



Schlussbericht vom 2. April 2026

StoWaDim-WRG

Stochastische Warmwasserbedarfsanalyse zur
Dimensionierung von Wasser-Wärmespeichern
unter Berücksichtigung von
Wärmerückgewinnung



© Adobe-Stock, 2025



Datum: 2. April 2026

Ort: Rapperswil

Subventionsgeberin:

Bundesamt für Energie BFE
Sektion Energieforschung und Cleantech
CH-3003 Bern
www.bfe.admin.ch

Subventionsempfänger/innen:

SPF Institut für Solartechnik
OST - Ostschweizer Fachhochschule
Oberseestrasse 10, CH-8640 Rapperswil
www.spf.ch

Hochschule Luzern HSLU
Technikumstrasse 21, 6048 Horw
www.hslu.ch

Autor/in:

Alexander Schmitt, SPF, alexander.schmitt@ost.ch
Vera Gütle, SPF, vera.guetle@ost.ch
Daniel Philippen, SPF, daniel.philippen@ost.ch
Reto von Euw, HSLU, reto.voneuw@hslu.ch
Michel Haller, SPF, michel.haller@ost.ch

BFE-Projektbegleitung:

Stephan A. Mathez, stephan.a.mathez@solarcampus.ch
Lavinia Niederhäuser, elena-lavinia.niederhaeuser@bfe.admin.ch

BFE-Vertragsnummer: SI/502909-01

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.



Zusammenfassung

Das Projekt StoWaDim-WRG befasste sich mit der Analyse des Warmwasserbedarfs und der Wärmerückgewinnung (WRG) aus Duschabwasser sowie ihren Einfluss auf die Dimensionierung von Trinkwarmwasserspeichern. Vor dem Hintergrund steigender relativer Anteile des Warmwasserbedarfs am Heizwärmebedarf in gut wärmegeämmten Gebäuden wurden bestehende Messdaten, stochastisch erzeugte Bedarfsprofile sowie verschiedene Prüf- und Berechnungsnormen von WRG bei Duschen systematisch ausgewertet und verglichen.

Um den Warmwasserbedarf in der Schweiz zu untersuchen, wurden verschiedene Studien herangezogen. Dabei wurde der Fokus auf den Warmwasserbedarf für Duschen gelegt. Die ausgewerteten Messkampagnen zeigen, dass der Anteil des Duschens am Warmwasserbedarf in allen Studien hoch ist und typische Duschvorgänge 20 bis 30 Normliter bzw. 40 bis 50 L Mischwasser umfassen, was mit den Werten der Norm SIA 385/2:2025 gut übereinstimmt.

Es wurden unterschiedliche Werkzeuge zur Erzeugung von Warmwasserprofilen (dhwCalc, LoadProfileGenerator, pySimdeum) miteinander verglichen. Diese unterscheiden sich hinsichtlich Modellansatz, Datengrundlage, zeitlicher Auflösung und den berücksichtigten Entnahmestellen. Für die weitere Analyse im Projekt wurde aufgrund der stochastischen Struktur und der vorhandenen Datengrundlagen primär dhwCalc eingesetzt. Damit konnten Profile für Mehrfamilienhäuser mit normalem und gehobenem Standard erzeugt und die jeweiligen Stundenspitzen hinsichtlich ihres Duschanteils analysiert werden. Durch den Einsatz von WRG kann der Duschanteil reduziert werden, wodurch sich wiederum die erforderliche Speichergrosse verringert.

Der Vergleich verschiedener nationaler Normen und Berechnungsverfahren hat ergeben, dass es keinen einheitlichen Ansatz gibt, weder was die Effizienzbestimmung noch was die Berechnungen in Bezug auf die durch WRG eingesparte Energie betrifft. Eine Reduktion des erforderlichen Speichervolumens auf Grund der WRG konnte lediglich in der SIA-Norm 385/2:2025 gefunden werden. Die Wärmeverluste der WRG werden unterschiedlich berechnet und sind in keiner Norm zufriedenstellend abgebildet. Zu diesen gehören (sortiert nach ihrer Grösse): Wärmeverluste in der Duschkabine, reduzierte Effizienz des WRG-Geräts durch Verschmutzung, sowie Wärmeverluste in der Aufwärmphase und in den Rohrleitungen.

Bei einer Effizienz des Dusch-WRG-Geräts zwischen 20 % und 50 % liegen die zu erwartenden Reduktionen des Warmwasserverbrauchs bei 17 % bis 38 % eines Duschvorgang. Je nach Einbauvariante der WRG kann bei Objekten mit mehr als 10 Personen das Steuervolumen des Speichers zwischen 4 % und 13 % reduziert werden. Diese Werte hängen jedoch von zahlreichen Annahmen ab, unter anderem auch vom Nutzerverhalten, und können somit nicht allgemeingültig bestimmt werden. Aus hygienischen Überlegungen wird in der Norm SIA 385/2 bisher keine Reduktion des Spitzendeckungsvolumens vorgesehen. Aufgrund der vorliegenden Analyse erscheint eine solche Reduktion jedoch sinnvoll. Sie könnte relativ einfach mit derselben Formel eingeführt werden, mit welcher auch der relative Anteil des Spitzendeckungsvolumens am Tagesbedarf bestimmt wird, indem für den Tagesbedarf der durch die WRG reduzierte Bedarf eingesetzt wird.



Résumé

Le projet StoWaDim-WRG s'est penché sur l'analyse des besoins en eau chaude et la récupération de chaleur (RDC) à partir des eaux usées des douches, ainsi que sur leur influence sur le dimensionnement des réservoirs d'eau chaude potable. Dans un contexte d'augmentation relative des besoins en eau chaude dans les bâtiments bien isolés thermiquement, les données de mesure existantes, les profils de besoins générés de manière stochastique et différentes normes d'essai et de calcul de la RDC pour les douches ont été systématiquement évalués et comparés.

Différentes études ont été utilisées pour analyser les besoins en eau chaude en Suisse. L'accent a été mis sur la part des besoins en eau chaude pour les douches. Les campagnes de mesure évaluées montrent que la part des douches dans les besoins en eau chaude est constamment élevée et que les douches typiques consomment entre 40 et 50 litres d'eau mélangée, ce qui correspond bien aux valeurs de la norme SIA 385/2:2025.

Différents outils permettant de générer des profils de consommation d'eau chaude (dhwCalc, LoadProfileGenerator, pySimdeum) ont été comparés entre eux. Ceux-ci se distinguent par leur approche modélistique, leur base de données, leur résolution temporelle et les points de prélèvement pris en compte. En raison de sa structure stochastique et des bases de données disponibles, dhwCalc a été principalement utilisé pour l'analyse approfondie dans le cadre du projet. Cela a permis de générer des profils de standard moyen et supérieur dans l'habitat et d'analyser les pointes horaires des besoins en termes de proportion de douches. L'utilisation de la récupération de chaleur permet de réduire cette proportion, ce qui diminue à son tour la taille de stockage nécessaire.

La comparaison de différentes normes et méthodes de calcul a montré qu'il n'existe pas encore d'approches uniformes, ni en ce qui concerne la détermination de l'efficacité, ni en ce qui concerne les calculs relatifs à l'énergie économisée grâce à la récupération de chaleur. Une réduction du volume de stockage nécessaire grâce à la récupération de chaleur n'a été trouvée que dans la norme SIA 385/2:2025. Les pertes thermiques de la récupération de chaleur sont calculées de différentes manières et ne sont pas encore représentées d'une manière satisfaisante dans ces documents. Elles comprennent (classées par ordre d'importance): les pertes thermiques dans la cabine de douche, la réduction de l'efficacité de l'appareil de récupération de chaleur due à l'encrassement, ainsi que les pertes thermiques pendant la phase de réchauffement et dans les tuyaux.

Avec une efficacité de l'appareil RDC comprise entre 20 % et 50 %, les réductions d'eau chaude attendues sont de 17 % à 38 % pour une douche. Selon le type d'installation, le volume de contrôle du réservoir peut être réduit de 4 % à 13 % dans les bâtiments accueillant plus de 10 personnes. Ces valeurs dépendent toutefois de nombreux facteurs, notamment du comportement des utilisateurs, et ne peuvent donc pas être déterminées de manière générale. La réduction du volume de couverture des pointes, qui n'était pas prévue jusqu'à présent dans la norme SIA 385/2, serait judicieuse au vu de la présente analyse et pourrait être introduite relativement facilement à l'aide de la même formule que celle utilisée pour calculer la part relative du volume de couverture de pointe dans les besoins quotidiens, en utilisant les besoins quotidiens réduits de la récupération de chaleur.



Summary

The StoWaDim-WRG project focused on analysing hot water demand and heat recovery (HWHR) from shower waste water, as well as their influence on the dimensioning of domestic hot water storage tanks. Against the backdrop of rising relative proportions of hot water demand in well-insulated buildings, existing measurement data, stochastically generated demand profiles and various testing and calculation standards for HWHR in showers were systematically evaluated and compared.

Various studies were consulted in order to investigate hot water demand in Switzerland. The focus was placed on the proportion of hot water demand for showers. The measurement campaigns evaluated show that this proportion of hot water demand for showers is consistently high and that a typical showering process involves between 40 and 50 litres of mixed water, which is in line with the values specified in SIA standard 385/2:2025.

Various tools for generating hot water profiles (dhwCalc, LoadProfileGenerator, pySimdeum) were compared with each other. These differ in terms of their modelling approach, data basis, temporal resolution and the type of draw-offs taken into account. Due to its stochastic structure and the available data bases, dhwCalc was primarily used for further analysis in the project. This made it possible to generate profiles for multi-family houses with normal and high standards and to analyse the hourly peaks in terms of their shower share. The use of HWHR can reduce this share, which in turn reduces the required hot water storage size.

A comparison of different standards and calculation methods has shown that there are still no uniform approaches, either in terms of efficiency determination or calculations relating to the energy saved by HWHR. A reduction in the required storage volume due to HWHR could only be found in the standard SIA 385/2:2025. The heat losses of heat recovery systems are calculated differently and are not yet satisfactorily treated in these documents. These include (sorted by importance): heat losses in the shower cubicle, reduced efficiency of the heat recovery device due to contamination, as well as heat losses during the warm-up phase and heat losses in the pipes.

With HWHR device efficiency between 20% and 50%, the expected reductions of hot water demand are between 17% and 38% per shower. Depending on the installation variant, the control volume of the storage tank can be reduced by between 4% and 13% in properties with more than 10 people. However, these values depend on numerous inputs, including user behaviour, and therefore cannot be determined universally. The reduction in peak coverage volume, which has not been provided for in SIA 385/2 to date, would make sense based on the present analysis and could be introduced relatively easily using the same formula used to calculate the relative share of peak coverage volume in daily demand, by using the demand reduced by HWHR for daily demand.



Take-home messages

- Die meisten vorhandenen Prüfnormen für Dusch-WRG Geräte machen keine Unterscheidung zwischen den unterschiedlichen Einbau-Konfigurationen.
- Keine der Normen berücksichtigt die mit unterschiedlichen Einbau-Konfigurationen unter Umständen verbundenen ungleichen Kapazitätsflussraten, respektive Volumenströme, auf den beiden Seiten des Wärmeübertragers.
- Die verschiedenen Normen zur Berechnung der Energieeinsparung durch WRG in der realen Anwendung bauen auf unterschiedlichen Messverfahren auf, arbeiten mit unterschiedlichen Randbedingungen und berücksichtigen Verluste (z.B. in der Duschkabine oder durch die Verschmutzung der WRG) teils unterschiedlich und teils gar nicht. Auch die (meist nicht vorhandene) Berücksichtigung unterschiedlicher Volumenströme und WÜ-Konfigurationen vermag dabei nicht zu überzeugen.
- Die beiden dominanten Verlustfaktoren für die Wärmerückgewinnung aus Duschatwasser sind der Wärmeverlust in der Duschkabine sowie die verminderte Wärmerückgewinnung auf Grund von Verschmutzungen. Diese sind bisher unzureichend verstanden und dokumentiert, so dass auch der Einfluss zum Beispiel von geschlossenen oder offenen Duschkabinen auf die erzielbare Wärmerückgewinnung nicht zuverlässig quantifiziert werden kann.
- Die stochastische Bedarfsanalyse zeigt: das Duschen bestimmt massgeblich die Stundenspitzen in Mehrfamilienhäusern mit mehr als 10 Personen. Daher wäre eine Auslegung der Stundenspitze und des dafür reservierten Speichervolumens mit dem durch die Dusch-WRG reduzierten Wärmebedarf sinnvoll.
- Bei den zur Verfügung stehenden Tools zur Berechnung von stochastischen Warmwasserprofilen (z.B. DHWcalc) mangelt es an Möglichkeiten zur Differenzierung verschiedener Typen von Warmwasserbezug, was die Verwendung für Objekte mit Dusch-WRG erschwert.
- Derzeit fehlen verlässliche und vergleichbare Angaben der Hersteller von Dusch-WRG-Geräten, sowie handhabbare Normen, welche beschreiben, wie die effektiven Einsparungen durch WRG objektspezifisch zu berechnen sind.



Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	12
1.1	Ausgangslage und Hintergrund	12
1.2	Gegenstand des Projektes	13
2	Stochastische Bedarfsanalysen	14
2.1	Marktanalyse Gebäude- und Wohnstatistik	14
2.2	Wasserbedarf insgesamt und Warmwasserbedarf im Speziellen	15
2.3	Warmwasser-Verbrauchsprofile.....	16
2.4	Stochastische Warmwasserbedarfsanalyse	17
3	Produkte und Berechnungsverfahren für Dusch-WRG	23
3.1	Produkte und Einbauvarianten	23
3.2	Theorie der Wärmeübertrager	26
3.3	Normen zur Effizienzmessung.....	29
3.3.1	Kanadische Norm B55.1-15:.....	29
3.3.2	Niederländische Norm NTA 8800:2023	31
3.3.3	Französische Norm CAPE/RECADO-PQE	32
3.3.4	Zusammenfassung der Prüfnormen	34
3.4	Berechnungsgrundlagen und Normen die WRG-Einheiten berücksichtigen	36
3.4.1	Britische Norm: Waste Water Heat Recovery Systems	36
3.4.2	Französische Norm: RT 2012	39
3.4.3	Schweizer SIA-Norm 385/2:2025.....	41
3.4.4	Zusammenfassung Berechnungsverfahren	43
3.5	Rechenbeispiel.....	45
3.5.1	Parameter(-vorschläge) und Faktoren für die WRG-Berechnung.....	46
3.5.2	Berechnung Wärmerückgewinnung nach Konfiguration A, B und C.....	47
3.5.3	Untersuchung des Einflusses der WRG auf das Spitzendeckungsvolumen...	53
3.5.4	Kombinierte Reduktion von Steuer- und Spitzendeckungsvolumen	55
4	Schlussfolgerungen und Fazit	57
4.1	Normen und Berechnungsgrundlagen	57
4.2	Verlustfaktoren bei der Wärmerückgewinnung von Duschabwasser.....	58
4.3	Reduktion des Speichervolumens durch Dusch-WRG	59
4.4	Stochastische Warmwasserprofile und Stundenspitzen	60
5	Ausblick	61
6	Literaturverzeichnis	63



Abkürzungsverzeichnis

Insbesondere englische Abkürzungen wurden aus der SIA385 oder aus der Wegleitung SIA 4012 (momentan in Ausarbeitung) entnommen.

CH	Schweiz
d	Tag
E	Einwohner
L	Liter
PQE	Procédure Qualité Expérimentale
PW-HR	durch WRG vorgewärmtes Kaltwasser (potable water – heat recovery)
PWC	Kaltwasser (potable water cold)
PWH	Warmwasser (potable water hot)
RT	Réglementation Thermique (Wärmeschutzverordnung)
SAP	Standard Assessment Procedure
SVES	Schweizerischer Verband für Energieeffiziente Sanitärprodukte
SVGW	Schweizerischer Verband des Gas- und Wasserfachs
WRG	Wärmerückgewinnung, HR (heat recovery)
WÜ	Wärmeübertrager
WW	Abwasser (waste water)

Begriffsdefinitionen nach SIA385/2:2025

Kaltwasser:	Trinkwasser, dessen Temperatur nicht gezielt erhöht wurde.
Warmwasser:	Trinkwasser, dessen Temperatur durch Wärmezufuhr gezielt erhöht worden ist.
Nutzwarmwasser:	Warmwasser, das an der Entnahmestelle mit der Temperatur von 40 °C oder höher entnommen wird
Nutzwarmwasserbedarf: $V_{W,u}$ Normliter	Bedarf an Nutzwarmwasser pro Tag. Absolut oder bezogen auf eine Bezugseinheit.
Nutzenergiebedarf: $Q_{W,u}$ kWh	Bedarf an Nutzenergie, absolut oder bezogen auf eine Bezugseinheit. Der Nutzenergiebedarf bezieht sich auf die Auslaufstellen der Warmwasserversorgung. Ohne Wärmerückgewinnung sind der Wärmebedarf für Warmwasser und der Nutzenergiebedarf gleich gross. Mit Wärmerückgewinnung ist der Wärmebedarf für Warmwasser kleiner als der Nutzenergiebedarf.
Spitzendeckungsvolumen: $V_{W,sto,pk}$ l, m ³	Das Teilvolumen eines Speichers, welches die Kontinuität der Warmwasserverfügbarkeit während der grössten



	Verbrauchsspitzen sicherstellen soll. Das Spitzendeckungsvolumen ergibt sich aus der grössten kurzfristig zu erwartenden Spitze des Warmwasserverbrauchs, gewöhnlich der grössten Stundenspitze (siehe SIA, A.5). Am unteren Rand des Spitzendeckungsvolumens befindet sich in der Regel der Temperaturfühler, welcher die Nachladung einschaltet.
Steuervolumen: $V_{W,sto,ctrl}$ l, m ³	Das Teilvolumen eines Speichers, dessen Temperatur die Nachladung des Speichers steuert. Der Temperaturfühler, welcher die Nachladung unterbricht, befindet sich am unteren Rand des Steuervolumens. Wird ein einziger Temperaturfühler eingesetzt, bestimmt die Hysterese das Steuervolumen. Findet die Nachladung nur nachts statt («Tagesspeicher»), wird sie durch eine Schaltuhr freigegeben und durch den Fühler am unteren Rand des Bereitschaftsvolumens ausgeschaltet. Die Abgrenzung von Steuer- und Spitzendeckungsvolumen ist in diesem Fall unscharf.
Bereitschaftsvolumen: $V_{W,sto,cont}$ l, m ³	Das Teilvolumen eines Speichers, das nach einer Beladung auf Soll-Temperatur zur Nutzung zur Verfügung steht. Das Bereitschaftsvolumen ist die Gesamtheit von Spitzendeckungs- und Steuervolumen eines Speichers. Das Bereitschaftsvolumen kann Trinkwasser, Betriebswasser oder beides enthalten. Es ist oft durch die Position eines Ausschaltfühlers begrenzt. Alle Speicher haben ein Bereitschaftsvolumen.
Normliter: nL	Dieser Wert wird genutzt, um den Energieinhalt des Warmwassers in Speichervolumen umzurechnen. Dabei wird von einem Delta T von 50 K ausgegangen. Ein Normliter entspricht dabei 0.058 kWh.

Symbole

$C_{\Delta t}$	Faktor für die zeitliche Verschiebung Duschen, WRG-Anfang RT2012	-
C_{trans}	Verlustfaktor für Aufwärmverluste WRG, RECADO-PQE	-
\dot{C}	Kapazitätsflussrate	W/K
\dot{C}_{min}	Kleinere der beiden Kapazitätsflussraten	W/K
F_{aa}	Verlustfaktor Warmwasser an Umgebung, RT2012	-
F_{am}	Verlustfaktor in Abwasserrohr vor WRG-Eintritt, RT2012	-
F_{av}	Verlustfaktor in Rohr nach WRG-Austritt, RT2012	-
F_{ba}	Anteil Warmwasser der Badewannen + Duschen, SAP	-
F_{hw}	Anteil Warmwasser der Duschen, SAP	-
h	Spezifische Enthalpie	kJ/kg
L_{ve}	Mittlere Abwasser-Rohrlänge im beheizten Gebäudeteil, RT2012	m
L_{vnc}	Mittlere Abwasser-Rohrlänge im unbeheizten Gebäudeteil, RT2012	m



M	Masse	kg
\dot{m}	Massenstrom	kg/s
n	Anzahl	-
NTU	Number of Transfer Units	-
\dot{Q}_{max}	Maximal erzielbare Wärmeübertragungsleistung	W
\dot{Q}_{real}	Real übertragene Wärmeleistung	W
$Q_{w,rec}$	jährlicher Wärmegewinn durch Wärmerückgewinnung	kWh/a
$Q_{w,sho,i}$	Nutzenergiebedarf eines Duschvorgangs ohne WRG	kWh
$Q_{w,u}$	Nutzenergiebedarf	kWh
$T_{Cmax,in}$	Eintrittstemperatur des Fluids mit der grösseren Kapazitätsflussrate	°C
$T_{Cmin,in}$	Eintrittstemperatur des Fluids mit der kleineren Kapazitätsflussrate	°C
UF	Verlustfaktor für Wärmeverluste bei WRG, SAP	-
\dot{V}	Volumenstrom	m ³ /s
$V_{w,sto,cont}$	Bereitschaftsvolumen	L
$V_{w,sto,pk}$	Spitzendeckungsvolumen	L
$V_{w,u}$	Normliter	nL
c_p	spezifische Wärmekapazität des Fluids	J/(kgK)
dt	Messintervall	s
f_1	Verlustfaktor Abwasserwärmeverluste	-
f_2	Verlustfaktor Aufwärmverlust und Restwasser	-
f_3	Verlustfaktor Verschmutzung Wärmeübertrager	-
$f_{hr,pWC}$	Kaltwasseranteil Duschwärmeübertrager zur Mischbatterie	-
$\Delta Q_{w,sho,pWC}$	Reduktion des Wärmebedarfs durch Dusch-WRG	kWh
ε	Wärmeübertrager-Wirkungsgrad (Effectiveness), bezogen auf den maximal möglichen Wirkungsgrad	-
η_{hr}	Wirkungsgrad der WRG, bezogen auf das Duschwasser	-
$\eta_{hr,glob}$	globale Effizienz des WRG-Systems (inkl. Anfahrfaktor), bestimmt gemäss RT 2012	-
$\eta_{hr,sts}$	Energetischer Wirkungsgrad der WRG im steady-state, bezogen auf die Dusch-Wärmeleistung unter Berücksichtigung der Einbau-Konfiguration	-
$\eta_{w,gen}$	Gesamtwirkungsgrad der Warmwassererzeugung (inkl. Speicher- und Verteilverluste)	-
θ	Temperatur	°C
$\theta_{hot,in}$	Temperatur am WÜ-Eingang	°C
ρ	Spezifische Dichte	kg/m ³
σ	Standardabweichung	var.



Indizes

A	Einbau WRG nach Konfiguration A
B	Einbau WRG nach Konfiguration B
BU	Bottom-Up
C	Einbau WRG nach Konfiguration C
c	Kapazitätsfluss
W	Warmwasserversorgung
gen	Erzeugung
hr	Wärmeübertrager (heat recovery device)
ms	Gemessen (measured)
out	Austritt
PWC	Kaltwasser (potable water cold)
PWC-HR	Durch WRG vorgewärmtes Kaltwasser (potable water – heat recovery)
PWH	Warmwasser (potable water hot)
sho	Dusche (Shower)
sts	stationär (steady state)
TD	Top-Down



1 Einleitung

1.1 Ausgangslage und Hintergrund

Mit zunehmend gut wärmegeprägten Gebäuden wird der Wärmebedarf für Warmwasser (PWH - Potable Water Hot) immer wichtiger, respektive nimmt dessen Anteil am Gesamtwärmebedarf zu und übersteigt in modernen Minergie-P-Gebäuden im Jahrestotal bereits den Raumwärmebedarf. Aufgrund der hohen instantanen Leistung beim Bezug von PWH wird dieses auf Vorrat erwärmt. Dabei sind hohe Anforderungen an die Hygiene zu erfüllen, um die Nutzenden vor Belastung mit Keimen, allen voran den Legionellen, zu schützen.

Die Ermittlung des Speichervolumens nach SIA 385/2 in der Planung von Anlagen basiert auf der Ermittlung der Wärmemenge, die gespeichert werden muss. Hierzu wird zunächst der benötigte Wärmebedarf für Warmwasser und der Wärmebedarf für die Deckung der grössten Stundenspitze ermittelt. Basierend auf diesen Werten wird das Spitzendeckungsvolumen und das Steuervolumen des Speichers bestimmt, welche zusammen das Bereitschaftsvolumen ergeben. Unter anderem fliesst in die Berechnungen die Anzahl der geplanten Ladungen pro Tag und die Anordnung von Wärmeübertragern ein. Die resultierende Speichergrösse aus den Berechnungen sollte einen hygienisch einwandfreien Betrieb der Warmwasserversorgung gewährleisten. Es ist jedoch bei vielen Speichern davon auszugehen, dass sich im späteren Betrieb am Boden des Speichers Temperaturen ergeben, die im mikrobiologisch kritischen Bereich liegen. Entsprechend können sich dort Legionellen vermehren. Dies erfordert eine thermische Barriere im oberen Speichervolumen (Spitzendeckungsvolumen), um einen Durchbruch von Legionellen in die Verteilleitungen hin zu den Zapfstellen zu verhindern. Eventuell ist auch der Anschluss des Rücklaufs zum Wärmeerzeuger im unteren Speicherbereich seitlich anzubringen, so dass nicht direkt Wasser aus dem Speicherboden angesaugt wird während der Beladung.

In der Norm sind die Verursacheranteile des WW-Verbrauchs sowie deren zeitliche Verteilung und Varianz nicht definiert. Bei der Betrachtung von künstlich erzeugten Lastprofilen, zum Beispiel aus Programmen wie DHWcalc [1] oder LoadProfileGenerator [2], und auch bei der Auswertung von Feldmessungen, wird klar, dass die Dusche den grössten Anteil im Verbrauch von PWH darstellt. Dabei erfolgt der Bezug in der Regel nicht auf dem bevorrateten Temperaturniveau, sondern als Mischtemperatur von PWH und Kaltwasser.

In der SIA 385/2 wurde mit dem informativen Anhang K im Jahr 2025 erstmals eine Möglichkeit eingeführt, wie die Wärmerückgewinnung (WRG) aus dem Abwasser berücksichtigt werden kann für die Berechnung des durchschnittlichen Warmwasserbedarfs sowie bei der Auslegung des Steuervolumens des Speichers. Dabei fliessen Wärmerückgewinnungs-Wirkungsgrade ein, deren Berechnung oder Herkunft in der Norm nicht weiter erläutert werden.

Am weitesten verbreitet ist die Wärmerückgewinnung aus dem Duschabwasser im Durchflussprinzip. Dabei kommen nach Socal [3] drei Varianten der hydraulischen Einbindung von WRG-Geräten in Frage: Bei **Variante A** wird das durch die Dusch-WRG vorgewärmte Kaltwasser aufgeteilt und sowohl zur Warmwasserversorgung (Speicher/ Erzeuger bzw. Warmwasserstrang) als auch zur Kaltwasserseite der Dusch-Mischarmatur geführt, bei **Variante B** wird es ausschliesslich der Kaltwasserseite der Mischarmatur zugeführt, und bei **Variante C** wird das vorgewärmte Kaltwasser ausschliesslich dem Warmwasser-Erwärmer zugeführt.



Erfolgt eine Wärmeübertragung auf den Kaltwasserzulauf der Duscharmaturen (Varianten A und B), dann reduziert sich der ab Speicher bezogene Massenstrom des PWH. Diese Einsparung hängt von vielen Faktoren ab, welche bei der Berechnung berücksichtigt werden sollten. Entsprechende Berechnungsverfahren für die in einer konkreten Situation zu erwartenden Einsparungen fehlen derzeit in der SIA. Zusätzlich fehlt es aber auch an Daten und Wissen über die Bezugstypen von Warmwasser und von zu erwartenden Gleichzeitigkeiten des Bezugs. Aufgrund der Reduktion des ab Speicher bezogenen PWH durch eine WRG kann der Wärmespeicher kleiner dimensioniert werden. Gerade in der Kombination mit solarer Wärmezeugung, sei es über Solarthermie oder über die Kombination PV und Wärmepumpe, können insbesondere bei grösseren Speichervolumen, welche den Bedarf über mehrere Tage oder sogar saisonal abdecken, erhebliche Einsparungen beim Volumen und damit bei den Investitionskosten erzielt werden (siehe zum Beispiel Resultate des Projektes 100%SolarLCA [4]). Betriebskosten können durch kleinere Speicher reduziert werden, da ein kleinerer Speicher zumindest die Speicherwärmeverluste reduziert, die je nach Fall 5 bis 10 % des Wärmebedarfs betragen (bei regelkonform ausgeführter Dämmung).

1.2 Gegenstand des Projektes

Auf Grund der in Abschnitt 1.1 dargelegten Sachverhalte und Wissenslücken verfolgte das vorliegende Projekt die folgenden Ziele:

1. Stochastische PWH-Bedarfsanalyse und -modellierung: Bedarfsanalyse für Warmwasser, welche individuelle Gegebenheiten und deren Einfluss auf den Gesamtwärmebedarf sowie auf die maximale zu deckende Stundenspitze aufzeigt.
2. Übersichtliche Darstellung des Wissensstandes, der Feldmessungen und Labor-Messmethoden für PWH-WRG im Durchfluss, und der heute in Diskussion befindlichen Berechnungsverfahren.
3. Quantitative Betrachtung von PWH-Bedarf und WRG und dessen Einfluss auf die Dimensionierung der Warmwasserspeicher.



2 Stochastische Bedarfsanalysen

2.1 Marktanalyse Gebäude- und Wohnstatistik

In der vom Bundesamt für Statistik veröffentlichten Gebäude- und Wohnstatistik [5] umfasst der Schweizer Gebäudepark 2023 knapp 1.8 Mio. Gebäude, die zu Wohnzwecken genutzt werden. In diesen Gebäuden befinden sich fast 4.8 Mio. Wohnungen. Die Anzahl Gebäude je Gebäudeart ist in Abbildung 1 aufgezeigt. Mit 57 % entfällt der Grossteil der zu Wohnzwecken genutzten Gebäude auf Einfamilienhäuser. Insgesamt verfügen mehr als 220'000 Gebäude über zwei Wohnungen und mehr als 180'000 Gebäude über 3-5 Wohnungen. Die Anzahl mittlerer und grosse MFH liegt bei rund 140'000 respektive 90'000 (vgl. Abbildung 2).

