

Swimming Pool Simulation

Pascal Fankhauser, Nico Canzani und Dominik Müller

Windisch, 17. Juni 2019



Inhaltsverzeichnis

1 Grundlagen	1
1.1 Aufgabenstellung	1
1.2 Annahmen	1
2 Simulation	2
2.1 Teilsysteme	2
3 Resultate	4
3.1 Pooltemperatur	4
3.2 Regelung	4
3.3 Einflüsse der Umwelt	5
4 Zusammenfassung	6
Literatur	9
A Zeitabschätzung	10

1 Grundlagen

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.

1.2 Annahmen

Dass eine möglichst realistische Simulation durchgeführt werden kann, wird ein physisch existierender Pool mit dem Simscape-Model angenähert. Um den komplexen Vorgang der Natur beschreiben zu können, werden dabei diverse Annahmen und Vereinfachungen getroffen.

Pool / Umgebung	Annahme
Länge	8.1 m
Breite	4 m
Höhe	1.5 m
Solltemperatur Pool	30 °C
Lufttemperatur	8 °C bis 19 °C
Funktion der Lufttemperatur	Sinus
Bodentemperatur	Mittelwert der Lufttemperatur ± 1 °C
Funktion der Bodentemperatur	Sinus, 3 h verzögert gegenüber der Luft
Luftfeuchtigkeit	50 %
Sonne	Täglich 12 h
Funktion der Sonne	Cosinus quadrat
Hysterese der Regelung	1 °C
Strahlungsaustausch	vernachlässigbar
Wind	konstant sehr schwach

Beim Pool, welcher als Model dient, ist eine Wärmepumpe installiert. Diese erzeugt eine Temperaturdifferenz von 3 K. Mit einem Volumenstrom von 1013 L/h erreicht man, dass der vorgegebene Pool eine Umwälzzeit von genau zwei Tagen besitzt. Das ergibt eine Heizleistung von:

$$P = c_w \cdot \Delta T_w \cdot Q = 4184 \frac{J}{kg \cdot K} \cdot 3K \cdot \frac{1013 \frac{L}{h}}{3600} = 3.53kW \quad (1.1)$$

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

Folgende Literaturwerte werden in den Berechnungen im Matlab verwendet:

	Symbol	Wert	[Literatur]
Spezifische Wärmekapazität	c_w	4184 J/(kgK)	[1]
Verdampfungswärme	q_w	2257 kJ/kg	[1]
Wärmeübergangskoeffizient Wasser Luft	$h_{PoolAir}$	8 W/(m²K)	[2]
Thermischer Widerstand Beton	Rth_G	2 m²K/W	[3]
Absorptionskoeffizient	k	0.1917 1/m	[4]
Sonnenenergie pro Quadratmeter	P_{Sperp}	1,36 kW	[5]
Verdunstendes Wasser pro Quadratmeter und Tag	m_{ev}	2.27kg	[6]

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 Umgebung eingesetzt.

Um die Simulation übersichtlicher zu gestalten wurde diese in Teilsysteme unterteilt. Diese werden im nachfolgenden Unterkapitel genauer erläutert.

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.

Umgebung

Die Umwelt beeinflusst mit vier verschiedenen Faktoren die Pooltemperatur:

- Temperaturabnahme durch Verdunsten von Wasser.
- Temperaturzunahme oder Temperaturabnahme durch Konvektion über die Luft.
- Temperaturzunahme oder Temperaturabnahme durch Wärmeleitung an die Poolwände.
- Temperaturzunahme durch die Sonnenstrahlen.

Diese vier Faktoren befinden sich im Element 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-Konverter in die physikalische Umgebung übersetzt wird. Danach wird das Signal mithilfe eines entsprechenden Blockes von Temperatur oder Leistung an das System angepasst.

