

Realistische Trinkwarmwasser-Profile für bis zu 100 Wohneinheiten

Ulrike Jordan, Klaus Vajen

Universität Marburg, FB Physik, 35032 Marburg

Tel.: 06421/282 4131, Fax: /282 6535, solar@physik.uni-marburg.de

1. Einleitung

Speichertests, Jahressimulationen und Optimierungsrechnungen von Solarspeichern wurden bisher in der Regel mit recht einfachen Trinkwasser-Verbrauchsprofilen durchgeführt. So wird z. B. für die EN 12977 die Berücksichtigung dreier täglicher Zapfungen mit jeweils konstantem Volumenstrom diskutiert. Diese stark vereinfachten Zapfprofile sind jedoch für Auslegungsrechnungen von Speichern und Wärmeübertragern ungeeignet und lassen sich nicht (durch Superposition) zur Simulation von Warmwasser-Bereitungsanlagen in Mehrfamilienhäusern hochskalieren. Einerseits besteht das Ziel, eine möglichst realistische Verbrauchsverteilung zu berücksichtigen, um verschiedene, auf das dynamische Verhalten einer Entnahme sensitive, Speicher vergleichen zu können. Andererseits muss aber auch dem Bedarf nach kurzen Rechenzeiten Rechnung getragen werden. Aus diesen Gründen wurden mit statistischen Mitteln Verbrauchsprofile auf zwei unterschiedlichen Zeitskalen generiert. Die Profile bestehen aus Datensätzen, in denen jeweils jedem Zeitschritt im Jahr (jedem Ein-Minuten- oder Sechs-Minuten Intervall) ein Wert für den Trinkwarmwasser-Volumenstrom zugeordnet wird. Die Datensätze werden im Rahmen des *IEA-Task26 (Solar Combisystems)* erstellt /IEA00, Jor00/ und zum internationalen Vergleich solarer Kombianlagen eingesetzt. Eine Verwendung im *IEA-Task 28 (Solar Sustainable Housing)* ist ebenfalls vorgesehen.

Als Beispiel sind in Bild 1a und 1b Ausschnitte der Verbrauchsprofile für ein Einfamilienhaus dargestellt. Bilder 2a und 2b zeigen die täglichen Entnahmeholumina im Jahresverlauf.

2. Annahmen zur Erstellung eines realistischen Zapfprofils

a.) Volumenströme und Zapfdauer

Zeitschritt: 1 Minute

Die gewählten Volumenströme und Zapfdauern der Ein-Minuten Profile orientieren sich an Ergebnissen sehr unterschiedlich angelegter Studien (von Telefonumfragen über einfache Temperaturmessverfahren bis hin zu Leistungsmessungen an elektrischen Durchlauferhitzern) /Dic99, Dit72, Loo91, Mac98, Nip99, Rea99/.

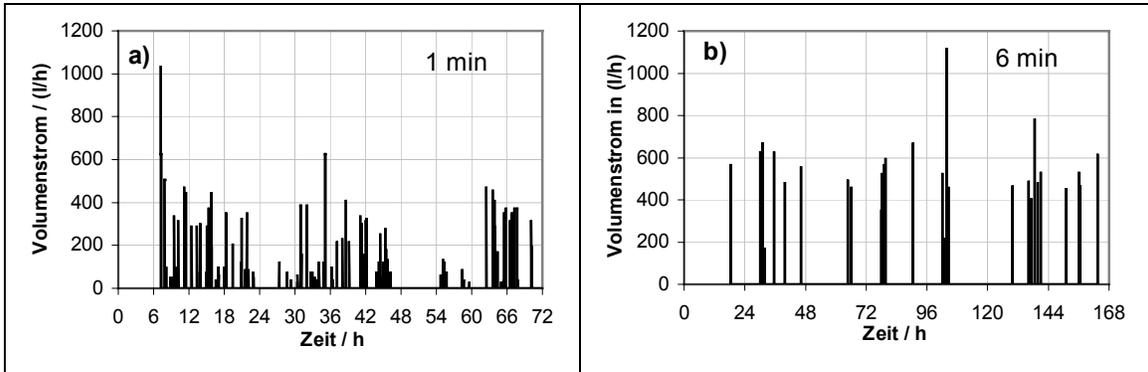


Bild 1: Auf statistischer Basis generierte Zapfprofile für Einfamilienhäuser. Mittlerer Verbrauch: 200 l/d.

