



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Energie BFE

UNTERSUCHUNG UND BEWERTUNG AN- GEPASSTER LÖSUNGEN ZUR TRINK- WARMWASSER-BEREITSTELLUNG

ENTWICKLUNG EINER TESTPROZEDUR FÜR FRISCHWASSERMODULE

Schlussbericht

Ausgearbeitet durch

Florian Ruesch und Elimar Frank

SPF Institut für Solartechnik, Oberseestrasse 10, 8640 Rapperswil

florian.ruesch@solarenergy.ch, www.solarenergy.ch

Impressum

Datum: 16. Dezember 2011

Im Auftrag des Bundesamt für Energie, Forschungsprogramm Solarwärme

BFE-Projektnummer 102955

Mühlestrasse 4, CH-3063 Ittigen

Postadresse: CH-3003 Bern

www.bfe.admin.ch

Bezugsort der Publikation: www.energieforschung.ch

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen ist ausschliesslich der Autor dieses Berichts verantwortlich.

Inhaltsverzeichnis

1	Zusammenfassung	5
2	Ausgangslage	5
3	Unterschiedliche Methoden der Brauchwassererwärmung	6
3.1	Energetische Betrachtung.....	6
3.2	Legionellenproblematik	7
3.2.1	Bakterium	7
3.2.2	Legionellose	7
3.2.3	Richtlinien und Vorschriften für Trinkwasserinstallationen.....	8
3.2.4	Legionellen in kleinen Trinkwasserspeichern.....	8
3.2.5	Legionellen bei externem Wärmeübertrager.....	9
3.3	Verkalkung	9
4	Teststand	11
4.1	Konzept	11
4.2	Steuerung und Daten-Handling.....	12
4.3	Leistungsfähigkeit des Teststandes	13
5	Identifizieren kritische Testparameter und Bedingungen	14
5.1	Maximaler Sekundärvolumenstrom.....	14
5.2	Temperaturschwankungen.....	14
5.3	Erreichen der Solltemperatur	17
5.4	Rücklauftemperatur	17
6	Erarbeiten von Beurteilungskriterien.....	17
6.1	Leistung.....	18
6.1.1	Definieren der Temperatureinstellungen.....	18
6.1.2	L1 Maximaler Sekundärvolumenstrom.....	18
6.1.3	L2 Minimaler Sekundärvolumenstrom.....	19
6.2	Komfort.....	20
6.2.1	Temperaturschwankungen.....	20
6.2.2	K1 Temperaturschwankungen bei konstantem Sekundärvolumenstrom	26
6.2.3	K2 Temperaturschwankungen bei Störungen.....	26
6.2.4	K3 Sekundärvorlauftemperatur bei unterschiedlichen, aber jeweils konstanten Betriebsbedingungen	28
6.3	Energieeffizienz	28
6.3.1	E1 Elektrischer Stromverbrauch	28
6.3.2	E2 Auskühlungsverluste	30
6.3.3	E3 Rücklauftemperatur.....	36
6.4	Wartung/Installation.....	42
6.4.1	W1 Aufbau.....	42

6.4.2	W2 Wartung und Verkalkung	42
6.4.3	W3 Regelung.....	43
6.4.4	W4 Betriebsanleitung	44
7	Ergebnisse der Testreihe	45
7.1	L1 Leistung	45
7.1.1	Maximaler Sekundärvolumenstrom.....	45
7.1.2	L2 Minimaler Sekundärvolumenstrom.....	46
7.2	Komfort.....	46
7.2.1	K1 Temperaturschwankungen bei konstantem Sekundärvolumenstrom	46
7.2.2	K2 Temperaturschwankungen bei Störungen.....	47
7.2.3	K3 Sekundärvorlauftemperatur	49
7.3	Energieeffizienz.....	51
7.3.1	E1 Elektrischer Energieverbrauch.....	51
7.3.2	E2 Auskühlverluste.....	51
7.3.3	E3 Rücklauftemperatur.....	52
7.4	Wartung/Installation.....	55
8	Diskussion.....	57
8.1	Leistung.....	57
8.2	Komfort.....	57
8.3	Energieeffizienz.....	58
8.4	Wartung/Inbetriebnahme.....	60
9	Ausblick.....	60
10	Symbolverzeichnis	61
11	Referenzen	62
12	Anhang	2
12.1	Linearisierung des elektrischen Stromverbrauches	2
12.2	Tabellen zur Einordnung von Temperaturschwankungen	3

1 Zusammenfassung

Frischwassermodule zur Trinkwassererwärmung im Durchlaufprinzip haben in den letzten Jahren stark an Marktpräsenz zugenommen, einheitliche Betriebspunkte zur Leistungsangabe oder gar standardisierte Tests zur Bewertung solcher Module sind bisher aber nicht vorhanden. In diesem Projekt wurden die Grundlagen für eine standardisierbare Testprozedur erarbeitet, welche den systematischen Vergleich von unterschiedlichen Modulen erlaubt. Zu diesem Zweck wurde am SPF ein Teststand zur Vermessung von Frischwassermodulen aufgebaut und in Betrieb genommen. Eine Prozedur, welche die Bereiche „Leistungsvermögen“, „Komfort“, „Effizienz“, und „Wartung und Installation“ berücksichtigt, wurde erarbeitet.

Sieben Module von sechs führenden Herstellern wurden nach den erarbeiteten Testkriterien geprüft und miteinander verglichen. Anhand einer Leistungsmessung bei definierten Bedingungen können die Module systematisch verglichen werden. Bei den Tests zum Bereich „Komfort“ wurden u.a. deutliche Komfortunterschiede bei der Reaktion auf Störungen im Zapfprofil festgestellt. Auch bei der Auskühlung des Pufferwassers wurden signifikante Unterschiede gemessen, welche einen starken Einfluss auf den Zusatzenergieverbrauch von typischen Solar-Kombisystemen haben.

The presence of external domestic hot water modules (DHWM) on the market is growing, amplified by stronger sanitary rules and an increasing popularity of large 'solar' storage tanks. Still, there are no unified operation points or even standardized testing procedures for the characterization of such modules. In the project presented, the basis for the development of a standardized testing procedure has been worked out which allows a systematic comparison of different modules. A test rig for the characterization of domestic hot water modules was designed and installed at SPF. Furthermore a test procedure concentrating on the following topics was elaborated: "Power", "Comfort", Efficiency" and "Maintenance and Installation"

Seven Modules from six different manufacturers were tested according to the defined test procedure. A measurement of the output power at defined working points leads to an increased comparability of the different modules. Large differences of the domestic hot water comfort between the tested modules were observed following some typical disturbances in the flow rate. Some modules also showed elevated backflow temperatures resulting in important additional energy consumptions of a typically attached solar combisystem.

2 Ausgangslage

Die Bereitstellung von Brauchwarmwasser kann auf unterschiedliche Weise erfolgen. Oft wird ein Wasserspeicher zur Bevorratung von Wärme verwendet, die zur Erwärmung des Trinkwassers benötigt wird. Ein verstärktes Hygienebewusstsein und neue Richtlinien zur Legionellenbekämpfung haben speziell in Deutschland zur verschärften Regelungen bei der Trinkwarmwasserspeicherung und somit zu einer vermehrten Entkoppelung von Frischwasser und gespeichertem Pufferwasser geführt. Dazu werden immer häufiger externe Plattenwärmeübertrager eingesetzt, welche zusammen mit einer geregelten Pumpe die Wärme des Pufferwassers im Gegenstromprinzip auf das Frischwasser übertragen. Wärmeübertrager, Pumpe und Regelung werden oft als Einheit, als sogenanntes Frischwassermodule (FWM) oder Frischwasserstation, angeboten. Die grosse Leistungsfähigkeit von Plattenwärmeübertragern bietet dabei die Möglichkeit einer starken Auskühlung des Pufferwassers im unteren Speicherbereich, was wiederum zu einer höheren Effizienz von Solarkollektoren und Brennwertgeräten, aber auch zu weniger Speicherverlusten führt. Daher werden Frischwassermodule oft als sehr energieeffizient angepriesen. Die gute Auskühlung des Pufferwassers hängt aber sowohl vom eingesetzten Wärmeübertrager als auch von einer funktionierenden Regelung ab. Diese Regelung passt den Volumenstrom des Pufferwassers an die benötigte Energiemenge, also die Zapfrate an und erwärmt das Trinkwasser somit direkt vor dem Verbrauch. Im Gegensatz zu Trinkwarmwasserspeichern, in denen ein bestimmtes Volumen an Brauchwarmwasser bevorratet wird, kann es durch die Regelung zu Temperaturschwankungen und Verzögerungen kommen, welche den Komfort, beispielsweise bei einer Dusche, vermindern.

Es ist mittlerweile eine Vielzahl von Frischwassermodulen auf dem Markt erhältlich, die mit unterschiedlichen Leistungsparametern und speziellen Detaillösungen werben. Bislang gibt es

jedoch keine allgemein anerkannten Rahmenbedingungen, bei welchen Module getestet und Leistungsangaben gemacht werden. Dies macht einen systematischen Vergleich der Angebote auf dem Markt für alle Beteiligten (Endkunden, Planer, usw.) sehr schwierig.

Durch die hier vorgestellte Arbeit sollen Rahmenbedingungen definiert und Testgrößen eingeführt werden, welche einen systematischen Vergleich der am Markt angebotenen Frischwassermodule erlaubt.

Im folgenden Bericht wird die Heizungswasser führende Seite des Moduls als Primärseite und die Frischwasser führende Seite als Sekundärseite bezeichnet.

3 Unterschiedliche Methoden der Brauchwassererwärmung

In den letzten Jahren gab es eine Reihe neuer Erkenntnisse und Trends in der Warmwasserbereitstellung, insbesondere mit solarer Unterstützung. Dabei werden unter anderem Problemfelder wie Energieeffizienz, Trinkwasserhygiene, aber auch Aspekte zur Vereinfachung von Installation und Wartung vermehrt beachtet. Dies hat zur Folge, dass die Brauchwarmwasserbereitung oft mit der Heizung kombiniert wird und nicht gesondert betrachtet werden kann.

Folgende systemische Ansätze zur Brauchwarmwasserbereitstellung eignen sich zur Kombination mit Sonnenkollektoren und Raumheizungsunterstützung:

- Separate Trinkwasserspeicher
- In Speicher mit Heizungswasser integrierte interne Wärmetauscher
 - Als „Tank in Tank“, d.h. eine in den Speicher integrierte Trinkwasserblase
 - Als Rohrwendelwärmeübertrager (glatt oder gerippt)
- Speicher mit Heizungswasser und ergänzende externe Wärmeübertrager (u.a. Frischwassermodule bzw. -stationen, ...)

Die verschiedenen Ansätze weisen spezifische Vor- und Nachteile bezüglich der zentralen Problemfelder von Legionellenbildung, Verkalkung und dem Kompromiss zwischen Komfort und Energieeffizienz auf. Diese werden in den folgenden Abschnitten erläutert.

3.1 Energetische Betrachtung

Die Bewertung der Energieeffizienz eines Wassererwärmungssystems ist nur schwer generalisierbar und hängt oft stark vom Zusammenspiel der einzelnen Komponenten ab. Dabei ist es kaum möglich, die Problemstellung der Brauchwarmwasserbereitstellung unabhängig vom gesamten Warmwassersystem (Wärmequellen, Gebäude und Heizungssystem, Verbraucherprofil usw.) zu betrachten. Im diesem Abschnitt werden unterschiedliche Konzepte zur Trinkwasserbereitstellung mit Einbezug des gesamten Warmwassersystems verglichen.

Bei der Speicherung von warmem Wasser, aber vor allem auch in den Verteilnetzen fallen ständig Wärmeverluste an die Umgebung an. Diese sind abhängig von der Temperaturdifferenz zwischen dem warmen Wasser und der Umgebung und fallen also bei niedrigen Wassertemperaturen geringer aus. Zur Steigerung der Energieeffizienz sind demnach systemische Ansätze günstig, welche grundsätzlich mit tiefen Temperaturen auskommen.

Zusätzlich kann mit tiefen Rücklauftemperaturen auch die Effizienz von unterschiedlichen Wärmeerzeugern wie Sonnenkollektoren, kondensierende Brenner (Brennwertgeräte) oder Wärmepumpen gesteigert werden. Wenn Speicher zur Wärmebevorratung und als hydraulische „Weichen“ verwendet werden, spielt deswegen die Effektivität der Schichtung im Speicher eine entscheidende Rolle. Eine gute Schichtung mit möglichst tiefen Temperaturen im unteren Speicherabschnitt wirkt sich positiv auf die Effizienz des Gesamtsystems aus.

Pauschinger [1] hat bereits 1997 fünf Anlagenkonzepte simuliert und unter energetischen Gesichtspunkten miteinander verglichen. Dabei wurden auch zwei Anlagenkonzepte mit Frischwassermodule betrachtet, wobei die „Low-flow“-Anlage mit Frischwassermodule im Vergleich am besten abgeschnitten hat. Den Ergebnisse aus [1] zufolge sind Tank-in-Tank-Systeme, Zweispeicheranlagen und Anlagen mit Pufferspeicher und Frischwassermodule ähnlich effizient. Einzig die Anlage mit eingetauchtem Brauchwasser-Wärmeübertrager führt zu einem deutlich höheren Zusatzenergieaufwand. Dies lag hauptsächlich an der hohen eingestellten Bereitschaftstemperatur in der Simulation. Zusätzlich wirkte sich der nur im obersten Speicherab-

schnitt platzierte Wärmeübertrager negativ auf die Temperaturschichtung aus. Ähnliche Resultate wurden auch von Bales et al. [2] publiziert, welche den Einsatz von externen und internen Wärmeübertragern anhand von Simulationen und Messungen verglichen haben. Auch in dieser Studie wird von Energieeinsparungen beim Einsatz von externen Wärmeübertragern im Vergleich zu interne Rohrwendelübertragern gerechnet. Dies wird aber hauptsächlich durch das Absenken der Bereitschaftstemperatur erreicht.

Bei einer gross angelegten Messreihe von solarunterstützten Kombisystemen des SPF („Kombi-Kompakt“, vgl. [3]), bei der das gesamte System unter quasi-realistischen Bedingungen dynamisch getestet wurde, konnten diese Resultate nicht bestätigt werden. Einige Systeme mit unterschiedlichen internen Wärmeübertragern haben bei den detaillierten und umfangreichen Messungen leicht besser abgeschnitten als die beiden untersuchten Systeme, welche über ein Frischwassermodule zur Brauchwassererwärmung verfügten. Da jedoch lediglich zwei Systeme mit Frischwassermodule untersucht wurden, kann dies nicht als Basis für fundierte generelle Aussagen angesehen werden. Hinzu kommt, dass durch die zunehmende Marktpräsenz insbesondere in den letzten Jahren deutliche Fortschritte bei der Entwicklung der Module, speziell im Bereich der Regelung, erreicht wurden. Der oft erwähnte energetische Vorteil von Frischwassermodulen bedingt durch eine tiefe Rücklauftemperatur und eine gute Speicherschichtung muss jedoch in einem grösseren Zusammenhang gesehen werden: Bei den umfangreichen Tests von Kombi-Kompakt+ führten unterschiedliche Konzepte zu ähnlich guten oder schlechten Resultaten. Nicht das grundsätzliche Konzept, sondern das gute Zusammenspiel der Komponenten hat sich dabei als entscheidend herausgestellt.

3.2 Legionellenproblematik

Das Problem der Trinkwasserhygiene hat im letzten Jahrzehnt stark an Beachtung gewonnen. In diesem Zuge wurden auch vermehrt Regeln zur Sicherstellung der Trinkwasserhygiene aufgestellt (DVGW W551 [4], SVGW Merkblatt [5], SIA 385/1 [6]). Die Regeln in der Schweiz unterscheiden sich dabei deutlich von Deutschland. In Deutschland wird ein tägliches Aufheizen des gesamten Trinkwasserspeichervolumens auf über 60 °C gefordert und für kleine Anlagen empfohlen. In der Schweiz muss hingegen nur Trinkwarmwasser, welches länger als 24 Stunden bei mittleren Temperaturen gelagert wurde, thermisch desinfiziert werden. Beide Regelungen favorisieren die Trinkwasserbereitstellung im Durchlaufprinzip (interne oder externe Wärmeübertrager) gegenüber der Verwendung von grossen Trinkwarmwasserspeichern.

3.2.1 Bakterium

Mittlerweile sind mehr als 50 Arten von Legionellen bekannt, wobei die Mehrzahl aller Krankheitsausbrüche auf Legionella Pneumophila Serotyp 1 zurückzuführen sind.[7]

Legionellen sind sehr widerstandsfähig und können in den meisten Umgebungen für lange Zeit überleben. Sie überleben kurzzeitig bei Temperaturen zwischen 0 und 68 °C [8] (0-63 °C nach [9]) und pH-Werten zwischen 5..8,5, und auch gegen Chlorierung sind sie weitgehend immun. Daher kommen Legionellen auch in den meisten Gewässern und in feuchten Böden vor.

Legionellenwachstum findet aber nur im mittleren Temperaturbereich statt. Diederer [8] gibt einen Bereich von 20..42 °C und eine optimale Temperatur von 35 °C an, nach Cabeza [9] hingegen liegen die optimalen Wachstumsbedingungen zwischen 30..45 °C. Ab Temperaturen über 50 °C beginnt der Abtötungsprozess von Legionellen, der mit steigender Temperatur schneller erfolgt. Bei einer Temperatur von 60 °C sinkt die Konzentration von lebenden Legionella pneumophila innerhalb von ca. drei Minuten um 90% [10]. In zehn Minuten kann die Konzentration also um ca. drei Zehnerpotenzen gesenkt werden. Andererseits brauchen Legionellen aber relativ lange, um sich zu vermehren. Von BAG [7] wird eine Verdoppelungsrate von 4h unter Idealbedingungen angegeben und Makin [10] sagt aus, dass in *weniger als fünf Tagen* aus einer Grundbelastung (background numbers) gefährliche Konzentrationen entstehen können.

3.2.2 Legionellose

Die Legionärskrankheit oder Legionellose erhielt ihren Namen durch den ersten Dokumentierten Ausbruch 1976 an einer US-Kriegsveteranenvereinigung „American Legion state convention“. Dabei erkrankten 221 ‚Ex-Legionäre‘, wovon 34 an starker Lungenentzündung und den Folge-

erkrankungen starben. Nach der Entdeckung des Erregers wurde mit einer hohen Sterblichkeitsrate von 10..15 % der an Legionellose erkrankten Patienten gerechnet [9]. Mit den heutigen schnellen Diagnosemethoden und der gezielten Behandlung mit Antibiotika konnte die Sterblichkeit stark gesenkt werden: Diederer [8] gibt 0..5.5% an. Die Infektion erfolgt über das Einatmen von legionellenhaltigen Aerosolen. Über den Magen-Darm-Trakt führen Legionellen hingegen nicht zur Infektion, und die Krankheit gilt auch nicht als ansteckend. Daher gelten auch Lüftungsanlagen und im Speziellen gewisse Typen von Kühltürmen und Luftbefeuchtern als grosse mögliche Quelle von Legionelleninfektionen. Diese Quellen sind aber durch eine relativ lange Inkubationszeit meist schwierig zu identifizieren.

Grundsätzlich können sich auch gesunde Personen infizieren, gefährlich kann jedoch die Legionärskrankheit vor allem bei Patienten mit geschwächtem Abwehrsystem werden. Deshalb ist das Risiko erhöht bei Organtransplantierten, Niereninsuffizienten, chronisch Herz- oder Lungenerkrankten, Diabetikern oder Krebskranken, bei älteren Personen, bei Rauchern und Alkoholkranken.

3.2.3 Richtlinien und Vorschriften für Trinkwasserinstallationen

In der Schweiz behandelt die neu (2011) überarbeitete Version der SIA 385/1 "Warmwasserversorgung für Trinkwasser in Gebäuden – Grundlagen und Anforderungen" [6] das Thema Legionellenschutz. Darin werden wichtige Punkte aus einem Bericht des Bundesamtes für Gesundheit (BAG) [7] übernommen, wobei Trinkwarmwasseranlagen in drei Risikogruppen eingeteilt werden. Für die Hochrisikogruppe (beispielsweise Spitälern mit Transplantationsabteilungen) müssen individuell angepasste Massnahmen erarbeitet werden. Ein mittleres Risiko wird allen grösseren Gebäuden mit zentraler Wassererwärmung und Duschen zugeschrieben. Für diese Gruppe werden Regeln aufgestellt, welche im folgenden Abschnitt erläutert werden. Wohnungsspezifische Wassererwärmungsanlagen werden zur Gruppe mit geringem Risiko gezählt, bei denen die folgenden Massnahmen nur als Empfehlungen zu verstehen sind. Brauchwarmwasser muss thermisch desinfiziert werden, wenn es länger als 24 h bei Temperaturen zwischen 25 und 50 °C gelagert wurde. Eine thermische Desinfektion wird durch ein Aufheizen auf mehr als 60 °C während mindestens einer Stunde erreicht. Für Anlagen, bei welchen das Volumen des Trinkwarmwasserspeichers den Tagesbedarf unterschreitet, kann die Warmwassertemperatur also auch auf weniger als 60 °C eingestellt werden. Allerdings muss die Erwärmungsanlage so ausgelegt werden, dass 60 °C am Austritt des Erwärmers, 55 °C in den warmgehaltenen Leitungen und 50 °C an den Entnahmestellen erreicht werden kann. Bei Durchflusserwärmern gelten diese Anforderungen nicht, sofern das erwärmte Wasser innerhalb von weniger als 24 h verbraucht wird. Zusätzlich wird eine regelmässige Entkalkung verlangt, und es ist darauf zu achten, dass die gespeicherte Warmwassermenge knapp ausgelegt wird und die Kaltwasserleitungen vor einer Erwärmung geschützt werden. Selten benutzte Entnahmestellen sollen regelmässig gespült werden und stillgelegte Leitungsanschlüsse müssen an der Zweigstelle abgetrennt werden. Aus Komfortgründen wird empfohlen, die Zirkulation in der Nacht nicht auszuschalten.

In Deutschland gelten andere und wesentlich undifferenzierter Regeln, welche im DVGW Arbeitsblatt W551 [4] beschrieben werden. Trinkwasserspeicher müssen ab einer Grösse von 400 Litern täglich vollständig auf mehr als 60 °C aufgeheizt werden. Dies verunmöglicht die Verwendung von solaren Trinkwasserspeichern schon ab einer geringen Grösse. Somit muss auf Wärmeübertrager zurückgegriffen werden, welche die Wärme vom gespeicherten Betriebswasser auf das Trinkwasser übertragen.

3.2.4 Legionellen in kleinen Trinkwasserspeichern

Die umfangreichste empirische Untersuchung über Legionellen in kleinen Brauchwasseranlagen stammt von Mahys et al. [11], die 452 Einfamilienhäuser in zwei deutschen Städten auf ihren Legionellenbefall untersuchten. Dabei wurde etwa jeder zehnte Haushalt (10.6 %) positiv auf Legionellen getestet. Andere Studien ergaben demgegenüber deutlich höhere Zahlen von 22.6% und 30% [12][13].

Es wurde eine Korrelation zwischen Wassertemperatur und Legionellenbefall beobachtet: Systeme, bei denen tiefe Warmwassertemperaturen gemessen wurden, sind häufiger und stärker von Legionellen befallen. Ein weiterer Faktor, der zu erhöhtem Legionellenrisiko führt, ist das

Alter einer Anlage: Bei keiner Anlage, die jünger als zwei Jahre war, wurde ein Legionellenbefall gemessen. Der Einfluss von anderen Faktoren wie z.B. Kupferionen-Konzentration oder Wasserhärte konnte nicht geklärt werden, und die Resultate der Studien stehen teilweise im Widerspruch zueinander. Das Risiko eines Legionellenbefalls von Systemen mit solarer Unterstützung ist weitgehend unklar. Da Systeme mit Solarunterstützung grössere Speicher mit teils nur kleinem Bereitschaftsvolumen enthalten, wird oft von einem erhöhten Legionellenrisiko gesprochen. Durch das Solarsystem werden die Schichtgrenzen aber oft verschoben, und im Sommer wird oft der gesamte Tank auf sehr hohe Temperaturen (bis 95 °C) angehoben, was zu einer thermischen Desinfektion des gesamten Speichers führt. Das einzige den Autoren bekannte empirische Resultat stammt ebenfalls aus der Untersuchung von Mathys et al. [11]: Dabei wurden Systeme mit Solarunterstützung trotz tieferer Wassertemperaturen und grösserer Speicher deutlich weniger oft von Legionellen befallen als konventionelle Systeme.

3.2.5 Legionellen bei externem Wärmeübertrager

Trinkwarmwassererwärmer, welche nach dem Durchlaufprinzip funktionieren, werden sowohl in der Schweiz wie auch in Deutschland (nur bei Leitungsvolumen < 3 Liter) von jeglichen Vorschriften bezüglich einer Mindesttemperatur enthoben, sofern das Trinkwasser nicht länger als 24 h im Verteilnetz bei Temperature zwischen 25 °C und 50 °C verweilt. Selbst für hinsichtlich der Legionellenvermehrung kritischen Temperaturen kann bei einer kurzen Verweildauer eine starke Vermehrung von Legionellen im Trinkwasser ausgeschlossen werden, da sich Legionellen nur sehr langsam vermehren. Externe Wärmeübertrager werden aus diesem Grund als besonders legionellensicher bezeichnet. Dies ist aber nur dann zutreffend, wenn keine warmgehaltenen Zirkulationsleitung besteht, oder wenn alle Zapfstellen häufig benutzt werden. Im Gegenzug können Zirkulationssysteme mit selten benutzten Zapfstellen, welche bei kritischen Temperaturen betrieben werden, zu einem hohen Legionellenrisiko führen.

Empirische Untersuchungen zu externen Wärmeübertragern sind den Autoren nicht bekannt, bezüglich Legionellen können diese aber mit dezentralen Durchlauferhitzern verglichen werden. Mathys et al. [11] stellten bei keiner dieser Anlagen einen Befall fest, und auch Borella et al. [12] geben einen schwachen Befall an. Bei den befallenen Systemen konnten aber fast ausschliesslich Legionella Pneumophila Serotyp 1 identifiziert werden, der für die meisten Fälle von Legionellose verantwortlich ist. In zentralen Warmwasserspeichern wurden vor allem andere Serotypen identifiziert. Der gefährlichste Serotyp 1 kann sich also auch in sehr kurzen Leitungssystemen und an den Zapfstellen einnisten. Daher vermuten Borella et al., dass die meisten Fälle von Legionellose auf einen Befall der Zapfstellen und nicht auf einen Befall der zentralen Speicher zurückzuführen sind. Als wichtige Hygienemassnahme wird daher ein regelmässiges Desinfizieren der Duschköpfe vorgeschlagen.

3.3 Verkalkung

Kalkablagerungen im Trinkwassersystem treten in der Schweiz relativ häufig auf, da viele Regionen über kalkhaltige Bodenschichten verfügen. Wenn säurehaltiges Regenwasser durch diese Gesteinsschichten sickert, werden dabei in Abhängigkeit von pH-Wert, Druck und Temperatur Ca^{2+} Ionen gelöst. Diese Reaktion kann umgekehrt werden, wenn beispielsweise durch Druckabnahme CO_2 entweicht. Somit wird wieder Calciumcarbonat gebildet, das als fester Kalkstein ausfallen kann. Bei Trinkwassererwärmern führt aber hauptsächlich eine andere Eigenschaft zu (Kalk) Steinbildung, nämlich die Temperaturabhängigkeit der Löslichkeitskonstante. Da die Löslichkeit von Kalk mit steigender Temperatur abnimmt, kann es bei einer starken Erwärmung zur Ausfällung kommen. Generell wird dabei von einer geringen Anfälligkeit für Steinbildung gesprochen, wenn keine Temperaturen von mehr als 60 °C erreicht werden (Recknagel et al. [14], Seite 418).

Bei Systemansätzen mit direkter Speicherung von Trinkwarmwasser werden grössere Mengen Trinkwasser erwärmt und bei „kritischen“ Temperaturen gespeichert. Dies kann zur Ausfällung von relativ grossen Mengen von Kalk führen. Dabei werden aber für den Verbraucher meist keine negativen Einflüsse auf den Komfort spürbar, da eine Erwärmung auf die gewünschte Temperatur trotzdem stattfindet. Da die Steinbildung meist an den heissesten Stellen im System auftritt, sind somit Bauteile wie Zusatzheizung, Solarwärmeübertrager und Elektroheizstab am

stärksten betroffen. Die Ablagerung von Kalk führt jeweils zu einer Verschlechterung des Wärmeübergangs. Dies hat dann meist eine Verminderung der Systemeffizienz oder, im Fall des Elektroheizstabes, eine schnellere Alterung zur Folge. Bei externen Plattenwärmeübertragern wird der Effekt der verschlechterten Wärmeübergabe durch einen erhöhten Druckabfall und folglich durch einen verminderten Durchfluss auf der Trinkwasserseite verstärkt. In extremen Fällen kann es zum kompletten Zusetzen des Wärmeübertragers kommen. Wird ein Rohrwendel-Wärmeübertrager im Solarkreis für die Beladung des Trinkwasserspeichers benutzt, erfolgt die Verkalkung auf der Aussenseite, es kommt also nicht zu einer Verstopfung, sondern lediglich zu einer Verschlechterung der Wärmeübertragung. Viele Hersteller geben an, dass aufgrund der variierenden Temperaturen des Rohrwendel-Wärmeübertragers die Kalkablagerung immer wieder abplatzt und sich als Sediment auf dem Speicherboden absetzt. Trinkwasserspeicher müssen zwar über eine Reinigungsöffnung verfügen, eine Reinigung und Entkalkung von Trinkwasserspeichern ist aber aufwändig und wird in der Praxis selten gemacht.

Interne Wärmeübertrager zur Erwärmung von Trinkwasser, welche sich im oberen Teil eines Pufferspeichers befinden und somit ständig der heissesten Temperatur im System ausgesetzt sind, weisen ein hohes Potenzial zur Verkalkung auf, insbesondere auch weil darin unbewegtes Wasser auf kritische Temperaturen erwärmt werden kann. Speziell kann dies in Kombination mit Wärmequellen, bei welchen hohe Temperaturen auftreten (z.B. Sonnenkollektoren oder Stückholzfeuerungen), zu Problemen führen. Kalkablagerungen in integrierten Trinkwarmwasser-Wärmeübertragern haben eine Verschlechterung des Wärmeübergangs zur Folge. Dies kann sich weiter auf eine ungenügende Erwärmung des Wassers bei grossen Zapfvolumenströmen, aber auch auf eine Verschlechterung der Temperaturschichtung und somit die Energieeffizienz des Gesamtsystems auswirken. Interne Wärmeübertrager sind dabei meist fix im Speicher verbaut und zu Wartungszwecken schlecht zugänglich. Wird ein Rohrwendel-Wärmeübertrager zur Erwärmung des Trinkwassers in einem Pufferspeicher benutzt, tritt eine allfällige Verkalkung auf der Innenseite des Wärmeübertragers auf. Hier kann es im extremen Fall ebenso zum kompletten Zusetzen kommen (Abbildung 2), selbst wenn ein spiralförmiges Wellrohr gewählt wird.

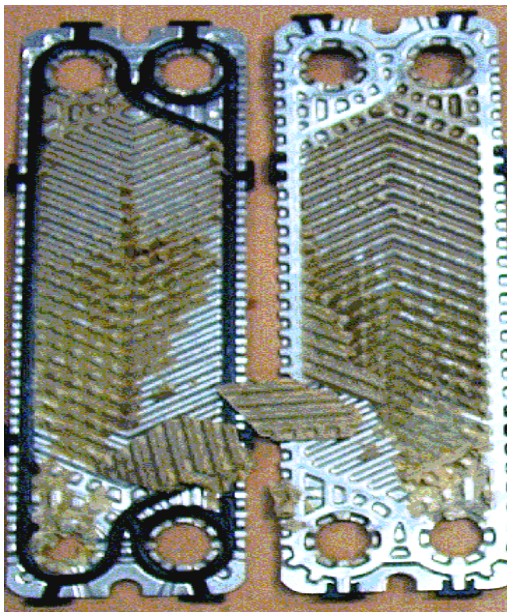


Abbildung 1 Verkalkung eines Solarwärmeübertragers, Quelle: [15]

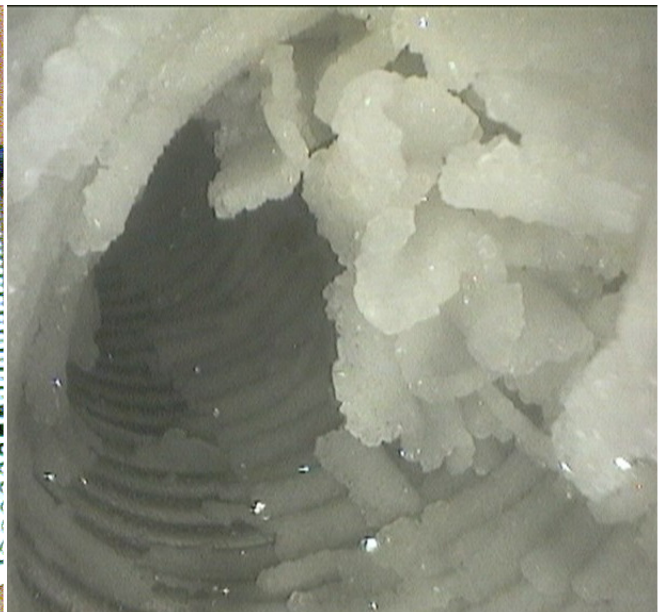


Abbildung 2 Verkalkung in einem Wendelwärmeübertrager (Endoskop-Aufnahme). Quelle: SPF

Bei Frischwassermodulen, d.h. in externen Plattenwärmeübertragern, kann schon eine vergleichsweise geringe Verkalkung (dünne Kalkschicht) zu deutlichen Leistungseinbußen führen. Dabei wird nicht nur der Wärmeübergang verschlechtert, zusätzlich führen Kalkrückstände in

den schmalen Zwischenräumen der Plattenwärmeübertrager zu einer Erhöhung des Druckabfalles über dem Wärmeübertrager. Externe Wärmeübertrager bieten aber den Vorteil, dass sie meist einfach zugänglich sind und somit einfacher entkalkt oder gegebenenfalls sogar ausgetauscht werden können. Dies wird bei einigen Modulen mit Hilfe von eingebauten Anschlüssen und Absperrhahnen unterstützt, welche das Entkalken des Wärmeübertragers vor Ort vereinfachen sollen. Einige Hersteller verwenden einen Thermostatischer, welcher die primärseitige Vorlauftemperatur und somit auch die maximale Temperatur im Wärmeübertrager begrenzt und dadurch die Verkalkungsgefahr vermindert. Als weitere Methode zur Verminderung von Steinbildung werden die warmen Anschlüsse am unteren Ende des Wärmeübertragers platziert. Somit findet nach Beendigung der Zapfung eine Durchmischung des Inhaltes und dadurch ein rasches Absinken unter kritische Temperaturen statt. Es befindet sich also nur für sehr kurze Zeit stehendes Frischwasser mit einer kritischen Temperatur im Wärmeübertrager.

Eine starke Verkalkung hat auch negative Einflüsse auf die Trinkwasserhygiene, da sich Legionellen und auch andere Mikroorganismen in den entstehenden Ritzen und Spalten einnisten können, ohne dabei mit dem normalen Wasserdurchsatz aus dem System ausgespült zu werden. Zusätzlich bieten solche Nischen auch Schutz vor einigen gängigen Desinfektionsmethoden (z.B. Chlorierung oder andere chemische Ansätze).

4 Teststand

Ein Teststand zur Charakterisierung von Frischwassermodule wurde am SPF aufgebaut. Dabei konnten Teile eines bestehenden Teststandes aus früheren Projekten des SPF eingesetzt und weiterentwickelt werden.

4.1 Konzept

Zentrales Element des Teststandes ist ein 300-Liter Edelstahlspeicher, dessen Inhalt mit einer elektrischen Heizung (Nennleistung 32 kW) rasch auf die gewünschte Temperatur erwärmt werden kann.

