

Wärmerückgewinnung aus Abwasser im Niedrigenergie- und Passivhaus: Potenzial und Konzepte in Kombination mit Solarthermie und Wärmepumpe

WRGpot

A. Heinz, W. Lerch, J. Breidler, Ch. Fink, W. Wagner

Berichte aus Energie- und Umweltforschung

3/2013

Impressum:

Eigentümer, Herausgeber und Medieninhaber:
Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie
Radetzkystraße 2, 1030 Wien

Verantwortung und Koordination:
Abteilung für Energie- und Umwelttechnologien
Leiter: DI Michael Paula

Liste sowie Downloadmöglichkeit aller Berichte dieser Reihe unter
<http://www.nachhaltigwirtschaften.at>

Wärmerückgewinnung aus Abwasser im Niedrigenergie- und Passivhaus: Potenzial und Konzepte in Kombination mit Solarthermie und Wärmepumpe WRGpot

Dipl.-Ing. (FH) Dr.techn. Andreas Heinz, Dipl.-Ing. Werner Lerch
Technische Universität Graz, Institut für Wärmetechnik

Dipl.-Ing. (FH) Johann Breidler, Ing. Christian Fink,
Ing. Waldemar Wagner
AEE INTEC

Graz, Juni 2012

Ein Projektbericht im Rahmen des Programms



im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie

Vorwort

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse eines Projekts aus dem Forschungs- und Technologieprogramm *Haus der Zukunft* des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie.

Die Intention des Programms ist, die technologischen Voraussetzungen für zukünftige Gebäude zu schaffen. Zukünftige Gebäude sollen höchste Energieeffizienz aufweisen und kostengünstig zu einem Mehr an Lebensqualität beitragen. Manche werden es schaffen, in Summe mehr Energie zu erzeugen als sie verbrauchen („Haus der Zukunft Plus“). Innovationen im Bereich der zukunftsorientierten Bauweise werden eingeleitet und ihre Markteinführung und -verbreitung forciert. Die Ergebnisse werden in Form von Pilot- oder Demonstrationsprojekten umgesetzt, um die Sichtbarkeit von neuen Technologien und Konzepten zu gewährleisten.

Das Programm *Haus der Zukunft Plus* verfolgt nicht nur den Anspruch, besonders innovative und richtungsweisende Projekte zu initiieren und zu finanzieren, sondern auch die Ergebnisse offensiv zu verbreiten. Daher werden sie in der Schriftenreihe publiziert und elektronisch über das Internet unter der Webadresse <http://www.HAUSderZukunft.at> Interessierten öffentlich zugänglich gemacht.

DI Michael Paula
Leiter der Abt. Energie- und Umwelttechnologien
Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	III
Abstract	IV
1 Einleitung.....	1
2 Hintergrundinformationen zum Projektinhalt	1
2.1 Stand der Technik	1
2.2 Vorarbeiten zum Thema	2
2.3 Innovationsgehalt des Projekts	2
2.4 Verwendete Methoden	4
3 Ergebnisse des Projektes.....	6
3.1 Recherche zur Abwasser-Wärmerückgewinnung im Gebäude.....	6
3.1.1 Arten der Abwasser-Wärmerückgewinnung	6
3.1.2 Anfallende Abwasser-Mengen und -Temperaturen in Einfamilienhäusern.....	7
3.1.3 Abwasser-Wärmerückgewinnung im Gebäude.....	8
3.1.4 Beispiele für AWR-Systeme im Durchlaufprinzip.....	9
3.1.5 Beispiele für AWR-Systeme im Speicherprinzip	12
3.1.6 Verschmutzung der Wärmetauscher-Oberflächen.....	15
3.2 Messtechnische Bestimmung des Potentials zur Wärmerückgewinnung aus dem Abwasser von Wohngebäuden	17
3.2.1 Auswahl des prinzipiellen Messkonzepts.....	17
3.2.2 Auswahl der Feldmessenanlagen.....	18
3.2.3 Feldmessenanlage „Einfamilienhaus“	18
3.2.4 Feldmessenanlage „Mehrfamilienhaus“	33
3.2.5 Zusammenfassung der Ergebnisse und Erfahrungen zu den Feldmessungen	41
3.3 Konzeptentwicklung für kombinierte Wärmepumpen-Solaranlagen mit AWR.....	43
3.3.1 Konzept 1	43
3.3.2 Konzept 2.....	44
3.3.3 Konzept 3.....	44
3.3.4 Konzept 4.....	45
3.3.5 Konzept 5.....	46
3.4 Energetische und ökonomische Bewertung von Konzepten	48
3.4.1 Randbedingungen für die Berechnungen	48
3.4.2 Kennzahlen	49

3.4.3	Anlagenkosten	51
3.4.4	Bewertungsergebnisse	51
3.5	Entwicklung von Simulationsmodellen	53
3.5.1	Wärmepumpe	53
3.5.2	Fallrohr-Filmstrom-Wärmetauscher	55
3.5.3	Abwasser-Speicher.....	56
3.5.4	Eisspeicher	57
3.6	Detaillierte Systemsimulationen in TRNSYS.....	59
3.6.1	Untersuchte System-Varianten	59
3.6.2	Implementierung der Simulation in TRNSYS.....	63
3.6.3	Kennzahlen zur Bewertung der Systeme.....	66
3.6.4	Simulationsergebnisse und Interpretation.....	66
3.7	Dissemination und Workshops.....	72
3.7.1	Abschlussworkshop	72
3.7.2	Experts Meetings des IEA SHC Task44 / HPP Annex 38.....	72
3.7.3	Beitrag in der Zeitschrift „Erneuerbare Energie“	72
3.7.4	Konferenzbeiträge durch das IWT	73
4	Detailangaben in Bezug auf die Ziele des Programms	74
4.1	Beitrag zum Gesamtziel des Programms	74
4.2	Einbeziehung der Zielgruppen und Berücksichtigung ihrer Bedürfnisse im Projekt	75
4.3	Beschreibung der Umsetzungs-Potenziale für die Projektergebnisse.....	75
5	Schlussfolgerungen zu den Projektergebnissen	76
6	Ausblick und Empfehlungen	77
7	Literaturverzeichnis	79
8	Internetquellen.....	81
Anhang A: Wasser- und Energieverbrauch Haushaltsgeräte.....		82

Kurzfassung

In Niedrigenergiehäusern ist der Anteil des Wärmebedarfs für die Warmwasserbereitung am Gesamtwärmebedarf relativ hoch und kann bei Passivhäusern sogar höher sein als der Heizwärmebedarf. Für das Erreichen des Warmwasserkomforts sind außerdem höhere Temperaturen erforderlich als dies für den Vorlauf z.B. einer Fußbodenheizung nötig ist. Dadurch steigt die Relevanz des Energiebedarfs für Warmwasser mit zunehmendem Dämmstandard von Gebäuden. Aus diesen Gründen wird auch die Nutzung der im Abwasser vorhandenen Wärme über eine Abwasser-Wärmerückgewinnungs(AWR)-Anlage mit sinkendem Heizwärmebedarf interessanter.

Im Projekt WRGpot wurde das Potential einer AWR insbesondere in Kombination mit einer thermischen Solaranlage und einer Wärmepumpe untersucht. Die Kopplung einer Wärmepumpe mit der AWR hat den Vorteil, dass jene Wärme, die auf einem direkt nicht nutzbaren Temperaturniveau anfällt, nutzbar gemacht werden kann. Ziel des Projekts war es, unterschiedliche Möglichkeiten zur Wärmerückgewinnung aus häuslichem Abwasser aufzuzeigen bzw. Systemkonzepte auf Basis einer Kombination von Solaranlage und Wärmepumpe zu untersuchen und zu bewerten.

Mittels einer Literaturrecherche wurden Informationen und bekannte Arbeiten über AWR-Systeme in Gebäuden und über kombinierte Wärmepumpen-Solarsysteme erhoben.

Im Rahmen von Feldmessungen in einem Einfamilien- und einem Mehrfamilienhaus wurden Abwassermengen und -temperaturen erfasst, um das Potential für eine AWR abschätzen zu können. Aus den Ergebnissen wurden zeitliche Profile von Abwasserdurchfluss und -temperatur abgeleitet, die dann in den durchgeführten Simulationsarbeiten verwendet wurden.

Im zweiten Projektteil wurden Wärmeversorgungskonzepte auf Basis von kombinierten Wärmepumpen-Solaranlagen mit AWR mit Hilfe von Simulationen in der Simulationsumgebung TRNSYS analysiert und bewertet. Dabei wurden insbesondere Systeme, die als Wärmequelle für die Wärmepumpe Solarwärme und Abwasser – ohne konventionelle Wärmequelle (Erdreich oder Außenluft) – verwenden, untersucht. Die durchgeführten Arbeiten zeigen, dass derartige Systeme bei Gebäuden mit einem sehr niedrigen Wärmebedarf eine gute energetische Performance erreichen können. Die Systemeffizienz ist dabei stark vom Klima des jeweiligen Standorts bzw. vor allem von der Solarstrahlung im Winter abhängig. Eine Wärmerückgewinnung aus dem Abwasser ist hier besonders interessant, weil das Warmwasser bei Niedrigenergiegebäuden einen relativ hohen Anteil am Gesamtwärmebedarf einnimmt und das Abwasser in den kalten Monaten des Jahres eine zusätzliche Wärmequelle für das System darstellt.

In weiterführenden Arbeiten sollte der Einsatz von nicht abgedeckten Kollektoren in den betrachteten Systemen untersucht werden, da über diese im Winter auch Umgebungsluft als Wärmequelle verwendet werden kann. Auch wissenschaftliche Arbeiten in Bezug auf das Verschmutzungsverhalten und die dadurch verursachte Leistungsminderung von Abwasserwärmetauschern sind anzustreben.

Abstract

In low energy buildings the share of the domestic hot water demand on the total heat demand of the building is relatively high, and in passive houses it can be even higher than the space heating demand. Additionally the temperature level that is required to fulfil the comfort requirements for domestic hot water is higher than e.g. the temperature that is necessary for heating with a low temperature heating system. Therefore the relevance of the heat demand for domestic hot water is increasing with an improving insulation standard of buildings. For these reasons the heat recovery from waste water in buildings is becoming more interesting with a decreasing space heating demand.

In the project WRGpot the potential of waste water heat recovery in combination with a solar thermal system and a heat pump was investigated. The coupling of a heat pump with the waste water heat recovery offers the advantage that the heat, which is available at a temperature level that cannot be used directly, can be shifted to higher, usable temperatures. The objective of the project was to point out different options for waste water heat recovery in buildings, and to analyse and evaluate different system concepts based on a combination of solar and heat pumps.

Available information and published work about waste water heat recovery in buildings and about combined solar and heat pump systems was collected and documented.

In order to be able to make an analysis of the potential of waste water heat recovery, the amount and temperature of waste water was determined in a single- and a multi-family building by means of field measurements. The results were used to generate time profiles of the waste water flow and temperature, which were later used in the simulation studies that were carried out in the project.

In the second project part different heating system concepts based on combined solar and heat pump systems with waste water heat recovery were evaluated by means of dynamic simulations in the simulation environment TRNSYS. The emphasis was on systems that use solar energy and waste water as the source for the heat pump, without a conventional heat source (ground or ambient air). The results show that with such systems high system efficiencies can be reached for buildings with a low heat demand. The efficiency is strongly dependent on the climate and on the solar radiation in the cold months of the year respectively. Waste water heat recovery is an interesting option in such systems, as the hot water demand has a high fraction on the total heat demand of low energy buildings and the waste water provides an additional heat source for the heat pump in winter.

Future investigations should deal with the use of unglazed solar collectors, which would offer the possibility to additionally use ambient air as a heat source of such systems in winter. Also the fouling of waste water heat exchangers which can cause a loss of efficiency and the necessity of a cleaning of the heat exchanger surfaces should be examined scientifically.

1 Einleitung

In Niedrigenergiehäusern ist der Anteil des Wärmebedarfs für die Warmwasserbereitung am Gesamtwärmebedarf relativ hoch und kann bei Passivhäusern sogar höher sein als der Heizwärmebedarf. Für das Erreichen des Warmwasserkomforts sind außerdem höhere Temperaturen erforderlich als dies für den Vorlauf z.B. einer Fußbodenheizung nötig ist. Dadurch steigt die Relevanz des Energiebedarfs für Warmwasser mit zunehmendem Dämmstandard von Gebäuden. Aus diesen Gründen wird auch die Nutzung der im Abwasser vorhandenen Wärme über eine Abwasser-Wärmerückgewinnung (AWR) mit sinkendem Heizwärmebedarf interessanter.

Im Vergleich zur Entwicklung besser gedämmter Gebäude und Abluft-Wärmerückgewinnungs-Anlagen wurde im Bereich der Effizienz von Brauchwarmwasser-Anlagen und der Rückgewinnung von Wärme aus dem Abwasser im Gebäude bis jetzt wenig Forschung betrieben und es sind wenige Informationen vorhanden.

Im Projekt WRGpot wurde das Potential einer AWR insbesondere in Kombination mit einer thermischen Solaranlage und einer Wärmepumpe untersucht. Eine Wärmepumpe in Verbindung mit der AWR hat den Vorteil, dass jene Wärme, die auf einem direkt nicht nutzbaren Temperaturniveau anfällt, nutzbar gemacht werden kann. Ziel des Projekts war es, unterschiedliche Möglichkeiten zur Wärmerückgewinnung aus häuslichem Abwasser aufzuzeigen, bzw. Systemkonzepte auf Basis einer Kombination von Solaranlage und Wärmepumpe für die Wärmeversorgung von Niedrigenergie- und Passivhäusern zu untersuchen und zu bewerten. Der Fokus lag dabei nicht auf einer Bewertung von Einzelkomponenten, sondern auf einer ganzheitlichen energetischen Systembetrachtung.

2 Hintergrundinformationen zum Projektinhalt

2.1 Stand der Technik

Die dezentrale Wärmerückgewinnung aus dem Abwasser mit Hilfe von Wärmepumpen, welche die Wärme aus der Kanalisation oder aus der Kläranlage bezieht, ist heute Stand der Technik. Alleine in der Schweiz gibt es bereits heute über 200 dieser Anlagen (Schmid, 2007). Leider ist jedoch das Temperaturniveau in der Kanalisation bereits degeneriert, weil sich auf dem Weg in die Kanalisation warme Abwasserspitzen mit kaltem Abwasser vermischt haben und zudem Wärme an die Umgebung verloren geht. Auch muss die von der Wärmepumpe zur Verfügung gestellte Wärme danach wieder unter Verursachung von Wärmeverlusten an die Verbraucher verteilt werden. Thermodynamisch günstiger wäre es, die Wärme bereits vor dem Einleiten in die Kanalisation und möglichst aus unvermischten warmen Abwässern zurückzuholen und an Ort und Stelle wieder einzusetzen.

Eine im Projekt durchgeführte Recherche hat ergeben, dass es hierzu mehrere am Markt verfügbare Systeme gibt. Dazu wird auf Kapitel 3.1 verwiesen, in dem die Ergebnisse der Recherche zusammengefasst sind.

2.2 Vorarbeiten zum Thema

Kombinierte Wärmepumpen-Solarsysteme wurden bzw. werden intensiv im IEA SHC Task 44 / HPP Annex 38 (www.iea-shc.org/task44) sowie im laufenden Projekt SolPumpEff (FFG Proj.-Nr. 825546) untersucht. An beiden Projekten ist das Projektteam von WRGpot beteiligt. Sowohl im Task 44 als auch in SolPumpEff wurden umfangreiche Recherchen zu bestehenden Systemkonzepten und am Markt verfügbaren Systemen durchgeführt. Diese wurden teilweise bereits in Sparber et al (2011) und Henning et al. (2009) veröffentlicht und werden bis zum Ende beider Projekte noch weiter dokumentiert.

Zum Thema AWR in Gebäuden wurden von Meggers und Leibundgut (2011) theoretische Untersuchungen zum Wärmepotential im Abwasser von Gebäuden durchgeführt. Der zeitliche Verlauf von Abwasserdurchfluss und -temperatur wurde dabei unter Verwendung von verfügbaren Daten zu Warmwasserzapfprofilen abgeschätzt. Detaillierte Informationen über die so generierten Abwasserprofile sind in der Veröffentlichung nicht enthalten. Im verwendeten Simulationsmodell wird das Abwasser in einem Speicher gesammelt, dem mittels einer Wärmepumpe, die über ein einfaches Modell abgebildet wird, Wärme entzogen wird. Über die Wärmepumpe erfolgt dann die Warmwasserbereitung. Die Ergebnisse zeigen, dass mit einem derartigen System eine Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe für die Warmwasserbereitung von über 6 erreicht werden kann.

Zur AWR in Gebäuden wurden ansonsten keine wissenschaftlichen Vorarbeiten gefunden. Eine allgemeine Recherche zum Thema AWR und zu am Markt verfügbaren Systemen wurde aber durchgeführt und ist im Kapitel 3.1 dokumentiert.

2.3 Innovationsgehalt des Projekts

In diesem Projekt wurden in mehrfacher Hinsicht innovative Wege bei Wärmeversorgungskonzepten für Niedrigenergie- und Passivhäusern und bei der Abwasser-Wärmerückgewinnung besprochen:

1. Durch den Einsatz einer Wärmepumpe ist nicht nur die Nutzung des Abwassers aus Dusche und Küche interessant, sondern das gesamte Brauchwasser (auch das Kaltwasser) kann genutzt werden. Dabei ist zu bedenken, dass das abfließende Kaltwasser durchaus nicht mit der niedrigen Temperatur abfließt, mit welcher es bezogen wurde. Zum Zeitpunkt des Abfließens hat es sich bereits in den hausverlegten Zuleitungen, in den Toiletten-Spülkästen, im Geschirrspüler, in der Waschmaschine, beim Kochen und beim Abfließen selber erwärmt.
2. Für die Wärmerückgewinnung wurden verschiedene innovative Konzepte untersucht. Eines davon basiert auf dem Prinzip der turbulenten Filmströmung. Dabei werden sehr

hohe Wärmeübergangskoeffizienten erreicht, und es können daher sehr große Leistungen mit relativ kleinen Wärmetauscherflächen übertragen werden. Dieses Prinzip wird z.B. bei sogenannten Fallstrangwärmetauschern (vgl. Kapitel 3.1.4) genutzt. Diese sind in Kanada relativ weit verbreitet, aber auch am europäischen Markt erhältlich. Bisher wurden diese Wärmetauscher hauptsächlich zur Kaltwasser-Vorwärmung genutzt (z.B. www.preheat.de, 29.06.2012).

3. Auf eine getrennte Führung der Abwasserleitungen soll, nicht nur aus Kostengründen, verzichtet werden. Die Vermischung der verschiedenen Abwässer wird sich durch den Einsatz der Wärmepumpe bei der Rückgewinnung weniger gravierend auswirken.
4. Die aus dem Abwasser zurückgewonnene Energie soll dem unteren Bereich eines Solarspeichers zugeführt werden. Da der Solarspeicher bei einem Plus-Energie-Haus sowieso nicht fehlen darf, führt die Speicherung nicht zu zusätzlichen Kosten welche der Abwasser-Wärmerückgewinnung angelastet werden müssten.
5. Durch die Kopplung einer Wärmepumpe mit der Abwasser-Wärmerückgewinnung einerseits und mit der Solarwärme andererseits, kann ev. gänzlich auf den Bezug von Wärme aus einem Erdreichkollektor oder einer Tiefenbohrung verzichtet werden. Die dadurch eingesparten Kosten stehen für andere Systemkomponenten wie Wärmerückgewinnung, Speicher oder Solarkollektoren zur Verfügung.
6. Durch die Einbindung der Wärmepumpe in den Wärmespeicher kann der Exergieverlust, der in großen, saisonal wirkenden Wärmespeichern wegen der Wärmeleitung erheblich ist, durch Umschichten der Energie von unten nach oben wieder ausgeglichen werden. Dies ist besonders für die relativ hohe benötigte Warmwassertemperatur von Bedeutung.
7. Es soll untersucht werden, ob durch den Einsatz eines Eisspeichers die Speicherkapazität erhöht und durch das damit verbundene längere Halten einer konstanten Temperatur das Potenzial für die Wärmerückgewinnung aus dem Abwasser und für den Wärmebezug der Wärmepumpe verbessert werden kann.

Die Einbindung der Wärmepumpe bietet den entscheidenden Vorteil, dass im unteren Bereich des Speichers Temperaturen von 4°C erreicht werden können, was für den Kollektorsertrag im Winter sowie für die Abwasser-Wärmerückgewinnung ein stark verbessertes Potenzial in der entscheidenden Saison des Jahres eröffnet. Platzbedarf und Investitionskosten der Wärmepumpe und des Abwasser-Wärmetauschers sind gering im Vergleich zu den Einsparungen, welche vermutlich durch die Reduktion von Kollektorfläche und SpeichergroÙe erzielt werden können.

Hintergrund dieser Variante bildet die Tatsache, dass selbst in Niedrigenergie- und Passivhäusern das Erreichen von hohen Wärme-Deckungsgraden durch Solaranlagen (80 bis 100 %) derzeit nur mit sehr hohem Aufwand realisiert werden kann. Im Verhältnis zur eingesparten Energie können solche Aufwendungen für solarthermische Anlagen gerade bei sinkendem Gesamt-Energiebedarf aus finanzieller Sicht immer weniger gerechtfertigt werden. Ein wesentlicher Sprung von sehr hohen Investitionskosten auf ein tieferes Niveau kann nur dann erreicht werden, wenn die Solaranlage garantiert 100 % des Wärmebedarfs abdecken kann. Dies deshalb, weil nur dann auf eine Zusatzheizung gänzlich verzichtet

werden kann. In diesem Projekt wurde unter anderem untersucht, inwiefern Kollektorfläche, Speichergröße und Investitionskosten dieses Konzepts durch die Nutzung von Abwasserwärme und einer Wärmepumpe reduziert werden könnten, jedoch ohne die üblicherweise kostspielige Verlegung eines Flächenkollektors oder Bohrung einer Tiefensonde. Der für die Wärmepumpe erforderliche jährliche Strombedarf könnte bei dieser Lösung über z.B. PV-Paneele in den Sommermonaten ins Netz zurückgespeist werden.

2.4 Verwendete Methoden

Literaturrecherche

Mittels einer Literaturrecherche wurden Informationen und bekannte Arbeiten über AWR-Systeme und über kombinierte Wärmepumpen-Solarsysteme erhoben. Die Ergebnisse zu vorhandenen Arbeiten bzw. vorhandene AWR-Systeme sind in Kapitel 3.1 zusammengefasst.

Kombinierte Wärmepumpen-Solarsysteme wurden bzw. werden im Zuge der Teilnahme des Projektteams am IEA SHC Task 44 / HPP Annex 38 (www.iea-shc.org/task44) sowie im Projekt SolPumpEff (FFG Proj.-Nr. 825546) untersucht. In diesem Bericht wird auf eine Zusammenfassung des Stands der Technik in Bezug auf kombinierte Wärmepumpen-Solarsysteme verzichtet, da dies in beiden genannten Projekten erfolgt bzw. zum Teil schon erfolgt ist (vgl. Kapitel 2.2).

Messtechnische/Experimentelle Arbeiten

Um das Potential für eine AWR in Gebäuden abschätzen zu können, ist es notwendig, den zeitlichen Verlauf des Abwasserdurchflusses und der Abwassertemperatur zu kennen. Da derartige Daten bisher nicht verfügbar waren, wurden im Projekt Feldmessungen in einem Ein- und einem Mehrfamilienhaus durchgeführt. Die Ergebnisse bzw. daraus abgeleitete zeitliche Profile von Abwasserdurchfluss und -temperatur wurden in den durchgeführten Simulationsarbeiten verwendet. Die Vorgangsweise und die Ergebnisse dieses Arbeitspakets sind in Kapitel 3.2 detailliert dokumentiert.

Konzeptentwicklung und Simulation

Verschiedene Konzept-Ideen für Wärmeversorgungssysteme basierend auf einer Kombination von Wärmepumpe und Solaranlage mit einer AWR wurden über ein relativ einfaches Berechnungsverfahren energetisch berechnet. Die Kosten für die entsprechenden Systeme wurden abgeschätzt und damit Wärmegestehungskosten ermittelt. Diese Berechnungen bzw. deren Ergebnisse bildeten die Grundlage für die Entscheidung, welche Lösungsansätze in detaillierten Simulationen genauer untersucht werden sollten. Diese Arbeiten sind in Kapitel 3.3 zusammengefasst.

Zwei Systemkonzepte wurden über detaillierte dynamische Simulationen in der Simulationsumgebung TRNSYS (2011) abgebildet und analysiert. Dabei werden für die

einzelnen Systemkomponenten, wie z.B. Speicher, Wärmepumpe, Abwasserwärmetauscher etc., Komponentenmodelle verwendet, die das reale Systemverhalten detailliert und dynamisch nachbilden. So kann insbesondere auch die Auswirkung von unterschiedlichen Regelungsstrategien analysiert werden. Diese Arbeiten sind im Kapitel 3.6 dokumentiert. Da einige der dazu erforderlichen Komponentenmodelle noch nicht vorhanden waren, mussten diese teilweise neu erstellt werden (vgl. Kapitel 3.5).

3 Ergebnisse des Projekts

3.1 Recherche zur Abwasser-Wärmerückgewinnung im Gebäude

Zu Beginn des Projekts wurde eine Literaturrecherche zum Thema Wärmerückgewinnung aus Abwasser durchgeführt. Hierbei wurden veröffentlichte Beiträge und wissenschaftliche Arbeiten bzw. Informationen über am Markt bereits vorhandene Produkte gesammelt und zusammengefasst. Das gefundene Material beinhaltet sowohl Informationen über die prinzipiellen Möglichkeiten der Wärmerückgewinnung als auch zu den verschiedenen Arten von Abwasser-Wärmerückgewinnungssystemen bzw. Wärmetauschern.

Es hat sich im Zuge der Recherche gezeigt, dass zur Wärmerückgewinnung aus Abwasser aus dem Kanalnetz eine ganze Reihe an Arbeiten und ausgeführten Anlagen – insbesondere in der Schweiz – vorhanden sind. Da in diesem Projekt die Wärmerückgewinnung direkt im Gebäude im Fokus steht, wird aber in den folgenden Abschnitten vor allem auf diese das Hauptaugenmerk gelegt.

3.1.1 Arten der Abwasser-Wärmerückgewinnung

Je nachdem, wo dem Abwasser Wärme entzogen wird, unterscheidet man unterschiedliche Arten der Abwasser-Wärmerückgewinnung. Müller und Schmid (2005) unterteilen die Nutzung von Abwasserwärme in drei Kategorien (siehe Abbildung 3.1):

- Rückgewinnung aus gereinigtem Abwasser nach der Kläranlage
- Rückgewinnung aus Rohabwasser im Entwässerungssystem (Kanalisation)
- Rückgewinnung im Gebäude (in-house)

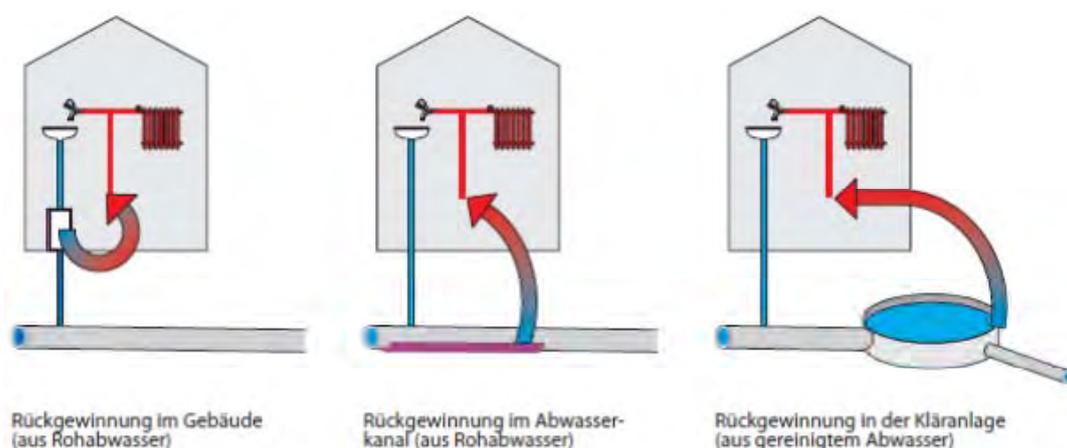


Abbildung 3.1: Möglichkeiten zur Energiegewinnung aus Abwasser (Müller, Schmid, 2005)

Je nach Entnahmeort ergeben sich unterschiedliche Aspekte bzgl. je nach dem vorhandenen Temperaturniveau, der Konstanz des anfallenden Abwasser-Massenstroms, der vorhandenen Inhaltsstoffe und der notwendigen Anlagentechnik. Tabelle 1 gibt einen Überblick über die Vor- und Nachteile der verschiedenen Möglichkeiten.

Tabelle 1: Vor- und Nachteile der verschiedenen Abwasser-Wärmerückgewinnungsarten nach dem Ort der Wärmeentnahme (Butz, 2009)

Ort der Rückgewinnung:	Vorteile	Nachteile
im Gebäude	<ul style="list-style-type: none"> • relativ hohe Abwassertemperaturen • sehr kurzer Wärmetransportweg • Betreiber = Wärmeverbraucher • netzunabhängiger Betrieb • kein Einfluss durch Niederschlagswasser 	<ul style="list-style-type: none"> • geringer Abfluss mit tageszeitlich großen Schwankungen (instationär) • störende Abwasserinhaltsstoffe • dezentrale Anlagen mit evtl. relativ hohem Betriebsaufwand
im Abwasserkanal	<ul style="list-style-type: none"> • große Wassermengen • stationär (relativ konstanter Massenstrom) • kurze bis mittlere Wärmetransportwege 	<ul style="list-style-type: none"> • Temperaturniveau niedriger als bei Inhouse-Variante • Zustimmung des Netzbetreibers notwendig • störende Abwasserinhaltsstoffe • begrenzte Abkühlungsmöglichkeit (Einfluss auf Abwasserreinigung)
in der Kläranlage	<ul style="list-style-type: none"> • große Wassermengen • konstanter Massenstrom • kein Einfluss auf die Abwasserreinigung • benutztes Abwasser ist gereinigt (geringere Anforderungen an den Wärmetauscher) 	<ul style="list-style-type: none"> • Temperaturniveau niedriger als bei anderen Varianten • Wärmeerzeugung nicht bei Verbraucher (langer Wärmetransportweg) • ein Nahwärmenetz wird benötigt • Abhängigkeit vom Kläranlagenbetreiber

3.1.2 Anfallende Abwasser-Mengen und -temperaturen in Einfamilienhäusern

Der durchschnittliche Wasserverbrauch eines Österreicherers beträgt laut einer Studie der Grazer Stadtwerke (2006) 140 Liter pro Tag (Warmwasser und Kaltwasser). Die Wassermenge für Trinken und Kochen spielt dabei eine untergeordnete Rolle. Der größte Anteil wird für die Körperpflege, zum Waschen der Wäsche und zum Spülen der Toilette verbraucht (vgl. Abbildung 3.2).

Nach Feist et al. (1998) beträgt die Menge an Kaltwasserabfluss täglich ca. 90 Liter pro Person. Auch in einer Studie der Grazer Energieagentur (Bucar, 2007) wird der durchschnittliche tägliche Schmutzwasseranfall pro Person mit zwischen 130 bis 150 Liter beziffert. Diese Angaben enthalten sowohl das gezapfte Kalt- als auch das Warmwasser.



Abbildung 3.2: Typischer Wasserverbrauch eines Österreichers (Grazer Stadtwerke AG, 2006)

Bei normalem Nutzungsverhalten gelangt der überwiegende Teil des im Abwasser enthaltenen Wärmeinhalts in die Kanalisation (Feist, 1998). Im Gegensatz zum Warmwasser verändert sich das Temperaturniveau des Kaltwassers. Kaltes Trinkwasser gelangt in der Heizsaison mit Temperaturen zwischen 8 und 11 °C in das Gebäude und verlässt dieses mit einem Temperaturniveau zwischen 14 °C und 19 °C (Mittelwert 16 °C).

Um Rückschlüsse auf den Energieinhalt machen zu können, müssten die bei unterschiedlichen Temperaturniveaus anfallenden Abwassermengen bekannt sein. Aus diesem Grund wurden im Rahmen des vorliegenden Projekts Messungen im Bereich Abwasser-Temperaturniveau und Abwassermenge an zwei ausgewählten Objekten durchgeführt (siehe Kapitel 3.2).

3.1.3 Abwasser-Wärmerückgewinnung im Gebäude

Die hausinterne Wärmerückgewinnung aus Abwasser wird in der Schweiz bereits in über 200 Anlagen praktiziert: in der Industrie, in Schwimmbädern, Turnhallen, Spitälern und in Wohnbauten. Die Nutzung der Abwasserwärme konzentriert sich in solchen Inhouse-Anlagen auf die Warmwasserbereitung (Wanner, 2009).

Grundsätzlich ist das Abwassertemperaturniveau im Gebäude höher, da sich das Abwasser in der Kanalisation mit kühlerem Abwasser und Niederschlagswasser vermischt. Allerdings fällt das Abwasser im Gebäude zeitlich nicht konstant sondern je nach Tageszeit und Nutzerverhalten in Intervallen an. Es treten je nach Uhrzeit und Benutzungsverhalten der Personen unterschiedliche Mengen an Abwasser im Gebäude auf. Die größten Abwassermengen treten in den Morgenstunden, wenn die Nassräume benutzt werden, wenn der Geschirrspüler oder die Waschmaschine eingeschaltet werden und am Abend, wenn wieder die Nassräume benutzt werden, auf.

Hinsichtlich der Verschmutzung des anfallenden Abwassers ist zu unterscheiden, ob im Gebäude eine getrennte Abwasserführung für das Grauwasser (Abwasser von Bad und Waschmaschine) und Schwarzwasser (Küche und WC) vorhanden ist, oder ob Grau- und Schwarzwasser – wie es größtenteils üblich ist – gemeinsam über eine Leitung abgeführt werden. Das Schwarzwasser ist naturgemäß wesentlich stärker mit Feststoffen, diversen

Fetten und anderen Inhaltsstoffen belastet als das Grauwasser. Dementsprechend ergeben sich unterschiedliche Herausforderungen bzgl. einer evtl. auftretenden Verschmutzung bzw. einer notwendigen Reinigung der Wärmetauscherflächen.

Bei der Abwasser-Wärmerückgewinnung im Kanalnetz oder in Kläranlagen werden hauptsächlich Rinnen-Wärmetauscher verwendet, die im Durchlaufprinzip arbeiten, da das Abwasser hier kontinuierlich anfällt (Biesalski, 2008; Wanner, 2009). Beim Einsatz im Gebäude ergeben sich durch den diskontinuierlichen Anfall des Abwassers andere Anforderungen an Wärmerückgewinnungssysteme. Hier werden vielfach Speichersysteme verwendet, bei denen das Abwasser in einem Behälter gesammelt und der Wärmeentzug über einen internen Wärmetauscher bewerkstelligt wird (Wanner, 2009). Dies hat den Vorteil, dass auch kleinere Abflüsse nutzbar sind, aber auch den Nachteil dass kälteres und wärmeres Abwasser ständig vermischt wird, sodass insgesamt das nutzbare Temperaturniveau etwas niedriger ist. Im Folgenden werden unterschiedliche Wärmetauscherbauarten, die in Gebäuden eingesetzt werden – sowohl im Durchfluss als auch im Speicherprinzip – vorgestellt.

3.1.4 Beispiele für AWR-Systeme im Durchlaufprinzip

Fallrohr-Filmstrom-Wärmetauscher PREHEAT

Fallrohr-Filmstrom-Wärmetauscher werden für die Abwasser-Wärmerückgewinnung in Ein- und Mehrfamilien- Häusern verwendet, und werden z.B. von der PREHEAT GmbH (www.preheat.de) hergestellt. In derartigen Wärmetauschern strömt warmes Abwasser in einem senkrechten Kupferrohr nach unten. Dabei bildet sich eine Filmströmung entlang des Rohrumfangs aus, wodurch ein guter Wärmeübergang vom Abwasser an die Rohrwandung erreicht wird. An der Außenseite des Abwasserrohres ist eine Kupferrohrleitung aufgewickelt. Durch diese strömt (bei zeitgleichem Auftreten von Zapfung und Abfluss) Wasser, welches durch das Abwasser vorgewärmt wird (Preheat, 2010). Durch die doppelwandige Trennung zwischen dem Abwasser und dem im äußeren Rohr fließenden Medium (Abwasserrohr und aufgewickeltetes Rohr) kann das äußere Rohr direkt mit Frischwasser beschickt werden.