a) Zeitintervall von 1 min, Ausschnitt des Profils für den 1. bis 3. Januar.

b) Zeitintervall von 6 min, Ausschnitt des Profils für den 1. bis 7. Januar.

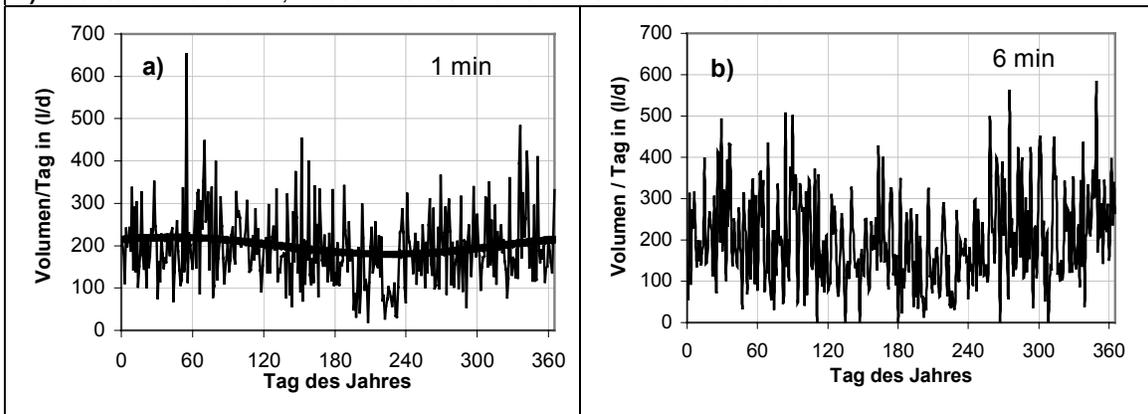


Bild 2: Täglicher Warmwasser-Verbrauch, berücksichtigt mit realistischem Zapfprofil. Durchschnittlicher Tagesverbrauch: 200 l/d. a) Zeitintervall: 1 min, b) Zeitintervall: 6 min.

Angelehnt an diese Ergebnisse wurden die auftretenden Zapfereignisse in vier Kategorien gegliedert, denen jeweils eine Zapfdauer Δt und ein mittlerer Volumenstrom \dot{V}_m zugeordnet ist.

- | | |
|--|-------------|
| (A) kurze Entnahmemengen (z. B. Händewaschen) | (C) Baden |
| (B) mittlere Entnahmemengen (z. B. Geschirrspülen) | (D) Duschen |

Die tatsächlich berücksichtigten Volumenströme sind um die Werte von \dot{V}_m normalverteilt:

$$prob(\dot{V}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp \frac{-(\dot{V} - \dot{V}_m)^2}{2\sigma^2}$$

Die Gaußverteilung wurde in 0.2 l/min -Volumenstrom-Intervalle diskretisiert (Bild 3a). In Tabelle 1 sind die angenommenen Randbedingungen für den mittleren Volumenstrom, die Zapfdauer, die mittlere Anzahl der Zapfungen am Tag, sowie die Standardabweichung der Gaußverteilungen der vier Kategorien für einen mittleren täglichen Warmwasserbedarf von 200 l zusammengestellt.

