

# **Abschlussbericht zum Thema**

**Ermittlung der nutzbaren Wärmemenge einer Kleinkläranlage  
zur Verbesserung eines Kompostierungsprozesses mit  
Wärmepumpe**

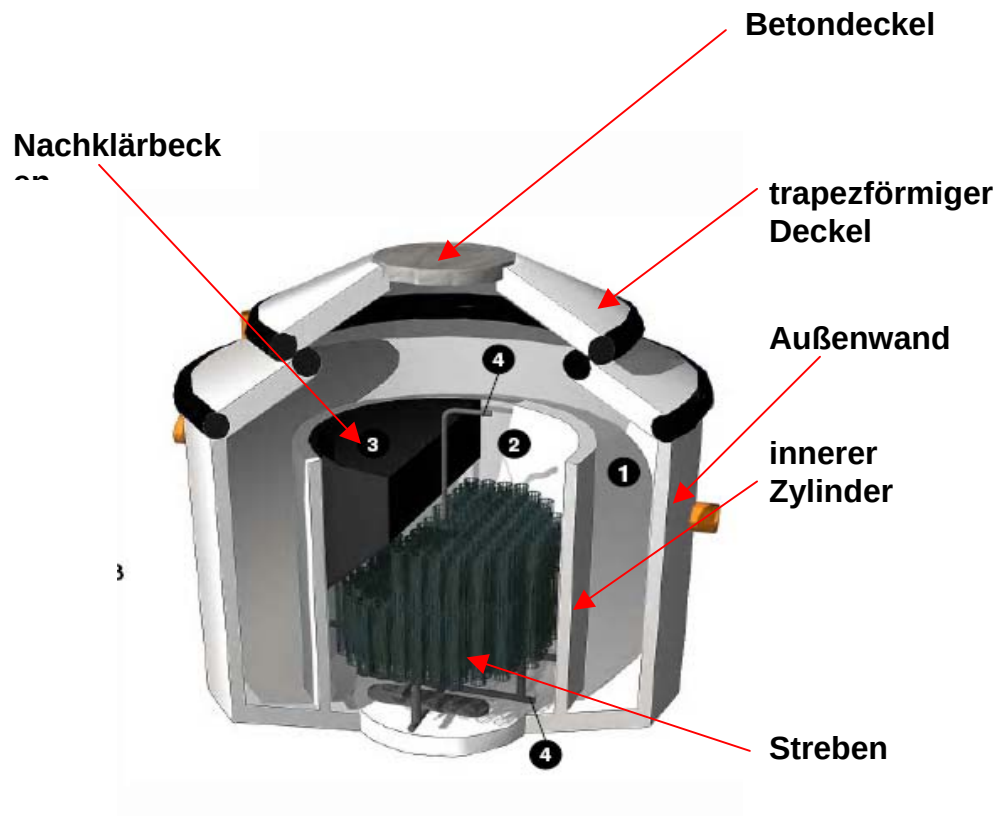
## **Inhaltsverzeichnis**

|           |                                                                                                                                                         |           |
|-----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b>  | <b>Kurzfassung .....</b>                                                                                                                                | <b>1</b>  |
| <b>2</b>  | <b>Funktionsweise der Kleinkläranlage .....</b>                                                                                                         | <b>2</b>  |
| <b>3</b>  | <b>Messtechnik .....</b>                                                                                                                                | <b>6</b>  |
| 3.1       | Einbau der Messtechnik.....                                                                                                                             | 8         |
| 3.2       | Messdatenerfassung und Auswertung.....                                                                                                                  | 9         |
| <b>4</b>  | <b>Zeichnung des KKA- Behälters mit Gambit.....</b>                                                                                                     | <b>13</b> |
| 4.1       | Bilanzierung der KKA mit Fluent.....                                                                                                                    | 15        |
| <b>5</b>  | <b>Simulation der KKA .....</b>                                                                                                                         | <b>18</b> |
| <b>6</b>  | <b>Wärmepumpe .....</b>                                                                                                                                 | <b>21</b> |
| <b>7</b>  | <b>Simulation des Komposters.....</b>                                                                                                                   | <b>23</b> |
| 7.1       | Simulation 1.....                                                                                                                                       | 26        |
| 7.2       | Simulation 2.....                                                                                                                                       | 28        |
| 7.3       | Simulation 3.....                                                                                                                                       | 30        |
| 7.4       | Simulation 4.....                                                                                                                                       | 30        |
| <b>8</b>  | <b>Diskussion.....</b>                                                                                                                                  | <b>31</b> |
| <b>9</b>  | <b>Ausblick.....</b>                                                                                                                                    | <b>33</b> |
| <b>10</b> | <b>Literaturverzeichnis.....</b>                                                                                                                        | <b>35</b> |
| <b>11</b> | <b>Anhang .....</b>                                                                                                                                     | <b>36</b> |
| 11.1      | Temperaturverläufe an verschiedenen Tagen .....                                                                                                         | 36        |
| 11.2      | Verhalten der Temperaturen mit der Zulaufmenge an einem Tag ...                                                                                         | 40        |
| 11.3      | Verlauf der stündlich gemittelten Zulaufmenge und der stündlich<br>gemittelten Abwassertemperatur vom Hausablauf an Werktagen und<br>am Wochenende..... | 41        |
| 11.4      | Temperaturverlauf einer Woche .....                                                                                                                     | 42        |
| 11.5      | Temperaturverlauf eines Monats.....                                                                                                                     | 43        |

- **Kurzfassung**

Kleinkläranlagen (KKA) werden heutzutage mit nicht unerheblichem Energieaufwand betrieben. Im Gegensatz zu Großkläranlagen, bei denen durch Umleitung der Abgase von Faultürmen in Blockheizkraftwerken (BHKW`s) Energie zurückgewonnen wird, geht bei Kleinkläranlagen die durch den biologischen Prozess freiwerdende Energie an die Umgebung verloren. Damit bleibt das Energiepotential von Kleinkläranlagen ungenutzt. Bei einer Kompostierung entsteht ebenfalls Wärme im Innern des Kompostes und durch zusätzliches Einleiten von Wärme kann der Kompostierungsprozess beschleunigt werden. Damit stellt sich die Frage, wie viel Wärme beim biologischen Prozess der KKA frei wird, und ob die Wärme mit Hilfe einer Wärmepumpe auf ein höheres Energieniveau gebracht und in den Komposter eingeleitet werden kann. Dafür muss die Konstruktion des Komposters mit berücksichtigt werden.

- Funktionsweise der Kleinkläranlage



**Bild 1: KKA geschnitten [3]**

Die Kleinkläranlage (KKA) ist im Schnitt in Bild 1 dargestellt. Die Außenwände und der trapezförmige Deckel bestehen aus zwei Polyethylenplatten zwischen denen der Wärmedämmstoff Polyurethanhart (PUR) eingeschäumt ist. Die Wand zwischen Vorklärkammer (1) und Belebungsbecken (2), sowie das Nachklärbecken (3) selber bestehen aus dem Kunststoff High- Density Polyethylen (HDPE). In der Mitte der Anlage befindet sich ein Trägersystem (4) aus Edelstahl. An diesem Trägersystem sind Druckluftschläuche, Rohrsysteme zum Fördern von Abwasser und Schlamm, ein Membranplattenbelüfter und der Festbettkörper befestigt. Die Streben aus denen der Festbettkörper aufgebaut ist bestehen ebenfalls aus dem Kunststoff HDPE. Auf der KKA ist ein Betondeckel angebracht. Die KKA ist normalerweise bis zur Oberkante dieses Betondeckels im Boden. Für dieses Forschungsvorhaben ist der trapezförmige Deckel nicht mit Erde bedeckt, damit ein größtmöglicher Zugang

gewährleistet ist. Damit wird sichergestellt, dass alle Änderungsarbeiten in der Anlage ohne Erdarbeiten vollzogen werden können. (Bild 2).



**Bild 2: eingesetzte KKA im Boden [3]**

**Tabelle 1: Bezeichnung der Nummern in Bild 3 und 4**

| Nummer | Bezeichnung                  |
|--------|------------------------------|
| 1      | Zulauf                       |
| 2      | Vorklärbecken                |
| 3      | Belebungsbecken              |
| 4      | Membranplattenbelüfter       |
| 5      | Nachklärbecken               |
| 6      | Schlammrückführung           |
| 7      | Überschussschlammrückführung |
| 8      | Ablauf                       |
| 9      | Entlüftung/ Schlammmentnahme |

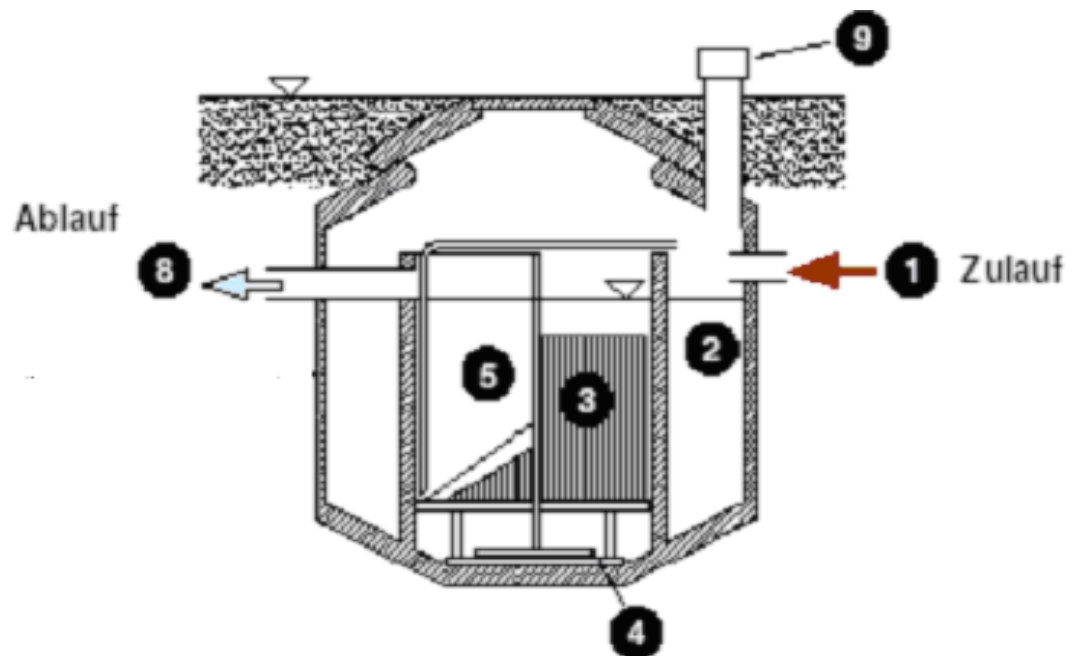
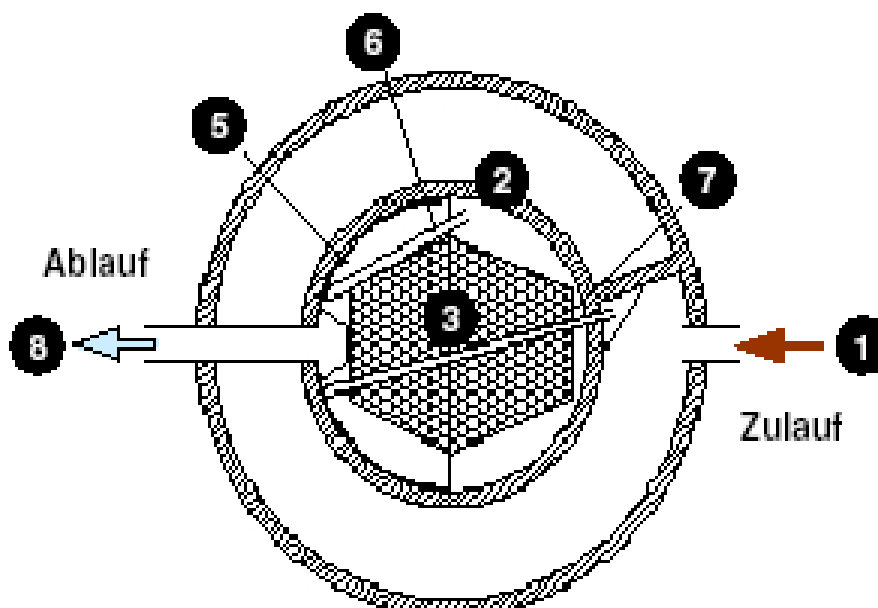


Bild 3: Seitenansicht der KKA in 2D [3]



#### **Bild 4: Draufsicht der KKA in 2D [3]**

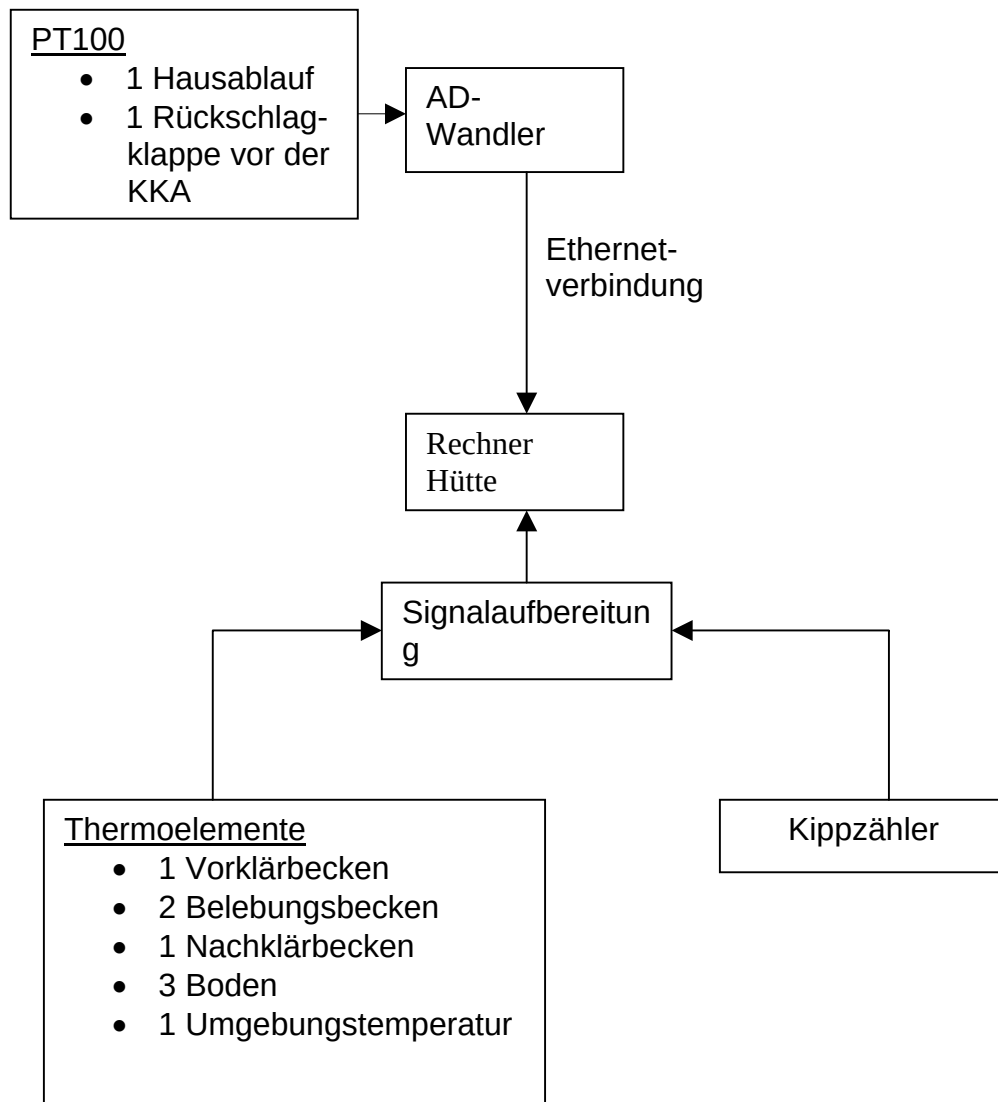
Zunächst läuft das Schwarzwasser vom Haus über den Zulauf (1) in das Vorklärbecken (2). Hier erfolgt die mechanische Abwasserreinigung durch einen Sedimentationsprozess. Hierbei setzen sich die groben Schmutzpartikel des frisch zulaufenden Schwarzwassers am Boden ab, wodurch sich eine Schlammsschicht ausbildet. Durch verschiedene Prozesse kann ein Teil des Schlammes leichter als Wasser werden und es bildet sich im Vorklärbecken an der Wasseroberfläche eine schwimmende Schlammsschicht aus.