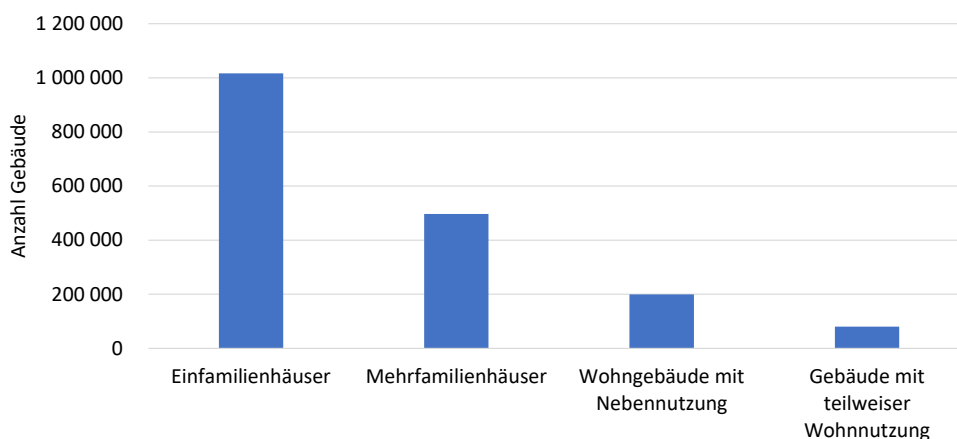


Abbildung 1: Anzahl Wohngebäude der Schweiz nach Gebäudetyp, Ein- und Mehrfamilienhäuser werden ausschliesslich zu Wohnzwecken genutzt, Wohngebäude mit Nebennutzung hauptsächlich zu Wohnzwecken und Gebäude mit teilweiser Wohnnutzung beinhalten Kollektivhaushalte (Spitäler, Hotels, etc.) und Fabriken, Verwaltungsgebäude, etc. mit mind. einer Wohnung.

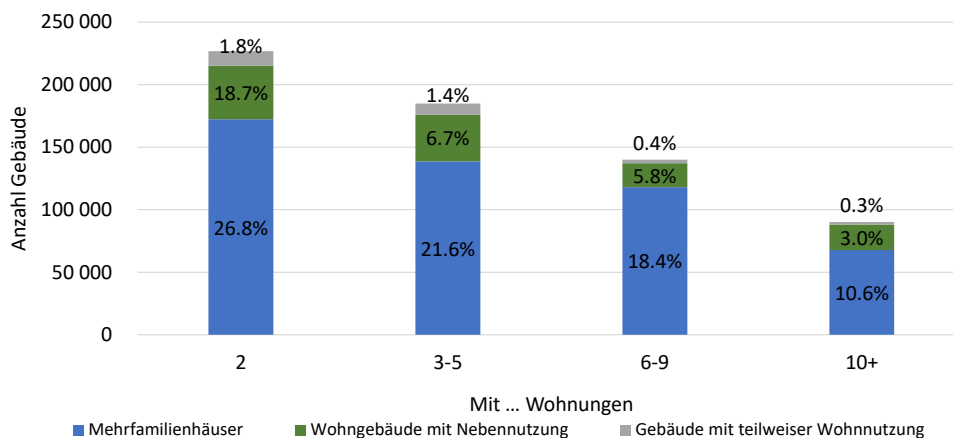


Abbildung 2: Anzahl Gebäude in der Schweiz mit mehr als einer Wohnung nach Anzahl Wohnungen und Art der Nutzung.



In den letzten 20 Jahren hat der Anteil von Wohngebäuden mit zehn und mehr Wohnungen zugenommen. In der Bauperiode von 2021 bis 2023 liegt der Anteil neugebauter Wohngebäude mit zehn und mehr Wohnungen bei 12 % aller Neubauten. Im Vergleich sind im Zeitraum von 1991 bis 2000 weniger als 5 % aller Neubauten mit zehn und mehr Wohneinheiten gebaut worden. Daraus folgt, dass zunehmend Wohngebäude mit mehr Wohneinheiten gebaut werden. In Mehrfamilienhäusern beträgt die Wohnfläche durchschnittlich 43.3 m² pro Person [5].

2.2 Wasserbedarf insgesamt und Warmwasserbedarf für Duschen

Die Trinkwasserstatistik liefert Zahlen über den Trinkwasserverbrauch, wobei zwischen Kalt- und Warmwasser meist nicht unterschieden wird [6]. Im Durchschnitt verbraucht eine Person in einem Schweizer Haushalt 142 Liter Trinkwasser (Kalt- und Warmwasser) pro Tag. Der grösste Teil entfällt mit 28.9 % auf die WC-Spülung (ausschliesslich Kaltwasser), gefolgt vom Wasserverbrauch für Duschen und Baden mit 25.3 %, Küchenspültisch (15.5 %), Waschmaschine (12.0 %) und Lavabo im Bad (11.3 %) [6]. Gemäss der Statistiken zum Energieverbrauch nach Verwendungszweck (Jahr 2023) entfallen 15 % des Endenergieverbrauchs der privaten Haushalte auf die Erwärmung des Warmwassers [7].

Bei der Wärmerückgewinnung aus Warmwasser liegt der Fokus auf Duschvorgängen. Eine Umfrage, durchgeführt im Auftrag des SVES zum Dusch- und Badeverhalten ergab 2023, dass in der Schweiz im Schnitt jede Person lediglich 10 Mal pro Jahr zuhause ein Bad nimmt [8]. Freiburghaus gibt in einer Untersuchung für den SVGW an, dass der Wasserverbrauch für Duschen und Baden in der Schweiz von 32.8 L/(E*d) (Liter pro Einwohner und Tag) im Jahr 1997 auf 36 L/(E*d) im Jahr 2014 leicht gestiegen ist. Diese Angabe bezieht sich auf Mischwarmwasser an der Armatur. Der Anteil Warmwasser am Nutzwarmwasserverbrauch von 63 %, bleibt dabei unverändert [9]. Ableitner u. a. untersuchten das Duschverhalten aus 636 Ein- bis Zwei-Personenhaushalten in der Schweiz. Hierzu wurden in Duschen mit Hilfe von Smartmetern die Temperatur, Volumenstrom, Dauer und Wasserverbrauch gemessen. Die erhobenen Daten umfassten 5610 Duschgänge von 975 Personen. Auf Grund der Ergebnisse wurden pro Duschgang im Schnitt 43.9 L Mischwarmwasser bei einer Temperatur von 36°C verbraucht. Die Standardabweichung betrug 33.7 L respektive 4.09 °C für Wasserverbrauch und Temperatur [10]. Dies entspricht bei einer angenommenen Kaltwassertemperatur von 10 °C einem Energieverbrauch von 1.32 kWh pro Duschvorgang.

Tabelle 1 gibt eine Übersicht zu verschiedenen Quellen mit Daten zum Warmwasserverbrauch beim Duschen und Baden.



Tabelle 1: Übersicht Verbrauchsdaten für Warmwasser zum Duschen (bzw. Baden). Der Energieverbrauch wurde anhand des Verbrauchs und der jeweiligen Temperatur berechnet. Dabei wurde angenommen, dass die Kaltwassertemperatur 10 °C beträgt. Bei fehlender Angabe zur Duschtemperatur wurde 36 °C Mischwarmwasser bzw. 60 °C für PWH angenommen. Des Weiteren wurden 0.8 Duschen pro Tag angenommen.

Literatur	Jahr / Land	Volumen	Temperatur/ Nutz-PWH	Angaben Haushalt / Verwendungszweck	Energie pro Person und Tag
Freiburghaus [9]	1997 CH	32.8 L/(E*d)	Nutzwarmwasser (PWH 63%)	Duschen und Baden	1.20 kWh
Freiburghaus [9]	2014 CH	36 L/(E*d)	Nutzwarmwasser (PWH 63%)	Duschen und Baden	1.32 kWh
Ableitner et al. [10]	2013 CH	43.9 L/Dusche	36 °C	1- bis 2-Personenhaushalt	1.06 kWh
Warmwasserspiegel [12]	2024 DE	44 L/(E*d)	Nutzwarmwasser	Baden, Duschen und Körperpflege	1.33 kWh
GOV UK [13]	2024 UK	37 L/Dusche ¹	52.4 °C ²	Dusche	1.46 kWh
Mazzoni et al. [14]	1990-2020 Int.	44 L/(E*d) ³	-	Dusche	1.33 kWh

- 1 Median, nur Warmwasser, Messung erfolgt am Speicher mit späterer Zuordnung zur Entnahmestelle
- 2 Temperatur gemessen ab Speicher
- 3 Mittelwert aus 114 ausgewerteten Studien weltweit

2.3 Warmwasser-Verbrauchsprofile

In der Schweiz und der Europäischen Union sind die EU-Tapping Cycles aus der EN 16147 verbreitet. Der Standard weist 24-h-Zapfprofile mit verschiedenen grossen Gesamtenergiebezügen auf. Diese reichen vom kleinsten Profil 3XS mit einem PWH-Bezug von 0.345 kWh bis zum grössten Profil 4XL mit einem Bezug von 93.52 kWh. Die Zapfprofile geben Bezüge ab Speicher zu einer bestimmten Tageszeit mit vorgegebenen Volumenstrom und Energiebezug vor. Eine Unterscheidung nach Entnahmestelle erfolgt nicht. Die EU-Tapping Cycles dienen zur Standardisierung der Prüfung von Geräten zur Erwärmung von Warmwasser [15]. Auf Grund der darin inhärent fehlenden Stochastik und auch viel zu geringer Zeitauflösung wurden diese Profile für die vorliegende Arbeit nicht verwendet.

International gibt es weitere Normen mit Warmwasser-Zapfprofilen zum standardisierten Testen von Warmwassererwärmer, z.B. AS/NZS 4234 (Australien/ Neuseeland) oder CSA C74503 (Kanda) [16], auf welche aus den bereits gemachten Überlegungen nicht weiter eingegangen wird.

Zusätzlich gibt es Tools zur stochastischen Erzeugung von Tages- und Jahresprofilen des Warmwasser-Verbrauchs, welchen verschiedene Berechnungen und Daten zu Grunde liegen.



Nachfolgend werden die drei ausgewählten Tools dhwCalc [1], LoadProfileGenerator (LPG) [2] und pySimdeum [17] verglichen.

Tabelle 2: Tools für stochastische Warmwasser-Verbrauchsprofile mit einer Auflösung von mindestens 1 Minute.

	dhwCalc	LPG	pySIMDEUM
Modell	Stochastisch, basierend auf Daten aus DE und CH	Agenten-Modell (bedürfnisorientiert), Gesamtenergieverbrauch	Stochastisch, basierend auf Daten aus NL (erweiterbar)
Gebäudetyp / Haushalt	EFH / MFH (Anzahl Wohnungen wählbar)	60 vordefinierte Haushalte (erweiterbar)	1- und 2-Pers.haushalt, Familie bis 5 Pers.
Entnahmestellen	4 Kategorien: Kleine und mittlere Bezüge, Bad, Dusche	Nach Gebäude definierbar	Dusche, Bad, Waschbecken Küche, Spülmaschine, Waschmaschine, Aussenbereich
Ausgabe	Volumenstrom gesamt Gebäude	Volumenstrom je Zapfstelle	Volumenstrom (gemischt, PWH) je Zapfstelle
Auflösung	1 min	1 min	10 s

Im Vergleich zu dhwCalc und pySIMDEUM, welche speziell zur Erstellung von PHW-Verbrauchsprofilen entwickelt worden sind, können mit LPG Profile des gesamten Energiebedarfs von Wohneinheiten und Gebäuden erstellt werden.

2.4 Stochastische Warmwasserbedarfsanalyse

In einem parallelen BFE-Projekt «Ermittlung des Warmwasserbedarfs bei unterschiedlichen Gebäudekategorien» wurden anhand von Messdaten von 48 Mehrfamilienhäusern (zwischen 8 und 46 Bewohnende) die Verbrauchsprofile mehrerer Jahre analysiert und mit der SIA-Norm 385/2:2025 verglichen (dargestellt in Abbildung 3). Die Auswertung der Messungen zeigt, dass sich der zeitliche Bedarf an Warmwasser und damit die Stundenspitzen zwischen Wochentag und Wochenende nur in den Morgenstunden durch späteres Duschen an den Wochenenden signifikant unterscheidet. Da dieser Unterschied jedoch auf unsere Analyse kaum eine Auswirkung haben wird, wurde für jeden Tag im Jahr das gleiche Wahrscheinlichkeitsprofil gewählt. Die Messdaten zeigen zudem eine starke Übereinstimmung mit den SIA-Daten, weshalb die Normwerte für die Profilerstellung genutzt werden.

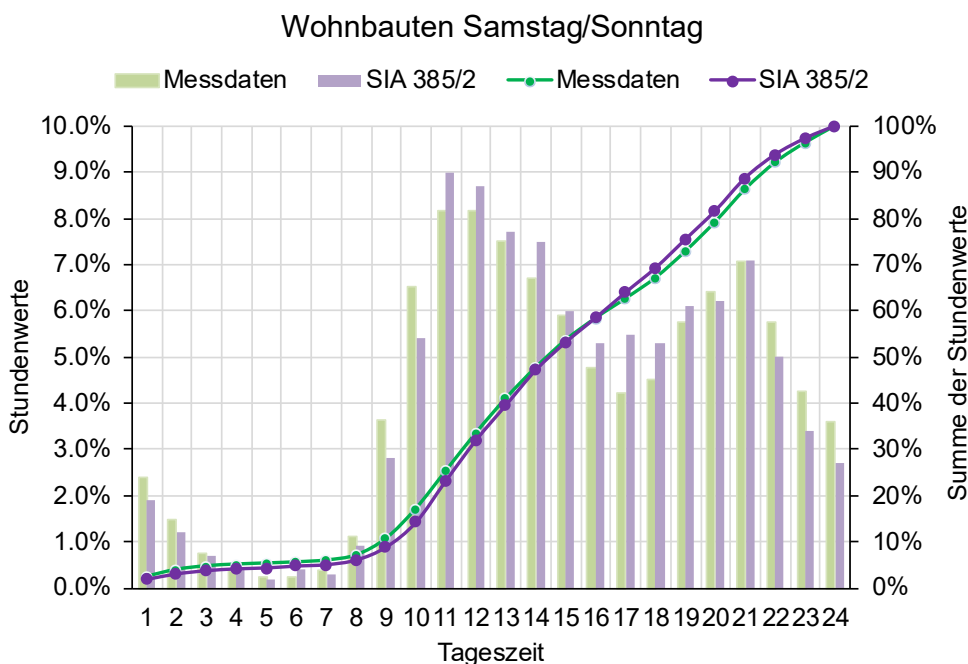
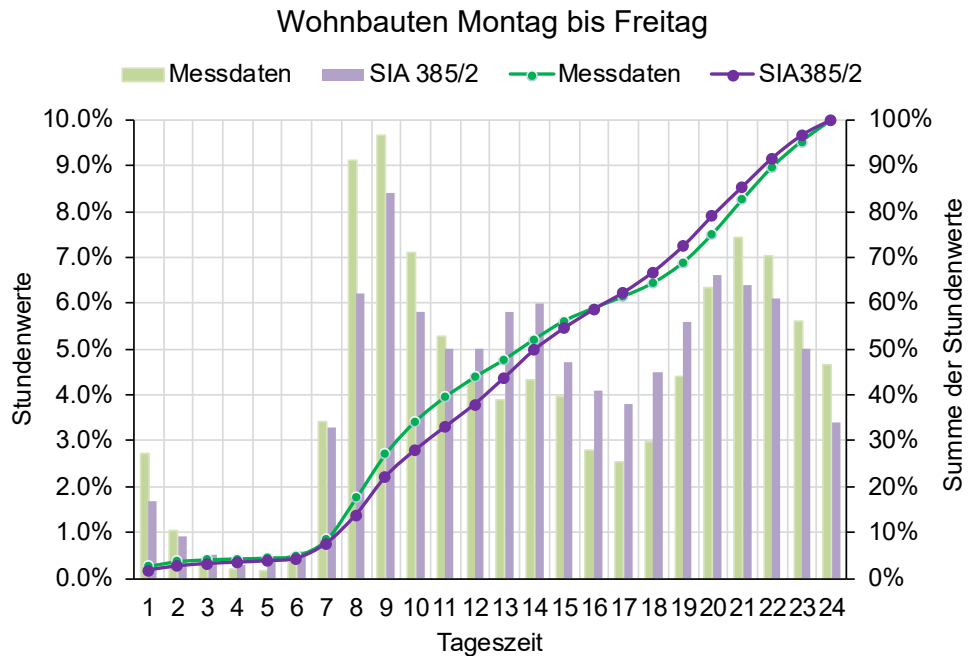


Abbildung 3: Säulen- und Summenliniendiagramm des Wärmebedarfs der Warmwasserversorgung in Wohnbauten. Die Säulen zeigen durchschnittliche Stundenwerte in % der entsprechenden Tagessumme (linke Skala), während die Linie die Summe dieser Stundenwerte ab 0 Uhr darstellt (rechte Skala). Die Messdaten stammen von 48 Mehrfamilienhäusern mit einer Belegung von 8 bis 45 Personen.

Zur Erstellung von Warmwasserprofilen wurde das Tool DHWcalc verwendet und es wurden stochastische Warmwasserprofile über je 365 Tage erstellt. Da DHWcalc immer nur die Summe des parametrisierten Bezugsprofils ohne Unterscheidung in einzelne Bezugstypen



(Dusche, etc.) aus gibt, wurde jeweils ein Profil für den gesamten Warmwasser-Bedarf erstellt und eines für den Duschbedarf. Die Verteilung des Gesamtbedarfs über den Tag erfolgte anhand des SIA-Summenliniendiagramms. Für die Dusche wurde die im DHWcalc hinterlegte «Standard Distribution» verwendet, welche je eine Spitze am Morgen und Abend aufweist. Anschliessend wurde der Duschbedarf vom Gesamtbedarf abgezogen. Resultierte zu einem Zeitpunkt ein Duschbedarf, der höher ist als der Gesamtbedarf, wurde der Dusch-Mehrbedarf auf die benachbarten Zeitschritte verteilt.

Es wurden Profile für Gebäude mit 10, 25, 50, 75, 100, 200 und 400 Personen sowie jeweils für den allgemeinen und gehobenen Standard erstellt. Für jede Wohnung wurde eine sanitäre Ausstattung für PWH von zwei Wasch- bzw. Spülbecken und einer Dusche angenommen. Der gehobene Standard verfügt zudem über eine Badewanne. Über diese Annahmen wird der maximale Spitzendurchfluss gemäss SVGW-Richtlinie W3 [18] ermittelt. Für den allgemeinen Standard wird ein Bedarf an Normliter pro Person und Tag von 35 L und für den gehoben von 45 L gemäss SIA 385/2 angenommen. Die Duschbrause verfügt über einen mittleren Volumenstrom von 7 L/min bzw. 10 L/min für den allgemeinen, respektive gehobenen Standard. Eine detaillierte Auflistung der Annahmen befindet sich in Annex D.

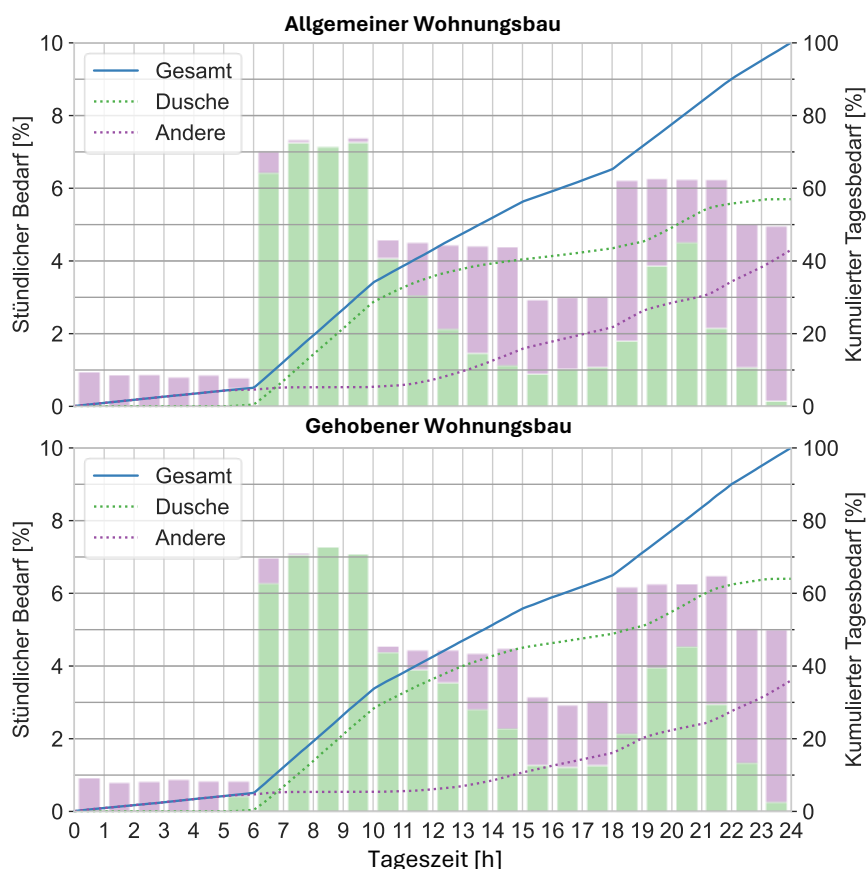


Abbildung 4: Mittleres Warmwasserbedarfsprofil relativ zum Gesamtbedarf für MFH 75 Personen, allgemeiner und gehobener Standard. Der kumulierte Gesamtbedarf (blaue Linie) setzt sich aus den Profilen Dusche (grüne Linie) und Andere (violette Linie) zusammen. Der relative stündliche Bedarf ist nach Kategorie (grün: Dusche und violett: Andere) als Balken dargestellt.



Das über alle Tage des Jahres gemittelte Profil des Warmwasserbedarfs ist beispielhaft für ein MFH mit 75 Personen für den allgemeinen und gehobenen Standard in Abbildung 4 dargestellt. Die tägliche Verteilung wird massgeblich durch die hinterlegte Verteilfunktion, welche auf den SIA-Daten basiert, bestimmt, weshalb alle Gebäude im Mittel über alle Tage des Jahres einen vergleichbaren Tagesverlauf aufweisen. Der Anteil der Dusche am Gesamtverbrauch liegt beim gehobenen Standard mit 64 % etwas höher als beim allgemeinen Standard (57 %). Beide Verläufe zeigen je einen stärkeren Anstieg am Morgen und Abend, was auf die Dusche zurückzuführen ist.

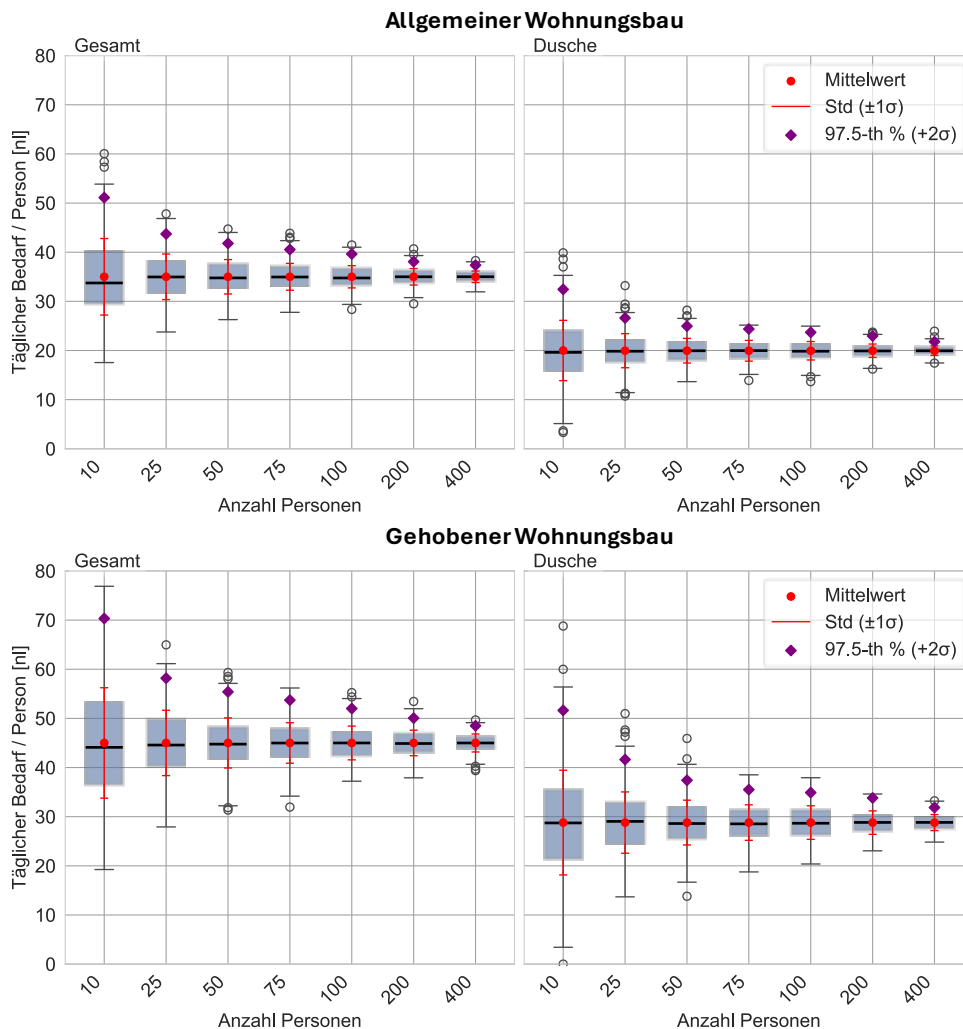


Abbildung 5: Täglicher Gesamt-Warmwasserbedarf bzw. Duschbedarf pro Person. Oben: Allgemeiner Wohnungsbau, unten: Gehobener Wohnungsbau. Der Boxplot zeigt den Mittelwert und dessen Standardabweichung (rot), sowie die 97.5 % Perzentile (violett) und Ausreisser (runde Kreise).

In Abbildung 5 ist der tägliche Gesamt-Warmwasserbedarf und Warmwasserbedarf für das Duschen pro Person aufgezeigt. Es wird deutlich, dass sowohl die Standardabweichung als auch die maximale Abweichung vom Mittelwert in Prozent mit zunehmender Anzahl an Personen deutlich abnehmen. In der SIA385/2 wird zur Speicherauslegung eine Standardabweichung von 5 nL/Person/Tag im allgemeinen Wohnungsbau und von



7.5 nL/Person/Tag im gehobenen Wohnungsbau angenommen, welche sich in Abhängigkeit der Personenanzahl um den Faktor $1/\sqrt{n_{p,i}}$ reduziert. Damit liegt die Standardabweichung der stochastischen Profile, welche für die untersuchten Gebäudegrößen von 11 auf 2 nL/Person/Tag abnimmt, oberhalb der Annahme der SIA.

Abbildung 6 zeigt den relativen Anteil der Stundenspitze des Gesamt- und des Duschbedarfs am gesamten PWH-Verbrauch für verschiedene Anzahl Personen. Zudem wird die nach der SIA385/2:2025 berechnete Stundenspitze gezeigt. Nach SIA wird die Auslegung des Spitzendeckungsvolumen für Gebäude mit mehr als zehn Personen nach folgender Gleichung berechnet:

$$Q_{W,pk} = Q_W \cdot \left(0.09 + \frac{0.66}{\sqrt{n_{p,W}}} + \frac{1.98}{n_{p,W}} \right) \quad (1)$$

mit:

- $Q_{W,pk}$ grösste Stundenspitze des Wärmebedarfs für Warmwasser im *Wohnbereich*, kWh/d
- Q_W Wärmebedarf für Warmwasser in der betrachteten Warmwasserversorgung, kWh/d
- $n_{p,W}$ Anzahl Personen, der betrachteten Warmwasserversorgung

Somit folgt für das Verhältnis von Stundenspitze zu Nutzwarmwasserbedarf:

$$\frac{Q_{W,pk}}{Q_W} = 0.09 + \frac{0.66}{\sqrt{n_{p,W}}} + \frac{1.98}{n_{p,W}} \quad (2)$$

Damit ist gemäss der SIA-Auslegung der Anteil der Stundenspitze am Gesamt-Nutzwarmwasserbedarf nur von der Anzahl der Personen abhängig, jedoch nicht vom Nutzwarmwasserbedarf pro Person.

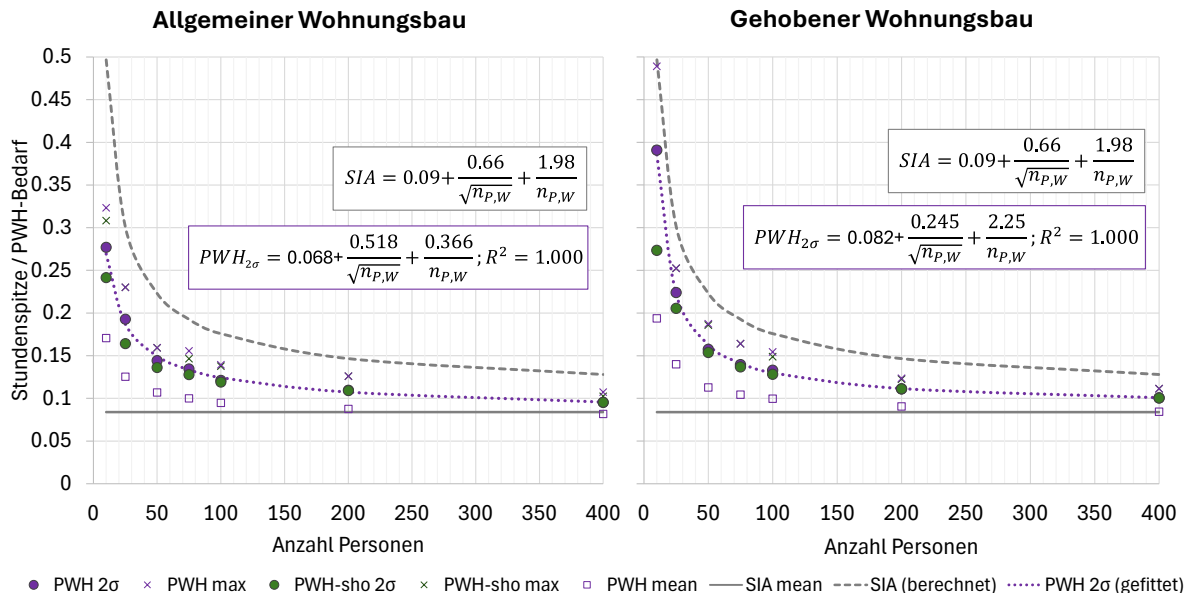


Abbildung 6: Relativer Anteil der Stundenspitze des PWH-Verbrauchs (violett) und der Dusche (grün) in Relation zum Warmwasser-Tagesverbrauch, links: allgemeiner Wohnungsbau, rechts: gehobener Wohnungsbau. Zudem aufgeführt, die aus der SIA abgeleitete mittlere Stundenspitze (grau) und das gemäss Auslegung resultierende Spitzendeckungsvolumen (grau-gestrichelt).



