

Literatur

- [1] Ames, B. N., J. Mc Cann and E. Yamasaki: Methods for detecting carcinogens and mutagens with the Salmonella/mammalian microsome mutagenicity test. *Mutation Res.* 31 (1975) 347-364.
- [2] Anonym: Warum Sie unbesorgt mit Hartschaum dämmen können. Herausgeber: Industrieverband Hartschaum e. V. (IVH) Informationsbroschüre, April 1985.
- [3] Anonym: Isorast - das Sparbausystem. Informationsbroschüre der Fa. Isorast GmbH, 6204 Taunusstein (1986).
- [4] Anonym: Empfehlungen V, Polystyrol zur Lebensmittelherstellung. *Bundesgesundheitsblatt* 26 (1983) 53-55.
- [5] Anonym: Maximale Arbeitsplatzkonzentrationen und biologische Arbeitsstofftoleranzwerte. Mitteilung XII, VCH, Weinheim (1987).
- [6] R. Lefaux: Chemie und Toxikologie der Kunststoffe. Krausskopf-Verlag, Mainz (1966) 39-40.
- [7] K.-H. Stammberger und J. Porst: Polystyrol. *Wohnung + Gesundheit* 5 (1983) 25-27.
- [8] W. Wirth und C. Gloxhuber: Toxikologie. Georg Thieme Verlag, Stuttgart (1985) 204.

Simulation des energetischen Betriebsverhaltens von Wassererwärmungssystemen in Hallenbädern

K. Leisen und L. Rouvel

Im Rahmen eines Demonstrationsvorhabens des BMFT und der EG wurden meßtechnische Untersuchungen zum Energieverbrauch des Hallenbades Schwalmtal durchgeführt, die auch das Warmwasser- und das Heizwassersystem einschlossen. Die während der Untersuchungen gewonnenen Erfahrungen waren Ausgangsbasis für die Entwicklung eines rechnergestützten Modells zur Simulation des energetischen Betriebsverhaltens von Warmwasser- und Heizsystemen.

Im folgenden wird ein Simulationsmodell vorgestellt, das die Warmwasser- und Heizsysteme von Hallenbädern beschreibt. Es wird über Vergleiche zwischen Berechnungen und Messungen an Beispielen des Hallenbades Schwalmtal berichtet, wobei es sich hier um Betriebsmessungen und nicht um Labormessungen handelt. Entsprechend ist es auch das Ziel des Simulationsmodells, nicht die thermodynamischen Prozesse möglichst genau nachzubilden, sondern Aussagen über den zu erwartenden Betriebsablauf in der Praxis zu erhalten.

1. Rechnergestütztes Modell zur Simulation des energetischen Betriebsverhaltens von Warmwasser- und Heizsystemen

Die Entwicklung des Modells verfolgt die Ziele, die Wärmeabgabe und den Energiebedarf von Wassererwärmern sowie den Verlauf von Zustandsgrößen in möglichst vielen Systemvarianten unter Berücksichtigung der in Wasserspeichern bevorratbaren Energie ermitteln zu können. Mit dem Modell sollen die Auswirkungen der Veränderung von Systemparametern, deren Werte bei Planungen festzulegen sind, und der Veränderung von Randbedingungen, deren Werte und Verläufe bei der Planung nicht eindeutig festlegbar sind, bestimmt werden können. Zu

diesem Zweck werden die Systeme in einzelne typische Bestandteile zerlegt, die durch charakteristische Kenngrößen beschrieben werden können und deren thermodynamisches Verhalten mit zutreffenden vereinfachenden Annahmen in einem für die Praxis relevanten Bereich ausreichend genau nachgebildet werden kann. Bild 1 zeigt den prinzipiellen Aufbau einfacher Warmwasser- und Heizsysteme, die sich aus den Bestandteilen Wasser, Wasserspeicher, Warmwasser- bzw. Heizwärmeentnahmesystem, Steuerungs- und Regelungseinrichtung sowie Wassererwärmer mit Ladepumpe zusammensetzen.