In Abbildung 3.3 ist eine Prinzipskizze eines Filmstrom Wärmetauschers dargestellt. Das beschriebene System funktioniert ohne Pumpen, Steuerungen oder sonstige elektronische Regelungen. Abbildung 3.3, rechts, zeigt schematisch eine Warmwasserbereitungsanlage, in welcher ein Schwerkraft-Filmstrom-Wärmetauscher eingebaut ist. Dabei wird das über den Wärmetauscher vorgewärmte Frischwasser sowohl zum Verbraucher als auch zum Warmwasserspeicher geführt. Die Nacherwärmung erfolgt durch eine Solaranlage oder durch ein anderes Wärmebereitstellungssystem.

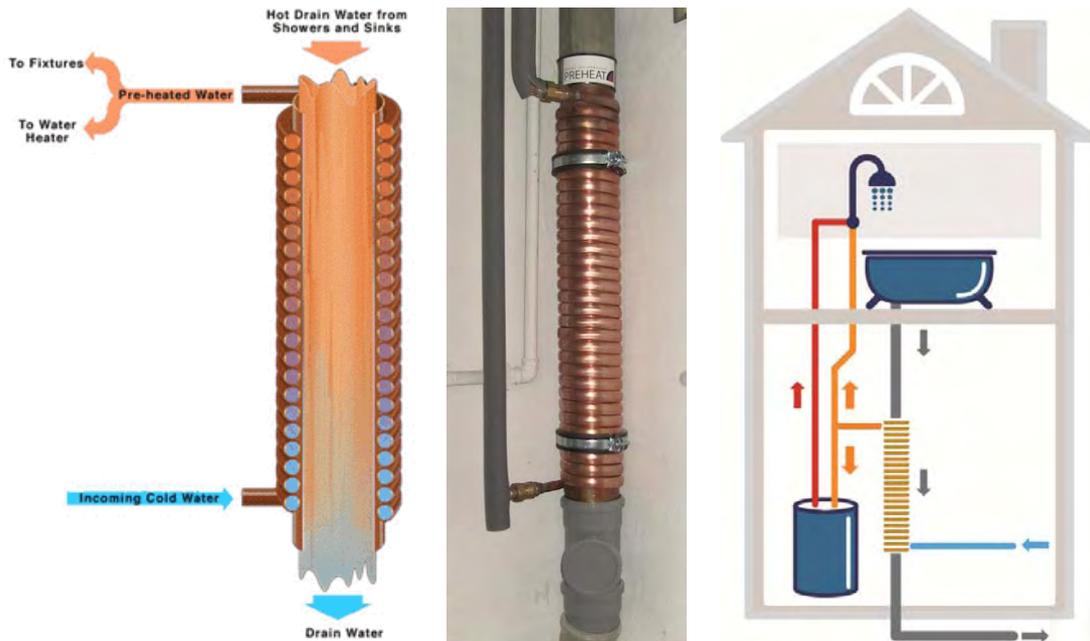


Abbildung 3.3: Filmstrom Wärmetauscher: Links: Prinzipskizze (Tomlinson, 2003); Mitte und Rechts: Foto einer Einbausituation, Hydraulikschema (Preheat, 2010)

Fercher Duschtassen-Wärmetauscher

Der Wärmetauscher der Firma Fercher (www.fercher.at) der Type AWT 911 ist für den Einbau im Badezimmer entwickelt worden (Abbildung 3.12). Der Wärmetauscher wird direkt unter der Duschkabine eingebaut und an die Kaltwasserversorgung sowie abwasserseitig an den Abfluss der Dusche angeschlossen. Das Kaltwasser wird über die über die Dusche abfließende Abwasser vorgewärmt und es muss weniger Warmwasser an der Duscharmatur zugemischt werden, um die gewünschte Wassertemperatur zu erreichen. Auch hier sind keine Pumpen, Steuerungen oder sonstige elektronische Regelungen erforderlich. Abbildung 3.4 zeigt eine Skizze des Wärmetauschers.

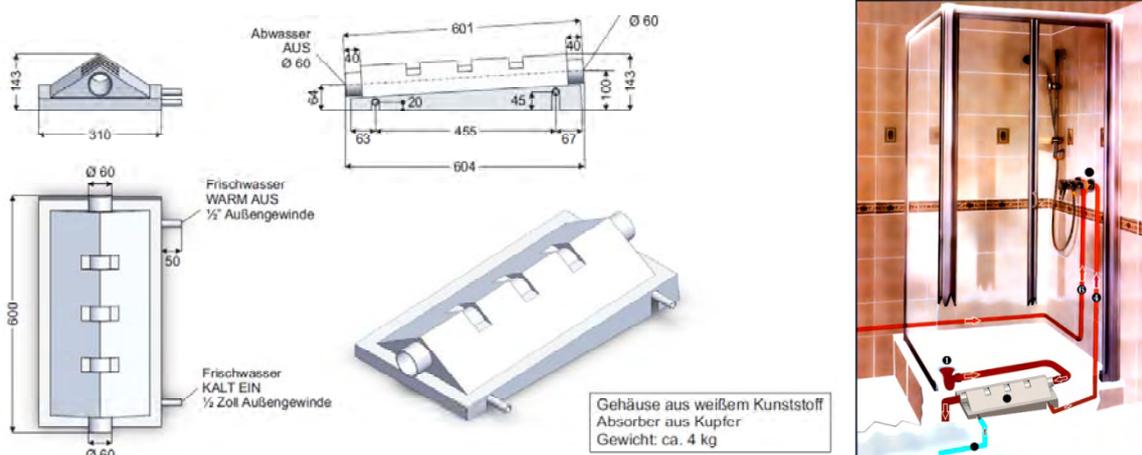


Abbildung 3.4: Duschwärmetauscher der Fa. Fercher (Fercher, 2010a)

Beim Einbau des Wärmetauschers für das Duschabwasser beträgt die Leistung laut Hersteller ca. 2 bis 4 kW, je nach Wasserverbrauch beim Duschen. Das heißt, das kalte Wasser vom Zulauf bei der Dusch-Mischbatterie wird von ca. 10 auf 18 bis 22 °C vorgewärmt.

Der Wärmetauscher basiert auf dem Prinzip der drucklosen Filmströmung auf der Abwasserseite, d.h. das Abwasser strömt frei und drucklos an einer Oberfläche über eine Wärmetauscherplatte.

Fercher Abwasserwärmetauscher Typ FB

Dieser Wärmetauscher der Fa. Fercher (www.fercher.at) besteht aus Absorberplatten aus Riffelblech und ist für höhere Leistungen entwickelt worden. Das Abwasser fließt an der Oberseite der Absorberplatten in Form eines dünnen turbulenten Filmstromes ab. Durch die turbulente offene Filmströmung soll eine Selbstreinigungswirkung des Abwasserwärmetauschers erzielt werden. Durch den konstruktiven Aufbau können die Wärmetauscherbleche im Bedarfsfall aber auch einfach im Betrieb gereinigt werden. An der Unterseite sind Flachrohre aufgelötet, durch die ein Wärmeträger (Frischwasser oder Sole) im Kreuz-Gegenstrom zum Abwasser fließt. In Abbildung 3.5 ist ein Schnitt durch eine Absorberplatte dargestellt.

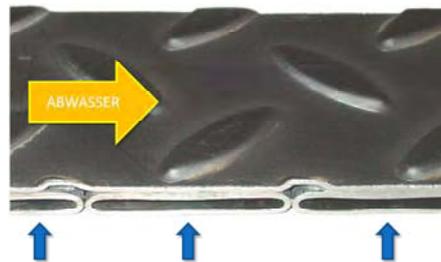


Abbildung 3.5: Absorberplatte (Fercher, 2010c)

Der technische Aufbau eines Absorberplattenwärmetauschers ist in Abbildung 3.6 dargestellt. Das Abwasser verteilt sich auf der gesamten Absorberplatte und fließt in Form eines dünnen turbulenten Filmstromes ab. Dadurch soll ein guter Wärmeübergang erreicht werden. Laut Hersteller sind die Einsatzgebiete für diesen Typ von Wärmetauscher Wäschereien, Färbereien, Destillieren, Sportzentren, Schwimmbäder, Nahrungsmittelindustrie und Kläranlagen. Der Wärmetauscher soll bei konstantem Abwasserstrom eingesetzt werden und lässt sich gut mit einer Wärmepumpe kombinieren (Fercher, 2010c).



Abbildung 3.6: Absorberplattenwärmetauscher (Fercher, 2010b)

3.1.5 Beispiele für AWR-Systeme im Speicherprinzip

Feka Sammelschacht-Wärmetauscher

Bei diesem System des Schweizer Herstellers Feka (www.feka.ch) fließt das Rohabwasser durch einen Filter in einen Abwasserschacht. Der Filter hält Fäkal- und Schmutzstoffe zurück, diese werden täglich einmal mit einer Spülpumpe in die Kanalisation gefördert. Das abgekühlte Wasser fließt über das Standrohr im gleichen Verhältnis wie der Zulauf laufend in die Kanalisation ab. Rund um den Abwasserfilter ist ein Spiral-Wärmetauscher angebracht (siehe Abbildung 3.7 und Abbildung 3.8).

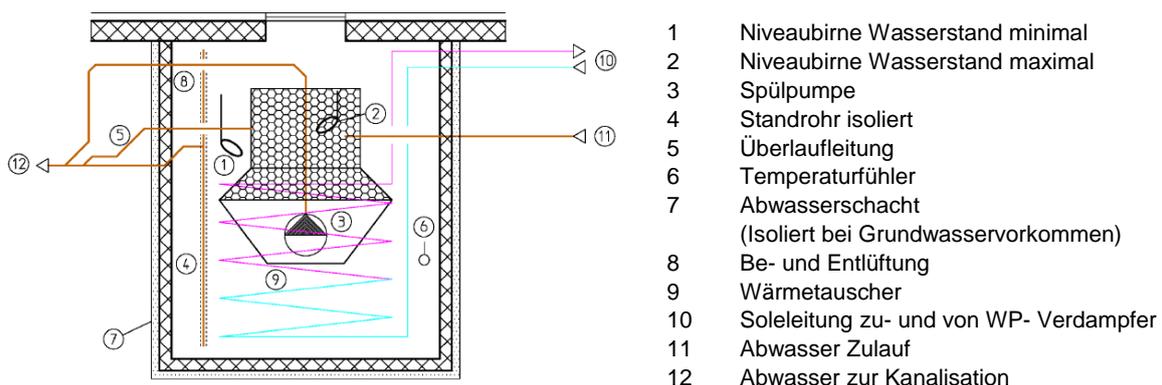


Abbildung 3.7: Integrierter Filter und Wärmetauscher in Abwasserschacht (Feka, 2009)

Bei einer Wärmeanforderung wird eine Wärmepumpe aktiviert, die über einen Solekreislauf über den Spiralwärmetauscher im Schacht dem Abwasser Wärme entzieht. Beim Unterschreiten einer eingestellten Soletemperatur, oder einer minimalen Abwassertemperatur, wird die Anlage abgeschaltet. Erst bei Freigabe durch einen Temperaturfühler im Abwasserschacht wird die Anlage wieder in Betrieb genommen.

Laut einer Studie von Schinnerl et.al (2007) sollte der Sammelschachtwärmetauscher bei einer Abwassermenge von 8000 bis 10.000 Liter pro Tag eingesetzt werden, damit ein wirtschaftlicher Betrieb gewährleistet wird. Dies entspricht einer Abwassermenge von mindestens 25 Wohneinheiten. Der Sammelschachtwärmetauscher wurde lt. Hersteller für Spitäler, Hallenbäder, Pflegeheime, Kasernen, Mehrfamilienhäuser oder Schulanlagen entwickelt.



Abbildung 3.8: Abwasserschacht einer Wohnüberbauung (Feka, 2009)

Forstner ThermoCYCLE

Das ThermoCYCLE der Forstner Speichertechnik GmbH ist eine Wärmerückgewinnungsanlage, in welcher warmes, abfließendes Grauwasser aufgestaut und gefiltert wird. Über einen Wärmetauscher wird Wärme entzogen und kann z.B. an einen Pufferspeicher zur Brauchwasservorwärmung und Heizungsunterstützung abgegeben werden. Das System wird in drei verschiedenen Größen mit einem Speichervolumen von 30 bis 130 Liter angeboten. (Forstner, 2012)

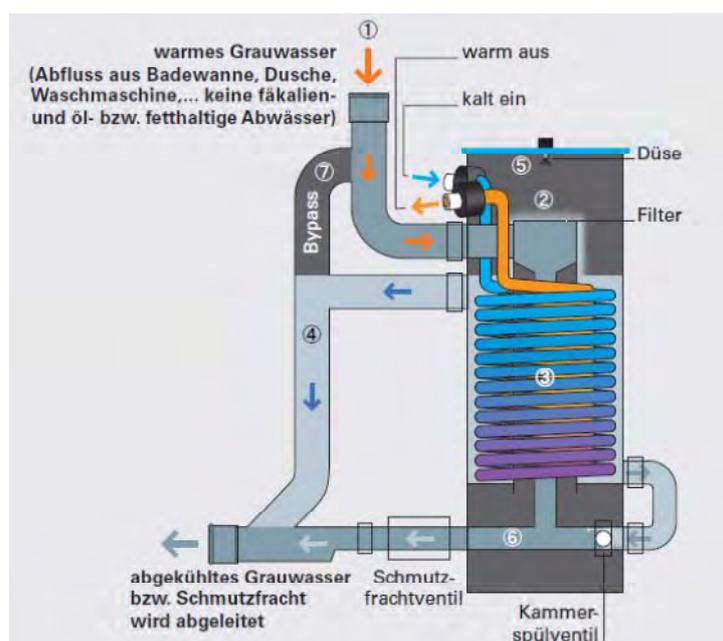


Abbildung 3.9: Thermocycle der Fa. Forstner Speichertechnik GmbH (Forstner, 2012)

Bedingung für den Einsatz des Systems ist ein getrenntes Abwassersystem, d.h. Schwarz- und Grauwasser müssen im Gebäude getrennt geführt werden, da das Gerät lt. Hersteller nur mit Grauwasser betrieben werden darf.

Im Folgenden wird die Funktionsweise des Geräts anhand der in Abbildung 3.8 mit Zahlen gekennzeichneten Anlagenteile beschrieben:

In einer separaten Abwasserzuleitung (1) wird das warme Grauwasser (aus der Dusche, Waschmaschine etc.) durch das ThermoCYCLE geleitet. Ein Filtersystem (2) sorgt für die Zurückhaltung der im Grauwasser enthaltenen Schmutzfracht (Haare, Wollflusen, Sand etc.). Dem gefilterten Grauwasser wird mit dem Wärmetauscher (3) die enthaltene Wärme entzogen. Anschließend fließt das abgekühlte Abwasser (4) in die Kanalisation. Die vollautomatisch ablaufende Filterreinigung (5) spült die angefallene Schmutzfracht (6) in individuell definierbaren Zeitintervallen ebenfalls in das Abwassernetz. Dadurch wird ein störungsfreier Betrieb gewährleistet. Zusätzlich sorgt ein Bypass für einen garantierten Ablauf des Abwassers.

Aqua-Re Energietrichter (Schellhorn, 2006)

Der "Aqua-Re-Energie-Trichter" der DeTec GmbH (www.de-tec.net) in Deutschland ist ein Abwasser-Wärmerückgewinnungssystem, bei dem Abwasser über den Zulauf in einen Trichter gelangt und dort zunächst gespeichert wird. Mittels eines Wärmetauschers wird dem Abwasser im Trichter Wärme entzogen. Der Wärmetauscher wird über einen Solekreislauf mit dem Verdampfer einer Wärmepumpe gekoppelt. Die Kondensatorwärme der Wärmepumpe wird an das Heizsystem abgegeben.

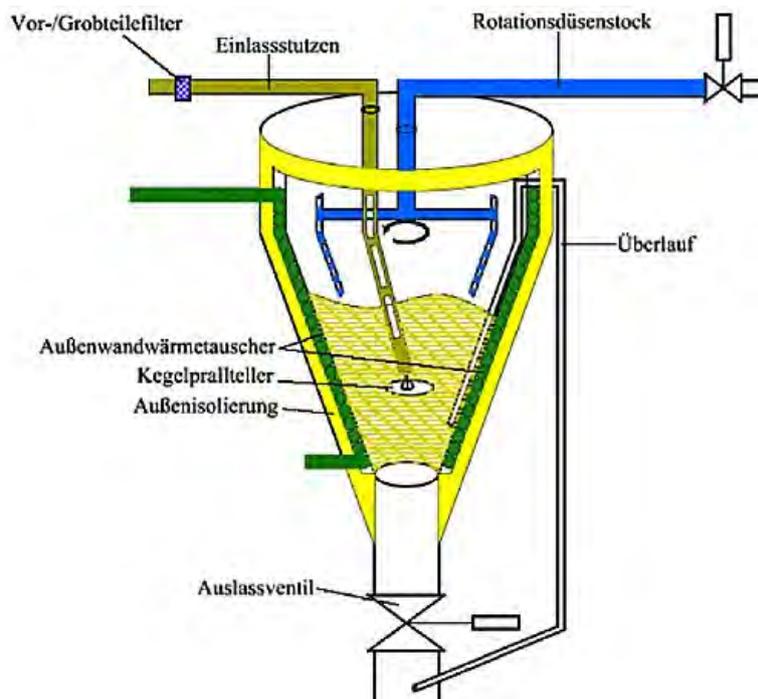


Abbildung 3.10: Aqua-Re-Energietrichter (De-Tec, 2010)

Der Behälter hat eine Trichterform mit steil abfallenden Wänden, die sich zum Auslass hin immer weiter verengen (siehe Abbildung 3.10). Dadurch sollen Verschmutzungen durch die Sog- und Strudelwirkung beim Öffnen des Behälters mitgerissen werden. Fließt das Abwasser von oben in den Trichter, setzen sich große und schwere Inhaltsstoffe unten ab. Der Sole/Wasser-Kreislauf des Außenwand-Wärmeübertragers stellt die Wärmequelle für die Wärmepumpe dar. Ist die technisch sinnvoll gewinnbare Wärme entzogen, wird das Ventil am Trichterhals geöffnet und das Abwasser fließt in die Kanalisation. Durch die Strudelwirkung, die an der Öffnung des Trichters besonders groß ist, werden alle dort abgesetzten Feststoffe mitgerissen. Dadurch ist lt. Hersteller ein Einsatz dieses Wärmetauschers bei jeglicher Art von verschmutztem Abwasser möglich

Weil sich dennoch nicht vollständig verhindern lässt, dass der Behälter im Laufe der Zeit verschmutzt oder sich ein Biofilm am Wärmetauscher ausbildet, ist am oberen Abschluss des Behälters ein Rotationsdüsenstock eingebaut. Dieser wird in der Regel mit Kaltwasser betrieben und reinigt den Behälter je nach Verschmutzungsgrad des Abwassers und der Abwassermenge in festen Zeitabständen. Laut Hersteller sollte die tägliche Abwassermenge für einen wirtschaftlichen Einsatz des Systems bei $> 1\text{m}^3$ liegen.

3.1.6 Verschmutzung der Wärmetauscher-Oberflächen

Da Abwasser-Wärmetauscher mit mehr oder wenig stark verschmutztem Abwasser beaufschlagt werden, stellt sich die Frage nach einer evtl. auftretenden Wärmetauscher-Verschmutzung bzw. nach einer damit einhergehenden Verminderung der Leistungsfähigkeit und einer Notwendigkeit einer kontinuierlichen oder zyklischen Reinigung der Wärmetauscherflächen. Die im Projekt durchgeführte Literaturrecherche hat ergeben, dass diese Thematik in Fachkreisen als jedenfalls relevant angesehen wird, jedoch wurden relativ wenige einschlägige wissenschaftliche Arbeiten gefunden.

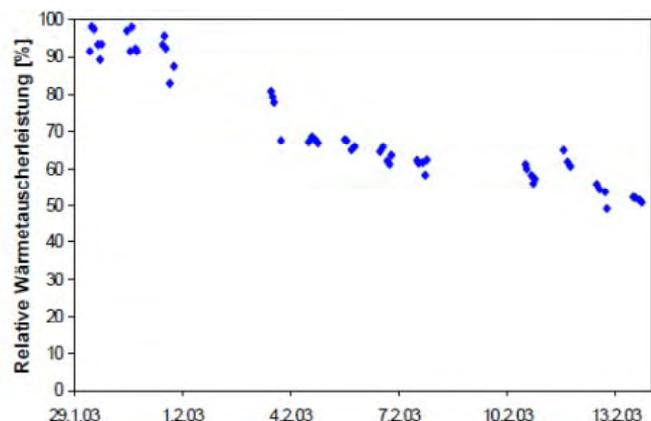


Abbildung 3.11: Biofilmbildung (Wanner, 2009)

Bestehende Arbeiten und Erfahrungen gibt es vor allem im Bereich von größeren Abwasser-Wärmerückgewinnungsanlagen in Kanalnetzen und Kläranlagen. Zum Beispiel wird in einem Bericht der EAWAG (Wanner, 2009) die Wärmetauscherverschmutzung als ein unvermeidliches Phänomen und ein wichtiger Faktor für den Betrieb von derartigen Wärmerückgewinnungsanlagen beschrieben. Der Autor erachtet es als wesentlich, dass die

Auslegung der Anlage und die Wahl des Wärmetauschers so geplant werden, dass technische Vorkehrungen und betriebliche Maßnahmen ergriffen werden können, falls auftretende Verschmutzungsprobleme den Betrieb der Anlage beeinträchtigen. Bei Rohrbündel- und Plattenwärmetauschern wirkt sich die Verschmutzung über eine steigende Druckdifferenz und einen sinkenden Volumenstrom des Abwassers im Wärmetauscher aus. Bei allen Wärmetauschertypen reduziert die Schmutzschicht den Wärmedurchgang durch die Tauscherwand und somit die Wärmetauscherleistung im schlimmsten Fall um bis zu 60 %. Präventive Maßnahmen umfassen die passende Auswahl der Anlagenkonfiguration, des Wärmetauschertyps und Betriebsmodus, die ausreichende Dimensionierung und allenfalls Desinfektion oder automatische mechanische Reinigung des Wärmetauschers, sowie die Abwasserbehandlung durch Vorfiltration.

Für die Reinigung der Wärmetauscher werden teilweise automatische, festinstallierte Reinigungssysteme verwendet. Bei Platten- und Rohrbündelwärmetauschern wird eine regelmäßige chemische Spülung zum Entfernen der Schmutzschicht empfohlen. Rinnenwärmetauscher lassen sich gemäß der Studie am einfachsten durch eine Hochdruckspülung reinigen. (Wanner, 2009)

Über die Verschmutzung von Wärmetauschern in AWR-Systemen in Gebäuden bzw. die Notwendigkeit einer Reinigung ist relativ wenig bekannt, bzw. wurden bei der durchgeführten Recherche keine wissenschaftlichen Arbeiten gefunden, die fundierte Informationen zu dieser Thematik enthalten. Grundsätzlich unterscheidet sich der Einsatz im Gebäude von jenem im Kanal bzw. in Kläranlagen bzgl. der Zusammensetzung des Abwassers, der Konstanz des Abwasserabflusses und bzgl. des vorhandenen Temperaturniveaus. Es ist anzunehmen, dass alle diese Eigenschaften einen Einfluss auf die Ausbildung von Schmutzschichten auf den Wärmetauscher-Oberflächen haben. Eine fundierte Aussage darüber, wie schnell und in welchem Ausmaß sich Schmutzschichten abhängig von der Art des Wärmetauschers und der Betriebsbedingungen ausbilden, ist an dieser Stelle nicht möglich bzw. würde eine Beurteilung aufwendige Untersuchungen im Rahmen eines Forschungsprojekts beanspruchen.

Gewisse Rückschlüsse über das Auftreten der Verschmutzungsproblematik können aufgrund der am Markt verfügbaren Systeme getroffen werden. Die Hersteller der AWR-Systeme im Durchlaufprinzip (vgl. Kap. 3.1.4) geben an, dass bei diesen Wärmetauschern aufgrund des sich ausbildenden turbulenten Filmstroms eine gewisse Selbstreinigungswirkung bei längeren Abflüssen mit warmem Wasser erzielt wird und diese daher auf der Abwasserseite nicht gereinigt werden müssen. Die am Markt erhältlichen AWR-Systeme im Speicherprinzip verfügen teilweise über ein automatisches Abreinigungssystem für die Wärmetauscher-Oberflächen.

3.2 Messtechnische Bestimmung des Potentials zur Wärmerückgewinnung aus dem Abwasser von Wohngebäuden

Ziel der im Projekt durchgeführten Feldmessungen war es, Potenziale zur Wärmerückgewinnung aus Abwasserströmen basierend auf realen Gebäuden zu erhalten. Diese sollen in weiterer Folge die Grundlage für die Beurteilung von Systemkonzepten bilden.

3.2.1 Auswahl des prinzipiellen Messkonzepts

Im ersten Schritt dieses Arbeitspakets wurden umfangreiche Recherchen über in Frage kommende Objekte sowohl im Einfamilienhaus- als auch im Mehrfamilienhausbereich durchgeführt. Ziel dieser Recherche war es, möglichst unterschiedliche Gebäude mit verschiedenen Abwasserkonzepten zu eruieren.

Als Ergebnis konnten Einfamilien- und Mehrfamilienhäuser in verschiedenen Baustandards und unterschiedlichen Ausstattungen recherchiert werden. Konventionelle Abwassersysteme waren ebenso vertreten wie Abwasseranlagen mit Grauwasserreinigung. Bei der Auswahl der tatsächlich zu messenden Anlagen wurde darauf geachtet, beide Systeme vertreten zu haben.

Aufgrund der Datenbasis aus oben genannter Recherche wurden mögliche Messkonzepte entwickelt. Wie auch im Projektantrag definiert, wurde zu Beginn des Projekts auch die Möglichkeit der Volumenstrommessung des Schwarzwassers untersucht. Als eine realistische Möglichkeit stellte sich ein Konzept heraus, welches aus einer Kombination von Sammelbehälter, Siphon und Hebeanlage besteht. Die Problematik hierbei war zum einen die Betriebssicherheit (Pumpenausfall, Undichtigkeit), zum anderen die zeitgleiche Messung des Volumenstroms und der zugehörigen Temperatur (Zuordnung der Temperatur zur entsprechenden Wassermenge). Dem gegenüber stand ein Messkonzept nach dem Prinzip einer Input-Output-Bilanzierung. Die Nachteile dieser Methode liegen in der aufwendigen Zuordnung der gemessenen Abwassertemperaturen (Output-Seite) zur Wassermenge auf der Input-Seite (Zapfstellen, Wohnungsstation), und dass nicht das tatsächlich durch das Abflussrohr fließende Volumen gemessen wird, sondern der Zufluss zum Verbraucher. Die wesentlichen Vorteile dieses Prinzips liegen darin, dass die Volumenströme auf der Input-Seite mittels Standard-Wasserzählern mit einer vergleichsweise hohen Genauigkeit gemessen werden können und dass es hinsichtlich Betriebssicherheit keine Bedenken gibt. Außerdem ist diese Messtechnik im Gegensatz zu jener einer Schwarzwasser-Mengenmessung ohne großen Platzbedarf zu installieren. Aus diesen Gründen wurde entschieden, zur Bestimmung des Energieinhalts des Abwassers, eine Volumenstrommessung am Warm- sowie Kaltwasserzufluss (Input) und eine Temperaturmessung im Abwasser (Output) einzusetzen.

3.2.2 Auswahl der Feldmessenanlagen

Um eine möglichst breite Palette an Anwendungsvarianten und somit Wärmerückgewinnungspotenzialen zu untersuchen, sollten sowohl Messungen im Bereich Einfamilienhaus als auch im Bereich Mehrfamilienhaus durchgeführt werden. Ausgewählt wurde schlussendlich ein Einfamilienhaus (4 Personen, Niedrigenergiehausstandard), das eine Grauwassernutzungsanlage besitzt und ein Mehrfamilienhaus (sechs Wohneinheiten, Passivhausstandard) mit konventionellem Abwassersystem, sprich keiner getrennten Führung von Grau- und Schwarzwasser. Entgegen der Ausführungen im Projektantrag entschied sich das Projektteam die Anzahl der Messanlagen von drei auf zwei zu reduzieren. Dies hat den Hintergrund, dass aufgrund der Input-Output-Bilanzierung wesentlich genauere Daten zu den einzelnen Verbrauchern bestimmt werden können, was eine allgemeingültige Umlegung des Wasserverbrauchs und somit des Wärmerückgewinnungspotenzials auf andere Objekte ermöglicht. Aufgrund des hohen Detaillierungsgrades des Messkonzepts würde eine dritte Anlage einerseits keine relevante Verbesserung der Ergebnisse bedeuten, andererseits aber einen erheblichen Mehraufwand im Bereich der Messdatenerfassung, Messdatenanalyse und Darstellung der Messergebnisse (eine Vielzahl auszuwertender Sensoren) mit sich bringen. Diese Aspekte waren schlussendlich ausschlaggebend für die Entscheidung des Projektteams bei der Auswahl der Messanlagen.

3.2.3 Feldmessenanlage „Einfamilienhaus“

Der Standort des ausgewählten Einfamilienhauses ist Lieboch (Stmk.). Das Gebäude verfügt über eine Grauwassernutzungsanlage inklusive Grauwasserreinigung. Zusätzlich ist auch eine Regenwassernutzungsanlage installiert. Das Warmwasser wird mittels einer Frischwasserstation bereit. Das untersuchte Einfamilienhaus wird von zwei Erwachsenen und zwei Kindern bewohnt. Einer der Erwachsenen ist Vollzeit berufstätig, der zweite Erwachsene arbeitet Teilzeit, beide Kinder besuchen die Schule.

Das Einfamilienhaus ist als Niedrigenergiehaus ausgeführt, die Wärmeversorgung erfolgt über einen Nahwärmenetzanschluss und eine Solaranlage.

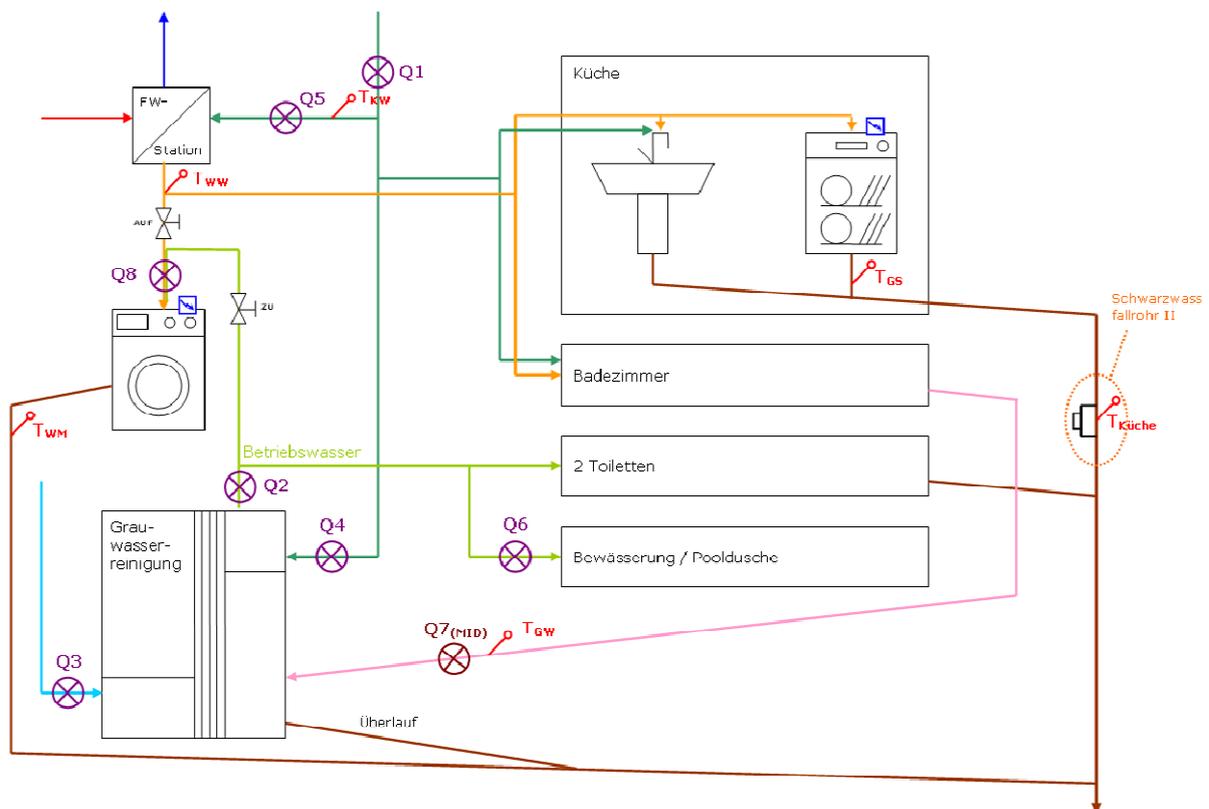
Die für die Untersuchung relevante Ausstattung des Einfamilienhauses beinhaltet:

- 1 Küchenspüle
- 1 Geschirrspüler (mit Warmwasseranschluss)
- 2 Toiletten
- 1 Badewanne
- 1 Dusche
- 2 Waschbecken im Badezimmer
- 1 Waschmaschine (entweder am Warmwasser oder am Kaltwasser angeschlossen)
- Grauwasserreinigungsanlage
- Regenwassernutzungsanlage

3.2.3.1 Anlagen- bzw. Messkonzept

Das entsprechende Anlagenkonzept inklusive installierter Messtechnik ist in Abbildung 3.12 dargestellt. Der Wasserzähler Q1 ist der Hauptzähler des Kaltwassers, welches von der Hausübergabestation an alle Verbraucher des Haushalts verteilt wird. Der Wasserzähler Q5 zählt jene Wassermenge, welche von der installierten Frischwasserstation erwärmt wird, also den gesamten Warmwasserverbrauch des Haushalts.

In den Sommermonaten gibt es in der Regel seitens der thermischen Solaranlage Wärmeüberschüsse. Durch den Anschluss der Waschmaschine und des Geschirrspülers an der Warmwasserleitung können diese Überschüsse genutzt werden. Waschmaschine und Geschirrspüler benötigen somit beträchtlich weniger elektrische Energie für die Aufheizung. Im Winterhalbjahr wird die Waschmaschine an das Betriebswasser angeschlossen, welches von der Grauwasserreinigung oder der Regenwassernutzung bezogen wird. Die Wassermenge wird in beiden Betriebsarten mit dem Wasserzähler Q8 bestimmt (siehe Abbildung 3.13).



Legende:

	Vorlauf Heizungswasser		Betriebswasser (ger. Grauwasser)
	Rücklauf Heizungswasser		Regenwasser
	Warmwasser		Schwarzwasser
	Kaltwasser		Grauwasser
	Stromzähler		Wasserzähler

Abbildung 3.12: Anlagenkonzept inklusive installierte Messtechnikkomponenten

Auch die beiden Toilettenspülungen werden mit gereinigtem Betriebswasser betrieben. Die Wassermengen für Bewässerung bzw. Pooldusche können für diese Untersuchung unberücksichtigt bleiben, da diese nicht in die Kanalisation geleitet werden. Die Wassermengen der Toiletten können durch Q2, Q6 und Q8 bestimmt werden.

Der Durchfluss des Grauwassers, welches aus dem Badezimmer zur Grauwasserreinigung geleitet wird, wird mittels des Wasserzählers Q7 bestimmt. Durch die Kenntnis von Q1, Q4, Q7 und Q8 kann der Wasserverbrauch der Küche errechnet werden. Die jeweiligen Temperaturen sowohl der Zuflüsse als auch der Abflüsse werden zur Erstellung einer detaillierten Input-Output-Bilanz gemessen.