Nach dem Sedimentationsprozess gelangt das Wasser in das Belebungsbecken (3) der KKA. Dort werden die Schadstoffe durch Mikroorganismen biologisch abgebaut. Dieser biologische Abbauprozess ist ein aerober Prozess. Das bedeutet, dass eine bestimmte Sauerstoffkonzentration im Belebungsbecken (3) vorhanden sein muss, um den biologischen Prozess instand zu halten. Hierfür wird über einen Membranplattenbelüfter (4) mit Hilfe eines Verdichters in bestimmten Zeitintervallen Luft in das Belebungsbecken (3) eingebracht. Das Abbauprodukt mit den angelagerten Mikroorganismen wird als Belebtschlamm bezeichnet. Um eine gleichmäßige Ablagerung des Belebtschlammes im Belebungsbecken gewährleisten zu können, sind in diesem Becken Kunststoffstreben angebracht.

Nach der biologischen Wasseraufbereitung gelangt das gereinigte Wasser in das Nachklärbecken (5). Durch Sedimentation setzt sich der Belebtschlamm am Boden des Nachklärbeckens ab. Von dort wird er über die Schlammrückführung (6) teilweise in das Belebungsbecken zurückgeführt, um dort die Anzahl der Mikroorganismen aufrecht zu erhalten. Der überschüssige Schlamm wird in das Vorklärbecken (2) eingetragen. Das gereinigte Wasser gelangt vom Nachklärbecken (5) über den Ablauf (8) in den Vorfluter.

Über den Belüftungsstutzen (7) gelangt von außen Frischluft in die KKA wodurch die Konzentration korrosiver Gase gering bleibt. Wenn im Vorklärbecken (2) die maximal zulässige Schlammhöhe erreicht ist, erfolgt die Schlammmentnahme über den Belüftungsstutzen (7).

- **Messtechnik**

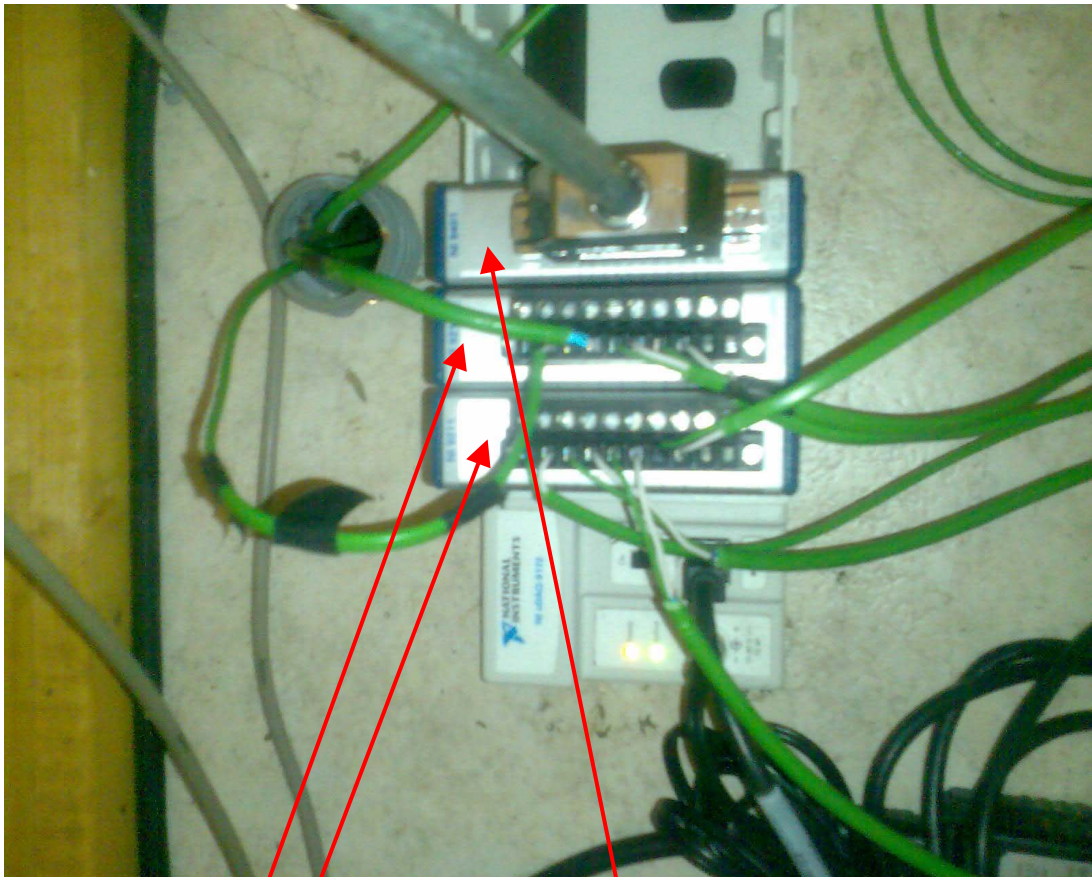


**Bild 5: Schematische Darstellung der Messtechnik**

Für die Wärmebilanz sind die Temperaturen innerhalb und um die KKA interessant. Hierfür werden Thermoelemente vom Typ K und Widerstandssensoren vom Typ PT100 verwendet. Mit den Thermoelementen werden die Temperaturen in den Kammern der KKA, die Bodentemperaturen sowie die Umgebungstemperatur erfasst. Die Widerstandssensoren (PT100) werden für das Abwasserrohr zwischen

dem Wohnhaus und der KKA verwendet. Von den Widerstandssensoren (PT100) gehen die analogen Signale jeweils auf einen AD- Wandler, der die digitalisierten Signale per Ethernetverbindung an den Rechner in der Holzhütte leitet. Die Holzhütte befindet sich neben der Kleinkläranlage.

Für die ausgehenden Signale der Thermoelemente wird zur Signalaufbereitung ein Signalverstärker von „National Instruments“ Typ NIC\_DAQ- 9211 mit Thermoelemente- Kaltstellenkompensation und AD- Wandler eingesetzt. Hiervon werden zwei Module mit jeweils vier Anschlüssen für die Thermoelemente verwendet. Anschließend gelangen die Signale über eine USB Verbindung ebenfalls an den Rechner in der Holzhütte. Zusätzlich werden vom Signalverstärker die Kippsignale eines Kippzählers aufgenommen. Dieser



**Zwei Module mit jeweils vier angeschlossenen Thermoelementen**

**Modul mit angeschlossenem Kippzähler**

## **Bild 6: Signalverstärker**

### **o Einbau der Messtechnik**

Zur Messung der Temperaturen der KKA werden in den einzelnen Kammern Thermoelemente eingesetzt. Dabei befindet sich jeweils ein Thermoelement im Vor- und Nachklärbecken und zwei Thermoelemente im Belebungsbecken. Die Thermoelemente im Belebungsbecken sind auf zwei unterschiedlichen Höhen eingebaut, um eine eventuelle Temperaturänderung mit der Höhe feststellen zu können. Zusätzlich wird vor der KKA eine Rückschlagklappe eingebaut, wo ein PT100 eingesetzt wird. Am Hausablauf wird ebenfalls ein PT100 eingesetzt. Dadurch kann der Wärmeverlust vom Haus zur Kleinkläranlage im Abwasserrohr ermittelt werden.

Zur Ermittlung der Umgebungstemperatur wird an der Außenwand der Holzhütte ein zusätzliches Thermoelement angebracht.

Die Temperaturdaten werden an den Rechner in der Holzhütte weitergeleitet und mit dem Programm LabVIEW erfasst.

Unter dem Zulaufrohr der KKA ist ein aus zwei Kammern bestehender Kippzähler angebracht, um den Temperatureinfluss der Zulaufmenge zu ermitteln. Sobald eine Kammer des Kippzählers mit einem Wasservolumen von 2,3 l beschickt wird, erfolgt eine Schwerpunktverlagerung, und der Kippzähler kippt zur unbefüllten Kammer über. Bei jedem Kippvorgang wird ein Signal an den Rechner weitergeleitet. Durch aufsummieren der 2,3 l über die Signale kann die Zulaufmenge in bestimmten Zeitintervallen berechnet werden.

Zur Feststellung des Temperaturverlaufs im Boden werden drei Thermoelemente auf drei unterschiedlichen Höhen in den Boden eingeführt. Zur Fixierung der Thermoelemente wird eine Temperaturmesssonde mit Hilfe eines PVCU- Rohrs mit einem Außendurchmesser von 2 cm konstruiert. An den Positionen der

Thermoelemente wird das Rohr mit Rohrstücken von 2,7 cm Außendurchmesser verstärkt.

## o Messdatenerfassung und Auswertung

### Abkürzungen:

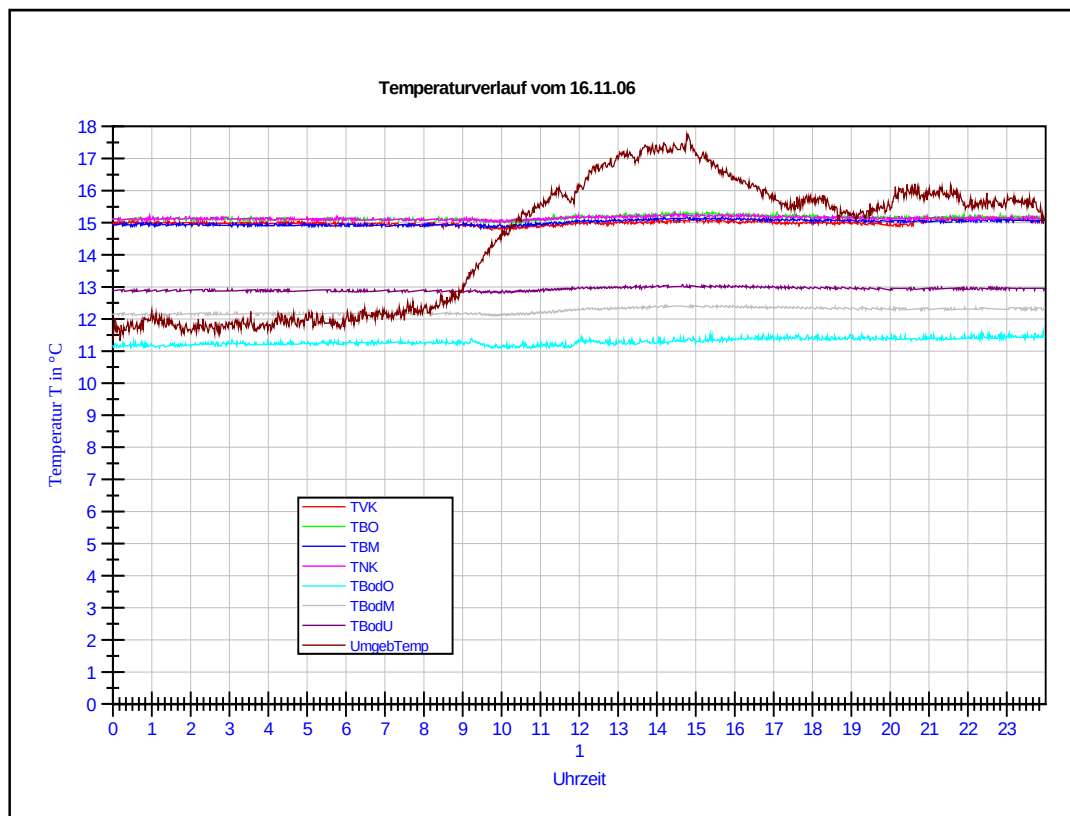
|                      |                                  |
|----------------------|----------------------------------|
| TVK                  | Temperatur Vorklärung            |
| TBO                  | Temperatur Belebungsbecken oben  |
| TBM                  | Temperatur Belebungsbecken Mitte |
| TNK                  | Temperatur Nachklärung           |
| TbodO                | obere Bodentemperatur            |
| TbodM                | mittlere Bodentemperatur         |
| TbodU                | untere Bodentemperatur           |
| Umgeb.Temp.          | Umgebungstemperatur              |
| mittlere Boden.Temp. | gemittelte Bodentemperatur       |
| Temp.Haus            | Temperatur vom Hausablauf        |

Zur Berechnung der Wärmebilanz der KKA müssen die Auswirkungen des Wärmeeintrags durch den Abwasserzulauf ermittelt werden. Die Zulaufmenge wird durch die Anzahl der Kippvorgänge des Kippzählers ermittelt. Die Zeitintervalle zwischen den einzelnen Kippvorgängen sind allerdings unbekannt, da die Abwassermenge in einer bestimmten Zeit der Datenerfassung variiert. Deshalb wird die Datenerfassung im Sekundentakt aufgenommen, wovon wiederum Datensätze erstellt werden.

Zur Auswertung der Messdaten werden diese für einzelne Tage zusammengefasst. Berücksichtigt man, dass ein Tag 24 Stunden, und eine Stunde 3600 Sekunden umfasst, dann ergibt sich für den Datensatz von einem Tag eine Datenmenge von 86400 Messdaten für jedes Thermoelement und für jeden Widerstandssensor. Während der Auswertung wird festgestellt, dass es besser ist, die Datenmenge zu reduzieren. Die Messwerte werden nicht im Sekundentakt, sondern im Minutentakt betrachtet. Damit ergibt die Datenmenge von einem Tag 1440 Messwerte. Auch diese Datenmenge ist noch sehr hoch. Sie sollte aber nicht weiter reduziert werden, da schließlich die Kippvorgänge des Kippzählers ziemlich genau erfasst werden sollten.

Zur Auswertung der Datensätze werden Stichtage zwischen den Monaten September 2006 und Januar 2007 gewählt, um die Temperaturänderungen innerhalb einer Jahreszeit einzuschließen.

Die Datenauswertung eines Stichtages soll an folgendem Diagramm erläutert werden.



**Diagramm 1: Temperaturverläufe vom 16.11.06**

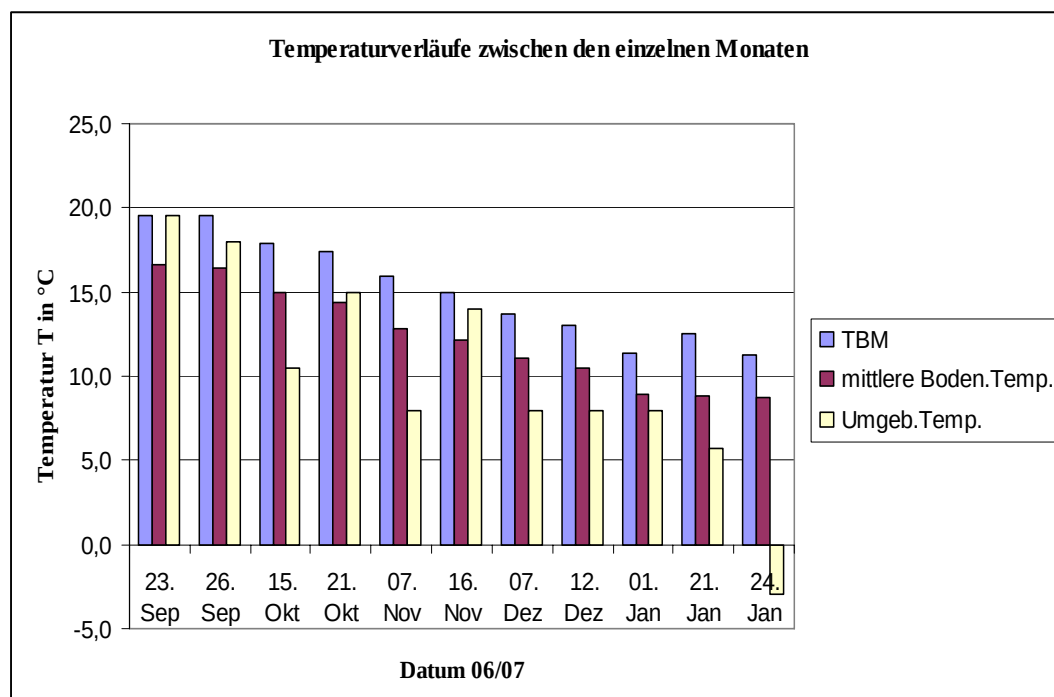
In Diagramm 1 sind die Temperaturverläufe in den einzelnen Kammern der KKA und die Temperaturverläufe im Boden dargestellt. Man sieht, dass die Temperaturen der drei Messstellen im Boden und die Temperaturen in der KKA über einen Tag annähernd konstant bleiben. Ebenfalls ist zu erkennen, dass sich die Temperaturen der einzelnen Kammern zueinander nicht sehr stark unterscheiden. Dagegen sind die Temperaturunterschiede der drei Messstellen im Boden zueinander eindeutig zu erkennen. Dabei zeigt die tiefste Messstelle eine höhere Temperatur an als die oberste Messstelle. Die Temperaturdifferenz zwischen oberer (TBodO) und unterer Messstelle (TBodU) beträgt ungefähr 2 K. Die Umgebungstemperatur

(Umgeb.Temp.) schwankt um bis zu 5 °C. Dennoch scheint sie auf die anderen Temperaturen keinen Einfluss zu nehmen.

