

# Swimming Pool Simulation

Pascal Fankhauser, Nico Canzani und Dominik Müller

Windisch, 17. Juni 2019



**Inhaltsverzeichnis**

<b>1 Grundlagen</b>	<b>1</b>
1.1 Aufgabenstellung . . . . .	1
1.2 Annahmen . . . . .	1
<b>2 Simulation</b>	<b>3</b>
2.1 Teilsysteme . . . . .	3
<b>3 Resultate</b>	<b>6</b>
3.1 Pooltemperatur . . . . .	6
3.2 Regelung . . . . .	6
3.3 Umwelteinflüsse . . . . .	7
3.4 Zeitabschätzung . . . . .	7
<b>4 Zusammenfassung</b>	<b>8</b>
<b>Literatur</b>	<b>9</b>
<b>A Zeitabschätzung</b>	<b>10</b>

# 1 Grundlagen

Das Simulieren mit Simscape ermöglicht es, verschiedene physikalische Netzwerke miteinander zu verbinden. So kann das Zusammenspiel der verschiedenen Domänen ausgewertet werden.

## 1.1 Aufgabenstellung

Die Aufgabe besteht darin, einen beheizten Swimmingpool zu modellieren und zu simulieren. Dabei sollen das Aufheizverhalten sowie der stationäre Zustand untersucht werden. Als Vorlage wird ein bestehender Pool verwendet. Die Abmessungen werden übernommen, sodass die Resultate der Simulation mit den Temperaturwerten des Pools verglichen werden können.

Die Simulation wird jedoch ein wenig vereinfacht. So werden nicht wie in echt fünf kleine Düsen, sondern nur eine Zuleitung simuliert. Des Weiteren wird die abgerundete Treppe weggelassen, damit nur ein Quader modelliert werden muss.

## 1.2 Annahmen

Damit eine möglichst realistische Simulation durchgeführt werden kann, wird der bestehende Pool mit dem Simscape-Modell angenähert. Um den komplexen Vorgang der Natur beschreiben zu können, werden dabei die folgenden Annahmen und Vereinfachungen getroffen:

Pool / Umgebung	Annahme
Länge	8.1 m
Breite	4 m
Tiefe	1.5 m
Solltemperatur vom Pool	30 °C
Hysterese der Regelung	1 °C
Lufttemperatur	8 °C bis 19 °C
Funktion der Lufttemperatur	Sinus
Bodentemperatur	Mittelwert der Lufttemperatur $\pm 1$ °C
Funktion der Bodentemperatur	Sinus, 3 h verzögert gegenüber der Luft
Luftfeuchtigkeit	50 %
Sonne	Täglich 12 h
Funktion der Sonne	Kosinus-Quadrat
Strahlungsaustausch	Vernachlässigbar
Wind	Konstant, sehr schwach

Beim Pool, welcher als Vorlage dient, ist eine Wärmepumpe installiert. Diese erzeugt eine Temperaturdifferenz von 3 K. Mit einem Volumenstrom von  $1013 \text{ l/h}$  erreicht man, dass der vorgegebene Pool eine Umwälzzeit von genau zwei Tagen besitzt. Das ergibt eine Heizleistung von