Das Verhältnis von Stundenspitze zu Nutzwarmwasserbedarf nimmt mit steigender Anzahl Personen für den allgemeinen und gehobenen Wohnungsbau ab. Für grössere Gebäude liegen die Werte der 97.5 % Perzentile für Duschspitze und Warmwasserspitze übereinander. Folglich ist es naheliegend, dass die Stundenspitze praktisch ausschliesslich durch die Duschen verursacht wird. Zudem ist der relative Anteil der Stundenspitzen am PWH-Bedarf für den gehobenen Wohnungsbau bei kleineren Gebäuden deutlich grösser als beim allgemeinen Wohnungsbau. Die mittels DHWcalc erzeugten Profile zeigen insgesamt tiefere Stundenspitzen als sie aus der Berechnung der SIA folgen würden. Jedoch zeigt sich, dass die stochastisch ermittelten Profile an die Regressionsfunktion der SIA in der Form $y = a + b/\sqrt{x} + c/x$ sehr gut gefittet werden können. Hierdurch wird ersichtlich, dass die SIA von leicht grösseren Stundenspitzen für sehr grosse Gebäude ausgeht ($n_{p,w} \rightarrow \infty$). Für kleinere Gebäude zeigen der gehobene Wohnungsbau und die SIA vergleichbare Zunahmen des Stundenspitzenanteils, im allgemeinen Wohnungsbau verläuft diese flacher.

Es zeigt sich beim Vergleich der Stundenspitzen aus den stochastischen Daten mit der Auslegung der SIA, dass gemäss SIA von höheren Stundenspitzen ausgegangen wird, welche entsprechend über das Spitzendeckungsvolumen abgedeckt werden müssen. In Abbildung 3 fällt auf, dass die grösste durchschnittliche Stundenspitze am Wochentag gemäss SIA bei 8.4 % liegt. Wenn das Spitzendeckungsvolumen für 100 Personen gemäss Formel 2 (ebenfalls nach SIA) berechnet wird, so resultiert ein Wert, der um Faktor 2 höher ist als diese 8.4%. Werden hingegen die Stundenspitze aus den stochastischen Profilen aus Abbildung 6 ermittelt (*Mittelwert* + 2σ), entweder direkt oder über die in der Grafik angegebene Fit-Formel, so liegt das Resultat mit 12.3% des Tagesbedarfs um Faktor 1.5 höher als die 8.4% aus dem Summenliniendiagramm, und somit um 25% tiefer als die Berechnung auf Grund der SIA-Formel.

In Annex E sind die stündlichen Profile an Warmwasser und Duschwarmwasser für beide Ausbaustandards aufgeführt.

Je grösser ein Gebäude, in diesem Falle zum Beispiel ein Mehrfamilienhaus, umso mehr kann davon ausgegangen werden, dass sich die Vielzahl der Bezüger, welche zu unterschiedlichen Bezugstypen in Bezug auf die Häufigkeit, Temperatur und Dauer des Duschens gehören, statistisch ausgleichen, so dass mit Durchschnittswerten und statistischen Wahrscheinlichkeiten gearbeitet werden kann. Bei kleinen Objekten ist dies nicht der Fall. Auch bei diesen kann jedoch der zu erwartende jährliche Warmwasserbedarf über Durchschnittswerte und deren statistische Varianz oder Standardabweichung berechnet und mit einem Vertrauensintervall (via Wahrscheinlichkeitsrechnung) angegeben werden. Eine Reduktion des Speichervolumens (Steuervolumen, Spitzendeckungsvolumen auf Grund von Stundenspitzen) kann jedoch in diesem Falle nicht gemacht werden, weil individuelles «Baden statt Duschen» der dominante Faktor für die Auslegung sein kann. In diesem Falle kann auch bei der zu erwartenden Stundenspitze kein Abzug auf Grund von Durchfluss-WRG gemacht werden, da sich diese Stundenspitze unter Umständen nach dem Bedarf für Badewannen richtet.



3 Produkte und Berechnungsverfahren für Dusch-WRG

3.1 Produkte und Einbauvarianten

Auf dem Markt gibt es zwei Produktklassen für die Wärmerückgewinnung bei Duschen: horizontale und vertikale Wärmeübertrager. Zu den horizontalen Wärmeübertragern zählen beispielsweise Duschrinnen-Wärmeübertrager und Flächen-Wärmeübertrager, die unter der Badewanne oder auf dem Duschboden installiert werden. Diese Produkte haben den Vorteil, dass sie in der Regel sehr einfach nachgerüstet werden können, was die Installation kostengünstig macht. Horizontale Duschwasser-Wärmerückgewinnungssysteme (WRG-Systeme) eignen sich daher besonders für Sanierungen bzw. nachträgliche Installationen. Ein weiteres Merkmal dieser Systeme ist, dass sie bauartbedingt nur für jeweils eine Dusche bzw. ein Bad eingesetzt werden können und in der Grösse auf die Geometrie der Dusche/ Duschrinne limitiert sind, was die Einsatzmöglichkeiten begrenzt.

Tabelle 3: Übersicht einiger gängiger Duschwasserwärmerückgewinnungssysteme.

Kategorie	Hersteller	Beispielprodukte	Abmessungen	Effizienz- bereich* (%)
Duschrinnen- Wärmeübertrager	Joulia AG	(tw)inline 3P, (tw)inline 5P	Länge: 837 mm, Breite: 142-168 mm, Höhe: 89-120 mm	34 -41
	Recoup	Drain+ Duo HE	Länge: 866 mm, Breite: 310 mm, Höhe: 207 mm	60
Vertikale Rohrsysteme	Q-Blue B.V.	Showersve QB1-12, QB+-21C, QB1-21D	Höhe: 1270 - (2x) 2300 mm	52 - 78
	Technea	Shower HR Tube 1-17. 1-21, 2-21 Twin	Höhe: 1700 - (2x) 2100 mm	63 - 77
	Zypho	PiPe 55 DW, 60 DW, 65 DW	Höhe: 1650 - 2400 mm	51 - 64
	Recoup	Pipe Hex, Hex Active	Höhe: 2300 - 2650 mm	63 - 68
Horizontale Systeme Badewanne	Zypho	Bathtub iZi30, iZi40	Länge: 58 mm, Breite: 170 mm Höhe: 90 mm	31
	Recoup	Easyfit+	Länge: 1176 mm Breite: 386 mm Höhe: 95 mm	48
Horizontale Systeme Dusche	Zypho	Slim 50 DW		
	Recoup	HeatDeck	Länge: 800 - 1200 mm Breite: 800 mm Höhe: 84 mm	43
Mehrfamilienhaus vertikal	Q-Blue B.V.	Showersave Multi II	Länge: 1900 - 2730 mm Breite: 600 - 900 mm Höhe: 400 mm	-

*Der Effizienzbereich wurde gemäss Webseite «Passivhaus» bestimmt und bezieht sich auf eine Integration des WRG in A-Konfiguration [19].



Bei der zweiten Kategorie, den vertikalen Wärmeübertragern, handelt es sich überwiegend um doppelwandige Rohr-Wärmeübertrager, bei denen das warme Abwasser durch ein Innenrohr fließt und das kalte Trinkwasser in dem umgebenden Zwischenraum oder einem Aussenrohr im Gegenstromprinzip erwärmt wird. Bei der Installation ist auf eine ausreichende Einbauhöhe zu achten. Bei den hier ermittelten Produkten beträgt die Länge der senkrechten Fallrohre je nach Leistung zwischen 1.7 m und 2.4 m (ohne Anschlüsse). Diese müssen deshalb in einem Stockwerk unterhalb der Duschen installiert werden. Ausserdem müssen die Wärmeübertrager für Wartungszwecke zugänglich sein. Ein nachträglicher Einbau ist daher schwierig bzw. mit höheren Kosten verbunden, weshalb sich diese Variante besonders für Neubauten eignet. Die Rohre gibt es in verschiedenen Ausführungsvarianten. Sie können sowohl für nur eine Dusche, aber auch als grosse Anlage aus parallelgeschalteten Rohren für Mehrfamilienhäuser und Hotels ausgelegt werden. Tabelle 3 gibt eine Übersicht einer Produktrecherche für gängige Systeme am europäischen Markt.

Je nach Anwendungsgegebenheiten oder Wunsch kann das WRG-System auf eine von drei verschiedenen Arten installiert werden. Diese sind in Abbildung 7 dargestellt. Sie unterscheiden sich jeweils darin, wie das durch den Wärmeübertrager erwärmte Kaltwasser genutzt wird. Wird das erwärmte Kaltwasser sowohl zur Duscharmatur als auch zum Warmwasserbereiter/Speicher geleitet, spricht man von Konfiguration A, wird es nur zur Duscharmatur geleitet, spricht man von Konfiguration B und beim Weiterleiten nur zum Warmwasserbereiter/Speicher, von Konfiguration C.

Aus mikrobiologischer Sicht sollten die Ausstossleitungen zur Duscharmatur bei den Konfigurationen A und B möglichst kurz ausgeführt werden, sodass sie innerhalb von etwa 4 Stunden auf eine Umgebungstemperatur von unter 25 °C abkühlen.

Für die Konfigurationen A und C kann angenommen werden, dass sich in der Speicheranschlussleitung aufgrund des regelmässigen Warmwasserbezugs das Wasservolumen mehrmals täglich erneuert. Trotz zeitweise mikrobiologisch kritischer Temperaturbereiche ist daher nicht mit einer mikrobiologisch kritischen Situation zu rechnen. Zudem ist im Spitzendeckungsvolumen eine thermische Desinfektion gegeben, welche bei ungünstigen mikrobiologischen Bedingungen eine Ausbreitung von Mikroorganismen in das Warmwasserverteilnetz verhindern sollte.

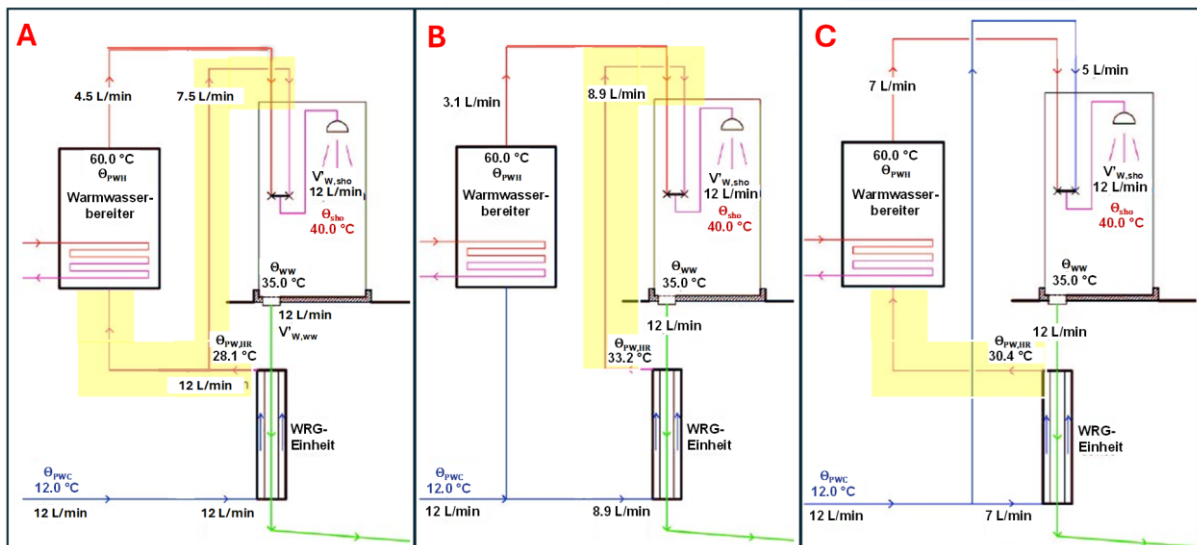


Abbildung 7: Die drei Konfigurationen A, B, C, mit denen WRG-Einheiten üblicherweise in die Warmwasserversorgung eines Gebäudes integriert werden. A: gleicher Durchfluss durch die WRG-Einheit primär- und sekundärseitig (sekundär: niedrigste Temperatur am WRG-Auslass aber höchste Effizienz). B: nur Kaltwasseranteil wird durch WRG vorgewärmt (höhere Temperatur des erwärmten Kaltwassers wie A, aber niedrigerer Durchfluss). C: nur Kaltwassereintritt am Speicher wird vorgewärmt. (Darstellung nach [3]).

Konfiguration A, Parallel: Einspeisung in Speicher/Erzeuger und zur Duscharmatur

Bei dieser Methode wird das durch den Wärmeübertrager vorgewärmte kalte Frischwasser sowohl dem Kaltwasserzulauf der Duscharmatur als auch dem Warmwasserbereiter zugeführt. Da das gesamte Frischwasser, das für das Duschen benötigt wird, durch die Wärme des Abwassers vorgewärmt wird, bevor es entweder direkt zum Mischer gelangt oder im Warmwasserbereiter weiter erwärmt wird, ist bei dieser Konfiguration die Wärmemenge, die zurückgewonnen werden kann, am höchsten. Diese Konfiguration erfordert jedoch möglicherweise längere warme Verbindungsleitungen: Wenn die WRG im Keller oder Technikraum installiert ist, ist der Weg des warmen Abwassers der Dusche zur WRG sowie des vorgewärmten Kaltwassers zur Dusche länger. Wenn die WRG nahe an der Dusche erfolgt, ist der Weg des vorgewärmten Kaltwassers zum Warmwasserbereiter womöglich länger. Auf Grund der separaten Leitungen zur Dusche oder zum Warmwasserspeicher, die hier notwendig sind, ist dieses Konzept besser für Neubauten und kleinere Objekte (EFH) geeignet.

Konfiguration B, nur Duscharmatur: Vorwärmung Kaltwasserseite der Mischarmatur

Bei dieser Methode wird das durch den Wärmeübertrager vorgewärmte kalte Trinkwasser ausschliesslich dem Kaltwasserzulauf der Duscharmatur zugeführt. Der Anteil der Wärme, der zurückgewonnen werden kann, ist tiefer als bei System A, da nur der Kaltwasseranteil des für das Duschen benötigten Wassers vorgewärmt wird. Dieses System eignet sich gut zur Nachrüstung, da keine separate Leitung zum Warmwasserbereiter notwendig ist.



Konfiguration C, nur Speicher/Erzeuger: Einspeisung in die Warmwasserversorgung

Hier wird der vorgewärmte Kaltwasser-Zulauf aus dem Wärmeübertrager ausschliesslich dem Warmwasserspeicher oder der Wassererwärmungsanlage zugeführt. System C eignet sich vor allem in MFH, wenn Duschen weit vom Speicher entfernt liegen. Hier kann eine zentrale Wärmerückgewinnungseinheit für alle Duschen in der Technikzentrale installiert werden, wodurch Kosten für Installation und Wartung tiefer ausfallen. Bei Konfiguration C ist es wichtig, die Rohrleitungen des Abwassers zu dämmen, wenn Dusche und WRG weit auseinanderliegen. Die rückgewinnbare Wärmemenge liegt unter derjenigen von A, da nur der Kaltwasseranteil des Speichers vorgewärmt wird. Bei Konfiguration C spielen die Wärmeverluste in den Rohrleitungen eine entscheidende Rolle für die Effizienz der Konfiguration.

Einfluss auf benötigtes Speichervolumen ist unterschiedlich

Nicht nur auf die Effizienz hat die Konfiguration einen Einfluss, auch auf die mögliche Volumenreduktion bei der Auslegung des Wärmespeichers. Lediglich der Teil des vorgewärmten Kaltwassers, welcher direkt zur Duscharmatur geht, hat einen Einfluss auf die erforderliche Speichergösse. Denn nur wenn durch Wärmerückgewinnung weniger Warmwasser aus dem Speicher bezogen wird, kann das erforderliche Speichervolumen reduziert werden [3]. Dies ist für die Konfigurationen A und B der Fall, nicht aber für C. Eine Übersicht der drei Konfigurationen ist in Tabelle 4 zu sehen.

Tabelle 4: Übersicht der drei Einbauarten für WRG-Systeme für Duschabwasser (siehe auch Abbildung 7).

System	Ziel des vorgewärmten Wassers	Rückgewinnbare Wärmemenge ^{a)}	Volumenreduktion Warmwasserspeicher
A	Kaltwasserzulauf der Duscharmatur UND des Warmwasserspeichers	Hoch	Teilweise (nur der Anteil, welcher zur Duscharmatur fliesst, kann für eine Volumenreduktion berücksichtigt werden)
B	Ausschliesslich Kaltwasserzulauf der Duscharmatur	niedriger als A	Die ganze zurückgewonnene Energie, des durch die WRG-Einheit vorgewärmten Kaltwassers, kann angerechnet werden
C	Ausschliesslich Kaltwasserzulauf des Warmwasserspeichers	niedriger als A	Keine Reduktion, da die dem Speicher entzogene Energie gleich bleibt

a) auf Grund der reduzierten Volumenströme auf der Kaltwasserseite des WÜ bei Konfiguration B und C ist die rückgewinnbare Wärmemenge (Theorie der Wärmeübertragung, siehe 3.2) bei diesen geringer als bei Konfiguration A.

3.2 Theorie der Wärmeübertrager

Wärmeübertrager (WÜ) sind technische Vorrichtungen zur Übertragung von Wärme. Dabei kann diese Übertragung auf Grund des zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik immer nur von der wärmeren auf die kältere Seite erfolgen. Wärmeübertrager – oft auch als Wärmetauscher bezeichnet, sind in der Regel für die Übertragung von einem Fluid oder Stoffstrom auf einen anderen konzipiert. Dies ist auch bei der Dusch-WRG der Fall. Dabei



spielen die Kapazitätsflussraten \dot{C} auf beiden Seiten (warme und kalte Seite) des Wärmeübertragers eine entscheidende Rolle:

$$\dot{C} = \dot{m} \cdot c_p \quad (3)$$

- \dot{C} Kapazitätsflussrate, W/K
 \dot{m} Massenstrom, kg/s
 c_p spezifische Wärmekapazität des Fluids, J/(kgK)

Sind die Kapazitätsflussraten auf beiden Seiten des WÜ nicht gleich, so ist die kleinere der beiden Kapazitätsflussraten (\dot{C}_{min}) massgebend für das Maximum an Wärme, welches überhaupt übertragen werden kann. Dieses Maximum wird dann erreicht, wenn der Austritt des Fluids mit der geringeren Kapazitätsflussrate beim Austritt die Eintrittstemperatur des anderen Fluids erreicht:

$$\dot{Q}_{max} = \dot{C}_{min}(T_{Cmin,in} - T_{Cmax,in}) \quad (4)$$

- \dot{Q}_{max} Maximal erzielbare Wärmeübertragungsleistung, W
 \dot{C}_{min} Kleinere der beiden Kapazitätsflussraten, W/K
 $T_{Cmin,in}$ Eintrittstemperatur des Fluids mit der kleineren Kapazitätsflussrate, °C
 $T_{Cmax,in}$ Eintrittstemperatur des Fluids mit der grösseren Kapazitätsflussrate, °C

Die Effizienz (engl.: effectiveness, ε) oder Wirkungsgrad eines Wärmeübertragers wird jeweils in Bezug auf diese maximal erzielbare Wärmeleistung angegeben:

$$\varepsilon = \frac{\dot{Q}_{real}}{\dot{Q}_{max}} = \frac{\dot{Q}_{real}}{\dot{C}_{min}(T_{Cmin,in} - T_{Cmax,in})} \quad (5)$$

- ε Wärmeübertrager-Wirkungsgrad (Effectiveness), bezogen auf den maximal möglichen Wirkungsgrad, (0-1)
 \dot{Q}_{real} Real übertragene Wärmeleistung, W

Achtung: der Wirkungsgrad des Wärmeübertragers ε ist NICHT dasselbe wie der Wirkungsgrad einer Wärmerückgewinnungsanlage η_{hr} , wie er zum Beispiel im Anhang K der SIA 385/2 definiert ist.

Für diejenige Seite mit der geringeren Kapazitätsflussrate kann die Temperaturänderung des Fluids durch Multiplikation von ε mit der Temperaturdifferenz der beiden WÜ-Eintritte berechnet werden. Für die Seite mit der höheren Kapazitätsflussrate jedoch nicht (!).

Die Temperaturänderungen auf den beiden Seiten des Wärmeübertragers stehen in folgender Beziehung zueinander: Die Effizienz der Wärmerückgewinnung aus dem Abwasser (WRG-Effizienz η_{hr}) bezieht sich auf die thermische Leistung des Duschwassers, unter Berücksichtigung des delta-T von Kaltwasser und Warmwasser an der Brause und dem Volumenstrom der Brause, also auf die Kapazitätsflussrate der warmen Seite mit $T_{h,in}$ = Temperatur Brause. Der Wirkungsgrad des Wärmeübertragers ε jedoch bezieht sich auf die kleinere der beiden Kapazitätsflussraten, was nicht dasselbe ist. Bei Konfiguration A kann man



die beiden, unter Vernachlässigung von Wärmeverlusten, praktisch gleichsetzen, bei Konfiguration B und C ist jedoch das Dusch-Abwasser diejenige Seite mit der höheren Kapazitätsflussrate. Deshalb muss für den effektiven Wirkungsgrad der Dusch-WRG auf Grund des geringeren Volumenstroms auf der Kaltwasserseite eine Korrektur vorgenommen werden, um vom Wärmeübertrager-Wirkungsgrad auf den effektiven Wirkungsgrad der WRG schliessen zu können. Dies ist noch keine Verlust-Korrektur, sondern eine Korrektur auf Grund der ungleichen Kapazitätsflussraten. Dabei wird der verlustfreie stationäre Wirkungsgrad der WRG $\eta_{hr,STS}$ durch Multiplikation des Wärmeübertrager-Wirkungsgrades ε mit dem Verhältnis der Kapazitätsflussraten C_r erhalten:

$$C_r = \frac{\dot{c}_{min}}{\dot{c}_{max}} \quad (6)$$

$$\eta_{hr,STS} = C_r \cdot \varepsilon \quad (7)$$

Weiter stellt die Theorie der Wärmeübertrager eine Methode zur Verfügung, um aus einer Messung bei einer bestimmten Konfiguration von Durchflüssen und Temperaturen Resultate bei veränderten Durchflüssen und Temperaturen rechnerisch abzuschätzen.

Dabei wird davon ausgegangen, dass der Wärmeübertrager im betrachteten Arbeitsbereich näherungsweise durch einen konstanten Gesamtwärmeübertragungskoeffizienten UA beschrieben werden kann. Die Wärmeübertrager-Effizienz ε kann dann für verschiedene Wärmeübertragerarten (Gegenstrom, Gleichstrom, Kreuzstrom, etc.) in einer jeweils für diese Art spezifischen Formel der Form $\varepsilon = f(NTU, C_r)$ ermittelt werden, welche eine Funktion der Kapazitätsflussraten (C_{min}, C_{max}) sowie der Number of Transfer Units (NTU) ist, wobei letztere definiert ist über:

$$NTU = \frac{UA}{c_{min}} \quad (8)$$

Für Gegenstromwärmeübertrager gilt:

$$\varepsilon = \frac{NTU}{1+NTU}; \quad \text{für } C_r \approx 1 \quad (9)$$

$$\varepsilon = \frac{1-\exp[-NTU(1-C_r)]}{1-C_r \cdot \exp[-NTU(1-C_r)]}; \quad \text{für } C_r < 1 \quad (10)$$

Liegt eine Messung unter balancierten Bedingungen (z.B. Konfiguration A mit annähernd gleichen Kapazitätsflussraten ($C_r \approx 1$)) vor, kann daraus zunächst ein Referenzwert NTU_0 bestimmt werden. Dieser Wert beschreibt die „Wärmeübertragungsfähigkeit“ des WÜ und dient als Ausgangspunkt, um ε für andere Kapazitätsflussverhältnisse zu berechnen. Wird anschliessend das Kapazitätsflussverhältnis geändert (geringerer Durchfluss auf der kalten Seite und dadurch kleineres C_r), so kann ein neuer NTU-Wert für diesen Betriebspunkt und daraus ein aktualisierter Wert von ε berechnet werden.

Für die Konfigurationen B und C ist das Kapazitätsflussverhältnis jedoch nicht im Voraus bekannt: es ist abhängig von den Temperaturen des Warmwassers sowie des evtl. vorgewärmten Kaltwassers am Eingang der Duscharmatur. In Konfiguration B wird Wärme der WRG ausschliesslich auf die Kaltwasserseite der Mischarmatur übertragen, sodass der Kaltwasserstrom durch den Wärmeübertrager dem Kaltwasseranteil zur Erreichung der Soll-Duschtemperatur θ_{sho} entspricht. Dieser Anteil hängt von der erwärmte Kaltwassertemperatur



$\theta_{PWC,hr}$ ab. Gleichzeitig wird $\theta_{PWC,hr}$ durch die Wirksamkeit ε des Wärmeübertragers bestimmt, welche wiederum vom Kapazitätsflussverhältnis C_r abhängt. Damit entsteht eine Rückkopplung: $\varepsilon \rightarrow \theta_{PWC,hr} \rightarrow \dot{m}_{PWC,hr} \rightarrow C_r \rightarrow \varepsilon$.

Der Betriebspunkt von Konfiguration B kann daher nicht in einem Schritt berechnet werden, sondern muss iterativ bestimmt werden. Dazu kann mit dem aus Konfiguration A abgeleiteten Startwert für ε bzw. NTU_0 begonnen werden. Daraus wird in einem Iterationsschritt n ein erstes $C_{r,n}$ über das Mischungsverhältnis und die resultierende erwärmte Kaltwassertemperatur $\theta_{PWC,hr}$ bestimmt. Mit diesem $C_{r,n}$ wird der Wirkungsgrad ε_n berechnet und daraus wiederum das resultierende Mischungsverhältnis $C_{r,n+1}$. Diese Iterationsschleife wird wiederholt, bis sich ε (und damit $\theta_{PWC,hr}$ sowie $\dot{m}_{PWC,hr}$) zwischen zwei Rechenschritten nur noch vernachlässigbar ändert (Konvergenzkriterium). Gemäss Socal (2023) reicht es, die Iteration fünf- bis sechsmal durchzuführen [20], bis sich der Wert bis zur zweiten Nachkommastelle bei zwei aufeinander berechneten Wirkungsgraden nicht mehr ändert.

3.3 Normen zur Effizienzmessung von Dusch-WRG

Folgendes Kapitel gibt eine Übersicht über verschiedene Normen zur Effizienzbestimmung von Duschwasser-Wärmerückgewinnungssystemen.

3.3.1 Kanadische Norm B55.1-15:

Die kanadische Norm CSA B55.1-15 «Test method for measuring efficiency and pressure loss of drain water heat recovery units» aus dem Jahr 2015 ist eine Testmethode zur Messung der Effizienz und des Druckverlusts von Fallfilm-Wärmeübertragern, welche zur Wärmerückgewinnung aus dem Duschabwasser eingesetzt werden [21]. Die Norm berücksichtigt ausschliesslich WRG-Einheiten, die gemäss Konfiguration A betrieben werden. Das heisst, der Volumenstrom des Duschabwassers entspricht dem Volumenstrom an Kaltwasser, welches auf der Sekundärseite einströmt. Das erwärmte Wasser fliesst je nach Stellung der Dusch-Mischbatterie sowohl zum Duschkopf als auch zum Warmwasserbereiter. Der Testaufbau ist in Abbildung 8 zu sehen. Dabei darf das Verbindungsrohr im Testaufbau zwischen Duschwannenauslass und Wärmeübertrager max. 750 mm lang sein und es muss mit einer Wärmedämmung ummantelt sein.

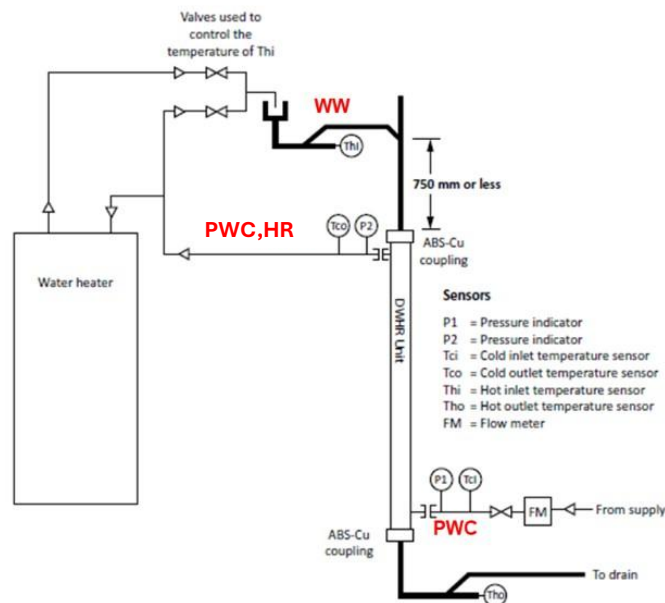


Abbildung 8: Testaufbau für die Effizienzbestimmung nach der kanadischen Norm B55.1-15, Temperatur-Indizes in Rot, nach [21]

Folgende Testbedingungen sind in der B55.1-15 vorgegeben:

- Trinkwasser-Eintrittstemperatur (PWC) am Eingang der WRG-Einheit: $12.0 \pm 0.4 \text{ }^\circ\text{C}$
- Die Eintrittstemperatur des Abwassers muss $28.0 \pm 0.6 \text{ }^\circ\text{C}$ über der PWC-Temperatur liegen
- Die Prüfungen werden bei den Durchflussraten von 5.5; 7; 9; 10; 12 und 14 L/min durchgeführt
- Jede Prüfreihe wird im stationären Betrieb (steady state test condition) erfasst, bei dem sich die gemessenen Werte von Durchflussraten, Temperaturen und der Eintrittstemperaturdifferenz innerhalb der angegebenen Toleranzen nicht ändern.
- Die Durchflussrate und die Wassertemperaturen müssen jeweils einen Durchschnitt aus Messungen über mindestens eine Minute sein, in welcher mindestens im Sekundentakt gemessen wurde (d.h. mindestens 60 Einzelmessungen)
- Des Weiteren wird für jede Durchflussrate der Druckverlust bestimmt

Der Wirkungsgrad wird wie folgt berechnet:

$$\varepsilon^* = \left(\frac{\theta_{PW,HR} - \theta_{PWC}}{\theta_{WW} - \theta_{PWC}} \right) \cdot 100\% \quad (11)$$

wobei:

ε^* Wirkungsgrad des Wärmeübertragers unter Berücksichtigung gewisser Verlust (hier zwischen Dusch-Abfluss und WRG Eintritt) im steady state, $C_r = 1$.

$\theta_{PW,HR}$ Trinkwasser-Auslasstemperatur WRG, $^\circ\text{C}$

θ_{PWC} Kaltwassertemperatur am Eintritt, $^\circ\text{C}$

θ_{WW} Abwasser-Eintrittstemperatur, $^\circ\text{C}$



Nach der Durchführung aller Testpunkte wird die berechnete Effizienz gegenüber der Durchflussrate aufgetragen und eine Kurve mit der Funktion

$$\varepsilon^* \cdot 1/(a + b \cdot \dot{V}) \quad (12)$$

durch die Messpunkte gefittet, wobei a und b durch eine Regressionsanalyse bestimmt werden und \dot{V} die Durchflussrate (Volumenstrom) ist. Nach dem Bestimmen der Regressionskurve wird die Effizienz in Prozent bei einer Durchflussrate von 9.5 L/min mit Hilfe der Parameter a und b berechnet und ausgewiesen.