Durch den freiwerdenden Wärmestrom der biologischen Reaktion wird das Fluid in der KKA erwärmt. Gleichzeitig gibt das Fluid durch die Außenwände Wärme an die Umgebung ab. Wenn sich die Wandtemperaturen nicht ändern, stellt sich aufgrund des Wärmedurchgangs ein konstanter Wärmestrom ein. Zusätzlich sind die Wandstärken der einzelnen Wände innerhalb der KKA sehr gering. Aufgrund dieser Tatsachen ergeben sich für die Temperaturen in den einzelnen Kammern konstante Werte.

Die Bodentemperatur nimmt normalerweise mit zunehmender Tiefe ab. In Diagramm 1 ist das Gegenteil der Fall. Die Erklärung hierfür liegt im hohen Grundwasserspiegel. Aufgrund der hohen Wärmekapazität des Wassers bleibt die Wärmemenge im Grundwasser länger gespeichert, wodurch es eine höhere Temperatur besitzt als der Boden selbst.

Dass die Umgebungstemperatur keinen großen Einfluss auf die Temperaturen in der KKA hat, liegt an der geringen Wärmeaustauschfläche, die vom trapezförmigen Deckel der KKA eingenommen wird.



**Diagramm 2: Temperaturverlauf in Abhängigkeit verschiedener Monate**

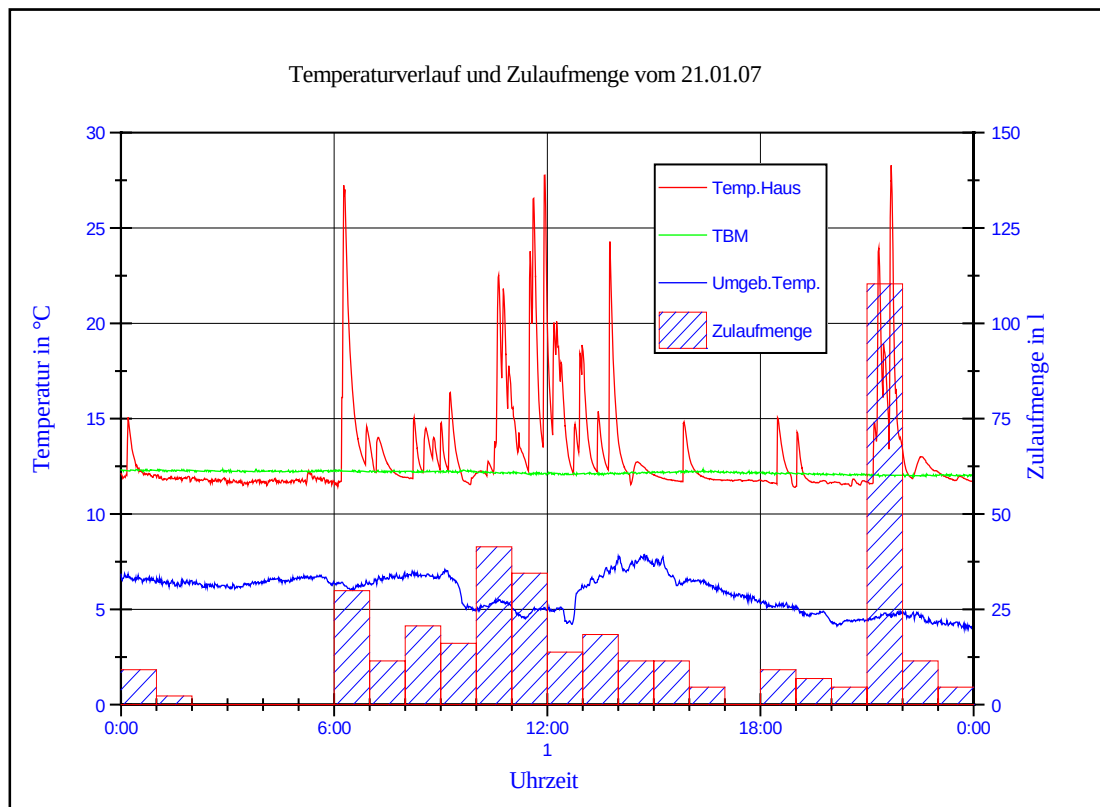
In Diagramm 2 sind die Temperaturen vom Belebungsbecken, von der mittleren Bodentemperatur und von der Umgebungstemperatur an verschiedenen Tagen dargestellt.

Auch hier wird deutlich, dass die Umgebungstemperatur auf die Bodentemperatur und auf die Temperatur im Belebungsbecken nur einen geringeren Einfluss zu haben scheint. Obwohl die Umgebungstemperatur starke Schwankungen aufweist, verlaufen die beiden anderen Temperaturen eher stetig und nehmen zum Januar ab.

Die Fluidtemperatur (TBM) nimmt mit der mittleren Bodentemperatur (mittlere Bod. Temp.) ab, da im Boden durch die zylindrische Wand und der Bodenfläche der KKA eine große Wärmeaustauschfläche zur Verfügung steht. Temperaturänderungen im Boden bewirken eine Änderung des Verlustwärmestroms in der KKA.

Die Umgebungstemperatur hat keinen großen Einfluss auf die Temperatur im Belebungsbecken (TBM) was wieder mit der geringen Wärmeaustauschfläche am Deckel der KKA zusammenhängt.

Im Folgenden wird die Auswirkung des Wärmeeintrags durch den Abwasserzulauf betrachtet. Dafür werden die Messwerte vom 21.01.07 herangezogen.



**Diagramm 3: Verhalten der Temperaturen mit der Zulaufmenge**

Die Temperatur vom Hausablauf liegt zwischen 6 und 15 Uhr teilweise über 25 °C. Ausgehend von dieser Temperatur sind zwischen 6 und 15 Uhr ca. 190 l in die KKA geflossen. Die Temperaturen in den einzelnen Kammern der KKA (TBM) sind dabei mit ca. 12,5 K konstant geblieben.

Da die Temperaturen in der KKA über die Zulaufmenge konstant bleiben, lässt sich sagen, dass die Aufnahme der Datenmenge im Sekundentakt bzw. im Minutentakt überflüssig ist, da die ermittelte Zulaufmenge über den Kippzähler im Verlaufe eines Tages keinen Einfluss auf die Temperaturen in der KKA hat.

- **Zeichnung des KKA- Behälters mit Gambit**

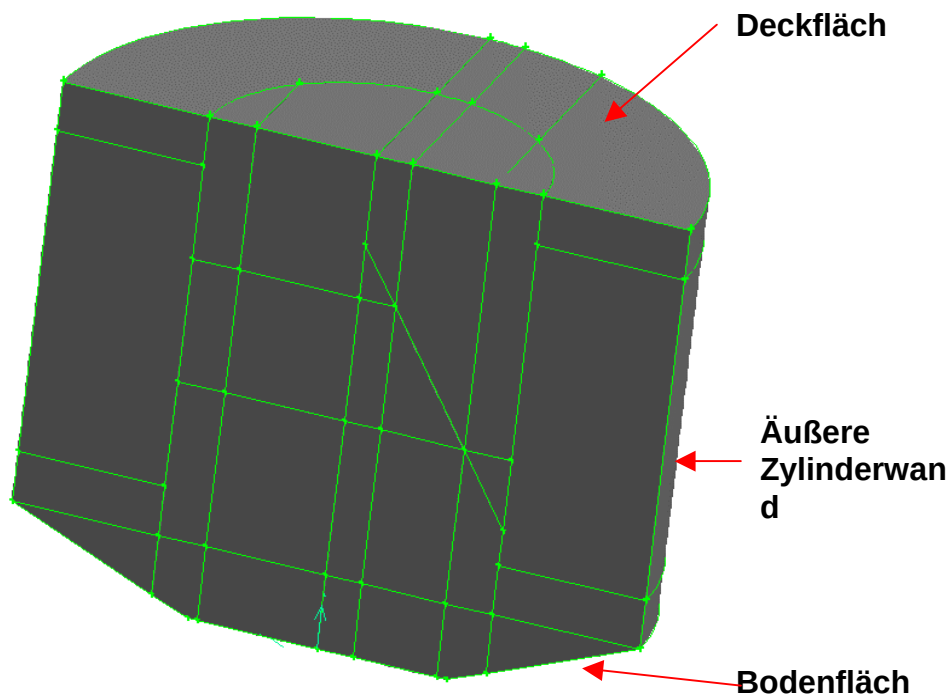
Bei der Zeichnung der KKA wird von den Nenndaten aus Tabelle 2 ausgegangen.

**Tabelle 2: Nenndaten der KKA [3]**

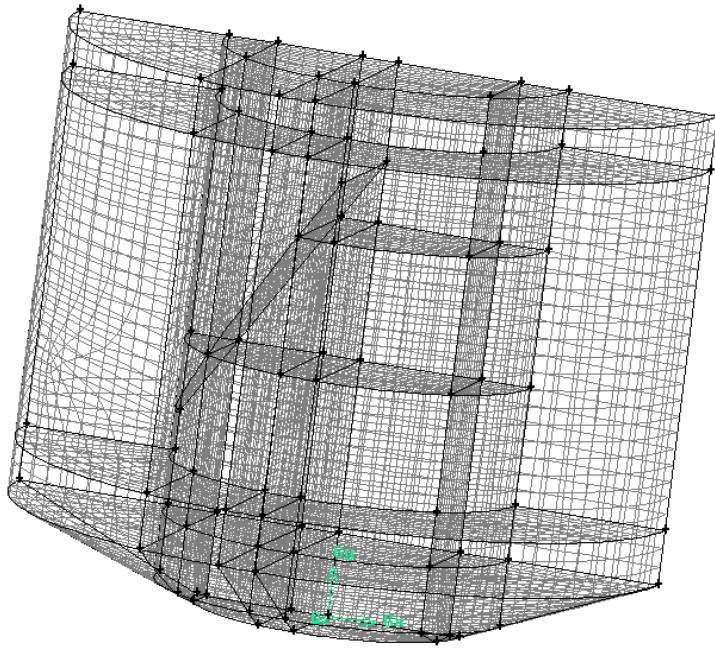
|                                |         |
|--------------------------------|---------|
| Typ KKA- UTS- VITALIS- pro     | 10-2320 |
| Behälterinnendurchmesser in mm | 2350    |
| Behälteraußendurchmesser in mm | 2450    |

|                                  |      |
|----------------------------------|------|
| Durchmesser Randprofil in mm     | 2500 |
| Nutzhalt in m <sup>3</sup>       | 7    |
| Behältertiefe T in cm            | 285  |
| Wassertiefe W <sub>t</sub> in cm | 170  |
| Gesamtgewicht in kg              | 485  |

Die KKA ist von der Geometrie her symmetrisch aufgebaut. Um bei der späteren Netzgenerierung die Zellanzahl zu verringern, wird das Volumen der KKA entlang einer Symmetrieffläche halbiert. Dieses halbierte Volumen ist in die einzelnen Teilvolumina wie Nachklärbecken und Energiequelle zu unterteilen, indem es an verschiedene Querschnittsflächen geschnitten wird. Dabei ist darauf zu achten, dass zwischen den einzelnen Volumina keine doppelten Kanten und Flächen entstehen. Ansonsten kann bei der Netzerstellung zwischen den einzelnen Volumina kein korrekter Netzübergang garantiert werden (Bild 7).



**Bild 7:** geschnittene KKA an der Symmetrieebene

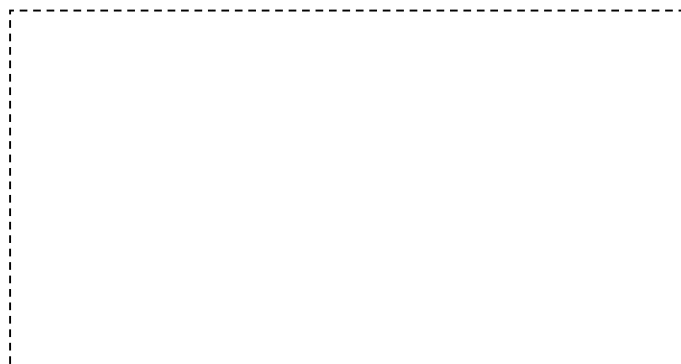


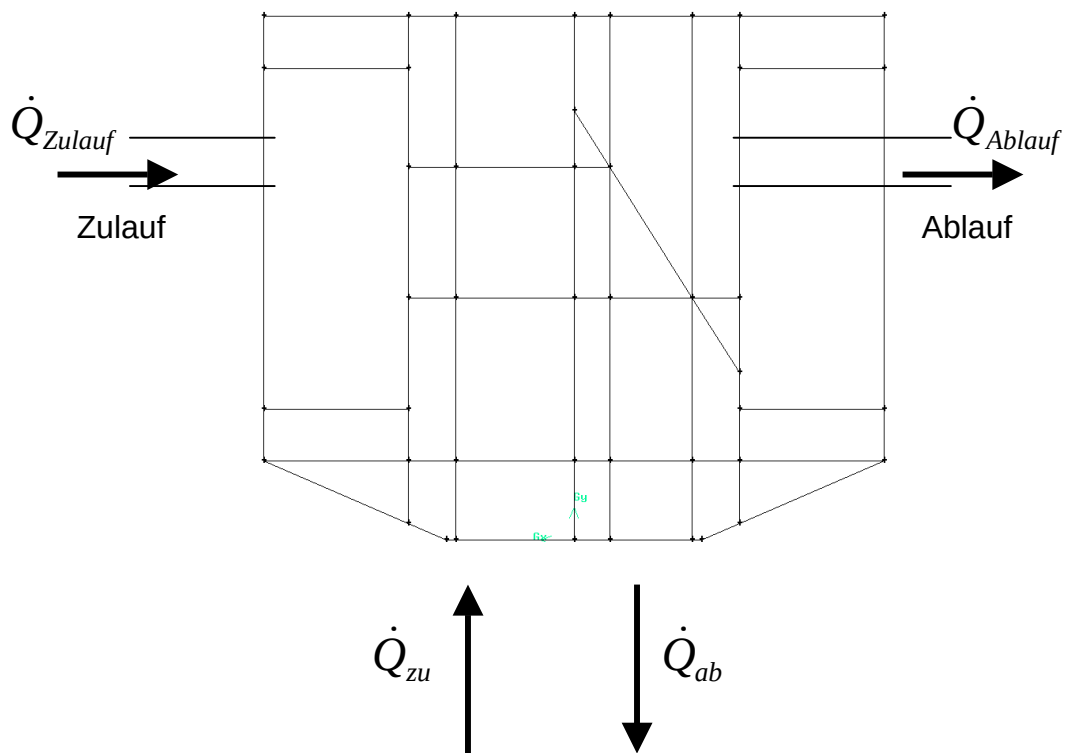
**Bild 8: komplett vernetzte KKA**

### o Bilanzierung der KKA mit Fluent

Bei der Simulation soll die nutzbare Wärmemenge der KKA ermittelt werden. Dafür muss um die KKA eine Energiebilanz vorgenommen werden. Für die Bilanzierung wird die KKA als komplett mit Wasser gefüllt betrachtet, und es wird die Erstellte Zeichnung aus Gambit zugrundegelegt. Dabei soll das Wasser komplett mit Wänden umschlossen sein.