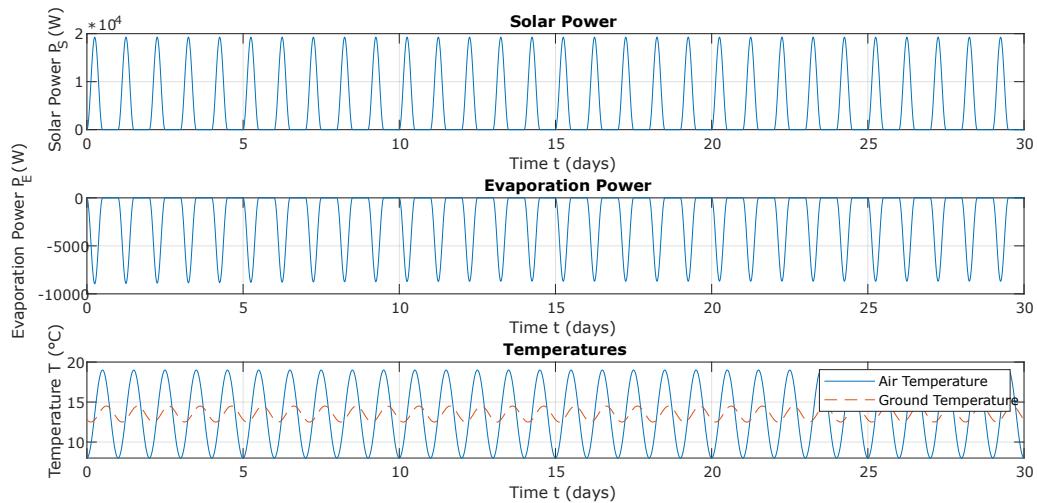
$$P = c_w \cdot \Delta T_w \cdot Q = 4'184 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot 3 \text{ K} \cdot 1'013 \text{ l/h} = 3.53 \text{ kW}. \quad (1.1)$$

Der simulierte Pool wird deshalb mit einer Leistung von 3.53 kW geheizt.

Folgende Literaturwerte werden für die Berechnungen in MATLAB verwendet:

	Symbol	Wert	
<b>Spezifische Wärmekapazität</b>	$c_w$	$4'184 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$	[1]
<b>Verdampfungswärme</b>	$q_w$	$2'257 \text{ kJ/kg}$	[1]
<b>Wärmeübergangskoeffizient Wasser zu Luft</b>	$h_{\text{Pool}, \text{Air}}$	$8 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$	[2]
<b>Wärmewiderstand Boden</b>	$R_{thG}$	$2 (\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$	[3]
<b>Absorptionskoeffizient</b>	$k$	$0.1917 \text{ m}^{-1}$	[4]
<b>Sonnenenergie pro Quadratmeter</b>	$P_{S, \text{perp}}$	$1.36 \text{ kW}$	[5]
<b>Wasserverdunstung pro Quadratmeter und Tag</b>	$m_{ev}$	$2.27 \text{ kg}$	[6]

Abbildung 1.1 zeigt die Kurvenformen der verschiedenen Umgebungseinflüsse:



**Abbildung 1.1:** Kurvenformen der Umgebungseinflüsse

## 2 Simulation

Die Simulation verfügt über einen Tank, welcher den Pool modelliert, eine Umwälzpumpe und eine Heizung. Des Weiteren wird ein Thermostat zur Temperaturregelung und ein thermisches Netzwerk zur Modellierung der Umgebungseinflüsse eingesetzt.

Um die Simulation übersichtlicher zu gestalten wurde diese in Teilsysteme unterteilt. Diese werden im nachfolgenden Unterkapitel genauer erläutert. Eine Übersicht des Modells ist in Abbildung 2.1 dargestellt.