Grundsätzlich werden die Temperaturen so nahe als möglich beim Modul gemessen, da jegliche Effekte von Leitung und Verbindungsstücken ausgeschlossen werden sollen. Es handelt sich also, was die wesentlichen Messungen betrifft, um einen Komponententest und nicht um einen Systemtest. Um auch rasche Temperaturschwankungen erfassen zu können, müssen Temperaturfühler mit einer geringen thermischen Masse verwendet werden. Hierzu werden Widerstandsthermometer (PT100, K1) mit speziell verjüngter Messspitze (1.6 mm) eingesetzt, welche direkt in das durchflossene Rohr eingesetzt werden. Eine zusätzliche Kalibrierung garantiert eine Messungenauigkeit von weniger als ± 0.1 °C.

Es wird ein Kaltwasserspeicher mit 1000l Inhalt zur Konditionierung des Primärvorlaufes eingesetzt. Dessen Inhalt wird ständig umgewälzt und dabei über einen Plattenwärmeübertrager auf die gewünschte Temperatur konditioniert. Als Wärme oder Kältequelle dient dabei ein Thermostatbad (*Lauda Integral T 2000*), welches über einen externen Temperaturfühler (am Eintritt in den Kaltwasserspeicher platziert) geregelt wird.

Der Zapfvolumenstrom wird über vier Regelkugelhahne mit Stellmotor (Belimo) eingestellt. Für ein rasches Öffnen und Schliessen ist pro Strang zusätzlich ein Schrägsitzventil mit Druckluftantrieb eingebaut, mit welchem Sprünge im Zapfprofil realisiert werden können. Gemessen wird der Zapfvolumenstrom auf der Sekundärseite mit einem magnetisch-induktiven Durchflussmesser (Krohne Optiflux 5000). Auf eine Durchflussmessung auf der Primärseite wurde bewusst verzichtet, da ein zusätzlicher Druckverlust, wie er bei den gängigen Arten der Durchflussmessung nicht vermieden werden kann, die Leistungsfähigkeit des Modules einschränkt.

Der elektrische Verbrauch des Moduls wird mit einem Messumformer (*Sineax 653 von Camille Bauer*) ermittelt und direkt vom PC ausgelesen.

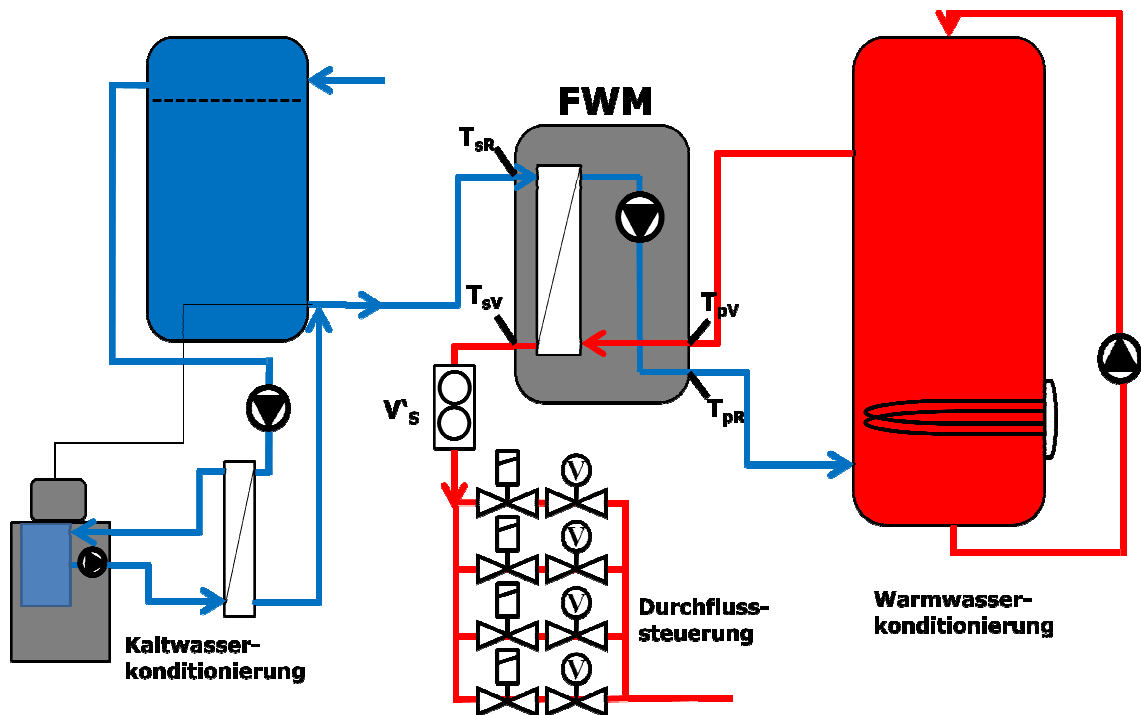


Abbildung 3 Übersichtsskizze des Frischwassermodul-Teststands am SPF

Legende:	T_{pR}	Primärücklauftemperatur	$\pm 0.1 \text{ K}$
	T_{pV}	Primärvorlauftemperatur	$\pm 0.1 \text{ K}$
	T_{sR}	Sekundärücklauftemperatur	$\pm 0.1 \text{ K}$
	T_{sV}	Sekundärvorlauftemperatur	$\pm 0.1 \text{ K}$
	V'_s	Sekundärvolumenstrom	3 %

4.2 Steuerung und Daten-Handling

Eine wichtige Verbesserung des Teststandes beinhaltet das Einbinden eines Interfaces (National Instruments, Compact DAQ) zum Einlesen von Messwerten und zum Ausgeben von Steuerungssignalen. Somit sind jegliche Datenlogging-, Steuerungs- und Kontrollprozesse automatisch über den angeschlossenen PC ausführbar. Dank einem Netzwerkanschluss kann der Teststand auch direkt von einem beliebigen Arbeitsplatz aus kontrolliert oder angesteuert werden.

Mit der Software *LabView* von *National Instruments* wurde ein Programm erstellt, welches folgende Funktionen erlaubt:

1. Das Ansteuern aller Ventile und Heizungselemente von Hand und das simultane Darstellen der gemessenen Parameter.
2. Erfassen und Loggen der Messwerte (Temperaturen, Volumenstrom, Elektrischer Verbrauch)
3. Exportieren der geloggtten Daten in .txt-Format zur weiteren Aufbereitung.
4. Eingeben und Speichern von unterschiedlichen Zapfprofilen.
5. Aufrufen von unterschiedlichen Zapfprofilen bei unterschiedlichen Primärvorlauftemperaturen. Dabei kann eine Vielzahl von Zapfprofilen automatisch nacheinander abgefahren werden.
6. Das automatische Aufheizen und Abkühlen des Speicherinhaltes auf die gewünschte Temperatur.

7. Die Kontrolle der Primärvorlauftemperatur und der Kaltwassertemperatur (sekundär Rücklauf). Wenn eine Abweichung von mehr als ± 1 °C von der erwünschten Temperatur auftritt, wird die Messung unterbrochen und ein Aufheizen oder Abkühlen wird eingeleitet.

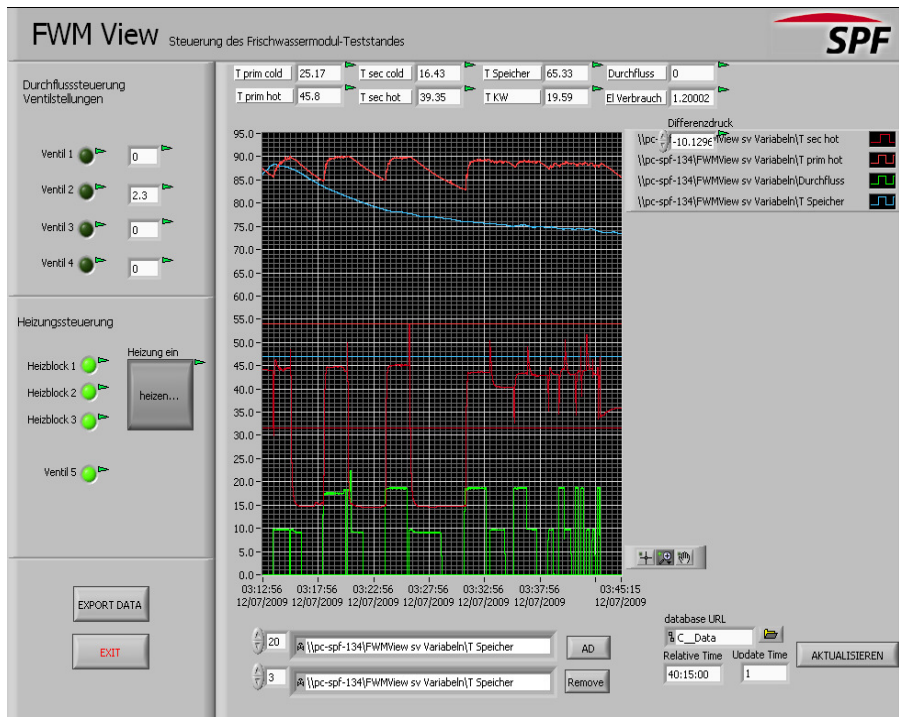


Abbildung 5 Beispiel eines Programmfensters zur Steuerung der Heizung und der Ventile zur Volumenstromregulierung. Die Gemessenen Grössen können graphisch angezeigt und als .txt-File exportiert werden.

4.3 Leistungsfähigkeit des Teststandes

4.3.1.1 Volumenstromsteuerung

Für einen Vergleichbarkeit der Messresultate ist es wichtig, einen konstanten und genau einstellbaren Volumenstrom erzeugen zu können. Da die verwendeten Regelkugelhähne nur langsam reagieren und auch über eine starke Hysterese verfügen, eignen sie sich nicht, um kurzzeitige Schwankungen im Volumenstrom auszugleichen. Um konstante Durchflüsse zu erreichen, darf also der Versorgungsdruck keine Schwankungen aufweisen. Versuche mit einem Anschluss an die „normale“ Wasserversorgung führten dabei zu keinem befriedigenden Resultat. Erst mit einem direkten Anschluss an die externe Versorgung mit 6 bar und dem Einsatz eines Druckreduzierventils (JRG) unmittelbar vor dem Eintritt in den Teststand konnte eine Wasserversorgung ohne Druckschwankungen gewährleistet werden. Somit könne je nach Modul Zapfvolumenströme von maximal 40 l/min bis 50 l/min eingestellt werden. Die Einstellgenauigkeit beträgt mit dieser Anordnung ca. ± 5 % des Messwertes und bei kleinen Volumenströmen ± 0.3 l/min.

4.3.1.2 Kaltwassertemperatur

Eine Kaltwassertemperatur von 10 °C wird als Standardbedingung festgesetzt. Der Einsatz eines 1000 l Kaltwasserspeichers mit internen Konvektionsbremsen ermöglicht das Konditionieren des Sekundärvorlaufes auf 10 ± 1 °C.

4.3.1.3 Speichertemperatur

Während des Heizvorgangs wird der gesamte Speicherinhalt ständig umgewälzt, um eine gute Temperaturhomogenität über den gesamten Speicherinhalt zu erreichen. Da der Speicher nur über 300l Inhalt verfügt und während einer Messung relativ rasch leergezapft wird, hat sich eine

Isolation des Speichers als unnötig erwiesen. Nahezu der gesamte Speicherinhalt kann während eines Versuches verwendet werden, ohne dass sich die Primärvorlauftemperatur um mehr als $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ändert. Während der unterschiedlichen Tests wird Primärvorlauftemperatur ständig überwacht. Wenn das Kriterium von $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ nicht mehr erreicht werden kann wird der Test abgebrochen um den Speicherinhalt neu zu konditionieren.

5 Identifizieren kritische Testparameter und Bedingungen

5.1 Maximaler Sekundärvolumenstrom

Der maximale Sekundärvolumenstrom wurde als wichtiger Leistungsindikator eines Frischwassermoduls identifiziert. Dieser Wert wird oftmals auch in die Typenbezeichnung mit einbezogen. Bei unterschiedlichen Herstellern werden aber sehr unterschiedliche Randbedingungen für diese Angaben gewählt. Die Übertragungsleistung von Frischwassermodulen hängt mit der Grösse des Wärmeübertragers, mit der Leistungsfähigkeit der Primärpumpe, aber natürlich auch mit den gewählten Temperaturen für die Messung zusammen.

5.2 Temperaturschwankungen

In einer ersten Testreihe wurden unterschiedliche Betriebsbedingungen mit variabler Primärvorlauftemperatur und unterschiedlichen Sekundärvolumenströmen getestet. Dabei haben sich hauptsächlich kleine Sekundärvolumenströme bei hohen Speichertemperaturen als kritische Bedingungen herausgestellt. Bei elektronisch geregelten Modulen mit drehzahlgesteuerten Primärpumpen stellt diese Bedingung eine grosse Herausforderung an die Pumpenregelung dar, da nur ein sehr kleiner Primärvolumenstrom zum Bereitstellen der nötigen Energie gebraucht wird. Drehzahlgeregelte Pumpen lassen sich aber nicht uneingeschränkt präzise auf sehr kleine Volumenströme herunterregeln, deswegen werden sie in diesem Fall oft gepulst angetrieben. Durch die Pulsung entstehen dann auf der Sekundärseite Temperaturschwankungen. Speziell in Kombination mit einer Solaranlage, aber auch bei Einsatz von Stückholzfeuerungen; kann es zu sehr hohen Temperaturen im Speicher kommen, so dass ein sehr geringer Primärvolumenstrom für die Bereitstellung kleiner Mengen Trinkwarmwasser benötigt wird.

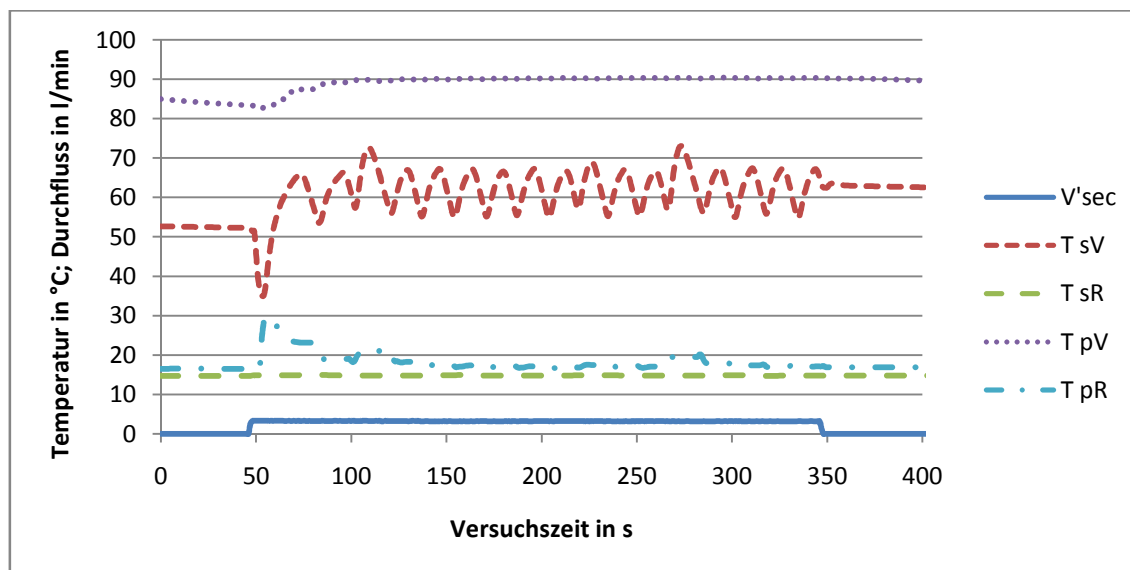


Abbildung 4 Beispiel von auftretenden Temperaturschwankungen bei einem Sekundärvolumenstrom von 3 l/min und einer Primärvorlauftemperatur von 90 °C.

Auch durch Lastwechsel können Temperaturschwankungen herbeigeführt werden. Unterschiedliche Störungsszenarien wurden dabei identifiziert und getestet:

Stufen im Zapfprofil: Durch das Zu- und Wegschalten einer Zapfstelle entstehen Stufen im Zapfprofil. Dabei können unterschiedliche Effekte auftreten, welche zu einem verminderten Komfort führen. Zum einen kann sich die Sekundärvorlauftemperatur ändern, was ein Nachregeln der Mischerposition nötig macht. Zum andern können Über- und Unterschwinger entstehen, welche unterschiedliche rasch ausgegelt werden. Bei elektronisch geregelten Modulen

sind diese Schwankungen nicht zu vermeiden, da durch die Masse des Wärmeübertragers immer eine Verzögerung der Reaktion auf veränderte Betriebsbedingungen entsteht. Bei umfangreichen Tests hat es sich für alle getesteten Module bestätigt, dass sich das Zu- und Wegschalten einer Zusatzzapfung bei kleinen Basis-Zapfvolumenströmen deutlicher auswirkt als bei grossen Basis-Zapfvolumenströmen.

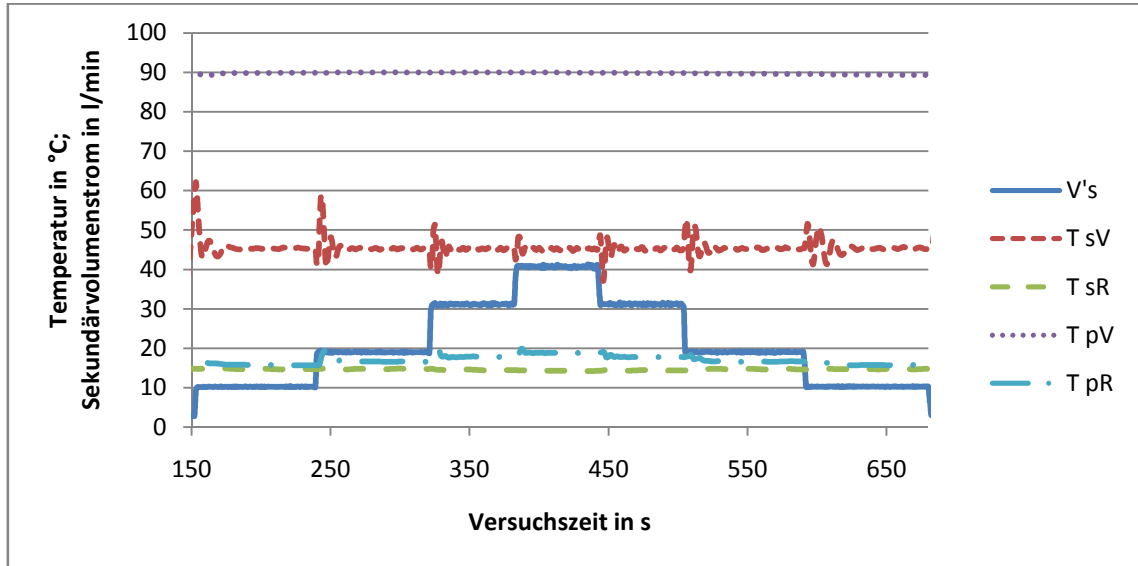


Abbildung 5 Beispiel eines Moduls, das nach einer Veränderung des Sekundärstroms mit Temperaturschwankungen reagiert, dann aber exakt auf die eingestellte Solltemperatur einregelt. Dargestellt werden Stufen mit Schritten von 10 l/min.

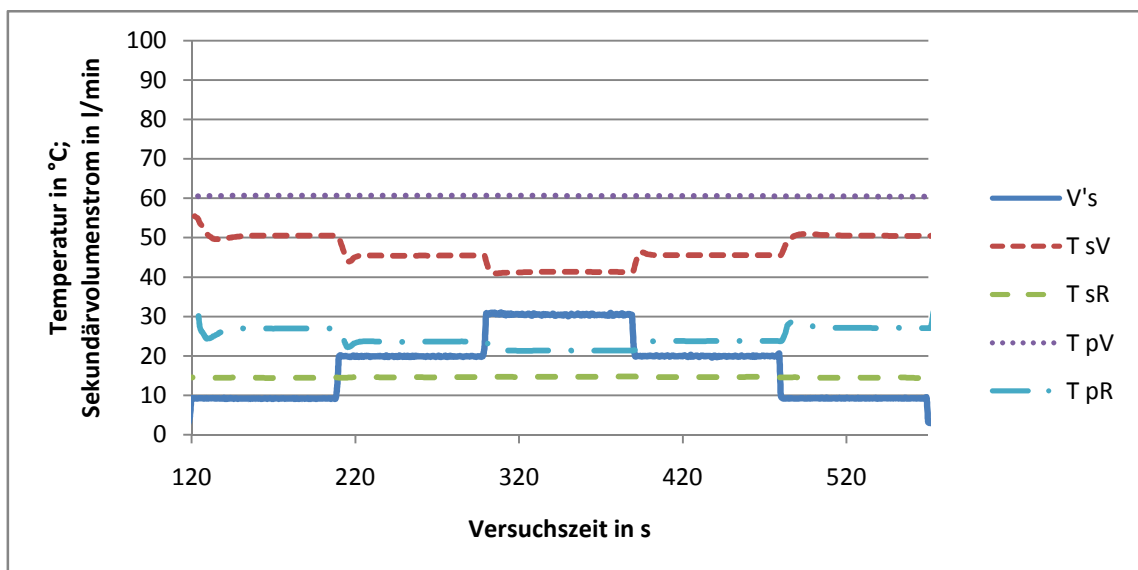


Abbildung 6 Beispiel eines Moduls, bei dem sich die Sekundärvorlauftemperatur in Abhängigkeit des Sekundärstroms ändert, Über- und Unterschwinger treten dabei aber kaum auf. Dargestellt werden Stufen mit Schritten von 10 l/min.

Pausen: Pausen während der Zapfung sind ein häufiges Phänomen, da beim Duschen oft eine Pause zum Einseifen gemacht wird. Die Reaktionen unterschiedlicher Module auf Pausen waren verschieden und von der Nachlaufzeit der Pumpe und der Anordnung des Wärmeübertragers abhängig. Wenn beispielsweise die warmen Anschlüsse oben liegen, so kann sich nach der Zapfung das heiße Wasser oben sammeln und bei der nachfolgenden Zapfung wird dieses heiße Wasser direkt ausgespült. Dadurch kann ein deutlicher Überschwinger entstehen. Wenn die Pumpen nach dem Ende der Zapfung noch lange nachlaufen, so kann ein grosser Teil des

Wärmeübertragers durch das heiße Pufferwasser aufgewärmt werden. Bei Beginn einer neuen Zapfung wird dann erst dieses heiße Wasser aus dem Wärmeübertrager ausgespült und erzeugt einen Überschwinger. Bei den meisten Modulen werden die warmen Anschlüsse aber mittlerweile unten am Wärmeübertrager angebracht. Nach Zapfende durchmischt sich der Inhalt des Wärmeübertragers somit aufgrund der Schwerkraft und kühlt rasch unter eine kritische Temperatur aus. Somit können am Anfang der folgenden Zapfung auch Unterschwinger auftreten.

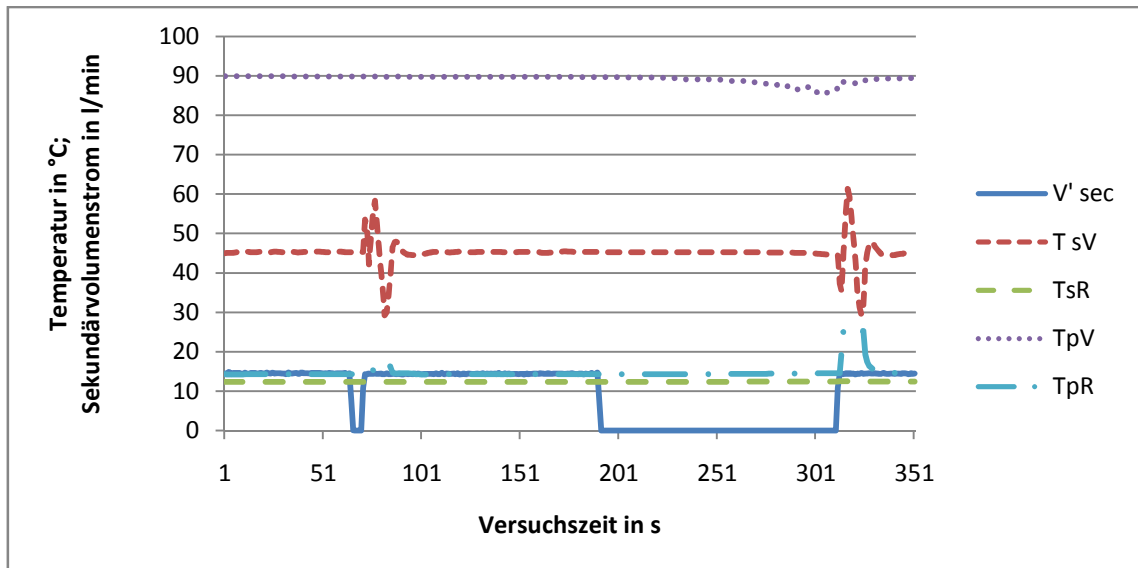


Abbildung 7 Beispiel eines Moduls das mit Temperaturschwankungen auf Pausen während der Zapfung reagiert. Dargestellt wird die Reaktion auf eine kurze Pause von fünf Sekunden und eine längere Pause von 120 Sekunden bei einer Primärvorlauftemperatur von 90 °C.

Schnapsglaszapfungen: Als Schnapsglaszapfungen werden kurze Zusatzzapfungen bezeichnet, welche immer dann erfolgen wenn etwas Wasser benötigt wird und kurz der Zapfhahn geöffnet wird. Die kurze Änderung des Zapfvolumenstromes kann die Regelung stören und zu Schwankungen durch Nachregelung führen. Auch bei diesem Störungsszenario hat sich gezeigt, dass die verursachten Schwankungen bei kleinen Basis-Zapfvolumenströmen deutlicher ausfallen als bei hohen.

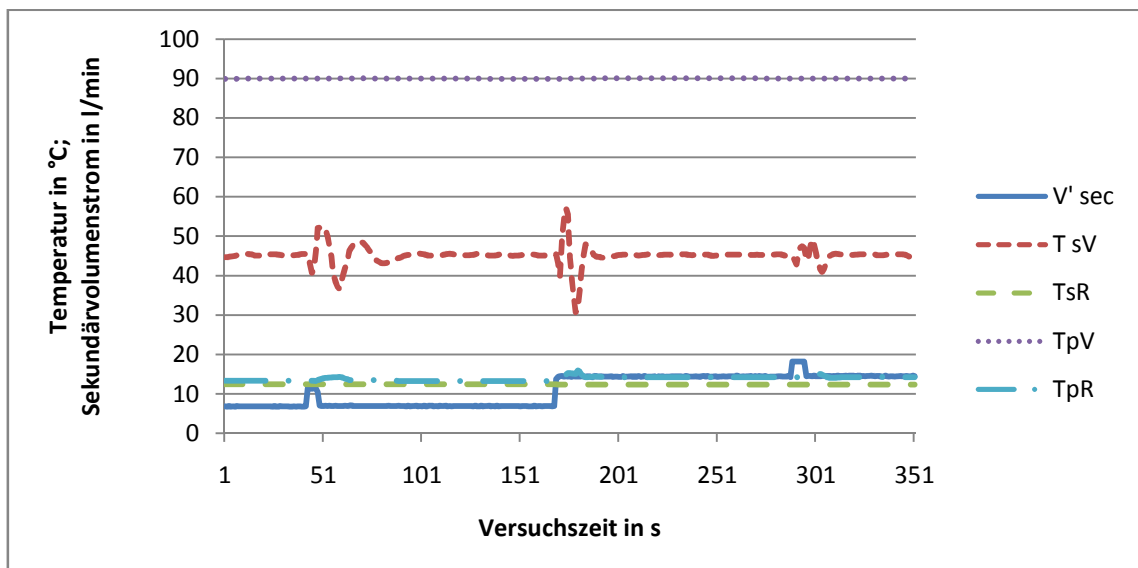


Abbildung 8 Beispiel von Temperaturschwankungen nach kurzen ‚Schnapsglaszapfungen‘. Dargestellt wird die Reaktion eines FWM auf eine kurze Störung (eine ‚Schnapsglaszapfung‘ von fünf Sekunden) bei einem Sekundär volumenstrom von 7 resp. 14 l/min.

5.3 Erreichen der Solltemperatur

Ein punktgenaues Erreichen der Solltemperatur wird nicht als ein wichtiges Kriterium für den Warmwasserkomfort angesehen, da die Austrittstemperatur aus dem Modul in der Regel über der gewünschten Temperatur am Zapfhahn liegt. Somit wird an der Zapfstelle in den meisten Fällen noch kaltes Wasser beigemischt, um die gewünschte Temperatur zu erreichen. Durch diese Beimischung werden dann Abweichungen von der gewünschten Solltemperatur wieder ausgeglichen. Anders als eine für alle Bedingungen gleiche Abweichung von der Solltemperatur wirkt sich aber eine ändernde Sekundärvorlauftemperatur auf den Komfort aus. Ändert sich nämlich die Sekundärvorlauftemperatur bei unterschiedlichem Zapfvolumenstrom, dann führt das Zu- und Wegschalten von zusätzlichen Zapfungen zu einer Temperaturänderung, was dann ein Nachregeln im Modul nötig macht. Speziell bei einem hydromechanisch geregelten Modul, aber auch bei elektronisch geregelten Modulen konnten veränderte Sekundärvorlauftemperaturen in Funktion des Sekundärvolumenstromes und der Primärvorlauftemperatur ausgemacht werden. In Abbildung 5 und Abbildung 6 weiter oben wird das Verhalten von zwei Modulen gezeigt; beim ersten wird immer auf exakt dieselbe Sekundärvorlauftemperatur geregelt, bei anderen ändert sich die Sekundärvorlauftemperatur mit unterschiedlichen Bedingungen stark.

5.4 Rücklauftemperatur

Eine gute Auskühlung des Pufferwassers durch das kalte Frischwasser ist aus energetischen Gründen sehr wichtig. Zum einen sind die Verluste des Pufferspeichers direkt abhängig von der Temperaturdifferenz zwischen Pufferwasser und Umgebung. Erhöhte Rücklauftemperaturen vom Modul zum Speicher führen zu einer erhöhten Temperatur im unteren Bereich des Speichers und somit zu grösseren Speicherverlusten. Zum anderen sind aber auch andere Komponenten eines Warmwassersystems wie Sonnenkollektoren oder Brennwertkessel auf niedrige Temperaturen angewiesen, um effizient arbeiten zu können. Bei den Messungen an unterschiedlichen Modulen hat sich bestätigt, dass nicht nur die Grösse und Form des Wärmeübertragers, sondern auch die Regelung einen beträchtlichen Einfluss auf die Rücklauftemperatur hat. Wird nämlich der Volumenstrom auf der Primärseite des Moduls nicht ideal an den Volumenstrom an der Sekundärseite angepasst, dann verändert sich nicht nur die Sekundärvorlauftemperatur, sondern auch die Primärrücklauftemperatur (vergleiche Abbildung 6 oben).

6 Erarbeiten von Beurteilungskriterien

In der ersten Phase des Projektes wurde eine Testreihe durchgeführt, um kritische Bedingungen und wichtige Betriebspunkte ausfindig zu machen. Dabei wurde festgestellt, dass sich Temperaturschwankungen gravierender auswirken, je grösser die Primärvorlauftemperatur und je geringer der Sekundärvolumenstrom ist. Daher wurden typische Zapfleistungen definiert, welche die häufigsten Zapfverhältnisse für Module dieser Grössenordnung darstellen. Bei der Erarbeitung der unterschiedlichen Beurteilungskriterien wurde dann immer auf dieselben Zapfverhältnisse zurückgegriffen.

Händewaschzapfungen: 3 l/min bei 42 °C Zapftemperatur

In Recknagel et al. [14] S.1727 werden 3 l/min bei 35 °C (2.6 l/min bei 42 °C) für ein Händewaschbecken und 5 l/min bei 35 °C (3.9 l/min) für ein Waschbecken angegeben. In VDI 6003 [16] wird bei einem Waschtisch aber 3 l/min für die kleinste und 6 l/min für die höchste Komfortstufe bei 40 °C verlangt (2.8 l/min resp. 5.6 l/min bei 42 °C).

Kleine Duschzapfung: 7 l/min bei 42 °C Zapftemperatur

Damit soll der Betriebszustand eines energiebewussten Verbrauchers (Sparbrause, nicht voll geöffnete Hahn oder niedrige Wassertemperatur) wiedergegeben werden. In DIN 4708-2 [17] werden 6.67 l/min für Sparduschen angegeben (bei ΔT 35 °C) und in VDI 6003 [16] werden 7 l/min bei 42 °C Zapftemperatur für eine Duschzapfung mit Komfortstufe I angegeben.

Grosse Duschzapfung: 14 l/min bei 42 °C Zapftemperatur

Die doppelte Menge einer kleinen Duschzapfung wird als grosse Duschzapfung bezeichnet, also 14 l/min bei einer Temperatur von 42 °C nach einer Beimischung von 10 °C. In DIN 4708-2 [17] werden 15 l/min für Normduschen angegeben (bei ΔT 35 °C), Recknagel et al. [14] hingegen geben nur 8.3 l/min für Duschen und 12.5 l/min für Badewannen an.

Um die oben angegebenen Zapfvolumenströme bei den jeweiligen Temperaturen zu erhalten, muss mit einer Beimischung von kaltem Wasser gerechnet werden. Der Zapfvolumenstrom am Modul liegt also in der Regel unter den oben angegebenen Werten, da noch kaltes Wasser beigemischt werden muss, um die gewünschten bzw. vorgegebenen 42 °C an der Zapfstelle zu erreichen. Diese Beimischung geschieht rein rechnerisch mit einer Kaltwassertemperatur von 10 °C. Je höher die Sekundärvorlauftemperatur, desto geringer fällt der Sekundärvolumenstrom am Modul aus. Die oben genannten Zapfvolumenströme stellen die relevantesten Betriebsbedingungen zum Testen des Verhaltens bei konstantem Zapfvolumenstrom dar.

6.1 Leistung

6.1.1 Definieren der Temperatureinstellungen

Grundsätzlich wurden alle Module mit den Grundeinstellungen getestet, einzig die Solltemperatur wurde auf die zwei festgelegten Temperaturen von 45 °C und 60 °C verstellt. Diese Einstellungen müssen aber nach einem klar definierten Ablauf vorgenommen werden. Bei Modulen mit elektronischer Regelung lässt sich die Solltemperatur einfach über den Regler eingeben. Bei mechanischen oder hydraulischen Regelungen kann die Solltemperatur zwar verstellt, aber oft nicht auf einen präzisen Wert eingestellt werden. Zur Vereinheitlichung der eingestellten Solltemperatur wurden alle Module bei der vom Hersteller angegebenen Nennleistung betrieben und dabei die Regelung so eingestellt, dass die gewünschte Solltemperatur genau erreicht wurde. Auch bei elektronisch geregelten Modulen wurden etwaige Abweichungen von der eingestellten Solltemperatur in diesem Betriebspunkt ausgeglichen.

Nach dem Einstellen der Solltemperatur wurde an der Regelung nichts mehr verändert und alle Messungen wurden mit denselben Einstellungen durchgeführt.

6.1.2 L1 Maximaler Sekundärvolumenstrom

Der maximale Sekundärvolumenstrom soll angeben, bei welchem Volumenstrom die geforderte Temperatur nicht mehr erreicht werden kann. Dazu muss eine Grenze definiert werden, bei der diese Bedingung als nicht mehr erfüllt gilt. Da aber nicht die Genauigkeit der Regelung beurteilt werden soll, sondern die Leistungsfähigkeit des Modules, wird diese Grenze bei 3K unter der eingestellten Solltemperatur festgelegt. Bei einer Temperatureinstellung von 45 °C wird die Grenze also bei 42 °C festgelegt, was auch der in der VDI 6003 für die meisten Bedingungen geforderten Temperatur entspricht.

