

Simulation von Schwimmbadsystemen - Energiebilanz des Schwimmbeckens

Clemens Radermacher, Sebastian Engelhardt
Dr. Valentin EnergieSoftware GmbH, 10243 Berlin
Tel.: +49 (0)30 588 439 0
E-Mail: info@valentin.de
Internet: www.valentin.de

Einleitung

Die Erwärmung von Schwimmbädern ist ein Standardanwendungsfall für solarthermische Systeme. Die Systeme sind technisch eingeführt, akzeptiert und deren Wirtschaftlichkeit ist unumstritten.

Dennoch ist es nicht einfach, die Energieeinsparung und Wirtschaftlichkeit der solaren Schwimmbaderwärmung darzustellen, da es viele überlagernde Effekte gibt, die die Zustandsgrößen des Schwimmbades beeinflussen.

Für den Nutzer und Planer sind der Verlauf der Beckentemperatur und der benötigte Energieaufwand für den Betrieb des Schwimmbades von Interesse. Zur Ermittlung dieser Parameter ist es notwendig den energetischen Austausch des Beckens abhängig von den Umgebungsbedingungen zu beschreiben. Je nach Standort können die klimatischen Unterschiede den benötigten Energieaufwand zur Erlangung einer gewünschten Temperatur mehr als verdoppeln. Der Anspruch einer Simulation besteht also darin, die aus den Umgebungsbedingungen resultierende Dynamik abzubilden. Dabei sind realistische Annahmen der Klimadaten und eine genaue Berechnung der einzelnen Wärmetransportmechanismen von Bedeutung.

Im Simulationsprogramm T*SOL ist es u.a. möglich Schwimmbadsysteme zu simulieren. Dazu ist im Programm ein thermodynamisches Modell hinterlegt, welches die auftretenden Energieströme abhängig von den klimatischen Einflussgrößen und den Betriebsparametern ermittelt. Im Rahmen einer Bachelorarbeit wurden die bestehenden Algorithmen und Annahmen des Simulationsprogrammes T*SOL überprüft, überarbeitet und anhand eines vermessenen Beckens validiert.

In dem überarbeiteten Modell werden die Strahlungsgewinne durch Sonneinstrahlung, Verluste durch langwelligen Strahlungstransport, Wärmetransport durch Konvektion und Wärmeleitung, Verdunstungsverluste sowie der Einfluss des Benutzerverhaltens und des Wasseraustausches berücksichtigt. Zusätzlich sind technische Anwendungen wie die Verwendung einer Abdeckung zur Reduzierung der Wärmeverluste und die Möglichkeit einer Beckenbeheizung in der Simulation implementiert.

Energiebilanz

Das Schwimmbad stellt ein offenes thermodynamisches System dar, in dessen Bilanz Energie- und Stoffströme erfasst werden müssen. Im Modell wird davon ausgegangen, dass die Temperatur im gesamten Becken konstant ist (Ein-Knoten-Modell).

Aus den im Programm hinterlegten Klimadaten, der Schwimmbadgeometrie und den Umgebungsbedingungen werden die auftretenden Wärmetransportströme ermittelt. Zur Berechnung werden die Windgeschwindigkeit v an der Wasseroberfläche, die relative Luftfeuchte φ , Umgebungstemperatur T_L , die Bodentemperatur T_e sowie die Globalstrahlung \dot{E}_g benötigt.

Der zeitliche Verlauf der Beckenwassertemperatur $T_w(t)$ wird in 6-minütiger Auflösung berechnet und ergibt sich mit der Summe der Bilanzgrößen $\sum \dot{Q}_i$, der spezifischen Wärmekapazität c_{pw} und Dichte ρ_w des Wassers sowie dem Volumen des Beckens V_w aus dem Zusammenhang:

$$\frac{dT_w}{dt} = \frac{\sum \dot{Q}_i}{c_{pw} \cdot \rho_w \cdot V_w} \quad (1)$$

Der Wärmetransport am Becken setzt sich aus Verdunstung \dot{Q}_v , langwelliger Strahlung \dot{Q}_s , Konvektion \dot{Q}_k , Wärmeleitung \dot{Q}_t und Frischwasserzufuhr \dot{Q}_{Fw} zusammen. Weiterhin können Energiegewinne durch Absorption von Solarstrahlung \dot{Q}_p und weiterer „externer“ Energiezufuhr durch eine Solaranlage \dot{Q}_{sol} oder eine konventionelle Heizung \dot{Q}_{aux} auftreten (s. Abb. 1).