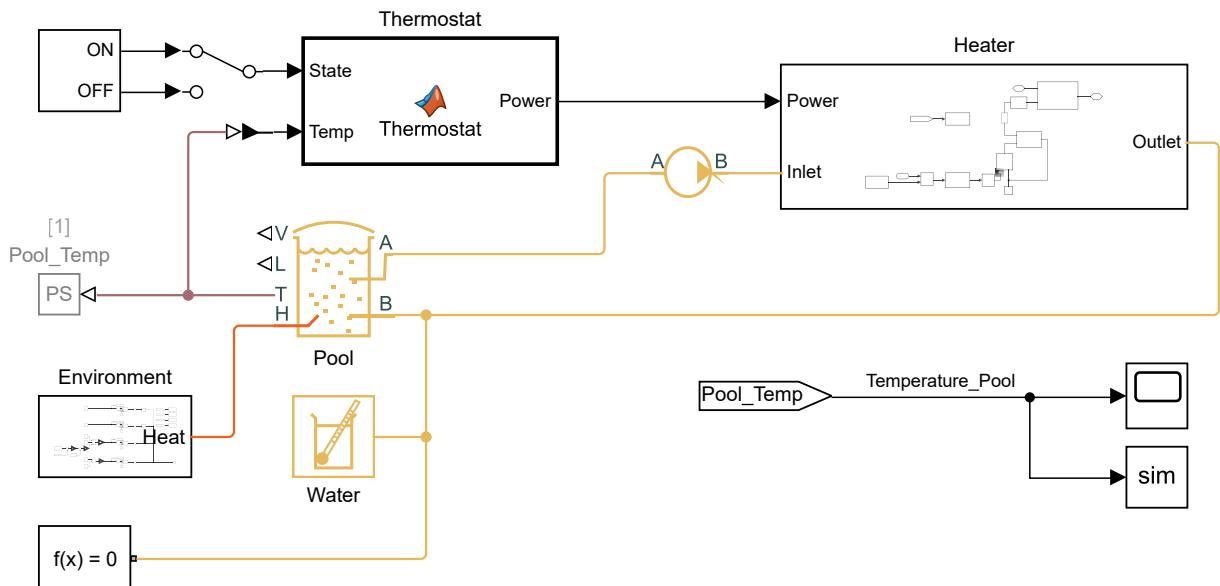


Abbildung 2.1: Simscape-Modell vom Swimmingpool

### 2.1 Teilsysteme

Die Simulation verfügt über die folgenden drei Teilsysteme:

#### Thermostat

Der Thermostat wurde mit einer MATLAB-Funktion realisiert. Dazu wurde eine **persistent** Variable verwendet, welche ihren Wert zwischen Funktionsaufrufen beibehält und den Heizzustand speichert. Weiter wird geprüft, ob die aktuelle Temperatur innerhalb eines definierten Bereichs liegt. Dies entspricht einem einfachen Zweipunktregler mit einer Hysterese.

#### Heizung

Die Heizung wurde mit einem elektrischen Durchlauferhitzer modelliert. Dazu wird während dem Heizvorgang die entsprechende Spannung an einem Leistungswiderstand angelegt. Die entstehende Wärme wird dann über ein 0.5 m langes Kupferrohr mit einem Durchmesser von 10 cm durch Wärmeleitung in das Wasser übertragen. Die Leistung des Durchlauferhitzers entspricht der berechneten Leistung der Wärmepumpe (siehe Kap. 1.2). Abbildung 2.2 zeigt das Teilsystem.