Die Stromaufnahmen des Geschirrspülers und der Waschmaschine werden aufgezeichnet, um zum einen die elektrische Energiemenge zu bestimmen, die zum Aufheizen des Wassers nötig ist, und zum anderen um zu erkennen, zu welchen Zeiten und wie häufig das jeweilige Haushaltsgerät in Betrieb genommen wird.

Es wurden auch Temperaturmessungen in den Spülkästen der Toiletten durchgeführt, um zu bestimmen, in welchem Maße das im Spülkasten verweilende Wasser der Umgebung Energie entzieht, bzw. welche Potenziale es hinsichtlich einer Wärmerückgewinnung birgt.



Abbildung 3.13: Installierter Wasserzähler zur Waschmaschine

3.2.3.2 Messtechnik

Die Taktung und die Genauigkeit der eingebauten Messtechnik wurden so gewählt, dass auch kleinere Zapfungen berücksichtigt werden können. Es wird jede Minute ein Wert pro Messgerät (Wasserzähler bzw. Temperaturmessgerät) im Datenlogger gespeichert. Die Wasserzähler geben einen Impuls pro Liter weiter.

Zur Messung des Volumenstroms im Grauwasser (Abwasserrohr des Badezimmers) wird ein magnetisch induktives Durchflussmessgerät (MID) eingesetzt, da dieses keine mechanischen Einbauten im Durchflusskanal besitzt und somit eventuelle Verschmutzungen sowie kleine Feststoffe im Grauwasser kein Problem für das Messinstrument darstellen.

Außerdem treten in einem Abflussrohr hauptsächlich sehr geringe Strömungsgeschwindigkeiten auf, die andere Messprinzipien nicht erfassen können. Voraussetzung für die Messung mittels MID ist, dass die Messstrecke immer vollständig gefüllt bleibt. Dies konnte mit einem Siphon an der Einbaustelle erreicht werden (siehe Abbildung 3.14). Alle weiteren eingebauten Wasserzähler sind als Flügelradzähler ausgeführt.

Ebenso wie bei Temperatur und Durchflussmessung wird von den Strommessgeräten je ein Wert pro Minute im Datenlogger gespeichert. Gemessen werden die aufgenommene Leistung des Geschirrspülers und die der Waschmaschine in Watt (Minutendurchschnittswert).



Abbildung 3.14: Situierung des MID für die Messung der Grauwassermenge aus dem Badezimmer

3.2.3.3 Energiebilanzierung (Methodik)

Beim Einfamilienhaus wird eine genaue Input-Output Bilanz erstellt. Dies bedeutet, dass die Energie, die über das Warmwasser, über das Kaltwasser und über Strom für Geschirrspüler und Waschmaschine dem Gebäude zugeführt wird (Input) mit der Energie, welche vom Gebäude abgeleitet wird (Output), verglichen wird. Da die tatsächliche Kaltwassertemperatur unter der Referenztemperatur (10 °C) liegen kann, sind auch geringe negative Energieeinträge möglich.

Zusätzlich wird bei diesem Objekt in einer Detaillierung gemessen, die eine Bilanzierung der einzelnen Verbraucher des Gebäudes erlaubt. Dadurch besteht im Weiteren die Möglichkeit, die gemessenen Verbraucher so darzustellen, dass Objekte mit anderen Verbraucherkombinationen modelliert werden können.

Bilanzierung der einzelnen Verbraucher:

Für die vorhin beschriebene Input-Output-Bilanzierung des Einfamilienhauses werden die Wärmemengen mittels der gemessenen Durchflüsse bzw. Massenströme (Annahme: 1 Liter Wasser entspr. 1 kg) und den zugehörigen Temperaturen nach folgender Formel berechnet:

$$Q = \frac{m_x \cdot c \cdot (T_x - T_{\text{referenz}})}{3600} \quad \text{Gl. 3.1}$$

Q	Wärmemenge [kWh]
m_x	Masse [kg]
c	Spezifische Wärmekapazität [kJ/kgK]
T_x	Wassertemperatur [°C]
T_{referenz}	Referenztemperatur [°C]

Die Referenztemperatur ist jene Temperatur, auf die ein im Falle einer Abwasserwärmerückgewinnung eingebauter Wärmetauscher das Abwasser abkühlt, bevor es in den öffentlichen Kanal gelangt. Diese Referenztemperatur ist abhängig vom Konzept der Abwasserwärmerückgewinnung. In den nachfolgenden Berechnungen wurde diese mit 10 °C angenommen. Theoretisch könnte das Abwasser jedoch bis auf knapp über 0 °C abgekühlt werden, was das Wärmerückgewinnungspotenzial positiv beeinflussen würde.

Beim untersuchten Einfamilienhaus wird der Wärme-Input von Warm- und Kaltwasser getrennt berechnet, der Wärme-Output kann jedoch nur mit einem gesamten Abwasservolumen berechnet werden. Nachfolgend sind die Algorithmen für die Berechnung der Massenströme der einzelnen Verbraucher angeführt.

Küche (inklusive Geschirrspüler):

Die folgenden Formeln gelten, wenn kein Grauwasser (Q7) fließt. Andernfalls wird Warmwasser und Kaltwasser auf Küche und Badezimmer nach dem Gesamtverhältnis aufgeteilt. Eine Auswertung ergab, dass Gleichzeitigkeiten von Zapfungen im Badezimmer und in der Küche nur sehr selten auftreten. Die Warmwassermenge, welche in die Küche fließt, wird wie folgt berechnet:

$$m_{\text{Küche_WW}} = Q5 - Q8 \quad \text{Gl. 3.2}$$

$m_{\text{Küche_WW}}$	Warmwassermenge Küche (Input) [kg]
$Q5$	Warmwasserzählerstand [kg]
$Q8$	Wasserzählerstand der Waschmaschine [kg]

Die Kaltwassermenge, welche in die Küche fließt, wird wie folgt berechnet:

$$m_{\text{Küche_KW}} = Q1 - Q4 - Q5 \quad \text{Gl. 3.3}$$

$m_{\text{Küche_KW}}$	Kaltwassermenge Küche (Input) [kg]
$Q1$	Kaltwasserzählerstand gesamt [kg]
$Q4$	Kaltwasserzählerstand der Grauwasserreinigung [kg]
$Q5$	Warmwasserzählerstand [kg]

Die Abwassermenge der Küche wird wie folgt berechnet:

$$m_{Küche_Abw.} = Q1 - Q7 - Q8 \quad \text{Gl. 3.4}$$

$m_{Küche_Abw.}$	Abwassermenge Küche (Output) [kg]
$Q1$	Kaltwasserzählerstand gesamt [kg]
$Q7$	Grauwasserzählerstand [kg]
$Q8$	Wasserzählerstand der Waschmaschine [kg]

Geschirrspüler:

Der Stromzähler zeigt, wann der Geschirrspüler in Betrieb genommen wurde. Durch Beobachten des Warmwasserverbrauchs mehrerer Programmdurchläufe kann ein durchschnittlicher Warmwasserverbrauch des Geschirrspülers ermittelt werden. Somit kann dieser Verbrauch des Geschirrspülers von der Bilanz der Küche abgezogen werden.

Badezimmer:

Die Warmwassermenge, welche in das Badezimmer fließt wird wie folgt berechnet:

$$m_{Bad_WW} = Q5 - Q8 - m_{Küche_WW} \quad \text{Gl. 3.5}$$

m_{Bad_WW}	Warmwassermenge Badezimmer (Input) [kg]
$Q5$	Warmwasserzählerstand [kg]
$Q8$	Wasserzählerstand der Waschmaschine [kg]
$m_{Küche_WW}$	Warmwassermenge Küche (Input) [kg]

Die Kaltwassermenge, welche in das Badezimmer fließt, wird wie folgt berechnet:

$$m_{Bad_KW} = Q1 - Q5 - Q4 - m_{Küche_KW} \quad \text{Gl. 3.6}$$

m_{Bad_KW}	Kaltwassermenge Badezimmer (Input) [kg]
$Q1$	Kaltwasserzählerstand gesamt [kg]
$Q5$	Warmwasserzählerstand [kg]
$Q4$	Kaltwasserzählerstand Grauwasserreinigung [kg]
$m_{Küche_KW}$	Kaltwassermenge Küche (Input) [kg]

Die Abwassermenge des Badezimmers ist wie folgt definiert:

$$m_{Bad_Abw.} = Q7 \quad \text{Gl. 3.7}$$

$m_{Bad_Abw.}$	Abwassermenge Badezimmer (Output) [kg]
$Q7$	Grauwasserzählerstand [kg]

Toiletten:

Die Spülwassermengen der Toiletten werden wie folgt berechnet:

$$m_{WC} = Q2 - Q6 - Q8 \quad \text{Gl. 3.8}$$

m_{WC}	Spülwassermenge Toiletten [kg]
$Q2$	Betriebswasserzählerstand [kg]
$Q6$	Wasserzählerstand für Bewässerung und Pooldusche [kg]
$Q8$	Wasserzählerstand der Waschmaschine [kg]

Waschmaschine:

Die Waschwassermenge der Waschmaschine ist wie folgt definiert:

$$m_{WM} = Q8 \quad \text{Gl. 3.9}$$

m_{WM}	Waschwassermenge der Waschmaschine [kg]
$Q8$	Wasserzähler Waschmaschine [kg]

3.2.3.4 Ergebnisse zur Feldmessung am Einfamilienhaus

Wie in Kapitel 3.2.3.3 beschrieben, wurden Energiebilanzen der einzelnen Verbraucher erstellt, ebenso wie Häufigkeitsverteilungen der auftretenden Temperaturen im Abwasser von Küche und Badezimmer. In den folgenden Unterkapiteln und Diagrammen werden die ersten Ergebnisse zum untersuchten Einfamilienhaus beschrieben bzw. dargestellt.

Bei der Entwicklung der Auswerteroutine wurde darauf geachtet, einen möglichst hohen Automatisierungsgrad zu schaffen. Um jedoch die gewünschte Genauigkeit der Messung am Einfamilienhaus zu gewährleisten, mussten aufwendige manuelle Eingriffe bei der Auswertung der erhaltenen Daten vorgenommen werden. Die Aufgabe war es, auftretende Verzögerungen zwischen Input und Output wie z.B. Badewannenfüllungen, Geschirrspüler- und Waschmaschinenprogrammdurchläufe etc. zu erkennen und dem richtigen Verbraucher zuzuordnen.

Ein Beispiel: Das Wasservolumen, welches in die Küche geleitet wird, errechnet sich nach dem gegenständlichen Messkonzept, indem zwischen Kalt- und Warmwasser-Input und dem zeitgleichen Abwasser-Output des Badezimmers eine Differenz gebildet wird. In Abbildung 3.15 sind beispielhaft Abwassertemperaturen und Durchflüsse (Input sowie Output) des Badezimmers und der Küche vom 26.09.2010 dargestellt. Es ist hier zu erkennen, dass beim Befüllen der Badewanne (ca. 17 Uhr 10) das gesamte Volumen an Kalt- und Warmwasser nach der automatischen Auswertung der Küche zugeordnet wird. Beim Entleeren der Badewanne (ca. 17 Uhr 30) würde nach dem oben beschriebenen Algorithmus somit ein „negativer Durchfluss“ in der Küche errechnet werden.

Dieses Beispiel zeigt, dass nur durch zusätzliche manuelle Zuordnungen der Volumenströme zu den entsprechenden Verbrauchern (im Falle einer Input-Output-Verzögerung) genaue Messergebnisse möglich sind.

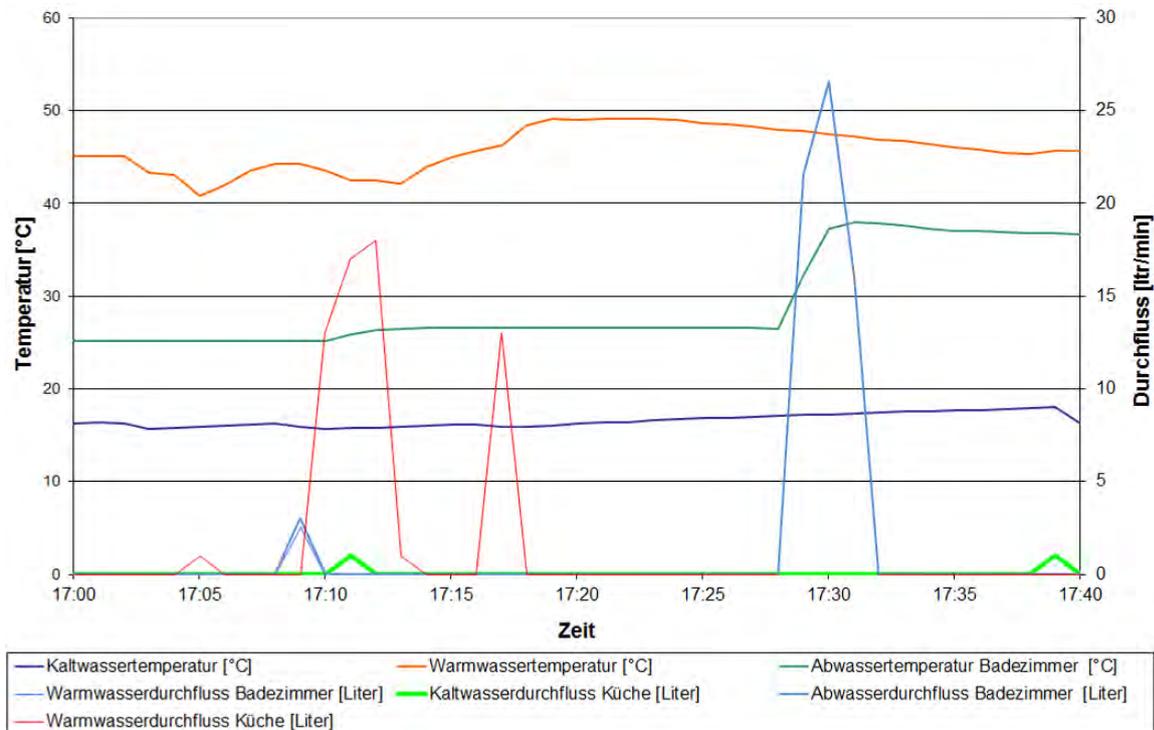


Abbildung 3.15: Beispielhaft die Abwassertemperaturen und Durchflüsse (Input sowie Output) des Badezimmers und der Küche vom Sonntag, dem 26.09.2010 (Manuelle Zuordnung der Massenströme nötig)

Häufigkeitsverteilung der auftretenden Temperaturen im Abwasser

In Abbildung 3.16 und Abbildung 3.17 sind die Häufigkeitsverteilungen der auftretenden Temperaturen im Abwasser der Küche und des Badezimmers ersichtlich (blaue Balken). Zusätzlich stellen die roten Dreiecke der Diagramme den durchschnittlichen Durchfluss pro Minute im entsprechenden Temperaturbereich dar.

Küche:

Betrachtet man Abbildung 3.16, so ist ersichtlich, dass 18,9 % des gesamten Abwassers der Küche mit einer Temperatur im Bereich von 20 °C bis 22 °C in den Abfluss gelangen. Gleichzeitig zeigt das Diagramm auch, dass die Wassermenge, welche in einer Minute mit einer Temperatur von 20 °C bis 22 °C gezapft wird, im Durchschnitt 1,2 Liter beträgt.

Als Erkenntnis der Häufigkeitsverteilung der auftretenden Abwassertemperaturen der Küche kann gesagt werden, dass gut die Hälfte des Abwassers (51,3 %) mit einer Temperatur von 18 °C bis 24 °C durch das Abwasserrohr fließen. Sehr selten (2,9 % des Abwassers) gelangt Wasser in den Abwasserkanal der Küche mit einer Temperatur von mehr als 36 °C, jedoch liegen hier die durchschnittlichen Zapfmengen bei 3 Liter in einer Minute.

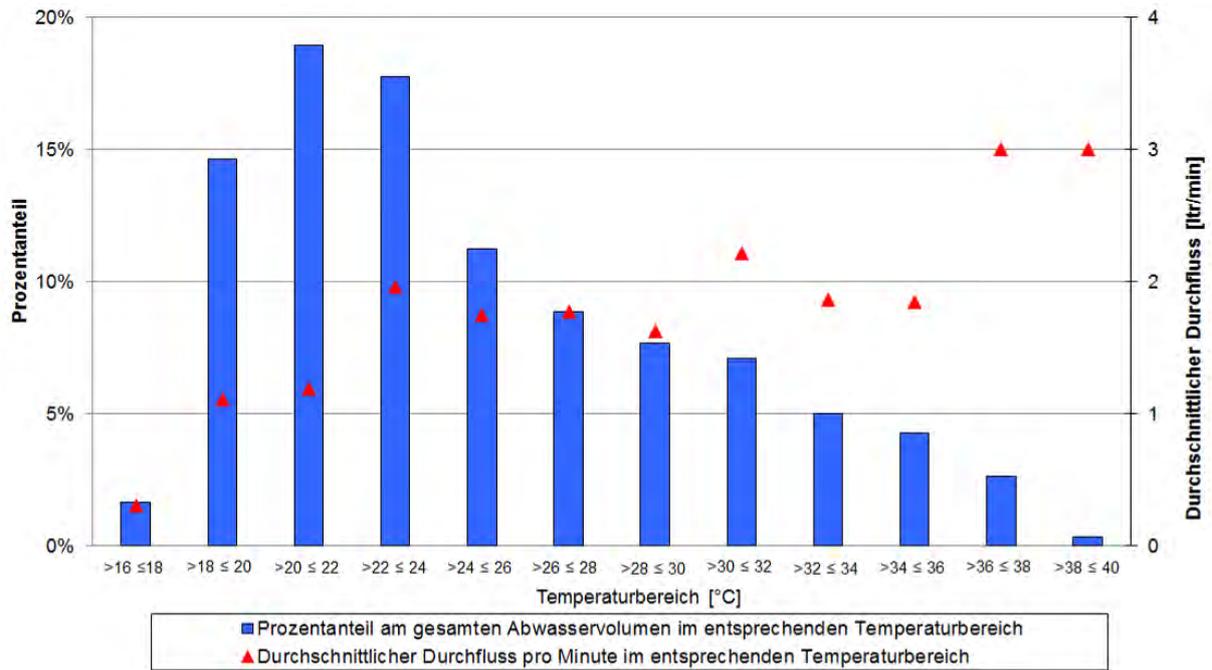


Abbildung 3.16: Häufigkeitsverteilung Küche: Anteil des anfallenden Abwassers in verschiedenen Temperaturbereichen sowie durchschnittlicher Durchfluss pro Minute (Zeitraum: 1.9. bis 30.11.2010)

Badezimmer:

Abbildung 3.17 zeigt, dass 32,3 % des Abwassers im Badezimmer mit einer Temperatur im Bereich von 34 °C bis 36 °C in den Abfluss gelangen. Gleichzeitig zeigt das Diagramm auch, dass die Wassermenge, welche in einer Minute mit einer Temperatur von 34 °C bis 36 °C gezapft wird, im Durchschnitt 4,7 Liter beträgt.

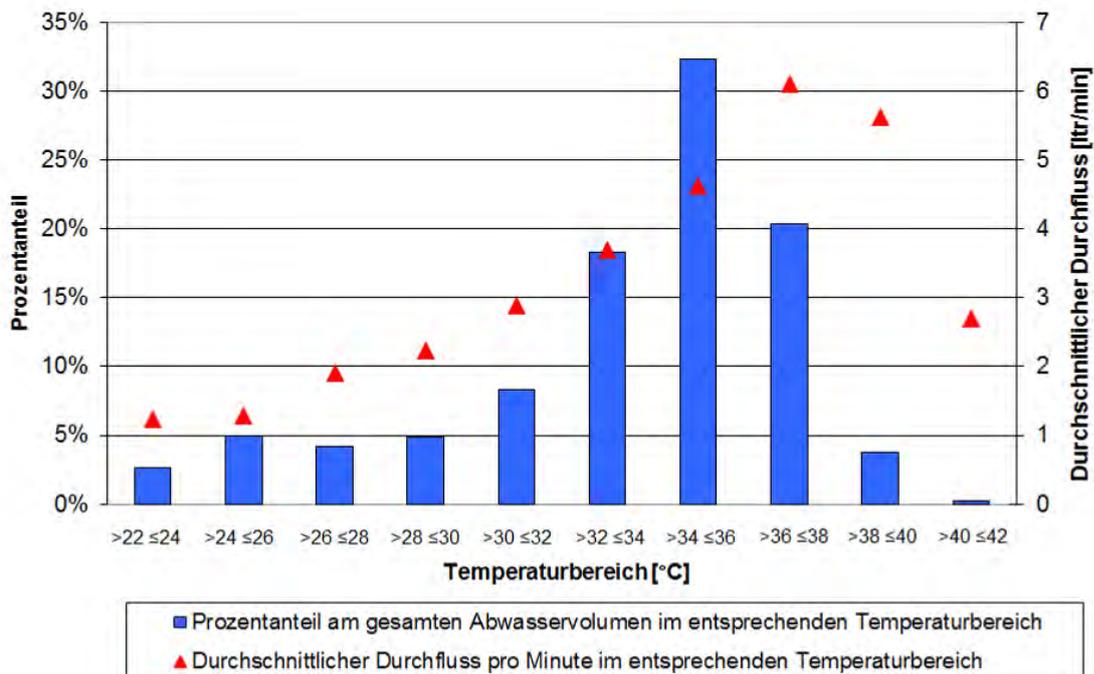


Abbildung 3.17: Häufigkeitsverteilung Badezimmer: Anteil des anfallenden Abwassers in verschiedenen Temperaturbereichen sowie durchschnittlicher Durchfluss pro Minute (Zeitraum: 1.9. bis 30.11.2010)

Als Erkenntnis der Häufigkeitsverteilung der auftretenden Abwassertemperaturen des Badezimmers kann gesagt werden, dass der größte Teil des Abwassers (71 %) mit einer Temperatur von 32 °C bis 38 °C durch das Abwasserrohr fließen. Selten (4 % des Abwasservolumens) gelangt Wasser in den Abwasserkanal des Badezimmers mit einer Temperatur von mehr als 38 °C. Interessant hierbei ist, dass bei Zapfungen mit Temperaturen zwischen 32 °C und 38 °C sehr wohl auch große Durchflussmengen (durchschnittlich zwischen 3,7 und 6,1 Liter/min) im Abwasserkanal des Badezimmers auftreten. Diese Kombination aus häufigen Zapfungen mit hohen Temperaturen und gleichzeitig großen Wassermengen bildet gute Voraussetzungen für die Nutzung des Abwassers des Badezimmers als Wärmerückgewinnungsquelle.

Wärmemengen

Badezimmer/Küche:

In Abbildung 3.18 ist die in Kapitel 3.2.3.3 beschriebene Energiebilanz der Messperiode 20.05.2010 bis 28.11.2010 von Küche (inklusive Geschirrspüler) und Badezimmer dargestellt. Betrachtet man die Absolutwerte der Tagesdurchschnitte an Kilowattstunden der Küche und des Badezimmers, lässt sich klar erkennen, dass das Potenzial des Badezimmers jenes der Küche um ein Mehrfaches übersteigt. Somit wird die Erkenntnis aus den Diagrammen der Häufigkeitsverteilung (Abbildung 3.16 und Abbildung 3.17) bestätigt, dass bei einem typischen Einfamilienhaus die Potenziale für die Nutzung des Abwassers aus dem Badezimmer quantitativ höher sind als von den anderen Verbrauchern.

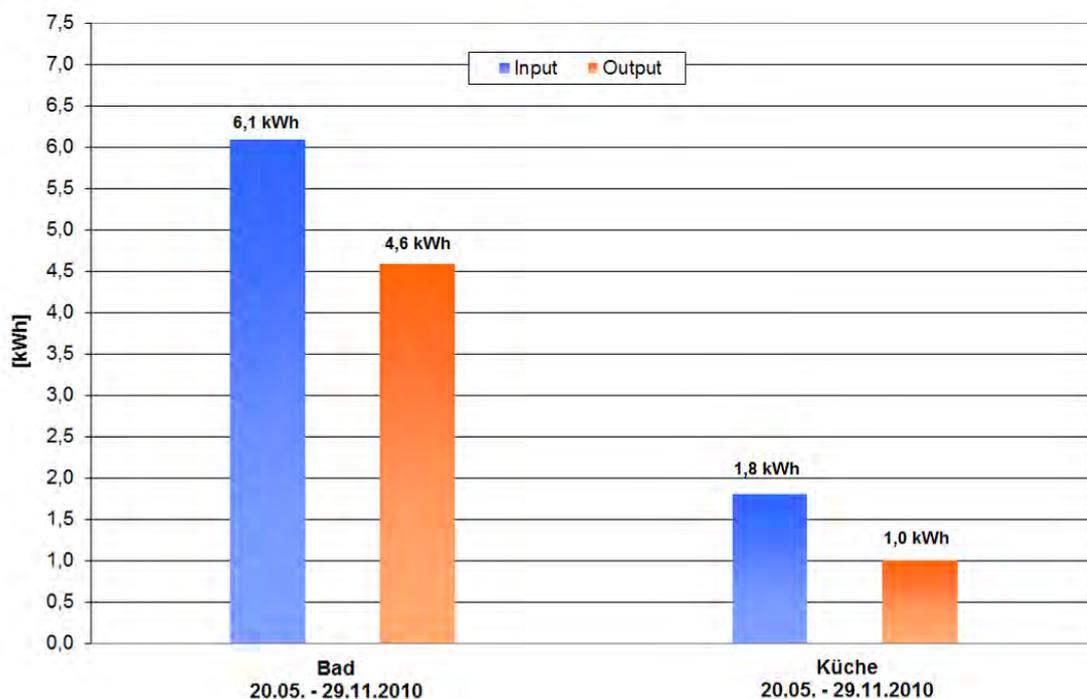


Abbildung 3.18: Tagesdurchschnittliche Input-Output-Bilanz von Badezimmer und Küche (Messperiode vom 20.05.2010 bis 28.11.2010)

Waschmaschine:

Die Waschmaschine war in der Untersuchungsperiode Sommer/Herbst 2010 am Warmwasser angeschlossen (Sommer/Herbst). Unabhängig vom Programmverlauf wurde sie also immer mit heißem Wasser beaufschlagt. Aus diesem Grund ergab sich für diese Untersuchungsperiode ein vergleichsweise hohes Wärmerückgewinnungspotenzial. Die Auswertungen der Monate Jänner, Februar und Mai 2011 zeigten, dass sich bei Kaltwasseranschluss der Waschmaschine der Energieinhalt des Abwassers im Vergleich zu einem Warmwasseranschluss auf gut die Hälfte reduziert (siehe Abbildung 3.19).

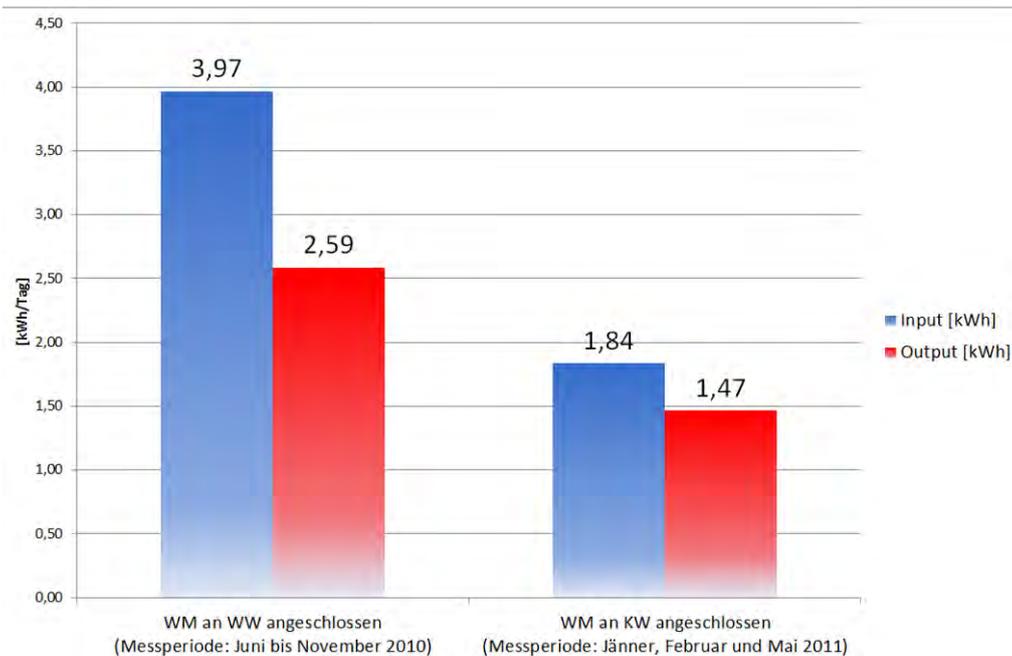


Abbildung 3.19: Tagesdurchschnittswerte (Input-Output) der Waschmaschine, eingeteilt in Warmwasseranschluss und Kaltwasseranschluss

Toilette:

Um die Temperatur des Spülwassers zu bestimmen, mit welcher die Toilette gespült wird und in den Kanal gelangt, wurde in den ersten Wochen der Feldmessung am Einfamilienhaus die Wassertemperatur im Inneren des Spülkastens gemessen. Nach den ersten Messungen wurde erkannt, dass das Betriebswasser, mit welchem die Toiletten versorgt werden, durch die Grauwasserreinigung bereits auf Raumtemperatur erwärmt wurde. Um eine repräsentative Einschätzung des Wärmerückgewinnungspotenzials einer Toilette abgeben zu können, wurden an einem Objekt mit konventionellem Abwassersystem Messungen der Spültemperatur einer Toilette durchgeführt, welche eine durchschnittliche Temperatur des Spülwassers bei Betätigung der Toilettenspülung von 15,8 °C ergaben.

Der durchschnittliche Wasserverbrauch der Toiletten liegt bei 118 Liter pro Tag für das gesamte Einfamilienhaus. Eine durchgeführte Internetrecherche bestätigt diese Messung mit einem Wert von 30 Liter Toilettenspülwasser pro Person und Tag (Lebensministerium, 2006).

Für das Wärmerückgewinnungspotenzial bedeutet das bei einer vierköpfigen Familie eine durchschnittliche Wärmemenge von 0,8 kWh pro Tag. Die Untersuchung zeigt, dass sich das Wärmerückgewinnungspotenzial der Toilette trotz hohem Wasserverbrauch in Grenzen hält, da sich das Wasser im Spülkasten nur sehr langsam aufwärmt (siehe Abbildung 3.20).

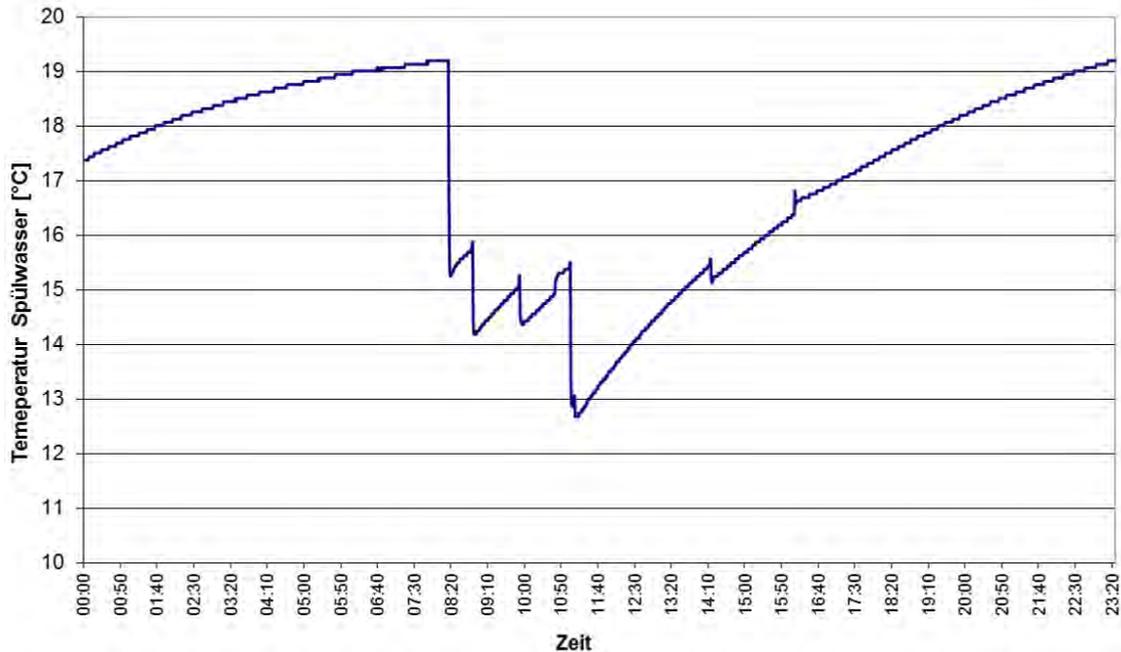


Abbildung 3.20: Untersuchung der Toilettenspülwassertemperatur (im Spülkasten) an einem Gebäude mit konventionellem Abwassersystem

Geschirrspüler:

Der Geschirrspüler wird meist im Automatikprogramm betrieben. Dies bedeutet, dass die Programmdauer und somit der Stromverbrauch des Gerätes, je nach Verschmutzungsgrad des Geschirrs, variieren. In Abbildung 3.21 ist eine Input-Output-Bilanz eines durchschnittlichen Programmdurchlaufs angeführt (Messperiode: 01.09.2010 bis 10.09.2010). Hier ist ersichtlich, dass dem energetischen Input von Warmwasser und elektrischer Energie (insgesamt 1,3 kWh) ein Output im Abwasser von 0,22 kWh gegenüber steht. Zu berücksichtigen ist hierbei, dass die thermische Speicherkapazität im Geschirrspüler (Geschirr) zu einem erheblichen, nicht nutzbaren Anteil führt.

Die dargestellten Ergebnisse bestätigen auch die Recherche, dass der Wasserverbrauch von neuen Geschirrspülern zwischen 10 und 20 Liter liegt (siehe Anhang A). Dem entsprechend gering zeigt sich hier auch die Wärmemenge, die für die Abwasserwärmerückgewinnung zur Verfügung steht.

Wie in den vorhin beschriebenen Abbildungen dargestellt, ermöglicht die Input-Output Bilanzierung im Einfamilienhaus eine Aufschlüsselung jedes einzelnen Verbrauchers hinsichtlich des Potenzials zur Abwasserwärmerückgewinnung. In Abbildung 3.22 sind die durchschnittlichen Wärmemengen aller Verbraucher pro Tag im Einfamilienhaus dargestellt, welche als Wärmequelle für eine Abwasserwärmerückgewinnung zur Verfügung stehen.

