

BAUFORSCHUNG FÜR DIE PRAXIS, BAND 105

Marten F. Brunk, Christopher Seybold, Rainard Osebold,
Joachim Beyert, Georg Vosen

Dezentrale Wärmerückgewinnung aus häuslichem Abwasser

Die vorliegende Arbeit wurde unter dem Förderkennzeichen SF-10.08.18.7-10.4; II3-F20-09-1-250 – F 2831 vom Bundesinstitut für Bau,- Stadt- und Raumforschung, Bonn, mit Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau gefördert. Für den Inhalt sind allein die Verfasser verantwortlich.

Druck und Weiterverarbeitung:

IRB Mediendienstleistungen des
Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB, Stuttgart

Für den Druck des Buches wurde chlor- und säurefreies Papier verwendet.

© by **Fraunhofer IRB Verlag**, 2013

ISBN 978-3-8167-9012-9

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB

Postfach 80 04 69, 70504 Stuttgart

Telefon 0711 970-2500, Telefax 0711 970-2508

E-Mail info@irb.fraunhofer.de

URL www.baufachinformation.de

Alle Rechte vorbehalten

Dieses Werk ist einschließlich seiner Teile urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die über die engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes hinausgeht, ist ohne schriftliche Zustimmung des Fraunhofer IRB Verlages unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen sowie die Speicherung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Warennamen und Handelsnamen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass solche Bezeichnungen im Sinne der Warenzeichen und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und deshalb von jedermann benutzt werden dürften.

Sollte in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z.B. DIN, VDI, VDE) Bezug genommen werden oder aus ihnen zitiert werden, so kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen. Es empfiehlt sich, gegebenenfalls für die eigenen Arbeiten die vollständigen Vorschriften oder Richtlinien in der jeweils gültigen Fassung hinzuzuziehen.

Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben

„Dezentrale Wärmerückgewinnung aus häuslichem Abwasser“

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

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Rainard Osebold
Dr.-Ing. Joachim Beyert
Dipl.-Ing. Georg Vosen
Lehrstuhl für Baubetrieb und Projektmanagement
RWTH Aachen University

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

(Aktenzeichen: SF-10.08.18.7-10.4/ II 3-F20-09-1-250)

Die Verantwortung für den Inhalt des Berichtes liegt beim Autor.

Aachen, den 14.05.2012

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
2	Stand der Technik.....	2
2.1	Zentrale Wärmerückgewinnung im öffentlichen Kanalisationsnetz.....	2
2.2	Dezentrale Wärmerückgewinnung aus Abwasser.....	5
3	Sanierungsbedarf Grundleitungen.....	6
4	Potentialanalyse.....	10
4.1	Monitoringkonzept und Messtechnik.....	10
4.2	Monitoringobjekte.....	13
4.3	Ergebnisse.....	14
4.3.1	Theodore von Kármán Haus.....	17
4.3.2	Otto Petersen Haus.....	23
4.3.3	Business Hotel Aachen City.....	29
4.3.4	Luisenhospital Aachen.....	35
4.4	Zusammenfassung.....	44
5	Analyse von Abwasserwärmepumpensystemen.....	45
5.1	Analysekonzept.....	45
5.2	Berechnungstool.....	47
5.3	Bewertungsgrößen.....	51
5.4	Ergebnisse.....	52
5.4.1	Theodore von Kármán Haus.....	53
5.4.2	Otto Petersen Haus.....	56
5.4.3	Business Hotel Aachen City.....	59
5.4.4	Luisenhospital Aachen.....	62
5.5	Wirtschaftlichkeitsbetrachtung und CO ₂ -Emissionen.....	65
5.6	Zusammenfassung.....	73
6	Fazit und Ausblick.....	75
	Abbildungsverzeichnis.....	76
	Tabellenverzeichnis.....	78
	Literaturverzeichnis.....	79

1 Einleitung

Etwa 5 % 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 11 %.² Aufgrund der fortschreitenden Anstrengungen zur Reduktion des Heizwärmebedarfs von Gebäuden wird der Anteil für Warmwasser in den kommenden Jahren erheblich steigen.

Diese Wärmemenge 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.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens „Dezentrale Wärmerückgewinnung aus häuslichem Abwasser“ erfolgte eine Potentialanalyse der Energiequelle Abwasser innerhalb von Gebäuden. Hierzu wurden an zwei Studentenwohnheimen, einem Hotelgebäude und einem Krankenhausgebäude Messungen von Abwassertemperatur und Durchfluss durchgeführt und in repräsentative Ganglinien transformiert. Auf Grundlage dieser Profile wurden mit einem Berechnungstool verschiedene dezentrale Abwasserwärmepumpensysteme zur Trinkwarmwassererzeugung auf ökologische und ökonomische Vorteilhaftigkeit untersucht und bewertet.

¹ Vgl. o.V., Anwendungsbilanzen für die Endenergiesektoren in Deutschland im Jahr 2008, AG Energiebilanzen e.V. (Hrsg.), 2011, S. 23.

² Vgl. o.V., CO₂-Gebäudereport 2007, Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (Hrsg.), 2007, S. 17.

2 Stand der Technik

Die zentrale Wärmerückgewinnung stellt eine seit Ende der 80er Jahre bekannte Technik zur Nutzung der Wärme aus Abwasser dar und es liegt bereits eine Vielzahl von Projekten und Beispielanlagen vor. Grundsätzlich kann die Wärmerückgewinnung zentral aus dem öffentlichen Kanalisationsnetz oder dezentral auf privatem Baugrund erfolgen. Im Folgenden werden die beiden Methoden hinsichtlich ihrer technischen Randbedingungen erläutert.

2.1 Zentrale Wärmerückgewinnung im öffentlichen Kanalisationsnetz

Bei Systemen der zentralen Wärmerückgewinnung wird ein flächiges Wärmeübertragungselement in einen bestehenden Sammelkanal des öffentlichen Kanalisationsnetzes nachträglich eingebaut (siehe **Abbildung 1**). Die Installation kann im Falle eines Neubaus über in die Rohrwandung integrierte Übertragungselemente durchgeführt werden (siehe **Abbildung 2**).



Abbildung 1 (links): Wärmetauscherelement zum nachträglichen Einbau (Quelle: www.ikt.de)

Abbildung 2 (rechts): Wärmetauscherelemente in der Kanalwandung (Quelle: www.ipp.mpg.de)

Der Wärmetauscher entzieht dem vorbeiströmenden Abwasser Wärmeenergie und leitet diese zu einer Wärmepumpe weiter. Diese Wärmepumpe hebt die gewonnene Energie auf ein höheres Temperaturniveau, um sie so für die Raumheizung und die Warmwasserbereitung nutzbar zu machen. Zusätzlich wird ein Nahwärmenetz erforderlich, das die zentral gewonnene Wärmeenergie zum Verbraucher transferiert. Eine mögliche Anordnung in der öffentlichen Kanalisation zeigt **Abbildung 3**.

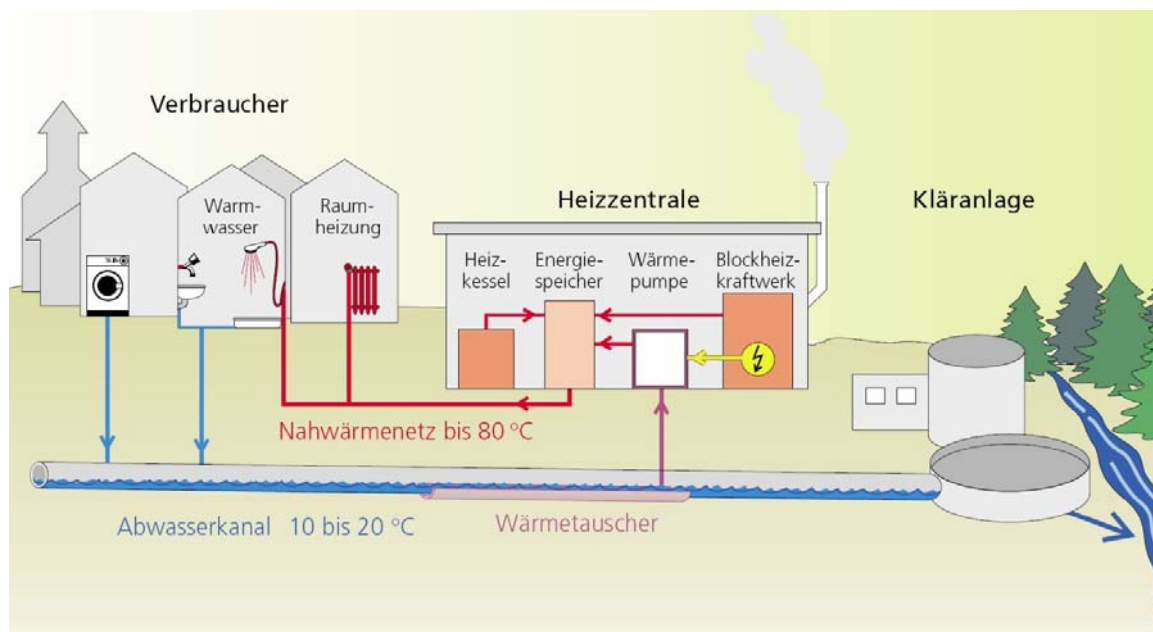


Abbildung 3: Mögliches Installationsschema einer Anlage zur zentralen Wärmerückgewinnung in der öffentlichen Kanalisation (Quelle: www.ikt.de)

Im Fall einer Sanierung kann der Einbau von Wärmeübertragungselementen unmittelbar berücksichtigt werden. Der kurz- und mittelfristige Sanierungsbedarf der öffentlichen Kanalisation in Deutschland beträgt etwa 20 %.³ Die Zahl der Einbauorte wird allerdings durch zahlreiche technische Randbedingungen eingeschränkt. Günstige Voraussetzungen für die Wärmerückgewinnung im öffentlichen Kanalnetz finden sich in großen Kanälen (Durchmesser größer 800 mm), die in unmittelbarer Nähe zu Quartieren oder Bauten mit hoher Wärmenutzung liegen. Entfernungen von unter 300 m sind dabei anzustreben. Die Durchflussmenge sollte im Tagesmittel bei Trockenwetterabfluss nicht unter 15 l/s liegen. Zudem sollte der Kanal über eine Strecke von mindestens 20 m geradlinig verlaufen. Durch die Lage im Straßenkanal ergeben sich während des Baus oft Störungen des darüber liegenden Verkehrsraumes. Zudem wird dieses System in einem genutzten Teil des Kanalnetzes eingebaut, der für die Installationsdauer nicht zur Ableitung zur Verfügung steht, sodass hier ein Ersatz geschaffen werden muss.⁴

Die Temperatur des Abwassers im öffentlichen Kanalsystem beträgt in den Wintermonaten zwischen 10 °C und 15 °C.⁵ Die Temperaturentnahme kann hier nur in engen Grenzen erfolgen. Wird die Temperatur durch die Wärmeentnahme zu weit (unter 10 °C) abgesenkt, kann dies unter ungünstigen Voraussetzungen negative Folgen für den Betrieb einer nachgeschalteten Kläranlage haben.⁶ Die von Temperatureinflüssen am stärksten betroffenen Reinigungsprozesse der Nitrifikation und Denitrifikation können so in ihrer Wirksamkeit dadurch eingeschränkt werden.

³ Vgl. o.V., Branchenbild der deutschen Wasserwirtschaft, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (Hrsg.), 2008, S. 41.

⁴ Vgl. o.V., Heizen und Kühlen mit Abwasser, Deutsche Bundesstiftung Umwelt DBU (Hrsg.), 2009, S.09.

⁵ Vgl. o.V., Energie aus Kanalabwasser, Deutsche Bundesstiftung Umwelt DBU (Hrsg.), 2005, S. 2.

⁶ Vgl. o.V., Energie aus Kanalabwasser, Deutsche Bundesstiftung Umwelt DBU (Hrsg.), 2005, S. 7ff.

Werden sowohl die technischen Ansprüche der Kanalnetz- und Kläranlagenbetreiber als auch Anforderungen der angebots- und nachfrageseitigen Akteure wie Energieversorger und Liegenschaftseigentümer bzw. Bauherren berücksichtigt, reduziert sich die Zahl der für eine zentrale Wärmerückgewinnung geeigneten Kanalabschnitte im öffentlichen Kanalnetz in Nordrhein-Westfalen mit einer Vermarktungswahrscheinlichkeit von 1 % – 7 % auf nur noch 1 km – 8 km pro Jahr im Bestand. Im Neubau, wo schon in der Planung vorteilhaft auf Anforderungen eingegangen werden kann, beläuft sich die geeignete Kanallänge mit einer Vermarktungswahrscheinlichkeit von 16,5 % – 40 % auf immerhin 10 km – 26 km pro Jahr.⁷ Insgesamt kann für die verbreitete Verwendung der zentralen Wärmerückgewinnung aus Abwasser im öffentlichen Kanalnetz also nur ein geringes Potential ausgemacht werden.

⁷ Vgl. Rometsch, L., Wärmegewinnung aus Abwasserkanälen - Kurzbericht; IKT Institut für unterirdische Infrastruktur (Hrsg.), 2005.

2.2 Dezentrale Wärmerückgewinnung aus Abwasser

Im Gegensatz zur zentralen Wärmerückgewinnung verfolgt das Forschungsvorhaben das Ziel, die Wärme der gesamten Abwasserströme dezentral innerhalb der Gebäude vor dem Einleiten in die Straßenkanalisation mit wesentlicher Energieabgabe ans Erdreich zu nutzen. Hier stellen sich wesentlich höhere Abwassertemperaturen von durchschnittlich 23 - 26 °C ein, wodurch die Effizienz und Wirtschaftlichkeit eines Wärmepumpensystems zur Nutzbarmachung der Abwasserwärme wesentlich gesteigert werden kann. So wird ein Wärmekreislauf aufgebaut, worin die Abwasserwärme direkt innerhalb des Gebäudes mittels einer kompakten Wärmepumpe zur Erzeugung des Trinkwarmwassers genutzt werden kann. Vorteile der dezentralen Abwasserwärmepumpensysteme sind die im Vergleich zu anderen regenerativen Energiequellen hohe Wärmequellentemperatur, die direkte Nähe des Wärmeabnehmers, die relativ einfache Implementierung in den Gebäudebestand, die klar abgegrenzte rechtliche Situation und die Kombinationsmöglichkeiten des Wärmepumpensystems mit Geothermie- oder Solarnutzung des Gebäudes.

Zur dezentralen Wärmerückgewinnung stehen bereits einige Verfahren zur Verfügung. Beispielsweise gibt es Lösungsansätze zur Wärmerückgewinnung aus den fäkalienfreien Grauwasserströmen aus Duschen, Badewannen, Handwaschbecken und Waschmaschinen.⁸ Hierfür ist eine Trennung der Schwarzwasserströme aus Toiletten und der Grauwasserströme notwendig, wie es bei Neubauten realisiert werden kann, aber im interessanten Bereich, in Bestandsgebäuden, nur mit erheblichem Aufwand realisiert werden kann. Darüber hinaus gibt es Lösungen des Schweizer Unternehmens FEKA Energiesysteme zur dezentralen Wärmerückgewinnung aus dem gesamten Abwasser großer Liegenschaften. Hierbei wird das Abwasser in einem Schachtbauwerk außerhalb des Gebäudes gesammelt und dort mittels eines Wärmeübertragers die Wärme entzogen.⁹ Des Weiteren ist eine Anlage bekannt, worin ein sogenannter Aqua-Re-Energie-Trichter die Abwasserwärme eines Mehrfamilien-Gebäudekomplexes in Berlin zur Unterstützung der Warmwasserbereitung nutzt.¹⁰ Eine weitere Anlage in Berlin arbeitet mit einem Halbschalen-Absorber, welcher von außen an die bestehenden Abwasserleitungen angebracht ist, um die Wärme aus den Abwasserströmen zu entziehen und diese zur Trinkwarmwasservorwärmung nutzt.¹¹ Als grundlegende Schwierigkeiten dieser Anlagen sind die Bildung von Biofilmen auf dem abwasserseitigen Wärmeübertrager, welche den Wärmeübertrag maßgeblich verschlechtern, die Steuerungs- und Regelstrategie der Anlagen, die Sicherstellung der Trinkwarmwasserhygiene und letztendlich die Sicherstellung eines effizienten Betriebs ohne negative Auswirkungen auf die Abwassernetze und die Kläranlagen anzusehen. Darüber hinaus fehlt eine detaillierte Beschreibung der Wärmequelle Abwasser innerhalb von Gebäuden.

⁸ Vgl. u.a. <http://www.hansgrohe.de/5852.htm>,
<http://www.huber.de/de/loesungen/waerme-aus-dem-kanal/kleinraeumige-kreislaeufe.html>,
<http://www.menerga.com/Waermerueckgewinnung-aus-124.0.html?&L=3Banken.481.0.html%3F>.

⁹ Vgl. o.V., Heizen und Kühlen mit Abwasser, Deutsche Bundesstiftung Umwelt (Hrsg.), 2009, S. 16.

¹⁰ Vgl. o.V., Gebäudebezogene Nutzung von Abwasserwärme, Berliner Netzwerk E (Hrsg.), Berlin, 2011, S. 18f.