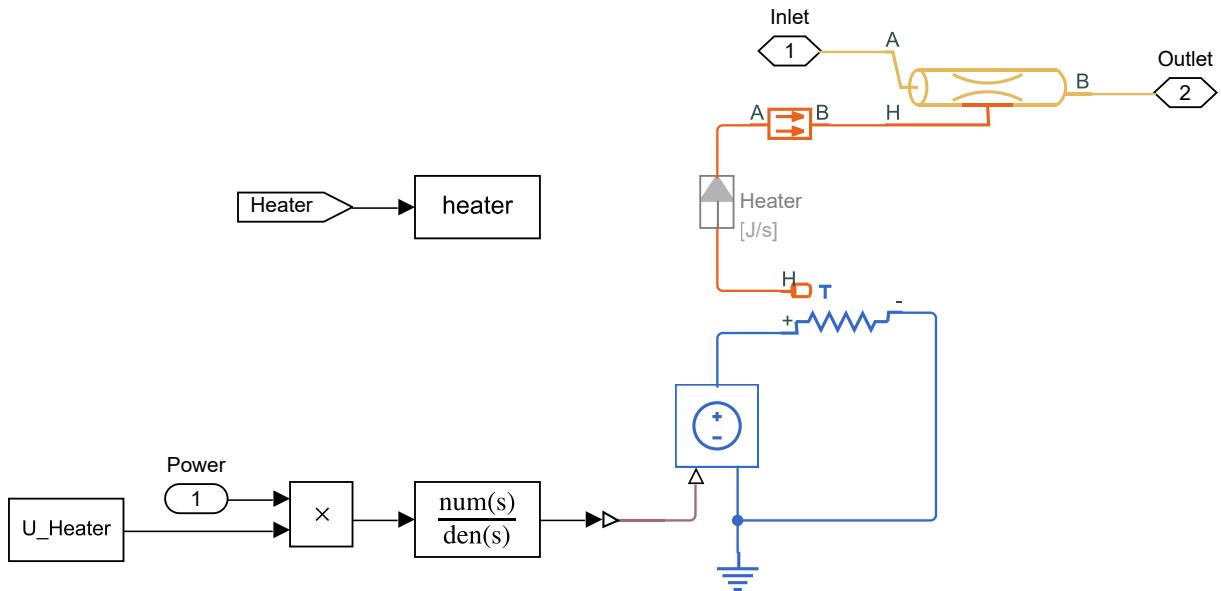


Abbildung 2.2: Teilsystem: Heizung

### Umgebung

Die Umwelt beeinflusst mit vier verschiedene Faktoren die Pooltemperatur:

- Temperaturzunahme / -abnahme durch Wärmeleitung (Poolwände)
- Temperaturzunahme / -abnahme durch Konvektion (Wasser zu Luft)
- Temperaturabnahme durch Wasserverdunstung
- Temperaturzunahme durch die Sonnenstrahlen

Diese vier Faktoren befinden sich im Teilsystem **Environment** und sind parallel geschaltet. Das Vorgehen der vier Blöcke ist immer ähnlich. Es wird jeweils ein mathematisches Signal beschrieben, welches am Ende mit einem **PS-Converter** in die physikalische Umgebung übersetzt wird. Dieses Temperatur- oder Leistungssignal kontrolliert dann eine ideale Energiequelle.

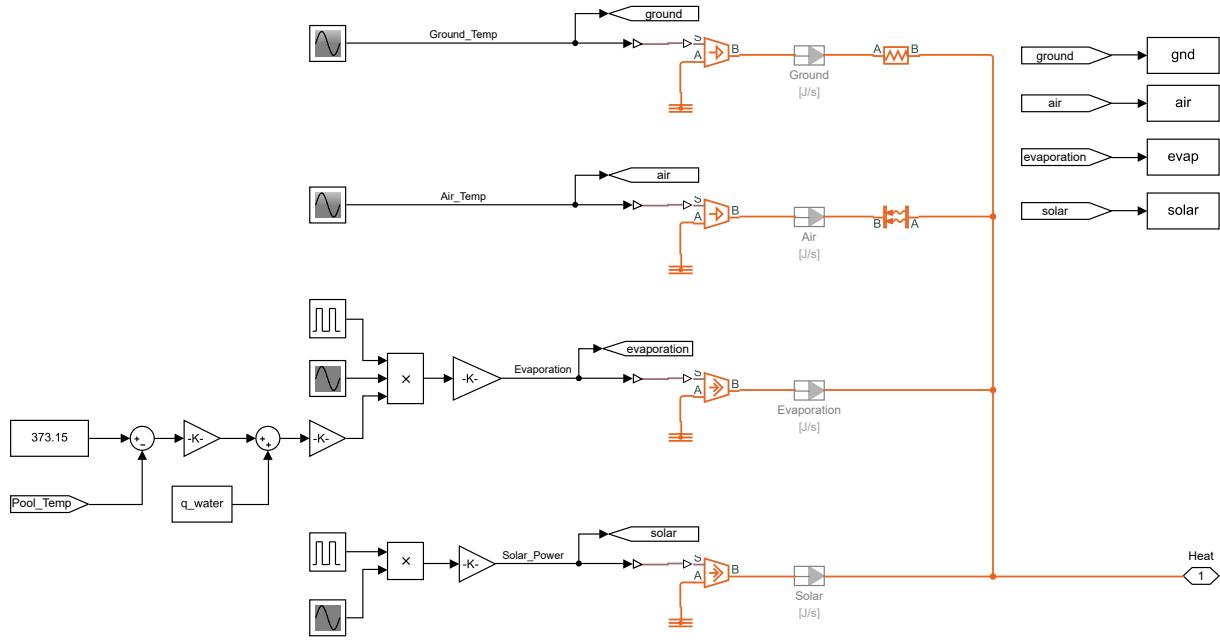
Die Wasserverdunstung hängt hauptsächlich von der Sonne ab und macht einen grossen Anteil der Verluste aus [6]. Deshalb erfolgt der Wärmeverlust entsprechend der Funktion der Sonnenstrahlung. Dabei wird dem Pool mit dem Simscape-Element **Controlled Heat Flow Rate Source** Energie entzogen. Die Energiemenge wurde mithilfe der Arbeitsgrundlagen (siehe Kapitel 1.2) berechnet und der mittlere Wert der Funktion entsprechend gewählt. Um einen Verlust zu erreichen, besitzt die Funktion ein negatives Vorzeichen.

