Bachelorarbeit

Université du Luxembourg

Wärmerückgewinnung aus dem Grauwasser innerhalb von Gebäuden

von

Lisa Maria Jungerwirth

Matrikelnummer: 0180532429

BING – Energie und Umwelt

Betreuer:

Prof. Dr.-Ing. Frank Scholzen (Uni.lu)

Admir Sijaric (SNHBM)

September 2021

Abstract

Heutzutage haben sich viele Länder zum Ziel gesetzt, immer energieeffizientere Wohngebäude zu bauen, um so Energie, aber auch CO_2-Emissionen einzusparen. In der Europäischen Union müssen daher seit Anfang des Jahres 2021 alle neuen Gebäude die Anforderungen des Niedrigstenergiehausstandards („Nearly Zero Energy Building“) erfüllen.

Eine Möglichkeit dafür wäre die Wärmerückgewinnung aus dem Grauwasser innerhalb der Wohngebäude. Das kalte Frischwasser wird mit Hilfe von Wärmetauschern durch die zurückgewonnene Wärme aus dem noch heißen Abwasser vorerhitzt. Am weitesten entwickelt sind Wärmeübertrager, die die Energie dem Duschwasser entziehen. Sie können entweder horizontal direkt in der Duschrinne integriert sein oder vertikal am Duschabflussrohr installiert werden.

Diese Systeme können sowohl in Einfamilien- als auch in Mehrfamilienhäusern eingesetzt werden. Für die zukünftigen Neubauten der SNHBM stellen sie eine interessante, einfach einzubauende Technologie dar, um Energie, CO_2-Emissionen und laufende Kosten der Bewohner einzusparen.

De nos jours, l'objectif de nombreux pays est de construire des bâtiments résidentiels de plus en plus efficaces du point de vue énergétique afin d'économiser de l'énergie ainsi que des émissions de CO_2. Dans l'Union européenne, tous les nouveaux bâtiments doivent donc répondre aux exigences du standard du « bâtiment à Quasi Zéro Énergie » depuis début 2021.

Une possibilité pour ceci serait la récupération de la chaleur des eaux grises dans les bâtiments résidentiels. L'eau potable froide est préchauffée à l'aide d'échangeurs de chaleur en utilisant la chaleur récupérée des eaux usées encore chaudes. Les échangeurs thermiques qui extraient l'énergie de l'eau de la douche sont les plus développés. Ils peuvent être intégrés horizontalement directement dans le caniveau de douche ou installés verticalement sur le conduit d’écoulement de la douche.

Ces systèmes peuvent être utilisés aussi bien dans les maisons unifamiliales que dans les immeubles à appartements. Pour les futurs bâtiments neufs de la SNHBM, ils représentent une technologie intéressante et facile à installer afin d’économiser de l'énergie, des émissions de CO_2 et de réduire les dépenses courantes des résidents.

Danksagung

Zu Beginn dieser Bachelorarbeit möchte ich mich bei den folgenden Personen bedanken, die alle dazu beigetragen haben, dass ich meine Abschlussarbeit in dieser Form fertigstellen konnte.

Zunächst gilt mein Dank Herrn Prof. Dr.-Ing. Frank Scholzen, der meine Bachelorarbeit betreut hat. Bedanken möchte ich mich für die hilfreichen sowie teilweise auch kritischen Anregungen während des gesamten Schreibprozesses.

Des Weiteren bedanke ich mich aufrichtig bei Herrn Admir Sijaric von der „Société Nationale des Habitations à Bon Marché“ (SNHBM), der an die Universität getreten ist, um das Thema dieser Arbeit für eine Projektarbeit vorzuschlagen. Die anschließende zuverlässige Zusammenarbeit und die wertvollen Hinweise sowie die schnelle Beantwortung all meiner Fragen waren unabdinglich für das Gelingen der Arbeit.

Abschließend möchte ich mich bei meinen Eltern für das Korrekturlesen dieser Bachelorarbeit und die Unterstützung während meines gesamten Studiums bedanken.

Inhaltsverzeichnis

Abstract 2

Danksagung 3

Abbildungsverzeichnis 6

Tabellenverzeichnis 8

1 Einleitung 9

2 Technischer Teil 11

2.1 Definition von Schmutzwässern 11

2.2 Anwendungsgebiete und Bauformen von Wärmetauschern 11

2.3 Funktionsweise von Wärmetauschern 15

2.4 Prinzipien der Wärmeübertragung 17

2.5 Möglichkeiten für den Einbau 18

2.6 Möglichkeiten der Installation 20

2.7 Materialien der Wärmetauscher 22

2.8 Lebensdauer und Wartung 23

2.9 Hygiene und Legionellen 24

2.10 Druckverlust über dem Wärmetauscher 26

3 Energetischer Teil 27

3.1 Wärmeinhalt im Grauwasser 29

3.2 Effizienz von Wärmetauschern 29

3.3 Beeinflussende Faktoren für die Effizienz 30

3.4 Unterschiedliche Ermittlung und Bewertung der Effizienzwerte 31

3.4.1 Zertifikat des Passivhaus Instituts 31

3.4.2 NEN 7120 32

3.4.3 Norm DIN V 18599-8 und GEG 33

3.4.4 CSA B55.1 34

3.4.5 Règlement grand-ducal 34

4 Produzenten 35

4.1 EcoDrain aus Nordamerika 35
4.2 RenewABILITY Energy Inc. aus Nordamerika 38
4.3 Wagner Solar GmbH aus Deutschland 40
4.4 Q-Blue B.V. aus den Niederlanden 43
4.5 Joulia SA aus der Schweiz 45
5 Pilotprojekte 47
5.1 Projekt „Uilenstede“, Niederlande 47
5.1.1 Versuchsaufbau und Rahmenbedingungen 47
5.1.2 Ergebnisse 48
5.2 Projekt im “Archetype Sustainable House” in Vaughan, Kanada 50
5.2.1 Versuchsaufbau und Rahmenbedingungen 50
5.2.2 Ergebnisse 51
6 Grauwasserwärmetauscher in Wohngebäuden der SNHBM 53
6.1 Beeinflussende Faktoren für das Potenzial in Wohngebäuden 54
6.2 Amortisationszeit der Duschwasserwärmetauscher 55
6.3 Mögliches Pilotprojekt in einer Neubausiedlung von SNHBM 56
7 Beispielrechnung für einen vertikalen Duschwasserwärmetauscher 58
7.1 Ergebnisse für Fall 1 59
7.2 Ergebnisse für Fall 2 59
7.3 Interpretation der Ergebnisse der beiden Fälle 60
7.4 Amortisationszeit 61
7.5 Vergleich mit den Herstellerangaben 61
7.6 Anmerkung zur Berechnung für einen horizontalen Wärmetauscher 63
8 Ausblick 64
Literaturverzeichnis 67
Anhang: Beispielrechnung für den vertikalen Wärmetauscher 71

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Horizontaler Wärmetauscher im Abwasserkanal 12
Abbildung 2: Vertikaler Grauwasserwärmetauscher..... 13
Abbildung 3: Aufbau eines Plattenwärmetauschers 14
Abbildung 4: Funktionsweise eines vertikalen Grauwasserwärmetauschers..... 16
Abbildung 5: Wasserfluss durch ein vertikales (links) und ein horizontales (rechts) Rohr 17
Abbildung 6: Veranschaulichung der Wärmeübertragungsprozesse 18
Abbildung 7: Wärmerückgewinnung im Abfluss der Dusche, horizontal (links) und vertikal (rechts)..... 19
Abbildung 8: Wärmerückgewinnung in einem Mehrfamilienhaus 20
Abbildung 9: Erhitzung des Kaltwassers des Warmwasserbereiters (links), Erhitzung des Kaltwassers der Dusche (Mitte), Erhitzung beider (rechts) 21
Abbildung 10: Wärmerückgewinnung in Kombination mit Wärmepumpe 22
Abbildung 11: Korrosion an einem Kupferrohr durch Kontakt mit Grauwasser..... 23
Abbildung 12: Entwicklung der Wärmeenergiemenge für Heizung und Warmwasser in Gebäuden in der Schweiz..... 28
Abbildung 13:Anteil von Duschwasser am Warmwasserverbrauch..... 28
Abbildung 14: A1000 von EcoDrain..... 36
Abbildung 15: Kosteneinsparungen durch den A1000 von EcoDrain 36
Abbildung 16: Jährliche CO_2-Reduzierung durch den A1000 von EcoDrain..... 37
Abbildung 17: Aufbau des VT1000 von EcoDrain..... 38
Abbildung 18: Patentiertes Design des Power-Pipe 39
Abbildung 19: Anwendung in einem Mehrfamilienhaus..... 39
Abbildung 20: Duschrinne ECOShower von Wagner Solar 41
Abbildung 21: Duschwanne ECOShower von Wagner Solar..... 42
Abbildung 22: Duschrohr ECOShower von Wagner Solar..... 43
Abbildung 23: Vertikale Systeme QB1-21D (links) und QB1-21 (rechts) von Q-Blue 44
Abbildung 24: Q-Blue Multivert mit 4 Rohrwärmetauschern von Q-Blue 45
Abbildung 25: Aufbau der Joulia Inline mit 5 Rohr-Wärmetauschern von Joulia SA. 46
Abbildung 26: Formel aus dem Règlement grand-ducal für den spezifischen Nutzwärmebedarf für Warmwasser 71

Abbildung 27: Formel für den Nutzenergieeintrag infolge der Wärmerückgewinnung aus dem Duschwasser nach DIN V 18599 72
Abbildung 28: Formel für den Nutzungsgrad des Wärmerückgewinnungssystems nach DIN V 18599..... 72
Abbildung 29: Formel aus dem Règlement grand-ducal für den spezifischen Endenergiebedarf für Warmwasser 73
Abbildung 30: Formel aus dem Règlement grand-ducal für den spezifischen Primärenergiebedarf für Warmwasser..... 75
Abbildung 31: Formel aus dem Règlement grand-ducal für die spezifischen CO_2-Emissionen für Warmwasser..... 77

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Spezifischer Nutzwärmebedarf für Warmwasser für Fall 1 ohne Wärmerückgewinnung (Duschrohr) 71
Tabelle 2: Spezifischer Nutzwärmebedarf für Warmwasser für Fall 2 ohne Wärmerückgewinnung (Duschrohr) 71
Tabelle 3: Spezifischer Nutzwärmebedarf für Warmwasser für Fall 1 mit Wärmerückgewinnung (Duschrohr) 72
Tabelle 4: Spezifischer Nutzwärmebedarf für Warmwasser für Fall 2 mit Wärmerückgewinnung (Duschrohr) 73
Tabelle 5: Spezifischer Endenergiebedarf für Warmwasser für Fall 1 ohne Wärmerückgewinnung (Duschrohr) 73
Tabelle 6: Spezifischer Endenergiebedarf für Warmwasser für Fall 2 ohne Wärmerückgewinnung (Duschrohr) 74
Tabelle 7: Spezifischer Endenergiebedarf für Warmwasser für Fall 1 mit Wärmerückgewinnung (Duschrohr) 74
Tabelle 8: Spezifischer Endenergiebedarf für Warmwasser für Fall 2 mit Wärmerückgewinnung (Duschrohr) 75
Tabelle 9: Spezifischer Primärenergiebedarf für Warmwasser für Fall 1 ohne Wärmerückgewinnung (Duschrohr)..... 76
Tabelle 10: Spezifischer Primärenergiebedarf für Warmwasser für Fall 2 ohne Wärmerückgewinnung (Duschrohr) 76
Tabelle 11: Spezifischer Primärenergiebedarf für Warmwasser für Fall 1 mit Wärmerückgewinnung (Duschrohr) 76
Tabelle 12: Spezifischer Primärenergiebedarf für Warmwasser für Fall 2 mit Wärmerückgewinnung (Duschrohr) 77
Tabelle 13: Spezifische CO_2-Emissionen für Warmwasser für Fall 1 ohne Wärmerückgewinnung (Duschrohr)..... 78
Tabelle 14: Spezifische CO_2-Emissionen für Warmwasser für Fall 2 ohne Wärmerückgewinnung (Duschrohr) 78
Tabelle 15: Spezifische CO_2-Emissionen für Warmwasser für Fall 1 mit Wärmerückgewinnung (Duschrohr) 78
Tabelle 16: Spezifische CO_2-Emissionen für Warmwasser für Fall 2 mit Wärmerückgewinnung (Duschrohr) 79

1 Einleitung

Schon lange bevor die Gesellschaft ein besonderes Bewusstsein für die Umwelt und dementsprechend auch für Energieeinsparung beziehungsweise -effizienz entwickelt hat, wurden die ersten Grauwasserwärmetauscher auf den Markt gebracht.

Bereits in den 1980er Jahren wurden in den Niederlanden und der früheren Deutschen Demokratischen Republik (DDR) Duschwannen mit integriertem Wärmetauscher gefertigt. Die Produkte konnten damals jedoch noch nicht überzeugen und im großen Stil verkauft werden.

Die ein wenig in Vergessenheit geratene Technologie der Wärmerückgewinnung aus dem Grauwasser ist in den letzten Jahren wieder mehr in den Vordergrund gerückt. Einzelne Hersteller haben das Energiepotenzial im Abwasser erkannt und immer effizientere Wärmetauscher entwickelt, um dieses Potenzial so gut es geht auszuschöpfen.

Vor allem in Nordamerika ist die Wärmerückgewinnung aus dem Grauwasser (insbesondere dem Duschwasser) schon weit verbreitet und die Technik sehr ausgereift. Man ist von dem positiven Einfluss auf die Energieeffizienz von Gebäuden und den damit verbundenen Energieeinsparungen sowie den reduzierten CO_2-Emissionen überzeugt. Daher ist seit April 2016 die Installation einer Abwasserwärmerückgewinnung in der kanadischen Provinz Manitoba für Neubauten gesetzlich vorgeschrieben. Dies gilt sowohl für Einfamilienhäuser als auch für Mehrfamilienhäuser. Ferner ist im Januar 2017 in Ontario, Kanada, ein Gesetz in Kraft getreten, das die Wärmerückgewinnung aus dem Grauwasser in neu errichteten Einfamilienhäusern vorschreibt. (RenewABILITY)

In Europa gibt es bislang noch keine Gesetzgebung, die den Einbau von Wärmerückgewinnungseinheiten vorschreibt. Dennoch wird nun auch verstärkt ein Augenmerk auf die dezentrale Wärmerückgewinnung aus dem Grauwasser innerhalb von Gebäuden gelegt.

Diese Arbeit befasst sich daher mit der Wärmerückgewinnung aus dem Grauwasser innerhalb von Wohngebäuden. Dabei werden vor allem folgende zwei Schwerpunkte behandelt: die technischen sowie die energetischen Rahmenbedingungen von Grauwasserwärmetauschern.

Im technischen Teil werden die verschiedenen Wärmetauschertypen, aber auch diverse Installationsarten vorgestellt. Außerdem wird die Funktionsweise der Wärmeübertrager, deren Materialien und Lebensdauer sowie die Hygieneproblematik behandelt.

Im energetischen Teil wird erläutert, welcher Wärmeinhalt noch im heißen Grauwasser steckt und wie die Effizienz von Wärmetauschern definiert wird. Des Weiteren befasst sich dieser Teil mit den Faktoren, die den Wirkungsgrad eines Wärmerückgewinnungssystems beeinflussen sowie den unterschiedlichen Ermittlungs- und Bewertungsverfahren der Effizienz.

Neben diesen beiden Hauptpunkten werden verschiedene Produzenten für Duschwasserwärmeübertrager aus Nordamerika und Europa sowie zwei Pilotprojekte vorgestellt. Abschließend wird erläutert, wie solche Wärmerückgewinnungseinheiten in die Wohngebäude der SNHBM integriert werden können. Die Energie- und CO_2-Einsparungen sowie die Amortisationszeit für einen vertikalen Duschwasserwärmetauscher in einem Einfamilienhaus von SNHBM sollen anhand einer Beispielrechnung aufgezeigt werden.

2 Technischer Teil

2.1 Definition von Schmutzwässern

Für die Wärmerückgewinnung mit Hilfe von Wärmetauschern innerhalb von Gebäuden ist nicht jedes Abwasser, sondern nur das Grauwasser, geeignet.

Das Schmutz- beziehungsweise Abwasser, das in Wohngebäuden anfällt, wird in Schwarz- und Grauwasser unterteilt. Unter Schwarzwasser versteht man stark verschmutztes Schmutzwasser, welches mit Fäkalien verunreinigt ist und bei Toiletten entsteht. Grauwasser hingegen wird nach der Europäischen Norm 12056-1 als fäkalienfreies und nur leicht verschmutztes Wasser definiert. Es fällt in der Dusche, dem Waschbecken, der Badewanne oder der Waschmaschine an. Aufgrund der Verschmutzung durch Speiseabfälle sowie Fette zählt das Abwasser der Spülmaschine nicht zum Grauwasser. Die beiden Schmutzwasserarten sollten in Wohngebäuden getrennt gesammelt werden, um mögliche Kontaminationen des Grauwassers durch das Schwarzwasser zu vermeiden. (Hartmann, 2016a)

2.2 Anwendungsgebiete und Bauformen von Wärmetauschern

Grauwasserwärmetauscher werden vor allem dort eingesetzt, wo das Abwasser noch hohe Temperaturen und somit einen hohen, nutzbaren Energieinhalt besitzt. Zusätzlich ist die Wärmerückgewinnung sinnvoll, wenn große Mengen an Abwässern anfallen. Neben der Anwendung in Wohnhäusern kommt somit auch der Einsatz in der Industrie infrage. Hier wäre beispielsweise die Textilindustrie mit ihren Wäschereien zu nennen, wo viele Abwässer mit hohen Temperaturen anfallen. Darüber hinaus sind öffentliche Schwimmbäder prädestiniert dafür, um die Wärme dem Duschabwasser oder dem verbrauchten Wasser der Schwimmbecken zu entziehen. Bei einem durchschnittlichen täglichen Grauwasseranfall von rund 30.000 Litern in einem Schwimmbad und Wassertemperaturen zwischen 25 und 41 °C kann es sinnvoll sein, über eine Wärmerückgewinnung nachzudenken. (Niewitecka, 2018)

Im englischsprachigen Raum spricht man bei der Wärmerückgewinnung aus dem Grauwasser von „Drain Water Heat Recovery“, kurz DWHR. Manche Autoren verwenden auch den Begriff „Greywater Heat Recovery“.

Die zwei üblichen Bauformen für Grauwasserwärmetauscher sind vertikale und horizontale Wärmetauscher.

Horizontale Grauwasserwärmetauscher werden hauptsächlich außerhalb von Gebäuden in das Abwasserkanalnetz eingebaut (siehe Abb. 1). Besonders in der Schweiz ist diese Technik schon weit verbreitet und wird dort auch eingehend erforscht.

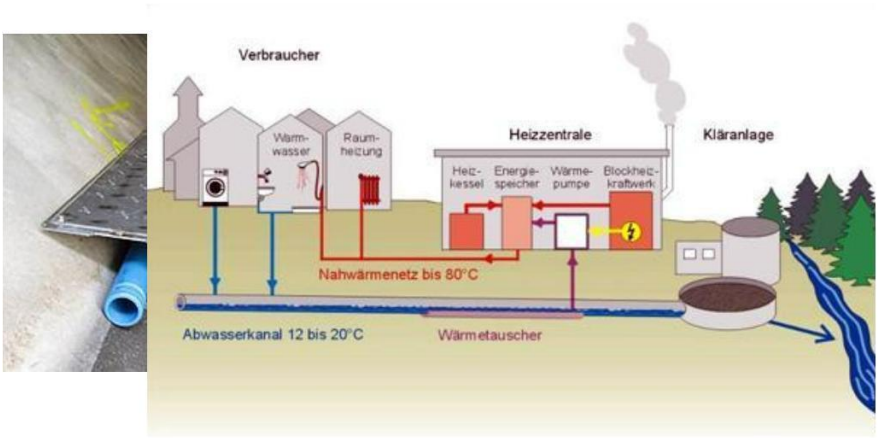

Abbildung 1: Horizontaler Wärmetauscher im Abwasserkanal

Quelle: https://www.eneff-schule.de/index.php/demonstrationsobjekte/best-practice-beispiele-/tuebingen.html

Die vertikalen Wärmetauscher eignen sich vor allem für die Anwendung in Gebäuden (siehe Abb. 2). Aktuell werden sie, vor allem in Europa, noch nicht so oft eingebaut wie die oben genannten horizontalen Wärmetauscher im Kanalnetz. Es gibt jedoch bereits mehrere Hersteller in Europa und Nordamerika, die solche Apparaturen anbieten. Zudem wurden und werden Pilotprojekte in verschiedenen Ländern durchgeführt, die die Erforschung der Effizienz und der optimalen Anwendungsmöglichkeiten der vertikalen Wärmetauscher in Wohngebäuden zum Ziel haben.

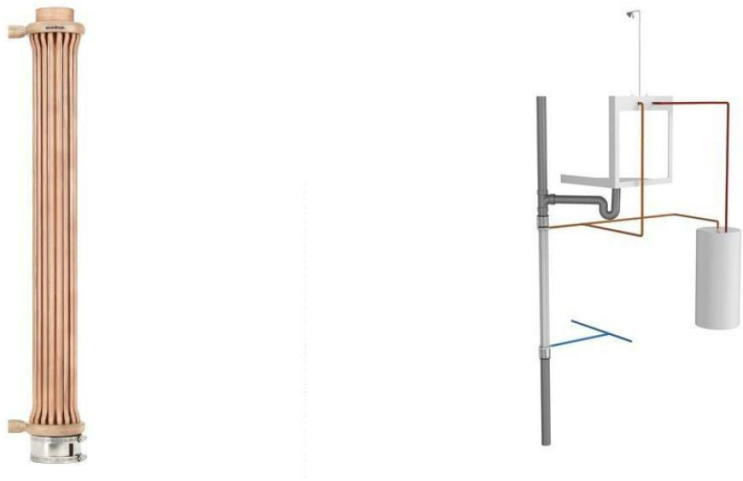

Abbildung 2: Vertikaler Grauwasserwärmetauscher

Quelle: https://ecodrain.com/en/products/VT1000/

Auch die Wärmenutzung kann prinzipiell variieren. Auf Abbildung 1 ist die Wärme aus dem Grauwasser als Wärmequelle für eine Wärmepumpe zu sehen. Abbildung 2 stellt die direkte Nutzung der zurückgewonnenen Wärme zur Warmwassererwärmung dar.

Neben der Ausrichtung des Wärmetauschers und der Wärmenutzung kann man zusätzlich zwischen Platten- und Doppelrohrwärmetauschern unterscheiden.

