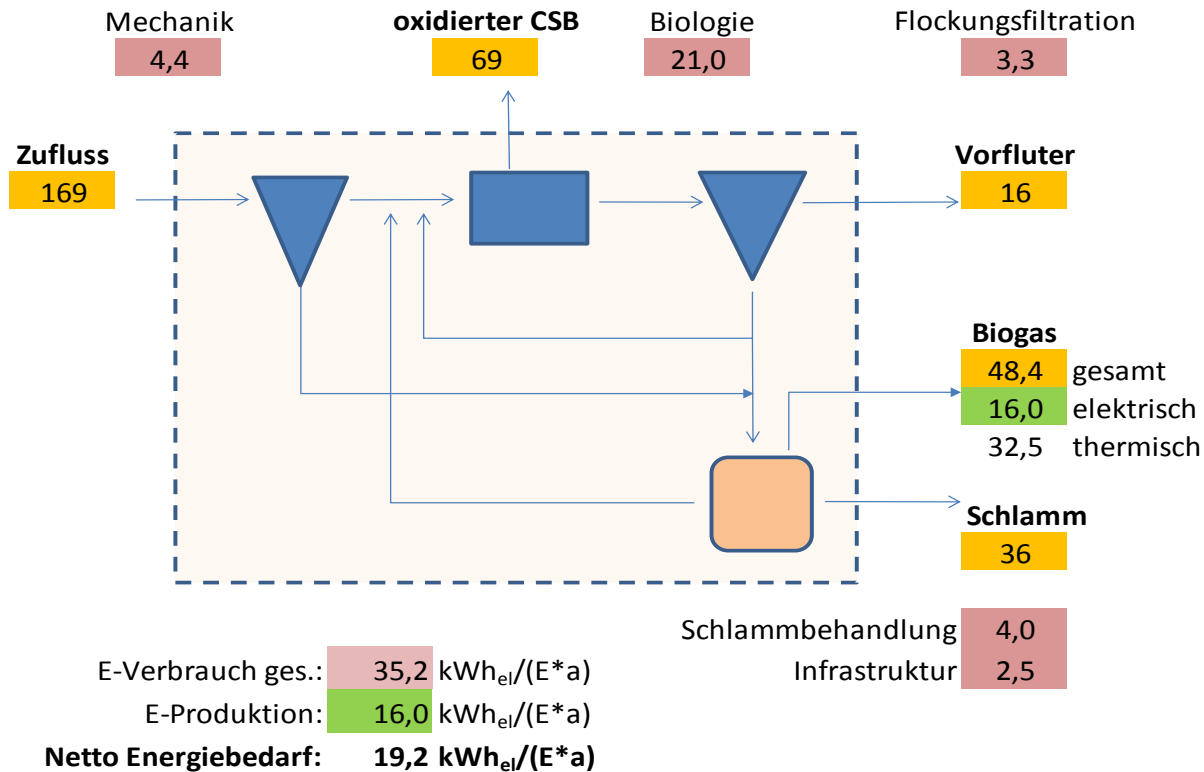
- Eingabedaten MBZ: experimentell bestimmte Daten
  - 1) HRT MBZ
  - 2) Abwasser-Temperatur
  - 3) CSB-Elimination
  - 4)  $N_{\text{ges}}$ -Elimination
  - 5) AFS-Elimination
  - 6) NER
  - 7) Prozentualer Zulauf MBZ
- Berechnung ÜS-Produktion im BB: CSB-Ansatz des neuen DWA-A131 (2016)
- Weitere Bezugs-Werte KA: DWA (2014) + MKULNV (2014)



## 6. Statische Bilanzierung Modell-KA, 63.500 EW

### Modellkläranlage ohne MBZ

#### Referenz-KA ohne MBZ



Produziert  
[kWh<sub>el</sub>/(EW\*a)]

Bedarf  
[kWh<sub>el</sub>/(EW\*a)]

