

Mathematisches Modell Trinkwasserbedarf

Wasserversorgung, Tagesbedarf, Ganglinien, Wasserzähler, mathematische Simulation, Haustechnik, DIN 1988, W 406, W 410

Georg Hofmann

Das mathematische Modell ist Bestandteil eines Visual Basic Computer-Programms. Es geht davon aus, dass die Gesamtheit eines Trinkwasser-Tagesbedarfs sich stets aus einer Vielzahl von Einzelentnahmen zusammensetzt und durch Simulationen unter Berücksichtigung von gewichteten Wahrscheinlichkeiten bestimmt werden kann. Alle rechnerischen auf der Basis von Messdaten zufällig ermittelten Wasserentnahmen werden so lange aufsummiert bis der vorgegebene Wasserbedarf als Zielgröße erreicht ist. Durch eine anschließende Transformation und Zusammenstellung wird eine Datei gebildet, die in ihrer Struktur identisch mit einer Messdatenerfassung bei Verwendung eines Datenloggers ist. Zur abschließenden Ermittlung der gesuchten Daten wie Ganglinien, Spitzendurchflüsse, Häufigkeitsverteilungen, Stillstände, Mittelpunkte der Haupteinsatzbereiche und Druckverluste in Wasserzählern werden dieselben Analysen im Computer-Programm verwendet, wie sie bereits zur Auswertung von Messdaten existieren. Zahlreiche Anwendungen anhand von Beispielrechnungen und Darstellungen in Grafiken belegen die Funktionalität des Modells. Vergleiche der erhaltenen Ergebnisse und Grafiken mit früher ermittelten Messdaten weisen bemerkenswerte Ähnlichkeiten und Übereinstimmungen auf. Zur Verfeinerung der Ergebnisse sind statistische Ermittlungen von Verbraucherverhalten von Einzelpersonen im Rahmen der zu erwartenden Streubreite eine vordringliche Aufgabe zukünftiger Messprogramme.

1. Einleitung

Messungen von Trinkwasser-Volumenströmen bilden die Basis anerkannter Regeln der Technik zur Berechnung und Bemessung von Installationen und Wasserzählern. Zuletzt wurden umfangreiche Messungen vor über 30 Jahren durchgeführt [1, 2]. Die Ergebnisse dieses Messprogramms bilden noch immer die Grundlage für die Ermittlung der Rohrdurchmesser von Trinkwasser-Installationen [3]. Der Abschlussbericht des Messprogramms enthält bereits eine Dimensionierungsricht-

Mathematical Model Water-Consumption

The presented mathematical model is the main element of computer software written in visual basic. It is based on the fact that the daily water consumption in a building is the total of a large number of single user consumptions and can be estimated. Following this fact and based on measuring findings, estimated single water consumption is summarized and collected in a data file until the input daily water consumption is reached. The data is transformed and assembled in a data file with the same format as utilized by a data logger. By analyzing the assembled data file, all existing and already known procedures included in the software can be used to identify the peak water flow rates, frequency distributions, simultaneous opening of water taps and pressure drop in water meters. Numerous samples and presented charts demonstrate the usability of the mathematic model. The results compared with earlier findings indicate the measurements are almost the same. The accuracy can be even better if or when improved by utilizing more statistical details of single consumer behaviors in future investigations.

linie [1, Abschnitt 7.1,4] für Wasserzähler, die vom DVGW im Jahre 1981 veröffentlicht wurde [4] und Eingang in das aktuelle DVGW-Arbeitsblatt W 406 [5] gefunden hat. Im Vergleich zum damaligen Messprogramm ist allerdings der statistisch relevante Pro-Kopf-Verbrauch inzwischen von 155 auf derzeit 120 Liter pro Tag zurückgegangen. Aktuelle Messungen, die diesen Sachverhalt berücksichtigen [6], sind regional begrenzt und finden bisher nicht die notwendige widerspruchslöse Zustimmung aller Fachleute.

Allen Messungen haftet der Nachteil an, dass sie nur für einen zeitlich begrenzten Momentanzustand das Verbraucherverhalten der Bewohner von bestimmten Gebäuden erfassen können. Beispielsweise wurden beim Messprogramm [1,2] Komfortwohnungen in bevorzugter Wohnlage ausgesucht. Streng genommen gelten die Auswertungen der damaligen Messungen nur für diesen Gebäudetyp.

Hinreichend repräsentative Messungen einschließlich deren Auswertung und Interpretation sind immer aufwendig, zeit- und kostenintensiv. Die Anpassungen an reale Anwendungen in ihrer Vielfalt sind schwierig. Das derzeit gültige Regelwerk lässt beispielsweise die Fragen offen, welche Spitzenvolumenströme die wirklichen strömungstechnischen Vorgänge in Wohngebäuden derzeit am besten beschreiben, wie diese vorzugsweise anzuwenden wären und insbesondere wie die durch Strömungswiderstände der Wasserzähler verursachten Druckverluste ermittelt werden sollen. Die nach DIN 1988-300 [3] berechneten hypothetischen anlagenspezifischen Spitzendurchflüsse entsprechen fast nie den wirklichen verbrauchsspezifischen Durchflüssen, weil sie Sicherheitszuschläge enthalten müssen. Sie sind daher nur für die Dimensionierung von Rohrleitungen geeignet und verwendbar. Beim Berechnen von Spitzendurchflüssen aus Summendurchflüssen werden, wie allgemein bekannt, hypothetische Gleichzeitigkeiten angenommen. Dabei bleibt unberücksichtigt, dass einzelne Zapfstellen viel häufiger oder seltener von Verbrauchern genutzt werden als andere. Beispielsweise werden Waschmaschinen und Geschirrspüler in der Regel nur in Abständen von Tagen verwendet.

Aus diesen Sachverhalten ergab sich die Aufgabenstellung, ein computergestütztes Berechnungsmodell zu entwickeln, das in Verbindung mit aktuellen Messdaten bestehende Lücken zumindest verringern kann. Bisher sind Modelle bekannt [7], die sich unter bestimmten Voraussetzungen und Annahmen an der Ausstattung eines Objektes, d. h. der Anzahl und Art der Zapfstellen und der Personenzahl orientieren. Die Ergebnisse werden in Form mathematischer Formeln angegeben. Es ist bisher nicht bekannt, ob derartige Modelle vereinzelt angewendet werden.

Eine andere und in diesem Beitrag bevorzugte Methode geht von der Zielvorstellung aus, dass durch Modellrechnung die Simulation aller einzelnen Entnahmevorgänge zu realisieren ist, so dass damit ein kompletter Messvorgang simuliert werden kann. Das Ergebnis ist eine Datentabelle, die strukturell einer Messdatenerfassung in vollem Umfang entspricht und daher eine identische Auswertung ermöglicht. Auf diese Weise sind Ergebnisse von Simulationen auch rechnerisch zugänglich und mit Messergebnissen vergleichbar. Ein derartiges mathematisches Strömungsmodell wird beschrieben und dessen Anwendung in Beispielrechnungen gezeigt.

2. Anforderungen an ein mathematisches Modell

Von einem brauchbaren Berechnungsmodell werden Ergebnisse erwartet, die zumindest näherungsweise denen von Messungen entsprechen. Darunter versteht man Ganglinien, Spitzendurchflüsse, Häufigkeitsverteilungen, Stillstände und Mittelpunkte der Haupteinsatzbereiche. Zugleich müssen Dateneingaben überschaubar und realitätsnah sein.