Plattenwärmetauscher bestehen, wie der Name es bereits sagt, aus mehreren Platten, die nur einen geringen Abstand zueinander haben. Man spricht auch von einem Plattenpaket mit einer Anschlussplatte am Anfang und einer Abschlussplatte am Ende. Die Platten dazwischen werden Kanalplatten genannt und dienen der Wärmeübertragung. Das warme und das kalte Medium fließen nun abwechselnd (räumlich gesehen) durch das Plattenpaket, damit sie sich nicht vermischen können. Zunächst gibt das warme Medium bei der Durchströmung seine Wärme an die Platten ab. Fließt anschließend das kalte Wasser hindurch, nimmt dieses die Wärme auf. Somit handelt es sich um ein rekuperatives Wärmerückgewinnungssystem. Plattenwärmetauscher werden beispielsweise horizontal in das Abwasserkanalnetz eingebaut. (siehe Abb. 3)

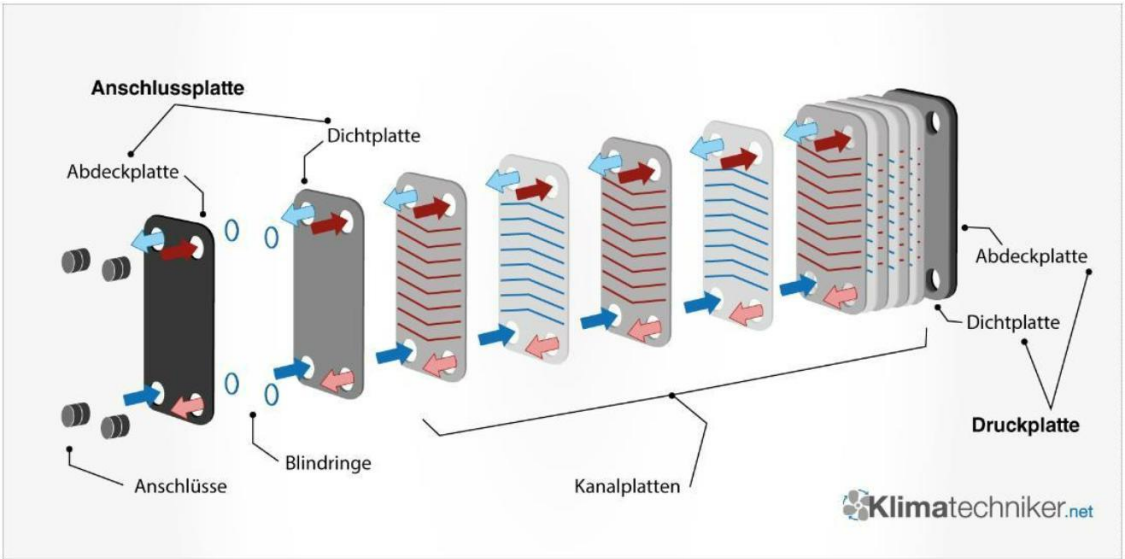

Abbildung 3: Aufbau eines Plattenwärmetauschers

Quelle: https://www.klimatechniker.net/magazin/plattenwaermetauscher-20163421

Doppelrohrwärmetauscher, oder auch Mantelrohrwärmetauscher genannt, bestehen aus einem Innen- und einem Außenrohr, die koaxial sind. Zwischen den Rohren befindet sich ein kleiner Spalt. Durch das Innenrohr fließt das warme Medium und gibt seine Wärme an das durch den Spalt zwischen den Rohren fließende Medium ab. Diese Bauweise wird verstärkt für vertikale Grauwasserwärmetauscher angewandt. Sie ist im Vergleich zum Plattenwärmetauscher aufgrund des einfacheren Aufbaus meist kostengünstiger.

Die dritte Variante ist ein Wärmetauscher mit einem Innenrohr und einem Außenrohr, das spiralförmig um das innere Rohr gelegt wird. Während einige Hersteller bei dem Bau von vertikalen Grauwasserwärmetauschern auf Doppelrohrwärmeübertrager setzen, so gibt es auch Produkte mit der letztgenannten Konfiguration.

Je nachdem wie groß die Volumenströme des kalten und heißen Mediums durch den Wärmeübertrager sind, unterscheidet man zwischen dem balancierten und nicht balancierten Betrieb. Im balancierten Betrieb sind der Abwasservolumenstrom und der Kaltwasservolumenstrom gleich groß. Im nicht balancierten Betrieb sind die beiden Ströme jedoch nicht identisch. Die meisten Grauwasserwärmetauscher funktionieren im balancierten Betrieb.

2.3 Funktionsweise von Wärmetauschern

Grundsätzlich haben sowohl die horizontalen als auch die vertikalen Wärmetauscher die Aufgabe, die Wärmeenergie aus dem Abwasser an das kalte Frischwasser oder an ein anderes Medium zu übertragen und es somit vorzuerhitzen.

Die Funktionsweise eines Grauwasserwärmetauschers wird im Folgenden am Beispiel einer vertikalen Apparatur für die Anwendung in der Dusche erläutert. In Wohngebäuden sind die vertikalen Grauwasserwärmetauscher zumeist Wasser-Wasser-Wärmetauscher. Das bedeutet, dass sowohl das warme Medium, welches seine Wärme abgibt, als auch das kalte Medium, welches die Wärme aufnimmt, Wasser sind. Das warme Grauwasser, also der Abfluss aus der Dusche, fließt durch ein vertikales Rohr nach unten. Das kalte Wasser fließt von unten nach oben durch ein oder mehrere Rohre, welche um das Grauwasserrohr gelegt werden. Die Anordnung beziehungsweise das Design kann je nach Hersteller variieren. Nun kommt es durch die Temperaturdifferenz zwischen dem heißen und kalten Wasser zu einer Wärmeübertragung. Das kalte Wasser wird dabei erhitzt. (siehe Abb. 4)

Das belastete Grauwasser und das unbelastete Frischwasser sind hydraulisch getrennt (durch zwei getrennte Rohre). Somit können sich die beiden Wässer nicht mischen und die Trinkwasserqualität bleibt hygienisch unbedenklich.

Zumeist fließen das warme und kalte Wasser gegenstromförmig durch den Grauwasserwärmetauscher. Das bedeutet, dass die beiden Flüssigkeiten in entgegengesetzter Richtung durch die Apparatur und so aneinander vorbei strömen. Das warme Grauwasser fließt, wie oben bereits erwähnt, von oben nach unten und kaltes Frischwasser wird von unten nach oben durch das Rohr gepumpt.

In der Regel liegt die durchschnittliche Grauwassertemperatur von Duschen bei circa 30 bis 35 °C. Das kalte Frischwasser gelangt mit etwa 10 °C in die Leitung, wobei es im Sommer auch etwas wärmer sein kann. Das Kaltwasser kann je nach Hersteller und Effizienz um 10 bis 15 °C auf rund 20 bis 25 °C vorerwärmt werden. Wenn man nun von einer geforderten Warmwassertemperatur von 40 °C ausgeht, benötigt man

durch die Vorerwärmung des Kaltwassers deutlich weniger Heißwasser (circa 60 °C) zur Beimischung als ohne Wärmerückgewinnung. (Hartmann, 2016b)

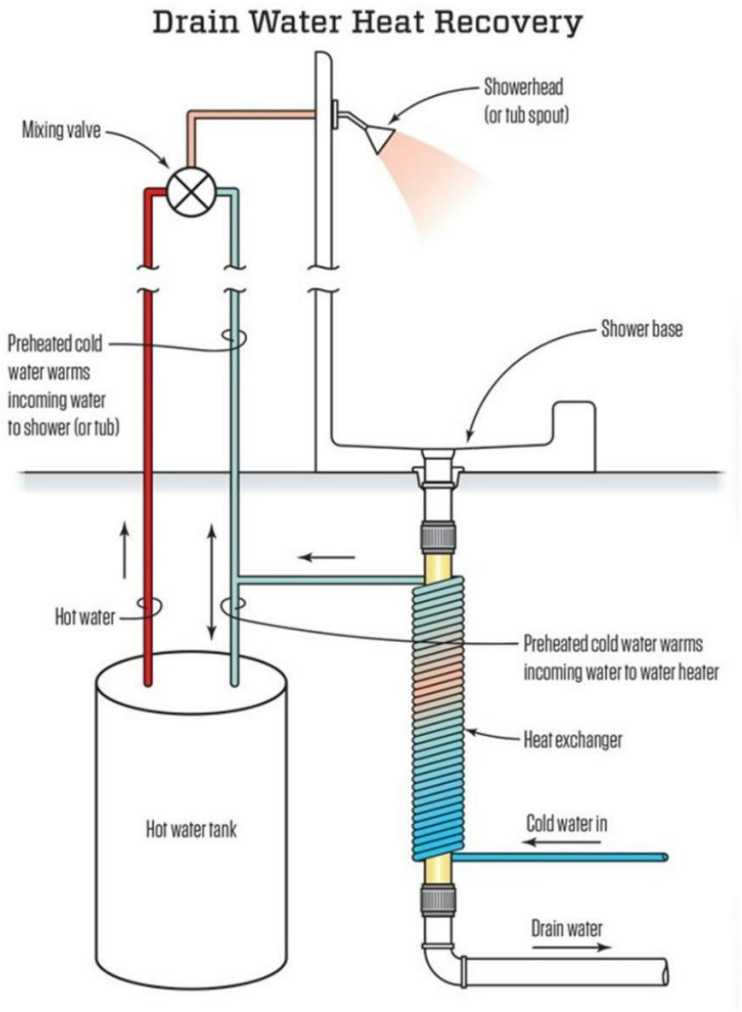

Abbildung 4: Funktionsweise eines vertikalen Grauwasserwärmetauschers

Quelle: https://www.jlconline.com/how-to/plumbing/wastewater-heat-recovery-systems_o

Ein wesentlicher Unterschied zwischen dem horizontalen und vertikalen Wärmetauscher ist die Art und Weise, wie das Grauwasser durch das Rohr fließt.

In einem horizontalen Rohr bildet sich eine dicke Wasserschicht, die je nach Füllstand nur den unteren Teil des Rohres abdeckt (siehe Abb. 5 rechts). Im Gegensatz dazu „fällt“ das Wasser bei einem vertikalen Wärmetauscher aufgrund der Schwerkraft sozusagen nach unten durch das Rohr. Dabei bildet sich ein dünner, meist nur ein paar Millimeter dicker Film an der Innenseite des Rohres. Dies sieht dann aus wie ein schmaler Wasserring innerhalb des Rohres. Dieser Effekt wird auch der „Falling film effect“ genannt (siehe Abb. 5 links). Der Vorteil dabei ist, dass durch die ringförmige

Wasserschicht, die durchgehend die Innenoberfläche des Rohres berührt, die Kontaktfläche zwischen dem Wasser und dem Rohr maximal ist. Dadurch kann auch mehr Wärme übertragen werden, als dies bei einer horizontalen Ausrichtung des Rohres möglich wäre (bei jeweils gleicher Warmwassertemperatur).

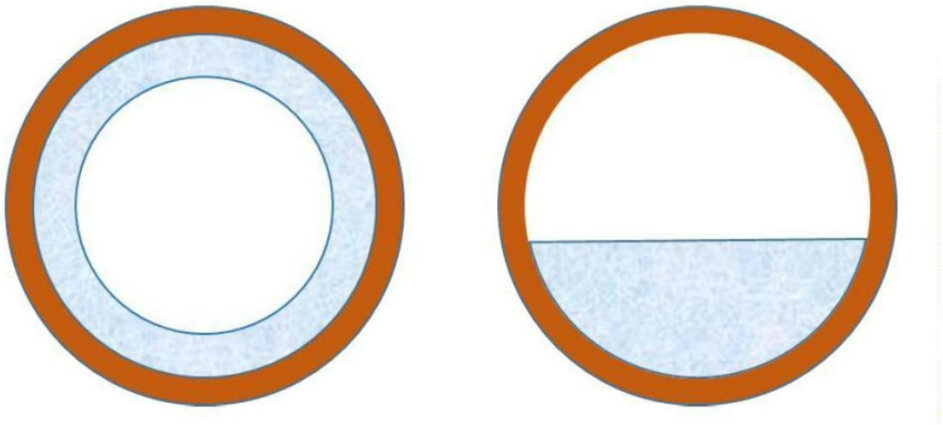

Abbildung 5: Wasserfluss durch ein vertikales (links) und ein horizontales (rechts) Rohr

Quelle: Garcia, 2016

2.4 Prinzipien der Wärmeübertragung

Die Wärmeübertragung vom heißen auf das kalte Medium findet sowohl konvektiv als auch konduktiv statt (siehe Abb. 6).

Unter Konvektion, oder auch Wärmeströmung genannt, versteht man die energetische Wärmeübertragung von einem strömungsfähigen Medium auf ein anderes Medium. Hierbei kommt es dann zu einem Temperaturausgleich zwischen den beiden Medien. Im Falle des Grauwasserwärmetauschers stellt das Grauwasser das strömungsfähige Medium dar, das seine Wärme an die Oberfläche des Innenrohres abgibt, durch das es fließt. Strömt das kalte Frischwasser an dem erhitzten Innenrohr vorbei, so wird es durch Konduktion beziehungsweise Wärmeleitung erwärmt. Damit ist der Wärmefluss zwischen zwei Medien gemeint, der aufgrund des vorherrschenden Temperaturunterschiedes stattfindet. Er findet, gemäß des zweiten Hauptsatzes der

Thermodynamik, stets vom heißen in Richtung des kalten Mediums statt. (wikipedia.de)

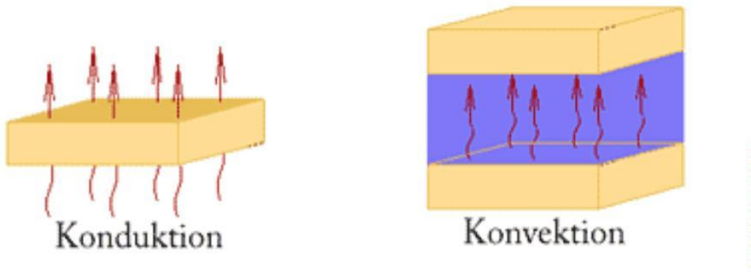

Abbildung 6: Veranschaulichung der Wärmeübertragungsprozesse

Quelle: http://www.klein-zimmerei.de/wp-content/uploads/2013/02/Sol_07.gif

2.5 Möglichkeiten für den Einbau

Grundsätzlich unterscheidet man zwischen zwei Arten des Einbaus: zum einen die Wärmerückgewinnung, die sofort im Abfluss der Dusche stattfindet, und zum anderen jene, bei der das Grauwasser zunächst zentral von mehreren Anwendungen gesammelt wird, um dann die Wärme zu entziehen. Beide Varianten werden im Folgenden etwas ausführlicher behandelt.

Die kleinstmögliche Ausführung eines Grauwasserwärmetauschers in einem Wohngebäude ist die dezentrale Wärmerückgewinnung direkt im Abfluss der Dusche, die auf Abbildung 7 veranschaulicht wird. Diese kann horizontal erfolgen, indem man den Wärmetauscher direkt in die Duschwanne einbaut. Es besteht aber auch die Möglichkeit, den Wärmetauscher vertikal in das Grauwasserabflussrohr der Dusche einzubauen. Die Systeme beruhen auf dem Prinzip der Gleichzeitigkeit. Das bedeutet, dass Warmwasserentnahme, also der Bedarf, zeitlich mit der Abwasserableitung korreliert. Bei beiden Einbauvarianten ist somit kein Grauwasserspeicher notwendig, da das Grauwasser seine Wärme unmittelbar nach dem Abfluss an das kalte Frischwasser abgibt.

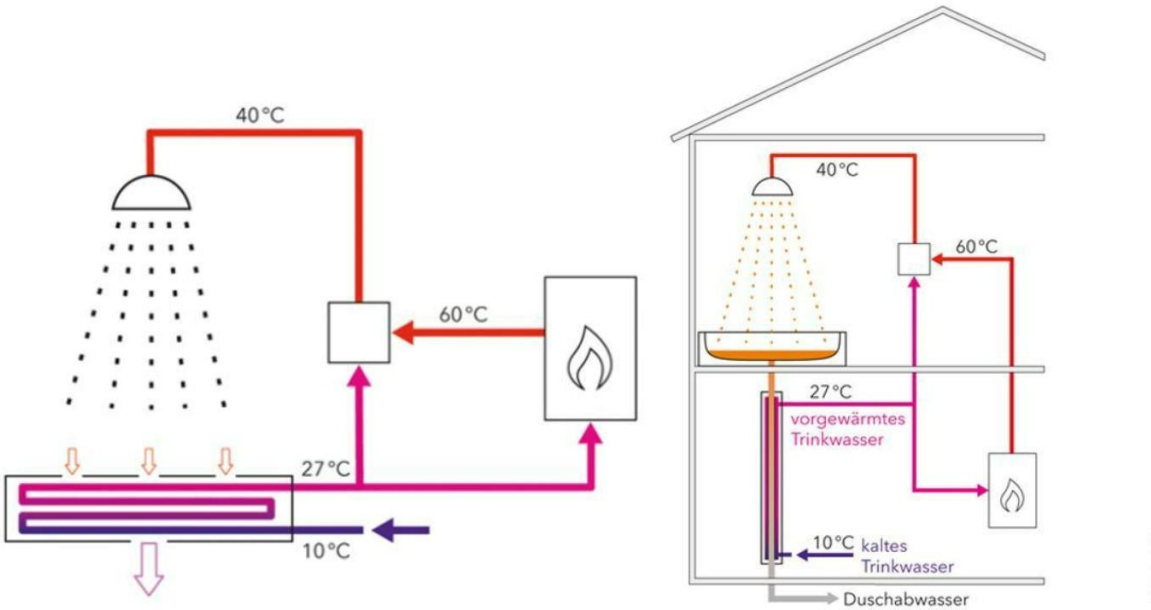

Abbildung 7: Wärmerückgewinnung im Abfluss der Dusche, horizontal (links) und vertikal (rechts)

Quelle: https://www.wagner-solar.com/de/wrg/waermerueckgewinnung

Es gibt aber auch die Möglichkeit einer zentralen Einheit, die dann das Grauwasser mehrerer Verbraucher sammelt und daraus die Wärme zurückgewinnt. Dies kann einerseits in einem Einfamilienhaus erfolgen, bei dem das Grauwasser, das sowohl im Sanitärbereich (außer der Toilettenspülung) als auch bei der Wasch- oder Spülmaschine anfällt, gesammelt wird. In einem Mehrfamilienhaus werden die Grauwässer der verschiedenen Mietparteien zusammengeführt (siehe Abb. 8). Hier wird dann ein Speicher benötigt, um das abfließende Abwasser zu speichern. Voraussetzung für diese Konfiguration ist selbstverständlich, dass das Grauwasser und das Schwarzwasser getrennte Abflüsse haben und sich innerhalb des Gebäudes zu keinem Zeitpunkt vermischen können.

Ein Speichersystem muss zudem vorgesehen werden, wenn der Bedarf an Warmwasser und der Abfluss von Grauwasser nicht gleichzeitig vonstattengehen. Dies ist beispielsweise bei Wasch- oder Geschirrspülmaschinen der Fall.

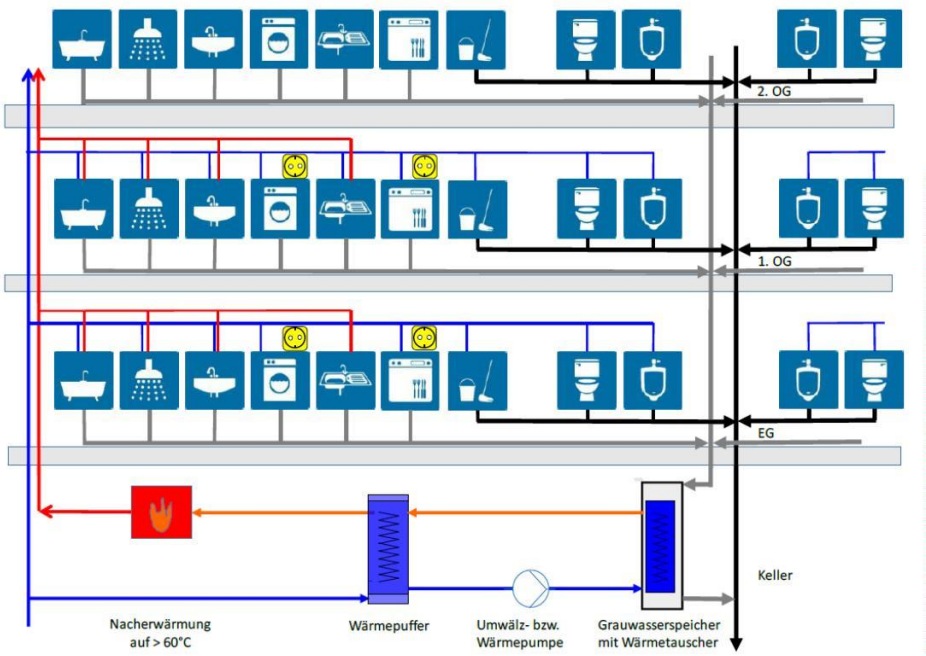

Abbildung 8: Wärmerückgewinnung in einem Mehrfamilienhaus

Quelle: Nolde, 2016

2.6 Möglichkeiten der Installation

Grundsätzlich gibt es drei Varianten, um einen Grauwasserwärmetauscher an das Abwassersystem eines Gebäudes anzuschließen.

Die erste Möglichkeit besteht darin, das vorerhitzte Kaltwasser ausschließlich dem Warmwasserbereiter zuzuführen. Ein Teil des kalten Frischwassers fließt direkt zum Kaltwasserzufluss der Dusche. Der andere Teil fließt durch den Wärmetauscher, wird dort vorerwärmt und gelangt in den Warmwasserbereiter. Hier wird weniger Energie benötigt, um das Wasser komplett zu erhitzen, da dieses ja bereits vorerwärmt wurde. (siehe Abb. 9 links)

Bei der zweiten Konfiguration, auf Abbildung 9 in der Mitte, wird das vorerhitzte Kaltwasser nur der kalten Seite der Dusche zugeführt. Somit hat das Kaltwasser bereits eine höhere Temperatur im Vergleich zu einem System ohne Wärmerückgewinnung. Dadurch verringert sich die Menge an Heißwasser, die aus dem Warmwasserbereiter kommt und dem Kaltwasser beigemischt wird.