Das Verdunsten von Wasser hängt vor allem 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 Matlab Element Controlled Heat Flow Source Energie entzogen. Die Energiemenge wurde mit den Arbeitsgrundlagen 1.2 berechnet und der mittlere Wert der Funktion so gesetzt. Um einen Verlust zu erreichen, besitzt die Funktion ein negatives Vorzeichen.

Die Einstrahlung der Sonne wird gleich umgesetzt, wie die Verluste durch das Verdunsten. Die Funktion ist jedoch positiv, was zu einer Energiezufuhr führt. Außerdem besitzt die Funktion eine andere, der Sonnenenergie entsprechende Amplitude.

Um die Wärmeverluste oder Gewinne durch den Boden zu berechnen, bietet Simscape den Block Thermal Resistance. Damit kann auf beiden Seiten eine Temperaturdomaine angeschlossen, sowie der Widerstand dazwischen angegeben werden und Simscape simuliert den Energiefloss in

J/s. Ausserdem wird eine Controlled Temperature Source verwendet, welche eine ideale Temperaturquelle darstellt.

Mittels Convective Heat Transfer Block können die Konvektionsverluste an die Luft berechnet werden. Wie beim Boden wird auf beiden Seiten des Blockes eine Temperatur angegeben. Das Element benötigt zusätzlich noch die gesamte Pooloberfläche, sowie den Wärmeübergangskoeffizient.

3 Resultate

3.1 Pooltemperatur

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

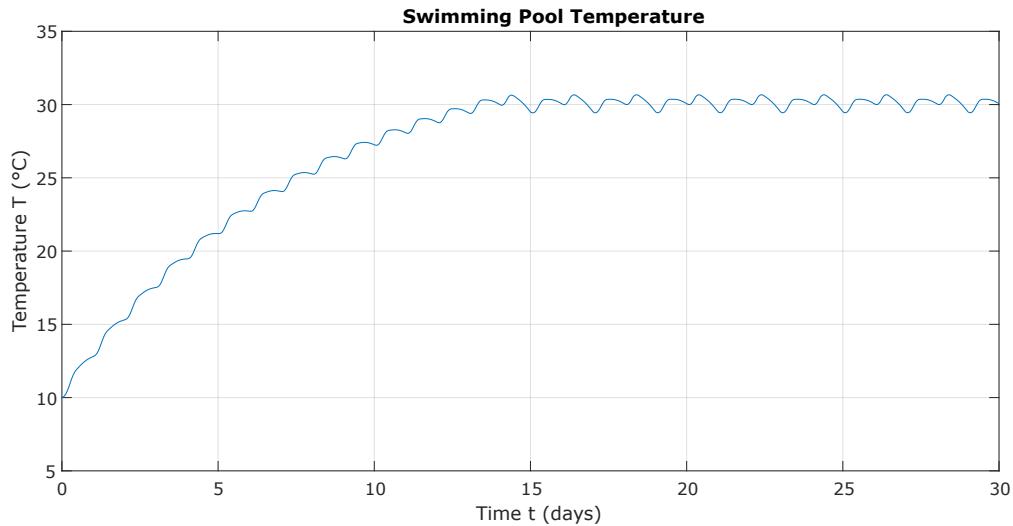


Abbildung 3.1: Pooltemperatur in Abhängigkeit der Zeit

Aus dem Bild lässt sich herauslesen, dass der Pool die Temperatur von 30 °C nach ungefähr 13 Tagen und 7 Stunden erreicht wird. Danach bewegt sich die Temperatur im vorgegebenen Bereich von 29.5 °C bis 30.5 °C. Dies entspricht den erwarteten Werten. Bei genauem Betrachten lässt sich allerdings eine minimale Temperatur von 29.4 °C messen. Das lässt darauf schliessen, dass die Heizung nicht über genug Leistung verfügt, um im kältesten Moment der Nacht alle Verluste zu kompensieren.