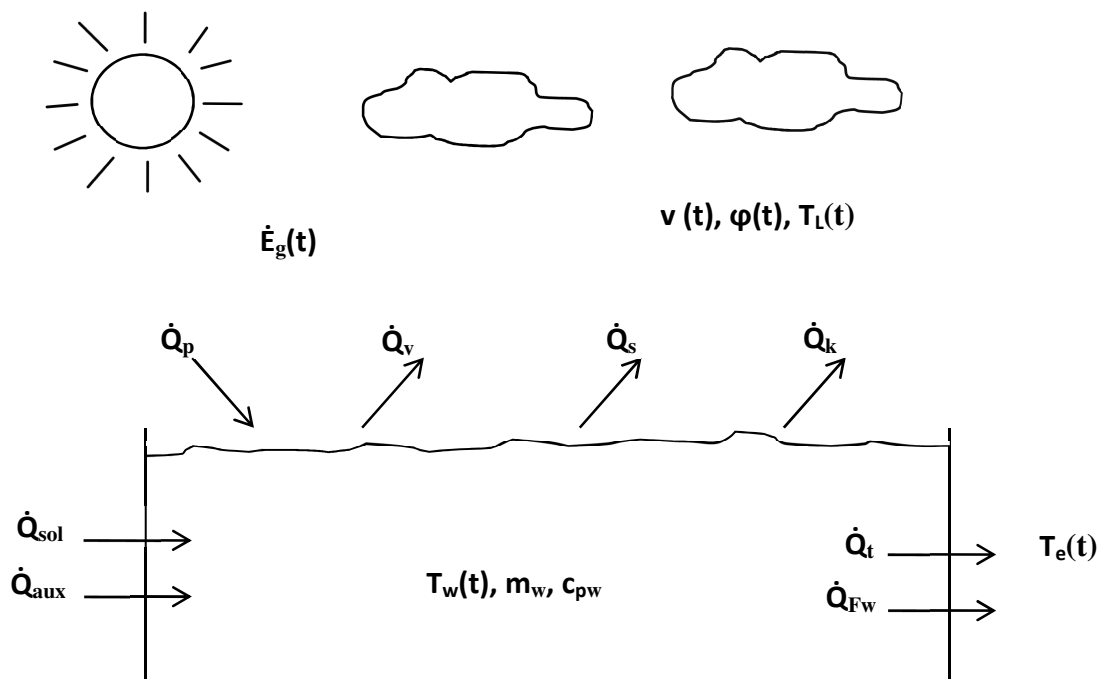


Abb. 1 Energiebilanz des Schwimmbekens

Algorithmen

Kurzwelliger Strahlungsaustausch

Infolge der Sonneneinstrahlung wird dem Becken tagsüber Energie durch kurzwellige elektromagnetische Strahlung zugeführt. Die Strahlungsabsorption im Wasser unterliegt mehreren Einflussfaktoren.

Sie ist zunächst abhängig von Schwimmbadparametern wie der Wassertiefe und dem Absorptionsgrad des Beckenbodens. Die Abhängigkeit von der Wassertiefe ist darin begründet, dass die Absorption im Wasser proportional zu dem zurückgelegten Weg in diesem ist. Die Beschaffenheit des Beckenbodens entscheidet darüber, welcher Anteil am Boden wieder zurückreflektiert wird und dann weiteren Reflexionsvorgängen unterworfen sein kann. Weiterhin spielen Einfallswinkel, direkter bzw. diffuser Anteil und die spektrale Zusammensetzung der Strahlung eine Rolle. In Abb. 2 werden die Reflexionsvorgänge an der Wasseroberfläche veranschaulicht.

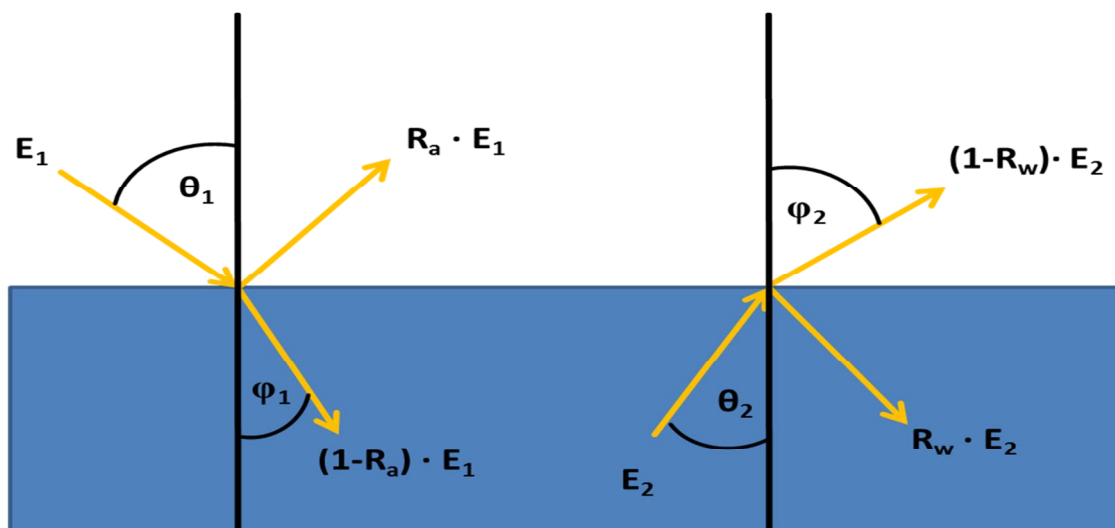


Abb. 2 Reflexionsvorgänge eines Strahls E_1 bzw. E_2 an der Luft-Wasser bzw. Wasser-Luft Schnittstelle, θ :Einfallswinkel, φ :Brechungswinkel

Das in T*SOL umgesetzte Berechnungsverfahren basiert auf einem Modell, welches die beschriebenen Zusammenhänge mittels mathematischer Methoden erfasst und den Absorptionsgrad des Wassers α_s im Vergleich mit experimentellen Daten mit nur einer relativen Abweichung von 3,67 % angibt [1]. Für öffentliche Becken wird in den Öffnungszeiten eine Minderung des Absorptionsgrades nach ISO 12596 [2] angenommen.