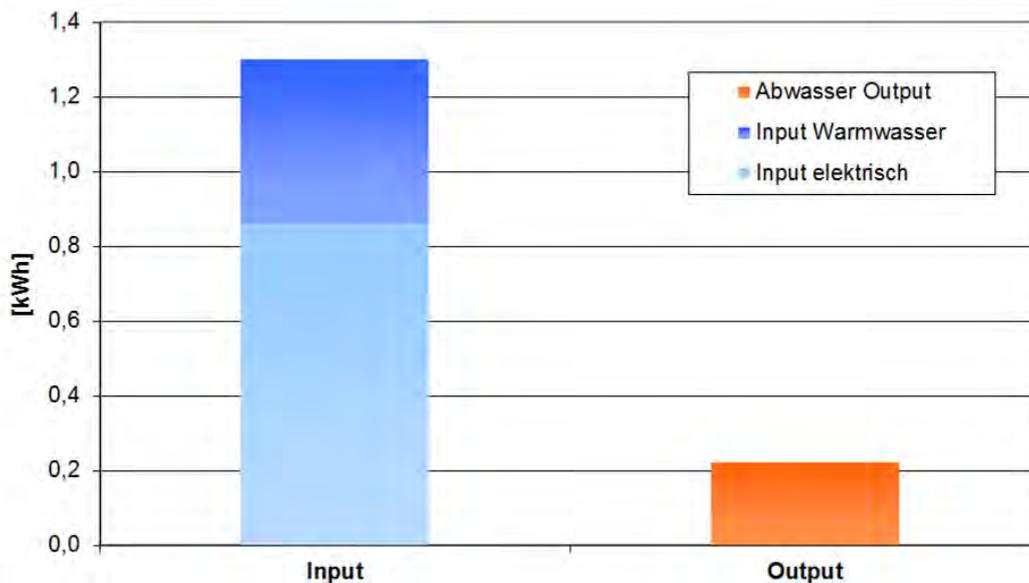


Abbildung 3.21: Grafische Darstellung von einer Input-Output-Bilanz (mit Berücksichtigung des elektrischen Inputs) eines Programmdurchlaufs des Geschirrspülers (Messperiode 01.09.2010 bis 10.09.2010)

Dieses Diagramm zeigt klar, dass das Wärmerückgewinnungspotenzial des Badezimmers um ein Vielfaches höher ist als jenes aller anderen untersuchten Verbraucher. Die Waschmaschine zeigt hier auch einen relativ hohen Wärme-Output, was jedoch darauf beruht, dass die Waschmaschine in der Messperiode 1.9. bis 10.9.2010 nur mit Warmwasser betrieben wurde. Die Waschmaschine wurde jedoch ab Dezember 2010 über den Kaltwasseranschluss gespeist, die Input-Output-Analyse wurde deshalb in den Monaten Jänner, Februar und Mai 2011 gesondert betrachtet. Der Vergleich der beiden Betriebsweisen zeigt deutlich, dass sich der Wärmeinhalt des Abwassers der Waschmaschine durch einen Kaltwasseranschluss gegenüber einem Warmwasseranschluss auf gut die Hälfte reduziert (Abbildung 3.22). Die Potenziale der Küche und der Toilettenspülung liegen mit durchschnittlich 0,9 kWh bzw. 0,8 kWh pro Tag in einem ähnlichen Bereich. Der Geschirrspüler hat wegen seinem geringen Wasserverbrauch, der seltenen Verwendung (ca. alle zwei Tage) und der nicht nutzbaren Wärmemenge des Inhalts (Geschirr) ein dementsprechend geringes Wärmerückgewinnungspotenzial. Die nutzbare Wärmemenge liegt hier durchschnittlich bei 0,12 kWh pro Tag.

Insgesamt gibt es bei dem untersuchten Einfamilienhaus, welches von zwei Erwachsenen und zwei Kindern bewohnt wird, im Durchschnitt eine nutzbare Wärmemenge von ca. 9 kWh pro Tag (bei Warmwasseranschluss für die Waschmaschine), wobei den größten Anteil mit 4,6 kWh das Abwasser des Badezimmers bereitstellt. Ein Argument für die alleinige Nutzung des Potenzials aus dem Badezimmerabwasser (Grauwasser) wäre auch, dass dieses keine Feststoffe enthält und somit das Anlagen- und Wärmetauscherkonzept vereinfachen würde. Betrachtet man den gesamten Wärme-Input über das Warm- und Kaltwasser, und den gesamten Output, so zeigt sich, dass etwa 77 % über das Abwasser wieder in den Kanal abgeleitet werden.

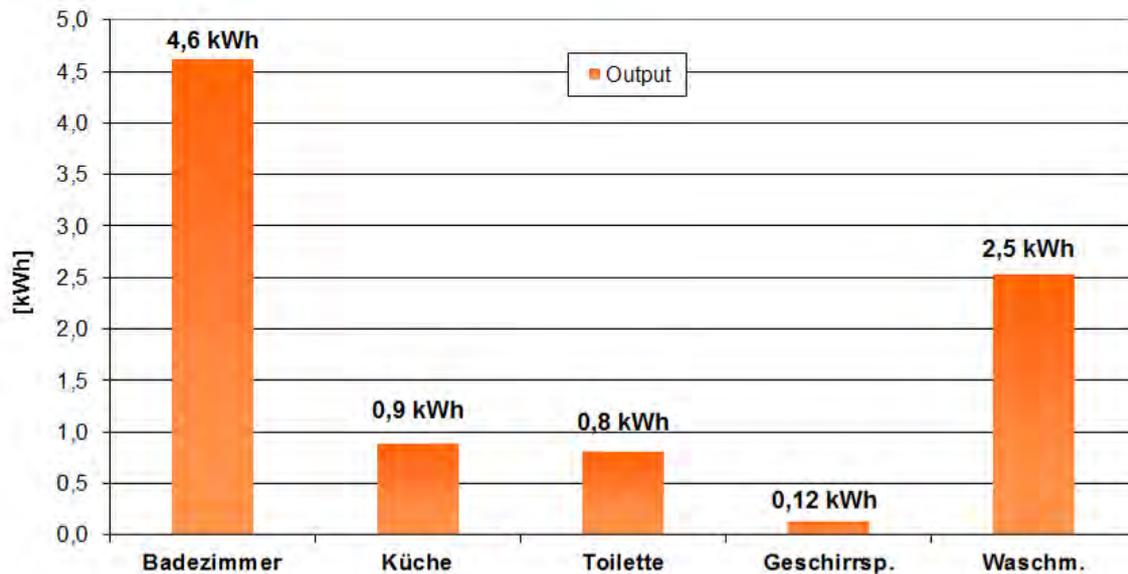


Abbildung 3.22: Gesamtdarstellung der nutzbaren Wärmemengen (Output) im Tagesdurchschnitt der einzelnen Verbraucher (Messperiode von Badezimmer, Küche und Waschmaschine: 20.05.2010 bis 28.11.2010, Messperiode des Geschirrspülers: 01.09.2010 bis 10.09.2010)

In Abbildung 3.23 ist eine repräsentative Woche mit den durchschnittlich stündlich anfallenden Wärmemengen im Abwasser dargestellt. Diese wurden anhand der Messwerte aller Wochentage im Zeitraum vom 01.09.2010 bis zum 30.11.2010 errechnet. Dieses Ergebnis dient – in höherer zeitlicher Auflösung (Minuten-Intervalle) – in den weiterführenden simulationstechnischen Analysen der Konzepte für die Abwasserwärmenutzung als Basis.

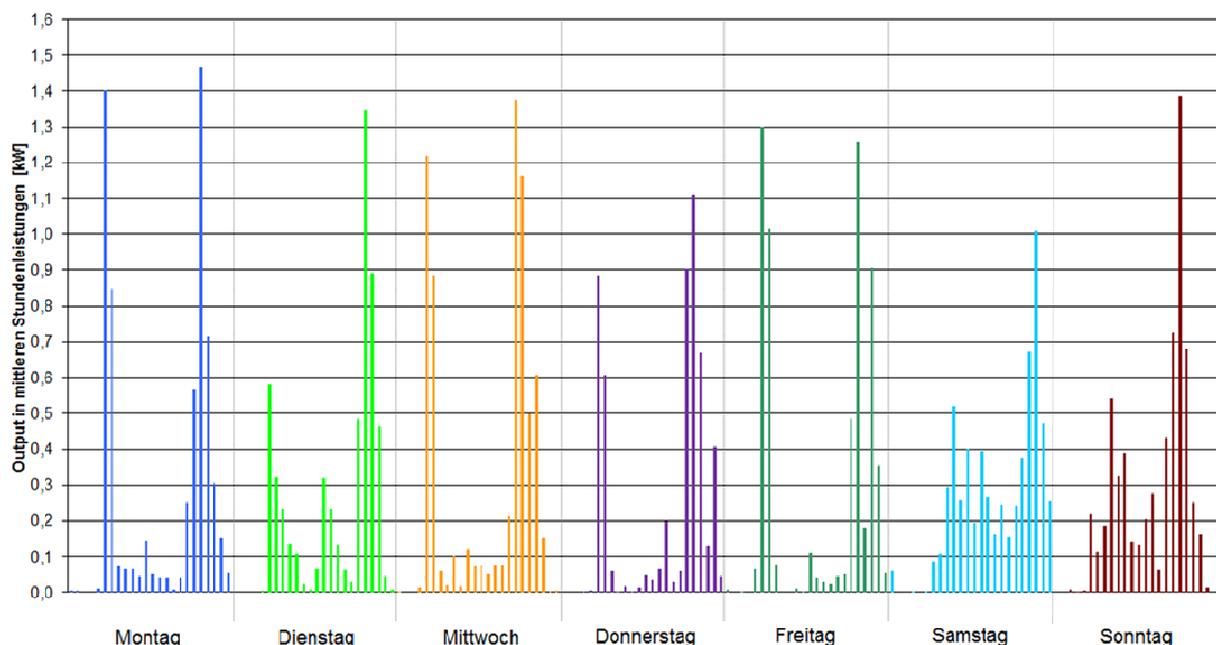
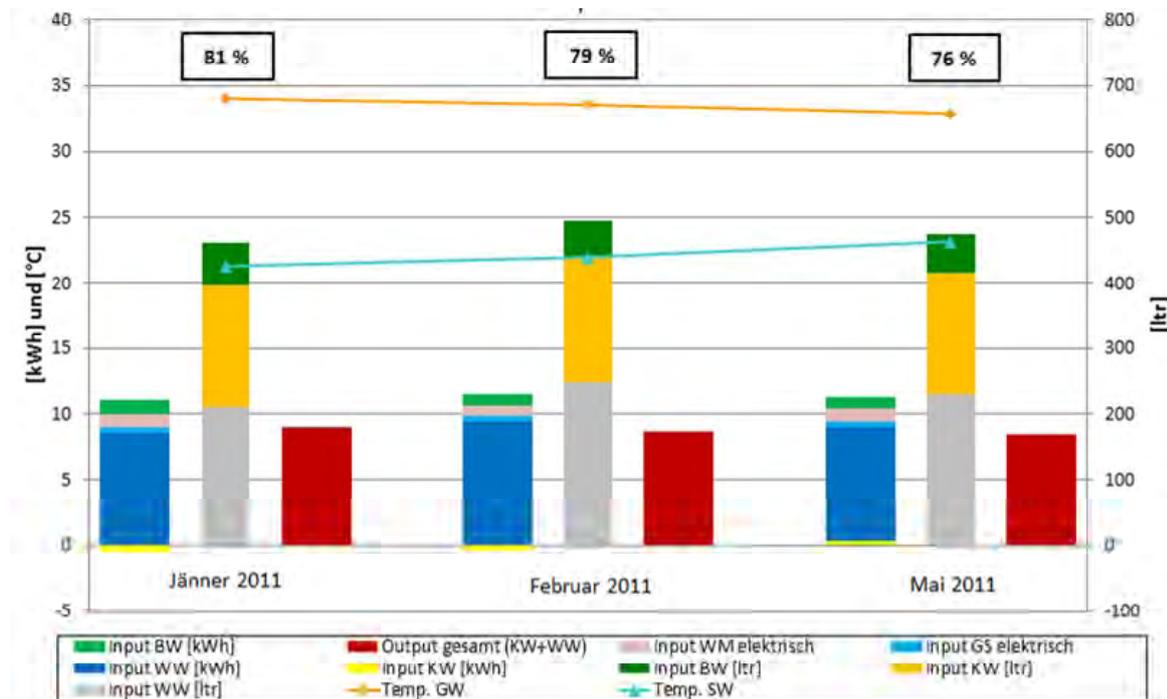


Abbildung 3.23: Repräsentative Woche für die anfallenden Wärmemengen auf der Output-Seite (Messzeitraum: 01.09.2010 bis 30.11.2010)

Jahreszeitlicher Einfluss

Nach der Messung der Anlage über einen längeren Zeitraum kann nun der Einfluss von Jahreszeiten auf die nutzbaren Wärmemengen und auf die Abwassertemperaturen untersucht werden. In Abbildung 3.36 sind die Ergebnisse der Monate Jänner, Februar und Mai 2011 dargestellt. Es ist jeweils der gemessene durchschnittliche tägliche Input durch Kaltwasser, Warmwasser sowie durch Strom für den Betrieb des Geschirrspülers und der Waschmaschine angeführt (jeweils der linke Balken). Der Output ist als gesamte Wärmemenge dargestellt (roter Balken). Die mittig angeordneten Balken sind die durchschnittlichen täglichen Volumina von Warm- und Kaltwasser, ebenso sind die Durchschnittstemperaturen des Grauwassers und des Schwarzwassers eingezeichnet.



(Abk. in der Legende: GS = Geschirrspüler; WM = Waschmaschine; GW = Grauwasser; SW = Schwarzwasser; WW = Warmwasser; KW = Kaltwasser)

Abbildung 3.24: Jahreszeitlicher Einfluss auf die Wärmemengen und auf die Abwassertemperaturen beim Einfamilienhaus (Messperiode: Jänner, Februar und Mai 2011)

Hier ist auch ersichtlich, dass das Kaltwasser in den Wintermonaten im Durchschnitt unter der Referenztemperatur liegt, was zu einem negativen Wärmeeintrag führt, der jedoch zu vernachlässigbar klein ist. Das Diagramm zeigt deutlich, dass über die drei dargestellten Monate sowohl bei der Wärmemenge, die einer eventuellen Wärmerückgewinnung zur Verfügung stünde, als auch bei den Abwassertemperaturen kaum Veränderungen durch die unterschiedlichen Jahreszeiten feststellbar sind, sodass vor allem beim Grauwasser mit einem stabil hohen nutzbaren Temperaturniveau über das ganze Jahr zu rechnen ist.

3.2.4 Feldmessanlage „Mehrfamilienhaus“

Das in Innsbruck erbaute Mehrfamilienhaus wurde im Passivhausstandard ausgeführt und besteht insgesamt aus 482 Wohnungen. Zur energetischen Betrachtung im gegenständlichen Projekt wurde eine Stiege mit sechs übereinander liegenden Wohnungen ausgewählt. Das Gebäude ist mit einer Wärmeversorgung nach dem Prinzip von Zwei-Leiter-Netzen in Verbindung mit dezentralen Wohnungsstationen ausgestattet und verfügt über ein konventionelles Abwassersystem. Das Warmwasser wird in den Wohnungsstationen mittels externen Wärmetauschern bereitet. Die Wohnfläche der untersuchten sechs Wohneinheiten des Mehrfamilienhauses beträgt jeweils ca. 75 m², die durchschnittliche Wohnungsbelegung beträgt drei Personen. Durch den niedrigen spezifischen Raumheizenergiebedarf würden bei diesem Mehrfamilienhaus gute Rahmenbedingungen für die Wärmeversorgung mittels Wärmepumpe (und Wärmerückgewinnung aus dem Abwasser) vorherrschen.

Die für die Untersuchung relevante Ausstattung je Wohneinheit des Mehrfamilienhauses:

- 1 Küchenspüle
- 1 Geschirrspüler (mit Kaltwasseranschluss)
- 1 Toilette
- 1 Badewanne mit Duschfunktion
- 1 Waschbecken im Badezimmer
- 1 Waschmaschine (mit Kaltwasseranschluss)

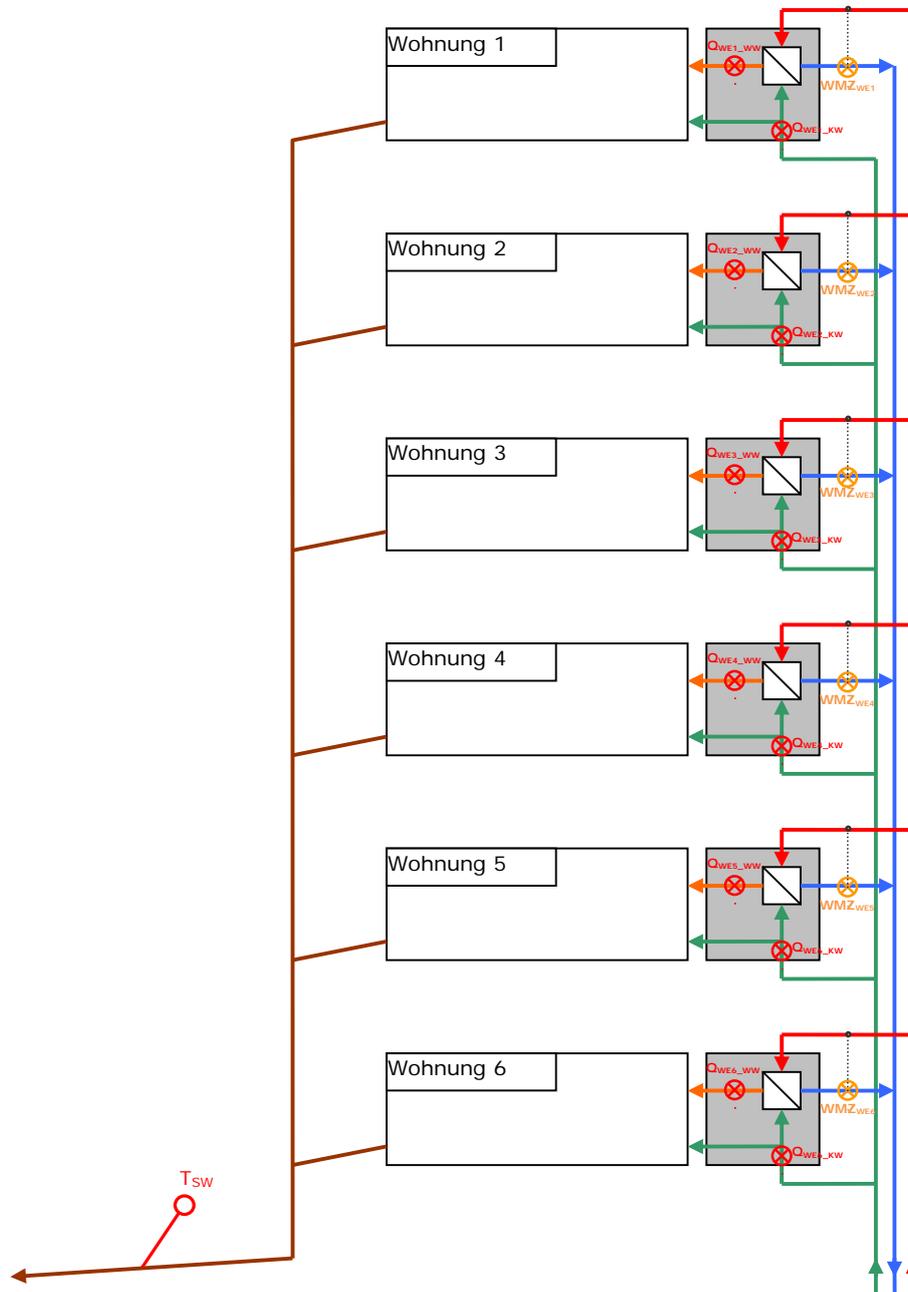
3.2.4.1 Anlagen- bzw. Messkonzept

Das entsprechende Anlagenkonzept inklusive installierter Messtechnik ist in Abbildung 3.25 dargestellt. In jeder der sechs Wohnungen ist eine Wohnungsstation installiert. Diese Wohnungsstation ist jeweils mit einem Wärmemengenzähler, einem Kaltwasserzähler und einem Warmwasserzähler ausgestattet (siehe Abbildung 3.27). Der Kaltwasserzähler misst das gesamte Kaltwasser, welches in die entsprechende Wohnung fließt und somit auch jene Wassermenge, die zu Warmwasser aufbereitet wird.

Die Wärmemengenzähler sind auf der Heizungswasserseite in den Wohnungsstationen installiert. Diese messen sowohl die Wärmemengen, die für die Warmwasserbereitung benötigt werden, als auch jene für die Raumwärmeversorgung. Zusätzlich zum Wärme-Input wurde der Strombedarf für die Waschmaschinen aller sechs Wohneinheiten gemessen, um auch die Energiemenge für das Aufheizen des Waschwassers zu eruieren.

Im Unterschied zum untersuchten Einfamilienhaus ist das untersuchte Mehrfamilienhaus mit einem konventionellen Abwassersystem ausgestattet. Das bedeutet, dass hier keine Trennung zwischen Schwarzwasser aus Küche und Toilette und Grauwasser aus dem Badezimmer erfolgt. Die sechs übereinanderliegenden Wohneinheiten münden in einen gemeinsamen Abwasserstrang. Somit kann für alle sechs untersuchten Wohneinheiten ein einziger Temperaturmesspunkt am Ende des Abwassersammelrohres installiert werden. Die genaue Position des Abwassertemperaturmesspunktes liegt an der Rohrsohle des waagrechten Abwasserrohres (siehe Abbildung 3.26).

Um nun die Wärmemenge des Outputs durch das Abwasser aus allen sechs Wohneinheiten zu errechnen, werden alle Kaltwasserzapfungen sowie alle Warmwasserzapfungen einer Minute addiert, und einer gemessenen Abwassertemperatur zugeordnet.



Legende:

	Vorlauf Heizungswasser		Warmwasser
	Rücklauf Heizungswasser		Kaltwasser
Q	Wasserzähler		Schwarzwasser
WMZ	Wärmemengenzähler	T_{sw}	Temperaturfühler Schwarzwasser

Abbildung 3.25: Anlagenkonzept inklusive installierte Messtechnikkomponenten



Abbildung 3.26: Position des Temperaturmesspunktes an der Sohle des waagrechten Abwasserrohres (Sammelstrang der sechs Wohneinheiten)

3.2.4.2 Messtechnik

Im ersten Schritt galt es, die bereits in den Wohnungsstationen verbaute Messtechnik (Kaltwasserzähler, Warmwasserzähler, Wärmemengenzähler, Stromzähler der Waschmaschinen) zu nutzen und an einen neu installierten Datenlogger in jeder Wohneinheit zu koppeln. Nach den ersten Auswertungen der Messdaten wurde erkannt, dass die Genauigkeit der installierten Kalt- und Warmwasserzähler von 10 Liter pro Impuls eine vernünftige Zuordnung zur gemessenen Abwassertemperatur nur schwer möglich machte. Um eine gute Messgenauigkeit betreffend des Abwärmerückgewinnungspotenzials zu erhalten, entschied man sich für eine Umrüstung der 10-Liter-Wasserzähler auf 1-Liter-Wasserzähler, was aber auch neue Anforderungen an die Datenlogger und deren Software stellte.



Abbildung 3.27: Wohnungsstation inklusive eingebauter Messtechnik (Wärmemengenzähler, Kalt- und Warmwasserzähler) in allen Wohneinheiten

Mit einer Genauigkeit von einem Liter pro Impuls und der Taktung von einer Minute der neu installierten Wasserzähler können somit auch kleinere Zapfungen in entsprechender

Genauigkeit berücksichtigt werden. Auch die Temperaturmessung am Abwassersammelrohr speichert einen Wert in einer Minute. Kalt- und Warmwasserzähler sind als Flügelradzähler, der eingebaute Wärmemengenzähler ist als Ultraschallmessgerät ausgeführt.

3.2.4.3 Energiebilanzierung (Methodik)

Beim Mehrfamilienhaus wird wie auch beim Einfamilienhaus eine Input-Output-Bilanz erstellt. Dies bedeutet, dass die Energie, die über das Zwei-Leiter-Netz, den Stromanschluss der Waschmaschine und den Stromanschluss des Geschirrspülers den Wohneinheiten zugeführt wird (Input), mit der Energie, welche vom Gebäude über das Abwasser abgeleitet wird (Output), verglichen wird. Die Wassermengen welche in den Abfluss gelangen, werden mittels der installierten Kalt- und Warmwasserzähler im Zufluss in den Wohnungsstationen gemessen. Für die weiteren Untersuchungen wurde 1 Liter Wasser entspr. 1 kg angenommen. Für auftretende Badewannenfüllungen müssen die Daten visualisiert, manuell herausgefiltert und bewertet werden.

Bilanzierung der Wärmeströme der sechs Wohnungen:

Als thermischer Input für die Bilanz kann prinzipiell der Wert des Wärmemengenzählers herangezogen werden. Um aber die Wärmemenge, welche nur für die Warmwasserbereitung benötigt wird, ermitteln zu können, ohne dass die Wärmemenge für die Raumheizung inkludiert ist, muss ein bestimmter „Sockelbetrag“, welcher für die Raumheizungswärme täglich anfällt, abgezogen werden. Dieser Sockelbetrag an Wärmeabgabe für die Raumheizung muss durch eine Visualisierung des Wärmemengenzählerwertes für jeden Tag ermittelt werden. Die Wärmemenge für die Warmwasserbereitung wird wie folgt berechnet:

$$Q_{inputTherm} = \sum Q_{WE_WW} - \sum Q_{WE_RH} + \sum Q_{WE_KW} \quad \text{Gl. 3.10}$$

$Q_{inputTherm}$	Wärmeeintrag über die Warmwasserbereitung und das Kaltwasser für sechs Wohneinheiten [kWh]
Q_{WE_WW}	Wärmemenge für Warmwasserbereitung und Raumheizung pro Wohneinheit [kWh]
Q_{WE_RH}	Wärmemenge für Raumheizung pro Wohneinheit [kWh]
Q_{WE_KW}	Wärmemenge, welche durch das Kaltwasser zu- oder abgeführt wird (positiver und negativer Energieeintrag möglich) [kWh]

Der Input des elektrischen Stroms für die Waschmaschinen der sechs Wohneinheiten wird über gesondert installierte Stromzähler erfasst. Aus Literaturrecherchen (siehe Literaturverzeichnis) ging hervor, dass durchschnittlich (abhängig von Waschttemperatur und Energieeffizienz der Waschmaschine) 75 % des Strombedarfs eines Waschganges für die Erwärmung des Waschwassers aufgewendet werden. Folglich gilt für den thermischen Energiebedarf der Waschmaschinen:

$$Q_{inputElektrWM} = \sum Q_{WE_WM_Elektr} \cdot 0,75 \quad \text{Gl. 3.11}$$

- $Q_{inputElektWM}$ ····· Energiemenge für Waschwassererwärmung für 6 Wohneinheiten [kWh]
- $Q_{WE_WM_Elekt}$ ····· Energiemenge für den Betrieb der Waschmaschine pro Wohneinheit [kWh]

Eine genaue Messung des Stromverbrauchs eines Geschirrspülers wurde bereits bei der Feldmessenanlage Einfamilienhaus durchgeführt. Es kann davon ausgegangen werden, dass auch bei den Wohneinheiten des Mehrfamilienhauses ca. alle zwei Tage die Spülmaschine aktiviert wird. Daher kann dieser Strominput des Einfamilienhauses für die Geschirrspüler des Mehrfamilienhauses hochgerechnet werden:

$$Q_{inputElektGS} = Q_{inputGS_EFH} \cdot 6 \quad \text{Gl. 3.12}$$

- $Q_{inputElektGS}$ ····· Energiemenge für Geschirrspüler für sechs Wohneinheiten [kWh]
- $Q_{inputGS_EFH}$ ····· Energiemenge für den Geschirrspüler des Einfamilienhauses [kWh]

Der Gesamtinput für die Bilanzierung des Mehrfamilienhauses stellt sich nun wie folgt zusammen:

$$Q_{input} = Q_{inputTherm} + Q_{inputElektWM} + Q_{inputElektGS} \quad \text{Gl. 3.13}$$

Für die Berechnung des Outputs werden die Wärmemengen mittels der gemessenen Durchflüsse bzw. Massenströme (Annahme: 1 Liter Wasser entspricht 1 kg) an den Kalt- und Warmwasserzählern in allen Wohnungen und den zugehörigen Abwassertemperaturen nach folgender Formel berechnet:

$$Q_{output} = \frac{(\sum m_{WE_KW} + \sum m_{WE_WW}) \cdot c \cdot (T_{Abwasser} - T_{referenz})}{3600} \quad \text{Gl. 3.14}$$

- Q_{output} ··········· Wärmemenge des Abwassers [kWh]
- m_{WE_KW} ··········· Masse des Warmwassers pro Wohneinheit [kg]
- m_{WE_WW} ··········· Masse des Kaltwassers pro Wohneinheit [kg]
- c ···················· Spezifische Wärmekapazität [kJ/kgK]
- T_{Abw} ················ Abwassertemperatur [°C]
- $T_{referenz}$ ·············· Referenztemperatur [°C]

Die Referenztemperatur ist jene Temperatur, auf die ein im Falle einer Abwasserwärmerückgewinnung eingebauter Wärmetauscher das Abwasser abkühlt, bevor es in den öffentlichen Kanal gelangt. Diese Referenztemperatur ist abhängig vom Konzept der Abwasserwärmerückgewinnung. In den nachfolgenden Berechnungen wurde diese mit 10 C angenommen. Theoretisch könnte das Abwasser (beispielsweise mit einer Wärmepumpe) jedoch bis auf knapp über 0 °C abgekühlt werden, was das Wärmerückgewinnungspotenzial positiv beeinflussen würde.

3.2.4.4 Ergebnisse zur Feldmessung am Mehrfamilienhaus

Wie bereits erläutert, stellte sich die Messgenauigkeit der ursprünglich installierten Wasserzähler im Mehrfamilienhaus als problematisch heraus. Aufgrund deren groben Auflösung (10 Liter pro Impuls) wurde nach Probemessungen und aufwendiger rein manueller Auswertungen der Daten entschieden, die Wasserzähler gegen höher auflösende Zähler zu tauschen und die Spezifikationen der Datenlogger zu adaptieren. Seit dem 18.11.2010 sind die Messdaten des Mehrfamilienhauses auch mit der gewünschten Genauigkeit verfügbar.

Beispielhaft zeigt Abbildung 3.28 einen Tagesverlauf von Durchfluss (Kalt- und Warmwasser) und der Abwassertemperatur vom 22.12.2010. Um die Energieinhalte des Abwassers zu bestimmen, müssen die Wassermengen (grüne und orange Linie) der Temperatur im Abwasser (blaue Linie) zugeordnet werden. Es wurde versucht, die Auswertungsroutine möglichst automatisiert durchzuführen. Im Falle einer Verzögerung zwischen Input und Output ist eine automatisierte Auswertung jedoch nicht möglich, da die Temperaturerhöhung im Abwasser später auftritt als der Zufluss am Verbraucher.

Ein Beispiel: Im Falle einer Badewannenfüllung würde bei Vernachlässigung dieser Tatsache ein Teil der Wärmemengen auf der Output-Seite (Abwasserwärmemenge) fehlen.

Die Kontrolle aller ausgewerteten Tagesgänge von Temperatur und Durchfluss sowie manuelle Eingriffe in die Auswerterroutine sind somit für eine entsprechende Genauigkeit notwendig.

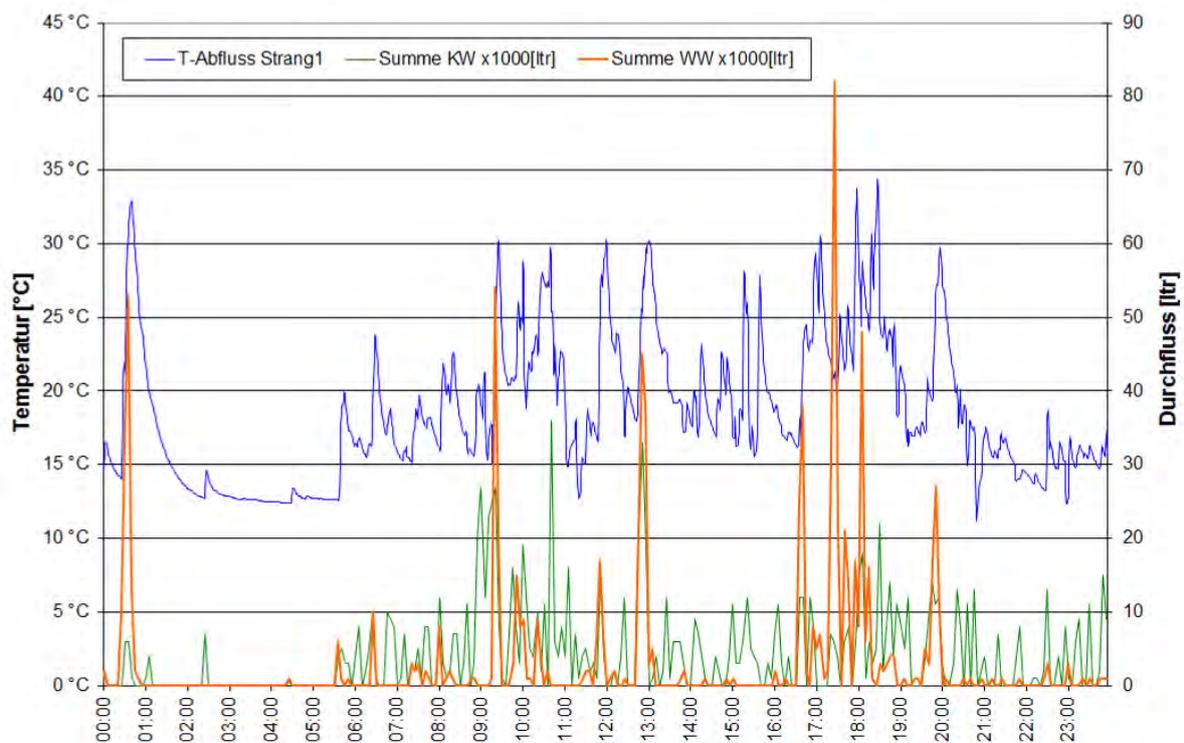


Abbildung 3.28: Darstellung von Durchfluss und Abwassertemperatur des untersuchten Mehrfamilienhauses vom 22.12.2010

Häufigkeitsverteilung der auftretenden Temperaturen im Abwasser

In Abbildung 3.29 ist die Häufigkeitsverteilung der auftretenden Temperaturen im Abwasser von sechs Wohneinheiten des untersuchten Mehrfamilienhauses ersichtlich (blaue Balken). Zusätzlich stellen die roten Dreiecke des Diagramms den durchschnittlichen Durchfluss pro Minute im entsprechenden Temperaturbereich dar. Es ist beispielsweise ersichtlich, dass 14 % des gesamten Abwassers der sechs Wohneinheiten mit einer Temperatur im Bereich von 18 °C bis 20 °C in den Abfluss gelangen. Ebenso zeigt das Diagramm, dass der durchschnittliche Abwasserdurchfluss bei einer Temperatur zwischen 18 °C und 20 °C 3,7 Liter/min beträgt.

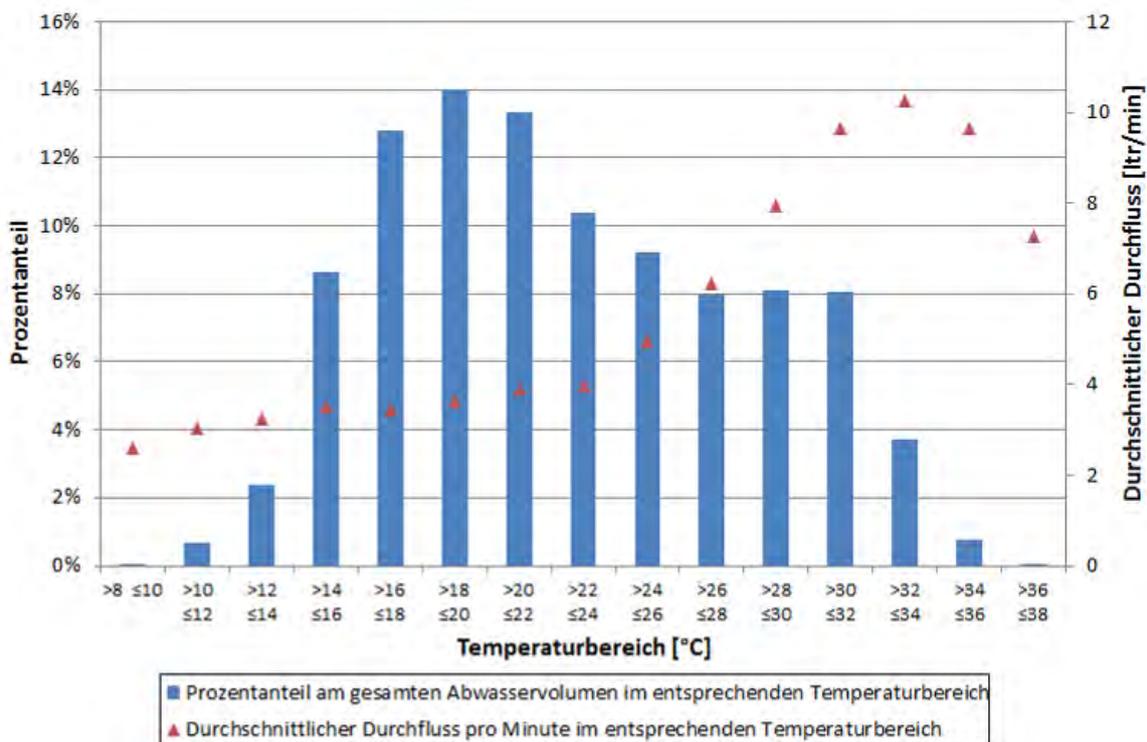


Abbildung 3.29: Häufigkeitsverteilung Mehrfamilienhaus: Anteil des anfallenden Abwassers in verschiedenen Temperaturbereichen sowie durchschnittlicher Durchfluss pro Minute (Zeitraum: 1.3. bis 31.3.2011)

Als Erkenntnis der Häufigkeitsverteilung der auftretenden Abwassertemperaturen im Mehrfamilienhaus kann gesagt werden, dass etwa die Hälfte des abgeführten Wassers eine Temperatur zwischen 16 °C und 24 °C aufweist. Das Temperaturniveau eines Großteils des Abwassers ist somit ähnlich niedrig wie das der Küche des Einfamilienhauses. Etwa 37 % des gesamten Abwassers wird mit einer Temperatur von 24 °C bis 34 °C in die Kanalisation geleitet. Kaum (0,8 %) fällt Abwasser mit mehr als 34 °C an.