Um diese Grenze zu bestimmen, wird also der Sekundärvolumenstrom schrittweise erhöht, bis die Sekundärvorlauftemperatur unter 42 °C fällt. Der Punkt, bei dem exakt 42 °C erreicht werden, wird aus einer linearen Interpolation zwischen den beiden Messpunkten ermittelt, bei denen die 42 °C gerade noch erreicht resp. gerade nicht mehr erreicht werden konnte. Die erreichte Sekundärvorlauftemperatur darf dazu bei beiden Messpunkten um nicht mehr als 2 K von 42 °C abweichen. Als Vergleichswert wird der erreichte maximale Sekundärvolumenstrom bei 45 °C Solltemperatur, 55 °C Primärvorlauftemperatur und 10 °C Sekundärrücklauftemperatur angegeben. Dieser wird mit $V'_{\max 45/55}$ bezeichnet. Der maximale Sekundärvolumenstrom wird aber auch bei einer Solltemperatur von 60 °C und jeweils bei drei unterschiedlichen Primärvorlauftemperaturen gemessen und in einem Diagramm aufgezeigt (Resultate in Abschnitt 7.1). Somit kann ermittelt werden, welcher maximale Sekundärvolumenstrom für unterschiedliche Wärmequellen mit unterschiedlichen Primärvorlauftemperaturen erreicht werden kann.

6.1.2.1 Korrektur der Bedingungen

Da der maximale Sekundärvolumenstrom trotz des eben beschriebenen Vorgehens nie bei vollständig gleichen Bedingungen gemessen wird (Abweichungen von ± 1 °C, z.B. in der Kaltwassertemperatur, werden akzeptiert), können Abweichungen zwischen den ermittelten maximalen Sekundärvolumenströmen auftreten, so dass die Ergebnisse strenggenommen noch immer nicht direkt miteinander verglichen werden können.

Unter einigen Annahmen kann man die gemessenen Werte aber rechnerisch auf standardisierte Bedingungen zurückführen. Dazu muss im Anschluss an die Messung die Frage beantwortet werden: Wie hoch wäre die Brauchwassertemperatur gewesen, wenn ideale bzw. definierte Bedingungen, d.h. keine Abweichung der tatsächlichen gemessenen Eintrittstemperaturen primär und sekundär, von den eingestellten (idealen) Temperaturen geherrscht hätten?

Dazu kann nach [14] folgender Zusammenhang verwendet werden:

$$1) \quad \Phi = \frac{\Delta T_s}{\Delta T_{max}}$$

Hier stellt Φ die Betriebscharakteristik (oder Effizienz) des Wärmeübertragers, ΔT_{max} die Temperaturdifferenz zwischen beiden Eintrittten und ΔT_p die Temperaturdifferenz auf der Primärseite dar. Die Betriebscharakteristik ist dabei abhängig von der Geometrie des Wärmeübertragers und von den Kapazitätsströmen auf beiden Seiten. Zum Berechnen der Austrittstemperaturen bei den theoretisch (Th) gewünschten bzw. als Standard definierten Eintrittstemperaturen und denselben Strömungsbedingungen am WÜ kann die gemessene (empirische, Emp) Betriebscharakteristik bei diesen Strömungsbedingungen verwendet werden unter der Annahme, dass $\Phi_{Emp} = \Phi_{Th}$:

$$2) \quad \Delta T_{p,Th} = \Delta T_{max,Th} \Phi_{Emp} = \Delta T_{max,Th} \frac{\Delta T_{p,Emp}}{\Delta T_{max,Emp}}$$

Bei grossen übertragenen Leistungen (dh. bei grossen Volumenströmen) können die Wärmeverluste vernachlässigt werden, da sie viel kleiner als die übertragenen Leistungen sind. Es kann also damit gerechnet werden, dass die auf einer Seite abgegebene Leistung vollständig auf der anderen Seite aufgenommen wird.

$$3) \quad \begin{aligned} \dot{c}_s \Delta T_{s,Th} &= \dot{c}_p \Delta T_{p,Th} \\ \dot{c}_s \Delta T_{s,Emp} &= \dot{c}_p \Delta T_{p,Emp} \end{aligned}$$

Wobei \dot{c}_s den Kapazitätsstrom auf der Sekundärseite bezeichnet. Mit dem Ziel, $T_{s,Th}$ freizustellen, folgt:

$$4) \quad \Delta T_{p,Th} = \Delta T_{max,Th} \frac{\Delta T_{p,Emp}}{\Delta T_{max,Emp}} = \Delta T_{s,Th} \frac{\dot{c}_p}{\dot{c}_s} = \Delta T_{sec,Th} \frac{\Delta T_{p,Emp}}{\Delta T_{s,Emp}}$$

$$5) \quad \Leftrightarrow \Delta T_{s,Th} = \Delta T_{max,Th} \frac{\Delta T_{s,Emp}}{\Delta T_{max,Emp}}$$

Somit kann die Brauchwassertemperatur, die bei standardisierten Bedingungen für die beiden Eintrittstemperaturen zu erwarten wäre, wie folgt anhand der gemessenen Werte sowie der beiden definierten (theoretischen) Standardbedingungen für die Eintrittstemperaturen primär und sekundär bestimmt werden:

$$6) \quad T_{sV,Th} = (T_{pV,Th} - T_{sR,Th}) \frac{\Delta T_{s,Emp}}{\Delta T_{max,Emp}} + T_{sR,Th}$$

6.1.3 L2 Minimaler Sekundärvolumenstrom

Neben dem maximalen Sekundärvolumenstrom ist auch der minimale Sekundärvolumenstrom ein entscheidender Leistungsparameter. Als minimaler Sekundärvolumenstrom V'_{min} wird in diesem Bericht der kleinste Sekundärvolumenstrom bezeichnet, bei dem eine Erwärmung des sanitären Warmwassers stattfindet. Diese Bedingung gilt als erfüllt, wenn die mittlere Sekundärvorlauftemperatur mehr als 35 °C beträgt. Dies entspricht der geringsten Anforderung in der VDI 6003 [16]. Der minimale Sekundärvolumenstrom, den ein Frischwassermodul noch erwärmen kann, ist dabei hauptsächlich von der im Modul verwendeten Sensorik abhängig, welche den Sekundärvolumenstrom detektiert. Er variiert nur selten mit unterschiedlichen Einstellungen am Modul oder mit unterschiedlichen Primärvorlauftemperaturen. Aus diesem Grund kann auf eine Messung des minimalen Sekundärvolumenstroms bei unterschiedlichen Bedingungen verzichtet werden. Es wird also nur eine Messung bei den wichtigsten Bedingungen (Solltemperatur 45 °C, Primärvorlauftemperatur 55 °C) durchgeführt. Dabei wird der Sekundärvolumenstrom zunächst auf 1 l/min eingestellt und schrittweise um 1 l/min erhöht, bis eine Erwärmung des Brauchwassers auf über 35 °C erreicht wird. Zur Beurteilung werden die letzten 60 s einer 120 s dauernder Zapfung ausgewertet.

Somit wird der minimale Sekundär volumenstrom als Leistungsparameter und abgelöst von Komfortkriterien definiert. Bei einer Zapfung mit minimalem Sekundär volumenstrom können starke Temperaturschwankungen auftreten, welche den Komfort einschränken. Die Beurteilung des Trinkwarmwasserkomforts wird im folgenden Abschnitt bearbeitet.

6.2 Komfort

6.2.1 Temperaturschwankungen

6.2.1.1 Einfluss von Rohrleitungen

Temperaturschwankungen am Modulaustritt haben sich als wichtiges Kriterium zur Beurteilung des Komforts erwiesen. Es ist aber umstritten, wie stark sich Temperaturschwankungen am Modulaustritt auf die Situation an der Zapfstelle auswirken. Ein entscheidender Unsicherheitsfaktor ist hierbei der dämpfende Einfluss der Rohrleitung zwischen Modul und Zapfstelle. Es konnten zu diesem Thema keine vorgängigen Untersuchungen gefunden werden, die es erlauben, diesen Einfluss verlässlich zu quantifizieren. Will man eine praxisrelevante und somit auch aussagekräftige Beurteilung von Temperaturschwankungen bei Frischwassermodule vornehmen, muss jedoch geklärt werden, wie stark der Einfluss unterschiedlicher Rohrleitungen und – längen ist. Dazu tragen hauptsächlich Effekte der Wärmeübertragung (von Fluid, Rohrmantel und Umgebung) und Wärmespeicherung (Fluid und Rohrmantel) bei. Diese sind bekannt und modellierbar. In der Umgebung TRNSYS [7] existiert bereits ein Rohrmodell (Type 604, aus TESS Hydraulics library), welches die oben genannten Parameter berücksichtigt. Dieses wurde modifiziert, um den Einfluss unterschiedlicher Materialien und deren Oberflächenrauheit ϵ genauer differenzieren zu können.

$$7) \quad Nu = \frac{\left(\frac{f}{8}\right)(Re-1000)Pr}{1+12.7\left(\frac{f}{8}\right)^{0.5}\left(Pr^{\frac{2}{3}}-1\right)} \quad \text{mit } f \text{ aus: } \frac{1}{\sqrt{f}} = -1.8 \log\left(\frac{6.9}{Re} + \left(\frac{\epsilon}{3.7D}\right)^{1.11}\right)$$

Dabei wird neu die Rauheit der Rohroberfläche ϵ (Einheit: Meter) als zusätzlicher Parameter eingegeben, D beschreibt den Rohrrinnendurchmesser (Einheit: Meter). Die für ϵ verwendeten Werte betragen: $1.5 \cdot 10^{-5}$ m für Kupfer und $0.7 \cdot 10^{-5}$ m für Polyethylen. Zur experimentellen Validierung des Rohrmodells wurden Labormessungen mit drei unterschiedlichen Rohrleitungen (mit und ohne Isolation) durchgeführt.

- Polyethylen temperaturbeständig (PEX 16 x 2.2 mm)
- Kupferleitung (Cu 15 x 1 mm)
- Kupferleitung (Cu 22 x 1 mm)

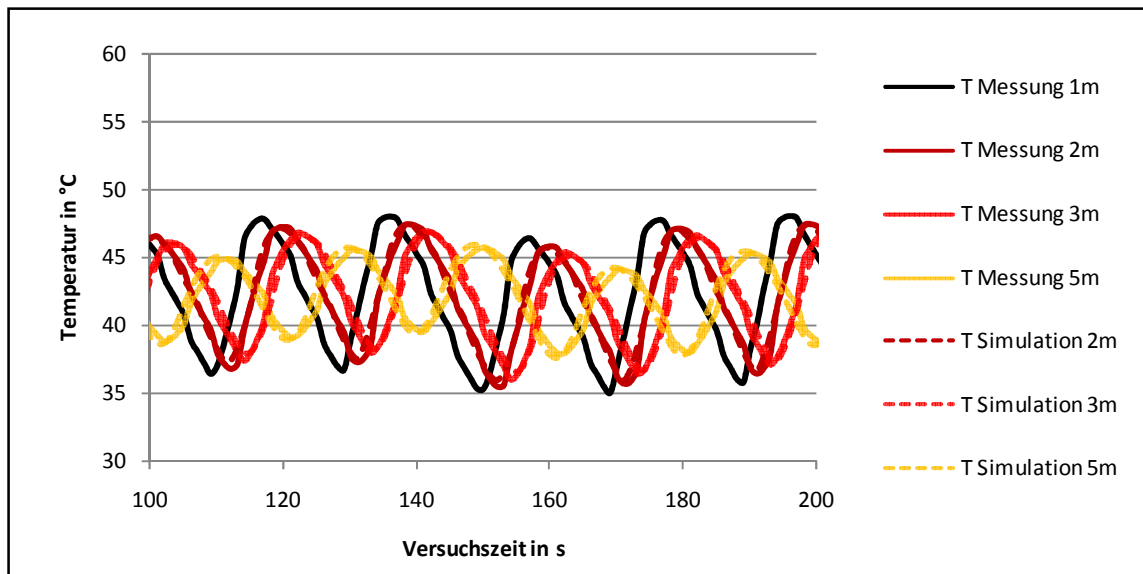


Abbildung 9 Der dämpfende Einfluss einer PEX 16 x 2.2 mm Rohrleitung wurde experimentell bestimmt und mit einem Simulationsmodell numerisch ermittelt. Dabei konnte eine sehr gute Übereinstimmung von gemessenen und simulierten Daten festgestellt werden.

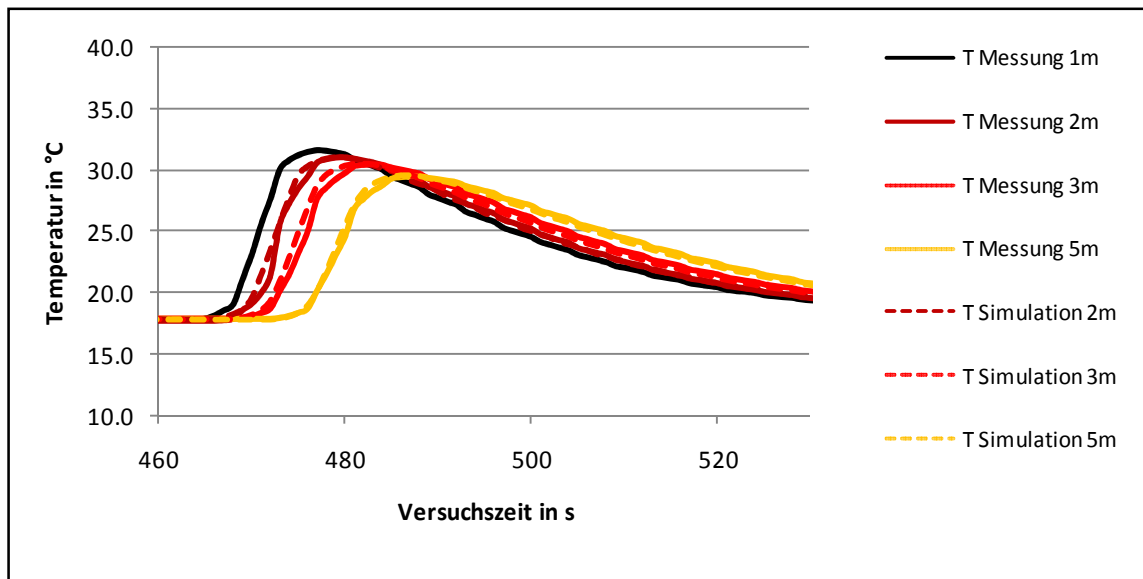


Abbildung 10 Der dämpfende Einfluss einer PEX 16 X 2.2 mm Rohrleitung wurde experimentell bestimmt und mit einem Simulationsmodell numerisch ermittelt. Dabei konnte eine sehr gute Übereinstimmung von gemessenen und simulierten Daten festgestellt werden.

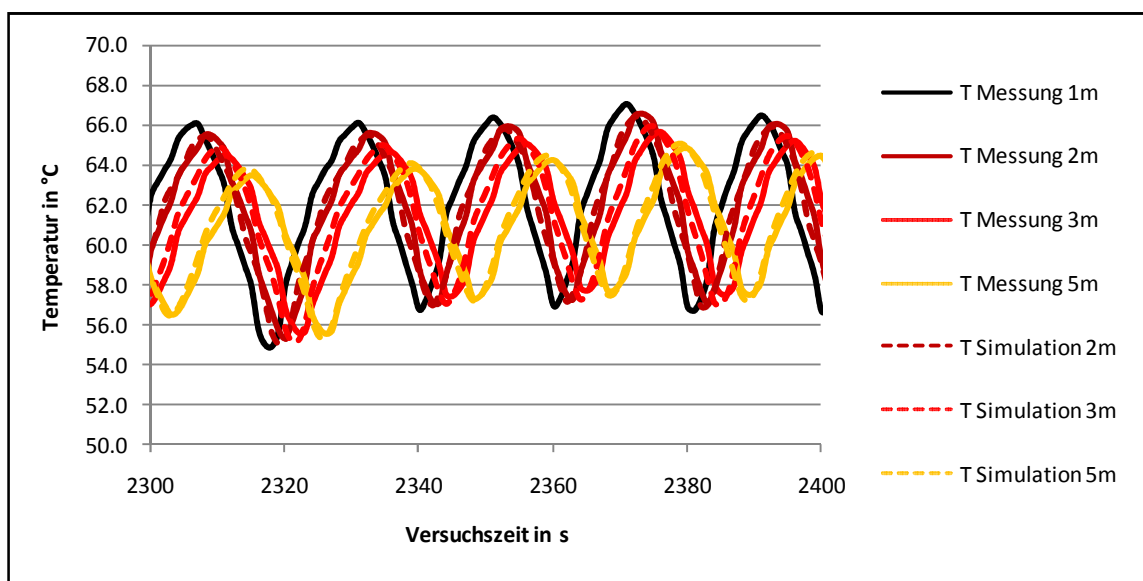


Abbildung 11 Der dämpfende Einfluss einer Cu 22 x 1 mm Rohrleitung wurde experimentell bestimmt und mit einem Simulationsmodell numerisch ermittelt. Dabei konnte eine sehr gute Übereinstimmung von gemessenen und simulierten Daten festgestellt werden.

Dabei wurden die Temperaturen jeweils am Eintritt und nach 1,2,3 und 5 m Rohrlänge gemessen. Dieselbe Anordnung wurde parallel mit dem Simulationsprogramm TRNSYS mit gleichen Eintritts- und Umgebungsbedingungen nachsimuliert (Beispiel in Abbildung 9 bis Abbildung 11). Es wurde dabei der modifizierte Typ 604 verwendet, wobei die physikalischen Materialeigenschaften der Rohre vorgegeben wurden. Es wurde in den Messungen festgestellt, dass der massive Messinganschluss (mit Halterung für Temperaturfühler) direkt am Modul einen zusätzlichen dämpfenden Einfluss auf Temperaturschwankungen ausübt. Aus diesem Grund weicht die erste Messung (1 m) stark von den simulierten Werten ab. Daher wurde für die weiteren Punkte die gemessene Temperatur nach 1 m als Starttemperatur verwendet. Die drei folgenden Messpunkte (2 m, 3 m, und 5 m) werden mit den Simulationen verglichen. Im Bereich der untersuchten Temperaturschwankungen (Sekundärstrom 2-10 l/min, Amplitude der Schwankung

< 60 °C, Dauer der Schwankung 6-30 s) konnte eine sehr gute Übereinstimmung von simulierten und gemessenen Daten festgestellt werden.

Aufgrund der guten Übereinstimmung von gemessenen und simulierten Daten wurden weitere Parametervariationen rein numerisch durchgeführt. Dabei wurden auch Schwankungen mit einer kurzen Dauer ab 2s untersucht, welche mit der zur Verfügung stehenden Installation nicht experimentell untersucht werden konnten. Folgende Parameter wurden genauer betrachtet:

Rohrleitung: Es wurden Kupferrohre mit 12 x 1mm, 15 x 1mm und 22 x 1 mm und PEX-Rohre mit 12 x 1.8 mm, 16 x 2.2 mm und 25 x 3.5 mm Durchmesser implementiert und die Dämpfungsfaktoren nach 1, 2, 3, 5, 10, 20 und 30 m Rohrleitung ermittelt. Die verwendeten Rohre entsprechen den Empfehlungen des SVGW für Belastungswerte von ca. 12..55 l/min.

Amplitude: Es wurden Amplituden im Bereich von 2..20 °C simuliert. Dabei wurde festgestellt, dass die Amplitude einer Temperaturschwankung nur einen geringen Einfluss auf die Dämpfung der Schwankung hat. Somit kann auf eine weitere Variation der Amplitude verzichtet werden. Für alle weiteren Simulationen wurden Temperaturschwankungen mit einer Amplitude von 5 °C verwendet.

Volumenstrom: Bei der Dämpfung von Temperaturschwankungen spielt der Volumenstrom in zweierlei Hinsicht eine entscheidende Rolle. Zum einen vergrößert sich der Wärmeübergang vom Fluid zu Rohr bei einem erhöhten Volumenstrom, was zu einer verstärkten Dämpfung führt. Zum anderen verkürzt sich dadurch die Verweildauer im Rohr, was dann aber zu einer geringeren Dämpfung führt. Diese beiden entgegengesetzten Phänomene führen zu einem komplexen Einfluss, welcher anhand von zahlreichen Simulationen genauer untersucht wurde.

Dauer: Auch die Dauer einer Temperaturschwankung (resp. Frequenz einer Schwingung) hat einen starken Einfluss auf deren Dämpfung durch eine Rohrleitung. Kurze Schwankungen werden dabei deutlich stärker gedämpft als lange. Es wurden Schwankungen mit einer Dauer von 2..30 s untersucht.

Form: Die Form der Temperaturschwankung hat einen Einfluss auf die Geschwindigkeit der Dämpfung Ihrer Amplitude. Dabei wurden kontinuierliche Temperaturschwankungen in Form einer Sinusfunktion, Überschwinger mit der Form einer *Glockenkurve* und einer *Rechteckfunktion* betrachtet.

6.2.1.2 Beschreiben von Temperaturschwankungen

In der Realität auftretenden Temperaturschwankungen sind meist geprägt von einem Über- oder Unterschwingen, welcher sich mit der Zeit ausregelt. Diese Charakteristik liegt zwischen den beiden simulierten Fällen von Sinusschwankung und Überschwinger in der Form einer Glockenkurve. Die Schwierigkeit besteht darin, für die unterschiedlichen Formen von Temperaturschwankungen eine einheitliche Definition von Dauer und Amplitude zu finden. Folgende Regelungen wurden dafür definiert:

Amplitude: Die Amplitude einer Temperaturschwankung bezeichnet die maximale Temperaturdifferenz von aufeinanderfolgenden Über- und Unterschwingern. Bei Lastwechseln oder Störungen im Zapfprofil sind das meist die ersten Über- und Unterschwinger. Bei kontinuierlichen Schwankungen (also Schwingungen) wird die maximale Abweichung bei aufeinanderfolgenden Über- und Unterschwingern als Amplitude bezeichnet (siehe Abbildung 12). Falls die auftretende Schwankung von einer übergeordneten Schwankung mit längerer Dauer überlagert wird (siehe Abbildung 13), muss zwischen zwei Fällen unterschieden werden. Dazu wird eine ‚absolute maximale‘ Abweichung mit der Temperaturdifferenz bei aufeinanderfolgenden Über- und Unterschwingern verglichen. Wenn die absolute Temperaturdifferenz mehr als die doppelte Differenz bei aufeinanderfolgenden Über- und Unterschwingern beträgt, so wird diese als dominant bezeichnet und als Amplitude weiterverwendet. Wenn umgekehrt aber die Differenz bei aufeinanderfolgenden Über- und Unterschwingern mehr als die Hälfte der absoluten Temperaturdifferenz beträgt, so wird die kürzere Schwankung als wichtiger gewertet und die maximale Differenz bei direkt aufeinanderfolgenden Über- und Unterschwingern weiter als Amplitude der Temperaturschwankung verwendet (siehe Abbildung 13). Bei Änderungen der Zapftemperatur, welche ohne Über- und Unterschwinger vonstatten geht (beispielsweise bedingt durch einen

Lastwechsel), wird die Differenz zwischen Anfangs – und Endtemperatur als Amplitude bezeichnet.

Dauer: Die Dauer einer Temperaturschwankung Δt_D bezeichnet die Zeit zwischen zwei aufeinanderfolgenden Über- und Unterschwingern. Ist es auf Grund des Temperaturverlaufes nicht möglich, zwei aufeinanderfolgende Minima und Maxima zu identifizieren, so wird stattdessen die Full Width at Half Maximum (FWHM) angegeben. Dies bezeichnet also die Zeit, während der die halbe Amplitude über- oder unterschritten wird (siehe Abbildung 14). Tritt eine Überlagerung von unterschiedlichen Schwankungen auf, so wird eine Fallunterscheidung wie bei der Definition der Amplitude durchgeführt (siehe vorangehender Abschnitt und Abbildung 13). Bei Änderungen der Sekundärvorlauftemperatur wird eine unendliche Dauer der Schwankung angenommen, welche zu keiner Dämpfung durch die Rohrleitung führen kann.

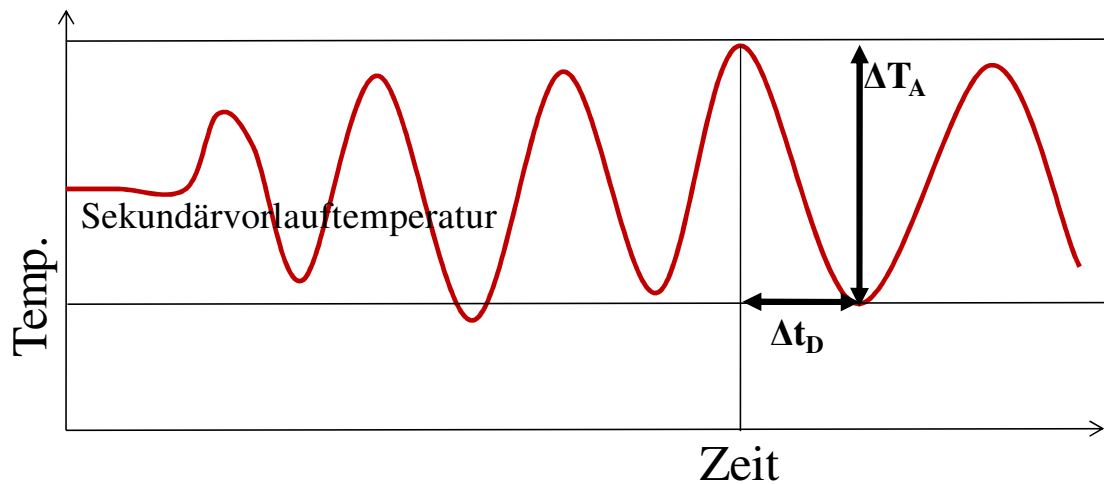


Abbildung 12 Die Amplitude ΔT_A von Temperaturschwankungen bezeichnet die grösste Temperaturdifferenz von aufeinanderfolgenden Unter- und Überschwingern (oder umgekehrt). Das Zeitintervall zwischen diesen beiden Scheitelpunkten wird als Dauer der Temperaturschwankung bezeichnet.

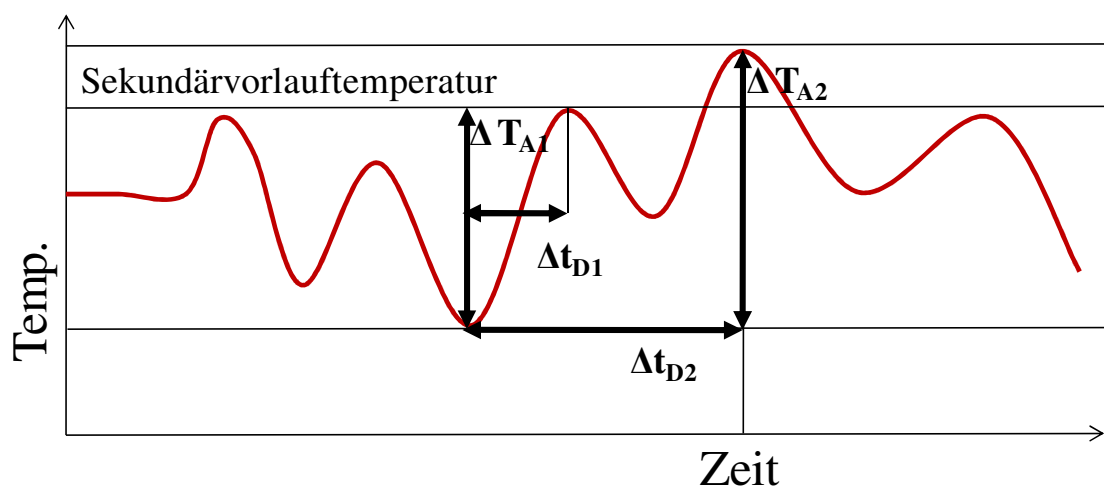


Abbildung 13 Bei einer Überlagerung von unterschiedlichen Schwankungen werden zwei Fälle unterschieden: 1. $\Delta T_{A1} > \Delta T_{A2}/2$ herkömmliche Definition $\Delta T_A = \Delta T_{A1}$; $\Delta t_D = \Delta t_{D1}$ 2. $\Delta T_{A1} < \Delta T_{A2}/2$ die übergeordnete lange Schwankung ist wichtiger $\Delta T_A = \Delta T_{A2}$; $\Delta t_D = \Delta t_{D2}$ wobei Δt_{D2} die Zeit zwischen den beiden absoluten Scheitelpunkten darstellt.

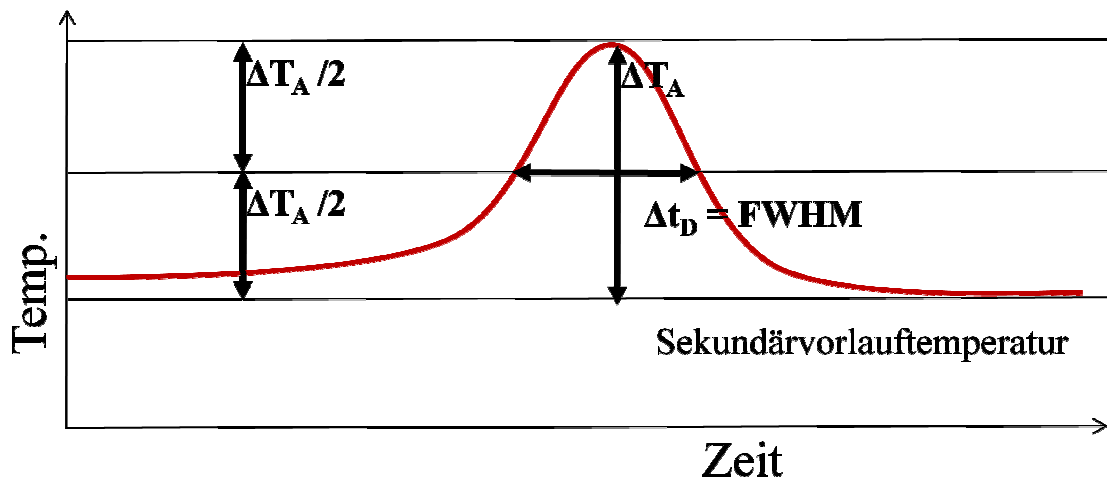


Abbildung 14 Wenn auf Grund der Form der Temperaturschwankung keine Scheitelpunkte bestimmt werden können, wird stattdessen die Full Width at Half Maximum (FWHM) als Dauer einer Schwankung bezeichnet.

6.2.1.3 Kategorien

Da keine einfache, reduzierte Formel zur Dämpfung von Temperaturschwankungen gefunden werden konnte (dazu ist der Wärmeübergang von Fluid zu Rohrmantel zu komplex und von vielen Parametern abhängig), wird vorgeschlagen, einen exemplarischen Fall auszuwählen und Temperaturschwankungen an einer virtuellen Zapfstelle nach einer Referenzleitung zu beurteilen. In VDI 6003 [16] werden Kriterien zur Klassifizierung von Temperaturänderungen dargestellt, welche sich auf die Wassertemperatur an der Zapfstelle beziehen, und auch in der DIN EN 13203-1 [18] werden Komfortklassen angegeben. Dabei wird in beiden Fällen für die beste Beurteilung eine Schwankung von weniger als 2 K verlangt und ab einer Schwankung von 5 K wird die schlechteste Beurteilung vorgenommen. In Anlehnung an diese beiden Quellen wird wurden in [19] vier Stufen eingeführt welche unterschiedliche exemplarische Fälle darstellen. Dabei wird eine Leitung (5 m Länge, PEX 16 x 2.2 mm) als ‚minimale Anschlussleitung‘ angenommen und vorausgesetzt, dass in jedem Fall äquivalente schwingungsdämpfende Elemente bis zur ersten Zapfstelle eingesetzt werden. Als Normalfall wird aber angenommen, dass dämpfenden Elemente (also Rohrleitung, Verzweigungsstücke, Duscharmaturen usw.) äquivalent zu einer 10 m langen Rohrleitung (Cu 22 x 1 mm) eingebaut werden. Daraus ergab sich folgende Klassifizierung:

Keine Störenden Schwankungen: Nach einer minimalen Anschlussleitung (von 5 m PEX 16 x 2.2 mm) schwankt die Temperatur um weniger als 2 K.

Im Normalfall keine störenden Schwankungen: Nach einer typischen Anschlussleitung (von 10 m Cu 22 x 1 mm) schwankt die Temperatur um weniger als 2 K.

Störenden Schwankungen: Nach einer typischen Anschlussleitung (von 10 m Cu 22 x 1 mm) schwankt die Temperatur um weniger als 5 K.

Starke Schwankungen: Nach einer typischen Anschlussleitung (von 10 m Cu 22 x 1 mm) schwankt die Temperatur um mehr als 5 K.

Eigene Untersuchungen haben aber gezeigt, dass einige Personen auch schon auf kleinere Temperaturschwankungen durchaus empfindlich reagieren. Die Kriterien aus den beiden oben zitierten Normen sind hauptsächlich auf Gasthermen ausgelegt, bei denen Verbraucher gewisse Temperaturschwankungen in Kauf nehmen. Da Frischwassermodule aber eher als Konkurrenz zu trinkwasserspeichernden Systemen, bei denen üblicherweise eine annähernd konstante Temperatur erreicht wird, zu betrachten sind, wird eine zusätzliche Klasse eingeführt:

Eine **konstante Temperatur** wird erreicht. Dies gilt, wenn die Temperatur unabhängig von der angeschlossenen Leitung um nicht mehr als 1K variiert.

Bei den umfangreichen Tests von Frischwasserstationen (Resultate weiter unten) hat sich gezeigt, dass die beiden oben beschriebenen Klassen ‚*keine störenden Schwankungen*‘ und ‚*im Normalfall keine störenden Schwankungen*‘ sehr selten unterschieden werden können. In der Praxis treten also Schwankungen auf, die entweder schon als ‚*störende Schwankungen*‘ klassifiziert werden, oder dann direkt als ‚*keine störenden Schwankungen*‘ klassifiziert werden können. Aus diesem Grund wird vorgeschlagen, in der Endauswertung auf eine Unterscheidung zwischen diesen beiden Klassen zu verzichten. Folgende Klassen werden also für die Endauswertung berücksichtigt:

Tabelle 1 Klassifizierung von Temperaturschwankungen in Anlehnung an VDI 6003 und DIN EN 13203-1 und an Empfindlichkeitsmessungen des SPF.

Klasse	Auswirkung, Bezeichnung	Leitung	Kriterium nach Leitung
A	Temperatur konstant	keine	$\Delta T < 1 \text{ }^{\circ}\text{C}$
B	Im Normalfall keine störenden Schwankungen	10 m Cu 22 x 1 mm	$\Delta T < 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$
C	störende Schwankungen	10 m Cu 22 x 1 mm	$\Delta T < 5 \text{ }^{\circ}\text{C}$
D	starke Schwankungen	10 m Cu 22 x 1 mm	$\Delta T \geq 5 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Zum Einteilen von realen Schwankungen in die oben genannten Kategorien wurden eine Vielzahl von Temperaturschwankungen simulationstechnisch ausgewertet. Dabei konnten Tabellen generiert werden, welche die maximal erlaubte Amplitude einer Temperaturschwankung definieren um in eine der oben genannten Kategorien zu gelangen (Beispiel in Tabelle 2). Dabei ändert sich die erlaubte Amplitude für unterschiedliche Sekundärvolumenströme und unterschiedliche Dauer einer spezifischen Schwankung. Kontinuierliche Schwankungen werden stärker gedämpft als reine Über- oder Unterschwinger, welche nach oben genannten Kriterien beurteilt werden (Festlegung der Dauer und Amplitude). In der Realität treten meist Mischformen von reinen Überschwingern und kontinuierlichen Schwankungen auf, was eine eindeutige Unterscheidung oft unmöglich macht. Aus diesem Grund werden zur Beurteilung für alle Temperaturschwankungen die Zahlen für Unter- und Überschwinger verwendet. Dabei wird in Kauf genommen, dass kontinuierliche Temperaturschwankungen tendenziell eher zu schlecht bewertet werden, da sie in der Realität etwas stärker gedämpft werden als Überschwinger. Zusätzlich muss auch die Beimischung von kaltem Wasser an der Zapfstelle berücksichtigt werden: Hauptsächlich bei hohen Sekundärvorlauftemperaturen wird an der Zapfstelle kaltes Wasser mit einer konstanten Temperatur (Annahme 10 °C) beigemischt, wodurch auch die Temperaturschwankungen vermindert werden. Die Amplitude der Schwankung ΔT_A reduziert sich also um den Anteil des beigemischten Kaltwassers um eine realistische Zapftemperatur (Annahme 42 °C) zu erhalten. Somit muss für die Beurteilung der Temperaturschwankungen die reduzierte Amplitude ΔT_{AR} verwendet werden:

$$8) \quad \Delta T_{AR} = \Delta T_A * \frac{32 \text{ }^{\circ}\text{C}}{(T_{SV} - 10 \text{ }^{\circ}\text{C})}$$

Wobei $\overline{T_{SV}}$ die mittlere Sekundärvorlauftemperatur während der betrachteten Zapfung darstellt.