Zusätzlich wird für alle Messpunkte der Druckverlust bestimmt. Diese Messpunkte werden über eine quadratische Formel in Abhängigkeit des Volumenstroms gefittet und ebenfalls als berechnetes Resultat bei 9.5 L/in ausgewiesen.

Da im Gleichgewichtszustand gemessen wird und für die Effizienzberechnung nur die Temperaturen und der Durchfluss berücksichtigt werden, werden die Verluste durch die Aufwärm- und Abkühlphasen des Wärmeübertragers und der Rohrleitungen nicht berücksichtigt. Auch eine Umrechnung auf Fälle mit $C_r < 1$ wird nicht beschrieben.

3.3.2 Niederländische Norm NTA 8800:2023

Die niederländische Norm NTA 8800:2023, Bijlage U beschreibt ebenfalls eine Prüfmethode zur Bestimmung des Wirkungsgrades von Duschwasser-Wärmerückgewinnungseinheiten unter bestimmten Testbedingungen. Im Vergleich zur kanadischen Norm steht bei der niederländischen Norm mehr der Duschvorgang selbst im Vordergrund. Das heisst, nicht nur die Temperaturen, sondern auch die Dauer und verschiedene Nutzungsszenarien von sparsamem bis zu hohem Warmwasserverbrauch (CW2–CW6), werden berücksichtigt [22]. Die Norm prüft, wie die kanadische Norm B55.1-15, nur Wärmeübertrager, die gemäss Konfiguration A installiert werden. Folgende Testbedingungen sind in der NTA 8800:2023, Bijlage U vorgegeben:

- Kaltwasser-Eintrittstemperatur = 10 ± 1 °C,
- Duschtemperatur = 40 ± 1 °C*,
- Leitungsdruck = 0.2 MPa, (2 bar)
- Umgebungstemperatur = 20 ± 3 °C

*Die Duschtemperatur kann auch geändert werden, wichtig ist, dass dann auch die Dauer angepasst wird, damit immer die gleiche Energiemenge gezapft wird.

Tabelle 5: Messbedingungen für die Effizienzbestimmung nach CW-Klasse, nach [23].

CW-Klasse	Durchfluss Brause/Hahn [L/min]	Volumen [L]	Dauer [min:s]	Energie [kWh]
2	5.8	47	8:06	≈ 1.64 kWh
3	9.2	73	7:56	≈ 2.55 kWh
4; 5; 6	12.5	100	8:00	≈ 3.49 kWh



Im Vergleich zur kanadischen Norm wird nicht erst im stationären Zustand angefangen zu messen, sondern gleich zu Beginn, wenn die WRG-Einheit noch kalt ist. Dafür muss diese vor jedem Test mit kaltem Wasser durchgespült werden. Die Norm bietet keine Skizze zum Testaufbau. Es wird jedoch erwähnt, dass das Abwasser über einen Siphon zugeführt werden muss und die Leitung zwischen Duschbrause und Wärmeübertrager kurz und wärmegeämmt sein muss. Temperaturmessungen erfolgen hier ebenfalls mit einer Abtastezeit ≤ 1 s.

Messungen werden dreimal pro Klasse durchgeführt; das arithmetische Mittel wird als Endergebnis angegeben und auf ein Vielfaches von 0.025 abgerundet.

Berechnet wird der Wirkungsgrad aus dem Verhältnis der zurückgewonnenen Wärmeenergie der WRG-Einheit Q_{hr} durch die Wärmeenergie des Duschvorgangs Q_{sho} :

$$\eta_{hr,A} = \frac{Q_{hr}}{Q_{sho}} \quad (13)$$

wobei:

$$Q_{hr} = \sum \{ \dot{V}_{hr} \cdot \rho(\theta) \cdot [h(\theta_{PW,HR}) - h(\theta_{PWC})] \cdot dt \} \quad (14)$$

$$Q_{sho} = \sum \{ \dot{V}_{sho} \cdot \rho(\theta) \cdot [h(\theta_{WW}) - h(\theta_{PWC})] \cdot dt \} \quad (15)$$

mit:

\dot{V}_{hr} Durchflussmenge des Wassers durch die WRG-Einheit, m³/s

\dot{V}_{sho} Durchflussmenge des Wassers durch den Duschkopf, m³/s

$\rho(\theta)$ ist die spezifische Dichte des Wassers als Funktion der Temperatur, kg/m³

$h(\theta)$ ist die spezifische Enthalpie des Wassers als Funktion der Temperatur, kJ/kg

dt ist das Messintervall, s

Da hier der gesamte Duschprozess zur Messdatenauswertung genutzt wird, ist auch die Startphase des Wärmeübertragers berücksichtigt. Die genaue Eintrittstemperatur in den Wärmetauscher ist nicht vorgegeben. Es wird darauf verwiesen, dass im Testaufbau idealerweise ein Siphon genutzt wird, und die Rohrleitungen so gut wie möglich gedämmt werden.

3.3.3 Französische Norm CAPE/RECADO-PQE

Die französische Prüfnorm CAPE/RECADO-PQE (Procédure Qualité Expérimentale), entwickelt durch das Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB) in Nantes, beschreibt ein experimentelles Prüfverfahren zur Bestimmung der thermischen Leistung von Duschwasser-Wärmerückgewinnungssystemen für stationäre und transiente Szenarien [23]. Ziel ist die Ermittlung der nominellen stationären Effizienz (Steady State) und eines Übergangskoeffizienten (ein Koeffizient zur Berücksichtigung der Startphase der WRG) für alle drei Einbindungskonfigurationen, womit dieses Verfahren vollständiger ist als die beiden in den vorherigen Unterkapiteln behandelten Normen. Des Weiteren wird die Temperatur des Duschabwassers am WRG-Eingang um drei Kelvin niedriger definiert als die Duschtemperatur, um Wärme- und Temperaturverluste zwischen Duschkopf und Abfluss abzubilden.



Folgende Testbedingungen werden vorgegeben:

- Duschtemperatur “sho”: $40 \pm 1.5 \text{ °C}$
- Kaltwassertemperatur “PWC”: $12.8 \pm 1.5 \text{ °C}$
- Abwassertemperatur am WRG-Eintritt “WW”: $37.0 \pm 1.5 \text{ °C}$
- Warmwassertemperatur am Mischer “PWH”: $55.0 \pm 1.5 \text{ °C}$
- Volumenstrom Brause: $8.0 \pm 0.5 \text{ L/min}$
- Duschkvolumen: $60.0 \pm 0.6 \text{ L}$
- Raumtemperatur: $23 \pm 3 \text{ °C}$
- Anhand der Parameter ergibt sich ein Energiebedarf von 1.68 kWh pro Duschkvorgang.

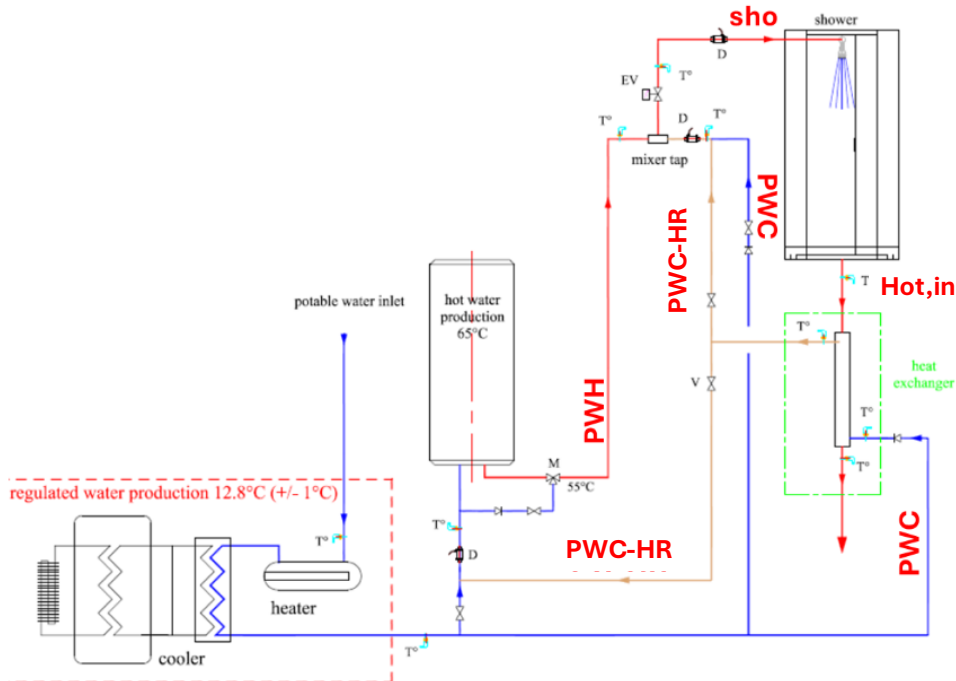


Abbildung 9: Messaufbau gemäss CAPE/RECADO-PQE, Temperatur-Indizes in Rot, nach [23].

Das Abwasser muss bei diesem Test durch Schwerkraft (ohne Pumpe) durch den Wärmeübertrager fließen. Tests werden sowohl mit kaltem Wärmeübertrager als auch mit vorgewärmtem Wärmeübertrager durchgeführt. Dadurch soll auch die Effizienz bei kurz aufeinanderfolgenden Duschen berücksichtigt werden können.

Die Wirkungsgrade für Konfiguration A, B und C werden für den stationären Betrieb bestimmt. Dafür werden nur Messdaten der letzten 20 Sekunden eines Tests verwendet. Die Berechnung erfolgt dann folgendermassen:

$$\eta_{hr,A} = \left(\frac{\theta_{PWC,HR} - \theta_{PWC}}{\theta_{WW} - \theta_{PWC}} \right) \quad (16)$$

$$\eta_{hr,B,C} = C_r \cdot \left(\frac{\theta_{PWC,HR} - \theta_{PWC}}{\theta_{WW} - \theta_{PWC}} \right) \quad (17)$$

Wobei für Konfiguration B gilt: $C_r = \dot{m}_{PWC,sho} / \dot{m}_{sho}$ und für Konfiguration C: $C_r = \dot{m}_{PWH,sho} / \dot{m}_{sho}$, mit:



$\dot{m}_{PWC,sho}$ Massenstrom Kaltwasser an der Mischbatterie
 $\dot{m}_{PWH,sho}$ Massenstrom Warmwasser an der Mischbatterie
 \dot{m}_{sho} Massenstrom Mischwarmwasser der Dusche
Temperaturen: siehe Gleichung 11

Diese Wirkungsgrade werden mit dem sogenannten Übergangskoeffizienten c_{trans} multipliziert. Mit diesem kann berücksichtigt werden, dass der Wärmeübertrager eine gewisse Zeit benötigt zum Aufwärmen. Auch dieser Übergangskoeffizient wird für alle drei Varianten anhand von Messdaten berechnet. Es werden also zwei Werte pro Konfiguration berechnet, wobei die Varianten mit kalter WRG mit dem Faktor 3 gewichtet werden, um sie stärker zu gewichten als die Variante mit warmen WRG. Der Faktor c_{trans} ergibt sich aus dem Quotienten von tatsächlich zurückgewonnener Energie pro Duschkvorgang und der zurückgewonnenen Energie im stationären Zustand, wenn dieser auf die gesamte Duschkdauer extrapoliert wird. Wichtig anzumerken ist, dass der Faktor c_{trans} von der Duschkdauer abhängt. Je länger die Duschkdauer, desto kleiner ist der Einfluss und umgekehrt.

3.3.4 Zusammenfassung der Prüfnormen

Die kanadische Norm B55.1-15 prüft Wärmerückgewinnungssysteme von Fallrohrwärmetauchern unter idealisierten Laborbedingungen. Der Fokus liegt auf dem stationären Betrieb mit festgelegten Durchflussstufen und definierter Temperatur. Transiente Effekte wie Anfahr- oder Abkühlphasen werden nicht berücksichtigt, ebenso wenig reale Wärmeverluste zwischen Dusche und Wärmeübertrager. Die Prüfung liefert damit reine Gerätekennwerte bei Dauerbetrieb, ohne Bezug zu typischen Duschkzyklen oder Installationsbedingungen. Die insgesamt sechs getesteten Durchflüsse bilden jedoch einen breiten Anwendungsbereich ab.

In der niederländischen Norm NTA 8800:2023, Bijlage U, wird der Duschkvorgang als Nutzungseinheit stärker in den Fokus gerückt. Sie berücksichtigt den gesamten Duschkverlauf und somit auch die Anfahrverluste zu Beginn der Nutzung. Die Prüfvorgänge werden für unterschiedliche Zapfprofile (CW2–CW6) durchgeführt, wodurch verschiedene Nutzungsklassen abgebildet werden. Die Messung erfolgt jedoch unter idealisierten Laborbedingungen. Das Duschkwasser tritt, wie bei B55.1-15, mit 40 °C unmittelbar in den Wärmeübertrager ein, ohne dass die Temperaturverluste im Ablauf berücksichtigt werden.

Die französische CAPE/RECADO-PQE-Norm erweitert den Prüfansatz zu einem dynamischen Mehrzyklen-Verfahren. Dabei werden jeweils zwei aufeinanderfolgende Tests durchgeführt: einer mit Start im kalten Zustand und einer mit vorgewärmten Startbedingungen. Dadurch werden sowohl die Anfahrverluste als auch die Abkühlverluste zwischen den Nutzungen abgebildet. Aus den Messungen werden zwei Kennwerte bestimmt: die Effizienz für den stationären Zustand und der Übergangskoeffizient für den Kaltstart. Letzterer beschreibt die Effizienzverluste infolge der thermischen Trägheit. Es wird jedoch nur bei einem einzigen Volumenstrom getestet. Dafür ist sie die einzige Prüfnorm, die alle drei Einbauarten (A, B und C) getrennt voneinander prüft und bewertet. Im Vergleich zu den beiden anderen Verfahren werden hier des Weiteren realistischere Temperaturen zugrunde gelegt: die Duschktemperatur beträgt 40 °C und die Abwassertemperatur beim Eintritt in den



Wärmeübertrager 37 °C. Dadurch werden Verluste in der Duschkabine und zwischen Dusche und WRG mit 3 K berücksichtigt. Damit entspricht das französische Prüfverfahren den realen Einsatzbedingungen am besten. Danach folgt die niederländische Prüfnorm. Die kanadische Prüfnorm versucht hingegen nicht, bei der Effizienzmessung einen Duschkvorgang realitätsnah darzustellen und fokussiert sich mehr auf den stationären Betrieb der WRG-Einheit bei Temperaturen, die beim Duschen zu erwarten sind, misst dafür bei mehreren Durchflüssen. Tabelle 6 fasst die wichtigsten Parameter der unterschiedlichen Prüfnormen zusammen.

*Tabelle 6: Vergleich der Prüfbedingungen der drei Normen. *Die Abwassereintrittstemperatur bei der kanadischen und der niederländischen Norm wird nicht vorgegeben, aber darauf verwiesen, dass Rohrleitungen möglichst kurz und gedämmt sein sollen.*

Parameter	CSA B55.1-15 (Kanada)	NTA 8800:2023 (Niederlande)	CAPE/RECADO- PQE (Frankreich)
Bewertete Konfigurationen	A	A	A, B, C
Kaltwassertemperatur	12 °C	10 °C	12.8 °C
Duschtemperatur	40 °C	40 °C	40 °C
Abwassereintrittstemperatur	40 - X °C*	40 - X °C*	37 °C
Volumenstrom	5.5; 7; 9; 10; 12 und 14 L/min	5.8; 9.2; 12.5 L/min	8 L/min
Volumen	stationär	47–100 L je CW- Klasse)	60 L
Startbedingung	Steady State	kalter Start	A: kalt / B: warm
Berücksichtigte Verluste	–	thermische Masse WRG und Wasser	thermische Masse - + Verluste in der Duschkabine

WRG-Geräte, die gemäss Konfiguration B oder C eingebaut werden, deren Effizienz jedoch nur nach Konfiguration A ermittelt wurde, können nur einen geringeren Anteil der Wärme aus dem Abwasser zurückgewinnen. Dies liegt daran, dass bei Konfiguration B und C der Kaltwasser-Volumenstrom und damit C_{min} geringer ist als der Volumenstrom des Abflusses. Daher sollte für Einbau-Varianten B und C die Effizienz nach CAPE/RECADO-PQE bestimmt werden, oder aber ein geeignetes Umrechnungsverfahren bereitgestellt werden. Als Beispiel sind in Abbildung 10 Resultate des WRG-Gerätes von Joulia dargestellt. Bei diesem Gerät werden in Konfiguration B passive Turbulatoren auf der Kaltwasserseite eingesetzt, welche den Wirkungsgrad bei geringem Durchfluss erhöhen. Diese kommen bei hohen Durchflüssen auf Grund des dadurch induzierten Druckverlustes nicht zum Einsatz. Hier würde entsprechend eine WRG-Einheit die nach Konfiguration A verbaut wird anders ausgeliefert als bei Konfiguration B, und Messungen in Konfiguration A wären daher nicht auf Konfiguration B umrechenbar.

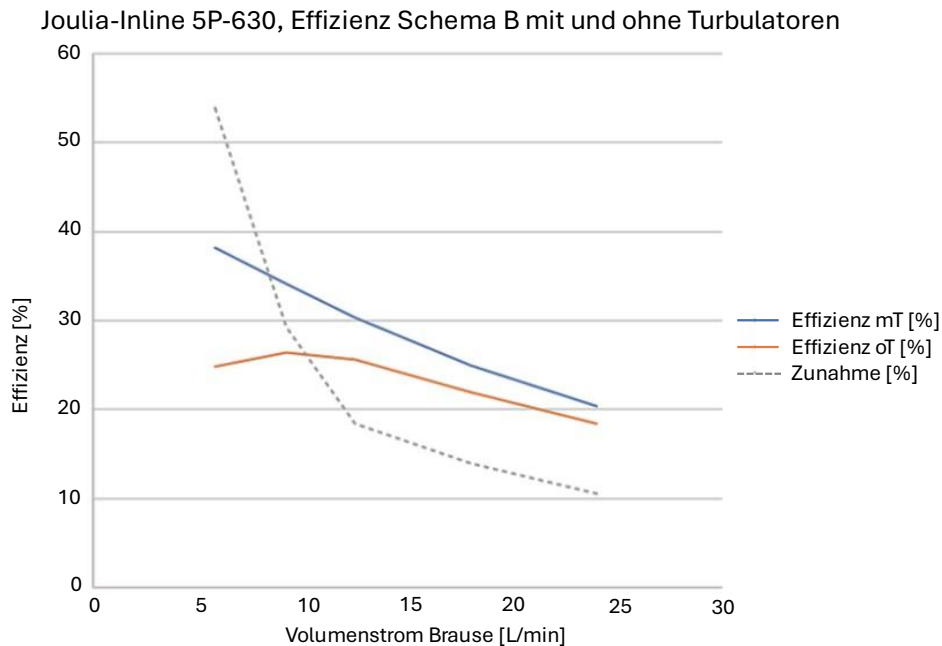


Abbildung 10: Effizienzverhalten ($\eta_{hr,B}$) des Produkts Joulia-Inline 5P. Die blaue Kurve zeigt das Gerät mit passiven Tabulatoren, welche zu einer deutlichen Effizienzsteigerung bei niedrigen Durchflüssen führt, im Vergleich zum baugleichen Gerät ohne Tabulatoren (orange Kurve). Der Massenstrom über den WÜ beträgt hier etwa 40% des Volumenstroms über die Brause. Quelle: Joulia SA.

3.4 Berechnungsgrundlagen und Normen, die WRG-Einheiten berücksichtigen

Das folgende Kapitel gibt einen Überblick über Berechnungsgrundlagen, welche im Gegensatz zu den Testnormen zur Effizienzbestimmung die tatsächliche Reduktion des Energiebedarfs für die Warmwasserversorgung durch Einsatz von Dusch-WRG abbilden – und somit die Grundlage für die Reduktion des Speichervolumens liefern können.

3.4.1 Britische Norm: Waste Water Heat Recovery Systems

Die Britische Norm: Waste Water Heat Recovery Systems (Instantaneous Shower): Method statement for recognition für die Standard Assessment Procedure (SAP), 2021 ist eine Berechnungsgrundlage und kleine Metastudie zum Warmwasserbrauch in Grossbritannien. Sie dient zur Berechnung des reduzierten Wärmebedarfs bei Verwendung von Duschwasser-Wärmerückgewinnungssystemen gemäss SAP-Standard (Standard Assessment Procedure for Energy Rating of Dwellings) [24].

Die Norm legt fest, wie aus Laborwerten die Effizienz von Wärmeübertragern und der tatsächliche Energiegewinn im Haushalt berechnet wird. Dabei werden sowohl das Duschverhalten (Häufigkeit, Dauer, Volumen und der Anteil Duschen/Baden) als auch der Nutzungsfaktor zur Berücksichtigung realer Verluste wie Aufheiz- und Restwasserverluste einbezogen. Wärmeverluste in den Leitungen werden dabei als vernachlässigbar eingestuft.

Um die eingesparte Wärme zu bestimmen, wird der Mittelwert aus einem Bottom-Up- und einem Top-Down-Ansatz gebildet.



Beim Bottom-up-Ansatz wird die Wärmerückgewinnung ausgehend vom einzelnen Duschvorgang berechnet und auf das gesamte Gebäude hochskaliert. Zunächst wird der tägliche Nutzwarmwasserbedarf durch Duschen bestimmt:

$$V_{sho,i} = V_{sho,mix} \cdot n_p \cdot n_{sho} \quad (18)$$

mit:

- $V_{sho,mix}$ Mischwasservolumen pro Dusche, L
- n_p Anzahl Personen, [-]
- n_{sho} Anzahl Duschen pro Person und Tag, [-]

Die zurückgewonnene Wärme $\Delta Q_{W,sho,PWC,BU}$ im Bottom-up-Ansatz berechnet sich wie folgt:

$$\Delta Q_{W,sho,PWC,BU} = \rho \cdot c_p \cdot \bar{\eta} \cdot (\theta_{hot,in} - \theta_{PWC}) \cdot V_{sho,i} \quad (19)$$

mit:

- ρ Dichte des Wassers, kg/L
- c_p spezifische Wärmekapazität Wasser, kWh/(kg·K)
- θ_{PWC} Trinkwasser-Eintrittstemperatur, °C
- $\theta_{hot,in}$ Abwasser-Eintrittstemperatur, °C
- $\bar{\eta}$ durchschnittliche Effizienz der Wärmerückgewinnung unter Berücksichtigung der Anzahl der Duschen mit und ohne WRG sowie der Badewannen (bei denen gemäss Definition keine WRG stattfindet), unter Berücksichtigung der oben erwähnten Wärmeverluste.

Der Top-Down-Ansatz startet mit dem gesamten Nutzenergiebedarf des Hauses, schliesst dabei auf den durch Duschen nötigen Anteil und berechnet für diesen Anteil die Einsparungen mit WRG.

Im SAP wird der Warmwasserbedarf pro Tag linear aus der Bewohnerzahl bestimmt:

$$V_{W,u} = A \cdot n_p + B \quad (20)$$

mit:

- $V_{W,u}$ täglicher Nutzwarmwasserbedarf der Wohnung, L/d
- A, B empirische Koeffizienten für Personenabhängigkeit, L/d (SAP 2012: A = 25 L/d, B = 36 L/d)

Die Reduktion des Wärmebedarfs des Top-Down-Ansatzes ($\Delta Q_{W,sho,PWC,TD}$) der Duschvorgänge ergibt sich dann wie folgt:

$$\Delta Q_{W,sho,PWC,TD} = V_{W,u} \cdot c_p \cdot \rho \cdot \bar{\eta} (\theta_{WW} - \theta_{PWC}) \frac{F_{ba}}{F_{hw}} \quad (21)$$

mit:

- F_{ba} Anteil Warmwasser (alle Verbraucher) der Badewannen + Duschen, [-] (Gemäss SAP 2005: 66 %)
- F_{hw} Anteil Warmwasser (alle Verbraucher) der Duschen, [-], (Gemäss SAP 2005: 62 %)

Gemäss dieser Methode besteht der beste Ansatz darin, den numerischen Durchschnitt des



Bottom-up- und Top-down-Ansatzes zu verwenden. Die Reduktion des Wärmebedarfs $\Delta Q_{W,sho,PWC}$ ist also:

$$\Delta Q_{W,sho,PWC} = \frac{\Delta Q_{W,sho,PWC,BU} + \Delta Q_{W,sho,PWC,TD}}{2} \quad (22)$$

Des Weiteren stellt die Norm eine Tabelle mit Kaltwassertemperaturen für jeden Monat des Jahres zur Verfügung und beschäftigt sich mit der Duschkdauer sowie Duschkvolumen. Dafür werden verschiedene Studien mit mehreren hundert Haushalten aus Grossbritannien herangezogen. In den frühen Versionen (SAP 2005 und 2009) wurde ein Standardwert von 75 Litern pro Duschkvorgang (Misch-Warmwasser) festgelegt. Dieser beruhte auf Studien mit mittleren Duschkzeiten von rund 6 bis 9 Minuten und Durchflussraten von etwa 8 bis 9 Litern pro Minute, was als konservative Schätzung galt. Ab SAP 2012 wurde dieser Wert angepasst. Bei einer angenommenen Durchflussrate von 11 Litern pro Minute und einer Duschkdauer von 6 Minuten ergibt sich ein Volumen von 66 Litern pro Duschkvorgang. Damit wurde das Modell praxisnäher, da Untersuchungen an britischen Haushalten zeigen, dass typische Duschkvolumina zwischen 60 und 80 Litern liegen.

Zudem geht die Norm darauf ein, wie die Energieeinsparungen zu rechnen sind, wenn die WRG-Einheit nicht nach Konfiguration A sondern nach B oder C verbaut ist. Bei diesen Konfigurationen ist der Kaltwasservolumenstrom durch den Wärmeübertrager kleiner als der Volumenstrom durch die Dusche, wodurch die WRG-Effizienzen geringer sind. Hier wird durch ein aufwändiges iteratives Verfahren der Wirkungsgrad berechnet, ausgehend von dem Wert für Konfiguration A. Eine Umrechnung birgt jedoch auch gewisse Risiken, da die Strömung auf der Sekundärseite auf Grund der geringeren Volumenströme bei B und C laminar sein kann, was die Effizienz gegenüber einer turbulenten Strömung zusätzlich verringert. Dieser Effekt kann bei einer Extrapolation nicht korrekt berücksichtigt werden.

Als Weiteres wird ein Verlustfaktor UF eingeführt, mit welchem die nach Beendigung des Duschkvorgangs im Wärmeübertrager und in den Rohren vorhandene Wärme berücksichtigt wird. Der Faktor ist wie folgt definiert: $UF = 1 - \text{Gesamtenergieverlust} / \text{pro Dusche übertragene Energie}$

Zur Berechnung für Konfiguration A wird dabei folgende Gleichung genutzt:

$$UF = 1 - \frac{2 \cdot 1000 l \pi r^2 c_p \rho \eta + 0.5 (c_p \rho V_{hr} + M_{hr} c_{hr})}{V c_p \rho \eta} \quad (23)$$

mit:

- l ist die Länge der Verbindungsrohre, m.
- r der Radius der Verbindungsrohre, m
- c_{hr} spezifische Wärmekapazität Wärmeübertrager, kJ/(kg·K)
- c_p spezifische Wärmekapazität Wasser, kJ/(kg·K)
- ρ Dichte von Wasser, 1L/kg
- V Duschkvolumen, L
- M_{hr} Masse des Wärmeübertragers, kg
- V_{hr} Volumen des Wassers innerhalb des Wärmeübertragers, L
- $2 \cdot 1000$ Umwandlung des Rohrvolumens in L, Länge Abwasserrohr = Länge Rohr mit vorgewärmtem Wasser



Eine Umrechnung für die Effizienz und den Verlustfaktor für Konfiguration B und C wird ebenfalls gegeben. Diese sind jedoch sehr umfangreich und bedingt das Wissen über die Wärmeleitung auf der Primär und Sekundärseite am Wärmetauscher und macht es daher für eine Berechnung für Auslegungen weniger praktikabel. Eine ähnliche Art der Umrechnung erfolgt in Kapitel 3.5.

