

F 2934

Marten F. Brunk, Christopher Seybold

Dezentrale Abwasserwärme- rückgewinnung zur Steigerung der Energieeffizienz von Gebäuden

Fraunhofer IRB ■ Verlag

Bei dieser Veröffentlichung handelt es sich um die Kopie des Abschlussberichtes einer vom Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung -BMVBS- im Rahmen der Forschungsinitiative »Zukunft Bau« geförderten Forschungsarbeit. Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die Originalmanuskripte wurden reprotechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprotechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2015

ISBN 978-3-8167-9430-1

Vervielfältigung, auch auszugsweise,
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69
70504 Stuttgart

Nobelstraße 12
70569 Stuttgart

Telefon 07 11 9 70 - 25 00
Telefax 07 11 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de

www.irb.fraunhofer.de/bauforschung

Endbericht zum Forschungsvorhaben

„Dezentrale Abwasserwärmerückgewinnung zur Steigerung der Energieeffizienz von Gebäuden“

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Marten F. Brunk
Dipl.-Wirt.-Ing. Christopher Seybold
Lehrstuhl für Baubetrieb und Gebäudetechnik
RWTH Aachen University

Das Forschungsvorhaben wurde mit Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau des
Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung gefördert.

(Aktenzeichen: SF-10.08.18.7-11.38)

Die Verantwortung für den Inhalt des Berichtes liegt beim Autor.

Aachen, den 02.08.2014

Inhaltsverzeichnis

1	Ziel der Forschungsaufgabe	1
2	Durchführung der Forschungsaufgabe	5
2.1	Potentialanalyse	5
2.1.1	Monitoringkonzept und Messtechnik	5
2.1.2	Monitoringobjekte	6
2.1.3	Datenauswertung	9
2.2	Analyse von Anlagenkonzepten	10
2.2.1	Hygienische Anforderungen	10
2.2.2	Anlagenkonzept	11
2.2.3	Simulation	12
3	Ergebnisse	13
3.1	Potentialanalyse	13
3.1.1	Mehrfamilienhaus in Düren	14
3.1.2	Mehrfamilienhaus in Pforzheim	16
3.1.3	Studentenwohnheim Otto Petersen Haus	17
3.1.4	Studentenwohnheim Theodore von Kármán Haus	18
3.1.5	Business Hotel Aachen City	19
3.1.6	Luisenhospital Aachen	20
3.1.7	Analyse von Einflussgrößen	21
3.1.7.1	Einflussgröße Trinkkaltwassertemperatur	21
3.1.7.2	Einflussgröße Abwassermenge	32
3.1.7.3	Einflussgröße Duschverhalten	37
3.1.8	Zusammenfassung Messergebnisse	44
3.2	Analyse von Anlagenkonzepten	45
3.2.1	Studentenwohnheim Theodore von Kármán Haus	45
3.2.1.1	Simulation des Grundsystems	45
3.2.1.2	Wirtschaftlichkeitsbetrachtung	49
3.2.1.3	Variation Biofilmschichtdicken	55
3.2.1.4	Variation Teilerwärmungstemperaturen Wärmepumpe	57
3.2.2	Weitere Wohngebäude	59
3.2.3	Zusammenfassung Simulationsergebnisse	65

4	Fazit	66
	Anhang 1	67
	Abbildungsverzeichnis	68
	Tabellenverzeichnis	69
	Literaturverzeichnis	70

1 Ziel der Forschungsaufgabe

Etwa 4,3 % des gesamten Endenergieverbrauchs für Industrie, Verkehr, Haushalte und Gewerbe/Handel der Bundesrepublik Deutschland werden zur Erzeugung von Trinkwarmwasser verwendet.¹ Bezogen auf Gebäude beträgt der Anteil des Endenergieverbrauchs für Warmwasser circa 12,2 %.² Speziell für den Bereich der Wohngebäude ergibt sich für den Anteil des Endenergieverbrauchs für Warmwasser, wie in **Abbildung 1** dargestellt, ein ähnlicher Wert, nämlich 11 %. Hierbei ist zu erkennen, dass der Endenergieverbrauch für Trinkwarmwasser aktuell circa 1/6 des Energieverbrauchs für Raumwärme entspricht.

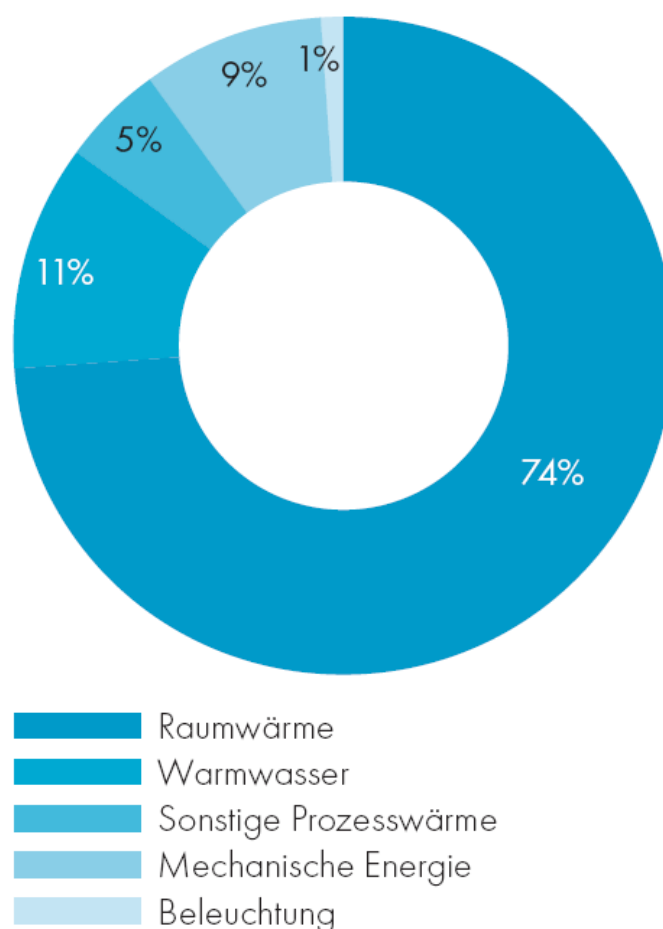


Abbildung 1: Endenergieverbrauch der Haushalte für Wohnen 2008³

Betrachtet man die Entwicklung des Endenergiebedarfs für verschiedene Gebäude- und Anlagenstandards in **Abbildung 2**, dann zeigt sich, dass der Wärmebedarf für Lüftung und Transmission von Gebäuden mit höherem Standard sinkt während der Wärmebedarf für die Trinkwassererwärmung auf konstantem Niveau (circa 15 kWh/m²a) verbleibt. Somit wird aufgrund der fortschreitenden Anstrengungen zur Reduktion des Heizwärmebedarfs von Gebäuden der prozentuale Anteil für Warmwasser in den kommenden Jahren erheblich steigen.

¹ Vgl. AG Energiebilanzen e.V. (Hrsg.), Anwendungsbilanzen für die Endenergiesektoren in Deutschland in den Jahren 2009 und 2010, 2011, S. 27.

² Vgl. AG Energiebilanzen e.V. (Hrsg.), Anwendungsbilanzen für die Endenergiesektoren in Deutschland in den Jahren 2009 und 2010, 2011, S. 18.

³ Vgl. Statistisches Bundesamt, 2010.

Folglich wird das Trinkwarmwasser eine wesentliche Größe für die Energieeffizienz von Gebäuden.

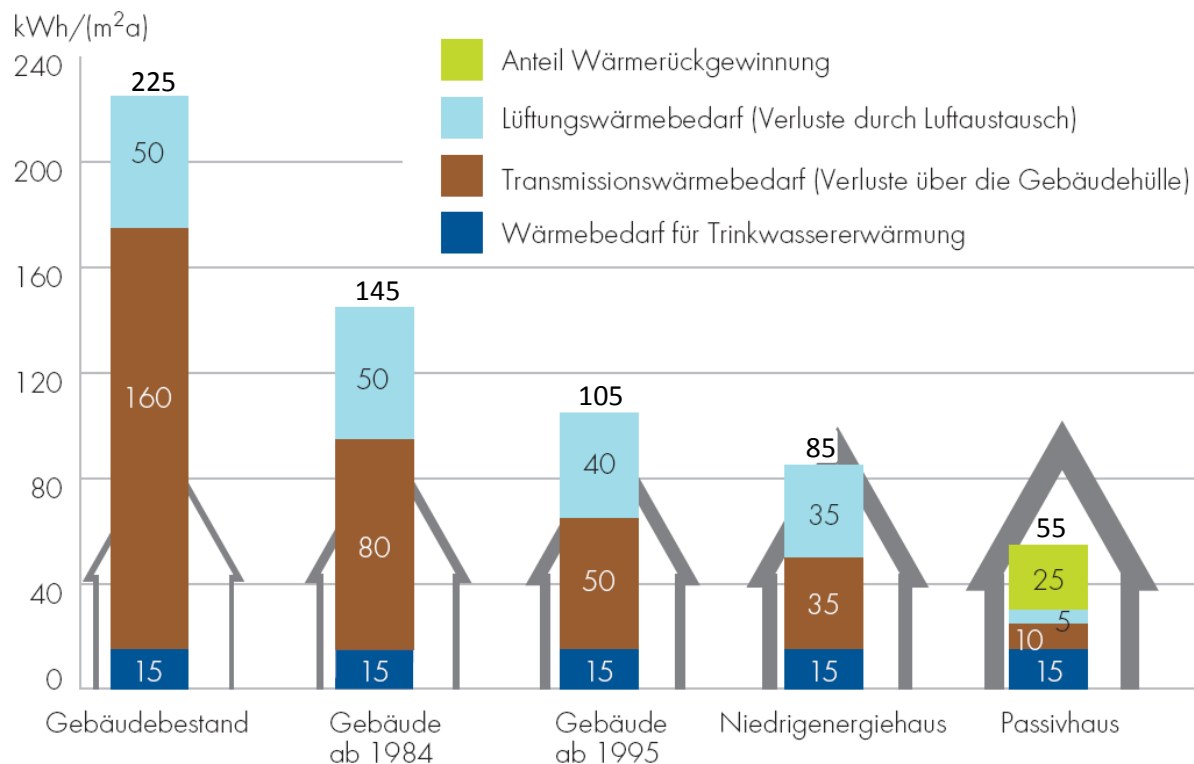


Abbildung 2: Entwicklung Endenergiebedarf Trinkwarmwassererzeugung⁴

Die Wärmemenge des Trinkwarmwassers wird größtenteils ungenutzt über das Abwasser in die Entwässerungssysteme eingeleitet. Vor dem Hintergrund der deutschen Klimaschutzziele, die Treibhausgasemissionen und den Anteil fossiler Energieträger zu reduzieren und gleichzeitig die Effizienz des Energieeinsatzes zu steigern, liegt in der Abwasserwärmerückgewinnung ein großes, bisher weitgehend ungenutztes Potential zur Entwicklung von ressourcenoptimierten gebäudetechnischen Anlagen vor. Eine weitere Absenkung der Wärmemenge im Abwasser durch Einsparungen im Warmwasserverbrauch ist aufgrund der hohen Hygiene- und Komfortansprüche der Nutzer nicht zu erwarten.

⁴ Vgl. SHELL Hauswärme-Studie, 2011, S. 20.

Grundsätzlich kann, wie in **Abbildung 3** dargestellt ist, die Abwasserwärmerückgewinnung innerhalb des Gebäudes, in der Straßenkanalisation oder an der Kläranlage erfolgen. Die Wärmerückgewinnung im Gebäude stellt eine bisher kaum verbreitete Technologie dar.

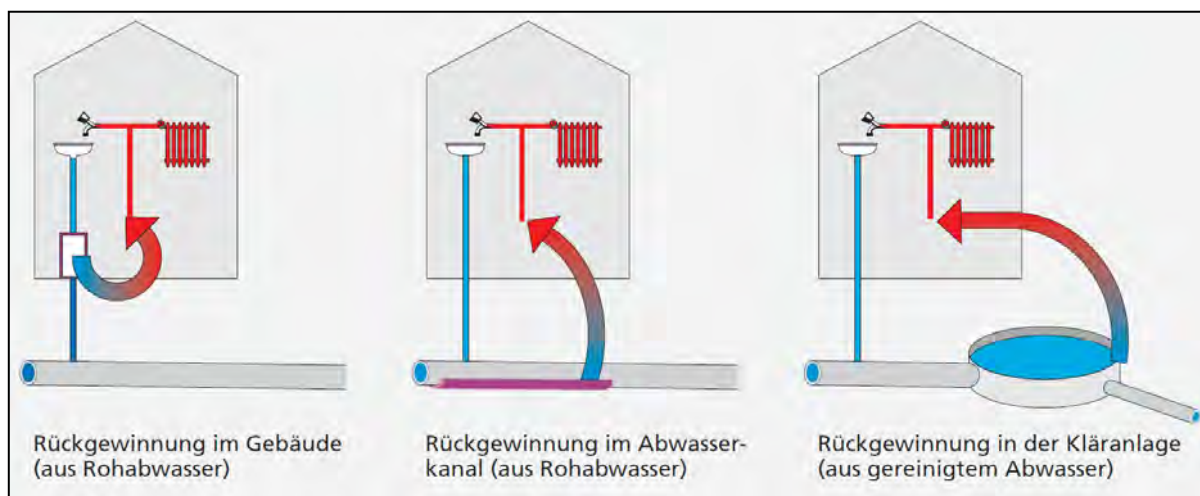


Abbildung 3: Orte der Abwasserwärmenutzung⁵

Im Rahmen des Forschungsvorhabens „Dezentrale Abwasserwärmerückgewinnung zur Steigerung der Energieeffizienz von Gebäuden“ wird der Ansatz der gebäudeinternen Abwasserwärmerückgewinnung im privaten Kanalnetz (siehe **Abbildung 4**) untersucht. Aufgrund der im Vergleich zu anderen regenerativen Energiequellen hohen Abwassertemperatur im Gebäude von 23 – 25 °C ist eine hohe Effizienz einer eingesetzten Wärmepumpentechnologie zu erwarten. Zusätzlich steht mit dem Gebäude ein direkter Abnehmer der zurückgewonnenen Wärme zur Verfügung.

⁵ Vgl. Müller, E.A., Schmid, F., Kobel, B., Stodtmeister, W., Heizen und Kühlen mit Abwasser - Ratgeber für Bauträger und Kommunen, Deutsche Bundesstiftung Umwelt (Hrsg.), Osnabrück, 2009, S. 24.

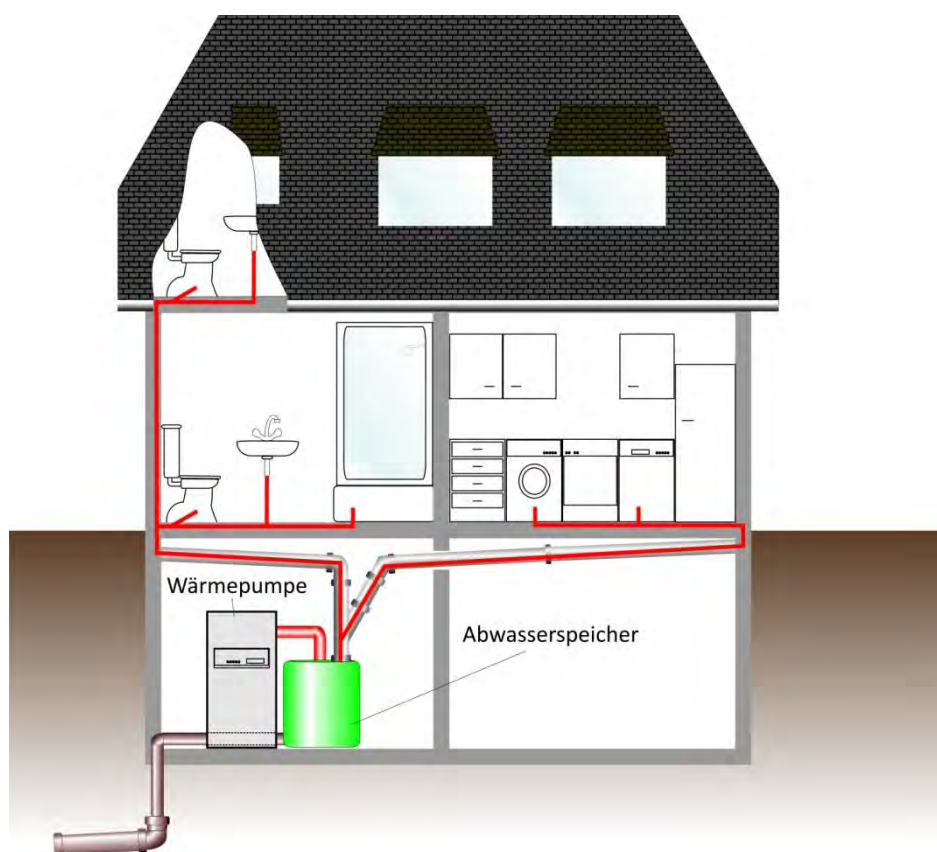


Abbildung 4: Gebäudeinterne Abwasserwärmerückgewinnung

Die Forschungsarbeiten knüpfen an das im Frühjahr 2012 abgeschlossene, ebenfalls mit Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung geförderten Forschungsvorhaben „Dezentrale Wärmerückgewinnung aus häuslichem Abwasser“ (SF-10.08.18.7-10.4) an.⁶

In diesem abgeschlossenen Forschungsvorhaben wurden eine messtechnische Potentialanalyse an zwei Studentenwohnheimen, einem Hotel und einem Krankenhaus durchgeführt sowie auf Grundlage der ermittelten Abwasserganglinien erste Simulationsrechnungen eines Abwasserwärmepumpensystems durchgeführt. Offene Fragestellungen blieben die Analyse von jahreszeitlichen Schwankungen des Abwasserenergieprofils, die Bewertung der maßgeblichen Einflussgrößen auf Abwassertemperaturniveau und Abwassermenge sowie die Identifikation des Potentials der Abwasserwärmerückgewinnung bei kleineren Mehrfamilienhäusern. Zudem fehlte eine detaillierte simulatorische Analyse mittels dynamischer Berechnung.

Somit lassen sich die Ziele der Forschungsarbeiten dieses Berichts einerseits mit der Ausweitung der messtechnischen Potentialanalyse der Energiequelle Abwasser in Gebäuden

⁶ Vgl. Beyert, Joachim; Brunk, Marten F.; Osebold, Rainard; Seybold, Christopher; Vosen, Georg: Dezentrale Wärmerückgewinnung aus häuslichem Abwasser. Endbericht der RWTH Aachen University, Lehrstuhl für Baubetrieb und Gebäudetechnik im Forschungsprogramm Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesministeriums für Verkehr, Bau, Stadtentwicklung, Aktenzeichen: SF-10.08.18.7-10.4/ II 3 F20-09-1-250. Aachen, 2012.

sowie der numerischen Simulation von Anlagenkonzepten zur Bewertung der ökologischen und ökonomischen Vorteilhaftigkeit der Abwasserwärmerückgewinnung beschreiben.

Hieraus leiten sich folgende Teilziele ab:

- Fortführung der messtechnischen Potentialanalyse an 4 Gebäuden des Vorprojektes (2 Studentenwohnheime, 1 Hotel, 1 Krankenhaus)
- Erweiterung der messtechnischen Potentialanalyse durch Aufnahme von 2 Mehrfamilienhäusern in die Analyse
- Erstellung von repräsentativen, wochentagsabhängigen Ganglinien der Energiequelle Abwasser auf Grundlage von Langzeitmessungen sowie Untersuchung der maßgebenden Einflussgrößen auf das Energiepotential
- Konzeption und Simulation von Anlagen
- Bewertung der Vorteilhaftigkeit der Anlagenkonzepte

2 Durchführung der Forschungsaufgabe

Die Ausführungen zur Durchführung der Forschungsaufgabe werden entsprechend der o.g. Zielformulierung in die Kapitel „Potentialanalyse“ und „Analyse von Anlagenkonzepten“ unterteilt.

2.1 Potentialanalyse

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wird vom Lehrstuhl für Baubetrieb und Gebäudetechnik eine detaillierte messtechnische Potentialanalyse der Energiequelle Abwasser durchgeführt. Hierzu werden Messungen in zwei Studentenwohnheimen, einem Hotel und einem Krankenhaus fortgeführt, sowie zwei neue Gebäude (Mehrfamilienhäuser) in das Monitoring aufgenommen.

2.1.1 Monitoringkonzept und Messtechnik

Zur Ermittlung des Energiepotentials der Abwasserströme werden in den Monitoringobjekten die Trinkwassermenge und die Abwassertemperatur gemessen. Die Trinkwassermenge stellt hierbei den Schätzer für die Abwassermenge dar. Die Abwassertemperatur wird mit jeweils zwei Temperaturanlegefühlern in Sechsuhrstellung an den Abwasserleitungen redundant gemessen.⁷ Die Messstellen hierfür befinden sich an den Hauptabwassersträngen, nachdem alle gebäudeinternen Abwasserteilleitungen zusammengeführt werden, und bevor das Abwasser an die Straßenkanalisation übergeben wird. Zusätzlich werden die Raumtemperaturen in den Räumen mit den Messstellen des Trinkwasserdurchflusses und der Abwassertemperatur gemessen sowie die Trinkkaltwassertemperatur mit zwei Anlegefühlern in

⁷ Im Luisenhospital Aachen sowie im Mehrfamilienhaus in Pforzheim wird die Abwassertemperatur abweichend mit einem innenliegenden, am Boden des Abwasserrohrs befestigten Temperaturfühlers gemessen.

Sechsuhrstellung aufgezeichnet. In **Abbildung 5** ist das Schema zum Monitoring beispielhaft dargestellt.

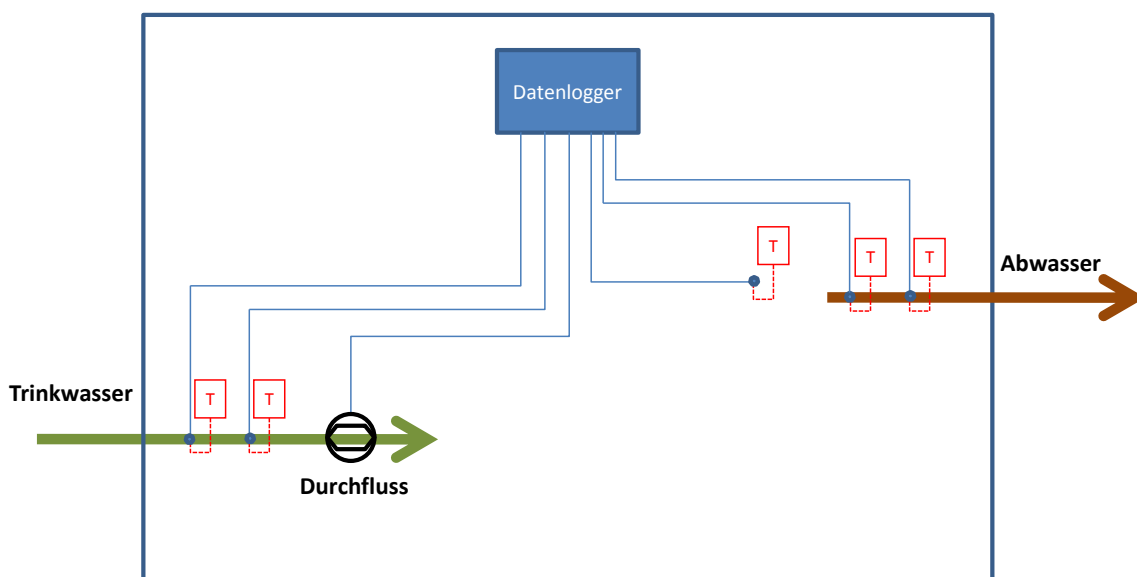


Abbildung 5: Monitoringkonzept

Als Temperaturfühler werden Platin-Widerstandsthermometer mit 1000 Ohm verwendet. Der Anschluss an den Datenlogger erfolgt mittels kurzen Leitungen in Zweileiterschaltung. Alle Temperatursensoren wurden am Institut mithilfe eines Tauchbades und Hochpräzisionsmessinstrumenten kalibriert. Die Trinkwassermenge wird mittels Impulsgebern erfasst. Diese werden verwendet, um das mechanische Zählwerk des Durchflussmessers an das elektrische System anzubringen. Die Impulswertigkeit beträgt 1, 10 oder 100 Liter. Die Mess- und Speicherintervalle aller Messungen betragen 5 Sekunden.

2.1.2 Monitoringobjekte

Die messtechnische Potentialanalyse wird an sechs Gebäuden in drei deutschen Städten durchgeführt. Es handelt sich hierbei um zwei Mehrfamilienhäuser (19 und 49 Bewohner), zwei Studentenwohnheime (209 und 244 Bewohner), ein Hotel (154 Zimmer) und ein Krankenhaus (348 Betten). Die Monitoringobjekte werden im Folgenden beschrieben.

Das Mehrfamilienhaus „DNW“ mit 19-20 Bewohnern⁸ in der Wilhelmstraße in der Stadt Düren (NRW) wurde in den 1960er Jahren gebaut und in den 1990er Jahren saniert (siehe **Abbildung 6**). Es handelt sich um ein 5-geschossiges, unterkellertes innerstädtisches Reihenhausbauwerk mit 8 Wohnungen und 4 gewerblichen Nutzungseinheiten. Die gewerblichen Nutzungseinheiten sind ein Kiosk, eine Apotheke, ein Internetcafé und eine neurologische Arztpraxis. Die Altersstruktur der Bewohner weist 4 Kinder bis 13 Jahre, 13 Bewohner im Alter zwischen 25 und 65 Jahren und 2 Bewohner älter als 65 Jahre auf.

⁸ Ab 1. November 2012 beträgt die Bewohneranzahl 20.



Abbildung 6: Mehrfamilienhaus im Stadtzentrum von Düren, Wilhelmstraße

Das Mehrfamilienhaus „PFG“ mit 49 Bewohnern in der Güterstraße in der Stadt Pforzheim (BW) verfügt über 9 Etagen (siehe **Abbildung 7**). Im Erdgeschoss befindet sich eine nicht-vermietete Gewerbeeinheit. Das Gebäude befindet sich in unmittelbarer Nähe zum Pforzheimer Hauptbahnhof.



Abbildung 7: Mehrfamilienhaus in Pforzheim, Güterstraße

Das Wohnheim „OPH - Otto Petersen Haus“ (siehe **Abbildung 8**, linkes Gebäude) ist ein Studentenwohnheim in der Rüttscher Straße in der Stadt Aachen (NRW), welches 1965 ge-

baut und 1988/89 saniert wurde. Das Haus hat 18 Etagen und beherbergt 209 Bewohner. In den ersten vier Etagen befinden sich 66 Einzelzimmer mit je 12 m² Wohnfläche. In diesen Etagen stehen jeweils eine große Küche, vier Duschen und drei Toiletten zur gemeinsamen Nutzung zur Verfügung. In den Etagen fünf bis 17 befinden sich 104 Apartments und 26 Doppelapartements. Die Apartments haben eine Wohnfläche von 18 m² und sind mit einer Miniküche, sowie eigenem Bad mit Dusche ausgestattet. In den Doppelapartements sind ebenso ein Bad und eine Miniküche integriert. Die Wohnfläche des Doppelapartements beträgt 24 m² und wird von zwei Studenten bewohnt. Das Wohnheim ist vollständig vermietet.

Das Studentenwohnheim „TKH - Theodore von Kármán Haus“ (siehe **Abbildung 8**, rechtes Gebäude) wurde 1968 gebaut und 1988/89 saniert. Das Haus liegt ebenfalls an der Rüttscher Straße in der Stadt Aachen (NRW) und bietet auf 16 Etagen Platz für 244 Bewohner. Die Unterbringung erfolgt in Einzelzimmern mit einer Größe von 12 m². Jedes Zimmer verfügt über ein Waschbecken. Auf jeder Etage stehen eine große Küche, vier Duschen und drei Toiletten zur Verfügung, welche von den Bewohnern der Etage gemeinsam genutzt werden. Das Studentenwohnheim ist wie das Otto Petersen Haus vollständig vermietet.

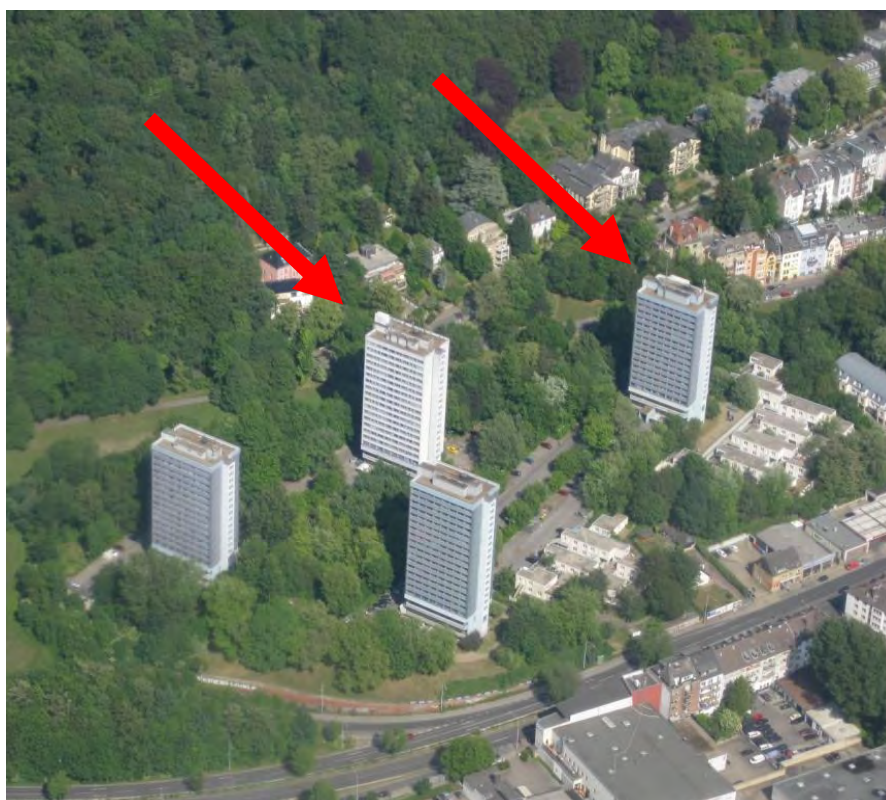


Abbildung 8: Studentenwohnheime in Aachen

Das Business Hotel Aachen City wurde im Jahr 2004 eröffnet. Der Hotelneubau befindet sich in der Aachener Innenstadt (NRW). Das Hotel verfügt über 154 Zimmer, einen Fitnessbereich mit Dampfbad und sieben Konferenzräumen mit bis zu 240 Sitzplätzen. Die Zimmer sind standardmäßig mit Dusche, Badewanne und WC ausgestattet. Das Hotel wird vorrangig

von Geschäftsreisenden besucht. Es liegen keine Informationen über die Belegungszahlen der einzelnen Tage vor.