Die dritte Anwendung ist gewissermaßen eine Kombination aus den beiden vorherigen Systemen und vereint deren Vorzüge. Hier wird nun das komplette Kaltwasser durch

den Wärmetauscher geleitet. Das vortemperierte Wasser fließt anschließend sowohl in den Warmwasserbereiter als auch direkt zu der kalten Seite der Dusche (siehe Abb. 9 rechts). Das kalte Wasser, das in den Warmwasserbereiter gelangt, hat bereits eine höhere Temperatur und es wird somit weniger Energie zum vollständigen Aufheizen gebraucht. Außerdem benötigt man nur eine reduzierte Menge an heißem Wasser an der warmen Seite der Dusche, weil das Kaltwasser auch schon vorerwärmt wurde. Somit ist die Effizienz des Systems im Vergleich zu den anderen beiden Lösungen höher.

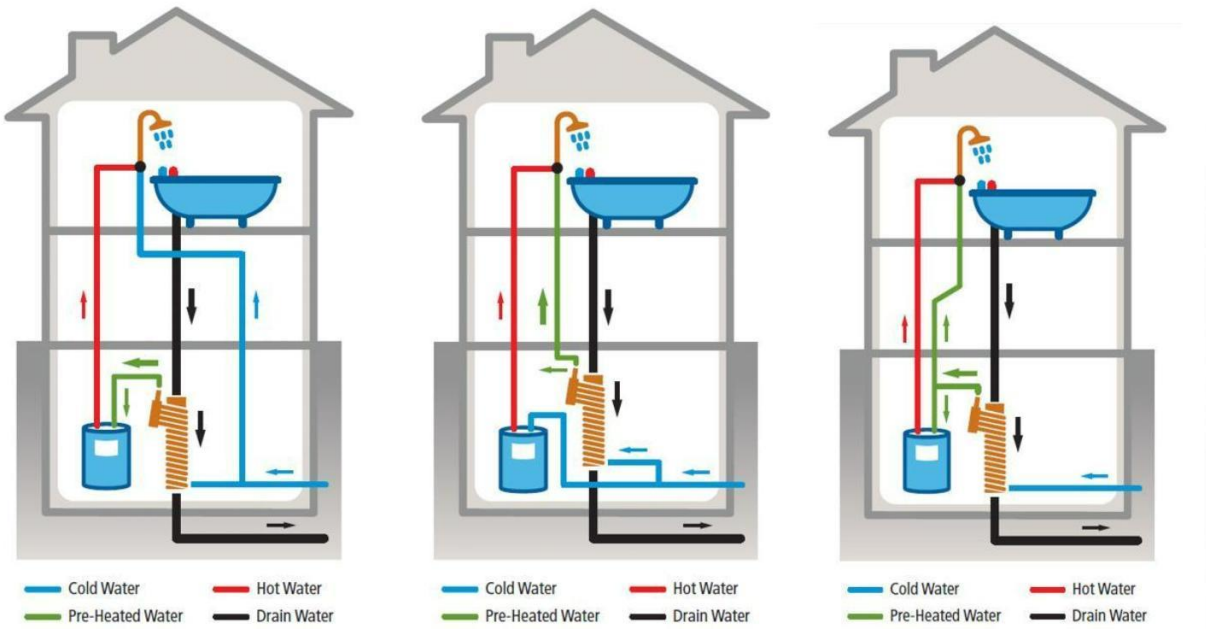

Abbildung 9: Erhitzung des Kaltwassers des Warmwasserbereiters (links), Erhitzung des Kaltwassers der Dusche (Mitte), Erhitzung beider (rechts)

Quelle: http://renewability.com/home-construction/

Die letzte Kombination stellt also eindeutig den Optimalfall dar und ist die energieeffizienteste Lösung. Falls jedoch aus praktischen, baulichen Gründen ein solches System nicht realisierbar ist, so kann man dennoch die weniger effiziente Variante 1 oder Variante 2 als Wärmetauscher einbauen. In beiden Fällen sinkt jedoch, laut Herstellerangaben, die Effizienz um 26 Prozent. (RenewABILITY)

Ein besonderer Fall stellt noch die Kombination einer Grauwasserwärmerückgewinnung mit einer Wärmepumpe dar, der auf Abbildung 10 zu sehen ist. Das Ziel ist es, mit Hilfe der Wärmepumpe dem Grauwasser noch mehr

Wärme zu entziehen, als es mit einem Wärmetauscher möglich wäre. Die Wärme des Grauwassers liefert die nötige Energie am Verdampfer, damit das Kältemittel der Wärmepumpe verdampfen kann.

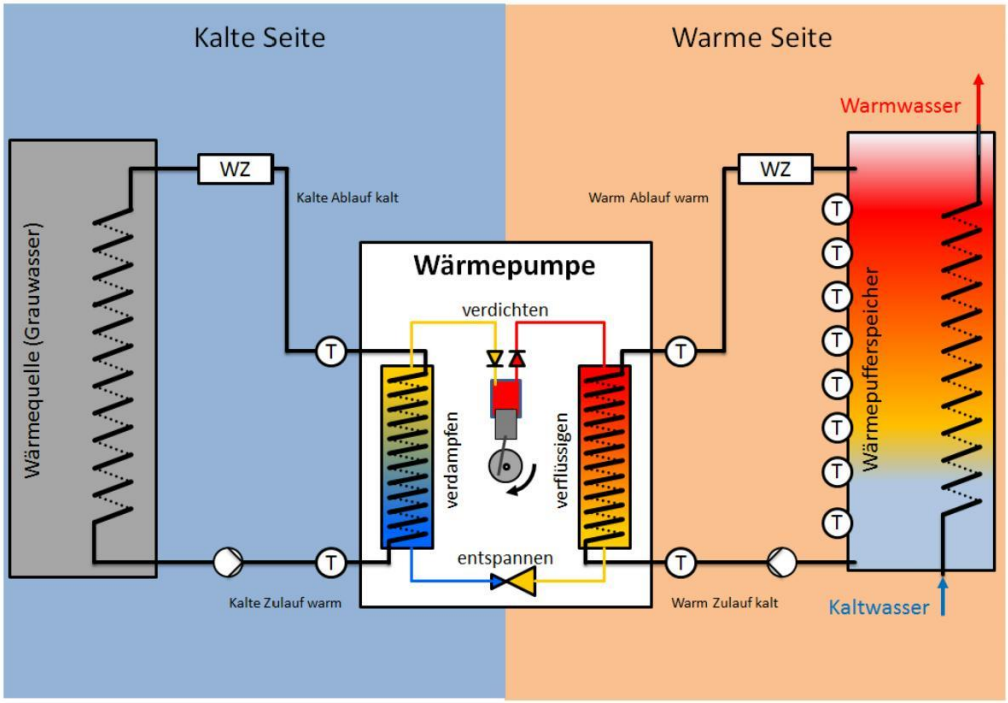

Abbildung 10: Wärmerückgewinnung in Kombination mit Wärmepumpe

Quelle: Nolde, 2016

Diese Konfiguration ist jedoch nicht geeignet für die Wärmerückgewinnung aus dem Grauwasser, wenn diese ausschließlich von der Dusche kommt. Das Problem ist nämlich, dass bei einem reinen Duschabfluss der Wasserfluss nur diskontinuierlich ist. Es fällt also immer nur dann Grauwasser an, wenn eine Person duscht. Eine Lösung wäre das Sammeln und Speichern verschiedener Grauwasserquellen wie der Dusche, der Waschmaschine oder der Spüle. Dadurch wird der Wasserfluss gleichmäßiger und die Wärmepumpe kann zuverlässiger und dauerhafter arbeiten. Diese Technik ist noch nicht viel erforscht worden, daher gibt es noch keine richtigen Erfahrungswerte, ob und unter welchen Rahmenbedingungen sie am besten funktioniert.

2.7 Materialien der Wärmetauscher

Die Rohre der Wärmetauscher werden hauptsächlich aus Kupfer hergestellt. Das Metall ist ein sehr guter Wärmeleiter. Die Wärmeleitfähigkeit λ liegt bei 401 W/(m*K). Zudem besitzt es ein hervorragendes Korrosionsverhalten und ist somit sehr

widerstandsfähig. Vor allem bei Wärmetauschern, die nur mit leicht verschmutztem Grauwasser aus der Dusche in Kontakt kommen, können die Rohre aus Kupfer sein. Einige Hersteller setzen alternativ Edelstahl ein, der auch sehr korrosionsbeständig ist. Bei diesem Werkstoff ist die Wärmeleitfähigkeit λ jedoch deutlich geringer als bei Kupfer und beträgt nur 15 W/(m*K). Edelstahlrohre werden bevorzugt bei Wärmetauschern eingesetzt, die auch stärker verschmutztem Grauwasser von Waschmaschinen oder Spülmaschinen die Wärme entziehen. Hier können Kupferrohre nämlich trotz der guten Korrosionsbeständigkeit angegriffen werden. Abbildung 11 zeigt beispielsweise ein Kupferrohr, welches drei Jahre in Kontakt mit stärker belastetem Grauwasser stand und dadurch korrodiert ist. Folglich eignet sich in diesen Fällen ein Wärmetauscher aus Edelstahl besser, auch wenn man dann Einbußen in der Wärmeübertragung akzeptieren muss. (Nolde, 2016)

Abbildung 11: Korrosion an einem Kupferrohr durch Kontakt mit Grauwasser

Quelle: Nolde, 2016

2.8 Lebensdauer und Wartung

Der Wärmetauscher selbst verfügt über keinerlei bewegliche Teile und ist daher weitestgehend wartungsfrei. Es ist jedoch von Vorteil, die Apparatur, wenn möglich, so einzubauen, dass man noch leicht herankommt, sollte dennoch mal ein Problem auftreten. Literaturwerten zufolge haben Grauwasserwärmetauscher eine Lebensdauer von rund 40 bis 50 Jahren (Canadian Mortgage and Housing Corporation, 2012).

Wichtig für eine gute Wärmeübertragung ist, dass die Rohre so sauber wie möglich sind. Wenn sich nach gewisser Zeit nämlich ein Biofilm oder Verunreinigungen

festsetzen, verschlechtert sich die Effizienz der Wärmetauscher. Die vertikalen Wärmetauscher, die direkt im Duschabfluss integriert sind, sind nur wenig anfällig für Verschmutzungen. Hier reinigt bereits das warme Duschwasser gemischt mit der Seife das Innenrohr. Ein horizontal eingebauter Wärmetauscher in der Duschwanne kann regelmäßig im Rahmen der Reinigung des Siphons mit einer Reinigungslösung gespült werden. Hierfür genügt es, das Präparat in den Siphon zu geben und danach etwas Wasser laufen zu lassen.

Wärmetauscher, die nicht nur Duschwasser, sondern auch stärker belastetes Grauwasser aus anderen Anwendungen führen, sind natürlich auch anfälliger für Verschmutzungen. Um diese so gering wie möglich zu halten, sollten im Zulauf bereits Fette und andere Störstoffe oder Schmutzpartikel mit Hilfe von Fettabscheidern sowie Sieben zurückgehalten werden.

Bei der Konfiguration, wo das Grauwasser an einer zentralen Stelle gesammelt wird, ist es wichtig, die Rohre, die das Abwasser transportieren, hinreichend zu isolieren. Je länger nämlich der Weg vom Verbraucher bis zum Speicher dauert, desto mehr Wärme kann unterwegs verloren gehen.

2.9 Hygiene und Legionellen

Die Hygiene spielt in der Trinkwasserversorgung eine sehr große Rolle. Daher ist es den Herstellern auch vorgeschrieben, dass das Grauwasser und das frische Kaltwasser zu jeder Zeit innerhalb des Wärmetauschers voneinander getrennt sind. Doch nicht nur die Verunreinigung durch das Abwasser kann zu einem hygienischen Problem führen. Auch das Auftreten von Legionellen kann gefährlich werden.

Legionellen sind kleine Bakterien, die bei Menschen zu schweren Lungenerkrankungen führen können. Die optimalen Bedingungen für deren Bildung sind Temperaturen zwischen 25 und 50 °C sowie lange Standzeiten des Wassers (Joulia SA, 2020b). Besonders gefährdet in Wohngebäuden sind demnach Warmwasserspeicher oder -leitungen. Dennoch können auch Kaltwasserleitungen mit einer erhöhten Legionellenkonzentration belastet sein, falls das Wasser hier lange stagniert und sich durch äußere Einflüsse erhitzt. Die Bakterien werden bei Temperaturen von 60 bis 65 °C abgetötet.

Bei der Wärmerückgewinnung aus dem Grauwasser sind vor allem die Abwasserspeicher, die in zentralen Systemen eingesetzt werden, potentiell gefährdet (vergleiche Abschnitt 2.5). Dort kann es passieren, dass das warme Wasser über einen längeren Zeitraum gespeichert wird und sich Legionellen bilden. So kann die Temperatur bei hohen Durchflüssen durchaus im kritischen Bereich liegen. Jedoch würde das Wasser in diesem Falle nicht stagnieren. Andernfalls wird das Grauwasser aufgrund von fehlendem Warmwasserbedarf lange gespeichert. Hier würde die Temperatur jedoch nach einiger Zeit wegen der Verluste soweit fallen, dass kein Risiko mehr besteht. Generell kann man jedoch sagen, dass eine Legionellenbildung im Grauwasserspeicher hygienisch relativ unbedenklich ist, weil das Grauwasser nie mit dem frischen Trinkwasser in Kontakt kommt.

In einer dezentralen Einheit, die lediglich die Wärme aus dem Duschabwasser zurückgewinnt und nach dem Durchflussprinzip funktioniert, ist die Gefahr einer Kontamination durch Legionellen sehr gering. Auch hier kann das kalte Frischwasser nach der Wärmeübertragung Temperaturen von über 25 °C annehmen. Dieser Zustand besteht jedoch nur für eine kurze Zeit. Außerdem ist das Wasser stets am Fließen und stagniert nicht.

Um dennoch jegliches Risiko einer Legionellenbildung zu minimieren, können folgende Voraussetzungen bei der Installation geschaffen werden (bei einer dezentralen Installation):

- Der Wärmetauscher sollte, wenn möglich, nicht isoliert sein, damit er sich schneller abkühlen kann. Dadurch wird verhindert, dass das Wasser lange auf einem höheren Temperaturniveau bleibt.
- Der Wärmeübertrager darf nicht in beheizten Schächten installiert werden. Diese Bedingung gilt hauptsächlich für vertikale Systeme. Bei horizontalen Einheiten, die direkt in der Duschrinne eingebaut werden, besteht dieses Problem ohnehin nicht.
- Es ist von Vorteil, wenn die Rohre, durch die das Trinkwasser fließt, aus Kupfer sind. Neben den energetischen Vorzügen dieses Werkstoffes hat das Material keimtötende Eigenschaften. Außerdem kann sich auf Kupfer schwieriger ein Biofilm absetzen.

- Bei Systemen mit kleinen Toträumen (Stellen in der Rohrleitung, in denen sich Wasser ablagern kann) sollte das vorgewärmte Wasservolumen nicht mehr als ein Liter betragen. Bei Wärmetauschern ohne Toträume sollte der Inhalt maximal vier Liter betragen. Dies sind Installationsempfehlungen aus den Niederlanden. (Joulia SA, 2020b)

2.10 Druckverlust über dem Wärmetauscher

Der Druckverlust in Trinkwasserleitungen von Wohngebäuden darf nicht zu hoch sein. Ansonsten besteht das Risiko, dass das Wasser bei Bedarf nicht mehr ausreichend aus den Entnahmestellen fließt und es somit zu Durchflussproblemen kommt.

Wenn die Rohrleitungen aufgrund einer Wärmetauscherinstallation verlängert werden müssen, führt dies zu einem Druckabfall im Wasserleitungssystem. Zudem stellt der Grauwasserwärmeübertrager einen zusätzlichen Widerstand im Verteilungsnetz dar und reduziert den Druck ebenfalls.

Die Hersteller versuchen stets, den Druckverlust über ihren Einheiten so gering wie möglich zu halten, indem sie zum Beispiel mehrere Außenrohre anbringen. Bei den meisten handelsüblichen Systemen liegt der Druckverlust bei einer Durchflussmenge von 12,5 l/min deutlich unter einem bar (je nach Ausführung ungefähr zwischen 0,2 und 0,6 bar), also unter 10^5 Pa. Bei einem durchschnittlichen Wasserdruck in einem Einfamilienhaus von 5 bar ist dieser Wert durchaus akzeptabel.

Bei der Planung sind die möglichen Druckverluste zu berücksichtigen, damit es im Nachhinein keine Probleme bei der Wasserentnahme gibt. Auch sollte man in den Herstellerangaben neben der Effizienz auch den Druckverlust beachten und bei zwei Produkten mit identischem Wirkungsgrad jenes mit dem geringeren Druckabfall wählen.

3 Energetischer Teil

In den letzten Jahren ist der Energiebedarf auf der ganzen Welt gestiegen und er wird sich voraussichtlich auch weiterhin erhöhen. In einigen Ländern machen alleine die Gebäude bis zu 32 % des gesamten Energieverbrauches aus (Garcia, 2016). In der EU liegt der Anteil der Gebäude sogar bei 40 % (Europäische Kommission, 2020). Somit kann man sagen, dass die Gebäude einen großen Einfluss auf den Ressourcenverbrauch haben. Es ist also wichtig, den Energiebedarf, aber auch die CO_2-Emissionen so gut es geht mit Hilfe von modernen Technologien wie der Wärmerückgewinnung aus dem Grauwasser zu senken.

Vor dem Hintergrund des „European Green Deal“ mit dem Ziel, bis 2050 europaweit klimaneutral zu werden, ist die Energieeffizienz von Gebäuden ein wichtiger Schritt in diese Richtung. Aus diesem Grund schreibt die europäische Richtlinie 2010/31/EU über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden allen Mitgliedsstaaten vor, dass ab 2021 alle neuen Gebäude dem Niedrigstenergiehausstandard („Nearly Zero Energy Building“) entsprechen müssen.

In Luxemburg ist bereits seit dem 1. Januar 2017 der Passivhausstandard (Energieeffizienzklasse A beziehungsweise B im Energiepass) für jedes neu errichtete Gebäude gesetzlich vorgeschrieben.

Die Energie in Wohngebäuden wird hauptsächlich zur Raumheizung- beziehungsweise Raumkühlung und zur Warmwasserbereitung benötigt. In den letzten Jahren wurde die Gebäudehülle jedoch qualitativ immer hochwertiger, wie zum Beispiel durch bessere Dämmungen. Man kann feststellen, dass je höher der Standard der Häuser ist, desto geringer wird der Wärmeenergiebedarf für die Heizung und die Kühlung. Der Bedarf für die Warmwasserbereitung ist jedoch unabhängig von der Gebäudehülle und bleibt somit relativ stabil auf einem konstanten Niveau. Während der Anteil der Wärmeenergiemenge für die Heizung in Wohngebäuden also gesunken ist, so ist jener für das Warmwasser stetig gestiegen.

Abbildung 12 zeigt diesen Trend beispielhaft für die Schweiz. In Luxemburg kann man grundsätzlich von dem gleichen Phänomen ausgehen, da auch hierzulande neue Gebäude dem Passiv- beziehungsweise dem Niedrigstenergiehausstandard entsprechen. Hat das Warmwasser in Gebäuden vor 1975 noch einen Anteil von 10 % an der gesamten Wärmeenergiemenge gehabt, so liegt dieser bei modernen Minergie

P-Häusern (Bezeichnung für Niedrigstenergiehäuser in der Schweiz, die den höchsten Ansprüchen an Energie, Komfort und Qualität genügen) bereits bei 73 %.

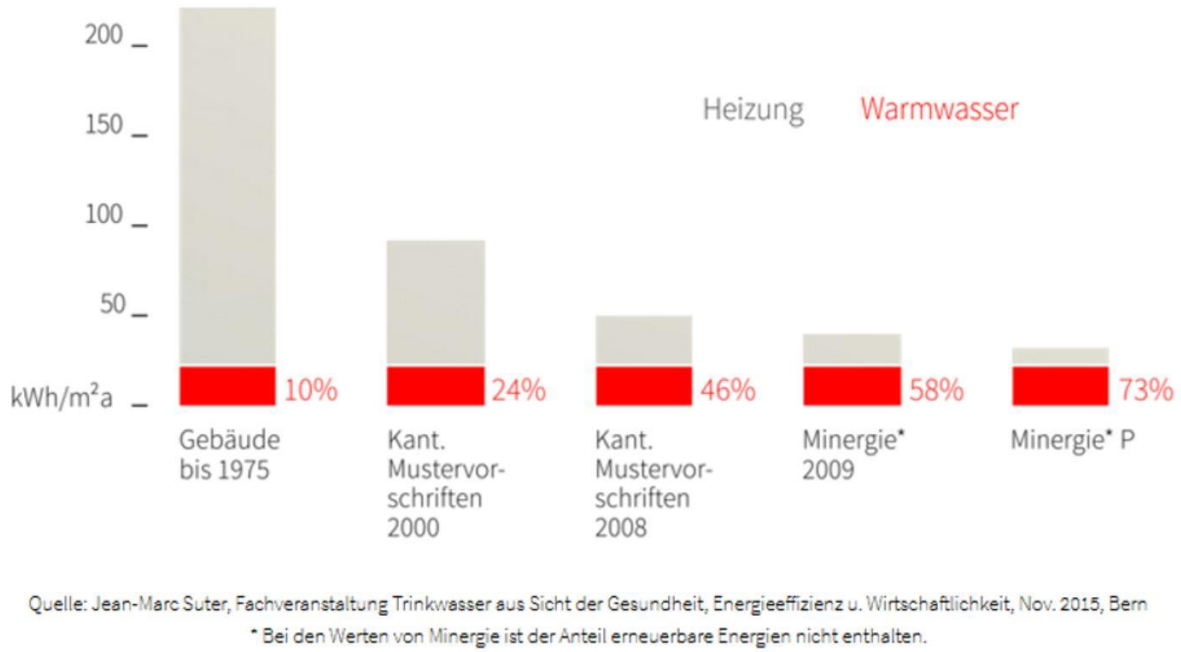

Abbildung 12: Entwicklung der Wärmeenergiemenge für Heizung und Warmwasser in Gebäuden in der Schweiz

Quelle: https://joulia.com/

Durchschnittlich kann man festhalten, dass heutzutage der Energiebedarf für die Heizung und das Warmwasser annähernd gleich hoch ist. Das Duschwasser allein macht hier etwa 50 bis 80 % des gesamten Warmwasserverbrauchs aus. (siehe Abb. 13)

Abbildung 13:Anteil von Duschwasser am Warmwasserverbrauch

Quelle: https://joulia.com/

Der Warmwasserbedarf pro Person und Tag wird allgemein mit 40 Litern gerechnet (Strauss, o. J.). Falls jedoch moderne Technologien zum Wassersparen eingesetzt werden, kann der Bedarf auf rund 30 Liter gesenkt werden (Nolde, 2016).