3.4.2 Französische Norm: RT 2012

Die französische Berechnungsgrundlage RT 2012 Modalités de prise en compte des systèmes de récupération instantanée de chaleur sur eaux grises dans la réglementation thermique 2012 (NOR : TERL1918981A) beschäftigt sich ebenfalls mit der durch WRG-Geräte zurückgewonnenen Wärme, welche zur Berechnung des Primärenergieverbrauchs in die französische Norm RT 2012 einfließt [25]. Dabei wird ein Top-Down-Ansatz verwendet, bei dem der jährliche Nutzenergiebedarf und der Anteil des Warmwassers, der durch eine WRG-Einheit fließt, berücksichtigt werden. Des Weiteren werden hier verschiedene Verlustfaktoren hinzugerechnet. Die jährliche eingesparte Wärme $Q_{W,rec}$ wird wie folgt berechnet:

$$\Delta Q_{W,rec} = \frac{Q_W \cdot \eta_{hr, glob} \cdot P \cdot F_{aa} \cdot F_{am} \cdot F_{av} \cdot C_{\Delta t}}{\eta_{W, gen}} \quad (24)$$

mit:

$Q_{W,rec}$	jährlicher Wärmegewinn durch Wärmerückgewinnung, [kWh/a]
Q_W	jährlicher Wärmebedarf für Warmwasser, [kWh/a]
$\eta_{hr, glob}$	globale Effizienz des WRG-Systems (inkl. Anfahrfaktor)
P	Nutzungsfaktor, Anteil des Warmwassers, der tatsächlich über Duschen mit WRG-Einheit läuft, Wohngebäude: ca. 80 % des PWH-Bedarfs über Duschen, Hotel: bis 90 %, Sportanlage: nahe 100 %
F_{aa}	Faktor für Verluste an die Umgebung (Abkühlung des Wasserstrahls in der Luft)
F_{am}	Faktor für Verluste vor dem Wärmeübertrager (z. B. Leitungsabschnitte bis zum WT)
F_{av}	Faktor für Verluste nach dem Wärmeübertrager (bis zum Speicher oder Mischer)
$C_{\Delta t}$	Korrekturfaktor für zeitliche Verschiebungen (Abwasserstrom vs. Kaltwasserstrom)
$\eta_{W, gen}$	Gesamtwirkungsgrad der Warmwassererzeugung (inkl. Speicher- und Verteilverluste)

Die vier Verlustfaktoren werden dabei wie folgt berechnet:

Faktor für Verluste an die Umgebung F_{aa}

Dieser Faktor berücksichtigt Verluste durch Wärmeabgabe des Strahls an die Raumluft während der Dusche, wodurch das Wasser, welches am Ablauf ankommt, drei Kelvin kälter ist als die Duschttemperatur.

$$F_{aa} = 1 - \frac{3 \text{ K}}{\theta_{sho} - \theta_{PWC}} \quad (25)$$



Faktor für Verluste vor dem Wärmeübertrager F_{am}

Dieser Faktor berücksichtigt Wärmeverluste im Abwasserweg vom Duschauslauf bis zu der WRG-Einheit.

$$F_{am} = 1 - 0.16 \cdot \frac{L_{ve}}{100} - 0.3 \cdot \frac{L_{vnc}}{100} \quad (26)$$

mit:

L_{ve} mittlere Abwasser-Rohrlänge im beheizten Gebäudeteil, m

L_{vnc} mittlere Abwasser-Rohrlänge im unbeheizten Gebäudeteil, m

Faktor für Verluste nach dem Wärmeübertrager F_{av}

Dieser Faktor berücksichtigt Wärmeverluste zwischen WRG-Einheit bis zum Nutzungsort (Speicher/Duschkopf) aus dem Mittel zum nächstem/entferntestem Punkt.

$$F_{av} = 1 - 0.05 \cdot \frac{L}{100} \quad (27)$$

mit:

L mittlere Rohrlänge zwischen WRG-Einheit und Punkt der Nutzungsort, m

Faktor für die zeitliche Verschiebung $C_{\Delta t}$

Dieser Faktor ermöglicht es, die Energieverluste aufgrund der zeitlichen Verzögerungen zwischen der Entnahme von Brauchwasser und dem Durchfluss des Abwassers durch die WRG-Einheit zu berücksichtigen. Dazu spielt sowohl die gesamte Rohrlänge zwischen Ablauf und WRG-Einheit eine Rolle als auch die Anzahl Duschen mit WRG-Einheit.

$$C_{\Delta t} = 1 - \frac{L_{ve} + L_{vnc}}{215.55 \cdot N_{app,WRG}^{0.141}} \quad (28)$$

mit:

$N_{app,WRG}^{0.141}$ Anzahl der Duschen, die an denselben Wärmeübertrager angeschlossen sind

Kombinierter Wirkungsgrad $\eta_{hr, glob}$

Dieser Wirkungsgrad berücksichtigt ebenfalls Anfahrverluste (Aufheizphase) und wird für die Konfiguration A, B und C unterschieden.

$$\eta_{hr, glob} = \eta_{hr} \cdot C_{trans} \quad (29)$$

Die Werte η_{hr} und C_{trans} werden für insgesamt 31 verschiedene Geräte und drei verschiedene Hersteller in Abhängigkeit der Installationsart angegeben (27 vertikale Fallrohr-Wärmeübertrager und vier Duschrinnen-Wärmeübertrager). Alle Geräte wurden vor 2012 getestet und sind gemäss den durchgeführten Recherchen nicht mehr erhältlich. Werden die Werte nicht nach CAPE/RECADO-PQE, sondern nach einem anderen akkreditierten Verfahren gemessen, muss der Wirkungsgrad mit 0.9 multipliziert werden. Werden die Angaben vom Hersteller bereitgestellt, müssen diese mit 0.8 multipliziert werden.

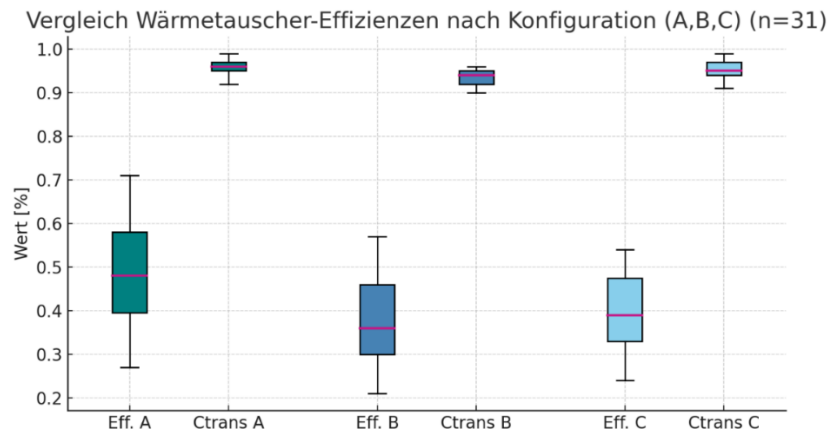


Abbildung 11: Boxplot stationäre Effizienzen und Übergangskoeffizienten (C_{trans}) von 31 Wärmerückgewinnungsgeräten für Duschen, geprüft gemäss CAPE/RECADO-PQE.

3.4.3 Schweizer SIA-Norm 385/2:2025

Die Norm SIA 385/2:2025, «Anlagen für Trinkwarmwasser in Gebäuden – Warmwasserbedarf, Gesamtanforderungen und Auslegung» behandelt Systeme zur Wärmerückgewinnung aus Duschabwässern (WRG) als Bestandteil der Trinkwarmwasseranlage im nicht normativen Anhang K [26]. Das Ziel besteht darin, einerseits den reduzierten Wärmebedarf der Warmwasserversorgung zu ermitteln und andererseits eine Korrektur der Auslegung des Speichersteuervolumens vorzunehmen. Eine Reduktion des Spitzendeckungsvolumens auf Grund der WRG ist in der Norm nicht vorgesehen. Bei der Berechnung der Wärmerückgewinnung orientiert sich die Schweizer Norm stark an den Überlegungen von Laurent Socal, 2023 [3]. Die Reduktion des Wärmebedarfs eines Duschvorgangs $\Delta Q_{W,sho,i}$ ergibt sich wie folgt:

$$\Delta Q_{W,sho,i} = \eta_{hr} \cdot Q_{W,u,sho,i} \quad (30)$$

mit:

- η_{hr} Energetischer Wirkungsgrad der Wärmerückgewinnung (in der Norm unpräzise und missverständlich als Wirkungsgrad des Wärmeübertragers bezeichnet) bei den gegebenen Temperaturen und Volumenströmen
- $Q_{W,u,sho,i}$ Nutzenergiebedarf eines Duschvorgangs ohne WRG, in kWh, dabei kann im Wohnungsbau mit folgenden Werten gerechnet werden: Einfacher und mittlerer Standard: $Q_{W,u,sho,i} = 1.45$ kWh pro Duschvorgang (25 nL), gehobener Standard: $Q_{W,u,sho,i} = 2.03$ kWh pro Duschvorgang (35 nL)
- i Index zur Nummerierung verschiedener Duschen im Gebäude, respektive im Warmwassersystem

Diese Werte $\Delta Q_{W,sho,i}$ werden über die Anzahl Duschen und Duschvorgänge pro Tag aufsummiert. Wenn alle Duschen mit der gleichen WRG ausgestattet sind, kann mit der Anzahl multipliziert werden. Der Wirkungsgrad η_{hr} wird in der Norm nicht weiter definiert und Wärmerückgewinnung aus Badewannen oder anderen Warmwasserbezügern wird nicht



berücksichtigt. Auch der Umgang mit Verlusten, welche bspw. in der britischen oder französischen Berechnungsvorgabe definiert sind, wird nicht erläutert.

Wie in Kapitel 3.1 ausführlich beschrieben, erfolgt eine Reduktion bei der Auslegung des Speicher-Volumens nur, wenn die WRG-Einheit nach Konfiguration A oder Konfiguration B eingebaut wird. In Konfiguration C muss das Bereitschaftsvolumen gleich gross dimensioniert werden wie ohne WRG. In Konfiguration B kann die gesamte Wärmemenge, die durch die WRG-Einheit zurückgewonnen wird, zur Speicherreduktion angerechnet werden, in Konfiguration A hingegen nur derjenige Teil, welcher der Energiemenge entspricht, die als vorgewärmtes Kaltwasser zur Armatur fließt. Um dies zu berücksichtigen, wird ein Volumenwirksamkeitsfaktor $f_{hr,PWC}$ eingeführt, welcher für Konfiguration B den Wert 1 hat. Für Konfiguration A wird daher der Anteil des im Wärmeübertrager vorgewärmten Kaltwassers bestimmt, der tatsächlich zur Mischbatterie fließt, und die zurückgewonnene Energie entsprechend mit diesem Faktor gewichtet. In Konfiguration A gilt: $\dot{V}_{WRG} = \dot{V}_{drain} = \dot{V}_{sho}$. Benetzungsverluste und Verdunstung werden nicht berücksichtigt. Der Faktor für den Kaltwasseranteil berechnet sich wie folgt:

$$f_{hr,PWC} = \frac{\theta_{PWH} - \theta_{sho}}{\theta_{PWH} - \theta_{PWC,hr}} \quad (31)$$

mit:

θ_{PWH} Temperatur des Warmwassers an der Zapfstelle, in °C

θ_{sho} Temperatur des Mischwassers an der Auslaufstelle der Mischbatterie, in °C

$\theta_{PWC,hr}$ Temperatur nach Erwärmung des Kaltwassers durch die WRG, in °C

Da bei Konfiguration A das gesamte Kaltwasser über die WRG geführt wird, entspricht der energiebezogene Wirkungsgrad $\eta_{hr,Q}$ dem temperaturbezogenen Wirkungsgrad $\eta_{hr,\theta}$. Die Austrittstemperatur des Kaltwassers $\theta_{PWC,hr}$ an der WRG-Einheit kann somit direkt aus dem energiebezogenen Wirkungsgrad berechnet werden.

$$\theta_{PWC,hr} = \theta_{PWC} + \eta_{hr,Q} \cdot (\theta_{sho} - \theta_{PWC}) \quad (32)$$

Für Konfiguration A und B kann dann die für eine mögliche Reduktion des Speicher-Steuervolumens zu berücksichtigende Reduktion der Wärmeentnahme $\Delta Q_{W,sho,PWC}$ aus dem Speicher wie folgt berechnet werden.

$$\Delta Q_{W,sho,PWC} = f_{hr,PWC} \cdot \Delta Q_{W,sho} \quad (33)$$

Für die Berechnung des reduzierten Bereitschaftsvolumens des Speichers $Q_{W,gen,out,sto,hr}$ wird die berechnete Reduktion des Wärmebedarfs $\Delta Q_{W,sho,PWC}$ vom Wärmebedarf der Warmwasserversorgung $Q_{W,gen,out}$ abgezogen.

$$Q_{W,gen,out,sto,hr} = Q_{W,gen,out} - \Delta Q_{W,sho,PWC} \quad (34)$$

Das Spitzendeckungsvolumen wird jedoch nicht reduziert, obwohl dieses theoretisch auch von $Q_{W,gen,out}$ abzüglich Ausstosswärmeverluste, Speicherwärmeverluste und Verluste der warmgehaltenen Leitungen abhängt.

Wichtig ist es zu beachten, dass die mögliche Reduktion des Speicher-Steuervolumens auch von der Anzahl Ladungen abhängt. Wird ein Speicher zweimal am Tag geladen, und die



Anzahl Duschvorgänge ist gleichmässig auf beide Zwischenperioden verteilt, halbiert sich der zu reduzierende Anteil entsprechend.

3.4.4 Zusammenfassung Berechnungsverfahren

Die vorgestellten Berechnungsverfahren zeigen unterschiedliche Vorgehen, wie die Effizienz einer WRG-Einheit und die von ihr zurückgewonnene Wärmeenergie berechnet werden kann. Bei allen einheitlich ist eine Duschtemperatur von 40 °C. Die Kaltwassertemperatur, die Temperatur, welche im WRG-Eingang ankommt, Dushdauer und Volumenstrom sind, wie in Tabelle 7 zusammengefasst, in allen Verfahren unterschiedlich.

Tabelle 7: Parameterübersicht der Berechnungsverfahren.

Regelwerk	Mischtemp. Dusche	Kaltwassertemp.	WRG-Eintrittstemp.	Duschhäufigkeit	Nutzwarmwasserbedarf	Duschvolumen pro Tag
SIA 385/2 2025	40 °C	oft 10 °C als Planwert	40 °C	0.8 pro Person und Tag*	35 nL oder 2.03 kWh*	20 nL (57% des gesamten Warmwasser-Bedarfs)*
UK – SAP 2012	40 °C	monatlich variabel	34 °C (6 °C unter Duschtemp.)	0.73 pro Person und Tag	25 L/Person + 36 L (pro Wohnung)	48 L (60% des gesamten Warmwasser - Bedarfs)
FR – RT 2012 Anhang	40 °C	Klimazonen-abhängig	37 °C	nicht festgelegt	nicht festgelegt	80% des gesamten Warmwasser - Bedarfs

* Annahme: Mehrfamilienhaus, allgemeiner Wohnungsbau.

Alle Verfahren gehen darauf ein, dass Wärmeübertrager für Duschabwasser nach den drei Konfigurationen A, B und C eingebaut werden können. Da die Effizienz gemäss B55.1-15 und NTA8800 nur für Konfiguration A gemessen wird, gibt die britische Norm ein Umrechnungsverfahren, welches jedoch aufwändig ist. Die französische Norm nennt für alle drei Einbauarten bereits verschiedene Effizienzen für einige Geräte welche auf Messungen gemäss CAPE/RECADO-PQE wie im Kapitel 3.3.3 abstützen.

Mit Ausnahme der SIA-Norm erwähnen alle Berechnungsverfahren unterschiedliche Wärmeverluste, welche je nach Anwendungsfall mitberücksichtigt werden müssen. Diese sind:

- Wärmeverluste zwischen Duschwannen-Ablauf und WRG-Einheit (RT 2012): Die französische Norm liefert eine Formel zur Berechnung des Wärmeverlusts anhand der Leitungslänge und unterscheidet dabei, ob das Rohr durch einen beheizten oder einen unbeheizten Raum führt. Dieser Verlustfaktor hängt stark von der Einbau-Konfiguration ab. Sind die WRG-Geräte in der Duschrinne integriert, kann dieser Verlust vernachlässigt werden. Die britische Norm hält den Verlust zwischen Duschwanne und WRG mit



12.4 W/m für ein unisoliertes Rohr mit 40 mm Durchmesser für vernachlässigbar, geht aber von einer mittleren Leitungslänge von nur 3 m aus. Sind Ablauf und WRG-System durch mehrere Stockwerke getrennt und das Abflussrohr nicht isoliert (z.B. MFH mit zentraler WRG im Heizungsraum), so kann dieser Verlust jedoch relevant werden. Bei dem Wärmeverlust eines Abwasserrohrs von 12.4 W/m ergäbe sich bei einer Rohrlänge von 30 m und einer Duschkdauer von 10 min ein Verlust von 0.06 kWh oder 4.1 % pro Duschkvorgang (vgl. SIA 385/2:2025, S. 34: Nutzenergie Dusche, Kategorie Wohnen: 1.45 kWh).

- Wärmeverluste zwischen WRG und Mischbatterie/Speicher (RT 2012): Hier gilt Gleiches wie für die Wärmeverluste zwischen Ablauf und WRG-Einheit.
- Wärmeverluste nach dem Duschen durch Abkühlen des Wärmeübertragers und des in den Rohren und im WÜ verbleibenden Warmwassers (SAP): Gemäss Gleichung 23 kann der Verlust für ein WRG-Gerät beispielhaft mit folgenden Annahmen berechnet werden:
 - Volumen: 1 L, Masse: 10 kg, Material: Kupfer
 - spezifische Wärmekapazität: 0.385 kJ/(kg*K).
 - Gerät direkt am Duschauslauf angeschlossen.
 - Temperaturunterschied zur Raumtemperatur: 17 K (37 °C – 20 °C)
 - Rohrvolumen WÜ zur Mischbatterie: 0.2 L.
 - Wassertemperatur zwischen dem WÜ und Mischbatterie/Speicher: 25 °C (angenommen $n_{hr} = 0.5$), Differenz zur Raumtemperatur: 5 K
- Mit diesen Annahmen beträgt der Wärmeverlust durch Auskühlung etwa 0.019 kWh für den gefüllten Wärmeübertrager und 0.001 kWh für die Rohrleitung. Zusammen ergibt sich ein Verlust von 0.020 kWh oder 1.4 % pro Duschkvorgang (vgl. SIA 385/2:2025, S. 34: Nutzenergie Dusche, Kategorie Wohnen: 1.45 kWh).
- Ist die Entfernung zwischen WRG-Gerät und Dusche gross (Bspw. MFH mit vielen Stockwerken, WRG im Keller) und das Rohrvolumen liegt bei 3.0 L (Länge= 27 m, Innenradius = 6 mm) so beträgt der Wärmeverlust durch Auskühlung 0.02 kWh oder etwa 1.4 % pro Dusche.
- Die Abkühlverluste des WRG-Gerätes sind äquivalent zu den Verlusten beim Starten eines Duschkvorgangs, um das WRG-Gerät aufzuheizen, Daher muss nur einer der beiden Verluste berücksichtigt werden. Ist die Effizienz gemäss NTA8800 oder CAPR/RECARDO-PQE bestimmt worden, ist dieser Verlust bereits in der Effizienz-Messung enthalten.
- Wärmeverluste an die Umgebung (Duschkabine / Badezimmer): gemäss französischer Berechnungsmethode RT 2012 kühlt das Wasser von 40 °C auf 37 °C ab, bevor das Duschauswasser am WRG-Gerät ankommt. Gemäss britischer Norm SAP kühlt es von 40 °C auf 34 °C ab. Der Produzent von Wärmerückgewinnungssystemen für Duschen Joulia nimmt einen Verlust zwischen 2 K und 4 K an [27]. Gemäss RT 2012 wird der Wärmeverlust an die Umgebung mittels eines Faktors von der zurückgewinnbaren Wärme abgezogen (Gleichung 17). Nimmt man eine Duschktemperatur von 40 °C, eine Abkühlung um 3 K und eine Kaltwassertemperatur von 10 °C an, erhält man als Faktor 0.9. Hierbei ist anzumerken, dass der Wärmeverlust in Realität dynamisch ist. Das heisst, dass er am Anfang hoch ist und gegen Ende, wenn die Umgebung aufgeheizt ist, kleiner wird. Einen grossen Einfluss auf die Abkühlung des fallenden Duschkwassers hat auch die Art der



Duschkabine (offen/geschlossen). Restwasser, welches in der Duschkabine zurückbleibt oder verdunstet, hat nur einen geringen Einfluss. Nimmt man an, es verbleibt ein halber Liter in der Dusche, entspricht das einem Verlust von 0.018 kWh. Dies entspricht etwa 1.2 % eines gemäss SIA definierten Duschvorgangs.

- Effizienzverluste durch Verschmutzung wie Biofouling, Seifenreste oder Korrosion: Diese werden in keinem Verfahren erwähnt, betragen jedoch gemäss Hersteller Joulia rund 5 % [27]. Ob diese für alle Wärmeübertrager-Systeme gleich anzunehmen sind, konnte nicht geklärt werden.

Abbildung 12 veranschaulicht den Wärmestrom für einen Wärmeübertrager mit einem stationären Wirkungsgrad von 45 %. Durch die Berücksichtigung aller oben erwähnten Verluste werden hier trotz 45 % Wirkungsgrad der eigentlichen WRG-Einheit nur 34 % der aus dem Duschkopf strömenden Nutzenergie zurückgewonnen. Dies trotz der Annahme von kurzen Rohrleitungen und entsprechend praktisch vernachlässigbaren Verlusten derselben. Die Zahlenwerte sollen hierbei vor allem zur Veranschaulichung der Verhältnisse dienen, um zu bewerten, welche Parameter einen nennenswerten Einfluss auf die zurückgewinnbare Wärme haben.

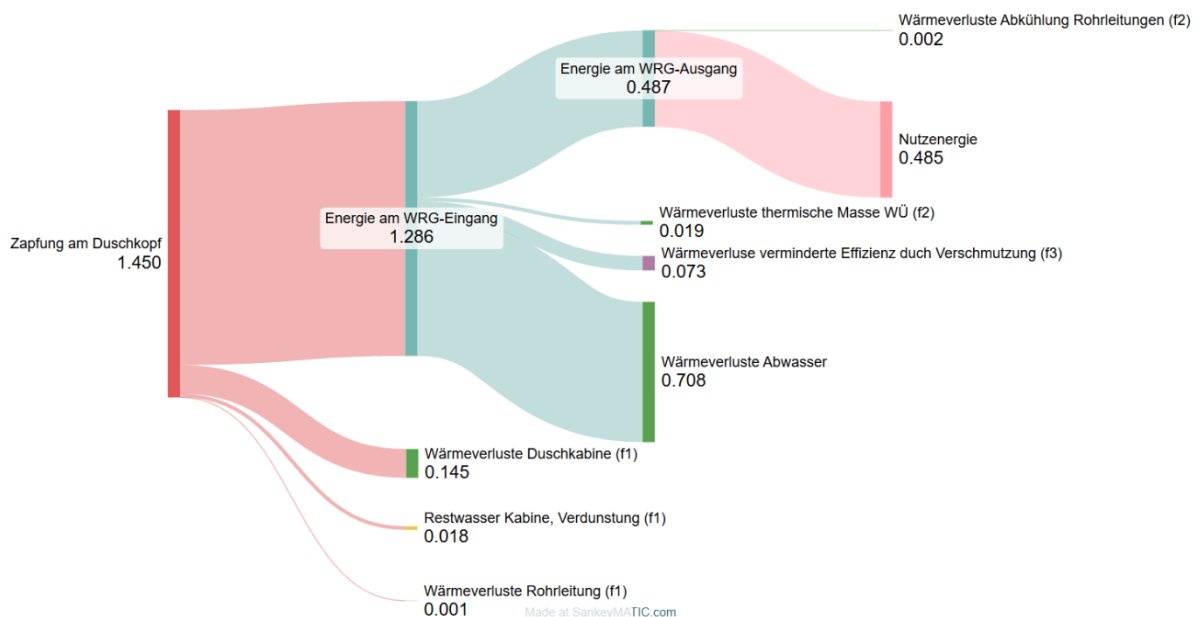


Abbildung 12: Beispiel für einen Wärmestrom eines Duschvorgangs mit Wärmerückgewinnung. (Werte in kWh). Annahme: $\eta_{hr} = 0.45$, Duschrinnen-WÜ, Konfiguration B (kurze Rohrlängen).

3.5 Rechenbeispiel

Anhand der zusammengetragenen Normen und Berechnungsverfahren werden hier die wichtigsten Punkte zusammengefasst und verschiedene Szenarien berechnet, welche als relevant erscheinen. Dabei wird stark an die Vorgabe der SIA385/2:2025 angelehnt, diese Berechnungen aber verfeinert und präzisiert.



3.5.1 Parameter(-vorschläge) und Faktoren für die WRG-Berechnung

- Kaltwassertemperatur θ_{PWC} : 10 °C.

Die untersuchten Normen anderer Länder arbeiten hier unterschiedlich, teils mit Saisonalität, teils mit Klimazonen. Da in der SIA mit 10 °C gerechnet wird, wird dieser Wert übernommen.

- Duschtemperatur θ_{sho} : 40 °C.

Da alle Normen mit 40 °C annehmen, bleibt dieser Wert. Es gibt jedoch Studien, welche von leicht tieferen Temperaturen ausgehen, z.B.: 38.5 °C. [28]

- Temperatur Abwasser am WRG-Eingang, $\theta_{hot,in}$: 37 °C oder weniger. Hier kommt es vor allem darauf an, ob es sich um eine geschlossene Duschkabine, oder um eine offene Duschkabine handelt. Bei einer offenen Kabine könnte die Temperatur noch weiter reduziert werden. Hierzu lassen sich keine Literaturwerte finden. Ein weiterer Einfluss ist, wie lang die dazugehörige Leitung zwischen Siphon und WRG-Eingang ist und ob diese wärmegeämmt ist. In diesem Dokument wird der Wert der französischen Norm RT 2012 übernommen. Im Vergleich dazu wird in der englischen SAP eine Eintrittstemperatur von 34 °C angenommen. Ein Verlust von 6 K erscheint aber sehr hoch. Der Hersteller Joulia rechnet mit einem Verlust von 2 K bei geschlossenen Duschkabinen und 4 K für offene Kabinen [27], ein Mittelwert mit einem Verlust von 3 K scheint realistisch.

Es gilt zu beachten: standardisierte Testergebnisse von WRG-Einheiten müssen jeweils die Volumenströme und Temperaturen ausweisen, bei welchen gemessen wurde. Die energetische Effizienz der Wärmerückgewinnung η_{hr} sagt aus, welcher Anteil der Warmwasser-Leistung (an der Entnahmestelle) aus der WRG bezogen wird. Dieser Wert kann nur dann direkt aus den Testergebnissen übernommen werden, wenn die Volumenströme und Temperaturen der WRG mit den im Einsatz zu erwartenden Werten übereinstimmen. B55.1-15 und NAT8800 messen die Effizienz bei einer Eintrittstemperatur in die WRG, welche der Duschatwassertemperatur von 40 °C entspricht, und vernachlässigen somit Wärmeverluste von der Brause bis zur WRG. Die Wärmeverluste innerhalb der Duschkabine sollten aber aus Sicht des Autorenteam's berücksichtigt werden, mit einer angenommenen Abkühlung des Duschwassers von 40 °C auf 37 °C.

- Durchschnittliche Nutzenergie pro Dusche und Person, $Q_{W,u,i,avg}$: 1.45 kWh/d.

Da die Werte für den Energieinhalt eines Duschvorgangs in den verschiedenen Studien alle nahe am Wert der SIA lagen, wird dieser verwendet.

- Reduktionsfaktoren für die Effizienzberechnung der WRG

Anhand der zusammengetragenen Literatur wird ersichtlich, dass für das Erzielen eines möglichst genauen Ergebnisses bei der Berechnung der Effizienz eines WRG-Systems viele Verlustkorrekturen zu berücksichtigen sind. Die Berechnungen können dabei sehr aufwändig sein, aber nie das exakte Ergebnis abbilden, da dieses vom Nutzerverhalten abhängig ist. Um später eine einfache Handhabung der Berechnungen zu gewährleisten, werden drei Verlustfaktoren vorgeschlagen. Diese sollen eine Diskussionsgrundlage für spätere Berechnungsgrundlagen dienen.



- **Faktor f_1 für die Wärmeverluste des Abwassers vor dem Eintritt in das WRG-Gerät: 0.75 bis 0.89**

Hierbei werden folgende Verlustfaktoren berücksichtigt. Erstens: Der Temperaturverlust von 3 K in der Duschkabine. Dieser entspricht bei einer Dusche, welche bei einem Delta-T von 30 K zwischen Warm- und Kaltwasser betrieben wird, 10 %. Bei einer offenen Duschkabine muss von einem höheren Temperaturverlust ausgegangen werden, bspw. 6 K [29], was bei gleichen Beispiel 20 % entspricht. Zweitens: Je nach Länge der Rohrleitung zwischen Ablauf und WRG-Gerät unterschiedlich grosse Wärmeverluste dieser Rohrleitungen. Bei einer WRG in der Duschrinne kann dieser vernachlässigt werden, bei einem zentralen WRG-Gerät in einem sehr grossen MFH mit langen Abwasserleitungen kommt ein zusätzlicher Verlust bis zu 3% hinzu. Restwasser und Verdunstung werden mit 1% berücksichtigt, können bei offenen Duschkabinen aber auch etwas höher liegen.
- **Faktor f_2 für Aufwärm- und Auskühlverluste: 0.94 bis 0.98**

Hier sind die Verluste für das Aufwärmen der WRG-Einheit sowie die Wärmeverluste am Ende berücksichtigt, wenn das aufgewärmte Wasser in den Rohrleitungen abkühlt. Sind die Rohrleitungen sehr lang und wurde der Wirkungsgrad gemäss B55.1-15 (Aufwärmverluste nicht berücksichtigt) bestimmt, wird der Wert 0.94 eingesetzt. Bei kurzen Rohrleitungen und einer Bestimmung des Wirkungsgrads nach NTA8800 oder CAPE/RECADO-PQE (Aufwärmverluste bereits berücksichtigt) kann mit 0.97 gerechnet werden. Die Firma Joulia SA rechnet in ihrem Berechnungstool mit 0.96. Dieser Wert hängt von der von der Duschkdauer ab [27].
- **Faktor f_3 für verminderte Effizienz durch Verschmutzung: 0.95**

Dieser Faktor stammt von der Firma Joulia und wird mit Seifenresten, Korrosion etc. an der WRG-Einheit begründet. Die Effizienz kann durch falsche Reinigungsmittel (z. B. säure- oder chlorhaltige Mittel) dauerhaft reduziert werden [27]. In einer weiteren Studie lag die Reduktion durch Fouling bei 8 % [29], hier war der Wärmetauscher jedoch schwer zugänglich installiert und konnte nicht gereinigt werden. Der Hersteller Ecodrain konnte keinen Effizienzverlust nach zwei Jahren Betrieb eines ihrer vertikalen Fallrohr-WÜ feststellen [30].

3.5.2 Berechnung Wärmerückgewinnung nach Konfiguration A, B und C

Mithilfe der zuvor definierten Faktoren werden nun für eine WRG-Einbindung gemäss Konfiguration A und B der reduzierte Wärmebedarf und die Reduktion des Steuervolumens berechnet.

Effizienz WRG-Einheit gem. Hersteller nach A: $\varepsilon_{hx,ms} = 0.4$, resp. 40 %, $V = 10$ L/min

Die Effizienz der WRG gemäss Einbau-Varianten B und C ist unbekannt und muss daher erst berechnet werden. Weitere Faktoren sind Tabelle 8 zu entnehmen.

Als Beispiel werden im Folgenden die Berechnung für Konfiguration A, B und C gemacht. Der hier dargestellte Rechenweg bezieht sich, wie die Wegleitung im Annex A, auf ein Fünf-Parteien Mehrfamilienhaus mit je drei Bewohnern.



Gleichung (30) enthält den effektiven WRG-Wirkungsgrad η_{hr} , der in der SIA-Norm verwendet, jedoch dort nicht weiter erläutert wird. Dieser Faktor kann unter Berücksichtigung des Wirkungsgrades des Wärmeübertragers im Stationärzustand (eventuelle Korrektur für $C_r < 1$ bereits erfolgt oder bereits unter diesen Bedingungen gemessen) unter Einbezug der Verlustfaktoren f_1 , f_2 und f_3 wie folgt berechnet werden:

$$\eta_{hr} = f_1 \cdot f_2 \cdot f_3 \cdot \eta_{hr,sts} \quad (35)$$

wobei:

$\eta_{hr,sts}$ Energetischer Wirkungsgrad der WRG im Gleichgewichtszustand (steady state), bezogen auf die Dusch-Wärmeleistung unter Berücksichtigung der Einbau-Konfiguration, in %

Tabelle 8: Parameter zur Berechnung der Wärmerückgewinnung.