Das Hauptaugenmerk ist auf eine verbrauchsspezifische Dateneingabe zu richten, die von ausschlaggebender Bedeutung ist. Es ist allgemein bekannt und wird in Lehrbüchern vermittelt, dass Verbrauchswerte und Spitzendurchflüsse signifikant von der Anzahl der Einwohner in einem Gebäude abhängig sind [8, Abschnitt 2.2, Seite 49]. Diese Aussage wird im später erschienenen DVGW-Arbeitsblatt W 410 [9, Abschnitt 6.2.1] bekräftigt.

In der praktischen Anwendung ist die sich laufend ändernde Anzahl von Bewohnern in großen Wohngebäuden nicht zuverlässig zu ermitteln. Insbesondere kann man fast nie davon ausgehen, dass alle Bewohner ständig anwesend sind. Zeitweilige Abwesenheiten (z. B. Urlaub) und gelegentliche Aufenthalte von Besuchern sind nicht auszuschließen. Auch das Verbraucherverhalten von Einzelpersonen variiert in der Regel von Tag zu Tag. Im Regelwerk [5] ist man dazu übergegangen, Wohnungseinheiten (WE) als Basisgrößen zu definieren. Auch das wird mitunter wegen unterschiedlicher Ausstattung und Belegung von Wohnungen kritisch bewertet. Derartige Eingangsgrößen werden im hier vorgestellten Modell nicht verwendet, stattdessen wird der erwartete Tages-Wasserbedarf als Zielgröße eingesetzt.

Der Wasserbedarf als globale Bemessungsgröße ist bekanntlich als Quotient aus einem Wasservolumen und einer Zeitspanne definiert. Dabei ist die Länge der Zeitspanne von größter Bedeutung [8, Abschnitt 2.2, Seite 45]. Das hier beschriebene Strömungsmodell geht bei den Simulationen immer vom Tagesbedarf eines Objektes als Zielgröße aus, wobei vorzugsweise der Spitzentagesbedarf Q_{dmax} [9, Abschnitt 3] verstanden werden soll. Dieser lässt sich aus dem Jahresverbrauch abschätzen, wenn zum Durchschnittswert ein Zuschlag gemacht wird. Eine Langzeitmessung von 200 Tagen [6, Messung-Nr. 0341.04] ergab eine maximale Schwankungsbreite des Tagesverbrauchs von $\pm 20\%$. In der Planungsphase von Wohngebäuden kann anhand der Wohnungsgröße und der möglichen Maximalbelegung unter Verwendung eines bekannten Pro-Kopf-Verbrauchs ein Spitzentagesbedarf geschätzt werden. Bei Hotels ist Vollbelegung zu berücksichtigen. Bei Verwaltungsgebäuden entfallen bei der Berechnung der Durchschnittswerte die Wochenenden und Feiertage. Ein relevanter Spitzentagesbedarf kann daher immer näherungsweise ermittelt werden. In diesem Beitrag

wird zur Vereinheitlichung stets die Bezeichnung Tagesbedarf angewendet. Das Verbraucherverhalten wird durch unterschiedliche Belastungsprofile berücksichtigt, die aus Vorgaben von Messungen erstellt, für mehrere Berechnungen genutzt und im folgenden Abschnitt beschrieben werden.

3. Aufbau des mathematischen Modells

Das Modell, das den beschriebenen Anforderungen genügt und hier vorgestellt wird, ist Hauptbestandteil des in der Programmiersprache Visual-BASIC verfassten Computer-Programms. Es geht davon aus, dass der Tagesbedarf eines Objektes die Summe aller Einzelentnahmen der Bewohner, verteilt über den gesamten Tag an beliebigen Stellen im Objekt ist, unter Beachtung von gewichteten Wahrscheinlichkeiten. Die Vielzahl der zufälligen Einzelentnahmen wird erfasst, registriert, aufsummiert und damit eine komplette Durchflussmessung in der Gebäudeanschlussleitung simuliert. Dabei wird für jeden einzelnen Öffnungsvorgang einer Entnahmestelle bzw. das Einschalten eines Gerätes (Waschmaschine, Geschirrspüler) die Uhrzeit als ein aufgrund von Wahrscheinlichkeiten geprägtes Zufallsereignis bestimmt. Diesem Ereignis wird ein ebenfalls zufälliges Entnahmevermögen aus einer vorgegebenen Bandbreite von Volumina berechnet und zugeordnet. Schließlich wird für jedes festgestellte Entnahmevermögen aus der Vielfalt des bekannten Streubereichs ein geeigneter Durchfluss ermittelt. Dieser Durchfluss bestimmt unter Berücksichtigung des Volumens den Schließzeitpunkt der betreffenden Zapfstelle als Ereignis. Die auf diese Weise ermittelten Daten jedes Ereignisses werden

gemeinsam als ein Datensatz für jeden einzelnen Entnahmevergänger registriert. Die Bewohner werden somit in ihrer Gesamtheit als virtuelle Verbraucher aufgefasst, ohne dass deren Anzahl und die Ausstattung, d.h. Anzahl und Art der Zapfstellen des Objektes zu beschreiben sind. Damit sind zugleich alle großen mitunter täglich wechselnden Unterschiede im komplexen Verbraucherverhalten von Einzelpersonen berücksichtigt. Nachdem die aufsummierten Volumina rechnerisch den Zielwert, nämlich den vorgegebenen Tagesbedarf, erreicht haben, werden die Datensätze bearbeitet, gleichzeitige Entnahmen überlagert, transformiert und zusammengestellt. Das Ergebnis ist eine aus vielen Datensätzen bestehende Datentabelle, die in Aufbau und Struktur mit einer entsprechenden Messdatenerfassung identisch ist. Der Unterschied zwischen Mess- und Berechnungstabelle beruht auf der Berücksichtigung unterschiedlicher Ereignisse. Bei Messungen wird bei Ereignissteuerung von jedem Durchflussvolumen (meist 1 Liter als Messvolumen) ein Impuls ausgelöst und der Zeitpunkt auf einem Datenlogger gespeichert. Im Gegensatz dazu wird bei der Simulation jedes Öffnen und jedes Schließen einer beliebigen Zapfstelle als ein Ereignis mit zufällig bestimmten Uhrzeiten registriert.

Tabelle 1 zeigt Ausschnitte aus zwei unterschiedlichen Datentabellen von einer Messung und einer Simulation unter gleichen Voraussetzungen im direkten Vergleich. Der Unterschied wird in der hervorgehobenen Spalte „Volumen“ deutlich. Bei der Messung wird stets das durch die Impulswertigkeit des verwendeten Impulsgebers bestimmte Messvolumen, hier 1,00 Liter, aufgezeichnet. Die lfd. Nr. 1 bis 7 sind ein kleiner Ausschnitt aus einer früheren Messung [6, Messung-Nr. 0431.05]. Bei der Simulation, lfd. Nr. 11 bis 16, bestimmt ein rechnerisch gefundenes Ereignis eine Registrierung. Das Volumen ergibt sich daher als Folge der zufällig berechneten Daten und ist fast immer unterschiedlich.

Neben der Verwendung des Tagesbedarfs als Zielgröße der Berechnung ist das Verbraucherverhalten der Bewohner-Gesamtheit von entscheidender Bedeutung. Dieses wird anhand von zunächst zwei unterschiedlichen vorgegebenen Belastungsprofilen beschrieben, die für alle Berechnungen verwendet werden können. Jedes der vorab festzulegenden und auf Zufälligkeiten ausgerichteten Belastungsprofile der Ereignisdaten besteht aus Uhrzeiten, Volumendaten und Durchflussvorgaben. Näherungsweise werden für die in diesem Beitrag durchgeführten Beispielrechnungen zwei Belastungsprofile für kleine und für große Entnahmevermolumina bestimmt. Große zusammenhängende Entnahmevermolumina werden optional in den Nachtstunden durch entsprechende Programmprozeduren ausgeschlossen. Die verwendeten Wahrscheinlichkeiten sind vorliegenden Messergebnissen entnommen. Der detaillierte Aufbau von Belastungsprofilen nebst Zahlenwerten wird im Zusammenhang mit den im folgenden

Tabelle 1. Ausgewählte Datensätze aus Messungen (Zeilen 1 bis 7) und Simulationen (Zeilen 11 bis 16) im direkten Vergleich.