3.2 Regelung

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

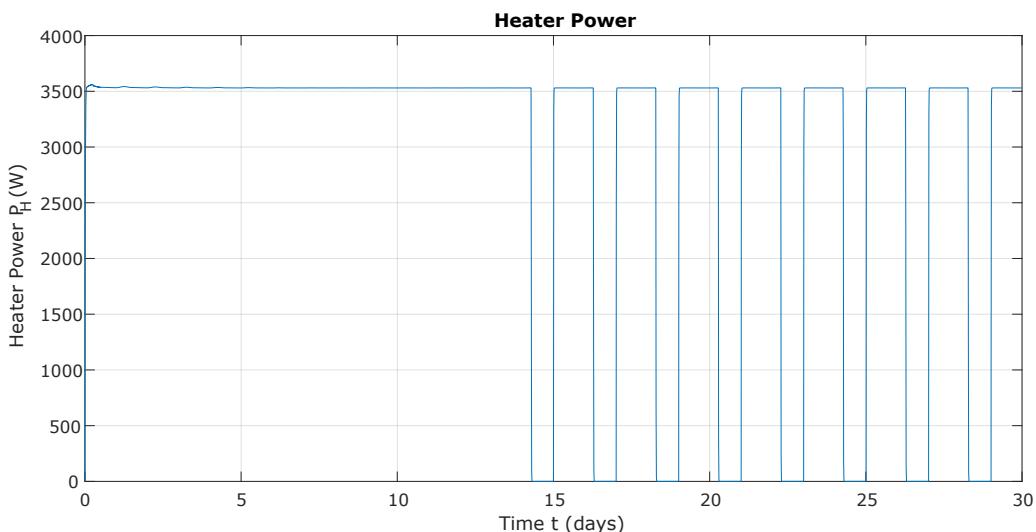


Abbildung 3.2: Verhalten der geregelten Heizung

Vergleicht man den Verlauf dieser Kurve mit der Wassertemperatur (Abb. 3.1), so kann man sehen, dass die Heizung eingeschaltet wird, so bald die Temperatur unter 29.5°C sinkt und wieder einschaltet, wenn die Temperatur über 30.5°C steigt. Mit diesem Plot wäre man in der Lage, die Heizkosten eines Pools ungefähr zu bestimmen.

3.3 Einflüsse der Umwelt

In der Abbildung 3.3 ist die Leistung der Umwelt in Abhängigkeit der Zeit dargestellt. Eine positive Leistung bedeutet, Energie wird zugeführt, während bei einer negativen Leistung Energie entzogen wird.