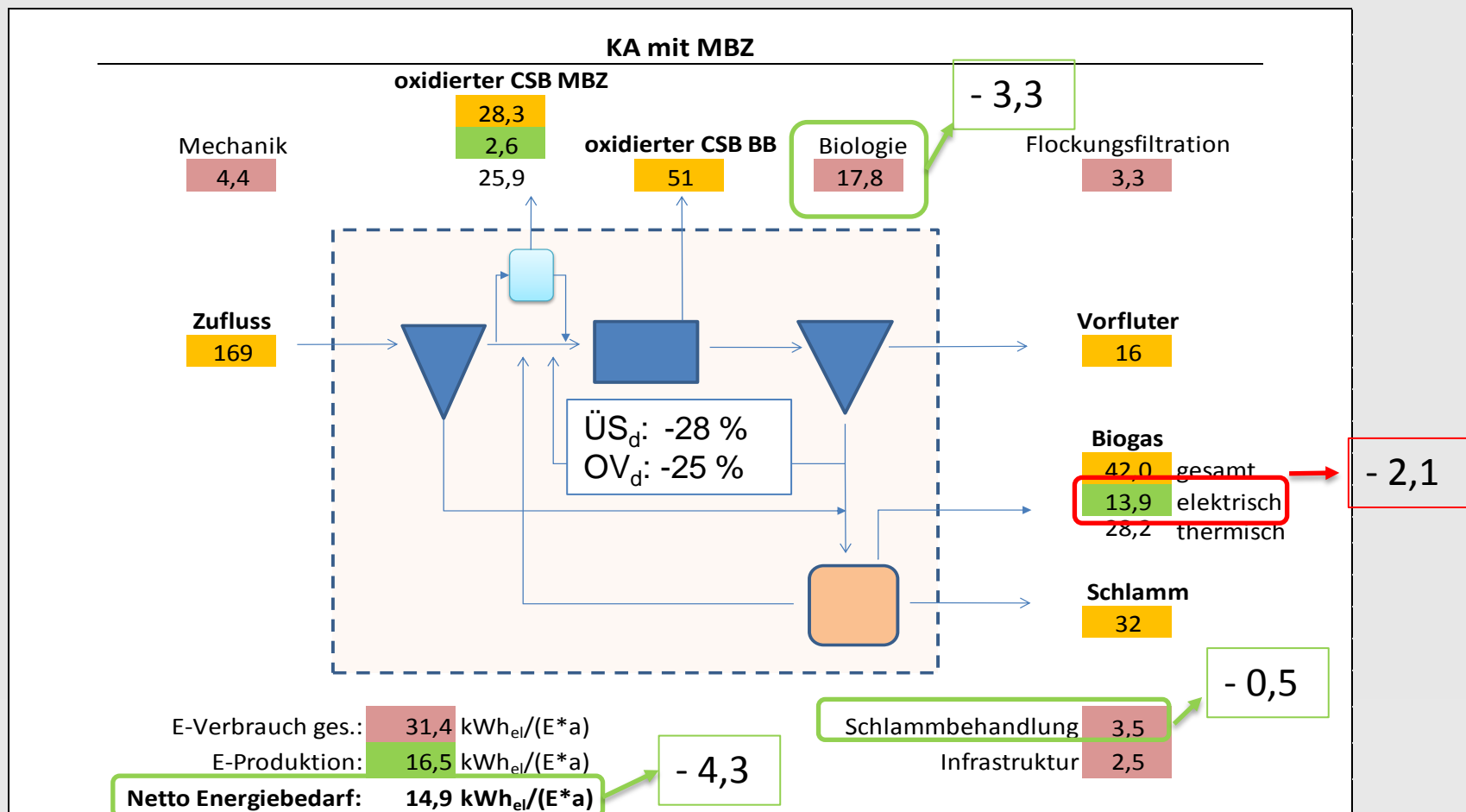
Theoretischer  
Energiegehalt\*  
[kWh/EW\*a)]

\* Annahme: 120g CSB/(E\*d) [DWA, 2003] | 3,86 kWh/kg CSB [OWEN, 1982]

## 6. Statische Bilanzierung Modell-KA, 63.500 EW

### Modellkläranlage mit MBZ

Szenario:  $HRT_{MBZ} = 22$  Std, Gesamt-CSB-Eli. MBZ = 24%,  $NER = 0,36 \text{ kWh}_{el}/\text{kg}_{CSB,abb}$



## 6. Statische Bilanzierung Modell-KA, 63.500 EW

### Modellkläranlage mit MBZ – weitere Szenarien

Tabelle: Szenarien zur Integration der MBZ in den Ablauf der Vorklärung bei verschiedenen HRT

