

Entwicklung und Bilanzierung beheizter Festbetteinrichtungen zur Leistungssteigerung vorhandener Abwasserteichanlagen im Winter (AZ 21755/02-23)

Abschlussbericht

Gefördert durch:

Deutsche Bundesstiftung Umwelt

**Weitere Förderer und
Kooperationspartner:**

Abwasserbetrieb Weimar

ENGENIOS AG Nohra/Weimar

Institut für Umweltmedizin Erfurt

Themenverantwortlicher:

**Armin Schäfer,
Bildung Beratung Beschäftigung
(bbb) e. V.
Alexander-Puschkin-Platz 6
99510 Apolda**

Apolda, im August 2008

Verantwortliche für ...

... den technischen Aufbau:	Herr Besuch
... die konstruktive Gestaltung des Festbettes:	Herr Dipl.-Ing. Gröbel
... die Versuchsdurchführung:	Herr Dipl.-Ing. (FH) Jens Voigtländer
... die mikrobiologische Begleitung:	Herr Dipl.-Biol. Stumm
... das Gutachten zum Wärmebedarf:	Herr Dr.-Ing. Schwerdtfeger
... die wissenschaftliche Begleitung:	Herr Prof. Dr.-Ing. Gottfried Voigtländer
Ort der Versuchsdurchführung:	Kläranlage der Stadt Weimar
Zeitraum der Versuchsdurchführung:	Januar 2007 bis Juli 2008

Inhalt

1. Problemstellung
2. Zielstellung
3. Angewandte Methoden zur Lösungsfindung
4. Entwicklung und Konstruktion von technischen Gebilden „beheizte Festbetten“ für die Versuchsanlagen
 - 4.1 Beheizte Festbetten mit Warmwasser als Energiequelle
 - 4.2 Beheizte Festbetten mit Elektroenergie betrieben
5. Beschreibung der Versuchsanlagen
 - 5.1 In-situ-Versuchsanlage mit Warmwasserheizung zum Stickstoffabbau
 - 5.2 Laboranlage mit Elektroenergieheizung zum Kohlenstoffabbau
 - 5.3 In-situ-Versuchsanlage mit Elektroenergieheizung zum Stickstoffabbau
6. Darstellung relevanter Versuchsergebnisse
 - 6.1 Vorbemerkungen
 - 6.2 In-situ-Versuche im Zeitraum von Januar bis Juli 2007
 - 6.3 In-situ-Versuche im Zeitraum von Januar bis Mai 2008
 - 6.4 Laborversuche im Zeitraum von Dezember 2007 bis Mai 2008
 - 6.5 Mikrobiologische Begleitung
7. Diskussion der Versuchsergebnisse
 - 7.1 Konstruktion des technischen Gebildes „beheizte Festbetten“
 - 7.2 Bestätigung des Verfahrensanspruches
 - 7.3 Zum Energiebedarf beheizter Festbetten
8. Zusammenfassung

Anlagen

Anlage 1: Erster Zwischenbericht (Zeitraum von Januar bis Juli 2007)

Anlage 2: Mikrobiologische Untersuchungen zur Beeinflussung der Nitrifikationsleistung und der Kohlenstoffabbauleistung vom 17.07.2008

Anlage 3: Theoretische Abschätzung des Wärmebedarfs von beheizten Festbetten vom 23.06.2008

Anlage 4: Patentschrift „Beheizte Festbetten zur Steigerung der Leistungsfähigkeit biologischer Kläranlagen“ CO2f 3/10 (2006.01) DE 10 2007 021 887 B3 2008.03.06

1. Problemstellung

Die in der kommunalen Abwasser- und Schlammbehandlung genutzten mikrobiologischen Prozesse sind u. a. abhängig von der Substratkonzentration und insbesondere von der Temperatur. Dieser Erkenntnis tragen z. B. die gesetzlich fixierten Anforderungen an das gereinigte Abwasser, das in öffentliche Vorfluter eingeleitet wird, Rechnung.

Nach dem Bundesgesetzblatt Jahrgang 1999 Teil I Nr. 6 werden für mittlere und große Kläranlagen Mindesteinleitungsgrenzwerte für Ammoniumstickstoff und Gesamtstickstoff bei Abwassertemperaturen von 12°C und größer im Ablauf des biologischen Reaktors der Abwasserbehandlungsanlage festgelegt. Mit anderen Worten heißt das, bei Abwassertemperaturen < 12°C müssen diese stickstoffbezogenen Mindesteinleitungswerte nicht erfüllt werden.

Weniger konkret stellt sich die Situation bei den kohlenstoffbezogenen Mindesteinleitungsgrenzwerten dar. Deren Einhaltung wird unabhängig von den wirksamen Abwassertemperaturen im biologischen Reaktor der Abwasserbehandlungsanlage gefordert. Bei kleinen Kläranlagen mit sehr volumenaufwendigen biologischen Reaktoren, wie sie z. B. in Oxidationsteichanlagen vorkommen, kühlt sich das Abwasser teilweise bis zur 0°C-Grenze ab. Trotzdem müssen die kohlenstoffbezogenen Mindesteinleitungsgrenzwerte nach o. g. Bundesgesetzblatt eingehalten werden.

Unter Fachleuten ist die Ambivalenz dieser Anforderung bekannt. Beispielsweise wird in dem von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt in Auftrag gegebenen Abschlussbericht „Entwicklung von kleinen getauchten Festbetteinrichtungen für belüftete Oxidationsteiche sowie qualitativer und quantitativer Nachweis ihrer Funktionstüchtigkeit von Mai 2004 bis April 2006“ festgestellt:

- Zusätzlich eingebaute Festbetten, die in belüfteten Oxidationsteichen installiert werden, führen zu temperaturabhängigen Leistungssteigerungen.

- Bei niedrigen Abwassertemperaturen von $\leq 2^{\circ}\text{C}$ sinkt die Leistungsfähigkeit belüfteter Oxidationsteiche mit eingebauten Festbetten unter die vorgegebenen Grenzwerte.

Die Problematik der leistungsbegrenzenden niedrigen Abwassertemperaturen ist bei weniger volumenaufwendigen biologischen Reaktoren infolge der ursprünglichen relativ hohen Abwassertemperaturen von $> 10^{\circ}\text{C}$ nicht relevant. Bei Aufenthaltszeiten von $\leq 1\text{d}$ in den biologischen Reaktoren werden normalerweise keine kritischen Temperaturen erreicht.

Ein weiteres Problem folgt aus der Erkenntnis, dass ausreichend hohe Temperaturen nicht nur die Funktionstüchtigkeit der Abwasser- und Schlammbehandlungsanlagen positiv beeinflussen. Sie können auch, wie aus der anaeroben Schlammbehandlung bekannt, zu spürbaren Volumeneinsparungen der Reaktoren/Fermenter führen.

Da Temperatursteigerungen in den volumenintensiven Anlagen der biologischen Abwasserbehandlung gleichzeitig energieintensiv sind, stellen sie vordergründig keine zukunftsorientierten Lösungen dar. Ihre Bedeutung könnte jedoch durch die Bereitstellung energiearmer, temperatursteigernder Konzepte verbessert werden.

2. Zielstellung

Die Ziele dieses Forschungsprojektes leiten sich aus der beschriebenen mehrschichtigen Problematik ab. Mit der Entwicklung und Bereitstellung von beheizten Trägermaterialien für die in der Abwassertechnik bekannten Biofilntechnik kann der negative Einfluss kalter Abwässer auf die Reinigungsleistung der Bakterien gemindert werden. Dabei sollte die gezielte Beheizung des Trägermaterials, im folgenden als beheizte Festbetten (BFB) bezeichnet, ohne eine spürbare Erwärmung des Abwassers erfolgen.

Schwerpunktmäßig geht es um

- die Entwicklung und Konstruktion von beheizten Festbetten, die als eigenständige technische Gebilde in einem biologischen Reaktor betrieben werden. Alternativ können sie auch in kombinierter Verfahrensweise in Belebtschlamm- oder gleichgestellten Verfahren zum Einsatz kommen. Im letzten Fall konzentriert sich die Reinigungsleistung der BFB nur auf die Belastungsspitzen.
- den Einsatz von BFB zur Unterstützung der Aufrechterhaltung der Funktionstüchtigkeit biologischer Reaktoren. Zur Einhaltung kohlenstoffbezogener Grenzwerte sollen die Oberflächentemperaturen der BFB $> 2^{\circ}\text{C}$ und bei stickstoffbezogenen Grenzwerten $> 10^{\circ}\text{C}$ sein.
- die Bestätigung der Hypothese, wonach durch den Einbau von BFB in biologische Reaktoren deren Volumen spürbar verringert werden kann.
- die Erfassung des Energiebedarfs zur Aufrechterhaltung der Funktionstüchtigkeit biologischer Reaktoren beim Einsatz von BFB im Vergleich zu technischen Lösungen, die von einer Beheizung des gesamten Reaktorinhalts, wie teilweise aus der industriellen Abwasserbehandlung bekannt, ausgehen.

3. Angewandte Methoden zur Lösungsfindung

Der verfügbare Stand von Wissenschaft und Technik wurde über ein *Literatur- und Patentstudium* ermittelt.

Die Notwendigkeit und Begründung zur Durchführung dieses Forschungsprojektes folgt aus dem Abschlussbericht des hauptsächlich von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt gesponserten Projektes „Entwicklung von kleinen getauchten Festbetteinrichtungen für belüftete Oxidationsteiche sowie qualitativer und quantitativer Nachweis ihrer Funktionsfähigkeit von Mai 2004 bis April 2006“. Darauf bezogen, wurden im Winter 2005/2006 in einem Belebungsbecken der Kläranlage

(KA) Weimar *Vorversuche* mit dem Ziel durchgeführt, die Temperaturabhängigkeit sessiler Nitrifikanten auf Kunststofffestbettelementen zu qualifizieren.

Für die Entwicklung der BFB wurden aus Zeitgründen reduzierte Ansätze (Anforderungsliste) von der *Konstruktionswissenschaft* entliehen. Dabei kam die Methode „*TRIAL and ERROR*“ zur Anwendung.

Für das technische Gebilde BFB war in erster Näherung eine für KA relevante Warmwasserheizung vorgesehen. Dazu wurden am Ende des Winters 2006/2007 *in-situ-Versuche* in einem Belebungsbecken der KA Weimar durchgeführt. In diesem Winter waren die Luft- und folglich auch die Abwassertemperaturen ungewöhnlich mild. Nähere Informationen können dem als Anlage 1 beigefügten Zwischenbericht „Entwicklung und Bilanzierung beheizter Festbetteinrichtungen zur Leistungssteigerung vorhandener Abwasserteichanlagen im Winter“ entnommen werden. Daraufhin wurde im Winter 2007/2008 dieser Versuch bei nicht beeinflussbaren ebenfalls relativ milden Lufttemperaturen wiederholt. Zur Stützung der Ergebnisse wurde ein zweiter *in-situ-Versuch* mit BFB, die mit Elektroheizung betrieben wurden, durchgeführt.