Geht man jetzt von den 40 Litern pro Person und Tag aus, so wären das bei einem Vier-Personen-Haushalt 160 Liter täglich. Die Energie, die notwendig ist, um das Warmwasser zu erzeugen, liegt dann bei 8,41 kWh. (Hartmann, 2016b)

3.1 Wärmeinhalt im Grauwasser

Man geht davon aus, dass fast 80 bis 90 % der Energie für die Warmwasserbereitung in Wohngebäuden „ungenutzt“ mit dem Grauwasser in den Abfluss fließt (Garcia, 2016). Die restlichen 10 bis 20 % können als effektive Entlastung der Raumheizung dienen, während der Großteil nur für Komfortzwecke (beispielsweise für das Duschen) oder zu Reinigungszwecken (heißes Wasser für den Abwasch) gebraucht wird.

Dabei hat das Wasser eine besondere Eigenschaft und zwar seine außerordentlich hohe spezifische Wärmespeicherkapazität c_p. Mit einem c_p von 4,187 J/(g*K) kann Wasser erheblich mehr Wärme absorbieren und speichern als die meisten anderen Materialien auf dem Planeten (Chemie.de, o. J.).

Folglich hat auch Grauwasser mit einer mittleren Temperatur von 30 °C noch einen hohen Energieinhalt, nämlich 3,74 kWh (im Vergleich zur Kaltwassertemperatur von 10 °C und bei einem Tagesverbrauch von 160 l) (Hartmann, 2016b). Diesen durch geeignete Technologien wie der Wärmerückgewinnung mit Hilfe von Wärmetauschern zu nutzen, liegt demnach in Zeiten von immer strikteren Energieeffizienzstandards auf der Hand.

3.2 Effizienz von Wärmetauschern

Damit man unterschiedliche Wärmetauscher gleicher Größe und Ausführung besser miteinander vergleichen kann, wird in den Herstellerangaben von jedem System die Effizienz angegeben.

Die Effizienz von Grauwasserwärmetauschern wird durch das Verhältnis zwischen der tatsächlichen Wärmeübertragung und der theoretisch maximal möglichen Wärmeübertragung ausgedrückt. Die Einheit des Effizienzwertes ist Prozent. Bei der

Auswahl eines geeigneten Wärmetauschers wird zunächst die passende Größe ermittelt. Anschließend wählt man das System mit der höchsten Effizienz, um so viel Wärme zurückzugewinnen wie möglich.

3.3 Beeinflussende Faktoren für die Effizienz

Die Effizienz von Wärmetauschern hängt von mehreren Faktoren ab. Dazu zählen folgende Aspekte:

- Die Austauscherfläche: Nach dem Fourier'schen Gesetz, (Wärmeleistung $\dot{Q}$ = Wärmeleitfähigkeit λ * Fläche A * Zeit t * ((Temperaturdifferenz $T_{W1,warm}$ – $T_{W2,kalt}$)/ Dicke d)) ist die übertragene Wärmemenge proportional zur Fläche (Nolde, 2016). Das bedeutet, dass bei einer großen Austauscherfläche auch mehr Wärme übertragen wird und die Effizienz somit höher ist. Aus diesem Grund sind vertikale Wärmetauscher, bei denen das Grauwasser in einem dünnen Film an der Innenrohroberfläche entlang fließt, effizienter als horizontale Systeme, bei denen das Abwasser nur einen Teil des Rohres berührt. Auch bei Rohren mit einem dickeren Durchmesser ist die Fläche und damit die Wärmeübertragung höher.
- Die Dicke und die Länge des Rohres: Nach dem Fourier'schen Gesetz, ist die übertragene Wärmemenge umgekehrt proportional zur Dicke des Materials. Somit sollte das Rohr, durch welches die Wärme vom warmen zum kalten Medium strömt, so dünn wie möglich sein. Außerdem ist ein langes Rohr effizienter als ein kurzes, da bei ersterem mehr Zeit für die Wärmeübertragung zur Verfügung steht.
- Der Temperaturunterschied zwischen dem kalten und dem warmen Medium: Nach dem Fourier'schen Gesetz, ist die übertragene Wärmemenge proportional zum Temperaturunterschied zwischen den beiden Medien. So ist die Effizienz des Wärmetauschers bedeutender, wenn entweder die Temperatur des Kaltwassers niedriger oder die Grauwassertemperatur höher ist.
- Das Material der Wärmetauscher: Zum einen spielt die Wärmeleitfähigkeit des Werkstoffes eine Rolle. Je höher diese ist, desto besser ist auch die Wärmeübertragung. Viele Hersteller setzen daher auf Kupfer, welches eine besonders hohe Wärmeleitfähigkeit besitzt.

- Die Verschmutzung: Je ausgeprägter die Schmutzschicht oder der Biofilm auf der Oberfläche des Wärmetauschers ist, desto schlechter kann die Wärme übertragen werden. Daher sollte stets darauf geachtet werden, dass sich so wenig wie möglich Verunreinigungen festsetzen können beziehungsweise, dass diese durch eine regelmäßige Reinigung entfernt werden.
- Der Weg vom Verbraucher bis zum Wärmetauscher: Je länger die Strecke zwischen dem Verbraucher und der Wärmeübertragereinheit, desto mehr Wärme geht unterwegs verloren. Somit sind Wärmetauscher, die beispielsweise direkt im Abfluss der Dusche integriert werden, effizienter als Systeme, die weiter entfernt vom Abfluss installiert sind.
- Anzahl der Spiralen (bei der entsprechenden Bauweise): Je weniger Spulen um das grauwasserführende Rohr gelegt sind, umso höher ist der Wirkungsgrad der Einheit. Es ist jedoch zu bedenken, dass in diesem Fall der Druckverlust auch ansteigt, was eher ungünstig ist. Hier muss also bestenfalls ein Kompromiss gefunden werden.

3.4 Unterschiedliche Ermittlung und Bewertung der Effizienzwerte

Die Effizienzwerte dienen dem Vergleich von Wärmeübertragern. Je nachdem, von welchem Kontinent oder aus welchem Land der Hersteller kommt, kann die Ermittlung und anschließende Bewertung der Effizienz variieren. Daher muss man stets überprüfen, ob man auch Produkte miteinander vergleicht, die unter den gleichen Rahmenbedingungen geprüft und zertifiziert wurden.

3.4.1 Zertifikat des Passivhaus Instituts

In Deutschland können Hersteller ihre Produkte beim Passivhaus Institut zertifizieren lassen. Dadurch verfügen diese über eine Mindesteffizienz und eignen sich ausdrücklich für den Einbau in ein Passivhaus.

Für den Nachweis der Mindesteffizienz werden zwei Parameter bestimmt: der stationäre Wirkungsgrad $\eta_{stationär}$ sowie die effektive Totzeit des Systems t_{tot}. Beide Kennzahlen müssen unter bestimmten Randbedingungen ermittelt werden. So beträgt der Volumenstrom des Grauwassers stets 8 l/min, das Kaltwasser hat eine Temperatur zwischen 8 und 13 °C, die Umgebungsluft zwischen 18 und 25 °C und das Abwasser zwischen 35 und 39 °C (Passivhaus-Institut, 2020).

Der stationäre Wirkungsgrad beschreibt das Temperaturverhältnis (T_{WRG} – $T_{Kaltwasser}$)/($T_{Abwasser}$ – $T_{Kaltwasser}$), wobei T_{WRG} die Temperatur des vorerhitzten Kaltwassers nach dem Wärmetauscher ist. Dieser Wirkungsgrad wird unter stationären Verhältnissen bestimmt, also bei gleichbleibendem Volumenstrom und konstanter Temperatur. Die Zeit, die das System ab Beginn des Duschvorganges braucht, um den stationären Zustand zu erreichen, wird als die effektive Totzeit bezeichnet. In dieser Zeitspanne gleichen sich die Temperaturen an und die Dusche sowie der Wärmetauscher werden auf ihre Betriebstemperatur gebracht.

Mit den vorab beschriebenen Werten wird schlussendlich die Nutzenergieeinsparung berechnet, die rund 20 bis 25 % niedriger ist als der stationäre Wirkungsgrad. Je nachdem, wie hoch die Nutzenergieeinsparung beim Duschwasser ist, werden vier Effizienzklassen definiert. Bei einer Einsparung unter 30 % ist das System nicht mehr zertifizierbar. (Passivhaus-Institut, 2020)

Zusätzlich zu der Effizienz wird der Druckverlust angegeben. Dieser ist jedoch nur rein informativ und spielt keine Rolle in der Bewertung des Wärmeübertragers. Die Hygiene wird bei der Zertifizierung überhaupt nicht berücksichtigt. Die einzige Voraussetzung ist, dass das Kalt- und das Grauwasser doppelwandig hydraulisch voneinander getrennt sind.

3.4.2 NEN 7120

In Europa wird die Effizienz von Duschwasserwärmetauschern häufig nach der niederländischen Norm NEN 7120 ermittelt und bewertet. Die Prüfung erfolgt unter festgelegten Standardbedingungen. Im Gegensatz zum Zertifikat durch das Passivhaus Institut wird hier der Wirkungsgrad über den gesamten Duschvorgang ermittelt und die Totzeit, die das System braucht, um auf Betriebstemperatur zu kommen, entfällt. Dadurch sind die Effizienzwerte nach der NEN 7120 auch geringer als die stationären Wirkungsgrade.

Die Temperaturniveaus sind standardisiert: das Kaltwasser hat eine Temperatur von 10 °C, das Warmwasser von 60 °C und das Misch- beziehungsweise Duschwasser von 40 °C (Wagner Solar, 2020).

Der Grauwasserwärmetauscher ist so installiert, dass das vorerhitzte Kaltwasser sowohl zum Warmwasserbereiter als auch zur kalten Seite der Dusche fließt. Außerdem funktioniert er im balancierten Betrieb.

Die Effizienz wird für drei Duschszenarien ermittelt, die sich jeweils in der Duschdauer, aber auch im Volumenstrom voneinander unterscheiden. Der Volumenstrom kann entweder 5,8 l/min, 9,2 l/min oder 12,5 l/min betragen. Neben der Effizienz wird auch der Druckverlust innerhalb des Wärmetauschers angegeben.

Viele europäische, aber auch internationale Hersteller lassen ihre Duschwasserwärmeübertrager durch Kiwa prüfen und zertifizieren. Das 1984 in den Niederlanden gegründete Unternehmen bietet weltweit Tests und die anschließende Zertifizierung nach der NEN 7120-Norm an.

3.4.3 Norm DIN V 18599-8 und GEG

Seit Oktober 2016 wurde die Wärmerückgewinnung aus dem Duschwasser in die DIN-Norm V 18599-8 aufgenommen. Die Norm liefert seither ein genaues Berechnungsverfahren für den Nutzenergieeintrag, also die zurückgewonnene Wärme durch einen Grauwasserwärmetauscher. Die Berechnungsgrundlage beschränkt sich jedoch auf Systeme, die unmittelbar im Sanitärbereich oder im Geschoss darunter angebracht sind. Zudem darf das Rohrleitungsvolumen zwischen dem Wärmetauscher und dem Warmwasserbereiter nicht größer als drei Liter sein (DIN V 18599 - Energetische Bewertung von Gebäuden, 2018).

Bei der Berechnung des Energieeintrages werden sowohl der Nutzwärmebedarf für das Warmwasser, die Nettogrundfläche des Gebäudes als auch der produktbezogene Effizienzwert des Wärmetauschers berücksichtigt. Hinzu kommt noch ein Korrekturfaktor für die reduzierte Effizienz aufgrund von Verschmutzungen. Außerdem sieht die Norm vor, dass der Nutzenergiebedarf am Warmwasser, der alleine für das Duschen benötigt wird, 65 % beträgt (DIN V 18599 - Energetische Bewertung von Gebäuden, 2018).

Der Wirkungsgrad des Wärmetauschers aus den Herstellerangaben muss stets nach NEN 7120 bei 12,5 l/min bestimmt worden sein. Falls kein Effizienzwert bekannt sein sollte, kann man auf vorgegebene Standardwerte zurückgreifen. Die Norm sieht hier einen Wirkungsgrad von 25 % bei Standardsystemen und von 45 % bei hocheffizienten Systemen vor (DIN V 18599 - Energetische Bewertung von Gebäuden, 2018).

Die Einsparung durch die Wärmerückgewinnung aus dem Duschwasser, die mit den Berechnungen aus der DIN V 18599-8 veranschaulicht wurde, kann in Deutschland seit November 2020 in der Energiebedarfsrechnung berücksichtigt werden. Zu diesem

Zeitpunkt ist das neue Gebäudeenergiegesetz (GEG) in Kraft getreten, welches die Energieeinsparverordnung (EnEV) ersetzt. Dort werden die Mindestanforderungen für Gebäude in Bezug auf ihre energetische Qualität festgelegt. Dadurch, dass nun auch die Wärmerückgewinnung aus dem Duschwasser mit einfließen kann, lässt sich der Primärenergiebedarf von Wohngebäuden mit Hilfe von Grauwasserwärmetauschern reduzieren.

3.4.4 CSA B55.1

In Nordamerika, genauer gesagt in Kanada und den Vereinigten Staaten, wird die Effizienz nach den Grundlagen der CSA B55.1 ermittelt. Dies ist ein standardisiertes Prüfverfahren zur Messung des Wirkungsgrades und des Druckverlustes von Grauwasser-Wärmerückgewinnungsanlagen der CSA Group. Die CSA Group ist genauso wie Kiwa einer der global führenden Anbieter für die Prüfung und Zertifizierung von Produkten. Darüber hinaus ist das Unternehmen in Nordamerika eine der bedeutendsten Organisationen für die Entwicklung von Normen. Die Norm wurde so entwickelt, dass sie mit den Anforderungen des „Standard Council of Canada“, der für die nationalen Normen in Kanada zuständig ist, übereinstimmt. Die neueste Fassung wurde 2020 als nationale Norm in Kanada veröffentlicht.

Für die Prüfung von Grauwasserwärmetauschern nach der CSA B55.1 spielt die Größe des Systems keine Rolle. Die einzige Voraussetzung ist, dass der Wärmeübertrager im balancierten Betrieb arbeitet.

Es werden sowohl die Effizienz als auch der Druckverlust der Einheiten bei unterschiedlichen Volumenströmen gemessen. Zum Schluss werden jedoch nur die entsprechenden Werte für einen Volumenstrom von 9,5 l/min angegeben.

3.4.5 Règlement grand-ducal

In Luxembourg gibt es zum jetzigen Zeitpunkt noch keine rechtliche Grundlage, die die Wärmerückgewinnung aus dem Grauwasser berücksichtigt. So sieht das Règlement grand-ducal weder ein Berechnungsverfahren zur Energieeinsparung noch die Bewertung von Effizienzwerten von Grauwasserwärmetauschern vor. Auch im Energiepass für Wohngebäude kann man den Energieeintrag durch die Wärmerückgewinnung aus dem Grauwasser nicht vermerken.

4 Produzenten

Die Wärmerückgewinnung aus dem Grauwasser ist vor allem schon in Amerika und Kanada verbreitet, da dort die Kaltwassertemperaturen sehr tief sind und sich die Wärmerückgewinnung folglich gut anbietet. In Europa findet man noch nicht so viele Anwendungen, der Trend ist jedoch steigend. Trotz allem gibt es sowohl in Nordamerika als auch in Europa verschiedene Hersteller, die Produkte auf den Markt gebracht haben. Im Folgenden wird eine Auswahl derer vorgestellt.

4.1 EcoDrain aus Nordamerika

Das nordamerikanische Unternehmen EcoDrain hat sich vor allem auf die Wärmerückgewinnung aus dem heißen Duschwasser spezialisiert.

In den Anfängen wurde an horizontalen Wärmetauschern geforscht und die Ingenieure entwickelten unzählige Prototypen. Dabei sollten die folgenden fünf Kriterien bestmöglich erfüllt werden:

1. Die Wärmetauscher sind günstig und lassen sich leicht neben bestehenden horizontalen Abflussrohren installieren.
2. Sie haben eine positive Wirkung auf die Umwelt. Gleichzeitig sollen sich die täglichen Routinen oder Lebensstile der Menschen nicht ändern müssen.
3. Man kann umgehend Einsparungen feststellen und die Amortisationszeit ist kurz.
4. Die Wärmetauscher sind zuverlässig und von höchster Qualität.
5. Sie sind zudem sicher in der Anwendung.

Die größte Herausforderung war es, die Austauscherfläche zu maximieren, um möglichst viel Wärme aus dem Duschwasser zurückzugewinnen. Damit die Effizienz weiter steigt, wurden mit Hilfe von sogenannten Turbulatoren Turbulenzen im Kaltwasserstrom erzeugt. Dadurch konnte die Wärmeübertragung erhöht und gleichzeitig auch der Druckverlust verringert werden.

Nach über 4700 Versuchen und Anpassungen konnte EcoDrain seinen horizontalen Wärmetauscher A1000 auf den Markt bringen (siehe Abb. 14). Dieser gewann im Jahr 2014 den „Architectural Record Products Awards“ in den Vereinigten Staaten, bei dem die Jury unter anderem die Ästhetik und die Innovation der Produkte bewertet.

Abbildung 14: A1000 von EcoDrain

Quelle: https://ecodrain.com/en/

Für den horizontalen Wärmetauscher A1000 wirbt das Unternehmen mit folgenden drei Gründen, warum es sich lohnen soll, das Produkt zu installieren:

1. Zum einen könnten, je nach Strompreis, die jährlichen Einsparungen zwischen 100 $ (niedrigster Strompreis von 0,10 $ pro kWh) und 250 $ (höchster Strompreis von 0,20 $ pro kWh) liegen. Die Jahresrendite läge dann bei 17 beziehungsweise 43 %. Diese Werte beziehen sich auf Duschzeiten von drei bis zehn Minuten täglich. (siehe Abb. 15)

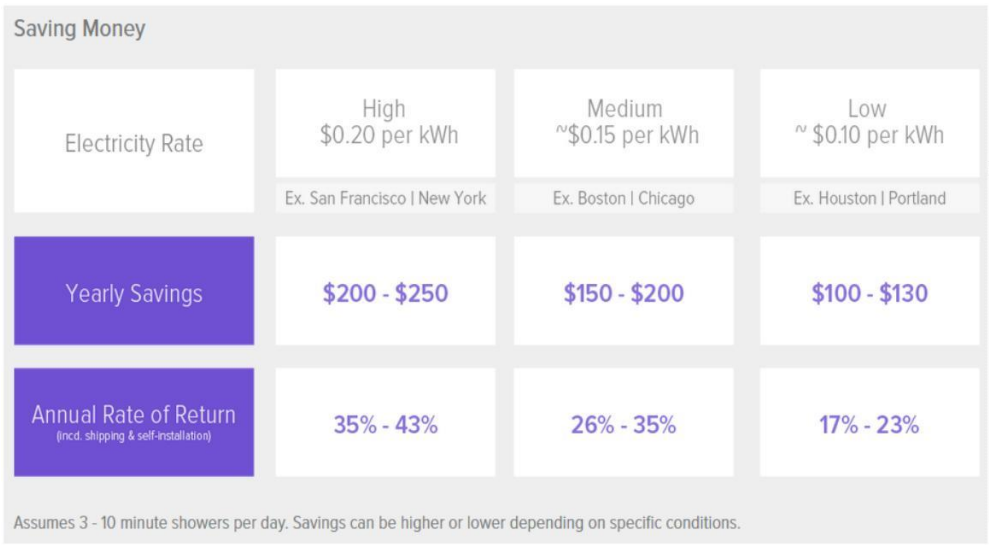

Abbildung 15: Kosteneinsparungen durch den A1000 von EcoDrain

Quelle: https://ecodrain.com/en/

2. Des Weiteren könnte der jährliche CO_2-Fußabdruck so stark reduziert werden, dass es beispielsweise der CO_2-Aufnahme von 22,6 10-jährigen Bäumen oder den CO_2-Emissionen von 374,4 Litern Benzin (1 US-Gallon entspricht 3,79

Litern) entspricht (siehe Abb. 16). Angenommen der Verbrauch eines Liters Benzin verursacht CO_2-Emissionen von 2,37 kg, so läge die Einsparung bei insgesamt 887 kg CO_2 (August, 2020).

Abbildung 16: Jährliche CO_2-Reduzierung durch den A1000 von EcoDrain

Quelle: https://ecodrain.com/en/

3. Schlussendlich verspricht EcoDrain, dass sich durch die Wärmerückgewinnung die Duschzeit um 33 % erhöhen kann, ohne dabei den CO_2-Fußabdruck oder den Stromverbrauch zu steigern (EcoDrain).

Diese Zahlen sind schwer zu kontrollieren, da nicht genau dargelegt wird, welche Versuche durchgeführt wurden, um diese Resultate zu erhalten.

Während der Entwicklung der horizontalen Apparatur hat das Unternehmen jedoch auch an den vertikalen Grauwasserwärmetauschern gearbeitet. Das Ziel war es, eine zweite Produktlinie zu erstellen und somit so vielen Menschen wie möglich eine Energieeinsparung durch Abwasserwärmerückgewinnung zu ermöglichen. Es entstand der Wärmetauscher VT1000, der 2017 ebenfalls Sieger bei den „Architectural Record Products Awards“ war (siehe Abb. 17).

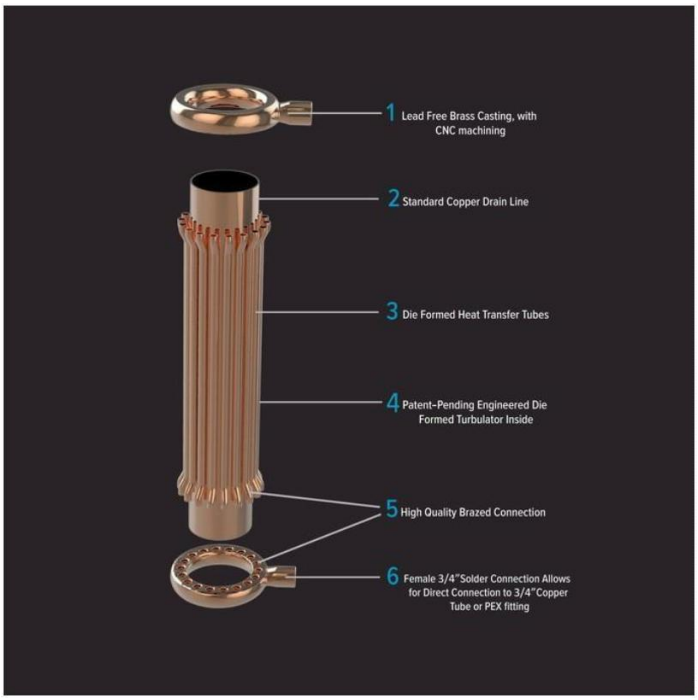

Abbildung 17: Aufbau des VT1000 von EcoDrain

Quelle: https://ecodrain.ca/en/products/VT1000/

Zum jetzigen Zeitpunkt verkauft EcoDrain ausschließlich vertikale Wärmetauscher sowie maßgefertigte, individuell gestaltete Wärmetauscher für kommerzielle Anwendungen. Der Vorteil der Produkte ist, dass sie sowohl in neue Gebäude als auch einfach in bereits bestehende Häuser eingebaut werden können. Je nach Ausführung und Größe des vertikalen VT1000 liegt die Effizienz laut dem Hersteller zwischen 43,5 Prozent (Nominaldurchmesser: 7,6 cm und Länge: 91,4 cm) und 66,1 Prozent (Nominaldurchmesser: 10,2 cm und Länge: 182,9 cm). Diese Werte ergeben sich aus Versuchen, die gemäß der CSA B55.1 durchgeführt wurden. Das Durchflussvolumen an Grau- und Kaltwasser beträgt jeweils 9,5 Liter pro Minute. (EcoDrain)

4.2 RenewABILITY Energy Inc. aus Nordamerika

Das Unternehmen mit Sitz in Kanada ist Marktführer in Nordamerika für Technologien zur Grauwasserwärmerückgewinnung, die gar keine oder nur geringe Wartung benötigen.