¹¹ Vgl. o.V., Berliner Netzwerk E, Gebäudebezogene Nutzung von Abwasserwärme, Berlin, 2011, S. 16f.

3 Sanierungsbedarf Grundleitungen

Schadhafte Abwasseranlagen haben weitreichende Folgen. Aus undichten Kanälen kann Abwasser in den umliegenden Boden gelangen und diesen sowie anstehendes Grundwasser verschmutzen (Exfiltration). Zudem kann in undichte Kanäle sauberes Grund-, Quell- oder durch Versickerung zuströmendes Oberflächenwasser eindringen (Infiltration). Dieses sogenannte Fremdwasser ist sowohl aus technischer wie auch ökonomischer Sicht problematisch. Die anfallende Menge ist i.d.R. nicht genau abschätzbar und kann so zu hydraulischen Problemen im Kanalnetz und im Zulauf der Kläranlage führen. Bei Entlastungsereignissen an Regenentlastungsbecken im Falle eines Starkregens kann ungeklärtes Abwasser in den nächsten Vorfluter eingeleitet werden. Zudem kommt es zu einer Verdünnung des Abwasserzulaufs auf der Kläranlage. Die Kosten für den nachfolgend notwendigen erhöhten Reinigungsaufwand sind vom Gebührenzahler zu tragen.

Nach dem Wasserhaushaltsgesetz des Bundes (WHG) ist Abwasser so zu beseitigen, dass „(...) das Wohl der Allgemeinheit nicht beeinträchtigt wird.“¹² Zudem wird dort gefordert, dass „(...) Abwasseranlagen so zu errichten, zu betreiben und zu unterhalten sind, dass die Anforderungen an die Abwasserbeseitigung eingehalten werden. Im Übrigen dürfen Abwasseranlagen nur nach den allgemein anerkannten Regeln der Technik errichtet, betrieben und unterhalten werden. Entsprechen vorhandene Abwasseranlagen nicht den Anforderungen (...), so sind die erforderlichen Maßnahmen innerhalb angemessener Fristen durchzuführen.“¹³ Die einschlägigen Normen und Merkblätter können in diesem Zusammenhang als allgemein anerkannte Regeln der Technik angewendet werden.

Die Abwasserbeseitigung in Deutschland wird zunächst auf Bundesebene durch das Wasserhaushaltsgesetz (WHG) und auf Länderebene durch die Landeswassergesetze (LWG) geregelt. In einigen Bundesländern wurden dazu in den letzten Jahren konkrete Regelungen in die jeweiligen Landeswassergesetze übernommen. Zum Jahreswechsel 2007/2008 wurde in Nordrhein-Westfalen mit der Novellierung des LWG, der Landesbauordnung (LBO) und des Landesabfallgesetzes (LAbfG) die Regelung zur Dichtheitsprüfung privater, erdverlegter Abwasseranlagen aus dem Bauordnungsrecht (§45 LBO NRW, seit 1995) in den §61a des Landeswassergesetzes überführt. Dieser Paragraph wird nach heutigem Stand im Frühjahr 2012 nochmals angepasst werden. In der Folge haben sich die Bundesländer Hamburg, Hessen und Schleswig-Holstein mit eigenen Regelungen zur Dichtheitsprüfung erdverlegter Kanäle angeschlossen. Weitere Bundesländer denken über Regelungen z.B. in Anlehnung an die Neufassung der DIN EN 1986-30 nach, während eine bundeseinheitliche Regelung derzeit nicht zur Diskussion steht.¹⁴

¹² Vgl. §55 (1) WHG.

¹³ Vgl. §60 (1) und (2) WHG.

¹⁴ Vgl. Dr. Mertsch, Ministerium für Umwelt, Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz NRW, Interview mit KomNetGEW, 22.09.2011, <http://www.komnetgew.de>.

Nach einer aktuellen Einschätzung der DWA liegt die Quote der sanierungsbedürftigen Grundstücksentwässerungsanlagen bei etwa 60-80%.¹⁵ Es besteht also ein erheblicher Sanierungsbedarf für private Anlagen. Bei negativem Ergebnis der Dichtheitsprüfung ergibt sich durch Auslegung der oben genannten gesetzlichen Regelungen eine Sanierungspflicht für Eigentümer. Zur Festlegung von geeigneten Sanierungsfristen hat beispielsweise das MKULNV¹⁶ in NRW einen entsprechenden Referenzkatalog veröffentlicht. Die Kosten für eine Sanierung von Grundstücksentwässerungsleitungen hängen stark von der Art, dem Umfang, der Lage und Länge, Verzweigungsgrad etc. ab. Die durchschnittlichen Kosten können zurzeit mit 250-500 EUR/m Sanierungslänge abgeschätzt werden.¹⁷

Das Merkblatt ATV-DVWK-M 143-1¹⁸ zeigt eine Übersicht über die Verfahren zur baulichen Sanierung von Entwässerungssystemen. Im Zuge von nachhaltigen Sanierungskonzepten kann für den Bereich des Grundleitungssystems unter der Gebäudegrundplatte u.a. ein erneuerndes Sanierungsverfahren angewandt werden, bei dem das schadhafte erdverlegte Grundleitungsnetz aufgegeben wird. Das somit stillgelegte Grundleitungsnetz wird durch abgehängte Leitungen ersetzt. **Abbildung 4** zeigt eine beispielhafte Darstellung für den Ersatz von defekten Grundleitungen durch abgehängte Leitungen.

¹⁵ Vgl. Berger, C., Zustand der Kanalisation 2009, in: wwt - wasserwirtschaft wassertechnik, Ausgabe 06/2011, S. 36.

¹⁶ MKULNV = Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen

¹⁷ Vgl. <http://komnetgew.de/sanierung/newsuebersicht/einzelansicht/datum/2011/05/10/sanierung-verfahren-technik-kosten-und-mehr.htm>.

¹⁸ Vgl. Merkblatt ATV-DVWK-M 143-1, 2004, S. 21.

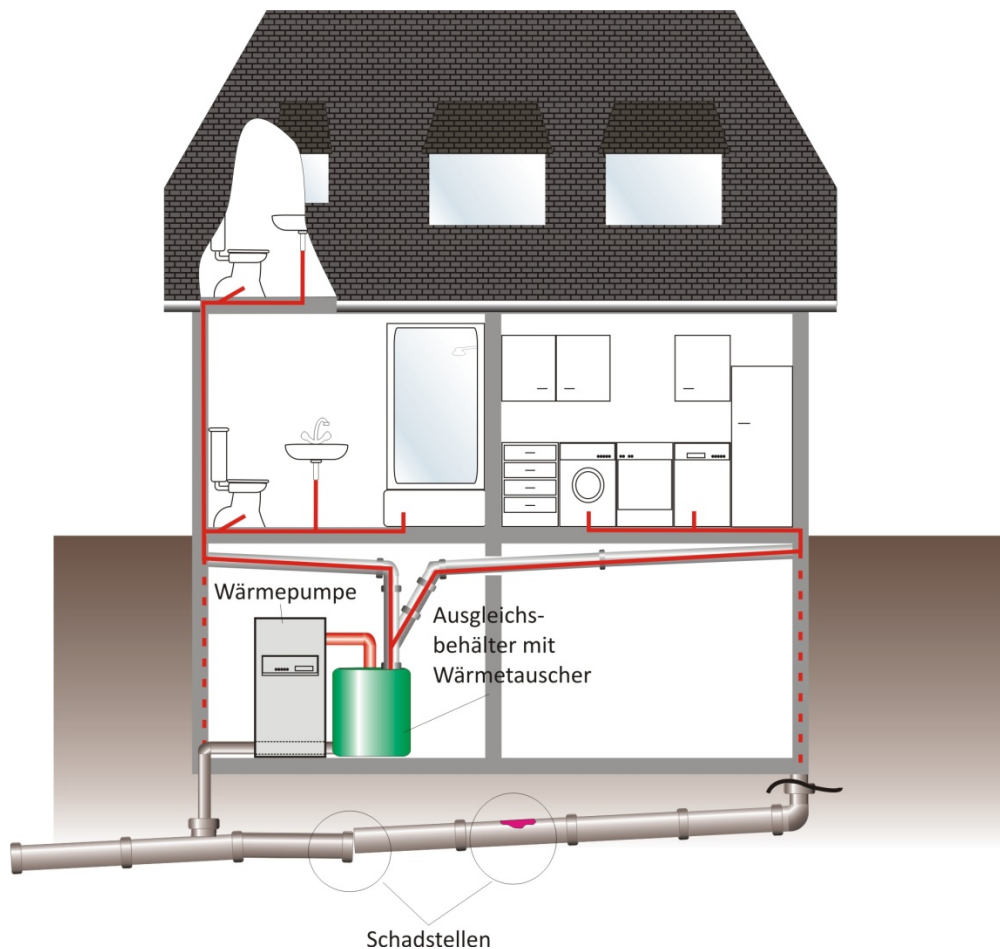


Abbildung 4: Aufgegebenes defektes Grundleitungsnetz zugunsten der Installation eines Rückgewinnungssystems (beispielhafte Darstellung)

Diese Form des Leitungssystems zeichnet sich durch eine hohe Wartungsfreundlichkeit und vergleichsweise geringe Investitionskosten (ca. 100-150 EUR/m) aus.¹⁹ Die Dimensionierung des abgehängten Leitungssystems kann durch Abkopplung der hydraulisch einflussreichen Lasten aus Niederschlagswasser platzsparend ausfallen. Gerade in größeren Objekten, wie Mehrfamilienwohnhäuser, Wohnheimen und Hotels, aber auch in Verwaltungsgebäuden, Krankenhäusern etc. stellt diese Form des hausseitigen Entwässerungssystems eine sinnvolle Alternative im Sanierungsfall dar. Zudem fallen sie aus den genannten Regelungen zur Dichtheitsprüfung heraus, da sie nicht erdverlegt sind. Eine mögliche Schadstelle wird unmittelbar augenfällig und austretendes Abwasser kann so keinen direkten ökologischen Schaden anrichten.

Bei einer Sanierung durch abgehängte Leitung wird im Kellergeschoss ein direkter Anknüpfungspunkt für die Installation einer Anlage zur Wärmerückgewinnung aus häuslichem Abwasser geschaffen. Der Zufluss zu einer solchen Anlage kann bautechnisch leicht realisiert werden, da die Fallleitungen unterhalb der Kellerdecke abgefangen werden. Dabei ist zu erwarten, dass sich die ausschließliche Lage der Leitungswege in beheizten Räumen im Gebäude und die geringe Länge, die das Abwasser vom Erzeu-

¹⁹ Vgl. <http://www.kua-nrw.de/index.php/news-detail/items/sanierungprivaterabwanlagn.html>.

gungspunkt bis zur Verwertung in der Wärmerückgewinnungsanlage zurücklegt, positiv auf die Abwassertemperatur im Zulauf der Anlage auswirken. Zusätzlicher Platzbedarf entsteht durch die Anordnung eines Abwasserspeichers, der an die Größe des Abwasseraufkommens und an die Anforderungen der Wärmerückgewinnungsanlage angepasst sein muss. Eine bisher noch offene Fragestellung ist die technische Lösung der Feststoffabscheidung vor dem Speicherbauteil. **Abbildung 5** zeigt eine schematische Darstellung zur Anordnung einer Anlage zur Wärmerückgewinnung aus häuslichem Abwasser am Beispiel des Monitoringobjektes Studentenwohnheim Otto-Petersen-Haus. Das grau gekennzeichnete Grundleitungssystem endet in einem Pumpensumpf mit Hebeanlage, die das Abwasser den abgehängten Abwasserleitungen zuführt. Die abgehängten Abwasserleitungen sind als direkte Zuführung zum Abwasserspeicher in hellbraun hervorgehoben. Ein Zufluss des getrennt geführten Regenentwässerungssystems zur Wärmerückgewinnungsanlage ist bei diesem Konzept nicht beabsichtigt und ist deshalb in der Abbildung nicht dargestellt.

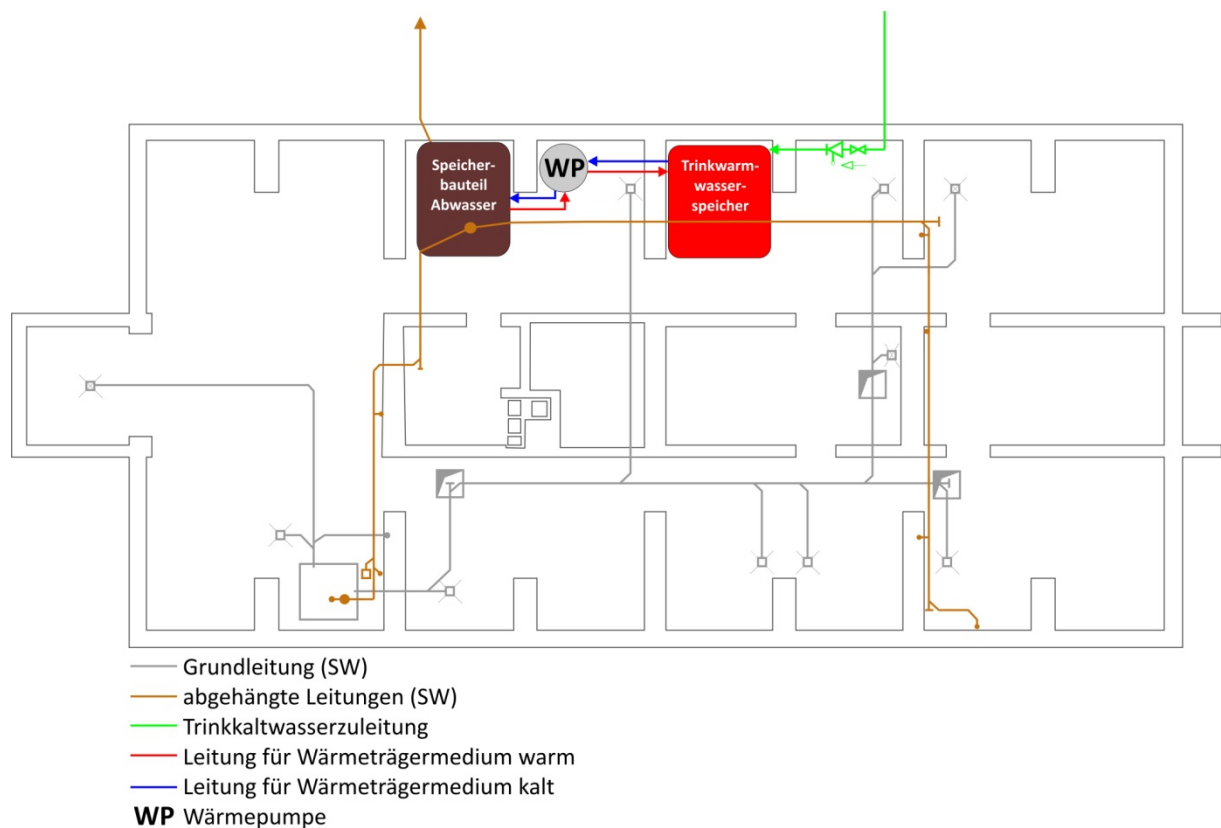


Abbildung 5: Schematische Darstellung (Konzept) zur Anordnung einer Anlage zur Wärmerückgewinnung aus häuslichem Abwasser am Beispiel des Monitoringobjektes Otto-Petersen-Haus, Aachen, Kellergrundriss

4 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 durchgeführt. Im folgenden Kapitel werden die Ergebnisse der Potentialanalyse vorgestellt. Das Kapitel beginnt mit der Beschreibung des Monitoringkonzeptes, der installierten Messtechnik und der Monitoringobjekte, worauf die Auswertung der Messungen folgt. Das Kapitel schließt mit einer Zusammenfassung der Ergebnisse.

4.1 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. 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 Sechsuhrstellung mitgeschrieben. In **Abbildung 6** ist das Schema zum Monitoring beispielhaft dargestellt.