Das Luisenhospital „LUI“ (siehe **Abbildung 9**) ist ein modernes Krankenhaus der Regelversorgung der Stadt Aachen (NRW) mit 348 Planbetten und 10 Fachabteilungen, mit dem entsprechenden diagnostischen Spektrum (u.a. Kernspintomographie, Computertomographie sowie klinisches Labor). Mit 348 Planbetten gehört das Luisenhospital zu den größeren Krankenhäusern in Deutschland.



Abbildung 9: Krankenhaus „Luisenhospital Aachen“

2.1.3 Datenauswertung

Ziel des Monitorings ist die Ermittlung von repräsentativen Ganglinien von Abwassertemperatur und Durchfluss verschiedener Gebäudetypen und Nutzung zur Identifikation des energetischen Potentials der Abwasserströme. Die Auswertung der Messdaten erfolgt mit einem Matlab-Tool. Hierbei werden zunächst die Temperaturmessungen mit den Werten der Kalibrierfunktionen bereinigt. Die Bestimmung der Abwassertemperatur und der Trinkkaltwassertemperatur ergibt sich aus dem arithmetischen Mittel der redundanten Messungen im Fünfsekundenintervall. Der durchschnittliche Trinkwasserdurchfluss der Fünfsekundenintervalle kann entsprechend der Größe der Betrachtungszeitschritte aufsummiert werden.

Zur Bildung der repräsentativen Ganglinien einzelner Wochentage werden die im Fünfsekundenintervall ermittelten Messdaten in Stundenwerte transformiert und statistisch ausgewertet. Feiertage werden hierbei den Sonntagen zugeordnet. Der Stundenmittelwert des Durchflusses ergibt sich aus der Summe der aufgezeichneten Impulse einer vollen Stunde und wird in Liter pro Stunde und Person (Wohnnutzung) bzw. Liter pro Stunde und Zimmer (Hotel) oder Liter pro Stunde und Bett (Krankenhaus) angegeben. Die Berechnung des

Stundenmittelwertes der Abwassertemperatur erfolgt nicht durch eine zeitliche Gewichtung der Fünfsekundenwerte, sondern durch eine mengenmäßige Gewichtung mit dem zeitgleich gemessenen Fünfsekundenwert des Durchflusses und wird in °C angegeben.

Im Rahmen der Datenauswertung werden die Einflüsse einer schwankenden Trinkkaltwassertemperatur sowie des individuellen Duschverhaltens auf das Abwasserenergiepotential untersucht. Hierzu werden im Rahmen des Monitorings zusätzlich die Trinkkaltwassertemperaturen gemessen. Zusätzlich wurde eine Umfrage zum Nutzerverhalten in den beiden Studentenwohnheimen durchgeführt.

2.2 Analyse von Anlagenkonzepten

Im Rahmen des Forschungsvorhabens werden Systeme zur Abwasserwärmenutzung mittels Wärmepumpen untersucht. Das Ziel der Analyse ist eine Aussage zur Vorteilhaftigkeit der dezentralen Nutzung von Abwasserwärme. Das Anlagenkonzept sieht die gebäudeinterne Abwasserwärmerückgewinnung mittels Wärmepumpen zur Trinkwarmwasserversorgung des Gebäudes vor (siehe **Abbildung 10**).

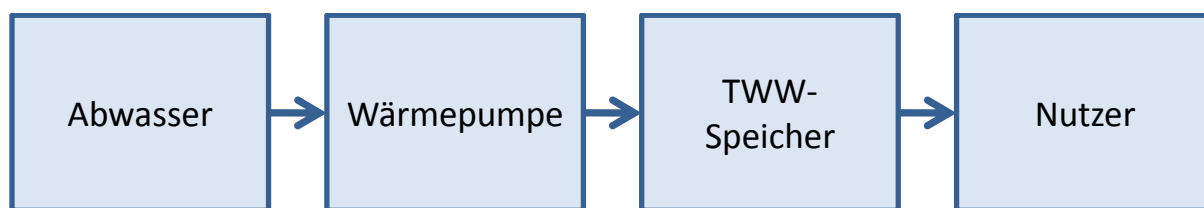


Abbildung 10: Analysekonzept

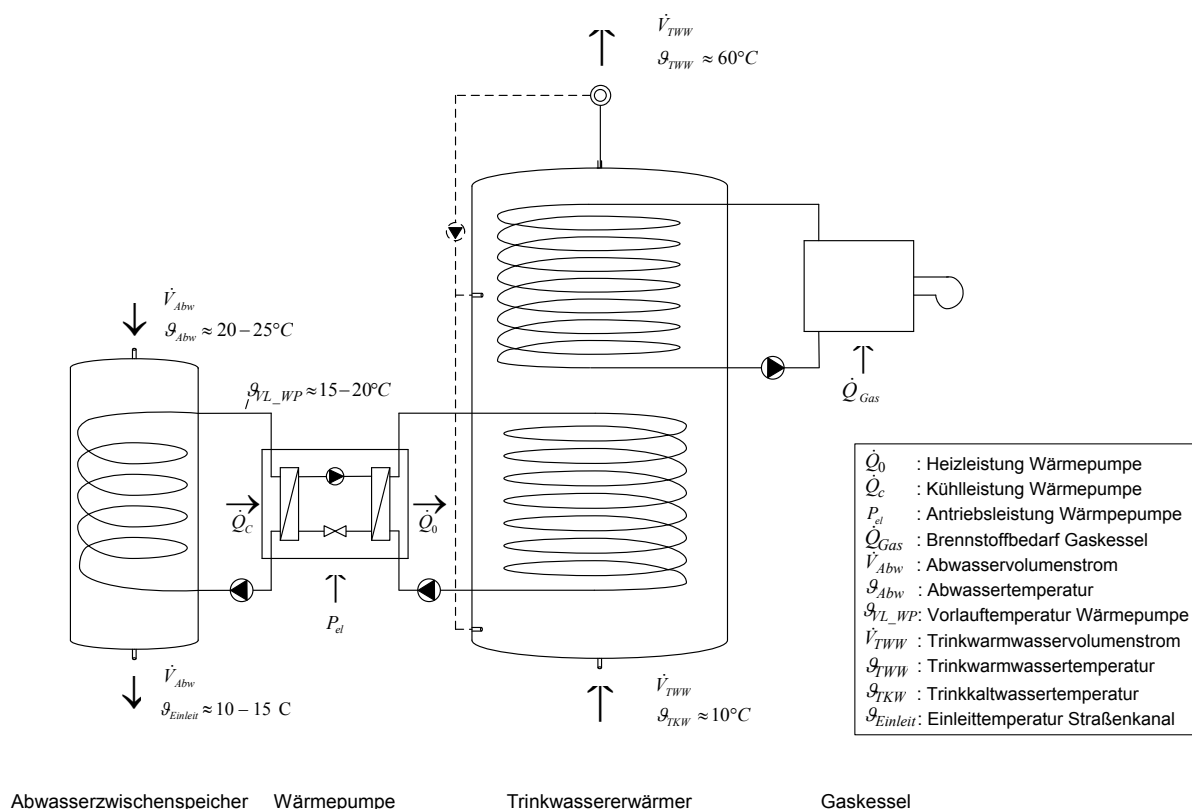
2.2.1 Hygienische Anforderungen

Bei der Trinkwarmwasserversorgung von Gebäuden sind hohe Hygieneanforderungen zu erfüllen. Grundlage hierzu sind die Trinkwasserverordnung (in der Änderungsfassung 2011), die DVGW-Richtlinie W 551 sowie die Normen DIN EN 1717 und DIN 1988. Ziel ist u.a. die Verminderung des Legionellenwachstums in Trinkwasserversorgungssystemen. Legionellen können beim Einatmen Legionellose (Legionellen-Pneumonie, Pontiac-Fieber) verursachen. Da Warmwassertemperaturen von 25 – 45 °C ideale Wachstumsbedingungen für Legionellen liefern, ist die thermische Desinfektion ein gesichertes Verfahren zur Verhinderung von Gesundheitsschäden. So schreibt die DVGW-Richtlinie W 551 eine Warmwassertemperatur am Austritt des Trinkwassererwärmers von größer oder gleich 60 °C bei Großanlagen vor. Als Großanlagen gelten Anlagen, welche einen Trinkwasserspeichereinhalt von 400 Litern überschreiten und/oder ein Fließweg des dem Trinkwassererwärmer nachgeschalteten Rohrnetzes mehr als 3 Liter aufweist (3-Liter-Regel). Großanlagen sind zudem mit Zirkulationsleitungen auszuführen, wobei eine maximale Abkühlung im Zirkulationssystem von 5 K einzuhalten ist. Die Trinkwasserverordnung regelt zusätzlich umfassende Untersuchungspflichten an repräsentativen Entnahmestellen.⁹

⁹ Vgl. TrinkwV 2001 in der Fassung d. Bekanntmachung v. 28.11.2011, DVGW, Technische Regel Arbeitsblatt W 551, April 2004, DIN EN 1717:2011, DIN 1988-100:2011 und DIN 1988-200:2012.

2.2.2 Anlagenkonzept

Abbildung 11 zeigt ein mögliches Anlagenkonzept zur Trinkwassererwärmung mit Speicher-Trinkwassererwärmer. Das Abwasser wird in einem Abwasserspeicher zwischengespeichert, worin die Wärmeentnahme mittels innenliegendem Wärmeübertrager erfolgt. Die übertragene Abwasserwärme dient als Wärmequelle der Wärmepumpe, welche die Energie auf einem hohem Temperaturniveau an den Speicher-Trinkwassererwärmer abgibt. Hierzu ist ein innenliegender Wärmeübertrager im unteren Teil des Speichers installiert. Im oberen Teil des Speichers ist ein weiterer Wärmeübertrager vorhanden, welcher einen zweiten Erzeuger, bspw. einen konventionellen Gaskessel, in den Speicher einbindet (bivalenter Speicher). Der bivalente Speicher ermöglicht eine Vorerwärmung des Trinkwarmwassers durch die Wärmepumpe und eine weitere Erwärmung auf die erforderliche Mindesttemperatur von 60 °C durch den zweiten Erzeuger.



Der gesamte Speicherinhalt des Trinkwassererwärmers wird zur thermischen Desinfektion einmal täglich mittels Umwälzung des Speichers vollständig auf über 60 °C erwärmt.

Die Regelung des Systems erfolgt individuell angepasst über Temperaturfühler im Trinkwassererwärmer (hier nicht dargestellt).

Abbildung 11: Anlagenkonzept zur Trinkwassererwärmung

2.2.3 Simulation

Die Anlage in **Abbildung 11** wird mittels Simulationssoftware modelliert. Hierzu wird die Software MATLAB SIMULINK mit der Erweiterungs-Bibliothek CARNOT-Blockset, welche vom Solar-Institut Jülich der FH Aachen entwickelt wurde, verwendet. In der CARNOT-Bibliothek steht eine Vielzahl von Modellen zur numerischen Simulation von Komponenten thermischer Systeme zur Verfügung.¹⁰

Die Wärmepumpe wird mittels Kennlinienmodell abgebildet. Hierzu werden Messdaten von Leistungsprüfungen verschiedener Wärmepumpen hinterlegt.

Eingangsgrößen in die Simulation sind einerseits das aus den Messdaten entwickelte Abwasserenergieprofil nach Kapitel 3 sowie andererseits ein Trinkwarmwasserbedarfsprofil, welches aus den Abwassermessdaten abgeleitet wird.¹¹ Hierbei wird davon ausgegangen, dass die Wärmemenge des Abwassers - unter Berücksichtigung eines pauschalen Verlustfaktors für Wärmeverluste von 10 % - der Wärmemenge des Trinkwarmwassers der Vorstunde entspricht. Somit wird der Trinkwarmwasserbedarf auf dem Temperaturniveau von 60 °C gegenüber der Trinkkaltwassertemperatur von 10 °C wie folgt berechnet:

$$\begin{aligned}\dot{Q}_{TWW,t} &= \dot{m}_{TWW,t} \cdot c_p \cdot (\vartheta_{TWW,t} - \vartheta_{TKW,t}) \\ \dot{Q}_{ABW,t} &= \dot{m}_{ABW,t} \cdot c_p \cdot (\vartheta_{ABW,t} - \vartheta_{TKW,t}) \\ \dot{Q}_{ABW,t} &= 0,9 \cdot \dot{Q}_{TWW,t-1} \\ \dot{m}_{ABW,t} \cdot c_p \cdot (\vartheta_{ABW,t} - \vartheta_{TKW,t}) &= 0,9 \cdot \dot{m}_{TWW,t-1} \cdot c_p \cdot (\vartheta_{TWW,t-1} - \vartheta_{TKW,t-1}) \\ \dot{m}_{TWW,t-1} &= \dot{m}_{ABW,t} \cdot \frac{(\vartheta_{ABW,t} - \vartheta_{TKW,t})}{0,9 (\vartheta_{TWW,t-1} - \vartheta_{TKW,t-1})} \\ \dot{m}_{TWW,t-1} &= \dot{m}_{ABW,t} \cdot \frac{(\vartheta_{ABW,t} - 10^\circ\text{C})}{0,9 (60^\circ\text{C} - 10^\circ\text{C})}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\dot{Q} &= \text{Wärmemenge [kJ/h]} \\ \dot{m} &= \text{Massenstrom [kg/h]} \\ \vartheta &= \text{Temperatur [}^\circ\text{C]} \\ c_p &= \text{spezifische Wärmekapazität von Wasser [kJ/(kg} \cdot \text{K)]} \\ t &= \text{Zeit[h]} \\ ABW &= \text{Abwasser} \\ TKW &= \text{Trinkkaltwasser} \\ TWW &= \text{Trinkwarmwasser.}\end{aligned}$$

¹⁰ Vgl. Hafner, B., Plettner, J., Wemhöner, C., Wenzel, T., CARNOT - User's Guide, Solar-Institut Jülich Fachhochschule Aachen, 1999.

¹¹ Es wurden keine Messungen des Trinkwarmwasserverbrauchs in den Monitoringobjekten durchgeführt.

3 Ergebnisse

Im folgenden Kapitel werden die Ergebnisse der Potentialanalyse (Kapitel 3.1) sowie der Analyse von Anlagenkonzepten (Kapitel 3.2) vorgestellt.

3.1 Potentialanalyse

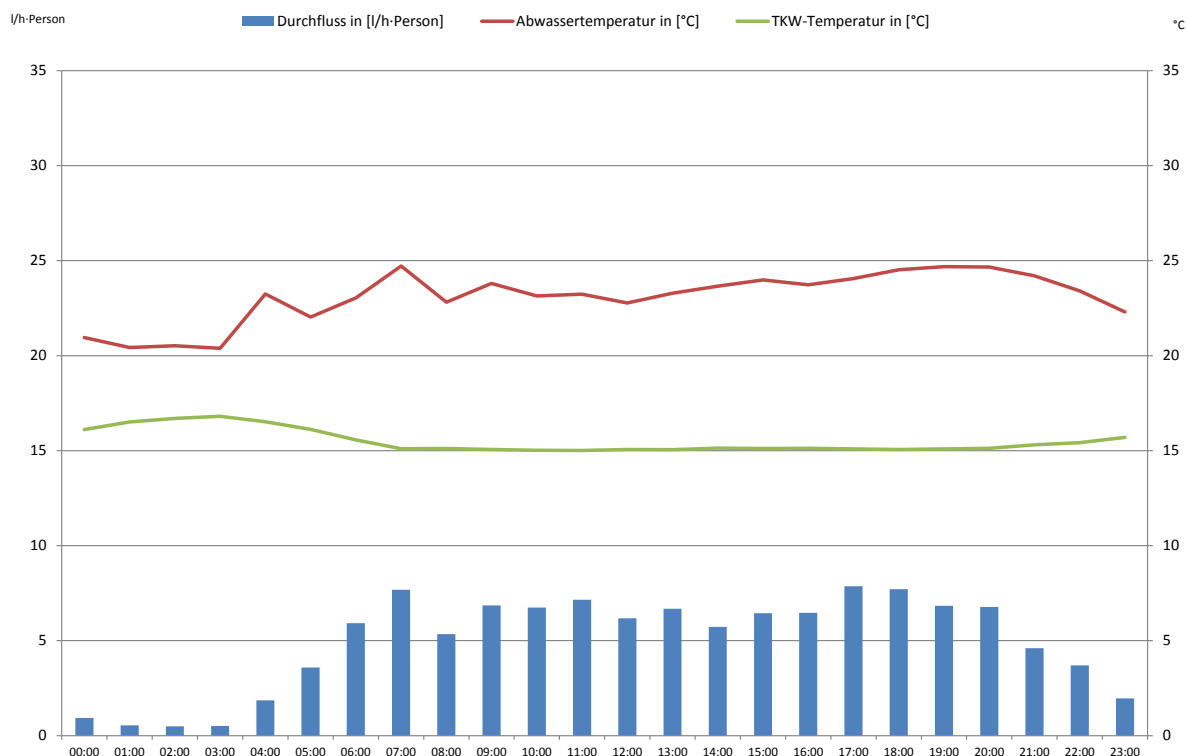
Im Folgenden werden die Ergebnisse des Monitorings an den sechs Gebäuden beschrieben. Die Diagramme zeigen den Tagesgang von Trinkwasserentnahme und Abwasser- sowie Trinkkaltwassertemperatur der sechs untersuchten Objekte auf Grundlage von arithmetischen Mittelwerten. Auf der Abszisse ist der Tag aufgeteilt in 24 Stundenwerte aufgetragen, wobei immer der Beginn des Stundenwertes angegeben ist. Der Durchfluss ist als Balkendiagramm dargestellt und bezieht sich auf die linke Ordinate mit der Skalierung 0 bis 35 Liter pro Stunde. Als Liniendiagramm sind die dazugehörigen durchschnittlichen Abwasser- und Trinkkaltwassertemperaturen abgebildet, welche sich auf die rechte Ordinate mit der Skalierung 0 bis 35 °C beziehen.

3.1.1 Mehrfamilienhaus in Düren

Abbildung 12 zeigt die repräsentative Ganglinie von Durchfluss und Abwasser- bzw. Trinkkaltwassertemperatur des Mehrfamilienhauses in Düren für einen Werktag der Messperiode von Mai bis Oktober 2012. Das Gebäude weist einen mittleren Durchfluss am Werktag von 118,5 Liter pro Person und Tag auf. Die durchschnittliche Abwassertemperatur beträgt 23,1 °C.

Für den Tagesgang sind für dieses Gebäude der frühe Beginn der morgendlichen Trinkwasserzapfungen zwischen 4:00 und 5:00 Uhr sowie die Morgenspitze zwischen 7:00 und 8:00 Uhr charakteristisch. In den Abendstunden ist eine zweite Wasserverbrauchsspitze zu erkennen. Die Abwassertemperatur folgt diesem Verlauf mit Maxima von bis zu 25 °C während der Morgen- und Abendspitzen.

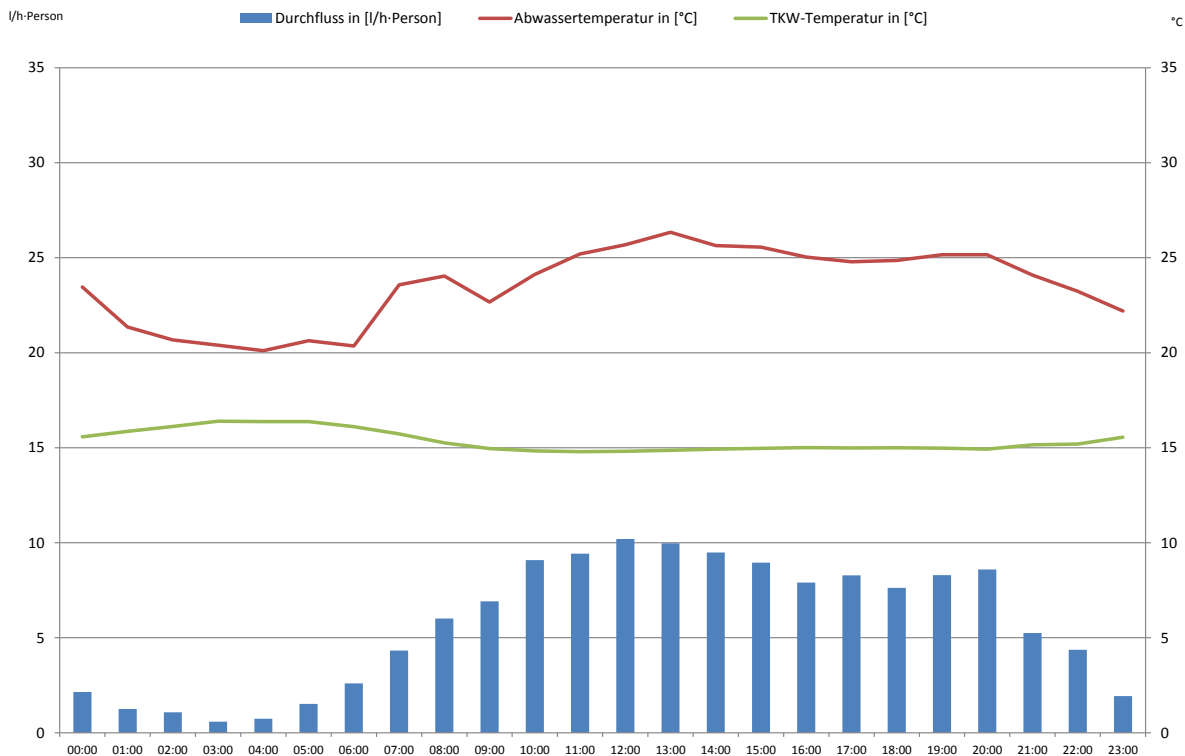
Die mittlere Trinkkaltwassertemperatur beläuft sich im Messzeitraum auf 15,2 °C. Da die Wasserversorgung teilweise mit Oberflächenwasser aus Talsperren erfolgt, sind Schwankungen der Trinkkaltwassertemperatur in Abhängigkeit der Lufttemperatur (hier vorwiegend Sommermonate dargestellt) festzustellen. In den Nachtstunden ist aufgrund der längeren Stagnation des Trinkkaltwassers in den Rohrleitungen eine geringfügige Erwärmung des Trinkkaltwassers aufgrund der höheren Raumtemperaturen in den Hausanschlussräumen zu beobachten.



Ermittelt aus Messdaten von Mai bis Oktober 2012. Der Durchfluss ist als Stundenmittelwert auf Basis von Messungen in 5-Sekunden-Intervallen in l/h angegeben. Der Stundenmittelwert der mit dem Durchfluss gewichteten Abwassertemperatur basiert ebenfalls auf Messungen in 5-Sekunden-Intervallen.

Abbildung 12: Ganglinie MFH in Düren (DNW), Werktag

In **Abbildung 13** ist die Ganglinie für Sonntage dargestellt. Im Vergleich zu Werktagen wird mit 136,5 Liter pro Person und Tag wesentlich mehr Wasser verbraucht. Zudem verschiebt sich die Morgenspitze deutlich in die Mittagszeit. Die mittlere Abwassertemperatur beträgt 24,6 °C; die mittlere Trinkkaltwassertemperatur liegt bei 15,1 °C.



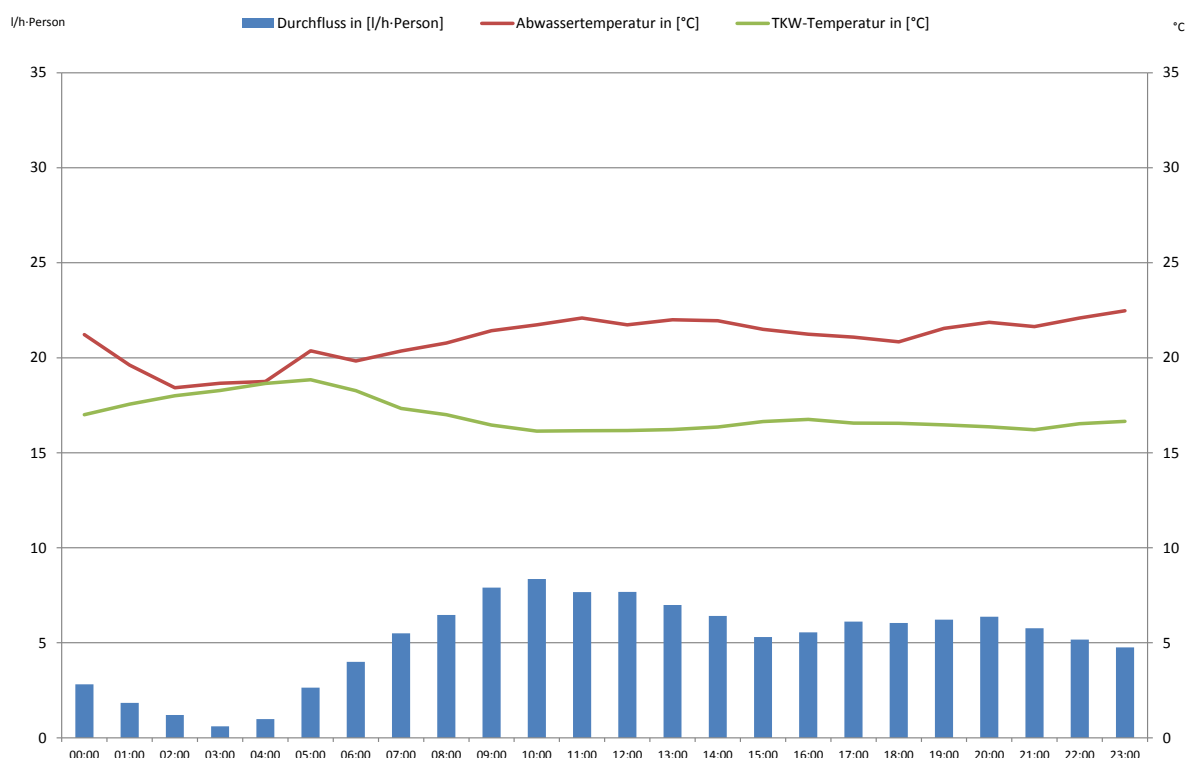
Ermittelt aus Messdaten von Mai bis Oktober 2012. Der Durchfluss ist als Stundenmittelwert auf Basis von Messungen in 5-Sekunden-Intervallen in l/h angegeben. Der Stundenmittelwert der mit dem Durchfluss gewichteten Abwassertemperatur basiert ebenfalls auf Messungen in 5-Sekunden-Intervallen.

Abbildung 13: Ganglinie MFH in Düren (DNW), Sonntag

3.1.2 Mehrfamilienhaus in Pforzheim

Abbildung 14 zeigt die Werktag-Ganglinie für das Mehrfamilienhaus in Pforzheim für den Messzeitraum August bis Oktober 2012. Der Mittelwert des Durchflusses beträgt werktags 122,3 Liter pro Person und Tag. Die mittlere Abwassertemperatur beträgt 21,0 °C. Im Vergleich zum Mehrfamilienhaus in Düren ist eine zeitliche Verschiebung der Morgenspitze in den Zeitraum von 10:00 bis 11:00 Uhr zu beobachten. Zudem ist die Abendspitze schwächer ausgeprägt. Die Abwassertemperatur folgt dem Verlauf des Durchfluss-Profils.

Die mittlere Trinkkaltwassertemperatur beläuft sich im Messzeitraum auf 16,7 °C. Die vergleichsweise hohe mittlere Trinkkaltwassertemperatur lässt sich mit dem Messzeitraum in vorwiegend Sommermonaten erklären.



Ermittelt aus Messdaten von August bis Oktober 2012. Der Durchfluss ist als Stundenmittelwert auf Basis von Messungen in 5-Sekunden-Intervallen in l/h angegeben. Der Stundenmittelwert der mit dem Durchfluss gewichteten Abwassertemperatur basiert ebenfalls auf Messungen in 5-Sekunden-Intervallen.

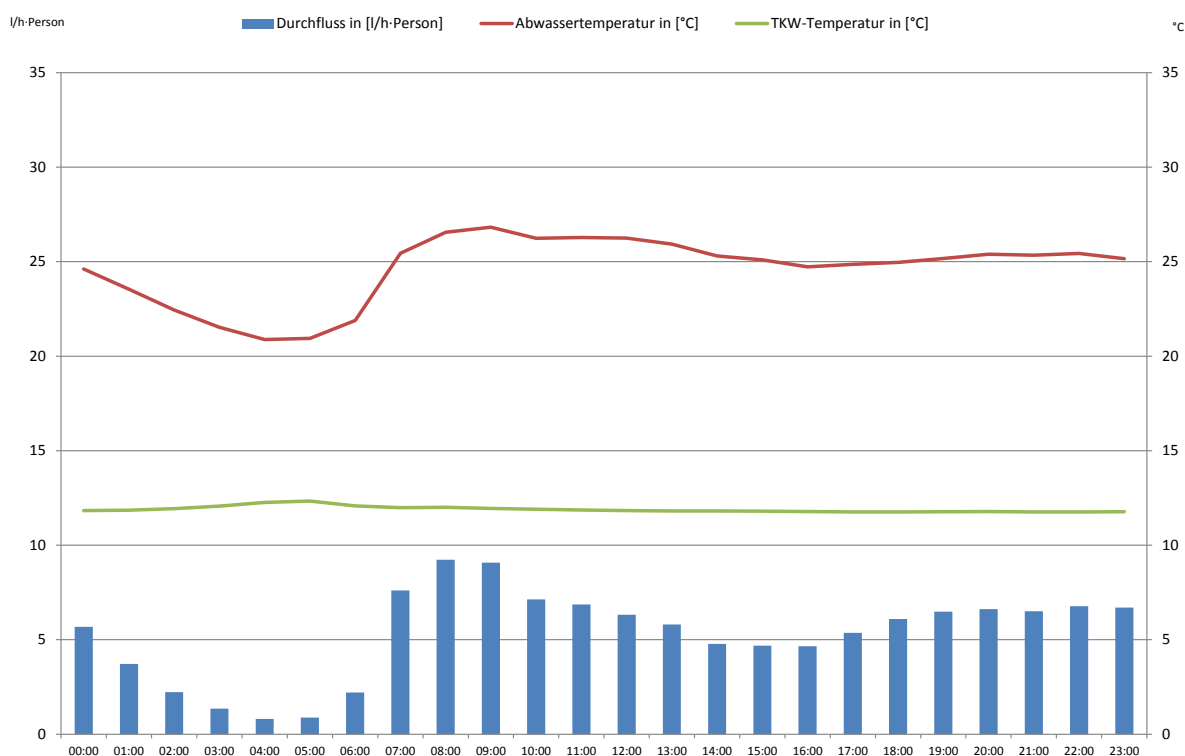
Abbildung 14: Ganglinie MFH in Pforzheim (PFG), Werktag

3.1.3 Studentenwohnheim Otto Petersen Haus

Abbildung 15 zeigt die Werktags-Ganglinie für das Otto Petersen Haus basierend auf Messdaten aus dem Messzeitraum von Mai 2011 bis Januar 2013. Montags bis freitags (nur Vorlesungszeit) werden durchschnittliche Werte des Trinkwasserverbrauchs von 127,6 Liter pro Tag und Person erreicht. Die durchschnittliche Abwassertemperatur beträgt 25,3 °C.