Parameter	Wert	Einheit
Energiebedarf Dusche $Q_{W,u,i,avg}$	1.45	kWh
Duschvolumenstrom	10	L/min
Duschhäufigkeit	0.8	1/d
Temperatur am WÜ-Eingang θ_{Drain}	37	°C
Temperatur des Warmwassers am Einlauf der Mischbatterie θ_{PWH}	55	°C
Temperatur des Mischwassers an der Auslaufstelle der Mischbatterie θ_{sho}	40	°C
Temperatur Kaltwasser θ_{PWC}	10	°C
Faktor Duscharwasserwärmeverluste f_1	0.89	-
Faktor Aufwärmverlust und Restwasserverlust f_2	0.98	-
Faktor Verschmutzung des Wärmeübertragers f_3	0.95	-

3.5.2.1 Konfiguration A

Hier ist auf beiden Seiten des Wärmeübertragers der gleiche Volumenstrom, daher ist $\eta_{hr,sts}$ gleich dem messtechnisch ermittelten Wirkungsgrad des Wärmeübertragers:

$$\eta_{hr,sts,A} = \varepsilon_{hx,ms} \quad (36)$$

wobei:

$\varepsilon_{hx,ms}$ Effizienz des Wärmetauschers im steady state, in %

Nun kann mit Gleichung 35, und den Verlustwerten aus Tabelle 8 der wirksame WRG-Wirkungsgrad η_{hr} berechnet werden

$$\eta_{hr,A} = 0.89 \cdot 0.98 \cdot 0.95 \cdot 0.40 = 0.329 \quad (37)$$

Die Reduktion des Wärmebedarfs eines Duschvorgangs wird gemäss (30) bestimmt:

$$\Delta Q_{W,sho,i,A} = 0.329 \cdot 1.45 \text{ kWh} = 0.48 \text{ kWh} \quad (38)$$



Für das hier berechnete Mehrfamilienhaus mit fünf Wohnungen a 3 Personen beträgt die Reduktion:

$$\Delta Q_{W,sho} = 5 \cdot 3 \cdot 0.80 \frac{1}{d} \cdot 0.48 \text{ kWh} = 5.76 \frac{\text{kWh}}{d} \quad (39)$$

Um die Reduktion des Steuervolumens berechnen zu können muss bei Konfiguration A nun die Temperatur des vorgewärmten Kaltwassers nach dem WRG-Gerät berechnet werden. Dabei werden im Gegensatz zu Gleichung (32) aus der SIA-Norm nicht 40 °C als Eintrittstemperatur $\theta_{hot,in}$ auf Primärseite gerechnet, sondern 37 °C oder, bei sehr langen Rohrleitungen, eine noch tiefere Temperatur, um den Temperaturverlust in der Duschkabine und den Rohrleitungen zu berücksichtigen. In Gleichung (32) wird dementsprechend θ_{sho} durch $\theta_{hot,in}$ ersetzt:

$$\theta_{PWC,hr} = \theta_{PWC} + \eta_{hr,sts} \cdot (\theta_{hot,in} - \theta_{PWC}) \quad (40)$$

$$\theta_{PWC,hr,A} = 10 \text{ °C} + 0.4 \cdot (37 \text{ °C} - 10 \text{ °C}) = 20.8 \text{ °C} \quad (41)$$

Nun kann mit Gleichung (31) die Volumenwirksamkeit berechnet werden, anhand welcher die Reduktion des Steuervolumens bestimmt wird. Hierbei muss im Fall Konfiguration A, der Kaltwasseranteil zur Mischbatterie $f_{hr,PWC}$ bestimmt werden.

$$f_{hr,PWC,A} = \frac{\theta_{PWH} - \theta_{sho}}{\theta_{PWH} - \theta_{PWC,hr}} = \frac{55.0 \text{ °C} - 40.0 \text{ °C}}{55.0 \text{ °C} - 20.8 \text{ °C}} = 0.44 \quad (42)$$

Mit diesem Faktor kann nun die Reduktion des Steuervolumens gemäss Gleichung 35 berechnet werden.

$$\Delta Q_{W,sho,PWC,A} = 0.44 \cdot 5.76 \frac{\text{kWh}}{d} = 2.53 \frac{\text{kWh}}{d} \quad (43)$$

3.5.2.2 Konfiguration B

Bei Konfiguration B wird das im Wärmeübertrager vorgewärmte Kaltwasser – wie in Kapitel 3 beschrieben – ausschliesslich auf die Kaltwasserseite der Mischarmatur geführt. Dadurch entspricht der Kaltwasserstrom durch den Wärmeübertrager nicht dem gesamten Duschkapazitätstrom, sondern nur dem Kaltwasseranteil, der zur Einstellung der Duschttemperatur θ_{sho} benötigt wird.

Wie in Kapitel 3.2 beschrieben, muss als erstes der Wirkungsgrad, welcher bei gleichen Kapazitätsflussraten bestimmt wurde, iterativ auf die unterschiedlichen Kapazitätsflüsse angepasst werden.

Als Ausgangspunkt werden dazu zunächst die Number of Transfer Units (NTU) aus den Messwerten der Konfiguration A bestimmt:

$$NTU_0 = \frac{\varepsilon_{hx}}{1 - \varepsilon_{hx}} = \frac{0.4}{0.6} = 0.667 \quad (44)$$

Als nächstes wird daraus die vorgewärmte Kaltwassertemperatur und in der Folge das Verhältnis der Kapazitätsflüsse am Wärmetauscher bestimmt.

Damit ergibt sich mit dem Startwert $\varepsilon_{hx,ms} = 0.4$ zum Iterationsschritt 0 das Verhältnis:

$$C_{r,B,0} = \frac{\theta_{PWH} - \theta_{sho}}{\theta_{PWH} - \theta_{PWC} - \varepsilon_{hx,ms} \cdot (\theta_{hot,in} - \theta_{PWC})} = \frac{15 \text{ K}}{45 \text{ K} - 0.4 \cdot 27 \text{ K}} = 0.439 \quad (45)$$



Anschliessend wird ein neuer Wert NTU für den Iterationsschritt n wie folgt berechnet:

$$NTU_{B,n} = \frac{NTU_{n-1}}{C_{r,B,n-1}} \quad (46)$$

Dabei wird die Annahme getroffen, dass der Wärmeübertragungskoeffizient UA konstant ist und sich lediglich der Durchfluss auf der Primärseite des Wärmetauschers ändert. Anschliessend kann ein neuer Wirkungsgrad in Abhängigkeit des Kapazitätsflussverhältnisses zum Iterationsschritt n berechnet werden $\varepsilon_{c,n}$ (Gegenstrom-Wärmeübertrager).

$$\varepsilon_{c,B,n} = \frac{1 - e^{-NTU_{B,n}(1-C_{r,B,n-1})}}{1 - C_{r,B,n-1} \cdot e^{-NTU_{B,n}(1-C_{r,B,n-1})}} \quad (47)$$

Der hier berechnete Wirkungsgrad kann jetzt wieder in Formel 45 eingesetzt werden. Die Iterationsschleife wird so lange durchgeführt, bis der kapazitätsflussabhängige Wirkungsgrad konstant ist. In diesem Beispiel ist der Wirkungsgrad nach sechs Iterationsschleifen bei $\varepsilon_{c,B,6} = 0.628$.

Als nächstes kann die Temperatur des vorgewärmten Kaltwassers nach dem WRG-Gerät berechnet werden:

$$\theta_{PWC,hr,B} = 10 \text{ °C} + 0.628 \cdot (37 \text{ °C} - 10 \text{ °C}) = 27.0 \text{ °C} \quad (48)$$

Der Kaltwasservolumenstrom ergibt sich dann wie folgt:

$$\dot{m}_{PWC,hr,B} = \dot{m}_{sho} \frac{\theta_{PWH} - \theta_{sho}}{\theta_{PWH} - \theta_{PWC,hr,B}} = 10 \text{ L/min} \cdot \frac{55 \text{ °C} - 40 \text{ °C}}{55 \text{ °C} - 27 \text{ °C}} = 5.35 \text{ L/min} \quad (49)$$

Mit diesem Volumenstrom kann der Wirkungsgrad der Wärmeübertragung $\eta_{hr,sts,B}$ wie folgt bestimmt werden:

$$\eta_{hr,sts,B} = \frac{\dot{Q}_{rec}}{\dot{Q}_{sho}} = \frac{\dot{m}_{PWC,hr,B} \cdot c_p \cdot (\theta_{PWC,hr,B} - \theta_{PWC})}{\dot{m}_{sho} \cdot c_p \cdot (\theta_{sho} - \theta_{PWC})} = \frac{5.35 \text{ L/min} \cdot 17 \text{ K}}{10 \text{ L/min} \cdot 30 \text{ K}} = 0.300 \quad (50)$$

Nun könnten mit Gleichung 35, und den Verlustwerten aus Tabelle 8 der wirksame WRG-Wirkungsgrad $\eta_{hr,b}$ berechnet werden.

$$\eta_{hr,B} = 0.89 \cdot 0.98 \cdot 0.95 \cdot 0.300 = 0.248 \quad (51)$$

Die Reduktion des Wärmebedarfs eines Duschvorgangs wird gemäss (30) bestimmt:

$$\Delta Q_{W,sho,i,B} = 0.248 \cdot 1.45 \text{ kWh} = 0.36 \text{ kWh} \quad (52)$$

Für das hier berechnete Mehrfamilienhaus mit fünf Wohnungen a drei Personen beträgt die Reduktion:

$$\Delta Q_{W,sho,B} = 5 \cdot 3 \cdot 0.80 \frac{1}{d} \cdot 0.36 \text{ kWh} = 4.32 \frac{\text{kWh}}{d} \quad (53)$$

Da sämtliche zurückgewonnene Energie bei Konfiguration B zur Duschbrause geht, gilt für die Reduktion des Speicher-Steuervolumens: $\Delta Q_{W,sho,PWC,B} = \Delta Q_{W,sho,B}$.

3.5.2.3 Konfiguration C

Auch bei Konfiguration C müssen die Kapazitätsflussraten am Wärmeübertrager berechnet werden. Da jedoch Kaltwassertemperatur und Volumenstrom am Mischer unabhängig von der WRG sind, muss hier nicht iteriert werden. NTU_0 ist gleich wie bei Konfiguration B (0.667). Der für Konfiguration C kapazitätsflussabhängige NTU-Wert NTU_C ergibt sich folgendermassen:



$$NTU_C = \frac{NTU_0}{C_{r,C}} \quad (54)$$

Wobei $C_{r,C}$ das Kapazitätsflussverhältnis ist, welches auf Grund der Temperaturen auf beiden Seiten des WÜ berechnet wird:

$$C_{r,C} = \frac{\theta_{sho} - \theta_{PWC}}{\theta_{PWH} - \theta_{PWC}} = \frac{30^\circ\text{C}}{45^\circ\text{C}} = 0.667 \quad (55)$$

Der kapazitätsflussabhängige NTU-Wert beträgt also 1. Der Wirkungsgrad in Abhängigkeit der Kapazitätsflussrate für Konfiguration C ergibt sich auf Grund der Gleichung für Gegenstrom-WÜ:

$$\varepsilon_{C,C} = \frac{1 - e^{-NTU_C \cdot (1 - C_{r,C})}}{1 - C_{r,C} \cdot e^{-NTU_C \cdot (1 - C_{r,C})}} = 0.543 \quad (56)$$

Die Temperatur des durch den Wärmeübertrager erwärmten Kaltwassers $\theta_{PWC,hr,C}$ wird analog Konfiguration B mit Gleichung 38 berechnet und beträgt 24.7°C . Der Volumenstrom des erwärmten Kaltwassers $\dot{m}_{PWC,hr,C}$ beträgt 6.67 L/min . Der Wirkungsgrad der Wärmeübertragung wird gemäss Gleichung 50 berechnet und beträgt 32.7% .

Nun könnten mit Gleichung (35), und den Verlustwerten aus Tabelle 8 der wirksame WRG-Wirkungsgrad $\eta_{hr,C}$ berechnet werden.

$$\eta_{hr,C} = 0.89 \cdot 0.98 \cdot 0.95 \cdot 0.327 = 0.271$$

Die Reduktion des Wärmebedarfs eines Duschvorgangs wird gemäss (30) bestimmt:

$$\Delta Q_{W,sho,i,C} = 0.271 \cdot 1.45\text{ kWh} = 0.39\text{ kWh} \quad (57)$$

Für das hier berechnete Mehrfamilienhaus mit fünf Wohnungen mit je drei Personen beträgt die Reduktion des Wärmebedarfs total:

$$\Delta Q_{W,sho,C} = 5 \cdot 3 \cdot 0.80 \frac{1}{\text{d}} \cdot 0.39\text{ kWh} = 4.71 \frac{\text{kWh}}{\text{d}} \quad (58)$$

Da sämtliche zurückgewonnene Energie bei Konfiguration C in den Speicher geht, gilt für die Reduktion des Speicher-Steuervolumens: $\Delta Q_{W,sho,PWC,C} = 0$.

In Tabelle 9 sind die drei Einbauvarianten A, B und C und deren Ergebnisse auf Grund der beispielhaften Berechnungen zusammengefasst.

Tabelle 9: Vergleich der Auswirkungen der Einbaukonfiguration eines Wärmetauschers auf den WRG-Wirkungsgrad. Zu Grunde liegenden Annahmen: Wirkungsgrad gemäss CSA B55.1 = 40%. Duschvolumenstrom 10 L/min. Dusch-, Speicher- und Kaltwassertemperaturen gemäss SIA 385/2:2025, MFH Beispiel: 5 Wohnungen mit je 3 Bewohnern, Duschhäufigkeit 0.8 Mal pro Tag, Energieverbrauch Dusche 1.45 kWh.

Parameter	Konfiguration A	Konfiguration B	Konfiguration C
Kapazitätsflussabhängiger Wirkungsgrad des WÜ ε	0.400	0.628	0.543
Wirkungsgrad der Wärmeübertragung $\eta_{hr,sts}$	0.400	0.300	0.327
Wirksamer Wirkungsgrad η_{hr}	0.329	0.248	0.271
Erwärmte Kaltwassertemperatur $\theta_{PWC,hr}$	20.8 °C	27.0 °C	24.7 °C



Massenstrom WRG $\dot{m}_{PWC,hr}$	10.00 L/min	5.35 L/min	6.67 L/min
Reduktion des Wärmebedarfs eines Duschvorgangs $\Delta Q_{W,sho,i}$	0.48 kWh	0.36 kWh	0.39 kWh
Kaltwasseranteil zur Mischbatterie $f_{hr,PWC}$	0.44	1	0
Reduktion des Wärmebedarfs MFH Beispiel $\Delta Q_{W,sho}$	5.76 kWh/d	4.32 kWh/d	4.71 kWh/d
Reduzierte Wärmeentnahme Steuervolumen MFH Beispiel $\Delta Q_{W,sho,PWC}$	2.53 kWh/d 43.62 nL	4.32 kWh/d 74.48 nL	0

Das Bereitschaftsvolumen eines gemäss SIA 385/2:2025 ausgelegten Speichers für 15 Personen (Typ: MFH-Allgemein) kann etwa 1000 L betragen (800 L Steuervolumen + 200 L Spitzendeckungsvolumen). Die Reduktion des Bereitschaftsvolumen liegt gemäss Konfiguration A für 15 Personen bei 44 L, was etwa 4.4% entspricht. Bei Konfiguration B reduziert sich das Bereitschaftsvolumen um 75 L, was einer Reduktion von etwa 7.5 % entspricht.

In Abbildung 13 und Abbildung 14 sind die Ergebnisse für Konfiguration A und B in Abhängigkeit zur Anzahl der Personen pro Warmwassersystem grafisch dargestellt, die restlichen Randbedingungen aber dieselben wie in der Rechnung zuvor. Dabei kann sowohl der reduzierte Wärmebedarf des Gebäudes in kWh als auch die Reduktion der Wärmeentnahme des Speichers in Normlitern abgelesen werden (siehe linke und rechte y-Achse). Die Grafiken verdeutlichen noch einmal den Unterschied zwischen den Konfigurationen A und B, welcher sich vor allem in der Steuervolumenreduktion bemerkbar macht.

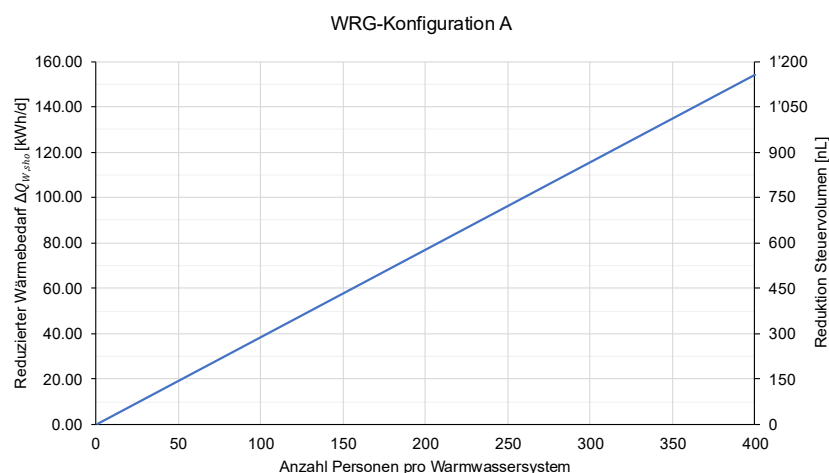


Abbildung 13: Beispielrechnung reduzierter Wärmebedarf und Steuervolumen bei einer Speicherbeladung pro Tag in Abhängigkeit der Anzahl Personen pro Warmwassersystem. Randbedingungen gemäss Tabelle 8. Wärmeübertrager Effizienz bei $C_r = 1$: 40%, **wirksamer WRG-Wirkungsgrad: 33% in Konfiguration A.**

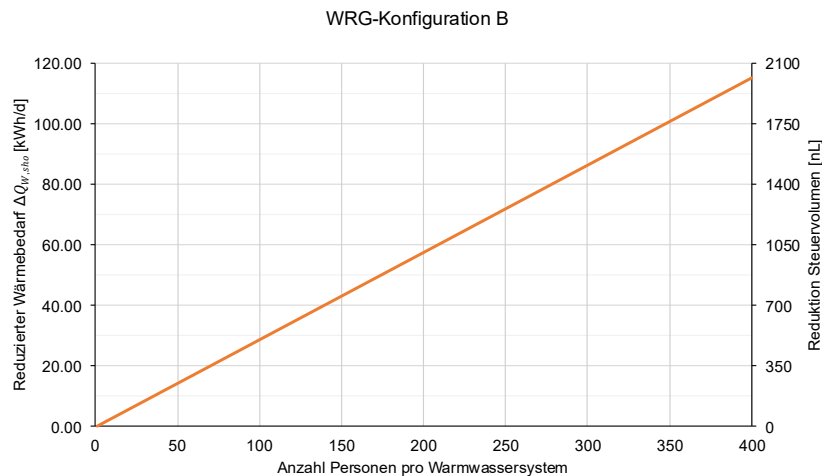


Abbildung 14: Beispielrechnung reduzierter Wärmebedarf und Steuervolumen bei einer Speicherbeladung pro Tag in Abhängigkeit der Anzahl Personen pro Warmwassersystem. Randbedingungen gemäss Tabelle 8. Wärmeübertrager Effizienz bei $C_r = 1$: 40%, **wirksamer WRG-Wirkungsgrad: 25% in Konfiguration B.**

3.5.3 Untersuchung des Einflusses der WRG auf das Spitzendeckungsvolumen

Eine Anrechenbarkeit der WRG bei Duschen an das Spitzendeckungsvolumen ist gemäss der SIA385/2:2025 nicht vorgesehen. Dabei gäbe es hier den Vorteil, dass diese Reduktion unabhängig von der Anzahl der Beladungen des Speichers pro Tag ist, während die Reduktion des Steuervolumens umgekehrt proportional zur Anzahl Speicherladungen pro Tag ist.

Zur Ermittlung des Einflusses der WRG auf den Warmwasserbedarf wurde für die in Kapitel 2.4 erstellten Profile der Verbrauch beim Duschen um den wirksamen WRG-Wirkungsgrad $\eta_{hr} = 24.4\%$ für Konfiguration B reduziert. Folglich ergibt sich der Gesamtbedarf aus der Summe des durch den Einfluss der WRG reduzierten Duschbedarfs und der anderen Bezüge, welche von der WRG nicht beeinflusst werden. Abbildung 15 und Abbildung 16 zeigen jeweils Werte von Warmwassersystemen mit Duschwasser-WRG und von identischen Systemen (Warmwasser-Bezugsprofilen) ohne WRG. Abbildung 15 zeigt dabei die Werte für einen allgemeinen Wohnungsbau (Nutzenergiebedarf 35 nL pro Person) und Abbildung 16 für den gehobenen Wohnungsbau (Nutzenergiebedarf 45 nL pro Person).

Rechte Achse:

Auf der rechten Achse der Grafiken lässt sich das Verhältnis von PWH mit WRG zu PWH ohne WRG (schwarze horizontale Linie bei 85.4%) sowie das Verhältnis der Stundenspitzen mit und ohne WRG (rote Balken) ablesen. Augenfällig ist, dass das Verhältnis der Stundenspitzen recht nahe am Verhältnis von PWH (ca. 85%) ist: bei kleinen Gebäuden tendenziell etwas höher und bei grosser Anzahl Personen tendenziell tiefer.

Linke Achse:

Dargestellt sind die zu erwartenden Stundenspitzen (Jahresmittelwert der simulierten täglichen Stundenspitze+ 2σ) des Systems mit WRG (blau) und ohne WRG (violett) im Verhältnis zu ihrem jeweiligen PWH-Bedarf, sowie eine entsprechende Trendlinie für die Punkte mit WRG (blau gestrichelt, $R^2=1.000$, Gleichung in Grafik). Die blauen Kreuze markieren die jeweiligen Maximalwerte im Zeitraum von 365 Tagen.



Die relativen Stundenspitzen bei den Systemen mit WRG (blau) sind etwa gleich gross wie die relativen Stundenspitzen ohne WRG (violett). Hieraus folgt, dass mit und ohne WRG die gleiche Formel für die Berechnung der relativen Stundenspitze eingesetzt werden kann, wobei sich diese im Falle mit WRG auch auf PWH unter Berücksichtigung der WRG bezieht.

Die zu erwartende Stundenspitze als Anteil des Tagesbedarfs, wie in der SIA 385/2:2025 mit Formel 2 berechnet, ist als grau gestrichelte Linie dargestellt (ohne Berücksichtigung von WRG). Würde man hier als Tagesbedarf den Bedarf unter Berücksichtigung der WRG einsetzen, jedoch keinen Abzug bei der Stundenspitze machen, so resultiert die grau ausgezogene Linie. Hierbei verändert sich das Verhältnis aus Formel 2 zu:

$$\frac{Q_{W,pk}}{Q_{W,hr}} = \left(1 + \frac{\Delta Q_{W,sho,PWC,B}}{Q_{W,hr}}\right) * \left(0.09 + \frac{0.66}{\sqrt{n_{P,W}}} + \frac{1.98}{n_{P,W}}\right) \quad (59)$$

In diesem Fall ist $Q_{W,hr}$ der durch die WRG reduzierte Wärmebedarf.

Generell zeigt sich, dass mit steigender Anzahl an Personen pro Warmwassersystem die relative Stundenspitze sowohl nach SIA als auch auf Grund der stochastisch simulierten Daten abnimmt. Zudem liegen für alle Gebäudegrössen die relativen Stundenspitzen aus den stochastischen Profilen unter der Stundenspitze nach SIA-Auslegung. Eine Anwendung der aus der SIA übernommenen Formel 2 mit Einsetzen des durch WRG reduzierten Tagesbedarfs würde deshalb Sinn ergeben und sogar die auftretenden Maximalwerte unserer Simulation mit abdecken (gestrichelte graue Linie liegt oberhalb der blauen Kreuze).

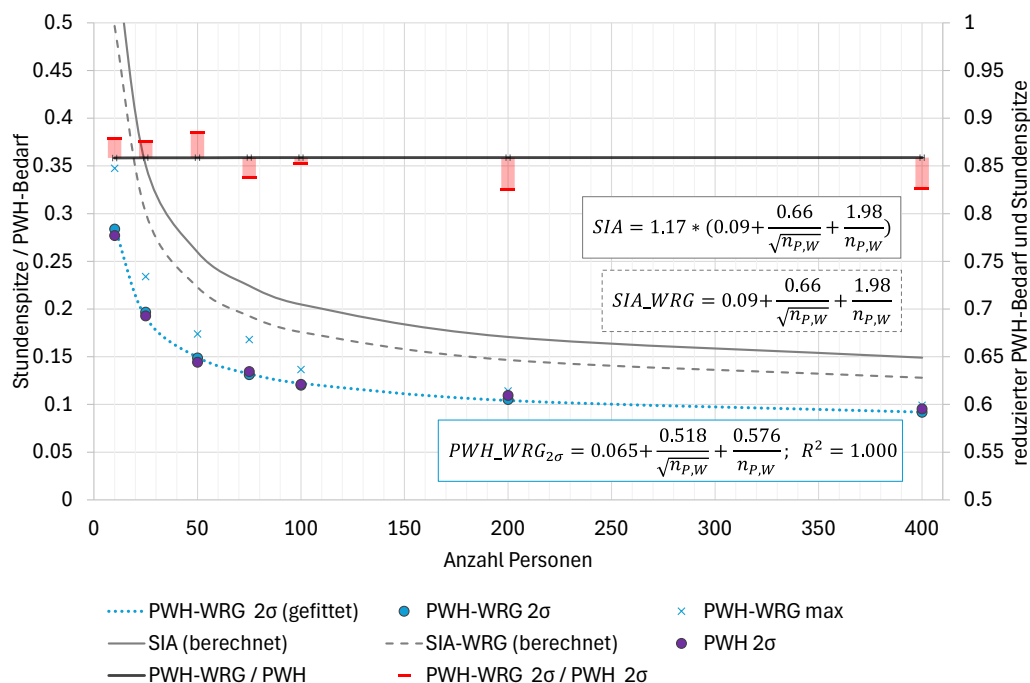


Abbildung 15: Stundenspitzen im allgemeinen Wohnungsbau - stündliche Spitzen von Warmwassersystemen mit und ohne Duschwasser-WRG (Konfiguration B, $\eta_{hr} = 24.4\%$) im Verhältnis zum jeweiligen täglichen PWH-Bedarf (links) und Verhältnis der Stundenspitze mit WRG gegenüber Stundenspitze ohne WRG, sowie das Verhältnis von PWH mit und ohne WRG (rechte Achse).

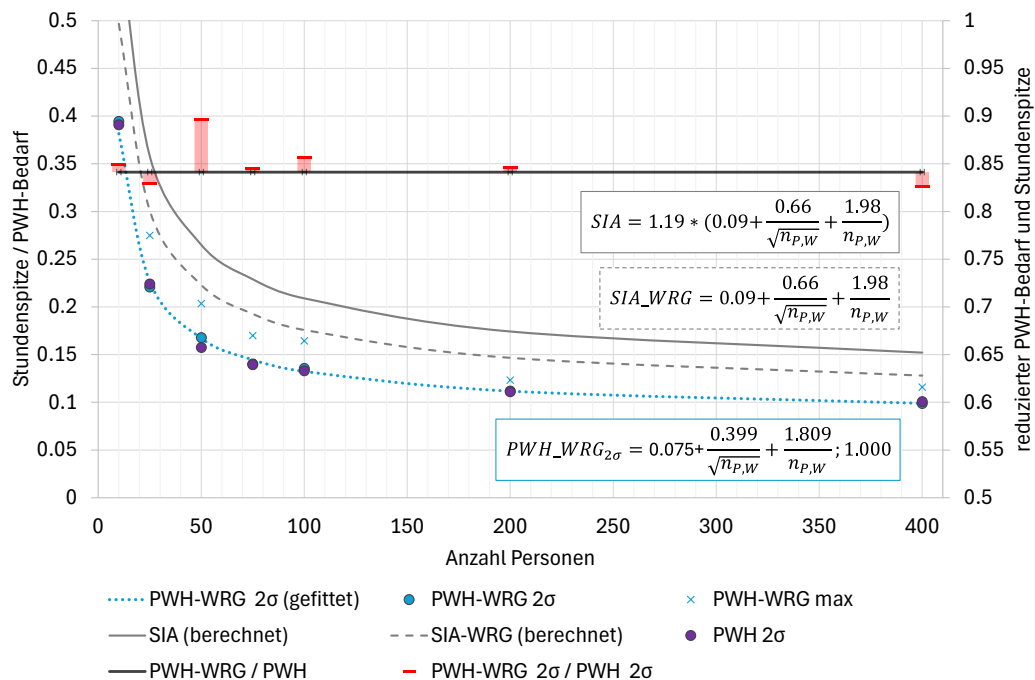


Abbildung 16: Stundenspitzen **im gehobenen Wohnungsbau** - stündliche Spitzen von Warmwassersystemen mit und ohne Duschwasser-WRG (Konfiguration B, $\eta_{hr} = 24.4\%$) im Verhältnis zum jeweiligen täglichen PWH-Bedarf (links) und Verhältnis der Stundenspitze mit WRG gegenüber Stundenspitze ohne WRG, sowie das Verhältnis von PWH mit und ohne WRG (rechte Achse).

Die Analyse zeigt, dass auf Grundlage der stochastischen Daten die Stundenspitzen durch eine Duschwasser-WRG um den gleichen Anteil wie der auf den Speicher anrechenbare Gesamtwärmebedarf reduziert werden. Das bedeutet, dass der durch WRG reduzierte Wärmebedarf für PWH für die Auslegung des Spitzendeckungsvolumens für Objekte mit mehr als 10 Personen in Formel 2 direkt eingesetzt werden kann. Dieses Ergebnis lässt sich mit Abbildung 6 untermauern, in welcher deutlich wird, dass die Stundenspitzen fast ausschliesslich vom Duschanteil abhängen.

Für Anlagen mit unter 10 Personen werden für das Spitzendeckungsvolumen Annahmen zur Gleichzeitigkeit verschiedener Verbraucher gewählt. Hier geht die SIA davon aus, dass die Unabhängigkeit der einzelnen Akteure in den wenigen Haushalten nicht unbedingt gegeben ist, und deshalb keine vorhersagbare statistische Verteilung angenommen werden kann. Entsprechend kann in diesen Fällen auch keine Reduktion von Steuer- und Spitzendeckungsvolumen vorgenommen werden.

3.5.4 Kombinierte Reduktion von Steuer- und Spitzendeckungsvolumen

Kombiniert man die Ansätze zur Reduktion von Steuervolumen nach SIA mit der Berechnung von η_{hr} aus Kapitel 3.5.2 mit der Reduktion des Spitzendeckungsvolumens wie in Kapitel 3.5.3 vorgeschlagen, so lässt sich das Breitschafsvolumen, wie in Tabelle 10 dargestellt, reduzieren. Die beispielhaft dargestellten Ergebnisse gelten nur für eine WRG, welche gemäss



Konfiguration B betrieben wird, und für einen stationären Wirkungsgrad der Wärmerückgewinnung von 29.5 %. Wie in Tabelle 10 zu sehen, reduziert sich das Bereitschaftsvolumen ab zehn Personen um 10 %. Ohne die Reduktion des Spitzendeckungsvolumens wären es 8 %.