Lfd. Nr.	Datum	Zeit-Differenz	Volumen	Volumenstrom	
		[s]	[L]	[L/s]	[m ³ /h]
1	27.10.2010 11:58:34,04	1,76	1,00	0,57	2,05
2	27.10.2010 11:58:36,68	2,64	1,00	0,38	1,36
3	27.10.2010 11:58:38,64	1,96	1,00	0,51	1,84
4	27.10.2010 11:58:41,10	2,46	1,00	0,41	1,46
5	27.10.2010 11:58:43,80	2,70	1,00	0,37	1,33
6	27.10.2010 11:58:46,02	2,22	1,00	0,45	1,62
7	27.10.2010 11:58:47,94	1,92	1,00	0,52	1,88
...
11	20.09.2012 11:58:17,86	2,86	1,37	0,48	1,72
12	20.09.2012 11:58:20,00	2,14	0,85	0,40	1,42
13	20.09.2012 11:58:21,50	1,50	0,70	0,47	1,68
14	20.09.2012 11:58:25,00	3,50	1,25	0,36	1,29
15	20.09.2012 11:58:27,26	2,26	0,89	0,39	1,42
16	20.09.2012 11:58:30,00	2,74	0,92	0,34	1,21

Abschnitt beschriebenen Berechnungsbeispielen ausführlich erklärt.

Für die Simulationen ist es notwendig, einige Vereinfachungen festzulegen. Das Strömungsmedium Wasser wird als vollkommen inkompressibel aufgefasst. Das Installationssystem ist als Gesamtheit im Sinne der Technischen Mechanik starr (nicht dehnbar). Luftblasen im System sind ausgeschlossen und Druckschwankungen bleiben unberücksichtigt. Öffnung und Schließung von Armaturen werden als abrupte Vorgänge festgelegt, ohne Rückwirkungen auf Durchflüsse. Entnahmedurchflüsse sind rechnerisch für jedes Einzelereignis konstant. Das führt dazu, dass sich Entnahmevorgänge unverzögert in der Hausanschlussleitung und am Wasserzähler bemerkbar machen. Der Zustrom zu Waschmaschinen wird in erster Näherung als zusammenhängend aufgefasst. Tatsächlich auftretende Teilentnahmen ergeben tendenziell geringe Vergleichmäßigungen. Die getroffenen Festlegungen entsprechen weitgehend den realen Zuständen von Vorgängen in einer Hausinstallation.

4. Berechnungsbeispiele

Mit dem beschriebenen mathematischen Modell „Wasserbedarf“ werden mehrere Simulationen durchgeführt. Die verwendeten Zahlenwerte als Zielgrößen des Tagesbedarfs liegen zwischen 3 und 100 m³. Zwei unterschiedliche Belastungsprofile für kleine (0,05 bis 8 Liter) und für größere (8 bis 150 Liter) Entnahmeholumina bilden die Grundlage für alle vorgenommenen Simulationen. Kleine Entnahmen stützen sich auf Wahrscheinlichkeiten zur Ermittlung der Uhrzeiten von Ereignissen aus dem Verbraucherverhalten einer früheren Messung [10, Abb. 2, Fall A]. **Bild 1** enthält die daraus entnommenen Uhrzeiten, aufgetragen über dem aufsummierten prozentualen Verlauf mit Prozentwerten/100, also Zahlenwerten zwischen 0 und 1. In **Bild 1** ist die Vorgehensweise durch Pfeile veranschaulicht, wie die Bestimmung der Uhrzeiten der zufälligen Ereignisse nach algorithmisch bestimmten Zufallszahlen Z erfolgt. Die Zufälligkeiten der Zahlenwerte von Entnahme-Volumina orientieren sich an Wahrscheinlichkeiten aus Messdatenerfassungen mit Messvolumen von 0,1 Liter. In zwei

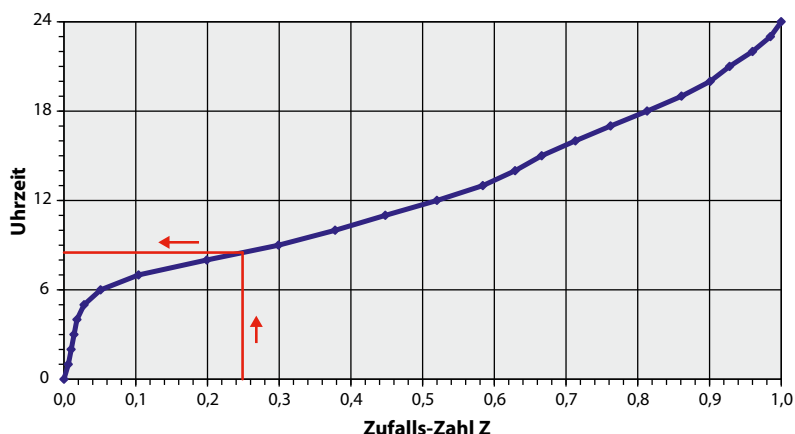


Bild 1. Aus einer früheren Messung entnommene Uhrzeiten und aus Wahrscheinlichkeiten ermittelte Zufallszahlen Z der zu erwarteten Ereignisse von Einzelentnahmen.

Einfamilienhäusern zeigen Ergebnisse, dass die weitaus meisten Entnahmeholumina kleiner als 1 Liter sind. Große Entnahmemengen ohne Unterbrechung sind äußerst selten feststellbar, obwohl diese insgesamt den größten Bedarfsanteil bestimmen. Die Messdatenanalyse veranschaulicht weiterhin, dass sich mit zunehmenden Entnahme-Volumina die Anzahl der Ereignisse reduziert und sich dem Nullwert nähert. Daher wurde für das Entnahmeprofil des Bereiches von 0,4 bis 1,5 L mit 70% die größte Wahrscheinlichkeit festgelegt. Die Zahlen sind zum Teil Näherungswerte, weil der erforderliche Datenumfang für genauere Vorgaben noch nicht ausreichend ist. Die Durchflüsse orientieren sich tendenziell an der Größe zuvor zufällig bestimmter Volumina. Sie decken den Bereich von 0,03 L/s für sehr kleine Entnahmen bis zu 0,23 L/s für größere Volumina ab. In **Tabelle 2** sind diese Zahlenwerte für die Wahrscheinlichkeiten der Ereignisse und Volumina sowie die verwendeten Durchflussbandbreiten zusammengefasst. In Verbindung mit der Grafik in **Bild 1** ist erkennbar, dass die Wahrscheinlichkeit von 9,93% in der Zeitspanne zwischen 08:00 und 09:00 Uhr die häufigsten Ereignisse erwarten lässt. Die Durchfluss-Eckpunkte in

Tabelle 2. Zahlenwerte des eingesetzten Belastungsprofils für kleine Volumina von 0,05 bis 8 Liter.