Die im Vergleich zum Badezimmer des Einfamilienhauses relativ niedrigen Abwassertemperaturen lassen sich zum einen durch die höheren Wärmeverluste aufgrund der längeren Abflussrohrleitungen (sechs Stockwerke) begründen. Zum anderen ist die gesamte Abwasser-Falleitung in Gusseisen ausgeführt, wodurch die Rohrleitung eine sehr hohe Wärmekapazität hat, was eine starke Dämpfung bzw. Verschleppung von Temperaturspitzen verursacht. Im Projekt wurden dazu vom Institut für Wärmetechnik

überschlägige Simulationen durchgeführt. Dabei wurde für die sechs übereinander liegenden Wohnungen jeweils ein Abwasserprofil angenommen, wie es für das Einfamilienhaus gemessen und ausgewertet wurde. Die Abwasserleitung, deren Wärmekapazität und Wärmeverluste berücksichtigt wurden, wurde nun mit diesen Abwasserabflüssen und -temperaturen (sowohl zeitlich etwas versetzt als auch bezüglich der Zuflusshöhe an der Fallleitung entsprechend den realen Bedingungen) beaufschlagt. Die sich dabei einstellenden Abwassertemperaturen bzw. die Häufigkeitsverteilung am Ende der Fallleitung zeigen ein ähnliches Verhalten, wie es in den Messungen ermittelt wurde.

Zusätzlich ist zu bedenken, dass hier alle Verbraucher (vor allem auch die WC-Spülungen) inkludiert sind, welche beim Einfamilienhaus separat gemessen und berechnet wurden. Den Aufzeichnungen des Einfamilienhauses zufolge liegen die WC-Spültemperaturen um die 15 °C, wodurch die Häufigkeit der Temperaturen nach unten verschoben wird.

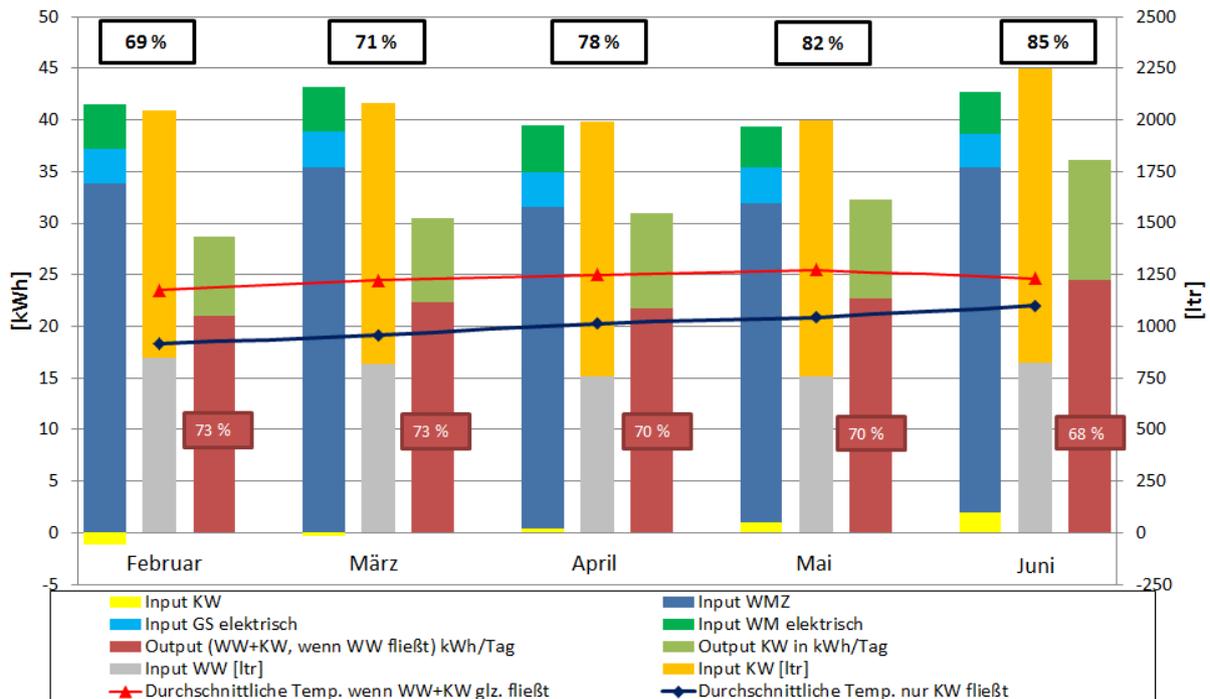
Als Erkenntnis der Häufigkeitsverteilungen der auftretenden Abwassertemperaturen des Mehrfamilienhauses kann gesagt werden, dass für die Nutzung eines möglichst hohen Temperaturniveaus eine Trennung des Grauwassers aus dem Badezimmer von den übrigen Verbrauchern (Küche, WC) vorteilhaft ist. Die Untersuchung zeigt auch, dass bei einer geplanten Abwasser-Wärmerückgewinnung keine Abwasserrohrleitungen aus Materialien mit hoher Wärmekapazität (z.B. Kunststoff statt Gusseisen) verwendet werden sollten.

Wärmemengen und jahreszeitlicher Einfluss

In Anlehnung an Kapitel 3.2.4.3 wurden Energiebilanzen des Mehrfamilienhauses (Wärmerückgewinnungspotenziale in Warm- und Kaltwasserwärmeströmen) definiert, und in Abbildung 3.30 dargestellt.

Es ist jeweils der gemessene durchschnittliche tägliche Input durch Kaltwasser, Warmwasser sowie durch Strom für den Betrieb des Geschirrspülers und der Waschmaschine angeführt (jeweils der linke Balken). Der Output ist aufgeteilt in Abwasserwärme nach Kaltwasserzapfung (hellgrüner Balken) und Abwasserwärme nach Warmwasserzapfung (dunkelroter Balken). Die mittig angeordneten Balken sind die durchschnittlichen täglichen Volumina von Warm- und Kaltwasser, ebenso sind die gemessenen Abwasserdurchschnittstemperaturen bei reiner Kaltwasserzapfung und bei Warmwasserzapfung dargestellt.

Die Energiemessungen am Mehrfamilienhaus haben ergeben, dass das Temperaturniveau zwar relativ niedrig ist, die nutzbare Wärme (bei einer Referenztemperatur von 10 °C) aber im Monatsdurchschnitt bis über 35 kWh pro Tag betragen kann. Das bedeutet etwa 2 kWh pro Person und Tag. Die zugeführte Energie für Warmwasserbereitung, Geschirrspülen, Waschen etc. kann nach den Untersuchungen theoretisch bis zu 85 % wieder rückgewonnen und genutzt werden.



(Abk. in der Legende: GS = Geschirrspüler; WM = Waschmaschine; WMZ = Wärmemengenzähler; WW = Warmwasser; KW = Kaltwasser)

Abbildung 3.30: Input-Output-Bilanzierung des Mehrfamilienhauses inklusive durchschnittliche Abflusstemperaturen und Zuflussmengen (Messperiode Februar bis Juni 2011)

Nach der Messung der Anlage über einen längeren Zeitraum kann nun der Einfluss von Jahreszeiten sowohl auf die nutzbaren Wärmemengen als auch auf die Abwassertemperaturen untersucht werden. Bei der Betrachtung der Ergebnisse ist auffällig, dass sich der Wärmerückgewinnungsfaktor (Verhältnis zwischen Input und Output) sowie auch die nutzbare Abwasserwärme zur wärmeren Jahreszeit hin erhöhen. Dies resultiert hauptsächlich aus dem Umstand, dass sich das Abwassersammelrohr anders als beim untersuchten Einfamilienhaus im unbeheizten Bereich befindet und somit das Medium im Durchfluss in den Wintermonaten geringfügig stärker abgekühlt wird.

3.2.5 Zusammenfassung der Ergebnisse und Erfahrungen zu den Feldmessungen

Sowohl beim Einfamilienhaus als auch beim Mehrfamilienhaus entschied man sich für ein Messkonzept nach dem Prinzip der Input-Output-Bilanzierung. Mit dieser Methode wurde die Erfahrung gemacht, dass der Auswerteaufwand für Ergebnisse mit einer hohen Genauigkeit sehr groß ist. Um Ergebnisse mit ähnlicher Messgenauigkeit zu erhalten, steht jedoch kein bekanntes Messkonzept, welches ohne bautechnische Änderungen verhältnismäßig einfach in eine bestehende Anlage zu integrieren ist, zur Verfügung. Insgesamt kann gesagt werden, dass die Erfahrungen mit Messungen nach dem Input-Output-Prinzip sehr zufriedenstellend sind und zu belastbaren Ergebnissen führen.

Durch die lange Messperiode der beiden Objekte (1 Jahr beim Einfamilienhaus bzw. 6 Monate beim Mehrfamilienhaus) konnten die Einflüsse der Jahreszeiten auf die nutzbaren Wärmeströme gezeigt werden. Weiters liegen nun detaillierte Daten zu Verbrauch und Abwasseraufkommen vor. Auch eine Separierung in einzelne Verbraucher ist durch das

gewählte detaillierte Messkonzept beim Einfamilienhaus möglich. Interessante Details wie zum Beispiel Unterschiede in der Betriebsweise der Waschmaschine (kaltwasser- oder warmwasserversorgt) stehen für zukünftige Arbeiten in diesem Bereich zur Verfügung.

Im Anhang A sind zusätzlich Ergebnisse zu einer Recherche über den Wasser und Energieverbrauch von Haushaltsgeräten zusammengefasst.

3.3 Konzeptentwicklung für kombinierte Wärmepumpen-Solaranlagen mit AWR

Aufbauend auf die in den durchgeführten Recherchen gesammelten Informationen wurden sechs Konzeptideen für die Wärmebereitstellung für Warmwasser und Heizung mit AWR entwickelt. Bei allen Systemkonzepten werden eine thermische Solaranlage und eine Wärmepumpe eingesetzt. Für die Wärmepumpe werden unterschiedliche Wärmequellen benutzt (Erdreich, Luft, Eisspeicher, Pufferspeicher), und auch für die Abwasser-Wärmerückgewinnung werden verschiedene Systeme betrachtet (Durchlauf- oder Speicherprinzip). Im Projekt werden diese Konzepte anhand eines relativ einfachen Bewertungstools hinsichtlich ihrer energetischen Performance und der Kosten bewertet (siehe Abschnitt 0). Ziel dieses Systemvergleichs ist eine Entscheidungsfindung, für welche Art von System detailliertere Untersuchungen und Simulationen durchgeführt werden sollen. Im Folgenden werden die definierten Systemkonzepte vorgestellt und in ihrer Funktionsweise beschrieben.

3.3.1 Konzept 1

Bei diesem Konzept handelt es sich um eine Erdreichwärmepumpe (Flächenkollektor oder Tiefensonde), die mit einer thermischen Solaranlage gekoppelt ist (siehe Abbildung 3.31). Sowohl die Wärmepumpe als auch die Solaranlage beladen einen Pufferspeicher. Ist das Temperaturniveau im Pufferspeicher hoch genug, wird das Heizungssystem, das bei allen Konzepten als Niedertemperaturheizung (Fußbodenheizung) angenommen wird, direkt aus dem Pufferspeicher versorgt. Ansonsten wird die Heizungswärme direkt mittels der Wärmepumpe bereitgestellt. Die Warmwasserbereitung erfolgt in allen Konzepten durch ein Frischwassermodul, das vom Pufferspeicher versorgt wird.

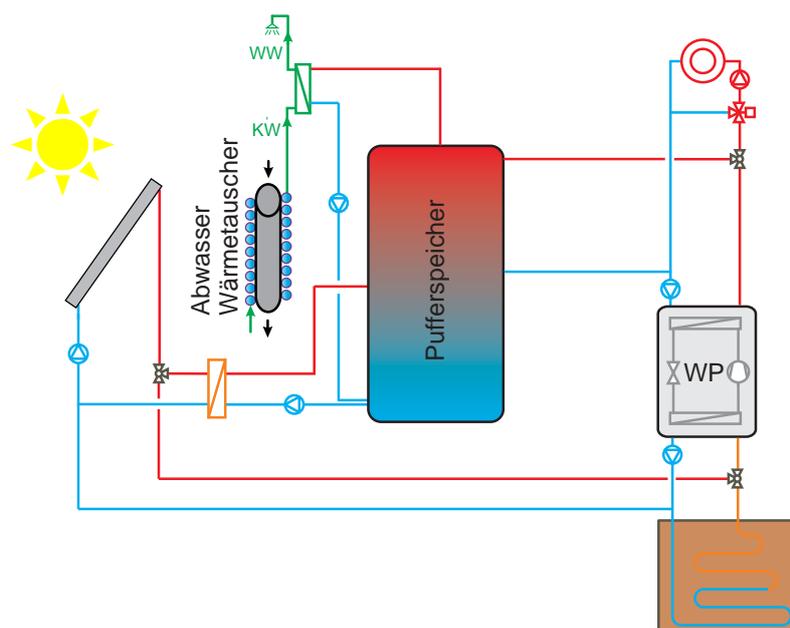


Abbildung 3.31: Hydraulikschema Konzept 1

Für die Abwasser-Wärmerückgewinnung ist ein Fallrohr-Filmstrom-Wärmetauscher (vgl. Kap. 3.1.4) installiert, den das Frischwasser vor dem Frischwassermodul durchströmt, wodurch dieses über das durch das Fallrohr strömende Abwasser vorgewärmt wird. Dieses System funktioniert ohne Hilfsenergie und Regelung. Allerdings kann nur dann Wärme aus dem Abwasser rückgewonnen werden, wenn gleichzeitig zum Abwasserabfluss auch Frischwasser gezapft wird.

Grundsätzlich könnte in diesem System eine Regenerierung des Erdreichs über die Solaranlage durchgeführt werden, wie es auch in Abbildung 3.31 dargestellt ist. Dies kann aber bei der energetischen Bewertung nicht berücksichtigt werden, da die Abbildung der Erdreichwärmequelle im Berechnungstool (siehe Kap. 0) nur stark vereinfacht über die Vorgabe des Jahresverlaufs der Sole-Austrittstemperatur aus der Erdreich-Wärmequelle erfolgt.

3.3.2 Konzept 2

Konzept 2 unterscheidet sich von Konzept 1 lediglich durch die Art der Einbindung der Abwasserwärmerückgewinnung. Hier wird der untere Teil des Pufferspeichers als Wärmesenke für den Abwasserwärmetauscher verwendet (Abbildung 3.32). Dabei ist im Vergleich zu Konzept 1 zusätzlich eine Pumpe und eine Regelung erforderlich. Ist die Temperatur im unteren Bereich des Pufferspeichers niedriger als jene des abfließenden Abwassers, wird die Pumpe eingeschaltet und der Pufferspeicher erwärmt.

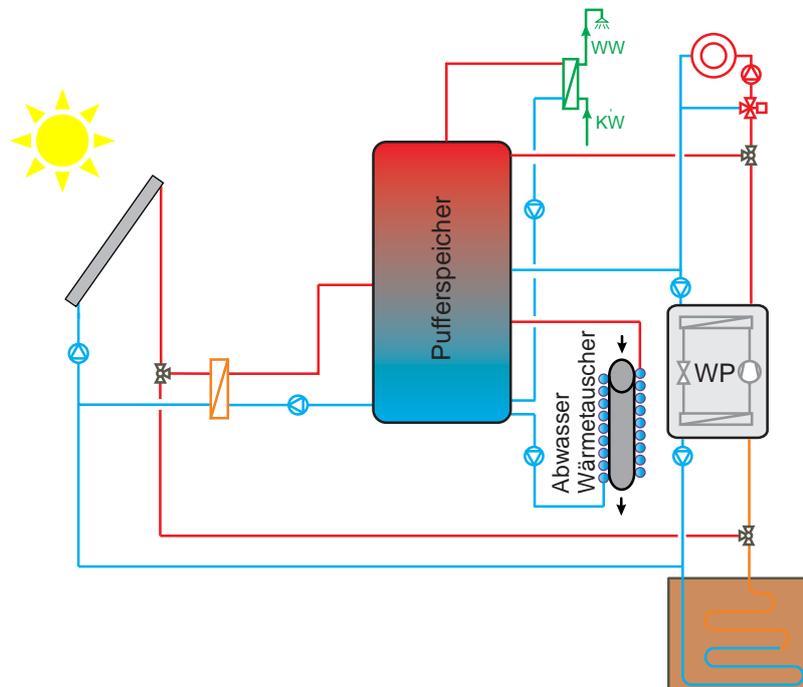


Abbildung 3.32: Hydraulikschema Konzept 2

3.3.3 Konzept 3

Bei diesem Konzept ist keine konventionelle Wärmequelle für die Wärmepumpe (Erdreich oder Außenluft) vorhanden. Der Verdampfer der Wärmepumpe nutzt einerseits die im Abwasser enthaltene Wärme und andererseits Solarwärme. Als zentrale Elemente sind ein

Niedertemperatur- und ein Hochtemperaturpufferspeicher installiert. Mit der Solaranlage werden im Vorrang der Hochtemperatur- und dann der Niedertemperaturpufferspeicher beladen. Das Abwasser wird in einem Abwassertank mit integriertem Wärmetauscher als Wärmequelle für die Wärmepumpe gespeichert (vgl. Abbildung 3.33). Wenn die Wärmepumpe betrieben wird, wird im Vorrang Wärme dem Abwasser entzogen. Unterschreitet die Temperatur des Abwassers eine untere Grenztemperatur, und muss gleichzeitig Wärme bereitgestellt werden, wird der Niedertemperaturspeicher als Wärmequelle verwendet. Wenn das Temperaturniveau im Hochtemperatur-Pufferspeicher hoch genug ist, erfolgt die Raumheizung direkt aus dem Speicher.

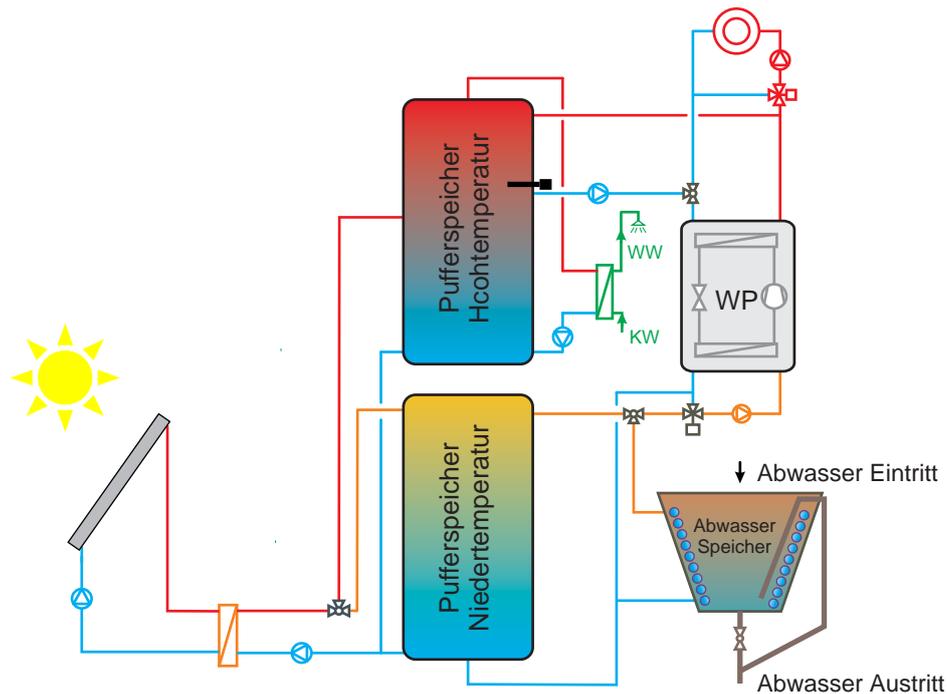


Abbildung 3.33: Hydraulikschema Konzept 3

Ist die Vorlauftemperatur zum Verdampfer zu hoch, wird diese über eine Beimischschaltung auf 18 °C begrenzt, um die maximale Verdampfungstemperatur, die aufgrund der Einsatzgrenzen des Kompressors erlaubt ist, nicht zu überschreiten. Dies ist auch bei allen folgenden Konzepten so ausgeführt.

Sind sowohl der Abwassertank als auch der Niedertemperaturspeicher entladen, und es besteht eine Heizanforderung aus dem Hochtemperatur-Speicher, erfolgt die Nachheizung des Speichers direkt elektrisch über eine E-Patrone.

3.3.4 Konzept 4

In Abbildung 3.34 ist das Anlagenkonzept 4 abgebildet. Wie in Konzept 3 ist ein Nieder- und ein Hochtemperatur-Pufferspeicher installiert. Die Wärmepumpe ist verdampferseitig mit zwei Wärmetauschern ausgestattet. Mit einem Wärmetauscher kann Außenluft zur Verdampfung des Kältemittels verwendet werden, und mit dem anderen kann Wärme aus dem Niedertemperaturspeicher genutzt werden. Die Solaranlage liefert im Vorrang Energie

in den Hochtemperaturpufferspeicher. Ist der Hochtemperaturpufferspeicher durchgeladen und Solarenergie verfügbar, wird der Niedertemperaturspeicher geladen.

Die Abwasserwärme-Rückgewinnung erfolgt in diesem Konzept wieder über einen Fallrohr-Filmstrom-Wärmetauscher. Der Wärmetransport vom Fallrohr wird hier über Heatpipes angenommen, die am Umfang des Fallrohrwärmetauschers angebracht sind. Dabei nehmen die Heatpipes Wärme vom Abwasser auf, wodurch das enthaltene Kältemittel verdampft wird. Das andere Ende der Heatpipes ragt in den unteren Bereich des Niedertemperaturspeichers. Hier wird das enthaltene Kältemittel wieder kondensiert und die Wärme an das Speicherwasser abgegeben. Dieser Kreislauf funktioniert nur, wenn das Temperaturniveau des Abwassers höher ist als jenes im Speicher.

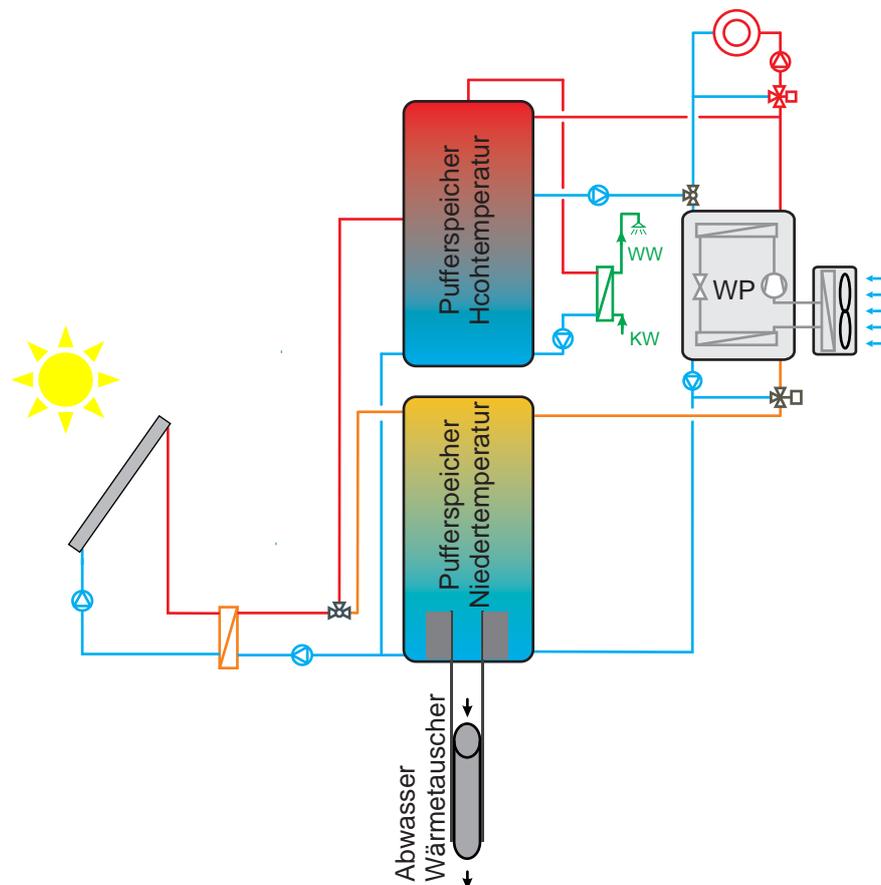


Abbildung 3.34: Hydraulikschema Konzept 4

3.3.5 Konzept 5

In Abbildung 3.35 ist ein Hydraulikschema für das Konzept 5 dargestellt. Als Wärmequelle für den Verdampfer der Wärmepumpe ist hier ein Eisspeicher installiert, der über einen Abwasserwärmetauscher wie in Konzept 4 und über die Solaranlage beladen werden kann. Die Solaranlage versorgt dabei im Vorrang den Pufferspeicher und, wenn dieser durchgeladen ist, den Eisspeicher.

Auch bei diesem System ist – wie bei Konzept 3 – keine konventionelle Wärmequelle für die Wärmepumpe (Erdreich, Außenluft) vorhanden. Der Eisspeicher bietet den Vorteil, dass

durch den Phasenwechsel Wasser-Eis bei 0 °C eine im Vergleich zur rein sensiblen Wärmespeicherung wesentlich höhere Speicherkapazität vorhanden ist. Wenn der Eisspeicher vollständig entladen ist, und damit die Wärmepumpe nicht betrieben werden kann, wird direkt elektrisch nachgeheizt.

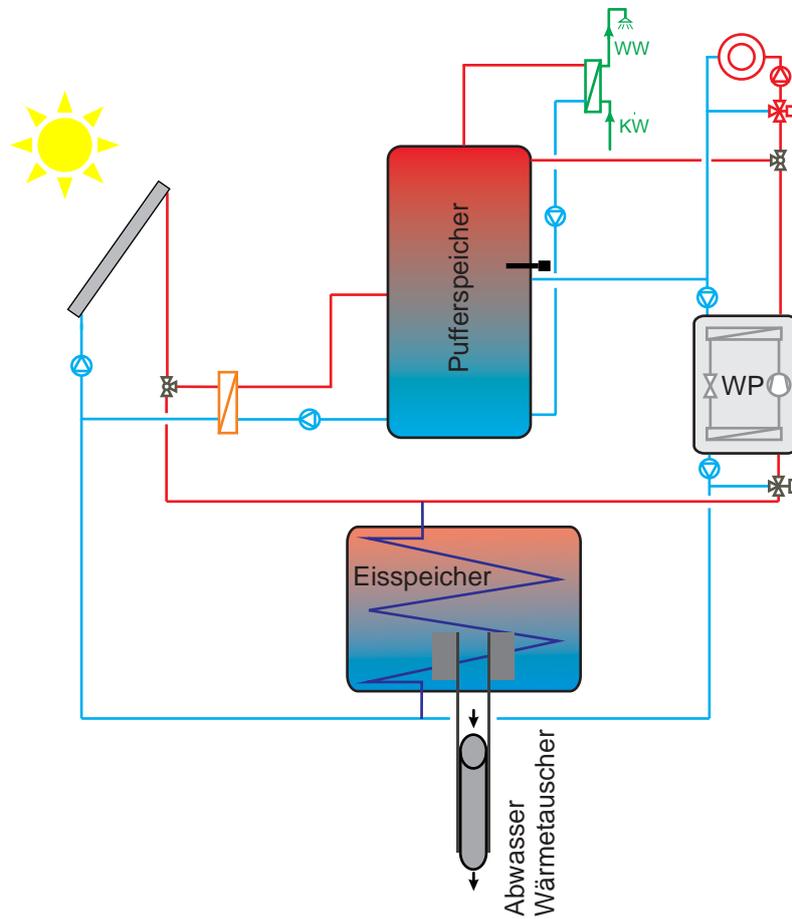


Abbildung 3.35: Hydraulikschema Konzept 5

3.4 Energetische und ökonomische Bewertung von Konzepten

Zur Bewertung des energetischen Potentials der einzelnen Konzepte wurde am Institut für Wärmetechnik ein einfaches Simulationstool erstellt. Dieses basiert auf Stundenzeitschritten, wobei in jedem Zeitschritt die Energiebilanzen für die einzelnen Komponenten des jeweiligen Systemkonzepts (Wärmepumpe, Kollektor, Speicher etc.) berechnet werden. Für die Raumheizung und den Warmwasserbedarf wurde jeweils ein Lastprofil auf Stundenbasis generiert. Als Gebäude wurde ein Niedrigenergie-Haus mit einem Fußbodenheizungssystem und einem Heizwärmebedarf von 30 kWh/(m²a) angenommen. Die Modellierung des Solarkollektors erfolgt über eine Kollektorkennlinie mit den Kenndaten eines durchschnittlichen einfach verglasten Flachkollektors. Die Global- und Diffusstrahlung auf die Kollektorebene (Ausrichtung Süd, 45° Neigung) wurde vorab in TRNSYS ermittelt. Der Pufferspeicher wird durch ein Finite Differenzen Modell mit einer vertikalen Diskretisierung von fünf Temperaturschichten abgebildet. Dieses bietet die Möglichkeit von vier direkten Anschlusspaaren (double ports) zur Energie-Zu- und -Abfuhr. Die Berücksichtigung von evtl. im System vorhandenen Wärmetauschern erfolgt als Vereinfachung durch die Annahme einer fixen Grädigkeit zwischen kalter und warmer Seite. Die Berechnung der Leistungszahl der Wärmepumpe erfolgt über den Carnot-Wirkungsgrad COP_{Carnot} bei der jeweils vorhandenen Quellen- und Senktemperatur und einen Gütegrad ν_{WP} , der mit 0,5 angenommen wurde.

$$COP_{Carnot} = \frac{T_{Wärmesenke}}{T_{Wärmesenke} - T_{Wärmequelle}} \quad \text{Gl. 3.15}$$

$$COP = COP_{Carnot} \cdot \nu_{WP} \quad \text{Gl. 3.16}$$

Die Wärmeverluste der Rohrleitungen und Wärmetauscher werden nicht berücksichtigt. Die Verluste des Pufferspeichers werden temperaturabhängig berechnet.

Die Wärmerückgewinnung aus dem Abwasser wird stark vereinfacht über einen angenommenen Rückgewinnungsgrad (in jedem Zeitschritt über die aktuell vorhandene Abwassertemperatur und die Temperatur der jeweiligen Wärmesenke) berechnet. Unterschiede zwischen verschiedenen Wärmetauscherbauarten für die AWR können aufgrund dieser Vereinfachung nicht berücksichtigt werden. Der Unterschied zwischen einer AWR mit Abwasser-Speicherung und einer AWR im Durchlaufprinzip kann aber abgebildet werden. Trotz der vielen Vereinfachungen ermöglicht dieses Tool eine ausreichend genaue Abschätzung des energetischen Potentials und einen schnellen Vergleich unterschiedlicher Konzepte.

3.4.1 Randbedingungen für die Berechnungen

Warmwasserbedarf

Da Messdaten über den Warmwasserverbrauch eines Einfamilienhauses aus den im Projekt durchgeführten Messungen verfügbar sind (vgl. Kap 3.2), wurden aus diesen

Stundenmittelwerte (für einen Zeitraum von zwei Wochen) generiert. Diese wurden im Tool hinterlegt und zyklisch wiederholt. Wird das hinterlegte Profil auf einen Vier-Personen-Haushalt aufgeteilt, ergibt sich ein Warmwasserbedarf von 47 Liter pro Person und Tag.

Abwassermengen und Temperaturen

Aus den Messergebnissen des Einfamilienhauses wurden Profile für den Abwasserdurchfluss und die dazugehörige Abwassertemperatur erstellt. Mit diesen Werten wurden – wie für das Warmwasser-Zapfprofil – Stundenwerte (für einen Zeitraum von zwei Wochen) generiert, im Tool hinterlegt und zyklisch wiederholt.

Heizwärmebedarf

Der Heizwärmebedarf des Gebäudes wurde durch ein stark vereinfachtes Modell für die Heizleistung abhängig von der aktuellen Außenlufttemperatur abgebildet. Es wurde eine lineare Funktion für die Heizleistung als Funktion der Außenlufttemperatur (Wetterdatensatz Graz) angenommen (siehe Abbildung 3.36). Dazu wurden von der Außenlufttemperatur unabhängige interne und externe Wärmequellen definiert. Aus der Luftwechselrate und einem definierten Raumluftvolumen wurden die Lüftungsverluste bestimmt. Für die Erstellung von drei Referenzfällen hinsichtlich des Dämmstandards wurden die Transmissions-Wärmeverluste so gewählt, dass der Heizwärmebedarf des Gebäudes 15, 30 und 45 kWh/(m²a) am gewählten Standort beträgt.

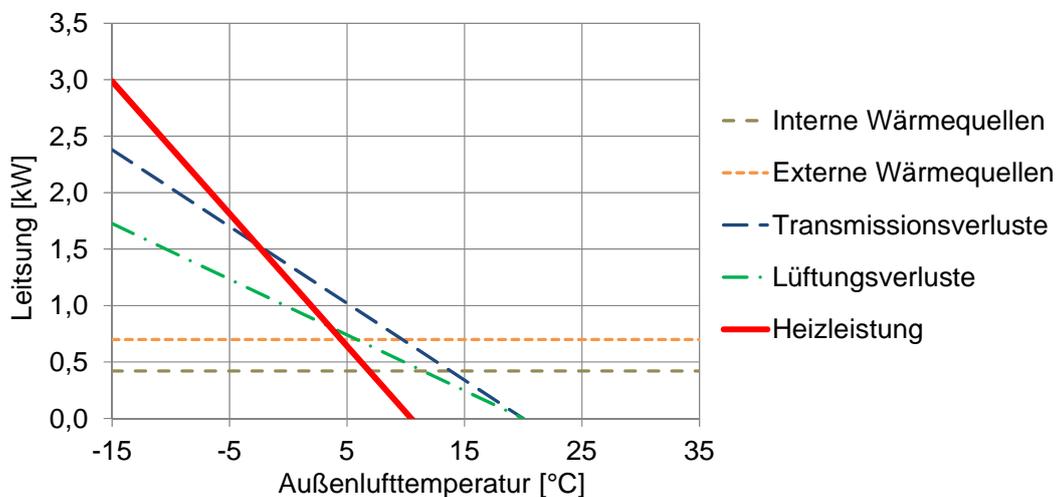


Abbildung 3.36: Wärmeverluste und -gewinne in Abhängigkeit der Außentemperatur für das Gebäude mit einem Heizwärmebedarf von 30 kWh/(m²a)

3.4.2 Kennzahlen

Folgende Kennzahlen werden zur Bewertung der Systeme herangezogen:

- System-Jahresarbeitszahl SPF_{Sys} (Seasonal Performance Factor)

$$SPF_{Sys} = \frac{Q_{Nutz}}{W_{el}} \quad \text{Gl. 3.17}$$

- SPF Wärmepumpe (Gesamt, Warmwasserbereitung, Heizung)

$$SPF_{WP} = \frac{Q_{K_WW} + Q_{K_H}}{W_{el_WW} + W_{el_H}} \quad \text{Gl. 3.18}$$

$$SPF_{WP_WW} = \frac{Q_{K_WW}}{W_{el_WW}} \quad \text{Gl. 3.19}$$

$$SPF_{WP_H} = \frac{Q_{K_H}}{W_{el_H}} \quad \text{Gl. 3.20}$$

- Solarer Deckungsgrad

$$SD_1 = \frac{Q_{Koll}}{Q_{WW} + Q_{Heiz}} \quad \text{Gl. 3.21}$$

$$SD_2 = 1 - \frac{Q_{Aux}}{Q_{WW} + Q_{Heiz}} \quad \text{Gl. 3.22}$$

- Spezifischer Kollektorsertrag

$$Q_{Koll_Sp} = \frac{Q_{Koll}}{A_{Netto}} \quad \text{Gl. 3.23}$$

- Wärmegestehungskosten

A_{Netto} ...	Absorberfläche (netto) Sonnenkollektor [m ²]
Q_{Aux} ...	Dem System zusätzlich zur Sonnenenergie zugeführte Energie (inkl. Abwasserwärme) → für die Berechnung von SD_2
Q_{Heiz} ...	Heizwärmebedarf des Gebäudes [kWh/a]
Q_{Koll} ...	Wärmeertrag Sonnenkollektoren [kWh/a]
Q_{Koll_Sp} ...	spezifischer Kollektorsertrag [kWh/m ² a]
Q_{K_H} ...	Wärmepumpe: abgegebene Wärmemenge für Raumheizung [kWh/a]
Q_{K_WW} ...	Wärmepumpe: abgegebene Wärmemenge für Warmwasserbereitung [kWh/a]
Q_{WW} ...	Warmwasserbedarf [kWh/a]
Q_{Nutz} ...	$Q_{WW} + Q_{Heiz}$ [kWh/a]
SPF ...	Jahresarbeitszahl (Seasonal performance factor) [-]
W_{el} ...	Stromverbrauch Wärmepumpe (Kompressor) + Stromverbrauch elektrische Nachheizung [kWh/a]
W_{el_H} ...	Stromverbrauch Wärmepumpe im Heizungsbetrieb [kWh/a]
W_{el_WW} ...	Stromverbrauch Wärmepumpe im Warmwasser-Betrieb [kWh/a]

3.4.3 Anlagenkosten

Um die verschiedenen Systemkonzepte auch ökonomisch bewerten zu können, wurde eine Kostenrecherche für die einzelnen Anlagenkomponenten durchgeführt. Dabei wurden Anlagenkosten aus verschiedenen Arbeiten (Baumann, 2009) und Hersteller-Preislisten erhoben und Kostenfunktionen abhängig von der Anlagengröße für Kollektoren, Speicher, Montage etc. erstellt. Die Kosten für die Wärmepumpe, deren Montage und die Wärmequelle wurden für entsprechend der jeweils verwendeten Wärmequelle angenommen. Für die AWR-Systeme konnten nur teilweise Kosten erhoben werden. Für den Schwerkraft Filmstrom Wärmetauscher wurden Kosten von 500 € (vgl. Powerpipe, 2011) und für einen Abwassertank ein Investitionsvolumen von 1500 € angenommen.