Szenario	1	2	3
HRT [h]	44	22	12
Temp. [°C]	17,2	21,4	21,8
CSB <sub>eli</sub> [%]	67	24	14
N <sub>ges,eli</sub> [%]	57	28	9
AFS <sub>eli</sub> [%]	60	40	10
NER [kWh <sub>el</sub> /kg <sub>CSB,abb</sub> ]	0,14	0,36	0,31
B <sub>A</sub> [g <sub>CSB,zu</sub> /(m <sup>2</sup> *d)]	10,3	20,6	37,7
B <sub>R</sub> [g <sub>CSB,zu</sub> /(m <sup>3</sup> *d)]	231	459	838
Energie MBZ [kWh <sub>el</sub> /(E*a)]	2,91	2,64	1,30
Einsparung Schlammbehandlung	29 %	13 %	6 %
Einsparung Belüftung	69 %	25 %	14 %
Verlust Energie Faulgas	- 29 %	- 13 %	- 6 %
Reduktion Deni-Fracht	- 83 %	- 46 %	- 20 %
Gesamt-Gewinn KA	8,2 kWh <sub>el</sub> /(E*a) $\triangleq$ 23 %	4,3 kWh <sub>el</sub> /(E*a) $\triangleq$ 12 %	2,4 kWh <sub>el</sub> /(E*a) $\triangleq$ 7 %
EW-spezifisches MBZ-Volumen	369 L/E	185 L/E	101 L/E

## 6. Statische Bilanzierung Modell-KA, 63.500 EW

### Modellkläranlage mit MBZ – weitere Szenarien

Tabelle: Szenarien zur Integration der MBZ in den Ablauf der Vorklärung bei verschiedenen HRT

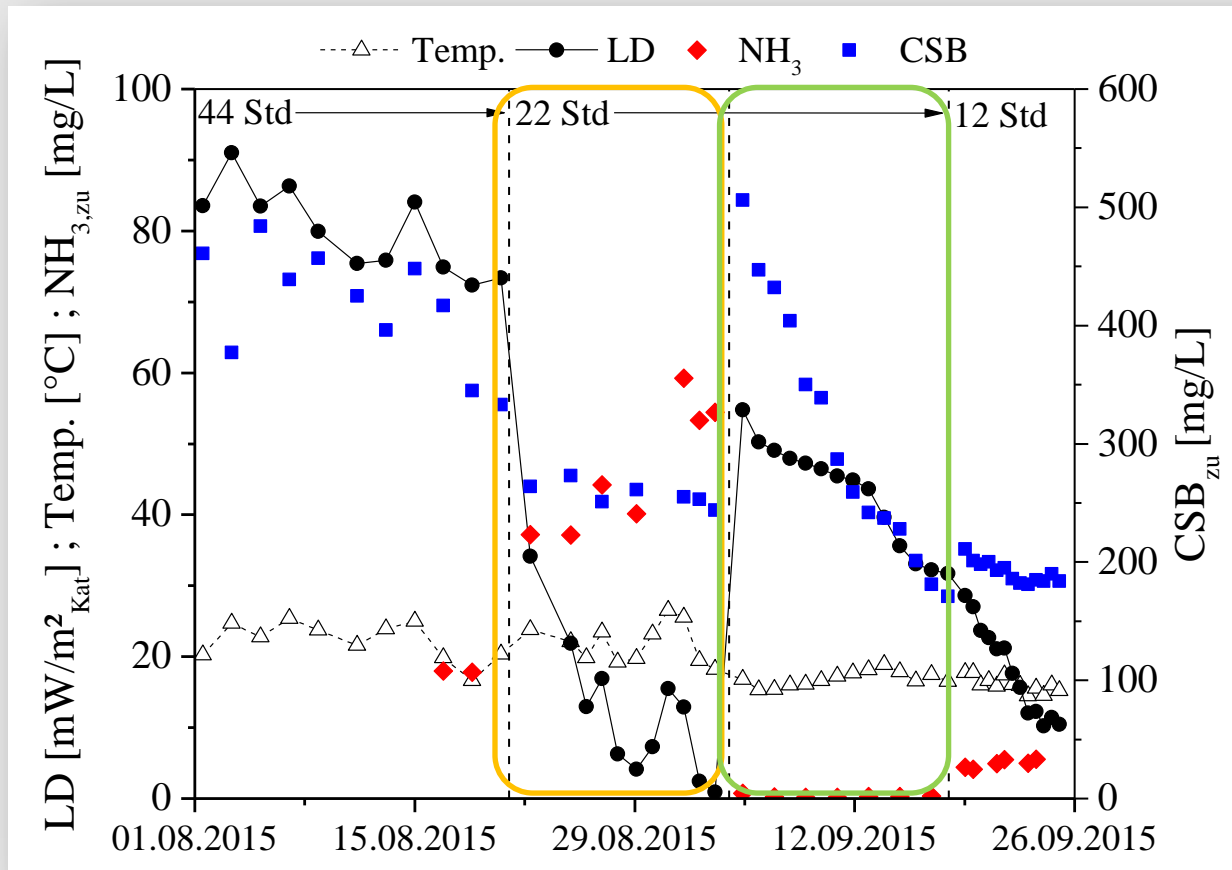
Szenario	1	2	3
HRT [h]	44	22	12
Temp. [°C]	17,2	21,4	21,8
CSB <sub>eli</sub> [%]	67	24	14
N <sub>ges,eli</sub> [%]	57	28	9
AFS <sub>eli</sub> [%]	60	40	10
NER [kWh <sub>el</sub> /kg <sub>CSB,abb</sub> ]	0,14	0,36	0,31
B <sub>A</sub> [g <sub>CSB,zu</sub> /(m <sup>2</sup> *d)]	10,3	20,6	37,7
B <sub>R</sub> [g <sub>CSB,zu</sub> /(m <sup>3</sup> *d)]	231	459	838
Energie MBZ [kWh <sub>el</sub> /(E*a)]	2,91	2,64	1,30
Einsparung Schlammbehandlung	29 %	13 %	6 %
Einsparung Belüftung	69 %	25 %	14 %
Verlust Energie Faulgas	- 29 %	- 13 %	- 6 %
Reduktion Deni-Fracht	- 83 %	- 46 %	- 20 %
Gesamt-Gewinn KA	8,2 kWh <sub>el</sub> /(E*a) $\triangleq$ 23 %	4,3 kWh <sub>el</sub> /(E*a) $\triangleq$ 12 %	2,4 kWh <sub>el</sub> /(E*a) $\triangleq$ 7 %
EW-spezifisches MBZ-Volumen	369 L/E	185 L/E	101 L/E