Für den passiven Energiegewinn \dot{Q}_p durch Strahlungsabsorption gilt mit der Wasseroberfläche A_w , der Globalstrahlung \dot{E}_g , sowie dem Absorptionsgrad α_s [3]:

$$\dot{Q}_p = \alpha_s \cdot A_w \cdot \dot{E}_g \quad (2)$$

Langwelliger Strahlungsaustausch

Jeder Körper emittiert langwellige Wärmestrahlung. Beim Schwimmbad findet ein ständiger Strahlungsaustausch zwischen Beckenwasser und Himmel statt. Die treibende Kraft hierbei ist die Differenz zwischen Wasser- und Himmelstemperatur. Bei der Ermittlung der Himmelstemperatur ist die Berücksichtigung von evtl. vorliegender Bewölkung zu beachten.

In T*SOL wird dazu zunächst die Strahlung \dot{E}_c berechnet, welche unter normalen Atmosphärischen Bedingungen und wolkenfreiem Himmel den Erdboden erreichen würde [4]. Setzt man diese in das Verhältnis zu den in den Klimadaten hinterlegten Globalstrahlungsdaten \dot{E}_g erhält man den Solarindex s [5]:

$$s = \frac{\dot{E}_g}{\dot{E}_c} \quad (3)$$

Der Solarindex ist ein Maß mit dem der Einfluss von Wolken berücksichtigt werden kann. Dazu wird über empirische Gleichungen zunächst der Emissionsgrad ϵ_c eines wolkenlosen Himmels bestimmt. Aus diesem kann dann der Emissionsgrad des bewölkten Himmels ϵ_a ermittelt werden [6]:

$$\epsilon_a = (1 - s) + s \cdot \epsilon_c \quad (4)$$

Die in T*SOL verwendeten Verfahren zur Bestimmung der Emissionsgrade ϵ_a und ϵ_c werden von Flerchinger et al. [5] empfohlen, nachdem Sie einen Vergleich von 27 verschiedenen Algorithmen, gegenüber Messdaten von über 21 Stationen in den USA und China durchführten.

Da nur tagsüber Strahlungswerte zur Bestimmung des Solarindex nach Gleichung (3) vorliegen, wird in T*SOL während den Nachtstunden ein Mittelwert aus den letzten vier berechenbaren Tageswerten verwendet.

Wird der Himmel als schwarzer Körper bei Temperatur T_H betrachtet¹ ergibt sich der langwellige Strahlungstransport \dot{Q}_s über die Wasseroberfläche A_w schließlich mit der Wassertemperatur T_w , dem Emissionsgrad ϵ_w von Wasser sowie der Stefan-Boltzmann-Konstante $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ [W m}^{-2} \text{ K}^{-4}]$ zu:

$$\dot{Q}_s = \epsilon_w \cdot \sigma \cdot A_w \cdot (T_w^4 - T_H^4) \quad (5)$$

¹ Die zuvor besprochenen Emissionsgrade betrachten den Himmel als grauen Körper bei Lufttemperatur. Wird der Himmel als schwarzer Körper betrachtet kann die Himmelstemperatur T_H über das Stefan-Boltzmann-Gesetz aus dem Emissionsgrad abgeleitet werden.

Verdunstung

Durch das Verdunsten von Wasser wird dem Becken fortwährend Verdampfungsenthalpie entzogen. Da die Verdunstungsverluste einen hohen Anteil am Gesamtwärmetransport haben, wirkt sich ein Fehler in ihrer Berechnung deutlich auf die simulierte Pooltemperatur aus. Ihre genaue Bestimmung ist jedoch mit Schwierigkeiten verbunden, denn es existiert keine allgemein gültige Gleichung, um die Verdunstung unter Windeinwirkung zu beschreiben [7].

Zur Bestimmung des Windeinflusses existieren verschiedene Ansätze. Weit verbreitet ist die Angabe einer empirisch ermittelten Windfunktion h_e , deren Parameter a, b und n aus experimentellen Untersuchungen gewonnen werden [8]:

$$h_e = a + b \cdot v^n \quad (6)$$

Vergleicht man die in der Literatur angegebenen Windfunktionen, zeigt sich dass ihre Ergebnisse bis zu einem Faktor von 2-3 voneinander abweichen können [9]. Dies liegt daran, dass die Parameter der Windfunktionen aus unterschiedlichen Experimenten gewonnen wurden, deren individuelle Verfahren und Umgebungsbedingungen auf die Form der Gleichung mit einwirkten [7]. So ist z.B. zu beachten, dass die Messhöhe der Windgeschwindigkeit nicht einheitlich ist.