Die Langzeitmessung bestätigt die Ergebnisse aus dem vorhergehenden Projekt. Es findet eine morgendliche Verbrauchsspitze zwischen 8:00 und 10:00 Uhr statt, sowie eine schwächere Abendsspitze zwischen 22:00 und 23:00 Uhr. Der Verlauf der Abwassertemperaturen weist einen ähnlichen Tagesverlauf auf.

Die mittlere Trinkkaltwassertemperatur beläuft sich im Messzeitraum auf 12,1 °C.



Ermittelt aus Messdaten von Mai 2011 bis Januar 2013. Der Durchfluss ist als Stundenmittelwert auf Basis von Messungen in 5-Sekunden-Intervallen in l/h angegeben. Der Stundenmittelwert der mit dem Durchfluss gewichteten Abwassertemperatur basiert ebenfalls auf Messungen in 5-Sekunden-Intervallen.

Abbildung 15: Ganglinie Otto Petersen Haus (OPH), Werktag

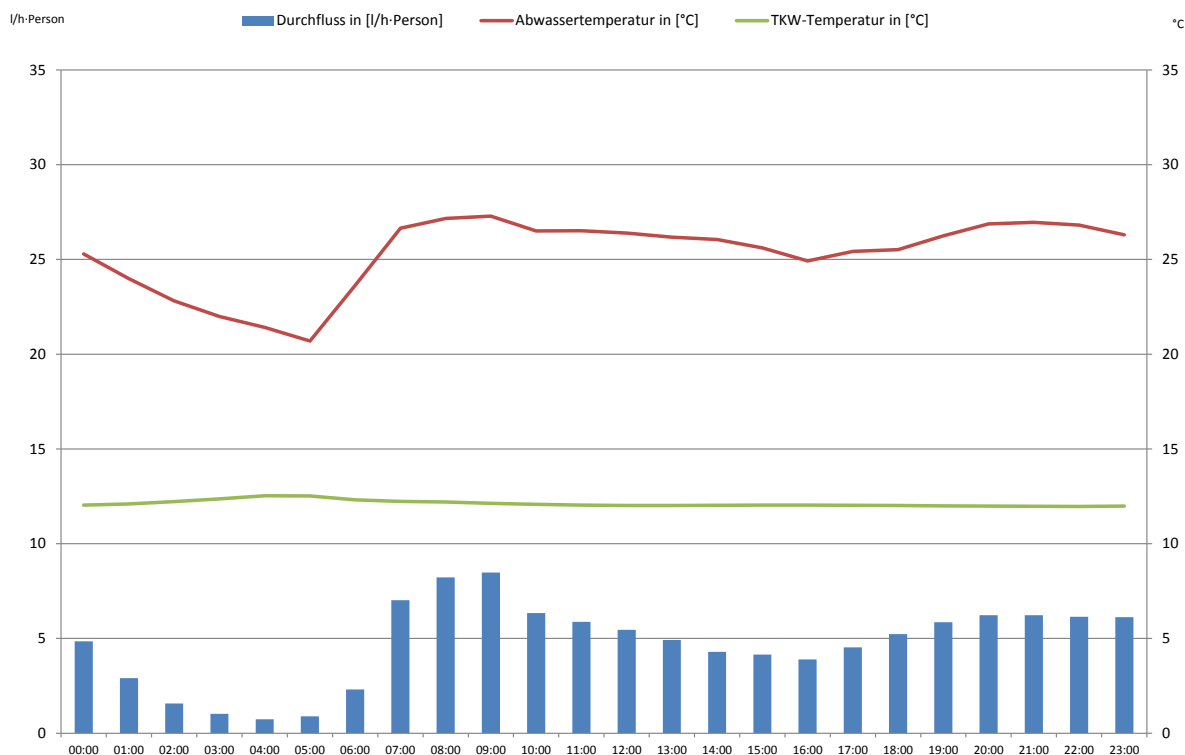
3.1.4 Studentenwohnheim Theodore von Kármán Haus

In **Abbildung 16** ist die Ganglinie von Durchfluss und Abwasser- bzw. Trinkkaltwassertemperatur für das Theodore von Kármán Haus auf Grundlage der Messergebnisse von Mai 2011 bis Januar 2013 dargestellt. Für den Messzeitraum ergibt sich für die Werktage (nur Vorlesungszeit) ein durchschnittlicher Trinkwasserverbrauch von 113,3 Liter pro Tag und Person. Die durchschnittliche Abwassertemperatur berechnet sich zu 26,1 °C.

Im Vergleich zum vorgenannten Studentenwohnheim ist ein geringerer Pro-Kopf-Wasserverbrauch festzustellen. Ein Grund hierfür liegt in der unterschiedlichen Ausstattung mit Sanitäranlagen: Im Theodore von Kármán Haus sind ausschließlich Einzelzimmer mit gemeinschaftlich genutzten Duschräumen vorhanden. Im Gegensatz dazu verfügt das Otto Petersen Haus mehrheitlich über Einzelappartements mit integrierten, d.h. alleine genutzten Badezimmern.

Die Ganglinie zeigt trotz dieser abweichenden Ausstattung einen nahezu identischen Verlauf wie das Otto Petersen Haus.

Die mittlere Trinkkaltwassertemperatur beläuft sich im Messzeitraum auf 11,7 °C.



Ermittelt aus Messdaten von Mai 2011 bis Januar 2013. Der Durchfluss ist als Stundenmittelwert auf Basis von Messungen in 5-Sekunden-Intervallen in l/h angegeben. Der Stundenmittelwert der mit dem Durchfluss gewichteten Abwassertemperatur basiert ebenfalls auf Messungen in 5-Sekunden-Intervallen.

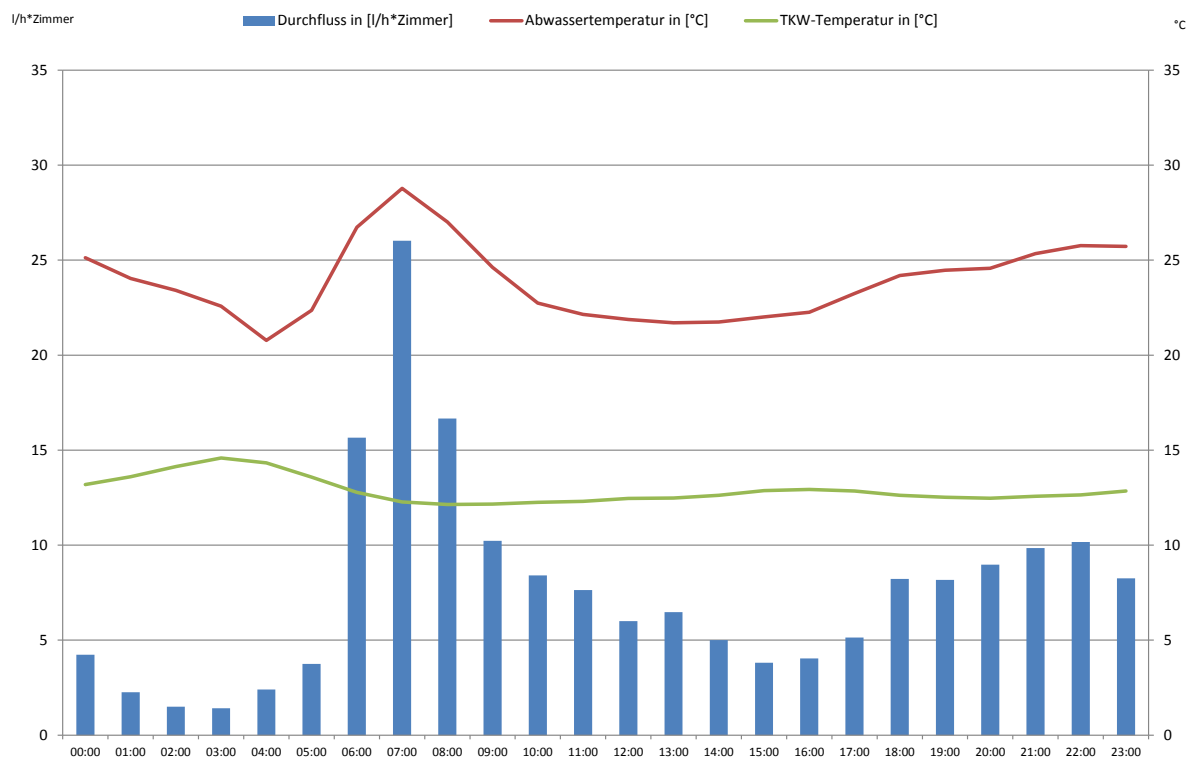
Abbildung 16: Ganglinie Theodore von Kármán Haus (TKH), Werktag

3.1.5 Business Hotel Aachen City

Abbildung 17 zeigt den Tagesgang von Durchfluss und Abwasser- bzw. Trinkkaltwassertemperatur für die Werktage Dienstag bis Freitag für das Business Hotel Aachen City. Grundlage hierfür ist die Messperiode von Mai 2011 bis März 2012. Dienstags bis freitags ist ein durchschnittlicher Trinkwasserverbrauch von 184,3 Liter pro Tag und Zimmer feststellbar. Die durchschnittliche Abwassertemperatur beträgt 23,9 °C. Da keine genauen Belegungszahlen für das Hotel vorliegen wird als Bezugsgröße für die Tagesganglinien die Zimmeranzahl verwendet.

Es ist zu erkennen, dass im Zeitraum von 6:00 bis 9:00 Uhr eine im Vergleich zum restlichen Tag enorme morgendliche Nachfragespitze stattfindet, welche zwischen 7:00 und 8:00 Uhr ihr Maximum erreicht. In den restlichen Tagesstunden wird wesentlich weniger Trinkwasser nachgefragt bis in den Abendstunden zwischen 22:00 und 23:00 Uhr eine zweite, schwächere Verbrauchsspitze auftritt. Der Verlauf des Abwassertemperaturprofils steigt, ähnlich wie bei den Studentenwohnheimen, in den Zeiträumen mit hoher Trinkwassernachfrage an und fällt entsprechend in Zeitperioden mit geringem Durchfluss ab.

Die mittlere Trinkkaltwassertemperatur beläuft sich im Messzeitraum auf 12,6 °C.



Ermittelt aus Messdaten von Mai 2011 bis März 2012. Der Durchfluss ist als Stundenmittelwert auf Basis von Messungen in 5-Sekunden-Intervallen in l/h angegeben. Der Stundenmittelwert der mit dem Durchfluss gewichteten Abwassertemperatur basiert ebenfalls auf Messungen in 5-Sekunden-Intervallen.

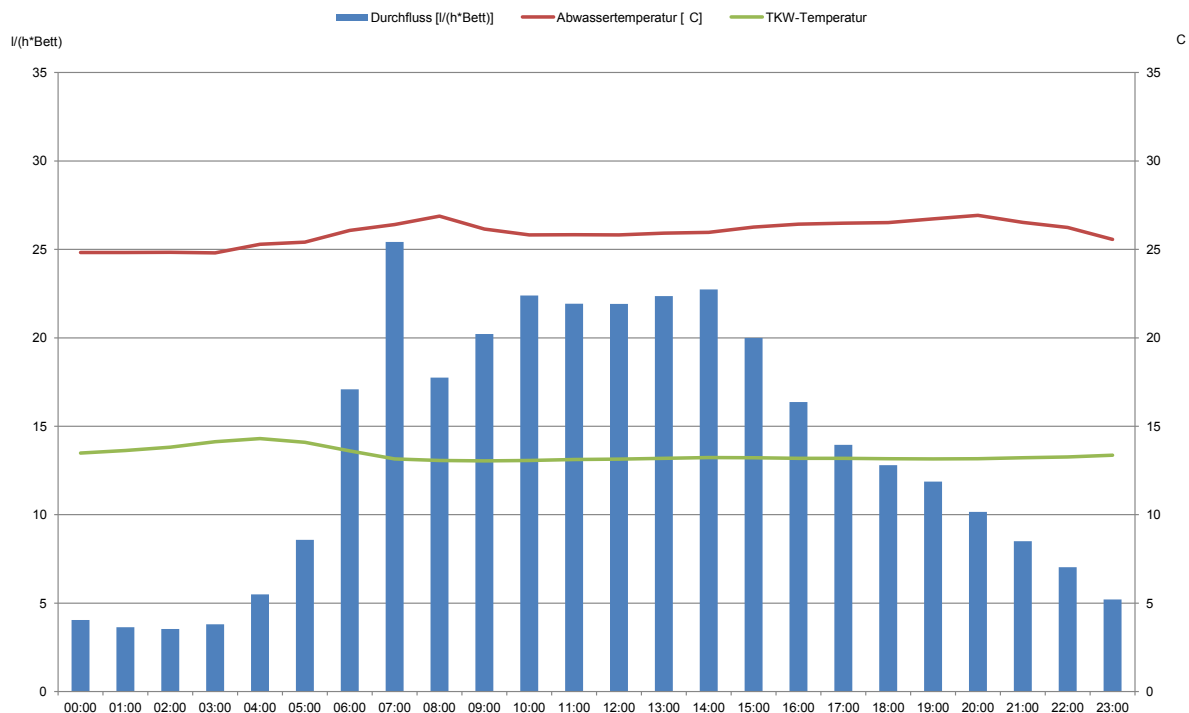
Abbildung 17: Ganglinie Business-Hotel, Dienstag-Freitag

3.1.6 Luisenhospital Aachen

In **Abbildung 18** ist die Ganglinie von Durchfluss und Abwasser- bzw. Trinkwassertemperatur für einen Werktag dargestellt. Der durchschnittliche Trinkwasserverbrauch beträgt 326,8 Liter pro Tag und Bett¹². Die mittlere Abwassertemperatur beträgt 26,1 °C.

Das Diagramm zeigt einen Beginn der morgendlichen Trinkwasserzapfungen bereits ab 4:00 Uhr. Das Maximum wird zwischen 7:00 und 8:00 Uhr erreicht. Danach bleibt der Trinkwasserdurchfluss bis 15:00 Uhr auf hohem Niveau. Ab 15:00 Uhr findet ein stetiges Absinken des Trinkwasserverbrauchs bis in die Nacht statt. Die Abwassertemperatur ist ganztägig auf einem hohen Niveau von über 25 °C.

Die mittlere Trinkkaltwassertemperatur beläuft sich im Messzeitraum auf 13,3 °C.



Ermittelt aus Messdaten von Mai 2011 bis Januar 2013. Der Durchfluss ist als Stundenmittelwert auf Basis von Messungen in 5-Sekunden-Intervallen in l/h angegeben. Der Stundenmittelwert der mit dem Durchfluss gewichteten Abwassertemperatur basiert ebenfalls auf Messungen in 5-Sekunden-Intervallen.

Abbildung 18: Ganglinie Luisenhospital (LUI), Werktag

¹² Es ist von einer nahezu ganzjährigen Vollausslastung der Bettenzahl auszugehen.

3.1.7 Analyse von Einflussgrößen

Im Folgenden werden Einflussgrößen auf das Abwasserenergiepotential untersucht. Zum einen werden die jahreszeitabhängige Schwankung der Abwassertemperatur aufgrund Schwankungen der Trinkkaltwassertemperatur sowie die jahreszeitlichen Schwankungen der Abwassermenge untersucht. Zum anderen wird das Duschverhalten als nutzerabhängige Einflussgröße auf das Abwasserenergiepotential auf Basis von Umfrageergebnissen in den beiden Studentenwohnheimen analysiert.

Die entsprechenden Analysen erfolgen für das Dürener Mehrfamilienhaus, die beiden Studentenwohnheime, das Hotelgebäude sowie das Krankenhaus. Das Pforzheimer Mehrfamilienhaus wird aufgrund des geringen Datenumfangs nicht in die Analyse einbezogen.

3.1.7.1 Einflussgröße Trinkkaltwassertemperatur

Als eine der bedeutendsten Einflussgrößen auf die Abwassertemperatur ist die Trinkkaltwassertemperatur anzusehen.

Bei allen betrachteten Gebäuden wird ein Großteil des Trinkwassers durch Oberflächenwasser (Talsperrenwasser) bereitgestellt. Die Temperatur des Oberflächenwassers wird im Wesentlichen durch die Außenlufttemperatur beeinflusst, d.h. die Temperatur des Oberflächenwassers korreliert mit der Außenlufttemperatur, unterliegt jedoch aufgrund der Wärmespeicherung im Wasser und im angrenzenden Erdreich weniger Schwankungen im Jahresverlauf. Zusätzlich werden Temperaturspitzen abgeschwächt.

Um den statistischen Zusammenhang zwischen der Trinkkaltwassertemperatur und der Abwassertemperatur zu prüfen, wird der Korrelationskoeffizient nach Pearson¹³ berechnet:

$$\rho(X, Y) = \frac{\text{Cov}(X, Y)}{\sigma(X) \cdot \sigma(Y)}$$

$\text{Cov}(X, Y) = \text{Kovarianz von } X \text{ und } Y$

$\sigma = \text{Standardabweichung}$

$X = \text{Zufallsvariable "Abwassertemperatur"}$

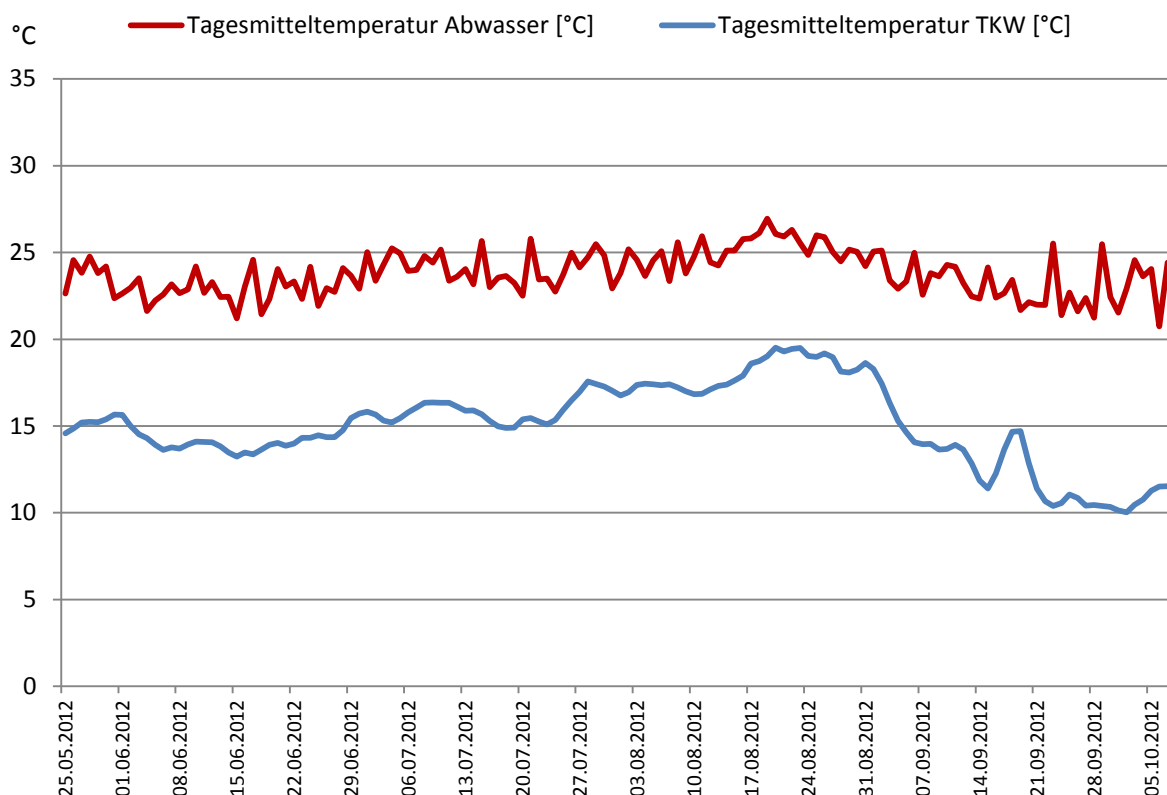
$Y = \text{Zufallsvariable "Trinkkaltwassertemperatur"}$.

Der Korrelationskoeffizient gilt als Maß für den Grad des linearen Zusammenhangs zwischen zwei Variablen. Mithilfe des zweiseitigen T-Tests wird die Signifikanz des statistischen Zusammenhangs geprüft. Die Irrtumswahrscheinlichkeit des Tests gibt Auskunft darüber, wie groß die Wahrscheinlichkeit ist, dass die Korrelation zufällig zu Stande gekommen ist. Je geringer die Irrtumswahrscheinlichkeit ist, desto unwahrscheinlicher ist ein Fehler und desto aussagekräftiger die ermittelte statistische Korrelation. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass

¹³ Vgl. Hartung, Joachim, Statistik - Lehr- und Handbuch der angewandten Statistik, 14. Auflage, München: Oldenbourg Wissenschaftsverlag, 2005, S. 546ff.

eine statistische Korrelation nicht immer einen kausalen Zusammenhang bedingt. Dieser ist zusätzlich zu prüfen.

In **Abbildung 19** sind die gemessenen Tagesmitteltemperaturen von Abwasser und Trinkkaltwasser für den Zeitraum Mai bis Oktober 2012 für das Mehrfamilienhaus in Düren (DNW) dargestellt. Der Korrelationskoeffizient der beiden Temperaturen beträgt 0,64. Dieser Wert deutet an, dass die Abwassertemperatur der Trinkkaltwassertemperatur folgt, d. h. eine hohe bzw. niedrige Trinkkaltwassertemperatur führt zu hohen bzw. niedrigen Abwassertemperaturen.

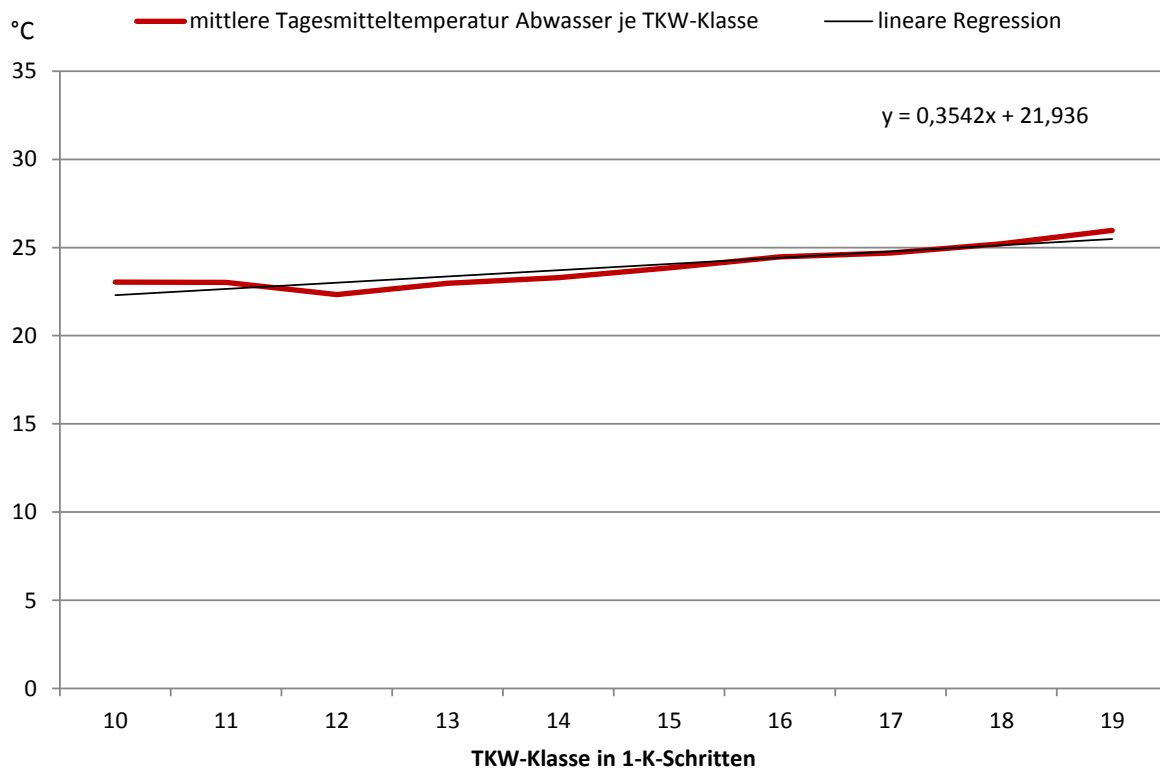


Ermittelt aus Messdaten von Mai bis Oktober 2012. Der Korrelationskoeffizient beträgt $\rho(\text{Abw}, \text{TKW}) = 0,64$.

Abbildung 19: Verlauf Abwasser- und TKW-Temperatur, Tagesdurchschnittswerte, DNW

Im Folgenden wird dieser positive (lineare) statistische Zusammenhang zwischen den gemittelten Tagestemperaturen des Trinkkaltwassers und des Abwassers weiter untersucht. Ziel des weiteren Vorgehens ist die Bewertung der Regression zwischen Abwassertemperatur und Trinkkaltwassertemperatur. Hierzu erfolgt eine Clusterung der mittleren Abwassertemperaturen in Trinkkaltwassertemperatur-Klassen mit einer Größe von jeweils 1 K. Darauf folgt eine lineare Regressionsanalyse der Abwassertemperatur in Abhängigkeit von der Trinkkaltwassertemperatur. Die Steigung der ermittelten Regressionsgeraden beschreibt schließlich den Einfluss einer Änderung der Trinkkaltwassertemperatur auf die mittlere Abwassertemperatur und kann zur Prognose der Abwassertemperatur genutzt werden.

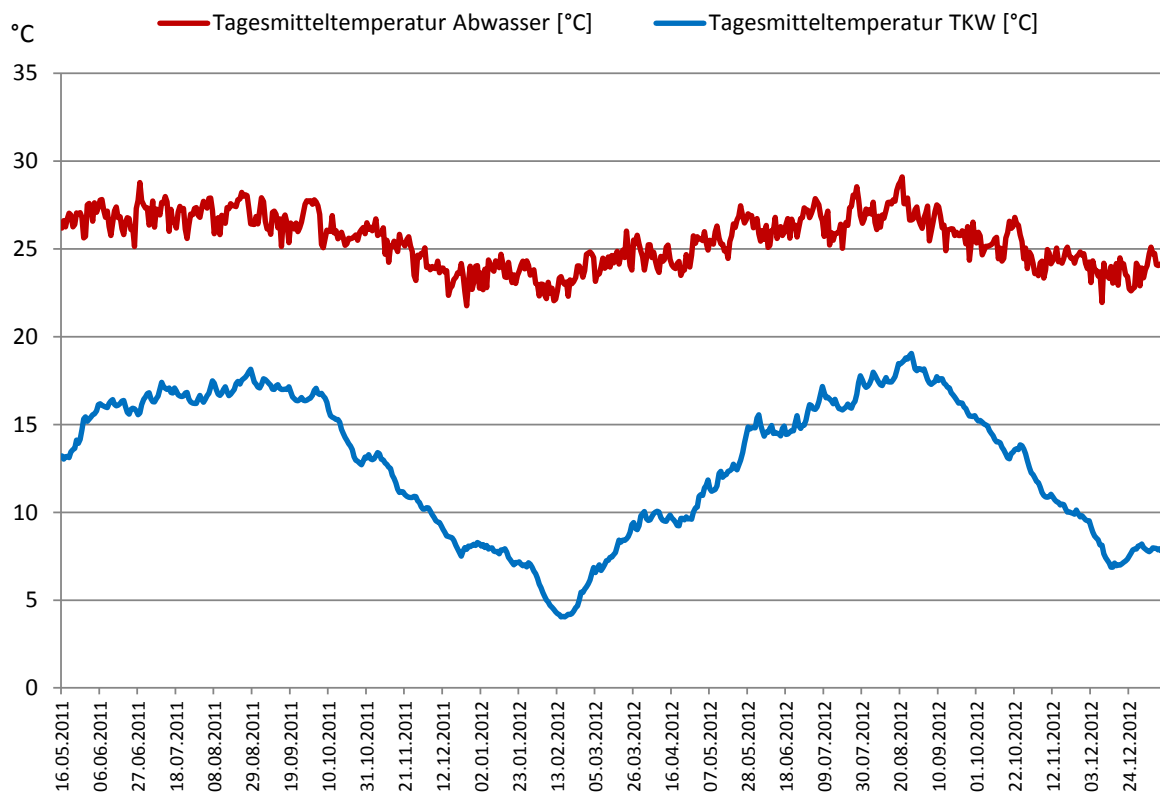
Abbildung 20 zeigt die mittlere Tagesmitteltemperatur des Abwassers je Trinkkaltwasser-temperaturklasse sowie die lineare Regressionsgerade als Ergebnis der Regressionsanalyse für das Dürener Mehrfamilienhaus. Die Regressionsgerade weist eine positive Steigung von 0,35 auf. Dieser Wert bedeutet, dass ein Zuwachs bzw. ein Abfall der Trinkkaltwassertemperatur um 1 K im Mittel einen Zuwachs bzw. einen Abfall der Abwassertemperatur von 0,35 K verursacht. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass aufgrund der relativ geringen Datenmenge (keine Wintertage enthalten) des Dürener Gebäudes das Ergebnis weniger belastbar ist.