Tabelle 2 Grenzwerte zur Klassifizierung von Temperaturschwankungen am Austritt eines FWM für unterschiedliche Volumenströme in Abhängigkeit der Dauer eines Über- oder Unterschingers. Die gemessenen *reduzierte Amplitude* ΔT_{AR} muss unter dem in dieser Tabelle angegebenen Grenzwert in Kelvin liegen, so dass *im Normalfall keine störenden Schwankungen* (Klasse A) zu erwarten sind. Ausführliche Tabellen mit den Grenzwerten für die anderen Komfortklassen werden im Anhang der gegeben.

Dauer der Schwankung in s	Durchfluss in l/min														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	14	16	18	20
2	33.7	17.1	13.7	11.6	10.2	9.2	8.4	7.7	7.2	6.8	6.1	5.6	5.2	4.9	4.6
4	16.4	9.1	7.4	6.4	5.7	5.2	4.8	4.5	4.2	4.0	3.7	3.4	3.2	3.1	3.0
6	11.3	6.6	5.5	4.8	4.3	4.0	3.7	3.5	3.3	3.2	3.0	2.8	2.7	2.6	2.5
8	8.9	5.5	4.6	4.0	3.6	3.4	3.2	3.0	2.9	2.8	2.6	2.5	2.4	2.4	2.3
10	7.5	4.8	4.0	3.6	3.3	3.0	2.9	2.7	2.6	2.6	2.4	2.4	2.3	2.3	2.2
15	5.7	3.9	3.3	3.0	2.7	2.6	2.5	2.4	2.3	2.3	2.2	2.2	2.2	2.1	2.1
20	4.8	3.4	2.9	2.7	2.5	2.4	2.3	2.3	2.2	2.2	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1
25	4.3	3.1	2.7	2.5	2.4	2.3	2.2	2.2	2.2	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.0
30	3.9	2.9	2.6	2.4	2.3	2.2	2.2	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.0	2.0	2.0

6.2.2 K1 Temperaturschwankungen bei konstantem Sekundärvolumenstrom

Temperaturschwankungen werden bei einer *Händewaschzapfung*, einer *kleinen Duschzapfung* und einer *grossen Duschzapfung* bei unterschiedlichen Primärvorlauftemperaturen gemessen. Dabei wird ein konstanter Zapfvolumenstrom der jeweiligen Zapfung eingestellt während fünf Minuten gewartet. Dies wird nach einminütiger Pause zweimal wiederholt. Ausschlaggebend sind für jeden Zapfvolumenstrom die Temperaturschwankungen während der letzten Minute der dritten Zapfung. Die Temperaturschwankungen bei konstantem Sekundärvolumenstrom werden bei einer Temperaturüberhöhung von 5 K und 10 K, sowie bei einer Primärvorlauftemperatur von 90 °C gemessen:

Solltemperatur 45 °C: 50, 55, 90 °C

Solltemperatur 60 °C: 65, 70, 90 °C

Anhand der oben beschriebenen Kriterien werden auftretende Temperaturschwankungen in die entsprechend Komfortklasse eingeteilt.

6.2.3 K2 Temperaturschwankungen bei Störungen

In Tabelle 3 wird ein Zapfprofil dargestellt bei welchem die gängig auftretenden Störungen abgefahren werden. Dabei sind die Zapfvolumenströme welche an der Zapfstelle auftreten angegeben. Der Zapfvolumenstrom am Modul muss in Abhängigkeit der auftretenden Sekundärvorlauftemperatur angepasst werden um unter einer rechnerischen Beimischung von Kaltwasser eine Zapftemperatur von 42 °C zu erhalten. Unabhängig von der Charakteristik des Modules wird der Test also bei derselben Leistung durchgeführt. Die Anpassung des Sekundärvolumenstromes kann anhand der Messungen der *Sekundärvorlauftemperatur bei unterschiedlichen, aber jeweils konstanten Betriebsbedingungen* (folgender Abschnitt) erfolgen, welche einen Zusammenhang zwischen Zapfvolumenstrom und Sekundärvorlauftemperatur aufzeigen.

Tabelle 3 Zapfprofil zum Beurteilen der Temperaturschwankungen nach gängigen Störungen

V'_{Zapf} in l/min	Zeit in s	Bezeichnung	V'_{Zapf} in l/min	Zeit in s	Bezeichnung
7 ^[1]	60	Kleine Duschzapfung	0	120	Pause
0 ^[1]	300	Pause	14	120	Grosse Duschzapfung
3	120	Waschbecken	7	120	Kleine Duschzapfung
0	120	Pause	27 ^[2]	120	Maximaler Sprung
7	120	Kleine Duschzapfung	7	120	Kleine Duschzapfung
12	5	Schnapsglaszapfung	0	5	Kurze Pause
7	120	Kleine Duschzapfung	7	120	Kleine Duschzapfung
14	120	Grosse Duschzapfung	0	120	Pause
19	5	Schnapsglaszapfung			
14	120	Grosse Duschzapfung			
0	5	Kurze Pause			
14	120	Grosse Duschzapfung			

[1] Dient zur Initialisierung und wird nicht aufgezeigt

[2] Wenn die Leistung des Modules nicht ausreicht um 27 l/min zu erreichen, dann soll diese Stufe bei maximalem Sekundärvolumenstrom durchgeführt werden.

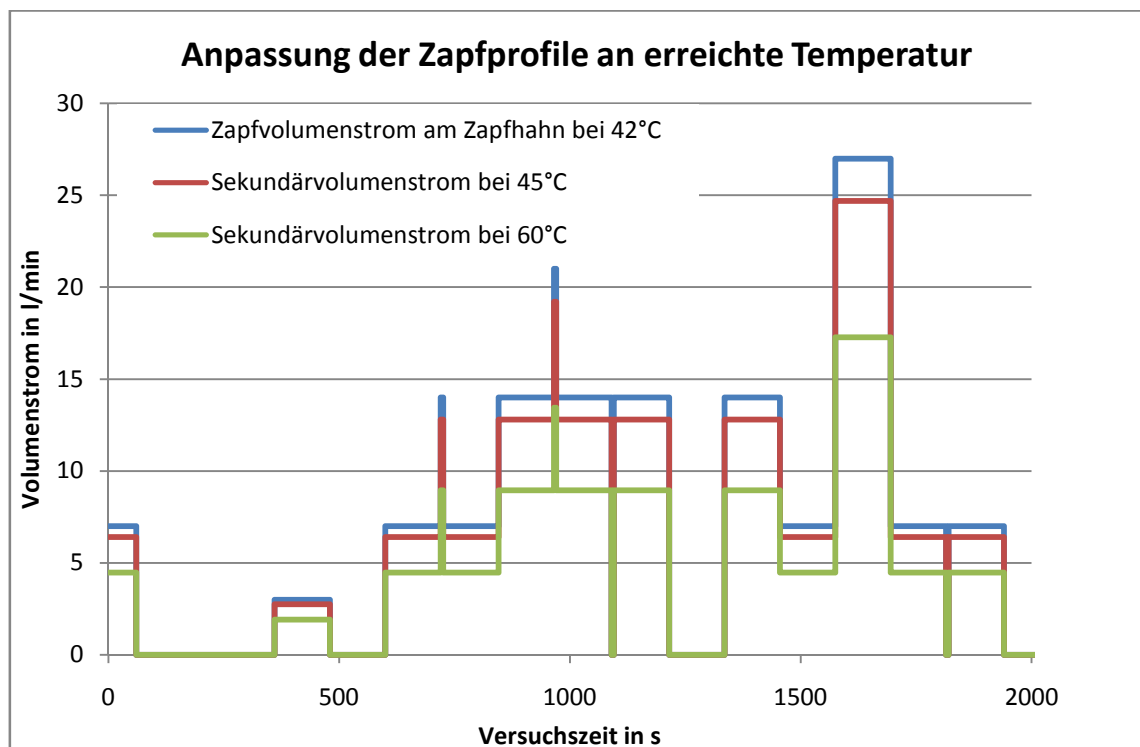


Abbildung 15 Beispiel von Zapfprofilen welche an das Verhalten eines Modules angepasst wurden, hier ein Modul das konstant 45 °C resp. 60 °C warmes Wasser liefert.

Nach jeder der somit abgefahrenen Störungen können Temperaturschwankungen auftreten welche anhand der oben beschriebenen Kriterien in unterschiedliche Komfortklassen eingeteilt

werden könne. Dabei wird auch angegeben nach welcher Zeit (Zeit nach Beginn der Störung) eine gewisse Komfortklasse erreicht wird.

6.2.4 K3 Sekundärvorlauftemperatur bei unterschiedlichen, aber jeweils konstanten Betriebsbedingungen

Ein Kriterium zur Beurteilung des Warmwasserkomforts ist die Konstanz der Sekundärvorlauftemperatur bei unterschiedlichen, aber jeweils konstanten Bedingungen. Ein Verändern des Sekundärvolumenstroms, der meist durch dauerhaftes, d.h. über einen längeren Zeitraum bestehendes Zu- oder Wegschalten einer zusätzlichen Zapfstelle auftritt, kann eine Veränderung der Sekundärvorlauftemperatur zur Folge haben. Somit wird dadurch ggf. ein manuelles Nachregeln der Kaltwasser-Beimischung an der Zapfstelle nötig. Die Veränderung der Sekundärvorlauftemperatur lässt sich anhand von gemessenen Kurven darstellen (Beispiele in Abschnitt 7.2.3). Dazu wird der Sekundärvolumenstrom schrittweise erhöht (1, 2, 3, 5, 7, 10, 20 und - falls möglich - 30 und 40 l/min). Jeder Volumenstrom wird während 120 Sekunden getestet und die mittlere Sekundärvorlauftemperatur der hinteren 60 Sekunden ausgewertet. Dieser Vorgang wird sechs mal durchgeführt (50, 55, 90 für eine Solltemperatur von 45 °C resp. 65, 70, 90 °C für eine Solltemperatur von 60 °C).

6.3 Energieeffizienz

6.3.1 E1 Elektrischer Stromverbrauch

Die Bereitstellung von Brauchwarmwasser mit einem Frischwassermodul benötigt (verglichen mit der Bevorratung von Trinkwarmwasser) zusätzlich elektrische Energie für die Pumpe und auch für die Regelung. Die dafür benötigte Energie soll auf Jahresbasis quantifiziert werden, um sie in die Bewertung und den Vergleich verschiedener Module einbeziehen zu können.

6.3.1.1 Abschätzen des Jahresverbrauches

Um den elektrischen Energieverbrauch mit den anderen in der Testprozedur ermittelten energetischen Größen vergleichen zu können, soll auf eine vereinfachte Art und Weise ein jährlicher Energieverbrauch abgeschätzt werden. Dazu wurde ein realitätsnahes Zapfprofil verwendet, welches mit der Software DHWcalc [20] stochastisch auf Minutenbasis für je ein Jahr generiert wurden. Dabei wurde mit einem Tagesverbrauch von 200 l bei einer Verbrauchstemperatur von 42 °C gerechnet und die in dieser Prozedur verwendeten Zapfvolumenströme eingegeben. Ansonsten wurden die Standardeinstellungen des Programmes verwendet:

Tabelle 4 Einstellungen im Programm DHWcalc zum Generieren eines realistischen Jahreszapfprofils.

	Kat. 1	Kat. 2	Kat. 3	Kat. 3
Zapfvolumenstrom [l/h]	180	360	840	420
Dauer [min]	1	1	10	5
Anteil [%]	14	36	10	40
Standardabweichung [l/h]	1210	120	12	24

Mit diesem Jahreszapfprofil kann ein Histogramm mit der Häufigkeitsverteilung von unterschiedlichen Zapfvolumenströmen erstellt werden (siehe Abbildung 16). Dieses Histogramm gibt die Häufigkeit der auftretenden Zapfvolumenströme an. Mit der Annahme, dass bei gleichen Zapfvolumenströmen immer dieselbe elektrische Leistung bezogen wird, kann der Jahresstromverbrauch eines Modules vereinfacht abgeschätzt werden. Dazu kann der Stromverbrauches bei unterschiedlichen Zapfvolumenströmen mit diesem Histogramm gewichtet werden. Um die Unsicherheiten bei der Messung des Stromverbrauches zu vermindern, sollte auf eine möglichst lange Messzeit bei quasikonstanten Bedingungen zurückgegriffen werden. Daher wird der elektrische Energieverbrauch nur bei den lange getesteten Zapfvolumenströmen von 3, 7, und 14 l/min angegeben. Auch hier wird nicht der Sekundärvolumenstrom am Modul verglichen, son-

dern der Zapfvolumenstrom an der Zapfstelle, welcher unter einer rechnerischen Beimischung von Wasser mit 10 °C zu 42 °C Austrittstemperatur führt. Die Werte dazwischen werden linear inter- resp. extrapoliert (siehe Abbildung 16). Unter der Annahme, dass der elektrische Stromverbrauch zwischen den Messpunkten linear verläuft, und dass Primärvorlauftemperatur keinen Einfluss auf den Stromverbrauch hat, kann diese Gewichtung formal durchgeführt und deutlich vereinfacht werden (genaue Herleitung im Anhang). Es ergibt sich eine Gewichtung der einzelnen Messwerte mit Gewichtungsfaktoren, welche in Tabelle 5 gegeben werden.

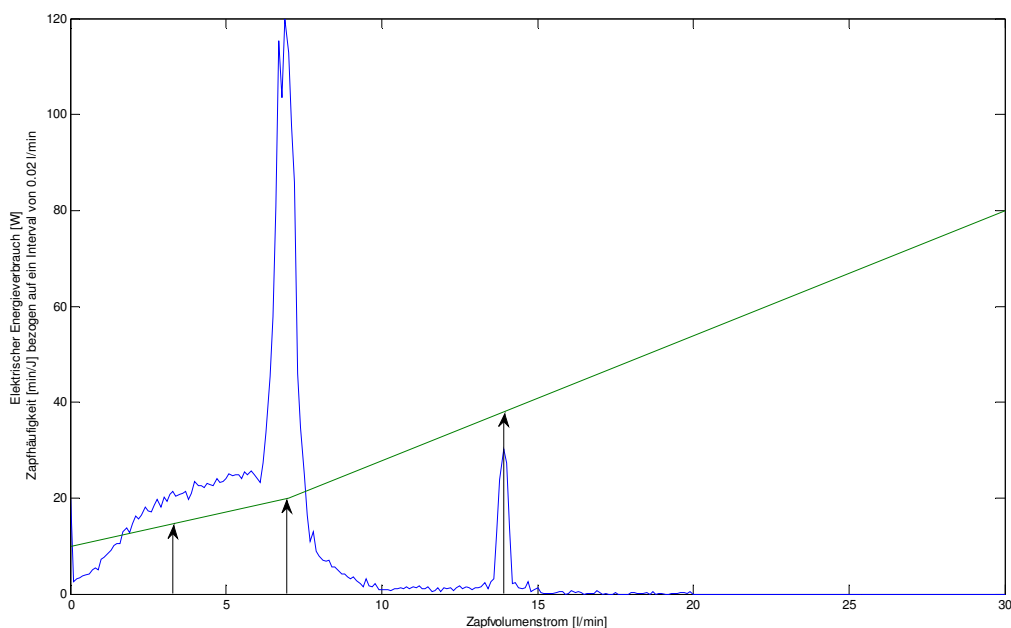


Abbildung 16 Häufigkeit von unterschiedlichen Zapfvolumenströmen (für einen Tagesverbrauch von 200 l) und Gewichtung anhand von drei Messungen des elektrischen Stromverbrauchs.

Tabelle 5 Gewichtungsfaktoren zur Abschätzung eines jährlichen Stromverbrauches

Betriebsart (Zapfvolumenstrom, 42 °C nach Beimischung)	Gewichtungsfaktor in h/a
Händewaschen (3 l/min)	72
Kleine Dusche (7 l/min)	107
Grosse Dusche (14 l/min)	19
Keine Zapfung	8563

Unsicherheiten und Messfehler

Das Strommessgerät hat eine Messunsicherheit von $\pm 1\%$ auf den Messwert. Im unteren Messbereich ist aber mit einer absoluten Unsicherheit von $\pm 0.4 \text{ W}$ zu rechnen, was insbesondere bei der Messung des Standby-Verbrauches zu einem grossen relativen Fehler führt. Bei gepulster Ansteuerung der Pumpe ergibt sich durch das Messintervall von einer Sekunde eine zusätzliche Messunsicherheit. Diese beträgt bei einer Messzeit von 15 min. maximal $\pm 3.2 \%$ des Messwertes (95% Konfidenzintervall). Durch die grosse Gewichtung des Standby-Verbrauches (siehe Tabelle 5), ist dieser auch bei einem kleinen Standby-Verbrauch sehr relevant (für einen typischen Wert von 2 W bei etwa 17 kWh/a). Aus diesem Grund führt auch die oben genannte Messunsicherheit zu einer relativ grossen Messunsicherheit von $\pm 3.5 \text{ kWh/a}$. Der abgeschätzte Jahresverbrauch ist aber auch vom gewählten Zapfprofil abhängig. Bei Modulen mit drehzahl-gesteuerten Pumpen ist der Standby-Verbrauch dominant, da der Verbrauch im Betrieb typi-

scherweise nur bei 3-5 kWh/a liegt. Bei Regelungen welchen nicht auf der Pumpenleistung beruhen liegt der Verbrauch im Betrieb etwa in derselben Grössenordnung wie der Standby-Verbrauch (für eine typische Pumpenleistung von 80 W bei etwa 16 kWh/a). Somit kann also der Einfluss des gewählten Zapfprofils abgeschätzt werden. Eine Verdoppelung des Verbrauches würde annähernd zu einer Verdoppelung des Verbrauches im Betrieb führen, da ein gleichzeitiges Auftreten von Zapfungen selten vorkommt. Anhand dieser Zahlen kann auch begründet werden, warum auf eine Berücksichtigung des Einflusses der Primärvorlauftemperatur verzichtet wurde. Eine höhere Primärvorlauftemperatur hat nur bei drehzahlgeregelten Pumpen einen Einfluss auf den Stromverbrauch, da diese bei hohen Temperaturen einen kleineren Volumenstrom erzeugen müssen um dieselbe thermische Leistung zu erreichen. Wenn angenommen wird, dass durch eine Solaranlage während drei Sommermonaten 90 °C statt 55 °C Speichertemperatur herrscht, würde der Verbrauch im Betrieb um ca. 10 % sinken. Diese 10 % von lediglich 3-5 kWh/a liegen weit unter der Messunsicherheit des Standby-Verbrauches und können daher vernachlässigt werden.

6.3.2 E2 Auskühlungsverluste

Ein Frischwassermodule stellt grundsätzlich eine zusätzliche erwärmte Installation ausserhalb des Pufferspeichers dar, welche somit auch zu zusätzlichen Wärmeverlusten führt. Diese sind hauptsächlich von der Isolation der Hülle abhängig. Auch die thermische Masse des Modules spielt eine wichtige Rolle, da diese bei jeder Zapfung aufgewärmt wird und danach wieder auskühlen kann. Im Folgenden werden die auftretenden Wärmeverluste stark vereinfacht modelliert, um die während eines Jahres im Betrieb anfallenden Wärmeverluste abzuschätzen.

6.3.2.1 Bestimmen der thermischen Masse

Um diese Verluste quantifizieren zu können, wird das Modul im Folgenden als eine einzige thermische Masse C betrachtet. Die thermische Masse besteht im Wesentlichen aus der im Wärmeübertrager und in den Rohren enthaltenen Wassermenge sowie den wasserberührten Teilen und deren Anbauten.

$$9) \quad C = \sum m_i * c_i$$

Mit	m_i	Masse eines Bestandteiles
	c_i	spezifische Wärmekapazität eines Bestandteils

Die im Modul enthaltene Wärmemenge Q_0 kann somit auch vereinfacht dargestellt werden:

$$10) \quad Q_0 = C * (T_{Modul} - T_{\infty})$$

Mit	T_{Modul}	Mittlere Modultemperatur
	T_{∞}	Umgebungstemperatur

Zur experimentellen Bestimmung der thermischen Masse wurden folgende Schritte durchgeführt:

- Primärseitige Ladung des Moduls mit thermischer Energie (Erwärmen des ganzen Modules auf eine bestimmte Temperatur T_{Modul}). Wenn das Modul über längere Zeit (in diesem Falle 15 min) mit einer konstanten Temperatur durchgespült wird, kann davon ausgegangen werden, dass die gesamte thermische Masse des Modules auf diese Temperatur erwärmt wurde.
- Sekundärseitige Entladung des Moduls mit Trinkwasser bei Raumtemperatur (T_{∞}). Dafür muss die Regelung des Modules ausgeschaltet und der primärseitige Durchfluss blockiert werden. Die im Modul gespeicherte Wärmemenge (Q_0) kann durch genaues Aufzeichnen der Ein- und Austrittstemperaturen und des Volumenstromes bestimmt werden. Dabei muss so lange gespült werden, bis die Temperaturdifferenz zwischen Ein- und Austritt im Genauigkeitsbereich der Sensoren liegt.

Somit sind alle Grössen aus Gleichung 9) bis auf die thermische Masse bekannt und diese kann berechnet werden.

6.3.2.2 Bestimmen des Wärmeverlustkoeffizienten

Frischwassermodule haben meist ein isoliertes Gehäuse, daher sind die Wärmeverluste recht gering. Grundsätzlich treten Wärmeverluste durch Wärmeleitung, Wärmestrahlung und Konvektion gegen die Umgebung und Wärmeleitung und Konvektion in den Anschlussrohren ausserhalb des Gehäuses auf. Für die weitere Betrachtung werden die Wärmeverluste (ΔQ) eines Frischwassermoduls wie folgt vereinfacht:

$$11) \quad \Delta Q = \Delta T U A \Delta t$$

Mit

ΔT Temperaturdifferenz zur Umgebung

UA Wärmedurchgangskoeffizient (Wärmedurchgangskoeffizient U und Oberfläche A)

Δt Zeitschritt

Somit lässt sich die nach einer Initialisierung auf die Modultemperatur T_{Modul} bzw. die Wärmemenge Q_0 beim Zeitpunkt $t=0$ noch im Modul verbleibende Energie Q_{Rest} als Funktion der Zeit darstellen:

$$12) \quad Q_{\text{Rest}}(t) = Q_0 * e^{\frac{-UA}{c} * t}$$

Um den Wärmeverlustkoeffizienten (UA) bestimmen zu können wurden folgende Versuche durchgeführt:

- Erwärmung des gesamten Modules auf eine bestimmte Temperatur wie oben beschrieben. Da die thermische Masse bereits bekannt ist, kann die im Modul gespeicherte Wärmemenge Q_0 als bekannt angenommen werden.
- Auskühlen des Modules über die Verluste zur Umgebung bei ausgeschalteter Regelung und blockierten Zuleitungen (diesmal sowohl primär- wie auch sekundärseitig).
- Bestimmung der im Modul gespeicherten Wärmemenge Q_{Rest} durch sekundärseitiges Spülen wie oben beschrieben.

In Abbildung 17 sind die Restwärmemengen dargestellt, die für unterschiedliche Auskühlzeiten und für drei unterschiedliche Module ermittelt wurden. Die auf den Messdaten basierenden Kurven werden mit den gefitteten Kurven entsprechend der oben beschriebenen Formel verglichen. Dabei konnte festgestellt werden, dass die gemessenen Werte sehr gut mit den angenäherten Werten übereinstimmen.

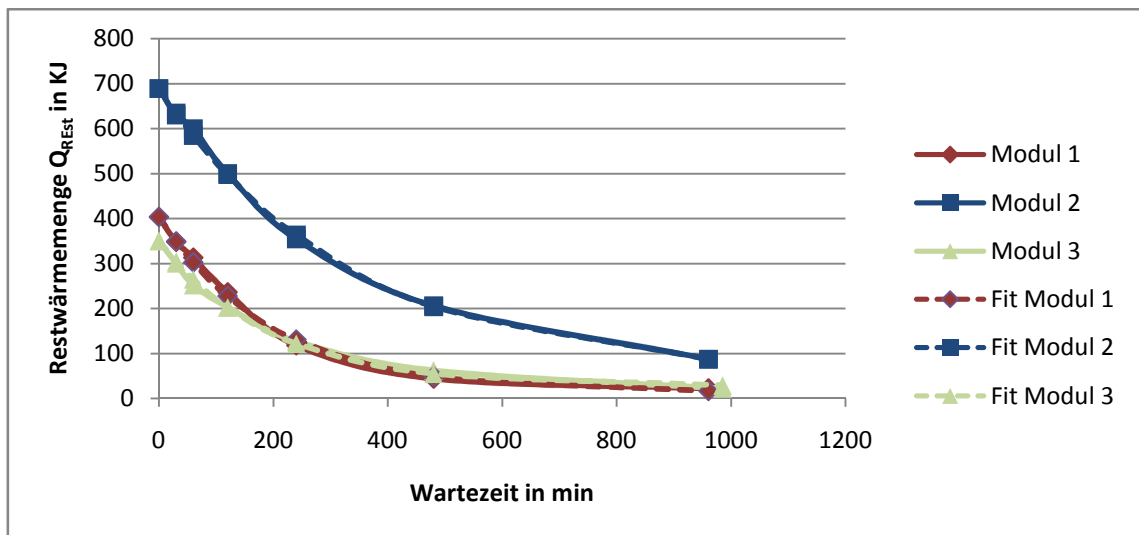


Abbildung 17 Auskühlkurven von drei verschiedenen Modulen und die dazu gefitteten Kurven zur Bestimmung des Wärmeverlustkoeffizienten. Da sich über die Nacht, also bei den langen Pausen, die Umgebungstemperatur leicht verändert hat, wurde ein zusätzlicher Offset in den Fit mit eingezeichnet.

Die umfangreichen Messungen haben also gezeigt, dass der Auskühlprozess sehr gut mit den oben beschriebenen Vereinfachungen dargestellt werden kann. Für die Bestimmung des Wärmeverlustkoeffizienten kann somit eine Einschränkung auf einen einzigen Messwert vorgenommen werden, wobei vorgeschlagen wird, eine Messung mit 90 min Wartezeit durchzuführen und anschließend den Wärmeverlustkoeffizienten über Gleichung 12) zu bestimmen. Um ein Auskühlen über die Anschlussleitungen zu vermeiden müssen diese isoliert und siphoniert werden. In der Praxis müssen aber Warmwasserstichleitungen nicht unbedingt isoliert werden, was ein zusätzliches Auskühlen des Moduls durch rohrinterne Gegenzirkulation zur Folge hat. In diesem Fall kann eine deutlich verstärkte Auskühlung des gesamten Frischwassermodules erfolgen.

6.3.2.3 Bestimmen der mittleren Modultemperatur

Zur Bestimmung der Auskühlverluste eines Frischwassermodules im Betrieb muss zusätzlich zur thermischen Masse und dem Wärmeverlustkoeffizienten auch die mittlere Temperatur des Moduls (in Abhängigkeit vom Betriebszustand) bekannt sein. Diese hängt von mehreren Parametern ab, insbesondere von der Nachlaufzeit der Primärpumpe am Ende einer Zapfung. Die mittlere Modultemperatur nach einer bestimmten Zapfung kann aber bei einer bekannten thermischen Masse über eine Messung der im Modul gespeicherten Wärmemenge vorgenommen werden. Dabei wird ähnlich wie bei den oben beschriebenen Messungen vorgegangen:

- Durchführung einer Zapfung bei definierten Bedingungen.
- Nach dem Ende der Zapfung wird eine sekundärseitige Entladung des Moduls mit kaltem Wasser (10 °C) durchgeführt. Dabei muss die Regelung des Moduls ausgeschaltet und der primärseitige Durchfluss blockiert werden.
- Die im Modul gespeicherte Wärmemenge (Q_0) kann durch genaues Aufzeichnen der Ein- und Austrittstemperaturen und des Volumenstromes bestimmt werden. Dabei muss so lange gespült werden, bis keine Temperaturdifferenz zwischen Ein- und Austritt mehr auszumachen ist.

Wenn die thermische Masse bekannt ist, kann also über die somit gemessene Energiemenge die mittlere Modultemperatur bestimmt werden. In Tabelle 6 und Tabelle 7 werden die gemessenen mittleren Modultemperaturen bei einem Modul nach unterschiedlichen Zapfungen und für zwei eingestellte Solltemperaturen dargestellt.

Tabelle 6 Gemessene mittlere Modultemperatur nach unterschiedlichen Zapfungen und einer eingestellten Solltemperatur von 45 °C.

Durchschnittliche Modultemperatur in °C gemessen bei 45 °C Solltemperatur und einer Sekundärvorlauftemperatur von 15 °C			
Speichertemperatur	5 l/min	10 l/min	30 l/min
50 °C	36	38	33
60 °C	39	35	37
75 °C	34	34	38
90 °C	42	35	34

Tabelle 7 Gemessene mittlere Modultemperatur nach unterschiedlichen Zapfungen und einer eingestellten Solltemperatur von 60 °C

Durchschnittliche Modultemperatur in °C gemessen bei 60 °C Solltemperatur und einer Sekundärvorlauftemperatur von 15 °C			
Speichertemperatur	5 l/min	10 l/min	30 l/min
65 °C	47	49	36
75 °C	46	46	46
90 °C	42	42	43

Die gemessenen Werte weichen für eine eingestellte Solltemperatur nur relativ wenig voneinander ab und es erscheint schwierig, eindeutige Trends auszumachen. Bei kleinen Zapfvolumenströmen (5 l/min) ist der Primärvolumenstrom gering, was viele Hersteller mit einem gepulsten Ansteuern der Primärkreispumpe lösen. Dabei ist dann aber die mittlere Modultemperatur während der Zapfung nicht konstant und es spielt eine Rolle, ob die Zapfung direkt nach oder vor einem Puls unterbrochen wurde. Daher schwanken die Werte bei diesem Zapfvolumenstrom relativ stark und lassen keine Aussage zu. Bei den grösseren Zapfvolumenströmen ist eine erstaunliche Tendenz feststellbar, nämlich eine Abnahme der mittleren Modultemperatur bei Speichertemperaturen über 75 °C. Dies hängt damit zusammen, dass weniger Pufferwasser zur Erwärmung des Trinkwassers gebraucht wird. Durch den daraus resultierenden geringen Primärvolumenstrom kühlt sich das Wasser rasch ab und ein Grossteil des Modules ist kalt. Wenn aber der Unterschied zwischen Speichertemperatur und eingestellter Solltemperatur zu gering ist, kann bei grossen Zapfvolumenströmen die Solltemperatur nicht mehr erreicht werden, was wiederum zu geringeren Mitteltemperaturen führt (siehe oberste Werte bei 30 l/min).

Da all diese Effekte nicht einfach zu modellieren sind, die mittlere Modultemperatur aber nur wenig um den Mittelwert schwankt, wird vorgeschlagen, für eine eingestellte Solltemperatur die mittlere Modultemperatur nach unterschiedlichen Zapfungen als konstant anzunehmen. Diese konstante mittlere Modultemperatur wird festgelegt als die gemessene Modultemperatur bei einem Zapfvolumenstrom von 7 l/min und einer Primärtemperatur, die 10 °C höher als die eingestellte Solltemperatur liegt. Diese Bedingungen treten im Jahresprofil am häufigsten auf.

6.3.2.4 Abschätzen der Wärmeverluste

Die Wärmeverluste hängen zum einen von den oben gemessenen Parametern und zum anderen auch vom Zapfprofil und von der Umgebungstemperatur und den Anschlüssen (resp. der Isolation der Anschlüsse) ab. Bei einem gegebenen Zapfprofil und einer gegebenen Umgebungstemperatur lassen sich aber die Wärmeverluste eines Modules während dem Betrieb über ein Jahr abschätzen. Zusätzliche Verluste, welche durch einen unsachgemässen Anschluss oder durch den Betrieb einer Zirkulationsleitung oder einer Warmhaltefunktion verursacht werden, können die eigentlichen Wärmeverluste des Modules durchaus um ein Vielfaches übersteigen. Dabei handelt es sich aber um Systemverluste, welche bei einem Komponententest nicht berücksichtigt werden können.

Zur qualifizierten Abschätzung der Wärmeverluste im Betrieb wurde das weiter oben beschriebene Zapfprofil auf Minutenbasis verwendet. Mit der Annahme einer konstanten Modulmitteltemperatur bei und unmittelbar nach jeder Zapfung kann die Temperatur und mit dem gemessenen Wärmeverlustkoeffizienten auch der Wärmeverlust in diesen Betriebssituation berechnet werden. Anhand des Zapfprofiles auf Minutenbasis kann dann die Modultemperatur und die Wärmeverluste zwischen den Zapfungen berechnet werden. Werden diese Werte über das gesamte Jahresprofil aufsummiert, erhält man eine gute Abschätzung der Wärmeverluste über das gesamte Betriebsjahr. Diese Rechnung ist jedoch aufwändig, da mehr als 500'000 Minutenwerte berechnet werden müssen. Diese Rechnung wurde aber über einen weiten Bereich von unterschiedlichen thermischen Massen C (5..30 kJ/K, gemessenen Module: 10..24 kJ/K) und Verlustkoeffizienten $U \cdot A$ (0.1..10 W/K, gemessene Module: 0.5..1.4 W/K) durchgeführt. In Abbildung 18 werden die somit abgeschätzten Jahresverluste in einer dreidimensionalen Fläche abgebildet.

Mit einer Division durch C lassen sich die Daten um eine Dimension reduzieren. Die Grösse ‚Jahresverlust dividiert durch die thermischen Masse‘ lässt sich also in Abhängigkeit einer einzigen Grösse ‚Verlustkoeffizient dividiert durch die thermische Masse‘ darstellen, siehe Abbildung 19.

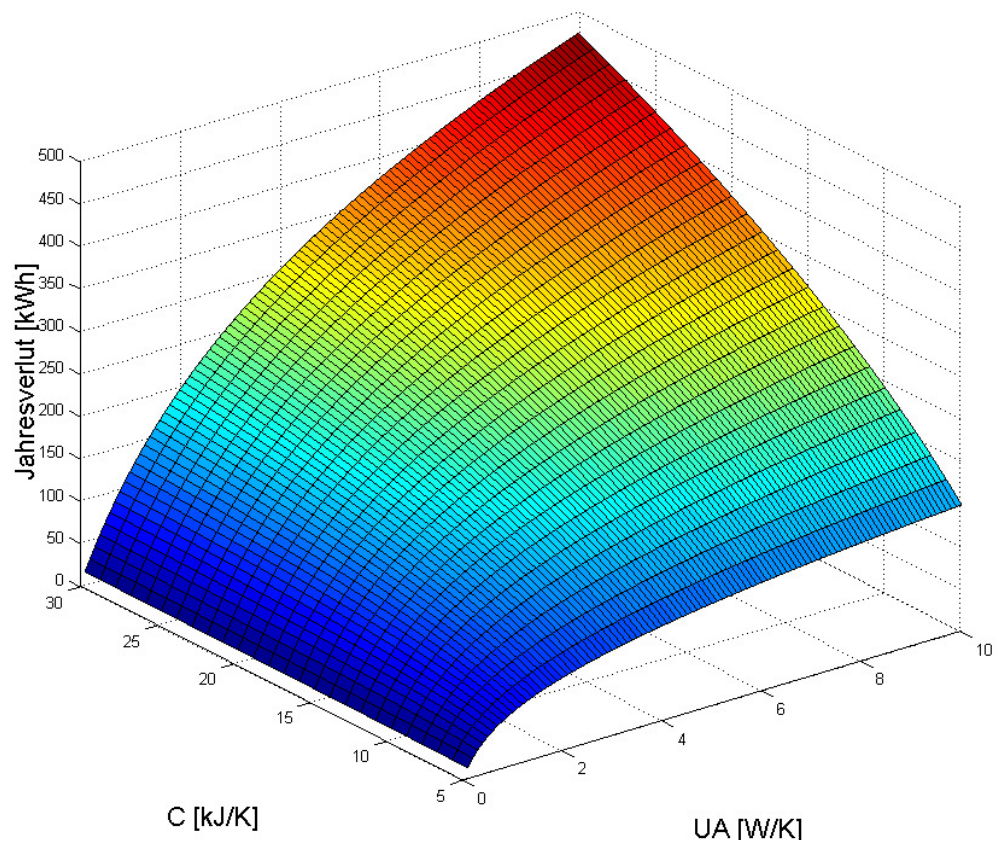


Abbildung 18 Jahres-Auskühlverlust für unterschiedliche thermische Massen und Verlustkoeffizienten.