Investkosten mind. 25-100€/EW, Re-Invest über Stromkosten 50-100a !

## 7. Betrieb mit Trübwasser des Voreindickers

### Einfluss des Trübwassers/Schlammwassers auf die Leistungsdichte

Hemmung des anaeroben Prozesses durch Ammoniak

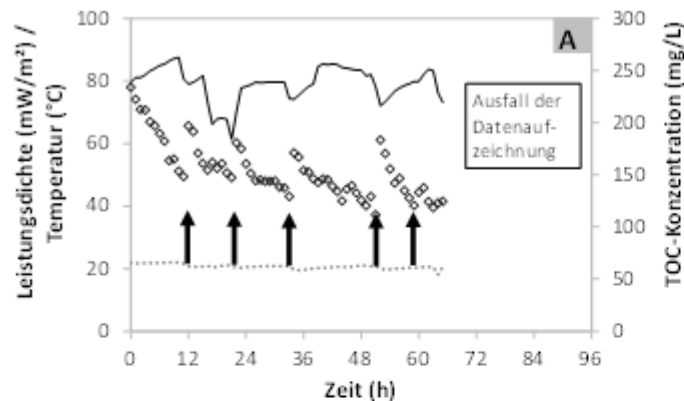


$$[NH_3] = \frac{[NH_4^+] * 10^{pH}}{e^{\frac{6344}{273+T}} + 10^{pH}}$$

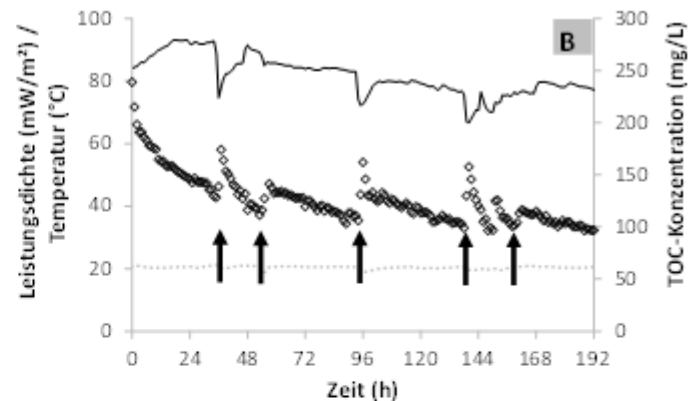
Deutliche Hemmung durch erhöhte Ammoniak-Konzentrationen (Schlammwasser!)