Die Sonneneinstrahlung wird gleich implementiert, wie die Wasserverdunstung. Die Funktion ist jedoch positiv, was zu einer Energiezufluss führt. Ausserdem besitzt die Funktion eine andere Amplitude, welche der Sonnenenergie entspricht.

Um die Wärmeverluste / -gewinne durch den Boden zu simulieren, bietet Simscape das Element **Thermal Resistance**. Dazu wird auf beiden Seiten eine Wärmequelle angeschlossen sowie der thermische Widerstand spezifiziert. Simscape simuliert dann den Wärmefluss in J/s, welcher proportional zur Temperaturdifferenz ist. Ausserdem wird das Element **Controlled Temperature Source** verwendet, welches eine ideale Energiequelle darstellt.

Mit dem Element **Convective Heat Transfer** können die Konvektionsverluste simuliert werden. Wie beim Boden wird auf beiden Seiten des Elements eine Wärmequelle angeschlossen. Das Element benötigt zusätzlich noch die Pooloberfläche sowie den Wärmeübergangskoeffizienten.

Abbildung 2.3 zeigt das Teilsystem, welches die Umwelteinflüsse modelliert:



**Abbildung 2.3:** Teilsystem: Umgebung

## 3 Resultate

### 3.1 Pooltemperatur

In der Abbildung 3.1 ist die Wassertemperatur in Abhängigkeit der Zeit dargestellt.