Das Wasser als zu temperierendes Medium, als Wärmetransportmedium sowie als Wärmespeichermedium steht mit allen übrigen Systembestandteilen in Kontakt und beeinflusst in starkem Maße das dynamische Verhalten solcher Systeme. In dem Modell wird dieser Einfluß berück-

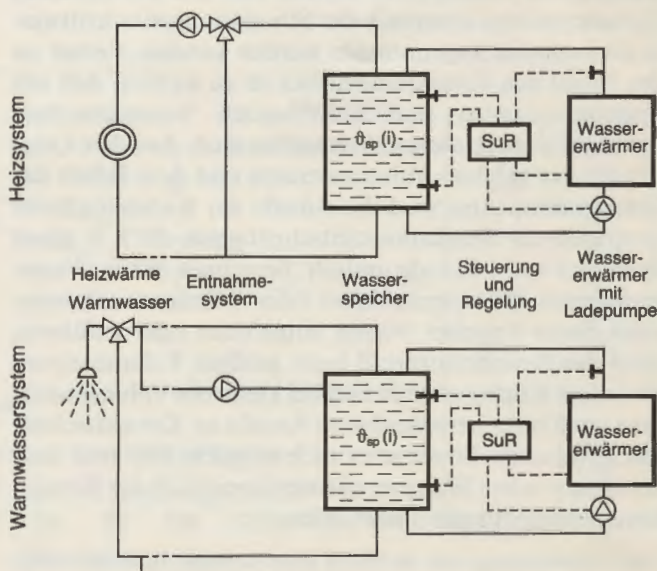


Bild 1. Schemata für den prinzipiellen Aufbau einfacher Warmwasser- und Heizsysteme.

sichtigt, indem die zeitliche und örtliche Temperaturverteilung des im System befindlichen Wassers nachgebildet wird.

Das räumliche Temperaturfeld des Wassers in einem Wasserspeicher, in dem sich gewöhnlich der größte Teil der Wassermasse des Systems befindet, wird vereinfachend durch ein eindimensionales, vertikales Temperaturprofil dargestellt. Dazu wird das im Speicher befindliche Wasser gedanklich in gleichgroße, raumfeste Volumenelemente in vertikale Richtung unterteilt, die jeweils als ideal durchmischt behandelt und durch eine Temperatur $\vartheta_{sp}(i)$ (Bild 1) gekennzeichnet werden. Die in einem Wasserspeicher gleichzeitig ablaufenden verschiedenartigen thermodynamischen Prozesse werden im Modell mit 4 Teilprozessen nachgebildet, die nacheinander abgehandelt werden.

Die durch Entnahme und Zufuhr von Wasser hervorgerufenen Veränderungen des Temperaturfeldes werden nachgebildet, indem das Temperaturprofil um jeweils ganze Volumenelemente zwischen den gekoppelten Entnahme- und Zufuhrstellen (z. B. eines Wassererwärmers) verschoben und dem Volumenelement an der Zufuhrstelle eine neue Temperatur zugeordnet wird. Temperaturinversionen, die bei der Zuordnung einer neuen Temperatur auf das Volumenelement an der Zufuhrstelle auftreten können, werden nachgebildet, indem allen Volumenelementen im betroffenen Bereich eine gemittelte Temperatur zugeordnet wird. Weiterhin werden die Auswirkungen der Wärmeleitung im Wasser und in der Speicherwand zwischen Volumenelementen sowie der Wärmeverluste an die Umgebung auf die Temperatur der Volumenelemente berücksichtigt. Um den teilweise sehr großen Einfluß der Wärmeverluste über die Speicherwand auf das Temperaturprofil in Speichern und das Betriebsverhalten der Wassererwärmer genauer nachbilden zu können, sind die Wärmedurchgangskoeffizienten k der Speicherisolation getrennt für Speicherdecke, Speicherboden und Speichermantel anzugeben.