Das auf Abbildung 18 dargestellte patentierte System „Power-Pipe“ ist ein vertikaler Wärmetauscher. Das Besondere daran ist, dass das äußere Rohr mit dem Kaltwasser aus mehreren Kupferspulen besteht, die spiralförmig um das Abflussrohr gelegt

werden. Dadurch soll die Effizienz höher sein als bei anderen Grauwasserwärmetauschern und außerdem soll der Druckverlust kaum erkennbar sein. Außerdem wird ausdrücklich betont, dass der Wärmetauscher selbstreinigend ist und somit keinerlei Wartung benötigt.

Abbildung 18: Patentiertes Design des Power-Pipe

Quelle: http://renewability.com

Der Wärmetauscher kann sowohl in Einfamilienhäusern als auch in Mehrfamilienhäusern eingesetzt werden. Bei Letzteren besteht die Möglichkeit, entweder jede Wohneinheit einzeln mit dem Power-Pipe auszustatten oder bis zu vier Appartements zusammen mit einem Wärmetauscher zu verbinden (siehe Abb. 19). Auch eine Nachrüstung in Bestandsgebäuden ist grundsätzlich möglich. Hier müssen jedoch einige Voraussetzungen erfüllt sein, wie beispielsweise das Vorhandensein eines vertikalen, frei liegenden Duschabflussrohres mit einer Mindestlänge von 84 Zentimetern. Solche Bedingungen sind in den meisten Altbauten eher nicht gegeben.

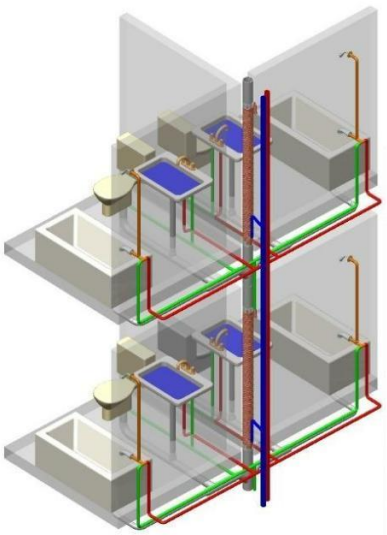

Abbildung 19: Anwendung in einem Mehrfamilienhaus

Quelle: http://renewability.com

Es werden drei Produktserien angeboten, die sich vorerst durch den Nominaldurchmesser des Duschabflussrohres (entweder 5 cm, 7,6 cm oder 10,2 cm) unterscheiden. Hat man diesen gewählt, existieren verschieden lange Wärmetauscher. Je nachdem, für welches Produkt man sich entscheidet, variiert die Effizienz. Im Allgemeinen soll jedoch der Gesamtenergieverbrauch des Haushalts um fünf bis zehn Prozent reduziert werden. Darüber hinaus könnte ein durchschnittlicher Haushalt (der jedoch nicht genau definiert wurde) jährlich bis zu einer Tonne an Treibhausgasemissionen einsparen. Die Amortisationszeit liegt im Schnitt bei zwei bis zehn Jahren. (RenewABILITY)

Die kleinste Ausführung (Durchmesser: 5 cm und Länge: 76,2 cm) erreicht bereits eine Effizienz von 25,9 %. Außerdem sollen laut Hersteller 17 % der Warmwasserkosten eingespart werden. Die größtmögliche Einheit (Durchmesser: 10,2 cm und Länge: 243,8 cm) hat eine Effizienz von 68 % und ermöglicht eine Einsparung der Warmwasserkosten von bis zu 45 %. (RenewABILITY)

Auch hier ergeben sich die Werte aus Versuchen, die unter den Standards der CSA B55.1 durchgeführt wurden.

Vergleicht man die beiden Hersteller aus Nordamerika (EcoDrain und RenewABILITY), so kann man feststellen, dass die Effizienz der Wärmetauscher mit gleichem Durchmesser und identischer Länge bei EcoDrain um wenige Prozent höher ist als beim Marktführer RenewABILITY. Dies ist jedoch etwas überraschend, weil RenewABILITY damit wirbt, dass die Effizienz des Power-Pipe durch die besondere spiralförmige Anordnung des Kaltwasserrohres höher sei als bei der Konkurrenz. Der VT1000 von EcoDrain mit einem Nominaldurchmesser von 7,6 cm und einer Länge von 91,4 cm hat eine Effizienz von 43,5 %. Der Power-Pipe von RenewABILITY hingegen hat nur eine Effizienz von 39 %.

4.3 Wagner Solar GmbH aus Deutschland

Das deutsche Unternehmen hatte sich 1979 zunächst auf nachhaltige Energietechnik und Solaranlagen spezialisiert. Es bietet sowohl Solarthermie-, Photovoltaik- als auch Stromspeichersysteme an und ist in der Solarkollektor-Herstellung einer der Marktführer in Europa. Neu dazugekommen ist die Produktreihe ECOShower Duschsysteme zur Wärmerückgewinnung aus dem Grauwasser. Diese neue Serie

umfasst eine Duschrinne, eine Duschwanne, ein Duschrohr sowie einen Duschsammler. Letzterer ist jedoch eher für den Gebrauch in größeren Duschanlagen, also nicht in Wohngebäuden, geeignet. Sämtliche ECOShower-Produkte haben ein Zertifikat des Passivhaus Institutes und weisen somit eine Mindestnutzenergieeinsparung von 30 % auf.

Die Duschrinne ECOShower wird horizontal direkt in den Abfluss der Dusche eingebaut und wird gleichmäßig mit dem warmen Duschabwasser durchspült. Das kalte Frischwasser fließt durch ein spiralförmiges Kupferrohr in der Duschrinne und nimmt dabei die Wärme des Duschabwassers auf (siehe Abb. 20).

Das System hat je nach Größe einen Wirkungsgrad (nach NEN 7120 bei 12,5 l/min) zwischen 36,4 und 56,4 % (Wagner Solar, 2020).

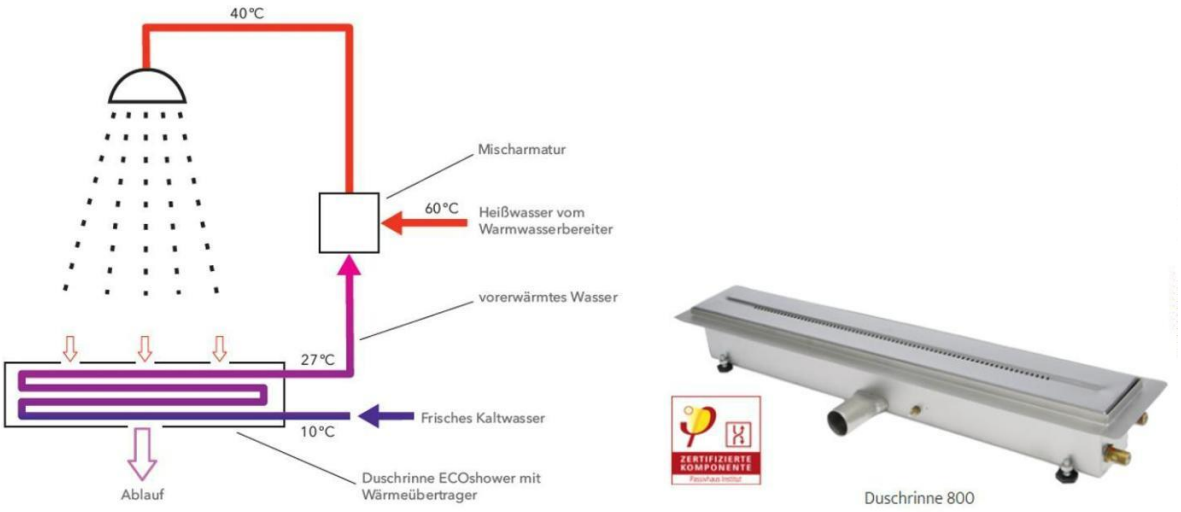

Abbildung 20: Duschrinne ECOShower von Wagner Solar

Quelle: https://www.wagner-solar.com/de/wrg/waermerueckgewinnung

Die Duschwanne ECOShower, die auf Abbildung 21 zu sehen ist, ist sehr ähnlich aufgebaut wie die Duschrinne. Auch sie enthält im Abfluss ein horizontales, spiralförmiges Wärmetauscherrohr, das vom Kaltwasser durchflossen wird. Das

Produkt wird in zwei Größen angeboten und hat dabei jeweils einen Wirkungsgrad von 48,3 % (nach NEN 7120 bei 12,5 l/min) (Wagner Solar, 2020).

Abbildung 21: Duschwanne ECOShower von Wagner Solar

Quelle: https://www.wagner-solar.com/de/wrg/waermerueckgewinnung

Laut Herstellerangaben könnte eine vierköpfige Familie durch den Einsatz einer Duschrinne oder -wanne bis zu 180 m³ Erdgas oder 180 l Heizöl im Jahr sparen (Wagner Solar, 2020).

Schlussendlich bietet Wagner Solar für den Einsatz in Wohngebäuden das Duschrohr ECOShower an, das auf Abbildung 22 dargestellt ist. Dieses wird vertikal unter der Dusche montiert. Das warme Duschabwasser fließt durch das Innenrohr nach unten in die Kanalisation. Gleichzeitig strömt das kalte Frischwasser nach oben durch das äußere Rohr und wird vorerwärmt.

Das Duschrohr ist die effizienteste Einheit des Unternehmens. Je nach Größe und Ausführung des Produkts weist es einen Wirkungsgrad von 50,2 bis zu 60,0 % auf (nach NEN 7120 bei 12,5 l/min). Damit könnte laut Wagner Solar eine vierköpfige Familie jährlich sogar bis zu 220 m³ Erdgas oder 220 l Heizöl einsparen. (Wagner Solar, 2020)

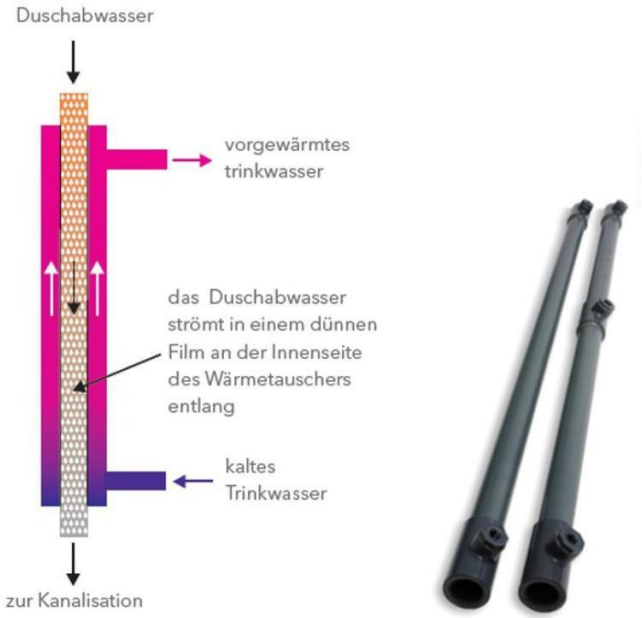

Abbildung 22: Duschrohr ECOShower von Wagner Solar

Quelle: https://www.wagner-solar.com/de/wrg/waermerueckgewinnung

Vorteilhaft ist die leichte Pflege der Systeme, da die Wärmeübertrager der Duschrinne sowie der –wanne sehr einfach zugänglich sind. Für die Reinigung entfernt man lediglich die Verteilerplatte, um anschließend das Wärmeübertragerrohr abzuspülen und abzubürsten. Das vertikale Rohr muss nach der Installation überhaupt nicht mehr gewartet werden. Aufgrund dieses ausgesprochen pflegeleichten Betriebs ist die Effizienz der Wärmeübertrager auch noch viele Jahre nach dem ersten Gebrauch auf dem gleichen Niveau wie zu Beginn.

4.4 Q-Blue B.V. aus den Niederlanden

Der niederländische Hersteller Q-Blue hat sich auf die Entwicklung von Wärmetauschern zur Wärmerückgewinnung aus dem Duschwasser spezialisiert. 2005 wurde der erste Wärmeübertrager unter dem Namen Showersave auf den Markt gebracht. Die Produktpalette umfasst verschiedene vertikale Einheiten, die alle von Kiwa, dem Passivhaus Institut sowie WRAS („Water Regulations Approval Scheme“, britische Zertifizierungsstelle) zertifiziert sind. Die Produkte werden seit 2009 auch in Großbritannien von dem Unternehmen Showersave vertrieben. In der europäischen Union sind sie als nachhaltige Systeme anerkannt worden. Außerdem können sie in Großbritannien im „Simplified Building Energy Model“ (SBEM, Software zur Analyse

des Energieverbrauchs von Gebäuden) und in der „Standard Assessment Procedure for Energy Rating of Dwellings“ (SAP, Methode zur Bewertung der Gesamtenergieeffizienz von neuen Wohngebäuden) berücksichtigt werden.

Die erste vertikale Variante stellt das doppelwandige Wärmetauscherrohr Q-Blue Showersave dar. Man kann es als einzelnes Rohr (QB1-21 und QB1-21C) oder als zwei nebeneinanderliegende Rohre (QB1-21D und QB1-21D HE) jeweils in drei unterschiedlichen Längen erwerben.

Das auf Abbildung 23 rechts gezeigte QB1-21 ist mit über 15.000 Einheiten das meist installierte System in Großbritannien. Es kann sowohl in Wohngebäuden als auch in gewerblich genutzten Gebäuden zum Einsatz kommen. Ein Vorteil ist, dass man bis zu zwei Duschen gleichzeitig an einen einzigen Wärmeübertrager anschließen kann. Der Wirkungsgrad liegt bei 61,4 % (nach NEN 7120 bei 12,5 l/min) (Showersave, o. J.-b).

Das QB1-21D ist, wie das vorherige Produkt auch, für den häuslichen sowie den gewerblichen Gebrauch geeignet. (siehe Abb. 23 links) Vor allem für Mehrfamilienhäuser ist es eine interessante Lösung, da bis zu vier Duschen an ein einziges System angeschlossen werden können. Die Einheit kann bei einem Volumenstrom von 12,5 l/min eine Effizienz von 69,3 % aufweisen (Showersave, o. J.-c). Im Jahr 2019 wurde das System mit dem „Innovation Award“ des Passivhaus Institutes ausgezeichnet. Der Preis geht an innovative, richtungsweisende Produkte, deren Vermarktung gefördert werden soll.

Abbildung 23: Vertikale Systeme QB1-21D (links) und QB1-21 (rechts) von Q-Blue

Quelle: https://www.q-blue.nl/de/produkte/q-blue-showersave

Des Weiteren gibt es den Q-Blue Multivert, der aus einer Kaskade von vier, sechs, acht oder zehn Rohrwärmetauschern besteht (siehe Abb. 24). Bei dieser Konfiguration wird das Duschabwasser aus dem gesamten Gebäude und nicht nur aus einer einzelnen Dusche durch den Wärmeübertrager geleitet. Somit eignet sich der Q-Blue Multivert besonders für Mehrfamilienhäuser, aber auch für öffentliche Gebäude mit mehreren Duschen, wie beispielsweise Schwimmbäder, Hotels oder Krankenhäuser. Der Wirkungsgrad kann sehr variabel sein und hängt im Wesentlichen von der Spitzenauslastung der Dusche ab. Im Allgemeinen liegt er jedoch laut Hersteller über 40 % (nach NEN 7120) (Showersave, o. J.-a).

Abbildung 24: Q-Blue Multivert mit 4 Rohrwärmetauschern von Q-Blue

Quelle: https://www.q-blue.nl/de/produkte/q-blue-multivert

4.5 Joulia SA aus der Schweiz

Das schweizerische Unternehmen stellt ausschließlich Duschrinnen mit integrierten horizontalen Wärmetauscherrohren her und wurde in den letzten zehn Jahren schon mehrmals für seine innovativen sowie effizienten Lösungen ausgezeichnet. Joulia bietet zwei Produktreihen an, die Joulia Inline und die Joulia Twinline. Diese können sowohl in Neubauten als auch bei der Renovierung von Gebäuden eingebaut werden.

Sie sind besonders gut geeignet für Appartements oder Bungalows, wenn hier der Platz unterhalb der Dusche für ein vertikales System nicht vorhanden ist.

Die Joulia Inline-Systeme waren die ersten Produkte des Herstellers, die auf den Markt gekommen sind. Wie bereits erwähnt, handelt es sich um eine Duschrinne, die wahlweise mit drei oder fünf Rohrwärmeübertragern ausgestattet ist. Die Konfiguration mit drei Rohren ist etwas kompakter und hat eine geringere Bauhöhe. Die Effizienz liegt bei 26,6 % (nach NEN 7120 bei 12,5 l/min). Die Einheit mit den fünf Rohren ist größer, dafür aber auch effizienter und auf Abbildung 25 zu sehen. Sie erreicht einen Wirkungsgrad von rund 34 %. Laut Hersteller könnte ein Vier-Personen-Haushalt mit einer Joulia Inline-Einheit jährlich rund 1.000 kWh zurückgewinnen. Dies entspricht der Energiemenge, die von eine Photovoltaikanlage von acht Quadratmetern produziert werden kann. (Joulia SA, 2020b)

Abbildung 25: Aufbau der Joulia Inline mit 5 Rohr-Wärmetauschern von Joulia SA

Quelle: https://showersave.com/wwhr-products/linear-drain/

Die Joulia Twinline ist die neueste Produktreihe des Unternehmens. Der große Unterschied zur Joulia Inline ist, dass hier nun sogar zehn Rohrwärmetauscher in die Duschrinne integriert werden. Dadurch erhöht sich die Effizienz erheblich, und zwar auf 52 % (nach NEN 7120 bei 12,5 l/min) (Joulia SA, 2020a).

5 Pilotprojekte

Im Rahmen dieser Bachelorarbeit wurden keine eigenen praktischen Versuche durchgeführt, um die Effizienz und die beste Auslegung von Wärmetauschern zu testen. Daher wird unter anderem auf zwei Pilotprojekte aus den Niederlanden sowie Kanada zurückgegriffen, die diese Punkte untersucht haben.

5.1 Projekt „Uilenstede“, Niederlande

Die niederländische Hauptstadt Amsterdam hat sich im Jahre 2015 zum Ziel gesetzt, sämtliche öffentlichen Gebäude und kommunale Dienstleistungen klimaneutral zu gestalten. Hierfür sollen die Treibhausgasemissionen im Vergleich zum Jahr 1990 bis 2025 um 40 % und bis 2040 um 75 % reduziert werden. Vor diesem Hintergrund hat der Wasserversorger von Amsterdam und der Umgebung Waternet seinerseits beschlossen, bis 2020 klimaneutral zu agieren. Um dies zu erreichen, müsste Waternet jährlich etwa 53.000 t CO_2 einsparen. (Deng et al., 2016)

Großes Potenzial sieht Waternet in der Grauwasserwärmerückgewinnung, insbesondere in der Wärmerückgewinnung aus dem Duschwasser. Die Gründe dafür liegen bei den hohen Abwasservolumenströmen sowie den hohen Duschwassertemperaturen. Zudem wird kein zusätzlicher Grauwasserspeicher benötigt und die Wärmeverluste sind aufgrund der kurzen Distanz zwischen dem Duschabfluss und dem Wärmetauscher gering.

Im Jahr 2014 wurde dann von Waternet in Zusammenarbeit mit der „Delft University of Technology“ (Delft, Niederlande) ein Pilotprojekt ins Leben gerufen. Zum einen sollte die Effizienz des Duschwasserwärmetauschers des Herstellers Dutch Solar Systems überprüft werden. Zum anderen sollte auch das Einsparungspotenzial hinsichtlich der Treibhausgasemissionen einer solchen Einheit bewertet werden.

5.1.1 Versuchsaufbau und Rahmenbedingungen

Es wurden insgesamt zwei Versuchsaufbauten errichtet. In einem Studentenwohnheim auf dem Campus Uilenstede in der niederländischen Gemeinde Amstelveen sollte der tatsächliche Alltagsgebrauch eines Wärmetauschers widergespiegelt werden. Zusätzlich gab es einen Versuchsaufbau im eigenen Labor

von Waternet, damit die Einheiten unter kontrollierten Laborbedingungen getestet werden konnten.

In Uilenstede wurden insgesamt 100 Duschwasserwärmetauscher von Dutch Solar Systems in den Einzelappartements des Studentenwohnheims installiert. Lediglich zehn der Wohneinheiten wurden überwacht. Davon galten zwei Wohnungen ohne Wärmerückgewinnung als Referenzen. Von den restlichen acht waren zwei mit einer horizontalen und sechs mit einer vertikalen Einheit ausgestattet. In allen zehn Appartements wurden dann der Volumenstrom durch den Wärmeübertrager sowie die Temperaturen des Kaltwassers vor und nach Durchlauf des Systems gemessen. Die Aufzeichnungen erfolgten über die Monate von September bis Dezember 2014.