Ereignisse		Entnahme-Volumina		Durchfluss-Eckpunkte		
Wahrscheinlichkeit	Uhrzeit	Wahrscheinlichkeit	Volumen [L]	Volumen	v_1 [L/s]	v_2 [L/s]
0,59%	00:00 – 01:00	10,00%	0,05 – 0,40	0,00	0,03	0,08
0,39%	01:00 – 02:00	70,00%	0,40 – 1,50	5,00	0,12	0,20
...	...	15,00%	1,50 – 3,00	10,00	0,14	0,23
9,93%	08:00 – 09:00	5,00%	3,00 – 8,00			
7,91%	09:00 – 10:00					
...	...					
1,15%	23:00 – 24:00					

Tabelle 3. Zahlenwerte des eingesetzten Belastungsprofils für große Volumina von 8 bis 150 Liter.

Ereignisse		Entnahme-Volumina		Durchfluss-Eckpunkte		
Wahrscheinlichkeit	Uhrzeit	Wahrscheinlichkeit	Volumen [L]	Volumen	v_1 [L/s]	v_2 [L/s]
10,00 %	00:00 – 06:00	20,00 %	8,0 – 30,0	0,00	0,14	0,15
80,00 %	06:00 – 18:00	70,00 %	30,0 – 70,0	150,00	0,23	0,30
10,00 %	18:00 – 23:00	7,00 %	70,0 – 100,0			
		3,00 %	100,0 – 150,0			

Tabelle 2 legen die Grenzbereiche der Durchflüsse fest. Für jedes Volumen werden zwei Durchflüsse v_1 und v_2 durch lineare Interpolation bestimmt. Der für die weitere Berechnung verwendete Durchfluss v wird nach der folgenden Festlegung berechnet:

$$v = v_1 + Z \cdot (v_2 - v_1)$$

Hierbei ist die rechnerisch bestimmte Größe Z eine Zufallszahl mit folgender Gültigkeit.

$$0 \leq Z < 1.$$

Ein nichtlinearer Zusammenhang der Größen ist optional.

Für die größeren Entnahmedurchflüsse gelten analog die Werte des Belastungsprofils nach **Tabelle 3**. Der Grenzwert für maximale Durchflüsse wird hierfür mit 0,3 L/s eingesetzt. Für alle Simulationen wird der Bedarfsanteil für große Entnahmen mit 70% und für kleine und häufige Entnahmen mit 30% des Tagesbedarfs gewählt.

Das Computerprogramm liefert für die Simulationen für jeden einzelnen vorgegebenen Tagesbedarf eine Ergebnistabelle, die in vollem Umfang einer Messdatenerfassung mit Datenlogger entspricht. Die anschließenden Auswertungen der Ergebnistabellen erfolgen nach denselben, bereits im Computerprogramm integrierten Prozeduren, die für Messdatenauswertungen angewendet werden [6]. Für jede einzelne Simulation ergeben sich Dauerlinien und daraus die Spitzenvolumenströme für Bezugszeiten von 10 und 20 Sekunden sowie 1 Minute und 5 Minuten. Mengelinien liefern entsprechende Spitzenvolumenströme bei Volumenanteilen von 10%, 1% und 0,1%. Erklärungen und Definitionen von Bezugszeiten sind einem DVGW-Lehr- und Handbuch [8, Abschnitt 2.2, Bild 2.3] zu entnehmen.

Zum erforderlichen Vergleich zwischen Messungen und Berechnungen werden beispielhaft zwei sich entsprechende Ganglinien gegenüber gestellt. In **Bild 2** ist die von der Loggersoftware CDLWin 3.42 unmittelbar erzeugte Ganglinie einer früheren Messung in einem Wohnobjekt mit 192 WE [6, Messung-Nr. 0431.05] bei einem Tagesbedarf von 29 m³ dargestellt. Zum Vergleich dient die mit demselben Tagesbedarf rechnerisch durch Simulation bestimmte Ganglinie in **Bild 3**. Die Ähnlichkeit der Grafiken hinsichtlich des Verlaufs wie auch der Durchflussspitzenwerte ist bemerkenswert. Bei grober Betrachtungsweise sind die Ganglinien nahezu identisch. Die Unterschiede der grafischen Darstellungen beruhen auf der unterschiedlichen Anzahl

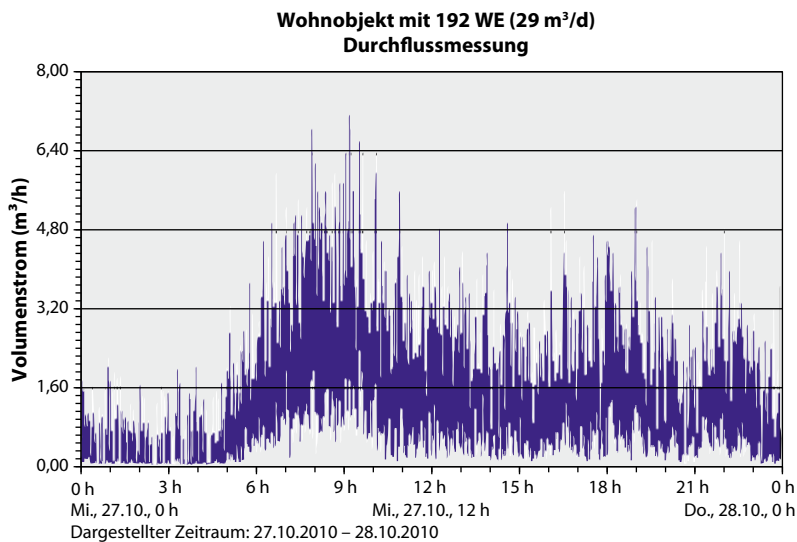


Bild 2. Mit der Loggersoftware CDLWin 3.42 erzeugte Durchflussganglinie einer Messung in einem Gebäude mit 192 WE und einem Tagesbedarf von 29 m³.

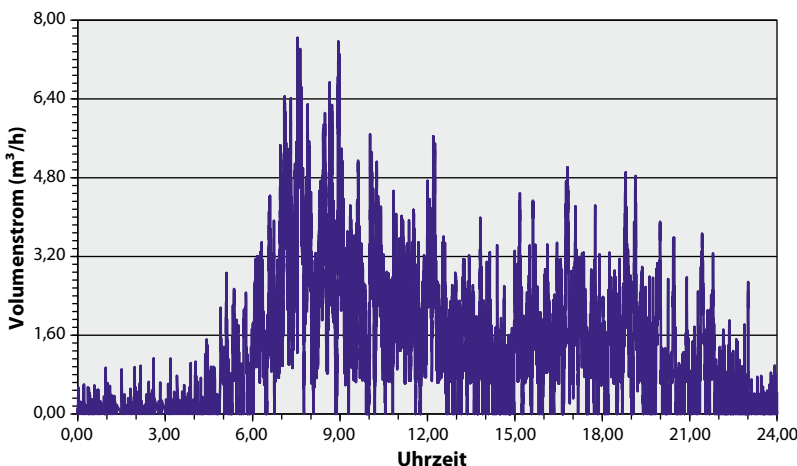


Bild 3. Durchflussganglinie nach einer Simulation bei einem Tagesbedarf von 29 m³, der einer Messung bei 192 WE entspricht.