Die Verfahrensweise zur Nachbildung der Entnahme und Zufuhr von Wasser setzt voraus, daß alle auftretenden Volumenströme innerhalb der Simulationszeitschrittweite als konstant angenommen werden können. Ferner ist der Inhalt des Volumenelementes so zu wählen, daß alle Speichervolumina und auftretenden Volumenströme ganzzahlig durch diesen Wert teilbar sind. Aus dem Quotienten des größten Volumenstroms und dem Inhalt des Volumenelementes wird die Anzahl der Kurzzeitschritte innerhalb der Simulationszeitschrittweite, die z. B. einen Zeitraum von 1 Stunde umfaßt, berechnet. Wenn Wassererwärmer, Wasserentnahme- oder Wärmeentnahmesystem einem Speicher Wasser entnehmen oder zuführen, wird das Temperaturprofil beim größten Volumenstrom bei jedem Kurzzeitschritt und bei kleineren Volumenströmen nach einer berechenbaren Anzahl an Kurzzeitschritten verschoben. Somit ist es auch möglich, Ein- und Ausschaltungen von Wassererwärmern innerhalb der Simulationszeitschrittweite nachzubilden.

Die Verwendung des Modells setzt voraus, daß die zeitlichen Verläufe der Heizwärme – bzw. Warmwasserentnahme im Simulationszeitraum als Randwerte bekannt sind

und die Entnahme innerhalb eines Simulationszeitintervalls linear auf den Summenwert ansteigt. Bei einem Heizwärmeentnahmesystem wird aus der Wärmeentnahme, dem Heizwasservolumenstrom und der Temperatur des Volumenelementes im Wasserspeicher an der Entnahmestelle schließlich die Temperatur des Volumenelementes an der Zufuhrstelle berechnet. Bei einem Warmwassersystem können Wärmeverluste und Leitungsaufheizverluste durch den Betrieb von Zirkulationsleitung, konstante Wärmeentnahme von Verbrauchern und die Lage der Anschlußstellen von Mischventilen vorgegeben und die Auswirkungen dieser Verbraucher auf das Temperaturprofil im Wasserspeicher berechnet werden.

Bei den Wassererwärmern mit Ladepumpe sind die Heizleistungsabgabe- und Leistungsbezugs Kennlinien in Abhängigkeit von der Heizwassertemperatur und gegebenenfalls weiterer Einflußgrößen – z. B. der Abwassertemperatur bei einem Wärmerückgewinnungsgerät – als Kurzzeit-Mittelwerte anzugeben. Aus der Temperatur des Volumenelementes im Wasserspeicher, in dessen Bereich sich der Zulauf zum Wassererwärmer befindet, und gegebenenfalls aus den weiteren Einflußgrößen werden die Betriebspunkte des Wassererwärmers mit den gegebenen Kennlinien für den Zeitraum eines Simulationskurzzeitintervalls ermittelt. Daraus können nun Wärmeabgabe und Energieaufnahme des Wassererwärmers sowie die Temperatur des Volumenelementes im Wasserspeicher, in dessen Bereich sich der Rücklauf des Wassererwärmers zum Wasserspeicher befindet, berechnet werden.

2. Warmwasser- und Heizsystem des Hallenbades Schwalmtal

In dem Warmwassersystem des Hallenbades Schwalmtal sind 3 Wasserspeicher in Reihe eingebaut, denen jeweils ein Wassererwärmer zugeordnet ist (Bild 2). Der Inhalt des 1. Speichers wird von einem Wärmerückgewinnungsgerät erwärmt, das aus einem Wärmeübertrager mit einer nachgeschalteten Wärmepumpe – Nennvolumenstrom $1,2 \text{ m}^3/\text{h}$, Nennheizleistung 31 kW – besteht und mit einem Abwasserspeicher verbunden ist.

Das Wärmerückgewinnungsgerät wird jeden Tag nach Beendigung des Badebetriebs manuell zur Entwärmung des Beckenabwassers umgeschaltet. Der Inhalt des 2. Speichers wird von einer Absorber-Wärmepumpenanlage und der Inhalt des 3. Speichers von einem erdgasbefeuerten Heizkessel erwärmt. Das Mischventil des Warmwasserentnahmesystems ist über zwei Zufluß- und eine Rückflußleitung mit den Wasserspeichern verbunden. Als weitere Verbraucher sind die Wärmebänke der Schwimmhalle an dem Warmwassersystem angeschlossen, die in dem Bild nicht eingezeichnet sind, aber bei der Simulation berücksichtigt werden.