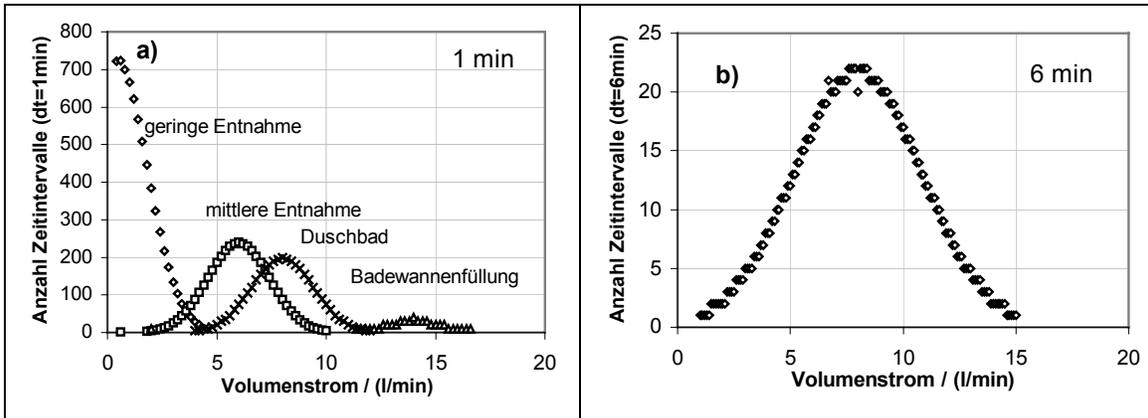


Bild 3: Die Anzahl der jährlichen Entnahme-Zeitintervalle ist in Abhängigkeit von den verwendeten Volumenströmen am Beispiel eines Haushalts mit einem mittleren Verbrauch von 200 l/d aufgetragen. (Z. B. wurden beim Ein-Minuten-Profil 140 Zeitintervalle pro Jahr für Duscbäder mit einem Volumenstrom von 6.8 l/min berücksichtigt. Das entspricht 28 Duschkategorien einer Dauer von jeweils 5 min mit $\dot{V} = 6.8 \text{ l/min}$). Es liegen näherungsweise Gaußverteilungen vor. Abweichungen von den Gaußverteilungen haben ihre Ursache in der Diskretisierung der Volumenströme bei vorgegebenem Jahresgesamtvolumen. **a)** Zeitintervall: 1 min, **b)** Zeitintervall: 6 min.

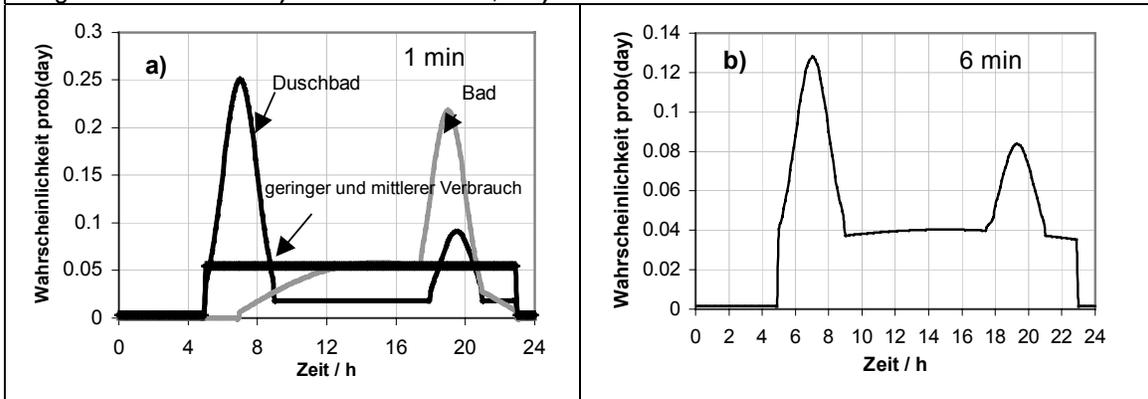


Bild 4: Wahrscheinlichkeitsverteilung im Tagesverlauf. **a)** Ein-Minuten Profil: Verteilungen für die vier Kategorien, **b)** Sechs-Minuten Profil (eine Kategorie).