Ermittelt aus Messdaten von Mai bis Oktober 2012.

Abbildung 20: Lineare Regression Abwasser-Trinkkaltwasser-Temperatur, DNW

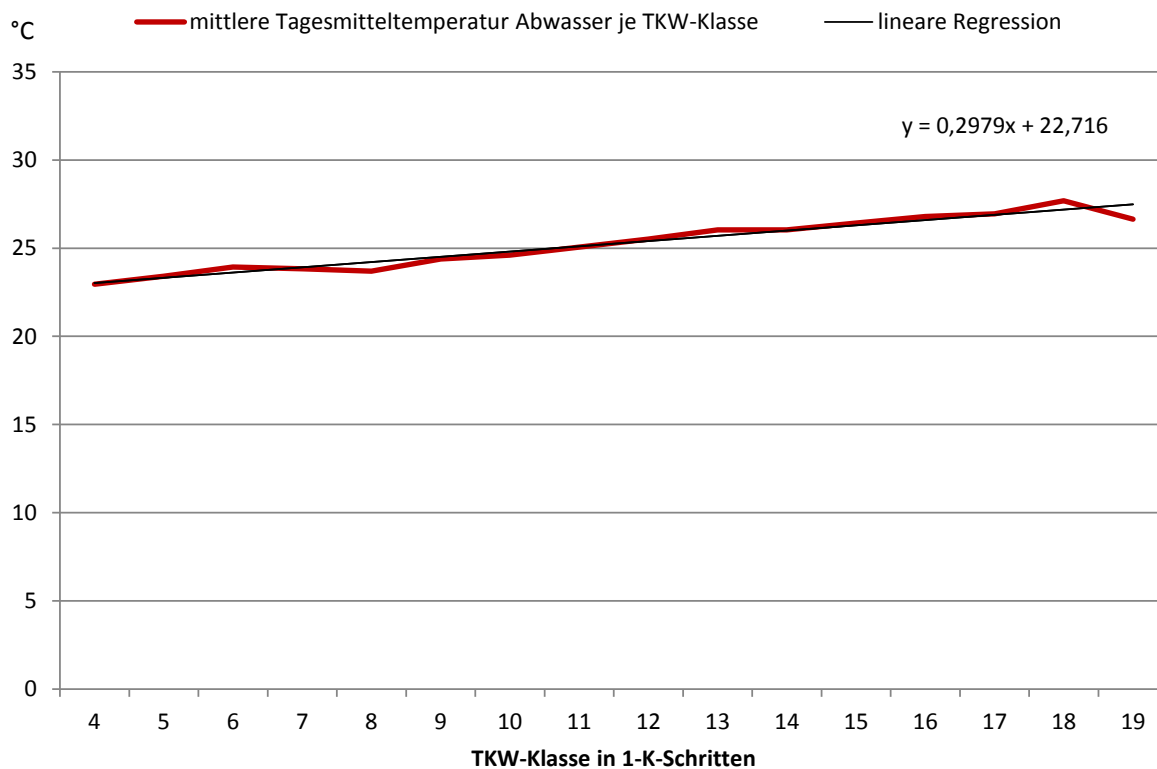
In **Abbildung 21** sind die Verläufe der Trinkkaltwasser- und Abwassertemperatur jeweils in gemittelten Tageswerten für das Studentenwohnheim Otto Petersen Haus (OPH) für den Zeitraum Mai 2011 bis Januar 2013 dargestellt. Im Vergleich zum vorhergehend beschriebenen Gebäude DNW ist beim OPH aufgrund des längeren Messzeitraums der Effekt einer schwankenden Trinkkaltwassertemperatur deutlicher zu erkennen: In den Wintermonaten mit einer Trinkkaltwassertemperatur unter 10 °C liegt die mittlere Abwassertemperatur im Bereich zwischen 22 und 25 °C. In den Sommermonaten steigt die Trinkkaltwassertemperatur auf über 15 °C an und die zeitgleich gemessenen Abwassertemperaturen weisen Werte von über 25 °C auf. Der aus den Messwerten ermittelte Korrelationskoeffizient für den Gesamtzeitraum beträgt 0,87, d. h. es ist eine hohe Korrelation festzustellen. Zudem ist die Irrtumswahrscheinlichkeit kleiner als 0,001 und die Korrelation demnach signifikant. Für aus dem Gesamtzeitraum extrahierte Teilzeiträume lassen sich teilweise wesentlich schwächere Korrelationen feststellen, bspw. ergibt sich für der Zeitraum Mai bis September 2011 (Sommermonate) ein Korrelationskoeffizient von nur 0,33 und somit eine geringe Korrelation.



Ermittelt aus Messdaten von Mai 2011 bis Januar 2013. Der Korrelationskoeffizient beträgt $\rho(\text{Abw}, \text{TKW}) = 0,87$.

Abbildung 21: Verlauf Abwasser- und TKW-Temperatur, Tagesdurchschnittswerte, OPH

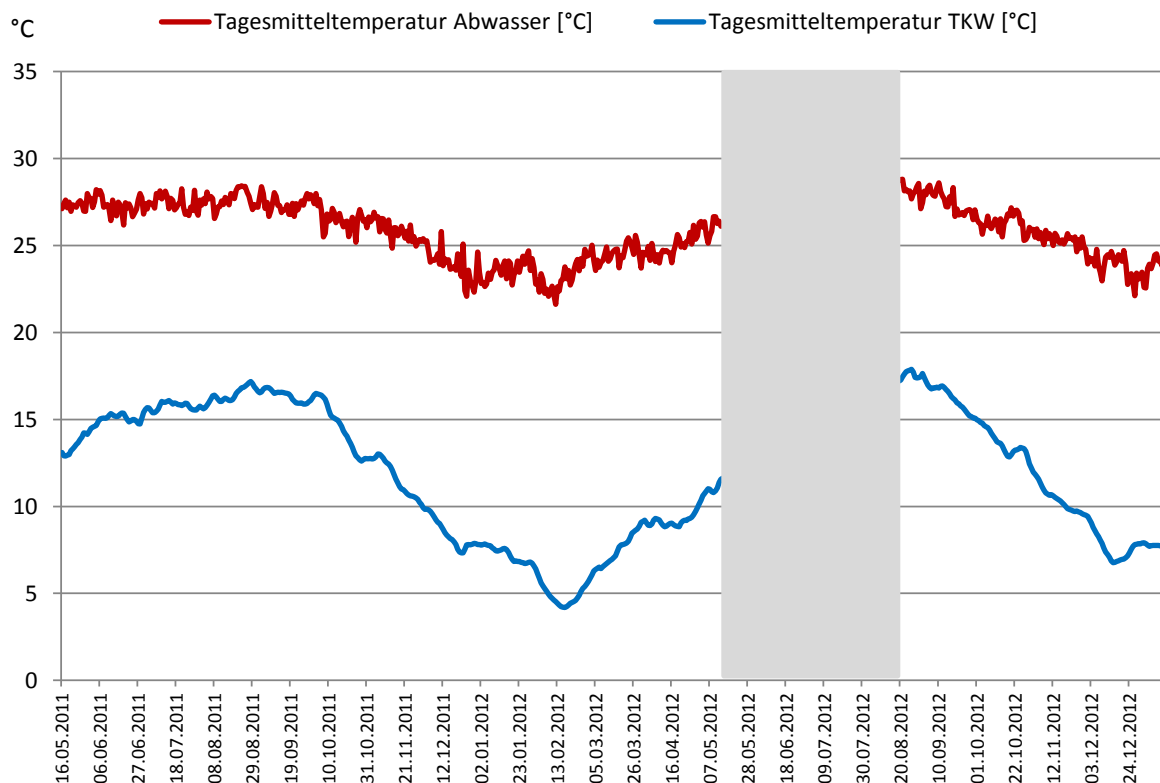
In **Abbildung 22** ist das Ergebnis der Regressionsanalyse für das OPH dargestellt. Das Diagramm zeigt die mittlere Tagesmitteltemperatur des Abwassers der Trinkkaltwassertemperaturklassen von 4 bis 19 °C sowie die Regressionsgerade. Die Steigung der Geraden beträgt 0,30 und bestätigt damit das Ergebnis der Untersuchung am Dürener Mehrfamilienhaus (0,35).



Ermittelt aus Messdaten von Mai 2011 bis Januar 2013.

Abbildung 22: Lineare Regression Abwasser-Trinkkaltwasser-Temperatur, OPH

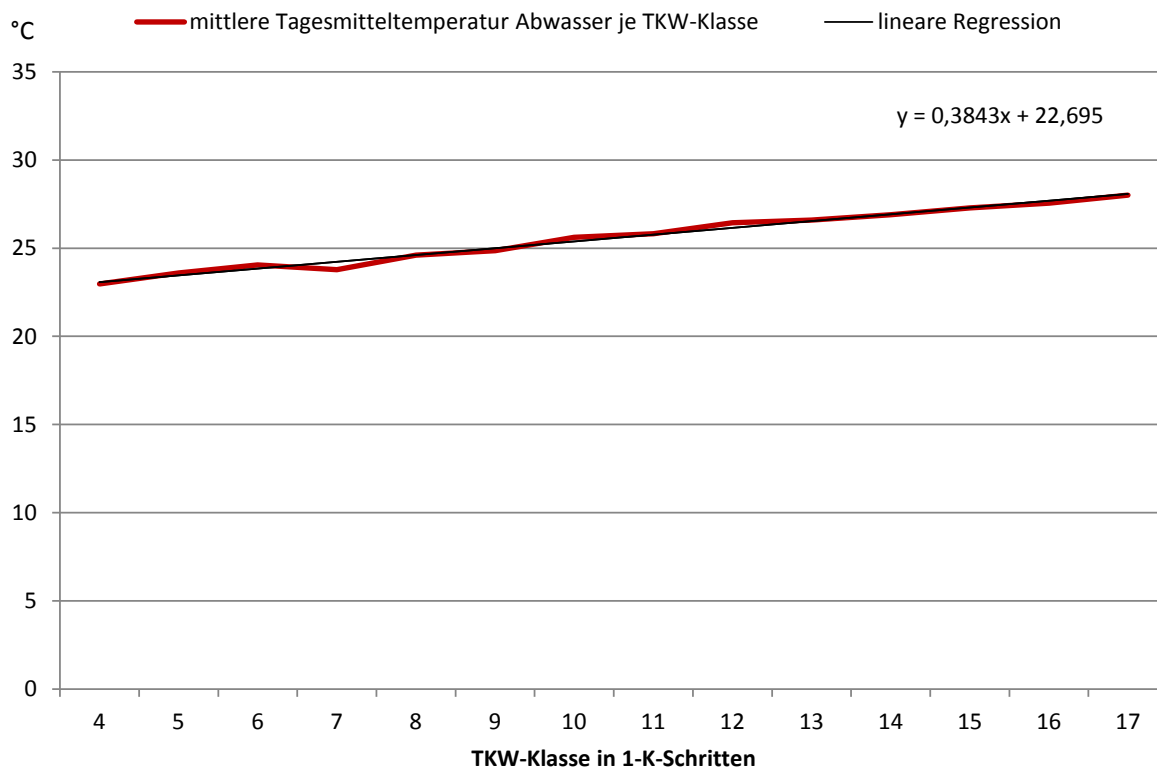
In **Abbildung 23** sind die Tagesmitteltemperaturen von Abwasser und Trinkkaltwasser für das zweite Studentenwohnheim, das Theodore von Karman Haus, dargestellt. Die Daten für den grau gekennzeichneten Zeitraum wurden aufgrund von Messfehlern aus der weiteren Analyse herausgenommen. Der Korrelationskoeffizient beträgt für den Gesamtzeitraum 0,92, d. h. die Korrelation ist ebenfalls hoch. Zudem liegt die Irrtumswahrscheinlichkeit unter 0,001, folglich besteht auch hier ein signifikanter Zusammenhang. Für den (Teil-)Zeitraum Mai bis September 2011 (Sommermonate) ist jedoch auch hier mit einem Korrelationskoeffizienten von 0,10 ebenfalls nur eine geringe Korrelation feststellbar.



Ermittelt aus Messdaten von Mai 2011 bis Januar 2013. Der Korrelationskoeffizient beträgt $\rho(\text{Abw}, \text{TKW}) = 0,92$. Für den grau gekennzeichneten Zeitraum liegen keine oder unvollständige Daten vor.

Abbildung 23: Verlauf Abwasser- und TKW-Temperatur, Tagesdurchschnittswerte, TKH

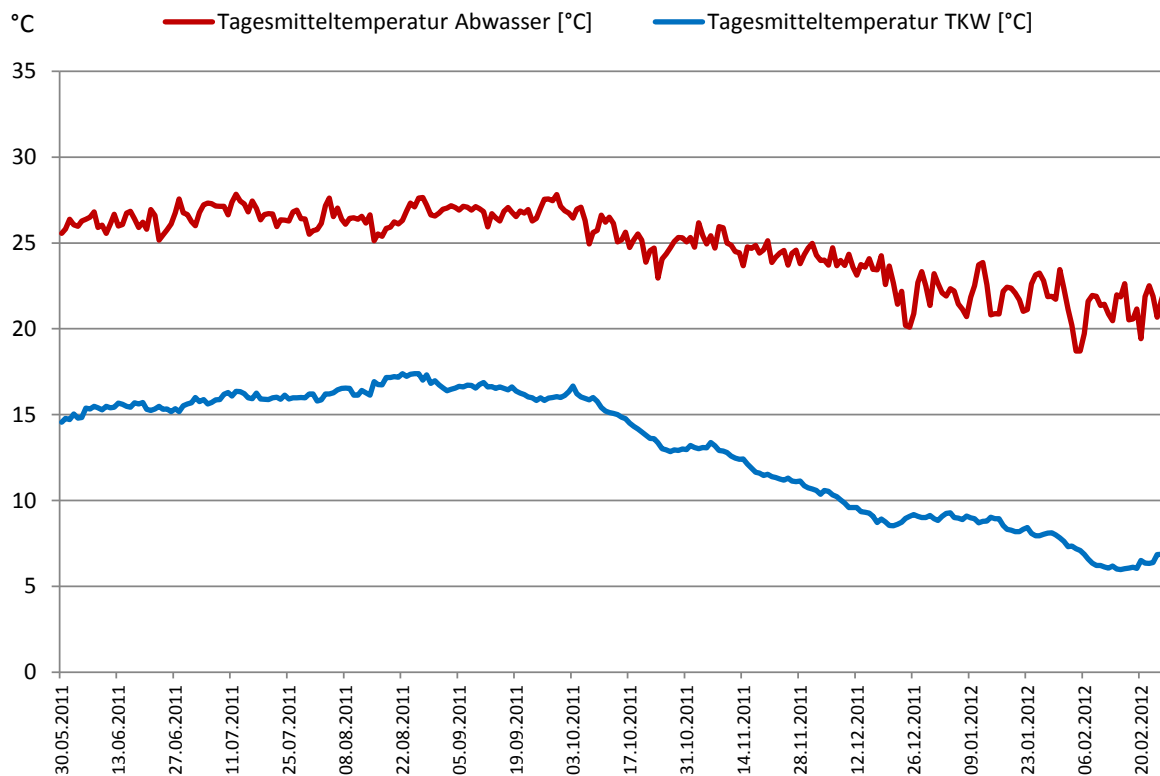
In **Abbildung 24** ist das Ergebnis der Regressionsanalyse für das TKH dargestellt. Das Diagramm zeigt die mittleren Tagesmitteltemperaturen des Abwassers der Trinkkaltwassertemperaturklassen von 4 bis 17 °C sowie die Regressionsgerade. Die Steigung der Regressionsgerade beträgt 0,38 und liegt damit in einer ähnlichen Größenordnung wie bei den anderen Wohngebäuden.



Ermittelt aus Messdaten von Mai 2011 bis Januar 2013.

Abbildung 24: Lineare Regression Abwasser-Trinkkaltwasser-Temperatur, TKH

Abbildung 25 zeigt die Tagesmittelwerte von Abwasser- und Trinkkaltwassertemperatur für das Hotelgebäude für den Messzeitraum Mai 2011 bis Februar 2012. Auch bei diesem Gebäude ist ein Einfluss der Trinkkaltwassertemperatur auf die Abwassertemperatur zu erkennen, was durch einen hohen Korrelationskoeffizienten von 0,93 bestätigt wird.



Ermittelt aus Messdaten von Mai 2011 bis März 2012. Der Korrelationskoeffizient beträgt $\rho(\text{Abw}, \text{TKW}) = 0,93$.

Abbildung 25: Verlauf Abwasser- und TKW-Temperatur, Tagesdurchschnittswerte, Hotel

In **Abbildung 26** ist das Ergebnis der Regressionsanalyse für das Hotel dargestellt. Es zeigt die mittlere Tagesmitteltemperatur des Abwassers der Trinkkaltwassertemperaturklassen von 5 bis 17 °C sowie die Regressionsgerade. Die Steigung beträgt 0,47, was im Vergleich zu den Wohngebäuden einen höheren Wert darstellt. Eine Änderung der Trinkkaltwassertemperatur um 1 K bewirkt im Mittel eine Änderung der Abwassertemperatur in Höhe von fast 0,5 K.

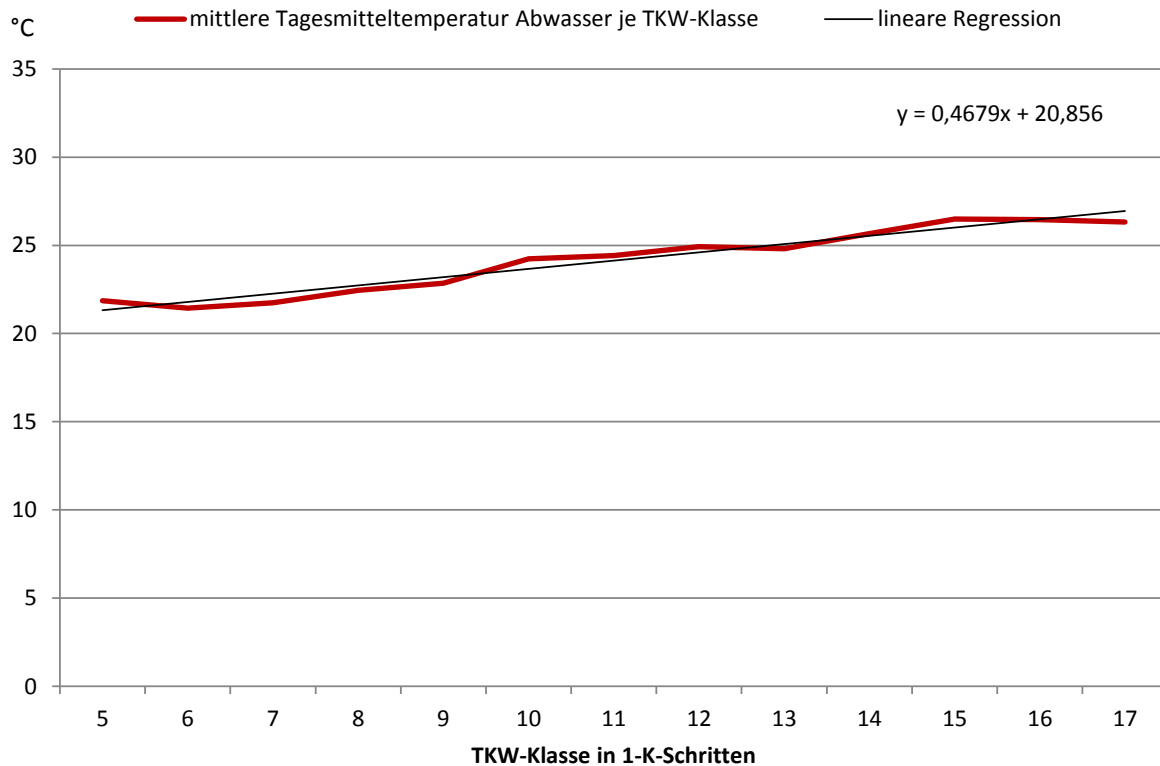
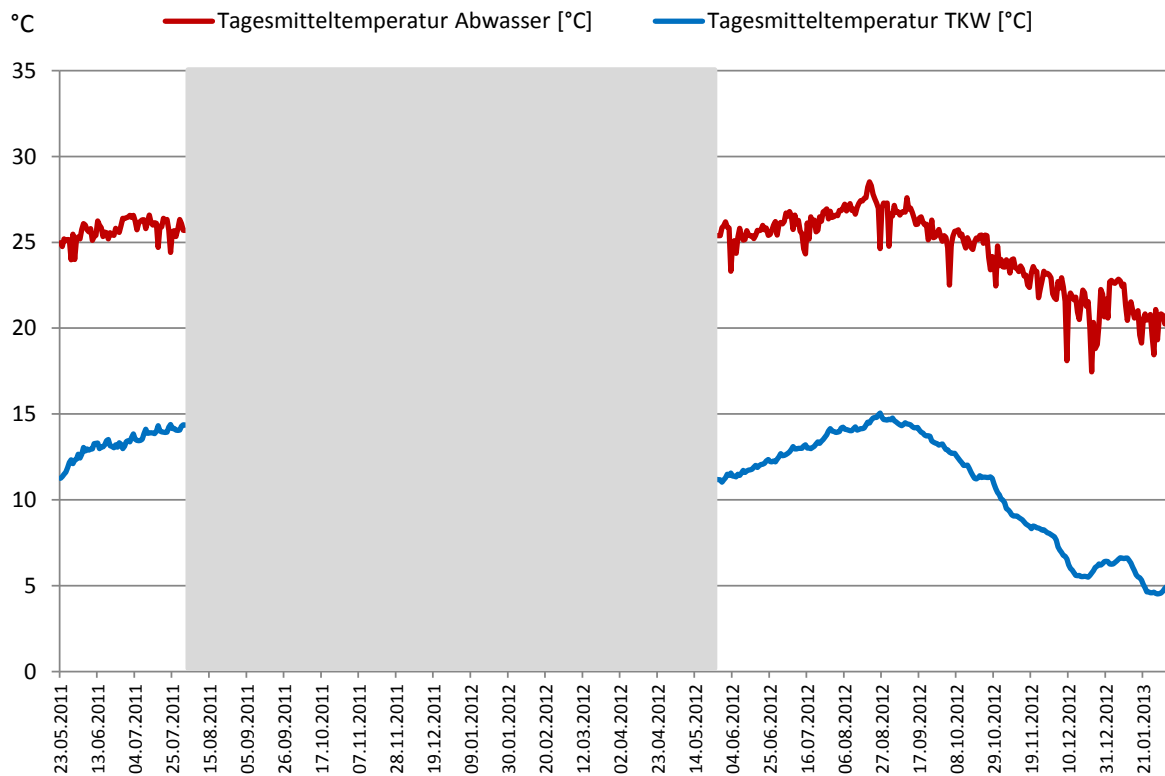


Abbildung 26: Lineare Regression Abwasser-Trinkkaltwasser-Temperatur, Hotel

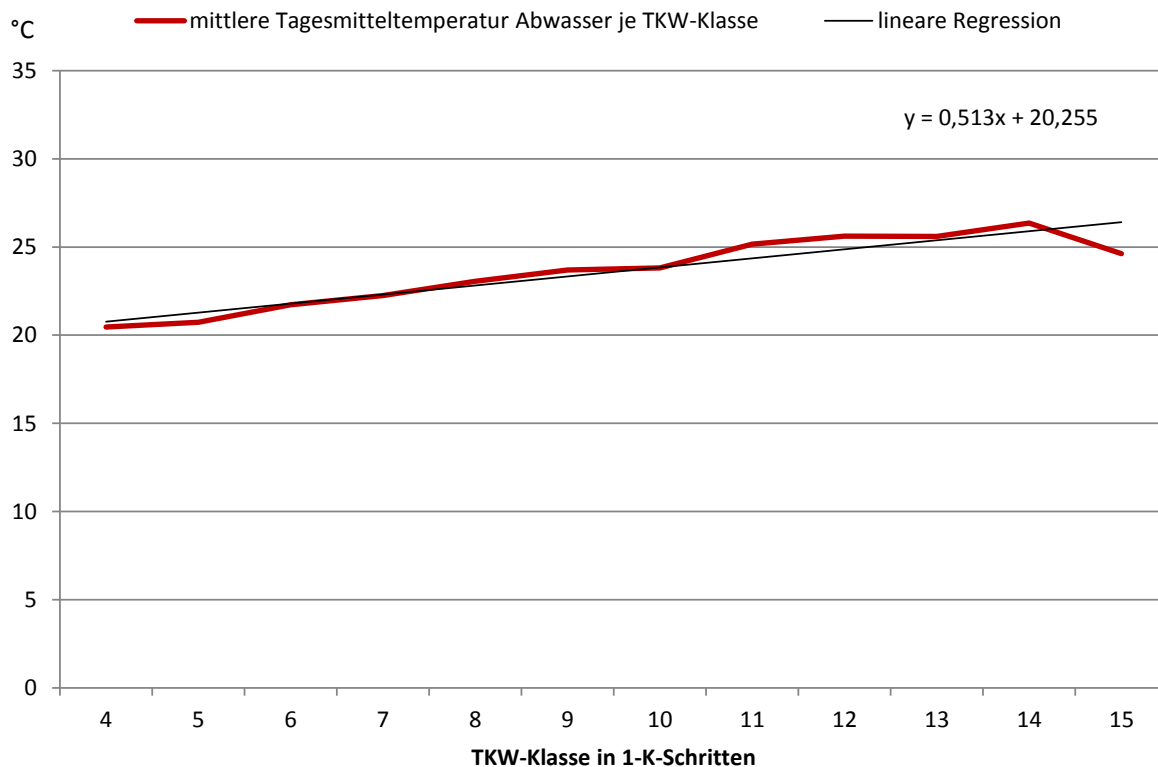
In **Abbildung 27** sind die Tagesmitteltemperaturen von Abwasser und Trinkkaltwasser für das Luisenhospital für den Messzeitraum Mai 2011 bis Januar 2013 dargestellt, wobei die Messwerte des grau gekennzeichneten Zeitraums aufgrund von Unstimmigkeiten aus der Untersuchung herausgenommen wurden. Für das Krankenhausgebäude ist ebenfalls eine Abhängigkeit zwischen Abwasser- und Trinkkaltwassertemperatur zu erkennen, welche durch den hohen Korrelationskoeffizienten von 0,93 bestätigt wird.



Ermittelt aus Messdaten von Mai 2011 bis Februar 2013. Der Korrelationskoeffizient beträgt $\rho(\text{Abw}, \text{TKW}) = 0,93$. Für den grau gekennzeichneten Zeitraum liegen keine oder unvollständige Daten vor.

Abbildung 27: Verlauf Abwasser- und TKW-Temperatur, Tagesdurchschnittswerte, LUI

In **Abbildung 28** ist das Ergebnis der Regressionsanalyse für das Krankenhaus dargestellt. Es zeigt die mittlere Tagesmitteltemperatur des Abwassers der Trinkkaltwassertemperaturklassen von 4 bis 15 °C sowie die Regressionsgerade. Die Steigung der Regressionsgerade beträgt 0,51, was der Größenordnung des Hotelgebäudes (0,47) entspricht.



Ermittelt aus Messdaten von Mai 2011 bis Februar 2013.

Abbildung 28: Lineare Regression Abwasser-Trinkkaltwasser-Temperatur, LUI

Die vorhergehend beschriebene Analyse zur Einflussgröße einer schwankenden Trinkkaltwassertemperatur auf die Abwassertemperatur ergibt für die betrachteten Gebäude eine hohe Korrelation der beiden Temperaturen. Die Regressionsanalyse zeigt für die Wohngebäude eine Regressionsgeradensteigung im Bereich von 0,30 bis 0,38 und für Hotel und Krankenhaus eine stärkere Regressionsgeradensteigung von 0,47 bzw. 0,51 auf. Die Steigung gibt an, wie stark sich der Effekt einer schwankenden Trinkkaltwassertemperatur auf die Abwassertemperatur auswirkt.

Da die Trinkwarmwassertemperatur bzw. die Nutztemperatur des Trinkwarmwassers unabhängig von einer schwankenden Trinkkaltwassertemperatur ist und konstant bleibt (die schwankende Trinkkaltwassertemperatur wird über die Trinkwassererwärmungsanlage ausgeglichen), wird der Effekt der Einflussgröße Trinkkaltwassertemperatur auf die Abwassertemperatur mit steigendem Trinkwarmwasseranteil am Gesamtwasserverbrauch abgeschwächt. Zusätzlich führt eine Stagnation des Trinkkaltwassers im Gebäude, bspw. in Wasserleitungen oder in WC-Spülkästen, aufgrund der Erwärmung auf Raumtemperaturniveau zu einer Dämpfung des Effektes einer schwankenden Trinkkaltwassertemperatur auf die Abwassertemperatur.