In dem Heizwassersystem sind 3 Wasserspeicher eingebaut, die gleichfalls der bereits erwähnten Wärmepumpenanlage zugeordnet sind. Das Heizwasser kann bei Bedarf über einen Wärmeübertrager vom Heizkessel erwärmt bzw. nacherwärmt werden. Das Heizwärmeentnahmesystem, zu dessen Verbrauchern die Luftnacherhit-

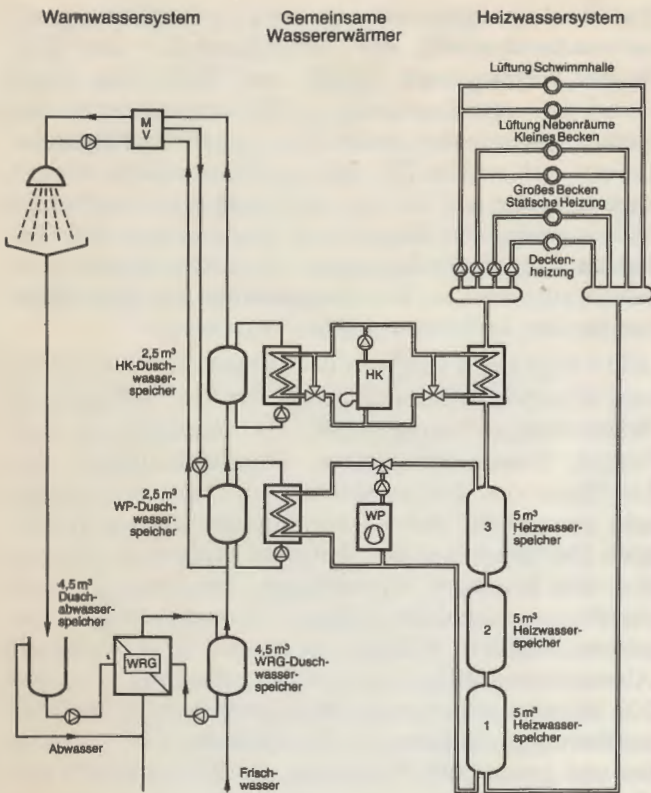


Bild 2. Hallenbad Schwalmtal; Schema des Aufbaus des Warmwasser- und Heizwassersystems.

zer der Schwimmhalle und Nebenräume, die statischen Heizflächen in den Nebenräumen sowie die Wärmeübertrager des Beckenwassersystems gehören, wird von einem nahezu konstanten Volumenstrom von $10 \text{ m}^3/\text{h}$ durchflossen.

Die elektrisch angetriebene, dreistufige Sole/Wasser-Wärmepumpe gibt im Nennleistungspunkt – 3 Verdichter, Sole 0°C , Heizwasservorlauf 55°C – eine Heizleistung von 81 kW ab und nimmt gleichzeitig eine elektrische Leistung von 30 kW auf. Sie ist über einen Solekreislauf mit einem Energiestapel und einem Energiedach verbunden, die je eine Wärmeübertragungsfläche von 800 m^2 haben. Die Wärmepumpenanlage ist betreibbar, solange die Sole eine Temperatur von -15°C nicht unterschreitet und der Heizwasservorlauf eine Temperatur von 55°C nicht überschreitet. Über eine interne Regelung werden die Verdichter schrittweise beim Erreichen der Grenztemperaturen ausgeschaltet. Zur Warmwassererwärmung wird die Wärmepumpenanlage von einem Zweipunktregler mit 2 Temperaturfühlern im zugeordneten Wasserspeicher und festen Sollwerten angesteuert. Zur Heizwassererwärmung mit der Wärmepumpe wird ein außentemperaturgeführter Zweipunktregler verwendet. Bei gleichzeitiger Wärmeanforderung von beiden Wassersystemen wird das Warmwassersystem vorrangig versorgt.