von Datenpunkten und darauf, dass bei Messungen mit Ereignissteuerung, im Gegensatz zu Simulationen, keine Stillstände feststellbar sind. Bei der Messung wird jeder Liter als Ereignis erfasst, sodass die Messdatentabelle des Tagesbedarfs 29000 Datensätzen, enthält. Bei der Simulation liefert jedes Ereignis, d.h. jede Öffnung und Schließung einer Zapfstelle einen Datensatz und damit wegen teilweisen Entnahmevolumina von mehreren Litern eine weitaus geringere Anzahl von etwa 14000 Werten. **Bild 4** enthält einige ausgewählte Dauerlinien aus Simulationen und aus zwei Messungen. Der Vergleich mit Messdaten lässt ebenfalls eine große Ähnlichkeit erkennen. Die Dauerlinien dienen zur Ermittlung der Spitzendurchflüsse bei unterschiedlichen Bezugszeiten. Eine aus Simulationen ausgewertete verbrauchsbezogene Häufigkeit bei einem Tagesbedarf von 19 m³/d ist in **Bild 5** zusammen mit einer entsprechenden Grafik aus einer Langzeitmessung bei 127 WE dargestellt. Die verbrauchsbezogenen Häufigkeiten der Simulation tendieren zu etwas größeren Durchflüssen als die Messung ergab. Das könnte mit einer Anpassung der Belastungsprofile reduziert werden. Ein identisches Ergebnis war nicht zu erwarten, die Streuung entspricht vielmehr den realen Bedingungen. Der Mittelpunkt des Haupteinsatzbereichs [5, Abschnitt 4] der Strömungsbelastung für Wasserzähler liegt nach **Bild 5** zwischen 1 und 1,5 m³/h. **Bild 6** enthält die verbrauchsbezogene Häufigkeit von zwei Simulationen für Tagesbedarfswerte von 50 m³/d und von 100 m³/d. Zur Darstellung wurde eine Intervallbandbreite von 20 L/h gewählt, um die Streubreite der Ergebnisdaten zu veranschaulichen. Beim größeren Tagesbedarf verschiebt sich das Maximum der verbrauchsbezogenen Häufigkeit erwartungsgemäß zu höheren Durchflüssen. Zugleich ist bei größeren Durchflüssen eine Vergleichmäßigung der Durchflussbeanspruchung erkennbar. Trotz der großen Streubandbreite sind in **Bild 6** charakteristische Gaußverteilungen erkennbar. Die strömungstechnischen Belastungsschwerpunkte betragen bei 50 m³/d etwa 3,5 m³/h und bei 100 m³/h rund 6,5 m³/h. Belastungsschwerpunkte aus allen Simulationen und besonders gekennzeichnete Werte aus früheren Messungen sind in **Bild 7** aufgetragen und zeigen eine angenähert lineare Abhängigkeit vom Tagesbedarf. Dieser Sachverhalt könnte für die verbrauchsgerechte Auswahl von Wasserzählern bedeutsam sein. Die Simulationen liefern neben den beschriebenen Werten auch rein rechnerisch exakte Zahlenwerte für die Anzahl und die Zeitdauer der Gleichzeitigkeiten von geöffneten Zapfstellen. Dabei wird nicht nach Art der Zapfstellen und deren Durchflüssen unterschieden. In **Bild 8** sind Gleichzeitigkeiten von zwei ausgewählten Simulationen im Vergleich mit entsprechenden Messergebnissen dargestellt. Sowohl die Messungen wie auch die Simulationen zeigen die erwartete Abnahme der Öffnungszeitdauer mit zunehmender Anzahl von geöffneten Zapfstellen.

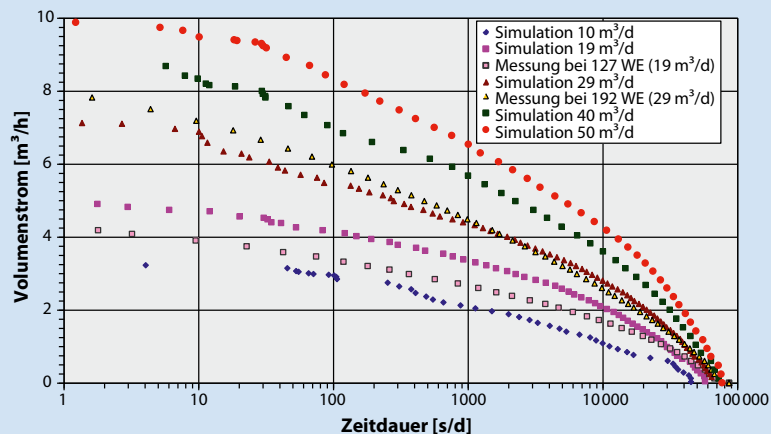


Bild 4. Durchflussdauerlinien von einigen der durchgeführten Simulationen im Vergleich mit Messungen.

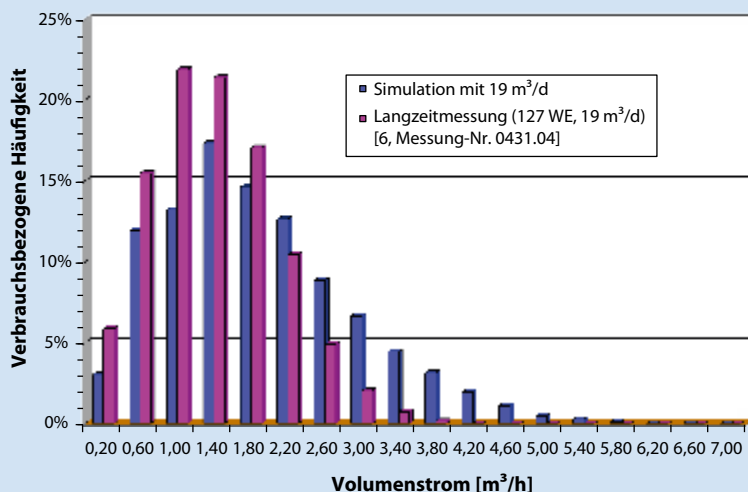


Bild 5. Vergleich von verbrauchsbezogenen Häufigkeiten aus einer Messung in einem Wohngebäude mit 127 WE und 19 m³/d mit einer Simulation bei demselben Tagesbedarf bei einer Intervallbandbreite von 400 L/h.

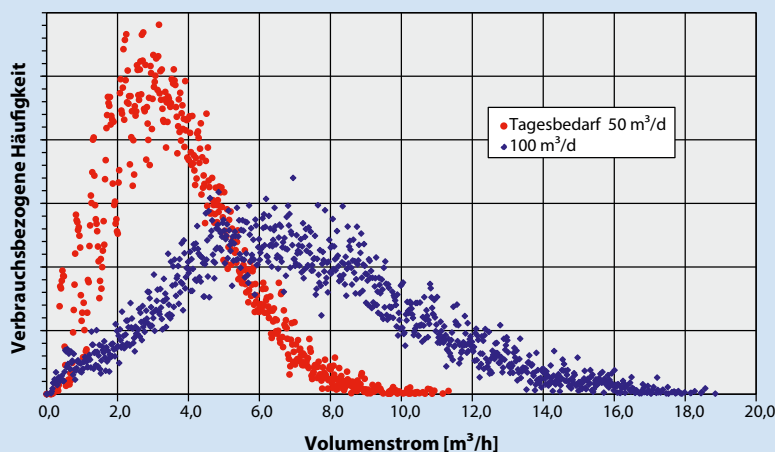


Bild 6. Verbrauchsbezogene Häufigkeiten als Ergebnisse von Simulationen mit sehr großen Tagesbedarfswerten von 50 und 100 m³/d und einer Intervallbandbreite von 20 L/h.

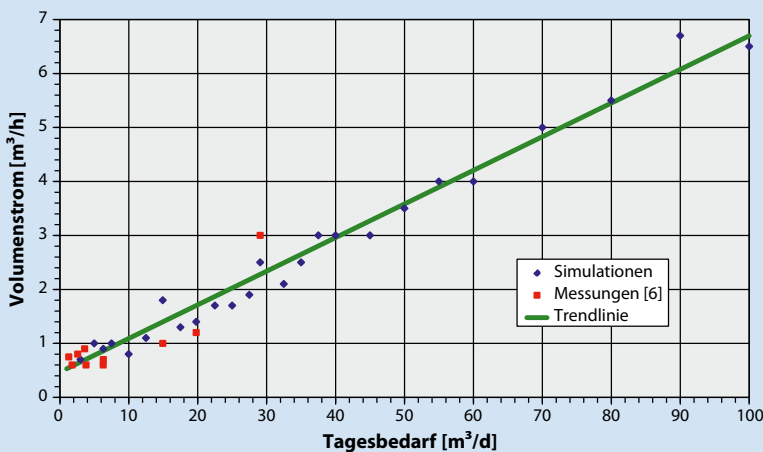


Bild 7. Aus Simulationen ermittelte Strömungsbelastungsschwerpunkte in Abhängigkeit vom Tagesbedarf und entsprechende Messpunkte aus früheren Messungen (rot).