Um die Bilanz besser zu verdeutlichen, wird um die KKA eine gedachte Bilanzhülle gelegt, die in Bild 9 als gestrichelte Linie dargestellt ist. Der Raum innerhalb der Bilanzhülle wird als Bilanzraum betrachtet, in dem sich die KKA befindet. Um diesen Bilanzraum werden die zu- und abgeführten Wärmeströme betrachtet.





**Bild 9: Symmetrieffläche der KKA mit Bilanzhülle**

Normalerweise muss der Wärmeeintrag über Zu- und Ablauf der KKA bei der Bilanzierung mit berücksichtigt werden. Der Zulauf des Abwassers erfolgt allerdings nur in unregelmäßigen Zeitintervallen, wodurch ein definierter Zulaufstrom nur schwer zu ermitteln ist. Zudem ist der Abstand des Abwasserrohres zwischen der Ablaufstelle am Haus und der Zulaufstelle an der KKA so groß, dass ein Teil der Wärme des Abwassers über die Wand des Rohres verloren geht. Zudem geht aus der Messtechnik hervor, dass die Zulaufmenge des Abwassers in die KKA keinen Einfluss auf die Temperaturen in den Kammern der KKA hat. Damit werden Zu- und Ablauf der KKA vernachlässigt.

**Unter diesen Bedingungen wird die Energiegleichung (Gl 1) betrachtet:**

$$\frac{\partial(\rho_w \cdot c_w \cdot T)}{\partial t} = -\nabla(\rho_w \cdot c_w \cdot T \cdot \vec{v}) + \nabla(\lambda_{\text{eff}} \cdot \nabla T) + \sum r_j \cdot (-\Delta H_{Rj}) + k_w \cdot \frac{A}{V_R} \cdot (\bar{T}_{\text{bod}} - \bar{T}_w)$$

**GL.1**  
**[1]**

**Bezeichnung der einzelnen Variablen:**

|                                    |                                                                                                      |
|------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $\rho_w$                           | Dichte von Wasser                                                                                    |
| $c_w$                              | spezifische Wärmekapazität von Wasser                                                                |
| $\vec{v}$                          | Geschwindigkeit des Fluids im Zu- und Ablauf                                                         |
| $\lambda_{\text{eff}}$             | effektive Wärmeleitfähigkeit                                                                         |
| $k_w$                              | Wärmedurchgangskoeffizient                                                                           |
| $A$                                | Wärmeaustauschfläche der Wand                                                                        |
| $V_R$                              | Reaktionsvolumen                                                                                     |
| $\bar{T}_{\text{bod}} - \bar{T}_w$ | Temperaturdifferenz zwischen mittlerer Wassertemperatur in der KKA und der mittleren Bodentemperatur |

Da Zu- und Ablauf der KKA nicht berücksichtigt werden, ergibt sich für den konvektiven Term:

$$-\nabla(\rho_w \cdot c_w \cdot T \cdot \vec{v}) = 0$$

GL.2

Der Term für die Wärmeentstehung bei der biologischen Reaktion  $\sum r_j \cdot (-\Delta H_{Rj})$  soll als Wärmequelle  $W_q$  bezeichnet werden.

Wenn der Prozess der KKA als stationär betrachtet wird, kann der Term links vom Gleichheitszeichen in der Energiegleichung zu Null gesetzt werden.

Damit ergibt sich für die Energiegleichung:

$$0 = \nabla(\lambda_{\text{eff}} \cdot \nabla T) + W_q + k_w \cdot \frac{A}{V_R} (\bar{T}_{\text{Bod}} - \bar{T}_w)$$

$$\Leftrightarrow W_q = - \left[ \nabla(\lambda_{\text{eff}} \cdot \nabla T) + k_w \cdot \frac{A}{V_R} (\bar{T}_{\text{Bod}} - \bar{T}_w) \right] \quad \text{GL.3}$$

Nimmt man an, dass in der KKA eine ideale Durchmischung herrscht, so ergeben sich innerhalb des Fluids keine Wärmetransportvorgänge durch Vorlage von Temperaturgradienten.

Das bedeutet, dass der Term  $\nabla(\lambda_{\text{eff}} \cdot \nabla T)$  vernachlässigt werden kann. Damit vereinfacht sich die Energiegleichung wie folgt:

$$W_q = - k_w \cdot \frac{A}{V_R} (\bar{T}_{\text{Bod}} - \bar{T}_w) \quad \text{Gl. 4}$$

Man kann also ungefähr sagen, dass der erzeugte Wärmestrom bei der biologischen Reaktion mit den abgeführten Wärmeströmen über die Behälterwände gleichzusetzen ist. Dabei wird im Programm Fluent der Wärmedurchgang als Wärmeübergang und Wärmeleitung getrennt berechnet.

- **Simulation der KKA**

Die Wassertemperaturen in den einzelnen Kammern und der Verlauf der Bodentemperatur werden durch die eingebauten Thermoelemente gemessen und liegen damit als bekannt vor. Der erzeugte Wärmestrom bei der biologischen Reaktion stellt die eigentliche unbekannte Größe dar.

**Für die Simulation wird nun nach folgender Überlegung vorgegangen:**

Das Volumen, welches von den Kunststoffstreben im Belebungsbecken eingenommen wird, wird in Fluent als Energiequelle deklariert. Als Randbedingungen werden die äußeren Oberflächentemperaturen der Außenwände in Fluent festgelegt. Während der Simulation werden nun die Temperaturen in den einzelnen Kammern der KKA berechnet. Die Wärmeleistung der Energiequelle wird so lange variiert, bis

die berechneten Temperaturen in den einzelnen Kammern mit den gemessenen Temperaturen von den einzelnen Thermoelementen übereinstimmen.

Als Randbedingung werden die Temperaturen der Außenwände der KKA den gemessenen Bodentemperaturen und Umgebungstemperaturen festgelegt.

Hierzu werden die in Tabelle 3 aufgelisteten Simulationen durchgeführt.

**Tabelle 3: Durchzuführende Simulationen**

| <b>Simulation</b> | <b>Beschreibung</b>                                                       | <b>Stoffeigenschaften<br/>der Außenwände<br/>der KKA</b> |
|-------------------|---------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|
| 1                 | Simulation der KKA mit Rand-<br>bedingungen vom<br>September/Oktober 2006 | PUR- Hartguss                                            |
| 2                 | Simulation der KKA mit<br>Randbedingungen vom 16.11.06                    | PUR- Hartguss                                            |
| 3                 | Simulation der KKA mit<br>Randbedingungen vom<br>September/Oktober 2006   | PUR- Hartschaum                                          |
| 4                 | Simulation der KKA mit<br>Randbedingungen vom 16.11.06                    | PUR- Hartschaum                                          |

Aus der oben stehenden Tabelle ist ersichtlich, dass bei den Außenwänden zwischen PUR- Hartguss und PUR- Hartschaum unterschieden wird. Der Unterschied liegt hier überwiegend bei der Wärmeleitung. Die Stoffdaten von HDPE, PUR- Hartguss und PUR- Hartschaum sind in Tabelle 4 dargestellt.

**Tabelle 4: Stoffwerte für PUR und HDPE bei 20°C [4] [6]**

| <b>Werkstoff</b> | <b>spez. Wärme-<br/>kapazität c in<br/>J/(kg*K)</b> | <b>Wärmeleitfähigkeit<br/><math>\lambda</math> in W/(m*K)</b> | <b>Dichte in <math>10^3</math><br/>kg/m<sup>3</sup></b> |
|------------------|-----------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|
| HDPE             | 1804                                                | 0,416                                                         | 0,95                                                    |
| PUR- Hartguss    | 1800                                                | 0,206                                                         | 1,1-1,2                                                 |

|                 |      |      |       |
|-----------------|------|------|-------|
| PUR- Hartschaum | 1400 | 0,03 | 0,035 |
|-----------------|------|------|-------|

Die Außenwand der KKA besteht aus einer dreischichtigen Wand. Sie besitzt außen zwei ca. 3 mm dicke HDPE- Schichten dessen Hohlraum mit PUR- Hartschaum ausgefüllt ist. Die gesamte Wandstärke der KKA- Außenwand liegt zwischen 5 und 10 cm.

Da das Berechnen der Wärmeleitung einer dreischichtigen Wand in Fluent sehr aufwändig ist, wird die Außenwand als einschichtige Wand betrachtet, indem von den Stoffdaten aus Tabelle 4, bezogen auf die Wandstärken von 5 und 10 cm, Mittelwerte gebildet werden. Diese Werte sind in Tabelle 5 dargestellt.

**Tabelle 5: Mittelwerte für PUR- Hartguss und PUR- Hartschaum bei 20°C**

| <b>Material</b> | <b>Wand-<br/>stärke s<br/>in m</b> | <b>mittlere<br/>Dichte <math>\bar{\rho}</math> in<br/>kg/m<sup>3</sup></b> | <b>mittlere spez.<br/>Wärmekapa-<br/>zität <math>\bar{c}</math> in<br/>J/(kg K)</b> | <b>mittlere<br/>Wärmeleitfähig-<br/>keit <math>\bar{\lambda}</math> in<br/>W/(m K)</b> |
|-----------------|------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|
| PUR- Hartguss   | 0,05                               | 1126,0                                                                     | 1800,48                                                                             | 0,23120                                                                                |
|                 | 0,10                               | 1138,0                                                                     | 1800,24                                                                             | 0,21860                                                                                |
| PUR- Hartschaum | 0,05                               | 144,8                                                                      | 1448,48                                                                             | 0,07632                                                                                |
|                 | 0,10                               | 89,9                                                                       | 1424,24                                                                             | 0,05316                                                                                |

In Tabelle 6 sind die Wandtemperaturen von drei verschiedenen Monaten abgebildet, die als Randbedingungen für die Außenwände der KKA verwendet werden sollen.

**Tabelle 6: Randbedingungen**

| <b>Datum</b>           | <b>Temperatur in °C</b>        |                        |                         |
|------------------------|--------------------------------|------------------------|-------------------------|
|                        | <b>äußere<br/>Zylinderwand</b> | <b>Deckfläch<br/>e</b> | <b>Bodenfläch<br/>e</b> |
| September/Oktober 2006 | 16,58                          | 17,42                  | 15,51                   |
| 16.11.2006             | 12,00                          | 14,00                  | 13,00                   |

Aufgrund der unterschiedlichen Wärmeleitwerte von PUR- Hartguss und PUR- Hartschaum haben sich für die erzeugte Wärmeleistung der KKA verschiedene Werte ergeben, die in Tabelle 7 dargestellt sind.

Tabelle 7: Simulationen

| <b>Simulation</b> | <b>Beschreibung</b>                                                                 | <b>Wärmeleistung<br/>in W</b> |
|-------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|
| 1                 | Simulation der KKA mit Randbedingungen von September/Oktober 2006 (PUR- Hartguss)   | 150                           |
| 2                 | Simulation der KKA mit Randbedingungen vom 16.11.06 (PUR- Hartguss)                 | 150                           |
| 3                 | Simulation der KKA mit Randbedingungen von September/Oktober 2006 (PUR- Hartschaum) | 50                            |
| 4                 | Simulation der KKA mit Randbedingungen vom 16.11.06 (PUR- Hartschaum)               | 30                            |

Um die Funktion der Wärmedämmung zu erfüllen, bestehen die Wände der KKA eher aus PUR- Hartschaum. Damit liegt bei der KKA nach den Berechnungen eine erzeugte Wärmeleistung zwischen 30 und 50 W vor.

- **Wärmepumpe**

Die erzeugte Wärmeleistung, die aus den vorherigen Simulationen hervorgeht, soll für einen Kompostierungsprozess genutzt werden. Zur Nutzung dieser Wärme und zur Beheizung des Komposters soll eine Wärmepumpe eingesetzt werden.

Nun muss untersucht werden, ob sich der Einsatz einer Wärmepumpe rentiert. Für diese Betrachtung wird die Carnotsche Leistungszahl für die Wärmepumpe  $\varepsilon_{CW}$  und die Carnotsche Leistungszahl für die Kältemaschine  $\varepsilon_{CK}$  herangezogen.

$$\varepsilon_{\text{CK}} = \frac{T_0}{T - T_0} = \frac{\dot{Q}_0}{N} \quad \text{Gl. 5}$$

$$\varepsilon_{\text{CW}} = \frac{\dot{Q}}{N} = \varepsilon_{\text{CK}} + 1 \quad \text{Gl. 6}$$

|             |                                         |
|-------------|-----------------------------------------|
| $T_0$       | Temperatur der KKA                      |
| $T$         | Temperatur Komposter                    |
| $\dot{Q}_0$ | erzeugter Wärmestrom der KKA            |
| $\dot{Q}$   | abgeführter Wärmestrom in den Komposter |
| $N$         | Antriebsleistung der Wärmepumpe         |

[7]

Für die oben stehenden Gleichungen wird folgendes Beispiel betrachtet:

Die Temperatur im Komposter betrage 60 °C. Um eine Erwärmung zu erzielen, soll die Wärme  $\dot{Q}$  bei  $\nu = 100$  °C an den Komposter abgegeben werden. Die nutzbare Wärme der KKA soll  $\dot{Q}_0 = 40$  W betragen, die bei einer Temperatur von  $\nu_0 = 20$  °C entnommen wird.

Demnach würde sich nach Anwendung der Gleichungen Gl. 5 und Gl. 6 eine Wärmeleistung von maximal  $\dot{Q} = 51$  W ergeben, die in den Komposter eingetragen werden kann.

Für die Antriebsleistung der Wärmepumpe ergibt sich ein Wert von  $N = 11 \text{ W}$ .

- **Simulation des Komposters**

Für die Simulation des Komposters wird ein Beispielbehälter betrachtet, der eine ähnliche Bauweise besitzt, wie der KKA- Behälter. Die Außenwände bestehen ebenfalls aus PUR- Hartschaum, die von zwei dünnen HDPE- Schichten abgedeckt sind. Die Stoffdaten der Außenwand werden mit den Mittelwerten aus Tabelle 5 bezogen auf PUR- Hartschaum deklariert. Für die Geometrie werden die Maße des Behältertypen „Europa-SB2020“ der Fa. Innotec verwendet, die in Tabelle 8 abgebildet sind.

Tabelle 8: Behälterdaten [8]

| Bezeichnung | Behälter typ | Nutz Inhalt in $\text{m}^3$ | Außen-Ø in cm | Einbautiefe <sup>1</sup> in cm | Gesamtgewicht in kg |
|-------------|--------------|-----------------------------|---------------|--------------------------------|---------------------|
| EUROPA      | SB 2020      | 6                           | 220           | 285                            | 345                 |

Bei der Simulation wird der Kompostbehälter, ähnlich wie bei der Simulation der KKA, an seiner Symmetrieebene halbiert um die Anzahl der Zellen zu verringern. Im Komposter wird der Kompost als Kugeln dargestellt, dessen Durchmesser 30 cm betragen. Durch die Symmetrieebene wird die Simulation nur mit der halben Anzahl der Kompostkugeln durchgeführt (Bild 10).