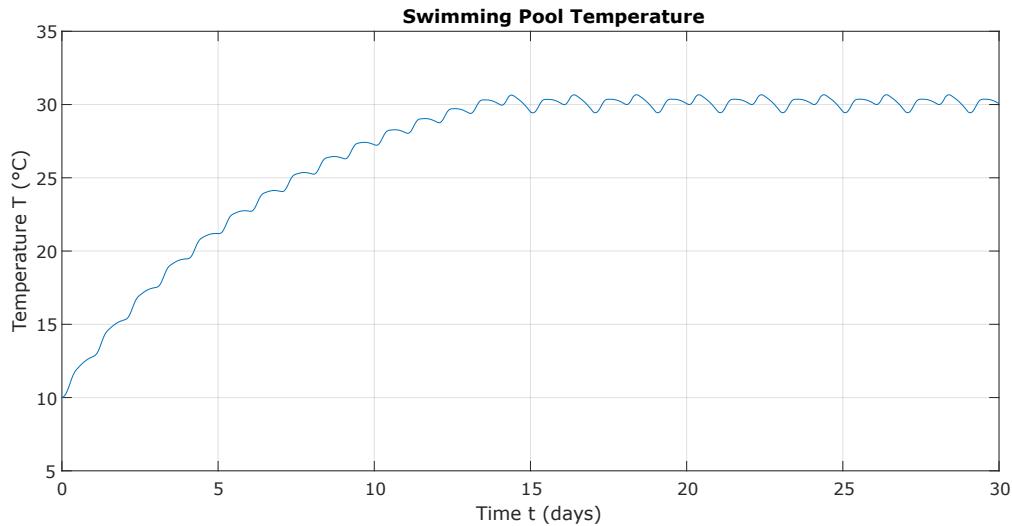


Abbildung 3.1: Pooltemperatur in Abhängigkeit der Zeit

Aus dem Bild lässt sich herauslesen, dass der Pool die Temperatur von  $30^{\circ}\text{C}$  nach ungefähr 13 Tagen und 7 Stunden erreicht. Danach bewegt sich die Temperatur im vorgegebenen Bereich von  $29.5^{\circ}\text{C}$  bis  $30.5^{\circ}\text{C}$ . Dies entspricht den erwarteten Werten. Bei genauerer Betrachtung lässt sich allerdings eine minimale Temperatur von  $29.4^{\circ}\text{C}$  messen. Dies liegt daran, dass die Heizung erst einschaltet, wenn die Pooltemperatur  $29.5^{\circ}\text{C}$  unterschreitet und das System sehr träge ist.

### 3.2 Regelung

Abbildung 3.2 zeigt auf, wann die Heizung eingeschaltet ist und wann nicht.

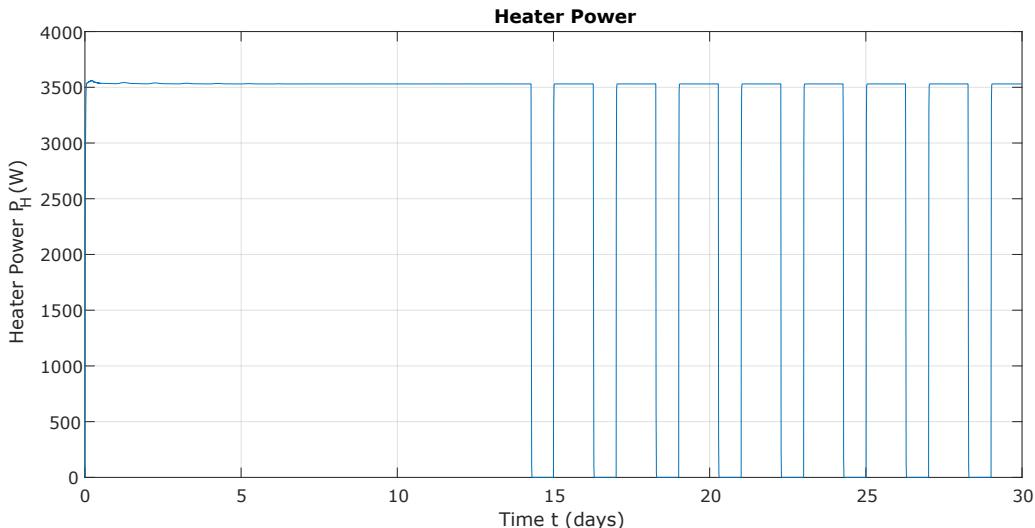


Abbildung 3.2: Verhalten der geregelten Heizung

Vergleicht man den Verlauf dieser Kurve mit der Wassertemperatur (Abb. 3.1), so kann man sehen, dass die Heizung eingeschaltet wird, sobald die Temperatur unter  $29.5^{\circ}\text{C}$  sinkt. Weiter wird die Heizung ausgeschaltet, wenn die Temperatur über  $30.5^{\circ}\text{C}$  steigt. Mit diesem Verlauf wäre man in der Lage, die Heizkosten eines Pools ungefähr zu bestimmen.