Um die geeignete Gleichung für die Schwimmbadsimulation in T*SOL zu ermitteln wurde auf Basis anderer Veröffentlichungen eine Auswahl von 12 Gleichungen zusammengestellt und diese jeweils einzeln in die Simulation implementiert. Die Auswahl des geeignetsten Berechnungsverfahrens erfolgte durch den Vergleich mit den Messdaten eines über 54 Tagen vermessenen Pools. Die besten Ergebnisse wurden dabei mit folgender Windfunktion erzielt, wobei $v_{0,5}$ die Windgeschwindigkeit in 0,5 m Höhe über der Wasseroberfläche beschreibt [8]:

$$h_e = AF \cdot (0,089 + 0,0782 \cdot v_{0,5}) \quad (7)$$

Der Faktor AF berücksichtigt die Steigerung der Verdunstungsrate aufgrund von Badegästen. Durch deren Badeaktivitäten kann die Verdunstungsrate stark ansteigen. In ISO 12596 [2] wird für fünf Schwimmer auf 100 m² eine Steigerung von 25–50 % angegeben und für 20-25 Personen bereits Steigerungen von 70-100 %. Da die Anzahl der Personen im Wasser von der Tageszeit- und dem Wetter abhängig ist, sollte der Faktor über den Tag und die Saison variieren. Als erste Näherung wird der Faktor in T*SOL nur in den Öffnungszeiten öffentlicher Bäder angepasst.

Die Verdunstungsmenge \dot{Q}_v ergibt sich schließlich aus der Wasserdampfdruckdifferenz Δp zwischen Wasseroberfläche A_w und der Umgebungsluft, sowie der Windfunktion h_e [7]:

$$\dot{Q}_v = h_e \cdot A_w \cdot \Delta p \quad (8)$$

Konvektion

Befindet sich ein Fluid relativ zu einem anderen Körper in Bewegung, so spricht man von Wärmeübertragung durch Konvektion. Die Konvektion kann sowohl einen Wärmegewinn als auch einen Wärmeverlust für das Schwimmbecken darstellen.

Da die Konvektionsverluste nur einen geringen Anteil am Gesamtwärmetransport haben, wirkt sich ein möglicher Fehler an dieser Stelle kaum auf die simulierte Pooltemperatur aus und kann durch andere Effekte leicht überlagert werden.

Die Bowen-Ratio R_B beschreibt einen Zusammenhang zwischen sensiblem und latentem Wärmefluss. Sie ist abhängig von dem Druckverhältnis des Außendruckes P_a zu dem atmosphärischen Normdruck $P_0 = 101,325$ [Pa] und einer Konstanten $C_B = 61,3$ [Pa K⁻¹]. Außerdem geht das Verhältnis von Temperaturdifferenz ΔT zur Wasserdampfdruckdifferenz Δp zwischen Wasseroberfläche und Umgebungsluft mit ein [10]:

$$R_B = C_B \cdot \frac{P_a}{P_0} \cdot \frac{\Delta T}{\Delta p} \quad (9)$$

Bei bekannten Verdunstungsverlusten \dot{Q}_v kann der Konvektionswärmestrom \dot{Q}_k über folgenden Zusammenhang ermittelt werden [10]:

$$R_B = \frac{\dot{Q}_k}{\dot{Q}_v} \quad (10)$$

Transmission

Die Transmissionsverluste \dot{Q}_t beschreiben die Wärmeverluste in Folge von Wärmeleitung durch Beckenwand und -boden. Mit der Fläche der Beckenumrandung A_B und dem Wärmedurchgangskoeffizient k_e wird der Wärmestrom in Folge der Temperaturdifferenz ΔT zwischen Beckenwasser und Erdreich wie folgt ermittelt [3]:

$$\dot{Q}_t = k_e \cdot A_B \cdot \Delta T \quad (11)$$

Die Temperatur des Erdreichs wird in T^*_{SOL} aus den Klimadaten des Standorts ermittelt. Der Wärmedurchgangskoeffizient ist im Wesentlichen abhängig von der Wandstärke sowie ihrer Wärmeleitfähigkeit und dem Wärmeleitwiderstand des Erdreichs. Hierfür werden in der Simulation Standardwerte verwendet.

Wärmeströme durch Massentransport

Dem Becken wird während des Betriebs zur Reinigung und zum Ausgleich von Wasserverlusten Frischwasser zugeführt, welches sich in der Regel auf einer niedrigeren Temperatur als das Beckenwasser befindet. Gleichzeitig kann dem Becken auch Warmwasser aus einer Heizungs- bzw. Solaranlage zugeführt werden.