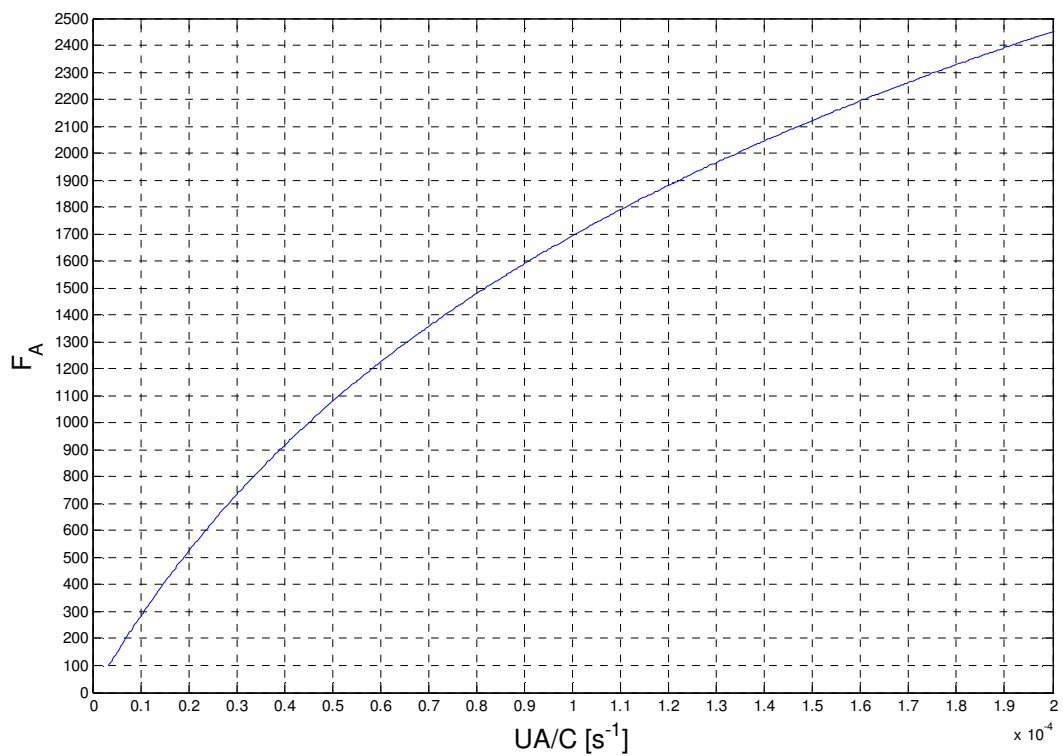


Abbildung 19 Faktor für das Bestimmen der Jahres-Auskühl-Verluste für ein Zapfprofil mit 200 l/d Warmwasserverbrauch.

Eine vereinfachte Abschätzung der Wärmeverluste kann somit nach folgender Vorgehensweise durchgeführt werden:

- Man bestimmt anhand von Messungen die modulspezifische Grösse UA/C , also eine Grösse, welche für die Auskühlgeschwindigkeit verantwortlich ist.
- Danach kann anhand von Abbildung 19 ein Auskühlungsfaktor F_A bestimmt werden.
- Mit diesem Faktor F_A kann ein Jahresverlust anhand der Formel $Q_A = F_A \cdot \Delta T \cdot C$ bestimmt werden, wobei ΔT die Temperaturdifferenz zwischen der mittleren Modultemperatur bei einer Zapfung und einer standardisierten Umgebungstemperatur von 20 °C darstellt.

In der Praxis können die Wärmeverluste stark von den oben ausgerechneten Wärmeverlusten abweichen. Die Prozedur erlaubt aber einen Vergleich der einzelnen Module, und da es sich dabei um eine realitätsnahe Abschätzung handelt, ist auch der Vergleich mit anderen energetisch relevanten Grössen wie beispielsweise dem elektrischen Stromverbrauch möglich.

6.3.2.5 Unsicherheit und Messfehler

Die Abschätzung des Jahresenergieverbrauches ist mit grossen Unsicherheiten behaftet. Dabei spielen Messfehler, welche auf den Ungenauigkeiten der Messgeräte beruhen, aber auch systematische Fehler welche sich aus der angewandten Methode ergeben. Folgende Punkte führen dabei zu Fehlern in der Abschätzung:

- Volumenstrom: Die Genauigkeit des Volumenstromsensors wird vom Hersteller nur für Standardbedingungen (Wasser, 20 °C, 1 bar) angegeben und liegt über einen weiten Bereich von Volumenströmen unter 0.4 % vom Messwert. Da bei den Tests von Frischwassermodule aber höhere Temperaturen gemessen werden, muss mit einem zusätzlichen Messfehler gerechnet werden. Für die weiteren Berechnungen werden 3% angenommen.
- Temperaturdifferenz: Die eigens kalibrierten Temperatursensoren weisen einen sehr geringen Messfehler von ± 0.1 K auf. Da bei der Temperaturmessung das Aufzeichnen von Temperaturschwankungen direkt am Modulausgang im Vordergrund lag, wurden keine Mischeinheiten eingebaut. Es ist also mit einer Temperaturverteilung innerhalb des Rohrquerschnittes zu rechnen. Aus diesem Grund wird mit einem zusätzlichen Fehler von 5% gerechnet.
- Thermische Masse: Die Fortpflanzung der Messfehler zur Bestimmung der thermischen Masse ergibt eine Unsicherheit von 8%. Das gesamte Modul wird als eine thermische Masse betrachtet, dabei wird angenommen, dass alle Bestandteile in einem guten thermischen Kontakt zueinander stehen. Dies ist aber bei den modulinternen Zuleitungen und Armaturen nicht immer unbeschränkt gegeben, was zu einer Unterschätzung der thermischen Masse führt. Der somit auftretende systematische Fehler kann durch das Volumen der primärseitigen Rohre im Vergleich zum Volumen des Wärmeübertragers und der sekundärseitigen Rohre abgeschätzt werden. Bei den getesteten Modulen lag dieser Anteil bei höchstens 10%.
- Wärmeverlustkoeffizient: Der Fehler bei der Bestimmung des Wärmeverlustkoeffizienten ergibt sich aus den Ungenauigkeiten, die bei der zweimaligen Bestimmung der im Modul „gespeicherten“ Wärmemenge entstehen. Der aus den Messungen anhand der Gauss'schen Fehlerfortpflanzung ermittelte Fehler für Messungen an einem typischen Modul liegt bei etwa 30%. Da der Wärmeverlustkoeffizient aber aus zwei Messungen einer Grösse bestimmt wird, ist anzunehmen, dass systematische Fehler nicht zu einer Vergrößerung der Messunsicherheit führen, so dass der tatsächliche Fehler deutlich unter 30% liegen dürfte. Eine Abschätzung des genaueren Fehlers erscheint komplex und wurde nicht durchgeführt.
- Mittlere Modultemperatur nach einer Zapfung: Auch bei der Messung der mittleren Modultemperatur hängt das Resultat vom Verhältnis zweier Messungen mit denselben systematischen Fehlern ab und eine Abschätzung des Fehlers über die Gauss'sche Fehlerfortpflanzung ist wiederum nur bedingt realistisch. Die oben aufgeführten Fehler für Temperatur und Volumenstrommessung würden zu einem Fehler von 16 % auf die Temperaturdifferenz zwischen Modul und Umgebung führen. Ein weiterer systematischer Fehler kann aufgrund einer gepulsten Ansteuerung der Primärpumpe erfolgen. In diesem Fall ist entscheidend ob die Zapfung unmittelbar vor oder unmittelbar nach ei-

nem Puls unterbrochen wurde. Dieser Fehler hängt von der Regelgüte des jeweiligen Moduls ab. Als Grössenordnung dieses Fehlers bei der Bestimmung der mittleren Modultemperatur kann die Amplitude der auftretenden Temperaturschwankung dienen.

Weitere Unsicherheiten sind:

- Bedingungen: Sowohl die angenommenen Umgebungstemperatur, als auch die Primärvorlauftemperatur von 10 °C haben einen deutlichen Einfluss auf die abgeschätzten Wärmeverluste. So führt beispielsweise eine Erhöhung der angenommenen Raumtemperatur von 20 °C auf 25 °C, bei einigen Modulen (bei einer mittleren Modultemperatur von 30 °C nach der Zapfung) eine Halbierung der Auskühlverluste bedeuten.
- Zapfprofil: Der abgeschätzte Jahresenergieverbrauch ist stark vom verwendeten Zapfprofil abhängig. Eine Verdoppelung der Zapfmenge von 200 auf 400 l/d verursacht eine Erhöhung des Jahresverlustes durch Auskühlung von ca. 30%. Da aber für alle Module dasselbe Zapfprofil verwendet wird, bleiben die Werte vergleichbar.

6.3.3 E3 Rücklauftemperatur

Frischwassermodule werden angesichts der hohen spezifischen Wärmeübertragung in Plattenwärmetauschern oft als für die Schichtung im Speicher besonders vorteilhaft angepriesen. Diese spielt insbesondere dann eine wichtige Rolle, wenn das System eine solarthermische Anlage und einen dementsprechend grossen Speicher umfasst. Für die Effizienz des Gesamtsystems ist dabei die Auskühlung der Primärrücklauftemperatur ein entscheidender Faktor. Tiefe Temperaturen im unteren Teil des Speichers führen einerseits zu geringeren Speicherverlusten, und andererseits zu besseren Wirkungsgraden von Kollektoren aber auch von kondensierenden Brennern oder Wärmepumpen. Mehrere Parameter, wie beispielsweise die Kapazität und die thermische Länge des Wärmetauschers, aber auch die Regelstrategie, können die Primärrücklauftemperatur beeinflussen. Da in der Praxis unterschiedliche Regelstrategien eingesetzt werden, die auch unterschiedliche gut funktionieren, wird für eine weitere Bewertung eine Methode entwickelt, die auf die gemessenen Werte der real auftretenden Rücklauftemperaturen abgestützt ist. Zur Bestimmung der Relevanz unterschiedlicher Rücklauftemperaturen der FWM wurden Jahressimulationen in der Simulationsumgebung TRNSYS durchgeführt. Das Frischwassermodule wurde dabei nicht physikalisch, d.h. als Wärmeübertrager mit einer bestimmten Regelung, simuliert, sondern über die gemessenen Werte von Vor- und Rücklauftemperatur mit Hilfe einer Lookup Table nachgebildet (Beispiel einer gemessenen Lookup-Table in Abbildung 20). Zwischen den gemessenen Werten wird dabei linear interpoliert. Die Rücklauftemperatur wurde bei den drei Temperaturen (50, 55, 90 °C) und den drei Standardzapfvolumenströmen (3, 7, 14 l/min) für stationäre Zustände gemessen. Diese Punkte und der maximale gemessene Volumenstrom von 27 l/min wurden für die Erstellung einer Lookup-Table für jedes Modul verwendet.

Um den Einfluss unterschiedliche erhöhter Rücklauftemperaturen auf den Primärenergieverbrauch des Gesamtsystems zu quantifizieren wurde ein Referenzsystem mit einem idealen (unendlich effizienten) Frischwassermodule simuliert. Dies entspricht einem Modul bei dem in allen Messpunkten keine Temperaturdifferenz zwischen Primärrücklauf und Sekundärrücklauf auftritt (vergleiche mit einer realen Messung in Abbildung 20). Ausgehend von diesem idealen Modul wurde die benötigte Zusatzenergiemenge für den idealen Referenzfall $Q_{aux,ref}$ mit einer Jahressimulation ermittelt. Simulationen mit real gemessenen Rücklauftemperaturen führen somit immer zu einem erhöhten Zusatzenergiebedarf $Q_{aux,var}$. Der zusätzliche Zusatzenergiebedarf $\Delta Q_{aux,var} = Q_{aux,var} - Q_{aux,ref}$ dient zum Vergleich der Module.

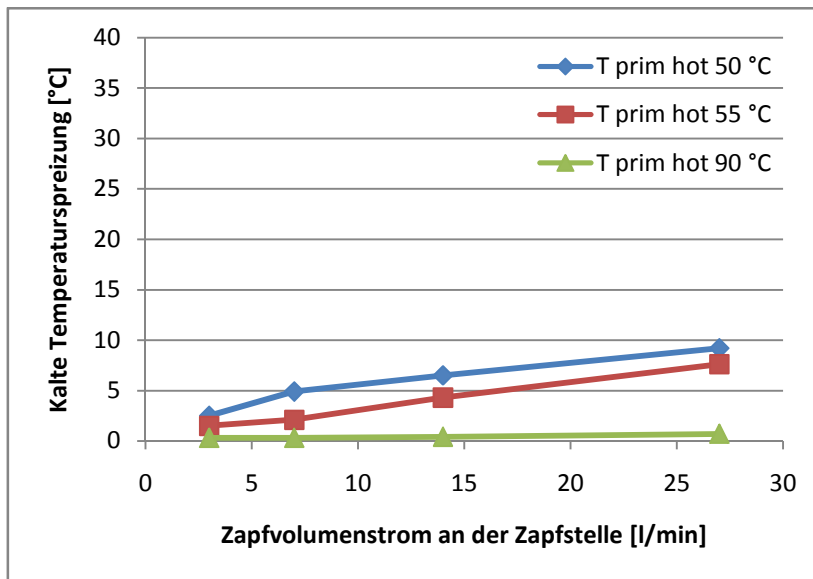


Abbildung 20 Beispiel einer gemessenen Temperatursteigerung zwischen Primärücklauf und Sekundärvorlauf bei unterschiedlichen Bedingungen. Die Primärvorlauftemperatur lag bei den Messungen bei 10 °C und eine Solltemperatur von 45 °C war eingestellt. Angegeben wird der Zapfvolumenstrom an der Zapfstelle nach der Beimischung von 10 °C kaltem Wasser um 42 °C zu erreichen. Der am Modul auftretende Volumenstrom liegt dabei etwas unter dem Zapfvolumenstrom.

6.3.3.1 Simuliertes System:

Auf Basis des TRNSYS Decks, das im Rahmen IEA SHC Task 32 als Referenz für eine Vielzahl von Simulationsstudien definiert wurde, wurden Jahressimulationen durchgeführt [21]. Einige Parameter und Modelle wurden dabei aber angepasst und verändert. Wesentliche Rahmenbedingungen für die Simulation waren dabei:

Speicher: 1m³ Pufferspeicher mit 150-200l Bereitschaftsvolumen (Tein 50 °C, Taus 55 °C) und weitere 150l „Bereitschaftsvolumen“ für die Heizung (Temperatur nach Heizkurve), Speicherverlust (6.75 W/K Wände, 0.5 W/K Deckel, 4.5 W/K Boden), Solarbeladung mit zwei internen Wärmeübertragern, Zusatzheizung direkt eingebunden, unterschiedliche Höhen für Heizungs- und Warmwasseranforderung.

Kollektor: 10 m² Apertur mit $a_1=3.311$; $a_2=0.012$ und 14-35 l/hm² Durchfluss angepasst

Brenner: modulierender, externer Gasbrenner mit 15.6 kW (Modell und Parameter aus [22] Gas 2)

Gebäude: Unterschiedlicher Wärmebedarf von 15-100 kWh/m²; Parameter aus Task 32 übernommen [21].

Zapfprofil: Minutenbasis aus DHWcalc [20] siehe oben

Frischwassermodul: Lookup-Table basierend auf Messdaten

Standort: Zürich

6.3.3.2 Linearisierung

Das Durchführen von Jahressimulationen wird aus aufwändig und ungünstig für ein standardisiertes Messverfahren angesehen. Deshalb wird angestrebt den Einfluss von erhöhten Rücklauftemperaturen auf die Effizienz des Gesamtsystems ohne aufwändige Jahressimulationen durchführen zu können. Dazu wird eine Linearisierung des Problems bezüglich der gemessenen Rücklauftemperaturen durchgeführt. Jeder Punkt in der Lookup-Table (Modulrücklauftemperatur bei definierter Primärvorlauftemperatur und Sekundärvolumenstrom) wurde einzeln zwischen 0K und 20K in 5K-Schritten variiert. Dabei wird von den umliegenden Gitterpunkten (liegen alle bei einer Temperaturdifferenz von Null) zu dem erhöhten hin linear interpoliert. Mit Jahressimulationen konnte somit für jeden Punkt der Lookup-Table dargestellt werden, wie stark eine erhöhte Rücklauftemperatur in dem spezifischen Betriebspunkt den Verbrauch an

Zusatzenergie beeinflusst. Die Resultate der Simulationen werden in Abbildung 21 für alle 12 Betriebssituationen dargestellt. Die unterschiedlichen Farben stellen dabei Simulationen für Gebäude mit unterschiedlichem Heizbedarf dar. Aus einer Linearisierung der Kurvenverläufe können dann anhand der Steigung Faktoren abgeleitet werden, welche die Relevanz eines Punktes (Betriebssituation) bezüglich der benötigten Zusatzenergie aufzeigen. Diese Faktoren (Steigungen der Kurvenverläufe) können dazu verwendet werden, ohne die Durchführung einer Jahressimulation auf den jährlichen Brennstoffverbrauch des untersuchten Referenzsystems zu schliessen. Dazu werden nur noch die gemessenen Primärücklauftemperaturen bei den 12 Betriebssituationen und die ermittelten Linearfaktoren benötigt. Anhand dieser Faktoren kann also der jährliche Mehrverbrauch an Zusatzenergie gegenüber einem ‚idealen Wärmeübertrager‘ mit unendlicher Übertragungsfläche ermittelt (absolute Relevanz) und ein Vergleich der Module untereinander (relative Relevanz) ermöglicht werden.

Bei den oben beschriebenen Referenzbedingungen und den verwendeten Temperatureinstellungen haben sich einige Betriebsbereiche als dominant (z.B. die häufig auftretenden Zapfungen um 7l/min bei Temperaturen im oberen Speicherbereich um 55 °C) und andere als vernachlässigbar herausgestellt. Aus diesem Grund wurde die Berechnung weiter vereinfacht, indem im Weiteren nur die Linearfaktoren von besonders relevanten Betriebssituationen berücksichtigt wurden, nämlich die ersten drei Abbildungen der zweiten Reihe und die zweite der dritten Reihe von Abbildung 21.

Zum Vergleich wurden auch Jahressimulationen durchgeführt, bei welchen alle Gitterpunkte der Lookup-Table gleichzeitig erhöht wurden. Die Faktoren der wichtigsten vier Betriebsbedingungen wurden anhand dieser Jahressimulationen zusätzlich skaliert. Dies führte zu einer Anhebung der Faktoren um knapp 20 %. Dabei wurde eine Kompensation für das Weglassen der wenig relevanten Betriebsbedingungen eingeführt und auch Unterschiede zwischen der Variation einzelner Parameter und einer generellen Anhebung der Rücklauftemperatur ausgeglichen.

In Tabelle 8 werden die ermittelten Linearfaktoren für eine vereinfachte Abschätzung des erhöhten Zusatzenergiebedarfs anhand der bei vier Betriebssituationen gemessenen Primärücklauftemperaturen gegeben. Der jährliche Mehrverbrauch gegenüber einem ‚idealen Wärmeübertrager‘ Q_R wird dann folgendermassen berechnet.

$$1) \quad Q_R = \sum_i F_{Ri} \Delta T_i \quad \text{wobei } \Delta T_i = (T_{pR,i} - T_{sR})$$

Tabelle 8 Faktoren zur vereinfachten Berechnung von Jahresverlusten auf Grund erhöhter Rücklauftemperatur für eine eingestellte Solltemperatur von 45 °C.

$V_{\text{sec42 } ^\circ\text{C}}$	T_{primhot}	Faktor F_{Ri} [kWh/K/a]
3 l/min	55 °C	2.0
7 l/min	55 °C	8.6
14 l/min	55 °C	2.4
7 l/min	90 °C	1.8

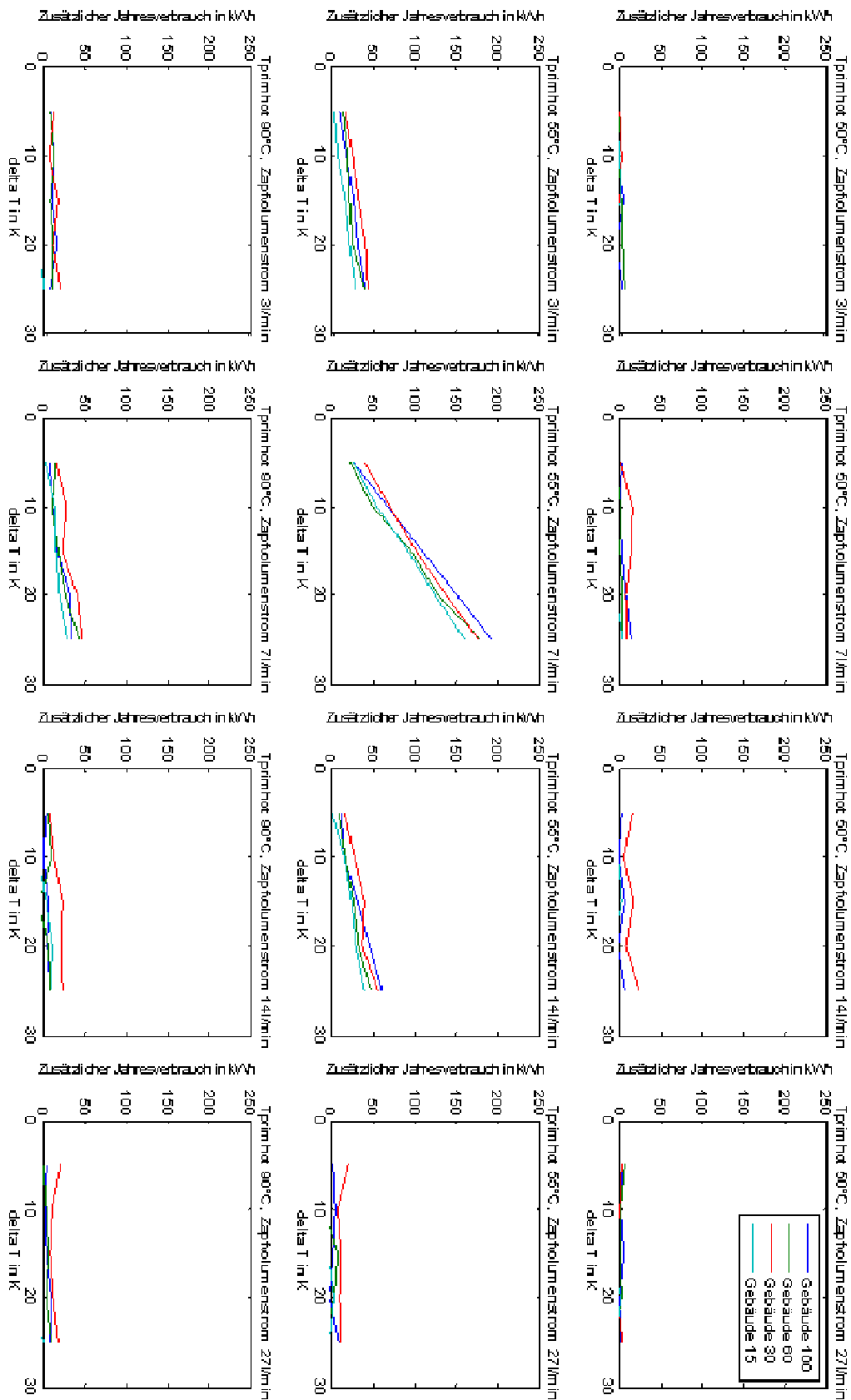


Abbildung 21 Zusätzliche Jahresverluste auf Grund erhöhter Primärrücklauftemperatur aufgeteilt auf einzelne Betriebsbedingungen. Unterschiedlicher Energiebedarf des Gebäudes: Dunkelblau: 100 kWh/EBF, Grün: 60kWh/EBF, Rot: 30kWh/EBF, Hellblau:15kWh/EBF

6.3.3.3 Unsicherheit und Messfehler

Die im vorgängigen Abschnitt beschriebene Methode erlaubt eine vereinfachte Abschätzung von Jahresverlusten aufgrund erhöhter Primärvorlauftemperaturen und ein Vergleich von unterschiedlichen Modulen bezüglich der erreichten Primärrücklauftemperaturen. Zusätzlich können die Resultate auch mit den anderen für Frischwassermodule energierelevanten Parametern in Relation gesetzt werden. Auch diese Werte gelten als Absolutwerte nur für das ausgewählte Referenzsystem mit den gewählten Referenzbedingungen. Andere Bedingungen (wie beispielsweise eine andere Bereitschaftstemperatur) führen zu unterschiedlichen Resultaten. Die zusätzlichen Verluste bedingt durch höhere Primärrücklauftemperaturen haben sich aber in zusätzlich durchgeführten Sensitivitätsuntersuchungen anhand weiterer Jahresimulationen als wenig sensitiv auf Veränderungen des Referenzsystems herausgestellt. Zwar änderte sich der Energieverbrauch bei den evaluierten Systemveränderungen deutlich, der Mehrverbrauch durch Primärrücklauf Temperaturerhöhung veränderte sich aber nur geringfügig. Weder eine Vergrößerung der Kollektorfläche um 50% (von 10 auf 15 m²) noch der Wechsel von kondensierendem zu nicht kondensierendem Brenner noch die Erhöhung der Temperatur im Heizungsraum (von 20 °C auf 25 °C) führte zu einer signifikanten Veränderung. Eine Erhöhung der Bereitschaftstemperatur verstärkte den Einfluss der Rücklauf Temperatur leicht (siehe Abbildung 22). Bei gleichbleibendem Zapfvolumen hat sich auch der Einfluss des Zapfprofils als relativ gering herausgestellt. Eine Verdoppelung der Zapfmenge (von 200l auf 400 l) führte aber wie erwartet zu erhöhten Zusatzverlusten, und bei kleineren Zapfmengen (EU2 [23], 157l bei 42 °C) waren auch die Zusatzverluste leicht geringer (Abbildung 23). Die Verwendung des Zapfprofils aus dem Task 32 [21] (T 32; 6 min Basis) hatte hingegen nur wenig Einfluss. Auch der Wechsel von matched-flow (14-35 l/m²) zu low- (15 l/m²) oder high-flow (50 l/m²) verändert den Einfluss der Rücklauf Temperatur nicht stark. Eine leichte Tendenz zu einer erhöhten Relevanz der Rücklauf Temperatur bei kleinen Kollektorvolumenströmen ist aber sichtbar. Eine eindeutige Tendenz kann auch bei einer Veränderung der Speicherverluste festgestellt werden. Die Relevanz der Rücklauf Temperatur steigt dabei mit erhöhten Speicherverlusten an. Bei den getesteten Werten (Verdoppelung bis Viertelung der Speicherverluste) veränderte sich der Einfluss der Rücklauf Temperatur um ca. ±20%.

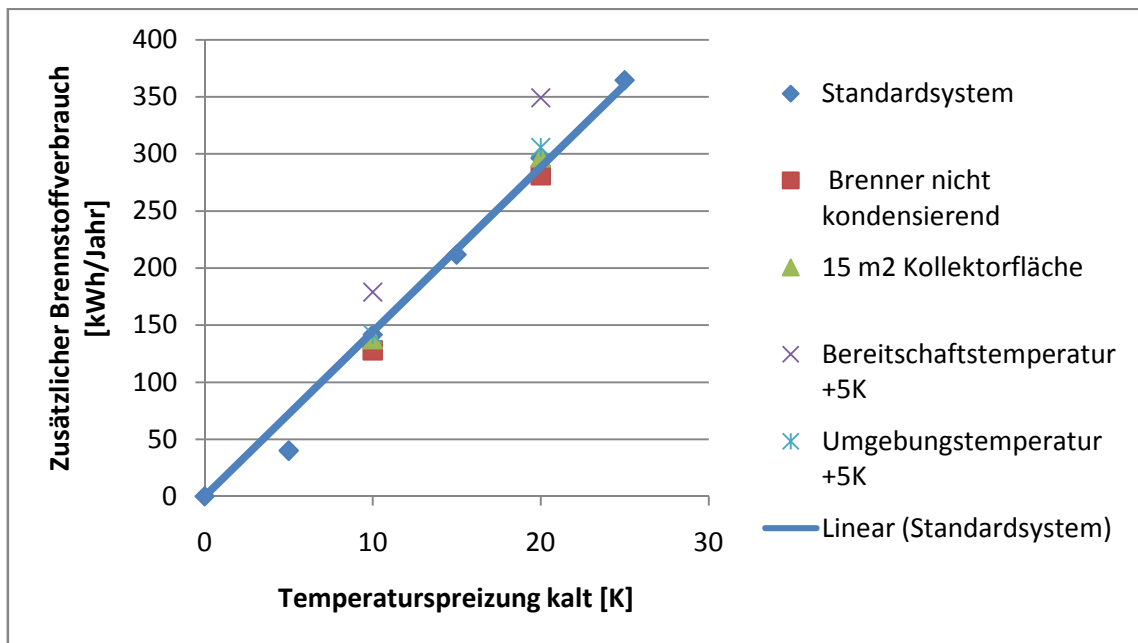


Abbildung 22 Der Einfluss erhöhter Rücklauftemperaturen auf die Systemeffizienz. Angegeben wird der zusätzliche Brennstoffverbrauch im Vergleich zu einem Referenzsystem mit ‚idealem Wärmeübertrager‘ für unterschiedliche Systemkonfigurationen.

Die durchgeführten Systemvariationen zeigen, dass der Einfluss der Rücklauf Temperatur zwar stark vom gewählten System abhängt. Bei allen Variationen lag er aber in derselben Größen-

ordnung. Im Vergleich zu dem Einfluss von unterschiedlichen Systemparametern ist die Messunsicherheit relativ gering, da Temperatursensoren mit kleinen Unsicherheiten belastet sind.

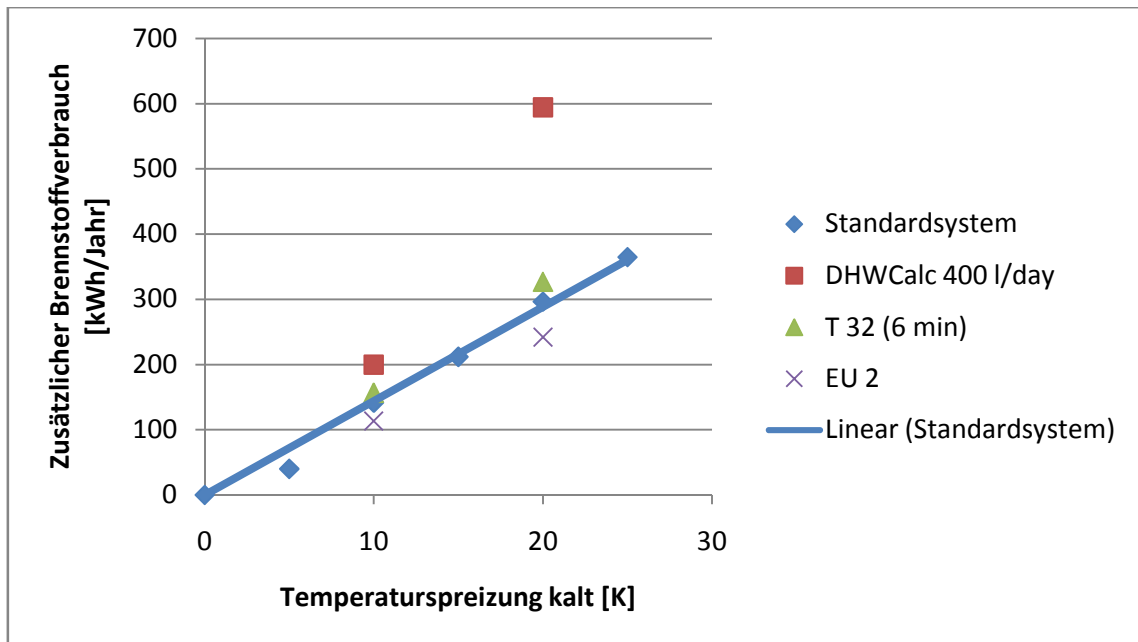


Abbildung 23 Der Einfluss erhöhter Rücklauftemperaturen auf die Systemeffizienz. Angegeben wird der zusätzliche Brennstoffverbrauch im Vergleich zu einem Referenzsystem mit ‚idealem Wärmeübertrager‘ für unterschiedliche Zapfprofile.

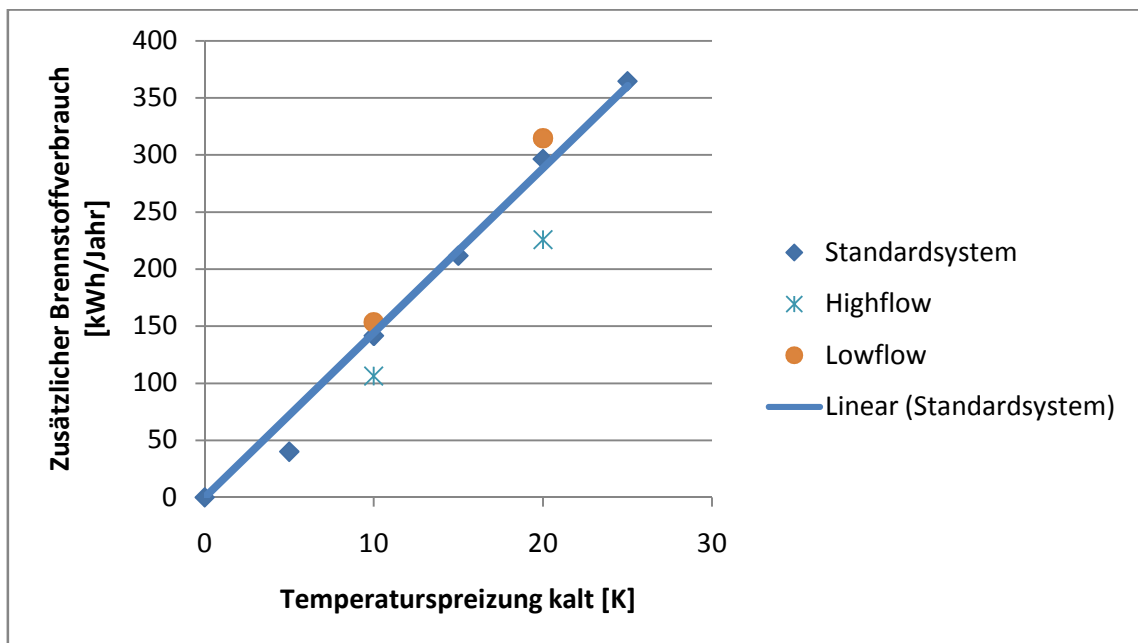


Abbildung 24 Der Einfluss erhöhter Rücklauftemperaturen auf die Systemeffizienz. Angegeben wird der zusätzliche Brennstoffverbrauch im Vergleich zu einem Referenzsystem mit ‚idealem Wärmeübertrager‘ bei unterschiedlichem Kollektorbetrieb.