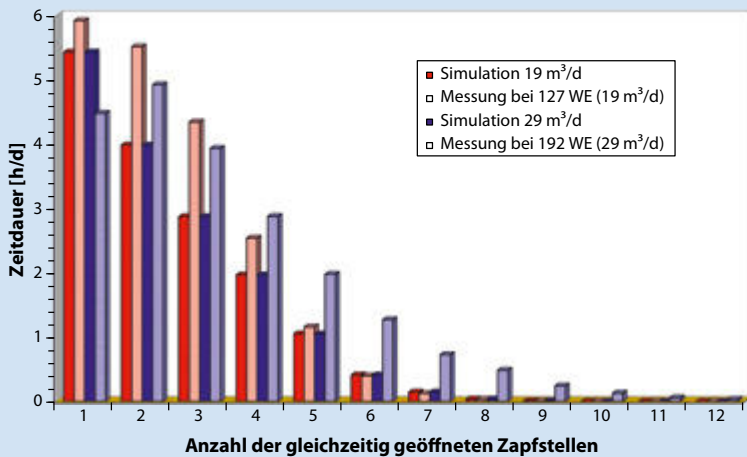


Bild 8. Darstellung der Zeitdauer von gleichzeitig geöffneten Zapfstellen aus zwei der durchgeführten Simulationen im Vergleich mit entsprechenden Messungen.

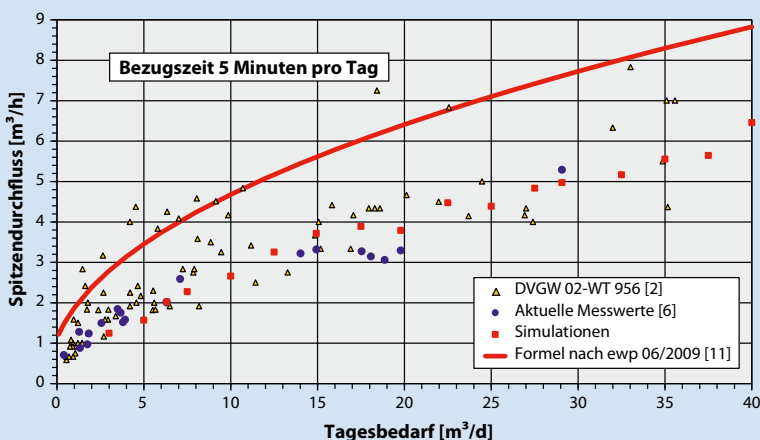


Bild 9. Darstellung von Spitzenvolumenströmen bei einer Bezugszeit von 5 Minuten aus früheren Messungen und einer Berechnungsformel für Wasserzähler im Vergleich mit Ergebnissen der Simulationen.

Der Verlauf nähert sich asymptotisch dem Nullwert bei größeren Gleichzeitigkeiten. Die Ergebnisse der Auswertungen aller Simulationen sind als Zahlenwerte in **Tabelle 4** zusammengefasst. Die in dieser Tabelle aufgelisteten Daten für die Spitzenvolumenströme bei einer Bezugszeit von 5 Minuten sind in **Bild 9** dargestellt. Die Bezugszeit 5 Minuten wird verwendet, weil bereits im bekannten DVGW-Messprogramm [1, Abschnitt 7.1.4, Seite 41] dieser Wert für die Bemessung von Wasserzählern festgelegt worden war und noch heute Gültigkeit hat. Die Grafik in **Bild 9** enthält auch aktuelle Messwerte [6], die Daten aus dem DVGW-Messprogramm [2] sowie die Gleichung einer Bemessungsformel [11]. Die Darstellung des Tagesbedarfs endet bei 40 m³/d. Nur bis zu diesem Wert sind Messungen im DVGW-Messprogramm durchgeführt worden. Alle Ergebnisse der Simulationen liegen im Vergleich mit bisherigen Messungen innerhalb der Streubandbreite. Das gilt auch für **Bild 10**, das die Ergebnisse einschließlich der bereits bekannten Werte für eine Bezugszeit von 20 Sekunden bis zum Maximalwert 100 m³/d enthält. Dazu ergänzend wurde eine empirische Hüllkurve für den Spitzendurchfluss V_s berechnet, die folgender Funktion entspricht:

$$V_s = 1,26 \cdot Q_d^{0,553}$$

In dieser Formel ist Q_d der einzusetzende Tagesbedarf bzw. der zu erwartende Spitzentagesbedarf Q_{dmax} .

5. Druckverluste durch Wasserzähler

Die in der Hausanschlussleitung installierten Wasserzähler verursachen infolge ihrer Strömungswiderstände Druckverluste, die bei der Auslegung von Hausinstallationen zu beachten sind. In älteren, inzwischen zurückgezogenen Regelwerken [12] findet man hierzu die Anmerkung: „Vom verfügbaren Druck wird ein Teil im Wasserzähler aufgezehrt.“ Das Regelwerk enthält auch Angaben, dass man den Druckverlust im Wasserzähler pauschal bis zu 1 bar ansetzen könnte. Manche Fachleute schreiben dem Wasserzähler daher eine Drosselwirkung zu. Diese Ansichten in Verbindung mit der Bezeichnung Druckverlust macht den Trugschluss verständlich, Wasserzähler würden für längere Zeitspannen mangelnde Strömungszustände verursachen. Leider enthält das Regelwerk derzeit keine konkreten Hinweise, wie hoch Druckverluste tatsächlich anzusetzen sind und wie lange diese andauern könnten. Werden die hypothetischen Spitzendurchflüsse nach DIN 1988-300 für die Berechnung von Druckverlusten in Wasserzähler verwendet, was offenbar weitverbreitet ist, dann wird der für die Installation verfügbare Druck in viel zu starkem Maße reduziert. Falsche Berechnungsansätze könnten in der Vergangenheit die Ursachen für viele Überdimensionierungen von Wasserzählern gewesen sein.

Weil hohe und spürbare Druckverluste tatsächlich nur bei großen und kurzzeitigen Spitzendurchflüssen

Tabelle 4. Zusammenfassung der Ergebnisse aller durchgeführten Simulationen.