3. Vergleich zwischen Messungen und Berechnungen

3.1 Auskühlen eines Wasserspeichers

Da keine Laboruntersuchungen vorgenommen wurden, wurde für die Überprüfung der Genauigkeit des Simulationsmodells für die Wasserspeicher auf veröffentlichte Ergebnisse zurückgegriffen.

Beim Eidgenössischen Institut für Reaktorforschung wurden Temperaturverläufe an unterschiedlichen Stellen in einem stehenden Warmwasserspeicher (5 m^3) gemessen, dem über einen Zeitraum von 180 Stunden (7,5 Tage) kein Wasser zugeführt bzw. entnommen wurde [1]. In Bild 3 sind die Temperaturverläufe an 4 Meßstellen eingetragen.

Mit Hilfe des Modells wurde das thermische Verhalten eines gleichgroßen Wasserspeichers nachgebildet, dessen Volumen in 10 Volumenelemente mit einem Inhalt von je $0,5 \text{ m}^3$ unterteilt wurde. In [1] wird angegeben, daß der Wärmedurchgangskoeffizient k der Speicherisolation im Bereich von Volumenelementen ohne Anschlußstutzen etwa $0,25 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ und der Einfluß eines Anschlußstutzens im oberen Teil etwa $1 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ sowie im unteren Teil etwa $0,5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ beträgt.

Ausgehend von diesen Werten wird mit dem Modell mit einem Wärmedurchgangskoeffizient k für die Speicherdecke von $2,2 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, für den Speichermantel von $0,6 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ und für den Speicherboden von $0,6 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ eine gute Übereinstimmung mit den Meßergebnissen erzielt. In Bild 3 sind die Temperaturverläufe derjenigen Volumenelemente eingetragen, in deren Bereich sich die o. g. Meßstellen befinden. Eine weitere Detaillierung des Modells ist nicht erforderlich, da sie in den meisten Fällen für die Praxis nur eine geringe Bedeutung hat und die erzielte Übereinstimmung für die o. g. Zielsetzung bei der Modellerstellung als ausreichend erachtet wird.

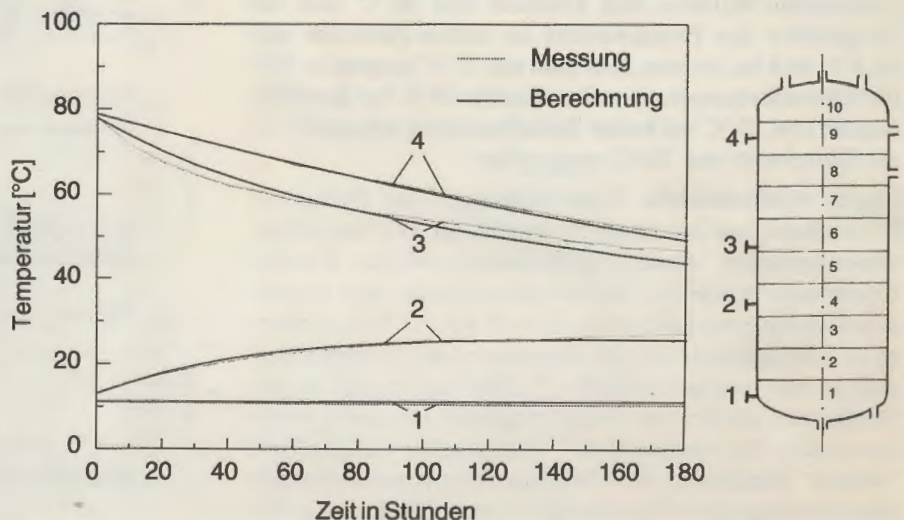


Bild 3. Vergleich von Temperaturverläufen in einem Wasserspeicher bei einem Auskühlversuch.