Beide *in-situ-Versuche* dienten Erkenntnisgewinnen zur temperaturbedingten Stickstoffreduzierung und dem dazu benötigten Energiebedarf. Die gewonnenen Ergebnisse wurden durch *theoretisch gestützte Gutachten* zur Mikrobiologie und zum Wärmebedarf begleitet.

Zur Bestimmung des BFB-Einflusses auf die Kohlenstoffreduzierung wurde ab Dezember 2007 eine *Laboranlage* nach dem Fermenterprinzip betrieben. Um das mechanisch vorgereinigte Abwasser mit $> 10^{\circ}\text{C}$ auf ca. 2°C abzukühlen, mussten mehrere Kältemaschinen hintereinander geschaltet werden. Das darauf bezogene *mikrobiologische Gutachten* konzentriert sich auf die temperaturabhängigen Stoffumsätze der sich bildenden Biomasse.

4. Entwicklung und Konstruktion von technischen Gebilden “beheizte Festbetten” für die Versuchsanlagen

In den Versuchsdurchführungen

- in-situ-Versuche mit Warmwasser- und Elektroenergiebeheizung
- Laborversuch mit Elektroenergiebeheizung

kamen technische Gebilde (tG) unterschiedlicher Größe und mit verschiedenen Materialien zum Einsatz. Die BFB der in-situ-Versuche waren zylinderförmig ausgebildet und hatten im Kern angebrachte Heizvorrichtungen. Diese wurden von Wärmedämmmaterial aus gesinterten Glaskugeln oder von Gasbeton ummantelt. Die BFB der Laboranlage wurden mit gesintertem porösen Steinmaterial ohne stärkere Wärmedämmeigenschaften umhüllt.

4.1 Beheizte Festbetten mit Warmwasser als Energiequelle

Im Jahr 2007 erfolgte kurzfristig die Entwicklung und Konstruktion eines BFB für den geplanten in-situ-Versuch in der KA Weimar. Für diesen stand ein nitrifikationsbetriebenes Belebungsbecken mit Druckluft zur Verfügung.

Für die Entwicklung des versuchsorientierten BFB durch die ENGENIOS AG war eine vereinfachte Anforderungsliste verfügbar. Deren Schwerpunkte konzentrierten sich auf

- die Beachtung der Erkenntnisse, die im Rahmen von Vorversuchen in einem Belebungsbecken der KA Weimar vom 07.12.2005 bis zum 26.04.2006 gewonnen wurden (Grundlage des Forschungsantrages bei der Deutschen Bundesstiftung Umwelt),
- die Berücksichtigung der Randbedingungen des verfügbaren Belebungsbeckens,
- die Verwendung und ggf. Anpassung des in der KA Weimar nutzbaren Heizwassers,
- die Berücksichtigung von heizmediumführenden Materialien im BFB, die sich durch eine hohe Wärmeleitfähigkeit auszeichnen,
- die Verwendung oder Entwicklung von äußeren Festbettmaterialien, welche

- als Wärmedämmung das heizmediumführende Material umschließen sollen,
- als Siedlungsfläche für die Mikroorganismen geeignet sind (raue Oberfläche, biologisch verträglich u. a.),
- aus Materialien mit geringer Wärmeleitfähigkeit bestehen und weitgehend eine gleichmäßige Wärmeabgabe über die Länge des BFB ermöglichen,
- Konzeptlösungen mit preisgünstigen Ansätzen bieten.

Bild 1 zeigt die ausgewählte, allerdings unbeheizte Vorzugslösung vor dem Einbau in das Belebungsbecken. Aus Bild 2 ist das beheizte, bereits in Gebrauch befindliche ausgebaute Festbett zu erkennen. Gleichzeitig wird die wärme gedämmte Zuführungsleitung des Heizwassers zu dem Festbett dokumentiert.

Das Festbettelement ist $l = 1000\text{mm}$ lang. Es besteht im Querschnitt aus einem heizmediumführenden Edelmetallrohr mit dem Außendurchmesser $d = 12\text{mm}$. Dieses Rohr wird von einem aus gesinterten Glaskügelchen bestehenden Dämmrohr $d = 70\text{mm}$ umhüllt.

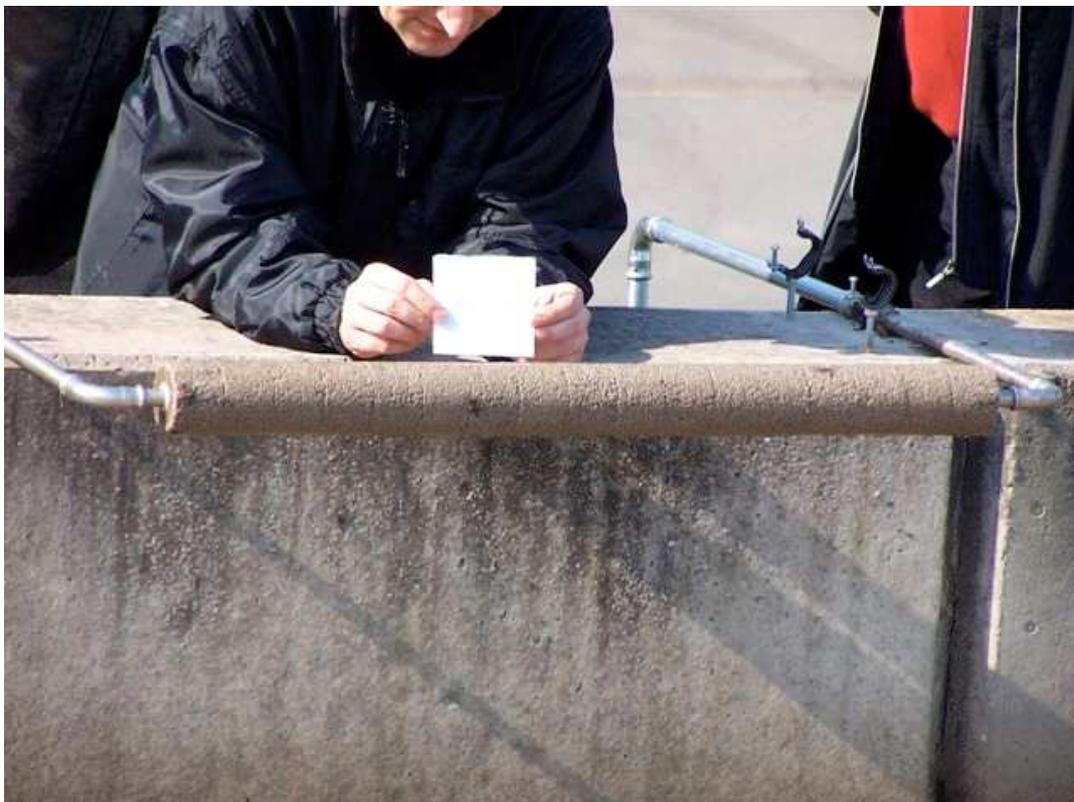


Bild 1:
Vorzugslösung eines unbeheizten Festbettes



Bild 2:
Vorzugslösung eines bereits in Betrieb befindlichen ausgebauten beheizten Festbettes mit Heizwasser-Zuführungsleitung

Im Rahmen der in-situ-Versuchsdurchführung wurden drei Festbettelemente eingebaut:

- unbeheizt – die Temperatur entspricht der Abwassertemperatur im Belebungsbecken;
- beheizt – mit einer Temperatur A;
- beheizt – mit einer Temperatur B.

Jedes Element besitzt eine Oberfläche

$$A_0 = 2 \pi \cdot r \cdot l = 2 \cdot 3,14 \cdot 0,035\text{m} \cdot 1,00\text{m} = \underline{\underline{0,22\text{m}^2}}$$

Die effektive Oberfläche ist wegen ihrer körnigen Struktur als Besiedlungsfläche für die Mikroorganismen deutlich größer. Aus Bruchmaterial konnten Eindringtiefen der Biomasse bis ca. 5 mm ermittelt werden.

4.2 Beheizte Festbetten mit Elektroenergiebetrieb

4.2.1 Laboranlage

Durch die geringen geometrischen Abmessungen konnten die BFB nicht mit Warmwasser versorgt werden. Deshalb kamen im Ergebnis mehrerer Experimente elektroenergiebetriebene Heizelemente, wie sie von Aquarien bekannt sind, zum Einsatz. Diese wurden mit gesinterter poröser Steinmaterial als Haftungsfläche für die Biomasse ummantelt. Auf deren geringe Wärmedämmfähigkeit wurde bereits hingewiesen. Die Oberfläche eines Elementes betrug etwa

$$A_0 = 2 \pi \cdot r \cdot l = 2 \cdot 3,14 \cdot 0,015\text{m} \cdot 0,05\text{m} = \underline{0,005\text{m}^2}$$

Die darauf bezogene Optik zeigt Bild 3.



Bild 3:
Vorzugslösung eines BFB der Laboranlage

4.2.2 In-situ-Anlage

Wie noch gezeigt wird, kam es mit der unter Punkt 4.1 beschriebenen Heiztechnik sowohl im Winter 2006/2007 als auch 2007/2008 infolge meist messtechnisch bedingter Unregelmäßigkeiten zu teilweise unverträglichen Ergebnissen. Deshalb wurde vom Abwasserbetrieb Weimar ein alternatives BFB mit Elektroenergiebetrieb nach dem in der Laboranlage praktizierten Vorbild entwickelt. Als Wärmedämmmaterial kam Gasbeton zum Einsatz. Bild 4 zeigt das tG.

Vergleichsweise ergab sich eine verfügbare Oberfläche von

$$A_0 = 2 \pi \cdot r \cdot l = 2 \cdot 3,14 \cdot 0,034\text{m} \cdot 0,21\text{m} = \underline{\underline{0,045\text{m}^2}}$$



Bild 4:
Vorzugslösung eines BFB der elektroenergiebetriebenen in-situ-Anlage

5. Beschreibung der Versuchsanlagen

5.1 In-situ-Versuchsanlage mit Warmwasserheizung zum Stickstoffabbau

Zu Beginn des Jahres 2007 wurde die erste Versuchsanlage in einem Belebungsbecken der KA Weimar installiert und in Betrieb genommen. Diese Anlage bestand aus:

- der Abnahmevorrichtung für warmes Nutzwasser aus dem Heizwasserkreislauf der Kläranlage;
- der Transport- und Rücktransportleitung für das gesamte Warmwasser über die Armaturen eines Steuer-, Regel- und Messschrankes zu den Festbetten im Belebungsbecken;
- einem unbeheizten und zwei beheizten Festbetten.