Der Wärmetransport \dot{Q}_m ergibt sich aus dem Massenstrom \dot{m} , der spezifischen Wärmekapazität des Wassers c_{pw} und der Temperaturdifferenz ΔT zwischen Vor- und Rücklauf [3]:

$$\dot{Q}_m = \dot{m} \cdot c_{pw} \cdot \Delta T \quad (12)$$

Abdeckung

Mit einer Abdeckung lassen sich die Wärmeverluste des Schwimmbads deutlich reduzieren. Die Verdunstung wird fast vollständig unterbunden und auch Strahlungs- und Konvektionsverluste können je nach Abdeckvorrichtung entsprechend gemindert werden.

In einem Freibad kann die nächtliche Abdeckung eine Minderung des Nachheizenergiebedarfs um 40-50% bewirken und stellt somit eine effiziente Energieeinsparmaßnahme dar [11].

Wenn in Zeiten solarer Einstrahlung abgedeckt ist, verringert sich der Wärmegewinn des Schwimmbeckens durch Absorption, dieser Effekt kann durch die Verwendung von transparenten Abdeckungen verringert werden. In T*SOL kommt ein Modell zur Anwendung, welches über die Energiebilanz der Abdeckung die Minderung der Verlustgrößen in Abhängigkeit der physikalischen Randbedingungen ermittelt [12].

Das Modell arbeitet dabei mit folgenden Annahmen:

- Die strahlungsphysikalischen Eigenschaften und Stoffwerte der Abdeckung sind konstant.
- Die Wärmekapazität der Abdeckung ist vernachlässigbar gering.
- Die Abdeckung ist undurchlässig für langwellige Strahlung.
- Die Abdeckung steht in direktem Kontakt mit dem Beckenwasser.
- Die latente Wärme des Verdunstungsprozesses wird vollständig dem Wasser entzogen.

Durch die Angabe des Flächenverhältnisses von Schwimmbad- zu Abdeckungsfläche steht dem Nutzer in T*SOL die Möglichkeit zur Verfügung, Schwimmbecken z.B. auch teilabgedeckt zu simulieren. Dazu werden die Bilanzen jeweils separat für den abgedeckten bzw. den unabgedeckten Teil bestimmt und anschließend miteinander verrechnet.

Validierung

Datengrundlage

Die Messdaten wurden über 54 Tage an einem Pool in Davis, Kalifornien aufgenommen und von Woolley et al. [10] übermittelt. Die Messungen liegen in stündlicher Auflösung vor und beinhalten die relative Luftfeuchtigkeit φ , Außentemperatur T_L , Globalstrahlung \dot{E}_g sowie die Windgeschwindigkeit v_2 aus 2 m Höhe. Die genannten Werte sind in Abb. 3 und Abb. 4 dargestellt.

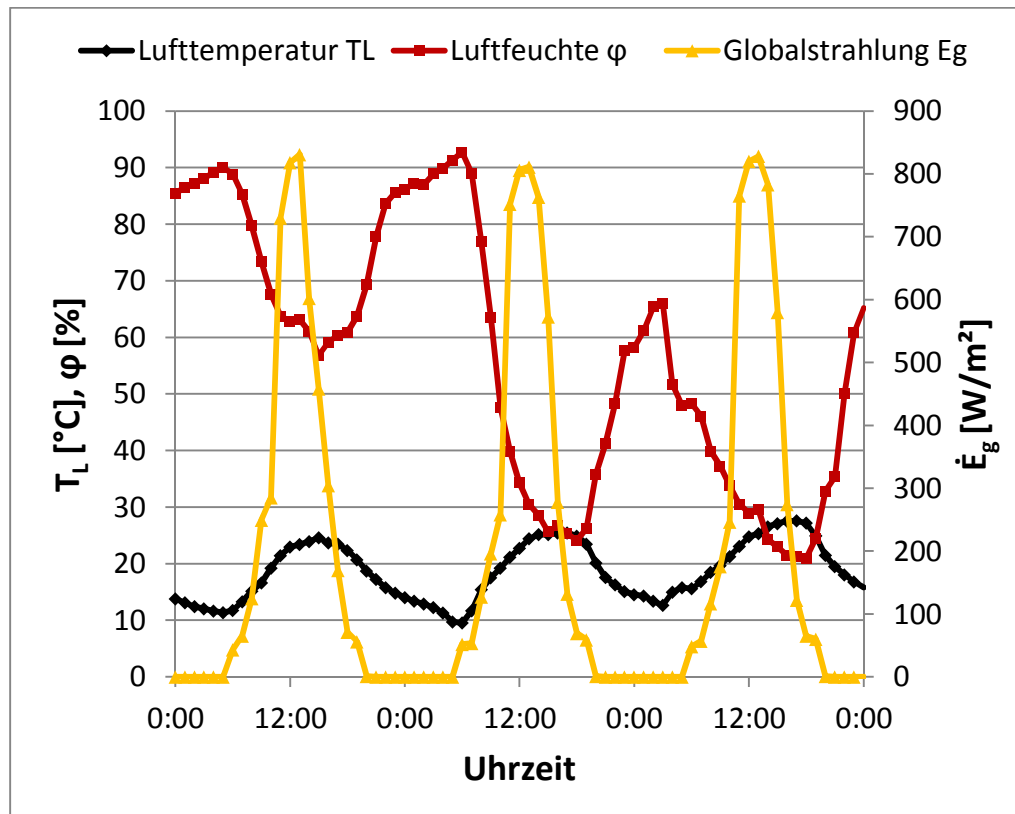


Abb. 3 Gemessene Lufttemperatur T_L , relative Luftfeuchte φ_L und Globalstrahlung \dot{E}_g über drei Tage des Messzeitraums