### 3.3 Umwelteinflüsse

Abbildung 3.3 zeigt den Wärmefluss der verschiedenen Umwelteinflüsse in Abhängigkeit der Zeit. Dabei bedeutet ein positiver Wärmefluss, dass dem Pool Energie zugeführt wird. Ein negativer Wärmefluss bedeutet hingegen, dass dem Pool Energie entzogen wird.

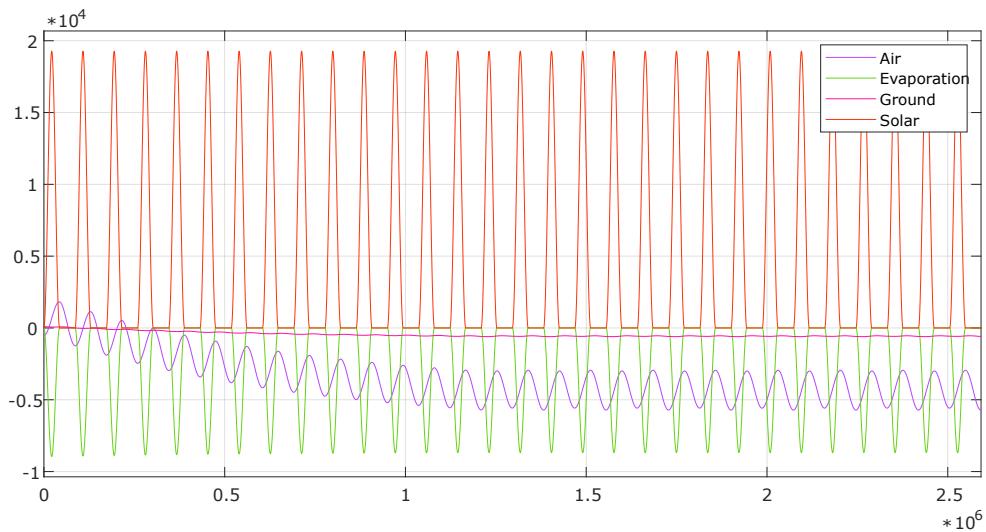


Abbildung 3.3: Wärmefluss der verschiedenen Umwelteinflüsse in Abhängigkeit der Zeit (s)

Auffällig ist, dass die Luft zu Beginn der Aufheizphase noch Energie zuführt, danach aber nur noch Energie entzieht. Dies liegt an der tiefen Wassertemperatur am Anfang der Simulation (nur  $10^{\circ}\text{C}$ ). Nach drei Tagen ist die Wassertemperatur vom Pool höher als die Lufttemperatur und es wird nur noch Energie entzogen.

Durch das Mitteln der Kurven kann man bestimmen, welche durchschnittliche Leistung durch die entsprechenden Umwelteinflüsse verloren geht:

Konvektion (Wasser zu Luft)	-	4340 W
Wasserverdunstung	-	2232 W
Wärmeleitung (Wände und Boden)	-	575 W
Sonneneinstrahlung	+	4817 W
<b>Total</b>	-	<b>2330 W</b>

### 3.4 Zeitabschätzung

Zuerst wurde eine grobe Abschätzung der Aufheizzeit vorgenommen, welche als Anhaltspunkt dient (siehe Angang A). In dieser Zeitabschätzung wurden die verschiedenen Umwelteinflüsse komplett vernachlässigt. Es wurde eine Aufheizzeit von 13 Tagen und 8 Stunden berechnet, welche sehr gut mit der Simulation übereinstimmt. Dies bedeutet, dass sich die Umwelteinflüsse während der Aufheizphase gegenseitig fast aufheben.