Die Ausgangstemperatur des für die Versuche benötigten Warmwassers wurde auf ca. 30°C festgelegt. Dieses wurde aus dem Vorlaufwasser des Heizwasserkreislaufes der Kläranlage mit einer Temperatur von ca. 70°C entnommen. Zur Abkühlung war ein Wärmeaustauscher und ein rundes Ausdehnungsgefäß, wie in Bild 5 dargestellt, erforderlich.



Bild 5:
Heizwasserentnahme aus dem Kläranlagenkreislauf. Mitte-links ist der Wärmeaustauscher und rechts das runde Ausdehnungsgefäß angeordnet.

Das ca. 30°C warme Wasser floss, wie aus [Bild 6](#) ersichtlich, über eine isolierte ca. 60m lange zweirohrige Vor- und Rücklaufleitung, oberirdisch zu einem Steuer-, Regel- und Messschrank, der direkt am Belebungsbecken postiert war. Diese Situation beschreibt [Bild 7](#). Im Steuer-, Regel- und Messschrank wurde das 30°C warme Wasser auf zwei definierte unterschiedliche Temperaturen < 30°C transformiert. Dieser Prozess wurde automatisch gemessen und aufgezeichnet. Die verfügbare Technik wurde der Regel- und Steuertechnik, wie sie im Wohnungsbau Anwendung findet, entnommen.

Unabhängig davon wurde die Abwassertemperatur im Belebungsbecken dokumentiert.

Das definierte Warmwasser floss durch die BFB und zurück über die Armaturen des Steuer-, Regel- und Messschrankes in den Heizkreislauf der Kläranlage. Dabei wurde der in den BFB verbrauchte Energieaufwand gemessen und aufgezeichnet. Aus [Bild 8](#) ist der Betrieb aller drei Festbetten ersichtlich.



Bild 6:
Warmwasserleitung einschließlich Rücklaufleitung vom Heizwasserkreislauf der Kläranlage bis zum Steuer-, Regel- und Messschrank



Bild 7:
Steuer-, Regel- und Messschrank



Bild 8:
Ein unbeheiztes und zwei beheizte Festbetten in Betrieb

Die Anlage wurde Mitte 2007 wegen gestiegener Abwassertemperaturen außer Betrieb genommen. Nach Änderungen an der Steuerungstechnik erfolgte die erneute Inbetriebnahme von Dezember 2007 bis April 2008.

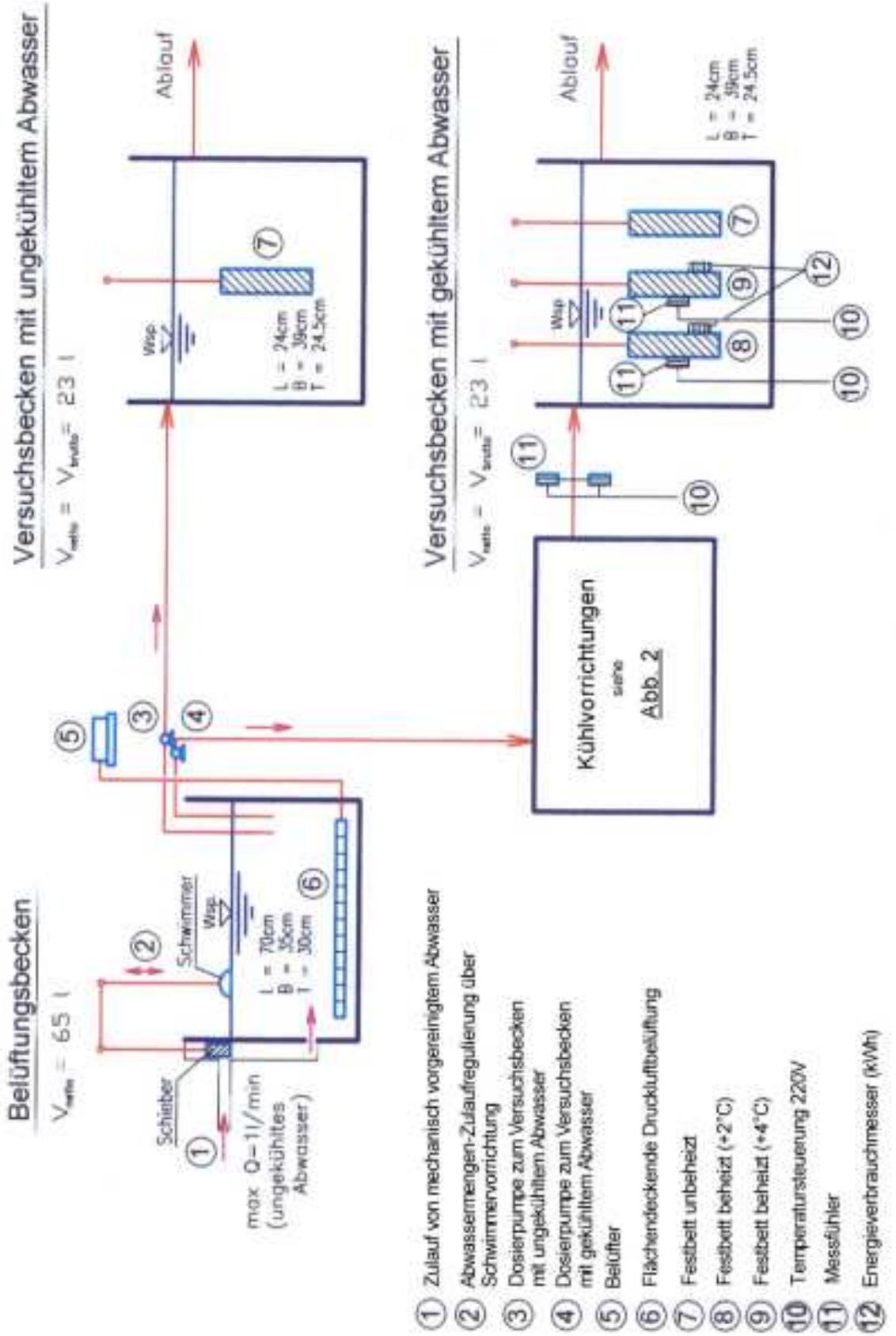
5.2 Laboranlage mit Elektroenergieheizung zum Kohlenstoffabbau

Die Versuche im Kleinmaßstab wurden in einem zentralen Pumpwerk der Kläranlage Weimar durchgeführt. Dabei wurde mechanisch vorgeklärtes Abwasser einer in Betrieb befindlichen Pumpe entnommen. Die Abwassermengen, ca. 1,0l/min, wurden halbiert. Die eine Hälfte wurde in ein Aquarium, welches zu einer Fermenterkläranlage (ohne Rücklaufschlamm) umgebaut wurde, eingeleitet. Die andere Hälfte wurde zunächst auf ca. 2°C abgekühlt und danach ebenfalls über eine gleichartige Fermenterkläranlage geleitet. In beide Fermenter wurden beheizte und unbeheizte Festbetten installiert. Es wurden ähnliche Vergleiche wie in der in-situ-Anlage durchgeführt.

Nach anfänglichen Schwierigkeiten mit den in Reihe geschalteten Kühlaggregaten konnte die Laboranlage im Dezember 2007 in Betrieb genommen werden. Mit Unterbrechungen wurde sie bis Mitte Mai 2008 beprobt.

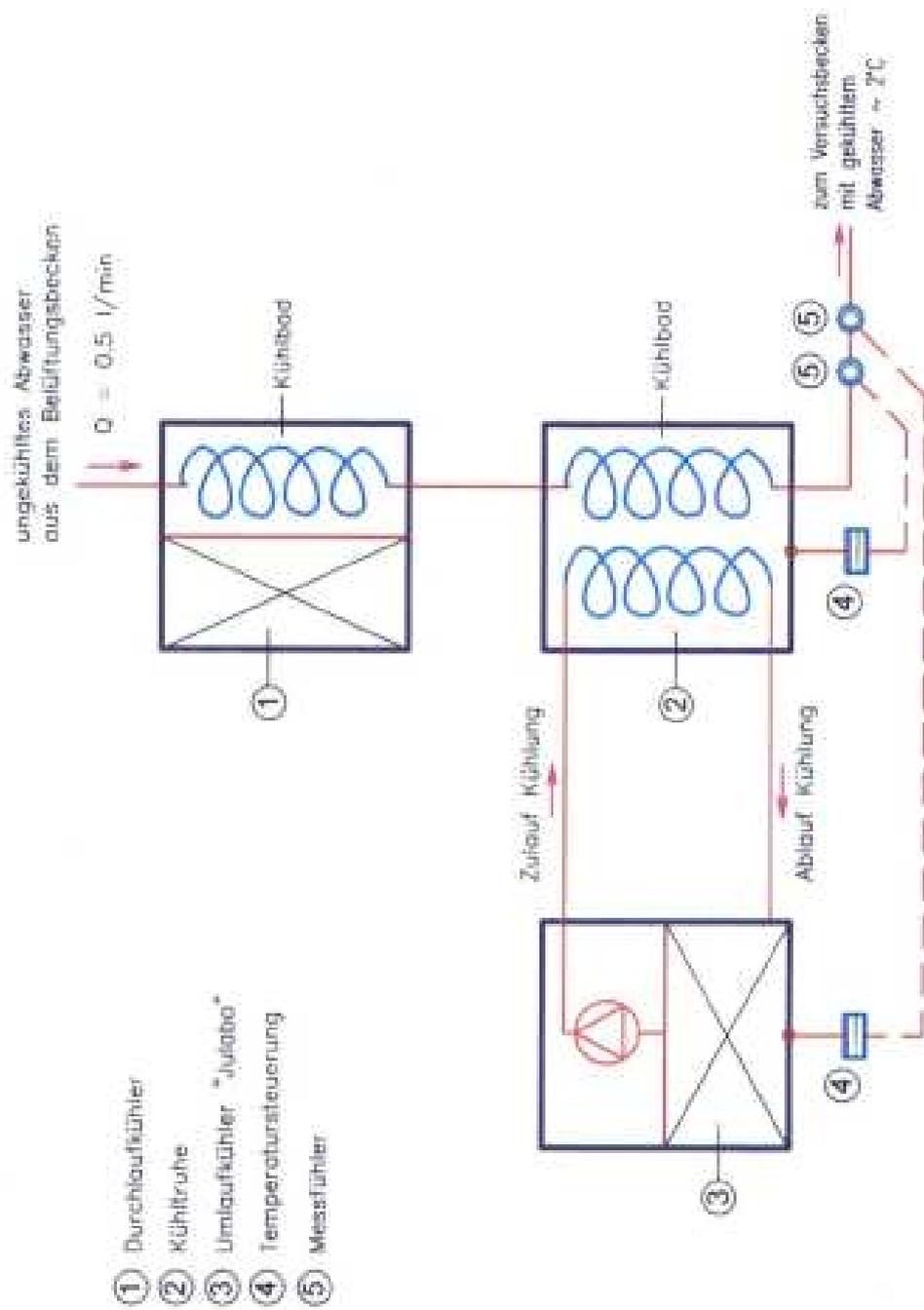
Abbildung 1 zeigt den schematischen Längsschnitt der Laboranlage und Abbildung 2 das Schema der Kühleinrichtungen