Der Pool wurde während den Messungen nicht von Personen genutzt und die Filterpumpen liefen mit einem konstanten Durchsatz um eine gute Durchmischung des Wassers zu erreichen.

Wärmeverluste durch zugeführtes Frischwasser können aufgrund der Menge und den herrschenden Temperaturdifferenzen vernachlässigt werden. Da der Pool teilweise verschattet war, wurde die Verschattung von Woolley et al. [10] ermittelt und in die Strahlungsdaten einbezogen.

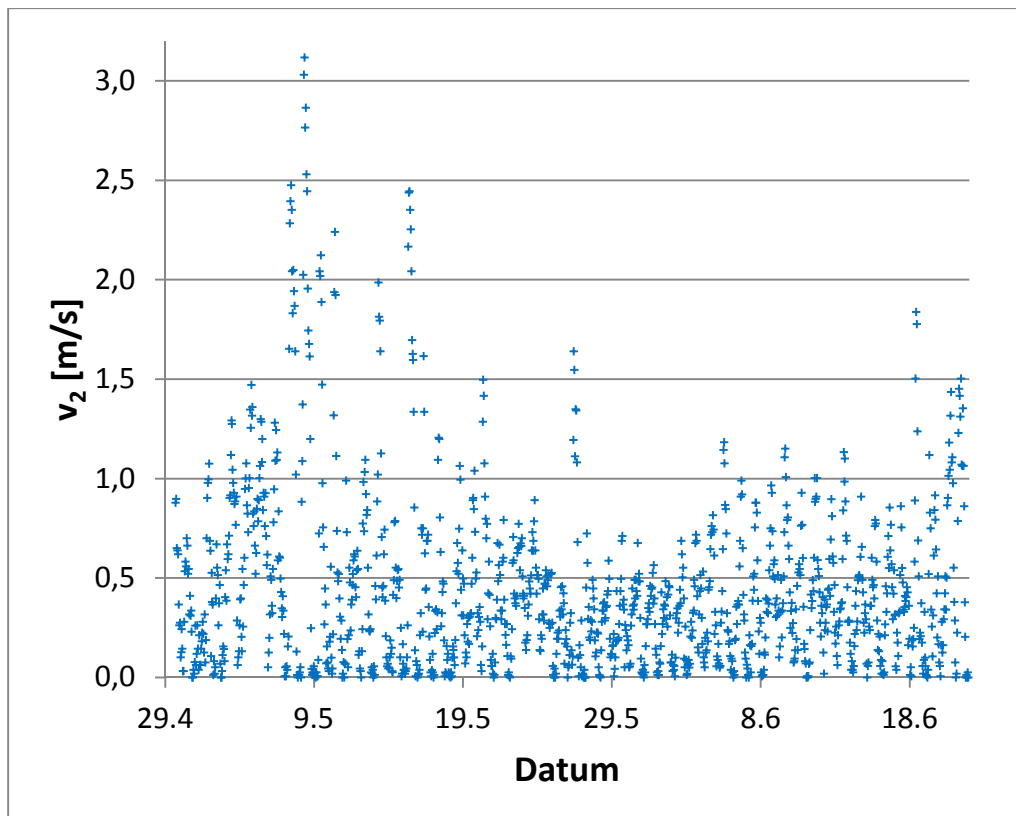


Abb. 4 Gemessene Winddaten des Messzeitraums

Die Windgeschwindigkeiten am Pool liegen, wie aus Abb. 4 hervorgeht, überwiegend unter 1 m/s. Aufgrund der Beschaffenheit des Geländes und der Umgebung des Schwimmbads nimmt die Windgeschwindigkeit mit der Höhe ab. Deswegen wurde die Windgeschwindigkeit auf die in Gleichung (7) angegebene Referenzhöhe umgerechnet. Dazu wurden Beziehungen für vorstädtische Umgebungen verwendet [13]. Alle weiteren Pooldaten die für die Simulation nötig waren, sind der Tabelle 1 zu entnehmen.

Tabelle 1 Pooldaten

Breitengrad	38,4 °N
Längengrad	121,7 °W
Poollänge	4,6 m
Poolbreite	9,1 m
Pooltiefe	1,8 m
Erdreichtemperatur	15 °C

Vergleich mit Messwerten

Wie der in Abb. 5 dargestellte Verlauf zwischen simulierter und gemessener Wassertemperatur verdeutlicht, sind die Kurvenverläufe, bis auf einen Zeitraum von ca. zwei Wochen Mitte Mai, weitgehend übereinstimmend. Hier kommt es zu einer Abweichung von maximal 1,5 °C. Insgesamt konnte eine durchschnittliche Abweichung von 0,38 °C erreicht werden.