Mit dem oben beschriebenen Berechnungstool wurde der Strombedarf der einzelnen Systeme berechnet. Unter Zugrundelegung der Investitionskosten der Systeme, einer Nutzungsdauer von 20 Jahren und dem jeweiligen Energiebedarf wurden Wärmegestehungskosten für die einzelnen Systeme ermittelt. Die Berechnung erfolgte dabei statisch unter Zugrundelegung eines Strompreises von 0,17 €/kWh.

3.4.4 Bewertungsergebnisse

Für die verschiedenen Wärmebereitstellungssysteme wurden Anlagenkonfigurationen hinsichtlich der Kollektorfläche und der Speichervolumina berechnet, mit denen Systemjahresarbeitszahlen von 5,5 und 6,5 erzielt werden. Da dies mit unterschiedlichen Konfigurationen (Kollektorfläche, Speichervolumen) möglich ist, wurde jeweils eine Konfiguration ermittelt, bei der sich die geringsten Wärmegestehungskosten ergeben. Dazu wurden für die Kollektorfläche sowie für das Volumen des Pufferspeichers/der Pufferspeicher (tlw. Eisspeicher) jeweils obere und untere Grenzwerte definiert. Zusätzlich wurden die Konzepte mit den gleichen Anlagenkonfigurationen aber ohne AWR-Systeme betrachtet. Alle Berechnungen wurden für einen Heizwärmebedarf von 15, 30 und 45 kWh/(m²a) durchgeführt.

In Tabelle 2 sind beispielhaft die Ergebnisse der davor beschriebenen Systeme jeweils mit und ohne AWR-System für ein Gebäude mit einem Heizwärmebedarf von 30 kWh/m²a dargestellt. Dabei wurde bei den Varianten mit AWR die Systemkonfiguration jeweils so gewählt, dass sich ein SPF_{Sys} von 5,5 ergibt. Aus den Ergebnissen ist ersichtlich, dass das Wärmerückgewinnungspotenzial bei Konzept 3 (Konzept mit Abwassertank) am größten ist (ca. 1.517 kWh). Hier können ca. 50 % der für die Warmwasserbereitung benötigten Wärme zurückgewonnen werden. Auch bei Konzept 1 (Frischwasser-Vorwärmung) ergibt sich eine Rückgewinnung von ca. 30 % der Wärme für die Warmwasserbereitung. Bei Konzept 2 ergibt sich das geringste Potential. Dies ist darauf zurückzuführen, dass der untere Bereich des Speichers als Wärmesenke für die AWR verwendet wird. Dieser Bereich hat aber, bedingt durch den solaren Wärmeeintrag und Wärmeeinträge aus darüber liegenden Speicherschichten, sehr oft ein für die AWR zu hohes Temperaturniveau. Bei Konzept 4 wird der untere Speicherbereich bzw. in diesem Fall der Niedertemperaturspeicher als

Wärmequelle für die Wärmepumpe verwendet. Dadurch ergibt sich im Jahresmittel ein wesentlich tieferes Temperaturniveau und somit ein höheres Rückgewinnungspotential.

Tabelle 2: Ergebnisse für einen Heizwärmebedarf von 30 kWh/(m²a)

		Konzept 1	Konzept 2	Konzept 3	Konzept 4	Konzept 5
	Kollektorfläche [m ²]	2,7	4,9	21,6	6,1	20,6
	Niedertemperaturspeicher [m ³]	-	-	1,5	0,35	-
	Pufferspeicher [m ³]	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
	Eisspeicher [m ³]	-	-	-	-	1,5
mit AWR SPF _{sys} = 5,5	SD ₁ [%]	19,4	30,5	93,4	47,8	78
	SD ₂ [%]	12,5	23,1	60,1	36,4	69
	W _{el} (WP+direkt) [kWh]	1270	1264	1266	1264	1266
	W _{el} direkt [kWh]	-	-	821	-	394
	Rückgewinnung AWR [kWh]	1064	331	1517	977	879
	Wärmegestehungskosten [€/kWh]	0,160	0,167	0,209	0,184	0,191
ohne AWR	SPF _{sys}	4,82	5,27	3,53	5	3,73
	SD ₁ [%]	24,0	32,1	102,2	49,6	82
	SD ₂ [%]	18,6	25,1	71,7	39,2	73
	W _{el} (WP+direkt) [kWh]	1448	1317	1972	1392	1868
	W _{el} direkt [kWh]	-	-	1666	-	1155
	Wärmegestehungskosten [€/kWh]	0,160	0,164	0,213	0,183	0,202

Der Vergleich der Systeme mit und ohne AWR ergibt, dass durch die AWR bei allen Systemen eine Energieeinsparung bzw. eine Steigerung des SPF_{sys} erreicht wird. Die größte Auswirkung der AWR auf die Einsparung ergibt sich bei den Systemen 4 und 5, die nur über Solarwärme und Abwasserwärme versorgt werden. Hier stellt die AWR eine wichtige Wärmequelle zusätzlich zur Solarwärme – insbesondere im Winter – dar.

Hinsichtlich der Wärmegestehungskosten zeigen die Berechnungen, dass sich bei den Systemen mit einer erdreichgekoppelten Wärmepumpe die geringsten Kosten pro bereitgestellter Nutzwärmeeinheit einstellen. Der Kostenvergleich zwischen den Systemen mit und ohne AWR ergibt, dass die Wärmegestehungskosten vor allem bei den Systemen 4 und 5 – wenn auch nicht besonders stark – positiv durch die AWR beeinflusst werden. Dies ist vor allem auf die deutliche Reduktion der direkt elektrisch zugeführten Energie zurückzuführen.

Da sich für die Systeme 4 und 5 die größten Verbesserungen – sowohl energetisch als auch hinsichtlich der Kosten – durch die AWR ergeben, wurde entschieden, diese Konzepte in den weiterführenden Arbeiten im Projekt detaillierter zu untersuchen.

3.5 Entwicklung von Simulationsmodellen

Für die detaillierten Simulations-Arbeiten, die im Projekt durchgeführt wurden und in Kapitel 3.6 beschrieben sind, wurden mehrere Simulationsmodelle zur Abbildung von verschiedenen Systemkomponenten am Institut für Wärmetechnik erstellt. Diese Modelle werden in diesem Abschnitt kurz beschrieben.

3.5.1 Wärmepumpe

Am Institut für Wärmetechnik wird in einer Kooperation mit dem Institut für Solartechnik SPF in Rapperswil, Schweiz ein Wärmepumpenmodell für TRNSYS entwickelt bzw. weiterentwickelt. Dieses Modell basiert auf einem Modell in der Software EES (Klein, 2007), das ursprünglich an der NTB Buchs erstellt wurde (Bertsch, 2009).

Es handelt sich um ein stationäres, semi-physikalisches Wärmepumpenmodell, in dem die thermodynamischen Stoffdaten des jeweiligen Kältemittels verwendet werden, um den Wärmepumpenkreislauf abhängig von der Wärmequelle und -senke und dem Wärmeübertragungsvermögen der Wärmetauscher abzubilden. Es besteht die Möglichkeit, Außenluft, einen Solekreislauf, oder auch beides als Wärmequelle (zwei Verdampfer, siehe Abbildung 3.37) zu verwenden. Zusätzlich zum Kondensator kann ein Enthitzer vorgeschaltet werden, um z.B. parallel zum Heizungsbetrieb Warmwasser zu erzeugen.

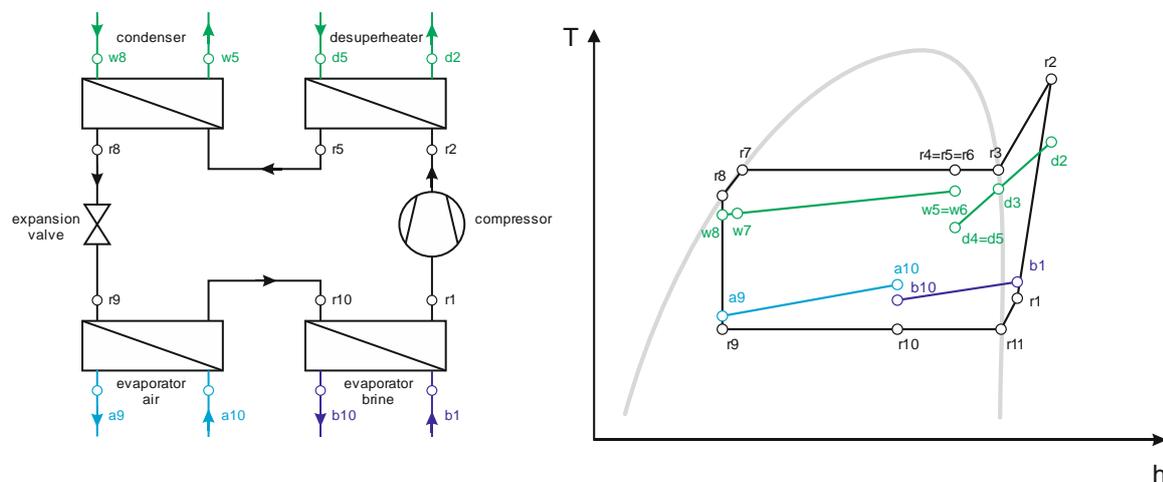


Abbildung 3.37: Links: exemplarisches Schema des Wärmepumpenkreislaufs; Rechts: Beispiel eines WP-Kreislaufs im Th-Diagramm bei Verwendung aller links dargestellten Wärmetauscher

Kältemittel-Stoffdaten

Die Stoffdaten des Kältemittels werden über Polynome angenähert, die getrennt für das Zweiphasengebiet und den Bereich überhitzten Gases erstellt wurden. Durch diesen Ansatz kann im Vergleich zum Aufruf eines separaten Programmes zur Berechnung der Stoffdaten Simulationszeit gespart werden. Dies ist insbesondere deshalb relevant, weil in jedem Zeitschritt eine Vielzahl an Iterationen in mehreren ineinander verschachtelten Iterationsschleifen durchgeführt wird, und es so zu sehr vielen Stoffdatenberechnungsvorgängen kommt. Bisher sind die Stoffdaten für die Kältemittel R410A, R407C, R134a, R290 und R404A im Modell hinterlegt.

Wärmetauscher

Die im Kreislauf verwendeten Wärmetauscher werden abhängig von den Eintrittsbedingungen (Massenstrom, Druck und Temperatur) auf beiden Fluidseiten und dem vom Nutzer einzugebenden Wärmeübertragungsvermögen des Wärmetauscher UA_{HX} (W/K) berechnet. Bei der Berechnung wird der Wärmetauscher in mehrere Abschnitte unterteilt, die jeweils getrennt voneinander berechnet werden (z.B. Unterteilung in Enthitzung, Kondensation und Unterkühlung im Kondensator, vgl. Abbildung 3.38). Für jeden Abschnitt wird mit

$$UA_i = \frac{Q_i}{\Delta T_{\log,i}} \quad \text{Gl. 3.24}$$

ein UA_i berechnet, wobei Q_i die übertragene Leistung und $\Delta T_{\log,i}$ die logarithmische Temperaturdifferenz zwischen den beiden Fluidseiten im jeweiligen Abschnitt ist. Der Kältemitteldruck im Wärmetauscher und die Wärmequellen- bzw. Senken-Austrittstemperatur wird iterativ ermittelt, wobei bei

$$\Sigma UA_i = UA_{HX} \quad \text{Gl. 3.25}$$

Konvergenz erreicht ist.

Die kältemittelseitigen Druckverluste in den Wärmetauschern werden nicht im Modell berücksichtigt.

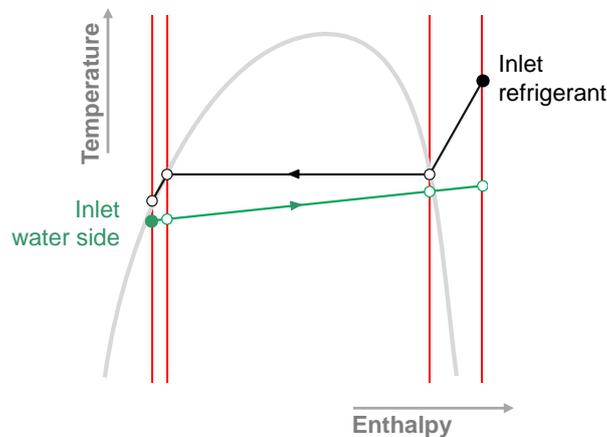


Abbildung 3.38: Unterteilung des Kondensators in Abschnitte

Kompressormodellierung

Für die Berechnung der Kältemittel-Kompression wird ein Kennfeld des jeweiligen Kompressors verwendet (bi-kubisches Polynom), mit dem der Kältemittel-Massenstrom und die elektrische Leistungsaufnahme ermittelt werden. Alternativ kann vom Nutzer ein Kompressor-Hubvolumenstrom als Parameter, sowie der Isentropen-Wirkungsgrad und volumetrische Wirkungsgrad als Input vorgegeben werden.

3.5.2 Fallrohr-Filmstrom-Wärmetauscher

Zur Simulation eines Fallrohr-Filmstrom-Wärmetauschers, wie in Abschnitt 3.1.4 beschrieben, wurde im Rahmen des Projekts ein TRNSYS-Simulationsmodell erstellt.

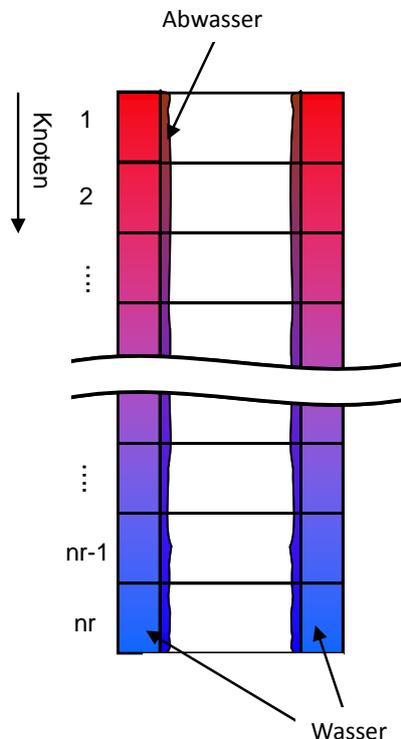


Abbildung 3.39: Schema der Knotenstruktur des Abwasser-Wärmetauscher-Modells

Das Modell ermöglicht die Berechnung der Austrittstemperaturen des Abwassers und des Mediums im äußeren Spiralrohr, abhängig von den Massenströmen und Eintrittstemperaturen des Wassers auf beiden Seiten des Wärmetauschers und der Geometrie des Abwasserrohres (Durchmesser, Wandstärke, Länge) und des äußeren Spiralrohres.

Der Wärmeübergang vom Abwasser an die Innenwand des Fallrohres wird dabei über empirische Gleichungen für Filmströmungen an senkrechten Flächen nach VDI Wärmeatlas (1997) Geometrie-, Stoffdaten- und strömungsabhängig berechnet. Die Stoffdaten des Abwassers werden dabei gleich angenommen wie jene von reinem Wasser. Der Wärmeübergang und der Druckverlust des Wärmeträgermediums im äußeren Spiralrohr werden ebenfalls mit empirischen Korrelationen nach VDI Wärmeatlas (1997) bzw. nach Incropera (2002) ermittelt.

Da sich die Stoffdaten der Medien vom Eintritt bis zum Austritt des Wärmetauschers und damit der Wärmeübergang über die Länge des Rohrs signifikant ändern, erfolgt eine Diskretisierung der Wärmetauscherfläche (abschnittsweise Berechnung, siehe Abbildung 3.39).

Um auch berücksichtigen zu können, wie sich die Übertragungsleistung bei einer evtl. auftretenden Verschmutzung der Innenoberfläche des Abwasserrohres ändert, kann im Modell eine Fouling-Schicht (Angabe von Dicke und Wärmeleitfähigkeit) berücksichtigt werden.

3.5.3 Abwasser-Speicher

Speichermodelle wie der Type340 (Drück, 2000), die z.B. zur Simulation von Solarspeichern in TRNSYS verwendet werden, arbeiten mit sogenannten Doppelanschlüssen („Double Ports“). Dabei werden für jedes Anschlusspaar eine Einlass- und eine Auslasshöhe definiert, und es wird angenommen, dass jeweils der zu- und abfließende Massenstrom gleich ist. Damit ist auch die Füllhöhe des Speichers konstant, bzw. wird normalerweise angenommen, dass der Speicher voll gefüllt ist.

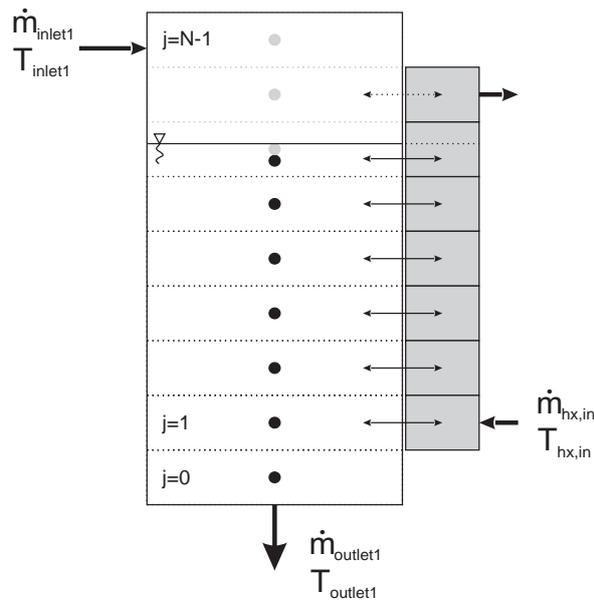


Abbildung 3.40: Schema der Knotenstruktur des Abwasser-Speicher-Modells

Zur Abbildung eines Abwasserspeichers wurde im Projekt ein Modell entwickelt, das die Simulation eines Behälters mit einem integrierten Wärmetauscher und einer variablen Füllhöhe ermöglicht. Bei diesem Modell wird nicht von Doppelanschlüssen ausgegangen, sondern die Ein- und Auslässe werden getrennt berücksichtigt bzw. können die ein- und austretenden Massenströme unabhängig voneinander vorgegeben werden (z.B. \dot{m}_{inlet1} , $\dot{m}_{outlet1}$ in Abbildung 3.40).

Wie bei anderen Mehrknotenmodellen (z.B. Drück, 2000 und Heinz, 2007) wird auch hier der Speicherraum vertikal in eine Anzahl von N Knoten unterteilt (siehe Abbildung 3.40). Zusätzlich wird berücksichtigt, dass der

Speicher nur bis zu einem gewissen Füllstand bzw. einer bestimmten Knotenanzahl befüllt ist. Der oberste Flüssigkeits-Knoten ist dabei in seiner Größe je nach Füllstand im Speicher variabel.

Die Entladung des Speichers erfolgt über einen internen Wärmetauscher, dessen Höhe über die Höhen der Anschlüsse angegeben wird. Der Wärmetauscher wird ebenfalls in einzelne Knoten unterteilt, die mit den jeweiligen Speicherknoten auf der gleichen Höhe im Wärmeaustausch stehen. Das Wärmeübertragungsvermögen des Wärmetauschers UA_{HX} [W/K] wird über einen Input vorgegeben. Wenn ein Teil des Wärmetauschers sich über dem aktuellen Flüssigkeitsspiegel im Speicher befindet (wie in Abbildung 3.40 angedeutet), so wird berücksichtigt, dass dieser Teil des Wärmetauschers nicht am Wärmeaustausch mit dem Speichermedium teilnimmt.

Die Wärmeverluste an die Umgebung werden über einen Wärmeverlustkoeffizienten UA_{Loss} [W/K] bestimmt, der als Input vorgegeben wird. Dieser wird über alle Knoten verteilt, und die Verluste werden pro Knoten, abhängig von der Knoten-Temperatur und der Umgebungstemperatur berechnet.

3.5.4 Eisspeicher

Im Rahmen des Projekts wurde ein Modell, das die Simulation eines quaderförmigen Eisspeichers mit einem integrierten Rohrwärmetauscher ermöglicht, erstellt. Bei einem Eisspeicher ist von zentraler Bedeutung, dass beim Wärmeentzug auf der Außenoberfläche der Wärmetauscher-Rohre bei Unterschreiten des Gefrierpunktes Wasser anfriert bzw. sich kontinuierlich eine immer dicker werdende Eisschicht bildet, die wie eine Dämmschicht wirkt und je nach Dicke die Wärmeübertragung zwischen dem Wasserraum des Speichers und dem Wärmeträgermedium im Wärmetauscher mehr oder weniger einschränkt.

Im Modell wird das Eiswachstum bzw. der steigende thermische Widerstand der Eisschicht auf den Rohren über eine explizite Finite Differenzen Formulierung der transienten Wärmeleitungsgleichung in Zylinderkoordinaten zwei-dimensional abgebildet. Die Modellierung des Phasenwechsels zwischen fest und flüssig erfolgt über die Enthalpie-Methode (Visser, 1986; Claußen, 1993). Die Temperatur des Wassers im Speicher wird zur Vereinfachung als über den gesamten Speicherraum gleich hoch angenommen, d.h. eine evtl. auftretende Temperaturschichtung wird vernachlässigt.

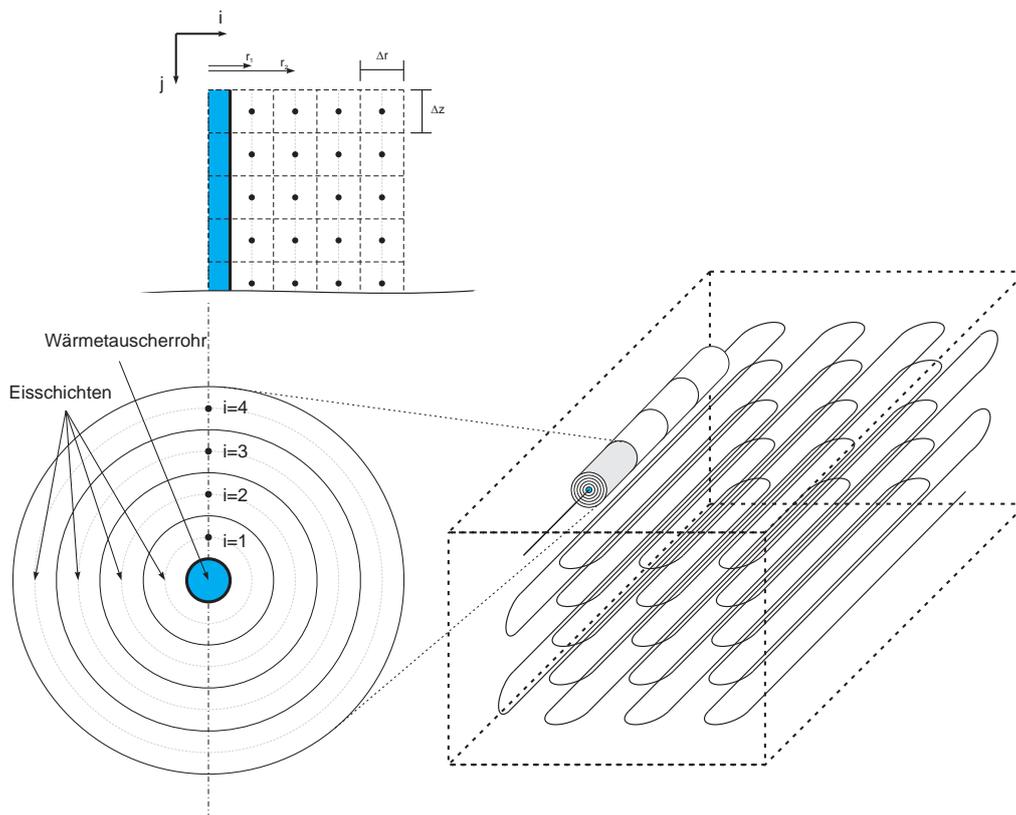


Abbildung 3.41: Schema des Eisspeichermodells:
Links: Schema der zweidimensionalen Knotenstruktur
Rechts: Aufbau des Speichers mit Wärmetauscher

Der Wärmetauscher wird als Rohrleitung angenommen, die in Schleifen im Speicher verlegt ist (vgl. Abbildung 3.41). Der Rohrdurchmesser, die Wandstärke und der Verlegeabstand sowie die Anzahl paralleler Kreise können vorgegeben werden. Der Wärmeübergang zwischen dem Wärmeträgerfluid und der Innenwand der Wärmeübertragerrohre wird über

empirische Gleichungen für die Strömung in zylindrischen Rohren angenähert (VDI Wärmeatlas, 1997).

Die Wärmeverluste an die Umgebung werden über einen Wärmeverlustkoeffizienten UA_{Loss} [W/K] bestimmt, der als Input vorgegeben wird. Dieser wird über alle Knoten verteilt, und die Verluste werden pro Knoten, abhängig von der Knoten-Temperatur und der Umgebungstemperatur, berechnet.

3.6 Detaillierte Systemsimulationen in TRNSYS

In diesem Kapitel werden die Systeme, die in den in Kapitel 3 beschriebenen Arbeiten für die weiterführenden Untersuchungen gewählt wurden, detailliert in der Simulationsumgebung TRNSYS abgebildet und anhand von energetischen Kennzahlen bewertet. Dabei werden auch unterschiedliche Konzepte für die AWR berücksichtigt und verglichen. Im Folgenden werden die einzelnen Varianten vorgestellt.

3.6.1 Untersuchte System-Varianten

System A

Bei diesem System wird durch die Sonnenkollektoren (einfach verglaste Flachkollektoren) über einen Plattenwärmetauscher und eine Schichtladeeinheit ein Pufferspeicher beladen. Eine Wärmepumpe mit einer Leistung von 5 kW (@ B0W35) benutzt den unteren Bereich des Speichers als Wärmequelle. Ist die Vorlauftemperatur zum Verdampfer zu hoch, wird diese über eine Beimischschaltung auf 18 °C begrenzt, um die maximale Verdampfungstemperatur, die aufgrund der Einsatzgrenzen des Kompressors erlaubt ist, nicht zu überschreiten. Dies ist auch bei allen folgenden Konzepten so ausgeführt.

Die Warmwasserbereitung erfolgt über eine Frischwasserstation, welche an den Pufferspeicher angeschlossen ist. Das Gebäude wird über eine Fußbodenheizung beheizt, die entweder aus dem Pufferspeicher oder direkt von der Wärmepumpe Wärme bezieht. Falls das Temperaturniveau ausreicht, erfolgt dies vorrangig aus dem unteren Bereich des Puffers (unter dem Nachheizvolumen), der von der Solaranlage erwärmt wird, um nicht Heizungswasser mit höherer Temperatur aus dem Nachheizvolumen auf ein tieferes Temperaturniveau mischen zu müssen. Ein Schema des Systems ist in Abbildung 3.42 dargestellt. Als Backup ist eine Elektro-Heizpatrone im oberen Bereich des Pufferspeichers installiert. Diese wird aktiviert, wenn die Wärmepumpe nicht mehr betrieben werden kann, weil der Pufferspeicher entladen ist, und somit keine Wärmequelle mehr vorhanden ist. Dieses System dient als Basisfall ohne AWR mit den Systemen B, C und D.

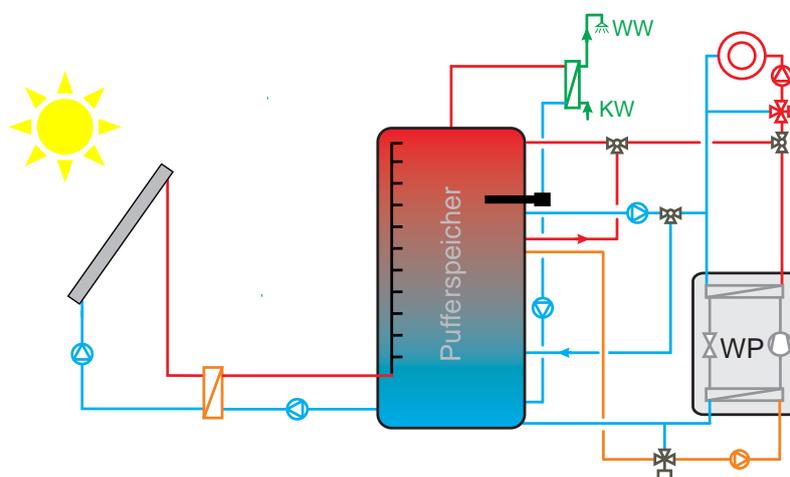


Abbildung 3.42: Hydraulikschema System A

System B

In diesem System ist zusätzlich ein Abwassertank mit einem Volumen von 250 Litern installiert, in dem das Abwasser des Gebäudes gesammelt wird. Über einen internen Wärmetauscher, der hydraulisch mit dem Verdampfer der Wärmepumpe gekoppelt ist, kann das Abwasser als Wärmequelle verwendet werden. Zusätzlich steht der Wärmepumpe der untere Teil des Pufferspeichers als Wärmequelle zur Verfügung. Es wird jeweils jener Speicher (Pufferspeicher oder Abwassertank) als Wärmequelle verwendet, der die höhere Temperatur aufweist. Ein Schema des Systems B ist in Abbildung 3.43 dargestellt.

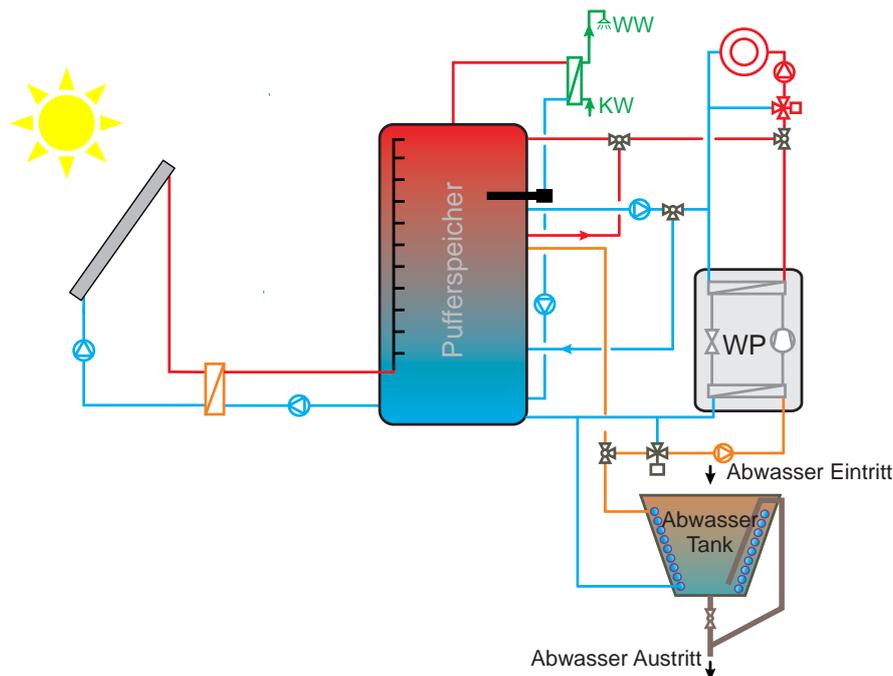


Abbildung 3.43: Hydraulikschema System B

Als Backup ist wie in System A eine elektrische Heizpatrone im oberen Bereich des Pufferspeichers installiert. Diese wird aktiviert, wenn die Wärmepumpe nicht mehr betrieben werden kann, weil sowohl Pufferspeicher als auch Abwasser-Tank entladen sind, und somit keine Wärmequelle mehr vorhanden ist. Der Abwassertank wird entleert, wenn im Tank eine Temperatur von 8 °C unterschritten oder wenn ein maximaler Füllstand überschritten wird. Für dieses System wird angenommen, dass ein getrenntes Grauwasser- und Schwarzwasser-Abwassersystem im Gebäude notwendig ist, da Schwarzwasser (Abwasser aus der Küche und Toilette) aufgrund der darin enthaltenen Verschmutzungen und Feststoffe nicht in den Abwassertank geleitet werden darf. Die Simulation des Abwassertanks erfolgt mit dem in Abschnitt 3.5.3 beschriebenen Modell.

System C

Dieses System unterscheidet sich von System B nur durch die Art der AWR. Hier wird statt eines Abwassertanks ein Fallrohr-Abwasserwärmetauscher (vgl. Kapitel 3.1.4) verwendet. Dieser wird in den Fallstrang der Abwasserleitung eingebaut und somit vertikal vom Abwasser durchströmt, wobei Grauwasser und Schwarzwasser gemeinsam abfließen. Außen am Wärmetauscher ist ein Kupferrohr aufgewickelt, das von einem

Wärmeträgermedium im Gegenstrom zum Abwasser durchflossen wird (siehe Abbildung 3.44 rechts). In den durchgeführten Berechnungen wurde eine Länge des Abwasserwärmetauschers von 2 m angenommen.

Im untersuchten System ist der Abwasser-Wärmetauscher (AWT) über Rohrleitungen an den unteren Teil des Pufferspeichers angeschlossen. Der AWT wird immer dann von kaltem Wasser aus dem Pufferspeicher durchflossen, wenn die Abwassertemperatur um 3 °C wärmer ist als die Temperatur am Fühler im unteren Bereich des Pufferspeichers. Dazu sind eine Temperaturmessstelle im Fallrohrwärmetauscher und eine Regelung notwendig. Weiters ist für diese Art des Betriebs eine Pumpe zwischen dem Pufferspeicher und dem Wärmetauscher erforderlich. Die Simulation des AWT erfolgt mit dem in Abschnitt 3.5.2 beschriebenen Modell.