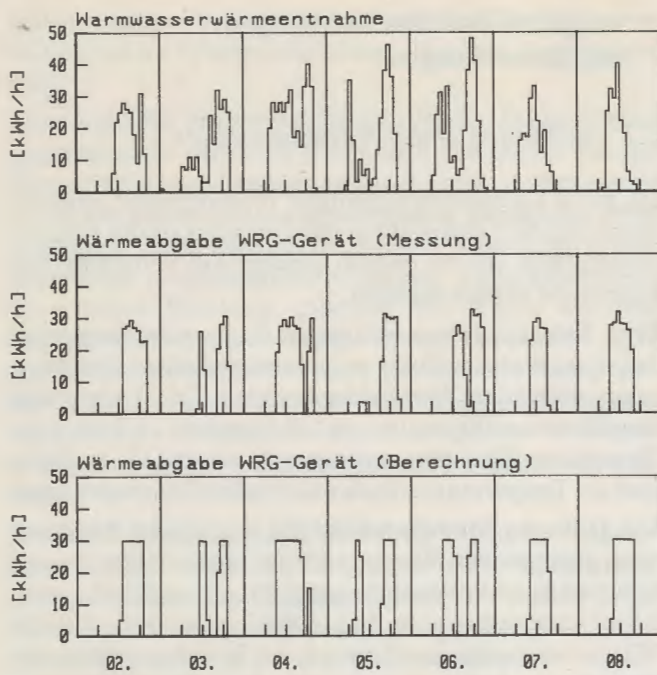


Bild 4. Vergleich der berechneten Wärmeabgabe des WRG-Gerätes des Hallenbades Schwalmtal mit gemessenen Werten (02. 09. bis 09. 09. 1985).

3.2 Wärmeabgabe und Endenergieverbrauch bzw. -bedarf der Wassererwärmer des Hallenbades Schwalmtal

Für die Simulation ist das Warmwasserspeichervolumen in 47 Volumenelemente mit einem Inhalt von je $0,2 \text{ m}^3$ und das Heizwasserspeichervolumen in 15 Volumenelemente mit einem Inhalt von je 1 m^3 unterteilt. Als Randwerte sind gemessene Stundenwerte des Verbrauchs an Warmwasser und des Heizwärmeverbrauchs der Entnahmesysteme sowie die gemessenen stündlichen meteorologischen Daten als Randwerte für die Steuerungs- und Regelungseinrichtungen und zur Ermittlung des Wärmegewins mit der Wärmepumpe zugrundegelegt.

In Anlehnung an Messungen ist die Temperatur des entnommenen Warmwassers konstant mit 40°C und die Temperatur des Frischwassers im ersten Zeitraum mit $16,5^\circ\text{C}$ und im zweiten Zeitraum mit 12°C angesetzt. Für die Abwassertemperatur, die zwischen 28°C bei Betriebsbeginn und 32°C bei hoher Besucherdichte schwankt, ist ein Mittelwert von 30°C vorgegeben.

Durch meßtechnische Untersuchungen im Hallenbad Schwalmtal und an einem Prüfstand für Wärmerückgewinnungsgeräte wurde der Wirkungsgrad des Wärmeübertragers sowie die Heizleistungsabgabe und elektrische Leistungsaufnahme des Verdichters der Wärmepumpe in Abhängigkeit von der Abwasser- und Warmwasser-eintrittstemperatur ermittelt [2]. Die Einsatzgrenzen des Verdichters werden durch eine minimale Abwasser- sowie maximale Warmwasseraustrittstemperatur vorgegeben. Weitere Parameter der Wärmerückgewinnungsanlage sind das nutzbare Volumen des Abwasserspeichers, das minimale Abwasservolumen zur Einschaltung des Gerätes und die Kenngrößen der Regelungseinrichtung.