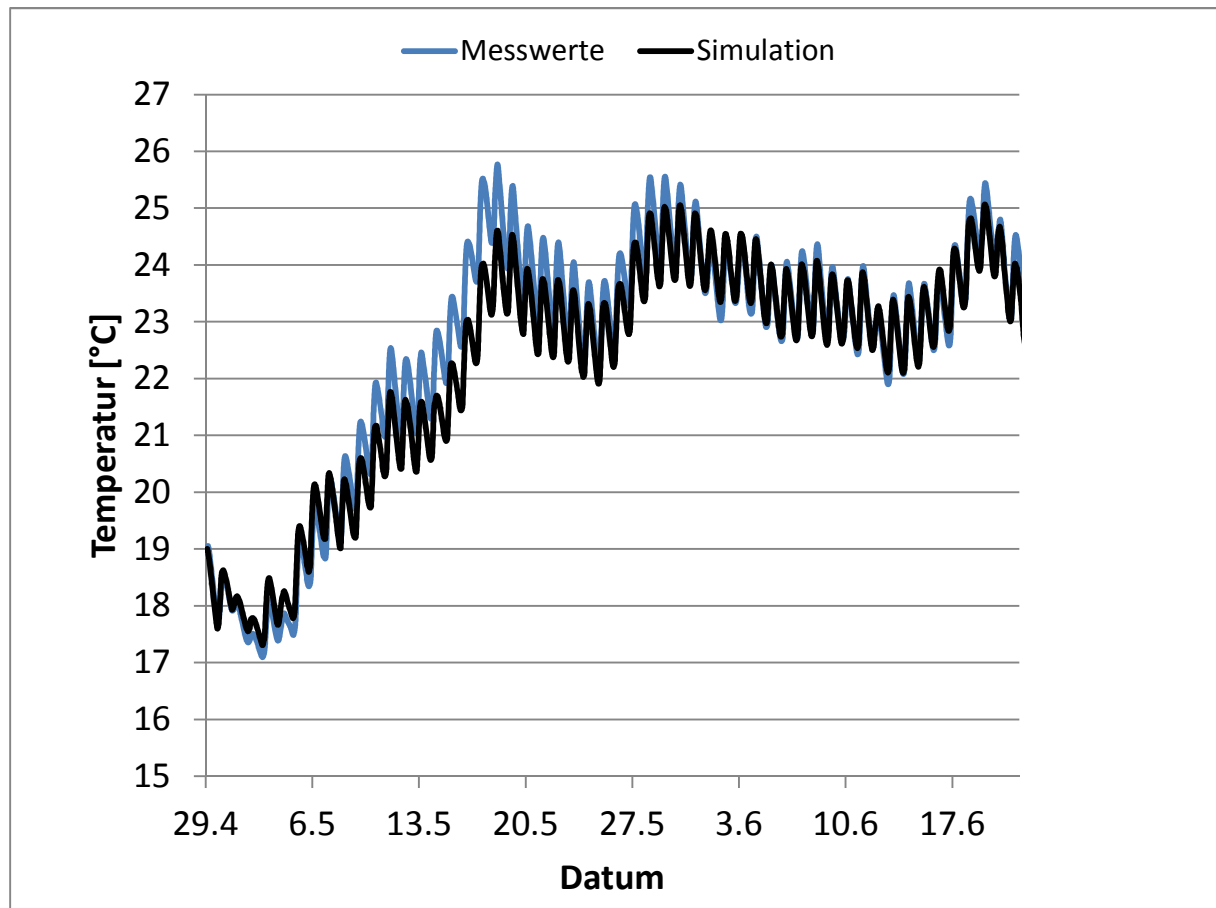


Abb. 5 Verlauf der Mess- und Simulationswerte der Beckentemperatur

Die Anteile der einzelnen Bilanzgrößen am Wärmetransport verteilen sich nach den in Abb. 6 dargestellten Proportionen². Man erkennt, dass langwellige Strahlung und Verdunstung den größten Anteil an dem Gesamtverlust tragen. Je nach klimatischen Bedingungen unter denen ein Pool betrieben wird, kann sich die Verteilung auch anders als in diesem Beispiel gestalten.

² Der Speicherterm des Beckens wurde für die Darstellung nicht berücksichtigt.