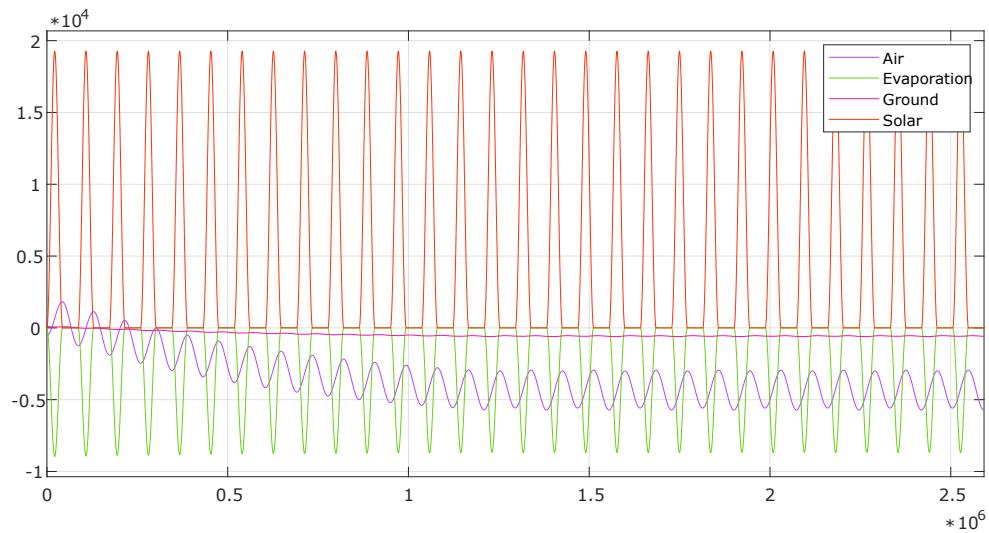


Abbildung 3.3: Durch die Umwelt erzeugte Leistungsverschiebungen

Auffällig ist, dass die Luft zu Beginn des Prozesses noch Energie zuführt, danach wird aber nur noch entzogen. Dies kommt von der tiefen Starttemperatur des Poolwassers von 10°C . Nach drei Tagen wird nur noch Energie abgeführt, wodurch schlussfolgern lässt, dass die Wassertemperatur höher ist, als die Lufttemperatur.

Durch Mitteln der einzelnen Kurven kann bestimmt werden, welche durchschnittliche Leistung bei den einzelnen Einflüssen verloren geht:

Luft	- 4340 W
Verdunsten	- 2232 W
Boden und Wände	- 0575 W
Sonne	+ 4817 W
Total	- 2330 W

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 60.8 %) 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.