## 4 Zusammenfassung

Die Simulation zeigt auf, wie viele Faktoren Einfluss auf die Wassertemperatur haben. Der Wärmeverlust erfolgt unter anderem über die Wände des Pools (Wärmeleitung), über den Wärmeaustausch zwischen Luft und Wasser (Konvektion) und über Verdampfung (Evaporation). Dies sind die Faktoren, gegen welche sich die Heizung und die Sonneneinstrahlung behaupten müssen, um den Pool auf eine Badetemperatur von 30 °C zu erwärmen. Die Simulation veranschaulicht den Einfluss der verschiedenen Faktoren auf die Pooltemperatur.

Überraschend war die Erkenntnis, dass der Wärmeverlust durch Konvektion einen derart grossen Einfluss (bei 30 °C etwa 60.7 %) hat. Der Verlust über die Wände und den Boden haben wir in der gefundenen Größenordnung erwartet. Die Temperatur der Erde unterliegt nur geringen Schwankungen und die Wärmeleitung über die isolierten Wände erfolgt sehr träge.

Die Herausforderung der Simulation lag vorwiegend im theoretischen Bereich. Um die Teilsysteme zu verstehen, mussten wir uns mit physikalischen Berechnungen aus dem Bereich Wärme und Strahlung auseinandersetzen.

## Literatur

- [1] Wikipedia, *Eigenschaften des Wassers*, Online, 2019. Adresse: [https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Eigenschaften\\_des\\_Wassers&oldid=189351524](https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Eigenschaften_des_Wassers&oldid=189351524) (besucht am 17. Juni 2019).
- [2] A. Schweizer, *Wärmeübergang*, Online, 2019. Adresse: [https://www.schweizer-fn.de/waerme/waermeuebergang/waerme\\_uebergang.php](https://www.schweizer-fn.de/waerme/waermeuebergang/waerme_uebergang.php) (besucht am 17. Juni 2019).
- [3] R. Paschotta, *Wärmeleitfähigkeit*, Online, 2019. Adresse: <https://www.energie-lexikon.info/waermeleitfaehigkeit.html> (besucht am 17. Juni 2019).
- [4] H. Grimm, *Wärmeleitfähigkeit*, Online, 27. Apr. 2006. Adresse: [http://www.wissenschafts-technik-ethik.de/wasser\\_eigenschaften.html#kap091](http://www.wissenschafts-technik-ethik.de/wasser_eigenschaften.html#kap091) (besucht am 17. Juni 2019).
- [5] Bibliographisches Institut GmbH, *Energie der Sonne*, Online, 2010. Adresse: <https://www.lernhelper.de/schuelerlexikon/physik/artikel/energie-der-sonne> (besucht am 17. Juni 2019).
- [6] D. Steuber und S. Haschek, *Verdunstung von Wasser*, Online, 30. Juni 2013. Adresse: [https://imsc.uni-graz.at/keeling/modI\\_ss13/projekten/HaschekSteuberBericht.pdf](https://imsc.uni-graz.at/keeling/modI_ss13/projekten/HaschekSteuberBericht.pdf) (besucht am 17. Juni 2019).

## A Zeitabschätzung

# Swimming Pool Simulation

## Wärmepumpe

Temperaturdifferenz:

3 K

Umwälzzeit:

48 h

Durchfluss:

1013  $\frac{l}{h}$

## Formeln

$$C = m \cdot c \quad \left( \frac{J}{K} \right)$$

$$\Delta T = T_{SOLL} - T_{IST} \quad (K)$$

$$Q = C \cdot \Delta T \quad (J)$$

$$t = \frac{Q}{P} \quad (s)$$

## Pool

IST-Temperatur:

10 °C

SOLL-Temperatur:

30 °C

Spez. Wärmekapazität:

4184  $\frac{J}{kg \cdot K}$

Poolinhalt:

48600 L

## Abschätzung

Benötigte Zeit:

13 d

8 h

Benötigte Wärmeenergie:

4.067 GJ

Leistung Wärmetauscher:

3.530 kW