Tabelle 10: Beispiele für Bereitschaftsvolumen und Anteil Spitzendeckungsvolumen gemäss SIA 385/2:2025 (allgemeiner und mittlerer Standard). Die Reduktion für das Steuervolumen (durch WRG) wurde gemäss Kapitel 3.5.2 und die Reduktion des Spitzendeckungsvolumens gemäss SIA mit reduziertem Wärmebedarf (Kapitel 3.5.3) berechnet. Beide beruhen auf einer WRG gemäss Konfiguration B und einem stationären Wirkungsgrad von 29.5%.*

Anzahl Pers.	Steuervolumen ohne WRG [L]	Steuervolumen mit WRG [L]	Spitzendeckung ohne WRG [L]	Spitzendeckung mit WRG [L]	Bereitschaftsvolumen* ohne WRG [L]	Bereitschaftsvolumen* mit WRG [L]	Bereitschaftsvolumen: mit WRG/ ohne WRG
1	83	78	98	94	182	172	95%
5	331	306	197	188	528	494	94%
10	561	511	190	165	751	676	90%
20	1068	970	251	218	1188	1211	90%
30	1567	1418	306	265	1873	1683	90%
50	2556	2311	406	351	2962	2662	90%
75	3776	3409	522	451	4299	3861	90%
100	5003	4505	633	547	5637	5052	90%
150	7422	6676	844	728	8265	7404	90%
200	9869	8874	1049	903	10918	9777	90%
400	19506	17552	1819	1566	21325	19118	90%

**Annahme: Zirkulation Rohr-an-Rohr, Leitungslänge Vorlauf = 1.5 m p.P.*



4 Schlussfolgerungen und Fazit

4.1 Normen und Berechnungsgrundlagen

Den betrachteten Normen und Berechnungsmethoden aus verschiedenen Ländern ist zu entnehmen, dass es sowohl für die Bestimmung der WRG-Effizienz als auch für die Berechnung des Einflusses auf den Wärmebedarf verschiedene Ansätze und Möglichkeiten gibt, die zu unterschiedlichen Ergebnissen führen. Wie im Folgenden erläutert wird, vermag jedoch keine der vorgestellten Normen restlos zu überzeugen.

Vor allem die vielen Inputparameter und das unterschiedliche Benutzerverhalten, die sich allesamt auf die WRG und die resultierende Effizienz auswirken, erschweren es, ein Vorgehen zu definieren, welches einen möglichst breiten Anwendungsbereich abdeckt. Als Input-Parameter sind die verschiedenen Einbau-Konfigurationen sowie die Einstellung der Warmwassertemperatur zu nennen. Zum Benutzerverhalten zählen u. A. Duschdauer, Duschtemperatur und Volumenströme, die sich stark auf die Effizienz auswirken können. Herkömmliche Duschbrausen erreichen 5 bis 15 L/min und mehr.

Die kanadische Prüfnorm B55.1-15 definiert den Wirkungsgrad nur für den stationären Zustand. Dadurch ist man flexibel und kann die transienten Auswirkungen und Verlustparameter spezifisch für den Einsatzzweck berechnen, um ein relativ genaues Ergebnis für ein System unter Berücksichtigung der spezifischen Einbausituation zu erhalten. Dies ist jedoch auch die aufwändigste Methode. Die unterschiedlichen Effizienzmessungen bei verschiedenen Volumenströmen ermöglichen die Berücksichtigung dieses Parameters in der spezifischen Situation.

Das niederländische Verfahren NTA8800 hingegen gibt einen Effizienzwert an, der sich auf den gesamten Duschvorgang bezieht und somit die Startverluste bereits berücksichtigt. Das vereinfacht die Berechnungen, bietet jedoch weniger Flexibilität, da dieser Effizienzwert stark von den im Testverfahren vorgegebenen Duschzyklen abhängt. Hier werden mehrere Effizienzen bei drei verschiedenen Volumenströmen gemessen (5.8 L/min, 9.2 L/min und 12.5 L/min). Dadurch ist die Wahrscheinlichkeit höher, dass einer der getesteten zum geplanten Volumenstrom passt.

Das französische Prüfverfahren CAPE/RECARDO-PQE geht einen Mittelweg: Es weist sowohl den stationären Effizienzwert als auch einen transienten Faktor aus, mit dem sich Aufwärmverluste berücksichtigen lassen. Wichtig zu beachten, dass auch der transiente Faktor nur für die in der Prüfnorm definierten Randbedingungen gilt. Diese Norm misst bei nur einem Volumenstrom. Sie ist jedoch die Einzige, die alle Einbaukonfigurationen A, B und C misst. Keine der Normen misst die WRG-Effizienz bei unterschiedlichen Kapazitätsflussraten auf der kalten und warmen Seite des WÜ. Dies wäre jedoch relevant, da bei Einbau-Konfiguration B und C die Kapazitätsflussrate des vorzuwärmenden Kaltwassers deutlich geringer ist als diejenige auf der wärmeren Seite.

Die Berechnungsverfahren in SAP, RT2012 und SIA verorten die zurückgewonnene Wärme aus Dusch-WRG unterschiedlich im Kontext des Warmwasser- bzw. Gebäudeenergiebedarfs. SAP bildet die Einsparung im Warmwasserbedarf innerhalb der Gebäude-/Monatsbilanz ab und basiert dabei auf dusch-spezifischen Grössen (z. B. Duschvolumenstrom, Temperaturannahmen und Wärmebedarfsanteil von Duschen mit WÜ). Neben der WÜ-Effizienz wird ein



Utilisation Factor verwendet, der Aufwärmverluste der WRG-Einheit (thermische Masse) und Wärmeverluste, respektive Restwärme, im angeschlossenen Rohrleitungsvolumen abdeckt; zusätzliche pauschale Verlustansätze können hier zu Doppelzählungen führen. Zudem unterscheidet SAP zwischen den Einbau-Konfigurationen A, B und C und bietet als einziges der betrachteten Verfahren eine rechnerische Abbildung von Konfigurationen mit gleicher Kapazitätsflussrate (balanced) auf solche mit reduziertem Volumenstrom auf der Kaltwasserseite (unbalanced), was jedoch für die praktische Planung vergleichsweise aufwändig ist. Das Verfahren berücksichtigt nicht, das je nach Prüfmethode gewisse Verluste bereits inkludiert sind (z.B: bei NTA) und diese daher nicht erneut berechnet werden müssen.

Das RT2012-Verfahren wählt hingegen einen Top-Down-Ansatz: Der Energiebedarf für Warmwasser wird zunächst ohne WÜ im Gebäudemodell berechnet und anschliessend über eine definierte Korrekturgrösse um den WRG-Beitrag reduziert. Das Verfahren enthält eine hohe Detailtiefe, die eine Genauigkeit suggeriert, die jedoch aufgrund der vielen variablen Inputparameter nicht gegeben ist. Somit scheint das Verhältnis von Aufwand zu Nutzen bei der Planung solcher Systeme eher ungünstig. In der SIA 385/2, Anhang K, wird der Einfluss der WRG auf den Bedarf an Wärmezufuhr und auf das Speicher-Steuervolumen über einen effektiven WRG-Wirkungsgrad bzw. eine Reduktion des erforderlichen Wärmebedarfs berücksichtigt, ohne darauf einzugehen, wie dieser Wirkungsgrad berechnet wird, und ob dabei interne Verlustmechanismen berücksichtigt werden. Sie ist die einzige Norm, die sich auch mit der möglichen Reduktion des Speichervolumens als Folge der WRG-Systeme befasst.

4.2 Verlustfaktoren bei der Wärmerückgewinnung von Duschabwasser

Bei den Verlustfaktoren dominieren die Wärmeverluste, die anfallen, bevor das Duschwasser überhaupt in den Wärmeübertrager eintritt. Dazu gehören die Wärmeverluste an die Umgebung bzw. an die Duschkabine. Dabei macht es einen grossen Unterschied, ob die Kabine offen oder geschlossen ist. Eventuell spielt dabei auch eine Rolle, welche Körpergrösse (Oberfläche) die duschende Person hat. Diese Effekte reduzieren die Wärme, welche am Wärmeübertrager (WÜ) ankommt, typischerweise bereits um 10 - 20 % gegenüber dem Wärmeinhalt des Duschwassers an der Brause [29].

Als zweitgrösster Verlust werden, je nach Quelle, Effizienzverluste der WRG-Einheit durch Verschmutzung oder Beschädigung genannt (z. B. Seifenreste oder dauerhafte Schäden durch ungeeignete Reinigungsmittel, etwa Korrosion). Diese Effekte sind jedoch stark system- und installationsabhängig: Relevant sind u. a. Einbaulage (horizontal/vertikal), Reinigungszugänglichkeit und Reinigungsintervalle. Entsprechend werden Effizienzverluste je nach Quelle in einer Bandbreite von 0 - 8 % angegeben. Hierzu fehlen jedoch Studien mit belastbaren Werten.

Darauf folgen die Verluste durch die Aufwärmphase der WRG-Einheit: Ein Teil der Energie wird benötigt, um den Wärmeübertrager und das darin befindliche Wasser aufzuheizen. Dieser Anteil lässt sich über die thermische Masse abschätzen und liegt typischerweise bei rund 1 - 2 % des Energiegehalts eines Duschvorgangs (z. B. ca. 10 kg Kupfer; Fassungsvermögen etwa 0.5 - 1 L Wasser). Dieser Anteil ist jedoch in hohem Masse abhängig von der Dauer des Duschvorgangs, da der relative Effekt mit der Dauer abnimmt.



Rohrleitungswärmeverluste sind in der Regel klein und – abhängig von der Einbaukonfiguration – oft vernachlässigbar. Erst bei längeren Leitungswegen (z. B. ab 27 m) erreichen sie Grössenordnungen von etwa 1 % des Energiegehalts eines typischen Duschvorgangs. Ebenso sind Verluste durch Auskühlung des durch den WÜ vorgewärmten Kaltwassers in den Leitungen zur Dusche oder zum Speicher meist gering: Diese Leitungen haben typischerweise kleine Innendurchmesser (ca. 12 mm) und damit ein kleines Volumen, zudem kühlt dieses Wasser nur etwa von 20 - 30 °C auf Raumtemperatur aus.

Ausnahmen können auftreten, wenn der Wärmeübertrager weit entfernt von der Dusche installiert ist, z. B. in grossen MFH mit zentraler Wärmerückgewinnung. Dann kommen zusätzliche Effekte hinzu, etwa Verzögerungen, bis warmes Abwasser den WÜ erreicht, sowie Gleichzeitigkeitseffekte, wenn mehrere Duschen in kurzer Folge stattfinden und das System zwischenzeitlich nicht vollständig auskühlt. Solche Verluste werden zwar im französischen Reglement RT2012 beschrieben, beruhen dort jedoch auf Annahmen, die nicht weiter erläutert sind und deshalb nicht direkt verifiziert werden können. Solche Fälle müssen gegebenenfalls separat betrachtet werden, um die wirksame Wärmeübertragungseffizienz realistisch abzuschätzen.

4.3 Reduktion des Speichervolumens durch Dusch-WRG

Gerade für die Reduktion des Speichervolumens ist die Konfiguration B am interessantesten, weshalb es wünschenswert wäre, in den Prüfverfahren auch diese Einbaukonfiguration zu berücksichtigen und zu testen, idealerweise bei verschiedenen Durchflüssen und verschiedenen ungleichen Kapazitätsflussraten. Eine Umrechnung ist zwar möglich, jedoch mit Unsicherheiten behaftet und relativ aufwändig und daher für eine schnelle und zuverlässige Auslegung nicht optimal.

Die schweizerische Norm SIA 385/2:2025 scheint die erste Norm zu sein, welche explizit den Einfluss von WRG auf die Auslegung des Speicher-Steuervolumens betrachtet. Auch diese Norm lässt aus Überlegungen im Zusammenhang mit Hygiene und Legionellensicherheit eine Reduktion des Spitzendeckungsvolumens aussen vor.

Die grosse Bandbreite an Effizienzen von WRG-Geräten auf dem Markt und die unterschiedlichen Einbaukonfigurationen sowie die Abhängigkeit von der täglichen Anzahl Speicherbeladungen machen es schwer zu sagen, ab welcher Wohnungsgrösse sich eine Berechnung einer möglichen Reduktion des Speichervolumens lohnt. Die hier durchgeführten Berechnungen deuten aber darauf hin, dass die erreichbare Speicherreduktion wohl im einstelligen oder unteren zweistelligen Prozent-Bereich zu verorten ist.

Die Auswirkungen einer Dusch-WRG können nie exakt bestimmt werden. Die hier durchgeführten Berechnungen basieren auf den Annahmen der Norm SIA 358/2:2025, welche auch für die Speicherauslegung verwendet werden. Je mehr Information man über das Benutzerverhalten hat und je genauer man weiss, welche Armaturen verbaut sind, umso genauer die Ergebnisse. Ein Auslegetool für Planer würde helfen, verschiedene Szenarien schnell, einfach und sicher durchrechnen zu können.



4.4 Stochastische Warmwasserprofile und Stundenspitzen

Die stochastischen Profile zeigen, dass eine Reduzierung des Spitzendeckungsvolumens bei Warmwassersystemen mit Dusch-WRG angezeigt wäre. Wie in Kapitel 2.4 aufgezeigt hängt, für Gebäude ab 50 Personen, die Stundenspitze sowohl im allgemeinen als auch im gehobenen Ausbaustandard praktisch ausschliesslich vom Duschanteil ab. Dies bedeutet, dass zusätzlich zum Steuervolumen auch das Spitzendeckungsvolumen reduziert werden könnte, was jedoch in der aktuellen Norm SIA 385/2:2025 nicht vorgesehen ist. Die Auswertungen zeigen, dass die Berechnungsformel aus der SIA-Norm zur Auslegung des Spitzendeckungsvolumens verwendet werden kann, wenn dabei als Tages-Wärmebedarf der durch die WRG verringerte Tages-Wärmebedarf eingesetzt wird.

Signifikant ist der Unterschied zwischen den Stundenspitzen, welche aus der Auslegung des Spitzendeckungsvolumen nach SIA und aus den mittels DHWcalc erzeugten Profil ermittelt worden sind. Es hat sich gezeigt, dass in DHWcalc das Wahrscheinlichkeitsprofil den grössten Einfluss auf die Stundenspitze hat. Da dieses auf Basis von SIA und Feldmessungen gewählt worden ist, kann hier von realitätsnahen Profilen ausgegangen werden. Jedoch bleibt anzumerken, dass DHWcalc zwar verschiedene Verbraucher unterscheidet, als Endresultat werden jedoch nur die Summe über alle Verbraucher ausgegeben. Für diese Studie war jedoch neben dem Gesamtprofil das darin enthaltene Duschprofil relevant. Um dies zu erhalten, wurden zusätzlich Profile mit ausschliesslich Duschverbrauchern erzeugt und diese kombiniert. Dieses Vorgehen kann zu einer Verzerrung der Datengrundlage führen, da die beiden stochastisch erzeugten Reihen (Gesamtbedarf und Duschbedarf) keinen zeitlichen Zusammenhang haben. Um eine bessere Datengrundlage zu erhalten, bräuchte es einerseits ein geeignetes Tool zur Erzeugung von stochastischen Profilen für die verschiedenen Verbraucher, andererseits fehlt eine Datengrundlage aus Feldmessungen, um die Profile zu beurteilen respektive die geeigneten Inputparameter zu setzen. Zudem könnten zur besseren Validierung die Analysen um Varianten mit verschiedenen Effizienzen der WRG und um weitere Mehrfamilienhausgrössen ergänzt werden. Vor allem bei höheren Effizienzen der WRG sollte untersucht werden, ob die Stundenspitzen dann immer noch massgeblich durch das Duschen bestimmt werden und sich in diesen Fällen der Einfluss der WRG auf die Stundenspitze verändert.

Nicht Gegenstand der Betrachtungen waren Objekte mit geringer Anzahl Personen (10 oder weniger), wo nicht mehr von statistischer Unabhängigkeit der Nutzenden ausgegangen werden kann.



5 Ausblick

Die vorliegenden Ergebnisse bilden eine Grundlage für die Weiterentwicklung der Norm SIA 385/2 hinsichtlich der Bewertung von Duschwasser-Wärmerückgewinnungssystemen (WRG). Die Analyse zeigt, dass die aktuelle Norm SIA 385/2:2025 zwar den planerischen Rahmen für WRG-Systeme enthält, jedoch kein Verfahren präsentiert für die Berechnung des Wärmeübertrager-Wirkungsgrades, und damit auch keine Vorgaben macht zur Berücksichtigung von Wärmeverlusten. Bei der Definition des WRG-Wirkungsgrades wird dieser in der Norm fälschlicherweise als Wärmeübertrager-Wirkungsgrad bezeichnet, was nur bei Konfiguration A korrekt ist. Zudem wird ein möglicher Einfluss auf das Speicher-Spitzendeckungsvolumen nicht berücksichtigt.

Die Ergebnisse dieser Studie können der SIA-Kommission als Entscheidungsgrundlage dienen, um die heute bestehenden Lücken zu schliessen und die in der SIA-Norm eingeführte effektive Wirkungsgrad der Wärmeübertragung um ein Berechnungsverfahren zu ergänzen sowie den derzeit noch ausgeklammerten Einfluss auf das Spitzendeckungsvolumen einzuführen. Es bieten sich dabei folgende Möglichkeiten an:

- Entwicklung einer neuen Prüfnorm für Duschwasser-Wärmerückgewinnungsgeräte, welche den Einbau nach allen drei Konfigurationen A, B und C berücksichtigt, verschiedene Durchflüsse und Kapazitätsflussverhältnisse testet und eine Grundlage für die Berechnung eines realistischen effektiven Wärmerückgewinnungs-Wirkungsgrad schafft, welche die wichtigsten Verlust-Terme wie zum Beispiel Temperaturverlust in der Duschkabine und Wärmeverluste auf Grund transienter Aufwärm- und Abkühlvorgänge beinhaltet (zum Beispiel aufbauend auf der niederländischen Norm NTA8800).
- Ergänzung um Verlustfaktoren wie vorgeschlagen oder analog zu Ansätzen anderer Länder, etwa zur Abbildung von Temperaturverlusten in der Duschkabine, Aufheizphasen, Abkühlverhalten, Leitungslängen oder Verschmutzung des Wärmeübertragers. Ziel sollte sein, die Berechnung möglichst einfach zu halten und sich bewusst zu sein, dass Abweichungen bei Temperaturen und Duschverhalten eine deutliche grössere Differenz zwischen Planung und Nutzung verursachen können als Wärmeverluste durch bspw. Aufheizen des WÜ oder in ungedämmten Rohrleitungen.
- Der Einfluss von Dusch-WRG auf die Stundenspitzen sollte in die Berechnung des Spitzendeckungsvolumens einfließen. Dazu müsste das Verfahren durch weitere Profile, wie im Kapitel Schlussfolgerungen und Fazit erwähnt, validiert und ergänzt werden. Die entsprechende Reduktion des Spitzendeckungsvolumens könnte in einer Nutzungsvereinbarung festgelegt werden.
- Schaffung einer empirischen Datenbasis aus realen Installationen, um Verlustfaktoren und Nutzungsannahmen für Mehrfamilienhäuser zu validieren. Da die Wärmeverluste in der Duschkabine durch Abkühlung des Wassers am grössten sind, sollte hierauf der Fokus liegen. Dabei sollten verschiedene Duschzyklen und Art der Duschkabine (offen/geschlossen) analysiert werden.
- Weiterführende Studie zur Ermittlung des Einflusses verschiedener Nutzerverhalten auf die WRG und Stundenspitzen für Objekte mit wenigen Nutzern (1 - 25 Personen).



Damit verbunden die Frage nach der korrekten Auslegung von Steuer- und Spitzendeckungsvolumen in diesen – bisher ausgeklammerten – Objekten.

- Jahressimulationen mit realitätsnahen Schichtspeichermodellen und stochastischen Warmwasser-Bezugsprofilen könnten aufzeigen, ob und wie häufig bei Reduzierung des Spitzendeckungsvolumens ein Transfer von Wasser mit ungenügender Temperatur in die Warmwasser-Verteilung geschehen kann, was zu einem Hygieneproblem werden könnte (Legionellen-Sicherheit). Dabei könnten unterschiedliche Nachheizkonzepte und dadurch Aufheizzeiten des Speichers in Kombination mit unterschiedlichen Regelstrategien berücksichtigt werden.

Durch diese Weiterentwicklungen könnte die Norm SIA 385/2 künftig einen wissenschaftlich fundierten Bewertungsrahmen für Dusch-WRG bereitstellen. Insgesamt bietet sich mit dieser Arbeit die Möglichkeit, die Bewertung von WRG-Systemen in der Schweiz deutlich zu präzisieren und das Energieeinsparpotenzial in Wohngebäuden genauer abzubilden.



6 Literaturverzeichnis

- [1] Dhwcalc: Program to Generate Domestic Hot Water Profiles with Statistical Means for User Defined Conditions. ResearchGate n.d.
- [2] Pflugradt N. LoadProfileGenerator 2023. <https://www.loadprofilegenerator.de//> (accessed June 14, 2023).
- [3] Socal, Laurent. Shower drain heat recovery – an introduction. REHVA Journal 2023.
- [4] Ruesch F, Haller M, Luca B, Willy V. Lebenszyklusanalysen verschiedener Konzepte für 100 % solar beheizte Gebäude. Rapperswil: SPF Institut für Solartechnik; 2024.
- [5] Bundesamt für Statistik. Gebäude und Wohnstatistik - Allgemeine Übersicht "Gebäude" nach Kantonen 2023 2024. <https://www.bfs.admin.ch/bfs/de/home/statistiken/bauwohnungswesen/gebaeude/energiebereich.assetdetail.32329499.html> (accessed November 27, 2024).
- [6] SVGW. Die Schweizer beziehen jährlich das Volumen des Bielersees aus den Wasserversorgungen n.d. https://www.svgw.ch/wasser/kommunikationstools/wasserversorgung/nutzung/#haushalt_sverbrauch (accessed November 29, 2024).
- [7] Kemmler A, Vu P, Tschumi D. Energieverbrauch der Privaten Haushalte 2000-2023 - Ex-Post-Analyse nach Verwendungszwecken und Ursachen der Veränderungen. Bern: Prognos; 2024.
- [8] Schweizerischer Verband für energieeffiziente Sanitärprodukte SVES. Wir wollen nicht kalt duschen n.d. <https://www.save-water.ch/wp-content/uploads/240311-Studie-Dusch-Badeverhalten-SVES.pdf> (accessed November 23, 2024).
- [9] Freiburghaus M. Wasserverbrauch - Sinkender Wasserabsatz im Schweizer Haushalt. AQUA & GAS 2015;AQUA&GAS:72–9.
- [10] Ableitner L, Schöb S, Tiefenbeck V. Digitalization of Consumer Behavior – A Descriptive Analysis of Energy Use in the Shower. 2016.
- [11] Department for Energy & Climate Change U. Measurement of domestic hot water consumption in dwellings 2011. <https://assets.publishing.service.gov.uk/media/5a75a29ced915d6faf2b4829/3147-measure-domestic-hot-water-consump.pdf> (accessed January 29, 2025).
- [12] Weissbach A. Durchschnittlicher Wasserverbrauch & Kosten im Haushalt n.d. <https://www.warmwasserspiegel.de/verbrauch-pruefen/durchschnittlicher-wasserverbrauch/#c155067> (accessed January 29, 2025).
- [13] Department for Energy Security and Net Zero U. Domestic hot-water use: observations on hot-water use from connected devices 2024. <https://assets.publishing.service.gov.uk/media/65f43b919d99de001d03df8a/domestic-hot-water-use-insights.pdf> (accessed January 29, 2025).
- [14] Mazzoni F, Alvisi S, Blokker M, Buchberger SG, Castelletti A, Cominola A, et al. Investigating the characteristics of residential end uses of water: A worldwide review. Water Research 2023;230:119500. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.119500>.
- [15] European Committee for Standardization (CEN). EN 16147+A1:2023: Heat pumps with electrically driven compressors - Testing, performance rating and requirements for marking of domestic hot water units 2017.
- [16] Fuentes E, Arce L, Salom J. A review of domestic hot water consumption profiles for application in systems and buildings energy performance analysis. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2018;81:1530–47. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.229>.
- [17] Steffelbauer DB, Hillebrand B, Blokker M. pySIMDEUM - An open-source stochastic water demand end-use model. Proceedings - 2nd International Join Conference on Water Distribution System Analysis (WDSA)& Computing and Control in the Water



- Industry (CCWI), Editorial Universitat Politècnica de València; 2022.
<https://doi.org/10.4995/WDSA-CCWI2022.2022.14774>.
- [18] SVGW. W3 Richtlinie für Trinkwasserinstallationen 2013.
- [19] Wärme-rück-gewinnung in der Passivhaus Portal Komponenten-datenbank n.d.
<https://database.passivehouse.com/de/components/list/heatrecovery> (accessed September 3, 2025).
- [20] Social L. WASTE WATER HEAT RECOVERY (WWHR) FROM SHOWER DRAIN - How to evaluate the energy performance of Waste Water Heat Recovery 2023.
- [21] B55.1-15, Test method for measuring efficiency and pressure loss of drain water heat recovery units 2015.
- [22] NTA 8800:2023, Bepaling rendement douchewaterwarmteterugwinning, Bijlage U 2023.
- [23] CAPE/RECADO-PQE-EN MEASUREMENT OF PERFORMANCE FOR INSTANTANEOUS ENERGY RECOVERY FROM GREYWATER 2015.
- [24] Hayton J. Waste Water Heat Recovery Systems (Instantaneous Shower): Method statement for recognition in SAP 2021.
- [25] Annexe à l'arrêté du 2 septembre 2019 relatif à l'agrément des modalités de prise en compte des systèmes de récupération instantanée de chaleur sur eaux grises dans la réglementation thermique 2012. 2019.
- [26] Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein. SIA 385/2: Anlagen für Trinkwarmwasser in Gebäuden - Warmwasserbedarf, Gesamtanforderungen und Auslegung n.d.
- [27] Energiesparrechner_Joulia_DE 2025. https://joulia.com/wp-content/uploads/2025/01/2025-01-15_Energiesparrechner_Joulia_DE.xlsx.
- [28] Keuler J, Albrecht K, Pärtsch P. Evaluation of thermal comfort during showering with system-related temperature fluctuations. *Journal of Building Engineering* 2024;88:109162. <https://doi.org/10.1016/j.job.2024.109162>.
- [29] Bouvenot J-B, Beaudet C. In situ experimental and theoretical studies of the performance and the fouling impact of shower greywater heat recovery systems. *Energy and Buildings* 2025;331:115341. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2025.115341>.
- [30] Écodrain. Cost Competitive Horizontal Drain Water Heat Recovery – An opportunity to save energy in many homes and commercial buildings. 2017.
- [31] DIN 94678, Geräte zur Wärmerückgewinnung aus Duschabwasser (DWHRD) 2022.



Annex A Beispiele für Berechnung WW-WRG auf Grund von SIA 385/2, Anhang K

Gemäss Anhang K, Tabelle 7, SIA 385/2 gibt es drei Möglichkeiten WRG für Duschen einzubinden ins WW-Versorgungssystem:

Tabelle 11: Möglichkeiten der Einbindung der WRG für Duschen gemäss SIA 385/2, Anhang K, Tabelle 7.

Konfiguration	Erwärmung PWC zu Dusche(n)	Erwärmung PWC zum Speicher	Typischer Einbau	Reduktion des Speicher-Steuvolumens
A	X	X	zentral	teilweise
B	X		dezentral Duschrinne	ja
C		X	zentral	nein

Einbindungsvariante B scheint die häufigste zu sein, gefolgt von Einbindungsvariante A. Deshalb werden diese beiden Konfigurationen hier auch behandelt.

Für diese beiden Konfigurationen werden jeweils die Reduktion des Wärmebedarfs ($\Delta Q_{W,sho}$) sowie die Volumenwirksamkeit (zur Reduktion des Speichervolumens) berechnet:

$$\Delta Q_{W,sho,i} = \eta_{hr} \cdot Q_{W,u,sho,i}^0 \quad (60)$$

$$f_{hr,PWC} = \frac{Q_{W,hr,i,PWC}}{Q_{W,hr,i}} \quad (61)$$

mit:

$\Delta Q_{W,sho,i}$ Reduktion des Wärmebedarfs eines Duschvorgangs, in kWh

η_{hr} Energetischer Wirkungsgrad der Wärmerückgewinnung (Achtung, NICHT des Wärmeübertragers)

$Q_{W,u,sho,i}^0$ Nutzenergiebedarf eines Duschvorgangs ohne WRG, in kWh

$f_{hr,PWC}$ Volumenwirksamkeitsfaktor, der WRG

$Q_{W,hr,i,PWC}$ pro Duschvorgang zurückgewonnene Wärmeenergie, welche über das Kaltwasser direkt der Duscharmatur zugeführt wird, in kWh

$Q_{W,hr,i}$ pro Duschvorgang insgesamt zurückgewonnene Wärmeenergie, in kWh

Auf eine explizite Berechnung des reduzierten Wärmebedarfs wird im Folgenden verzichtet, da diese einfach aus dem Wärmebedarf ohne WW-WRG und der Reduktion des Wärmebedarfs folgt:

$$Q_{W,gen,out,hr} = Q_{W,gen,out} - \Delta Q_{W,sho} \quad (62)$$

Allgemein

Auf die Umrechnung der Wärmeübertrager-Effizienz auf den effektiven WRG-Wirkungsgrad η_{hr} unter Berücksichtigung der effektiven Kapazitätsflussraten auf beiden Seiten sowie Verlustterminen in Duschkabine, Leitungen und durch Aufheizen der thermischen Masse wird hier nicht eingegangen.



$\Delta Q_{W,sho}$ ist die Summe der Wärmerückgewinnung aller Einzelduschvorgänge aller Duschen, die mit WRG ausgerüstet sind, pro Tag:

$$\Delta Q_{W,sho} = \sum \Delta Q_{W,sho,i} \quad (63)$$

Im Anhang K.5.5 ist der Wärmebedarf pro Duschvorgang (einfacher oder mittlerer Standard) gegeben als:

$$Q_{W,u,sho,i}^0 = 1.45 \text{ kWh pro Duschvorgang} \quad (64)$$

Jedoch gibt die SIA 385/2 auch Werte für das Duschen pro Person und Tag ($Q'_{W,i} = 1.16 \text{ kWh/d}$). Daraus ergeben sich im Schnitt 0.8 Duschvorgänge pro Person und Tag.

Angenommen, es sind in einem Mehrfamilienhaus fünf Wohnungen mit Duschen ausgerüstet, in jeder Wohnung leben drei Personen, so ergibt dies:

$$\Delta Q_{W,sho} = 5 \cdot 3 \cdot 0.8 \cdot \Delta Q_{W,sho,i} \quad (65)$$

Mit Gl. 28 kann nun $\Delta Q_{W,sho,i}$ berechnet werden unter Verwendung der Wärmerückgewinnungs-Effizienz (Gl. 60).