	A: kurze Entn.	B: mittlere Entn.	Kat. C: Bad	Kat. D: Duscbad	Summe	6-min Profil
mittl. Vol.-strom \dot{V}_m in l/min	1	6	14	8		8
Dauer in min	1	1	10	5		6
Häufigkeit / Tag	28	12	1/7	2		4.17
sigma	2	2	2	2		4
mittl. Vol. / Entnahme in l	1	6	140	40		48
mittl. Vol./ Tag in l	28	72	20	80	200	200
Diskretisierung in l/min	0.2	0.2	0.2	0.2		0.1
Anteil am Gesamtverbrauch in %	14	36	10	40	100	100

Tabelle 1: Randbedingungen zur Generierung eines realistischeren Verbrauchsprofils

Zeitschritt: 6 Minuten

Für Simulationsrechnungen mit einer größeren Zeitschrittweite als einer Minute wurden Zapfprofile mit einer fest definierten Zapfdauer von sechs Minuten generiert. Die Volumenströme sind um den Wert $\dot{V}_m = 8 \ell / \text{min}$ normalverteilt (Bild 3b, Tabelle 1). Im Vergleich zu dem bisher beschriebenen Profil liegen den Sechs-Minuten-Profilen also vereinfachende Annahmen zugrunde.

b.) Wahrscheinlichkeitsverteilungen im Jahresverlauf

Die Wahrscheinlichkeitsverteilungen für die Warmwasser-Entnahmen jeder Kategorie im Jahresverlauf wird durch das Produkt der Wahrscheinlichkeitsfunktionen im Jahresverlauf, an unterschiedlichen Wochentagen, im Tagesverlauf und einer Funktion zur Berücksichtigung eines längerfristig verringerten Warmwasserverbrauchs (z.B. verursacht durch Urlaub) beschrieben:

$$\mathit{prob}_x(t) = \mathit{prob}_x(\mathit{season}) * \mathit{prob}_x(\mathit{weekday}) * \mathit{prob}_x(\mathit{day}) * \mathit{prob}_x(\mathit{holiday})$$

mit x: Kategorie A, B, C, D

$\mathit{prob}_x(\mathit{season})$: Die Verteilung des Warmwasserbedarfs im Jahresverlauf orientiert sich an Ergebnissen von /Mac98/. Messungen in Mehrfamilienhäusern zeigen für die jahreszeitliche Verteilung des Energiegehalts des Warmwasserverbrauchs näherungsweise einen Sinusverlauf mit einem Maximum im Februar/März und einer Amplitude von 25 %. Diese jahreszeitlichen Schwankungen seien hauptsächlich auf den Jahresverlauf der Kaltwassertemperatur und auf Urlaubsperioden in den Sommermonaten zurückzuführen. Für die Verbrauchsschwankungen, die nicht auf diese beiden Phänomene zurückzuführen sind, wurde für $\mathit{prob}_x(\mathit{season})$ eine Sinusfunktion mit einer Amplitude von 10 % des mittleren täglichen Verbrauchsvolumens zugrundegelegt.

$\mathit{prob}_x(\mathit{weekday})$: Für die Ein-Minuten-Profile wurde nach den u.a. aus /Dic99/ und /Mac98/ abgeleiteten Ergebnissen nur für die Kategorie C (Baden) eine Abhängigkeit des Warmwasserverbrauchs vom Wochentag angenommen ($\mathit{prob}_C(\text{Mo-Do}) = 0.5$, $\mathit{prob}_C(\text{Fr}) = 0.8$, $\mathit{prob}_C(\text{Sa}) = 2.0$, $\mathit{prob}_C(\text{So}) = 2.2$), während für alle übrigen Kategorien $\mathit{prob}_x(\mathit{weekday})$ den Wert 1 annimmt. In den Sechs-Minuten Profilen wurde nach /Mac98/ die folgende Verteilung zugrundegelegt: $\mathit{prob}(\text{Mo-Do}) = 0.9$, $\mathit{prob}(\text{Fr}) = 1.0$, $\mathit{prob}(\text{Sa,So}) = 1.2$.