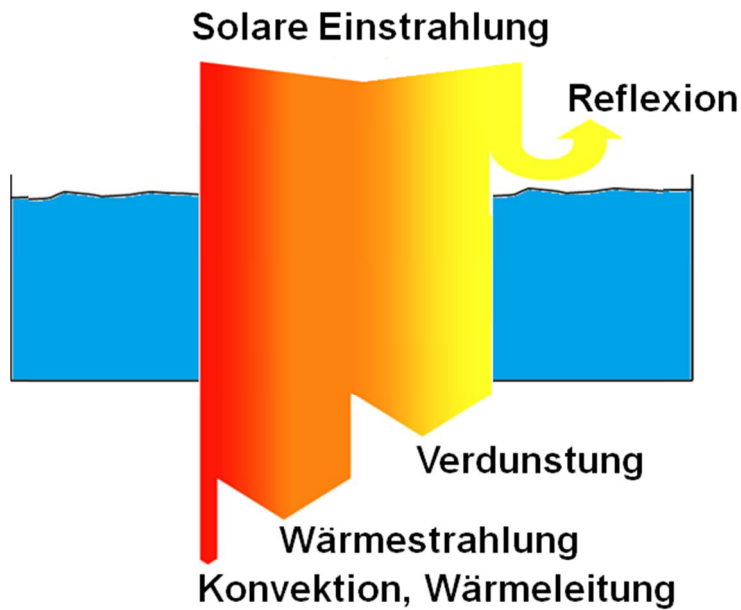


Abb. 6 Größenordnung der bilanzierten Wärmetransporte

Ausblick

Im Hinblick auf zukünftige Erweiterungen könnte bei größeren Schwimmbecken, der Energieeintrag durch Pumpen interessant sein. Insbesondere der Einfluss von Badegästen auf die Schwimmbadsimulation sollte noch genauer erfasst werden.

Da die Verdunstung einen hohen Anteil am Gesamtwärmeverlust trägt und stark von Windgeschwindigkeit und Luftfeuchte abhängt, ist eine realistische Annahme der vor Ort herrschenden klimatischen Bedingungen wichtig. Denkbar wäre eine genauere Erfassung der Umgebung des Schwimmbades wodurch auch evtl. vorliegende Verschattungen berücksichtigt werden könnten.

Weitere Ausbaumöglichkeiten des Modells bestehen in der Berücksichtigung von Temperaturschichtungen im Wasser infolge von Dichtedifferenzen. Für den hier untersuchten Pool zeigten sich aber gute Übereinstimmungen mit dem verwendeten Ein-Knoten-Modell. Hier müssen weitere Untersuchungen zeigen, ob eine Anpassung des Modells sinnvoll ist.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass für den untersuchten Pool eine hohe Qualität der Simulation erreicht werden konnte. Da nur ein Vergleich mit den Messwerten eines einzelnen Pools stattfand, sollten aber weitere Modellvalidierungen folgen.

Literaturverzeichnis

- [1] Hongbo, W., Runsheng, T., Zhimin, L., Hao, Z.: A mathematical procedure to estimate solar absorptance of shallow water ponds. In: *Energy Conversion and Management (2009)*, Vol. 50, S. 1828-1833
- [2] ISO/TR 12596: 1995(E), 1995a, *Solar Heating - Swimming Pool Heating Systems- Dimensions, Design and Installation Guidelines*. International Standards Organisation, Geneva (1995)
- [3] Lang, M.: *Einbettung von Schwimmbädern in solare Nutzungskonzepte*. Diplomarbeit (unveröffentlicht), Technische Universität Berlin, Berlin (1998)
- [4] Dilley, A. C., O'brien, D. M.: Estimating downward clear sky long-wave irradiance at the surface from screen temperature and precipitable water. In: *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society (1998)*, 124, S. 1391-1401
- [5] Flerchinger, G. N., Xaio, W., Marks, D., Sauer, T. J., Yu, Q.: Comparison of algorithms for incoming atmospheric long-wave radiation. In: *Water Resources Research (2009)*, 45, S. 1-13
- [6] Crawford, T. M., Duchon, C. E.: An improved parameterization for estimating effective atmospheric emissivity for use in calculating daytime downwelling longwave radiation. *Journal of Applied Meteorology and Climatology (1999)*, 48, S. 474-480
- [7] Sartori, E.: A critical review on equations employed for the calculation of the evaporation rate from free water surfaces. In: *Solar Energy (2000)*, Vol. 68, S. 77-89
- [8] Ruiz, E., Martinez, P. J.: Analysis of an open-air swimming pool solar heating system by using an experimentally validated TRNSYS model. In: *Solar Energy (2010)*, Vol. 84, S. 116-123
- [9] Hahne, E., Kübler, R.: Monitoring and simulation of the thermal performance of solar heated outdoor swimming pools. In: *Solar Energy (1994)*, Vol. 53, S. 9-19
- [10] Woolley, J., Harrington, C., Modera, M.: Swimming pools as heat sinks for air conditioners : Model design and experimental validation for natural thermal behavior of the pool. In: *Building and Environment (2011)*, Vol. 46, S. 187-195
- [11] Khartchenko, N.: *Thermische Solaranlagen*. Springer-Verlag, Berlin (1995)
- [12] Radermacher, C.: *Validierung der Schwimmbadsimulation in T*SOL*. Bachelorarbeit (unveröffentlicht), FH Nordhausen, Nordhausen (2011)
- [13] American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers (Hg.): *ASHRAE Handbook : 2005 Fundamentals*. Atlanta (2005)