Simulation Nr.	Tagesverbrauch	Belastungsschwerpunkt	Spitzenvolumenstrom mit einer Bezugszeit von				Spitzenvolumenstrom mit einer Bezugsmenge von		
			5-min	1-min	20-sec	10-sec	10‰	1,0‰	0,1‰
	m ³ /d	m ³ /d	m ³ /h	m ³ /h	m ³ /h	m ³ /h	m ³ /h	m ³ /h	m ³ /h
1	3,00	0,70	1,25	1,62	1,76	1,80	1,62	1,95	2,40
2	5,00	1,00	1,57	1,84	2,18	2,45	1,77	2,52	3,00
3	6,32	0,90	2,02	2,28	2,48	2,69	2,25	2,75	2,80
4	7,50	1,00	2,27	2,75	2,99	3,15	2,66	2,74	3,60
5	10,00	0,80	2,66	3,03	3,20	3,22	2,80	3,22	3,25
6	12,50	1,10	3,25	4,72	5,11	5,40	4,53	5,45	6,10
7	14,93	1,80	3,72	4,21	4,42	4,46	4,09	4,46	4,67
8	17,50	1,30	3,89	4,72	4,81	5,13	4,25	5,08	5,40
9	19,79	1,85	3,79	4,25	4,57	4,72	4,01	4,66	5,02
10	22,50	1,70	4,48	5,14	5,41	5,68	4,82	5,59	6,00
11	25,00	1,70	4,39	4,90	5,15	5,55	4,56	5,43	5,80
12	27,50	1,90	4,83	5,54	6,02	6,46	5,13	6,25	7,00
13	29,07	2,00	4,97	5,70	6,56	6,89	5,23	6,35	7,13
14	32,50	2,10	5,17	5,78	6,38	6,55	5,36	6,43	7,10
15	35,00	2,50	5,56	6,16	6,50	6,71	5,72	6,49	6,59
16	37,50	3,00	5,64	6,86	7,45	7,84	5,83	7,50	8,34
17	40,00	3,00	6,46	7,42	8,11	8,33	6,60	8,14	9,70
18	45,00	3,00	7,67	9,50	9,91	10,16	8,49	9,97	10,35
19	50,00	3,50	7,50	8,80	9,38	9,50	7,79	9,40	9,87
20	55,00	3,00	7,67	8,56	8,94	9,26	7,83	8,90	9,57
21	60,00	4,00	8,61	9,68	10,06	10,26	8,78	10,06	10,44
22	70,00	5,00	9,81	10,92	11,51	11,95	10,00	11,49	12,60
23	80,00	5,50	9,59	10,63	11,19	11,44	9,65	11,11	12,02
24	90,00	7,00	12,92	14,40	15,10	15,31	13,03	15,09	15,61
25	100,00	6,50	12,52	13,35	13,89	14,11	12,58	13,77	14,38

entstehen, wird für die folgenden Auswertungen der Zeitbegriff verwendet und die Bezeichnung Druckverlustspitze eingeführt. Dazu wird wie bei der Ermittlung von Spitzendurchflüssen eine Bezugszeit definiert und analog wie bei Spitzendurchflüssen [8, Abschnitt 2.2, Bild 2.3] verwendet. Ausgehend von **Bild 10** wird die angegebene empirische Hüllkurve bei einer Bezugszeit von 20 Sekunden für Spitzendurchflüsse zur Berechnung von Druckverlustspitzen eingesetzt. Die Druckverlustkennwerte von Wasserzählern werden Katalogangaben der Hersteller entnommen und der bekannte parabelförmige Verlauf von Druckverlustkurven berücksichtigt. Die berechneten Druckverlustspitzen sind in Abhängigkeit vom Spitzentagesbedarf in **Bild 11** in halblogarithmischer Darstellungsform aufgetragen. Dabei wird ganz bewusst nicht die übliche Bezeichnung für Wasserzähler verwendet, sondern als Kennwert der Durchfluss, der nach Herstellerangaben einen Druckver-

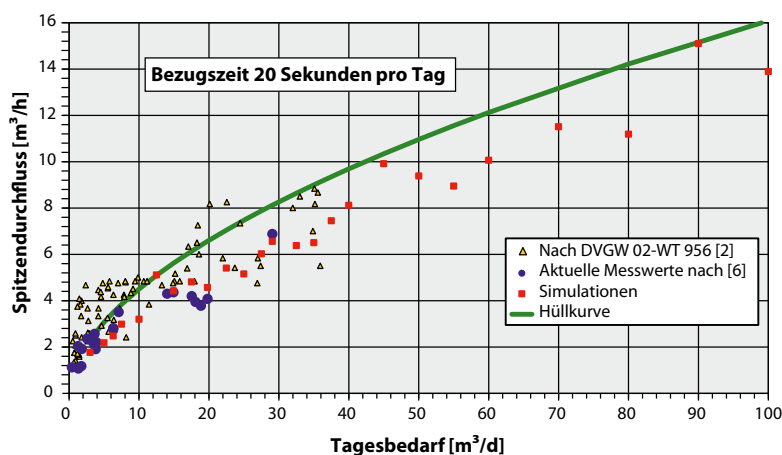


Bild 10. Darstellung von Spitzenvolumenströmen bei einer Bezugszeit von 20 Sekunden aus früheren Messungen im Vergleich mit Ergebnissen der Simulationen und Verlauf einer berechneten Hüllkurve.

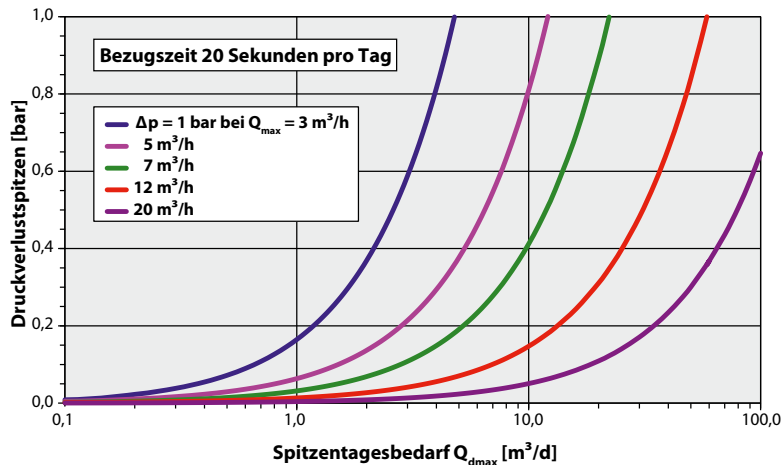


Bild 11. Zu erwartende Druckverlustspitzen beim Einsatz von verschieden großen Wasserzählern in Abhängigkeit von Spitzentagesbedarf Q_{dmax} .

lust von 1 bar verursacht. Für den Tagesbedarf sollte der Spitzentagesbedarf Q_{dmax} in Berechnungen eingesetzt werden. Je nach Größe des ausgewählten Wasserzählers kann damit der für etwa 20 Sekunden pro Tag auftretende Druckverlust **Bild 11** entnommen werden. Zu beachten ist, dass die 20 Sekunden keinesfalls eine zusammenhängende Zeit, sondern eine Aufsummierung von Einzelzeiten im Tagesablauf sind. Wie aus Messungen hervorgeht, werden in der Regel die angegebenen kurzzeitigen Druckverlustspitzen nur äußerst selten erreicht und führen somit keinesfalls zur Beeinträchtigung der Versorgungssicherheit.

6. Bewertung und Ausblick

Das mathematische Modell geht davon aus, dass mit einer geeigneten Simulation und Erfassung der Gesamtheit aller Entnahmevorgänge ein Zugang zu den komplexen Strömungsverhältnissen in Gebäudeanschlussleitungen möglich ist. Mit der ausführlichen Beschreibung und geschilderten Vorgehensweise ist allerdings kein Anspruch verbunden, eine praxistaugliche Lösung für Einzelfälle zu präsentieren. Aus Simulationen in Verbindung mit geeigneten Messungen können jedoch praxistaugliche Vorgaben erarbeitet werden.