Im Labor wurde ein vertikaler Wärmetauscher von Dutch Solar Systems installiert. Dieser hat laut Herstellerangaben einen Wirkungsgrad von 62 %. Die Gesamtkosten inklusive der Installation belaufen sich auf rund 500 €. (Deng et al., 2016)

Im Labor wurden nun zwei Versuche durchgeführt:

- Das erste Experiment sollte die Winterkonditionen simulieren. Man ging von einer hohen Duschtemperatur von 38 °C, einer Kaltwassertemperatur von 11 °C und einem Volumenstrom von 5,4 beziehungsweise 6,5 l/min aus. Es wurden sechs Duschvorgänge mit jeweils 30 Minuten Länge, aber unterschiedlichen Zeitspannen dazwischen durchgeführt. (Deng et al., 2016)
- Der zweite Versuch fingierte ein Sommerszenario. Die Duschtemperatur war niedriger und lag bei 33 °C. Die Kaltwassertemperatur war höher und betrug 20 °C. Die Volumenströme waren 5,2 respektive 6,8 l/min. Es wurden insgesamt drei Duschvorgänge mit jeweils 15 Minuten Zeitintervall dazwischen durchlaufen. (Deng et al., 2016)

Abschließend wurde die Effizienz der Wärmetauscher, die jährlichen Energie- und CO_2-Einsparungen sowie die Payback Time bestimmt.

5.1.2 Ergebnisse

Im Labor unter Winterkonditionen konnte eine marginal geringere Effizienz bei höherem Durchfluss festgestellt werden (2,5 bis 3 %). Der Wirkungsgrad lag je nach Volumenstrom zwischen 61,5 und 64,5 %. Die Duschdauer hat die Leistung des Wärmetauschers nicht merklich beeinflusst. Kurze Zeitintervalle zwischen

Duschvorgängen hingegen können die Leistung etwas steigern, weil der Wärmeübertrager bereits vorgewärmt ist. (Deng et al., 2016)

Unter den Sommerkonditionen im Labor fiel auch hier eine reduzierte Effizienz bei einem höheren Durchfluss auf. Die Unterschiede waren jedoch geringer im Vergleich zum Winterversuch, dies aufgrund der geringeren Temperaturdifferenz zwischen Kaltwasser und Duschabwasser. Der Wirkungsgrad lag je nach Volumenstrom zwischen 57 und 62 %. Außerdem hat im Sommer die Duschdauer einen größeren Einfluss, denn die Effizienz konnte bei längeren Duschzeiten um bis zu 1,4 % erhöht werden. (Deng et al., 2016)

Die Messungen und Ergebnisse aus dem Studentenwohnheim wurden mit den Resultaten der Laborversuche, die die Winterkonditionen simuliert haben, verglichen. Der Wirkungsgrad des vertikalen Wärmetauschers in Uilenstede lag nur bei 57 % und war somit geringer als im Labor (Deng et al., 2016). Dies könnte zwei mögliche Gründe haben:

- Die Temperaturdifferenz zwischen dem Duschabwasser und dem Kaltwasser war in den Appartements geringer, da das Frischwasser im Wohngebäude etwas wärmer war als im Labor.
- Außerdem gab es im Studentenwohnheim höhere Schwankungen beim Wasserfluss, weil dieser in der Praxis nicht so gut zu kontrollieren war wie im Labor.

Die Energieeinsparungen bei einer angenommenen Duschdauer von zehn Minuten pro Tag und einem wassersparenden Duschkopf mit einem Volumenstrom von 5 l/min lagen im Winter bei 1,1 kWh und im Sommer bei 0,4 kWh pro Duschvorgang. Würden nun alle 412.000 Wohneinheiten in Amsterdam mit Wärmerückgewinnungseinheiten ausgestattet werden, könnte der Erdgasverbrauch jährlich rein rechnerisch um 4,5 % reduziert werden. Dies entspricht einer CO_2-Einsparung von 54.000 t CO_2 (Deng et al., 2016). Das Ziel von Waternet, klimaneutral zu agieren, könnte somit durch die flächendeckende Aufrüstung der Haushalte mit Duschwasserwärmetauschern, erreicht werden.

Die Rückzahldauer liegt für Einzelappartements im Studentenwohnheim bei rund 13 Jahren. Sie verkürzt sich jedoch bei einer steigenden Personenzahl im Haushalt. In

der Regel konnte festgehalten werden, dass die Amortisationszeit zwischen 4 und 25 Jahren beträgt. (Deng et al., 2016)

5.2 Projekt im "Archetype Sustainable House" in Vaughan, Kanada

Bereits im Jahre 2011 wurde dieses Pilotprojekt als Grundlage für eine Masterabschlussarbeit an der „Ryerson University" (Toronto, Kanada) durchgeführt. Das Ziel war es, die Faktoren zu bestimmen, die die Leistung einer Grauwasserwärmerückgewinnung beeinflussen. Außerdem sollten die möglichen Energie- und CO_2-Einsparungen ermittelt werden, um zu bewerten, ob sich die Installation eines Grauwasserwärmetauschers in Wohngebäuden überhaupt lohnt.

5.2.1 Versuchsaufbau und Rahmenbedingungen

Der Versuchsaufbau erfolgte in zwei „Archetype Sustainable Houses", also Prototypen für nachhaltige Wohngebäude, auf dem „Kortright Living City Campus" in Vaughan, einer Stadt in der kanadischen Provinz Ontario. Diese beiden Häuser dienten der Veranschaulichung von nachhaltigen Technologien und waren Musterbeispiele für erneuerbare Energien, Umweltschutz sowie Energieeffizienz. Die beiden Doppelhaushälften waren jeweils mit der identischen Grauwasserwärmerückgewinnungseinheit ausgestattet. Darüber hinaus verfügten beide um weitere, jedoch jeweils unterschiedliche nachhaltige Energiesysteme. Haus A hatte einen Flachkollektor für die Solarthermie und einen kleinen Erdgaskessel, während Haus B mit einem Vakuumröhrenkollektor für die Solarthermie und einem elektrischen Pufferspeicher ausgestattet war.

Der installierte Grauwasserwärmetauscher war der vertikale Wärmeübertrager Power-Pipe R3-36 von dem nordamerikanischen Hersteller RenewABILITY. Das System hatte einen Wirkungsgrad von 39 % und kostete (ohne Installationskosten) 605 $ (RenewABILITY).

Für die Versuche wurde von einem Vier-Personen-Haushalt mit einem standardisierten Warmwasserverbrauch ausgegangen. Es wurde angenommen, dass der Warmwasserverbrauch 225 l/Tag beträgt, wobei 80 % davon Grauwasser war, dessen Energie entzogen werden konnte. Weiterhin galt die Annahme, dass das Heißwasser eine Temperatur von 48 °C aufweisen sollte. (Sustainable Technologies Evaluation Program, 2015)

Nun wurden die jeweiligen Vor- und Rücklauftemperaturen des Frisch- sowie Duschabwassers durch den Wärmetauscher und der Volumenstrom gemessen. Dies geschah über den Zeitraum eines ganzen Jahres, um eventuelle jahreszeitliche Unterschiede (zum Beispiel zwischen Sommer und Winter) genau zu erfassen. Mit diesen Messwerten konnte die zurückgewonnene Wärmeenergie ermittelt werden.

Zusätzlich wurden die jährlichen Energie- und Kosteneinsparungen berechnet. Die Rahmenbedingungen hierfür waren folgende: vier Duschen/Tag, die jeweils zehn Minuten andauerten, bei einer Duschwassertemperatur von 41 °C (Sustainable Technologies Evaluation Program, 2015).

Schlussendlich wurden auch die CO_2-Einsparungen ermittelt. Hier wurden CO_2-Emissionen für einen elektrischen Warmwassererzeuger von 0,16 kg CO_2/kWh und für Erdgaskessel von 1,879 kg CO_2/m³ angenommen (Sustainable Technologies Evaluation Program, 2015).

5.2.2 Ergebnisse

Für den oben erklärten Versuchsaufbau konnten mehrere Aspekte herausgefunden werden, die in manchen Punkten die Ergebnisse des Pilotprojekts aus den Niederlanden bestätigen:

- Im Winter weist der Wärmetauscher eine bessere Leistung auf als im Sommer. Dies liegt an der geringeren Kaltwassertemperatur in den kalten Monaten, wodurch mehr Wärme von dem heißen auf das kalte Medium übertragen werden kann. So kann die Temperatur des Frischwassers im Winter um 11,8 °C und im Sommer jedoch nur um 9,7 °C erhöht werden (Sustainable Technologies Evaluation Program, 2015).
- Je mehr Personen im Haushalt leben, desto besser wird die Leistung der Einheit. In einem mehrköpfigen Haushalt wird häufiger und in geringeren Zeitabständen geduscht. Dadurch ist der Wärmeübertrager bereits vorgewärmt und Verluste, um ihn zu erhitzen, entfallen. Somit wird der Betriebszustand schneller erreicht und die Maximalleistung kann früher erbracht werden.
- Der Wärmeübertrager kann eine erhöhte Leistung erzielen, wenn der Volumenstrom des Duschabwassers größer ist als die Durchflussmenge des Kaltwassers durch die Spulen. Dies ist beispielsweise bei Duschvorgängen mit einem gleichzeitigen Wasserfluss der Fall.

- Bei höheren Grauwassertemperaturen werden auch bessere Leistungen erreicht. Dies gilt für die Fälle, in denen der Wärmetauscher seinen Betriebszustand noch nicht erreicht hat und erst aufgeheizt werden muss.
- Der Wirkungsgrad des Wärmetauschers hängt nicht von der Frischwassertemperatur ab, sondern lediglich von den verschiedenen baulichen Faktoren (vergleiche Abschnitt 3.3).
- Die zurückgewonnene Wärmeenergiemenge hängt sehr stark von den Nutzern ab. Dabei spielt vor allem die Anzahl der Personen im Haushalt eine Rolle, aber auch, wie oft und wie lange geduscht wird oder welcher Grauwasservolumenstrom durch den Wärmetauscher fließt.
- Die Amortisationszeit ist relativ kurz und liegt je nach Rahmenbedingungen zwischen drei und rund zwölf Jahren (Sustainable Technologies Evaluation Program, 2015). Die Payback Time kann sogar noch mehr verkürzt werden, wenn besonders ineffiziente Duschköpfe mit höheren Volumenströmen verwendet werdet. Dies ist jedoch vor dem Hintergrund des Wassersparens nicht zu empfehlen.
- Die CO_2-Emissionen können in einem Vier-Personen-Haushalt mit einem elektrischen Warmwassererzeuger (Haus B) um 126,2 kg CO_2 reduziert werden. Dies entspricht der Menge, die durch 14 Bäume aufgenommen werden kann. Ein Wohngebäude mit einem Erdgaskessel (Haus A) kann sogar 144,1 kg CO_2 einsparen. (Sustainable Technologies Evaluation Program, 2015)

6 Grauwasserwärmetauscher in Wohngebäuden der SNHBM

Die Luxemburger Gesellschaft „Société Nationale des Habitations à Bon Marché“ (SNHBM) ist ein sozialer Bauträger, dessen Ziel es ist, hoch qualitative Wohnungen zu erschwinglichen Preisen zu errichten. Jährlich werden rund 300 neue Wohnungen gebaut, die allesamt die aktuellen Anforderungen der Energieeffizienzstandards, die im Règlement grand-ducal vorgeschrieben sind, erfüllen (SNHBM). Um in Zukunft noch mehr Energie sowie CO_2-Emissionen einzusparen, könnten die Ein- und Mehrfamilienhäuser zusätzlich mit Grauwasserwärmerückgewinnungseinheiten ausgestattet werden.

Vom jetzigen Stand der Technik aus gesehen wären hier im ersten Schritt Wärmetauscher zu bevorzugen, die die Wärme ausschließlich dem Duschwasser entziehen. Dieser Typ von Wärmeübertragern ist bereits seit Jahren erforscht und getestet worden und stellt daher eine ausgereifte Technologie dar. Demgegenüber sind Einheiten, die auch stärker verschmutztem Grauwasser von Wasch- oder Spülmaschinen die Wärme entziehen, noch nicht so weit entwickelt und deshalb zum aktuellen Zeitpunkt noch nicht zu empfehlen.

Unter den Duschwasserwärmetauschern sind die vertikalen Duschrohre den horizontalen Systemen vorzuziehen. Beide lassen sich zwar sehr einfach einbauen, letztere haben jedoch eine wesentlich geringere Effizienz. Lediglich in Wohngebäuden, in denen tatsächlich nicht genug Platz für die Installation eines Duschrohres ist, das am Abflussrohr unterhalb der Dusche montiert werden muss, sollte auf einen horizontalen Wärmeübertrager zurückgegriffen werden. Dieser wird direkt in die Duschwanne beziehungsweise in die Duschrinne integriert und benötigt daher auch keinen zusätzlichen Platz. Bei der zukünftigen Planung von Neubauten könnte SNHBM bereits genügend Platz für einen vertikalen Wärmetauscher vorsehen, um von seinem höheren Wirkungsgrad und den damit verbundenen Energie- sowie CO_2-Einsparungen zu profitieren.

In einem Einfamilienhaus würde die Wärmerückgewinnung dezentral, also direkt in der Duschrinne oder im Abfluss der Dusche, stattfinden. In einem Mehrfamilienhaus kann die Wärmerückgewinnung entweder zentral oder dezentral erfolgen. Bei der zentralen Variante verfügt jede Wohneinheit über seine eigene Wärmetauschereinheit. Alternativ könnten jedoch auch mehrere Appartements an ein einziges System anschlossen

werden. Solche Produkte, bei denen bis zu vier Duschen an einen Wärmeübertrager angeschlossen werden können, bietet beispielsweise der Hersteller Q-Blue an (vergleiche Abschnitt 4.4).

Wie bereits erwähnt, steht der Bauträger SNHBM für bezahlbaren aber auch modernen Wohnraum. Für die Gesellschaft ist es wichtig, dass die Produkte aus dem Inland oder aus dem näheren Ausland wie beispielsweise aus Europa kommen. Die globale Nachhaltigkeit spielt somit eine große Rolle bei der Planung und Umsetzung der Bauprojekte. Dementsprechend sollen so bereits durch die kürzeren Transportwege von regionalen Unternehmen nach Luxemburg viel Energie und CO_2-Emissionen eingespart werden. Es empfiehlt sich daher, die Duschwasserwärmerückgewinnungseinheiten zum Beispiel von den „lokalen“ Firmen Wagner Solar oder Q-Blue zu verwenden. Neben diesen beiden Herstellern gibt es natürlich auch noch weitere Anbieter auf dem europäischen Markt. Es sollte noch geprüft werden, welches Produkt am ehesten den Anforderungen und Wünschen (sowohl baulich als auch wirtschaftlich) der SNHBM entspricht.

6.1 Beeinflussende Faktoren für das Potenzial in Wohngebäuden

Die Effizienz von Wärmerückgewinnungseinheiten aus dem Duschwasser hängt vor allem von baulichen Faktoren ab (vergleiche Abschnitt 3.3). Um jedoch zu bewerten, wie hoch das Umsetzungspotenzial eines Wärmetauschers in einem Wohngebäude ist, fallen auch andere Aspekte ins Gewicht.

Die Anzahl der Personen, die im Haushalt leben, ist ein wichtiger Faktor. Je mehr Menschen in dem Gebäude leben, desto höher ist der Warmwasserverbrauch, wodurch die Installation einer Wärmerückgewinnungseinheit wirtschaftlicher wird. Aus diesem Grund lohnt es sich aus ökonomischer Sicht mehr, Grauwasserwärmetauscher in Mehrfamilienhäusern einzubauen, in denen möglichst viele Haushalte an die Systeme angeschlossen sind. Für Einfamilienhäuser ist, laut Studien, eine Personenzahl zwischen drei und vier am günstigen, da hier die Amortisationszeit wesentlich kürzer ist als bei kleineren Haushalten (Garcia, 2016).

Das spezifische Nutzerverhalten der Personen, die in dem Gebäude leben, spielt auch eine wesentliche Rolle. Dazu zählen die Duschdauer und der Warmwasserverbrauch. In der Regel kann man sagen, dass Haushalte mit mehr Personen einen höheren

Warmwasserverbrauch haben als kleinere Wohngemeinschaften. Doch auch zwei Vier-Personen-Haushalte können beispielsweise sehr diverse Nutzerverhalten aufweisen. Während der eine Haushalt sparsam mit dem Warmwasser umgeht und zum Beispiel nur wenige, kurze Duschdauern hat, kann in dem anderen Haushalt oft und lange geduscht werden. Diese Unterschiede im Nutzerverhalten kann man als Bauträger bei der Planung eines Wohngebäudes und der Auswahl einer Duschwasserwärmerückgewinnungseinheit nicht vorhersehen. Man muss daher auf Anhaltswerte aus den Normen zurückgreifen. Dennoch sollte man die Tatsache im Blick behalten, dass der Nutzer selbst auch einen großen Einfluss auf das Potenzial eines Grauwasserwärmetauschers hat.

6.2 Amortisationszeit der Duschwasserwärmetauscher

Unter der Amortisationszeit versteht man den Zeitraum, in dem die Investitionskosten (hier des Wärmetauschers) sich rentieren beziehungsweise von den jährlichen Einsparungen gedeckt werden. Es ist somit die Anzahl an Jahren bis zum Erreichen der Gewinnschwelle. Je kürzer dieser Zeitraum also ist, desto wirtschaftlicher ist der Wärmeübertrager.

Die sogenannte Payback Time hängt von mehreren Faktoren ab:

- Nutzerverhalten: Wie bereits unter Abschnitt 6.1 erläutert, spielt die Anzahl der Personen, die im Haushalt leben, eine wesentliche Rolle bei der Rückzahldauer. Doch auch das spezifische Nutzerverhalten der Bewohner hat einen Einfluss darauf. So sind vor allem Systeme in sparsamen Haushalten weniger rentabel. Bei nur kurzen Duschdauern und damit geringeren Durchflüssen kann weniger Wärme zurückgewonnen werden und es kann weniger Energie eingespart werden.
- Energiekosten: Je geringer die Energiekosten für die Warmwassererzeugung sind, desto länger ist auch die Rückzahldauer. Aus diesem Grund ist die Amortisationszeit für einen Wärmeerzeuger, der mit Erdgas (0,0467 €/kWh (Enovos, 2021a)) betrieben wird, erheblich länger als jene für eine Warmwasserbereitung, die mit Strom (0,1642 €/kWh (Enovos, 2021b)) arbeitet.
- Effizienz des Wärmeübertragers: Je höher der Wirkungsgrad des Produktes ist, desto mehr Wärme kann aus dem Duschwasser zurückgewonnen werden.

Dadurch ist es möglich, die Energieeinsparungen zu steigern und folglich die Gewinnschwelle innerhalb eines kürzeren Zeitraumes zu erreichen. Würde man also die Rückzahldauer eines horizontalen Wärmetauschers in der Duschrinne mit der eines vertikalen Duschrohres (unter den gleichen Rahmenbedingungen sowie mit den gleichen Investitionskosten) vergleichen, wäre das Duschrohr rentabler aufgrund seiner höheren Effizienz.

- Kosten des Systems: Geht man von zwei Wärmerückgewinnungseinheiten gleicher Effizienz aus, so ist die Payback Time des teureren Produktes länger.

Die genannten Punkte sind Anhaltspunkte für die Einschätzung der Amortisationszeit von Duschwasserwärmetauschern. In der Praxis, beim Vergleich mehrerer Einheiten, fallen die Faktoren von Fall zu Fall unterschiedlich ins Gewicht. Daher sollte stets eine genaue Berechnung durchgeführt werden.

6.3 Mögliches Pilotprojekt in einer Neubausiedlung von SNHBM

In einer zukünftigen Neubausiedlung mit Einfamilienhäusern von SNHBM könnte man ein Pilotprojekt starten, um die Wärmerückgewinnung aus dem Duschwasser mit Hilfe von Wärmetauschern zu überwachen.

Angenommen die Siedlung bestünde aus 12 Wohngebäuden. So würde man die Hälfte der Häuser mit den Wärmeübertragereinheiten ausstatten und die restlichen sechs Gebäude ohne Wärmerückgewinnung bauen.

Beim anschließenden Monitoring sollen einerseits die Energieverbräuche zur Warmwasserbereitung verglichen werden. Andererseits könnte man überprüfen, ob die Effizienz der Wärmetauscher auch im alltäglichen Gebrauch mit den jeweiligen Herstellerangaben übereinstimmen. Hier muss man jedoch bedenken, dass die Ergebnisse nur bedingt aussagekräftig sind, da jeder Haushalt ein anderes Nutzerverhalten hat, was die Resultate beeinflussen kann.

Der Versuchsaufbau könnte wie folgt aussehen: In jedem Haus, das mit einer Duschwasserwärmerückgewinnung ausgestattet wurde, werden die Temperaturen des Kaltwassers vor und nach dem Wärmetauscher gemessen. In den Häusern ohne Wärmerückgewinnung wird lediglich die Kaltwassertemperatur gemessen. Man könnte jedoch auch vereinfacht die Vorlauftemperatur des Frischwassers aus den anderen

Wohngebäuden übernehmen, damit man weniger Temperatursensoren anbringen muss. Zusätzlich zu den Temperaturen sollte der Duschwassermassenstrom gemessen werden, um das unterschiedliche Nutzerverhalten der Haushalte zu überwachen.

Der Vergleich zwischen den Wohngebäuden erfolgt nach den Messungen durch eine statistische Auswertung der Ergebnisse. Für die Überprüfung der Effizienzangaben werden lediglich die Resultate der Häuser mit Wärmerückgewinnung benötigt. Der berechnete Wirkungsgrad kann dann mit den Angaben der Produzenten verglichen werden.

7 Beispielrechnung für einen vertikalen Duschwasserwärmetauscher

In diesem Abschnitt wird eine Beispielrechnung für die Energie- und CO_2-Einsparungen sowie die Amortisationszeit für einen vertikalen Duschwasserwärmetauscher durchgeführt.

Die Rahmenbedingungen für das Wohngebäude sind folgende:

- Einfamilienhaus von SNHBM mit einer Energieeffizienzklasse B und einer Wärmeschutzklasse B (Niedrigenergiehaus)
- Energiebezugsfläche A_n von 160,6 m² (SNHBM, 2020)
- Vier-Personen-Haushalt
- Täglicher Warmwasserverbrauch von 40 l/Person, also 160 l/Haushalt
- Nutzwärmebedarf für das Warmwasser von 13,9 kWh/m²a (SNHBM, 2020)

Der gewählte vertikale Duschwasserwärmeübertrager ist das ECOShower Duschrohr 15 von Wagner Solar. Der maximale Durchfluss beträgt 15 l/min. Die Länge liegt bei 2100 mm und das Rohr hat einen Durchmesser von 63 mm. Der Wirkungsgrad nach NEN 7120 bei einem Volumenstrom von 12,5 l/min beträgt 60 % (Wagner Solar, 2020). Der Bruttopreis der Einheit setzt sich aus den Kosten für das Duschrohr selbst (523 €) und jenen für das Anschlussset (61 €) zusammen. Insgesamt ergibt dies einen Preis von 584 € (pv-solartechnik.de/shop/waermerueckgewinnung).