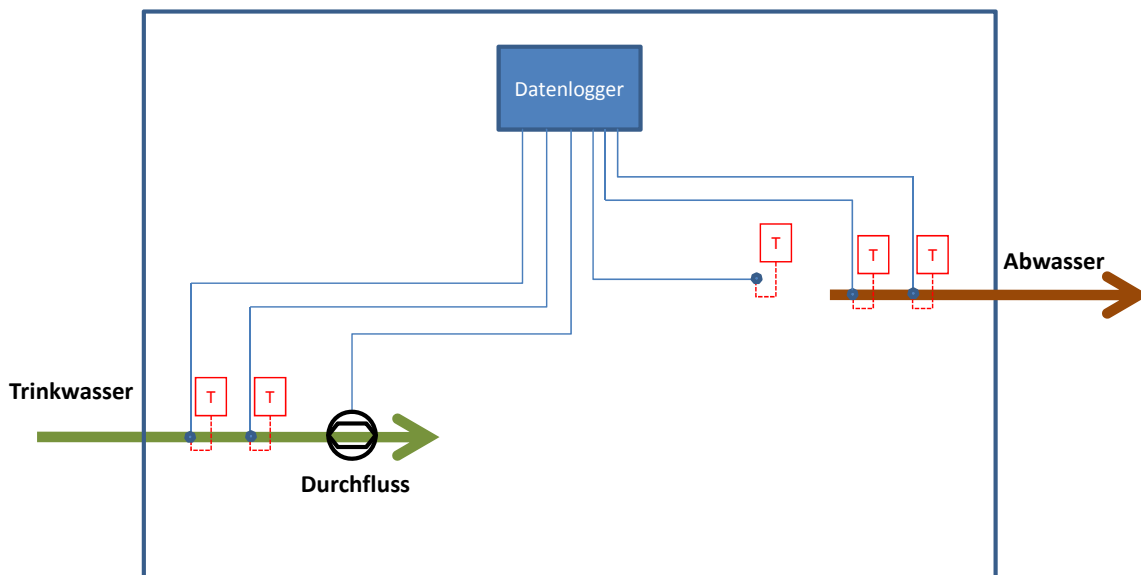


Abbildung 6: Monitoringkonzept

Als Temperaturfühler werden ausschließlich 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. Mit Hilfe der Kalibrierung kön-

nen die Messwerte um die Auswirkungen einer ungenauen Messfühlerherstellung (Abweichungen von 1000 Ohm) und der Widerstandserhöhung durch die Leitungslänge des Fühlers zum Datenlogger bereinigt werden. Die Genauigkeit der Kalibrierung beträgt 1/100 Kelvin. Die Leitungslänge beträgt je nach Einbaubedingungen 5 m, 25 m oder 30 m, der Leitungsquerschnitt $2 \times 0,25 \text{ mm}^2$. Die Temperaturfühler werden in der Sechsuhrstellung an die Rohrwandung angelegt. Bei der Montage werden die Fühler, wie in **Abbildung 7** dargestellt, in einen Aluminium-Block geschoben, welcher dann mit Wärmeleitpaste an die Rohrwandung gedrückt wird. Nach außen wird der Fühler mit einem Styropor-Block isoliert.

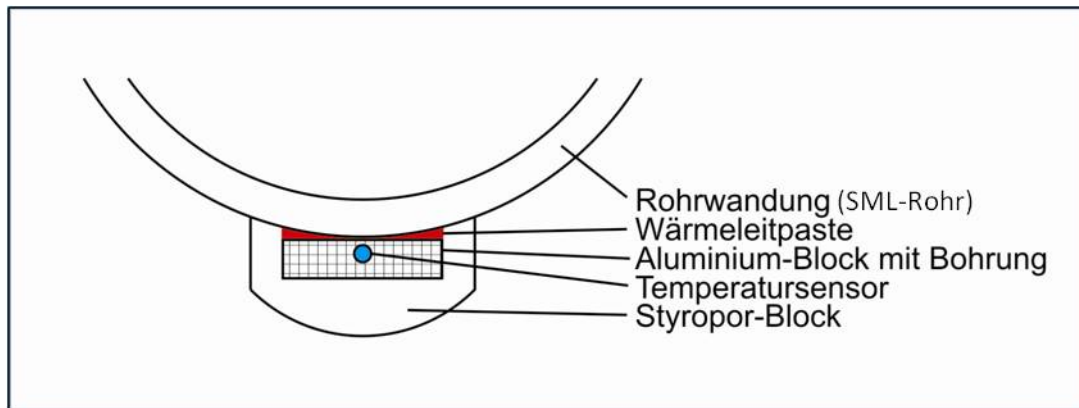


Abbildung 7: Schnitt Einbau Temperaturanlegefühler

In Vorversuchen am Lehrstuhl für Baubetrieb und Gebäudetechnik wurde die Tauglichkeit von Anlegefühlern gegenüber Eintauchfühlern an einem SML-Rohr mit einer Länge von 3 m untersucht. Hierbei wurden verschiedene Warm- und Kaltwasserereignisse simuliert und die gemessenen Temperaturen der beiden Einbausituationen analysiert. Bei einem ersten Versuch wurde die Wassertemperatur von 10°C auf 38°C (entspricht einer durchschnittlichen Duschtemperatur) erhöht. Die Verzugszeit des Tauchfühlers beträgt hierbei 10 s, die Ausgleichszeit 44 s. Im Gegensatz dazu ergibt sich die Verzugszeit beim Anlegefühler zu 28 s und die Ausgleichszeit zu 96 s. Sobald die Temperaturmessung einen stationären Zustand erreicht, wird die Wassertemperatur durch den Anlegetemperaturfühler im Mittel um 0,5 K unterschätzt. Beim Abkühlvorgang von 38°C auf 10°C beträgt die Verzugszeit des Tauchfühlers 3,2 s und die Ausgleichszeit 27 s. Der Anlegefühler weist eine Verzugszeit von 8,5 s und eine Ausgleichszeit von 31,5 s auf. Nach der Ausgleichszeit liegt die Temperaturunterschätzung des Anlegefühlers bei 0,05 K. Bei einem weiteren Versuch wurde eine Schwallspülung von 10 l mit einer Temperatur von 55°C untersucht. Hierbei zeigt sich neben der Verzögerung der Temperaturmessung auch eine deutliche Unterschätzung der Wassertemperatur. So kann mit dem Tauchfühler eine Temperatur von $37,6^\circ\text{C}$ und mit dem Anlegetemperaturfühler eine Temperatur von $29,5^\circ\text{C}$ gemessen werden.

Die Auswertung des gesamten Versuchsprogramms zeigt, dass eine Erwärmung des im Abflussrohr fließenden Mediums durch den Anlegefühler bis zur stationären Temperaturmessung im Mittel um 1,5 K unterschätzt und beim Abkühlen ebenfalls um durchschnittlich 1,5 K überschätzt wird. Während der stationären Temperaturmessung be-

trägt die Temperaturunterschätzung des Anlegefühlers im Mittel bei allen Versuchen im Temperaturbereich von 10 °C bis 55 °C 0,25 K.

Die Trinkwassermenge wird mittels Impulsgebern erfasst. Diese werden verwendet, um das mechanische Zählwerk des Durchflussmessers an das elektrische System anbringen zu können. Die Impulsgeber arbeiten mit Reedkontakten, d.h. ein Auslösen des Kontaktes bei einer vollständigen Drehung des Zählwerkes beruht auf magnetischen Kontakt. Die Impulswertigkeit beträgt im Regelfall 10 Liter.

Die Daten werden mit Datenloggern erfasst und gespeichert. Es wurden Smartboxen der Firma Ennovatis und Datenlogger der Firma Driesen + Kern verwendet. Die Mess- und Speicherintervalle aller Messungen betragen 5 Sekunden.

4.2 Monitoringobjekte

Die vier Monitoringobjekte Theodore von Kármán Haus, Otto Petersen Haus, Business Hotel Aachen City und Luisenhospital befinden sich alle im Aachener Stadtgebiet und werden im Folgenden beschrieben.

Das Studentenwohnheim Theodore von Kármán Haus wurde 1968 gebaut und 1988/89 saniert. Das Haus liegt an der Rütcher Straße in Aachen und bietet auf 16 Etagen Platz für 246 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 vollständig vermietet.

Das Otto Pettersen Haus ist ebenfalls ein Studentenwohnheim in der Rütcher Straße in Aachen, welches 1965 gebaut 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 siebzehn befinden sich 104 Appartements und 26 Doppelappartements. Die Appartements haben eine Wohnfläche von 18 m² und sind mit einer Miniküche, sowie eigenem Bad mit Dusche ausgestattet. In den Doppelappartements sind ebenso ein Bad und eine Miniküche integriert. Die Wohnfläche beträgt 24 m² und wird von zwei Studenten bewohnt. Das Wohnheim ist wie das Theodore von Kármán Haus vollständig vermietet.

In Deutschland gibt es 1.895 Studentenwohnheime mit durchschnittlich 119 Bewohnern.²⁰ Es ist zu erwarten, dass Studentenwohnheime ein ähnliches Verbrauchsprofil wie große Mehrfamilienhäuser aufweisen. In Deutschland gibt es ca. 260.000 große Mehrfamilienhäuser mit jeweils durchschnittlich 26 Wohnungen.²¹

Das Business Hotel Aachen City wurde im Jahr 2004 eröffnet. Der Hotelneubau befindet sich in der Aachener Innenstadt. Das Hotel verfügt über 154 Zimmer, einen Fitnessbereich mit Dampfbad und sieben Meetingräumen mit bis zu 240 Sitzplätzen. Die Zimmer sind standardmäßig mit Dusche, Badewanne und WC ausgestattet. Zum Hotel gehören außerdem eine Bar und ein Restaurant. Die Bar hat täglich von 10:00 bis 01:00 Uhr geöffnet und bietet 30 Gästen Platz. Das Restaurant wird morgens ab 06:30 Uhr für das Frühstück der Gäste genutzt und bleibt bis 22:30 Uhr geöffnet. Das Hotel wird vorrangig von Geschäftsreisenden besucht. Es liegen keine Informationen über die Belegungszahlen der einzelnen Tage vor. In Deutschland gibt es 56.035 Beherbergungsstätten, wovon 13.735 als Hotel klassifiziert werden. Insgesamt verfügen die Hotelbetriebe über 1.057.686 Betten, d.h. ein durchschnittliches Hotel verfügt über 77 Betten.²²

Das Luisenhospital ist ein modernes Krankenhaus der Regelversorgung der Stadt Aachen mit 348 Planbetten und 10 Fachabteilungen, mit dem entsprechenden diagnosti-

²⁰ Vgl. o.V., Wohnraum für Studierende, Deutsches Studentenwerk (Hrsg.), 2011, S. 20.

²¹ Vgl. Diefenbach, N., Loga, T., Basisdaten für Hochrechnung mit der Deutschen Gebäudetypologie des IWU: Neufassung August 2011, Institut Wohnung und Umwelt (Hrsg.), 2011, S. 2.

²² Vgl. o.V., Hotelmarkt in Deutschland, Hotelverband Deutschland (IHA) e.V. (Hrsg.), 2012, S. 32.

schen Spektrum (u.a. Kernspintomographie, Computertomographie sowie klinisches Labor). Insgesamt gab es in Deutschland im Jahr 2010 2.064 Krankenhäuser mit 502.749 Betten.²³ Im Bundesdurchschnitt verfügt ein deutsches Krankenhaus somit über 244 Planbetten. Mit 348 Planbetten gehört das Luisenhospital zu den größeren Krankenhäusern.

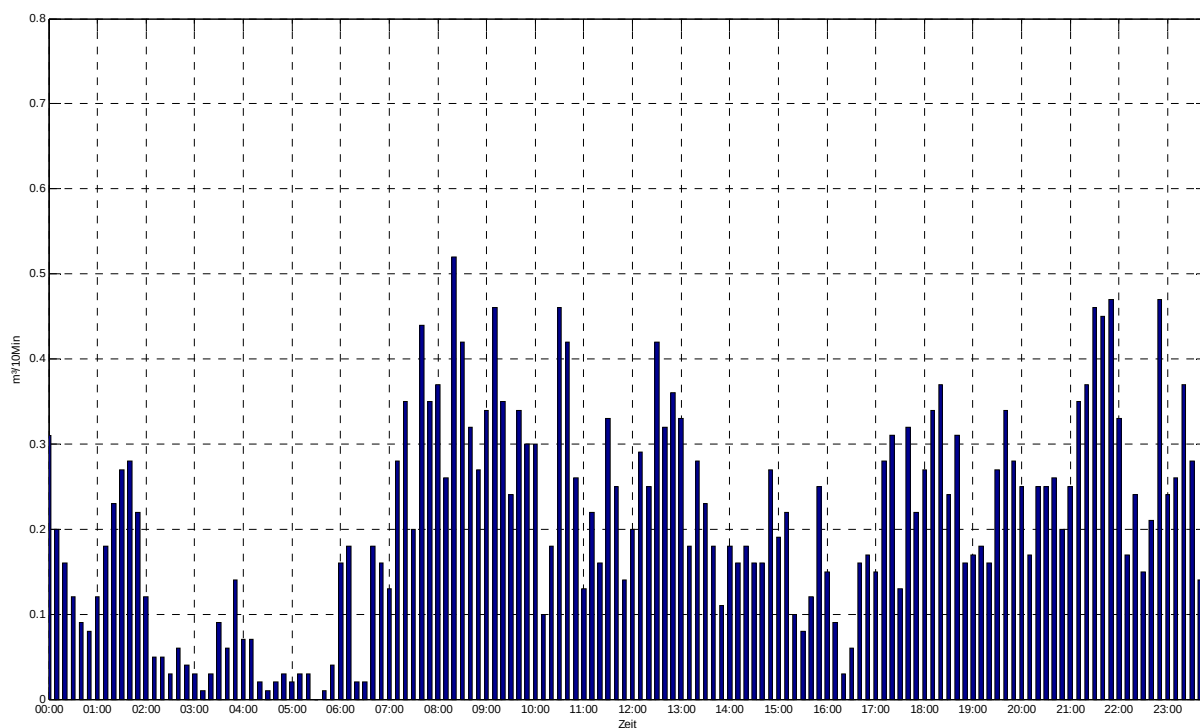
4.3 Ergebnisse

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 Betrachtungsschritte aufsummiert werden.

Abbildung 8 zeigt beispielhaft den Trinkwasserverbrauch des Theodore von Kármán Hauses am Dienstag, den 31.05.2011 in Zehnminutenintervallen. Der Durchfluss ist als Zehnminutenmittelwert auf Basis der Messungen in Fünfsekundenintervallen in m³ pro Zehnminuten angegeben. Es ist zu erkennen, dass der Trinkwasserverbrauch ab ca. 06:00 Uhr ansteigt, zwischen 08:00 und 09:00 Uhr ein Maximum von über 0,5 m³ pro Zehnminuten erreicht und in den Nachmittagsstunden wieder deutlich abflacht (Minimum zwischen 16:00 und 17:00 Uhr). In den Abendstunden ist zwischen 21:00 und 22:00 Uhr eine zweite Nachfragespitze zu beobachten. In den Nachtstunden wird deutlich weniger Trinkwasser gezapft. Dennoch sind gegen halb zwei und vier Uhr weitere kleinere Spitzen zu erkennen.

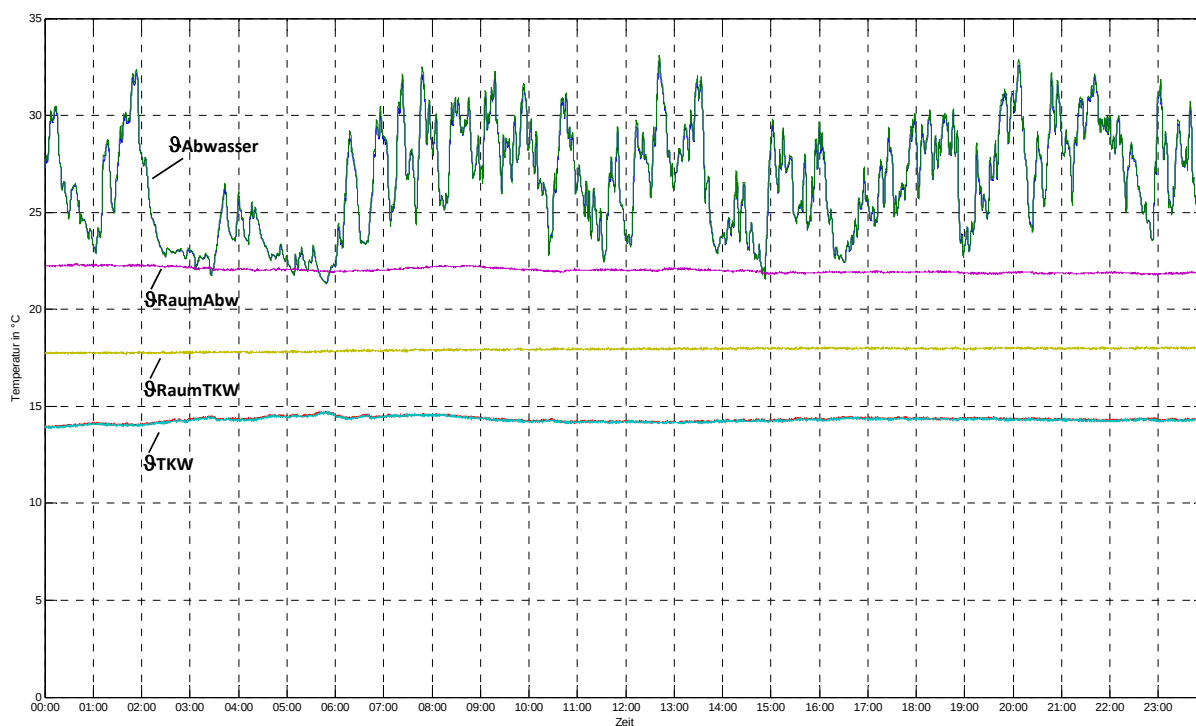
In **Abbildung 9** sind die dazugehörigen gemessenen Temperaturen in Fünfsekundenintervallen dargestellt. Es ist zu erkennen, dass während der Trinkwasserverbrauchsspitzen die Abwassertemperatur ansteigt. In der Vormittagsspitze liegen die gemessenen Temperaturen zwischen 25 und 32 °C. In den Abendstunden ist ebenfalls eine Abwassertemperatur von deutlich über 30 °C feststellbar. Des Weiteren sind auch die nächtlichen Trinkwasserzapfungen mit einem erheblichen Anstieg der Abwassertemperaturen verbunden. Dies zeigt, dass in Zeiträumen mit hohen Trinkwasserzapfungen auch viele Warmwasserzapfungen stattfinden. Darüber hinaus ist in **Abbildung 9** die hohe gemessene Trinkkaltwassertemperatur von ca. 14 °C zu erkennen. Ein Großteil des Trinkwassers der Stadt Aachen wird aus Talsperren der Wassergewinnungs- und Wasseraufbereitungsgesellschaft Nordeifel bereitgestellt. Hierdurch ist eine starke Schwankung der Trinkkaltwassertemperatur im Jahresgang zu erklären.