Die Heizleistungsabgabe- und elektrische Leistungsaufnahmecharakteristik der Verdichterstufen der Sole/Wasser-Wärmepumpe konnte aus Meßwerten durch zweifach lineare Regression in Abhängigkeit von der Soleeintrittstemperatur und der Heizwasservorlauftemperatur ermittelt werden [2]. Bei dem Wärmestrom, der von dem Absorber auf die Sole übertragen wird, werden der Wärmegewin aus Konvektion, Kondensation und Globalstrahlung einzeln berechnet. Die sich einstellende Soletemperatur wird bei Kondensatbildung auf dem Absorber iterativ, andernfalls explizit berechnet.

Bild 4 zeigt einen Vergleich des Verlaufs von gemessenen und berechneten Stundenwerten der Wärmeabgabe des Wärmerückgewinnungsgerätes über den Zeitraum einer Woche. Einschaltzeitpunkte, Einschalthäufigkeit und Laufdauer des Gerätes stimmen an allen Wochentagen sehr gut überein. Bei einem kontinuierlichen Gerätebetrieb über einen längeren Zeitraum wird bei der Simulation eine konstante Wärmeabgabe berechnet, während die Messung einen schwankenden Verlauf aufweist. Diese unterschiedlichen Verläufe sind u. a. auf die schwankende Abwassertemperatur und auf den selbsttätig, alle etwa 100 Minuten einsetzenden Reinigungsvorgang der Wärmeübertragungsflächen zurückzuführen. Die berechneten und gemessenen Tageswerte der Wärmeabgabe weichen – mit Ausnahme am Samstag infolge einer Betriebsunterbrechung – um höchstens 8 % voneinander ab. Diese Abweichungen sind im wesentlichen darauf zurückzuführen, daß der Zeitpunkt der manuellen Umschaltung des WRG-Gerätes bei der Simulation auf den Beginn des Ruhebetriebs festgesetzt ist, während er in der Praxis bis zu einer Stunde davor oder danach festgestellt wurde.

Bild 5 zeigt im oberen Koordinatensystem den zeitlichen Verlauf der Gesamtwärmeentnahme, der sich aus der Addition aller gemessenen Warmwasser- und Heizwärmeverbraucher ergibt. Dieser Verlauf ist der Simulations-

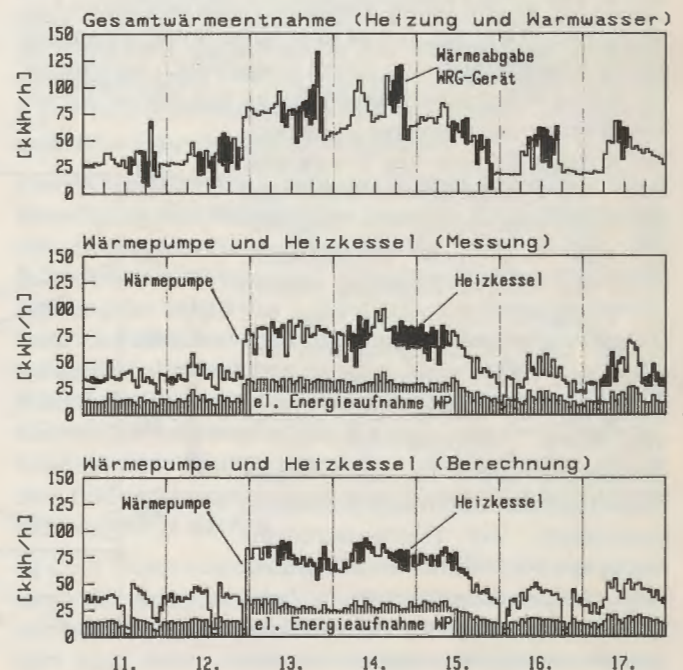


Bild 5. Vergleich der berechneten Wärmeabgabe von Wärmepumpe und Heizkessel mit gemessenen Werten (11. 11. bis 17. 11. 1985).

rechnung als Randwert aufgeteilt auf das Warmwasser- und Heizsystem zugrunde gelegt. Weiterhin ist in diesem Koordinatensystem die gemessene Wärmeabgabe des WRG-Gerätes eingetragen, deren Verlauf sehr gut mit der berechneten Wärmeabgabe übereinstimmt. Der verbleibende Bereich kennzeichnet denjenigen Wärmebedarf, der von der Wärmepumpe und dem Heizkessel zu decken ist. Der Verlauf weist die Besonderheit auf, daß die Wärmeentnahme am Abend des 12. 11. durch den erhöhten Wärmeverbrauch des Beckenwasserkreislaufs anstieg, als der Sollwert der Beckenwassertemperatur von 28 °C auf 30 °C für den Warmbadetag am 14. 11. angehoben wurde.