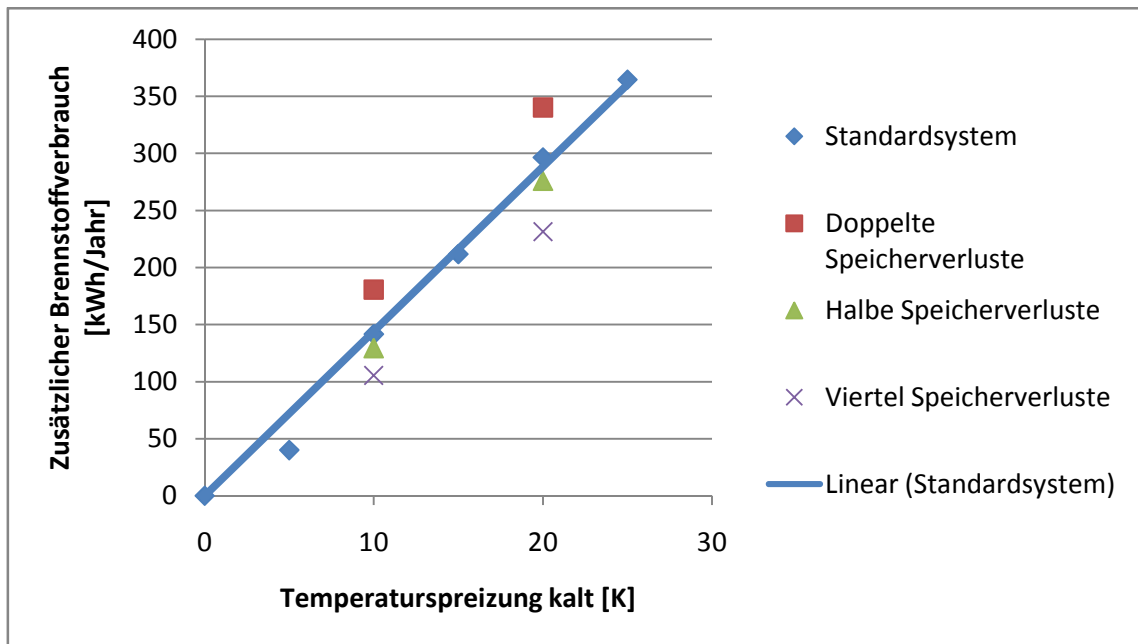


Abbildung 25 Der Einfluss erhöhter Rücklaufemperaturen auf die Systemeffizienz. Angegeben wird der zusätzliche Brennstoffverbrauch im Vergleich zu einem Referenzsystem mit ‚idealem Wärmeübertrager‘ bei unterschiedlichen Speicherverlusten.

6.4 Wartung/Installation

Unter dem Überbegriff Wartung/Installation werden Informationen zusammengefasst, welche das untersuchte Module und dessen Aufbau beschreiben. Dabei werden Punkte aufgelistet, die sich nicht als Messwerte darstellen lassen. Es kann sich dabei um Herstelleraussagen handeln, welche nicht überprüft oder gewertet werden können. Es werden dabei nur Kriterien aufgelistet, welche objektiv beurteilt werden können. Dabei wird auf einige wichtige Beurteilungskriterien wie beispielsweise die Bedienerfreundlichkeit verzichtet, da diese stark vom Empfinden des Anwenders abhängt.

6.4.1 W1 Aufbau

Wird ein Modul getestet, ist es wichtig, dass es sich auch um dasselbe Modul handelt, welches den Kunden zum Verkauf angeboten wird. In der Kollektorzertifizierung (Solar Keymark, vgl. [24]) wird daher ein Produkt aus einer laufenden Serienproduktion vom Testinstitut vor Ort ausgewählt. Dies ist aber mit viel Aufwand und Kosten verbunden und wird in dieser Phase für die Bewertung von Frischwassermodulen nicht in Betracht gezogen. Eine gewisse Sicherheit kann aber gegeben werden, indem die wichtigsten Bestandteile eines getesteten Moduls im Testbericht vermerkt werden. Da der Preis eines Frischwassermoduls auch zu einem grossen Teil durch die verwendeten Komponenten bestimmt wird, kann mit dieser Auflistung eingeschränkt werden, dass Spezialanfertigungen getestet werden, welche sich stark von den Serienprodukten unterscheiden.

6.4.2 W2 Wartung und Verkalkung

Ein wichtiges Qualitätsmerkmal eines Frischwassermoduls stellt der konzeptionelle Umgang mit Verkalkung (z.B. eine reduzierte Anfälligkeit zur Verkalkung des Wärmeübertragers und/oder Möglichkeiten zur Säuberung) dar. Die Bildung und Ablagerung von Kalk ist dabei von vielen Parametern wie Temperatur, Druck, Turbulenzen, aber auch sehr stark von der Zusammensetzung der gelösten Mineralien im Trinkwasser ab (siehe oben). Frühere Versuche des SPF mit dem Ziel, die Ausfällung von Kalk kontrolliert durchzuführen und wiederholbar zu quantifizieren, sind gescheitert. Aus diesem Grund wurde auch für dieses Projekt auf eine direkte Messung der Verkalkung verzichtet.

Von unterschiedlichen Herstellern werden unterschiedliche Massnahmen gegen Verkalkung angeboten. Diese können zum Vergleich der getesteten Module aufgelistet werden. Die Wirk-

samkeit der eingesetzten Massnahmen kann aber nach den heutigen Testmöglichkeiten am SPF nicht geprüft werden. Das Problem der Kalkbildung ist zudem regional sehr verschieden ausgeprägt. Von einigen Herstellern werden bereits Anschlüsse zur Entkalkung des Wärmeübertragers verbaut. In gewissen Regionen mit sehr hartem Trinkwasser kann dies ein wichtiges Entscheidungskriterium für ein bestimmtes Modul sein. Von einigen Herstellern werden auch bereits Absperrhahnen im Modul verbaut. Dies kann sowohl die Entkalkung als auch andere Wartungsarbeiten vereinfachen. Das Vorhandensein von Absperrhahnen rechtfertigt dabei einen höheren Preis, da sonst in den meisten Fällen zusätzliche Kosten durch das Montieren von Absperrhahnen ausserhalb des Modules anfallen. In der folgenden Tabelle werden die Merkmale bezüglich Wartung und Verkalkung aufgelistet, welche nach einem Test eines Moduls angegeben werden.

Tabelle 9 Aufbau des getesteten Modules

Aufbau	
Anschlüsse Primärseite	Durchmesser, flachdichtend/konisch
Anschlüsse Sekundärseite	Durchmesser, flachdichtend/konisch
Materialien Primärseite	Kupfer/Messing/Edelstal/Rotguss/Kunststoff
Materialien Sekundärseite	Kupfer/Messing/Edelstal/Rotguss/Kunststoff
Masse Wärmeübertrager	Plattenanzahl HxTxB
Pumpe Primärseite	Hersteller/Typ
Pumpe Zirkulation	Hersteller/Typ
Entlüfter	Vorhanden/nicht vorhanden
Rückschlagventil	Vorhanden/nicht vorhanden
Temperaturfühler	Anzahl
Durchflussmessung	Anzahl
Regler	Hersteller/Typ

Tabelle 10 Wartung und Massnahmen bezüglich Verkalkung

Wartung/Verkalkung	
Absperrhahnen Primärseite	vorhanden/nicht vorhanden
Absperrhahnen Sekundärseite	vorhanden/nicht vorhanden
Position warme Anschlüsse am WÜ	Unten/oben WÜ horizontal
Anschlüsse zur Entkalkung	vorhanden/nicht vorhanden
Primärtemperaturbegrenzung	vorhanden/nicht vorhanden
Automatische Erkennung von Verkalkung	vorhanden/nicht vorhanden

6.4.3 W3 Regelung

Für die meisten Tests ist es wichtig, die Regelung nach einheitlichen Kriterien einzustellen und dann während der unterschiedlichen Test nicht mehr zu verändern. Auch in der Praxis werden die Einstellungen in der Regel nach der Inbetriebnahme nur noch selten verändert und ein Modul muss mit derselben Einstellung sowohl die Zapfspitzen als auch kleine Zapfraten bewältigen. Daher werden die oben beschriebenen Funktionstests auch bei nur zwei Reglereinstellungen

gen durchgeführt. Um den individuellen Bedürfnissen unterschiedlicher Kunden und Anwendungen gerecht zu werden, ist aber auch die Flexibilität der Regelung und der Einstellmöglichkeiten wichtig. Da es aus Zeit- und Kostengründen nicht möglich ist, die Funktionalität des Moduls bei allen möglichen Reglereinstellungen zu testen, wird in einem Abschnitt eine Übersicht über die Einstellmöglichkeiten am Regler gegeben. In Tabelle 11 wird eine Übersicht über die wichtigsten Einstellmöglichkeiten gegeben. Diese werden in einer Tabelle aufgelistet, ohne die Funktionalität zu überprüfen.

Tabelle 11 Eigenschaften der Regelung

Eigenschaft	
Bereich Solltemperatur	40-70 °C
Desinfektionsfunktion	Nicht vorhanden/optional/täglich/ wöchentlich
Zusatzfunktionen bez. Komfort	Vorheizung des Wärmeübertragers möglich/ Komfortfunktion mittels Zirkulationspumpenunterstützung
Zirkulation	
Zirkulationsmodi	Zeiten Einstellbar, Selbstlernend, Zapfaktivierung
Geschichteter Rücklauf	Ausgang für Stellventil vorhanden/ Stellventil integriert/ nicht integriert

6.4.4 W4 Betriebsanleitung

Für gewisse Anwender kann eine gute Betriebsanleitung durchaus ein Wichtiges Entscheidungskriterium für oder gegen ein bestimmtes Modul sein. Dabei sind vor allem interessierte Privatanwender oder Installateure die Frischwassermodule nur sporadisch einsetzen auf eine Betriebsanleitung Angewiesen. Wird dagegen mit Installationsbetrieben gearbeitet, welche die Produkte oft einsetzen und ev. sogar für die Installation speziell geschult werden, ist eine Betriebsanleitung weniger wichtig. Es gibt auch Hersteller welche Ihre Produkte ausschliesslich über OEM Firmen vertreiben und somit wenig mit der Inbetriebnahme zu tun haben. Dabei werden Betriebsanleitungen häufig von der Vertriebsfirma individuell angefertigt. Bei Modulen, welche aus Paket mit einem Speicher bereits vorinstalliert und voreingestellt vertrieben werden erübrigt sich eine Betriebsanleitung auch weitgehen.

Da die Qualität einer Betriebsanleitung nur schwerlich objektiv zu beurteilen ist, wird die Betriebsanleitung nur auf das Vorhandensein einiger Punkte geprüft. Somit werden Kriterien wie die Bedienerfreundlichkeit von der Beurteilung ausgeschlossen. Aber selbst die Entscheidung über das Vorhandensein kann subjektiv geprägt sei, dies dann, wenn ein geforderter Punkt nur unvollständig vorhanden ist.

Tabelle 12 Überprüfung der Betriebsanleitung

Anleitung	
Anschlusschema	vorhanden/nicht vorhanden
Anleitung Inbetriebnahme Armatur/Entlüftung	vorhanden/nicht vorhanden
Anleitung Inbetriebnahme Regler	vorhanden/nicht vorhanden/nicht nötig
Anleitung Entkalkung	vorhanden/nicht vorhanden

7 Ergebnisse der Testreihe

In diesem Abschnitt werden exemplarische Messungen und Querschnittsvergleiche der gemessenen Module dargestellt. Die Messungen werden so vorgestellt, dass sie in die im vorgängigen Abschnitt dargestellten Testkriterien eingeordnet werden können. Tatsächlich wurde im Projektverlauf iterativ zwischen Messungen und der Ausarbeitung von Testkriterien gewechselt, weil sich beide Abschnitte gegenseitig bedingen: Die Testkriterien wurden anhand der Messergebnisse ausgearbeitet und – wo möglich und sinnvoll – vereinfacht, wofür wiederum ergänzende Messungen und Untersuchungen (Berechnungen, Simulationen, ...) durchgeführt wurden. Den Herstellern, welche ein Modul zu Testzwecken zur Verfügung gestellt haben wurde zugesichert, dass die Daten vollständig anonymisiert werden. Aus diesem Grund ist die Bezeichnung der Module (z.B. Modul1) nicht konsistent für alle Auswertungen auf dasselbe Modul bezogen.

7.1 L1 Leistung

7.1.1 Maximaler Sekundärvolumenstrom

Wie in Abschnitt 6.1 beschrieben, wurden Leistungsmessungen mit zwei eingestellten Solltemperaturen durchgeführt (45 °C und 60 °C). In Abbildung 26 werden die Leistungskurven (maximaler Sekundärvolumenstrom V'_{\max} in Abhängigkeit der Primärvorlauftemperatur) dargestellt. Dabei konnten Sekundärvolumenströme von deutlich mehr als 40 l/min nicht mehr gemessen werden, weil das der vorhandene Teststand für kleinere Module nicht mehr zulässt. Wie erwartet, sind die Kurvenverläufe für 45 und für 60 °C ähnlich, wobei die maximalen Sekundärvolumenströme bei der höheren Soll-Zapftemperatur für gleiche Temperaturdifferenz der beiden Vorlauftemperaturen etwas tiefer liegen, da zapfseitig eine höhere Wärmeleistung vom Modul gefordert wird. Die gemessenen fixen Temperaturüberhöhungen (Primärvorlauftemperatur liegt 5, 10 und 15 K über der Solltemperatur) sinken somit relativ zur benötigten Energie. Einzig beim Modul 7 weichen die Kurven von der erwarteten Form deutlich ab. Bei näherem Betrachten der Messungen an Modul 7 wurde festgestellt, dass dabei die Pumpenleistung nicht immer voll ausgeschöpft wurde, auch wenn die tatsächliche Sekundärvorlauftemperatur schon unter 42 °C resp. 57 °C gesunken war. Damit können die unregelmässigen Kurvenverläufe dieses Moduls erklärt werden. Es können zwei Gruppen von Modulen ausgemacht werden, eine Gruppe mit maximalen Sekundärvorlauftemperaturen um die 20 l/min kann dabei als typische Dimensionierung für Einfamilienhaushalte angesehen werden, obwohl diese Module alle eine ähnlichen maximalen Sekundärvolumenstrom aufweisen, weichen die Bezeichnungen dieser Module deutlich voneinander ab. Einige werden mit 35 l/min und andere mit 20 l/min bezeichnet. Viele Hersteller sind aber dazu übergegangen differenziertere Angaben zum maximalen Sekundärvolumenstrom zu machen und die Namensgebung nicht an den maximalen Sekundärvolumenstrom anzulehnen. Die Module mit maximalen Sekundärvolumenströmen um die 30 l/min sind auf grössere Verbraucher ausgelegt und können auch bei Zwei- und kleinen Mehrfamilienanlage, sowie bei der Verwendung von Luxusarmaturen eingesetzt werden. Bei diesen Modulen entsprachen die Bezeichnungen etwa den erreichten maximalen Volumenströmen. Bei einem der getesteten Module mit hydromechanischer Regelung hängt der maximale Sekundärvolumenstrom stark von der Temperatureinstellung ab. Bei diesem Modul führt eine höhere Temperatureinstellung auch zu einem grösseren maximalen Sekundärvolumenstrom, aber gleichzeitig auch zu höheren Sekundärvorlauftemperaturen und zu höheren Primärrücklauftemperaturen bei kleinen Volumenströmen. Für die Messungen am Teststand wurde eine mittlere Einstellung gewählt.

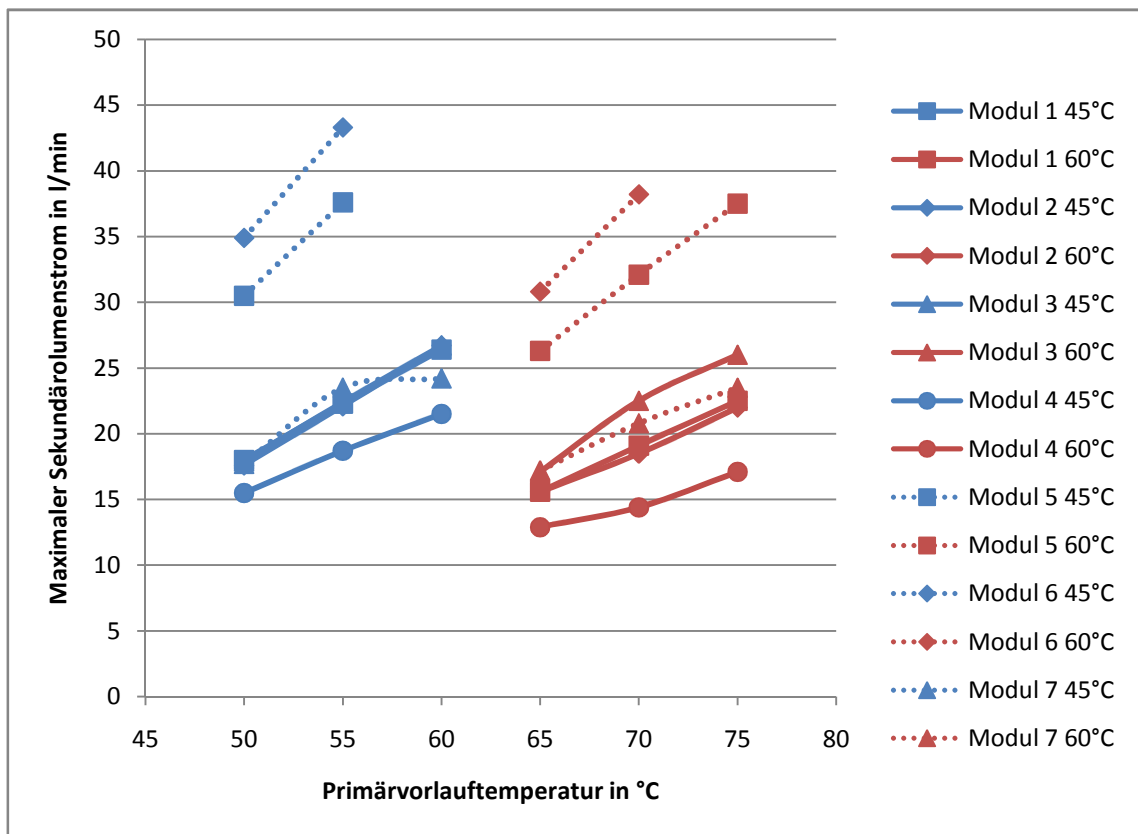


Abbildung 26 Vergleich der durchgeführten Leistungsmessungen zur Ermittlung des maximalen Sekundärvolumenstroms in Abhängigkeit der Primärvorlauftemperatur von acht Modulen für jeweils zwei Soll-Sekundärvorlauftemperaturen.

7.1.2 L2 Minimaler Sekundärvolumenstrom

Die gemessenen minimalen Sekundärvolumenströme nach dem Kriterium aus Abschnitt 6.1.3 lagen bei allen getesteten Modulen bei einem oder zwei Litern pro Minute. Somit trat bei allen Modulen schon bei sehr geringen Sekundärvolumenströmen eine Erwärmung des Trinkwassers auf. Dieser Parameter hat sich also bei allen bisher getesteten Modulen als unkritisch erwiesen. Bei kleinen Sekundärvolumenströmen wurden aber teilweise starke Temperaturschwankungen gemessen, welche im folgenden Kapitel zum Warmwasserkomfort behandelt werden.

7.2 Komfort

7.2.1 K1 Temperaturschwankungen bei konstantem Sekundärvolumenstrom

Das wichtigste Komfortkriterium ist eine konstante Sekundärvorlauftemperatur bei einem konstanten Zapfvolumenstrom. Nicht jedes Modul kann dies für alle Betriebsbedingungen erreichen. Insbesondere eine starke Temperaturerhöhung der Primär-Vorlauftemperatur und/oder kleine Zapfvolumenströme können problematisch sein. Obwohl Temperaturschwankungen hauptsächlich beim Duschen als unangenehm wahrgenommen werden, wurden sowohl eine *Händewaschzapfung* (3 l/min bei 42 °C Zapftemperatur nach Beimischung von Kaltwasser mit 10 °C), eine *kleine Duschzapfung* (7 l/min bei 42 °C Zapftemperatur nach Beimischung von Kaltwasser mit 10 °C) und eine *grosse Duschzapfung* (14 l/min bei 42 °C Zapftemperatur nach Beimischung von Kaltwasser mit 10 °C) getestet. In Tabelle 1 werden gemäss Kapitel 6.2.1.3 die gemessenen Temperaturschwankungen und die daraus folgenden Komfortstufen dargestellt. Angegeben wird die reduzierte Amplitude ΔT_{AR} , welche sich nach einer konstanten Beimischung von Kaltwasser mit 10 °C ergibt, um eine Zapftemperatur von 42 °C zu erreichen. Die Komfortstufe wird anhand des hinterlegten Farbcodes dargestellt; Stufe A=grün; Stufe B=hellgrün; Stufe C=gelb; Stufe D=rot. Da rasche Schwankungen stärker gedämpft werden, kann aus der reduzierten Amplitude nicht direkt auf die Komfortstufe geschlossen werden. Es

traten einige Temperaturschwankungen mit einer reduzierten Amplitude über acht Kelvin auf, welche trotzdem in die Komfortstufe C eingeteilt werden, da ihre Periode nur einige Sekunden dauert. Hingegen gibt es langsame Schwankungen, welche mit einer reduzierten Amplitude von sechs Kelvin schon in die Komfortstufe D eingeordnet werden. Starke Schwankungen mit Komfortstufe D wurden bei allen bisher getesteten Modulen nur bei der *Händewaschzapfung* oder mit einer Primärvorlauftemperatur von 90 °C gemessen. Dabei sind starke Temperaturschwankungen bei *Duschzapfungen* selbst bei einer Primärvorlauftemperatur von 90 °C nur in Einzelfällen aufgetreten. Bei Modul 1 handelt es sich um ein hydromechanisch geregeltes Modul, bei welchem keine Drehzahlgeregelte Pumpe eingesetzt wurde. Diese Art der Regelung führte zu einer sehr konstanten Sekundärvorlauftemperatur bei gleichbleibenden Bedingungen. Da die Temperaturschwankungen während der letzten Minute von drei Zapfungen mit der Dauer von fünf Minuten gemessen werden, kann die genaue Amplitude der Temperaturschwankung auch etwas vom Zufall abhängen. Bei Modul 6 und 7 wurden beispielsweise immer wieder leichte Änderungen der Sekundärvorlauftemperatur beobachtet diese langsamen Veränderungen haben zu den häufigen Klassifizierungen in Stufe B oder in wenigen Fällen gar C geführt. Bei Modul 7 traten auch teilweise deutliche Temperaturschwankungen auf welche auch nicht immer reproduzierbar wiederkehrten. Abgebildet sind aber die Temperaturschwankungen während des vorher zur Beurteilung definierten Zeitfensters.

Tabelle 13 Vergleich der Temperaturschwankungen bei konstantem Zapfvolumenstrom von 3, 7 und 14 l/min bei unterschiedlicher Solltemperatur/Primärvorlauftemperatur. Angegeben wird die reduzierte Amplitude und die Messpunkte sind mit folgendem Farbcode hinterlegt: Stufe A=grün; Stufe B=hellgrün; Stufe C=gelb; Stufe D=rot.

	45/50			45/55			45/90			60/65			60/70			60/90		
V _z	3	7	14	3	7	14	3	7	14	3	7	14	3	7	14	3	7	14
Modul 1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1
Modul 2	<1	<1	<1	<1	<1	<1	11.0	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	8.8	9.8	<1
Modul 3	<1	<1	<1	<1	<1	<1	11.0	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1
Modul 4	6.0	<1	<1	6.6	<1	<1	27.3	<1	16.3	4.7	<1	<1	10.7	<1	<1	17.6	<1	<1
Modul 5	<1	<1	<1	<1	<1	1.2	8.7	9.8	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1
Modul 6	2.4	1.2	<1	<1	<1	1.2	<1	3.0	1.2	1.3	1.2	2.3	<1	<1	<1	<1	1.2	2.1
Modul 7	4.7	<1	1.3	10.3	1.5	3.1	13.7	5.0	2.3	2.3	2.2	1.4	1.6	3.9	2	1.5	11.9	15.1
Modul 8	<1	<1	<1	1.4	<1	<1	8.0	2.4	1.8	5.0	<1	<1	5.6	<1	<1	11.5	<1	<1

7.2.2 K2 Temperaturschwankungen bei Störungen

Ein weiteres wichtiges Qualitätsmerkmal von Frischwassermodulen ist ihre Reaktion auf Störungen im Zapfprofil. Nach Störungen, wie das Zu- und Wegschalten von zusätzlichen Zapfstellen, Störungen durch *Schnapsglaszapfungen* oder Pausen während eines Zapfvorgangs, können unterschiedlich starke Unter- und Überschwinger auftreten. Diese sind meist stärker als bei konstanten Zapfbedingungen und unterscheiden sich daher von K1. Nach einer gewissen Zeit nach der Störung wird dann aber wieder die in K1 beschriebene Komfortstufe erreicht. Zur Beurteilung dieser Temperaturschwankungen ist sowohl die Amplitude der auftretenden Schwankung als auch die Geschwindigkeit beim Ausregeln dieser Störung entscheidend. In Abbildung 27 und Abbildung 28 werden diese beiden Merkmale dargestellt, indem die erreichte Komfortstufe in Abhängigkeit der Zeit nach unterschiedlichen Störungen dargestellt wird. Beide Beispiele zeigen Messungen mit einer eingestellten Solltemperatur von 45 °C und unterschiedlichen Primärvorlauftemperaturen. Im ersten Beispiel (Abbildung 27) wird das Verhalten eines hydromechanisch geregelten Moduls dargestellt. Bei diesem Modul treten nach den getesteten Stö-

rungen nur geringe Temperaturschwankungen auf und nach wenigen Sekunden wird in jedem Fall mindestens die Komfortstufe B erreicht. Im zweiten Beispiel (Abbildung 28) wird das Verhalten eines elektronisch geregelten Moduls gezeigt, dessen Regelung deutlich länger braucht, um eine quasikonstante Temperatur zu erreichen. Dabei ist zu beobachten, dass hauptsächlich

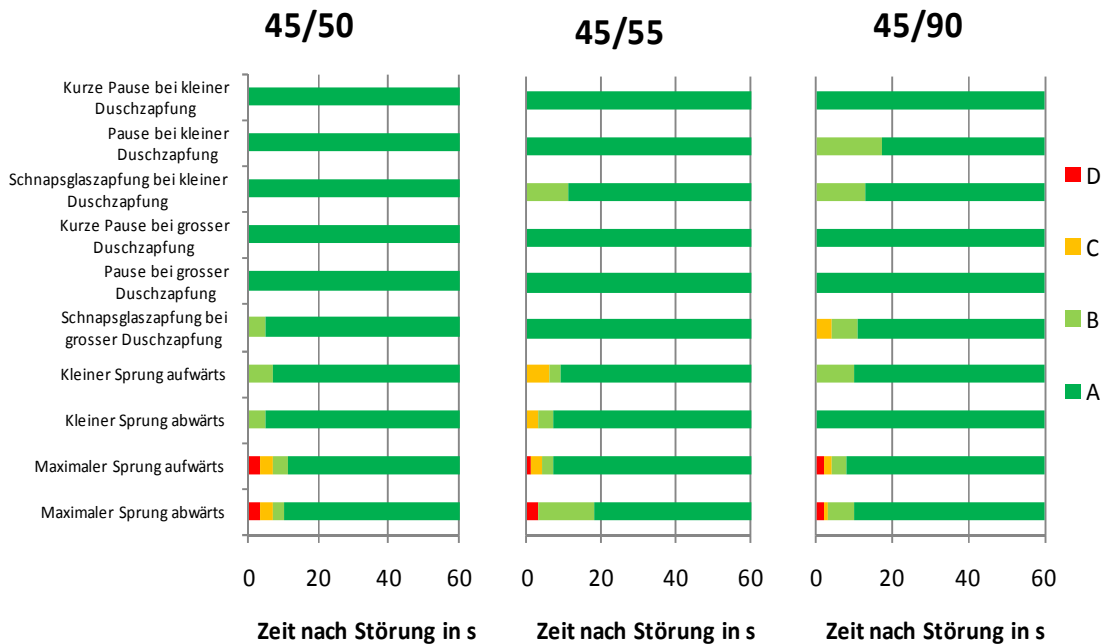


Abbildung 27 Beispiel von gemessenen Temperaturschwankungen nach typischen Störungen (vgl. Tabelle 1 in Kapitel 6.2.1.3). Die Farben zeigen die erreichte Komfortstufe in Abhängigkeit der Zeit nach den unterschiedlichen Störungen. Das Beispiel zeigt ein Modul mit wenig über und Unterschwinger, welche dann auch sehr rasch ausgegelt werden.

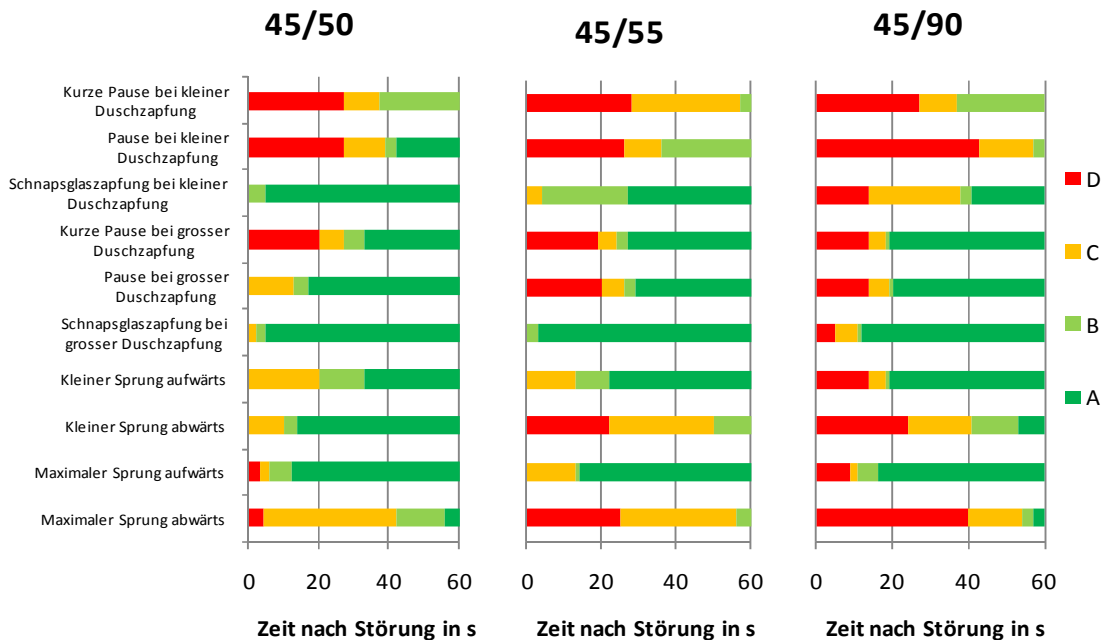


Abbildung 28 Beispiel von gemessenen Temperaturschwankungen nach typischen Störungen (vgl. Tabelle 1 in Kapitel 6.2.1.3). Die Farben zeigen die erreichte Komfortstufe in Abhängigkeit der Zeit nach den unterschiedlichen Störungen. Bei diesem Modul treten teilweise sehr langanhaltende Temperaturschwankungen auf.

die Pausen bei einer kleinen Duschzapfung zu hohen und langanhaltenden Temperaturschwankungen führen. Bei allen getesteten Bedingungen dauerten die starken Temperaturschwankungen länger als 20 Sekunden und teilweise sogar über mehr als 40 Sekunden an. Dies ist insofern problematisch, als dass ähnliche Pausen gerade beim Duschen (Einseifen) oft auftreten. Die anderen Störungen, welche meist mit dem Zu- und Wegschalten einer zusätzlichen Zapfstelle in Verbindung gebracht werden, treten bei kleinen Warmwasseranlagen für eine bis zwei Familien selten auf. Sie sind daher für kleine Stationen von geringerer Relevanz als Pausen. Erwartungsgemäss kann bei diesem Modul ein Trend zu höheren Temperaturschwankungen bei einer erhöhten Primärvorlauftemperatur (deutlich zu sehen bei 90 °C) ausgemacht werden. Die beiden Beispiele wurden ausgewählt um die deutlichen Unterschiede zwischen den getesteten Modulen aufzuzeigen. Daher liegen die meisten der getesteten Module zwischen den beiden gezeigten ‚Extrembeispielen‘.

7.2.3 K3 Sekundärvorlauftemperatur

In Abbildung 29 bis Abbildung 31 werden Beispiele von gemessenen Sekundärvorlauftemperaturen gezeigt. Im ersten Beispiel wird ein elektronisch geregeltes Modul gezeigt, welches auf eine fix eingestellte Sekundäraustrittstemperatur regelt. Bei sehr kleinen Sekundärvolumenströmen steigt die Sekundäraustrittstemperatur jedoch leicht an, da ein Regeln der Pumpe im kleinen Teillastbereich nicht möglich ist. Bei einer Primärvorlauftemperatur von 90 °C fällt die durchschnittliche Sekundärvorlauftemperatur im unteren Bereich deutlich ab. Bei diesen Bedingungen tritt ein getakteter Betrieb der Primärvorlaufpumpe auf, was zu Temperaturschwankungen führt. Die mittlere Temperatur dieser Schwankungen liegt bei diesem Modul bei einigen Betriebsbedingungen deutlich unter der eingestellten Solltemperatur. Im zweiten Beispiel (Abbildung 30) wird das Verhalten eines weiteren Moduls dargestellt, welches eine andere ‚Regelstrategie‘ anwendet. Das Modul passt den Primärvolumenstrom an den Sekundärvolumenstrom an, ohne kleine Abweichungen von der Solltemperatur sofort ‚auszuregulieren‘. Somit wird die eingestellte Solltemperatur nicht immer punktgenau getroffen, eine Regelcharakteristik mit Über- und Unterschwingern wird damit aber vermindert. Auch bei diesem Modul tritt bei sehr kleinen Sekundärvolumenströmen ein getakteter Betrieb der Primärpumpe mit den daraus folgenden Temperaturschwankungen auf, welche zu den dargestellten Abweichungen von der Solltemperatur führen. Im dritten Beispiel Abbildung 31 wird das Verhalten eines Moduls mit einer hydromechanischen ‚Regelung‘ dargestellt. Dabei wird nicht auf eine fixe Solltemperatur geregelt, sondern der Primärvolumenstrom wird über eine hydromechanische Steuerung angepasst. Somit ergeben sich unterschiedliche Primärvorlauftemperaturen für unterschiedliche Bedingungen. Die erreichten Temperaturen sind bei diesem Modul von der ‚Reglereinstellung‘ abhängig, die sowohl die Primärrücklauftemperatur, Sekundärvorlauftemperatur und den maximalen Sekundärvolumenstrom beeinflusst. In dem dargestellten Test wurde eine mittlere Einstellung verwendet, welche einen Kompromiss zwischen einem grossen maximalen Sekundärvolumenstrom und möglichst tiefen Primärrücklauftemperaturen bildet.

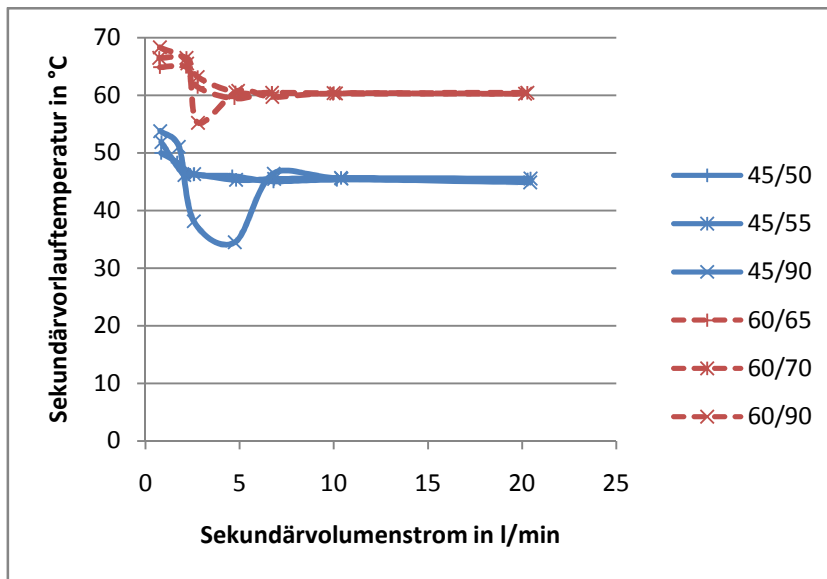


Abbildung 29

Sekundärvorlauftemperaturen in Abhängigkeit des Sekundärvolumenstroms für zwei eingestellte Solltemperaturen (60 bzw. 45 °C) und unterschiedliche Primärvorlauftemperaturen.