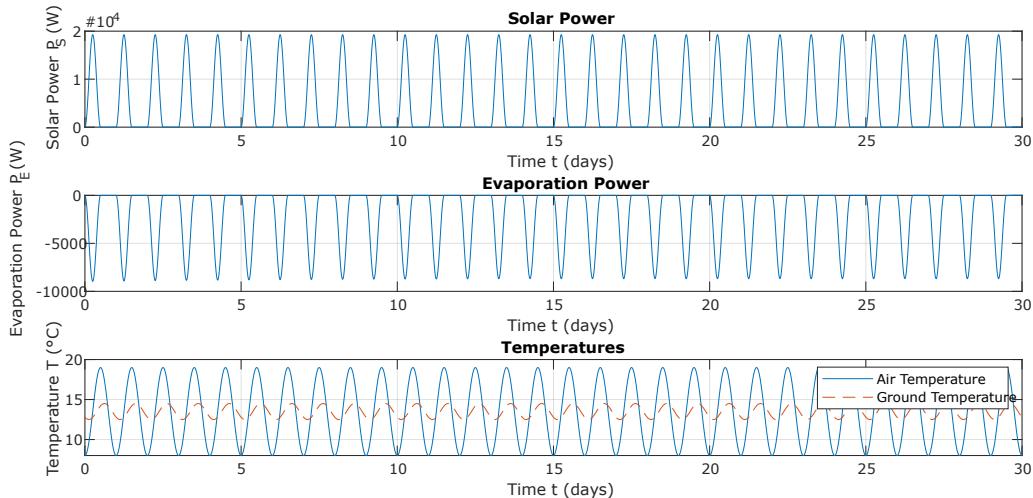


Abbildung 4.1

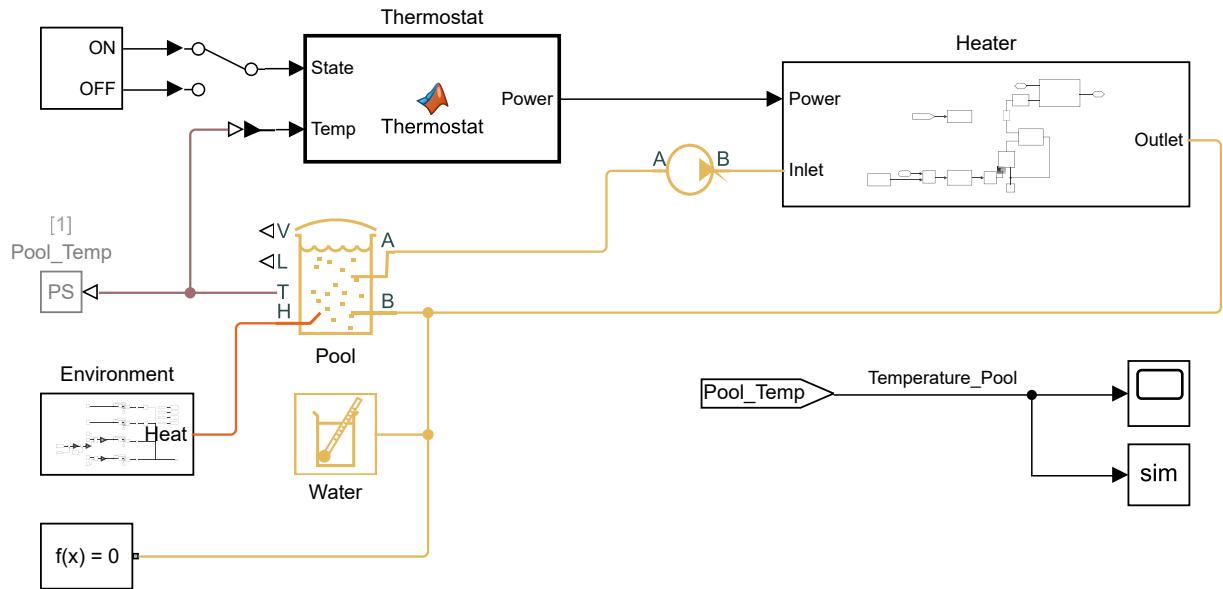


Abbildung 4.2

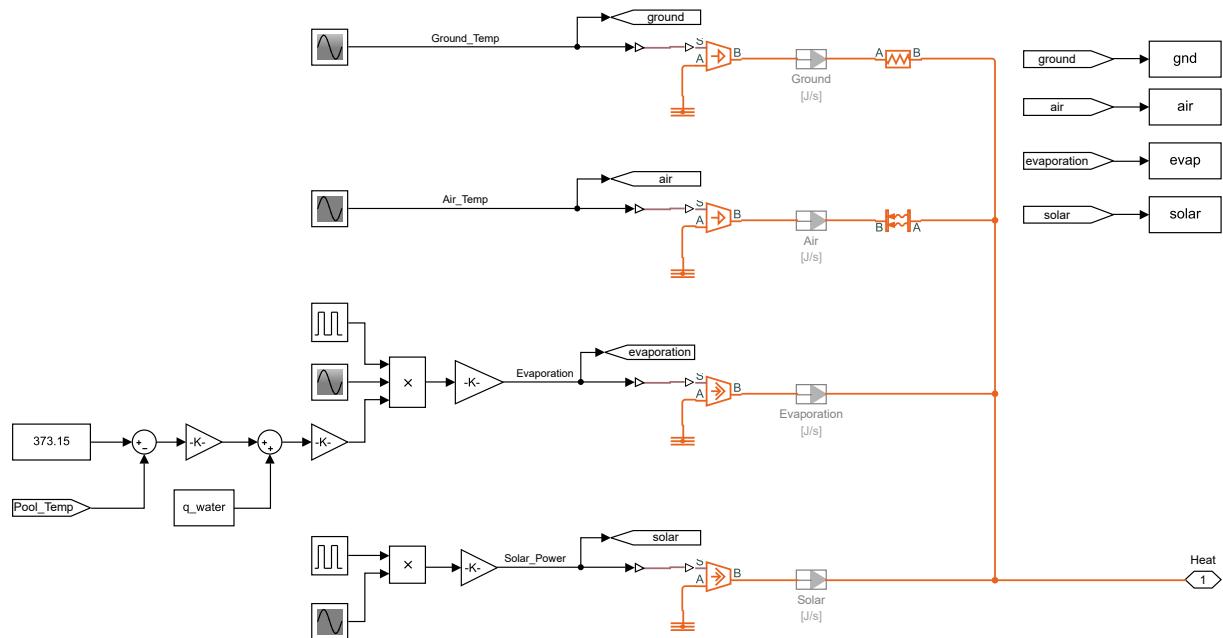


Abbildung 4.3

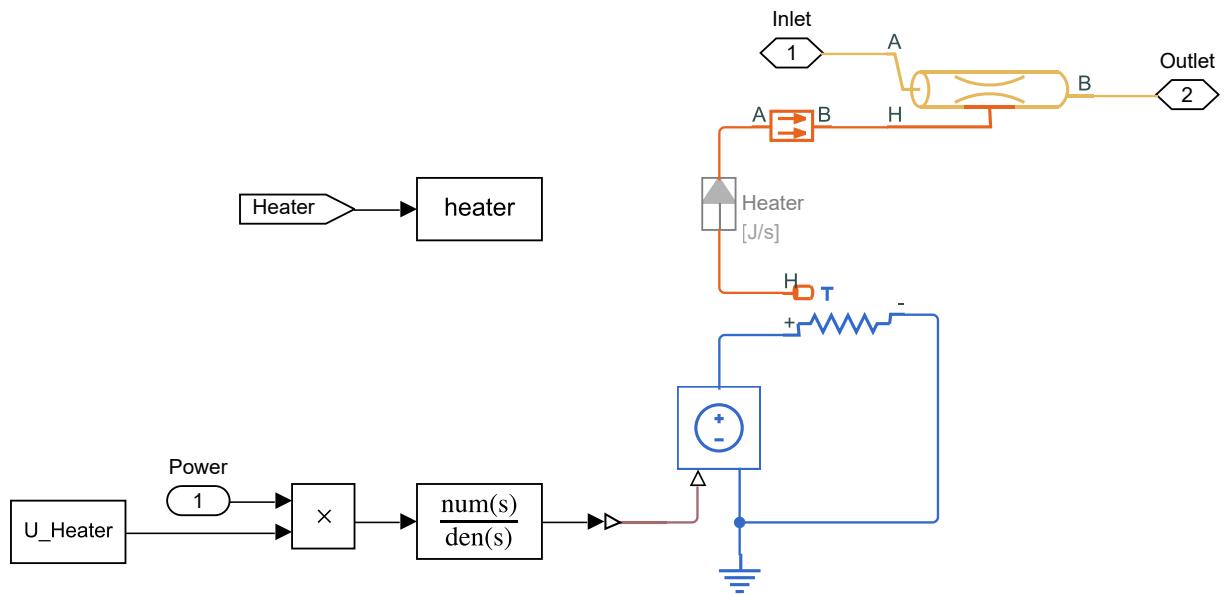


Abbildung 4.4

Literatur

- [1] Wikipedia, *Eigenschaften des Wassers — Wikipedia, Die freie Enzyklopädie*, [Online; Stand 17. Juni 2019], 2019. Adresse: %5Curl%7Bhttps://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Eigenschaften_des_Wassers&oldid=189351524%7D.
- [2] Schweizerfn, *Wärmeübergang*, [Online; Stand 17. Juni 2019], 2019. Adresse: https://www.schweizer-fn.de/waerme/waermeeuebergang/waerme_uebergang.php.
- [3] D. R. Paschotta, *Wärmeleitfähigkeit*, [Online; Stand 17. Juni 2019], 2019. Adresse: <https://www.energie-lexikon.info/waermeleitfaehigkeit.html>.
- [4] Meier, *Wärmeleitfähigkeit*, [Online; Stand 17. Juni 2019], 2006. Adresse: http://www.wissenschaft-technik-ethik.de/wasser_eigenschaften.html#kap091.
- [5] Lernhelfer, *Energie der Sonne*, [Online; Stand 17. Juni 2019], 2010. Adresse: <https://www.lernhelfer.de/schuelerlexikon/physik/artikel/energie-der-sonne>.
- [6] Steuber Daniel, Haschek Sarina, *Verdunstung von Wasser*, [Online; Stand 17. Juni 2019], 2013. Adresse: https://imsc.uni-graz.at/keeling/modI_ss13/projekten/HaschekSteuberBericht.pdf.

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