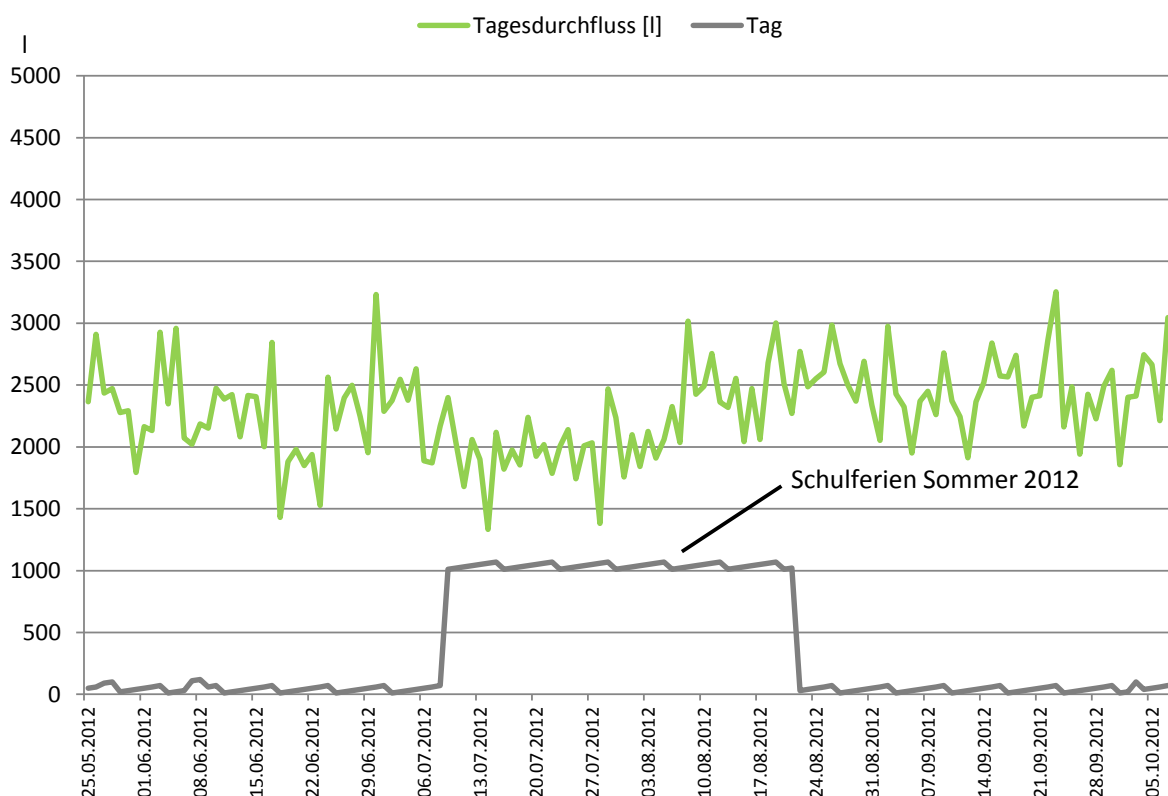
3.1.7.2 Einflussgröße Abwassermenge

Im Folgenden wird die jahreszeitliche Schwankung der Abwassermenge untersucht. Hierzu wird der Tagesdurchfluss in Litern pro Tag sowie eine Hilfsvariable zur Identifikation besonderer Zeiträume über die Zeitachse dargestellt.

Abbildung 29 zeigt den Tagesdurchfluss in Litern pro Tag für das Dürener Mehrfamilienhaus für den Messzeitraum Mai bis Oktober 2012. Die Hilfsvariable „Tag“ macht die Schulferien im Sommer 2012 sichtbar.

Der Tagesdurchfluss schwankt zwischen 1.333 und 3.254 Litern pro Tag. Die Minimalwerte werden während der Schulferien im Sommer erreicht. Aufgrund der geringen Bewohnerzahl im Dürener Mehrfamilienhaus wirkt sich die Abwesenheit einer Nutzereinheit verhältnismäßig stärker auf den durchschnittlichen Durchfluss aus als in größeren Gebäuden. Die Maximalwerte des Durchflusses werden am Wochenende erreicht.

Eine jahreszeitliche Schwankung des Tagesdurchflusses ist für den Messzeitraum nicht zu erkennen.

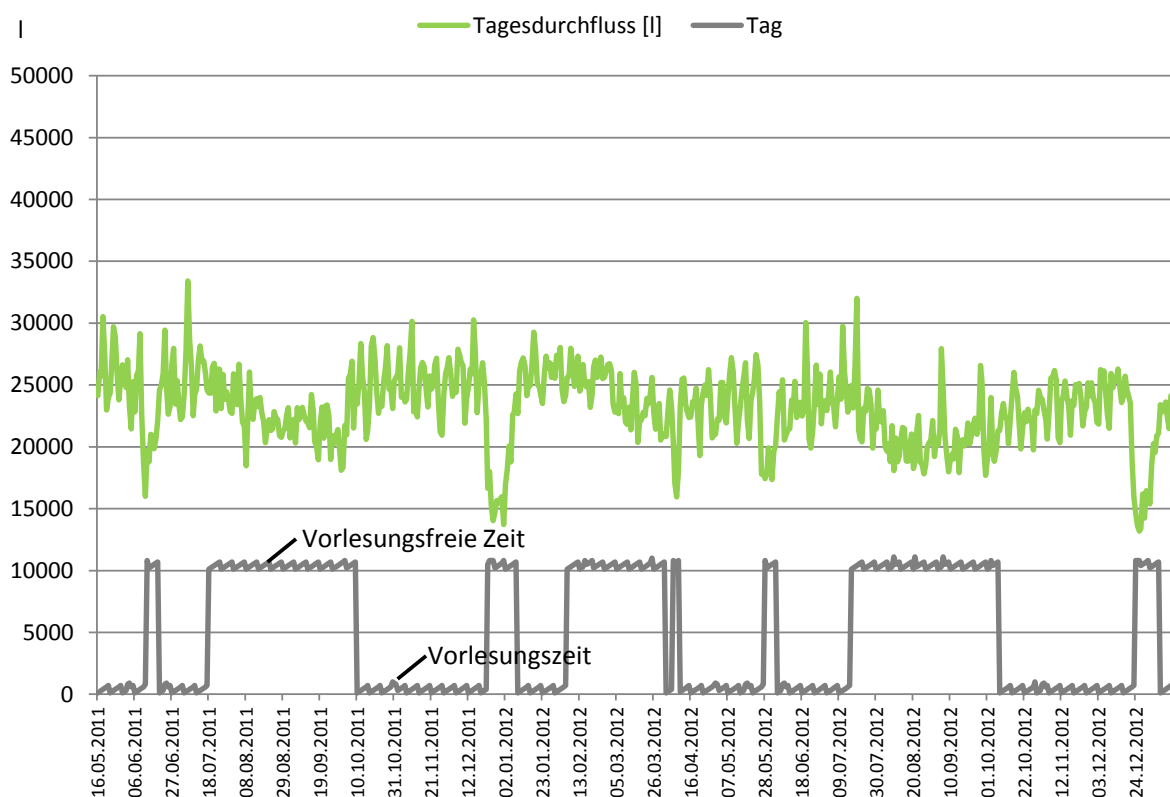


Ermittelt aus Messdaten von Mai bis Oktober 2012.

Abbildung 29: Verlauf Tagesdurchfluss, DNW

Abbildung 30 zeigt den im Studentenwohnheim Otto Petersen Haus gemessenen Tagesdurchfluss in Litern pro Tag von Mai 2011 bis Januar 2013. Mittels der Hilfsvariablen „Tag“ ist die Vorlesungszeit von der vorlesungsfreien Zeit (einschließlich Pfingstexkursionswoche der RWTH Aachen, Weihnachtsferien und Osterfeiertage) zu unterscheiden.

Die Bandbreite des Tagesdurchflusses beträgt 13.181 bis 33.422 Liter pro Tag. Die Minimalwerte des Tagesdurchflusses werden während der vorlesungsfreien Zeit an den Weihnachtstagen erreicht. In der Vorlesungszeit sind höhere Verbrauchswerte zu erkennen. Es ist davon auszugehen, dass die Anwesenheit der Bewohner in der Vorlesungszeit stärker ist als in der vorlesungsfreien Zeit. Für die Abwasserganglinien nach Kapitel 3.1.4 wird nur die Vorlesungszeit berücksichtigt.

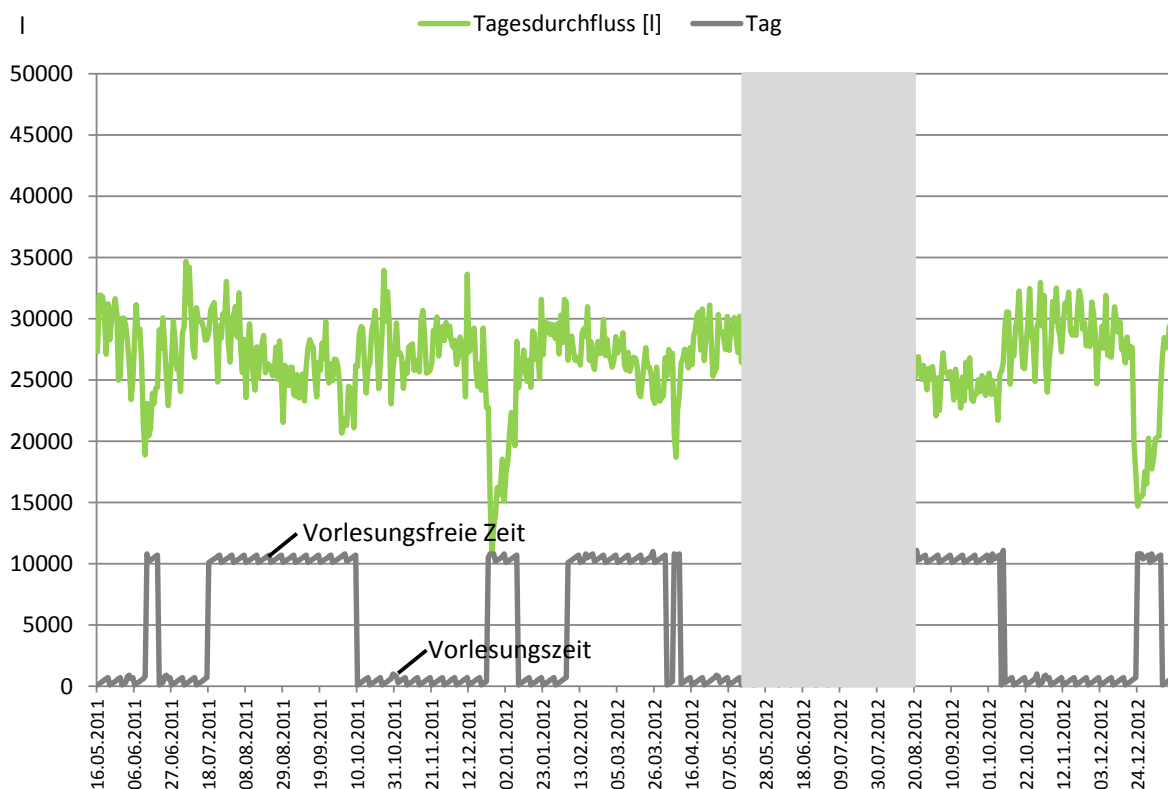


Ermittelt aus Messdaten von Mai 2011 bis Januar 2013.

Abbildung 30: Verlauf Tagesdurchfluss, OPH

In **Abbildung 31** sind der Tagesdurchfluss in Litern pro Tag sowie eine Hilfsvariable „Tag“ zur Identifikation von Vorlesungszeit und vorlesungsfreier Zeit für das Studentenwohnheim Theodore von Kármán Haus dargestellt.

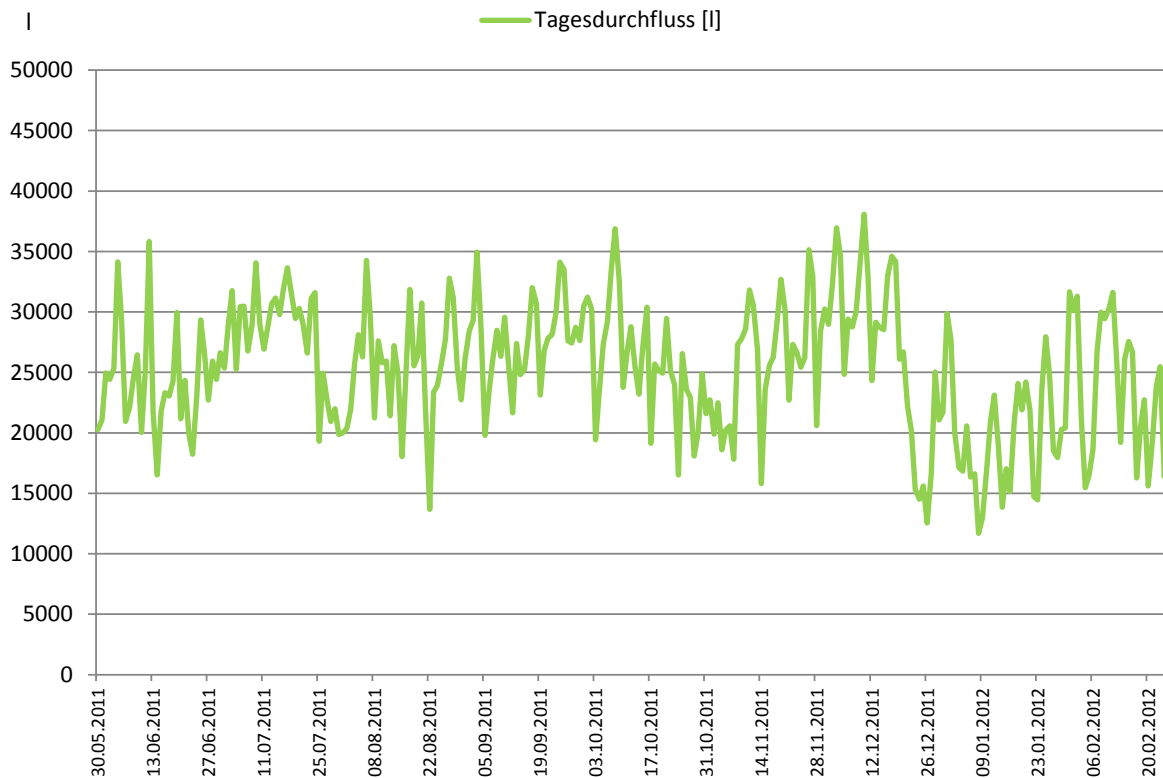
Der Tagesdurchfluss schwankt zwischen 10.859 und 46.081 Litern pro Tag. Die Minimalwerte werden während der vorlesungsfreien Zeit an den Weihnachtstagen erreicht. In der Vorlesungszeit werden höhere Verbrauchswerte als in der vorlesungsfreien Zeit erreicht. Auch hier ist davon auszugehen, dass die Anwesenheit der Bewohner in der Vorlesungszeit stärker ist als in der vorlesungsfreien Zeit. Für die Abwasserganglinien nach Kapitel 3.1.3 wird nur die Vorlesungszeit berücksichtigt.



Ermittelt aus Messdaten von Mai 2011 bis Januar 2013. Für den grau gekennzeichneten Zeitraum liegen keine oder unvollständige Daten vor.

Abbildung 31: Verlauf Tagesdurchfluss, TKH

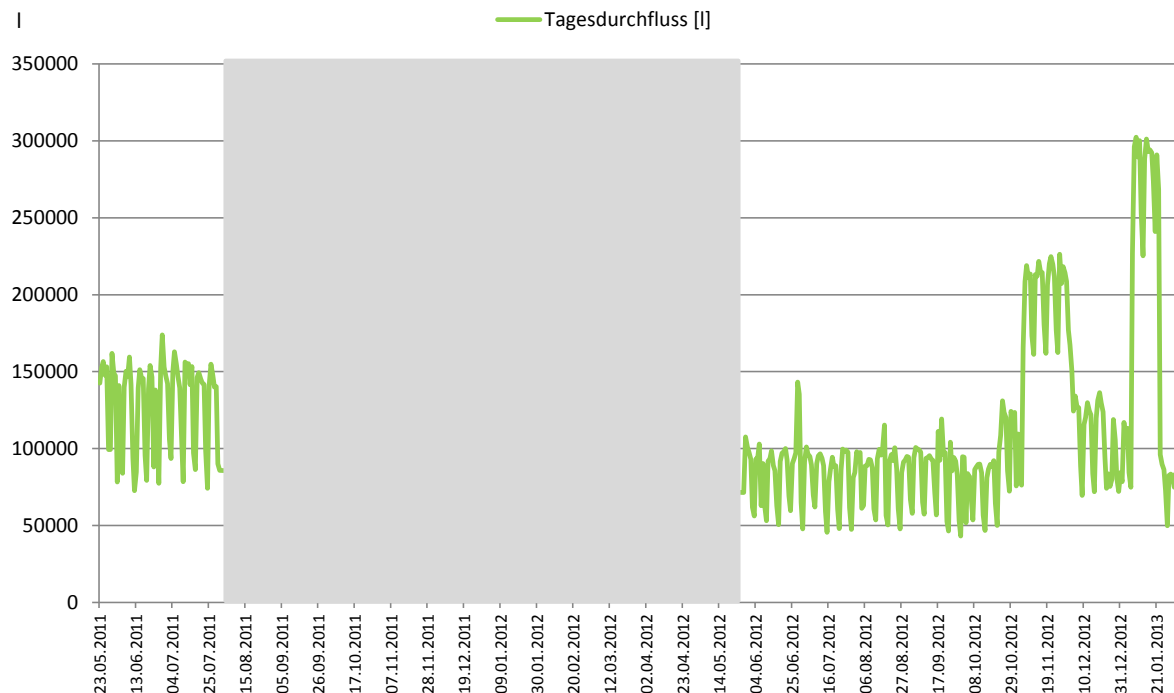
Abbildung 32 zeigt den Verlauf des Tagesdurchflusses in Litern pro Tag für das Hotelgebäude. Der Tagesdurchfluss schwankt zwischen 11.698 und 38.093 Litern pro Tag. Detailinformationen über die Auslastung des Hotels, die die wesentliche Ursache der Schwankungen sein dürfte, liegen uns aus Vertraulichkeitsgründen leider nicht vor.



Ermittelt aus Messdaten von Mai 2011 bis März 2012.

Abbildung 32: Verlauf Tagesdurchfluss, Hotel

Abbildung 33 zeigt den Tagesdurchfluss in Litern pro Tag für das Luisenhospital. Es sind stark schwankende Verbräuche von 43.061 bis 302.357 Litern pro Tag festzustellen, welche nicht auf jahreszeitliche Einflussfaktoren zurückzuführen sind. Gründe für die Verbrauchsspitzen im Herbst/Winter 2012/2013 können in einer Fremdnutzung des Wasseranschlusses liegen. Diese Messdaten wurden nicht für die Bildung der repräsentativen Abwasserganglinien verwendet.



Ermittelt aus Messdaten von Mai 2011 bis Januar 2013. Für den grau gekennzeichneten Zeitraum liegen keine oder unvollständige Daten vor.

Abbildung 33: Verlauf Tagesdurchfluss, LUI

Als Ergebnis der Untersuchung der Einflussgröße der Jahreszeit auf die Abwassermenge aller Objekte ist festzustellen, dass keine jahreszeitliche Schwankung der Abwassermenge zu erkennen ist. Die Schwankung der Abwassermenge der einzelnen Wochentage wurde bereits durch die Aufteilung der Abwasserganglinien in Werktage, Samstage und Sonntage berücksichtigt. Des Weiteren wurde bei den Studentenwohnheimen aufgrund der höheren Volatilität der Abwassermenge in der vorlesungsfreien Zeit nur die Vorlesungszeit zur Bildung der repräsentativen Ganglinien herangezogen.

3.1.7.3 Einflussgröße Duschverhalten

Für die Untersuchung des Einflusses des individuellen Duschverhaltens der Bewohner der Studentenwohnheime werden im Folgenden die stündlichen Durchflüsse aus dem Monitoring den Duschzeiten aus einer durchgeführten Umfrage gegenübergestellt. In der Umfrage wurden u.a. die Duschhäufigkeit und die vorwiegenden Duschzeiten abgefragt.¹⁴ Die Rücklaufquoten der Befragungsbögen betrugen im OPH 40,1 % und im TKH 35,0 %. Als mittlere Wasserentnahme eines Duschvorgangs werden im Folgenden 35 Liter angenommen.

Die Durchflüsse und Abwassertemperaturen der jeweiligen Tage sind den Tagesganglinien (nur Vorlesungszeit) entnommen. Der Vergleich bezieht sich nur auf die Vorlesungszeit, da hier der Tagesablauf der Studenten geregelter ist als in der vorlesungsfreien Zeit (die Unterscheidung zwischen Vorlesungszeit und vorlesungsfreier Zeit wurde ebenfalls in der Umfrage vorgenommen). **Abbildung 34** zeigt die Gegenüberstellung des gemessenen Durchflusses und des Durchflusses aufgrund von Duschvorgängen laut Umfrage für die Werktage Montag bis Freitag im OPH, sowie den errechneten Durchfluss ohne Duschanteil (nach Umfrage). Es ist zu erkennen, dass insbesondere in der Morgenstunde von 7:00 bis 8:00 Uhr ein großer Teil des entstehenden Abwassers durch Duschvorgänge erklärt werden kann. Auch Teile des Abwasseraufkommens in den Abendstunden lassen sich durch die Duschnutzung erklären. Es ist deutlich zu erkennen, dass in den Nachtstunden von 1:00 bis 6:00 Uhr und während des Nachmittags von 13:00 bis 17:00 Uhr das Duschen keinen Beitrag zur Entstehung des Abwassers leistet. Wird das gemessene Durchflussprofil um den Duschanteil (nach Umfrage) bereinigt, ist in den Tag- und Abendstunden ein stetiger Wasserverbrauch von ca. 5 Liter pro Stunde und Person zu erkennen.

¹⁴ Der Umfragebogen ist im Anhang 1 zu finden. Die Umfrage wurde im Rahmen einer Diplomarbeit am Lehrstuhl für Baubetrieb und Gebäudetechnik der RWTH Aachen University durchgeführt.

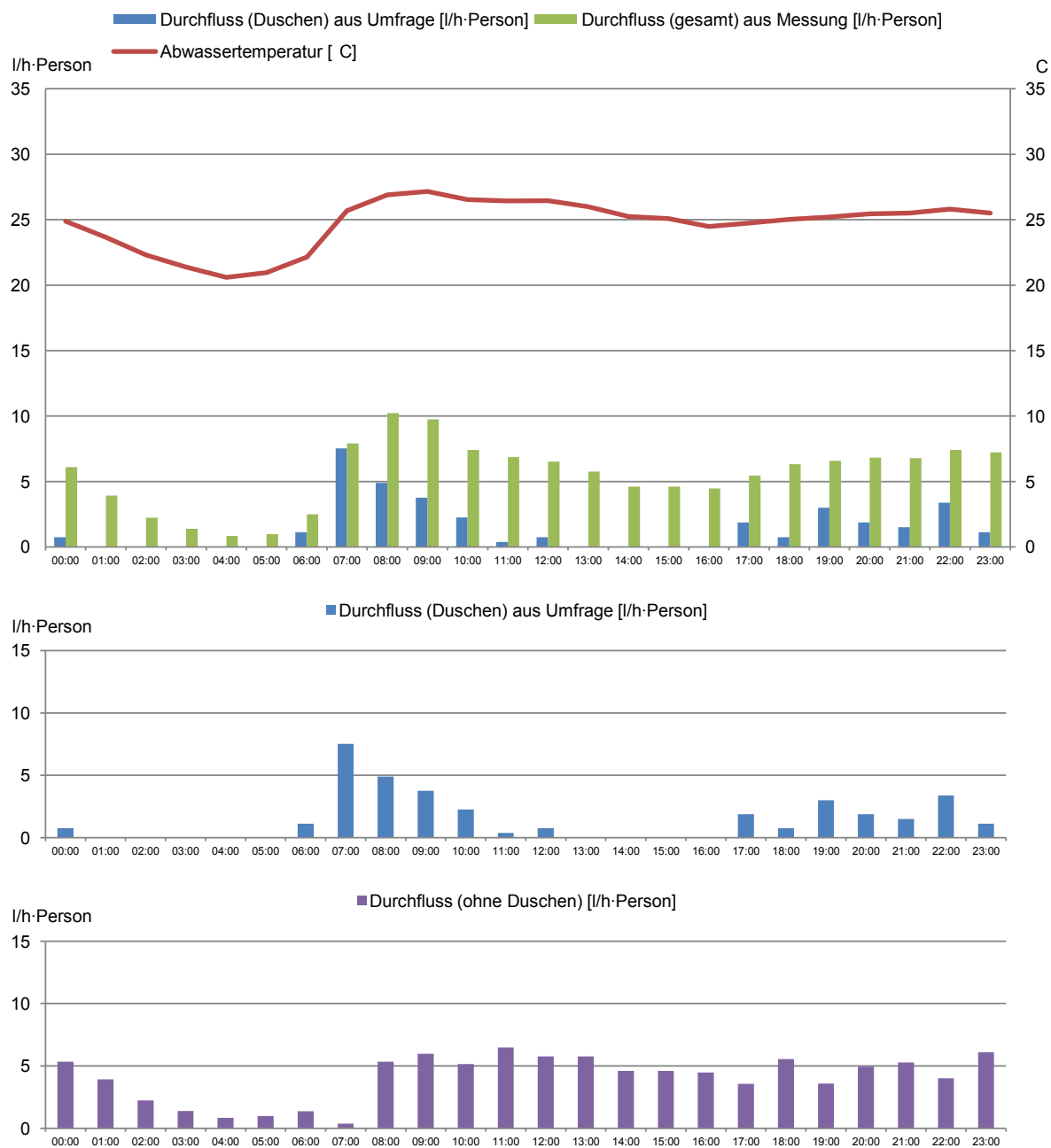


Abbildung 34: Duschverhalten, Vorlesungszeit, Montag bis Freitag, OPH

Da bereits vor der Durchführung der Umfrage vermutet wurde, dass sich das Verhalten der Bewohner der Gebäude an den Wochenenden von dem an Werktagen unterscheidet, wurden die Duschzeitpunkte für die Samstage und Sonntage gesondert abgefragt. **Abbildung 35** stellt den Vergleich für die Samstage der Vorlesungszeit im OPH dar.

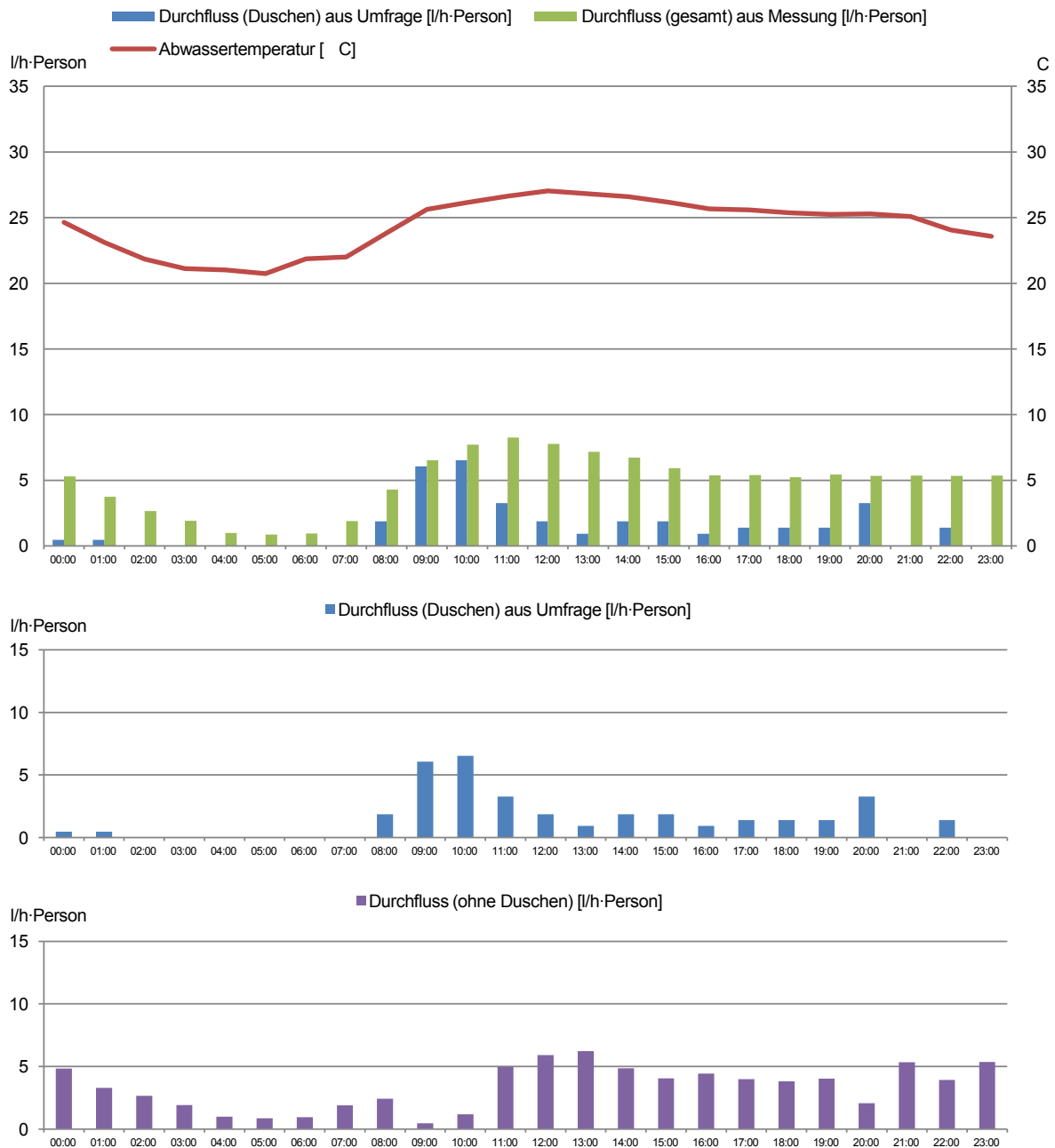


Abbildung 35: Duschverhalten, Vorlesungszeit, Samstag, OPH

Es ist sowohl bei dem aus den Ergebnissen der Umfrage ermittelten Durchfluss als auch bei dem gemessenen Durchfluss eine Verschiebung der Lastspitze auf die späteren Morgenstunden zu beobachten. Ein Großteil der Bewohner gibt an, die Dusche in den Stunden zwischen 9:00 und 11:00 Uhr zu benutzen. In dieser Zeit lässt sich beinahe das gesamte Abwasseraufkommen durch Duschvorgänge erklären. Im Vergleich zu den Werktagen ist auffäl-

lig, dass im weiteren Tagesverlauf das Duschen einen Beitrag zur Entstehung von Abwasser leistet.

Die Verteilung der Duschzeitpunkte an Sonntagen der Vorlesungszeit, dargestellt in **Abbildung 36**, ähnelt denen der Samstage. Der Durchfluss in den Morgenstunden von 9:00 bis 12:00 Uhr lässt sich fast vollständig mit der Duschnutzung erklären.