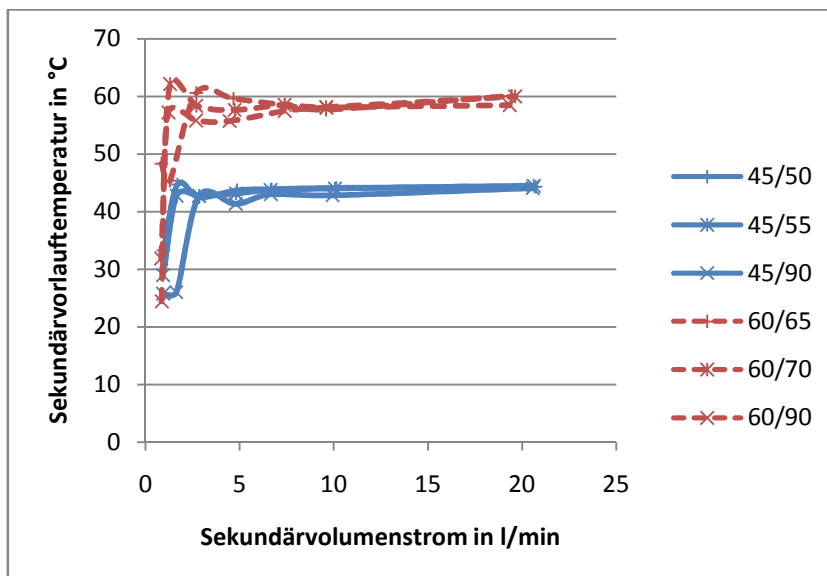


Abbildung 30

Sekundärvorlauftemperaturen in Abhängigkeit des Sekundärvolumenstroms für zwei eingestellte Solltemperaturen (60 bzw. 45 °C) und unterschiedliche Primärvorlauftemperaturen. Dargestellt ist ein Modul, welches die Pumpenleistung an den Sekundärvolumenstrom anpasst, jedoch nicht genau auf eine eingestellte Solltemperatur regelt.

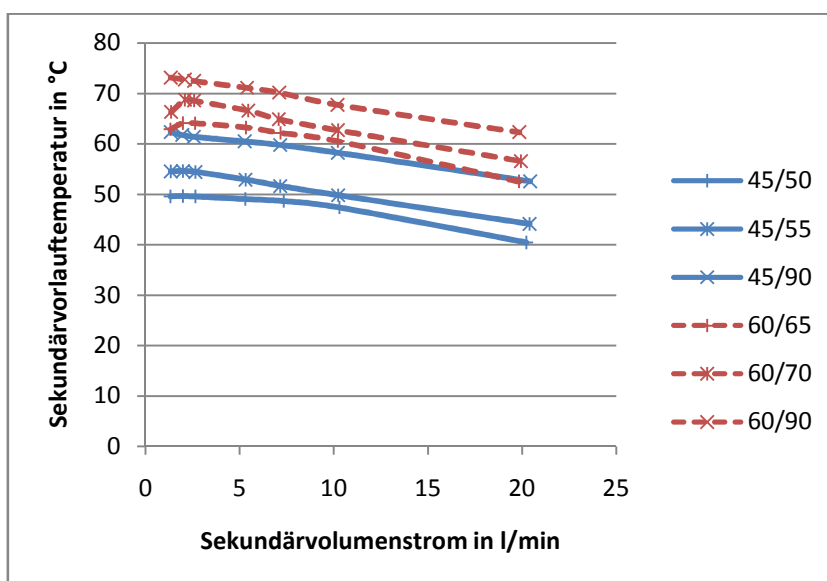


Abbildung 31

Sekundärvorlauftemperaturen in Abhängigkeit des Sekundärvolumenstroms für zwei eingestellte Solltemperaturen (60 bzw. 45 °C) und unterschiedliche Primärvorlauftemperaturen. In diesem Beispiel wird ein Modul dargestellt, bei welchem nicht auf eine konstante Sekundärvorlauftemperatur

7.3 Energieeffizienz

7.3.1 E1 Elektrischer Energieverbrauch

Der elektrische Energieverbrauch wurde bei den getesteten Modulen für die in Kapitel 6.3.1 beschriebenen Bedingungen gemessen und daraus der Energieverbrauch für ein ganzes Jahr abgeschätzt (Tabelle 14). Die daraus resultierenden Zahlen bewegen sich alle unter 30 kWh/y und sind daher im Vergleich zu der übertragenen Energie sehr gering. Sie liegen bei weniger als einem Prozent der benötigten Energie zur Erwärmung des Trinkwarmwassers. Hier wird der elektrische Energieverbrauch bei ausgeschalteter Zirkulation dargestellt, um Module mit und ohne Zirkulationseinheit miteinander vergleichen zu können. Bei eingeschalteter Zirkulation wird der elektrische Energieverbrauch von der Zirkulation dominiert und hängt fast ausschliesslich von den Laufzeiten der Zirkulationspumpe ab. Da die Laufzeiten meist frei vom Betreiber eingestellt werden kann, wird auf ein Abschätzen des Jahresverlustes aufgrund der Zirkulation verzichtet. Dem Vorhandensein von unterschiedlichen Zirkulationsmodi der Regelung wird aber durch das Auflisten der Zirkulationsmodi in 7.4 Rechnung getragen. Das Modul ohne drehzahl-geregelter Pumpe (Modul 4 in Tabelle 14) führt trotz hohem Stromverbrauch im Betrieb nur zu einem mittleren Jahresstromverbrauch, da nur ein sehr geringer Standby-Verbrauch gemessen wurde. Da mit einem Verbrauch von 200 l/d bei 42 °C (entspricht etwa dem Verbrauch einer Familie) gerechnet wird, fallen also hauptsächlich die Standby-Verluste ins Gewicht, welche aber durch die Messunsicherheit des Strommessgerätes von ± 0.4 W auch mit einer grossen Unsicherheit behaftet ist.

Tabelle 14 Vergleich des gemessenen elektrischen Energieverbrauchs von unterschiedlichen getesteten Modulen.

	Mod. 1	Mod. 2	Mod. 3	Mod. 4	Mod. 5	Mod. 6	Mod. 7	Mod. 8
Standby [W]	2.3	2.3	2.3	0.9	2.0	1.7	1.4	1.2
Händewaschen [W]	56	14	12	86	8	11	9	7
Kleine Dusche [W]	64	26	21	88	9	20	12	15
Grosse Dusche [W]	70	46	47	87	23	36	21	28
Jahresverbrauch [kWh]	29	24	24	21	19	18	15	13

7.3.2 E2 Auskühlverluste

Nach der in Kapitel 6.3.2 beschriebenen Prozedur wurde sowohl die thermische Masse, die Auskühlgeschwindigkeit und die mittlere Modultemperatur nach einer typischen Duschzapfung gemessen. Module mit grossen Wärmeübertragern (Modul 3 und Modul 4 aus Tabelle 15) weisen auch eine grosse thermische Masse auf. Die gemessenen Auskühlkoeffizienten liegen bei allen Modulen recht nahe beieinander, einzig ein Modul weist eine deutlich erhöhte Auskühlung auf. Dies liegt aber an der ungünstigen Montage.¹ Ein weiterer Parameter, der bei diesem Modul zu deutlich erhöhten Auskühlverlusten führt, ist die hohe Modulmitteltemperatur. Diese hängt vom Regelprinzip, aber beispielsweise auch von der Nachlaufzeit der Pumpe ab. Wenn die Pumpe nach Zapfende noch deutlich nachläuft, so wird der Wärmeübertrager zusätzlich mit heissem Pufferwasser beladen. Somit wird dem Modul Wärme zugeführt, welche zu einer erhöhten Modulmitteltemperatur führt.

¹ Das Modul ist eigentlich für eine direkte Montage am Speicher konzipiert und musste am Teststand so montiert werden, dass eine grosse Öffnung in der isolierenden Hülle entstand. Die zusätzlichen Verluste sind also auf die unsachgemässe Montage zurückzuführen.

Tabelle 15 Vergleich der abgeschätzten Jahresauskühlverluste und der dazugehörigen Messungen.

	Mod. 1 ¹	Mod. 2	Mod. 3	Mod. 4	Mod. 5	Mod. 6	Mod. 7
Thermische Masse C [kWh/K]	13	10.5	24	24	13	14	10
Auskühlungskoeffizient UA [W/K]	1.4	0.6	0.7	0.8	0.8	0.7	0.5
Mittlere Modultemperatur [°C]	50	39	34	31	30	30	34
Jahresverluste [kWh]	186	68	64	59	44	44	38

7.3.3 E3 Rücklaufftemperatur

Die Rücklaufftemperatur wurde bei den im Abschnitt 6.3.3 beschriebenen Bedingungen gemessen und ausgewertet. In den folgenden Diagrammen (Abbildung 32 bis Abbildung 35) werden Beispiele von gemessenen Primärrücklaufftemperaturen gegeben. Dabei wird die Temperaturdifferenz zwischen Primärrücklauf und Sekundärrücklauf dargestellt, damit die noch akzeptierte Variabilität der Sekundärrücklaufftemperatur (10 ± 1 °C) keinen direkten Einfluss auf das Resultat hat. Die Rücklaufftemperatur wurde bei einer eingestellten Solltemperatur von 45 °C für drei Primärvorlaufftemperaturen (50 °C, 55 °C und 90 °C) und für vier unterschiedliche Zapfvolumenströme gemessen. Der Zapfvolumenstrom bezeichnet dabei nicht den am Modul auftretenden Sekundärvolumenstrom, sondern den Volumenstrom, der nach einer Beimischung von Kaltwasser mit 10 °C an der Zapfstelle auftreten würde, um eine Zapftemperatur von 42 °C zu erreichen. Der am Modul auftretende Sekundärvolumenstrom wird also je nach Sekundärvorlaufftemperatur angepasst. Durch die Verwendung des Zapfvolumenstromes statt des Sekundärvolumenstromes werden die Module bei derselben übertragenen Leistung miteinander verglichen.

Im ersten Beispiel Abbildung 32 wird das Verhalten eines Moduls mit einem grossen Wärmeübertrager und einer gut funktionierenden Regelung aufgezeigt.² Bei kleinen Zapfvolumenströmen und müssen nur kleine Leistungen übertragen werden. Da die Wärmeübertrager aber für die Spitzenlasten ausgelegt sind, reicht im unteren Leistungsbereich ein geringer Temperaturunterschied zwischen Primär- und Sekundärseite aus, um die nötige Leistung zu übertragen. Auch die Primärvorlaufftemperatur hat einen starken Einfluss auf die Primärrücklaufftemperatur. Bei einer hohen Primärvorlaufftemperatur (z.B. 90 °C) ist nur ein kleiner Primärvolumenstrom nötig, um dieselbe Leistung zur Verfügung zu stellen. Die unterschiedlichen Volumenströme auf der Primär- und Sekundärseite führen zu einer ungleichen Temperaturverteilung über die Länge des Wärmeübertragers, bei der die warmen Temperaturen rasch abfallen und sich rasch der Sekundärvorlaufftemperatur angleichen. Somit kühlt auch die Primärrücklaufftemperatur rasch und stark aus. Im zweiten Beispiel (Abbildung 33) wird ein ähnliches Verhalten aufgezeigt. Dabei führt aber ein etwas kleinerer Wärmeübertrager zu leicht erhöhten Primärrücklaufftemperaturen. Beim grössten gemessenen Wert von 27 l/min kann die gewünschte Sekundärvorlaufftemperatur nicht mehr erreicht werden. Damit fällt auch die Primärrücklaufftemperatur ab. Dieser Wert ist aber nicht mehr vergleichbar mit Modulen, welche die gewünschte Sekundärvorlaufftemperatur noch erreichen. Im dritten Beispiel (Abbildung 34) wird ein ähnliches Verhalten dargestellt. Durch Probleme bei der Regelung von Zapfvolumenströmen mit 3 l/min wird die Primärrücklaufftemperatur in diesen Betriebspunkten erhöht. Im vierten Beispiel (Abbildung 35) treten deutlich erhöhte Primärrücklaufftemperaturen auf. Dieses Modul besitzt eine hydromechanische Regelung, bei welcher sich auch die Sekundärvorlaufftemperatur mit dem Zapfvolumenstrom ändert. Bei tiefen Primärvorlaufftemperaturen wird ein hoher Primärvolumenstrom und somit eine deutlich erhöhte Primärrücklaufftemperatur gemessen. Da sich bei diesem Modul sowohl die Sekundärvorlaufftemperatur und damit auch der maximale Sekundärvolumenstrom als auch

² Die Kennzeichnung * bedeutet, dass auf den Volumenstrom Bezug genommen wird, der an der Zapfstelle nach Beimischung von Kaltwasser mit 10°C auftritt, damit eine Zapftemperatur von 42°C zustande kommt. Es werden also Messpunkte miteinander verglichen bei welchen dieselbe Leistung am Modul übertragen wird. Der Sekundärvolumenstrom (am Modul) wird dabei je nach erreichter Sekundärvorlaufftemperatur angepasst. Eine erhöhte Sekundärvorlaufftemperatur führt also zu einer Beimischung von mehr Kaltwasser und somit zu einem geringeren Sekundärvolumenstrom direkt am Modul.

die Primärücklauftemperatur verändert, ist das Resultat stark von der gewählten Einstellung abhängig. Für die Messungen wurde eine mittlere Einstellung gewählt, welche ein Kompromiss zwischen einem hohen maximalen Sekundär volumenstrom und erhöhten Primär volumenströmen darstellt. Andere Einstellungen führen zu deutlich geringeren Primärücklauftemperaturen, aber eben auch zu einem kleineren maximalen Sekundär volumenstrom. In Abbildung 36 wird das Verhalten eines Moduls dargestellt bei welchem eine optionale 'Komfortfunktion' eingeschaltet wurde. Diese Komfortfunktion führt zu einer besseren Regelung der Sekundär vorlauf temperatur, nimmt dabei aber eine erhöhte Rücklauf temperatur in Kauf.

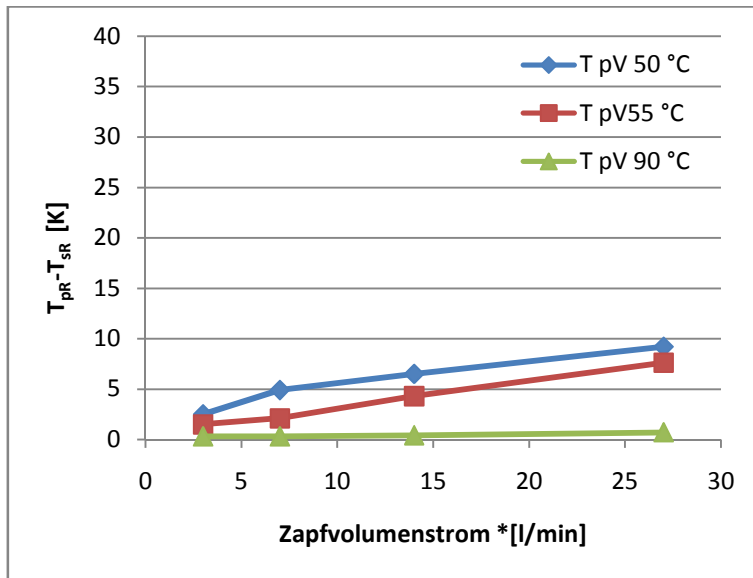


Abbildung 32 Beispiel von gemessenen Temperaturspreizungen zwischen Primär rücklauf und Sekundär vorlauf bei unterschiedlichen Bedingungen. Eingestellte Solltemperatur: 45 °C, Sekundär rücklauf temperatur: 10 °C. In diesem Beispiel wird das Verhalten eines Moduls dargestellt, bei dem der Primär volumenstrom gut an den Sekundär volumenstrom angepasst wird.

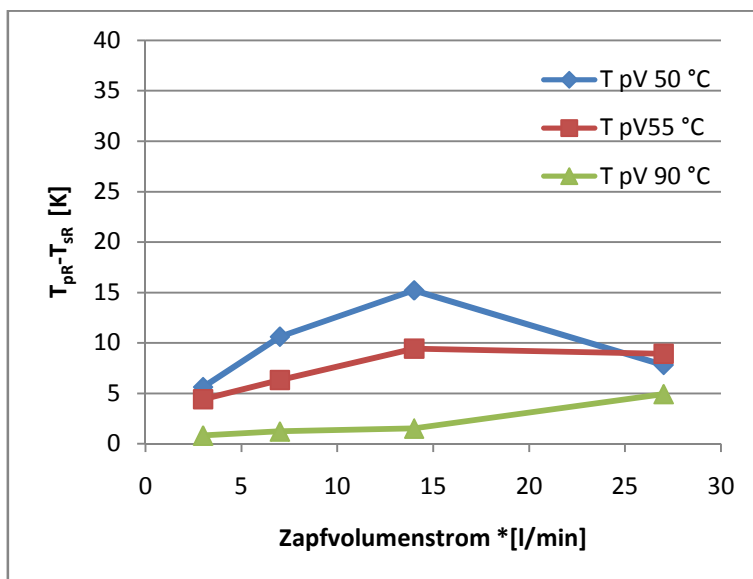


Abbildung 33 Beispiel einer gemessenen Temperaturspreizung zwischen Primär rücklauf und Sekundär vorlauf bei unterschiedlichen Bedingungen. In diesem Beispiel wird das Verhalten eines kleinen Moduls dargestellt, das den Volumenstrom von 27 l/min nicht erreichen kann. Aus diesem Grund fällt die Temperaturdifferenz bei kleinen Primär vorlauf temperaturen. Zur vereinfachten Abschätzung des zusätzlichen Jahresenergieverbrauchs spielt dieser Messpunkt aber keine Rolle.

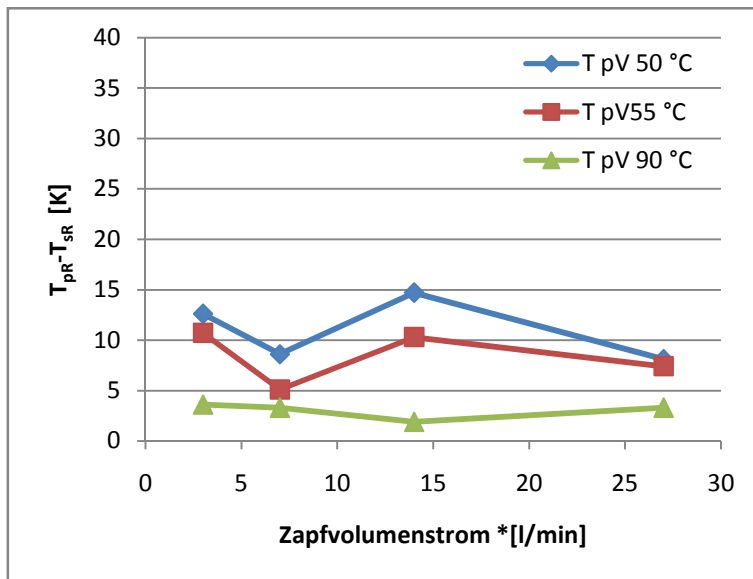


Abbildung 34 Beispiel einer Gemessenen Temperaturspreizung zwischen Primär-rücklauf und Sekundärvorlauf bei unterschiedlichen Bedingungen. In diesem Beispiel wird das Verhalten eines Moduls dargestellt, bei welchem Problemen mit der Regelung von kleinen Volumenströmen eine erhöhte Rücklauftemperatur auftritt.

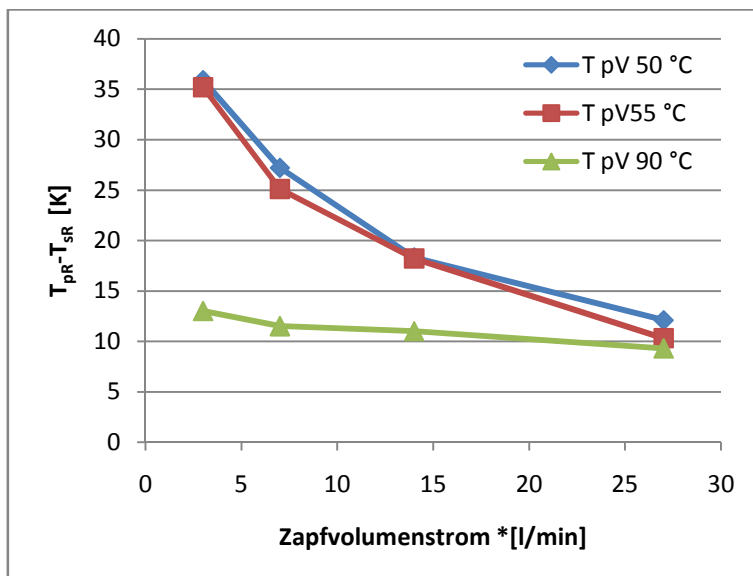


Abbildung 35 Beispiel einer Gemessenen Temperaturspreizung zwischen Primär-rücklauf und Sekundärvorlauf bei unterschiedlichen Bedingungen. In diesem Beispiel wird das Verhalten eines Moduls dargestellt, bei welchem die Regelstrategie zu einer stark erhöhten Rücklauftemperatur bei kleinen Volumenströmen und bei tiefen Primärvorlauf-temperaturen führt.

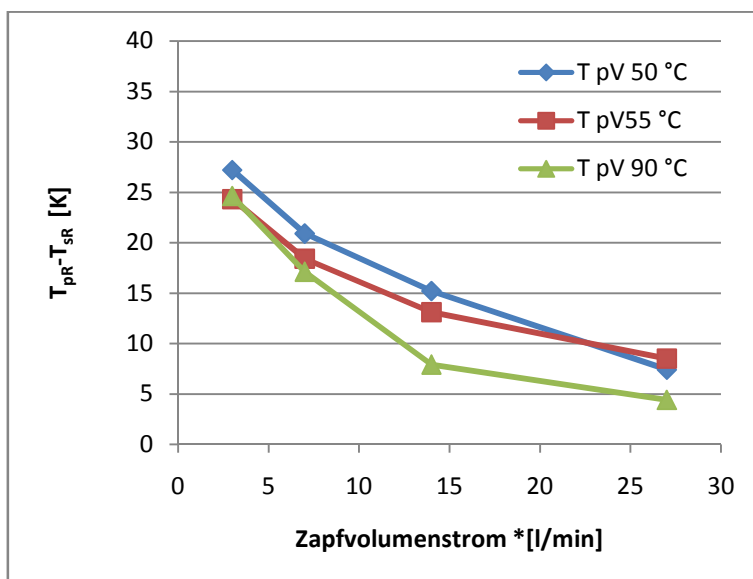


Abbildung 36 Beispiel einer Gemessenen Temperaturspreizung zwischen Primär-rücklauf und Sekundärvorlauf bei unterschiedlichen Bedingungen. In diesem Beispiel wird das Verhalten eines Moduls dargestellt, bei welchem eine optionale ‚Komfortfunktion‘ zu stark erhöhten Rücklauftemperatur bei kleinen Volumenströmen und bei tiefen Primärvorlauf-temperaturen führt.

Anhand der oben beschriebenen Messungen und der in Kapitel 6.3.3 beschriebenen Methode wurden die Zusatzenergieverbräuche abgeschätzt. Zum Überprüfen der Methode wurde für alle Module eine Jahressimulation durchgeführt. Dabei wurden die vollständigen gemessenen Loopkup-Tables implementiert. In Tabelle 15 werden die Resultate der vereinfachten Methode mit den Resultaten der kompletten Jahressimulationen verglichen. Dabei gab es eine gute Übereinstimmung, wobei die Abweichungen innerhalb von $\pm 10\%$ lag. Diese Abweichung ist insofern als klein zu erachten, da die Variabilität bei unterschiedlichen simulierten Systemvarianten deutlich grösser war (siehe Kapitel 6.3.3.3). Auch in Anbetracht der sehr deutlichen Unterschiede zwischen den einzelnen Modulen, die sich um fast einen Faktor 10 unterscheiden, sind die Unterschiede zwischen den beiden gering. Die vereinfachte Methode kann also zum Vergleich von Modulen eingesetzt werden. Wie schon zuvor diskutiert, sind die Resultate auf ein spezifisches System bezogen und für andere Systemkonfigurationen als Absolutwerte nicht direkt übertragbar. Zu den sehr deutlichen Unterschieden haben aber auch die angesetzten Bedingungen, insbesondere das Zapfprofil beigetragen. Für eine Duschzapfung wurden ein kleiner Volumenstrom von nur 7 l/min bei 42 °C angenommen, was etwa einer Energiesparbrause entspricht. Dies wirkt sich bei einer Mehrzahl der Module positiv auf den Zusatzenergieverbrauch aus, da die Primärrücklauftemperatur bei kleineren Zapfvolumenströmen eher sinkt (Beispiele in Abbildung 32 bis Abbildung 34). Die Module, für welche ein hoher Zusatzenergieaufwand abgeschätzt wurde, zeigen aber eher einen Anstieg der Primärrücklauftemperatur bei sinkenden Zapfvolumenströmen (Abbildung 35 und Abbildung 36). Dieser Effekt hat sowohl bei dem getesteten hydromechanischen Modul (7), als auch bei einem Modul bei welchem eine ‚Komfortfunktion‘ (6b) für einen noch deutlich erhöhten Zusatzenergieverbrauch geführt.

Tabelle 16 Vergleich der abgeschätzten Zusatzenergieverbräuche eines typischen Solarkombisystems anhand der Vereinfachten Methode im Vergleich zu vollständigen Jahressimulationen.

Module	Regelung	Simulation	Vereinfachte Methode
		[kWh/a]	[kWh/a]
1	elektronisch	31	32
2	elektronisch	67	72
3	elektronisch	58	62
4	elektronisch	92	96
5	elektronisch	98	109
6a	elektronisch	79	87
6b	elektronisch	277	269
7	hydromechanisch	390	351

7.4 Wartung/Installation

Es wurde eine Station mit hydromechanischer Regelung und mehrere Stationen mit elektronischer Regelung getestet. Die getesteten Stationen unterscheiden sich sowohl in der Wahl und Lage der Wärmeübertrager und der internen Verrohrung, als auch bei der Wahl der eingesetzten Komponenten. Im folgenden Abschnitt wird eine Übersicht über die einzelnen betrachteten Punkte gegeben.

W1 Aufbau

- Anschlüsse: Bei den kleineren Stationen wurden meist $\frac{3}{4}$ " Anschlüsse gewählt. Dabei kamen sowohl flachdichtende als auch konische Verschraubungen zum Zug. Bei den grösseren Modulen wurden aber meist grössere Durchmesser von 1" gewählt. Einige Hersteller haben für Primär- und Sekundärseite absichtlich unterschiedliche Anschlüsse verwendet, um Verwechslungen zu vermeiden. Bei anderen Herstellern wurden dieselben Anschlüsse für Primär und Sekundärseite verwendet.

- **Materialien:** Alle getesteten Module waren mit kupfergelöteten Edelstahl-Plattenwärmeübertrager ausgestattet. Des Weiteren wurden sowohl Kupfer- als auch Stahlverrohrungen und hauptsächlich Messingverbindungen eingesetzt. Bei den Pumpen kam aber auch Rotguss und bei einigen Durchflusssensoren auch Kunststoff zur Anwendung.
- **Wärmeübertrager:** Bei den getesteten Modulen wurden immer Kupfer gelötete Edelstahlwärmeübertrager unterschiedlicher Grössen eingesetzt. Dabei wurden Übertrager mit einer Fläche von mindestens 1 m² eingesetzt. Für die grösseren Module wurden aber auch Wärmeübertrager mit annähernd der doppelten Wärmeübertragungsfläche verwendet.
- **Pumpen:** Die RS-Serie der Firma Wilo [25] wird von vielen Herstellern eingesetzt. Nur zwei Hersteller verwenden Pumpen von anderen Herstellern.
- **Zusatzarmaturen:** Bei der Hälfte der getesteten Module kamen Schwerkraftbremsen resp. Rückschlagventile zum Einsatz. Diese sollen eine Auskühlung des Speichers durch schwerkraftbedingte Umwälzung durch das Modul verhindern. Ähnlich sieht es bei zusätzlichen Entlüftungsventilen aus, auch hier wurde etwa bei der Hälfte der getesteten Module ein zusätzliches Entlüftungsventil eingesetzt. Ein Hersteller bezeichnet das Modul als ‚selbstentlüftend‘ was bei der Montage auch soweit funktioniert hat.
- **Sensorik:** Zwei Hersteller von getesteten Modulen verwenden einen externen Temperatursensor welcher im Oberen Bereich des Speichers fixiert werden muss. Zusätzlich werden sowohl Anlegefühler, Tauchfühler als auch im Volumenstromsensoren integrierten Temperaturfühler verwendet. Als Volumenstromsensoren werden fast ausschliesslich Vortex-Sensoren verwendet, wobei die Grundfos VFS [26] dominieren.
- **Regelung:** Die meisten der getesteten Module sind mit Reglern ausgestattet, welche individuell programmiert wurden. Es gibt aber auch Hersteller welche Ihre Produkte mit unterschiedlichen Regelungen von Bekannten Herstellern wie Resol oder Steca anbieten.

W2 Wartung und Verkalkung

- **Absperrhahnen:** Bei allen getesteten Modulen waren Absperrhahnen im Primärvor und Rücklauf integriert oder wurden mit dem Modul mitgeliefert. Der Sekundärkreis ist nicht bei allen Modulen komplett absperrbar. Die meisten Hersteller welche Absperrhahnen auf beiden Seiten des Sekundärkreises eingebaut haben, integrieren auch ein zusätzliches Überdruckventil im Sekundärkreis.
- Die getesteten elektronisch geregelten Module weisen mittlerweile Anschlüsse unten am Wärmeübertrager auf. Es wurde lediglich ein Modul mit den warmen Anschlüssen oben am Wärmeübertrager getestet, welches dann aber im Laufe des Projektes mit einer anderen Version ersetzt wurde. Das hydromechanisch geregelte Modul hat aber keinen klassischen Aufbau mit Plattenwärmeübertragern und internen Zuleitungen. Aufgrund des gewählten Aufbaus kann aber durchaus von warmen Anschlüssen im oberen Bereich des Wärmeübertragers gesprochen werden.
- Von zwei Herstellern werden bereits Anschlussbahnen zur Entkalkung im Modul integriert ein anderer Hersteller bietet Anschlüsse direkt am Wärmeübertrager.
- Es wurde nur ein Modul mit integrierter Primärvorlauftemperaturbegrenzung getestet. Die hydromechanische Regelung arbeitet aber auch mit einer Beimischung auf der Primärseite, welche die Eintrittstemperatur in der Wärmeübertrager beschränkt.
- **Fehlererkennung:** Zwei Hersteller haben in der Regelung eine Fehlererkennung integriert. Die genaue Funktionalität dieser Fehlererkennung wurde aber nicht geprüft.

W3 Regelung

- **Solltemperatur:** Bei allen Modulen kann die Solltemperatur verstellt werden. Einige Hersteller lassen aber Einstellungen unter 45 °C nicht zu und andere Begrenzen den Bereich bei 60 °C um Verbrühungen zu vermeiden. Bei einem Regler können auch Tageszeitlich unterschiedliche Solltemperaturen eingegeben werden.
- **Sonderfunktion:** Wie schon oben erwähnt wurde ein Modul mit einer ‚Komfortfunktion‘ getestet welche die Zirkulationspumpe in die Regelung mit einbezieht. Ein anderes Modul weist die Möglichkeit einer optionalen Warmhaltefunktion des Wärmeübertragers

auf. Einige Hersteller bieten mit der Zirkulationsfunktion eine sogenannte Legionellen Schutzfunktion an, bei der die Zirkulationsleitung einmal in der Woche auf 70 °C erwärmt wird. Dabei muss aber auch eine genügen heisse Primärvorlauftemperatur zur Verfügung stehen.

- Zirkulation: Wenn eine Zirkulationsleitung vorhanden ist werden oft auch unterschiedliche Zirkulationsmodi angeboten. Sperrzeiten der Zirkulationsfunktion konnten bei allen getesteten Modulen, welche auch ein Zirkulationsmodul integriert hatten, eingegeben werden. Andere Module bieten auch noch die Wahl einer Zapfaktivierung oder der Kombination von Zapfaktivierung und Zeitfensteraktivierung an.

W4 Bedienungsanleitung

- Ein Anschlussschema wurde bei allen getesteten Modulen mitgeliefert.
- Der Stand der mitgelieferten Betriebsanleitungen war sehr unterschiedlich. Einige Hersteller bieten eine sehr ausführliche Betriebsanleitung mit genauer Beschreibung der Inbetriebnahme von Regler und Armaturen und auch eine Anleitung zur Entkalkung. Module, welche hauptsächlich über OEM Firmen vertrieben werden, wurden mit einer spärlichen Montageanleitung, welche fast ausschliesslich ein Anschlussschema enthielt angeliefert.

8 Diskussion

8.1 Leistung

Der maximale Sekundärvolumenstrom hängt stark von der zur Verfügung stehenden Primärvorlauftemperatur ab (siehe auch Abbildung 26 oben). Da unterschiedliche Hersteller bis anhin Leistungsangaben bei unterschiedlichen Bedingungen gemacht haben, waren diese auch nicht vergleichbar. Der Vorschlag von einem Leistungskennwert $V'_{\text{Max } 45/55}$ (bei einer eingestellten Solltemperatur von 45 °C, einer Primärvorlauftemperatur von 55 °C und einer Sekundärrücklauftemperatur von 10 °C) soll die Leistungsangaben der unterschiedlichen Hersteller vergleichbar machen. Die Messungen des maximalen Sekundärvolumenstroms bei unterschiedlichen Bedingungen, wie in Abbildung 26 dargestellt, dienen einer genaueren Charakterisierung des Moduls. Diese Messung ermöglicht das Abschätzen des maximalen Sekundärvolumenstroms für unterschiedliche Systemeinstellungen resp. unterschiedliche Wärmequellen. So sind beispielsweise bei der Kombination mit einer Wärmepumpe die Werte bei einer kleinen Differenz zwischen Soll- und Primärvorlauftemperatur entscheidend. Wenn das Modul aber mit einem Stückholzkessel kombiniert wird, kann mit einer höheren Primärvorlauftemperatur und somit auch mit einem höheren Sekundärvolumenstrom gerechnet werden. Während der Laufzeit des Projektes konnte aber schon beobachtet werden, dass einige Hersteller dazu übergegangen sind, differenziertere Angaben zum maximal erreichbaren Sekundärvolumenstrom zu machen.

Der maximale Sekundärvolumenstrom hängt von Druckverlust der Bestandteile im Modul, aber auch den Verbindungsleitungen zum Speicher ab. Am Teststand wurden die Leitungsquerschnitte mit 32 mm Innendurchmesser sehr gross gewählt, womit der Druckverlust der im Modul verbauten Komponenten sehr stark dominiert, da in den getesteten Modulen für Ein- bis Zweifamilienhäuser Komponenten mit deutlich grösserem Druckverlust verbaut werden. In der Praxis können aber längere Leitungen mit kleinerem Querschnitt und ev. auch weitere Armaturen mit grossem Druckverlust verwendet werden, welche dann zu kleineren maximalen Sekundärvolumenströmen führen. Die gemachten Messungen führen zu einer Vergleichbarkeit der getesteten Module, in der Praxis können aber zusätzliche Druckverluste zu einer Verkleinerung des maximalen Sekundärvolumenstroms führen. Bei langen Anschlussleitungen ist also eine zur Auslegung eine genaue Betrachtung durch den Fachmann nötig.

Bei allen getesteten Modulen konnte eine Erwärmung des Sekundärvorlaufes schon bei 1 l/min oder 2 l/min gemessen werden. Der minimale Sekundärvolumenstrom ist also als Leistungsparameter bei den getesteten Modulen unproblematisch. Bei kleinen Volumenströmen traten aber oft Temperaturschwankungen auf, welche im folgenden Kapitel behandelt werden.