Im Folgenden wird zwischen zwei Warmwasserbereitungen unterschieden. In Fall 1 hat man einen Erdgasbrennwertkessel, der durch eine thermische Solaranlage unterstützt wird. In Fall 2 hingegen hat man eine Elektrowärmepumpe (Luft/Wasser), die durch eine thermische Solaranlage sowie eine elektrische Zusatzheizung unterstützt wird. Für beide Fälle werden zunächst jeweils der spezifische Nutzwärme-, Endenergie- und Primärenergiebedarf sowie die spezifischen CO_2-Emissionen ohne Berücksichtigung der Wärmerückgewinnung berechnet. Alle Formeln und Werte werden dem „Journal officiel du Grand-Duché du Luxembourg - Règlement grand-ducal du 9 juin 2021 concernant la performance énergétique des bâtiments“ entnommen. Anschließend wird der Nutzenergieeintrag infolge der Wärmerückgewinnung nach der DIN V 18599-8 bestimmt. Damit kann für Fall 1 und 2 jeweils der spezifische Nutzwärme-, Endenergie- und Primärenergiebedarf sowie die spezifischen CO_2-Emissionen mit Berücksichtigung der Wärmerückgewinnung ermittelt werden. (siehe Anhang)

7.1 Ergebnisse für Fall 1

Der spezifische Nutzwärmebedarf ohne Wärmerückgewinnung liegt bei 17,5 kWh/m²a. Mit Berücksichtigung der Wärmerückgewinnung liegt er bei 12,35 kWh/m²a (siehe Anhang, Tabellen 1 und 3). Daraus ergibt sich eine Einsparung von 5,15 kWh/m²a oder bezogen auf die Energiebezugsfläche, rund 827 kWh/a, was der zurückgewonnenen Nutzenergie entspricht.

Beim spezifischen Endenergiebedarf kommt man auf 7,85 kWh/m²a (ohne Wärmerückgewinnung) und 5,54 kWh/m²a (mit Wärmerückgewinnung) (siehe Anhang, Tabellen 5 und 7). Die Einsparung durch den Wärmetauscher beträgt demnach 2,31 kWh/m²a respektive circa 371 kWh/a (bezogen auf die Energiebezugsfläche).

Für den spezifischen Primärenergiebedarf erhält man einen Wert von 8,79 kWh/m²a (ohne Wärmerückgewinnung) beziehungsweise 6,20 kWh/m²a (mit Wärmerückgewinnung) (siehe Anhang, Tabellen 9 und 11). Hier können 2,59 kWh/m²a oder, bezogen auf die Energiebezugsfläche, etwa 416 kWh/a eingespart werden.

Die spezifischen CO_2-Emissionen betragen ohne Wärmerückgewinnung 1,93 kg CO_2/m²a und mit Wärmerückgewinnung 1,36 kg CO_2/m²a (siehe Anhang, Tabellen 13 und 15). Die Einsparung liegt somit bei 0,57 kg CO_2/m²a oder auch knapp 92 kg CO_2/a (bezogen auf die Energiebezugsfläche).

7.2 Ergebnisse für Fall 2

Beim spezifischen Nutzwärmebedarf kommt man, wie auch bei Fall 1, auf 17,5 kWh/m²a (ohne Wärmerückgewinnung) und 12,35 kWh/m²a (mit Wärmerückgewinnung) (siehe Anhang, Tabellen 2 und 4). Die Einsparung durch den Wärmetauscher beträgt demnach 5,15 kWh/m²a respektive circa 827 kWh/a (bezogen auf die Energiebezugsfläche).

Für den spezifischen Endenergiebedarf erhält man einen Wert von 2,74 kWh/m²a (ohne Wärmerückgewinnung) beziehungsweise 1,93 kWh/m²a (mit Wärmerückgewinnung) (siehe Anhang, Tabellen 6 und 8). Hier können 0,81 kWh/m²a oder, bezogen auf die Energiebezugsfläche, rund 130 kWh/a eingespart werden.

Der spezifische Primärenergiebedarf beträgt ohne Wärmerückgewinnung 4,11 kWh/m²a und mit Wärmerückgewinnung 2,90 kWh/m²a (siehe Anhang, Tabellen 10

und 12). Die Einsparung liegt somit bei 1,21 kWh/m²a oder auch knapp 194 kWh/a (bezogen auf die Energiebezugsfläche).

Die spezifischen CO_2-Emissionen ohne Wärmerückgewinnung liegen bei 1,01 kg CO_2/m²a. Mit Berücksichtigung der Wärmerückgewinnung liegen sie bei 0,71 kg CO_2/m²a (siehe Anhang, Tabellen 14 und 16). Daraus ergibt sich eine Einsparung von 0,30 kg CO_2/m²a oder, bezogen auf die Energiebezugsfläche, etwa 48 kg CO_2/a, was der zurückgewonnenen Nutzenergie entspricht.

7.3 Interpretation der Ergebnisse der beiden Fälle

Für den ersten Fall mit dem Brennwertkessel und der solarthermischen Unterstützung kann man mit Hilfe des Duschrohres jährlich insgesamt rund 29 % des Nutzenergiebedarfes einsparen. Der jährliche Endenergiebedarf reduziert sich ebenfalls um etwa 29 %. Der jährliche Primärenergiebedarf fällt um circa 26 % geringer aus. Der angenommene Vier-Personen-Haushalt könnte durch die Wärmerückgewinnung rund 29 % an CO_2-Emissionen pro Jahr einsparen. Man kann also sagen, dass in der Regel der Energiebedarf sowie die CO_2-Emissionen um etwas weniger als ein Drittel zurückgehen, dies alleine durch den Entzug der nicht genutzten Wärme aus dem Duschwasser.

Des Weiteren kann bei Fall 1 für die Warmwassererzeugung jährlich 39 m³ Erdgas eingespart werden (mit einem Brennwert von 10 kWh/m³ und einer Zustandszahl von 0,95 (Dein Heizungsbauer, o. J.)). Die Energiekosten könnten somit um rund 17 € pro Jahr reduziert werden.

Zu Fall 2 muss angemerkt werden, dass die Resultate nur als Anhaltspunkte gesehen werden können. In der Realität ist es durchaus möglich, dass es zu mehr oder weniger großen Abweichungen kommt. Dies liegt an der Tatsache, dass sowohl die Wärmepumpe als auch die Solarthermie sowie die Wärmerückgewinnung auf einem niedrigen Temperaturniveau betrieben werden. So kann es vorkommen, dass alle Systeme in einer gewissen Konkurrenz zueinanderstehen und die reellen Einsparungen nur schwer nachzuvollziehen sind. Würde man jedoch das Temperaturniveau erhöhen, um die Einsparungen besser zu identifizieren, könnte die Leistungszahl beziehungsweise der „Coefficient of Performance“ sinken. Solche

Änderungen sind nur schwer vorherzusehen, wodurch sich die Bewertung der Ergebnisse von Fall 2 als recht schwierig gestaltet.

Ein wesentlicher Vorteil der Wärmerückgewinnung, neben den Energie- und CO_2-Einsparungen, ist dennoch, dass die ursprünglichen Warmwasserbereiter wie der Erdgasbrennwertkessel oder die Wärmepumpe kleiner dimensioniert werden könnten.

7.4 Amortisationszeit

Für die Berechnung der Amortisationszeit werden folgende Energiekosten angenommen (Stand 2021 für das Großherzogtum Luxemburg):

- Erdgas (naturgas von Enovos, inklusive Erdgas- und CO_2-Steuer sowie 8 % Mehrwertsteuer): 0,0467 €/kWh (Enovos, 2021a)
- Strom (naturstroum von Enovos, inklusive Netznutzungskosten, Kompensationsfonds, Verbrauchssteuer und 8% Mehrwertsteuer): 0,1642 €/kWh (Enovos, 2021b)

Weiterhin wird zur Vereinfachung der Berechnung vorausgesetzt, dass der Bruttopreis des Duschrohres (584 €) die Installationskosten abdeckt. Dadurch sollen die Rabatte, die Unternehmen bei großen Bestellungen erhalten, berücksichtigt werden. Schlussendlich werden die Wartungskosten und die Zinsen mit Null angesetzt.

Mit diesen Annahmen erhält man für den Fall 1 eine Amortisationszeit von fast 34 Jahren. Die Payback Time für Fall 2 beträgt hingegen nur knapp 28 Jahre.

7.5 Vergleich mit den Herstellerangaben

Die Hersteller versprechen meist sehr hohe Energie- und CO_2-Einsparungen. So gibt RenewABILITY beispielsweise an, dass jährlich fast eine Tonne CO_2 eingespart werden könnte. Wagner Solar wirbt mit einer Erdgaseinsparung von 220 m³ pro Jahr für eine vierköpfige Familie. Die Rückzahldauern liegen bei den meisten Produzenten in einem Bereich zwischen zwei und zehn Jahren (vergleiche Abschnitt 4). Vergleicht man diese Zahlen mit den Resultaten aus der Beispielrechnung (ausschließlich Fall 1, wegen der Unsicherheiten bei Fall 2), stellt man erhebliche Diskrepanzen fest.

Für Fall 1 lag die CO_2-Einsparung lediglich bei 92 kg CO_2 pro Jahr. Die Berechnung wurde zwar nicht für den vertikalen Wärmetauscher des Herstellers RenewABILITY durchgeführt, dennoch sind die Effizienzwerte und somit die Einsparungen mit dem ECOShower Duschrohr von Wagner Solar vergleichbar. Man kann demnach festhalten, dass die Hersteller rund zehnmal höhere Emissionseinsparungen angeben, als dies für ein Einfamilienhaus von SNHBM (Fall 1) berechnet wurde.

Auch die berechnete Erdgaseinsparung ist mit 39 m³ pro Jahr deutlich geringer, als von Wagner Solar genannt.

Letztlich ist die Payback Time mit 34 Jahren etwa dreimal höher als die längsten von den Herstellern angegeben Amortisationszeiten.

Diese nicht zu verachtenden Abweichungen können zwei Gründe haben:

- Zum einen ist es schwierig, die Ergebnisse der Beispielrechnung mit den Herstellerangaben zu vergleichen, weil letztere die Rahmenbedingungen für ihre Kalkulationen nicht mitveröffentlicht haben. So ist nicht klar, welcher Nutzwärmebedarf und welche Wärmeerzeugung zur Warmwasserbereitung angenommen wurden, um solch hohe Einsparungen zu erzielen. Es ist davon auszugehen, dass die Produzenten eher schlechtere Szenarien als Ausgangspunkt wählen. Geht man beispielsweise von einem Wohngebäude aus, das einen hohen Nutzwärmebedarf hat, macht sich eine Wärmerückgewinnung deutlicher bemerkbar und die Energieeinsparung fällt höher aus. Auch bei einer Warmwasserbereitung mit zum Beispiel einem heizölbetriebenen Heizkessel können mehr CO_2-Emissionen eingespart werden, als bei einem mit Solarthermie unterstützten Erdgasbrennwertkessel. In der Beispielrechnung betrug der Anteil der Solarthermie 61 %, welcher für die Kalkulation der Emissionen als null angenommen wird. Aus diesem Grund kann trotz Duschwasserwärmetauscher weniger eingespart werden.
- Zum anderen wird in der Beispielrechnung von einem Neubau ausgegangen, der die aktuellen Niedrigstenergiehausstandards erfüllt. Somit ist der Nutzwärmebedarf für die Warmwasserbereitung an sich schon sehr gering. Folglich kann auch weniger Energie eingespart werden. Aufgrund der geringen jährlichen Einsparungen ist die Payback Time in besonders energieeffizienten Häusern auch wesentlich höher als von den Herstellern angegeben.

7.6 Anmerkung zur Berechnung für einen horizontalen Wärmetauscher

Führt man die vorherige Beispielrechnung nun mit den gleichen Rahmenbedingungen für einen horizontalen Wärmetauscher durch, ändert sich an den Formeln und Rechenwegen nichts. Die Werte aus dem „Journal officiel du Grand-Duché du Luxembourg - Règlement grand-ducal du 9 juin 2021 concernant la performance énergétique des bâtiments“ können analog zu jenen für die vertikale Wärmerückgewinnungseinheit übernommen werden. Lediglich die Angaben für den Wärmeübertrager, also der Wirkungsgrad sowie die Investitionskosten, müssen angepasst werden.

Aufgrund des generell geringeren Wirkungsgrades einer horizontalen Einheit im Vergleich zu einem vertikalen System kann davon ausgegangen werden, dass die Einsparungen geringer ausfallen werden.

8 Ausblick

Im Hinblick auf weiter steigende Energiekosten (unter anderem durch die CO_2-Bepreisung) sowie den politischen Willen, den Energieverbrauch insgesamt innerhalb der nächsten Jahrzehnte europaweit deutlich zu senken, kann die Wärmerückgewinnung aus dem Grauwasser innerhalb von Gebäuden ein zwar kleiner, aber in der Vielzahl der Anwendungen keinesfalls unbedeutender Beitrag zur Ressourcenschonung der Erde sein.

Auch wenn die Technologie der Wärmerückgewinnung aus dem Grauwasser relativ einfach erscheint, so muss man doch auf einige Faktoren achten. Bei der Auswahl des geeigneten Wärmetauschers sollte man stets in den Herstellerangaben auf den Druckverlust beachten. Dieser darf, um Probleme in der Trinkwasserleitung zu vermeiden, nicht zu hoch sein.

Ein eventueller Nachteil der Wärmerückgewinnung aus dem Duschwasser könnte durch den Wärmeentzug die Abkühlung des Abwassers sein. In Kläranlagen könnte dies vor allem in der biologischen Reinigungsstufe, bei der eine Mindesttemperatur benötigt wird, problematisch sein. Dieser Aspekt ist aktuell noch nicht wissenschaftlich belegt und müsste in Zukunft noch eingehend erforscht werden.

Die Installation eines Duschwasserwärmeübertragers ist besonders in Altbauten ungünstig, da die nötigen Voraussetzungen, wie beispielsweise der Platzbedarf, häufig nicht gegeben sind. Aus diesem Grund sind Nachrüstungen eher unwahrscheinlich und die Verwendung der Wärmetauscher beschränkt sich auf den Einbau in Neubauten. Lediglich bei einer kompletten Badsanierung wäre es denkbar, eine Wärmerückgewinnungseinheit zu montieren. Hier würde sich primär eine horizontale Einheit, die in der Duschrinne integriert ist, eignen, da man so keinen zusätzlichen Platz benötigt.

Letztlich ist es wichtig, dass die Personen, die im Haushalt leben, trotz des Wissens um die Energieeinsparungen ein sparsames Nutzerverhalten beibehalten. Andernfalls kann es schnell zu einem sogenannten Reboundeffekt kommen. Dies führt zu einer Reduzierung des ursprünglich positiven Effekts aufgrund des veränderten Nutzungsverhaltens der Bewohner. Das bedeutet, dass die Einsparungen wieder zunichte gemacht werden könnten, weil die Personen im Haushalt beispielsweise ausgedehnter duschen.

Trotz dieser eher kritischen Punkte haben die Wärmetauscher auch bedeutende Vorteile aufzuweisen:

Die Installation einer Wärmerückgewinnungseinheit für das Duschabwasser ist besonders in Neubauten sehr einfach und geht relativ schnell. Der Wärmetauscher an sich ist sehr kompakt und benötigt in der Regel nur wenig Platz. Vor allem horizontale Einheiten, die direkt in die Duschrinne integriert werden, fallen überhaupt nicht auf, da sie die gleiche Bauhöhe wie Duschrinnen ohne Wärmetauscher haben.

Die Systeme sind bei einem korrekten Einbau zuverlässig und haben eine lange Lebensdauer. Eine Wartung ist in den meisten Fällen nicht von Nöten, da der Wärmetauscher keine beweglichen Teile enthält. Zudem funktionieren die Wärmetauscher komplett ohne Strom und benötigen keine komplexen Steuerungs- oder Regelungssysteme.

Außerdem muss man vertikale Einheiten überhaupt nicht reinigen, und bei horizontalen Wärmeübertragern ist die Reinigung auch für Laien nicht kompliziert. Dennoch ist, aufgrund der doppelwandigen Trennung zwischen Kalt- und Duschabwasser, die hygienische Sicherheit zu jedem Zeitpunkt der Nutzung gewährt.

Nach dem jetzigen Stand der Technik sind vor allem Duschwasserwärmetauscher eine ausgereifte Technologie. Vertikale Einheiten erreichen bereits, je nach Ausführung, Wirkungsgrade von mehr als 60 %. Horizontale Systeme haben eine geringere Effizienz, liegen in der Regel aber auch über 30 %. Durch die Verwendung solcher Wärmetauscher können die herkömmlichen Warmwassererzeuger kleiner dimensioniert werden. Zusätzlich lassen sich jährlich nicht nur merkliche Mengen an Energie, sondern auch an CO_2-Emissionen einsparen.

Letztlich ist die Amortisationszeit von Wärmerückgewinnungssystemen aus dem Duschwasser oft ziemlich kurz und liegt zwischen drei und zehn Jahren. Man muss sich jedoch bewusst sein, dass sie von einem Zusammenspiel von verschiedensten Faktoren abhängig ist. Daher kann die Payback Time auch deutlich höher ausfallen, wenn beispielsweise die Energiekosten extrem niedrig sind.

Bei der Auswahl eines Wärmetauschers muss man sich stets bewusst sein, dass die Herstellerangaben in Bezug auf die CO_2-, die Kosten- und die Energieeinsparungen meist von für das Ergebnis vorteilhaften Rahmenbedingungen ausgehen. Dies

bedeutet, dass eher Wohngebäude mit schlechten energetischen Voraussetzungen gewählt werden, damit dies zu einer besseren Leistung der Wärmerückgewinnungseinheit führt und die Einsparungen dementsprechend höher ausfallen. Bei Wohngebäuden, die dem Niedrigenergiehausstandard entsprechen, kann man dennoch die CO_2-Emissionen und den Energiebedarf reduzieren, nur in einem geringeren Umfang, als es die Produzenten vorgeben.

Während in Deutschland die Wärmerückgewinnung aus dem Duschwasser seit Ende 2020 in der Energiebedarfsrechnung für Wohngebäude berücksichtigt werden kann, ist dies im luxemburgischen Règlement grand-ducal noch nicht vorgesehen. Dies könnte ein Grund sein, warum diese Technologie im Großherzogtum noch nicht so weit verbreitet ist. Nun stellt sich die Frage, ob eine zukünftige Aufnahme von Duschwasserwärmeübertragern in das Règlement grand-ducal und die Berücksichtigung der Einsparungen im Energiepass einen Anreiz für die Bauträger darstellen könnte, sich mehr mit dem Thema zu beschäftigen und es in die Planung von Neubauten miteinzubeziehen. Es wäre durchaus denkbar, dass in diesem Fall auch bekannte Hersteller wie Buderus oder Viessmann in die Forschung noch effizienterer Systeme einsteigen. So würde es eine immer größere Auswahl an performanten Produkten auf dem europäischen Markt geben.

Schlussendlich bleibt zu sagen, dass die Wärmerückgewinnung in jedem Fall ein guter Schritt in Richtung mehr Energieeffizienz von Wohngebäuden und einer Reduzierung der CO_2-Emissionen ist. Auch wenn die Einsparungen, insbesondere der Energiekosten, in der Beispielrechnung auf den ersten Blick marginal aussehen, so könnte sich eine Installation eines Duschwasserwärmetauschers aufgrund seiner Einfachheit und der günstigen Investitionskosten trotz allem lohnen. Vor allem für die SNHBM könnte es eine interessante Lösung sein, um in Zukunft noch nachhaltigere Wohneinheiten zu errichten. Da die SNHBM als Bauträger im Segment des sozial-geförderten sowie bezahlbaren Wohnraums tätig ist, wird für die Bewohner ihrer Wohneinheiten bei zu erwartenden steigenden Energiekosten jede Kosteneinsparung bei den laufenden Ausgaben von Vorteil sein.

Literaturverzeichnis

Canadian Mortgage and Housing Corporation. (2012). *Reducing Costs of Affordable Housing: Drainwater Heat Recovery*. Abgerufen am 15. Mai von https://eppdscrmssa01.blob.core.windows.net/cmhcprodcontainer/sf/project/cmhc/pdfs/content/en/rcah-drainwater-heat-recovery.pdf

Deng, Z., Mol, S., & Van Der Hoek, J. P. (2016). *Shower heat exchanger: Reuse of energy from heated drinking water for CO2 reduction.* Drinking Water Engineering and Science, 9. Abgerufen am 1. Juli 2021 von https://doi.org/10.5194/dwes-9-1-2016

DIN V 18599 - Energetische Bewertung von Gebäuden. (2018).

Europäische Kommission. (2020). *Energieeffizienz von Gebäuden*. Abgerufen am 2. August 2021 von https://ec.europa.eu/info/news/focus-energy-efficiency-buildings-2020-feb-17_de

Garcia, J. D. (2016). *Characterization of Greywater heat exchangers and the potential of implementation for energy savings Karakterisering av gråvatten värmeväxlaren och potentialen av genomförande för energy besparingar*.

Hartmann, F. (2016a). *Schmutzwasser im Wohnungsbau. SBZ*. Abgerufen am 30. Juni 2021 von https://www.sbz-online.de/wasserwirtschaft/schmutzwasser-im-wohnungsbau

Hartmann, F. (2016b). *Wärmerückgewinnung aus Grauwasser. SBZ*. Abgerufen am 10. Juli von https://www.sbz-online.de/wasserwirtschaft/waermerueckgewinnung-aus-grauwasser

Joulia SA. (2020a). *Konkrete Massnahme gegen die Klimaerwärmung: Warm Duschen mit der neuen Joulia-Twinline*. Abgerufen am 3. August 2021 von https://joulia.com/

Joulia SA. (2020b). *Technische Dokumentation Joulia-Inline*. Abgerufen am 3. August 2021 von https://joulia.com/

Niewitecka, K. (2018). *Possibilities of heat energy recovery from greywater systems.* E3S Web of Conferences, 30. Abgerufen am 7. Juli 2021 von https://doi.org/10.1051/e3sconf/20183003003

Nolde, E. (2016). *Steigerung der Energieerträge bei der Wärmerückgewinnung aus Grauwasser, DBU Projekt AZ 32156*. Abgerufen am 11. Juli 2021 von https://www.dbu.de/OPAC/ab/DBU-Abschlussbericht-AZ-32156.pdf

Passivhaus-Institut. (2020). *Kriterien und Algorithmen für die Zertifizierte Passivhaus-Komponente: Duschwasser- Wärmerückgewinnung*. Abgerufen am 27. Juli 2021 von https://passiv.de/de/03_zertifizierung/01_zertifizierung_produkte/02_zertifizierungskriterien/02_zertifizierungskriterien.htm

Showersave. (o. J.-a). *Heat Recovery System A wonderfully simple route to cost effective energy saving QB1-21 / QB1-21C QB1-21D / QB1-21D HE MultiVert*. Abgerufen am 3. August 2021 von https://showersave.com/vertical-wwhrs/#downloads

Showersave. (o. J.-b). *Showersave QB1-21*. Abgerufen am 3. August 2021 von https://showersave.com/vertical-wwhrs/#downloads

Showersave. (o. J.-c). *Showersave QB1-21D*. Abgerufen am 3. August 2021 von https://showersave.com/vertical-wwhrs/#downloads

SNHBM. (2020). *Energiepass für ein Einfamilienhaus*.