Das verwendete Computerprogramm in der Programmiersprache Visual-Basic ist zunächst nur für den Eigengebrauch und zur Anwendung in Berechnungsbeispielen entwickelt worden. Die gezeigten Ergebnisse sind wegen der Annahmen in den verwendeten Belastungsprofilen vorwiegend als Beispiele für die nachgewiesene Modelltauglichkeit zu verstehen. Selbstverständlich ist darüber hinaus die Verwendung mathematischer Gleichungen anstelle von Wertetabellen zur Beschreibung von Belastungen optional. Trotz der vereinfachenden und teilweise auf Schätzungen beruhenden tabellarisch eingesetzten Belastungsprofile sind

bemerkenswerte Ähnlichkeiten mit ausgewerteten Messergebnissen feststellbar. Insbesondere ist eine fast identische Übereinstimmung der Ganglinien der **Bilder 2** und **3** hervorzuheben. Bei großen Tagesverbrauchswerten sind Ergebnisse unempfindlich gegenüber kleinen Änderungen der Belastungsprofile, wie Testrechnungen ergaben. Dagegen macht die große Streubreite der berechneten Werte bei kleinen Tagesverbrauchswerten deutlich, dass man ein zuverlässiges, statistisch abgesichertes Verbrauchsverhalten von Einzelverbrauchern benötigt. Bekanntlich gibt es bereits Untersuchungen zur Einteilung des Verbraucherverhaltens nach Kategorien. Demnach sind beispielsweise für Baden/Duschen/Körperpflege etwa 1/3 des Wasserbedarfs anzusetzen. Es ist denkbar, für jede einzelne Verbrauchs-Kategorie unterschiedliche Belastungsprofile gemäß den Beschreibungen in den Abschnitten 3 und 4 einzusetzen. Insbesondere kann man für Waschmaschinen unterbrochene Entnahmezyklen berücksichtigen.

Die statistische Erfassung der Anwendungsvielfalt von Einzelverbrauchern mit Eigenschaften von sparsam bis verschwenderisch wäre eine vordringliche Aufgabe von zukünftigen Messprogrammen. Dabei ist sowohl die Erfassung der Bandbreiten bei Betätigen von Zapfstellen nach Uhrzeiten als auch die Streubreite der dabei entnommenen Volumina erforderlich. Je genauer man das Verhalten von Einzelverbrauchern kennt, umso geringer wird die Streubreite und umso größer die Annäherung von Simulationen an wirkliche Strömungsvorgänge unter realen Bedingungen erreichbar sein. Derartige Messungen können zur Bewertung von Modellrechnungen dienen oder diese eingrenzen. Messungen in großen Gebäuden sind dagegen hinsichtlich der Erfassung von Einzelheiten zur Verwendung in Simulationen nicht geeignet. Derzeit wird vom DVGW ein umfangreiches Messprogramm vorbereitet [13].

Die Ergebnisse der Simulationen bestätigen weiterhin bisherige Erkenntnisse aus Messungen, wonach Spitzendurchflüsse selten und kurzzeitig sind. Dieser Effekt ist umso höher je größer ein Spitzendurchfluss angesetzt wird. Für die Praxis ist bedeutsam, dass technisch und betriebswirtschaftlich die Dimensionierungen nach Maximaldurchflüssen ungeeignet sind. Das war bereits im DVGW-Messprogramm [1, Abschnitt 7.1.2, Seite 38] aufgezeigt worden. Bei der Bewertung der durch Wasserzähler verursachten Druckverluste kommt die Anwendung von Druckverlustspitzen den realen Verhältnissen am nächsten. Der rechnerische Anteil der durch Wasserzähler verursachten Druckverluste, der zu einer Verringerung des für die Installation verfügbaren Druckes führt, wird dadurch auf das tatsächliche Maß reduziert.

Mit angepassten Belastungsprofilen kann das beschriebene Modell auch zur Berechnung von beliebigen Gebäudetypen und Teilstrecken in Hausinstallationen verwendet werden. Bei geeigneter Rechnerkapazi-

tät sind Berechnungen von strömungstechnischen Belastungen in Teilbereichen von Wassernetzen und von Rohrleitungen zu Versorgungsgebieten denkbar. Das könnte letztendlich auch zur Optimierung von Pumpenleistungen beitragen.

Literatur

- [1] DVGW-Forschungsprogramm 02-WT 956, Schlussbericht Wohngebäude, Band 1: Textteil.
- [2] DVGW-Forschungsprogramm 02-WT 956, Schlussbericht Wohngebäude, Band 2: Anlagen.
- [3] DIN 1988-300, „Technische Regeln für Trinkwasserinstalltionen – Teil 300 Ermittlung der Rohrdurchmesser; Technische Regel des DVGW“, Beuth Verlag Berlin 05/2012.
- [4] Schwickerath, H.: Mitteilung des DVGW, „Auswahl und Bemessung von Hauswasserzählern für Kaltwasser“. gwf-Wasser|Abwasser 1981 (122) Nr. 11, 1981, S. 541.
- [5] DVGW-Arbeitsblatt W 406: Volumen- und Durchflussmessung von kaltem Trinkwasser in Druckrohrleitungen – Auswahl, Bemessung, Einbau und Betrieb von Wasserzählern. WVGW Verlag Bonn 01/2012.
- [6] Hofmann, G. und Stefanski, F.: Trinkwasservolumenströme in Wohngebäuden. gwf-Wasser|Abwasser 2011 (152) Nr. 10, S. 958.
- [7] Eber, U.: Modell zur Berechnung der Wasserabnahmecharakteristik in Wohngebäuden. Vortrag „Internationales Symposium Wasserbedarf“, DVGW-Schriftenreihe Wasser Nr. 44, 1984.
- [8] Sattler, R.: Wassertransport und -verteilung. DVGW-Lehr- und Handbuch Wasserversorgung Bd. 2, ISBN 3-486-26219-X, Verlag Oldenbourg, 1999.
- [9] DVGW-Arbeitsblatt W 410: Wasserbedarf – Kennwerte und Einflussgrößen., Bonn 12/2008.
- [10] Hofmann, G.: Messverhalten überdimensionierter Wasserzähler in Wohngebäuden. DVGW energie|wasser-praxis 11/2008.
- [11] Hofmann, G.: Berechnungsformel für Hauswasserzähler in Wohngebäuden. DVGW energie|wasser-praxis 06/2009.
- [12] DVGW-Arbeitsblatt W 308: Richtlinien für die Berechnung von Wasserleitungen in Hausanlagen. Berechnungsanleitung zu DIN 1988. Frankfurt/Main 03/1962.
- [13] DVGW-TZW (Außenstelle Dresden): Aktualisierung der Verbrauchsganglinien für Haushalte, öffentliche Gebäude und Kleingewerbe sowie Entwicklung eines Modells zur Simulation des Wasserbedarfs. 01/2013.

Eingereicht: 19.11.2012
 Korrektur: 24.01.2013
 Im Peer-Review-Verfahren begutachtet

Autor

Dipl.-Ing. **Georg Hofmann**
 E-Mail: HofmannG@gmx.de |
 Konstantinstraße 17 |
 D-04315 Leipzig

Zeitschrift KA – Abwasser · Abfall

In der Ausgabe 02/2013 lesen Sie u. a. folgende Beiträge:

Schulz/Graf	Branchenkennzahlen Abwasserbeseitigung: Ein Beitrag zur Weiterentwicklung des Unternehmensbenchmarking
Pencereci/Schustereit	Dienstleistungskonzession – neue Entwicklungen und aktuelle Rechtsprechung Arbeitsbericht der DWA-Arbeitsgruppe WI-1.4 „Ökonomische Aspekte der WRRL“ Deckung der Kosten der Wasserdienstleistungen nach Artikel 9 WRRL – Teil 2: Angemessener Beitrag der Wassernutzungen
Tränckner u. a.	Wirtschaftliche Auswirkungen veränderlicher Rahmenbedingungen auf Abwasserentsorgungsunternehmen
Schröder	Ingenieure in der Wasserwirtschaft – Billige Handlanger oder wertvolle Ratgeber?