²³ Vgl. o.V., Gesundheit, Grunddaten der Krankenhäuser 2010, Statistisches Bundesamt (Hrsg.), 2012, S. 11.



Ermittelt aus Messdaten vom 31.05.2011. Der Durchfluss ist als Zehnminutenmittelwert auf Basis von Messungen in 5-Sekunden-Intervallen in m³ pro Zehnminuten angegeben.

Abbildung 8: Theodore von Kármán Haus, Trinkkaltwasserverbrauch, Dienstag, 31.05.2011



Ermittelt aus Messdaten vom 31.05.2011. Die Abwassertemperaturen wurden in 5-Sekunden-Intervallen gemessen.

Abbildung 9: Theodore von Kármán Haus, Temperaturmessung, Dienstag, 31.05.2011

Im Zuge der Auswertung werden die Daten der vier Monitoringobjekte standardisiert erfasst. 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 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. In den folgenden Kapiteln werden die Ergebnisse des Monitorings an den vier Gebäuden beschrieben. Die Diagramme zeigen den repräsentativen Tagesgang von Trinkwasserentnahme und Abwassertemperatur der vier untersuchten Objekte für Werktage, Samstage und Sonntage 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 ist die dazugehörige durchschnittliche Abwassertemperatur abgebildet, welche sich auf die rechte Ordinate mit der Skalierung 0 bis 35 °C bezieht.

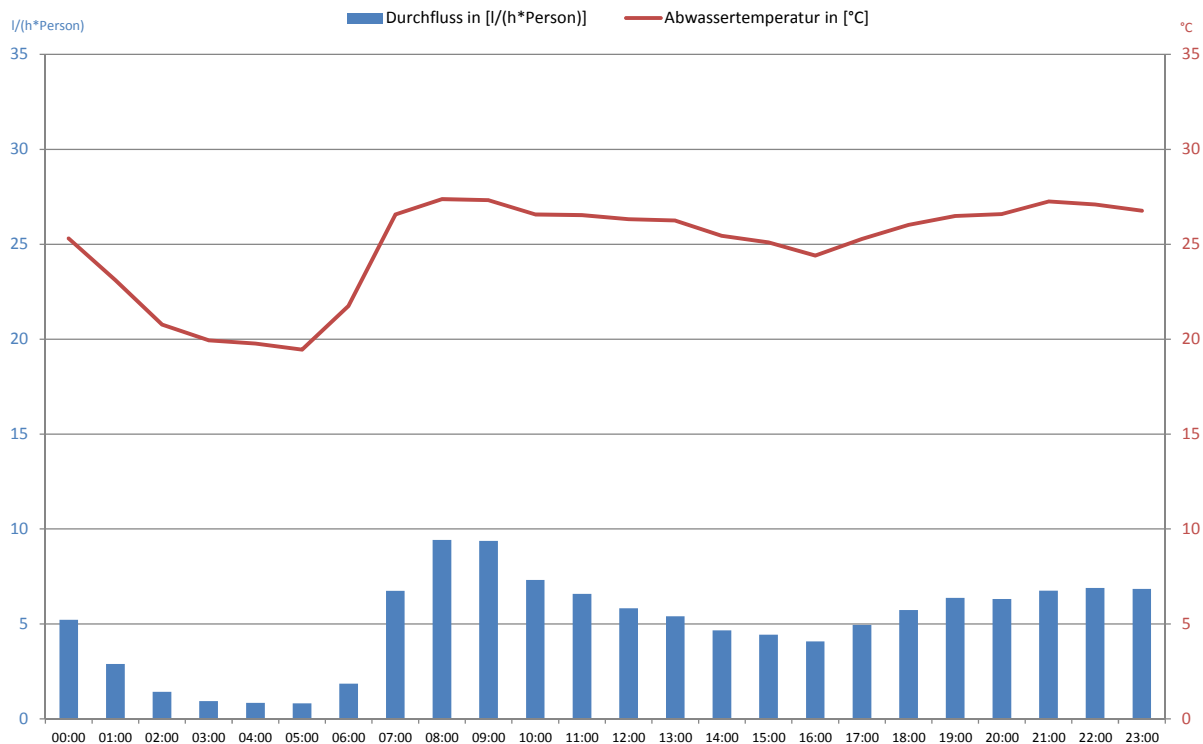
4.3.1 Theodore von Kármán Haus

Im Folgenden werden die Messergebnisse des Theodore von Kármán Haus vorgestellt. Der Messzeitraum umfasst 30 Tage im Februar und März 2011 sowie 33 Tage im Mai und Juni 2011. Die Auswertung einer vollständigen Jahresperiode erfolgt im Rahmen des Folgeforschungsvorhabens „Dezentrale Abwasserwärmerückgewinnung zur Steigerung der Energieeffizienz von Gebäuden“.

Für den Gesamtmesszeitraum ergibt sich ein durchschnittlicher Trinkwasserverbrauch von 29,1 m³ pro Tag bzw. 118,4 Liter pro Tag und Person. Die durchschnittliche Abwassertemperatur berechnet sich für den Gesamtzeitraum zu 26,2 °C.

Während der Werktage Montag bis Freitag ist ein durchschnittlicher Trinkwasserverbrauch von 30,0 m³ pro Tag bzw. 121,8 Liter pro Tag und Person feststellbar. Die dazugehörige Abwassertemperatur beträgt 26,3 °C. D.h. werktags stellen sich ein höherer Trinkwasserverbrauch und eine höhere Abwassertemperatur als am Wochenende ein.

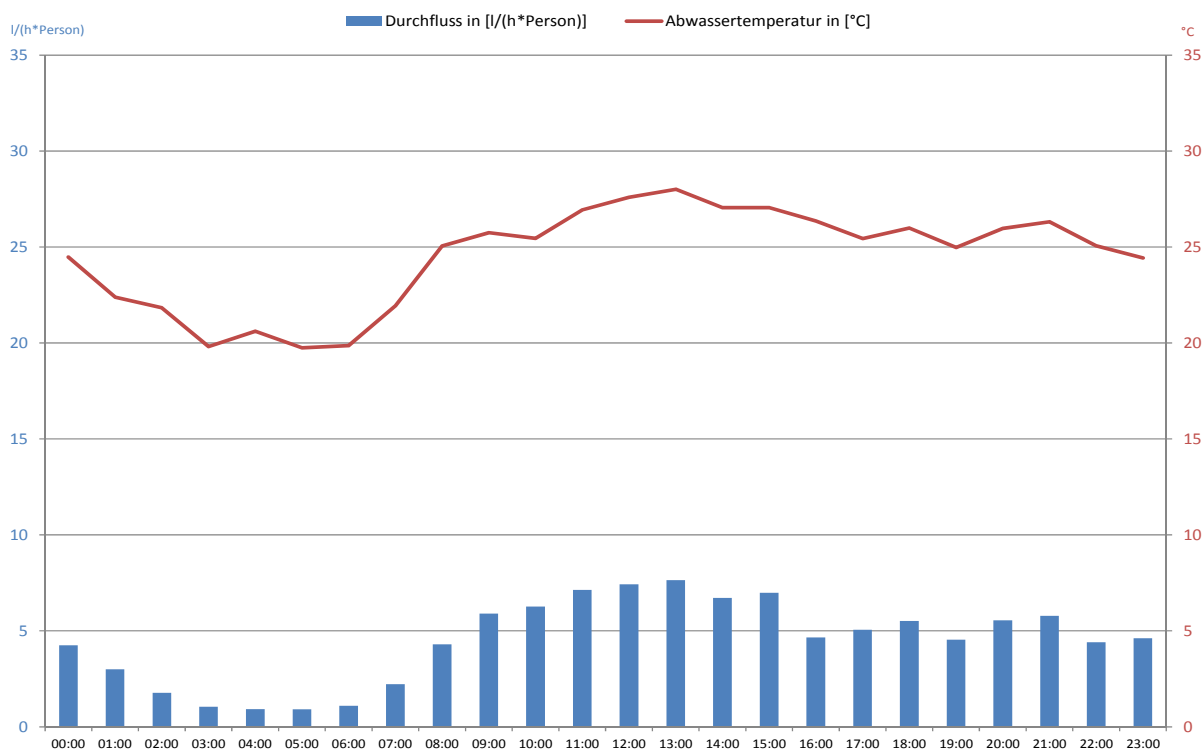
In **Abbildung 10** ist der repräsentative Tagesgang von Trinkwasserzapfung und Abwassertemperatur für einen Werktag dargestellt. Es ist zu erkennen, dass ab 6:00 Uhr die morgendlichen Trinkwasserzapfungen beginnen. Die Spitze tritt zwischen 8:00 und 10:00 Uhr mit 9,4 Liter pro Stunde und Person auf. In den Nachmittagsstunden ist zwischen 16:00 und 17:00 Uhr ein Absenken des mittleren Durchflusses auf 4,1 Liter pro Stunde und Person zu erkennen. Abends ist eine zweite Spitze mit 6,9 Liter pro Stunde und Person zwischen 22:00 und 23:00 Uhr zu sehen. In den Nachtstunden fällt der Trinkwasserverbrauch auf 0,82 Liter pro Stunde und Person zwischen 5:00 und 6:00 Uhr. Der Verlauf der Abwassertemperaturen weist einen ähnlichen Tagesverlauf auf. Mit der morgendlichen Verbrauchsspitze ist zwischen 8:00 und 09:00 Uhr der höchste Stundenwert der Abwassertemperatur in Höhe von 27,4 °C zu beobachten. In den Nachmittagsstunden sinkt die Temperatur analog zum Durchflussprofil auf 24,4 °C ab. In den Abendstunden wird zwischen 21:00 und 22:00 Uhr wieder eine hohe Abwassertemperatur von 27,3 °C erreicht. In den Nachtstunden fällt die Temperatur auf 19,5 °C zwischen 5:00 und 6:00 Uhr ab.



Ermittelt aus Messdaten von Februar bis Juni 2011. Der Durchfluss ist als Stundenmittelwert auf Basis von Messungen in 5-Sekunden-Intervallen in $l/(h \cdot \text{Person})$ angegeben. Der Stundenmittelwert der mit dem Durchfluss gewichteten Abwassertemperatur basiert ebenfalls auf Messungen in 5-Sekunden-Intervallen.

Abbildung 10: Theodore von Kármán Haus, Ganglinie Werktag

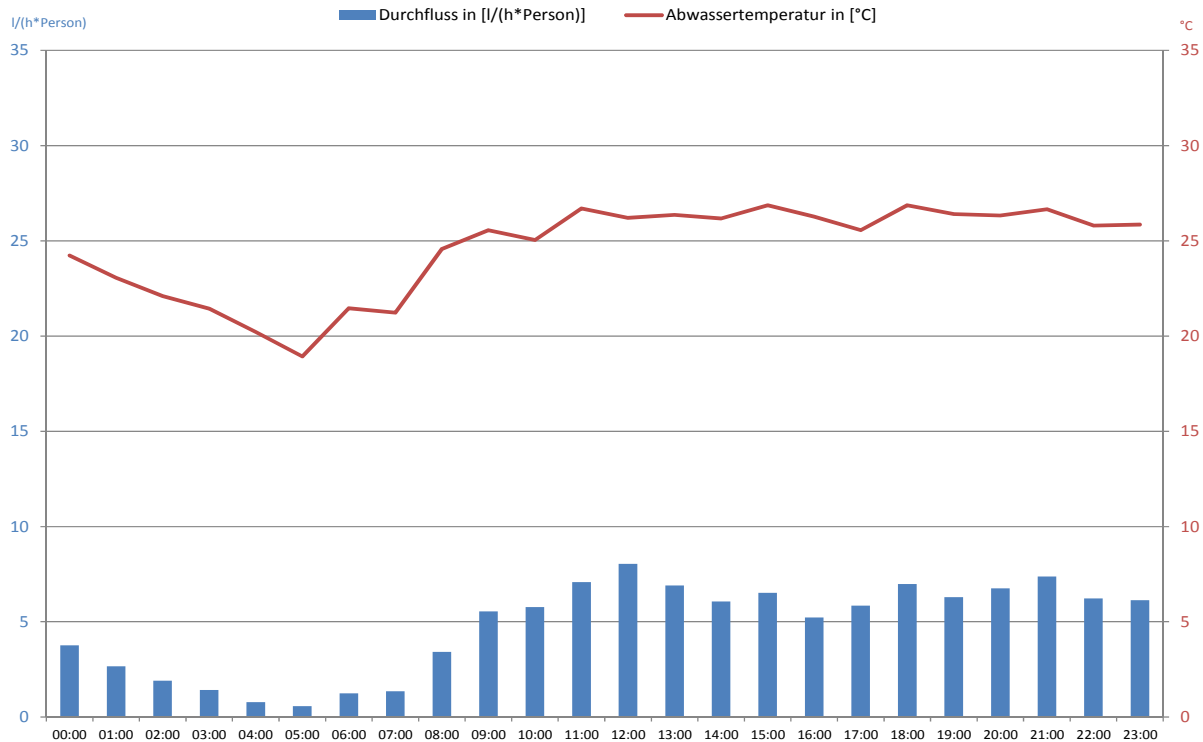
An Samstagen ist ein durchschnittlicher Trinkwasserverbrauch von $26,5 \text{ m}^3$ pro Tag bzw. 107,7 Liter pro Tag und Person feststellbar. Die durchschnittliche Abwassertemperatur ergibt sich zu $25,9 \text{ }^\circ\text{C}$. Durchfluss und Temperatur sind somit samstags geringer als in an Wochentagen. In **Abbildung 11** ist die repräsentative Ganglinie von Durchfluss und Abwassertemperatur für Samstag dargestellt. Es ist zu erkennen, dass in den Nachtstunden des Samstags ähnlich zu den Nächten zwischen den Werktagen der Durchfluss auf $0,9 \text{ Liter pro Stunde und Person}$ absinkt. Ab 7:00 Uhr, d.h. eine Stunde später als an Werktagen, beginnen die morgendlichen Trinkwasserzapfungen. Die Spitze wird erst zwischen 13:00 und 14:00 Uhr mit $7,6 \text{ Liter pro Stunde und Person}$ erreicht. Die morgendliche Spitze dauert im Vergleich zu einem Werktag länger (bis 16:00 Uhr) und erreicht geringere stündliche Durchflusswerte. Ab 16:00 Uhr stellt sich bis zum Abend ein gleichmäßiger Trinkwasserverbrauch von $4,4$ bis $5,8 \text{ Liter pro Stunde und Person}$ ein. Die zugehörigen durchschnittlichen Abwassertemperaturen verlaufen ähnlich wie das Durchflussprofil. In den Nachtstunden fällt die Abwassertemperatur auf $19,8 \text{ }^\circ\text{C}$ zwischen 5:00 und 6:00 Uhr. In den Morgen- und Mittagsstunden ist ein starker Anstieg der Temperaturen bis auf $28,0 \text{ }^\circ\text{C}$ zwischen 13:00 und 14:00 Uhr zu verzeichnen. In den Nachmittagsstunden pendelt die Abwassertemperatur zwischen $24,4 \text{ }^\circ\text{C}$ und $26,4 \text{ }^\circ\text{C}$.



Ermittelt aus Messdaten von Februar bis Juni 2011. Der Durchfluss ist als Stundenmittelwert auf Basis von Messungen in 5-Sekunden-Intervallen in $l/(h \cdot \text{Person})$ angegeben. Der Stundenmittelwert der mit dem Durchfluss gewichteten Abwassertemperatur basiert ebenfalls auf Messungen in 5-Sekunden-Intervallen.

Abbildung 11: Theodore von Kármán Haus, Ganglinie Samstag

An Sonntagen ist ein durchschnittlicher Trinkwasserverbrauch von 28,0 m³ pro Tag bzw. 113,9 Liter pro Tag und Person festzustellen. Die zugehörige durchschnittliche Abwassertemperatur beträgt 25,9 °C. Die Werte liegen zwischen denen von Wochentagen und Samstagen. In **Abbildung 12** ist die repräsentative Ganglinie von Trinkwassermenge und Abwassertemperatur für Sonntage dargestellt. Es ist zu erkennen, dass in den Nächten von Samstag auf Sonntag der Durchfluss auf 0,6 Liter pro Stunde und Person zwischen 5:00 und 6:00 Uhr anfällt. Der morgendliche Trinkwasserverbrauch beginnt zwischen 8:00 und 9:00 Uhr, d.h. zwei Stunden später als an Wochentagen. Die Spitze wird zwischen 12:00 und 13:00 Uhr mit 8,0 Liter pro Stunde und Person erreicht. In den Nachmittagsstunden ist wie an Wochentagen zwischen 16:00 und 17:00 Uhr mit 5,2 Liter pro Stunde und Person eine Senke zu erkennen. In den Abendstunden schwankt der Durchfluss zwischen 6,1 und 7,4 Liter pro Stunde und Person. Die zugehörigen Abwassertemperaturen erreichen in den Nachtstunden zwischen 5:00 und 6:00 Uhr das Minimum von 18,9 °C. Mit der Morgenspitze steigt die Temperatur bis auf 26,7 °C zwischen 11:00 und 12:00 Uhr an. Den Rest des Tages bleibt die Abwassertemperatur mit Werten zwischen 25,6 und 26,9 °C auf hohem Niveau.