Im Folgenden werden Beispiele für die Einbau-Varianten B und A berechnet:

Konfiguration B: Erwärmung PWC nur zu Dusche

In Konfiguration B erfolgt die Wärmerückgewinnung nur durch Übertragung der Wärme auf das Kaltwasser zu den Duschen. Da der Volumenstrom aus der Brause eine Mischung aus dem (nun vorgewärmten) Kaltwasserzulauf und dem Warmwasser des Warmwasser-Verteilsystems ist, ist der Volumenstrom auf der Primärseite des WRG-Wärmeübertragers (abfließendes Duschwasser) höher als auf der Sekundärseite (zufließendes Kaltwasser). Damit eine nennenswerte Wärmerückgewinnung realisiert werden kann, darf der vorgewärmte Kaltwasser-Volumenstrom nicht beliebig klein sein. Auf Grund der Vorgaben von SIA 385/1 und SVGW W3E3 können wir von einer Warmwasser-Temperatur von ungefähr 55 °C ausgehen, welche in der Dusch-Armatur auf 40 °C gemischt wird. Angenommen, das vorgewärmte Kaltwasser erreicht 25 °C, so beträgt der Anteil Kaltwasser an der Mischung

$$fr_{cold} = \frac{\theta_{PWH} - \theta_{sho}}{(\theta_{PWH} - \theta_{PWC,hr})} = \frac{(55^\circ\text{C} - 40^\circ\text{C})}{55^\circ\text{C} - 25^\circ\text{C}} = \frac{15}{30} = 0.5 \quad (66)$$

Da das Fluid auf beiden Seiten Wasser ist, kann auch von praktisch gleichen spezifischen Wärmekapazitäten c_p ausgegangen werden und damit ist das Verhältnis der Kapazitätsflussraten C_{rel} identisch mit fr_{cold} .

$$C_{rel} = fr_{cold} \quad (67)$$

Der Volumenstrom primärseitig ist abhängig von der Art der Dusch-Brause:

- Spar-Brause: $\dot{V} = 8 \text{ L/min}$
- Gewöhnliche Brause: $\dot{V} = 15 \text{ L/min}$

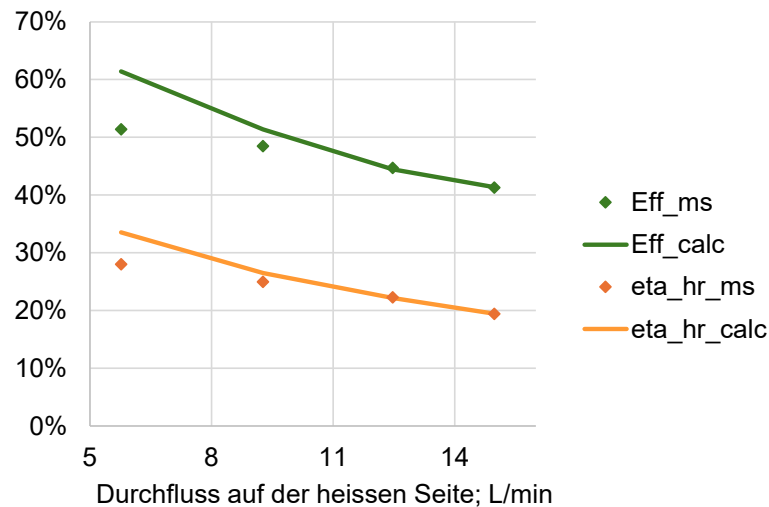


Abbildung 17: Abhängigkeit von Effectiveness ($Eff \varepsilon$) und Wirkungsgrad (η_{hr}) der Wärmerückgewinnung vom Durchfluss auf der heißen Seite, für C_{rel} zwischen 43 und 51%. Messpunkte sowie Kurve erhalten aus Fit von UA auf Grund der Messung mit der höchsten Durchflussrate und Extrapolation auf Grund der Effectiveness-NTU-Theorie unter Annahme eines konstanten UA-Wertes.

Der sekundärseitige Volumenstrom ergibt sich bei Konfiguration B aus dem primärseitigen sowie $f_{r_{cold}}$. Abbildung 17 zeigt beispielhaft eine Kurve für die Abhängigkeit der Effectiveness und des Wärmerückgewinnungsgrades vom Volumenstrom auf der Primärseite (heisse Seite) des Wärmeübertragers, mit Einbindung nach Konfiguration B, bei einem Volumenstrom-Verhältnis von $C_{rel} = f_{r_{cold}} \approx 0.47 \pm 0.04$.

Für den Fall von Wasserspar-Brausen kann bei $\dot{V} = 8 \text{ L/min}$ aus dem Diagramm $\eta_{hr} = 29.5\%$ abgelesen werden, und deshalb:

$$\Delta Q_{W,sho,i} = \eta_{hr} \cdot Q_{W,u,sho,i}^0 = 0.295 \cdot 1.45 \frac{\text{kWh}}{\text{d}} = 0.428 \frac{\text{kWh}}{\text{d}} \quad (68)$$

Und für die ganze Warmwasser-Anlage:

$$\Delta Q_{W,sho} = 5 \cdot 3 \cdot 0.8 \cdot \Delta Q_{W,sho,i} = 5.136 \frac{\text{kWh}}{\text{d}} \quad (69)$$

Für den Fall von gewöhnlichen Brausen kann bei $\dot{V} = 15 \text{ L/min}$ aus dem Diagramm $\eta_{hr} = 22\%$ abgelesen werden, und deshalb:

$$\Delta Q_{W,sho,i} = \eta_{hr} \cdot Q_{W,u,sho,i}^0 = 0.22 \cdot 1.45 \frac{\text{kWh}}{\text{d}} = 0.319 \frac{\text{kWh}}{\text{d}} \quad (70)$$

Und für die ganze Warmwasser-Anlage:

$$\Delta Q_{W,sho} = 5 \cdot 3 \cdot 0.8 \cdot \Delta Q_{W,sho,i} = 3.828 \frac{\text{kWh}}{\text{d}} \quad (71)$$

Da die gesamte Wärmerückgewinnung auf das Kaltwasser zur Dusche übertragen wird, ist diese zu 100% volumenwirksam:

$$f_{hr,PWC} = 1$$

Und damit ist die Speichervolumen-wirksame Energiemengenreduktion gleich der Wärmeeinsparung durch die WRG, also mit Spar-Brause:

$$\Delta Q_{W,sho,PWC} = f_{hr,PWC} \cdot \Delta Q_{W,sho} = 5.136 \frac{\text{kWh}}{\text{d}} \quad (72)$$



Und ohne Spar-Brause:

$$\Delta Q_{W,sho,PWC} = f_{hr,PWC} \cdot \Delta Q_{W,sho} = 3.828 \frac{kWh}{d} \quad (73)$$

Konfiguration A: Erwärmung PWC zum Speicher und zur Dusche

In dieser Konfiguration wird die zurückgewonnene Wärme auf den gesamten Kaltwasserzulauf zum Speicher UND zum Kaltwassereintritt in die Duscharmatur übertragen. Entsprechend ist der Volumenstrom auf beiden Seiten des WÜ per Definition gleich, das Verhältnis der Volumenströme und Kapazitätsflussraten ist 1.

Abbildung 18 zeigt beispielhaft eine Kurve für die Abhängigkeit des Wärmerückgewinnungsgrades vom Volumenstrom beider Seiten des Wärmeübertragers, mit Einbindung nach Konfiguration A.

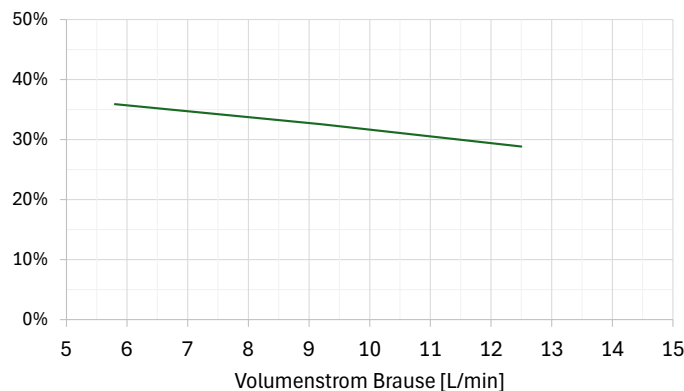


Abbildung 18: Effizienz der WRG für ein bestimmtes Produkt bei Einbau nach Konfiguration A in Abhängigkeit des Volumenstroms, bei Verhältnis der Volumenströme primär und sekundär von 1:1.

Für den Fall von Wasserspar-Brausen kann bei $\dot{V} = 8 \text{ L/min}$ aus dem Diagramm $\eta_{hr} = 33.7\%$ abgelesen werden, und deshalb:

$$\Delta Q_{W,sho,i} = \eta_{hr} \cdot Q_{W,u,sho,i}^0 = 0.337 \cdot 1.45 \frac{kWh}{d} = 0.489 \frac{kWh}{d} \quad (74)$$

Und für die ganze Warmwasser-Anlage:

$$\Delta Q_{W,sho} = 5 \cdot 3 \cdot 0.8 \cdot \Delta Q_{W,sho,i} = 5.868 \frac{kWh}{d} \quad (75)$$

Für den Fall von gewöhnlichen Brausen kann bei $\dot{V} = 15 \text{ L/min}$ kein Wert mehr ausgelesen werden.

Bei Konfiguration A ist jedoch die Volumen-Wirksamkeit nicht 1, sondern hängt davon ab, welcher Teil des Gesamt-Volumenstroms der Brause über den Kaltwasseranschluss in die Dusch-Armatur fließt. Unter Berücksichtigung des Wärmerückgewinnungsgrades kann die Temperatur des im WÜ erwärmten Kaltwassers $\theta_{PWC,hr}$ unter Verwendung der Beziehung $\eta_{hr,\theta} = \eta_{hr}$ (nur gültig für Volumenstromverhältnis = 1) errechnet werden:

$$\theta_{PWC,hr} = \theta_{PWC} + \eta_{hr,\theta} \cdot (\theta_{sho} - \theta_{PWC}) = 10^\circ\text{C} + 0.337 \cdot (40^\circ\text{C} - 10^\circ\text{C}) = 20.11^\circ\text{C} \quad (76)$$



Und damit

$$f_{hr,PWC} = \frac{\theta_{PWH} - \theta_{sho}}{\theta_{PWH} - \theta_{PWC,hr}} = \frac{55^{\circ}\text{C} - 40^{\circ}\text{C}}{55^{\circ}\text{C} - 20.11^{\circ}\text{C}} = 0.43 \quad (77)$$

Hätte in dieser Konfiguration das Warmwasser, welches in die Dusch-Armatur fließt, 60 °C, so wäre:

$$f_{hr,PWC} = \frac{60^{\circ}\text{C} - 40^{\circ}\text{C}}{60^{\circ}\text{C} - 20.11^{\circ}\text{C}} = 0.51 \quad (78)$$

Bei $\theta_{PWH} = 50^{\circ}\text{C}$ resultiert $f_{hr,PWC} = 0.33$

Es resultieren deshalb für verschiedene θ_{PWH} :

$$\theta_{PWH} = 50^{\circ}\text{C}: \Delta Q_{W,sho,PWC} = 0.33 \cdot 5.868 \frac{\text{kWh}}{\text{d}} = 1.936 \frac{\text{kWh}}{\text{d}} \quad (79)$$

$$\theta_{PWH} = 55^{\circ}\text{C}: \Delta Q_{W,sho,PWC} = 0.43 \cdot 5.868 \frac{\text{kWh}}{\text{d}} = 2.523 \frac{\text{kWh}}{\text{d}} \quad (80)$$

$$\theta_{PWH} = 60^{\circ}\text{C}: \Delta Q_{W,sho,PWC} = 0.51 \cdot 5.868 \frac{\text{kWh}}{\text{d}} = 2.993 \frac{\text{kWh}}{\text{d}} \quad (81)$$



Annex B Berechnungen zur WRG

Folgende Tabellen und Abbildungen mit Berechnungen zum reduzierten Wärmebedarf des Warmwassers des ganzen Gebäudes und der Reduktion des Steuervolumens einer Dusche in Normlitern beziehen sich auf die Berechnung gemäss Kapitel 3.5 und den Randbedingungen gemäss Tabelle 8.

Tabelle 12: Reduktion des Wärmebedarfs für WW des Gebäudes in kWh/d und reduzierte Wärmeentnahme aus dem Speicher in Normliter für eine Dusch-WRG gemäss Konfiguration A für verschiedene Effizienzen bei einem Volumenstrom der Dusche von 8 L/min und einer Speicherladung pro Tag.

Personen	$\eta_{hr,A} = 10\%$		$\eta_{hr,A} = 20\%$		$\eta_{hr,A} = 30\%$		$\eta_{hr,A} = 40\%$		$\eta_{hr,A} = 50\%$		$\eta_{hr,A} = 60\%$	
	kWh/d	nL	kWh/d	nL	kWh/d	nL	kWh/d	nL	kWh/d	nL	kWh/d	nL
1	0	1	0	1	0	2	0	3	0	4	1	5
5	0	3	1	6	2	10	2	15	2	20	3	26
10	1	6	2	13	3	20	4	29	5	39	6	52
15	1	9	4	19	5	30	6	44	7	59	9	78
20	2	12	5	25	6	40	8	58	10	79	12	104
30	3	18	7	38	10	61	12	87	14	118	17	156
40	4	24	10	50	13	81	15	116	19	158	23	207
50	5	29	12	63	16	101	19	146	24	197	29	259
75	7	44	18	94	24	152	29	218	36	296	43	389
100	10	59	24	126	32	202	38	291	48	395	58	518
150	14	88	36	188	49	303	58	437	72	592	87	778
200	19	118	48	251	65	405	77	582	96	790	115	1037
300	29	176	72	377	97	607	115	873	144	1185	173	1555
400	38	235	96	503	130	809	154	1164	192	1580	231	2073



Reduktion Steuervolumen Konfiguration A 1 Ladung/Tag

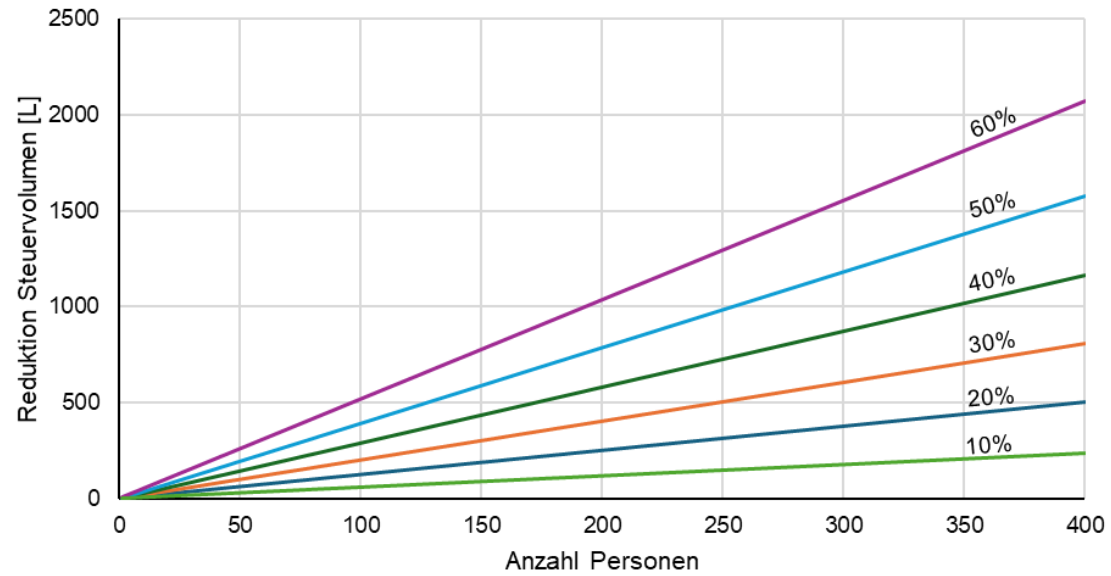


Abbildung 19: Reduktion Steuervolumen in Normliter für eine WRG bei Duschen gemäss Konfiguration A für verschiedene Effizienzen bei einem Volumenstrom der Dusche von 8 L/min und einer Speicherladung pro Tag.



Tabelle 13: Reduktion des Wärmebedarfs des Gebäudes in kWh/d und reduzierte Wärmeentnahme aus dem Speicher in Normliter für eine Dusch-WRG gemäss Konfiguration B für verschiedene Effizienzen bei einem Volumenstrom der Dusche von 8 L/min und einer Speicherladung pro Tag.

Personen	$\eta_{hr,B} = 10\%$		$\eta_{hr,B} = 20\%$		$\eta_{hr,B} = 30\%$		$\eta_{hr,B} = 40\%$		$\eta_{hr,B} = 50\%$		$\eta_{hr,B} = 60\%$	
	kWh/d	nL	kWh/d	nL	kWh/d	nL	kWh/d	nL	kWh/d	nL	kWh/d	nL
1	0	2	0	3	0	5	0	7	0	8	1	10
5	0	8	1	17	1	25	2	33	2	41	3	50
10	1	17	2	33	3	50	4	66	5	83	6	100
15	1	25	4	50	4	75	6	100	7	124	9	149
20	2	33	5	66	6	100	8	133	10	166	12	199
30	3	50	7	100	9	149	12	199	14	249	17	299
40	4	66	10	133	11	199	15	265	19	332	23	398
50	5	83	12	166	14	249	19	332	24	415	29	498
75	7	124	18	249	21	373	29	498	36	622	43	746
100	10	166	24	332	28	498	38	663	48	829	58	995
150	14	249	36	498	43	746	58	995	72	1244	87	1493
200	19	332	48	663	57	995	77	1327	96	1659	115	1990
300	29	498	72	995	85	1493	115	1990	144	2488	173	2986
400	38	663	96	1327	114	1990	154	2654	192	3317	231	3981



Reduktion Steuervolumen Konfiguration B 1 Ladung/Tag

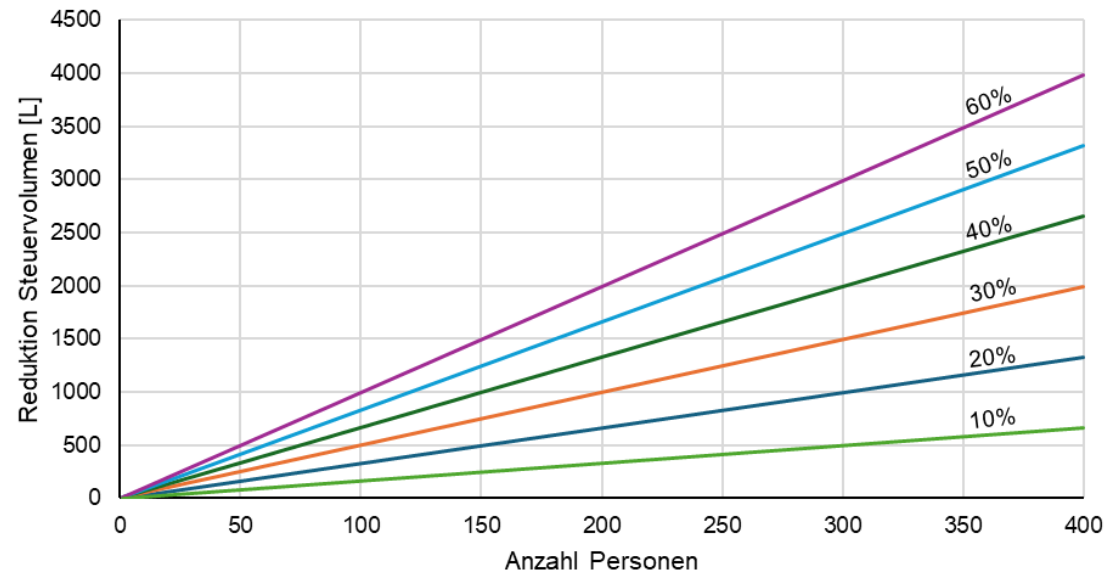


Abbildung 20: Reduktion Steuervolumen in Normliter für eine WRG bei Duschen gemäss Konfiguration B für verschiedene Effizienzen bei einem Volumenstrom der Dusche von 8 L/min und einer Speicherladung



Annex C Deutsche DIN 94678:2022-12

Die DIN 94678:2022-12 Geräte zur Wärmerückgewinnung aus Duschabwasser (DWHRD) ist eine Kombination aus Anforderungen und Prüfverfahren für Geräte zur Wärmerückgewinnung aus Duschabwasser und bietet einen Ansatz für die Effizienzumrechnung bei verschiedenen Durchflüssen [31]. Sie definiert technische, und sicherheitsrelevante Anforderungen wie Hygiene, Dichtheit, Temperaturwechselbeständigkeit und Druckfestigkeit. Sie wurde für dieses Projekt nicht direkt in die Auswertungen mit einbezogen, soll jedoch der Vollständigkeit halber dennoch hier im Annex präsentiert werden.

Die Berechnung der Energieeffizienz der WRG wird für verschiedene Durchflussprofile beschrieben, jedoch immer im Verbund mit Warmwasserbereitern. Dieses Verfahren richtet sich nach EU-Verordnungen 812 und 814, welche die Energieverbrauchskennzeichnung von Warmwasserbereitern, Warmwasserspeichern und deren Kombination definieren. Hier wird als Standarddurchfluss 12.5 L/min (Konfiguration A) definiert, weshalb sich die Berechnungen an diesem Wert orientieren.

Um den hygienischen Anforderungen zu entsprechen, muss der Wärmeübertrager schnell genug abkühlen, damit sich Legionellen nicht ausbreiten können. Dafür wird er mit einem Volumenstrom von 12.5 ± 0.5 L/min auf Primär- und Sekundärseite betrieben, bis ein stationärer Zustand erreicht ist (mindestens 10 min). Die Eintrittstemperaturen betragen 40 ± 1 °C (Primärseite) und 10 ± 1 °C (Sekundärseite), bei einer Raumtemperatur von 20 ± 1 °C.

Nach Erreichen des stationären Zustands wird die Auslauftemperatur der Sekundärseite gemessen: Liegt sie ≤ 25 °C, gilt die hygienische Prüfung als bestanden; bei > 25 °C folgt eine zusätzliche Abkühlprüfung, in welcher die Temperatur erneut nach 45 min und einer weiteren Durchflussmenge von 2 L gemessen wird. Ist die gemessene Temperatur ≤ 25 °C, ist die hygienische Prüfung bestanden.

Wie erwähnt erfolgt die Effizienzrechnung in Kombination mit dem Wärmeerzeuger:

$$\eta_{Wh+hr} = f_{hr} \cdot \eta_{Wh} \quad (82)$$

mit:

η_{Wh} Effizienz Wärmeerzeuger
 f_{hr} Wärmerückgewinnungsfaktor $1/[1 - (\eta_{hr} \cdot 0.4)]$

Zu dieser Formel gibt es in der Norm keine weitere Erläuterung. Im weiteren Schritt wird erklärt, wie man die Effizienz des WRG-Gerätes welche bei einem Durchfluss von 12.5 L/min (Primär und Sekundär) bestimmt wurde, für weitere Durchflüsse umrechnen kann.

$$\eta_{hr,tp} = \eta_{hr,12.5} + f_{corr} \cdot b_n \cdot (12.5 \text{ L/min} - q_{V,tp}) \quad (83)$$

mit:

$\eta_{hr,tp}$ Effizienz WRG beim Durchflussprofil tp
 f_{corr} Korrekturfaktor bei geringen Volumenströmen (0.8)
 b_n Veränderung der Effizienz, 1% je L/min
 $q_{V,tp}$ Volumenstrom des jeweiligen Lastprofils (S bis XXL), (3;5;6;8;10;12) L/min



Wenn $\eta_{hr,12.5}$ und ein weiterer Wert η_i für einen Volumenstrom $q_{V,i} < 12,5 \text{ L/min}$ vorliegen, kann für die Lastprofile S bis XXL folgende Gleichung verwendet werden:

$$\eta_{hr,tp} = \eta_{hr,12.5} + f_{corr} \cdot \left[\frac{\eta_{hr,12.5} - \eta_{hr,i}}{12.5 \frac{\text{L}}{\text{min}} - q_{V,i}} \cdot (q_{V,tp} - 12.5 \text{ L/min}) \right] \quad (84)$$



Annex D Parameter stochastische Warmwasserbedarfsanalyse

Allgemeine Parameter (für alle Profile)				
House type	Multi-Family Houses			
Np. of categories	4			
Time step duration	1 min			
Startday	1			
Total duration	365 days			
Daylight saving time	don't apply			
Probability weekend-day/weekday	100			
Amplitude of sine	0			
Sine maximum	0			
Holiday Periods	disabled			
Gesamtverbrauch			Dusche	
Wahrscheinlichkeiten				
Probability during the day	"Step function for weekdays and weekends"		"DHW standard distributions"	
Weekdays / Weekend-days	24:00-07:00	5%		
	07:00-11:00	29%		
	11:00-15:00	22%		
	15:00-18:00	9%		
	18:00-22:00	18%		
	22:00-24:00	17%		
Volumenströme				
	allgemein	gehoben	allgemein	gehoben
Cat1 (kleine Zapfungen)				
mean flow rate (L/h)	36	36	0	0
draw-off duration (min)	1	1	1	1
protion (%)	14	14	0	0
standard deviation (L/h)	120	120	1	1
Cat2 (mittlere Zapfungen)				
mean flow rate (L/h)	216	0	0	0
draw-off duration (min)	1	1	1	1
protion (%)	29	29	0	0



standard deviation (L/h)	120	120	1	1				
Cat3 (Badewanne)								
mean flow rate (L/h)	0	588	0	0				
draw-off duration (min)	1	10	1	1				
proton (%)	0	4	0	0				
standard deviation (L/h)	1	12	1	1				
Cat4 (Dusche)								
mean flow rate (L/h)	252	360	252	360				
draw-off duration (min)	6	6	6	6				
proton (%)	57	64	100	100				
standard deviation (L/h)	24	24	24	24				
Parameter Gebäudegrößen								
	mean daily (L)	max. flow (L/h)	mean daily (L)	max. flow (L/h)	mean daily (L)	max. flow (L/h)	mean daily (L)	max. flow (L/h)
No. of households = 5 (10 Pers)*	350	2110	450	2571	200	1203	288	1208
No. of households = 11 (25 Pers)*	875	2788	1125	3397	499	1589	720	1597
No. of households = 23 (50 Pers)*	1750	3617	2250	4407	998	2062	1440	2071
No. of households = 34 (75 Pers)*	2625	4152	3375	5059	1496	2367	2160	2378
No. of households = 45 (100 Pers)*	3500	4584	4500	5585	1995	2613	2880	2625
No. of households = 91 (200 Pers)*	7000	5877	9000	7161	3990	3350	5760	3366
No. of households = 182 (400 Pers)*	14000	7507	18000	9146	7980	4279	11520	4299

* Input Parameter in dhwCalc ist Anzahl Wohnungen (No. of households). Die Anzahl Wohnungen wurde anhand einer Belegung von 2.2 Personen/Wohnung ermittelt.



Annex E stündlicher Warmwasserbedarf für allgemeinen und gehobenen Wohnungsbau

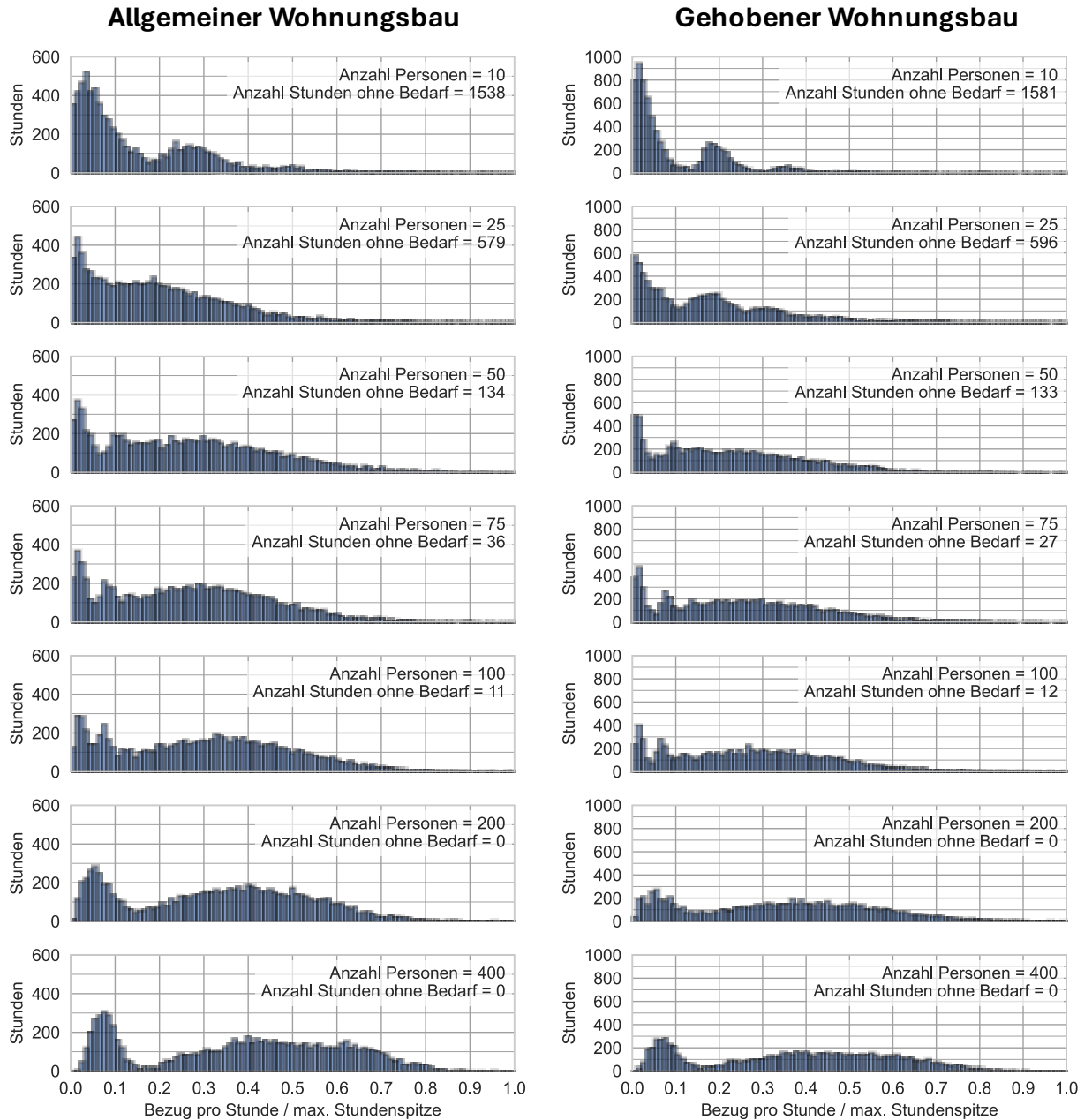


Abbildung 21: Allgemeiner Wohnungsbau MFH (links) Gehobener Wohnungsbau (rechts) mit je 10 (oben), 25, 50, 75, 100, 200, 400 (unten) Personen, Histogramm des stündlichen Bedarfs relativ zur maximalen Stundenspitze.