Abb. 1: Schematischer Längsschnitt der Laboranlage



- ① Zulauf von mechanisch vorgereinigtem Abwasser
- ② Abwassermengen-Zulaufregulierung über Schwimmervorrichtung
- ③ Dosierpumpe zum Versuchsbecken mit ungekühltem Abwasser
- ④ Dosierpumpe zum Versuchsbecken mit gekühltem Abwasser
- ⑤ Belüfter
- ⑥ Flachendeckende Druckluftbelüftung
- ⑦ Festbett unbeheizt
- ⑧ Festbett beheizt (+2°C)
- ⑨ Festbett beheizt (+4°C)
- ⑩ Temperatursteuerung 220V
- ⑪ Messfühler
- ⑫ Energieverbrauchsmesser (kWh)

Abb. 2: Schema der Kühlvorrichtungen



Den optischen Eindruck des Belüftungsbeckens verdeutlicht Bild 9 und den des Versuchsbeckens mit gekühltem Abwasser Bild 10. Im letztgenannten Becken ist neben den beiden BFB und dem unbeheizten Festbett (UFB) vorn links ein Temperaturkühler zur Steuerung der Kühlaggregate zu sehen.

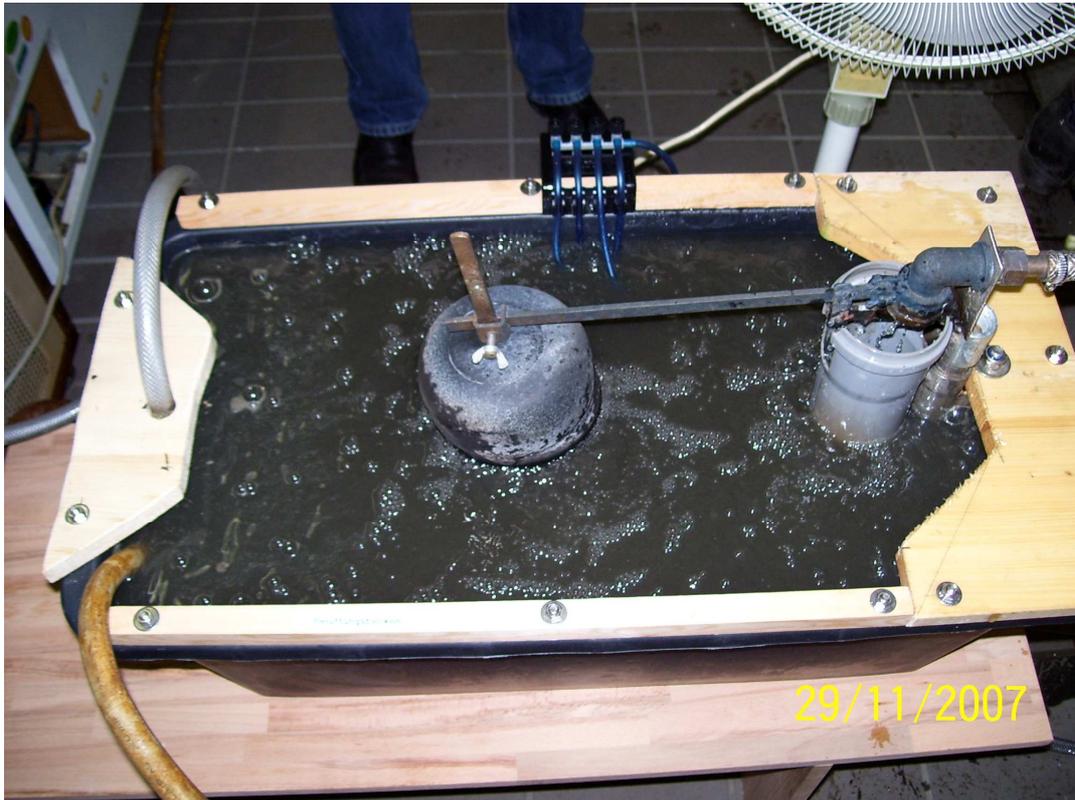


Bild 9:
Belüftungsbecken mit Abwasserzulauftechnik (Schwimmer)



Bild 10:
Versuchsbecken mit gekühltem Abwasser

Die Messung des Energieverbrauchs der BFB erfolgte ebenfalls über Temperaturmessfühler. Die Thermostate waren an frei programmierbare Ein- und Ausschaltwerte im Rahmen eines Zeitintervalls gekoppelt. Mithilfe einer Siemens-Prozess-Steuerung (SPS) konnten die effektiven Heizzeiten registriert werden.

Mit 60 W war die Leistung der mittig in den BFB angeordneten Heizstäbe (Aquariumheizung) relativ groß. Demzufolge konnte es in speziellen Fällen im Rahmen des gewählten Zeitintervalls zu kurzen Heiz- und langen Ruhezeiten kommen. Die im folgenden Kapitel dokumentierten Energieverbräuche beruhen auf der Grundlage, dass eine Betriebsstunde 60 W entspricht.

In Bild 11 wird eine Tiefkühltruhe mit eingebauten Vorrichtungen zur Abwasserkühlung gezeigt. In den eingebauten runden Kunststoffbehälter wurde als Wärmeaustauscher eine Kunststoffwendel installiert. Durch diese fließt das normal

temperierte Abwasser. Außerdem ist der Kunststoffbehälter mit einem auf ca. -10°C abgekühlten Kältemittel gefüllt. Dieses wird in einem Kühlgerät Julabo FC 1400 hergestellt.



Bild 11:
Tiefkühltruhe mit eingebauten Vorrichtungen zur Abwasserkühlung

In Bild 12 steht das Kühlaggregat rechts neben der Tiefkühltruhe. In dieses Kühlsystem sind weitere Armaturen, wie z. B. Umlaufpumpe und Thermostatventile, integriert.



Bild 12:
Kühlgerät Julabo FC 1400 und Tiefkühltruhe

5.3 In-situ-Versuchsanlage mit Elektroenergieheizung zum Stickstoffabbau

Die aus betriebstechnischer Sicht gewonnenen positiven Ergebnisse mit der Elektroenergieheizung in der Laboranlage waren Anlass, eine ebensolche im Rahmen eines weiteren in-situ-Versuchs einzusetzen. Die Festbetten wurden in einem anderen Abschnitt des Belebungsbeckens mit relativ geringen Turbulenzen installiert.

Das Bild 13 dokumentiert zwei BFB und ein UFB, dessen Ummantelung aus handelsüblichem Gasbeton besteht. Der darin mittig angeordnete Heizstab wurde einer Aquariumheizung mit 200 W entliehen. Die Mess- und Steuertechnik entsprach der in Punkt 5.2 beschriebenen. Der Rahmen dieser Konstruktion mit den unter

Wasser befestigten Festbetten kann Bild 14 und der Messschrank Bild 15 entnommen werden.



Bild 13:
Darstellung der beiden BFB und des UFB auf einem Edelstahlrahmen



Bild 14:
Eingehängter Festbettrahmen



Bild 15:
Messtechnik der Elektroenergieheizung

6. Darstellung relevanter Versuchsergebnisse

6.1 Vorbemerkungen

Von den nachfolgend beschriebenen Versuchen mit unterschiedlichem technischen Aufbau liegt umfangreiches Material vor. Infolge aufgetretener Störungen

- im Betriebsablauf,
- bei der verfügbaren Mess-, Steuer- und Regeltechnik,
- durch nicht beeinflussbare Witterungsbedingungen

ist deren innere Logik nicht immer gegeben. In den folgenden Tabellen sind deshalb nur in sich schlüssige Daten erfasst, deren Zeitabläufe > 1 Monat betragen. Soweit erforderlich, werden Versuchsergebnisse aus dem ersten Zwischenbericht entsprechend Anlage 1 übernommen.

Weiterhin bedarf es des Hinweises, dass bei allen Messwerten der Warmwasserheizung im gemessenen Energieverbrauch (kWh - absolut) ein Anteil von den ca. 2 · 4,0 m langen, gut isolierten Zu- und Ablaufleitungen von der Messstelle bis zum BFB enthalten ist. Mit anderen Worten: Die aufgezeichneten Messwerte sind in Wirklichkeit zu hoch angegeben.

6.2 In-situ-Versuche im Zeitraum von Januar bis Juli 2007

Die erste Versuchsreihe wurde von Januar bis Juli 2007 mit einer Warmwasserheizung betrieben. Nähere Informationen können Anlage 1 entnommen werden. Die folgenden Tabellen 1 und 2 zeigen Messwerte von

- zeitabhängigen variablen Temperaturen mit BFB, UFB und darauf bezogenen Abwassertemperaturen,
- temperaturabhängigen Energieverbräuchen der BFB.

Außerdem werden in den Tabellen 1 und 2 subjektive optische Bewertungen zur Bewuchsstärke der Mikroorganismen auf den Festbetten nach einer selbst gewählten Skala entsprechend Tabelle 3 vorgenommen.

Bei Betrachtung der spezifischen Energieverbräuche zwischen dem 12.04.07 und dem 13.04.07 nach Tabelle 1 (Heiztemperatur 18°C) fällt ein deutlicher Qualitätssprung auf. Der niedrigere spezifische Wert von i. M. 0,02 kWh/d · 1°C bis zum 12.04.07 gegenüber dem höheren Wert von i. M. 0,16 kWh/d · 1°C ab dem 13.04.07 ist auf die Korrektur der Messfühler zurückzuführen. Bei späteren Auswertungen wird deshalb auf die Werte der Zeitfolge vom 20.03. bis zum 12.04.07 verzichtet.