## 8. Online-Steuerung einer MBZ

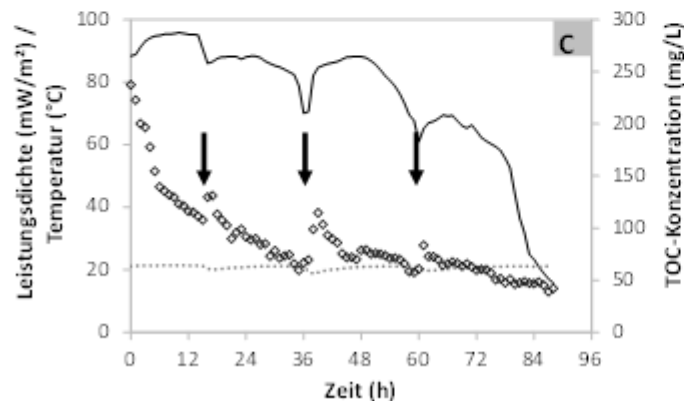
### Basierend auf Online TOC-Messung in Abhängigkeit der TOC-Abbauraten (Kletke et al., 2017)



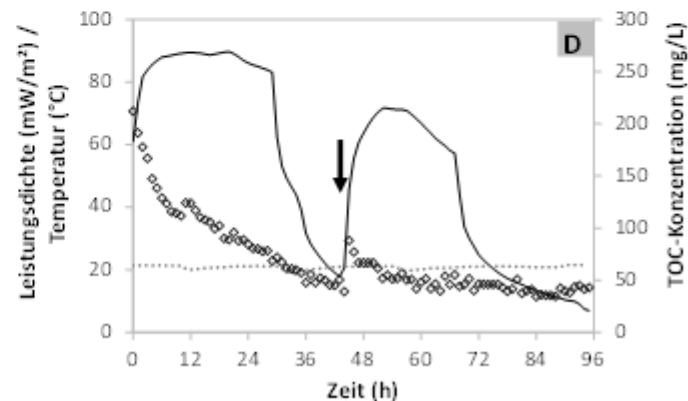
— Leistungsdichte (mW/m²) .... Temperatur (°C) ♦ TOC-Konz. (mg/L)



— Leistungsdichte (mW/m²) .... Temperatur (°C) ♦ TOC-Konz. (mg/L)



— Leistungsdichte (mW/m²) .... Temperatur (°C) ♦ TOC-Konz. (mg/L)



— Leistungsdichte (mW/m²) .... Temperatur (°C) ♦ TOC-Konz. (mg/L)



## 8. Zusammenfassung und Ausblick

### Was können wir von MBZ erwarten und was nicht?

- CSB-Elimination von 15-70% bei HRT von bei HRT von 12-44h ( $T \sim 20^\circ\text{C}$ )
- Nges und AFS-Elimination in ähnlicher Größenordnung wie CSB-Eli (!)
- Raumbelastungen von  $B_R = 200-800 \text{ g}_{\text{CSB}}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$  bzw. Flächenbelastungen von  $B_A = 10-40 \text{ g}_{\text{CSB}}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$
- stabiler und effizienter Betrieb auch bei sehr niedrigen CSB-Konzentrationen von  $< 150 \text{ g}_{\text{CSB}}/\text{m}^3$  möglich
- Aus Kostengründen muss zukünftig auf Platin als Katalysator verzichtet werden ( $1600 \text{ €/m}^2$ ), Kathoden auf Edelstahl-Aktivkohle Basis ( $15 \text{ €/m}^2$ )
- Systeme zur Spannungssteigerung notwendig
- Einsparungen und zusätzlicher Energiegewinn durch MBZ ( $2,5-8 \text{ kWh}_{\text{el}}/(\text{EW} \cdot \text{a})$ ) größer als Verluste durch Faulgasreduktion
- Entwicklung von Reaktorkonfigurationen zur Nutzung bereits vorhandener Beckenvolumina → Reduktion zusätzlicher Infrastruktur

## Danksagung

Die Autoren bedanken sich beim **MKULNV** für die Finanzierung des Projektes und das vertrauensvolle Verhältnis während der Projektlaufzeit, beim **LANUV** für die vertiefte fachliche Begleitung und bei allen Projektpartnern für die wertvollen Diskussionen und Anregungen.