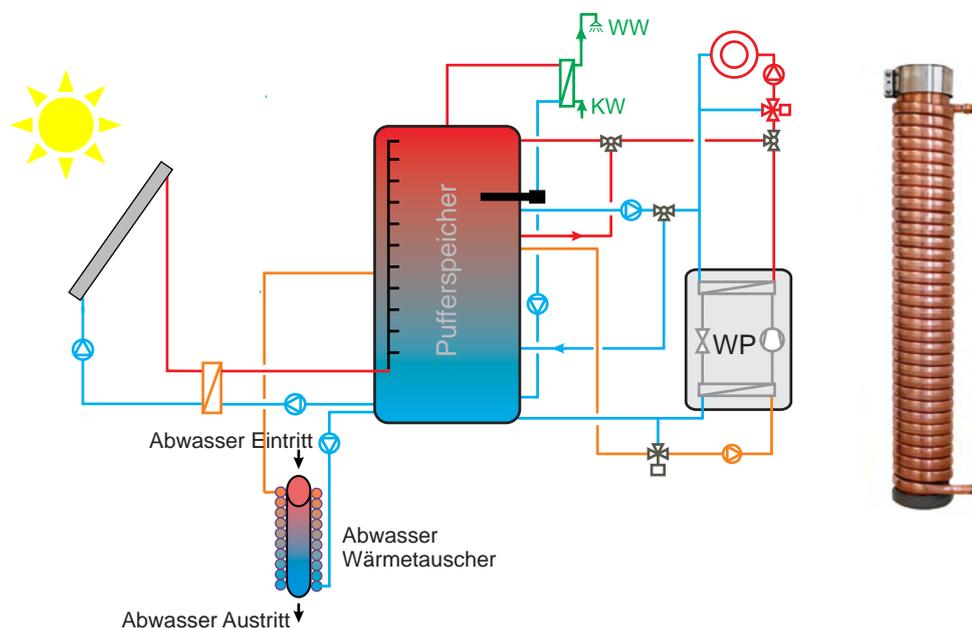


Abbildung 3.44: Links: Hydraulikschema System C; Rechts: Fallrohr-Wärmetauscher (www.preheat.de)

System D

In diesem System wird der gleiche Abwasserwärmetauscher wie in System C verwendet. Dieser wird hier allerdings nicht vom Wasser aus dem Pufferspeicher sondern direkt vom Frischwasser durchflossen. Im Wärmetauscher erfolgt dadurch eine Vorwärmung des kalten Frischwassers durch das Abwasser vor der Frischwasserstation (Abbildung 3.45). Die Länge des Wärmetauschers wird wie in System C mit 2 m angenommen. Im Gegensatz zu System C wird hier keine zusätzliche Pumpe für die AWR benötigt. Ein Nachteil dieser Art der Einbindung ist, dass die Wärmerückgewinnung nur dann funktioniert, wenn gleichzeitig Frischwasser gezapft wird und Abwasser durch den Wärmetauscher fließt.

Die Wärmepumpe kann die aus dem Abwasser rückgewonnene Wärme nicht direkt verdampferseitig nutzen. Es ergibt sich lediglich eine höhere Rücklauftemperatur von der Frischwasserstation zum Pufferspeicher aufgrund der Vorwärmung des Kaltwassers über die AWR. Dies wirkt sich negativ auf den Ertrag der Solaranlage aus.

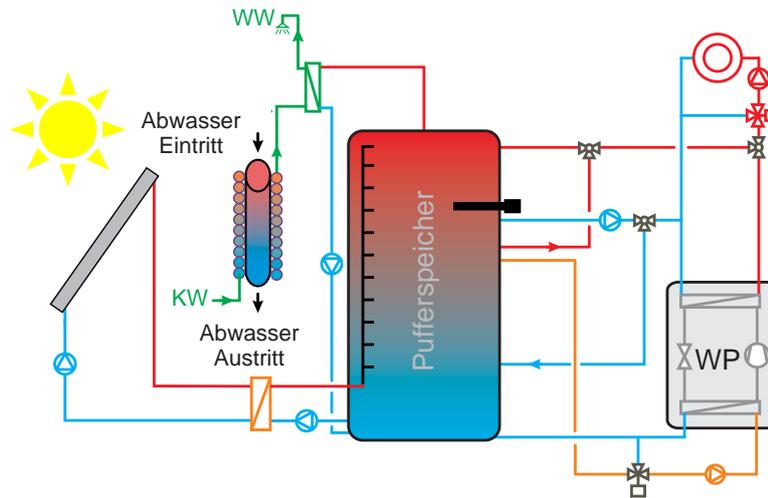


Abbildung 3.45: Hydraulikschema System D

System E

In diesem System ist zusätzlich zum Pufferspeicher ein Niedertemperaturspeicher (Eisspeicher) als Wärmequelle für die Wärmepumpe vorhanden. Das Hydraulikschema ist in Abbildung 3.46 dargestellt. Durch die thermische Solaranlage werden der Pufferspeicher über eine Schichtladeeinheit (wie bei den anderen Systemen) und der Eisspeicher durch einen internen Wärmetauscher beladen. Beim Einschalten der Solaranlage wird jeweils jener Speicher beladen, der das niedrigere Temperaturniveau aufweist. Steigt während des Beladens des Eisspeichers die Temperatur im Kollektorkreis über jene im unteren Bereich des Pufferspeichers, so wird der Pufferspeicher beladen. Ab einer Temperatur im Eisspeicher von 50 °C wird dieser nicht mehr beladen. Der Abstand der Wärmetauscherrohre im Eisspeicher wurde mit 10 cm angenommen. Dieses System stellt den Basisfall ohne AWR für das System F dar. Für die Simulation des Eisspeichers kommt das in Abschnitt 3.5.4 beschriebene Modell zur Anwendung.

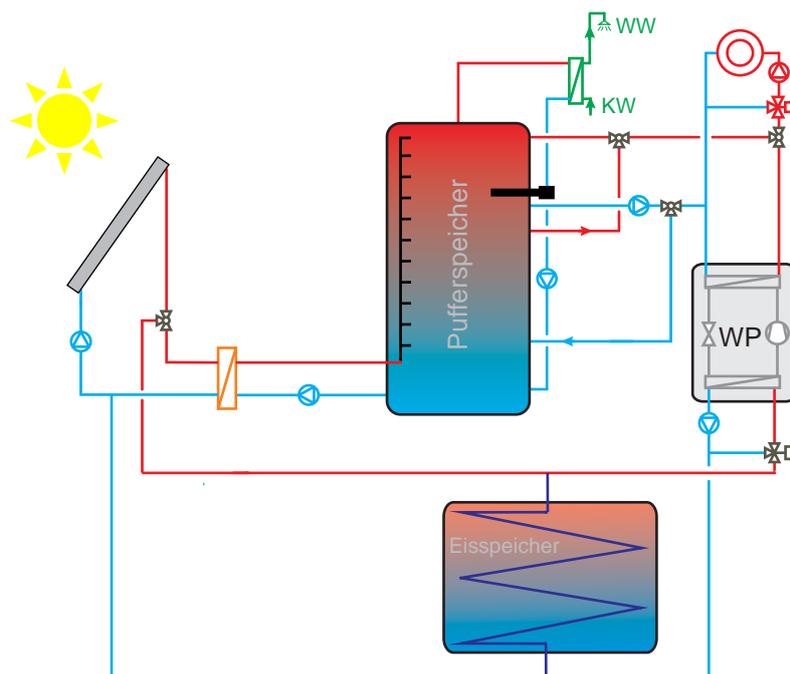


Abbildung 3.46: Hydraulikschema System E

System F

Der Unterschied von System E zu F ist jener, dass in diesem System der Eisspeicher nicht nur durch die Solaranlage sondern zusätzlich über eine AWR beladen wird. Das System ist in Abbildung 3.47 dargestellt. Zur Wärmerückgewinnung wird der gleiche Wärmetauscher wie in System C und D verwendet.

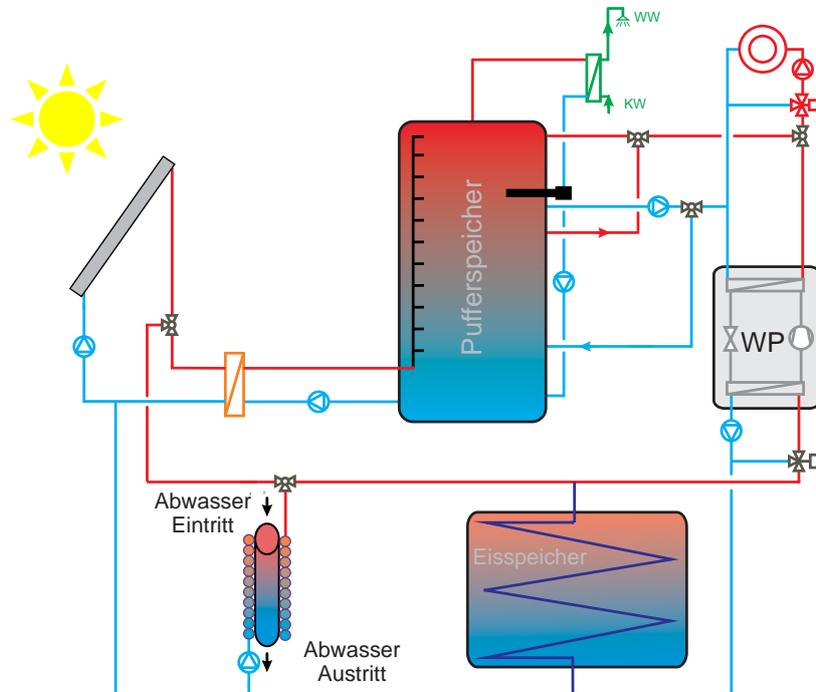


Abbildung 3.47: Hydraulikschema System F

3.6.2 Implementierung der Simulation in TRNSYS

Randbedingungen: Gebäude, Warmwasser und Abwasser

Für die Simulationen in dieser Arbeit werden hinsichtlich des **Gebäudes** die Randbedingungen des IEA SHC Task 44 verwendet (Dott et al., 2011) (Haller et al., 2011). Im Task 44 wurden drei Einfamilien-Referenzgebäude definiert, die für den Standort Straßburg einen Heizwärmebedarf (HWB) von 15, 45 und 100 kWh/(m²a) aufweisen (SFH15, 45 und 100). Für die Betrachtungen in dieser Arbeit wurden die Gebäude SFH15 und SFH45 gewählt. Zusätzlich wurde eine Variante betrachtet, bei der die Abluftwärmerückgewinnung bei SFH15 deaktiviert ist, wodurch sich ein Gebäude SFH30 ergibt.

Im Referenzsystem des Task 44 wird für das **Heizungssystem** eine Fußbodenheizung verwendet. Die Vorlauftemperatur wird abhängig von der Außenlufttemperatur über eine Heizkurve geregelt (35/30 °C bei Normaußentemperatur, Heizkörperexponent 1,1).

Hinsichtlich des anfallenden **Abwassers** werden Messdaten des über die Abflussleitung abfließenden Abwassers (jeweils zeitlicher Verlauf von Durchfluss und Temperatur) verwendet, die im Rahmen des Projekts in einem Einfamilienhaus gemessen wurden, vgl. 3.2). Aus diesen Daten wurden zwei repräsentative Wochen ausgewählt und daraus detaillierte zeitliche Profile erstellt. In Abbildung 3.48 sind die Wärmemengen für diese 14 Tage grafisch dargestellt.

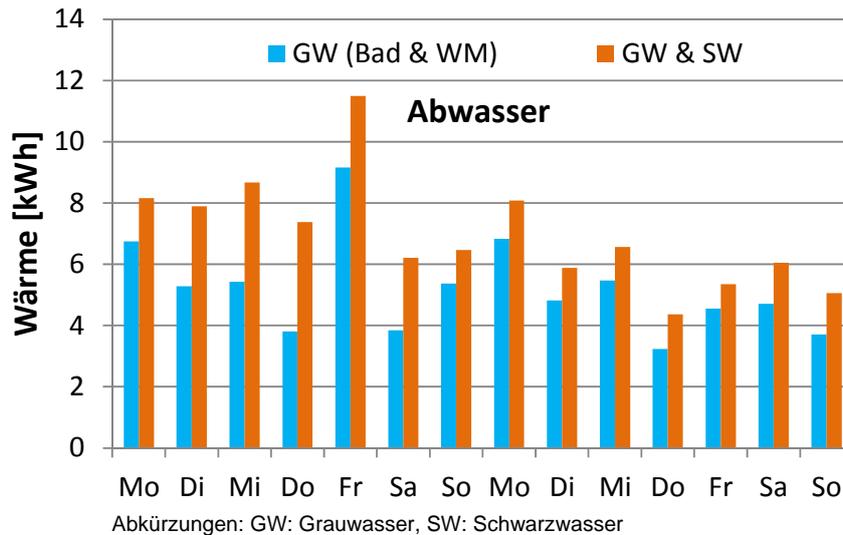


Abbildung 3.48: Täglich anfallende Wärmemengen (Bezug auf 10 °C) des verwendeten Abwasser-Profiles

Aus diesen Messdaten wurden verschiedene Profile für die Simulationen generiert. Bei den Systemvarianten mit Abwasserspeicher wird nur das Grauwasser zur Wärmerückgewinnung herangezogen. Aus diesem Grund wurde ein Abwasserprofil generiert, in dem nur das Abwasser aus dem Badezimmer und von der Waschmaschine zur Wärmerückgewinnung verwendet wird. Dabei ergibt sich bezogen auf eine Kaltwassertemperatur von 10 °C eine durchschnittliche Wärmemenge von 5,3 kWh/d.

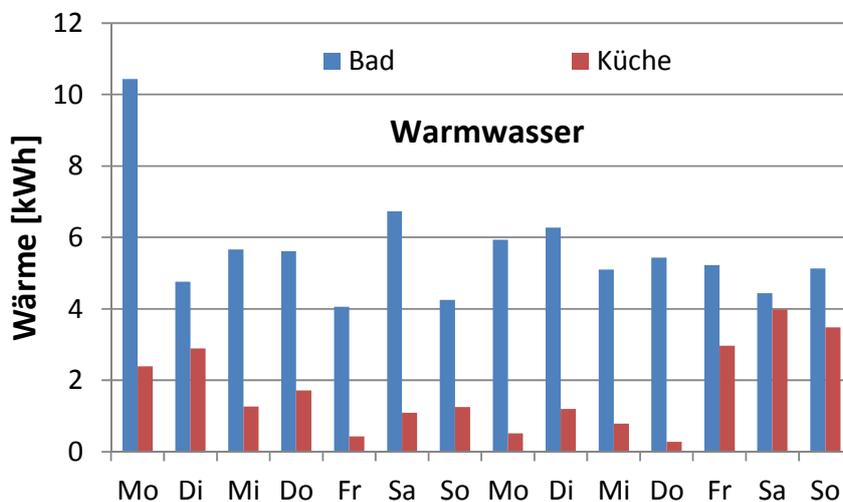


Abbildung 3.49: Täglich anfallender Warmwasserbedarf (Bezug auf 10 °C Kaltwasser und 45 °C Warmwasser)

Bei Abwasserwärmetauschern im Durchlaufprinzip kann auch Schwarzwasser zur Wärmerückgewinnung verwendet werden. Aus diesem Grund wurde auch ein Abwasserprofil generiert, in dem sowohl das Abwasser des Badezimmers und der Waschmaschine als auch das Abwasser aus der Küche und aus der WC Anlage inkludiert ist. Bezogen auf eine Kaltwassertemperatur von 10 °C errechnet sich eine durchschnittliche Wärmemenge von 7,1 kWh/d.

Für das **Brauchwarmwasserprofil** wurden ebenfalls die Messdaten aus dem Einfamilienhaus verwendet. Der Wärmebedarf für das Warmwasser (Badezimmer und Küche) beträgt mit diesem Profil ca. 2.600 kWh/a (siehe Abbildung 3.49). Aus diesen gemessenen Wärmemengen des Warmwasserbedarfs berechnet sich eine durchschnittliche tägliche Wärmemenge für das Badezimmer von 5,6 kWh/d und für die Küche von 1,7 kWh/d.

Randbedingungen: Klima

Im Task 44 wurden mit Straßburg, Athen und Helsinki drei Meteorolog-Klimadatenansätze (Meteotest, 2009) als Referenzklimas definiert. Für die Simulationen wurde als moderates Klima Straßburg gewählt. Zusätzlich wurden die Simulationen mit einem Klimadatenansatz für Graz (durchschnittliches Klima der Jahre 1991–2000) und in weiterer Folge für das durchschnittliche Grazer Klima der Jahre 2001–2012 durchgeführt.

Der Vergleich der Klimadatenansätze in Abbildung 3.50 zeigt, dass Straßburg im Winter zum einen niedrigere Einstrahlungswerte und zum anderen höhere Außentemperaturen als Graz (vor allem Graz 1991–2001) aufweist. Die Heizgradtage $HGT_{20/12}$ für die einzelnen Klimadatenansätze betragen:

- Straßburg (1996–2005): 2.800 Kd/a
- Graz (1991–2000): 3.575 Kd/a
- Graz (2001–2010): 3.050 Kd/a

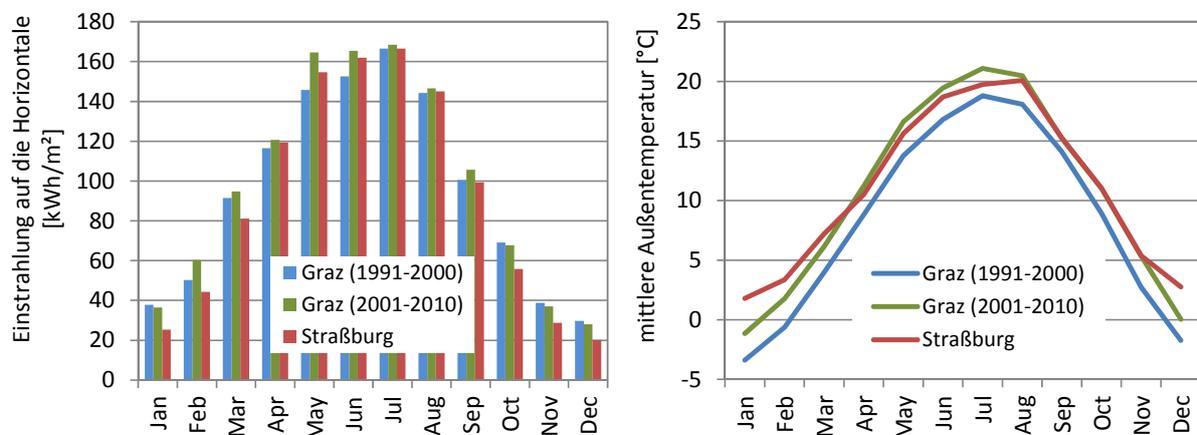


Abbildung 3.50: Links: Monatssummen der Globalstrahlung auf die Horizontale; Rechts: Monatsmittelwerte der Außenlufttemperatur für die drei verwendeten Klimadatenansätze

3.6.3 Kennzahlen zur Bewertung der Systeme

Die Simulationen wurden für unterschiedliche Konfigurationen hinsichtlich des Klimas, des Gebäudes und der Art des Systems durchgeführt. Für die Auswertungen und den Vergleich der Varianten wurden folgende Kennzahlen verwendet:

Der Gesamt-Stromverbrauch der Anlage $W_{el,tot}$ ist definiert durch

$$W_{el,tot} = W_{el,WP} + W_{el,E-Patrone} + W_{el,Pumpen} + W_{el,Regelung} \quad \text{Gl. 3.26}$$

Die System-Jahresarbeitszahl SPF_{sys} errechnet sich mit

$$SPF_{sys} = \frac{Q_{Nutz}}{W_{el,tot}} = \frac{Q_{Heizung} + Q_{WW}}{W_{el,tot}} \quad \text{Gl. 3.27}$$

$W_{el,WP}$	Elektr. Leistungsaufnahme Wärmepumpe [kWh/a]
$W_{el,E-Patrone}$	Elektr. Nachheizung durch E-Patrone [kWh/a]
$W_{el,Pumpe}$	Elektr. Leistungsaufnahme aller Pumpen außer der Heizungspumpe und der Pumpe der Frischwasserstation [kWh/a]
$W_{el,Regelung}$	Elektr. Leistungsaufnahme der Anlagenregelung [kWh/a]
$Q_{Heizung}$	Heizwärmebedarf des Gebäudes [kWh/a]
$Q_{WW...}$	Warmwasserbedarf [kWh/a]
$Q_{Nutz...}$	gesamte Nutzwärme [kWh/a]

3.6.4 Simulationsergebnisse und Interpretation

In Tabelle 3 sind alle berechneten Varianten mit den jeweiligen Systemkonfigurationen und den dazugehörigen Ergebnissen dargestellt. Diese Simulationen wurden für das Klima von Graz (1991–2000) und von Straßburg durchgeführt. In Tabelle 3 ist ersichtlich, dass sich für die drei Gebäude SFH15, 30 und 45 je nach Standort ein unterschiedlicher Heizwärmebedarf (HWB) ergibt. Je nach Gebäude ist für das Klima Graz (1991–2000) der HWB im Vergleich zu Straßburg um 20 bis 25 % höher.

Die Auslegung des Systems hinsichtlich der verwendeten Kollektorfläche und des Speichervolumens wurde je nach Gebäude unterschiedlich, aber für beide Standorte gleich angenommen.

Die Ergebnisse zeigen, dass bei Gebäuden mit einem niedrigen Wärmebedarf mit den gezeigten Systemen gute SPF_{sys} erreicht werden können, obwohl keine herkömmliche Wärmequelle für die Wärmepumpe verwendet wird. Die notwendige Kollektorfläche und das Pufferspeichervolumen müssen dabei mit steigendem HWB jeweils größer gewählt werden, um eine vergleichbare Systemeffizienz zu erreichen.

Ein Vergleich der Jahreswärmebilanzen für das Gebäude SFH45 für das Klima Graz (1991–2000) in Abbildung 3.51 und Abbildung 3.52 zeigt, dass durch eine Einbindung einer Abwasserwärmerückgewinnung der SPF_{sys} erhöht werden kann. In den beiden Abbildungen

sind exemplarisch die Jahres-Wärmebilanzen für die Systeme A bis F für das Gebäude SFH45 dargestellt. Der linke Balken zeigt dabei jeweils die dem System zufließenden Wärmemengen, während der rechte Balken die aus dem System abfließenden Wärmemengen darstellt.

Tabelle 3: Simulationsvarianten und Ergebnisse

Klima	Annahmen		System	Ergebnisse				
	Konfiguration			Q_{AWR}	$W_{el,WP}$	$W_{el,Epatrone}$	$W_{el,tot}$	SPF_{sys}
				kWh	kWh	kWh	kWh	-
Graz	Gebäude	SFH15	A	0	722	986	1810	3.26
	HWB _{Gebäude}	23 kWh/(m ² a)	B	455	727	631	1460	4.04
	$Q_{Heizung} + Q_{WW}$	5870 kWh/a	C	419	721	689	1511	3.90
	$A_{Koll} / V_{speicher}$	20 m ² / 2 m ³	D	794	658	860	1617	3.65
	$A_{Koll} / V_{speicher} / V_{eisspeicher}$	20 m ² / 1 m ³ / 1 m ³	E	0	737	671	1479	3.92
			F	748	849	112	1032	5.56
	Gebäude	SFH30	A	0	947	1292	2352	3.58
	HWB _{Gebäude}	41 kWh/(m ² a)	B	486	988	852	1953	4.31
	$Q_{Heizung} + Q_{WW}$	5870 kWh/a	C	448	949	959	2021	4.17
	$A_{Koll} / V_{speicher}$	30 m ² / 3 m ³	D	794	922	1112	2146	3.93
	$A_{Koll} / V_{speicher} / V_{eisspeicher}$	30 m ² / 1.5 m ³ / 1.5 m ³	E	0	922	946	1938	4.27
			F	867	1045	275	1390	5.89
	Gebäude	SFH45	A	0	1218	1437	2782	3.88
	HWB _{Gebäude}	58 kWh/(m ² a)	B	498	1202	1074	2402	4.51
	$Q_{Heizung} + Q_{WW}$	10770 kWh/a	C	466	1227	1092	2446	4.43
	$A_{Koll} / V_{speicher}$	40 m ² / 4 m ³	D	794	1190	1273	2588	4.18
	$A_{Koll} / V_{speicher} / V_{eisspeicher}$	40 m ² / 2 m ³ / 2 m ³	E	0	1067	1226	2363	4.51
			F	926	1226	464	1760	5.99
Straßburg	Gebäude	SFH15	A	0	648	1150	1899	2.78
	HWB _{Gebäude}	19 kWh/(m ² a)	B	430	665	781	1547	3.41
	$Q_{Heizung} + Q_{WW}$	5310 kWh/a	C	456	667	794	1562	3.38
	$A_{Koll} / V_{speicher}$	20 m ² / 2 m ³	D	794	605	1004	1708	3.09
	$A_{Koll} / V_{speicher} / V_{eisspeicher}$	20 m ² / 1 m ³ / 1 m ³	E	0	643	802	1515	3.43
			F	745	803	124	997	5.13
	Gebäude	SFH30	A	0	822	1463	2396	3.01
	HWB _{Gebäude}	33 kWh/(m ² a)	B	461	840	1088	2039	3.53
	$Q_{Heizung} + Q_{WW}$	7270 kWh/a	C	477	861	1075	2048	3.52
	$A_{Koll} / V_{speicher}$	30 m ² / 3 m ³	D	794	785	1328	2222	3.25
	$A_{Koll} / V_{speicher} / V_{eisspeicher}$	30 m ² / 1.5 m ³ / 1.5 m ³	E	0	781	1120	1970	3.60
			F	825	943	366	1378	5.08
	Gebäude	SFH45	A	0	1070	1690	2885	3.17
	HWB _{Gebäude}	46 kWh/(m ² a)	B	467	1049	1339	2512	3.64
	$Q_{Heizung} + Q_{WW}$	9090 kWh/a	C	489	1037	1345	2505	3.65
	$A_{Koll} / V_{speicher}$	40 m ² / 4 m ³	D	794	1022	1552	2696	3.39
	$A_{Koll} / V_{speicher} / V_{eisspeicher}$	40 m ² / 2.0 m ³ / 2.0 m ³	E	0	910	1387	2367	3.80
			F	867	1082	594	1746	5.11

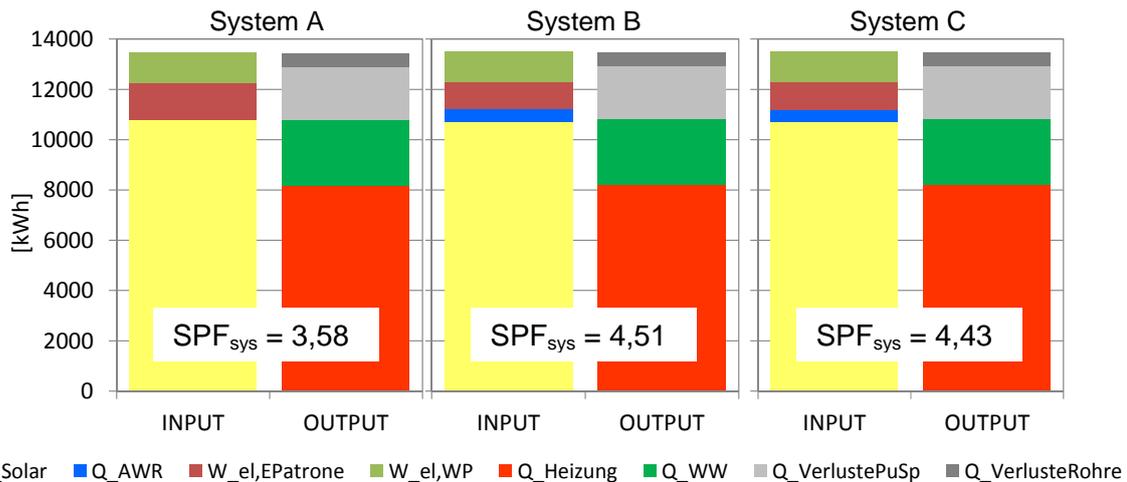


Abbildung 3.51: Jahreswärmebilanz für Graz (1991–2000) und SFH45, Systeme A bis C

Bei den Varianten mit Eisspeicher (Systeme E und F) wurde das Pufferspeichervolumen jeweils auf die Hälfte reduziert und durch ein gleich großes Eisspeichervolumen ersetzt (vgl. Tabelle 3). Aus den Ergebnissen ist ersichtlich, dass bei diesen Systemen höhere Systemarbeitszahlen und Wärmerückgewinnungsgrade erzielt werden als bei den Systemen ohne Eisspeicher.

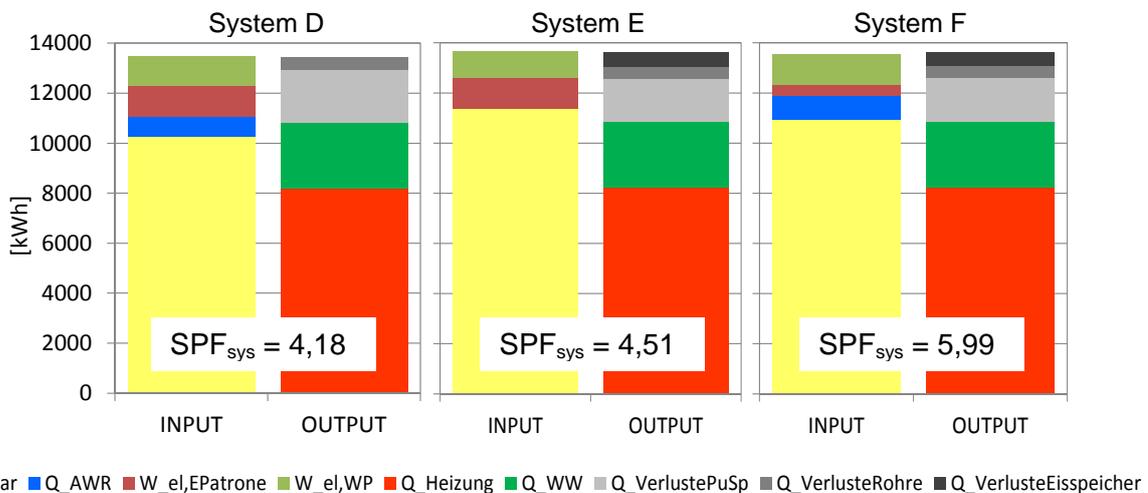


Abbildung 3.52: Jahreswärmebilanz für Graz (1991–2000) und SFH45, Systeme D bis F

Das kann dadurch begründet werden, dass bei diesen Systemen nicht nur sensible, sondern auch latente Wärme genutzt werden kann und dadurch eine höhere Speicherkapazität vorhanden ist. Dadurch steht mehr Wärme für die Wärmepumpe zur Verfügung und es muss weniger durch das Backup-System (E-Patrone) nachgeheizt werden. Mit System E (Eisspeicher mit AWR) kann bei den beschriebenen Systemen am meisten Wärme aus dem Abwasser rückgewonnen werden (ca. 926 kWh).

Hinsichtlich des Standorts zeigt sich, dass alle betrachteten Systeme in Graz (1991–2000) bei gleicher Auslegung nicht nur einen höheren SPF_{sys} sondern auch einen niedrigeren absoluten Strombedarf $W_{el,tot}$ erreichen als in Straßburg (vgl. Tabelle 3). Dies ist insofern

bemerkenswert, als in Graz alle drei Referenzgebäude einen höheren HWB aufweisen. In Abbildung 3.53 sind Ergebnisse für das System C, SHF45 an allen betrachteten Standorten dargestellt. Es zeigt sich, dass in Straßburg ein geringerer Solarertrag anfällt als in Graz, und dass daher mehr direkt elektrisch nachgeheizt werden muss. Für das Grazer Klima 2001–2010 zeigt sich ein fast gleicher Heizwärmebedarf wie für Straßburg, aber ein deutlich höherer Solarertrag. Dadurch wird bei diesem Klima auch der weitaus höchste SPF_{sys} erreicht.

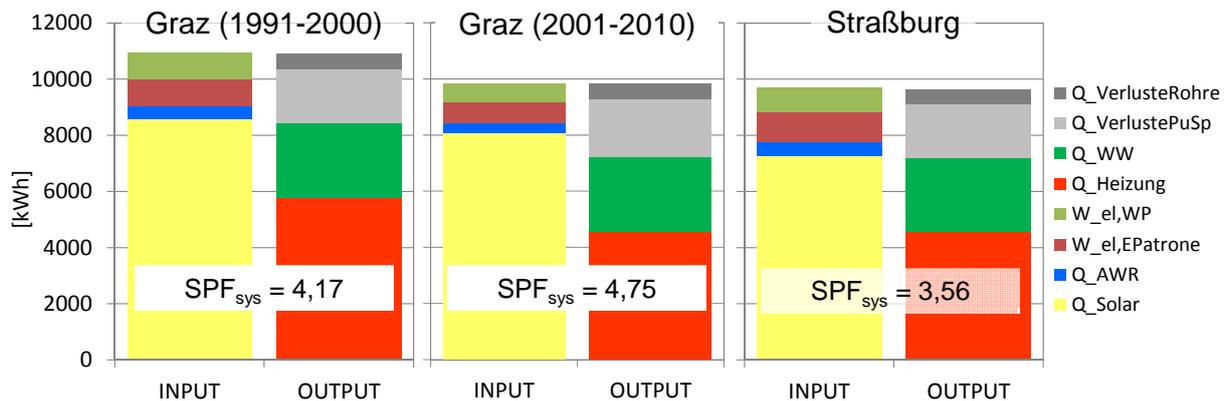


Abbildung 3.53: Simulationsergebnisse für System C, SFH30 mit unterschiedlichen Klimadatensätzen

Hinsichtlich der AWR zeigt sich, dass die absoluten Wärmeerträge speziell bei den Systemen B und C relativ niedrig sind. Da das Abwasser aber vor allem im Winter, wo naturgemäß wenig Solarwärme anfällt, als zweite Wärmequelle für die Wärmepumpe dient, kann durch die AWR die Systemeffizienz verbessert werden. Ohne AWR (System A) muss ungefähr um jene Wärmemenge mehr elektrisch nachgeheizt werden, die die AWR ins System liefert (vgl. Abbildung 3.54). Berechnungen haben gezeigt, dass bei System A die Kollektorfläche und das Puffervolumen um jeweils 25 % vergrößert werden müssten, um den gleichen SPF_{sys} zu erreichen wie bei System B.

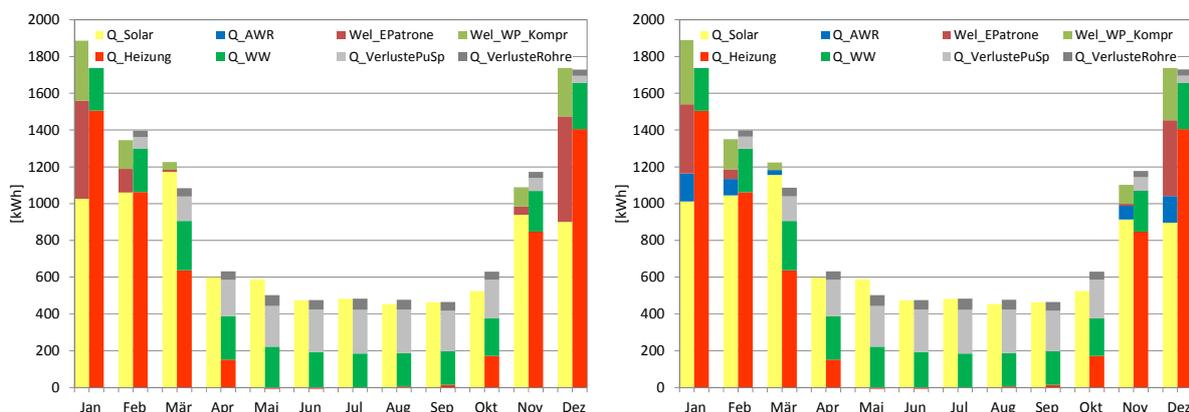


Abbildung 3.54: Monatsbilanzen für Graz (1991–2000), SFH30, System A (links), System B (rechts)

Dadurch dass der Pufferspeicher in den warmen Monaten allein durch die Solaranlage beladen wird, kann bei System C durch die AWR wenig bis keine Wärme zurückgewonnen werden, da keine ausreichend kalte Wärmesenke zur Verfügung steht. Ähnliches gilt für System B, da die Wärmepumpe jeweils den Speicher mit der höheren Temperatur als

Wärmequelle nutzt. Bei System D kann durch die Einbindung des Abwasser-Wärmetauschers direkt in die Frischwasserleitung auch im Sommer Wärme aus dem Abwasser zurückgewonnen werden (vgl. Abbildung 3.55 rechts). Dadurch fällt insgesamt deutlich mehr Wärme über die AWR an. Allerdings ist die Wärmeausbeute im Winter im Vergleich zu den anderen AWR-Systemen niedriger, da als kälteste Wärmesenke nur das Frischwasser zur Verfügung steht, während bei den anderen Systemen über die Wärmepumpe das Abwasser weiter abgekühlt werden kann. Hinsichtlich des Gesamtstrombedarfs bzw. des SPF_{sys} weist dieses System daher höhere Werte auf als System B und C.