Tabelle 1:
Zusammenstellung eines in-situ-Versuchs (Warmwasserheizung)

Datum	UFB		BFB A (links)			Heiztemperaturziel: 18°C			
	Abwassertemperatur (°C)	Wertung nach Tabelle 3	FB-Temp. (°C)	Temp.-Differenz (°C)	kWh absolut	kWh spezif.	kWh/d spezif.	kWh/d x 1°C spezif.	Wertung nach Tabelle 3
20.03.	12,4	./.	18,7	6,3	1,9	0,0	0,00	0,0	./.
21.03.	11,9	./.	17,9	6,0	2,0	0,1	0,10	0,02	./.
22.03.	8,3	./.	18,3	10,0	2,3	0,3	0,30	0,03	./.
25.03.	9,5	./.	18,1	8,6	2,7	0,4	0,13	0,02	./.
26.03.	10,7	./.	18,9	8,2	2,8	0,1	0,10	0,01	./.
27.03.	11,6	3	18,8	7,2	3,0	0,2	0,20	0,03	3
28.03.	12,5	./.	19,2	6,7	3,1	0,1	0,10	0,01	./.
30.03.	13,0	./.	18,0	5,0	3,3	0,2	0,10	0,02	./.
01.04.	12,8	./.	18,8	6,0	3,6	0,3	0,15	0,03	./.
02.04.	13,0	./.	18,8	5,8	3,9	0,3	0,30	0,05	./.
03.04.	13,4	./.	18,3	4,9	4,0	0,1	0,10	0,02	./.
04.04.	12,7	3	18,1	5,4	4,0	0,0	0,00	0,00	3
05.04.	13,0	./.	17,9	4,9	4,1	0,1	0,10	0,02	./.
10.04.	13,3	./.	19,0	5,7	4,5	0,4	0,08	0,01	./.
12.04.	13,8	./.	18,3	4,5	4,6	0,1	0,05	0,01	./.
13.04.	14,3	./.	18,7	4,4	5,0	0,4	0,40	0,09	./.
18.04.	14,9	./.	18,0	3,1	7,8	2,8	0,56	0,18	./.
19.04.	14,9	./.	18,6	3,7	8,1	0,3	0,30	0,08	./.
20.04.	14,7	./.	18,7	4,0	8,5	0,4	0,40	0,10	./.
23.04.	15,0	./.	20,1	5,1	9,8	1,3	0,43	0,08	./.
24.04.	15,0	./.	18,6	3,6	10,5	0,7	0,70	0,19	./.
25.04.	15,2	4	20,7	5,5	11,0	0,5	0,50	0,09	4
26.04.	15,9	./.	20,1	4,2	12,0	1,0	1,00	0,24	./.
02.05.	15,0	./.	18,2	3,2	15,7	3,7	0,62	0,19	./.
04.05.	15,9	./.	18,8	2,9	17,1	1,4	0,70	0,24	./.
05.05.	15,8	./.	18,6	2,8	17,7	0,6	0,60	0,21	./.
08.05.	14,4	./.	18,2	3,8	19,9	2,2	0,73	0,19	./.
relevante Mittelwerte									
bis 12.04.07:				6,33		0,02			
ab 13.04.07:				3,86		0,16			

Tabelle 2:
Zusammenstellung eines in-situ-Versuchs (Warmwasserheizung)

Datum	UFB		BFB B (rechts)				Heiztemperaturziel: 23°C		
	Abwasser- temperatur (°C)	Wertung nach Tabelle 3	FB- Temp. (°C)	Temp.- Differenz (°C)	kWh absolut	kWh spezif.	kWh/d spezif.	kWh/d x 1°C spezif.	Wertung nach Tabelle 3
2007									
16.03.	13,3	./.	22,4	9,1	3,7	./.	./.	./.	./.
19.03.	12,0	./.	23,1	11,1	5,5	1,8	0,6	0,05	./.
20.03.	12,4	./.	21,5	9,1	6,5	1,0	1,00	0,11	./.
21.03.	11,9	./.	21,6	9,7	7,8	1,3	1,30	0,13	./.
22.03.	8,3	./.	21,6	13,3	10,0	2,2	2,20	0,17	./.
25.03.	9,5	./.	21,6	12,1	11,8	1,8	0,60	0,05	./.
26.03.	10,7	./.	22,0	11,3	12,7	0,9	0,90	0,08	./.
27.03.	11,6	3	22,2	10,6	13,7	1,0	1,00	0,09	./.
28.03.	12,5	./.	21,6	9,1	14,8	1,1	1,10	0,12	./.
30.03.	13,0	./.	23,0	10,0	16,4	1,6	0,80	0,08	./.
01.04.	12,8	./.	21,5	8,7	17,8	1,4	0,70	0,08	./.
02.04.	13,0	./.	21,9	8,9	18,3	0,5	0,50	0,06	./.
03.04.	13,4	./.	22,9	9,5	19,2	0,9	0,90	0,09	./.
04.04.	12,7	3	22,4	9,7	20,1	0,9	0,90	0,09	3
05.04.	13,0	./.	21,9	8,9	21,4	1,3	1,30	0,15	./.
10.04.	13,3	./.	23,0	9,7	24,6	3,2	0,64	0,07	./.
12.04.	13,8	./.	22,3	8,5	25,6	1,0	0,50	0,06	./.
13.04.	14,3	./.	22,9	8,6	26,3	0,7	0,70	0,08	./.
18.04.	14,9	./.	23,0	8,1	28,7	2,4	0,48	0,06	./.
19.04.	14,9	./.	23,7	8,8	29,5	0,8	0,80	0,09	./.
20.04.	14,7	./.	21,6	6,9	29,9	0,4	0,40	0,06	./.
23.04.	15,0	./.	23,0	8,0	32,2	2,3	0,77	0,10	./.
24.04.	15,0	./.	23,7	8,7	32,8	0,4	0,40	0,05	./.
25.04.	15,2	4	24,8	9,6	33,1	0,3	0,30	0,03	5
26.04.	15,9	./.	23,8	7,9	33,3	0,2	0,20	0,03	./.
02.05.	15,0	./.	22,9	7,9	35,4	2,1	0,35	0,04	./.
04.05.	15,9	./.	23,0	7,1	36,1	0,7	0,35	0,05	./.
05.05.	15,8	./.	23,8	8,0	36,4	0,3	0,30	0,04	./.
08.05.	14,4	./.	23,1	8,7	37,7	1,3	0,43	0,05	./.
relevante Mittelwerte				9,2				0,08	

Tabelle 3:
Bewertungsschema zur Bewuchsstärke der Mikroorganismen

Note	Qualitative Kennzeichnung
1	kein Bewuchs erkennbar
2	leichter Bewuchs auf Einzelflächen erkennbar
3	leichter Bewuchs auf der Gesamtläche erkennbar
4	deutlicher Bewuchs auf der Gesamtläche erkennbar
5	mittelstarker Bewuchs erkennbar
6	starker Bewuchs erkennbar
7	starker Bewuchs bei gleichzeitigen Ablösungen
8	starker Bewuchs bei dominanten Ablösungen
9	totale Ablösungserscheinungen
10	totale Ablösungserscheinungen bei gleichzeitigem Bewuchsneubeginn

6.3 In-situ-Versuche im Zeitraum von Januar bis Mai 2008

Im Winter 2007/2008 wurden die in-situ-Versuche mit der gleichen Warmwasserheizung wiederholt. Außerdem wurde ein angepasster Versuch mit einer Elektroenergieheizung durchgeführt. Für letztere wurden, wie bereits beschrieben, die Erfahrungen genutzt, die ab Dezember 2007 bei den Laborversuchen gesammelt werden konnten.

Die Tabellen 4 und 5 zeigen die Ergebnisse mit der Warmwasserheizung. In Abänderung zu den Temperaturen in den BFB, wie sie 2007 gewählt wurden, erfolgte eine maximal machbare Temperaturreduzierung um 4°C bzw. 7°C. Die niedrigen Temperaturen waren den Möglichkeiten der verfügbaren Heiztechnik (Fußbodenheizung im Wohnungsbau) geschuldet.

Im Laufe der Versuche wurde insbesondere bei der Warmwasserheizung die große Relevanz der Lage der Messelektroden auf der Oberfläche der BFB deutlich. Schließlich wurden diese in Fließrichtungsende des Festbettes ca. 6 mm tief versenkt und mit Steinband abgeklebt.

Bei den Versuchen mit Elektroenergieheizung entstanden beim Heiztemperaturziel 13°C Probleme mit der Erfassung der effektiven Heizzeiten (1 Betriebsstunde = 200 W). Deshalb wird in Tabelle 6 nur der Zeitraum vom 28.02.08 bis zum 15.04.08 betrachtet. Die erfassten Ergebnisse der Tabelle 7 erscheinen plausibel.

Tabelle 4:
Zusammenstellung eines in-situ-Versuchs (Warmwasserheizung)

Datum	UFB		BFB A (links)				Heiztemperaturziel: 14°C			
	Abwassertemperatur (°C)	Wertung nach Tabelle 3	FB-Temp. (°C)	Temp.-Differenz (°C)	kWh absolut	kWh spezif.	kWh/d spezif.	kWh/d x 1°C spezif.	Wertung nach Tabelle 3	
2008										
07.01.	10,7	./.	13,7	3,0	91,7	./.	./.	./.	./.	
11.01.	11,5	./.	14,0	2,5	93,0	1,3	0,33	0,13	./.	
14.01.	11,1	./.	14,4	3,3	94,2	1,2	0,40	0,12	./.	
16.01.	10,9	./.	14,0	3,1	95,4	1,2	0,60	0,19	./.	
21.01.	11,2	./.	17,2	6,0	101,1	5,7	1,14	0,19	./.	
22.01.	9,8	./.	14,4	4,6	101,7	0,6	0,60	0,13	./.	
24.01.	10,6	./.	13,6	3,0	102,6	0,9	0,45	0,15	./.	
28.01.	10,4	6	13,3	2,9	104,1	1,5	0,38	0,13	5	
31.01.	9,8	./.	13,7	3,9	105,9	1,8	0,60	0,15	./.	
04.02.	9,8	./.	13,3	3,5	110,7	4,8	1,20	0,34	./.	
06.02.	10,5	./.	13,8	3,3	112,1	1,4	0,70	0,21	./.	
08.02.	9,9	./.	13,1	3,2	114,1	2,0	1,00	0,31	./.	
11.02.	10,4	./.	13,5	3,1	115,6	1,5	0,50	0,16	./.	
13.02.	10,7	./.	13,6	2,9	116,2	0,6	0,30	0,10	./.	
15.02.	10,3	./.	13,9	3,6	117,0	0,8	0,40	0,11	./.	
20.02.	10,0	7	13,1	3,1	122,7	5,7	1,14	0,37	7	
22.02.	10,7	./.	13,6	2,9	123,2	0,5	0,25	0,09	./.	
relevante Mittelwerte			3,4							

Tabelle 5:
Zusammenstellung eines in-situ-Versuchs (Warmwasserheizung)