Ermittelt aus Messdaten von Februar bis Juni 2011. Der Durchfluss ist als Stundenmittelwert auf Basis von Messungen in 5-Sekunden-Intervallen in l/(h*Person) angegeben. Der Stundenmittelwert der mit dem Durchfluss gewichteten Abwassertemperatur basiert ebenfalls auf Messungen in 5-Sekunden-Intervallen.

Abbildung 12: Theodore von Kármán Haus, Ganglinie Sonntag

Bei allen vorgestellten Ganglinien ist festzustellen, dass bei einem Anstieg des Trinkwasserverbrauchs gleichzeitig die gemessene Abwassertemperatur ansteigt. Dies zeigt, dass in Zeitperioden mit hohem Durchfluss größere Warmwassermengen verbraucht werden als in Zeiträumen mit geringem Durchfluss.

Die Ganglinien enthalten arithmetische Mittelwerte der auf Grundlage von Messungen in Fünfsekundenintervallen gebildeten Stundenmittelwerte der Einzeltage. Mit Hilfe von Konfidenzintervallen können Bereiche angegeben werden, mit denen unter Berücksichtigung der Stichprobenstandardabweichung und eines bestimmten Wahrscheinlichkeitsniveaus die erwartete Menge und Temperatur der Abwasserströme beschrieben werden können. Hierzu wird eine Standardnormalverteilung der Messwerte um den Mittelwert angenommen. Die Formel zur Berechnung des Konfidenzintervalls eines normalverteilten Merkmals mit unbekannter Varianz lautet:

$$\left[\bar{x} - t_{\left(1-\frac{\alpha}{2}; n-1\right)} \frac{s}{\sqrt{n}}; \bar{x} + t_{\left(1-\frac{\alpha}{2}; n-1\right)} \frac{s}{\sqrt{n}} \right]$$

- $\bar{x}$ = Arithmetisches Mittel
- t = Quantil der t-Verteilung
- α = Irrtumswahrscheinlichkeit
- s = Stichprobenstandardabweichung
- n = Stichprobenumfang

In **Abbildung 13** sind die Konfidenzintervalle der Durchflusstundenwerte an Werktagen des Theodore von Kármán Haus dargestellt. Die Konfidenzintervalle wurden auf dem 5 % Niveau gebildet, d.h. mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 % kann davon ausgegangen werden, dass die Stundenwerte des Durchflusses in den dargestellten Intervallen liegen. Die Schwankungsbreiten der Konfidenzintervalle sind im Vergleich zu den Minimal- und Maximalwerten der Messwerte aufgrund der angenommenen Standardnormalverteilung der Messwerte um den Mittelwert und der zugelassen Irrtumswahrscheinlichkeit deutlich geringer. Es ist zu erkennen, dass unter Beachtung der Bandbreite des Konfidenzintervalls die oben beschriebene Charakteristik der Ganglinie erhalten bleibt. Des Weiteren ist zu sehen, dass in Zeitspannen mit hohem Wasserverbrauch größere Konfidenzintervalle und in Zeiträumen mit geringem Wasserverbrauch engere Konfidenzintervalle vorliegen. Daraus folgt, dass in den Stunden mit hohem Wasserverbrauch größere Abweichungen zu erwarten sind.

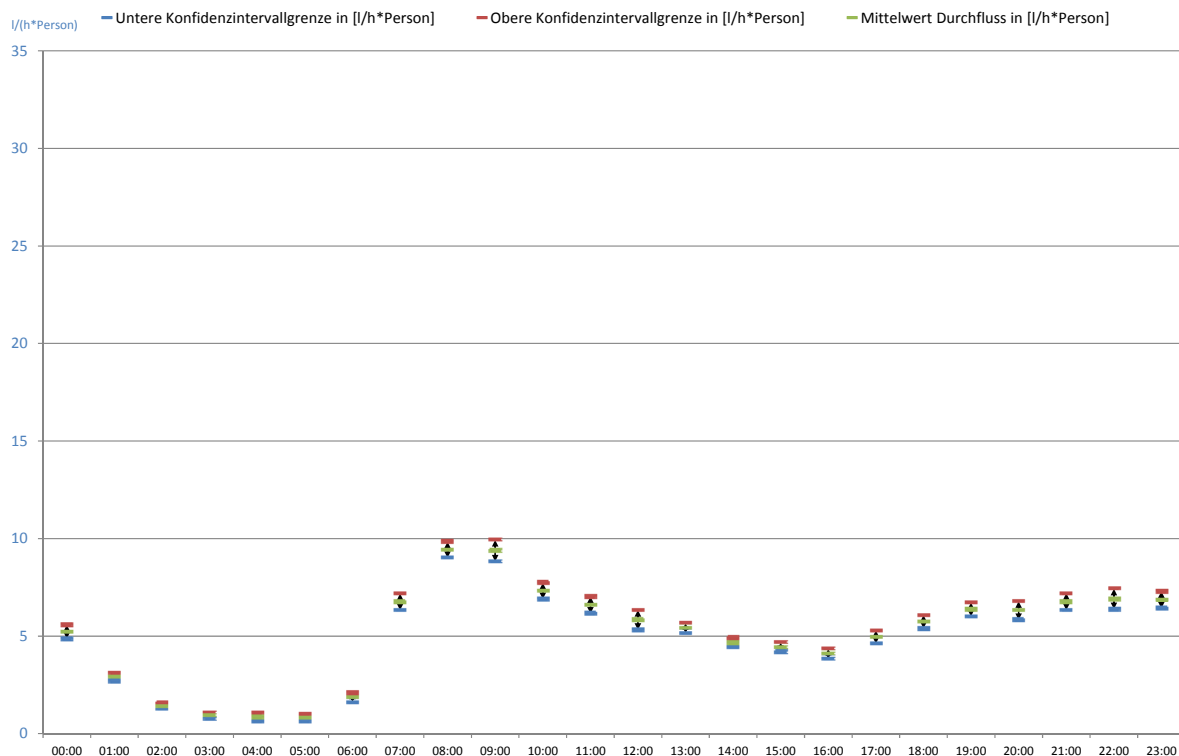


Abbildung 13: Theodore von Kármán Haus, Konfidenzintervalle Werktag

Bei der Auswertung der Konfidenzintervalle der Abwassertemperaturen ergaben sich große Schwankungsbreiten, so dass der Datensatz nach einer entsprechenden Regelmäßigkeit untersucht wurde. Hierbei konnte festgestellt werden, dass die Höhe der Abwassertemperatur jahreszeitlichen Schwankungen unterworfen ist. In **Abbildung 14** sind die Ganglinien von Durchfluss und Abwassertemperatur für Werktage unterschiedlicher Zeitperioden dargestellt. Periode 1 umfasst die Messwerte aus Februar und März und Periode 2 beinhaltet die Werte aus Mai und Juni 2011.

Es ist zu erkennen, dass die Profile des Durchflusses sehr ähnlich sind. Im Durchschnitt werden in der 2. Periode 1,0 Liter pro Tag und Person weniger verbraucht als in der 1. Periode. Betrachtet man die Abwassertemperaturprofile, fällt auf, dass die Abwassertemperatur in der 2. Periode zu jeder Stunde höher liegt als in der 1. Periode. Durchschnittlich ergibt sich pro Tag eine um 2,3 K höhere Abwassertemperatur in der 2. Periode. Es ist festzustellen, dass die Abwassertemperatur mit der Trinkkaltwassertemperatur korreliert. In der ersten Messperiode betrug die Trinkkaltwassertemperatur zwischen 6,7 und 7,8 °C. In der zweiten Messperiode lag die Trinkkaltwassertemperatur im Bereich von 14,5 bis 15,5 °C. Die Schwankungen der Trinkkaltwassertemperatur in Aachen lassen sich durch einen großen Anteil von Oberflächenwasser aus Talsperren im Trinkwasserversorgungsnetz erklären. Oberflächenwasser unterliegt in der Jahreszeitraumbetrachtung großen Temperaturschwankungen.

Während am Tag die Warmwasserzapfungen das Abwassertemperaturprofil bestimmen, wird in den Nachtstunden häufig kaltes Wasser verwendet. Dies ist auch im Diagramm zu erkennen: die Abwassertemperaturdifferenz ist in den Nachtstunden größer als am Tag. Im Rahmen des Folgeforschungsvorhabens „Dezentrale Abwasserwärmerückgewinnung zur Steigerung der Energieeffizienz von Gebäuden“ wird eine gesamte Jahresperiode von Durchfluss, Abwassertemperatur und Trinkkaltwassertemperatur vermessen. Hierdurch wird eine detaillierte Untersuchung der Abhängigkeit der Abwassertemperatur von der Trinkkaltwassertemperatur ermöglicht.

In den Mieten der beiden untersuchten Studentenwohnheime sind die Nebenkosten für Strom, Wasser und Heizung enthalten, d.h. es findet keine verbrauchsgemäße Abrechnung der Nebenkosten statt. Die Bewohner werden lediglich im Mietvertrag zu einem sparsamen Verhalten aufgefordert. Fraglich ist, ob dieser Umstand zu einem Mehrverbrauch an Wasser und Energie führt. Die durchschnittlichen gemessenen Trinkwasserverbrauchsmengen von 118,4 Liter pro Tag und Person (Theodore von Kármán Haus) und 120,2 Liter pro Tag und Person (Otto Petersen Haus) liegen geringfügig unter dem Bundesdurchschnitt von 122 Liter pro Tag und Person.²⁴ Eine andere Untersuchung an 18 Studentenwohnheimen in Deutschland, worin u.a. der Trinkwasserverbrauch ermittelt wird, bestätigt mit einem gemittelten Wasserverbrauch für den Betrachtungszeitraum 2007 bis 2009 von 115,9 Liter pro Tag und Person den geringfügig unterdurchschnittlichen Wasserverbrauch von Studentenwohnheimen.²⁵ Die Studie kommt zu dem Ergebnis, dass der Pro-Kopf Verbrauch von Wasser und Energie in Studentenwohnheimen nicht wesentlich vom bundesdeutschen Durchschnitt entfernt ist.²⁶

²⁴ Vgl. o.V., Statistisches Jahrbuch 2010 für die Bundesrepublik Deutschland mit internationalen Übersichten, Statistisches Bundesamt (Hrsg.), 2010, S. 307.

²⁵ Vgl. Voss, K., Helbich, U., Benchmarks für die Sanierung und den Neubau von Wohnheimen für Studierende, 2011, S. 42.

²⁶ Vgl. Voss, K., Helbich, U., Benchmarks für die Sanierung und den Neubau von Wohnheimen für Studierende, 2011, S. 69.

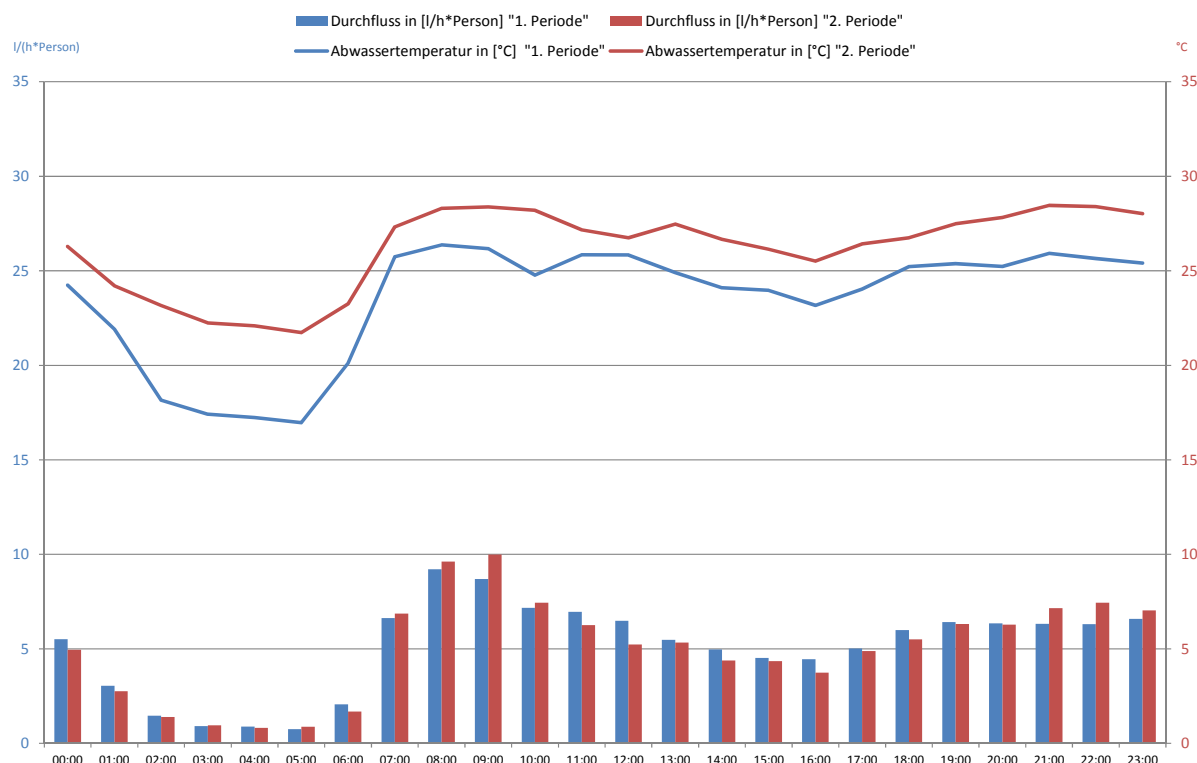


Abbildung 14: Theodore von Kármán Haus, Periodenvergleich Werktag

In **Tabelle 1** sind die Tagesdurchschnittswerte von Durchfluss und Abwassertemperatur für den Gesamtmesszeitraum, für Werktage, für Samstage und für Sonntage zusammengefasst.

Tabelle 1: Theodore von Kármán Haus, Tagesdurchschnittswerte Monitoring

<i>Zeitraum</i>	<i>Durchfluss</i>	<i>Abwassertemperatur</i>
Gesamtmesszeitraum	29,1 m ³ /d 118,4 l/d·Person	26,2 °C
Werktage	30,0 m ³ /d 121,8 l/d·Person	26,3 °C
Samstage	26,5 m ³ /d 107,7 l/d·Person	25,9 °C
Sonntage	28,0 m ³ /d 113,9 l/d·Person	25,9 °C

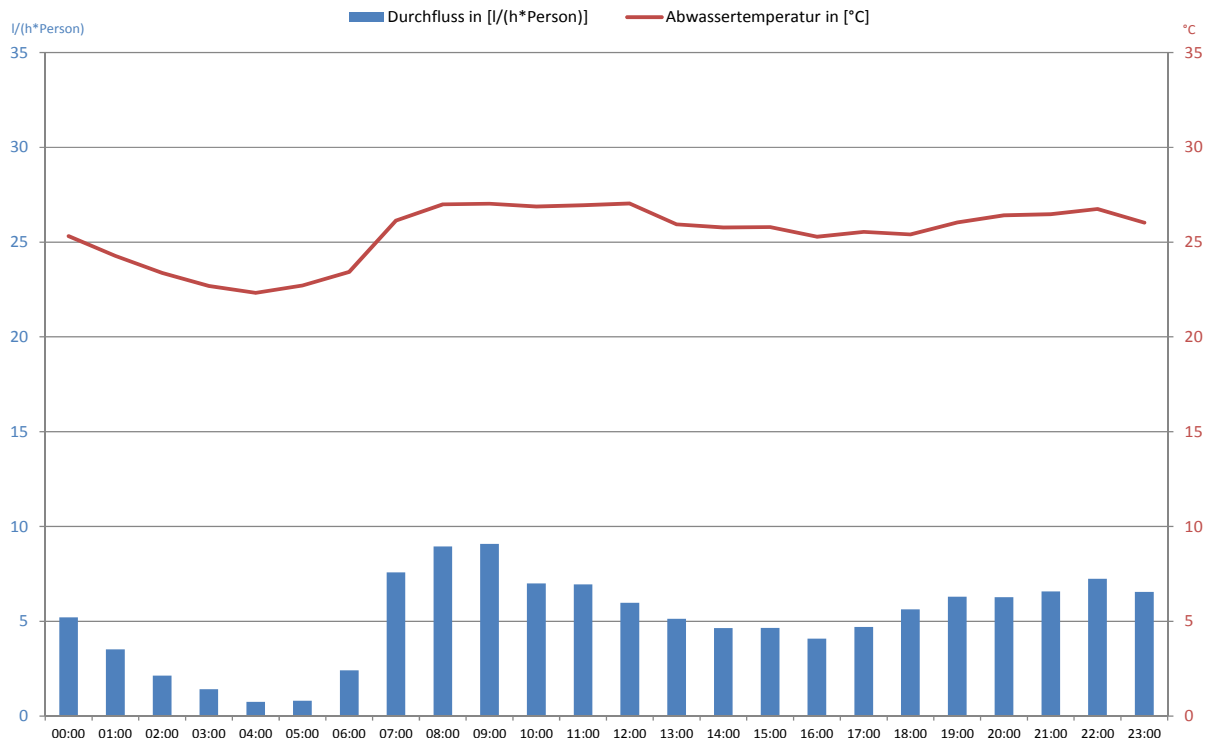
4.3.2 Otto Petersen Haus

Im Folgenden werden die Messergebnisse des Otto Petersen Haus vorgestellt. Der Messzeitraum umfasst 14 Tage im Februar und März 2011 sowie 33 Tage im Mai und Juni 2011. Die Auswertung einer vollständigen Jahresperiode erfolgt im Rahmen des Folgeprojektes „Dezentrale Abwasserwärmerückgewinnung zur Steigerung der Energieeffizienz von Gebäuden“.