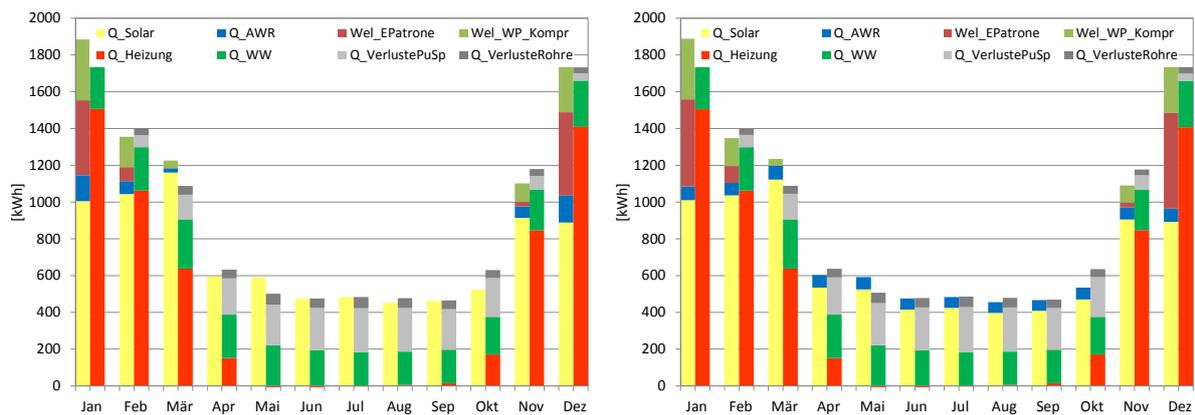


Abbildung 3.55: Monatsbilanzen für Graz (1991–2000), SFH30, System C (links), System D (rechts)

Mit dem System F (Eisspeichersystem vgl. Abbildung 3.56, rechts) kann die Senktemperatur für die AWR gegenüber den anderen Systemen weiter gesenkt werden. Bei diesem System muss daher durch die E-Patrone weniger nachgeheizt werden. Werden alle Systeme bei gleichen Anlagenkonfigurationen (Kollektorfläche, Speichervolumina) gegenübergestellt, werden mit den Eisspeichersystemen (E und F) die größten SPF_{sys} erreicht.

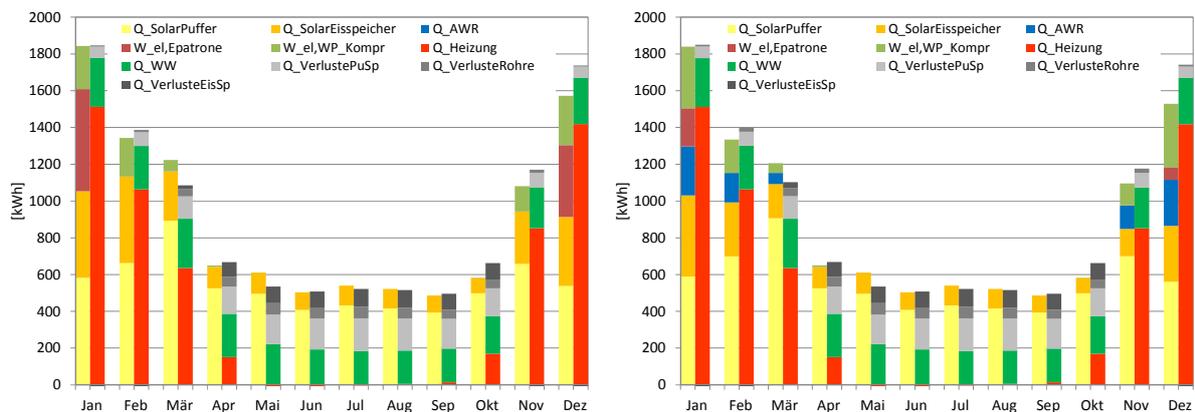


Abbildung 3.56: Monatsbilanzen für Graz (1991–2000), SFH30, System E (links), System F (rechts)

In Abbildung 3.57 ist eine Sensitivitätsanalyse für das Gebäude SFH30 und System C dargestellt. Dabei wurden die Parameter Kollektorfläche und Speichergöße getrennt voneinander variiert. Es ist ersichtlich, dass bei einer gleichen prozentuellen Vergrößerung /

Verkleinerung der Kollektorfläche oder des Speichervolumens die Kollektorfläche einen größeren Einfluss auf den SPF_{sys} hat als das Speichervolumen. Durch eine Vergrößerung der Kollektorfläche um 25 % könnte SPF_{sys} z.B. um ca. 23 % erhöht werden.

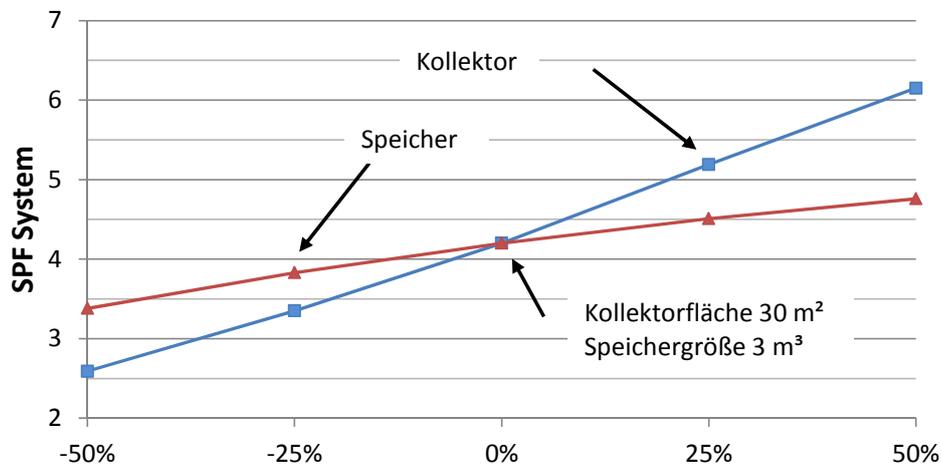


Abbildung 3.57: Sensitivitätsanalyse für SFH30 System C

Mit dem Abwasserwärmetauscher-Modell für Fallstrangwärmetauscher (vgl. Abschnitt 3.5.2), das für die Systeme C, D und F verwendet wird, können auch Fouling-Schichten an der Wärmetauscher-Oberfläche berücksichtigt werden. Für die davor dargestellten Berechnungsergebnisse wurde keine Fouling-Schicht angenommen. In Abbildung 3.58 sind die Ergebnisse einer Sensitivitätsanalyse, die bezüglich verschiedener Fouling-Schichtdicken durchgeführt wurde, dargestellt. Die Wärmeleitfähigkeit der Fouling-Schicht wurde dabei mit 0,4 W/(mK) angenommen. Es zeigt sich, dass bei einer Fouling-Schichtdicke von 1 mm der SPF_{sys} von 4,17 auf 3,93 (ca. 6 %) und die AWR von 389 kWh auf 259 kWh (ca. 33 %) reduziert wird. Die Übertragungsleistung des Wärmetauschers wird also bereits durch relativ dünne Fouling-Schichten vermindert.

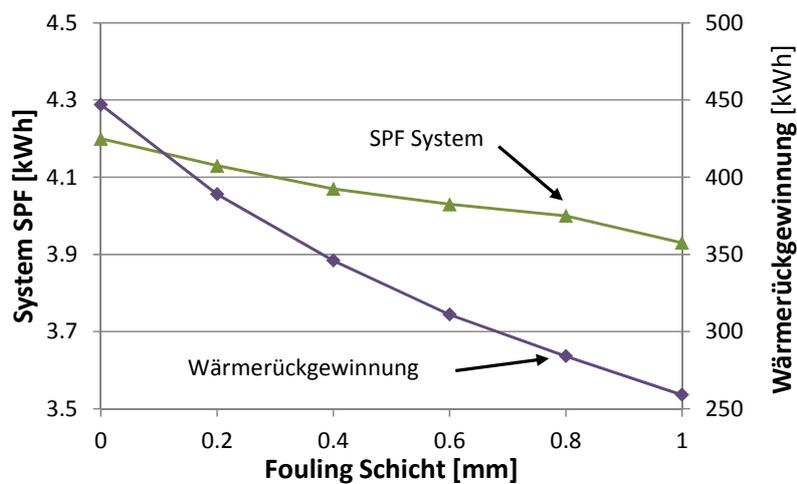


Abbildung 3.58: Sensitivitätsanalyse für SFH30, System C

3.7 Dissemination und Workshops

Im Zuge des Projekts wurden die Projektergebnisse an mehreren Konferenzen und bei einem Abschlussworkshop präsentiert. Zusätzlich haben Vertreter des Projektteams an fünf Experts-Meetings des IEA SHC Task 44 teilgenommen und die Ergebnisse des Projekts vorgestellt. In den nachfolgenden Abschnitten sind detaillierte Informationen zu den Aktivitäten in Bezug auf Dissemination enthalten.

3.7.1 Abschlussworkshop

Der Abschlussworkshop fand am 31. Oktober 2012 in Haag statt. Aufgrund inhaltlicher Parallelen wurde die Veranstaltung gemeinsam mit einem Workshop des Projekts SolPumpEff – „Hocheffiziente Kombinationen von Solarthermie und Wärmepumpenanlagen“ abgehalten. Es wurden das Projekt im Allgemeinen, die durchgeführten Feldmessungen und die Simulationsarbeiten vorgestellt und mit den Teilnehmern diskutiert.

3.7.2 Experts Meetings des IEA SHC Task44 / HPP Annex 38

1. Experts-Meeting: Bozen (IT), 29.–30. April 2010
Teilnehmer: Andreas Heinz, Werner Lerch (IWT),
Alexander Thür (AEE INTEC)
2. Experts-Meeting: Wien (AT), 28.–29. Oktober 2010
Teilnehmer: Andreas Heinz, Werner Lerch, René Rieberer (IWT),
Walter Becke (AEE INTEC)
3. Experts-Meeting: Barcelona (ES), 6.–8. April 2011
Teilnehmer: Andreas Heinz, Werner Lerch (IWT),
Alexander Thür (AEE INTEC)
4. Experts-Meeting: Marseille (FR), 18.–19. Oktober 2011
Teilnehmer: Andreas Heinz, Werner Lerch (IWT),
Alexander Thür, Martin Vukits (AEE INTEC)
5. Experts-Meeting: Povoia de Varzim (PT), 2.–4. Mai 2012
Teilnehmer: Andreas Heinz, Werner Lerch (IWT),
Martin Vukits (AEE INTEC)

3.7.3 Beitrag in der Zeitschrift „Erneuerbare Energie“

In der dritten Ausgabe der Zeitschrift „Erneuerbare Energie“ vom Jahr 2011 wurde vom Projektteam ein Artikel mit dem Titel „Wärmerückgewinnung aus Abwasser im Niedrigenergie- und Passivhaus“ veröffentlicht.

3.7.4 Konferenzbeiträge durch das IWT

Neben den oben genannten Beiträgen hat das IWT seine F&E-Arbeiten auf den folgenden Konferenzen präsentiert:

- Lerch, W.; Heinz, A.; Fink, C.; Breidler, J.; Wagner, W.: Kombination Solarthermie / Wärmepumpe inkl. Abwasser - Wärmerückgewinnung (AWR). 21. Symposium Thermische Solarenergie, 11.-13.05.2011, Bad Staffelstein, DE, Tagungsband S. 342 - 347
- Lerch, W.; Heinz, A.: Kombination von Solarthermie und Wärmepumpe inkl. Abwasserwärmerückgewinnung. RENEXPO AUSTRIA 2011, 3. Österreichisches Wärmepumpen Forum. Salzburg am 24.11.2011
- Heinz, A.; Lerch, W.: Kombination Solarthermie / Wärmepumpe inkl. Abwasserwärmerückgewinnung: Energetische Bewertung verschiedener Systeme durch dynamische Anlagensimulationen. 22. Symposium Thermische Solarenergie, 09.-11.05.2012, Bad Staffelstein, DE, Tagungsband S. 182 – 183
- Lerch, W.; Heinz, A.: Solare Wärmepumpen- Kombianlagen inkl. Abwasser Wärmerückgewinnung: Energetische Bewertung durch dynamische Anlagensimulationen in TRNSYS. Gleisdorf Solar 2012 – 10. Internationale Konferenz für thermische Solarenergienutzung, 12. – 14. September 2012, Gleisdorf, AT, Tagungsband S. 212 - 221

4 Detailangaben in Bezug auf die Ziele des Programms

4.1 Beitrag zum Gesamtziel des Programms

Im Hinblick auf den drohenden Klimawandel und die Sicherung der Energieversorgung Österreichs müssen alle Hebel in Bewegung gesetzt werden, um fossile Energieträger durch alternative Energien zu ersetzen. Ob und bis wann dies erreicht werden kann, ist eine Frage der Politik und der Energiepreise einerseits und der technologischen Entwicklung und der Marktdurchdringung neuer Konzepte andererseits.

Auf dem Weg zu einem Plus-Energie-Haus, welches nicht durch die Zufuhr von Brennstoff versorgt werden muss, spielt die Effizienz des Brauchwarmwasser-Systems eine Schlüsselrolle. Dies deshalb, weil bei gut gedämmten Gebäuden, insbesondere wenn eine Wärmerückgewinnung (WRG) aus der Abluft vorhanden ist, der Warmwasserverbrauch nicht nur energetisch, sondern auch bzgl. des notwendigen Temperaturniveaus der dominante Faktor ist. Im Vergleich zur Entwicklung besser gedämmter Gebäude und Abluft-WRG-Anlagen wurde im Bereich der Effizienz der Brauchwarmwasser-Anlagen und der Rückgewinnung von Wärme aus dem Abwasser im Gebäude bis jetzt wenig Forschung betrieben und kaum nennenswerte Durchbrüche erreicht.

Es gab bisher auch keine verlässlichen Quellen, mit welchen die anfallenden Abwassermengen und die dazugehörigen Temperaturen in Mehr- und Einfamilienhäusern zeitlich aufgelöst abgeschätzt werden konnten. Dies ist jedoch für die Abschätzung des Potenzials von Konzepten zur Abwasser-Wärmerückgewinnung von zentraler Bedeutung. In diesem Projekt wurde diese Datenlücke durch Feldmessungen geschlossen. Damit wurde eine Grundlage geschaffen, mit welcher das Potenzial der Abwasser-Wärmerückgewinnung im Wohnbau in Abhängigkeit des nutzbaren Temperaturniveaus abgeschätzt werden kann. Vielversprechende Wärmeversorgungskonzepte mit AWR wurden simulationstechnisch analysiert und deren energetische Performance unter unterschiedlichen Randbedingungen ermittelt.

Gerade bei Objekten mit sehr geringem Heizwärmebedarf ist es heute durchaus üblich, direkt mit Strom nachzuheizen oder mit relativ günstigen, jedoch ineffizienten Luft-Wasser-Wärmepumpen-Konzepten. Die in diesem Projekt untersuchten Konzepte haben das Potenzial, alleine auf Basis vor Ort gewonnener Solarenergie, der Abwasser-Wärmerückgewinnung und der Kopplung mit einer Wärmepumpe zu Plus-Energie-Haus-Lösungen zu führen.

Durch die Entwicklung des österreichischen Gebäudesektors in Richtung Null-Energie-Haus soll eine weitere Stärkung der technologischen Position Österreichs erwirkt werden. Die Inhalte dieses Projekts wurden auch in bestehende Internationale Kooperationen im Rahmen der Internationalen Energieagentur IEA (Implementing Agreement für Solar Heating and Cooling und IEA Heat Pump Program) eingebracht. Dadurch wurde ein wertvoller Beitrag zur

internationalen Vernetzung österreichischer Expertise und zum internationalen Know-how-Transfer im Forschungsbereich Energie und Gebäude geleistet.

4.2 Einbeziehung der Zielgruppen und Berücksichtigung ihrer Bedürfnisse im Projekt

Im Rahmen des Projekts war eine konkrete Umsetzung der untersuchten Konzepte weder möglich noch vorgesehen. Die durchgeführten Arbeiten und Ergebnisse wurden aber auf mehreren Veranstaltungen national und international präsentiert und diskutiert (vgl. Kapitel 3.7), wodurch auch wichtige Hinweise und Erkenntnisse für den weiteren Projektfortschritt gewonnen werden konnten. Während der Projektlaufzeit gab es mehrfach Interesse von Industrievertretern an den Projektergebnissen. Die dadurch geknüpften Kontakte bestehen teilweise noch bzw. wird angestrebt ein Folgeprojekt zur Thematik gemeinsam mit einem Industriepartner einzureichen.

4.3 Beschreibung der Umsetzungs-Potenziale für die Projektergebnisse

Die Systemkonzepte, die in diesem Projekt untersucht wurden, sind sowohl in Gebäuden in Niedrigenergiestandard als auch in Passivhäusern einsetzbar. Durch die Entwicklung des österreichischen Bausektors bzw. aufgrund der gesetzlichen Vorgaben hinsichtlich der Dämmstandards und die bestehenden Förderungen ist die Niedrigenergiebauweise im Neubau in Österreich heute Stand der Technik. Auch der Passivhaussektor wird mit Zuwachsraten von weit über 1.000 neu errichteten Gebäuden pro Jahr immer wichtiger.

Schon allein durch den Neubausektor mit mehr als 40.000 neu errichteten Wohneinheiten pro Jahr ergibt sich hier ein sehr großer Markt für Systeme, wie sie in diesem Projekt untersucht wurden. Die Resultate des Projekts sind jedoch auch im Bereich thermisch sanierter Altbauten einsetzbar.

Da es sich bei diesem Projekt um Grundlagenforschung handelt, ist mit Projektende kein vermarktbares Produkt vorhanden. Es wird aber angestrebt, in einem Folgeprojekt mit Firmenbeteiligung an einer konkreten Produktentwicklung weiterzuarbeiten.

5 Schlussfolgerungen zu den Projektergebnissen

Über die im Projekt durch AEE INTEC durchgeführten Feldmessungen an einem Einfamilien- und einem Mehrfamilienhaus konnten detaillierte Daten über die in Gebäuden anfallenden Abwassermengen bzw. Temperaturen ermittelt werden.

Die Messergebnisse zeigen, dass unter der Annahme, dass das Abwasser auf 10 °C rückgekühlt werden kann, im Einfamilienhaus theoretisch bis zu 80 % der an den Entnahmestellen zufließenden Wärmemenge wieder rückgewonnen werden könnte. Im Mehrfamilienhaus liegt dieser Wert – abhängig von der Jahreszeit – zwischen 70 und 80 %.

Aufgrund der detaillierten Messungen im Einfamilienhaus wird eine Zuordnung der Abwassermengen- und Temperaturen zu den einzelnen Verbrauchern ermöglicht. Es hat sich z.B. gezeigt, dass 75 % des im Badezimmer anfallenden Abwassers mit einer Temperatur von über 32 °C abfließt (Temperaturmessung an der Falleitung im Keller).

Im Mehrfamilienhaus war eine genaue Zuordnung der Abwassermengen zu einzelnen Verbrauchern aufgrund der installierten Messtechnik nicht möglich. Insgesamt zeigt sich aber, dass das Temperaturniveau des Abwassers im Mittel niedriger ist als jenes im Einfamilienhaus. Dies liegt zum einen an den höheren Wärmeverlusten durch die längeren Leitungen, aber zum anderen auch daran, dass die Abwasserleitungen im Mehrfamilienhaus in Gusseisen ausgeführt sind. Dies führt nach Einschätzung des Projektteams zu einer Dämpfung bzw. Verschleppung von Temperaturspitzen bis zu der Temperaturmessstelle an der Falleitung im Keller.

Im zweiten Projektteil wurden durch das Institut für Wärmetechnik Wärmeversorgungs-konzepte auf Basis von kombinierten Wärmepumpen-Solaranlagen mit AWR mit Hilfe von Simulationen in der Simulationsumgebung TRNSYS analysiert und bewertet. Dazu wurden mehrere Simulationsmodelle zur Abbildung von einzelnen Systemkomponenten, wie z.B. ein Eisspeicher, neu entwickelt.

Im Projekt wurden insbesondere Systeme, die als Wärmequelle für die Wärmepumpe Solarwärme und Abwasser – ohne konventionelle Wärmequelle (Erdreich oder Außenluft) – verwenden, untersucht. Die durchgeführten Arbeiten zeigen, dass derartige Systeme bei Gebäuden mit einem sehr niedrigen Wärmebedarf eine gute energetische Performance erreichen können. Für ein Gebäude mit einem Gesamt-Wärmebedarf von 7.300 kWh/a (Heizung und Warmwasser) werden z.B. bei einem mittleren Grazer Klima (2001–2010) ca. 1.500 kWh/a an Strom benötigt. Dafür sind 30 m² an Sonnenkollektoren, ein Speicher mit einem Volumen von 3 m³ und eine AWR-System notwendig. Noch bessere Ergebnisse können mit einem Eisspeicher erreicht werden.

Die durchgeführten Arbeiten zeigen, dass der Strombedarf solcher Systeme stark vom Klima des jeweiligen Standorts bzw. vor allem von der Solarstrahlung im Winter abhängig ist. Eine Wärmerückgewinnung aus dem Abwasser ist hier besonders interessant, weil das Warmwasser bei Niedrigenergiegebäuden einen relativ hohen Anteil am Gesamtwärmebedarf einnimmt und das Abwasser in den kalten Monaten des Jahres eine

zusätzliche Wärmequelle für das System darstellt. Mit den hier gezeigten Systemen kann bis zu ca. 30 % der für die Warmwasserbereitung aufgewendeten Wärmemenge aus dem Abwasser zurückgewonnen werden.

Eine wichtige Fragestellung im Zusammenhang mit der AWR stellt das Fouling der Wärmetauscher-Oberflächen durch die im Abwasser enthaltenen Inhaltsstoffe und die damit verbundene Verminderung der Übertragungsleistung dar. Erste theoretische Abschätzungen für Fallrohr-Wärmetauscher haben gezeigt, dass schon relativ dünne Fouling-Schichten die Leistung des Wärmetauschers stark vermindern können. Jahressimulationen für eines der untersuchten Systeme mit Fallrohrwärmetauscher ergeben, dass eine Fouling-Schicht von 1 mm den SPF_{sys} um ca. 6 % reduziert.

Wie und wie schnell sich solche Schichten abhängig von den Abwasser-Inhaltsstoffen und vom Typ des Wärmetauschers bilden und inwiefern eine kontinuierliche oder zyklische Reinigung der Wärmetauscher-Oberflächen notwendig ist, konnte in dieser Arbeit nicht untersucht werden.

Das Projektteam wird die Ergebnisse dieses Projekts, insbesondere die am IWT erstellten Simulationsmodelle, auch in andere laufende Forschungsarbeiten – insbesondere in das Projekt SolPumpEff (FFG Proj.Nr. 825546) – einfließen lassen.

6 Ausblick und Empfehlungen

Eine interessante Variante der im Projekt untersuchten Wärmeversorgungskonzepte wäre, statt normalen verglasten Flachkollektoren unabgedeckte Absorber zu verwenden. Solche Kollektoren werden auch mit witterungsbeständigen selektiven Beschichtungen angeboten (z.B. www.energie-solaire.com), und haben den Vorteil, dass sie zusätzliche Wärmegewinne über die Umgebungsluft (Konvektion und Kondensation) ermöglichen (Phillipen et al., 2010). Dadurch könnte bei den untersuchten Systemen eine Reduktion der direkt elektrisch zugeführten Wärme erreicht werden, da die Wärmepumpe in der kalten Jahreszeit über die Kollektoren zusätzlich Außenluft als Wärmequelle verwenden kann. Andererseits treten – im Vergleich zu abgedeckten Kollektoren – höhere Wärmeverluste bei höheren Absorber-Temperaturen auf, was zu Ertragseinbußen bei der direkten solaren Nutzung führt. Inwiefern der Einsatz von unabgedeckten Kollektoren im Vergleich zu den hier untersuchten Varianten zu einer Effizienzsteigerung des Systems führt, soll im Projekt SolPumpEff noch untersucht werden.

Eine kritische Fragestellung, die in diesem Projekt, aufgrund der Ausrichtung auf theoretische Untersuchungen und Simulationen nicht geklärt werden konnte, ist die evtl. bei Abwasser-Wärmetauschern in Gebäuden auftretende Verschmutzungsproblematik. Eine fundierte wissenschaftliche Analyse dieser Problematik könnte wohl nur über aufwändige Messungen durchgeführt werden. Aus jetziger Sicht müssten diese Messungen sowohl unter kontrollierten Bedingungen im Labor als auch in einer realen Installation im Feld stattfinden. Messungen im Labor hätten den Vorteil, dass kontrolliert bestimmte Randbedingungen bzgl.

Durchfluss Temperatur und Abwasserzusammensetzung eingestellt werden könnten, bzw. dass der Wärmetauscher durch einen geeigneten Aufbau der Versuchsanordnung relativ einfach ausgebaut und der Verschmutzungsgrad untersucht werden könnte. Auch die Messung des Durchflusses – insbesondere abwasserseitig – und des Wärmerückgewinnungsgrades ist im Labor wesentlich genauer möglich als in einer Feldinstallation. Die Schwierigkeit liegt dabei aber darin, die „richtige“ Abwasserzusammensetzung, wie sie typischerweise in Gebäuden auftritt, zu kennen bzw. im Labor gezielt herzustellen. Zusätzlich hat sicher auch die zeitliche Abfolge von unterschiedlichen Abwasser-Durchflüssen, -temperaturen und -zusammensetzungen einen Einfluss auf die Bildung von Verschmutzungsschichten. Dies könnte wiederum durch den Einbau eines Wärmetauschers in einer Feldinstallation wesentlich besser berücksichtigt werden als im Labor.

7 Literaturverzeichnis

- Baumann D. (2009): Stand von Solarthermie und Wärmepumpen in Österreich-Anlagentechnik, Ökologie, Ökonomie, Potenziale und Nutzung; Diplomarbeit am Institut für Wärmetechnik, Technische Universität Graz
- Bertsch S., (2009): "Quasidynamischer Wärmepumpen-Simulator", Computer - Code in EES (Engineering Equation Solver)
- Bucar G. (2007): WasteWaterHeat. Technisches und wirtschaftliches Marktpotential der Wärmeenergienutzung aus dem Abwasser in Österreich. Grazer Energieagentur GmbH
- Butz (2009): Pflichtenheft nach DWA-M 114 und Erfahrungen bei der Planung von Wärmerückgewinnungsanlagen aus Abwasser, Ingenieurbüro Klinger und Partner GmbH, http://www.um.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/65665/06-Dr_Butz.pdf (22.03.2010)
- Claußen T. (1993): Entwicklung und experimentelle Verifizierung eines dynamischen Latentwärmespeichermodells; Diplomarbeit am Studiengang Diplom-Physik, Universität Oldenburg
- Dott R., Haller M., Ruschenburg J., Ochs F., Bony J. (2011): Reference Buildings Description of the IEA SHC Task 44 / HPP Annex 38, Subtask C – Working Group Boundary Conditions, Draft
- Drück H. (2000): Multiport store-model for Trnsys. Stratified fluid storage tank with four internal heat exchangers, ten connections for direct charge and discharge and an internal electrical heater. Type 140, version 1.99B. November 2000.
- Feist W., Borsch-Laaks R., Werner J., Loga T., Ebel W. (1998): Das Niedrigenergiehaus. Neuer Standard für energiebewusstes Bauen. 5. Auflage. C.F. Müller Verlag Heidelberg.
- Feka (2009): Feka – Energiesysteme AG. Energie aus dem Abwasser. Lehrmittel-System Feka. http://www.feka.ch/pdf/FEKA_Energie_aus_Abwasser.pdf (01.03.2010)
- Fercher (2010a): Datenblatt – Fercher Abwasserwärmetauscher Typ AWT-911-Smart Shower. http://www.fercher.at/download/AWT-911_SmartShower_Datenblatt.pdf (23.02.2010)
- Fercher (2010b): Fercher – Wärmerückgewinnung aus dem heißen Abwasser. http://www.fercher.at/download/Beschreibung_Abwasser_Fercher.pdf (23.02.2010)
- Grazer Stadtwerke AG (2006): Broschüre Wasser – Eine klare Sache, Grazer Stadtwerke AG, www.grazer-stadtwerke.at
- Haller M., Dott R., Ruschenburg J., Ochs F., Bony J. (2011), The Reference Framework for System Simulations of the IEA SHC Task 44 / HPP Annex 38, A preliminary report of subtask C, Deliverable C1.3 Draft

Heinz A. (2007): Application of Thermal Energy Storage with Phase Change Materials in Heating Systems, Dissertation am Institut für Wärmetechnik, Technische Universität Graz

Henning H.-M., Miara M. (2009): Kombination Solarthermie und Wärmepumpe – Lösungsansätze, Chancen und Grenzen, in: Tagungsband 19. Symposium Thermische Solarenergie, Staffelstein, S. 40-44

Incropera F. P., DeWitt D. P. (2002): Fundamentals of Heat and Mass Transfer, Fifth Edition, John Wiley & Sons, ISBN 0-471-38650-2

Klein, S.A. (2007): Engineering Equation Solver, Academic Commercial V7.934-3D, F-Chart Software, Madison, USA

Meggers F., Leibundgut H. (2011): The potential of wastewater heat and exergy: Decentralized high-temperature recovery with a heat pump; Energy and Buildings 43 (2011), p. 879-886

Meteotest (2009), Meteororm 6.1.0.9, Global Meteorological Database for Engineers, Planners and Education, Software and Data on CD-ROM. Meteotest, Bern, Switzerland.

Müller E., Schmid F. (2005): Heizen und Kühlen mit Abwasser – Ratgeber für Bauherrschaften und Gemeinden. Herausgeber: EnergieSchweiz, Bundesamt für Energie BFE, 3003 Bern

Philippen D., Haller M.Y., Frank F. (2011): Einfluss der Neigung auf den äusseren konvektiven Wärmeübergang unabgedeckter Absorber. 21. Symposium Thermische Solarenergie, 11.-13.05.2011, Bad Staffelstein, DE, Tagungsband S. 336 – 341

Schinnerl D., Bucar G., Piller S., Unger F. (2007): AbwasserWärmeNutzung: Leitfaden zur Projektentwicklung; WasteWaterHeat; Grazer Energieagentur, Berliner Energieagentur. Herausgeber: Grazer Energieagentur GmbH, Kaiserfeldgasse 13/1, 8010 Graz

Schmid, F. (2007): Wärmerückgewinnung aus Abwasser - Potenzialerhebung im Rahmen des GEP. gwa, (6), S. 405-411.

Sparber W., Vajen K., Herkel S., Ruschenburg J., Thür A., Fedrizzi, D'Antoni M. (2011): Overview on solar thermal plus heat pump systems and review of monitoring results. In Proc.: ISES Solar World Congress, Kassel 2011.

TRNSYS (2011), TRNSYS 17, A Transient System Simulation Program, V17.00.0019, Solar Energy Lab, University of Wisconsin - Madison, USA, 2011.

VDI Wärmeatlas (1997): Wärmeübergang und Strömung in Verfahrenstechnik und Chemie, 8. Auflage, Springer Verlag

Visser H. (1986): Energy Storage in Phase Change Materials, Development of a component model compatible with the TRNSYS transient simulation program; Department of Applied Physics, Delft University of Technology

Wanner (2009): Wärmerückgewinnung aus Abwasser. Schriftenreihe der Eawag Nr. 19.
http://library.eawag-empa.ch/schriftenreihe/schriftenreihe_19.pdf (22.03.2010)

8 Internetquellen

De-Tec (2010): Homepage der DeTec GmbH: <http://www.de-tec.net>, 24.03.2010

Forstner (2012): <http://www.speichertechnik.com/thermocycle/produkte.html> (20.08.2011)

Fercher (2010c): Homepage der Firma Fercher: <http://www.fercher.at>, 23.02.2010

Gloor, R. (2010): Homepage der Energie.ch AG: <http://www.energie.ch/waschmaschine>,

Lebensministerium, 2006: Homepage des Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft,
http://lebensministerium.maz24.com/generationblue/brg_waidhofen/quellen/11.htm, Wien, 2006

Preheat (2010): Homepage PREHEAT, Wärme aus Abwasser: www.preheat.de, 10.05.2012

Powerpipe (2011): http://www.renewability.com/order_powerpipe_online.html (10.05.2011)

Stens O. (2006): Homepage des „Bund der Energieverbraucher“:
http://www.energieverbraucher.de/de/Zuhause/Hausgeraete/Waschmaschinen/Waschmaschinen-ans-Warmwasser_1662, 16.03.2011

Anhang A: Wasser- und Energieverbrauch Haushaltsgeräte

Waschmaschine

Eine durchschnittliche Haushaltswaschmaschine benötigt für einen Programmdurchlauf etwa 50 Liter Wasser, wovon jedoch nur etwa 10 Liter erwärmt werden. Trotzdem braucht eine Waschmaschine etwa 50 % des Stroms beim 30 °C-Programm für das Heizen, bei einem 60 °C-Programm sind es bereits ca. 75 %, bei einem Kochwäschewaschvorgang sogar 90 %. (Stens, 2006 / Gloor, 2010)

Tabelle 4: Ergebnisse der Literaturrecherche für Wasser- und Energieverbrauch von Waschmaschinen (* Quellen: Eudora; Bosch)

Hersteller / Modell	Temperatur [°C]	Wasser- verbrauch [ltr] *	Energieverbrauch gesamt [kWh] *	Beladung [kg]	Aufheizen d. Wassers [kWh]
EUDORA Supernova W6563	95	85	2,1	7,0	1,9
	60	75	1,2	7,0	0,9
	40	59	0,66	7,0	0,45
	30	70	0,5	4,5	0,25
BOSCH WAS32750	90	80	2,2	7,0	2,0
	60	69	1,3	7,0	1,0
	40	69	0,88	7,0	0,59
	30	40	0,16	2,0	0,08

Geschirrspüler

In folgender Tabelle sind Geschirrspüler dreier verschiedener Hersteller angeführt. Durch den geringen Wasserverbrauch je Programmdurchlauf (ca.10-20 ltr) von Haushaltsgeschirrspülern ist auch die Wärmemenge, welche in den Kanal geleitet wird, sehr gering.

Tabelle 5: Ergebnisse der Literaturrecherche für Wasser- und Energieverbrauch von Geschirrspülern (Quellen: Miele; Zanussi; Adora)

Hersteller/ Modell	Programm	Reinigungs-/ Klarspültemperatur [°C]	Wasser- verbrauch [ltr]	Gesamtenergie- verbrauch [kWh]
MIELE G 4500 SCU	EnergieSpar	45/60	11	0,8
	Intensiv	75/65	15	1,3
ZANUSSI ZDTS100	BIO	50	14	0,8
	Intensiv	65	20	1,7
ADORA N GS60N-Gi/-c	Normal/ Standard	50/65	12	1,05
	Intensiv	65/70	23	1,6

Folgende Bedienungsanleitungen von Haushaltsgeräten wurden zur Errechnung von Verbrauchszahlen herangezogen:

Eudora, 2010: Bedienungsanleitung Waschautomat; EUDORA Supernova W6563,

Bosch, 20xx: Waschmaschine Gebrauchsanleitung; BOSCH WAS32750 und WAS28750

Miele, 2008: Gebrauchsanweisung Geschirrspüler; MIELE G 4500 SCU

Zanussi, 2005: Zanussi Geschirrspüler ZDTS 100 Bedienungsanleitung

Adora, 2005: Geschirrspüler Adora N integriert Bedienungsanleitung