8.2 Komfort

Bei den wichtigen Betriebssituationen, also bei Zapfleistungen welche bei Duschen erreicht werden, haben mit wenigen Ausnahmen alle Module bei allen getesteten Bedingungen eine

relativ konstante Temperatur erreicht. Meistens werden Sekundärvorlauftemperaturen erreicht, welche um weniger als ein Kelvin schwanken. Damit wird von allen Modulen mit sehr wenigen Ausnahmerebedingungen ein sehr guter Komfort während des Duschens erreicht. Dabei werden die höchsten Komfortanforderungen aus der VDI 6003 [16] deutlich übertroffen. Anders bei kleinen Zapfvolumenströmen, welche beispielsweise beim Händewaschen auftreten. Sehr kleine Primärvolumenströme stellen für elektronische Regelungen mit drehzahlgesteuerten Pumpen eine Herausforderung dar. Daher zeigen die meisten Module mit drehzahl geregelter Pumpe Temperaturschwankungen bei sehr kleinen Zapfvolumenströmen, speziell bei sehr hohen Primärvorlauftemperaturen. Bei dem getesteten hydromechanisch geregelten Modul konnten hingegen keine Temperaturschwankungen ausgemacht werden.

Bei der Reaktion auf Störungen im Zapfprofil (wie Pausen, oder das Zu- und Wegschalten von zusätzlichen Zapfstellen) wurden deutliche Unterschiede zwischen den getesteten Modulen festgestellt. Einige der Module (insbesondere das hydromechanisch geregelte) erreichten in jedem Fall schon nach wenigen Sekunden eine konstante Sekundärvorlauftemperatur. Bei anderen Modulen wurden langanhaltende Temperaturschwankungen gemessen, welche teilweise deutlich länger als 30 Sekunden andauerten. Diese Regelzeiten sind lange im Vergleich zu den 10 resp. 15 Sekunden Ausstosszeit, welche nach der neuen SIA 385-1 [6] für Duschen mit resp. ohne Warmhaltefunktion noch akzeptiert werden. Diese langanhaltenden Einregelverhalten können insofern als deutliche Komforteinbusse angesehen werden, da sie mitten im Duschvorgang (bei Störungen durch andere Zapfstellen oder nach Pausen z.B. bei Einseifen) auftreten. Es muss aber auch angemerkt werden, dass bei Einfamilienhaushalten, also der typischen Anwendung der meisten getesteten Module, Überlagerungen von zwei Zapfungen nur selten vorkommen und daher nicht zu stark gewichtet werden sollten.

Das Erreichen einer konstanten und genau einstellbaren Sekundärvorlauftemperatur wird als ein weniger wichtiges Komfortkriterium angesehen, da bei den meisten Anwendungen die gewünschte Zapftemperatur durch die Beimischung von kaltem Wasser erreicht wird. Eine Primärvorlauftemperatur, welche sich in Abhängigkeit des Sekundärvolumenstroms verändert, führt dazu, dass bei veränderten Bedingungen ein Nachstellen des Brauchwassermischers erforderlich ist. Derselbe Effekt kann jedoch auch unabhängig von Frischwassermodule durch Veränderungen des Leitungsdrucks herbeigeführt werden. Nur beim hydromechanisch geregelten Modul sind Sekundärvorlauftemperaturen aufgetreten, welche sich in Abhängigkeit des Zapfvolumenstroms und der Primärvorlauftemperatur deutlich verändert haben. Alle elektronisch geregelten Module waren die erreichten Sekundärvorlauftemperaturen bei stark unterschiedlichen Bedingungen sehr ähnlich. Wenn aber Temperaturschwankungen aufgetreten sind, hat sich häufig auch die durchschnittliche Sekundärvorlauftemperatur verändert.

8.3 Energieeffizienz

Die Systemsimulationen nach Messungen der Primärrücklauftemperaturen haben gezeigt, dass es grosse Unterschiede zwischen Modulen gibt und dass die Primärrücklauftemperatur einen grossen Effekt auf die Systemeffizienz hat. Systemvariationen konnten aufzeigen, dass der Einfluss der Primärrücklauftemperatur zwar deutlich von dem gewählten Referenzsystem abhängt, die Grössenordnung der Zusatzverluste bleibt aber bei allen simulierten Variationen gleich. Bei Modulen mit deutlich erhöhten Primärrücklauftemperaturen ist also für alle Solar-kombisysteme mit einem deutlich erhöhten Zusatzverlust zu rechnen. Die abgeschätzten Zusatzverluste können 10% der benötigten Energie für die Trinkwarmwasserbereitung überschreiten und sind daher als hoch einzustufen. Bei günstigen Systemkonfigurationen wie einem sehr gut isolierten Speicher, oder bei anderen Zapfprofilen können die Realen Zusatzverluste im Vergleich zu den in Kapitel 7.3.3 abgeschätzten Zusatzverlusten deutlich geringer sein. Bei ungünstigen Konfigurationen können diese Werte aber auch deutlich überschritten werden. Da bei der Messung der Rücklauftemperatur nur kleine Messunsicherheiten auftreten, können die getesteten Module relativ gut miteinander verglichen werden. Die hohen gemessenen Primärrücklauftemperaturen des hydromechanisch geregelten Moduls können zum Teil aber auch auf die Einstellung zurückgeführt werden. Bei einer anderen Einstellung werden deutlich geringere Rücklauftemperaturen erreicht, aber es kann auch nicht mehr derselbe maximale Sekundärvolumenstrom erreicht werden. Da alle Tests mit derselben Einstellung durchgeführt wurden (und werden sollen), wurde eine mittlere Einstellung verwendet. In der Praxis kann die Einstellung am Modul aber dem gewünschten maximalen Zapfvolumenstrom angepasst werden. Begnügt

man sich dabei mit einem kleinen maximalen Volumenstrom, können tiefere Rücklauftemperaturen und somit weniger Zusatzverluste erreicht werden. Ebenfalls zu grossen zusätzlichen Verlusten hat eine Komfortfunktion bei einem getesteten Modul geführt. Dabei wird durch die Verwendung der Zirkulationspumpe eine bessere Regelgenauigkeit erreicht, welche aber auch erhöhte Rücklauftemperaturen zur Folge hat. Dabei ist es dem Benutzer überlassen, ob die Komfortfunktion eingeschaltet wird oder nicht. Der geringste zusätzliche Zusatzenergiebedarf durch erhöhte Rücklauftemperaturen wurde bei einem Modul abgeschätzt, welches mit einem maximalen Sekundär volumenstrom von $V'_{\max 45/55} > 35 \text{ l/min}$ für das verwendete Referenzzapfprofil eher überdimensioniert ist. Ein grosser Wärmeübertrager kann zu sehr tiefen Primär rücklauftemperaturen führen, wenn die Regelung in der Lage ist auch bei kleinen Volumenströmen den Primär volumenstrom ideal an den Sekundär volumenstrom anzugleichen. Ein Grossteil der getesteten Module mit einer drehzahl geregelten Pumpe führte zu ähnlichen Zusatzverlusten des Gesamtsystems. Dabei führten grösseren Wärmeübertrager mit nicht ganz idealer Regelung und kleinere Wärmeübertrager mit gut angepasster Regelung zu ähnlichen Resultaten. Diese lagen in der Grössenordnung von 2-3 % des Trinkwarmwasserenergiebedarfs und können daher als gering eingestuft werden.

Der elektrische Energieverbrauch während einer Zapfung ist nur von geringer Bedeutung, da bei durchschnittlichen Einfamilienhaushalten nur während ca. einer halben Stunde am Tag Zapfungen auftreten. Aus diesem Grund leistet auch schon ein sehr kleiner Standby-Verbrauch der Regelung einen wichtigen Beitrag zum Gesamtverbrauch. Diese Erkenntnis wurde erst im Verlauf des Projektes gewonnen und war bei der Wahl des Messgerätes für den elektrischen Energieverbrauch noch nicht vorhanden. Daher wurde ein Messgerät ausgewählt, welches für die Messung von grösseren elektrischen Leistungen ausgelegt ist und daher bei kleinen Standby-Verbräuchen eine grosse Messunsicherheit aufweist. Bei allen getesteten Modulen lag der elektrische Verbrauch aber bei weniger als 30 kWh/a und somit unter 1 % der benötigten Energie für die Trinkwarmwasserbereitung. Daher wird die Relevanz des elektrischen Energieverbrauches für die energetische Beurteilung eines Frischwassermoduls als gering eingestuft. Es ist aber nicht auszuschliessen, dass andere Produkte einen deutlich höheren Standby-Verbrauch aufweisen, welcher dann eine höhere Relevanz für die Gesamtenergiebilanz hätte. Wenn Frischwassermodule ohne Zirkulationsleitung eingesetzt werden, ist also ein geringer Standby-Verbrauch das wichtigste Kriterium für einen kleinen Energieverbrauch. Beispielsweise kann durch den Einsatz von Hocheffizienzpumpen nur sehr wenig elektrische Energie gespart werden. Ein getestetes Modul mit einer Hocheffizienzpumpe führte zwar zu einem der niedrigsten Energieverbräuche, dies jedoch vor allem auch durch einen geringen Standby-Verbrauch.

Alle vorgestellten Module waren mit einem isolierenden Gehäuse versehen und somit gut gegen Auskühlung geschützt. Die Messungen der mittleren Modultemperaturen nach einer kleinen Duschzapfung haben auch gezeigt, dass in den meisten Fällen relativ gering Durchschnittstemperaturen im Modul herrschen. Dies führte zu Auskühlverlusten im Bereich von 1-2 % des Trinkwarmwasserverbrauchs. Da alle Module von Herstellern für diese Tests zur Verfügung gestellt wurden, muss auch davon ausgegangen werden, dass es sich bei den getesteten Modulen auch um qualitativ hochwertige Produkte handelt. Aufgrund der schwer quantifizierbaren Unsicherheit bei den Messungen und der relativ tiefen absoluten Werte sollten die Unterschiede in dieser Grössenordnung nicht überbewertet werden. Ein getestetes Modul konnte am Teststand nicht korrekt montiert werden, da das Modul zur direkten Montage am Speicher konzipiert ist, was zu einer grossen Öffnung in der Isolation führte. Diese Montageart und auch eine hohe mittlere Modultemperatur führten dabei zu beträchtlichen Auskühlverlusten in der Grössenordnung von 6 % der Energie zur Trinkwarmwasserbereitstellung. Dies zeigt auf, dass es signifikante Unterschiede geben kann, und dass eine schlechte Isolation durchaus zu deutlich erhöhten Auskühlverlusten führen kann. Die angewendete Methode ergibt eine Abschätzung der Energie, welche durch Auskühlverluste des Modules an die Umgebung abgegeben wird. Da diese Verluste im Haus anfallen, könnte ein Teil davon auch der Heizung des Gebäudes zugeschrieben werden. Andererseits wird aber auch bei einem gut isolierten Modul, welches sehr langsam auskühlt, ein Teil der im Modul gespeicherten Wärme als Ausstossverlust verloren gehen. Da es sich um ein Beurteilungskriterium für die Komponente Frischwassermodule handelt, wurden die Ausstossverluste, welche sehr stark von der Leitung abhängig sind nicht beachtet. Daher ist auch unklar zu welchen Anteilen im Modul gespeicherte Wärme wieder zurück

in den Speicher fliesst, als Ausstossverlust verloren geht oder zur Aufwärmung der Leitung und somit zu einem rascheren Erreichen der Solltemperatur an der Zapfstelle beiträgt.

8.4 Wartung/Inbetriebnahme

Die genauere Betrachtung von Aufbau, Regelung, Bedienungsanleitung und den Massnahmen für Wartung und gegen Verkalkung hat eine grosse Variation im Detailaufbau aufgezeigt. Natürlich ist der Aufbau des hydromechanisch geregelten Moduls ganz anders als der von elektronisch geregelten. Die interne Leitungsführung und auch die verwendeten Komponenten waren bei allen getesteten Modulen unterschiedlich. Bei fast allen Modulen wird der Wärmeübertrager mittlerweile vertikal und mit den warmen Anschlüssen am unteren Ende eingebaut. Damit wird nach Zapfenden eine rasche Durchmischung des Wärmeübertragerinhaltes erreicht. Um die thermische Umwälzung nach Zapfende noch weiter zu verbessern, wurde bei zwei der getesteten Modulen der Wärmeübertrager gar schräg eingebaut.

Die Auflistung der verwendeten Komponenten soll dabei sicherstellen, dass es sich bei dem getesteten Modul auch um das tatsächliche Serienprodukt handelt. Wichtig ist dabei, dass dieselben Pumpen und derselbe Wärmeübertrager verwendet werden, da diese Komponenten einen wichtigen Anteil am Preis eines Frischwassermoduls ausmachen und die Leistungsfähigkeit stark beeinflussen.

9 Ausblick

Anhand der entwickelten Testprozedur können Frischwassermodule untersucht und verglichen werden. Dabei werden unterschiedliche Qualitätsmerkmale bezüglich Leistung, Komfort, Energieeffizienz und Wartung/Bedienung betrachtet. Der Fokus lag dabei immer bei der Bewertung der Komponente ‚Frischwassermodule‘.

Die Verbreitung und Weiterentwicklung der Testprozedur ist sicherlich stark davon abhängig, wie sie vom Markt aufgenommen wird. Zwei der am Projekt beteiligten Hersteller haben bereits angekündigt, dass sie die Testresultate zu Werbezwecken bzw. zur Aussendarstellung verwenden werden. In der Zeitschrift Sonne, Wind und Wärme wurde in einem Artikel über Frischwassermodule [27] bereits ausführlich über einige Aspekte der entwickelten Testprozedur berichtet. Dabei wurden auch Resultate aus Konferenzbeiträgen des SPF [28][29] aufbereitet und weiterverwendet.

Wichtige Punkte, welche noch nicht im Detail betrachtet werden konnten und welche für eine erweiterte Beurteilung von Frischwassermodulen wünschenswert wären, sind:

- **Die Bewertung des Zirkulationsbetriebes für Module mit Zirkulationsfunktion.** Dabei müssten mehrere Aspekte beachtet werden. Unter Anderem sind die Zirkulationsleitungen in der Praxis bezüglich Wärmeverluste und Wasservolumen sehr verschieden, was das definieren von relevanten Bewertungskriterien schwierig macht. Da es völlig unterschiedliche Zirkulationsstrategien (durchgehender Betrieb, frei wählbare Zeitfenster, Bedarfsgesteuert) ist eine einheitliche Bewertung nicht einfach zu realisieren.
- **Eine Quantifizierung der Verkalkung und andere Alterungseigenschaften.** Wie schon oben beschrieben, ist das SPF beim Versuch einer quantitativen Messung von Verkalkung auf grosse Schwierigkeiten gestossen. Eine Messung der Effektivität der unterschiedlichen Strategien gegen Verkalkung hätte aber speziell für die Schweiz eine sehr grosse Relevanz.

10 Symbolverzeichnis

T_{pV}	°C	Primärvorlauftemperatur
T_{pR}	°C	Primärrücklauftemperatur
T_{sV}	°C	Sekundärvorlauftemperatur
T_{sR}	°C	Sekundärrücklauftemperatur
T_{Modul}	°C	Mittlere Modultemperatur
T_{∞}	°C	Umgebungstemperatur
$\overline{T_{sV}}$	°C	Mittlere Sekundärvorlauftemperatur bei einer quasikonstanten Zapfung
ΔT_A	K	am Modulausgang
ΔT_{AR}	K	Reduzierte Amplitude einer Temperaturschwankung unter Berücksichtigung der Beimischung von Kaltwasser zum Erreichen von 42 °C an der Zapfstelle
$\Delta T_{p, \text{Emp}}$	K	Gemessenen Temperaturdifferenz an der Primärseite
$\Delta T_{s, \text{Emp}}$	K	Gemessenen Temperaturdifferenz an der Sekundärseite
$\Delta T_{p, \text{Th}}$	K	Gewünschte (theoretische) Temperaturdifferenz an der Primärseite
$\Delta T_{s, \text{Th}}$	K	Gewünschte (theoretische) Temperaturdifferenz an der Sekundärseite
$\Delta T_{\text{Max, Th}}$	K	Gewünschte (theoretische) Temperaturdifferenz zwischen den Eintritte
$\Delta T_{\text{Max, Emp}}$	K	Gemessenen Temperaturdifferenz zwischen den Eintritte
V'_p	l/min	Primärvolumenstrom
V'_s	l/min	Sekundärvolumenstrom
$V'_{\text{max x/y}}$	l/min	Maximalen Sekundärvolumenstrom bei: Wolltemperatur x; Primärvorlauftemperatur y
V'_{Zapf}	l/min	Volumenstrom an der Zapfstelle bezogen auf eine Zapftemperatur von 42 °C
\dot{c}_p	W/K	Kapazitätsstrom auf der Primärseite
\dot{c}_s	W/K	Kapazitätsstrom auf der Sekundärseite
Φ	1	Betriebscharakteristik (oder Effizienz) des Wärmeübertragers
ε	m	Oberflächenrauheit
D	m	Rohrdurchmesser
C	J/K	Thermische Masse
m_i	kg	Masse
c_i	J/(K kg)	Wärmekapazität
UA	W/K	Wärmeverlustkoeffizient
Q_0	J	Wärmemenge beim Start einer Auskühlung
Q_{Rest}	J	Wärmemenge nach Auskühlung

F_A	kWh/K	Faktor zur Berechnung der jährlichen Zusatzverluste aufgrund erhöhter Primärücklauftemperatur
Q_R	J	Jährliche Zusatzverluste aufgrund erhöhter Primärücklauftemperatur (alternativ in kWh)
F_A	1	Faktor zur Berechnung der jährliche Auskühlverluste
Q_A	J	Jährliche Auskühlverluste (alternativ in kWh)

11 Referenzen

- [1] T. Pauschinger, „Darf's ein bisschen mehr sein? - Solaranlagen zur kombinierten Brauchwassererwärmung und Raumheizung“, *Symposium Thermische Solarenergie*, S. 225-229, 1997.
- [2] C. Bales und T. Persson, „External DHW units for solar combisystems“, *Solar Energy*, Bd. 74, Nr. 3, S. 193-204, März 2003.
- [3] P. Vogelsanger und M. Haller, „Kompakte Kombi-Solarsysteme auf dem Prüfstand unter Einbezug der Zusatzheizung“, *Symposium Thermische Solarenergie*, Bd. 15, 2005.
- [4] DVGW W551, „Trinkwassererwärmungs- und Trinkwasserleitungsanlagen; Technische Massnahmen zur Verminderung des Legionellenwachstums; Planung, Errichtung, Betrieb und Sanierung von Trinkwasser-Installationen“, *Deutsche Vereinigung des Gas- und Wasserfaches*, 2004.
- [5] SVGW Merkblatt, „Legionellen in Trinkwasserinstallationen - Was muss beachtet werden?“, *Schweizerischer Verein des Gas- und Wasserfaches*, 2000.
- [6] SIA SN 385/1, „Warmwasserversorgung für Trinkwasser in Gebäuden – Grundlagen und Anforderungen“, *Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein*, 2011.
- [7] S. Graf, K. Boubaker, P. Helbling, und P.-A. Räber, „Legionellen und Legionellose“, BAG <http://www.bag.admin.ch>; 2000.
- [8] B. M. W. Diederer, „Legionella spp. and Legionnaires' disease“, *Journal of Infection*, Bd. 56, Nr. 1, S. 1-12, Jan. 2008.
- [9] L. F. Cabeza, „Legionella in Combisystem Tanks“, *University of Leida; A Report of IEA SHC Task 32: Advanced Storage Concepts for Solar and Low Energy Buildings*, 2005.
- [10] T. Makin, „Legionella Bacteria and Conditions for it's Growth and Thermal Desinfection in Stored , Pre-Heated Water for Domestic Purposes“, 2008.
- [11] W. Mathys, J. Stanke, M. Harmuth, und E. Junge-Mathys, „Occurrence of Legionella in hot water systems of single-family residences in suburbs of two German cities with special reference to solar and district heating“, *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, Bd. 211, Nr. 1-2, S. 179-185, März 2008.
- [12] P. Borella u. a., „Prevalence of anti-legionella antibodies among Italian hospital workers“, *Journal of Hospital Infection*, Bd. 69, Nr. 2, S. 148-155, Juni 2008.
- [13] B. Zietz, J. Wiese, F. Brengelmann, und H. Dunkelberg, „Presence of Legionellaceae in warm water supplies and typing of strains by polymerase chain reaction“, *Epidemiology and Infection*, Bd. 126, Nr. 1, S. 147-152, 2001.
- [14] H. Recknagel, E. Sprenger, und E.-R. Schramke, *Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik*, 73. Aufl. München: Oldenbourg Industrieverlag, 2007.
- [15] U. Frei, „CO2 – Effizienter Kalkschutz bei Solaranlagen Physikalischer Kalkschutz: Hokusfokus oder Realität; Erfahrungen aus einem Forschungsprojekt“, *Symposium Thermische Solarenergie*, Bd. 11, 2001.
- [16] VDI - Verein Deutscher Ingenieure, „VDI 6003 - Trinkwassererwärmungsanlagen Komfortkriterien und Anforderungsstufen für Planung, Bewertung und Einsatz“. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2004.
- [17] Deutsches Institut für Normierung, „DIN 4708-2 Zentrale Wassererwärmungsanlagen Regeln zur Ermittlung des Wärmebedarfs zur Erwärmung von Trinkwasser in Wohngebäuden“. Beuth Verlag GmbH, 1994.
- [18] DIN - Normenausschuss NAGas, FNH und NHRS, „DIN EN 13203-1- Gasbeheizte Geräte für die sanitäre Warmwasserbereitung für den Hausgebrauch -Geräte, die eine Nennwärmebelastung von 70 kW und eine Speicherkapazität von 300 Liter Wasser nicht überschreiten - Teil 1“. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2006.

- [19] F. Ruesch und E. Frank, „Einfluss von Rohrleitungen auf die Veränderung propagierender Temperaturprofile“, presented at the OTTI-Symposium Thermische Solarenergie, Bad Staffelstein, Deutschland, 2011.
- [20] U. Jordan und K. Vajen, „DHWcalc“. [Online]. Available: <http://solar.umwelt-uni-kassel.de/downloads.de.html>. [Accessed: 22-Nov-2010].
- [21] R. Heimrath und M. Haller, „The Reference Heating System, the Template Solar System“, A Report of IEA SHC Task 32: Advanced Storage Concepts for Solar and Low Energy Buildings, 2007.
- [22] M. Y. Haller u. a., „A unified model for the simulation of oil, gas and biomass space heating boilers for energy estimating purposes. Part I: Model development“, *Journal of Building Performance Simulation*, Bd. 4, Nr. 1, S. 1-18, 2011.
- [23] „Working document - implementing Directive 2010/30/EU of the European Parliament and of the Council with regard to energy labelling of water heaters and hot water storage tanks“. SNV.
- [24] „Solar Keymark“. [Online]. Available: <http://www.estif.org/solarkeymark/>. [Accessed: 08-Dez-2011].
- [25] „WILO SE - Startseite - Pumpen Intelligenz“. [Online]. Available: <http://wilo.de/cps/rde/xchg/de-de/layout.xsl/index.htm>. [Accessed: 09-Dez-2011].
- [26] „Grundfos Direct Sensors - Products - Vortex Flow Sensor“. [Online]. Available: http://net.grundfos.com/doc/webnet/directsensors/int/products_vortex.html. [Accessed: 08-Dez-2011].
- [27] E. Augsten, „Frischwasserstationen - mehr Leistung, weniger Platz“, *Sonne Wind und Wärme*, Bd. 15, Nr. 15, S. 52-56, 2011.
- [28] F. Ruesch und E. Frank, „Development of a Test Procedure for External Domestic Hot Water Modules“, presented at the EuroSun International conference on Solar Heating, Cooling and Buildings, Graz, Austria, 2010.
- [29] F. Ruesch und E. Frank, „The Influence of External DHW Modules on the Yearly Energy Consumption of Solar Combisystems“, presented at the ISES SOLAR WORLD CONGRESS, Kassel, Deutschland, 2011.
- [1]

12 Anhang

12.1 Linearisierung des elektrischen Stromverbrauches

Q_{JE} = Elektrischer Jahresverbrauch

$h(V'_{zapf})$ = Häufigkeitsverteilung Zapfvolumenstrom

$f1(V'_{zapf})$ = Elektrischer Energieverbrauch von 0 – 7 l/min

$f2(V'_{zapf})$ = Elektrischer Energieverbrauch linearisiert ab 7 l/min

E_i = Gemessener Verbrauch bei einer Zapfung von i l/min

$$Q_{JE} = \int_{0l/min}^{7l/min} h(V'_{zapf}) f1(V'_{zapf}) dV' + \int_{7l/min}^{\dot{V}max} h(V'_{zapf}) f2(V'_{zapf}) dV'_{zapf}$$

$$\text{mit } f1(V'_{zapf}) = \frac{7}{4} E_3 - \frac{3}{4} E_7 + \left(\frac{1}{4} E_7 - \frac{1}{4} E_3 \right) V'_{zapf}$$

$$\text{und } f2(V'_{zapf}) = 2E_7 - E_{14} + \left(\frac{1}{7} E_{14} - \frac{1}{7} E_7 \right) V'_{zapf}$$

$$\begin{aligned} Q_{JE} &= E_3 \left(\frac{7}{4} \int_{0l/min}^{7l/min} h(V'_{zapf}) dV'_{zapf} - \frac{1}{4} \int_{0l/min}^{7l/min} h(V'_{zapf}) V'_{zapf} dV'_{zapf} \right) \\ &\quad + E_7 \left(-\frac{3}{4} \int_{0l/min}^{7l/min} h(V'_{zapf}) dV'_{zapf} \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{4} \int_{0l/min}^{7l/min} h(V'_{zapf}) V'_{zapf} dV'_{zapf} + 2 \int_{7l/min}^{\dot{V}max} h(V) dV \right. \\ &\quad \left. - \frac{1}{7} \int_{7l/min}^{\dot{V}max} h(V) V dV \right) \\ &\quad + E_{14} \left(- \int_{7l/min}^{\dot{V}max} h(V'_{zapf}) dV'_{zapf} + \frac{1}{7} \int_{7l/min}^{\dot{V}max} h(V'_{zapf}) V'_{zapf} dV'_{zapf} \right) \\ &= E_3 F_{E3} + E_7 F_{E7} + E_{14} F_{E14} \end{aligned}$$

12.2 Tabellen zur Einordnung von Temperaturschwankungen

Tabelle 17 Klassifizierung von Temperaturschwankungen für unterschiedliche Volumenströme in Abhängigkeit der Dauer eines Über- oder Unterschingers. Die reduzierte Amplitude T_{AR} muss unter dem angegebenen Wert in K liegen um in der Komfortklasse B klassifiziert zu werden.

Dauer der Schwankung in s	Durchfluss in l/min																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
2	33.7	17.1	13.7	11.6	10.2	9.2	8.4	7.7	7.2	6.8	6.4	6.1	5.8	5.6	5.4	5.2	5.0	4.9	4.7	4.6
3	21.6	11.7	9.5	8.1	7.2	6.5	5.9	5.5	5.2	4.9	4.7	4.4	4.3	4.1	4.0	3.9	3.8	3.7	3.6	3.5
4	16.4	9.1	7.4	6.4	5.7	5.2	4.8	4.5	4.2	4.0	3.8	3.7	3.5	3.4	3.3	3.2	3.2	3.1	3.0	3.0
5	13.3	7.6	6.3	5.4	4.9	4.4	4.1	3.9	3.7	3.5	3.4	3.2	3.1	3.0	3.0	2.9	2.8	2.8	2.7	2.7
6	11.3	6.6	5.5	4.8	4.3	4.0	3.7	3.5	3.3	3.2	3.1	3.0	2.9	2.8	2.7	2.7	2.6	2.6	2.6	2.5
7	9.9	5.9	5.0	4.4	3.9	3.6	3.4	3.2	3.1	2.9	2.8	2.8	2.7	2.6	2.6	2.5	2.5	2.5	2.4	2.4
8	8.9	5.5	4.6	4.0	3.6	3.4	3.2	3.0	2.9	2.8	2.7	2.6	2.6	2.5	2.5	2.4	2.4	2.4	2.4	2.3
9	8.1	5.1	4.3	3.8	3.4	3.2	3.0	2.9	2.7	2.7	2.6	2.5	2.5	2.4	2.4	2.4	2.3	2.3	2.3	2.3
10	7.5	4.8	4.0	3.6	3.3	3.0	2.9	2.7	2.6	2.6	2.5	2.4	2.4	2.4	2.3	2.3	2.3	2.3	2.2	2.2
11	7.0	4.5	3.8	3.4	3.1	2.9	2.8	2.6	2.6	2.5	2.4	2.4	2.3	2.3	2.3	2.3	2.2	2.2	2.2	2.2
12	6.6	4.3	3.7	3.3	3.0	2.8	2.7	2.6	2.5	2.4	2.4	2.3	2.3	2.3	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2
13	6.2	4.2	3.5	3.2	2.9	2.7	2.6	2.5	2.4	2.4	2.3	2.3	2.3	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.1
14	5.9	4.0	3.4	3.1	2.8	2.7	2.5	2.5	2.4	2.3	2.3	2.3	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.1	2.1	2.1
15	5.7	3.9	3.3	3.0	2.7	2.6	2.5	2.4	2.3	2.3	2.3	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.1	2.1	2.1	2.1
16	5.5	3.8	3.2	2.9	2.7	2.5	2.4	2.4	2.3	2.3	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1
17	5.3	3.7	3.1	2.8	2.6	2.5	2.4	2.3	2.3	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1
18	5.1	3.6	3.1	2.8	2.6	2.5	2.4	2.3	2.3	2.2	2.2	2.2	2.2	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1
19	4.9	3.5	3.0	2.7	2.5	2.4	2.3	2.3	2.2	2.2	2.2	2.2	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1
20	4.8	3.4	2.9	2.7	2.5	2.4	2.3	2.3	2.2	2.2	2.2	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1
21	4.7	3.3	2.9	2.6	2.5	2.4	2.3	2.2	2.2	2.2	2.2	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1
22	4.6	3.3	2.8	2.6	2.4	2.3	2.3	2.2	2.2	2.2	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1
23	4.5	3.2	2.8	2.6	2.4	2.3	2.3	2.2	2.2	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1
24	4.4	3.2	2.8	2.5	2.4	2.3	2.2	2.2	2.2	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.0
25	4.3	3.1	2.7	2.5	2.4	2.3	2.2	2.2	2.2	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.0	2.0
26	4.2	3.1	2.7	2.5	2.3	2.3	2.2	2.2	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.0	2.0	2.0
27	4.1	3.0	2.6	2.4	2.3	2.2	2.2	2.2	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.0	2.0	2.0	2.0
28	4.0	3.0	2.6	2.4	2.3	2.2	2.2	2.2	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.0	2.0	2.0	2.0
29	4.0	3.0	2.6	2.4	2.3	2.2	2.2	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
30	3.9	2.9	2.6	2.4	2.3	2.2	2.2	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0

Tabelle 18 Klassifizierung von Temperaturschwankungen für unterschiedliche Volumenströme in Abhängigkeit der Dauer eines Über- oder Unterschingers. Die reduzierte Amplitude T_{AR} muss unter dem angegebenen Wert in K liegen um in der Komfortklasse C klassifiziert zu werden.

Dauer der Schwankung in s	Durchfluss in l/min																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
2	84.2	42.8	34.2	29.1	25.6	23.0	21.0	19.4	18.1	17.0	16.0	15.3	14.6	14.0	13.4	13.0	12.5	12.2	11.8	11.5
3	54.1	29.3	23.7	20.3	17.9	16.2	14.9	13.8	13.0	12.2	11.6	11.1	10.7	10.3	9.9	9.6	9.4	9.1	8.9	8.7
4	41.0	22.8	18.6	16.1	14.3	13.0	12.0	11.2	10.5	10.0	9.6	9.2	8.9	8.6	8.3	8.1	7.9	7.7	7.6	7.5
5	33.3	19.0	15.7	13.6	12.2	11.1	10.3	9.7	9.2	8.7	8.4	8.1	7.8	7.6	7.4	7.3	7.1	7.0	6.9	6.7
6	28.3	16.6	13.8	12.0	10.8	9.9	9.2	8.7	8.3	7.9	7.6	7.4	7.2	7.0	6.9	6.7	6.6	6.5	6.4	6.3
7	24.8	14.9	12.4	10.9	9.8	9.1	8.5	8.0	7.7	7.4	7.1	6.9	6.7	6.6	6.5	6.4	6.3	6.2	6.1	6.0
8	22.2	13.6	11.5	10.1	9.1	8.4	7.9	7.5	7.2	7.0	6.7	6.6	6.4	6.3	6.2	6.1	6.0	5.9	5.9	5.8
9	20.3	12.7	10.7	9.4	8.6	8.0	7.5	7.1	6.9	6.6	6.5	6.3	6.2	6.1	6.0	5.9	5.8	5.8	5.7	5.7
10	18.7	11.9	10.1	8.9	8.1	7.6	7.2	6.9	6.6	6.4	6.3	6.1	6.0	5.9	5.8	5.8	5.7	5.7	5.6	5.6
11	17.5	11.3	9.6	8.5	7.8	7.3	6.9	6.6	6.4	6.2	6.1	6.0	5.9	5.8	5.7	5.7	5.6	5.6	5.5	5.5
12	16.4	10.8	9.2	8.2	7.5	7.0	6.7	6.4	6.2	6.1	5.9	5.8	5.8	5.7	5.6	5.6	5.5	5.5	5.4	5.4
13	15.6	10.4	8.9	7.9	7.3	6.8	6.5	6.3	6.1	5.9	5.8	5.7	5.7	5.6	5.5	5.5	5.5	5.4	5.4	5.4
14	14.8	10.0	8.5	7.6	7.0	6.6	6.4	6.1	6.0	5.8	5.7	5.7	5.6	5.5	5.5	5.4	5.4	5.4	5.3	5.3
15	14.2	9.7	8.3	7.4	6.9	6.5	6.2	6.0	5.9	5.8	5.7	5.6	5.5	5.5	5.4	5.4	5.4	5.3	5.3	5.3
16	13.7	9.4	8.1	7.2	6.7	6.4	6.1	5.9	5.8	5.7	5.6	5.5	5.5	5.4	5.4	5.3	5.3	5.3	5.3	5.2
17	13.2	9.2	7.8	7.1	6.6	6.2	6.0	5.8	5.7	5.6	5.5	5.5	5.4	5.4	5.3	5.3	5.3	5.3	5.2	5.2
18	12.8	8.9	7.7	6.9	6.5	6.1	5.9	5.8	5.7	5.6	5.5	5.4	5.4	5.3	5.3	5.3	5.3	5.2	5.2	5.2
19	12.4	8.7	7.5	6.8	6.3	6.1	5.9	5.7	5.6	5.5	5.4	5.4	5.3	5.3	5.3	5.3	5.2	5.2	5.2	5.2
20	12.0	8.5	7.4	6.7	6.3	6.0	5.8	5.7	5.6	5.5	5.4	5.4	5.3	5.3	5.3	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2
21	11.7	8.4	7.2	6.6	6.2	5.9	5.7	5.6	5.5	5.4	5.4	5.3	5.3	5.3	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2
22	11.4	8.2	7.1	6.5	6.1	5.8	5.7	5.6	5.5	5.4	5.3	5.3	5.3	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	5.1
23	11.2	8.1	7.0	6.4	6.0	5.8	5.6	5.5	5.4	5.4	5.3	5.3	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	5.1	5.1
24	10.9	7.9	6.9	6.3	6.0	5.7	5.6	5.5	5.4	5.3	5.3	5.3	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	5.1	5.1	5.1
25	10.7	7.8	6.8	6.2	5.9	5.7	5.6	5.5	5.4	5.3	5.3	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	5.1	5.1	5.1	5.1
26	10.5	7.7	6.7	6.2	5.9	5.7	5.5	5.4	5.4	5.3	5.3	5.2	5.2	5.2	5.2	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1
27	10.3	7.6	6.6	6.1	5.8	5.6	5.5	5.4	5.3	5.3	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1
28	10.1	7.5	6.5	6.0	5.8	5.6	5.5	5.4	5.3	5.3	5.2	5.2	5.2	5.2	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1
29	9.9	7.4	6.5	6.0	5.7	5.6	5.4	5.4	5.3	5.3	5.2	5.2	5.2	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1
30	9.8	7.3	6.4	6.0	5.7	5.5	5.4	5.4	5.3	5.2	5.2	5.2	5.2	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1