Für den Gesamtmesszeitraum ergibt sich ein durchschnittlicher Trinkwasserverbrauch von 25,1 m³ pro Tag bzw. 120,2 Liter pro Tag und Person. Die durchschnittliche Abwas-

sertemperatur berechnet sich für den Gesamtzeitraum zu 26,1 °C. Der Trinkwasserverbrauch liegt um ca. 1,7 Liter pro Tag und Person höher als im Theodore von Kármán Haus. Die Abwassertemperatur weicht nur um -0,1 K von dem Wert des Theodore von Kármán Haus ab.

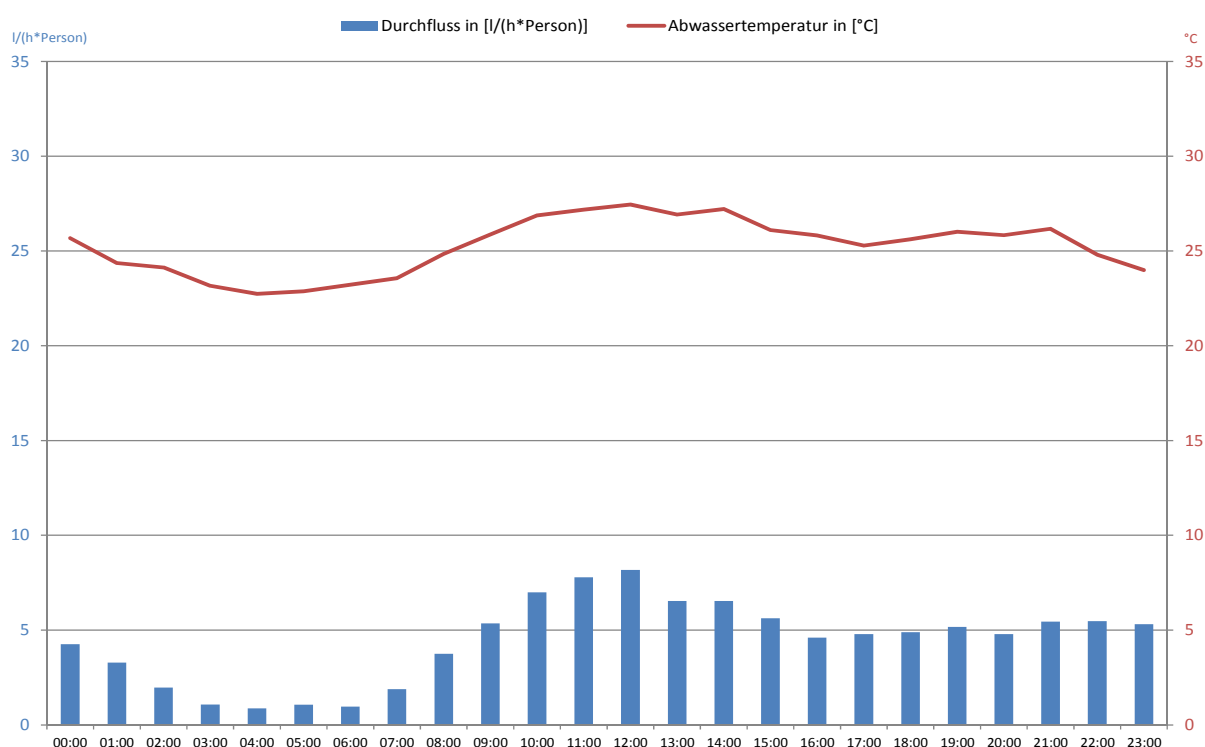
Montags bis freitags werden durchschnittliche Werte des Trinkwasserverbrauchs von 25,8 m³ pro Tag bzw. 123,6 Liter pro Tag und Person erreicht. Die durchschnittliche Abwassertemperatur beträgt 26,2 °C. Werktags sind, wie bereits beim Theodore von Kármán Haus beobachtet werden konnte, höhere Wasserverbräuche und Abwassertemperaturen als am Wochenende feststellbar. **Abbildung 15** zeigt die repräsentative Ganglinie von Trinkwasserzapfungen und Abwassertemperatur für einen Werktag. Die Ganglinie zeigt trotz abweichender Ausstattung einen nahezu identischen Verlauf wie das Theodore von Kármán Haus. Der morgendliche Verbrauch steigt ebenfalls ab 6:00 Uhr an, erreicht zwischen 8:00 und 10:00 Uhr mit 9,1 Liter pro Stunde und Person das Maximum und flacht über die Nachmittagsstunden wieder ab. Am Abend kommt es, wie beim Theodore von Kármán Haus, zu einer zweiten, etwas schwächeren Lastspitze mit 7,2 Liter pro Stunde und Person zwischen 22:00 und 23:00 Uhr. Das Abwassertemperaturprofil folgt dem Durchflussprofil, d.h. die Lastspitzen gehen mit einer Abwassertemperaturerhöhung einher. Während der morgendlichen Verbrauchsspitze wird ein Stundenwert der Abwassertemperatur von 27,0 °C erreicht, bei der abendlichen Verbrauchsspitze liegt eine Temperatur von 26,7 °C vor.



Ermittelt aus Messdaten von Februar bis Juni 2011. Der Durchfluss ist als Stundenmittelwert auf Basis von Messungen in 5-Sekunden-Intervallen in l/(h*Person) angegeben. Der Stundenmittelwert der mit dem Durchfluss gewichteten Abwassertemperatur basiert ebenfalls auf Messungen in 5-Sekunden-Intervallen.

Abbildung 15: Otto Petersen Haus, Ganglinie Werktag

An Samstagen sind analog zum Theodore von Kármán Haus geringere Trinkwasserverbräuche und niedrigere Abwassertemperaturen als an Wochentagen festzustellen. Der durchschnittliche Trinkwasserverbrauch beträgt 22,3 m³ pro Tag bzw. 106,6 Liter pro Tag und Person. Die durchschnittliche Abwassertemperatur ergibt sich zu 25,9 °C. In **Abbildung 16** ist die Ganglinie für einen Samstag dargestellt. Analog zum Samstag im Theodore von Kármán Haus beginnen die morgendlichen Trinkwasserzapfungen um 7:00 Uhr, d.h. eine Stunde später als werktags. Die Spitze wird zwischen 12:00 und 13:00 Uhr mit 8,2 Liter pro Stunde und Person erreicht. Ab 15:00 Uhr ist bis zum Abend eine gleichmäßige Trinkwarmwassernachfrage zwischen 4,6 und 5,6 Liter pro Stunde und Person zu beobachten. Die Abwassertemperatur erreicht mit 27,5 °C ihren Höchststand während der morgendlichen Verbrauchsspitze zwischen 12:00 und 13:00 Uhr.

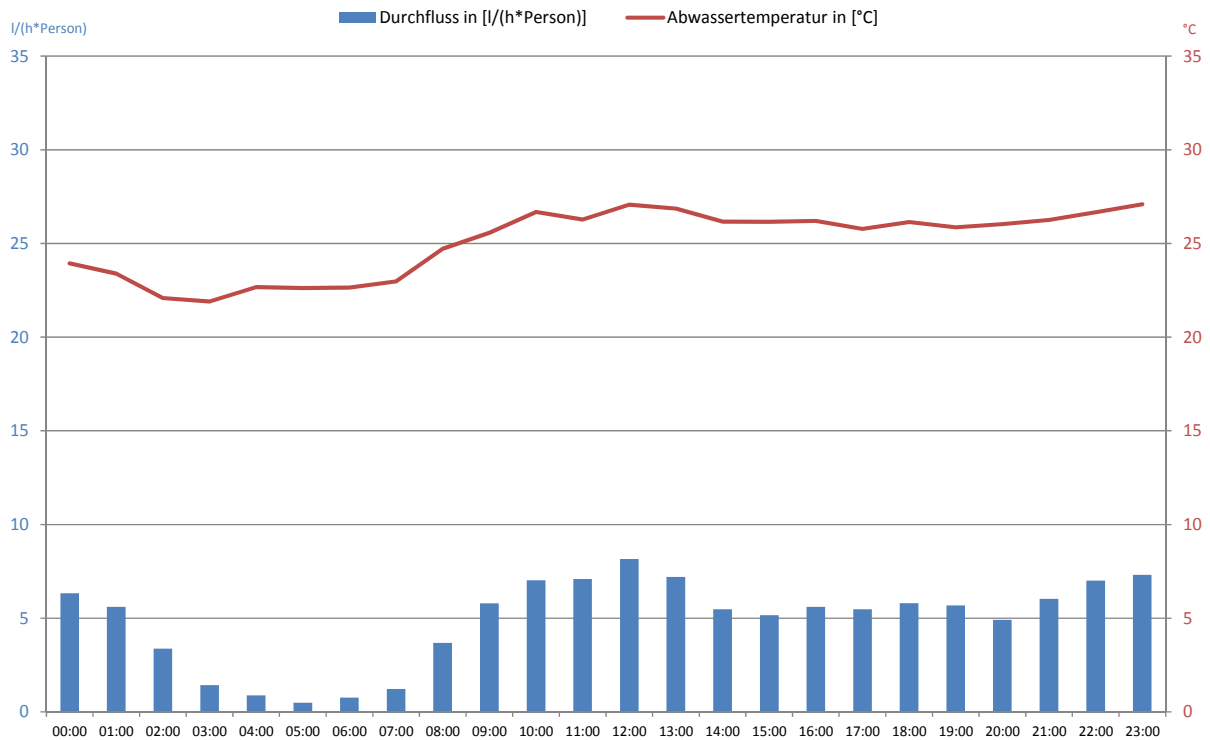


Ermittelt aus Messdaten von Februar bis Juni 2011. Der Durchfluss ist als Stundenmittelwert auf Basis von Messungen in 5-Sekunden-Intervallen in l/(h*Person) angegeben. Der Stundenmittelwert der mit dem Durchfluss gewichteten Abwassertemperatur basiert ebenfalls auf Messungen in 5-Sekunden-Intervallen.

Abbildung 16: Otto Petersen Haus, Ganglinie Samstag

An Sonntagen ist ein durchschnittlicher Trinkwasserverbrauch von 24,6 m³ pro Tag bzw. 117,6 Liter pro Tag und Person festzustellen. Die zugehörige durchschnittliche Abwassertemperatur beträgt 25,8 °C. In **Abbildung 17** ist die Ganglinie für einen Sonntag dargestellt. Ähnlich wie im Theodore von Kármán Haus beginnt der morgendliche Anstieg des Trinkwasserverbrauchs zwei Stunden später als an Werktagen ab 8:00 Uhr und erreicht das Maximum von 8,2 Liter pro Stunde und Person zwischen 12:00 und 13:00 Uhr. Im Gegensatz zum Theodore von Kármán Haus ist in den Nachmittagsstunden zwischen 14:00 und 21:00 Uhr ein gleichmäßiger Durchfluss von 4,9 bis 5,8 Liter pro Stunde und Person zu erkennen. In den Abendstunden steigt der Trinkwasserverbrauch wieder

an. Die Abwassertemperaturen erreichen das Maximum von 27,1 °C während der Morgenspitze.



Ermittelt aus Messdaten von Februar bis Juni 2011. Der Durchfluss ist als Stundenmittelwert auf Basis von Messungen in 5-Sekunden-Intervallen in $l/(h \cdot Person)$ angegeben. Der Stundenmittelwert der mit dem Durchfluss gewichteten Abwassertemperatur basiert ebenfalls auf Messungen in 5-Sekunden-Intervallen.

Abbildung 17: Otto Petersen Haus, Ganglinie Sonntag

Abbildung 18 zeigt die Konfidenzintervalle für den Durchfluss eines Werktages auf dem 5 % Niveau. Ähnlich wie beim Theodore von Kármán Haus ist zu erkennen, dass bei Zeitspannen mit hohem Wasserverbrauch größere Konfidenzintervalle und in Zeiträumen mit geringem Wasserverbrauch engere Konfidenzintervalle vorliegen. Die Charakteristik der Ganglinie bleibt unter Berücksichtigung der Vertrauensintervalle erhalten.

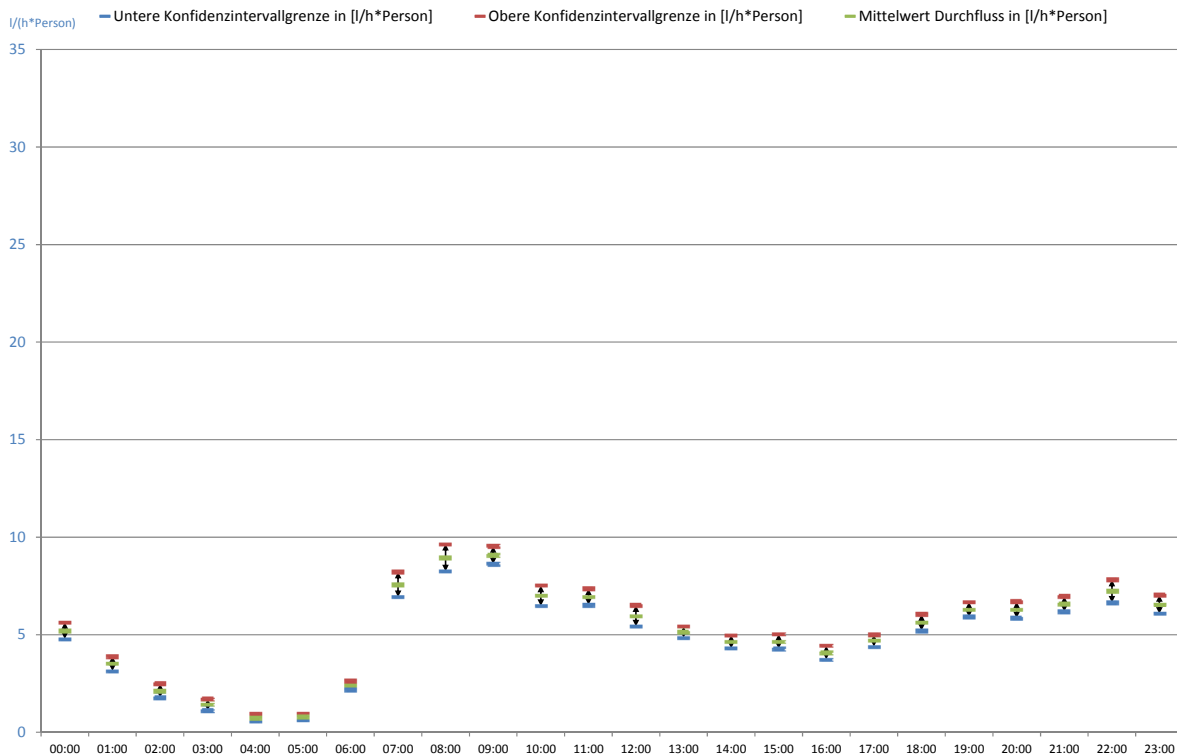


Abbildung 18: Otto Petersen Haus, Konfidenzintervalle Werktag

Da sich bei der Berechnung der Konfidenzintervalle für die Abwassertemperatur wie beim Theodore von Kármán Haus große Abweichungen ergaben, wurde auch dieser Datensatz auf jahreszeitliche Schwankungen als Folge der unterschiedlichen Trinkkaltwassertemperaturen untersucht. In **Abbildung 19** sind die Messwerte aus der 1. Periode (Februar und März) und der 2. Periode (Mai und Juni) gegenübergestellt. Es ist wieder festzustellen, dass die durchschnittlichen stündlichen Abwassertemperaturen der 2. Periode immer über den Werten der 1. Periode liegen. Es ergibt sich ein durchschnittlicher Temperaturunterschied zwischen den beiden Perioden von 2,5 K. Dieser Wert liegt nahe an dem durchschnittlichen Temperaturunterschied der beiden betrachteten Perioden im Theodore von Kármán Haus (2,3 K). Folglich ist auch hier zu vermuten, dass die Abwassertemperatur mit der Trinkkaltwassertemperatur korreliert. Im Rahmen des Folgeprojektes wird eine gesamte Jahresperiode von Durchfluss, Abwassertemperatur und Trinkkaltwassertemperatur vermessen und die jeweiligen Einflüsse detailliert untersucht.