Ministerium für Klimaschutz, Umwelt,  
Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz  
des Landes Nordrhein-Westfalen



Landesamt für Natur,  
Umwelt und Verbraucherschutz  
Nordrhein-Westfalen



**EMSCHER** **LIPPE**  
GENOSSENSCHAFT EQLV<sub>de</sub> VERBAND

Ein besonderer Dank gilt dem  
**Betriebspersonal der Kläranlage  
Bottrop**  
(Emschergenossenschaft/Lippeverband)

RUB - Siedlungswasserwirtschaft  
[heinz.hiegemann@rub.de](mailto:heinz.hiegemann@rub.de)



# Literatur

Dong Y., Qu Y., He W., Du Y., Liu J., Han X., Feng Y. (2015), „A 90-liter stackable baffled microbial fuel cell for brewery wastewater treatment based on energy self-sufficient mode“; *Bioresource Technology* **195**, pp. 66 - 72

DWA: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.; „Phosphor im Visier: 26. Leistungsvergleich kommunaler Kläranlagen 2013“; Gesellschaft zur Förderung der Abwassertechnik e.V., Hennef, **2014**

DWA: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.; Arbeitsblatt DWA-A 131 – „Bemessung von einstufigen Belebungsanlagen“; Gesellschaft zur Förderung der Abwassertechnik e.V., Hennef, **2016**

Feng Y., He W., Liu J., Wang X., Qu Y., Ren N. (2014); “A horizontal plug flow and stackable pilot microbial fuel cell for municipal wastewater treatment”; *Bioresource Technology* **156**, pp. 132 - 138

Ge Z., Li J., Xiao L., Tong Y., He Z. (2014); “Recovery of electrical energy in microbial fuel cells”; *Environ. Sci. Technol. Lett.* **1**, pp. 137 – 141

Hiegemann H., Lübken M., Wichern M., Schulte P., Schmelz K.-G., Gredigk-Hoffmann S. (2015); „Optimierung der mikrobiellen Brennstoffzellentechnik für den Kläranlagenbetrieb“; *Gewässerschutz – Wasser – Abwasser* **236**, pp. 20/1 – 20/15

## Literatur

Hiegemann H., Herzer D., Nettmann E., Lübken M., Schulte P., Schmelz K.-G., Gredigk-Hoffmann S., Wichern M. (2016); „An integrated 45 L pilot microbial fuel cell system at a full-scale wastewater treatment plant”; *Bioresource Technology* **218**, pp. 115 – 122

Jiang D., Curtis M., Troop E., Scheible K., McGarth J., Hu B., Suib S., Raymond D., Li B. (2011); “A pilot-scale study on utilizing multi-anode/cathode microbial fuel cells (MAC MFCs) to enhance the power production in wastewater treatment”; *International Journal of Hydrogen Energy* **36**, pp. 876 - 884

Teichgräber & Hetschel (2016); „Bemessung der einstufigen biologischen Abwasserreinigung nach DWA-A 131“; *KA Korrespondenz Abwasser, Abfall* **63** (2), pp. 97 - 102

MKULNV: Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes NRW; „Optimierung des Energieertrages kommunaler Kläranlagen durch prozess- und standortbezogene Verbundstrategie“; Wuppertal, **2014**

Owen W.F.; “Energy in Wastewater Treatment“; Prentice-Hall, Inc.; Engelwood Cliffs, New Jersey; **1982**

Yu J., Seon J., Park Y., Cho S., Lee T. (2012); “Electricity generation and microbial community in a submerged-exchangeable microbial fuel cell system for low-strength domestic wastewater treatment”; *Bioresource Technology* **117**, pp. 172 – 179