Beim Betrieb des Komposters sollen sich die Kugeln auf einer U-förmigen Kugelrutsche befinden, dessen Start- und Endpunkt zum oberen Deckel des Behälters führen. Das Gewicht der Kompostkugeln nimmt während des Kompostierungsprozesses ab. Durch Aufgabe von frischen Kompostkugeln, die ein höheres Gewicht besitzen, werden die leichten Kompostkugeln entlang der Kugelrutsche zum oberen Deckel befördert, wo sie entnommen werden können. Durch die Bewegung der Kugeln erfolgt eine Durchmischung des Kompostes, wodurch die Kompostierung begünstigt wird. Ebenfalls wird durch die Kugelform des Kompostes eine große Oberfläche erzeugt, wodurch das Einwirken der Wärme im Kompostbehälter auf den Kompost besser erfolgen kann.

Ziel ist es nun, den Kompostbehälter mit Hilfe einer Wärmepumpe und der nutzbaren Wärmemenge der KKA zu beheizen, um den Kompostierungsprozess zu beschleunigen. Hierzu muss im Komposter eine Wärmeaustauschfläche vorhanden

sein. Bei der Simulation wird eine Wärmeaustauschfläche parallel zum Boden des Behälters (Bild 10) und parallel zur zylindrischen Außenwand gelegt (Bild 11).

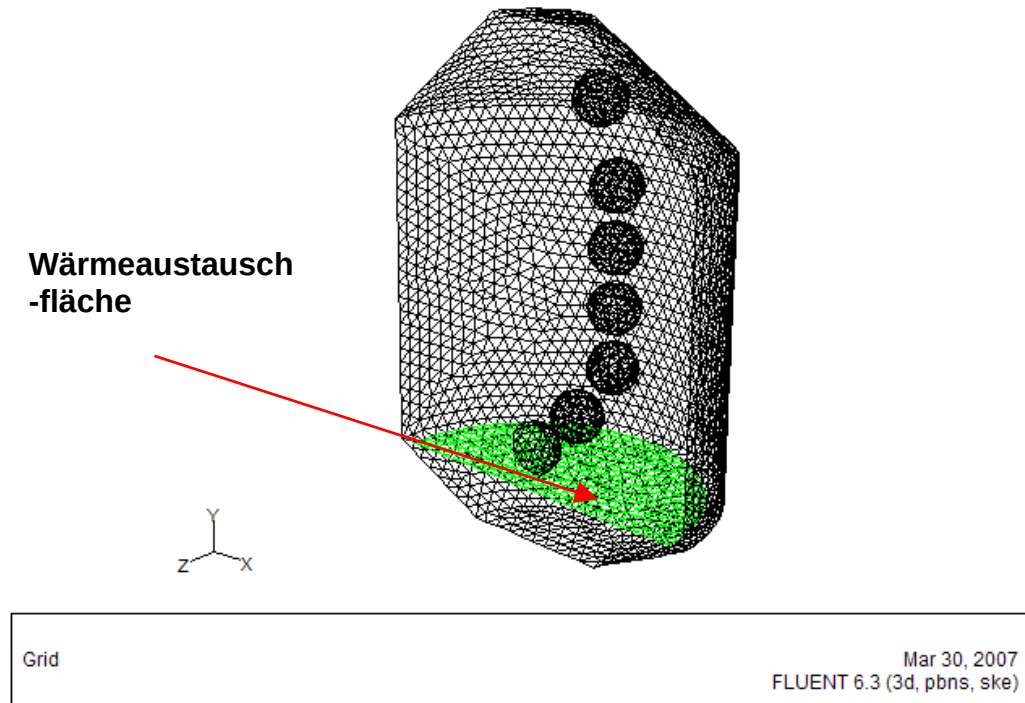


Bild 10 Wärmeaustauschfläche parallel zum Boden

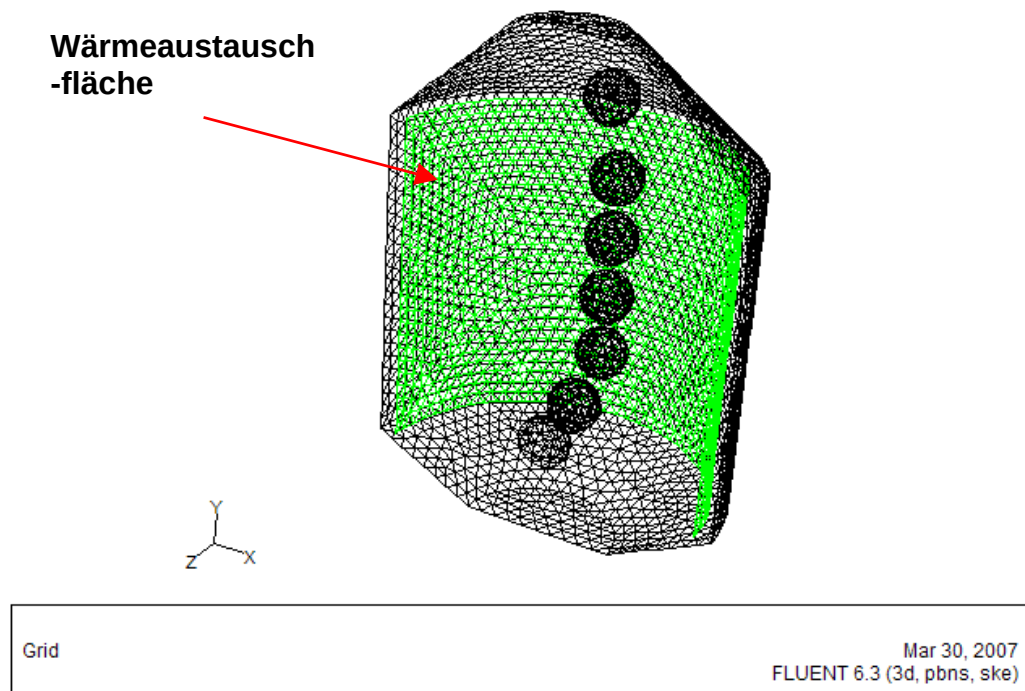


Bild 11 Zylindrische Wärmeaustauschfläche

**Für die Simulation wird folgende Überlegung zugrunde gelegt:**

Kompost besitzt nach einer gewissen Zeit im Innern eine Temperatur von ca. 60°C. Daher sollen auch die Kompostkugeln bei der Simulation eine Temperatur von 60°C im Komposter besitzen. Dabei werden sie mit einer volumenspezifischen Energiequelle beaufschlagt, die einer Temperatur von 60°C entspricht. Bei der Simulation beträgt diese volumenspezifische Wärmeleistung 1600 W/m<sup>3</sup>. Nun wird der Komposter bei der Simulation über die Wärmeaustauschflächen mit einer festgelegten Temperatur beheizt. Anschließend wird untersucht, wie sich die Temperaturen in den Kompostkugeln verhalten.

Für die Simulation des Komposters werden die Temperaturen vom 16.11.06 als Randbedingungen für die Außenwände des Behälters herangezogen.

Wandtemperatur: 285,15 K

Temperatur Deckfläche: 287,15 K

Temperatur Bodenfläche: 286,15 K

Es wird ebenfalls wieder zwischen verschiedenen Stoffdaten unterschieden. Zunächst wird der Kompost mit der Wärmeleitfähigkeit von Wasser und mit der Dichte von Aluminium deklariert. Anschließend wird er mit der Dichte von Sand und der Wärmeleitfähigkeit von Humus deklariert. Die Umgebung um die Kompostkugeln wird als Luft definiert.

Die unterschiedliche Deklaration hängt damit zusammen, dass Kompost einen gewissen Teil an Feuchte besitzt. Hier werden die Stoffdaten von Wasser herangezogen. Bei der Kompostierung selbst zerfällt der Abfall in humose Bestandteile. Daher werden zusätzlich die Stoffdaten von Humus und Sand herangezogen.

Tabelle 9: Stoffdaten für Kompost [10]

| Stoffart | Wärmeleitfähigkeit<br>$\lambda$ in (W/m K) | Dichte<br>$\rho$ in<br>kg/m <sup>3</sup> |
|----------|--------------------------------------------|------------------------------------------|
| Wasser   | 0,6                                        |                                          |
| Sand     |                                            | 1160                                     |
| Humus    | 0,25                                       |                                          |

|           |  |      |
|-----------|--|------|
| Aluminium |  | 2719 |
|-----------|--|------|

Tabelle 10: Simulationen für den Komposter

| Simulation | Beschreibung                                                                                      | Stoffdaten                          |
|------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|
| 1          | Beheizung mit der parallelen Wärmeaustauschfläche zum Behälterboden bei einer Temperatur von 80°C | Stoffdaten von Wasser und Aluminium |
| 2          | Beheizung mit der zylindrischen Wärmeaustauschfläche bei einer Temperatur von 67°C                | Stoffdaten von Wasser und Aluminium |
| 3          | Beheizung mit der parallelen Wärmeaustauschfläche zum Behälterboden bei einer Temperatur von 80°C | Stoffdaten von Sand und Humus       |
| 4          | Beheizung mit der zylindrischen Wärmeaustauschfläche bei einer Temperatur von 67°C                | Stoffdaten von Sand und Humus       |

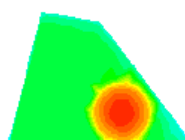
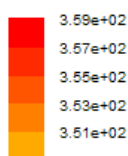
### o Simulation 1

Für diese Simulation sind die Ergebnisse in Tabelle 11 abgebildet.

Tabelle 11: Temperaturen von Simulation1

| Wärmeleistung<br>Kompostkugel in<br>W/m <sup>3</sup> | Temperatur<br>Luft in K | Temperatur<br>Wärmeaus-<br>tauschfläche in K | Temperatur<br>Kompost-<br>kugel in K |
|------------------------------------------------------|-------------------------|----------------------------------------------|--------------------------------------|
| 1600                                                 | 335,88                  | 353                                          | 359                                  |

Bei 1600 W/m<sup>3</sup> hätte der Kompost eine Temperatur von nur 333 K. Man erkennt an der Tabelle, dass die Temperatur der Kompostkugeln nun 359 K betragen. Die Temperatur ist also bei diesem Beispiel um 26 K im Kompost gestiegen. Die Wärmeaustauschfläche besitzt eine festgelegte Temperatur von 353 K.



#### Bild 12 Temperaturverlauf von Simulation 1

In Bild 12 ist zu erkennen, dass die Temperatur im Innern des Kompostes am höchsten ist. Das hängt damit zusammen, dass die Kompostkugeln mit einer volumenspezifischen Wärmeleistung von  $1600 \text{ W/m}^3$  deklariert sind, um die biologische Abbaureaktion von Kompostabfall zu Humus darzustellen.

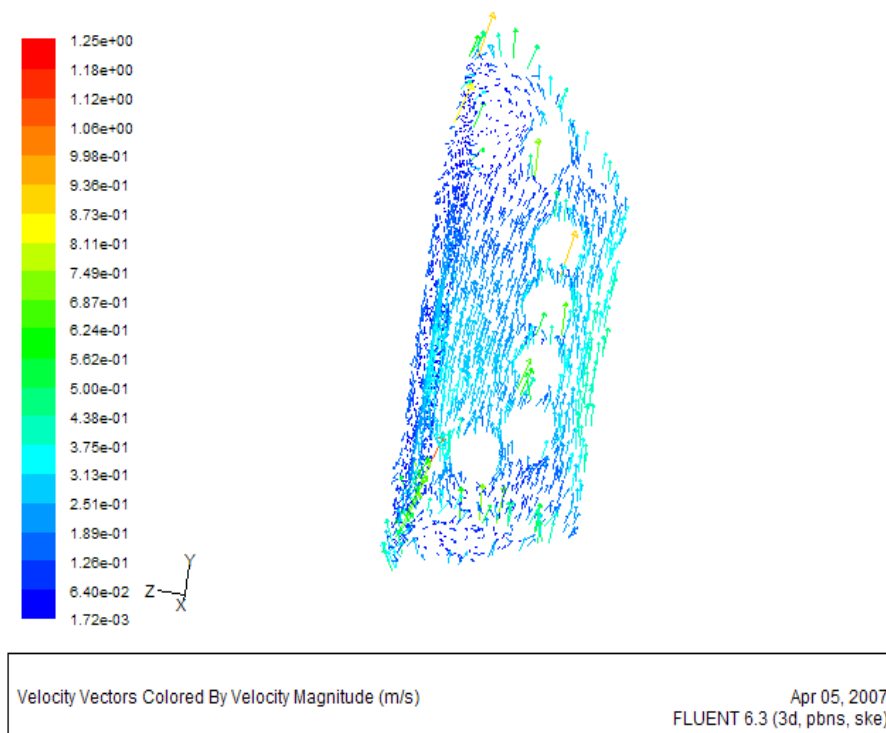


Bild 13 Geschwindigkeitsprofil von Simulation 1

In Bild 13 ist zu erkennen, dass die Luft zwischen den Kugeln aufsteigt, und im inneren Raum des Komposters am oberen Rand einen Wirbel ausbildet. Dadurch werden die Kompostkugeln gleichmäßig beheizt.

## o Simulation 2

Für diese Simulation sind die Ergebnisse in Tabelle 12 abgebildet.

Tabelle 12: Temperaturen von Simulation 2

| Wärmeleistung<br>Kompostkugel in<br>W/m <sup>3</sup> | Temperatur<br>Luft in K | Temperatur<br>Wärmeaus-<br>tauschflä-<br>che in K | Temperatur<br>Kompost-<br>kugel in K |
|------------------------------------------------------|-------------------------|---------------------------------------------------|--------------------------------------|
| 1600                                                 | 337,42                  | 340                                               | 360,66                               |

Bei 1600 W/m<sup>3</sup> hätte der Kompost eine Temperatur von nur 333 K. Man erkennt an der Tabelle, dass die Temperatur der Kompostkugeln nun 360,66 K betragen. Die Temperatur ist also bei diesem Beispiel um 27,66 K im Kompost gestiegen.

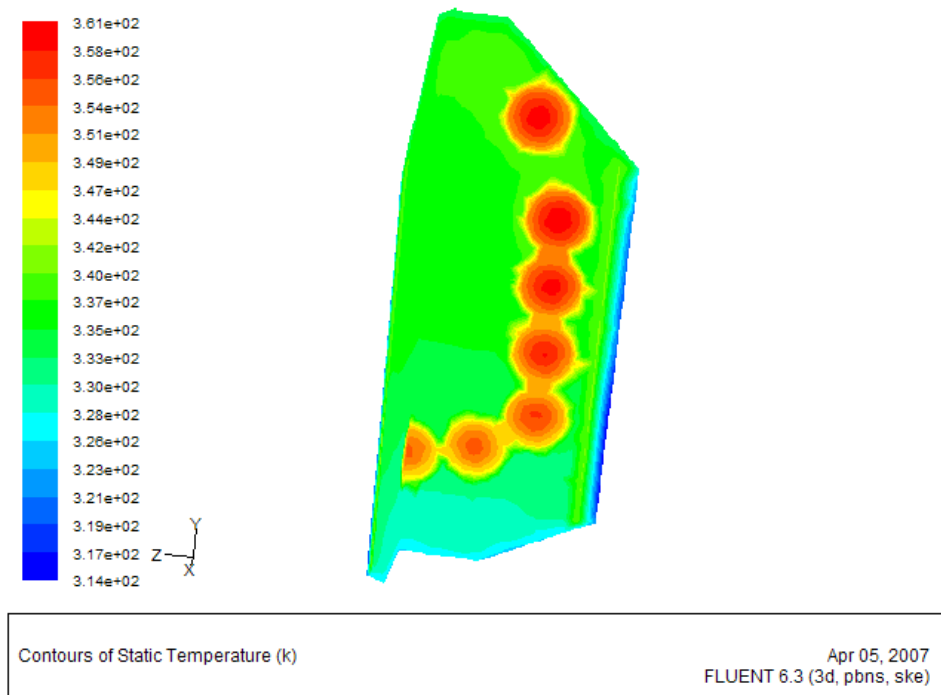


Bild 14 Temperaturverlauf von Simulation 2

In Bild 14 ist ebenfalls zu erkennen, dass die Temperatur im Innern des Kompostes am höchsten ist.