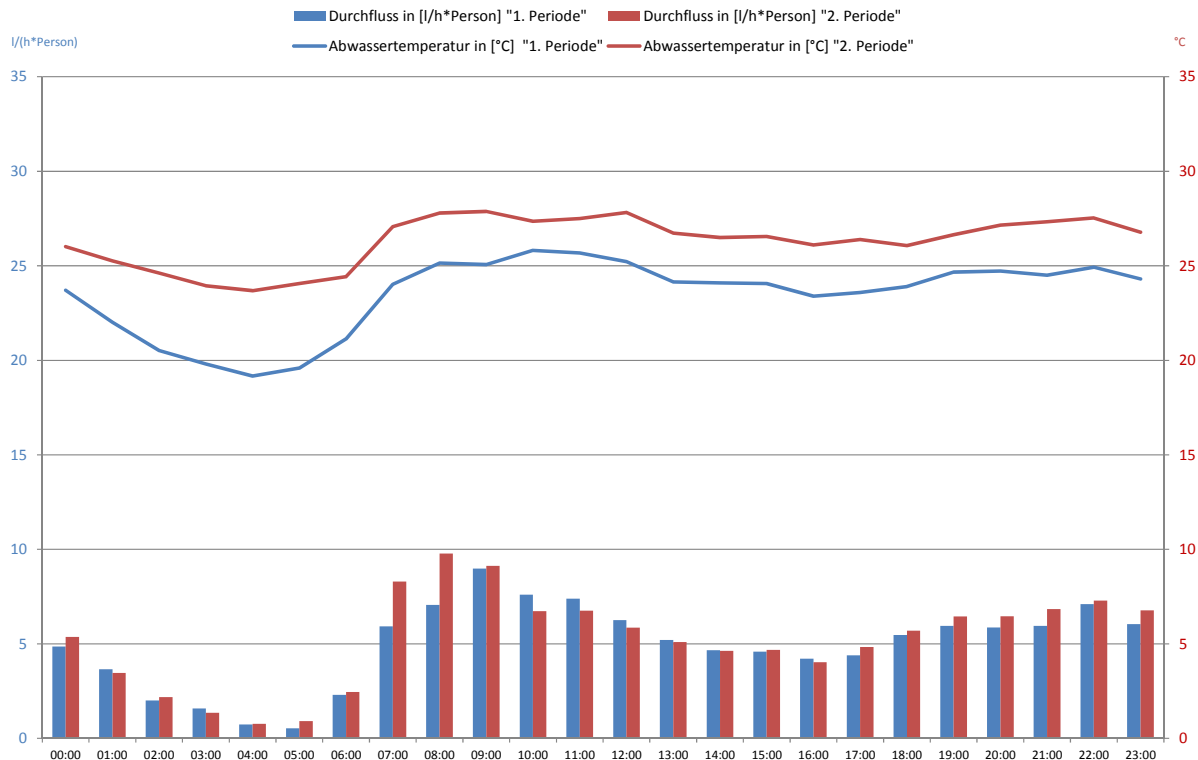


Abbildung 19: Otto Petersen Haus, Periodenvergleich Werktag

In **Tabelle 2** sind die Tagesdurchschnittswerte von Durchfluss und Abwassertemperatur für den Gesamtmesszeitraum, für Werktage, für Samstage und für Sonntage zusammengefasst.

Tabelle 2: Otto Petersen Haus, Tagesdurchschnittswerte Monitoring

Zeitraum	Durchfluss	Abwassertemperatur
Gesamtmesszeitraum	25,1 m^3/d 120,2 $\text{l/d} \cdot \text{Person}$	26,1 $^{\circ}\text{C}$
Werktage	25,8 m^3/d 123,6 $\text{l/d} \cdot \text{Person}$	26,2 $^{\circ}\text{C}$
Samstage	22,3 m^3/d 106,6 $\text{l/d} \cdot \text{Person}$	25,9 $^{\circ}\text{C}$
Sonntage	24,6 m^3/d 117,6 $\text{l/d} \cdot \text{Person}$	25,8 $^{\circ}\text{C}$

4.3.3 Business Hotel Aachen City

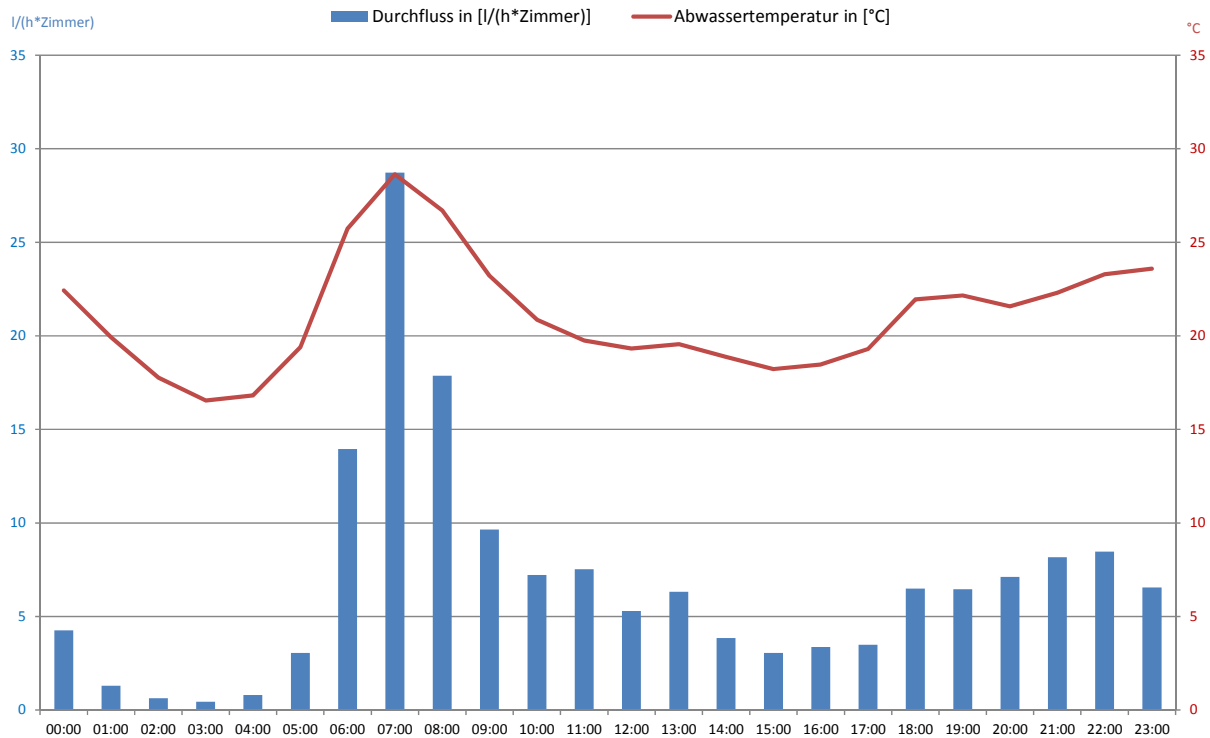
In diesem Kapitel werden die Messergebnisse des Business Hotel Aachen City beschrieben. Der Messzeitraum umfasst 27 Tage im Januar und Februar 2011 und 13 Tage im Mai und Juni 2011. Die Auswertung einer vollständigen Jahresperiode erfolgt im Rahmen des Folgeprojektes „Dezentrale Abwasserwärmerückgewinnung zur Steigerung der Energieeffizienz von Gebäuden“.

Da keine genauen Belegungszahlen für das Hotel vorliegen wird als Bezugsgröße für die Tagesganglinien die Zimmeranzahl verwendet. Für den Messzeitraum ist von einer hohen Auslastung während der Wochentage Dienstag bis Freitag auszugehen.

Für den Gesamtmesszeitraum ergeben sich ein durchschnittlicher Trinkwasserverbrauch von 23,9 m³ pro Tag bzw. 155,5 Liter pro Tag und Zimmer und eine durchschnittliche Abwassertemperatur von 23,6 °C. Die Abwassertemperatur ist ca. 2,5 K niedriger als in den Studentenwohnheimen. Dies kann neben der anderen Nutzungsart auch mit der Lage der Abwassertemperaturmessstelle zusammenhängen. Die Temperaturmessstelle befindet sich in der Tiefgarage des Hotels. Das letzte Teilstück der abgehängten Abwasserleitung läuft mit einer Länge von 30 m durch die Tiefgarage, woraus eine Abkühlung des Abwassers resultieren kann.

Aufgrund der Charakteristik der Ganglinien der Einzeltage werden für das Hotelgebäude die Tage Dienstag bis Freitag zusammengefasst. Montage, Samstage und Sonntage werden getrennt betrachtet.

Dienstags bis freitags ist ein durchschnittlicher Trinkwasserverbrauch von 25,3 m³ pro Tag bzw. 164,1 Liter pro Tag und Zimmer feststellbar. Die durchschnittliche Abwassertemperatur beträgt 23,7 °C. In **Abbildung 20** ist der repräsentative Tagesgang von Durchfluss und Abwassertemperatur dargestellt. Es ist zu erkennen, dass im Zeitraum von 6:00 bis 10:00 Uhr eine im Vergleich zum restlichen Tag enorme morgendliche Nachfragespitze stattfindet, welche zwischen 7:00 und 8:00 Uhr mit 28,7 Liter pro Stunde und Zimmer ihr Maximum erreicht. In den restlichen Tagesstunden wird wesentlich weniger Trinkwasser nachgefragt bis in den Abendstunden zwischen 22:00 und 23:00 Uhr mit 8,5 Liter pro Stunde und Zimmer 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. Während der morgendlichen Verbrauchsspitze wird das Maximum von 28,6 °C erreicht. Zur schwächeren Abendspitze ist eine durchschnittliche stündliche Abwassertemperatur von 23,6 °C zu erkennen. Während der Nachmittagsstunden und der Nachtstunden fällt die Abwassertemperatur auf 18,2 bzw. 16,5 °C.

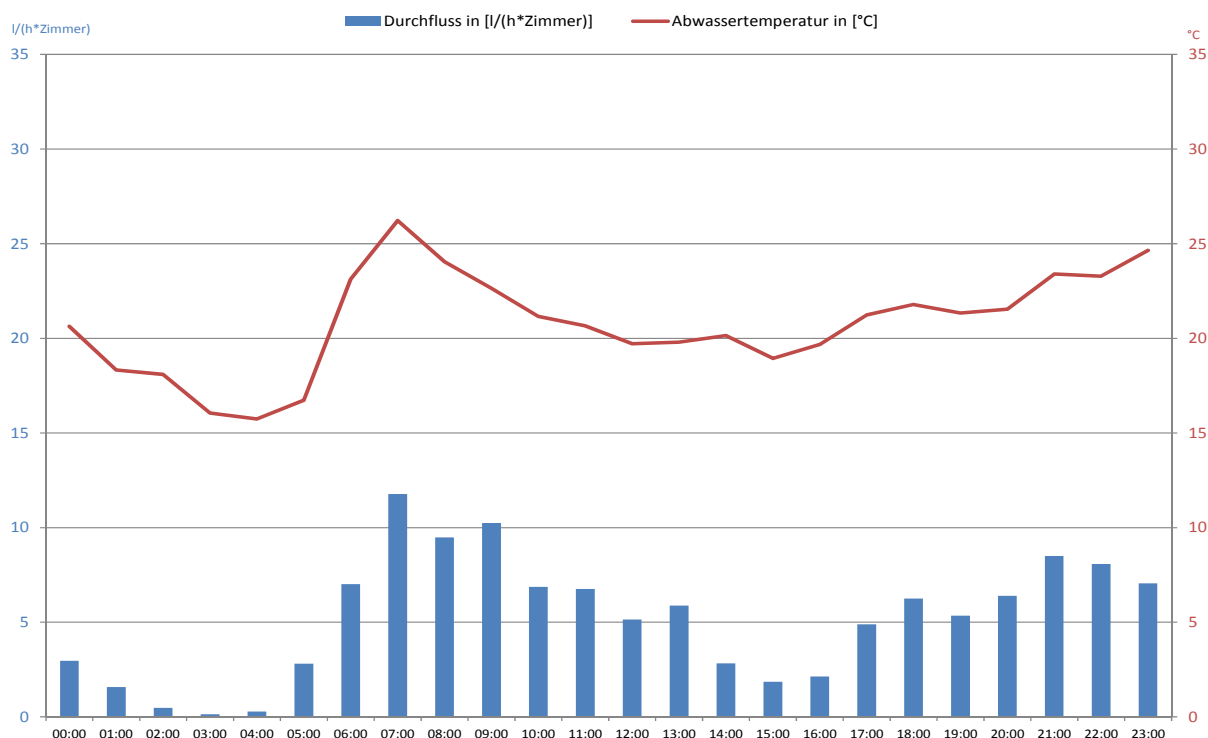


Ermittelt aus Messdaten von Januar bis Juni 2011. Der Durchfluss ist als Stundenmittelwert auf Basis von Messungen in 5-Sekunden-Intervallen in $l/(h \cdot Person)$ angegeben. Der Stundenmittelwert der mit dem Durchfluss gewichteten Abwassertemperatur basiert ebenfalls auf Messungen in 5-Sekunden-Intervallen.

Abbildung 20: Business Hotel Aachen City, Ganglinie Dienstag – Freitag

An Montagen ist ein durchschnittlicher Trinkwasserverbrauch von $19,2 \text{ m}^3$ pro Tag bzw. 124,7 Liter pro Tag und Zimmer und eine durchschnittliche Abwassertemperatur von $22,7 \text{ }^\circ\text{C}$ festzustellen. **Abbildung 21** zeigt die repräsentative Ganglinie des Montags. Die Ganglinie weist im Gegensatz zu den Werktagen Dienstag bis Freitag eine andere Charakteristik auf. Die morgendliche Verbrauchsspitze fällt mit einem Trinkwasserverbrauch zwischen 6:00 und 10:00 Uhr von 11,8 Liter pro Stunde und Zimmer im Vergleich zu 28,7 Liter an den anderen Werktagen wesentlich geringer aus. In den Nachmittags-, Abend- und Nachtstunden verläuft das Profil im Vergleich zu den anderen Werktagen sehr ähnlich. Das Temperaturprofil weist ebenfalls eine hohe Ähnlichkeit zu den anderen Werktagen auf, jedoch unterschreitet das Maximum zwischen 7:00 und 8:00 Uhr mit $26,2 \text{ }^\circ\text{C}$ das Profil der anderen Werktage um $2,4 \text{ K}$.

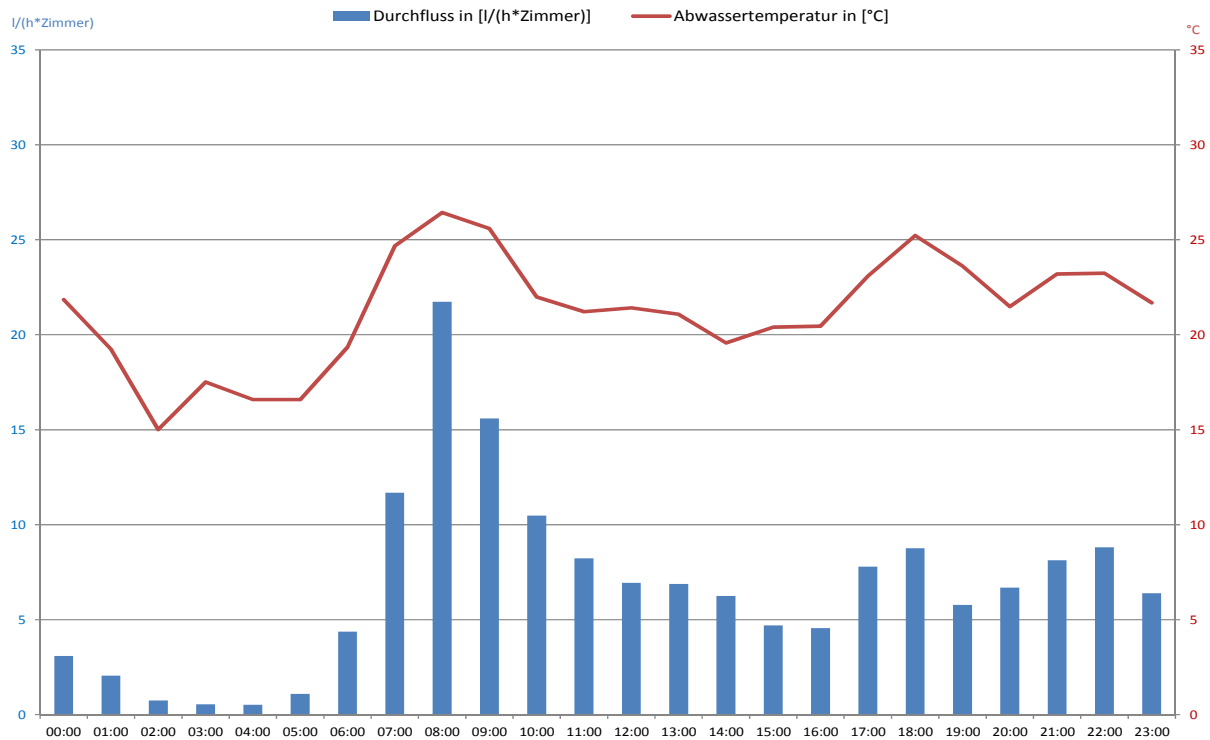
Die schwächere Morgenspitze an Montagen lässt sich mit der Hotelnutzung erklären. Wochenendurlauber reisen vorwiegend am Sonntag ab, Geschäftsleute als größte Kundengruppe der Wochentage reisen erst im Laufe des Montags an. Folglich ist zu erwarten, dass sich am Montagmorgen im Vergleich zu den anderen Wochentagen weniger Gäste im Hotel aufhalten.