Sustainable Technologies Evaluation Program. (2015). *Evaluation of Residential Drain Water Heat Recovery Unit - Technical Brief*. Abgerufen am 17. August 2021 von https://sustainabletechnologies.ca/home/energy-conservation/evaluation-of-residential-drain-water-heat-recovery-unit/

Wagner Solar. (2016). *ECOshower - Wärmerückgewinnung aus Duschwasser*. Abgerufen am 27. Juli 2021 von https://www.wagner-solar.com/de/wrg/waermerueckgewinnung

Wagner Solar. (2020). *Energie sparen mit Wärmerückgewinnung ECOshower*. Abgerufen am 28. Juli 2021 von https://www.wagner-solar.com/de/wrg/waermerueckgewinnung

Florian Berger GmbH. (2021). *[Informationen zum Grauwasser].* Abgerufen am 6. Juli 2021 von https://www.grauwasser.at

Lohneis, M. (2021, 02. Juni). *Plattenwärmetauscher: Was ist das?* Abgerufen am 7.

Juli 2021 von https://www.klimatechniker.net/magazin/plattenwaermetauscher-20163421

Energie-experten.org. (2020, 19. Februar). *Ratgeber Wärmetauscher: Übertragungsarten und Typen im Überblick.* Abgerufen am 7. Juli 2021 von https://www.energie-experten.org/heizung/heizungstechnik/waermetauscher#c33602

Strauss, C. (o. J.). *Der durchschnittliche Energieverbrauch für Warmwasser.* Abgerufen am 20. Juli 2021 von https://www.hausjournal.net/durchschnittlicher-energieverbrauch-fuer-warmwasser

Chemie.de. (o. J.) *Liste der spezifischen Wärmekapazitäten.* Abgerufen am 21. Juli 2021 von https://www.chemie.de/lexikon/Liste_der_spezifischen_W%C3%A4rmekapazit%C3%A4ten.html

Natural Resources Canada. (o. J.). *Energy Efficiency Ratings: Drain-water heat recovery.* Abgerufen am 10. August 2021 von https://oee.nrcan.gc.ca/pml-lmp/index.cfm?action=app.search-recherche&appliance=DWHR

August, K. (2020, 08. Januar). *„Wie viel CO2 steckt in einem Liter Benzin?“.* Abgerufen am 11. August 2021 von https://www.helmholtz.de/erde-und-umwelt/wie-viel-co2-steckt-in-einem-liter-benzin/

Dein Heizungsbauer. (o. J.). *Brennwert von Erdgas: So effizient ist der Rohstoff.* Abgerufen am 17. August 2021 von https://www.dein-heizungsbauer.de/ratgeber/energie-sparen/brennwert-erdgas/

Enovos. (2021, 01. Juli-a). *Nos tarifs de gaz naturel – home.* Abgerufen am 26. August 2021 von https://www.enovos.lu/de/privatkunden/erdgas

Enovos. (2021, 01. Januar-b). *Nos tarifs d’électricité verte – home.* Abgerufen am 26. August 2021 von https://www.enovos.lu/de/privatkunden/strom

https://www.wikipedia.de, letzter Zugriff: 13. August 2021

http://renewability.com, letzter Zugriff: 13. August 2021

https://ecodrain.com/en/, letzter Zugriff: 13. August 2021

https://www.wagner-solar.com/de/wrg/waermerueckgewinnung, letzter Zugriff: 13. August 2021

https://showersave.com/, letzter Zugriff: 13. August 2021

https://www.q-blue.nl/de/, letzter Zugriff: 13. August 2021

https://joulia.com/, letzter Zugriff: 13. August 2021

https://snhbm.lu/, letzter Zugriff: 15. August 2021

https://www.duden.de/, letzter Zugriff: 18. August 2021

Anhang: Beispielrechnung für den vertikalen Wärmetauscher

$$Q_{ww} = q_{ww} + q_{ww,v} + q_{ww,s}$$

où:

q_{ww}	kWh/m²a	est la valeur spécifique du besoin en énergie, production d'eau chaude sanitaire conformément au chapitre 6.2, tableau 28
$q_{ww,v}$	kWh/m²a	est la valeur spécifique des déperditions de distribution et de circulation de l'eau chaude sanitaire conformément au chapitre 6.3.2
$q_{ww,s}$	kWh/m²a	est la valeur spécifique des déperditions d'accumulation de l'eau chaude sanitaire conformément au chapitre 6.3.2.4.

Abbildung 26: Formel aus dem Règlement grand-ducal für den spezifischen Nutzwärmebedarf für Warmwasser

Quelle: Journal officiel du Grand-Duché du Luxembourg - Règlement grand-ducal du 9 juin 2021 concernant la performance énergétique des bâtiments.

Tabelle 1: Spezifischer Nutzwärmebedarf für Warmwasser für Fall 1 ohne Wärmerückgewinnung (Duschrohr)

Fall 1 (ohne Wärmerückgewinnung)		
q_{ww}	13.9	kWh/m²a
$q_{ww,v}$	2.3	kWh/m²a
$q_{ww,s}$	1.3	kWh/m²a
Q_{ww}	**17.5**	**kWh/m²a**

Tabelle 2: Spezifischer Nutzwärmebedarf für Warmwasser für Fall 2 ohne Wärmerückgewinnung (Duschrohr)

Fall 2 (ohne Wärmerückgewinnung)		
q_{ww}	13.9	kWh/m²a
$q_{ww,v}$	2.3	kWh/m²a
$q_{ww,s}$	1.3	kWh/m²a
Q_{ww}	**17.5**	**kWh/m²a**

$$q_{w,DWHR} = a_{shower} \cdot \eta_{DWHR} \cdot q_{w,b} \quad (99)$$

Dabei ist

$q_{w,DWHR}$ der Energieeintrag infolge Wärmerückgewinnung aus Duschabwasser bezogen auf die Nettogrundfläche (im Jahr) in kWh/m²;

a_{shower} der Anteil für Duschen am Nutzenergiebedarf Trinkwarmwasser;

η_{DWHR} der Nutzungsgrad des Wärmerückgewinnungssystems bei mittleren Verhältnissen;

$q_{w,b}$ der Nutzenergiebedarf für Trinkwarmwasser nach DIN V 18599-10, in kWh/m².

Abbildung 27: Formel für den Nutzenergieeintrag infolge der Wärmerückgewinnung aus dem Duschwasser nach DIN V 18599

Quelle: DIN V 18599 - Energetische Bewertung von Gebäuden

$$\eta_{DWHR} = \eta \cdot f_{dirt} \quad (100)$$

Dabei ist

η der Wirkungsgrad des Duschwasser-Wärmeübertragers (Produktwert oder Standardwert) im balancierten Betrieb[4)];

f_{dirt} der Faktor zur Berücksichtigung abnehmender Effizienz des Wärmeübertragers durch Verschmutzung zwischen zwei Wartungen ($f_{dirt} = 0{,}95$).

Abbildung 28: Formel für den Nutzungsgrad des Wärmerückgewinnungssystems nach DIN V 18599

Quelle: DIN V 18599 - Energetische Bewertung von Gebäuden

Tabelle 3: Spezifischer Nutzwärmebedarf für Warmwasser für Fall 1 mit Wärmerückgewinnung (Duschrohr)

Fall 1 (mit Wärmerückgewinnung)					
$q_{w,b}$	13.9	kWh/m²a		η	0.6
a_{Shower}	0.65			f_{dirt}	0.95
η_{DWHR}	0.57				
$q_{w,DWHR}$	5.15	kWh/m²a	(zurückgewonnene Nutzenergie)		
Q_{ww}	**12.35**	**kWh/m²a**	(spezifischer Nutzwärmebedarf)		

Tabelle 4: Spezifischer Nutzwärmebedarf für Warmwasser für Fall 2 mit Wärmerückgewinnung (Duschrohr)

Fall 2 (mit Wärmerückgewinnung)					
$q_{w,b}$	13.9	kWh/m²a		η	0.6
a_{Shower}	0.65			f_{dirt}	0.95
η_{DWHR}	0.57				
$q_{w,DWHR}$	5.15	kWh/m²a	(zurückgewonnene Nutzenergie)		
Q_{ww}	**12.35**	**kWh/m²a**	(spezifischer Nutzwärmebedarf)		

$$Q_{E,WW} = \sum_i Q_{E,WW,i}$$

avec :

$$Q_{E,WW,i} = Q_{WW} \cdot c_{WW,i} \cdot e_{E,WW,i}$$

où :

$Q_{E,WW,i}$	kWh/m²a	est la valeur spécifique du besoin en énergie finale, production d'eau chaude sanitaire avec l'indice i pour plusieurs installations de production de chaleur
Q_{WW}	kWh/m²a	est la valeur spécifique du besoin en énergie utile, production d'eau chaude sanitaire conformément au chapitre 5.3.1
$c_{WW,i=1}$	-	est le taux de couverture de la production de chaleur par une installation solaire thermique (production d'eau chaude sanitaire) conformément au chapitre 6.3.2.1
$c_{WW,i=2}$	-	est le taux de couverture de la production de chaleur par une installation de chauffage de base (production d'eau chaude sanitaire) conformément au chapitre 6.3.2.1
$c_{WW,i=3}$	-	est le taux de couverture de la production de chaleur par un système de chauffage d'appoint (production d'eau chaude sanitaire) conformément au chapitre 6.3.2.1
$e_{E,WW,i}$	-	est le facteur de dépense pour la production d'eau chaude sanitaire pour chaque type de production de chaleur, avec l'indice i pour plusieurs installations de production de chaleur, conformément au chapitre 6.3.2.2.

Abbildung 29: Formel aus dem Règlement grand-ducal für den spezifischen Endenergiebedarf für Warmwasser

Quelle: Journal officiel du Grand-Duché du Luxembourg - Règlement grand-ducal du 9 juin 2021 concernant la performance énergétique des bâtiments.

Tabelle 5: Spezifischer Endenergiebedarf für Warmwasser für Fall 1 ohne Wärmerückgewinnung (Duschrohr)

Fall 1 (ohne Wärmerückgewinnung)		
Q_{ww}	17.5	kWh/m²a
$c_{ww,1}$	0.61	(Solarthermie)
$c_{ww,2}$	0.39	(Brennwertkessel)
$c_{ww,3}$	0	
c_e	1	(Brennwertkessel)
$e_{E,ww,1}$	0	(Solarthermie)
$e_{E,ww,2}$	1.15	(Brennwertkessel)
$Q_{E,ww,1}$	0	kWh/m²a
$Q_{E,ww,2}$	7.85	kWh/m²a
$Q_{E,ww}$	**7.85**	**kWh/m²a**

Tabelle 6: Spezifischer Endenergiebedarf für Warmwasser für Fall 2 ohne Wärmerückgewinnung (Duschrohr)

Fall 2 (ohne Wärmerückgewinnung)		
Q_{ww}	17.5	kWh/m²a
$c_{ww,1}$	0.61	(Solarthermie)
$c_{ww,2}$	0.3705	(Wärmepumpe)
$c_{ww,3}$	0.0195	(Zusatzheizung)
c_e	0.95	(Wärmepumpe mit Zusatzheizung)
$e_{E,ww,1}$	0	(Solarthermie)
$e_{E,ww,2}$	0.37	(Wärmepumpe)
$e_{E,ww,3}$	1	(Zusatzheizung)
$Q_{E,ww,1}$	0	kWh/m²a
$Q_{E,ww,2}$	2.40	kWh/m²a
$Q_{E,ww,3}$	0.34	kWh/m²a
$Q_{E,ww}$	**2.74**	**kWh/m²a**

Tabelle 7: Spezifischer Endenergiebedarf für Warmwasser für Fall 1 mit Wärmerückgewinnung (Duschrohr)

Fall 1 (mit Wärmerückgewinnung)		
Q_{ww}	12.35	kWh/m²a
$c_{ww,1}$	0.61	(Solarthermie)
$c_{ww,2}$	0.39	(Brennwertkessel)
$c_{ww,3}$	0	
c_e	1	(Brennwertkessel)
$e_{E,ww,1}$	0	(Solarthermie)
$e_{E,ww,2}$	1.15	(Brennwertkessel)
$Q_{E,ww,1}$	0	kWh/m²a
$Q_{E,ww,2}$	5.54	kWh/m²a
$Q_{E,ww}$	**5.54**	**kWh/m²a**

Tabelle 8: Spezifischer Endenergiebedarf für Warmwasser für Fall 2 mit Wärmerückgewinnung (Duschrohr)

Fall 2 (mit Wärmerückgewinnung)		
Q_{ww}	12.35	kWh/m²a
$c_{ww,1}$	0.61	(Solarthermie)
$c_{ww,2}$	0.3705	(Wärmepumpe)
$c_{ww,3}$	0.0195	(Zusatzheizung)
c_e	0.95	(Wärmepumpe mit Zusatzheizung)
$e_{E,ww,1}$	0	(Solarthermie)
$e_{E,ww,2}$	0.37	(Wärmepumpe)
$e_{E,ww,3}$	1	(Zusatzheizung)
$Q_{E,ww,1}$	0	kWh/m²a
$Q_{E,ww,2}$	1.69	kWh/m²a
$Q_{E,ww,3}$	0.24	kWh/m²a
$Q_{E,ww}$	**1.93**	**kWh/m²a**

$$Q_{P,WW} = \sum_i Q_{P,WW,i}$$

avec :

$$Q_{P,WW,i} = Q_{E,WW,i} \cdot e_{P,WW,i}$$

où :

$Q_{P,WW,i}$	kWh/m²a	est la valeur spécifique du besoin en énergie primaire, production d'eau chaude sanitaire avec l'indice i pour plusieurs installations de production de chaleur
$Q_{E,WW,i}$	kWh/m²a	est la valeur spécifique du besoin en énergie finale, production d'eau chaude sanitaire avec l'indice i pour plusieurs installations de production de chaleur, conformément au chapitre 5.3.2
$e_{P,WW,i}$	-	est le facteur de dépense en énergie primaire (production d'eau chaude sanitaire) pour chaque type de production de chaleur, avec l'indice i pour plusieurs installations de production de chaleur, conformément au chapitre 6.3.2.

Abbildung 30: Formel aus dem Règlement grand-ducal für den spezifischen Primärenergiebedarf für Warmwasser

Quelle: Journal officiel du Grand-Duché du Luxembourg - Règlement grand-ducal du 9 juin 2021 concernant la performance énergétique des bâtiments.

Tabelle 9: Spezifischer Primärenergiebedarf für Warmwasser für Fall 1 ohne Wärmerückgewinnung (Duschrohr)

Fall 1 (ohne Wärmerückgewinnung)			
$Q_{E,ww,1}$	0	kWh/m²a	
$Q_{E,ww,2}$	7.85	kWh/m²a	
$e_{P,ww,1}$	0	kWh/m²a	
$e_{P,ww,2}$	1.12	kWh/m²a	(Erdgas)
$Q_{P,ww,1}$	0	kWh/m²a	
$Q_{P,ww,2}$	8.79	kWh/m²a	
$Q_{P,ww}$	**8.79**	**kWh/m²a**	

Tabelle 10: Spezifischer Primärenergiebedarf für Warmwasser für Fall 2 ohne Wärmerückgewinnung (Duschrohr)

Fall 2 (ohne Wärmerückgewinnung)			
$Q_{E,ww,1}$	0	kWh/m²a	
$Q_{E,ww,2}$	2.40	kWh/m²a	
$Q_{E,ww,3}$	0.34	kWh/m²a	
$e_{P,ww,1}$	0	kWh/m²a	
$e_{P,ww,2}$	1.5	kWh/m²a	(Strommix)
$e_{P,ww,3}$	1.5	kWh/m²a	(Strommix)
$Q_{P,ww,1}$	0	kWh/m²a	
$Q_{P,ww,2}$	3.60	kWh/m²a	
$Q_{P,ww,3}$	0.51	kWh/m²a	
$Q_{P,ww}$	**4.11**	**kWh/m²a**	

Tabelle 11: Spezifischer Primärenergiebedarf für Warmwasser für Fall 1 mit Wärmerückgewinnung (Duschrohr)

Fall 1 (mit Wärmerückgewinnung)			
$Q_{E,ww,1}$	0	kWh/m²a	
$Q_{E,ww,2}$	5.54	kWh/m²a	
$e_{P,ww,1}$	0	kWh/m²a	
$e_{P,ww,2}$	1.12	kWh/m²a	(Erdgas)
$Q_{P,ww,1}$	0	kWh/m²a	
$Q_{P,ww,2}$	6.20	kWh/m²a	
$Q_{P,ww}$	**6.20**	**kWh/m²a**	

Tabelle 12: Spezifischer Primärenergiebedarf für Warmwasser für Fall 2 mit Wärmerückgewinnung (Duschrohr)

Fall 2 (mit Wärmerückgewinnung)			
$Q_{E,ww,1}$	0	kWh/m²a	
$Q_{E,ww,2}$	1.69	kWh/m²a	
$Q_{E,ww,3}$	0.24	kWh/m²a	
$e_{P,ww,1}$	0	kWh/m²a	
$e_{P,ww,2}$	1.5	kWh/m²a	(Strommix)
$e_{P,ww,3}$	1.5	kWh/m²a	(Strommix)
$Q_{P,ww,1}$	0	kWh/m²a	
$Q_{P,ww,2}$	2.54	kWh/m²a	
$Q_{P,ww,3}$	0.36	kWh/m²a	
$Q_{P,ww}$	**2.90**	**kWh/m²a**	

La valeur spécifique d'émissions de CO_2, production d'eau chaude sanitaire $\mathbf{Q_{CO2,ww}}$ est déterminée d'après la formule suivante:

$$Q_{CO_2,WW} = \sum_i (Q_{E,WW,i} \cdot e_{CO_2,WW,i})$$

où:

$Q_{E,WW,i}$	kWh/m²a	est la valeur spécifique du besoin en énergie finale, production d'eau chaude sanitaire, avec l'indice i pour plusieurs installations de production de chaleur, à déterminer selon chaque cas conformément au chapitre 5.3.2 ou au chapitre 5.9.6
$e_{CO_2,WW,i}$	$kgCO_2/kWh$	est le facteur environnemental (eau chaude sanitaire) pour chaque type de production de chaleur, avec l'indice i pour plusieurs installations de production de chaleur, conformément au chapitre 6.6.

Abbildung 31: Formel aus dem Règlement grand-ducal für die spezifischen CO_2-Emissionen für Warmwasser

Quelle: Journal officiel du Grand-Duché du Luxembourg - Règlement grand-ducal du 9 juin 2021 concernant la performance énergétique des bâtiments.

Tabelle 13: Spezifische CO_2-Emissionen für Warmwasser für Fall 1 ohne Wärmerückgewinnung (Duschrohr)

Fall 1 (ohne Wärmerückgewinnung)			
$Q_{E,ww,1}$	0	kWh/m²a	
$Q_{E,ww,2}$	7.85	kWh/m²a	
$e_{CO2,ww,1}$	0	kg CO_2/kWh$_e$	
$e_{CO2,ww,2}$	0.246	kg CO_2/kWh$_e$	(Erdgas)
$Q_{CO2,ww}$	0	kg CO_2/m²a	
$Q_{CO2,ww}$	1.93	kg CO_2/m²a	
$Q_{CO2,ww}$	**1.93**	**kg CO_2/m²a**	

Tabelle 14: Spezifische CO_2-Emissionen für Warmwasser für Fall 2 ohne Wärmerückgewinnung (Duschrohr)

Fall 2 (ohne Wärmerückgewinnung)			
$Q_{E,ww,1}$	0	kWh/m²a	
$Q_{E,ww,2}$	2.40	kWh/m²a	
$Q_{E,ww,3}$	0.34	kWh/m²a	
$e_{CO2,ww,1}$	0	kg CO_2/kWh$_e$	
$e_{CO2,ww,2}$	0.367	kg CO_2/kWh$_e$	(Strommix)
$e_{CO2,ww,3}$	0.367	kg CO_2/kWh$_e$	(Strommix)
$Q_{CO2,ww,1}$	0	kg CO_2/m²a	
$Q_{CO2,ww,2}$	0.88	kg CO_2/m²a	
$Q_{CO2,ww,3}$	0.13	kg CO_2/m²a	
$Q_{CO2,ww}$	**1.01**	**kg CO_2/m²a**	

Tabelle 15: Spezifische CO_2-Emissionen für Warmwasser für Fall 1 mit Wärmerückgewinnung (Duschrohr)

Fall 1 (mit Wärmerückgewinnung)			
$Q_{E,ww,1}$	0	kWh/m²a	
$Q_{E,ww,2}$	5.54	kWh/m²a	
$e_{CO2,ww,1}$	0	kg CO_2/kWh$_e$	
$e_{CO2,ww,2}$	0.246	kg CO_2/kWh$_e$	(Erdgas)
$Q_{CO2,ww}$	0	kg CO_2/m²a	
$Q_{CO2,ww}$	1.36	kg CO_2/m²a	
$Q_{CO2,ww}$	**1.36**	**kg CO_2/m²a**	

Tabelle 16: Spezifische CO_2-Emissionen für Warmwasser für Fall 2 mit Wärmerückgewinnung (Duschrohr)

Fall 2 (mit Wärmerückgewinnung)			
$Q_{E,ww,1}$	0	kWh/m²a	
$Q_{E,ww,2}$	1.69	kWh/m²a	
$Q_{E,ww,3}$	0.24	kWh/m²a	
$e_{CO2,ww,1}$	0	kg CO_2/kWh$_e$	
$e_{CO2,ww,2}$	0.367	kg CO_2/kWh$_e$	(Strommix)
$e_{CO2,ww,3}$	0.367	kg CO_2/kWh$_e$	(Strommix)
$Q_{CO2,ww,1}$	0	kg CO_2/m²a	
$Q_{CO2,ww,2}$	0.62	kg CO_2/m²a	
$Q_{CO2,ww,3}$	0.09	kg CO_2/m²a	
$Q_{CO2,ww}$	**0.71**	**kg CO_2/m²a**	