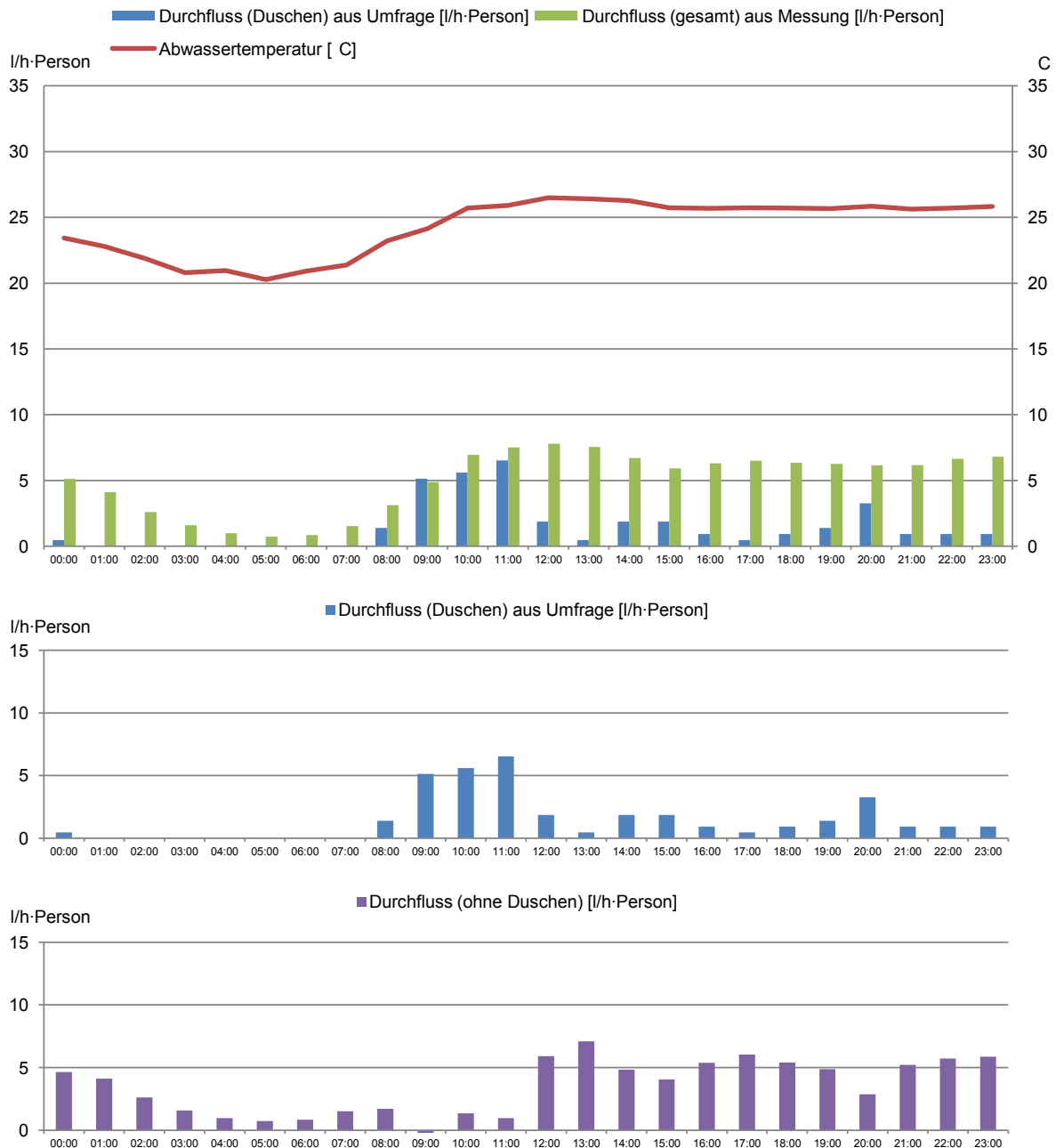


Abbildung 36: Duschverhalten, Vorlesungszeit Sonntag, OPH

Im Folgenden werden die Vergleiche für das TKH durchgeführt. **Abbildung 37** stellt den Verlauf für die Werktage Montag bis Freitag der Vorlesungszeit dar. Es besteht eine deutliche Ähnlichkeit mit den Tagen Montag bis Freitag in der Vorlesungszeit im OPH. Die Bewohner geben an, dass sie die Duschen hauptsächlich zwischen 7:00 und 10:00 Uhr nutzen. Auch hier lässt sich ein großer Teil des gemessenen Durchflusses durch diese Duschvorgänge erklären. Des Weiteren trägt in den Abendstunden ab 19:00 Uhr das Duschen einen bedeutenden Teil zur Abwasserentstehung bei. Entsprechend den Ergebnissen beim OPH finden in den Nachmittagsstunden zwischen 13:00 und 16:00 Uhr keine Duschvorgänge statt.

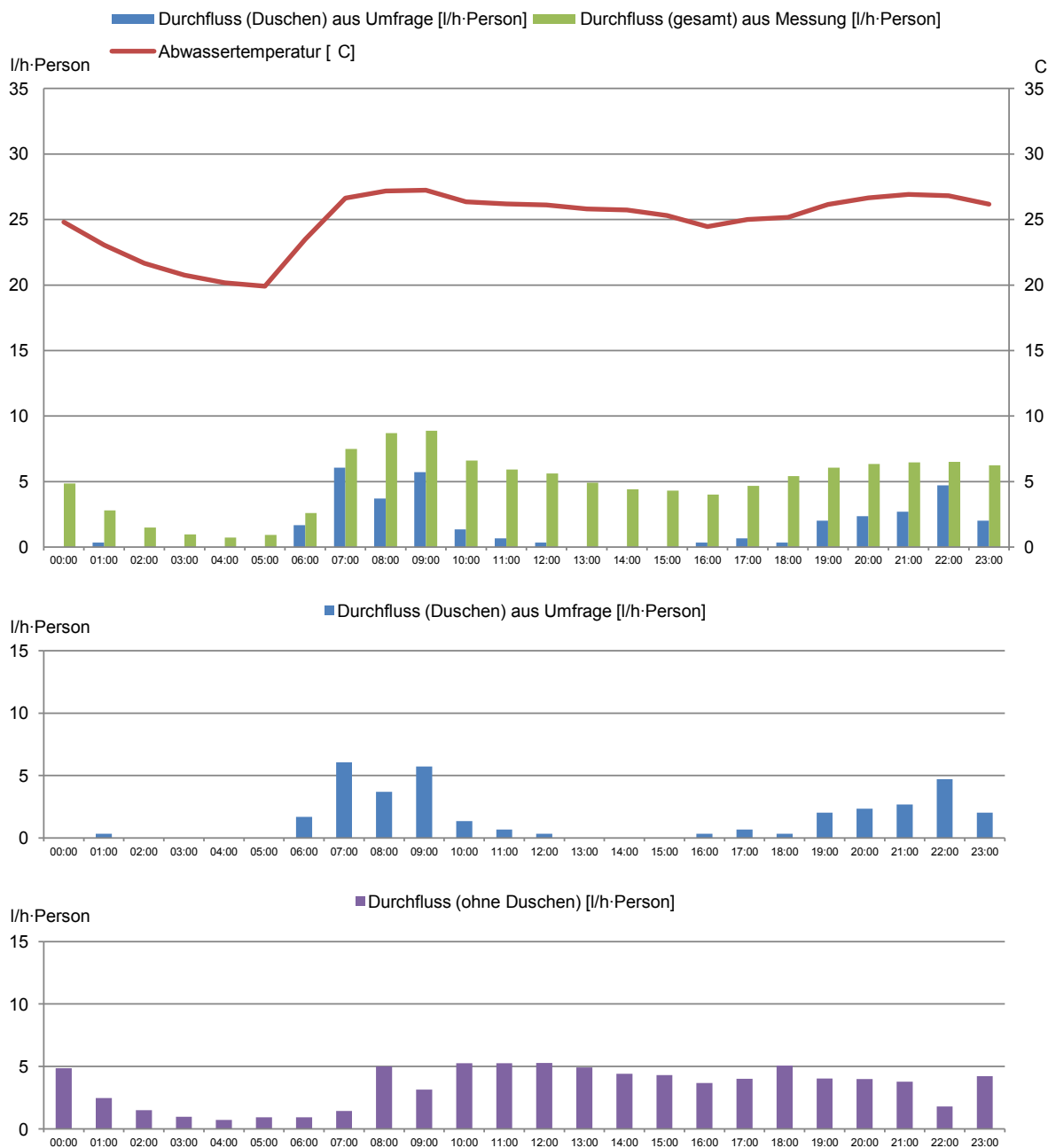


Abbildung 37: Duschverhalten, Vorlesungszeit, Montag bis Freitag, TKH

Auch an den Samstagen in der Vorlesungszeit sind deutliche Gemeinsamkeiten bei der Betrachtung des OPH und des TKH festzustellen. **Abbildung 38** stellt den Verlauf Durchflusses jeweils auf Basis der Messungen und der Angaben der Bewohner zum Duschverhalten für das TKH dar. Auch hier verschiebt sich der häufigste Duschzeitpunkt im Vergleich zu den Tagen Montag bis Freitag deutlich nach hinten. Die meisten Bewohner nutzen die Duschen erst zwischen 10:00 und 11:00 Uhr. In den Stunden von 9:00 bis 12:00 Uhr lässt sich ein großer Teil des Durchflusses durch Duschvorgänge erklären.

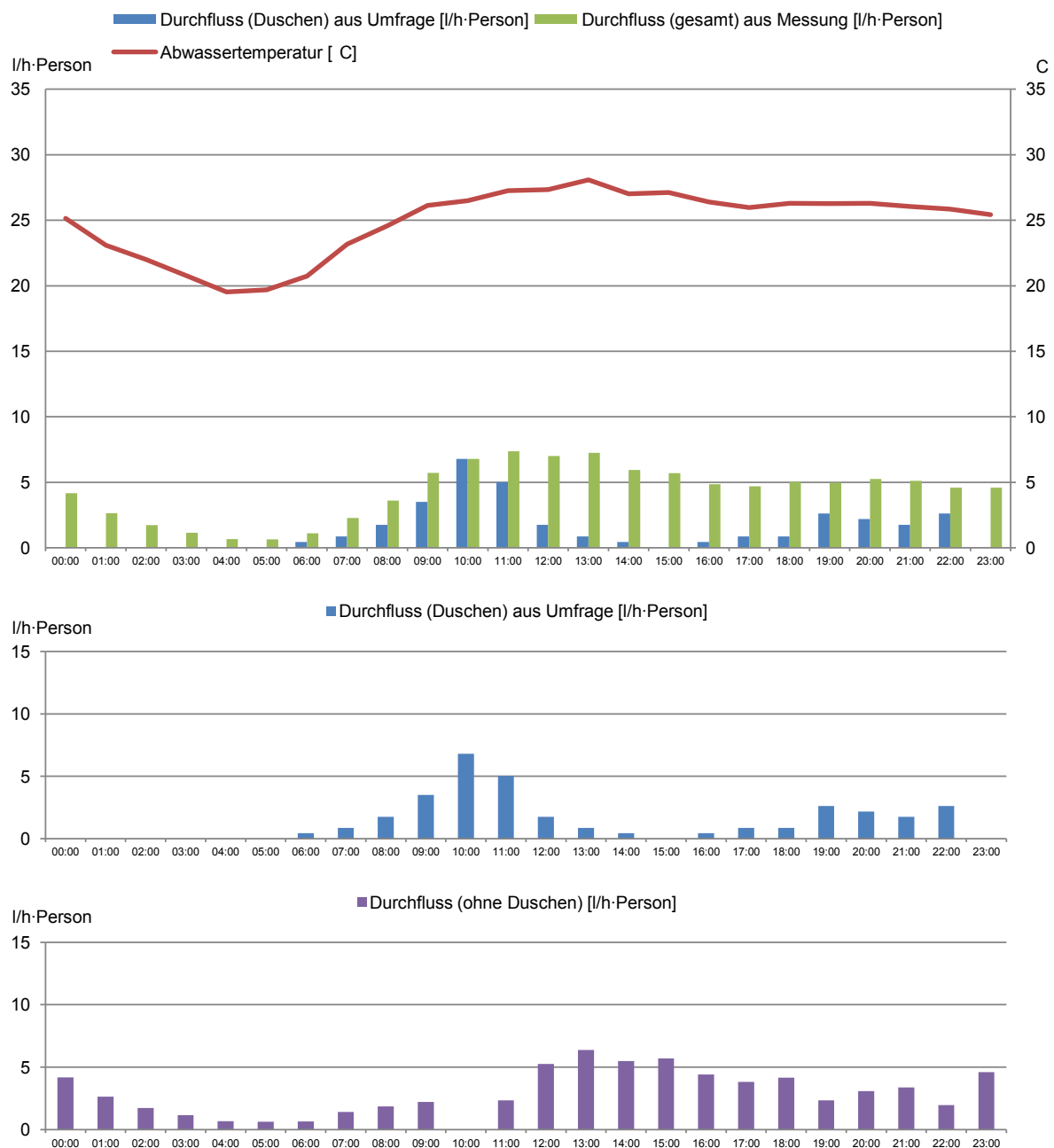


Abbildung 38: Duschverhalten, Vorlesungszeit, Samstag, TKH

Abbildung 39 zeigt die Gegenüberstellung der Messdaten zu den Umfrageergebnissen für Sonntage. Wie auch beim OPH geben die Bewohner an, die Duschen hauptsächlich in der Zeit von 9:00 bis 12:00 Uhr zu nutzen. Der gemessene Durchfluss lässt sich in diesen Stunden anhand der Duschvorgänge erklären. Allerdings ist festzustellen, dass der maximale Durchfluss an diesen Tagen erst zwischen 12:00 und 13:00 Uhr anfällt.

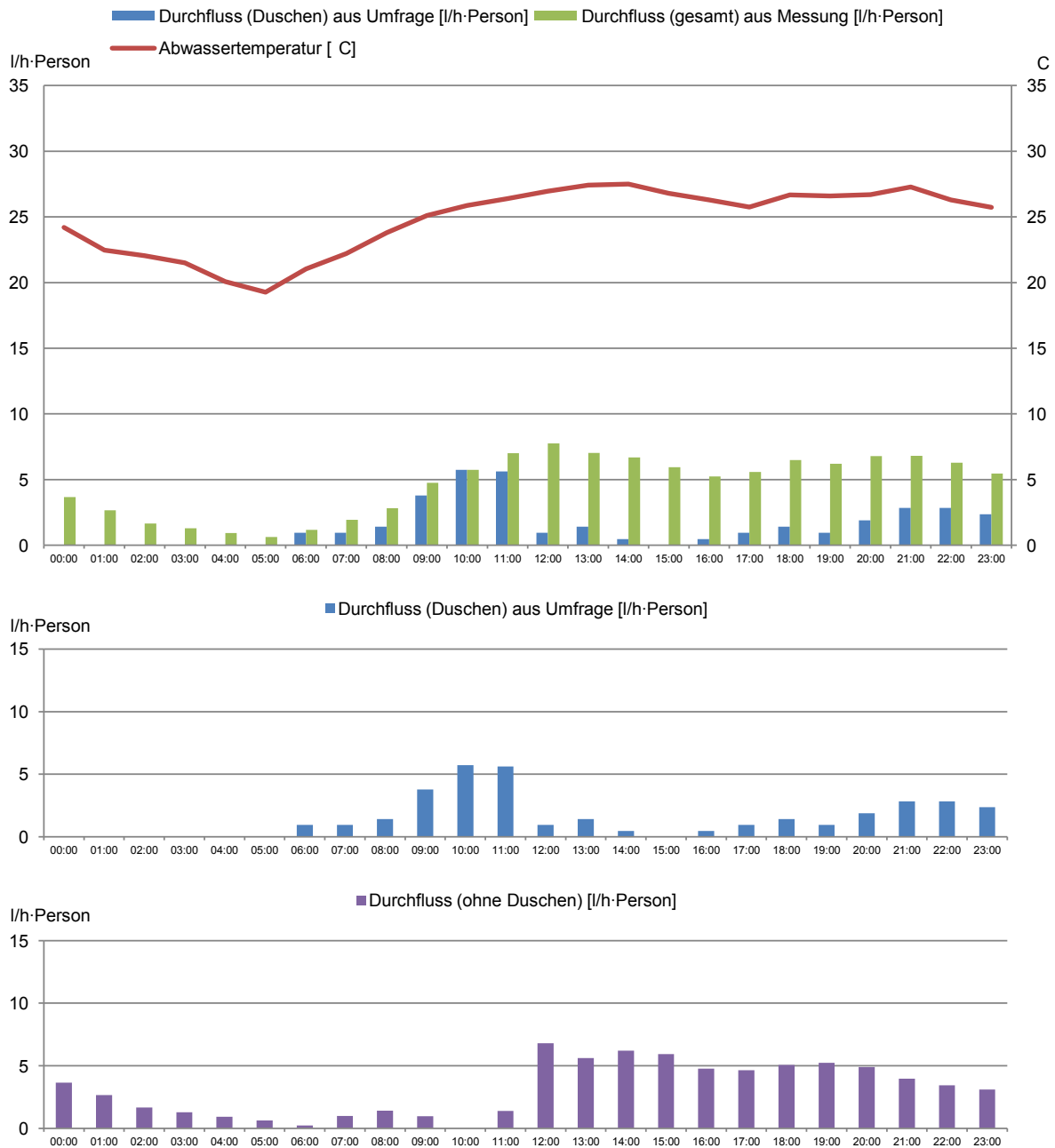


Abbildung 39: Duschverhalten, Vorlesungszeit Sonntag, TKH

3.1.8 Zusammenfassung Messergebnisse

Zusammenfassend lassen sich folgende Wasserverbräuche und Abwassertemperaturen feststellen:

- Täglicher Pro-Kopf-Wasserverbrauch bei der Wohnnutzung:
 Werktags: $V_{Abw} = 113,3 - 127,6 \text{ Liter/(Person} \cdot \text{Tag)}$
 Wochenende: $V_{Abw} = 103,0 - 145,2 \text{ Liter/(Person} \cdot \text{Tag)}$
- Täglicher Pro-Zimmer- bzw. Pro-Bett-Wasserverbrauch:
 Hotel: $V_{Abw} = 156,7 - 197,3 \text{ Liter/(Zimmer} \cdot \text{Tag)}$
 Krankenhaus: $V_{Abw} = 182,4 - 326,8 \text{ Liter/(Bett} \cdot \text{Tag)}$
- Mittlere tägliche Abwassertemperatur: $\vartheta_{Abw} = 21,0 - 26,1 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Alle vorgestellten Ganglinien zeigen in den Morgenstunden eine ausgeprägte Trinkwasserverbrauchsspitze. Bei der Wohn- und Hotelnutzung kommt es abends zu einer zweiten, schwächeren Verbrauchsspitze. Beim Krankenhaus sind während des gesamten Tages hohe Wasserverbräuche zu erkennen.

An den Wochenendtagen ergeben sich im Vergleich zu den Wochentagen abweichende Profile. Die morgendliche Verbrauchsspitze beginnt bei der Wohnnutzung an einem Samstag mit einer einstündigen und an einem Sonntag mit einer zwei- bis mehrstündigen Verzögerung. Bei der Hotelnutzung ist an beiden Wochenendtagen eine im Vergleich zu Wochentagen um eine Stunde nach hinten verlagerte morgendliche Verbrauchsspitze zu beobachten. Die Wochenendprofile des Krankenhauses zeigen keine zeitliche Verschiebung der Morgenspitze.

Die durchschnittlichen Abwassertemperaturen von 21 bis 26 °C zeigen das im Vergleich zu regenerativen Energiequellen hohe Temperaturniveau der Wärmequelle Abwasser. Die höchsten stündlichen Mittelwerte der Abwassertemperatur von über 28 °C treten während der Trinkwasserverbrauchsspitzen auf, wodurch eine mögliche dezentrale energetische Verwendung unterstützt wird.

Die Analyse der Einflussgröße einer schwankenden Trinkkaltwassertemperatur auf das Abwassertemperaturniveau ergibt eine hohe Korrelation der beiden Temperaturen. Das Ergebnis der Regressionsanalyse zeigt, dass eine Erhöhung bzw. ein Absinken der Trinkkaltwassertemperatur um 1 K eine Erhöhung bzw. ein Absinken der mittleren Abwassertemperatur um 0,3-0,38 K bei der Wohnnutzung bzw. 0,47-0,51 K bei Hotel und Krankenhaus bewirkt. Eine jahreszeitliche Schwankung der Abwassermenge kann nicht festgestellt werden. Mittels einer Umfrage in den beiden Studentenwohnheimen wurde das Duschverhalten der Bewohner abgefragt. Als Ergebnis ist festzustellen, dass vorwiegend in den Morgenstunden geduscht wird, womit die Morgenspitze in den Abwasserganglinien erklärt werden kann.

Die Ganglinien lassen sich als Eingangsgrößen für die Auslegung und die Simulation von Abwasserwärmerückgewinnungssystemen nutzen.

3.2 Analyse von Anlagenkonzepten

Im Folgenden werden Ergebnisse der simulierten Anlagenkonzepte sowie der Wirtschaftlichkeitsuntersuchung vorgestellt. Am Beispiel des Studentenwohnheims Theodore von Kármán Haus werden ausführliche Simulationsergebnisse gezeigt. Danach folgen die Ergebnisse für die weiteren Wohngebäude.

3.2.1 Studentenwohnheim Theodore von Kármán Haus

In diesem Teilabschnitt werden für das Studentenwohnheim Theodore von Kármán Haus die Ergebnisse der Simulation des Grundsystems, der Variation der Biofilmschichtdicke, der Variation der Teilerwärmungstemperatur der Wärmepumpe sowie der Wirtschaftlichkeitsuntersuchung vorgestellt.

3.2.1.1 Simulation des Grundsystems

Als Grundsystem wird ein bivalenter Speicher-Trinkwassererwärmer für das Theodore von Kármán Haus nach **Abbildung 11**, welcher mittels Abwasserwärmepumpe und Gaskessel erwärmt wird, simuliert. Randbedingungen für die Simulation sind:

- Sicherstellung der Trinkwarmwassertemperatur $\vartheta_{\text{TWW}} = 60 \text{ }^{\circ}\text{C}$
- Teilerwärmung¹⁵ des Trinkwarmwassers durch die Abwasserwärmepumpe auf $\vartheta_{\text{Teilerwärmung}} = 45 \text{ }^{\circ}\text{C}$
- Trinkkaltwassertemperatur $\vartheta_{\text{TKW}} = 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$
- Volumen des Trinkwassererwärmers¹⁶ $V_{\text{TWW-Speicher}} = 5 \text{ m}^3$
- Volumen des Abwasserzischenspeichers¹⁷ $V_{\text{Abwasserspeicher}} = 5 \text{ m}^3$
- Heizleistung der Wärmepumpe¹⁸ beträgt 24 kW
- die thermische Desinfektion (Erhitzung auf 60°C) des Speichers erfolgt einmal täglich mittels Gaskessel

Aufgrund des Nährstoffreichtums des Medium Abwassers kommt es zur Bildung von Biofilmen an den Kontaktflächen. Hierbei ist die Biofilmbildung am abwasserseitigen Wärmeübertrager von besonderem Interesse, da der Biofilm eine geringe Wärmeleitfähigkeit aufweist und somit eine isolierende Wirkung hat und den Wärmedurchgang des Wärmeübertragers erheblich behindern kann. In der Simulation wird ein Biofilm mit einer mittleren Stärke von 1 mm angesetzt, was einem nahezu sauberen Wärmeübertrager durch regelmäßige Abreinigung im mindestens 1-Tagesintervall voraussetzt:

¹⁵ Dieser Parameter wird in der Simulation noch variiert.

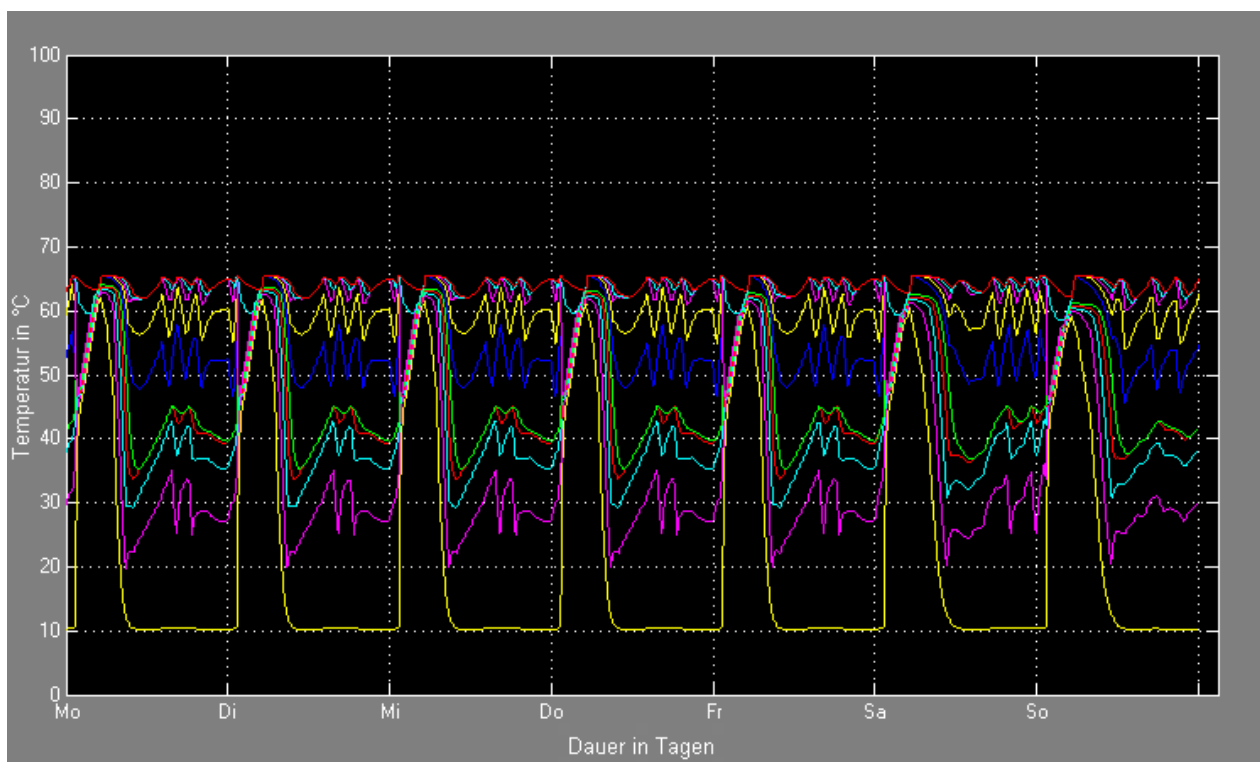
¹⁶ Das angesetzte Speichervolumen von 5 m³ entspricht der im TKW aktuell installierten Speichergröße. Dieser Parameter wird in der Simulation nicht weiter variiert.

¹⁷ Das Volumen des Abwasserzischenspeichers wurde in Voruntersuchungen zu 5 m³ bestimmt. Dieser Parameter wird in der Simulation nicht weiter variiert.

¹⁸ Die Heizleistung der Wärmepumpe wurde in Voruntersuchungen zu 24 kW bestimmt. Dieser Parameter wird in der Simulation nicht weiter variiert.

- Dicke der Biofilmschicht¹⁹ am abwasserseitigen Wärmeübertrager $d_{\text{Biofilm}} = 1 \text{ mm}$
- Wärmeleitfähigkeit des Biofilms $\lambda_{\text{Biofilm}} = 0,5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$
- Wärmedurchgangskoeffizient $k = 539 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$

Die folgenden **Abbildungen 40 bis 43** zeigen Simulationsergebnisse des Abwasserwärmepumpensystems für eine durchschnittliche Woche von Montag bis Sonntag. **Abbildung 40** zeigt das Temperaturprofil des Speicher-Trinkwassererwärmers. Die oberste Kurve (rot) gibt die Zapftemperatur des Trinkwarmwassers (oberer Speicherbereich) im Wochenverlauf an. Die Temperatur liegt immer oberhalb von $60 \text{ }^\circ\text{C}$, womit die Hygieneanforderungen an Großanlagen eingehalten werden (vgl. Kapitel 2.2.1). Die unterste Kurve (gelb) gibt die Temperatur im untersten Speicherbereich an, welche im Tagesverlauf der Temperatur des einströmenden Trinkkaltwassers entspricht. Der Wärmeübertrager der Wärmepumpe liegt in der unteren Speicherhälfte, so dass die Temperaturkurve in der Mitte des Speichers (grün) die Temperatur direkt oberhalb des Wärmeübertragers der Wärmepumpe anzeigt. Die Wärmepumpe leistet eine Teilerwärmung des Trinkwarmwassers bis maximal $45 \text{ }^\circ\text{C}$. In der oberen Speicherhälfte ist der Wärmeübertrager des Gaskessels installiert, welcher den „Temperaturhub“ von der Teilerwärmungsstufe der Wärmepumpe auf die Zapftemperatur von über $60 \text{ }^\circ\text{C}$ sicherstellt. Zusätzlich wird einmal täglich in den Nachtstunden der gesamte Speicher durch den Gaskessel auf über $60 \text{ }^\circ\text{C}$ durchgeheizt, um das Legionellenwachstum zu vermindern (vgl. Kapitel 2.2.1). Die Wärmepumpe schaltet erst wieder ein, wenn die Temperatur in der mittleren Schicht unter $45 \text{ }^\circ\text{C}$ fällt.



Das dargestellte Temperaturprofil zeigt die Speichertemperaturen in 10 übereinanderliegenden, äquidistanten Schichten.

Abbildung 40: Temperaturprofil Speicher-Trinkwassererwärmer

¹⁹ Dieser Parameter wird in der Simulation noch variiert.

Abbildung 41 zeigt die Vor- und Rücklauftemperaturen an Verdampfer und Kondensator der Wärmepumpe. Die mittlere Vor- bzw. Rücklauftemperatur am Verdampfer beträgt 19,8 °C bzw. 14,8 °C. Die mittlere Vor- bzw. Rücklauftemperatur am Kondensator liegt bei 44,0 °C bzw. 38,4 °C. Die Vorlauftemperatur am Verdampfer (violett) stellt sich u.a. als Ergebnis der isolierenden Wirkung des Biofoulings ein. Im Mittel arbeitet die Wärmepumpe mit einem „Temperaturhub“ von 19,8 °C auf 44,0 °C.