In der Tendenz konnten die gemessenen Verläufe der Wärmeabgabe und elektrischen Energieaufnahme der Wärmepumpe sowie die Wärmeabgabe des Heizkessels mit dem Modell gut nachgebildet werden. Die Tageswerte für die Wärmepumpe weichen im Mittel um 6% und höchstens um 12% voneinander ab. Bei den Wochenwerten liegen die Abweichungen unter 4%.

Bemerkenswert ist die Feststellung, daß bei einem Simulationslauf, dem als Randwerte die an den Steuerungs- und Regelungseinrichtungen abgelesenen Werte zugrunde liegen, kein zufriedenstellendes Ergebnis erzielt wird. An Tagen mit einer hohen gemessenen Wärmeabgabe des Heizkessels wird zwar in denselben Stunden eine Wärmeabgabe des Heizkessels berechnet, jedoch liegen die berechneten Stunden- und Tageswerte sowie der Wochenwert unter 20% der gemessenen Werte. Gleichzeitig wird die Wärmeabgabe der Wärmepumpe um den Differenz-

betrag zu hoch berechnet. Das Berechnungsergebnis stimmt mit dem Meßergebnis besser überein, wenn die Kennlinien der Steuerungs- und Regelungseinrichtungen der Wärmepumpe und des Heizkessels nur geringfügig – um etwa 2 K – verändert werden. Diese Abweichungen sind auf Ungenauigkeiten der Einstellskalen, der Meßfühler, der Meßwertumwandlung und aufgrund des Einbauortes zurückzuführen. Auch bei den meßtechnischen Untersuchungen wurde festgestellt, daß nur geringfügige Veränderungen an den Kennlinien der Steuerungs- und Regelungseinrichtungen zu bedeutenden Verschiebungen bei der Aufteilung der Wärmeabgabe von mehreren Wasssererwärmern in einem System in der beschriebenen Weise führten.

Insgesamt kann die Übereinstimmung zwischen Messungen und Berechnungen als gut bezeichnet werden, zumal es sich hier um Betriebsmessungen und nicht um Labormessungen handelt.

Literatur

- [1] *Weber, H., M. Brack und J. M. Suter*: Energetische Optimierung eines Warmwasserspeichers in Theorie und Praxis: Wärmeverluste, Schichtung und Auswirkung der Zirkulation. Eidg. Institut für Reaktorforschung. Beitrag zum 2. Statusseminar „Wärmeschutzforschung im Hochbau“, 19. und 20. Oktober 1982. ETH-Zürich.
- [2] *Biasin, K. und K. Leisen*: Kleinschwimmhalle Schwalmtal. Ergebnisse meßtechnischer Untersuchungen zur rationellen Energieverwendung. Abschlußbericht. Forschungsstelle für Energiewirtschaft, München, April 1986.

veröffentlicht in der gi:

Leisen K., Simulation des energetischen Betriebsverhaltens von
L. Rouvel Wassererwärmungssystemen in Hallenbädern
Gesundheits-Ingenieur – Haustechnik – Bauphysik – Umwelttechnik 109
(1988) Heft 5 **gi**, S.227/231

PROF. DR.-ING. HABIL. LOTHAR ROUVEL
FACHGEBIET ENERGIETECHNIK UND -VERSORGUNG · THERMISCHE GEBÄUDESIMULATION

SÄULINGSTRASSE 4
80686 MÜNCHEN

TEL.: 089-576804 FAX: 089-5706641
ROUVEL@GEBSIMU.DE WWW.GEBSIMU.DE