$\mathit{prob}_x(\mathit{day})$: Die Wahrscheinlichkeitsverteilungen von Warmwasserentnahmen im Tagesverlauf sind in den Bildern 4a und 4b dargestellt. Für die Ein-Minuten Profile wurden kleine und mittlere Verbräuche gleichmäßig über den Tag verteilt, für die Kategorie Duschen wurden morgen- und abendliche Verbrauchsspitzen und für die Kategorie Baden eine ausgeprägte abendliche Verbrauchsspitze angenommen.

Die Wahrscheinlichkeitsverteilung im Tagesverlauf der Sechs-Minuten Profile leitet sich direkt aus den Verteilungen der vier Kategorien der Ein-Minuten Profile ab, indem diese Wahrscheinlichkeitsverteilungen mit den Entnahmeverhältnissen der Kategorien gewichtet und dann addiert wurden. So entsteht die in Bild 4b dargestellte Wahrscheinlichkeitsverteilung.

$prob_x(\text{holiday})$: Urlaubsperioden wurden berücksichtigt, indem die Entnahmewahrscheinlichkeit $prob_x(\text{holiday})$ für jeweils 100 ℓ/d für Perioden von 14 Tagen mit statistisch ausgewähltem Beginn zwischen dem 1. Juni und 17. September auf Null gesetzt wird.

Methode: Kumulierte Häufigkeiten

Zunächst wurde die Anzahl der Zapfungen aller durch die Gaußverteilung vorgegebenen Volumenströme gemäß Tabelle 1 ermittelt. Jeder Zapfung wurde dann eine statistisch generierte Zahl zugeordnet, die jeweils in einem Ordinaten-Intervall der nach der Methode der kumulierten Häufigkeiten ermittelten und normierten Funktion $prob_x(t)$ liegt. Der Abszissenwert des Funktionswertes ist der Zeitschritt, dem das Zapfereignis zugeordnet wird. Auf diese Weise wurden die einzelnen Zapfereignisse entsprechend der Wahrscheinlichkeitsfunktionen $prob_x(t)$ über das Jahr verteilt. Für die Ein-Minuten Profile ergeben sich die Gesamtprofile aus Superposition der Verteilungen der vier Kategorien.

3. Zapfprofile für Mehrfamilienhäuser

Mit der oben beschriebenen Methode wurden Zapfprofile für tägliche mittlere Entnahmemengen von 100, 200, 400, 800, .. 3200 ℓ/d (Ein-Minuten Profil) und von 100, 200,..6400 ℓ/d (Sechs-Minuten Profil) generiert¹. Dabei wurde jeweils der statistische

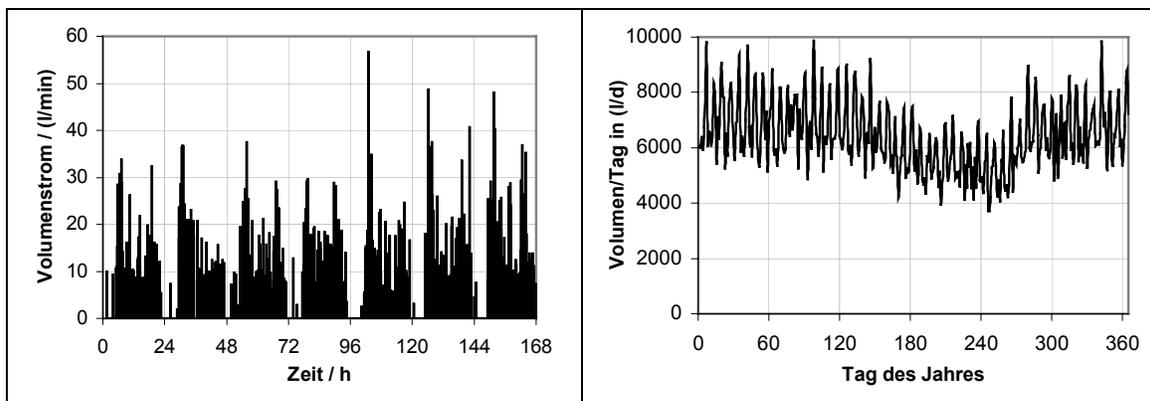


Bild 5: Auf statistischer Basis generiertes Zapfprofil mit einem Entnahmeintervall von 6 min für ein Mehrfamilienhaus (ca. 60 Wohneinheiten) mit einem mittleren Tagesverbrauch von 6400 l. **a)** Ausschnitt des Profils: 1. bis 7. Januar. **b)** Täglicher Warmwasser-Verbrauch. Die Periodizität resultiert aus einem erhöhten Wochenendverbrauch ($prob(\text{weekday})$).