Datum	UFB		BFB B (rechts)				Heiztemperaturziel: 16°C			Bemerkung	
	Abwassertemperatur (°C)	Wertung nach Tabelle 3	FB-Temp. (°C)	Temp.-Differenz (°C)	kWh absolut	kWh spezif.	kWh/d spezif.	kWh/d x 1°C spezif.	Wertung nach Tabelle 3		
2008											
28.02.	11,0	./.	14,4	3,4	86,7	./.	./.	./.	./.	T-Fühler verändert	
29.02.	11,0	./.	14,8	3,8	88,3	1,6	1,60	0,42	./.		
03.03.	9,7	./.	14,0	4,3	98,1	9,8	3,27	0,76	./.		
05.03.	9,8	./.	13,9	4,1	100,8	2,7	1,35	0,33	./.		
14.03.	11,5	./.	16,5	5,0	108,6	7,8	0,87	0,17	./.		
17.03.	10,5	./.	15,9	5,4	111,5	2,9	0,97	0,18	./.		
20.03.	10,9	./.	15,9	5,0	116,7	5,2	1,73	0,35	./.		
27.03.	10,8	./.	15,9	5,1	129,9	13,2	1,89	0,37	./.		
28.03.	11,2	./.	14,9	3,7	130,9	1,0	1,00	0,27	./.		
30.03.	11,2	./.	15,6	4,4	132,4	1,5	0,75	0,17	./.		
01.04.	12,2	./.	16,0	3,8	133,0	0,6	0,30	0,08	./.		
02.04.	11,4	./.	16,3	4,9	133,6	0,6	0,60	0,12	./.		
relevante Mittelwerte			4,41				0,29				

Tabelle 6:
Zusammenstellung eines in-situ-Versuchs (Elektroenergieheizung)

Datum	UFB Abwasser- temperatur (°C)	BFB		Heiztemperaturziel: 13°C			
		FB- Temp. (°C)	Temp.- Differenz (°C)	kWh absolut	kWh spezif.	kWh/d spezif.	kWh/d x 1°C spezif.
2008							
28.02.	11,0	14,1	3,1	0,0	./.	./.	./.
29.02.	11,0	14,0	3,0	0,2	0,2	0,20	0,07
03.03.	9,7	13,8	4,1	0,6	0,4	0,13	0,03
05.03.	9,8	12,8	3,0	0,8	0,2	0,10	0,03
14.03.	11,5	14,5	3,0	1,8	1,0	0,10	0,03
17.03.	10,5	13,7	3,2	2,2	0,4	0,13	0,04
20.03.	10,9	13,7	2,8	2,2	0,0	0,00	0,00
07.04.	10,1	14,0	3,9	2,8	0,6	0,03	0,01
08.04.	10,8	14,3	3,5	3,0	0,2	0,20	0,06
11.04.	10,3	13,2	2,9	3,4	0,4	0,13	0,05
15.04.	10,7	13,7	3,0	3,8	0,4	0,10	0,03
relevante Mittelwerte			3,25				0,04

Tabelle 7:
Zusammenstellung eines in-situ-Versuchs (Elektroenergieheizung)

Datum	UFB Abwasser- temperatur (°C)	BFB		Heiztemperaturziel: 15°C			
		FB- Temp. (°C)	Temp.- Differenz (°C)	kWh absolut	kWh spezif.	kWh/d spezif.	kWh/d x 1°C spezif.
2008							
28.02.	11,0	15,2	4,2	0,2	./.	./.	./.
29.02.	11,0	15,0	4,0	0,4	0,2	0,20	0,05
03.03.	9,7	14,8	5,1	1,6	1,2	0,40	0,08
05.03.	9,8	13,9	4,1	2,0	0,4	0,20	0,05
14.03.	11,5	14,5	3,0	3,2	1,2	0,13	0,04
17.03.	10,5	14,3	3,8	3,6	0,4	0,13	0,04
20.03.	10,9	14,0	3,1	4,0	0,4	0,13	0,04
27.03.	10,8	14,0	3,2	5,0	1,0	0,33	0,10
28.03.	11,2	14,3	3,1	5,0	0,0	0,00	0,00
30.03.	11,2	14,4	3,2	5,2	0,2	0,10	0,03
01.04.	12,2	15,4	3,2	5,6	0,4	0,20	0,06
02.04.	11,4	16,2	4,8	5,8	0,2	0,20	0,04
07.04.	10,1	15,5	5,4	6,8	1,0	0,20	0,04
08.04.	10,8	15,9	5,1	7,0	0,2	0,20	0,04
11.04.	10,3	15,2	4,9	7,4	0,4	0,13	0,03
15.04.	10,7	15,5	4,8	8,0	0,6	0,15	0,03
17.04.	11,2	15,7	4,5	8,2	0,2	0,10	0,02
22.04.	11,5	15,1	3,6	8,8	0,6	0,12	0,03
25.04.	12,4	15,6	3,2	9,2	0,4	0,13	0,04
29.04.	12,6	16,1	3,5	9,6	0,4	0,10	0,03
09.05.	14,2	17,7	3,5	10,8	1,2	0,12	0,03
15.05.	15,0	18,8	3,8	11,8	1,0	0,17	0,04
relevante Mittelwerte			3,96				0,04

6.4 Laborversuche im Zeitraum von Dezember 2007 bis Mai 2008

Die Versuchsergebnisse können den Tabellen 8 und 9 entnommen werden. Ergänzend wird bemerkt:

- Die Versuche vom 15.02.08 bis zum 17.03.08 und vom 03.04.08 bis zum 15.05.08 dienten zum Anzüchten von Biomasse und zur mikrobiologischen Bewertung. Die Ergebnisse wurden tabellarisch nicht erfasst.
- In den Belüftungsbecken betrug der O₂-Gehalt mindestens 4,2 mg/l und der pH-Wert $\geq 7,6$.
- In dem Versuchsbecken mit gekühltem Abwasser betrug der O₂-Gehalt mindestens 0,3 mg/l und der pH-Wert $\geq 7,7$.
- Der gemessene, vergleichsweise hohe Energieverbrauch ist vorrangig auf die nicht vorhandenen wärmedämmenden Eigenschaften des gewählten Festbettmaterials zurückzuführen. Er bleibt bei den folgenden Überlegungen im Punkt 7.3.1 unberücksichtigt.

6.5 Mikrobiologische Begleitung

Durch das Institut für Umweltmedizin Erfurt, mikrobiologisches Labor, wurden die Versuche regelmäßig begleitet. Entsprechende Bewertungen und gegebene Empfehlungen erfolgten in mündlicher und schriftlicher Form. Das zusammenfassende Gutachten kann Anlage 2 entnommen werden. Die im Gutachten als „kleine Anlage“ bezeichnete entspricht der in-situ-Anlage mit Elektroenergieheizung.

Tabelle 8:
Zusammenstellung des Laborversuchs (Elektroenergieheizung) + 2°C

Datum	Abwasser normal		Abwasser gekühlt		BFB Heiztemperaturziel: gekühltes Abwasser + 2°C						
	Temp. (°C)	Wertung UFB (Tabelle 3)	Temp. (°C)	Wertung UFB (Tabelle 3)	Temp. (°C)	Temp.-Differenz (°C)	kWh absolut	kWh spezif.	kWh/d spezif.	kWh/d x 1°C spezif.	Wertung nach Tabelle 3
12.12.2007	13,3	2+	1,8	1-	4,6	2,8	0,00	/.	/.	/.	1
17.12.2007	12,5	3	1,6	1	4,0	2,4	0,30	0,30	0,06	0,025	2
20.12.2007	12,8	4	1,5	2-	4,1	2,6	0,54	0,24	0,08	0,020	3
21.12.2007	12,8	4	1,7	2	4,1	2,4	0,60	0,06	0,06	0,015	3
02.01.2008	12,7	5	1,6	3	4,0	2,4	1,38	0,78	0,07	0,027	4
03.01.2008	12,4	5	1,6	3	3,7	2,1	1,44	0,06	0,06	0,026	4
04.01.2008	12,3	5	1,5	3,0	4,2	2,7	1,56	0,12	0,12	0,044	4
07.01.2008	12,9	5	1,5	3-4	4,4	2,9	1,86	0,30	0,10	0,034	4-5
09.01.2008	13,1	4-5	1,6	3-4	3,8	2,2	1,92	0,06	0,03	0,014	5
11.01.2008	13,7	/.	1,6	/.	3,6	2,0	2,10	0,18	0,09	0,045	/.
14.01.2008	13,1	/.	1,6	/.	3,9	2,3	2,34	0,24	0,08	0,035	/.
16.01.2008	12,9	/.	1,7	/.	4,0	2,3	2,46	0,12	0,06	0,026	/.
17.01.2008	13,4	/.	1,6	/.	4,0	2,4	2,52	0,06	0,06	0,025	/.
21.01.2008	13,8	/.	2,0	/.	4,2	2,2	2,82	0,30	0,08	0,034	/.
24.01.2008	13,6	4	1,7	3,0	4,2	2,5	3,06	0,24	0,08	0,019	3-4
relevante Mittelwerte						2,43		0,028			

* Bemerkung: Probenahme hat Bewuchs zerstört

Tabelle 9:
Zusammenstellung des Laborversuchs (Elektroenergieheizung) + 4°C

Datum	Abwasser normal		Abwasser gekühlt		BFB Heiztemperaturziel: gekühltes Abwasser + 4°C						
	Temp. (°C)	Wertung UFB (Tabelle 3)	Temp. (°C)	Wertung UFB (Tabelle 3)	Temp. (°C)	Temp.-Differenz (°C)	kWh absolut	kWh spezif.	kWh/d spezif.	kWh/d x 1°C spezif.	Wertung nach Tabelle 3
12.12.2007	13,3	2+	1,8	1-	6,0	4,2	0,12	/.	/.	/.	2
17.12.2007	12,5	3	1,6	1	5,6	4,0	0,60	0,48	0,10	0,024	2
20.12.2007	12,8	4	1,5	2-	6,0	4,5	0,84	0,24	0,08	0,018	3-4
21.12.2007	12,8	4	1,7	2	6,0	4,3	0,96	0,12	0,12	0,030	3-4
02.01.2008	12,7	5	1,6	3	5,9	4,3	2,22	1,26	0,19	0,043	4-5
03.01.2008	12,4	5	1,6	3	5,8	4,2	2,28	0,06	0,06	0,014	4-5
04.01.2008	12,3	5	1,5	3,0	5,8	4,3	2,46	0,18	0,18	0,042	4-5
07.01.2008	12,9	5	2	3-4	5,9	4,4	3,00	0,54	0,18	0,041	5
09.01.2008	13,1	4-5	1,6	3-4	6,0	4,4	3,12	0,12	0,06	0,014	5
11.01.2008	13,7	/.	1,6	/.	6,0	4,4	3,18	0,06	0,03	0,007	/.
14.01.2008	13,1	/.	1,6	/.	6,0	4,4	3,60	0,42	0,14	0,032	/.
16.01.2008	12,9	/.	2	/.	5,9	4,2	3,90	0,30	0,15	0,036	/.
17.01.2008	13,4	/.	1,6	/.	5,9	4,3	4,02	0,12	0,12	0,028	/.
21.01.2008	13,8	/.	2,0	/.	6,2	4,2	4,56	0,54	0,14	0,032	/.
24.01.2008	13,6	4	1,7	3,0	6,1	4,4	4,92	0,36	0,12	0,027	5
relevante Mittelwerte						4,3		0,028			

* Bemerkung: Probenahme hat Bewuchs zerstört

7. Diskussion der Versuchsergebnisse

7.1 Konstruktion des technischen Gebildes „beheizte Festbetten“

Für die äußeren Hüllen der BFB kamen unterschiedliche Materialien zum Einsatz. Neben den beschriebenen Stoffen Gasbeton, gesinterter poröses Steinmaterial, glattes Kunststoffmaterial, Textilien und Kokosmaterial schienen die gesinterten Glaskügelchen besonders geeignet. Auf allen Materialien siedelten sich die Bakterien relativ gleichmäßig an. Bei den gesinterten porösen Materialien drangen die Bakterien teilweise in die Oberfläche ein und erhöhten positiv deren Wärmedämmeigenschaften.