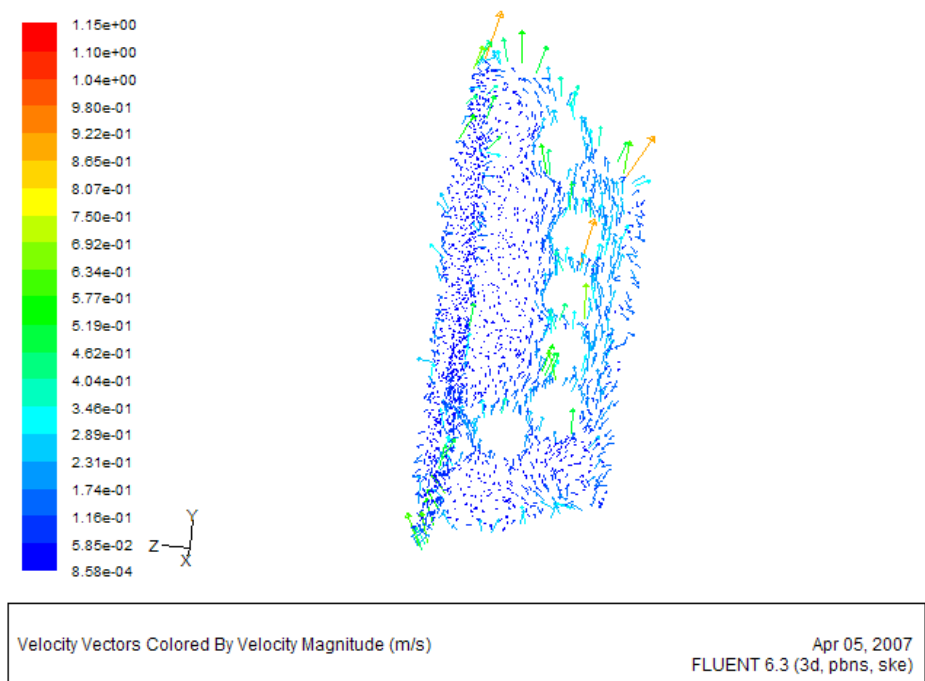


Bild 15 Geschwindigkeitsprofil von Simulation 2

In Bild 15 ist zu erkennen, dass sich bei einer Wärmeaustauschfläche parallel zur zylindrischen Außenwand ein unstrukturiertes Strömungsbild ausbildet. Daher ist eine parallele Wärmeaustauschfläche zum Behälterboden vorzuziehen.

### o Simulation 3

Für diese Simulation sind die Ergebnisse in Tabelle 13 abgebildet.

Tabelle 13: Temperaturen von Simulation 3

| Wärmeleistung<br>Kompostkugel in<br>W/m <sup>3</sup> | Temperatur<br>Luft in K | Temperatur<br>Wärmeaus-<br>tauschfläc-<br>he in K | Temperat-<br>ur<br>Kompost-<br>kugel in K |
|------------------------------------------------------|-------------------------|---------------------------------------------------|-------------------------------------------|
| 1600                                                 | 353,68                  | 353                                               | 370,77                                    |

Bei 1600 W/m<sup>3</sup> hätte der Kompost eine Temperatur von nur 333 K. Man erkennt an der Tabelle, dass die Temperatur der Kompostkugeln nun 370,77 K betragen. Die Temperatur ist also bei diesem Beispiel um 37,77 K im Kompost gestiegen.

### o Simulation 4

Für diese Simulation sind die Ergebnisse in Tabelle 14 abgebildet.

Tabelle 14: Temperaturen von Simulation 4

| Wärmeleistung<br>Kompostkugel in<br>W/m <sup>3</sup> | Temperatur<br>Luft in K | Temperatur<br>Wärmeaus-<br>tauschfläc-<br>he in K | Temperat-<br>ur<br>Kompost-<br>kugel in K |
|------------------------------------------------------|-------------------------|---------------------------------------------------|-------------------------------------------|
| 1600                                                 | 337,5                   | 340                                               | 372,48                                    |

Bei 1600 W/m<sup>3</sup> hätte der Kompost eine Temperatur von nur 333 K. Man erkennt an der Tabelle, dass die Temperatur der Kompostkugeln nun 372,48 K betragen. Die Temperatur ist also bei diesem Beispiel um 39,48 K im Kompost gestiegen.

Tabelle 15: Ergebnisse der Simulationen

| <b>Simula-<br/>tion</b> | <b>Stoffdaten</b>                      | <b>Temperatur<br/>Heizfläche<br/>in K</b> | <b>Temperatur<br/>Kompost in<br/>K</b> |
|-------------------------|----------------------------------------|-------------------------------------------|----------------------------------------|
| 1                       | Stoffdaten von Wasser<br>und Aluminium | 353                                       | 359,00                                 |
| 2                       | Stoffdaten von Wasser<br>und Aluminium | 340                                       | 360,66                                 |
| 3                       | Stoffdaten von Sand und<br>Humus       | 353                                       | 370,77                                 |
| 4                       | Stoffdaten von Sand und<br>Humus       | 340                                       | 372,48                                 |

Man erkennt, dass bei dem Kompost, dessen Stoffdaten mit der Dichte von Sand und mit der Wärmeleitfähigkeit von Humus deklariert sind, höhere Temperaturen auftreten als bei dem Kompost, der mit der Dichte von Aluminium und der Wärmeleitfähigkeit von Wasser deklariert ist.

## • Diskussion

Nach der Berechnung der resultierenden Wärmeleistung für den Komposter bei der Wärmepumpe lohnt sich der Prozess nur, wenn die Temperatur, bei der die Energie in den Komposter eingeleitet wird, nicht zu hoch ist. Wenn diese Temperatur steigt, steigt auch der Energieverbrauch der Wärmepumpe. Ist der Energieverbrauch der Wärmepumpe wesentlich größer als die abgeführte Energie aus der KKA, wird sich eine Wärmepumpe nicht mehr rentieren.

Ebenfalls muss bei der errechneten Energie der KKA von 30 bis 50 W ein gewisser Sicherheitsaufschlag mit berücksichtigt werden. Bei der Simulation treten zwischen den einzelnen Volumenelementen im Netz Temperaturgradienten auf, die das Ergebnis leicht verfälschen können. Ebenfalls wird ein sehr grobes Netz mit einer Intervallgröße von 60 verwendet. In Fluent schwanken die Ergebnisse bei zu groben Netzen für gewöhnlich wesentlich stärker als bei feineren Netzen. Bei den

durchgeführten Simulationen sind allerdings bei Netzverfeinerungen die Schwankungen der berechneten Temperaturen in der KKA gestiegen. Das liegt wahrscheinlich daran, dass im Netz die Volumenelemente teilweise Verzerrungen aufweisen. Diese machen sich bei feineren Netzen stärker bemerkbar.

Bei der Simulation wird die KKA als komplett dicht und ohne Zu- und Ablauf betrachtet. Bei der Auswertung der Messdaten hatte die Zulaufmenge schließlich auch keinen Einfluss auf die Temperaturen in der KKA. Jedoch muss man bedenken, dass bei der Zulaufmenge die Temperatur vom Hausablauf betrachtet wird. Diese Temperatur sinkt zur KKA hin ab, da das Abwasserrohr vom Haus zur KKA sehr lang ist. Damit geht über das Rohr ein Teil der Wärme verloren. Zusätzlich läuft vom Labor aus ständig Kaltwasser in die KKA, wodurch ebenfalls die Temperaturen in der KKA abnehmen.

Die KKA ist in Realität nicht komplett dicht. Neben dem Deckel befindet sich ein Rohrstutzen zur Schlammmentnahme. Über diesen Stutze wird Umgebungsluft in die KKA eingetragen. Auf der KKA befindet sich zusätzlich ein Betondeckel mit Lüftungslöchern, wodurch ebenfalls Umgebungsluft in die KKA eingetragen werden kann. Dadurch werden natürlich die Temperaturen innerhalb der KKA beeinträchtigt, was bei den Simulationen nicht mit berücksichtigt wird.

Bei der Messdatenauswertung stellt man fest, dass sich die Temperaturen, bis auf die Umgebungstemperatur, während der Messdatenerfassung nicht drastisch verändert haben. Man kann z.B. keine Aussage darüber treffen, wie sich die Temperaturen in der KKA verhalten hätten, wenn die Temperaturen im Boden weit unter 0 °C gesunken wären (Bodenfrost).

- **Ausblick**

Aufgrund der Temperaturanstiege im Kompost bei der Simulation des Komposters lohnt es sich, das Projekt weiter zu verfolgen. Bei Simulation 4 in Kap.7.4 besitzt die Wärmeaustauschfläche eine Temperatur von 340 K. Der Kompost besitzt im Normalzustand eine Temperatur von 333 K. Beaufschlagt man also den Komposter mit einer Temperatur, die nur 7 K wärmer als der Kompost selbst ist, erreicht man eine Temperatur im Kompost um ca. 372 K (99°C). Zum Normalzustand ist das eine Temperaturerhöhung von 39 °C. Man muss natürlich berücksichtigen, dass hier durch Fluent theoretisch berechnete Werte vorliegen. In der Praxis dauert es einige Zeit, bis der Kompost eine Temperatur von 333 K (60°C) erreicht hat.

Die Heizwärme von 340 K (67°C) kann mit einer Wärmepumpe aufgebracht werden. Nach den Berechnungen kann man annehmen, dass von der errechneten Wärmeleistung der KKA, die zwischen 30 und 50 W liegt, 40 W als nutzbare Energie zur Verfügung stehen. Dann würde nach den Carnotschen Leistungszahlen (Gl. 5 und 6) die Antriebsleistung der Wärmepumpe ca. 7 W und die eingebrachte Wärmeleistung in den Komposter ca. 47 W betragen.

Natürlich muss an dieser Stelle berücksichtigt werden, dass die Carnotschen Leistungszahlen aus einem thermodynamischen Vergleichsprozess resultieren. Das bedeutet, dass in der Praxis eine eingebrachte Wärmeleistung in den Komposter von 47 W bei einer nutzbaren Wärmemenge von 40 W aus der KKA nicht erreicht werden kann, da beim Prozess der Wärmepumpe selbst Wärmeverluste entstehen.

Um die nutzbare Wärmemenge aus der KKA in den Komposter einzuleiten, müssen in beiden Behältern Wärmetauscher angebracht werden. Der Wärmeentzug aus der KKA und der Wärmeeintrag in den Komposter hängen vom Wärmeleitwert und damit vom Material des Wärmetauschers ab. Auch die Strömung des Wärmetransportmittels in den Wärmetauschern hat einen Einfluss auf den Wärmeentzug aus der KKA und den Wärmeeintrag in den Komposter.

Zusätzlich muss sichergestellt werden, dass eine Mindesttemperatur in der KKA von 11 °C nicht unterschritten wird, da ansonsten der biologische Abbauprozess nicht aufrechterhalten werden kann. Damit können wiederum die Grenzwerte der einzelne Parameter im gereinigten Wasser nicht eingehalten werden.

Für das weitere Vorgehen des Projektes, sollte mit der KKA folgender Versuch durchgeführt werden:

Die nutzbare Wärmemenge zwischen 30 und 50 W wird der KKA manuell entzogen. Hierfür wird eine Wärmetauscherplatte oder ein Rohr mit bekanntem Material und bekannten Wärmeleitwerten zylindrisch um das Belebungsbecken der KKA angebracht. Anschließend wird zur Wärmeentnahme ein negativer Temperaturgradient vom Belebungsbecken zum Wärmetauscher hin aufgebaut. Dies kann geschehen, indem an dem Wärmetauscher eine Wärmepumpe mit bekannter Leistungszahl angeschlossen und somit die Wärme im Belebungsbecken entzogen wird.

Die Wärme kann aber auch mit Hilfe eines Rohrs entnommen werden, indem man z.B. Wasser mit einem bestimmten Volumenstrom durch das Rohr fließen lässt und die Temperatur des Wassers am Ein- und Austritt des Rohres und die Temperatur im Belebungsbecken misst. Am Eintritt muss das Wasser eine geringere Temperatur als das Belebungsbecken besitzen, da sonst kein negativer Temperaturgradient gebildet werden kann.

Während der Wärmeentnahme in der KKA muss das Verhalten der Temperatur im Belebungsbecken untersucht werden.

Des Weiteren muss der Kompostbehälter gebaut und in den Boden eingebracht werden. Auch hier muss anhand eines Versuches untersucht werden, welche Temperaturen im Komposter und im Kompost selbst erreicht werden. Hier sollte ein Wärmetauscher wie bei den Simulationen zylindrisch zur Außenwand und parallel zum Boden eingebaut werden, die als Heizfläche dienen. Die Wärmetauscher können zunächst mit Wasser durchströmt werden, dessen Volumenstrom und Temperatur bekannt ist. Während des Versuchs müssen dann die Temperaturen im Komposter und im Kompost selbst bei variierender Wassertemperatur in den Wärmetauschern betrachtet werden.

- **Literaturverzeichnis**

[1] Prof. Dr. P. v. Frieling 2002, Vorlesungsskript-Grundlagen der Verfahrenstechnik.

[2] Hoffmann, J. (Hrsg.): Handbuch der Messtechnik. Carl Hanser Verlag, München, Wien. 3. Auflage 2007, 821 Seiten, ISBN 978-3-446-40750-3.

[3] Hoffmann, J.; Trentmann, W.: Praxis der PC-Messtechnik. Mit CDROM, Carl Hanser Verlag, München, Wien 2002, 295 Seiten, ISBN 3-446-21708-8.

[4] Cerbe/Wilhelms 2005, Technische Thermodynamik, Hanser Verlag

[5] <http://www.huntmann.de>

[6] VDI 2002, VDI- Wärmeatlas, Springer Verlag

[7] Fluent.Inc Benutzerhandbuch

[8] <http://www.waermedaemstoffe.com>

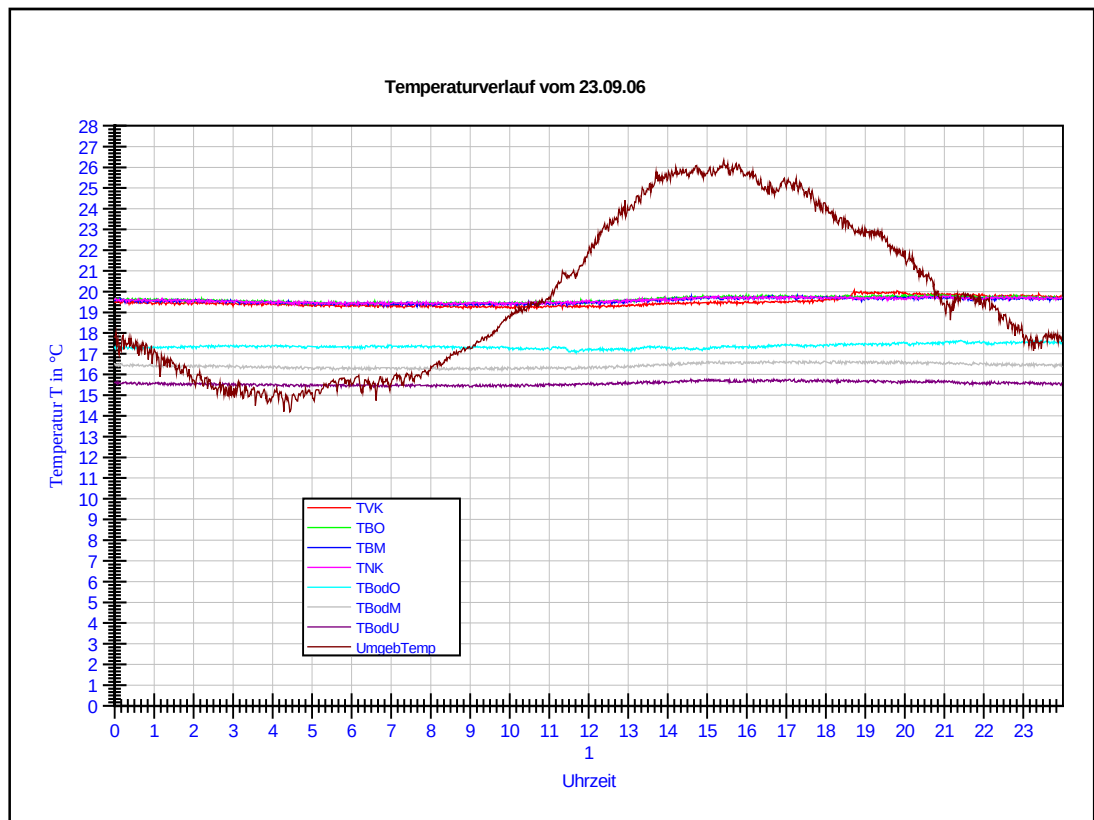
[9] H.L.v.Cube/F.Steimle, Wärmepumpen (Grundlagen und Praxis), VDI-Verlag