¹ Die beschriebenen Profile können bei den Autoren angefordert werden.

Generator unterschiedlich initialisiert, so dass durch Superposition neue Profile mit beliebigen mittleren täglichen Entnahmemengen im Abstand von 100 ℓ (mit maximal 6300 ℓ/d für $\Delta t = 1$ min und maximal 12700 ℓ/d für $\Delta t = 6$ min) erstellt werden können. In Bild 5a ist beispielhaft ein Ausschnitt des Sechs-Minuten Zapfprofils mit einem mittleren täglichen Entnahmevolumen von 6400 Litern (entspricht dem Warmwasserbedarf von ca. 60 Wohneinheiten) dargestellt. Bild 5b zeigt den dazugehörigen täglichen Verbrauch im Jahresverlauf.

Literatur

- /Dic99/ :Dichter E. (1999). Dusch- und Badeverhalten. *Bericht zu einer Repräsentativumfrage*, Eidgenössische Drucksachen- und Materialzentrale, Bern.
- /Dit72/ :Dittrich A., Linneberger B., Wegener W. (1972). Theorien zur Bedarfsermittlung und Verfahren zur Leistungskennzeichnung von Brauchwasser-Erwärmern. *HLH 23*, Nr. 2.
- /Loo91/ :Loose P. (1991). Der Tagesgang des Trink-Warmwasser-Bedarfes, *HLH 42*, Nr. 2.
- /IEA00/ :IEA SHC-Task 26: *Solar Combisystems*. Reference Conditions for Solar Combisystems. In: *Minutes of the 4. Experts Meeting*, Borlänge, Sweden (2000).
- /Jor00/ :Jordan U., Vajen K. (2000) Influence of the DHW Load on the Fractional Energy Savings: A Case Study of a Solar Combisystem with TRNSYS-Simulations, *EuroSun '00*, 19.-22.6.2000, Copenhagen, in print.
- /Mac98/ :Mack M., Schwenk C., Köhler S. (1998). Kollektoranlagen im Geschößwohnungsbau – eine Zwischenbilanz. In *Proceedings of 11. Internationales Sonnenforum*, (Eds), pp. 45-52, Köln, Germany.
- /Nip99/ :Nipkow J. (1999). *Warmwasser-Zapfungsverhalten. Schlussbericht*. Industrielle Betriebe der Stadt Zürich, Zürich.
- /Rea99/ :Real M., Nipkow J., Tanner L., Stadelmann B., Dinkel F. (1999). *Simulation Warmwassersysteme. Schlussbericht Forschungsprogr. Wasser*, Eidgenössische Drucksachen- und Materialzentrale, Bern.

Realistic DHW-Load Profiles for up to 100 Households

Load profiles for the domestic hot water demand for a period of one year were generated on a one minute and six minute time scale. The values of flow rates and the time of occurrence of every draw were selected by statistical means.

For the profiles on a one-minute time scale four categories of loads (short, medium, bath, and shower loads) were defined. The values of the flow rates were spread around the mean value with Gauss-Distribution. Further, probability functions, describing variations of the load profile during the year, the weekday, the day, and holiday periods were defined for every category. The cumulated frequency method was used, to distribute the draws according to the probability functions among the year.

The basic load is 100 liters/day. Profiles were generated for higher demands in dual order (100, 200, 400, 800 ℓ/d ..) with different initial random values. In this way, it is possible to produce load profiles for multi-family houses up to 12700 ℓ/d by superposition.