Im Gutachten „Theoretische Abschätzungen des Wärmebedarfs von beheizten Festbetten“ (Anlage 3) werden weitere Hinweise zur Gestaltung der Konstruktion (lineare Strömung, Oberfläche und Form der Heizplattenisolierungen) gegeben.

Zusammenfassend wird festgestellt:

Eine praxisreife Konstruktion liegt noch nicht vor. Diese ist außerdem von den technologischen Randbedingungen des Herstellerbetriebes abhängig.

7.2 Bestätigung des Verfahrensanspruchs

7.2.1 Vorbemerkungen

Mit dem Einsatz von BFB in biologischen Reaktoren war die Voraussetzung gegeben, höhere Umsatzleistungen von sessilen Bakterien auf warmem Untergrund gegenüber frei schwebenden Bakterien im kälterem Medium nachzuweisen. Durch die Bestätigung dieser These, die als Verfahrensanspruch patentiert wurde (siehe Anlage 4) waren die Voraussetzungen zur Bearbeitung der in Punkt 2 genannten Zielstellungen gegeben.

Aufgrund der verfügbaren finanziellen Fonds und der materiellen Grundausstattung konzentrierten sich die durchzuführenden Versuche auf wissenschaftlich begründete Analogieansätze. Trivial ausgedrückt, handelt es sich um Indizienbeweise.

Schwerpunktmäßig liegen von den durchgeführten in-situ- und Laborversuchen temperaturabhängige Aussagen

- zum Verhalten des biologischen Rasens auf den BFB und UFB,
- zur Nitrifikationsleistung der Nitrifikanten,
- zur metabolischen Leistung der heterotrophen Mikroorganismen vor.

7.2.2 Zum mikrobiologischen Bewuchs auf BFB

Zur Bewuchsstärke auf den BFB wurden im ersten Zwischenbericht (Anlage 1), insbesondere in den Punkten 5.2.3.2 und 5.2.3.4, bereits ausführliche Informationen und Schlussfolgerungen gegeben.

Einen guten Überblick über die zeit- und temperaturabhängigen Bewüchse zeigen die Laborversuche entsprechend den Tabellen 8 und 9. Bei diesen Versuchen unter vergleichsweise kalten Umweltbedingungen – ca. 2°C, 4°C und 6°C – kam es zu keinen plötzlichen Ablöseerscheinungen des biologischen Rasens von den Festbettoberflächen. Teilweise reduzierte sich jedoch die Bewuchsdichte entsprechend der Skala nach Tabelle 3. Als Begründung könnte die Anzahl und Größe der die Festbetten (FB) besiedelnden Weidengänger dienen. Im Rahmen einer mikroskopischen Bewertung der Festbetten am 04.01.08 wurde subjektiv festgestellt:

- FB 1,5°C: sehr wenige und sehr kleine einzellige Weidengänger,
- FB 4,2°C: mehrere kleine einzellige Weidengänger,
- FB 5,9°C: mehrere unterschiedlich große Weidengänger,
- FB 12,3°C: viele kleine und mittlere sowie wenige große Weidengänger.

Aus der Literatur und von Untersuchungen an der ehemaligen Hochschule für Architektur und Bauwesen Weimar, WB Versorgungsanlagen (Versuche mit anaeroben Festbetten), ist bekannt, dass Weidengänger den biologischen Rasen von Festbetten abgrasen können.

Eine weitere Erscheinung wurde bei der Beobachtung des biologischen Rasens am 04.04.07 auf den mit Warmwasser beheizten Festbetten deutlich sichtbar. Danach nahm die Stärke des biologischen Rasens in Fließrichtung des warmen Wassers in den Festbetten ab. Diese sichtbare Erscheinung entspricht den in der „Theoretischen Abschätzung des Wärmebedarfs von beheizten Festbetten“ (Anlage 3) gewonnenen Erkenntnissen. In dieser Ausführung wird außerdem auf die große Bedeutung der Dicke des biologischen Rasens für die wärmedämmende Wirkung desselben hingewiesen.

Zusammenfassend wird festgestellt:

Die Stärke des biologischen Rasens ist bei BFB von doppelter Bedeutung. Sie garantiert den Mikroorganismen nicht nur ausreichend temperierte Siedlungsflächen, sondern verbessert auch die erforderliche Wärmedämmung des tG.

7.2.3 Zur Nutzung von BFB für den Kohlenstoffabbau und die Stickstoffelimination

Alle durchgeführten Versuche wurden stichprobenartig mikrobiologisch begleitet. Die dabei gewonnenen Ergebnisse können der Anlage 2 entnommen werden. Hervorzuheben ist:

- Steigende Temperaturen in den beheizten Festbetten führen unabhängig von den umgebenden Abwassertemperaturen zu einem stärkeren Wachstum der sessilen Bakterien und deren erhöhten metabolischen Aktivitäten.
- Bezogen auf den Kohlenstoffabbau können die gemessenen pH-Wert-Verschiebungen während einer definierten Reaktionszeit als Indiz für einen stattgefundenen Abbau von organischen Substanzen gewertet werden.
- Bezogen auf die Stickstoffelimination begründen in erster Linie die gemessenen erhöhten potentiellen Nitrifikationsleistungen erwärmter sessiler Bakterien deren weitgehende Unabhängigkeit von umgebenden Abwassertemperaturen.

Zusammenfassend kann geschlussfolgert werden:

Die dem Forschungsthema zugrunde liegenden Überlegungen, wonach zur biologischen Abwasserbehandlung von kalten, organisch verschmutzten Abwässern beheizte Festbetten zur Funktionserhaltung und Leistungssteigerung geeignet sind, hat sich verfahrenstechnisch bestätigt.

7.3 Zum Energiebedarf beheizter Festbetten

7.3.1 Vorbemerkungen

Neben der Funktionstüchtigkeit und der möglichen umweltbedingten Erfordernis gewinnt aktuell der Energiebedarf des neu zu entwickelnden tG an besonderer Bedeutung.

Die Energieproblematik in kommunalen Kläranlagen ist vielschichtig. Bei kleinen „künstlich-biologisch“ arbeitenden Anlagen wird die Schlammbehandlung aerob betrieben. Sie ist in die Abwasserbehandlung integriert und besonders energieintensiv. Die Abwasserreinigung konzentriert sich auf den Kohlenstoffabbau. Dabei kann der Elt-Energiebedarf bis zu 40 kWh/EW·a betragen.

In mittleren und großen Kläranlagen wird die Abwasser- und Schlammbehandlung getrennt. Bei der anaeroben Schlammbehandlung fällt normalerweise Überschussenergie besonders in Form von Wärme an. Deren Verwertung könnte auch für BFB genutzt werden. Die Abwasserreinigungsleistung orientiert sich u. a. auf die N- und P-Elimination. Bei diesen Kläranlagen muss mit einem Elt-Energiebedarf bis zu 30 kWh/EW·a gerechnet werden.

Die in den Jahren 2007 und 2008 durchgeführten Versuche mit den BFB in einem nitrifizierenden Belebungsbecken können Tabelle 10 entnommen werden. Dabei handelt es sich um verbesserungsfähige Orientierungswerte für rohrförmige BFB, die von unterschiedlichen, noch zu optimierenden Festbettmaterialien und von der Dicke des instationären biologischen Rasens abhängen. Zu ähnlichen Erkenntnissen ist auch das Gutachten „Theoretische Abschätzung des Wärmebedarfs von beheizten Festbetten“ entsprechend Anlage 3 gekommen.

Die Gegenüberstellung der spezifischen Richtwerte zeigt:

- Versuche: 0,36 ... 0,83 ... 1,30 kWh/d · K · m²
- Gutachten: 0,50 ... 2,50 kWh/d · K · m².

Tabelle 10:
Ermittelter Energiebedarf der in-situ-Versuche

Zeitabschnitt	Tabelle	Heizungsart	Heiztemp.- ziel	kWh/d x 1°C (Mittelwert)	Faktor für 1m ² BFB (s. Pkt. 4)	kWh/d x 1°C x m ² spezifisch
13.04.-08.05.07	1	Warmwasser	18°C	0,16	4,5	0,72
16.03.-08.05.07	2	Warmwasser	23°C	0,08	4,5	0,36
07.01.-22.02.08	4	Warmwasser	14°C	0,18	4,5	0,81
28.02.-02.04.08	5	Warmwasser	16°C	0,29	4,5	1,30
28.02.-15.04.08	6	Elektro	13°C	0,04	22	0,88
28.02.-15.05.08	7	Elektro	15°C	0,04	22	0,88
Mittelwert:						0,82

* Im Punkt 6.1 wurde bereits auf die Überhöhung dieser Werte hingewiesen. Sie enthalten zusätzliche Wärmeverluste infolge der 2 x 4,0 m langen Zu- und Ablaufleitungen zwischen der Messeinrichtung und den BFB.

Zur weiteren Spezifizierung und zum Bewerten des zusätzlichen Energiebedarfs beim Einsatz von BFB in Kläranlagen interessieren die folgenden Überlegungen.