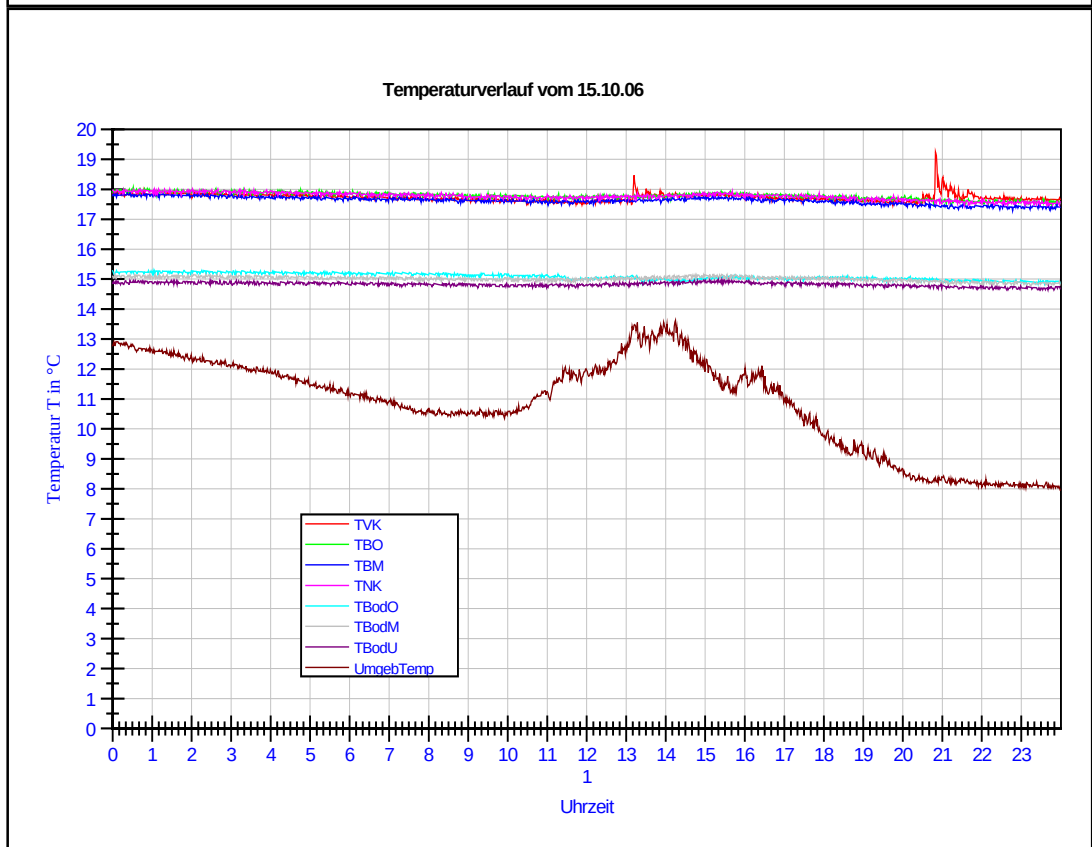
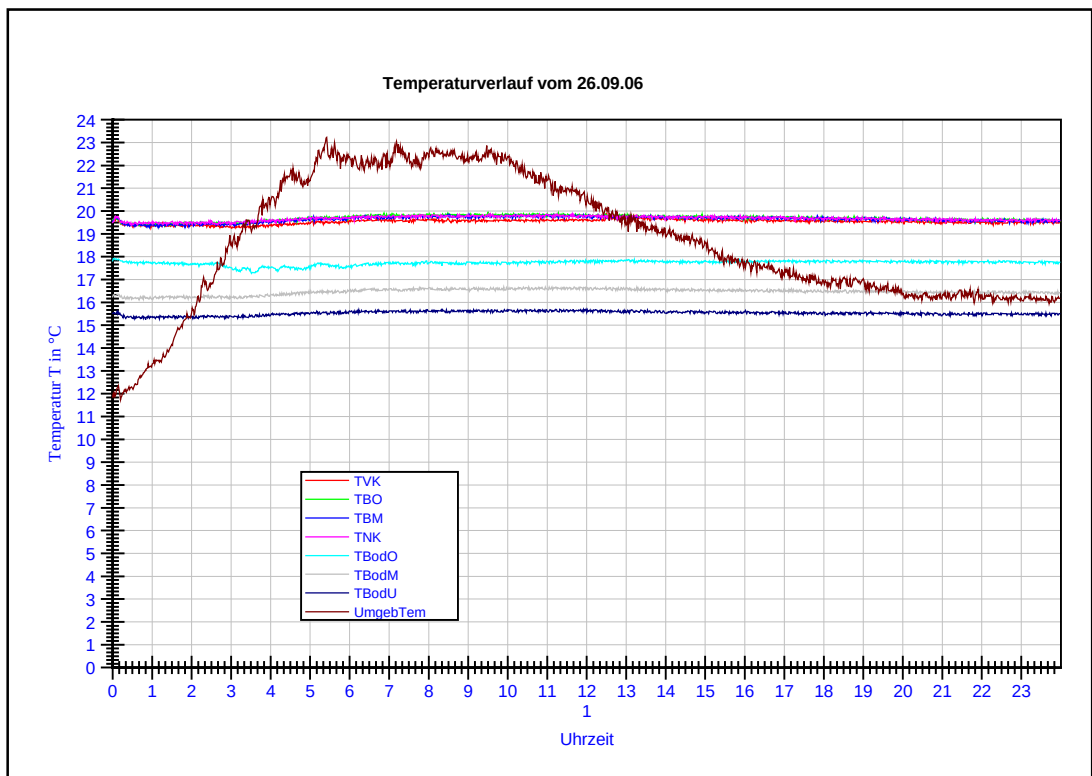
[10] <http://www.inno-tec.com>

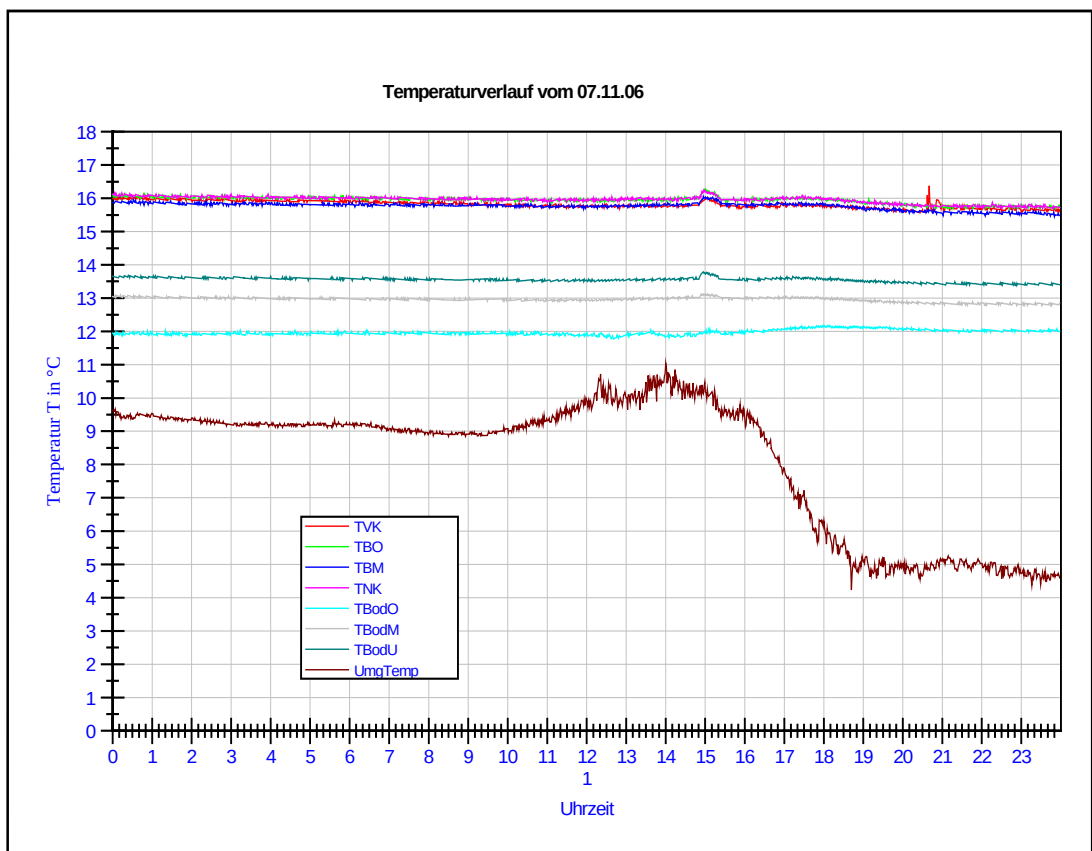
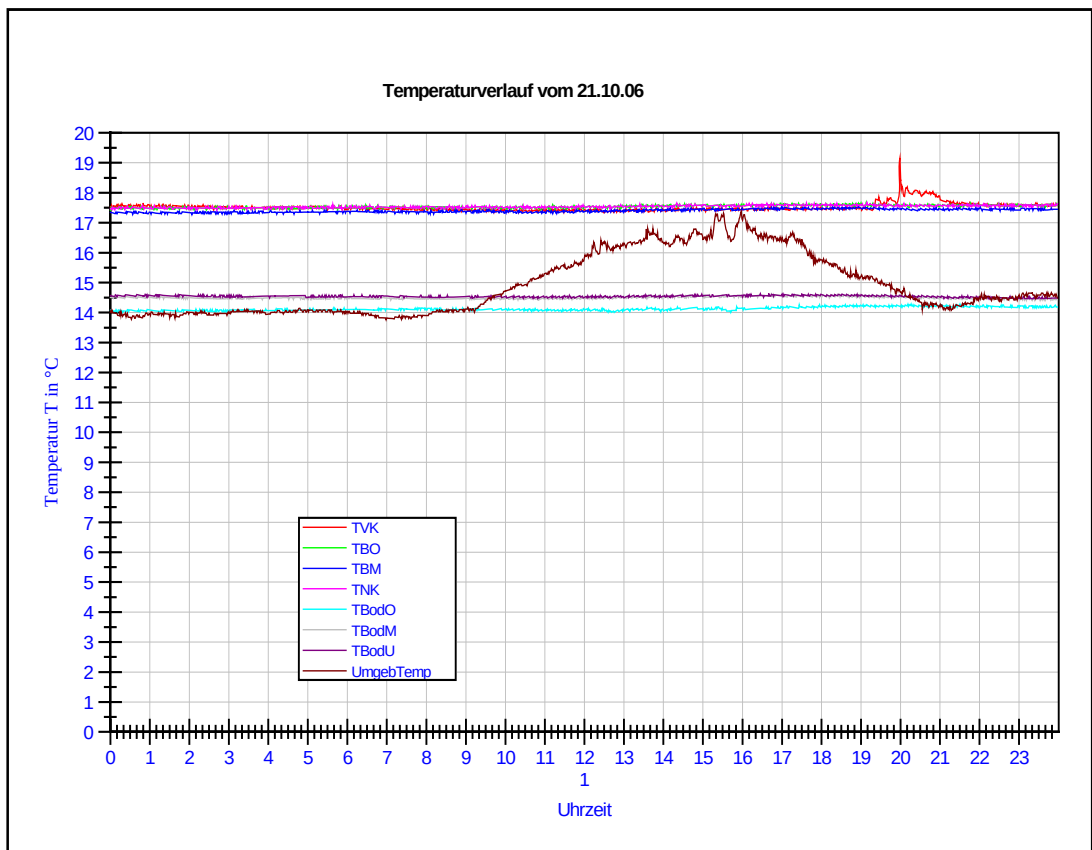
[11] Scheffer/Schachtschabel 2002, Lehrbuch der Bodenkunde, Spektrum Verlag

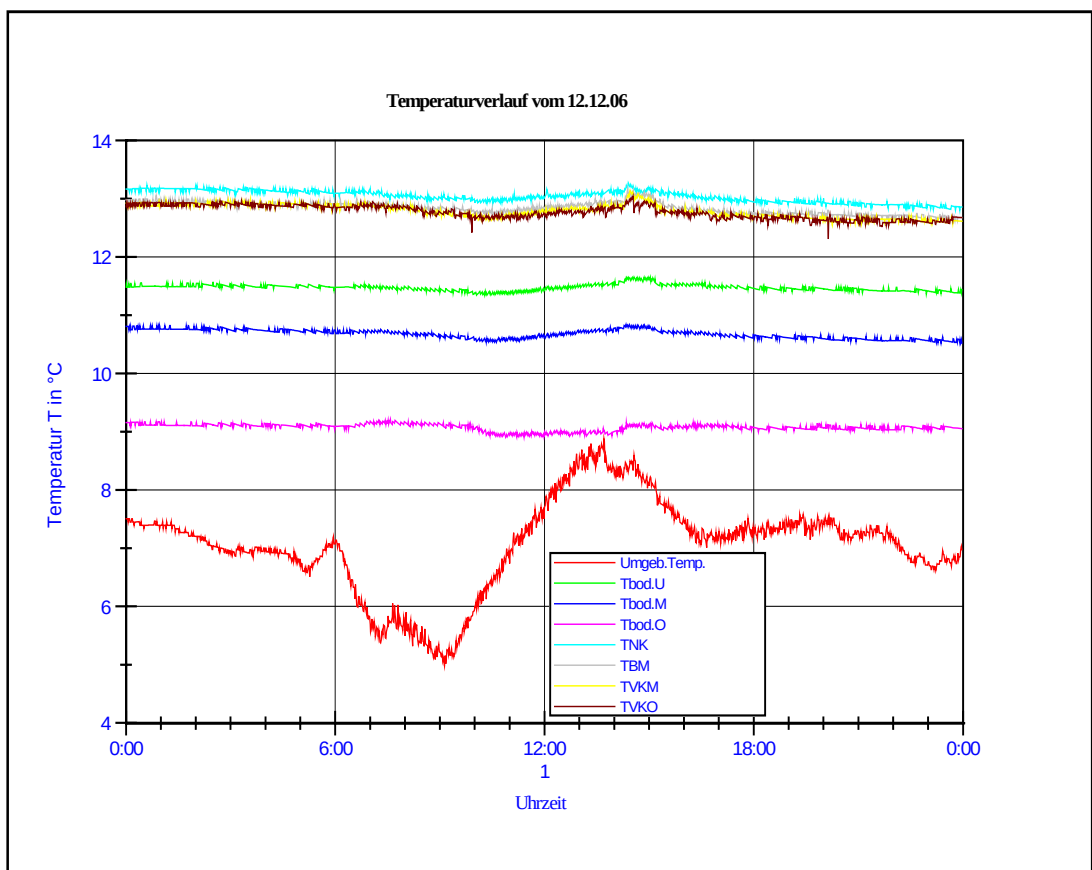
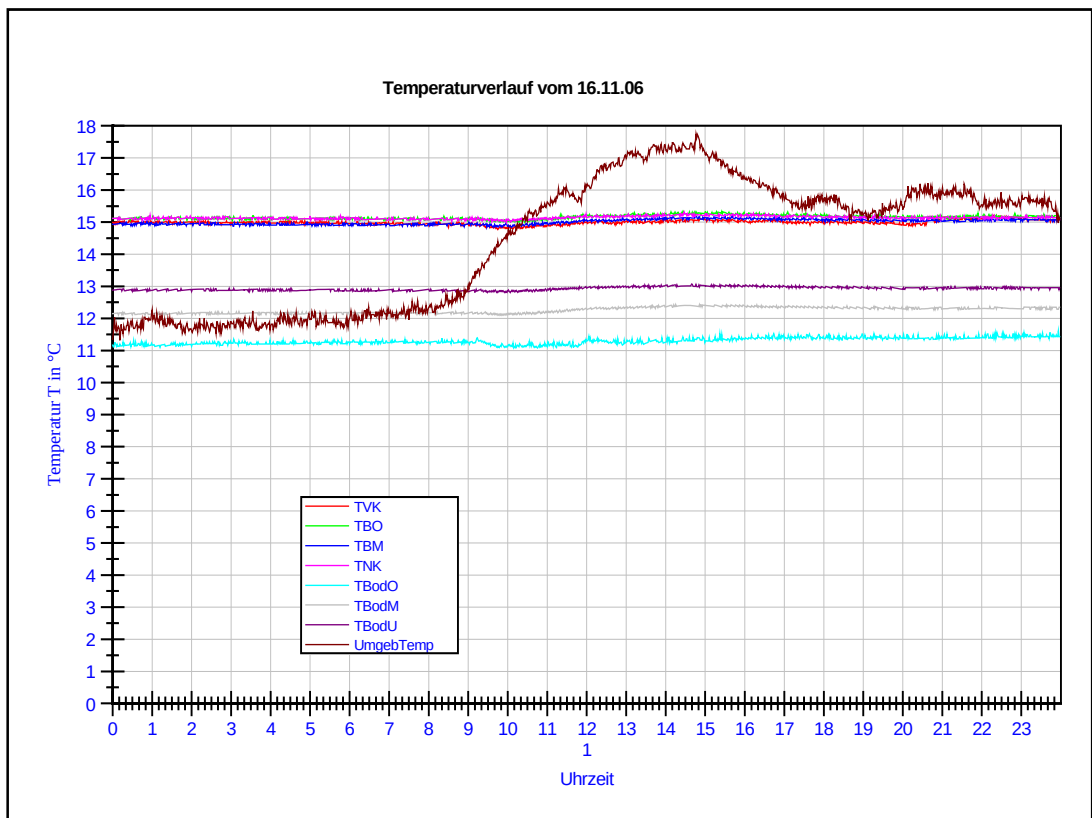
- **Anhang**