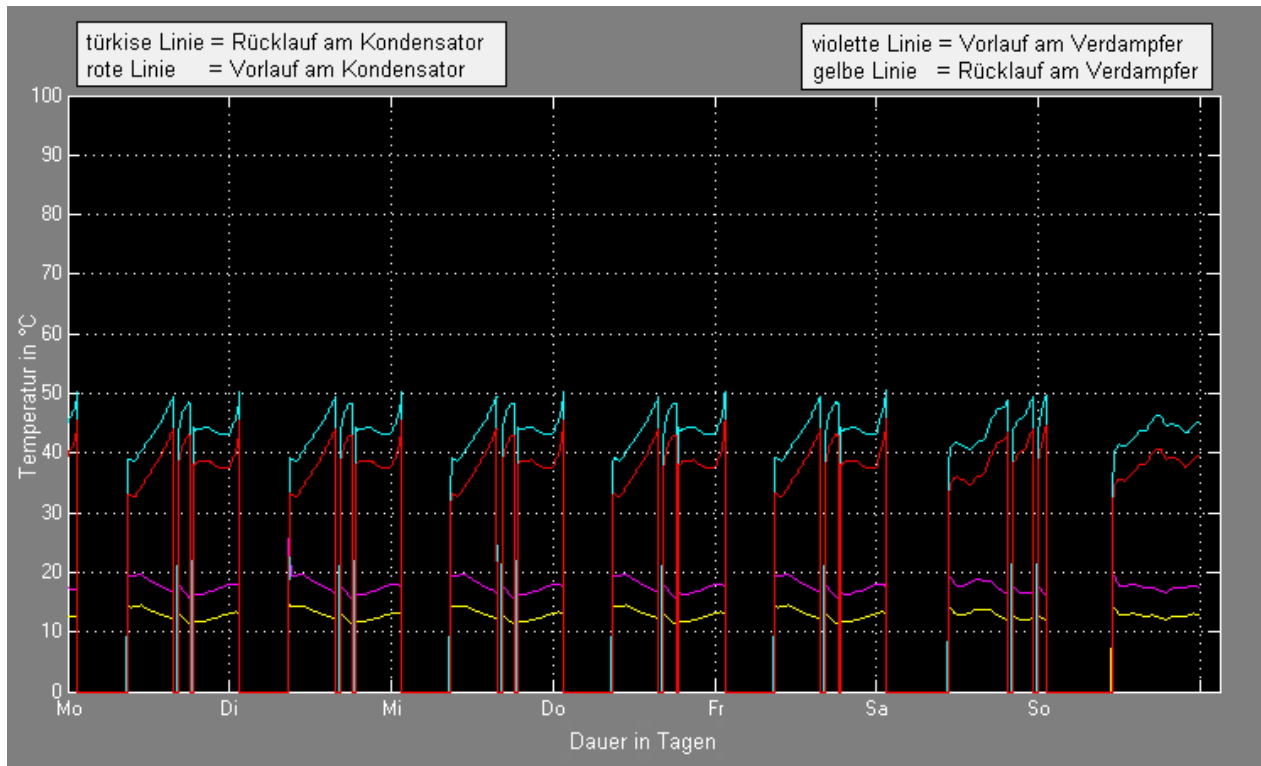


Abbildung 41: Vor- und Rücklauftemperaturen Wärmepumpe (vgl. Abbildung 11)

In **Abbildung 42** sind die Leistungszahlen (COP) der Abwasserwärmepumpe dargestellt. Die Arbeitszahl beträgt $5,52^{20}$ bei einem auf die gesamte Trinkwassererwärmung bezogenen Deckungsgrad der Wärmepumpe von 48,0 %.

Die dynamischen Ausschläge beim Einschalten der Wärmepumpe nach unten ($\text{COP} < 0$) und oben ($\text{COP} > 10$) zeigen das Ergebnis des ersten Berechnungsschritts in der Simulation. Beim Anlaufen der Wärmepumpe wird zur Berechnung der Leistungszahl die Heizleistung der Wärmepumpe sowie die elektrische Leistungsaufnahme des Verdichters berechnet. Im ersten Fall ($\text{COP} < 0$) ist beim Einschalten der Wärmepumpe (erster Berechnungsschritt) die Kondensator-Vorlauftemperatur (Speichertemperatur) höher als die Kondensator-Rücklauftemperatur (Raumtemperaturniveau), so dass kurzzeitig eine negative Heizleistung und folglich eine negative Leistungszahl berechnet wird. Der zweite Fall ($\text{COP} > 10$) tritt rechenstechnisch auf, wenn die Wärmepumpe kurz vorher in Betrieb war und der Kondensator bzw. die Kondensator-Rücklauftemperatur noch nicht abgekühlt ist und auf verhältnismäßig hohen Temperaturniveau liegt, so dass Heizleistung und Leistungszahl im ersten Berechnungsschritt auf Grund der großen Temperaturspreizung zwischen verhältnismäßig kühler Kondensator-Vorlauftemperatur und verhältnismäßig hoher Kondensator-Rücklauftemperatur sehr groß sind.

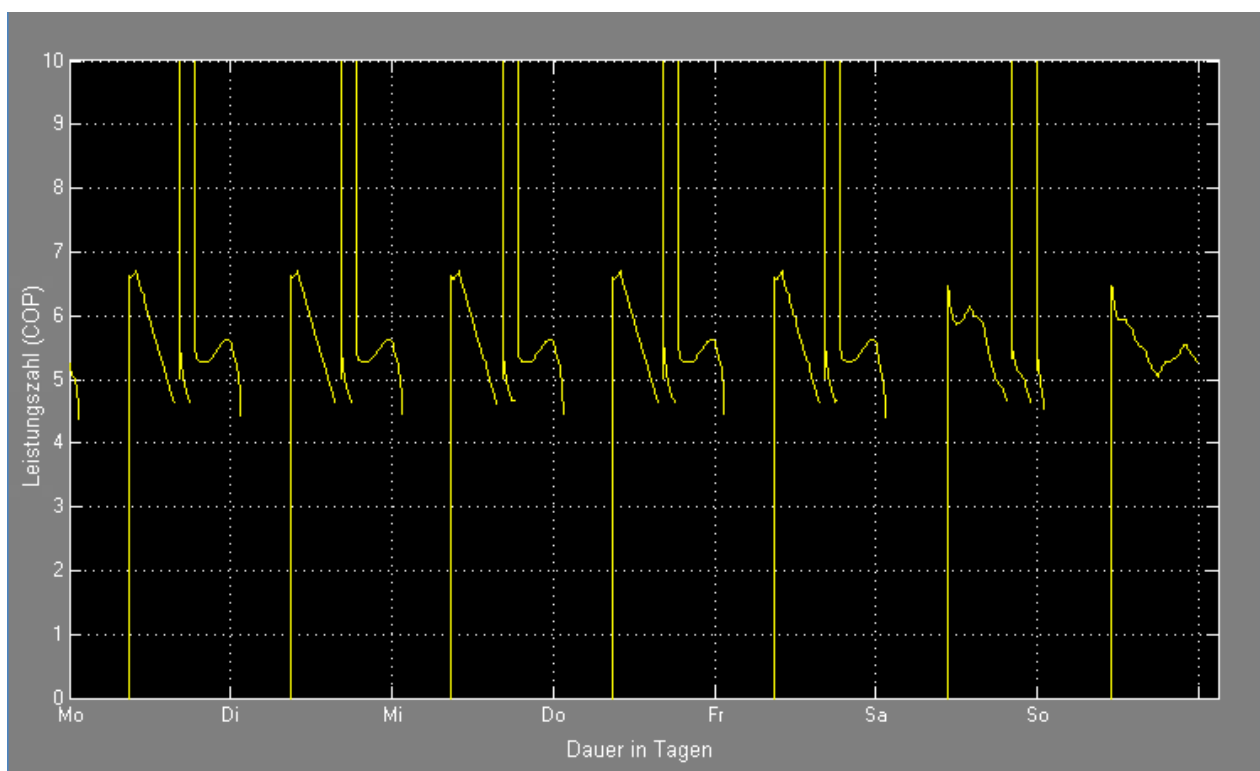
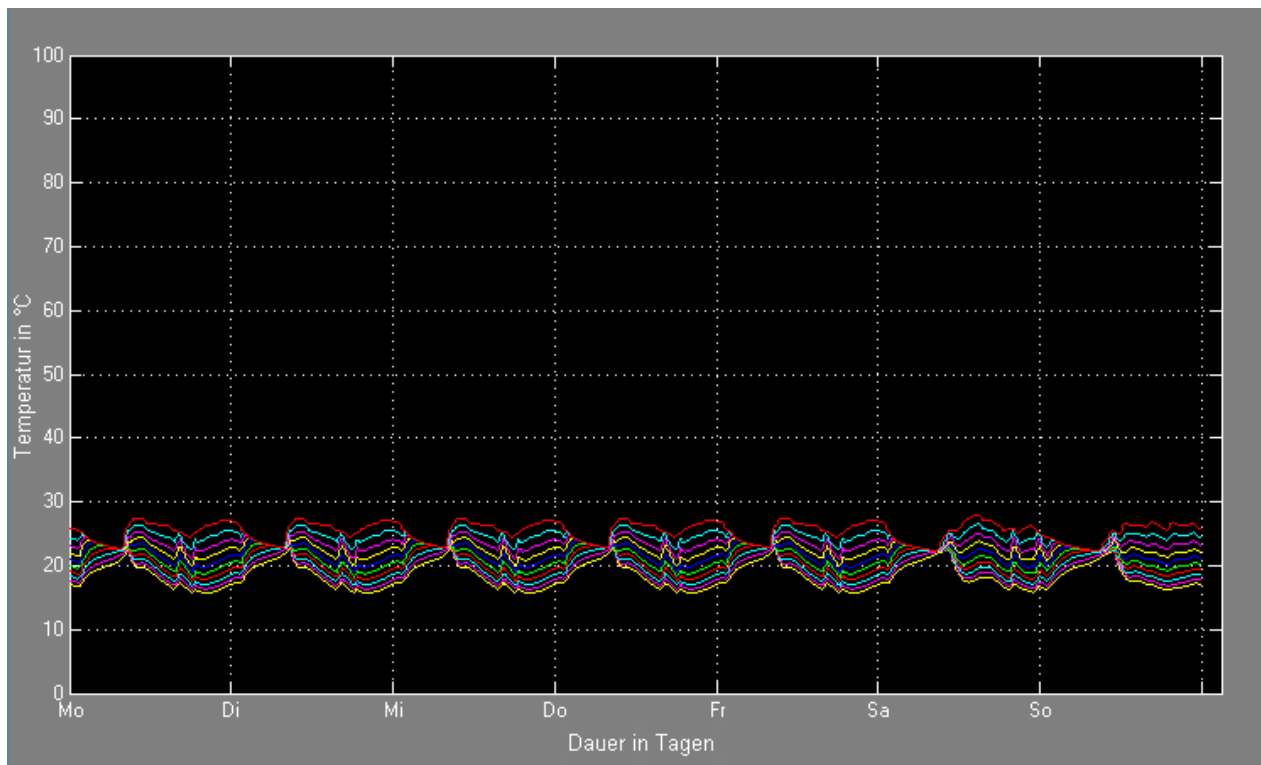


Abbildung 42: Leistungszahlen (COP) Wärmepumpe

²⁰ Die Umsetzung der theoretisch ermittelten Arbeitszahl muss in der Praxis noch bestätigt werden.

In **Abbildung 43** ist das Temperaturprofil im Abwasserzischenspeicher dargestellt. Die oberste Kurve gibt die Temperatur des dem Speicher zufließenden Abwassers (Stundenmittelwerte nach Potentialanalyse) an. Die untere Kurve stellt die Auslauftemperatur des abgekühlten Abwassers aus der untersten Speicherschicht dar. Diese entspricht der Einleittemperatur in die Straßenkanalisation. Im Mittel wird eine Einleittemperatur von 18,8 °C erreicht, was keine negativen Auswirkungen auf den Betrieb der nachgeschalteten Abwasserreinigungsanlagen (Kläranlage) erwarten lässt.



Das dargestellte Temperaturprofil zeigt die Speichertemperaturen in 10 übereinanderliegenden, äquidistanten Schichten.

Abbildung 43: Temperaturprofil Abwasserzischenspeicher

Für das simulierte System ergibt sich ein Jahres-Endenergiebedarf für Trinkwarmwasser von 991,2 kWh/a·Person²¹, wovon durch die Abwasserwärmepumpe ein Energiebedarf von 475,8 kWh/a·Person und durch den Gaskessel ein Energiebedarf von 515,4 kWh/a·Person gedeckt wird. Hieraus ergibt sich der Deckungsgrad der Wärmepumpe von 48 %.

3.2.1.2 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Für das in Kapitel 3.2.1.1 betrachtete Trinkwassererwärmungssystem werden im Folgenden die Energiekostensparnis sowie die Reduktion der CO₂-Emissionen gegenüber alleiniger Trinkwassererwärmung mit Gas berechnet. Es werden folgende Annahmen zugrunde gelegt:

- Jahres-Endenergiebedarf Trinkwarmwasser: $Q_W = 991,2 \text{ kWh/a·Person}$
- gedeckt durch Abwasserwärmepumpe: $Q_{W,WP} = 475,8 \text{ kWh/a·Person}$

²¹ Das in der Simulation verwendete TWW-Bedarfsprofil wurde aus den Messdaten berechnet. Literaturangaben ist ein Jahres-Endenergiebedarf für Trinkwarmwasser von $Q_W = 708,6 - 1.088,8 \text{ kWh/a·Person}$ (inkl. Verlusten für Verteilung und Speicherung) zu entnehmen. Vgl. Recknagel/Sprenger/Schramek, Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik, 2009, S. 1728.

- gedeckt durch Gaskessel: $Q_{W,Gaskessel} = 515,4 \text{ kWh/a} \cdot \text{Person}$
- Erzeuger-Jahresarbeitszahl $_{Wärmepumpe} = 5,52$
- Strompreis $_{WP-Tarif} = 0,2316 \text{ €/kWh}$, CO_2 -Emissionen Strom²² = 563 g/kWh
- Gaspreis = 0,0894 €/kWh, CO_2 -Emissionen Gas²³ = 201 g/kWh
- Jahresnutzungsgrad Gaskessel = 1,0 (hier angenommen).

Durch das kombinierte System Abwasserwärmepumpe und Gaskessel (Nacherhitzer) gegenüber alleiniger Trinkwassererwärmung mit Gas ergeben sich eine Energiekostensparnis von 22,57 €/a·Person bzw. 25 % und eine Reduktion der CO_2 -Emissionen von 47,1 kg/a·Person bzw. 24 %.

Hochgerechnet auf das Studentenwohnheim Theodore von Kármán Haus mit 244 Bewohnern ergibt sich eine Energiekosteneinsparung von 5.508 € pro Jahr bzw. 11,5 t CO_2 pro Jahr gegenüber Gas.

Die Energiekosteneinsparungen stehen als Erträge zur Verfügung, um eine Investition in die Abwasserwärmerückgewinnung unter Wirtschaftlichkeitsgesichtspunkten zu amortisieren. Im Folgenden wird die Wirtschaftlichkeit der Abwasserwärmepumpe nach VDI 2067 untersucht.²⁴

Die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung nach VDI 2067 wird auf Grundlage der Differenzinvestition „Nachrüsten einer Abwasserwärmepumpe in bestehendes Gas-System“ durchgeführt. Bestandteile der Investition sind Wärmepumpe, Abwasserspeicher mit Wärmeübertrager sowie Trinkwarmwasserspeicher mit zwei Wärmeübertragern zur Einbindung von Wärmepumpe und bestehenden Gaskessel. Des Weiteren werden einmalige Installationskosten sowie laufende Kosten für Instandsetzung, Wartung und Inspektion angesetzt. Die Energiekostensparnis wird mit dem Ergebnis für das Theodore von Kármán Haus (Vgl. Kapitel 3.2.1.1) von 22,57 € pro Person und Jahr abgeschätzt.

Für die Wirtschaftlichkeitsuntersuchung werden der Zinsfaktor sowie der Preisänderungsfaktor für Strom und Gas mit 1,03 abgeschätzt (Vgl. **Tabelle 1**). Der Betrachtungszeitraum wird nach VDI 2067 mit 20 Jahren angesetzt.

Entscheidungskriterien für die Wirtschaftlichkeit der betrachteten Differenzinvestition sind Barwert (Kapitalwert) und Annuität. Hierbei werden die zeitlichen Unterschiede im Auftreten der Erlöse und Kosten durch Auf- und Abzinsen berücksichtigt. Der Barwert ist die Summe der auf den Anfangszeitpunkt diskontierten Zahlungen während des Betrachtungszeitraums und stellt den erwirtschafteten Überschuss zu Anfang des Betrachtungszeitraums dar. Beim Annuitätenverfahren werden einmalige Zahlungen und laufende Zahlungen mithilfe des An-

²² Vgl. Umweltbundesamt (Hrsg.), Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emission des deutschen Strommix, 2011. Der CO_2 -Ausstoß des deutschen Strommix wird aufgrund einer verstärkten Verstromung von Kohle voraussichtlich steigen. Vorläufige Angaben sowie erste Schätzungen weisen für 2011 einen Wert von 570 g/kWh und für 2012 einen Wert von 601 g/kWh auf. Vgl. Umweltbundesamt (Hrsg.), Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emission des deutschen Strommix, 2013.

²³ Vgl. Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V. (Hrsg.), Energie Erdgas: Effiziente Technik und erneuerbare Energien, 2007, S. 5.

²⁴ Vgl. VDI 2067-1:2012.

nuitätenfaktors während des gesamten Betrachtungszeitraums zu einer periodisch konstanten Zahlung zusammengefasst. Darüber hinaus kann die Amortisationsdauer berechnet werden, welche den Zeitpunkt anzeigt, wann der Kapitaleinsatz wieder zurückgeflossen ist.²⁵

Der Annuitätsfaktor wird nach folgender Formel berechnet:

$$a = \frac{q - 1}{1 - q^{-T}}$$

$a = \text{Annuitätsfaktor}$

$q = \text{Zinsfaktor}$

$T = \text{Betrachtungszeitraum in Jahren.}$

Der Barwertfaktor berechnet sich nach:

$$b = \frac{T}{q} \text{ für } r = q$$

$b = \text{Barwertfaktor}$

$r = \text{Preisänderungsfaktor}$

$q = \text{Zinsfaktor}$

$T = \text{Betrachtungszeitraum in Jahren.}$

Der preisdynamische Annuitätsfaktor ergibt sich aus dem Produkt von Annuitätsfaktor und Barwertfaktor.

Die Berechnung der Annuität erfolgt durch Addition der Annuität der einmaligen Investition sowie der Annuität der laufenden Zahlungen. Die Annuität des Investitionsbetrags ergibt sich aus dem Produkt aus Investitionsbetrag und Annuitätsfaktor. Die Annuität der laufenden Zahlungen ergibt sich aus dem Produkt aus der laufenden Zahlung der ersten Periode mit dem preisdynamischen Annuitätsfaktor.

Zur Berechnung des Barwerts wird die Summe aus Investitionsbetrag zu Beginn der Investition und dem Barwert der laufenden Zahlungen gebildet. Der Barwert der laufenden Zahlungen ergibt sich dem Produkt der Zahlung der ersten Periode mit dem Barwertfaktor.

Übersteigt die Annuität (bzw. der Barwert) der Energiekosteneinsparungen die Annuität (bzw. den Barwert) der Kosten ist die Abwasserwärmenutzung für den Betrachtungszeitraum wirtschaftlich vorteilhaft.

Für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung werden folgende Investitionskosten²⁶ angesetzt:

- Wärmepumpe: 1.000,- € pro installierter Leistung von 1 kW

²⁵ Vgl. Franke, C., Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen, 2008.

²⁶ Die Kostenansätze basieren auf Rechercheergebnisse aus Frühjahr 2014.

- Trinkwarmwasserspeicher: 2.000,- € pro installiertem Speicherinhalt von 1 m³
- Abwasserspeicher: 2.000,- € pro installiertem Speicherinhalt von 1 m³
- Installationskosten: 1.000,- € pro installierter Leistung von 1 kW.

Die laufenden Kosten werden nach VDI 2067 als Prozentsatz der Investitionskosten angesetzt. Die Prozentsätze für Instandsetzung, Wartung und Inspektion sind in **Tabelle 1** angegeben. Es wird kein Aufwand für Bedienen angesetzt.

In **Tabelle 2** sind die Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung für das Theodore von Kàrmàn Haus zusammengefasst. Unter den getroffenen Annahmen ist die Abwasserwärmegewinnung wirtschaftlich vorteilhaft. Die Annuität der Differenzinvestition beträgt 1.314 €. Der Barwert der Differenzinvestition, welcher als Überschuss der Investition zum Anfangszeitpunkt interpretierbar ist, liegt bei 19.530 €. Die Amortisationsdauer beträgt circa 15 Jahre.

Tabelle 1: Grundlagen der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Wirtschaftlichkeitsbetrachtung nach VDI 2067						
Zinsfaktor	q	1,03				
Preisänderungsfaktor	r	1,03	(Preise für Strom, Gas, Anlagentechnik)			
Betrachtungszeitraum	T	20 Jahre				
Annuitätsfaktor	a	0,0672				
Barwertfaktor	b	19,4175				
preisdynamischer Annuitätsfaktor	b·a	1,3052				
Investitionskosten:						
Wärmepumpe	A _{0,WP}	1000 €/kW				
TWW-Speicher	A _{0,TWW}	2000 €/m ³				
Abwasser-Speicher	A _{0,ABW}	2000 €/m ³				
Installation	A _{0,In}	1000 €/kW				
Rechnerische Nutzungsdauer:						
Wärmepumpe	T _{N,WP}	20 Jahre				
TWW-Speicher	T _{N,TWW}	20 Jahre				
Abwasser-Speicher	T _{N,ABW}	20 Jahre				
Aufwand f. Instandsetzung:						
Wärmepumpe	f _{Inst,WP}	1,00%	v. A _{0,WP}			
TWW-Speicher	f _{Inst,TWW}	1,00%	v. A _{0,TWW}			
Abwasser-Speicher	f _{Inst,ABW}	1,00%	v. A _{0,ABW}			
Aufwand f. Wartung und Inspektion:						
Wärmepumpe	f _{W+Insp,WP}	1,50%	v. A _{0,WP}			
TWW-Speicher	f _{W+Insp,TWW}	1,00%	v. A _{0,TWW}			
Abwasser-Speicher	f _{W+Insp,ABW}	1,00%	v. A _{0,ABW}			
Aufwand f. Bedienen wird nicht angesetzt						
Energiekostensparnis		22,57 €/a·Person)				

Tabelle 2: Wirtschaftlichkeitsbetrachtung Theodore von Kármán Haus, TKH

TKH	Wärmepumpe (24kW)	TWW-Speicher (5m³)	Abwasser-Speicher (5m³)	Installation	Summe
Investitionskosten:					
Barwert Investition	$A_{0,WP}$	$A_{0,TWW}$	$A_{0,ABW}$	$A_{0,IN}$	68.000,00 €
Annuität Investition	$A_{N,K}$	$A_{N,K}$	$A_{N,K}$	$A_{N,K}$	4.569,60 €
laufende Kosten:					
Kosten f. Instandsetzung, Wartung, Inspektion	A_{IN}	A_{IN}	A_{IN}	-	
Barwert laufende Kosten	11.650,50 €	3.883,50 €	3.883,50 €	-	19.417,49 €
Annuität laufende Kosten	$A_{N,B}$	$A_{N,B}$	$A_{N,B}$	-	1.304,85 €
Barwert Gesamtkosten	35.650,50 €	13.883,50 €	13.883,50 €	24.000,00 €	87.417,49 €
Annuität Gesamtkosten	A_N	A_N	A_N	A_N	5.874,45 €
Energiekostensparnis:					
Erlöse im ersten Jahr	E_1				
Barwert	106.947,43 €				106.947,43 €
Annuität	$A_{N,E}$				7.188,76 €
Gesamtkosten-Erlöse:					
Barwert					19.529,94 €
Annuität					1.314,31 €
Amortisationsdauer	TA				15,54 a

3.2.1.3 Variation Biofilmschichtdicken

Im Folgenden werden die Auswirkungen verschiedener mittlerer Biofilmschichtdicken am abwasserseitigen Wärmeübertrager auf die Systemeffizienz am Beispiel des Theodore von Kármán Hauses untersucht. Die Schichtdicken werden hierzu in der Simulation in 1 mm-Schritten von 1 bis 5 mm variiert (vgl. **Tabelle 3**).

Durch die isolierende Wirkung des Biofilms verringert sich der Wärmedurchgang des Abwassers auf den Wasserzwischenkreislauf zur Wärmepumpe, so dass die mittlere Verdampfungstemperatur von 17,3 auf 2,1 °C gegenüber einer annähernd konstanten mittleren Abwassertemperatur von 22,5 bis 22,9 °C fällt. Die Wärmepumpen-Vorlauftemperatur sinkt von 19,8 auf 4,6 °C, im Mittel um 3,8 K je Änderung der Biofilmschichtdicke um 1 mm, wodurch die Effizienz der Wärmepumpe abnimmt. Die Jahresarbeitszahl fällt von 5,52 auf 3,45, im Mittel um ca. 11 % je Änderung des Biofilms um 1 mm.

Durch die herabgesetzte Effizienz der Wärmepumpe steigt die elektrische Leistungsaufnahme der Wärmepumpe und die Kühlleistung verringert sich von 19,7 auf 17,0 kW. Hieraus folgt eine geringere Abkühlung des Abwassers, d.h. die Einleittemperatur des abgekühlten Abwassers steigt von 18,8 auf 19,8 °C an.

Die herabgesetzte Effizienz führt zu einer Verschlechterung der Wirtschaftlichkeit des Systems. Ist der Barwert der Differenzinvestition für das Theodore von Kármán Haus gemäß Kapitel 3.2.1.2 bei einer Biofilmschichtdicke von 2 mm mit 3.733 € noch positiv, fällt der Barwert ab einer Biofilmschichtdicke von größer 3 mm unter null, was - unter den getroffenen Annahmen - die Unwirtschaftlichkeit der Abwasserwärmerückgewinnung bedeutet.

Für Untersuchungen zum Biofilmanwuchsverhalten am abwasserseitigen Wärmeübertrager mit Messungen des Wärmedurchgangs verschiedener Biofilmschichtdicken sowie Untersuchungen zu verschiedenen Reinigungsverfahren zur Sicherstellung eines ausreichenden Wärmedurchgangs wird auf das Forschungsvorhaben „Optimierung von Abwasserwärmetauschern für den gebäudetechnischen Einsatz“, bearbeitet durch den Lehrstuhl für Baubetrieb und Gebäudetechnik bzw. Lehrstuhl für Energieeffizientes Bauen der RWTH Aachen University, verwiesen.

Tabelle 3: Variation Biofilm

Biofilmdicke	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	mm
Wärmedurchgangskoeffizient	539	284	192	145	117	W/(m²·K)
Leistung Wärmeübertrager	3.773	1.988	1.344	1.015	819	W/K
Heizleistung Wärmepumpe	24.000	24.000	24.000	24.000	24.000	W
Kühlleistung Wärmepumpe	19.652	18.926	18.245	17.617	17.043	W
mittl. Abwassertemperatur (Zufluss Abwasserspeicher)	26,1	26,1	26,1	26,1	26,1	°C
mittl. Einleittemperatur (Abfluss Abwasserspeicher)	18,8	19,1	19,3	19,6	19,8	°C
mittl. Abwassertemperatur (im Abwasserspeicher)	22,5	22,6	22,7	22,8	22,9	°C
mittl. Rücklauftemperatur Wärmepumpe	14,8	10,6	6,6	3,0	-0,4	°C
mittl. Vorlauftemperatur Wärmepumpe	19,8	15,6	11,6	8,0	4,6	°C
mittl. Temperatur Verdampfer Wärmepumpe	17,3	13,1	9,1	5,5	2,1	°C
Deckungsgrad Wärmepumpe	48	48	48	48	48	%
Jahresarbeitszahl	5,52	4,74	4,18	3,76	3,45	-
Barwert Differenzinvestition (nach Kapitel 3.2.1.2)	19.530	3.733	-744	-1.661	-2.500	€

3.2.1.4 Variation Teilerwärmungstemperaturen Wärmepumpe

Elementarer Auslegungsparameter für das Trinkwassererwärmungssystem ist die geforderte Teilerwärmung durch die Wärmepumpe und damit die Festlegung, welcher Anteil durch die Wärmepumpe und welcher Anteil durch den Gaskessel erbracht wird sowie welcher Temperaturhub der Wärmepumpe erforderlich ist. Mit zunehmender Kondensationstemperatur, d.h. höherem notwendigen Temperaturhub sinkt die Effizienz der Wärmepumpe und der Einsatz kann unvorteilhaft werden. Mit sinkender Kondensationstemperatur, d. h. niedrigem notwendigen Temperaturhub steigt die Effizienz der Wärmepumpe, jedoch wird der Anteil der durch die Wärmepumpe bereitgestellten Energie kleiner. In diesem Abschnitt werden die Auswirkungen unterschiedlicher Solltemperaturen auf die Effizienz der eingesetzten Wärmepumpe untersucht. **Tabelle 4** enthält für das Studentenwohnheim Theodore von Kármán Haus verschiedene Szenarien für eine Teilerwärmung durch die Wärmepumpe auf den Temperaturniveaus von 35 bis 60 °C in 5 K-Schritten. Bei den Szenarien mit einer Solltemperatur von 35 bis 55 °C arbeitet die Wärmepumpe gemeinsam mit dem Gaskessel. Das Szenario mit einer Solltemperatur von 60 °C bedeutet eine alleinige Trinkwassererwärmung durch die Wärmepumpe, d. h. die thermische Desinfektion erfolgt ebenfalls durch die Wärmepumpe. Bei allen Szenarien wird eine mittlere Biofilmschichtdicke von 1 mm angesetzt.

Der Deckungsgrad der Wärmepumpe steigt bei den betrachteten Szenarien von 32,8 auf 100 %, folglich steigen auch Heiz- und Kühlenergie sowie die elektrische Energie der Wärmepumpe. Aufgrund der höheren entnommenen Abwasserwärme wird das Abwasser mit steigender Teilerwärmungstemperatur stärker abgekühlt, die mittlere Einleittemperatur fällt von 20,7 auf 13,0 °C. Die Jahresarbeitszahl fällt mit steigender Temperaturanforderung an die Wärmepumpe von 9,1 auf 3,4. Der Barwert der Differenzinvestition zeigt für das Studentenwohnheim Theodore von Kármán Haus bei einer Teilerwärmungstemperatur von 45 °C das Maximum von 19.530 €.