7.3.2 Erforderliche Festbettflächen

Für die Bemessung getauchter Festbetten, in denen die gesamte Abwasserreinigung durchgeführt wird, kann auf Empfehlungen in der Zeitschrift KA – Wasserwirtschaft, Abwasser, Abfall 2002 (49) Nr. 12, S. 1703 f. zurückgegriffen werden. Danach folgt:

$$A_{\text{FB, BSB5}} = \frac{B_{\text{d, BSB5}} \cdot 1000}{B_{\text{A, BSB5}}} \quad [\text{m}^2] ,$$

ggf. zuzüglich Nitrifikation

$$A_{\text{FB, TKN}} = \frac{B_{\text{d, TKN}} \cdot 1000}{B_{\text{A, TKN}}} \quad [\text{m}^2] ,$$

wobei $A_{\text{FB}} = A_{\text{FB, BSB5}} + A_{\text{FB, TKN}} [\text{m}^2]$ ist.

Es bedeuten

$A_{\text{FB}} [\text{m}^2]$ theoretische Oberfläche des Festbetts
 $B_{\text{A}} [\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})]$ Flächenbelastung des getauchten Festbetts
 $B_{\text{d}} [\text{kg}/\text{d}]$ tägliche Fracht.

Unter Benutzung allgemein anerkannter Richtwerte ergibt sich:

$$A_{\text{FB, BSB5}} = \frac{0,04 \cdot 1000}{12} = \underline{\underline{3,30 \text{ m}^2/\text{E}}} ,$$

$$A_{\text{FB, TKN}} = \frac{0,01 \cdot 1000}{1,75} = \underline{\underline{5,70 \text{ m}^2/\text{E}}} ,$$

$$A_{\text{FB}} = 3,30 \text{ m}^2/\text{E} + 5,70 \text{ m}^2/\text{E} = \underline{\underline{9,00 \text{ m}^2/\text{E}}} .$$

Beim zu betrachtenden Fall handelt es sich um ein kombiniertes Verfahren, wobei verankerte Festbetten in ein Belebungsbecken eingebaut werden. Die Festbetten übernehmen nur einen kleinen Teil der Reinigungsleistung, um auch bei niedrigen Abwassertemperaturen die vorgegebenen Grenzwerte einhalten zu können. Demzufolge interessiert der darauf bezogene Festbettflächenbedarf.

7.3.3 Kläranlagen zur Reduzierung des Kohlenstoffs

Zur Abschätzung des zusätzlichen Festbettflächenbedarfs werden die Reinigungsleistungen der KA Wundersleben herangezogen, wie sie im Forschungsbericht „Entwicklung von kleinen getauchten Festbetteinrichtungen für belüftete Oxidationsteiche sowie qualitativer und quantitativer Nachweis ihrer Funktionsfähigkeit vom Mai 2004 bis April 2006“ beschrieben sind.

In der Zeit vom 27.09.04 bis zum 13.12.04 wurden bei Abwassertemperaturen $> 5^{\circ}\text{C}$ im Oxidationsteich folgende Abbaueffekte nachgewiesen:

- ungefilterte Proben: 86% Abbau,
- gefilterte Proben: 94% Abbau.

Demgegenüber wurden in der Zeit vom 15.12.04 bis zum 25.02.05 bei Abwassertemperaturen $< 5^{\circ}\text{C}$ im Oxidationsteich nur erreicht:

- ungefilterte Proben: 75% Abbau,
- gefilterte Proben: 85% Abbau.

In grober Näherung müssten von den zusätzlich eingebauten BFB die Abbauleistungsdifferenzen von

- ungefilterte Proben: $86\% - 75\% = 11\%$,
- gefilterte Proben: $94\% - 85\% = 9\%$

übernommen werden. Übertragen auf zusätzlich erforderliche BFB folgt:

$$\begin{aligned} A_{\text{FB, BSB5}} &= 0,09 \cdot 3,3 \dots 0,11 \cdot 3,3 \\ &= \underline{0,30 \dots 0,36 \text{ m}^3/\text{E}} \end{aligned}$$

Hierbei handelt es sich um einen groben Richtwert.

7.3.4 Kläranlagen zur Reduzierung des Kohlen- und Stickstoffs

Nachfolgenden Überlegungen liegen Ablaufwerte der KA Weimar zugrunde. Die Kläranlage wurde im Jahr 2000 als nitrifizierende Anlage in Betrieb genommen. Bisher wurden nur im kalten Winter 2003/2004 die Stickstoffwerte von $N_{ges.} = 18,0$ mg/l überschritten. Vom 10.03.04 ist der Extremwert $N_{ges.-anorg.} = 21,43$ mg/l bei einer Abwassertemperatur von $8,4^{\circ}\text{C}$ bekannt. Weitere wenige Werte von $N_{ges.-anorg.} > 18,0$ mg/l lagen in diesem Zeitabschnitt deutlich unter vorgenanntem Extremwert.

Bezogen auf den Richtwert $N_{ges.-anorg.} = 18,0$ mg/l beträgt die Überschreitung des Extremwertes 19%. Für diesen Fall wären zusätzliche BFB in einer Größe von

$$A_{FB, TKN} + A_{FB, BSB5} = 0,19 \cdot 9 = \underline{\underline{1,70 \text{ m}^2/\text{E}}}$$

erforderlich. Ergänzend wird alternativ auf die begrenzte zusätzliche Beeinflussung des $N_{ges.}$ -Ablaufwertes durch die Steuerung des Schlammgehaltes im Belebungsbecken verwiesen.

Tabelle 11 zeigt die Umrechnung des Parameters „spezifischer Energiebedarf kWh/d·1°C·m²“ in den Parameter „spezifischer Energiebedarf kWh/E·d·1°C“.

Tabelle 11:
Umrechnung von [kWh/d x 1°C x m²] in [kWh/E x d x 1°C]

kWh/d x 1°C x m ²	kWh/E x d x 1°C					
	0,30 m ² /E	0,60 m ² /E	0,90 m ² /E	1,20 m ² /E	1,50 m ² /E	1,80 m ² /E
0,50	0,15	0,30	0,45	0,60	0,75	0,90
1,00	0,30	0,60	0,90	1,20	1,50	1,80
1,50	0,45	0,90	1,35	1,80	2,25	2,70
2,00	0,60	1,20	1,80	2,40	3,00	3,60

Aus praktischer Sicht werden $> 2^{\circ}\text{C}$ Temperaturerhöhung der BFB gegenüber der Abwassertemperatur erforderlich. Das führt mindestens zur Verdoppelung der spezifischen Werte nach Tabelle 11.

Die Betriebsdauer der BFB im Jahr beeinflusst maßgeblich den effektiven Energiebedarf. Als Vergleich und zur Bewertung wird auf Punkt 7.3.1 verwiesen. Dazu liefert Tabelle 12 die entsprechenden Daten.

Tabelle 12:
Umrechnung von [kWh/E x d x 1°C] in [kWh/E x a x 1°C]

kWh/E x d x 1°C	kWh/E x a x 1°C		
	10 d/a	20 d/a	30 d/a
0,30	3,0	6,0	9,0
0,60	6,0	12,0	18,0
0,90	9,0	18,0	27,0
1,20	12,0	24,0	36,0
1,50	15,0	30,0	45,0
1,80	18,0	36,0	54,0

Aus Tabelle 12 ist der hohe Anstieg des Energiebedarfs in beiden Richtungen erkennbar. Er wird sich bei Temperaturen der BFB, die um 2°C über den Abwassertemperaturen liegen, noch verdoppeln. Damit wird deutlich, wie sich der Energiebedarf zum begrenzenden Faktor für den Einsatz von BFB entwickeln kann.

Zusammenfassend wird festgestellt:

- **Da kleine oberflächenintensive Kläranlagen, z. B. belüftete Oxidationsteiche, mit der gegenwärtigen Technik die Einhaltung der gesetzlich vorgeschriebenen Grenzwerte nicht ganzjährig garantieren können, erscheint deren Komplettierung mit beheizten Festbetten überlegenswert.**
- **Für mittlere und große Kläranlagen werden vom Gesetzgeber bei Abwassertemperaturen $\leq 12^\circ\text{C}$ im Ablauf im Normalfall keine Nitrifikationsleistungen gefordert. Obwohl bei diesen Anlagen Überschussenergie verfügbar ist, dürfte der Einsatz von BFB sich auf umweltrelevante Ausnahmen beschränken.**
- **Im ersten Zwischenbericht (Anlage 1) zu diesem Projekt wurde empfohlen, aus energetischen Gründen auf das Forschungsziel „Einsatz von BFB zur Optimierung von Reaktionsräumen“ zu verzichten. Die dort gegebenen Begründungen werden durch die in Tabelle 12 ausgewiesenen Daten zusätzlich gestützt.**

8. Zusammenfassung

In den Winterperioden 2006/2007 und 2007/2008 konnte durch Labor- und in-situ-Versuche mit in biologischen Reaktoren eingebauten beheizten Festbetten nachgewiesen werden, dass sich die temperaturabhängigen Stoffumsätze sessiler Mikroorganismen verbessern. Damit wurde die Hypothese bestätigt, wonach mit dem Einsatz von BFB in biologischen Kläranlagen deren Leistungsfähigkeit auch bei niedrigen Abwassertemperaturen gewährleistet werden kann. Theoretische Abschätzungen und praktische Messungen ergeben energetische Aufwendungen, die den Betrieb der BFB zum begrenzenden Faktor werden lassen.

Darauf aufbauend kann geschlussfolgert werden:

- Bei kleinen, flächenintensiven Kläranlagen, z. B. belüfteten Oxidationsteichen, könnten durch den Einsatz von BFB ganzjährig die vorgegebenen Grenzwerte eingehalten werden.
- Bei mittleren und großen Kläranlagen werden im Normalfall keine ganzjährigen Nitrifikationsleistungen gefordert. Sofern ausreichend Überschussenergien von der anaeroben Schlammbehandlung verfügbar sind, wäre eine stabile Nitrifikation/Denitrifikation beim Einsatz von BFB auch im Winter möglich.
- Der Einsatz von BFB zur Optimierung von biologischen Reaktionsräumen ist denkbar. Er erscheint jedoch aus energetischer Sicht nicht sinnvoll.

Unabhängig von den energetischen Betrachtungen konnte bisher mangels praxisreifer BFB noch keine Kosteneffizienz nachgewiesen werden. Unbeschadet davon wurde das Verfahren patentiert.

Für die Entwicklung eines praxisreifen beheizten Festbettes als Rohrschlange liegen Erfahrungen und begründete Anforderungen vor. Deshalb und mit den technologischen Möglichkeiten des Herstellungsbetriebes erscheint eine Konstruktion kurzfristig realisierbar. Wärmetechnische Überlegungen favorisieren jedoch plattenförmige gegenüber rohrschlangenförmigen Abbildungen der BFB.

Es wird empfohlen, das vorliegende Forschungsprojekt bei Mitwirkung interessierter Hersteller weiterzuführen.