- o Temperaturverläufe an verschiedenen Tagen

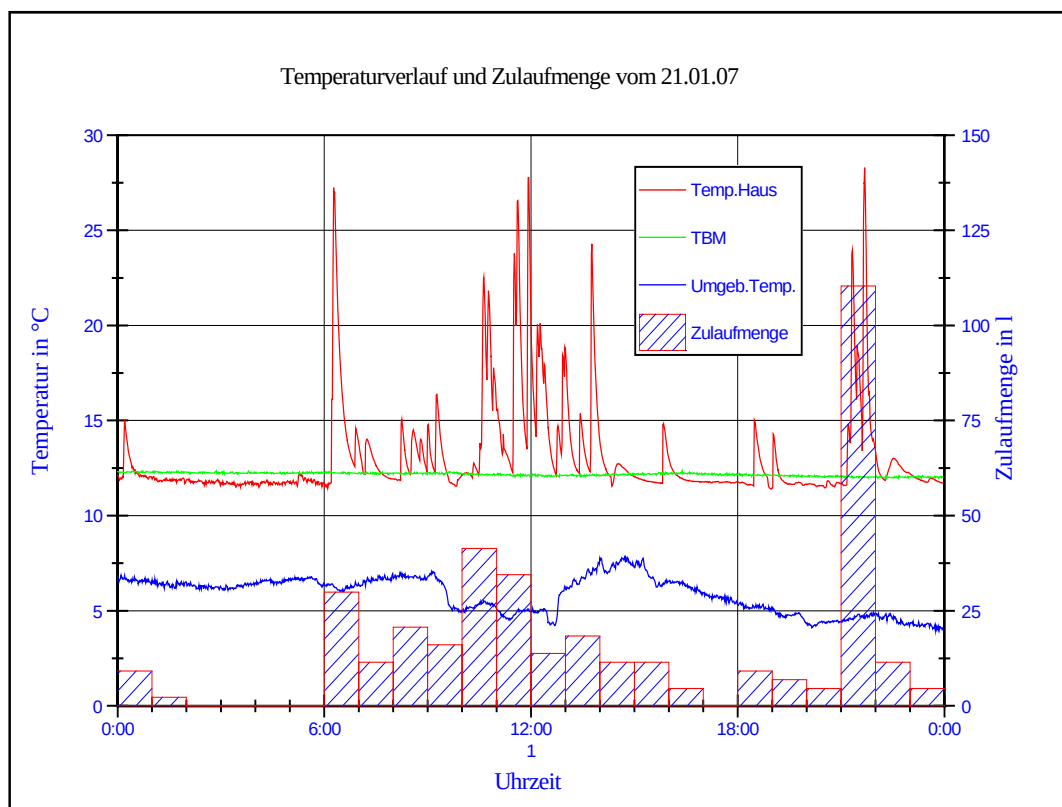




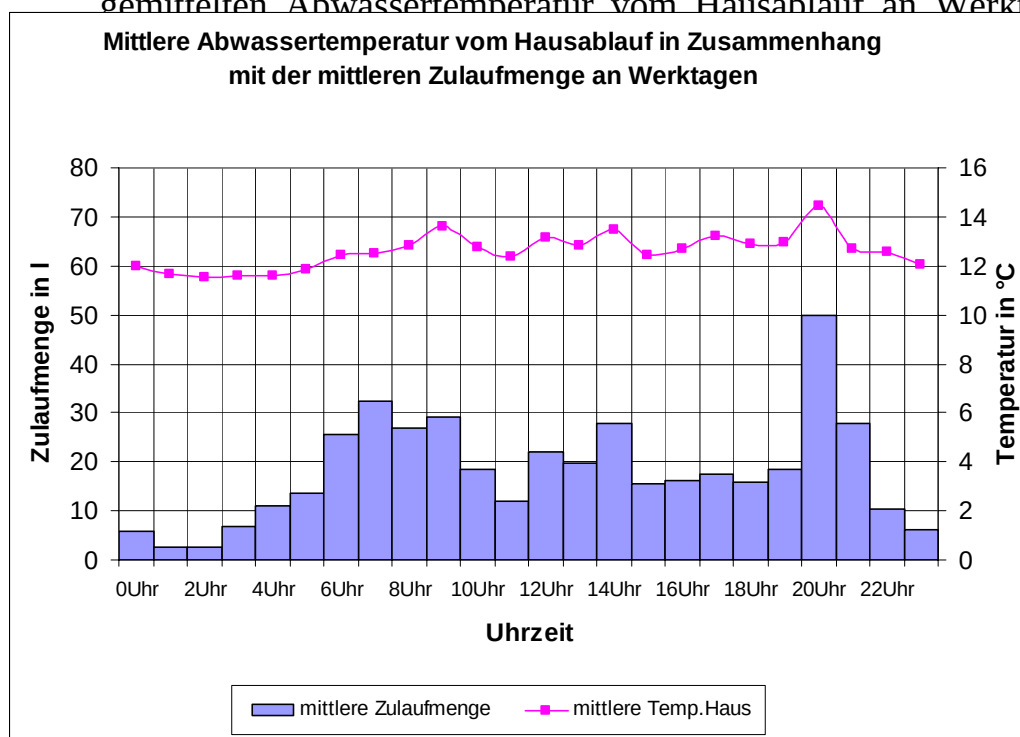




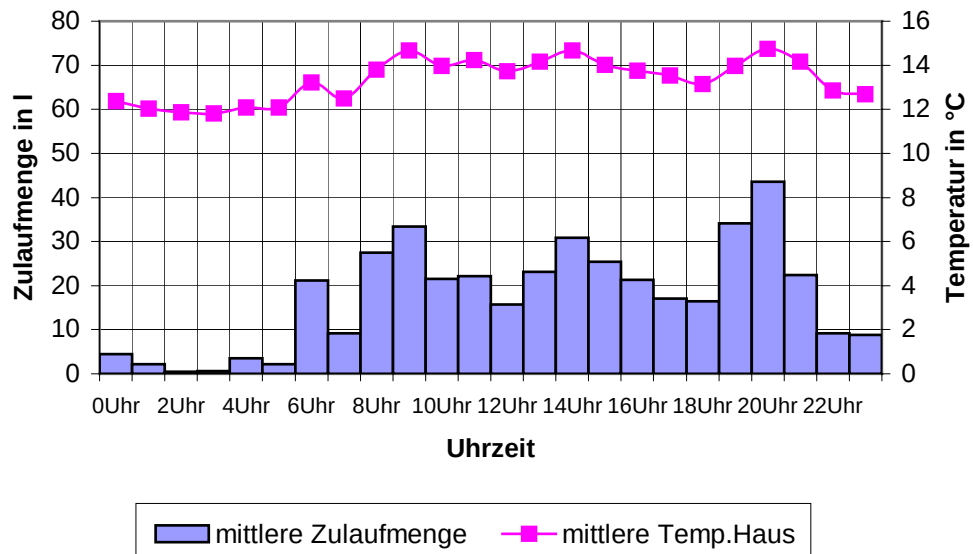
o Verhalten der Temperaturen mit der Zulaufmenge an einem Tag



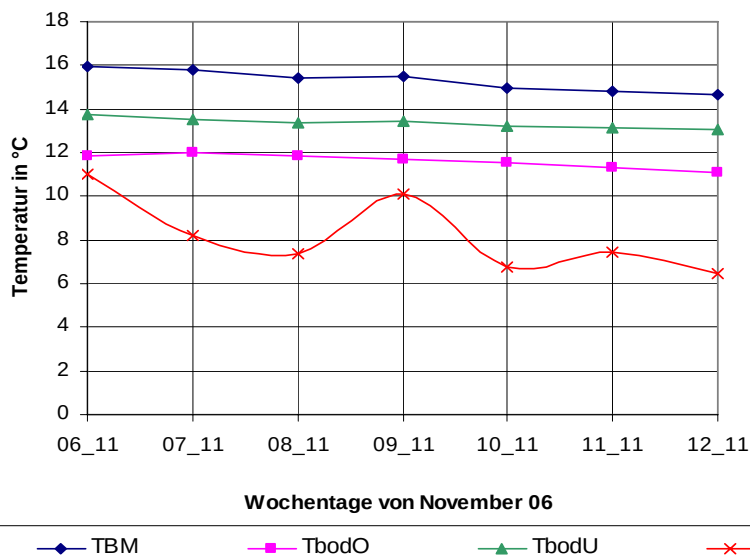
- o Verlauf der stündlich gemittelten Zulaufmenge und der stündlich gemittelten Abwassertemperatur vom Hausablauf an Werktagen



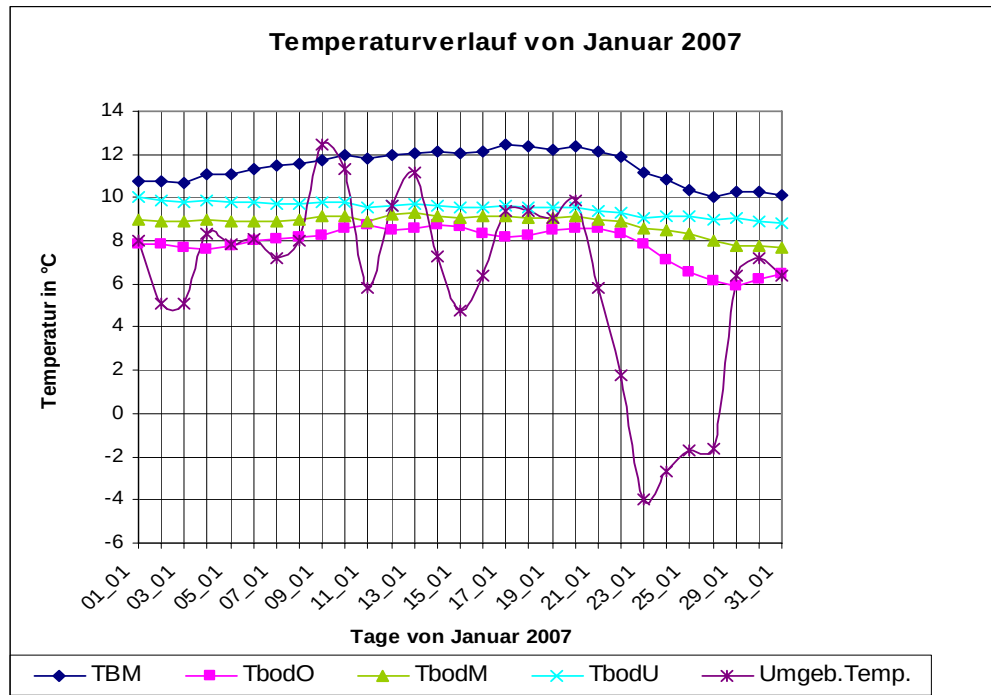
**Mittlere Abwassertemperatur vom Hausablauf in Zusammenhang mit der mittleren Zulaufmenge am Wochenende**



**Temperaturverlauf einer Woche**



## 0 Temperaturverlauf eines Monats



## Abbildungsverzeichnis

|         |                                                |    |
|---------|------------------------------------------------|----|
| Bild 1: | KKA geschnitten [3] .....                      | 2  |
| Bild 2: | eingesetzte KKA im Boden [3] .....             | 3  |
| Bild 3: | Seitenansicht der KKA in 2D [3] .....          | 4  |
| Bild 4: | Draufsicht der KKA in 2D [3] .....             | 5  |
| Bild 5: | Schematische Darstellung der Messtechnik ..... | 6  |
| Bild 6: | Signalverstärker .....                         | 8  |
| Bild 7: | geschnittene KKA an der Symmetrieebene .....   | 14 |
| Bild 8: | komplett vernetzte KKA .....                   | 15 |
| Bild 9: | Symmetriefläche der KKA mit Bilanzhülle .....  | 16 |
| Bild 10 | Wärmeaustauschfläche parallel zum Boden .....  | 24 |
| Bild 11 | Zylindrische Wärmeaustauschfläche .....        | 24 |
| Bild 12 | Temperaturverlauf von Simulation 1 .....       | 27 |
| Bild 13 | Geschwindigkeitsprofil von Simulation 1 .....  | 28 |
| Bild 14 | Temperaturverlauf von Simulation 2 .....       | 29 |
| Bild 15 | Geschwindigkeitsprofil von Simulation 2 .....  | 29 |

## **Tabellenverzeichnis**

|             |                                                                 |    |
|-------------|-----------------------------------------------------------------|----|
| Tabelle 1:  | Bezeichnung der Nummern in Bild 3 und 4.....                    | 3  |
| Tabelle 2:  | Nenndaten der KKA [3] .....                                     | 13 |
| Tabelle 3:  | Durchzuführende Simulationen.....                               | 19 |
| Tabelle 4:  | Stoffwerte für PUR und HDPE bei 20°C [4] [6].....               | 19 |
| Tabelle 5:  | Mittelwerte für PUR- Hartguss und PUR- Hartschaum bei 20°C..... | 20 |
| Tabelle 6:  | Randbedingungen.....                                            | 20 |
| Tabelle 7:  | Simulationen.....                                               | 21 |
| Tabelle 8:  | Behälterdaten [8] .....                                         | 23 |
| Tabelle 9:  | Stoffdaten für Kompost [10] .....                               | 25 |
| Tabelle 10: | Simulationen für den Komposter .....                            | 26 |
| Tabelle 11: | Temperaturen von Simulation1 .....                              | 26 |
| Tabelle 12: | Temperaturen von Simulation 2 .....                             | 28 |
| Tabelle 13: | Temperaturen von Simulation 3.....                              | 30 |
| Tabelle 14: | Temperaturen von Simulation 4.....                              | 30 |
| Tabelle 15: | Ergebnisse der Simulationen.....                                | 31 |