Tabelle 4: Variation Teilerwärmung durch Wärmepumpe

Soll-Temperatur Wärmepumpe	35	40	45	50	55	60 ²⁷	°C
Biofilmdicke	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	mm
Wärmedurchgangskoeffizient	539	539	539	539	539	539	W/(m²·K)
Leistung Wärmeübertrager	3.773	3.773	3.773	3.773	3.773	3.773	W/K
Heizleistung Wärmepumpe	24.000	24.000	24.000	24.000	24.000	30.000 ²⁸	W
Kühlleistung Wärmepumpe	21.374	20.496	19.652	18.816	18.015	21.254	W
mittl. Abwassertemperatur (Zufluss Abwasserspeicher)	26,1	26,1	26,1	26,1	26,1	26,1	°C
mittl. Einleittemperatur (Abfluss Abwasserspeicher)	20,7	19,8	18,8	17,9	16,9	13,0	°C
mittl. Abwassertemperatur (im Abwasserspeicher)	23,4	22,9	22,5	22,0	21,5	19,5	°C
mittl. Rücklauftemperatur Wärmepumpe	15,2	15,0	14,8	14,5	14,2	12,5	°C
mittl. Vorlauftemperatur Wärmepumpe	20,2	20,0	19,8	19,5	19,2	17,5	°C
mittl. Temperatur Verdampfer Wärmepumpe	17,7	17,5	17,3	17,0	16,7	15,0	°C
Heizenergie Wärmepumpe	325,1	397,5	475,8	563,0	659,2	991,2	kWh/(a·Person)
Deckungsgrad Wärmepumpe	32,8	40,1	48,0	56,8	66,5	100	%
Jahresarbeitszahl	9,14 ²⁹	6,86	5,52	4,64	4,02	3,44	-
Barwert Differenzinvestition (Vgl. Kap. 3.2.1.2)	11.260	17.270	19.530	17.624	11.409	415 ³⁰	€

²⁷ alleinige Trinkwassererwärmung durch Abwasserwärmepumpe

²⁸ Da eine Wärmepumpe mit 24 kW hier nicht ausreichend ist wird die Heizleistung der Wärmepumpe auf 30 kW angepasst.

²⁹ Die theoretisch zu erwartende Jahresarbeitszahl steigt aufgrund des vergleichsweise geringen Temperaturhubs - hier von 20,2 auf 35 °C - stark an.

³⁰ Bei der Wirtschaftlichkeitsanalyse wird eine Wärmepumpe mit einer Heizleistung von 30 kW berücksichtigt.

3.2.2 Weitere Wohngebäude

In Folgenden werden die Simulationsergebnisse sowie die Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsanalyse des Studentenwohnheims Otto Petersen Haus, des Pforzheimer Mehrfamilienhauses und des Dürener Mehrfamilienhauses vorgestellt.

Während die Pro-Kopf-Abwassermenge der Wohngebäude von 113,3 bis 127,6 Liter pro Tag vergleichsweise konstant ist, schwankt die mittlere Abwassertemperatur zwischen 21,0 und 26,1 °C stärker. Daher ist insbesondere die Auswirkung der niedrigen Abwassertemperaturen auf die erwartete Jahresarbeitszahl und somit auf die Wirtschaftlichkeit zu untersuchen.

Tabelle 5 enthält die Ergebnisse der Simulationen für die vier Wohngebäude. Angesetzt werden eine mittlere Biofilmschichtdicke von 1 mm sowie eine Teilerwärmungstemperatur der 45 °C, woraus ein Deckungsgrad von 48 % resultiert. Die gewählten Heizleistungen der Wärmepumpe betragen 24 kW für das Theodore von Kármán Haus (TKH), 20,6 kW für das Otto Petersen Haus (OPH), 4,8 kW für das Pforzheimer Mehrfamilienhaus (PFG) und 2 kW für das Dürener Mehrfamilienhaus (DNW). Die mittleren Abwassertemperaturen werden gemäß Kapitel 3.1 mit 26,1 °C für das TKH, 25,3 °C für das OPH, 21,0 °C für das PFG und 23,1 °C für das DNW angesetzt. Aufgrund der unterschiedlichen Abwassertemperaturen werden unterschiedliche Jahresarbeitszahlen von 5,52 für das TKH, 5,36 für das OPH, 4,64 für das PFG und 4,97 für das DNW erreicht. Die möglichen Energiekostensparnisse (in €) sowie die mögliche Reduktion der CO₂-Emissionen (in kg) auf Basis der Preise und Emissionsfaktoren gemäß Kapitel 3.2.1.2 berechnen sich zu 22,57 € sowie 47,1 kg pro Person und Jahr für das TKH, 21,98 € sowie 45,7 kg pro Person und Jahr für das OPH, 18,79 € sowie 37,9 kg pro Person und Jahr für das PFG und 20,4 € sowie 41,7 kg pro Person und Jahr für das DNW.

Die **Tabellen 6 bis 8** zeigen die Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen unter den Randbedingungen gemäß **Tabelle 1** für OPH, PFG und DNW. Bei allen drei Gebäuden ist unter den getroffenen Annahmen die Wirtschaftlichkeit der dezentralen Abwasserwärmerrückgewinnung nachweisbar. Die Barwerte der Differenzinvestitionen weisen Beträge von 14.109 € für das OPH, 391 € für das PFG und 321 € für das DNW aus. Die Amortisationsdauern betragen circa 16 Jahre für das OPH und circa 19 Jahre für das PFG und das DNW.

Tabelle 5: Ergebnisse der weiteren Wohngebäude OPH, PFG, DNW

Gebäude	TKH	OPH	PFG	DNW	
Bewohner	244	209	49	19	-
Biofilmdicke	1,0	1,0	1,0	1,0	mm
Wärmedurchgangskoeffizient	539	539	539	539	W/(m ² ·K)
Leistung Wärmeübertrager	3.773	3.238	754,6	314,4	W/K
Heizleistung Wärmepumpe	24.000	20.600	4.800	2.000	W
Kühlleistung Wärmepumpe	19.652	16.757	3.766	1.598	W
mittl. Abwassertemperatur (Zufluss Abwasserspeicher)	26,1	25,3	21,0	23,1	°C
mittl. Einleittemperatur (Abfluss Abwasserspeicher)	18,8	18,07	14,0	16,0	°C
mittl. Abwassertemperatur (im Abwasserspeicher)	22,5	21,7	17,5	19,6	°C
mittl. Rücklauftemperatur Wärmepumpe	14,8	14,0	10,0	12,0	°C
mittl. Vorlauftemperatur Wärmepumpe	19,8	19,0	15,0	17,0	°C
mittl. Temperatur Verdampfer Wärmepumpe	17,3	16,5	12,5	14,5	°C
Deckungsgrad Wärmepumpe	48	48	48	48	%
Jahresarbeitszahl	5,52	5,36	4,64	4,97	-
Energiekostensparnis	22,57	21,98	18,79	20,4	€/ (Person·a)
Reduktion CO ₂ -Emission	47,1	45,7	37,9	41,7	kg/ (Person·a)

Tabelle 6: Wirtschaftlichkeitsbetrachtung Otto Petersen Haus, OPH

OPH	Wärmepumpe (20,6kW)	TWW-Speicher (4,3m³)	Abwasser-Speicher (4,3m³)	Installation	Summe
Investitionskosten:					
Barwert Investition	$A_{0,WP}$	$A_{0,TWW}$	$A_{0,ABW}$	$A_{0,In}$	58.400,00 €
Annuität Investition	$A_{N,K}$	$A_{N,K}$	$A_{N,K}$	$A_{N,K}$	3.924,48 €
Laufende Kosten:					
Kosten f. Instandsetzung, Wartung, Inspektion	A_{IN}	A_{IN}	A_{IN}	-	
Barwert	10.000,00 €	3.339,81 €	3.339,81 €	-	16.679,61 €
Annuität	$A_{N,B}$	$A_{N,B}$	$A_{N,B}$	-	1.120,88 €
Barwert Gesamtkosten	30.600,00 €	11.939,81 €	11.939,81 €	20.600,00 €	75.079,61 €
Annuität Gesamtkosten	A_N	A_N	A_N	A_N	5.045,36 €
Energiekostensparnis:					
Erlöse im ersten Jahr	E_1				
Barwert	89.188,35 €				89.188,35 €
Annuität	$A_{N,E}$				5.995,04 €
Gesamtkosten-Erlöse:					
Barwert					14.108,74 €
Annuität					949,68 €
Amortisationsdauer	TA				16,11 a

Tabelle 7: Wirtschaftlichkeitsbetrachtung Pforzheimer Mehrfamilienhaus, PFG

PFG	Wärmepumpe (4,8kW)	TWW-Speicher (1m³)	Abwasser-Speicher (1m³)	Installation	Summe
Investitionskosten:					
Barwert Investition	$A_{0,WP}$	$A_{0,TWW}$	$A_{0,ABW}$	$A_{0,In}$	13.600,00 €
Annuität Investition	$A_{N,K}$	$A_{N,K}$	$A_{N,K}$	$A_{N,K}$	913,92 €
Laufende Kosten:					
Kosten f. Instandsetzung, Wartung, Inspektion	A_{IN}	A_{IN}	A_{IN}	-	
Barwert	2.330,10 €	776,70 €	776,70 €	-	3.883,50 €
Annuität	$A_{N,B}$	$A_{N,B}$	$A_{N,B}$	-	260,96 €
Barwert Gesamtkosten	7.130,10 €	2.776,70 €	2.776,70 €	4.800,00 €	17.483,50 €
Annuität Gesamtkosten	A_N	A_N	A_N	A_N	1.174,88 €
Energiekostensparnis:					
Erlöse im ersten Jahr	E_1				
Barwert	17.874,98 €				17.874,98 €
Annuität	$A_{N,E}$				1.201,52 €
Gesamtkosten-Erlöse:					
Barwert					391,48 €
Annuität					26,64 €
Amortisationsdauer	TA				19,44 a

Tabelle 8: Wirtschaftlichkeitsbetrachtung Dürener Mehrfamilienhaus, DNW

DNW	Wärmepumpe (2kW)	TTWW-Speicher (0,4m³)	Abwasser-Speicher (0,4m³)	Installation	Summe
Investitionskosten:					
Barwert Investition	$A_{0,WP}$	$A_{0,TTWW}$	$A_{0,ABW}$	$A_{0,In}$	5.600,00 €
Annuität Investition	$A_{N,K}$	$A_{N,K}$	$A_{N,K}$	$A_{N,K}$	376,32 €
Laufende Kosten:					
Kosten f. Instandsetzung, Wartung, Inspektion	A_{IN}	A_{IN}	A_{IN}	-	
Barwert	970,88 €	310,68 €	310,68 €	-	1.592,24 €
Annuität	$A_{N,B}$	$A_{N,B}$	$A_{N,B}$	-	107,01 €
Barwert Gesamtkosten	2.970,88 €	1.110,68 €	1.110,68 €		7.192,24 €
Annuität Gesamtkosten	A_N	A_N	A_N	A_N	483,33 €
Energiekostensparnis:					
Erlöse im ersten Jahr	E_1				
Barwert	7.512,82 €				7.512,82 €
Annuität	$A_{N,E}$				504,98 €
Gesamtkosten-Erlöse:					
Barwert					320,58 €
Annuität					21,65 €
Amortisationsdauer	TA				18,92 a

Auf Basis der vorgenannten Berechnungsergebnisse ist eine Untergrenze des wirtschaftlich sinnvollen Einsatzes der dezentralen Abwasserwärmerückgewinnung zu identifizieren. Grundsätzlich ist die Wirtschaftlichkeit von Systemen mittels der Bewohneranzahl und der Pro-Kopf-Ersparnisse nahezu beliebig nach oben und unten skalierbar. Hierbei sind jedoch technische Einflussfaktoren, welche die technische Umsetzbarkeit beschränken, sowie wirtschaftliche Einflussgrößen wie Preise, Zinssätze und Betrachtungszeiträume als kritische Randbedingungen zu berücksichtigen.

Als kritische Randbedingung sind die Investitions- und Wartungskosten des Wärmepumpensystems anzusehen, welche ab einer Unterschreitung der Anlagengröße von einer Wärmepumpen-Heizleistung unter 2 kW aktuell nicht mehr sinken, d.h. die Kosten bleiben trotz kleinerer Anlagengröße nahezu konstant. Hieraus ergeben sich deutliche Auswirkungen auf die Wirtschaftlichkeit von kleinen Anlagen.

Verringert sich beispielsweise die Bewohneranzahl des Dürener Mehrfamilienhauses von 19 auf 18, fällt der Barwert der Differenzinvestition bei gleichen Investitions- und Wartungskosten des Wärmepumpensystems von 321 € auf -75 €, d.h. für das DNW ist - unter den getroffenen Annahmen - bereits bei 18 Bewohnern keine Wirtschaftlichkeit mehr darstellbar.

Betrachtet man einen Vierpersonenhaushalt mit einer Energiekostensparnis von 18,79 bis 22,57 € pro Person und Jahr für den Nutzungszeitraum von 20 Jahren, stehen für die Abwasserwärmerückgewinnung eine Investitionssumme für Abwasserspeicher, Wärmepumpe und Trinkwarmwasserspeicher sowie Installationsaufwand von maximal 1.696 bis 2.038 € zur Verfügung, was aktuell als nicht ausreichend für die Investition in die dezentrale Abwasserwärmerückgewinnung anzusehen ist.

Das Potential von wirtschaftlich sinnvoller Abwasserwärmerückgewinnung im Wohnbereich liegt aktuell bei Wohngebäuden mit einer Größe von mindestens circa 20 Bewohnern. Zukünftig kann sich aufgrund von Entwicklungen hin zu kleineren und günstigen Abwasserwärmepumpensystemen diese Untergrenze verringern.

3.2.3 Zusammenfassung Simulationsergebnisse

Die Ergebnisse der Simulation des bivalenten Speicher-Trinkwassererwärmers nach **Abbildung 11** für die vier betrachteten Wohngebäude Theodore von Kármán Haus, Otto Petersen Haus sowie die Mehrfamilienhäuser in Pforzheim und Düren zeigen - auf Basis der getroffenen Annahmen - bei einer mittleren Biofilmschichtdicke von 1 mm und einer Teilerwärmungstemperatur durch die Abwasserwärmepumpe von 45 °C Jahresarbeitszahlen von 4,64 bis 5,52, was einer Energiekostensparnis von 18,79 bis 22,57 € pro Person und Jahr sowie einer Reduktion der CO₂-Emission von 37,9 bis 47,1 kg pro Person und Jahr entspricht.

Mit dieser Energiekostensparnis ist die Investition in ein dezentrales Abwasserwärmepumpensystem wirtschaftlich vorteilhaft. Auf Grundlage der betrachteten Differenzinvestition in Abwasserwärmepumpe, Abwasserzwischenspeicher und Trinkwarmwasserspeicher sowie Installationskosten betragen die Barwerte der Differenzinvestitionen 19.530 € für das Theodore von Kármán Haus mit 244 Bewohnern, 14.109 € für das Otto Petersen Haus mit 209 Bewohnern, 391 € für das Pforzheimer Mehrfamilienhaus mit 49 Bewohnern und 321 € für das Dürener Mehrfamilienhaus mit 19 Bewohnern.

Die Erhöhung der mittleren Biofilmschichtdicke führt aufgrund der isolierenden Wirkung zu einer Verschlechterung der Effizienz der eingesetzten Wärmepumpe. Die Jahresarbeitszahl reduziert sich beispielsweise für das Theodore von Kármán Haus von 5,52 auf 3,45 (Deckungsgrad 48 %) bei einer Zunahme des Biofilms von 1 auf 5 mm. Bereits ab einer mittleren Biofilmschichtdicke von 3 mm ist ein unwirtschaftlicher Betrieb des Systems zu erwarten.

Die Untersuchung zur Variation der Teilerwärmungstemperatur durch die Wärmepumpe von 35 bis 60 °C zeigt, dass die Jahresarbeitszahl bei steigender Temperaturanforderung an die Wärmepumpe steigt, während der Deckungsgrad sinkt. Am Beispiel des Theodore von Kármán Hauses ist die Teilerwärmungstemperatur von 45 °C die wirtschaftlichste Variante.

4 Fazit

Häusliches Abwasser besitzt innerhalb von Gebäuden mit einem durchschnittlichen Temperaturniveau von 21 bis 26 °C ein hohes energetisches Potential, welches mit dezentraler Wärmepumpentechnologie effizient genutzt werden kann. Die Arbeitszahlen des Abwasserwärmepumpensystems von 4,6 bis 5,5³¹ am Beispiel der vier untersuchten Wohngebäude zeigen, dass erstens das Abwasserwärmepumpensystem energiepolitisch positiv und bei überschaubaren Amortisationszeiten wirtschaftlich eingesetzt werden kann und zweitens ein erheblicher Beitrag zur Reduktion des CO₂-Ausstoßes von Gebäuden möglich ist. Aufgrund der moderaten Abkühlung des Abwassers ist keine Beeinträchtigung des nachgeschalteten Kläranlagenbetriebs zu erwarten.

Allein der sich bildende Biofilm erschwert die Energie-Rückgewinnung und erfordert weitere Analysen. Die Biofilmschichtdicke auf dem abwasserseitigen Wärmeübertrager verringert den Wärmedurchgang vom Abwasser auf den Wasserzwischenkreislauf zur Wärmepumpe. In der Folge verringert sich die Vorlauftemperatur am Verdampfer und die Effizienz der Wärmepumpe nimmt ab. Das Biofilmwachstum wurde bisher nur unzureichend untersucht. Für häusliches Abwasser stehen keine Daten über den Biofilm zur Verfügung. Ohne Kenntnis der zu erwartenden Wärmeübertragsreduktion ist die korrekte Auslegung einer dezentralen Abwasserwärmerückgewinnungsanlage nicht möglich. Weiterhin wird ein praxistaugliches wartungsarmes Reinigungsverfahren zur Abreinigung des Biofilms benötigt.

Zur Realisierung von Pilotanlagen sind weitere kostenintensive Untersuchungen erforderlich, um das dem Grunde nach äußerst positiv einzuschätzende Konzept der dezentralen Energierückgewinnung aus Abwasser zur Trinkwasservorerwärmung entsprechend **Abbildung 4** weiterzuentwickeln.

³¹ Die Umsetzung der theoretisch ermittelten Arbeitszahlen muss in der Praxis noch bestätigt werden.

Anhang 1



BGT
 Baubetrieb und
 Gebäudetechnik
 

Fragebogen zur Erfassung des Trinkwasserverbrauchs in den Türmen

Im Rahmen meiner Diplomarbeit möchte ich das Energiepotential der Abwasserströme in diesen Gebäuden (TvK und OPH) erfassen.

Um genaue Aussagen über deren Entstehung treffen zu können, würde es mir sehr helfen, wenn Du den Fragebogen ausfüllst (Zeitaufwand ca. 5 min) und diesen anschließend bei TvK: Steffen Huppertz (713) oder OPH: Robin de Winter (412) einwerfen würdest. Die Daten werden vollständig anonym und vertraulich behandelt. Unter allen Teilnehmer verlosen wir drei 20€ Mayersche-Gutscheine.

Allgemeines

Geschlecht: männlich ☐ weiblich ☐

Nationalität: deutsch ☐ andere ☐

Turm: TvK ☐ OPH ☐ Einzelzimmer ☐
 Einzelappartement ☐
 Doppelappartement ☐

Duschverhalten

Wie oft benutzt Du die Dusche durchschnittlich pro Woche?

Vorlesungszeit
 mal pro Woche

Vorlesungsfreie Zeit
 mal pro Woche

Wann gehst Du an den entsprechenden Tagen vorwiegend duschen?
 Bitte trage den entsprechenden Zeitpunkt (z.B. 9:00 Uhr) ein, in dem du ungefähr die Dusche benutzt. Falls Du die Dusche zweimal am Tag benutzt, trage dies bitte in die zweite Spalte ein.

Vorlesungszeit

	1. Mal	2. Mal
Wochentags		
Samstags		
Sonntags		

Vorlesungsfreie Zeit

	1. Mal	2. Mal
Wochentags		
Samstags		
Sonntags		

Wochenendverhalten

An wie vielen Wochenenden bist du durchschnittlich pro Monat in Deinem Zimmer in den Türmen anwesend?

☐ immer ☐ 3 ☐ 2 ☐ 1 ☐ 0 mal pro Monat

Weihnachtsferien 2011/2012

Bitte kreuze in der folgenden Tabelle die Tage an, an denen Du in den Weihnachtsferien 2011/2012 Dein Zimmer in den Türmen benutzt hast.

Dezember 2011														Januar 2012													
19.	20.	21.	22.	23.	24.	25.	26.	27.	28.	29.	30.	31.	01.	02.	03.	04.	05.	06.	07.	08.							
☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐							

Vielen Dank für Deine Teilnahme!

Kontakt:
 c.bohn@bgt.rwth-aachen.de (Caro)
 s.grunwald@bgt.rwth-aachen.de (Sebastian)

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Endenergieverbrauch der Haushalte für Wohnen 2008.....	1
Abbildung 2: Entwicklung Endenergiebedarf Trinkwarmwassererzeugung	2
Abbildung 3: Orte der Abwasserwärmenutzung.....	3
Abbildung 4: Gebäudeinterne Abwasserwärmerückgewinnung	4
Abbildung 5: Monitoringkonzept	6
Abbildung 6: Mehrfamilienhaus im Stadtzentrum von Düren, Wilhelmstraße	7
Abbildung 7: Mehrfamilienhaus in Pforzheim, Güterstraße	7
Abbildung 8: Studentenwohnheime in Aachen	8
Abbildung 9: Krankenhaus „Luisenhospital Aachen“.....	9
Abbildung 10: Analysekonzept	10
Abbildung 11: Anlagenkonzept zur Trinkwassererwärmung.....	11
Abbildung 12: Ganglinie MFH in Düren (DNW), Werktag.....	14
Abbildung 13: Ganglinie MFH in Düren (DNW), Sonntag.....	15
Abbildung 14: Ganglinie MFH in Pforzheim (PFG), Werktag.....	16
Abbildung 15: Ganglinie Otto Petersen Haus (OPH), Werktag	17
Abbildung 16: Ganglinie Theodore von Kármán Haus (TKH), Werktag.....	18
Abbildung 17: Ganglinie Business-Hotel, Dienstag-Freitag.....	19
Abbildung 18: Ganglinie Luisenhospital (LUI), Werktag	20
Abbildung 19: Verlauf Abwasser- und TKW-Temperatur, Tagesdurchschnittswerte, DNW ...	22
Abbildung 20: Lineare Regression Abwasser-Trinkkaltwasser-Temperatur, DNW	23
Abbildung 21: Verlauf Abwasser- und TKW-Temperatur, Tagesdurchschnittswerte, OPH....	24
Abbildung 22: Lineare Regression Abwasser-Trinkkaltwasser-Temperatur, OPH.....	25
Abbildung 23: Verlauf Abwasser- und TKW-Temperatur, Tagesdurchschnittswerte, TKH	26
Abbildung 24: Lineare Regression Abwasser-Trinkkaltwasser-Temperatur, TKH	27
Abbildung 25: Verlauf Abwasser- und TKW-Temperatur, Tagesdurchschnittswerte, Hotel ...	28
Abbildung 26: Lineare Regression Abwasser-Trinkkaltwasser-Temperatur, Hotel	29
Abbildung 27: Verlauf Abwasser- und TKW-Temperatur, Tagesdurchschnittswerte, LUI.....	30
Abbildung 28: Lineare Regression Abwasser-Trinkkaltwasser-Temperatur, LUI.....	31
Abbildung 29: Verlauf Tagesdurchfluss, DNW	32
Abbildung 30: Verlauf Tagesdurchfluss, OPH.....	33
Abbildung 31: Verlauf Tagesdurchfluss, TKH	34
Abbildung 32: Verlauf Tagesdurchfluss, Hotel	35
Abbildung 33: Verlauf Tagesdurchfluss, LUI.....	36
Abbildung 34: Duschverhalten, Vorlesungszeit, Montag bis Freitag, OPH	38
Abbildung 35: Duschverhalten, Vorlesungszeit, Samstag, OPH	39
Abbildung 36: Duschverhalten, Vorlesungszeit Sonntag, OPH	40
Abbildung 37: Duschverhalten, Vorlesungszeit, Montag bis Freitag, TKH.....	41
Abbildung 38: Duschverhalten, Vorlesungszeit, Samstag, TKH.....	42
Abbildung 39: Duschverhalten, Vorlesungszeit Sonntag, TKH.....	43
Abbildung 40: Temperaturprofil Speicher-Trinkwassererwärmer	46
Abbildung 41: Vor- und Rücklauftemperaturen Wärmepumpe	47
Abbildung 42: Leistungszahlen (COP) Wärmepumpe.....	48
Abbildung 43: Temperaturprofil Abwasserzischenspeicher	49

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Grundlagen der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung	53
Tabelle 2: Wirtschaftlichkeitsbetrachtung Theodore von Kármán Haus, TKH	54
Tabelle 3: Variation Biofilm	56
Tabelle 4: Variation Teilerwärmung durch Wärmepumpe	58
Tabelle 5: Ergebnisse der weiteren Wohngebäude OPH, PFG, DNW	61
Tabelle 6: Wirtschaftlichkeitsbetrachtung Otto Petersen Haus, OPH	61
Tabelle 7: Wirtschaftlichkeitsbetrachtung Pforzheimer Mehrfamilienhaus, PFG.....	62
Tabelle 8: Wirtschaftlichkeitsbetrachtung Dürener Mehrfamilienhaus, DNW	63

Literaturverzeichnis

Beyert, Joachim; Brunk, Marten F.; Osebold, Rainard; Seybold, Christopher; Vosen, Georg: Dezentrale Wärmerückgewinnung aus häuslichem Abwasser. Endbericht der RWTH Aachen University, Lehrstuhl für Baubetrieb und Gebäudetechnik im Forschungsprogramm Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesministeriums für Verkehr, Bau, Stadtentwicklung, Aktenzeichen: SF-10.08.18.7-10.4/ II 3 F20-09-1-250. Aachen, 2012.

DIN 1988: Technische Regeln für Trinkwasser-Installationen, Teil 100: Schutz des Trinkwassers, Erhaltung der Trinkwassergüte; Technische Regel des DVGW, August 2011, Normenausschuss Wasserwesen (NAW) im DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (Hrsg.), Beuth Verlag, Berlin, 2011

DIN 1988: Technische Regeln für Trinkwasser-Installationen, Teil 200: Installation Typ A (geschlossenes System) – Planung, Bauteile, Apparate, Werkstoffe; Technische Regel des DVGW, Mai 2012, Normenausschuss Wasserwesen (NAW) und Normenausschuss Heiz- und Raumlufttechnik (NHRS) im DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (Hrsg.), Beuth Verlag, Berlin, 2012

DIN EN 1717: Schutz des Trinkwassers vor Verunreinigung in Trinkwasser-Installationen und allgemeine Anforderungen an Sicherungseinrichtungen zur Verhütung von Trinkwasserverunreinigungen durch Rückfließen; Deutsche Fassung EN 1717:2000; Technische Regel des DVGW, August 2011, Normenausschuss Wasserwesen (NAW) im DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (Hrsg.), Beuth Verlag, Berlin, 2011

DVGW Arbeitsblatt W 511, Trinkwassererwärmungs- und Trinkwasserleitungsanlagen; Technische Maßnahmen zur Verminderung des Legionellenwachstums; Planung, Errichtung, Betrieb und Sanierung von Trinkwasser-Installationen, DVGW Deutsche Vereinigung des Gas- und Wasserfaches e.V. (Hrsg.), Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser, Bonn, 2004

Franke, C., Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen, 2008

Hafner, B., Plettner, J., Wemhöner, C., Wenzel, T., CARNOT Conventional And Renewable Energy Systems Optimization Toolbox - Extension for MATLAB SIMULINK - User's Guide, Solar-Institut Jülich der Fachhochschule Aachen, 1999.

Hartung, Joachim, Statistik - Lehr- und Handbuch der angewandten Statistik, 14. Auflage, München, Oldenbourg Wissenschaftsverlag, 2005

Müller, E.A, Schmid, F., Kobel, B., Stodtmeister, W., Heizen und Kühlen mit Abwasser - Ratgeber für Bauträger und Kommunen, Deutsche Bundesstiftung Umwelt (Hrsg.), Osnabrück, 2009

o.V., AG Energiebilanzen e.V. (Hrsg.), Anwendungsbilanzen für die Endenergiesektoren in Deutschland in den Jahren 2009 und 2010, Studie beauftragt vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, Projektnummer: 23/11, Berlin, 2011

o.V. Energie Erdgas: Effiziente Technik und erneuerbare Energien, Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V. (Hrsg.), Verlag Rationeller Erdgaseinsatz, Kaiserslautern, 2007

o.V., Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emission des deutschen Strommix 1990-2009 und erste Schätzung 2010, Umweltbundesamt (Hrsg.), 2011

o.V. Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 bis 2012, Umweltbundesamt (Hrsg.), 2013

o.V. SHELL Hauswärme-Studie - Nachhaltige Wärmeerzeugung für Wohngebäude Fakten, Trends und Perspektiven, Shell Deutschland Oil GmbH (Hrsg.), Hamburg, 2011

o.V., Statistisches Jahrbuch 2010 für die Bundesrepublik Deutschland mit internationalen Übersichten, Statistisches Bundesamt (Hrsg.), HGV Hanseatische Gesellschaft für Verlags-service, Kusterdingen, 2010

Recknagel, H., Sprenger, E., Schramek, E.-R. (Hrsg.), Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik, 74. Auflage, München, Oldenbourg Industrieverlag, 2009

Trinkwasserverordnung in der Fassung der Bekanntmachung vom 28.11.2011 (BGBl. I S. 2370), die durch Art. 2 Abs. 19 des Gesetzes vom 22.12.2011 (BGBl. I S. 3044) geändert worden ist

VDI 2067: Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen, Blatt 1: Grundlagen und Kostenberechnung, September 2012, Verein Deutscher Ingenieure (VDI) Gesellschaft Bauen und Gebäudetechnik (GBG) Fachbereich Technische Gebäudeausrüstung, Beuth Verlag, Berlin, 2012