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

Abbildung 21: Business Hotel Aachen City, Ganglinie Montag

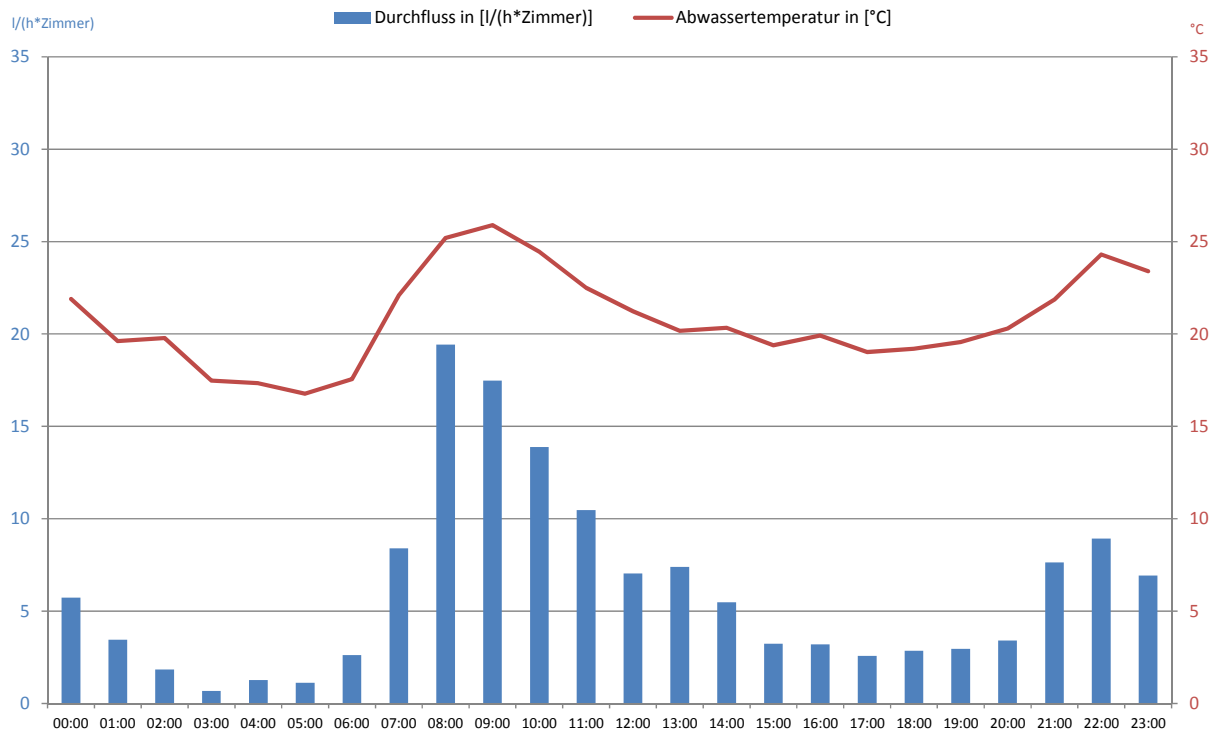
An Samstagen werden durchschnittlich 24,9 m³ Trinkwasser pro Tag bzw. 161,8 Liter pro Tag und Zimmer nachgefragt. Die durchschnittliche Abwassertemperatur ist mit 23,8 °C ähnlich hoch wie der Wert der Werktage Dienstag bis Freitag. In **Abbildung 22** ist die repräsentative Ganglinie von Durchfluss und Abwassertemperatur dargestellt. Die morgendliche Trinkwasserverbrauchsspitze liegt in der Zeitspanne von 7:00 bis 11:00 Uhr, d.h. eine Stunde verzögert als an Werktagen. Die Spitze wird zwischen 8:00 und 9:00 Uhr mit 21,7 Liter pro Stunde und Zimmer erreicht. In den Nachmittagstunden ist zwischen 17:00 und 18:00 Uhr eine weitere Nachfragespitze zu beobachten. In den Abendstunden zwischen 22:00 und 23:00 Uhr ist eine dritte Spitze zu erkennen. Das Profil der Abwassertemperatur folgt diesen Spitzen, d.h. zu den Zeitpunkten der Spitzennachfrage ist gleichzeitig eine Temperaturspitze zu erkennen. Das Maximum wird zwischen 8:00 und 9:00 Uhr mit 26,4 °C erreicht.



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

Abbildung 22: Business Hotel Aachen City, Ganglinie Samstag

An Sonntagen ist eine durchschnittliche Trinkwassernachfrage von 22,8 m³ pro Tag bzw. 148,0 Liter pro Tag und Zimmer und eine durchschnittliche Abwassertemperatur von 23,4 °C feststellbar. **Abbildung 23** zeigt die Ganglinie von Trinkwasserverbrauch und Abwassertemperatur. Es ist zu erkennen, dass die morgendliche Verbrauchsspitze zwischen 8:00 und 9:00 Uhr mit 19,4 Liter pro Stunde und Zimmer erreicht wird. In den Nachmittagstunden wird wenig Trinkwasser gezapft. In den Abendstunden ist zwischen 22:00 und 23:00 Uhr eine zweite Spitze zu erkennen. Das Abwassertemperaturprofil folgt diesen beiden Spitzen. Der Höchstwert wird zwischen 9:00 und 10:00 Uhr mit 25,9 °C erreicht.



Ermittelt aus Messdaten von Januar bis Juni 2011. Der Durchfluss ist als Stundenmittelwert auf Basis von Messungen in 5-Sekunden-Intervallen in $l/(h \cdot \text{Person})$ angegeben. Der Stundenmittelwert der mit dem Durchfluss gewichteten Abwassertemperatur basiert ebenfalls auf Messungen in 5-Sekunden-Intervallen.

Abbildung 23: Business Hotel Aachen City, Ganglinie Sonntag

Für dieses Objekt werden keine Konfidenzintervalle des Trinkwasserverbrauchs gebildet, da keine gleichmäßige Auslastung des Hotels vorliegt. Sinnvolle Konfidenzintervalle können nur erstellt werden, wenn mit dem tatsächlichen Belegungsgrad eine Vorskalierung vorgenommen werden kann.

Der Datensatz wurde ebenfalls auf die Auswirkungen der jahreszeitlichen Schwankungen der Trinkkaltwassertemperatur auf die Abwassertemperaturen untersucht. **Abbildung 24** zeigt die Ganglinien von Trinkwasserverbrauch und Abwassertemperatur getrennt für die 1. Periode im Januar und Februar und für die 2. Periode im Mai und Juni. Es fällt auf, dass die durchschnittliche Abwassertemperatur der 2. Periode, wie bereits bei den Studentenwohnheimen festgestellt, immer über den Temperaturen der 1. Periode liegt. Im Tagesdurchschnitt beträgt der Unterschied 3,5 K. Auch hier ist zu vermuten, dass die Abwassertemperatur mit der Trinkkaltwassertemperatur korreliert. Dies wird im Rahmen der Projektfortsetzung weiter untersucht.

Das Hotel verfügt über ein Dampfbad, welches in den Wintermonaten von 16:00 bis 22:00 Uhr geöffnet ist. In den Sommermonaten wird das Dampfbad nur auf Nachfrage eingeschaltet. Der Wasserverbrauch des Dampfbads beträgt 10 Liter pro Stunde. Aufgrund dieser geringen Menge wird die Nutzung des Dampfbads in der Auswertung vernachlässigt. Das Hotel verfügt über keine weiteren Wellness-Einrichtungen.

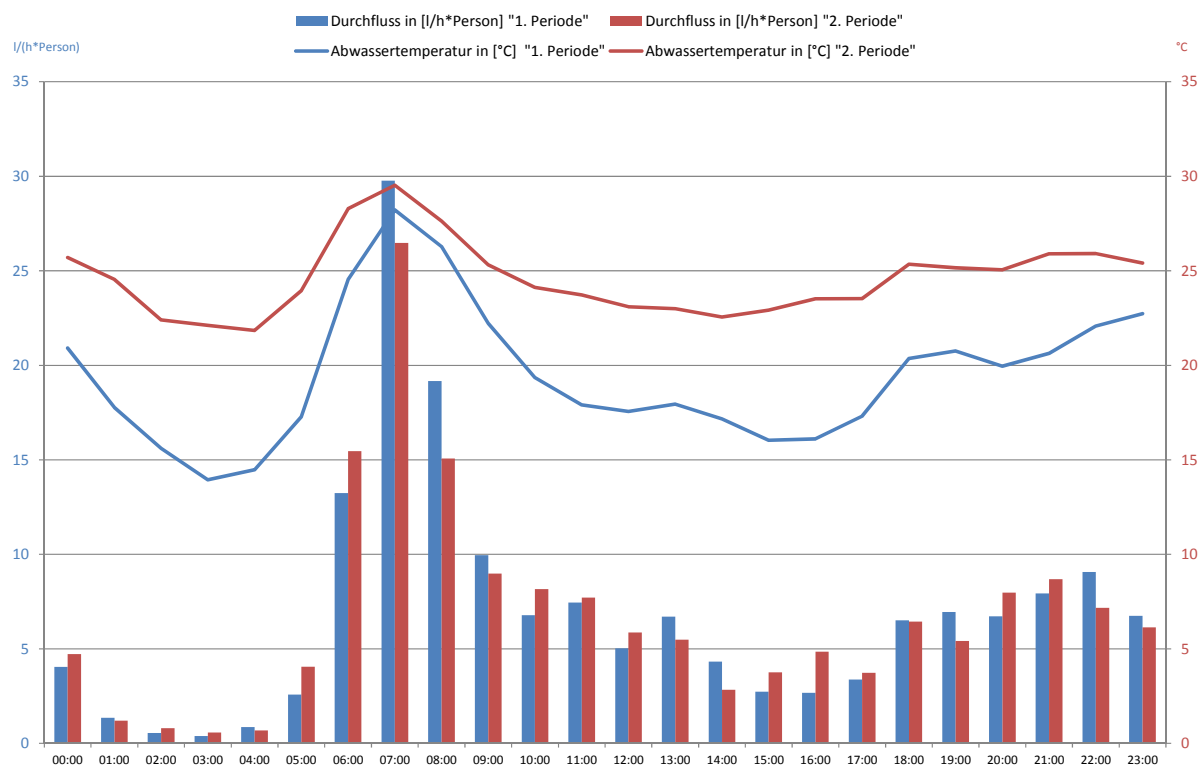


Abbildung 24: Business Hotel Aachen City, Periodenvergleich Dienstag – Freitag

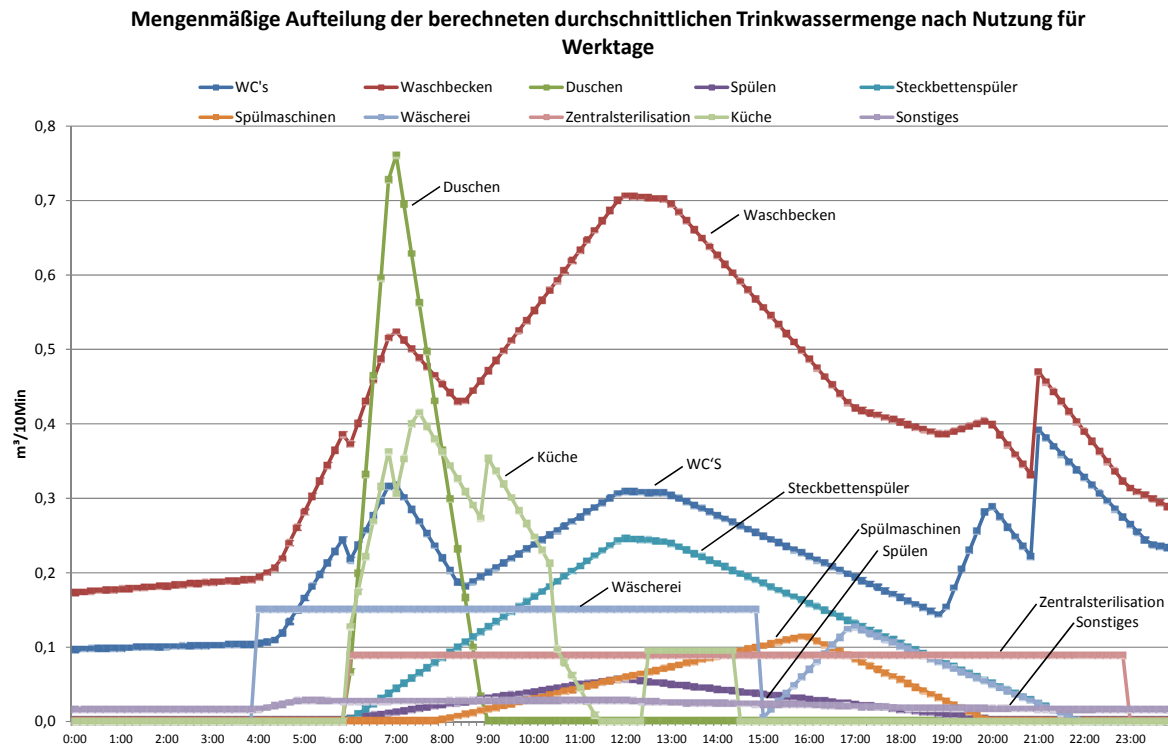
Tabelle 3 enthält die Tagesdurchschnittswerte von Trinkwasserverbrauch und Abwassertemperatur für den Gesamtmesszeitraum, für Montage, für Dienstage bis Freitage, für Samstage und für Sonntage.

Tabelle 3: Business Hotel Aachen City, Tagesdurchschnittswerte Monitoring

<i>Zeitraum</i>	<i>Durchfluss</i>	<i>Abwassertemperatur</i>
Gesamtmesszeitraum	23,9 m ³ /d 155,58 l/(d-Zimmer)	23,6 °C
Montage	19,2 m ³ /d 124,7 l/(d-Zimmer)	22,7 °C
Dienstage bis Freitage	25,3 m ³ /d 164,1 l/(d-Zimmer)	23,7 °C
Samstage	24,9 m ³ /d 161,8 l/(d-Zimmer)	23,8 °C
Sonntage	22,8 m ³ /d 148,0 l/(d-Zimmer)	23,4 °C

4.3.4 Luisenhospital Aachen

Bei der Messtechnikausrüstung des Luisenhospitals ergibt sich die Besonderheit, dass das Abwasser der Liegenschaft über vier Abwasserteilstränge in die Straßenkanalisation eingeleitet wird, jedoch nur eine Wasseruhr zur Messung der gesamten Trinkwassermenge zur Verfügung steht. Daher ist eine rechnerische Aufteilung der gemessenen Trinkkaltwassermenge auf diese vier Abwasserteilstränge notwendig. Hierzu wurden zunächst alle Entwässerungsgegenstände des Krankenhauses aufgenommen und den vier Abwassersträngen zugeordnet. Insgesamt verfügt das Gebäude über 312 WC's, 546 Waschbecken, 160 Duschen, 102 Spülen, 43 Steckbettenspüler, 9 Ringspülen, 33 Spülmaschinen, 2 Schuhspülmaschinen, 3 Sterilisationsreinigungsautomaten, 4 Waschmaschinen, ein Bewegungsbad und eine Großküche mit einer Spülstraße, einer Gläserspülmaschine und einer Topfspüle. Zusätzlich wurde für jeden Entwässerungsgegenstand das zugehörige Nutzungsprofil aufgenommen, d.h. jedem Verbraucher werden getrennt für die einzelnen Wochentage eine Nutzungszeit, eine Nutzungsintensität, eine Wassermenge und eine Wassertemperatur zugeordnet. Zur Aufnahme des Nutzungsprofils wurde eine Befragung des technischen Personals, des Krankenpflegepersonals, des Küchen- und Spülpersonals, der Hauswirtschaftsleitung und der Leitung der Zentralsterilisation durchgeführt. Zusätzlich wurden die technischen Daten der Sonderverbraucher wie Steckbettenspüler, Spülstraßen oder Sterilisationsreinigungsautomaten ermittelt. Mit Hilfe der gewonnenen Daten kann die Trinkwassermenge auf die verschiedenen Nutzungen aufgeteilt werden. **Abbildung 25** zeigt die mengenmäßige Aufteilung der berechneten durchschnittlichen Trinkwassermenge auf die verschiedenen Nutzungen in m³ pro Zehnminuten beispielhaft für einen Werktag.



Der Durchfluss ist im Diagramm als Zehnminutenmittelwert mit der Einheit m^3 pro Zehnminuten angegeben. Aus Gründen der Übersichtlichkeit sind die Zehnminutenwerte als Liniendiagramm mit Markierung der Einzelwerte dargestellt.

Abbildung 25: Luisenhospital, Aufteilung der Trinkwassermenge nach Nutzung (werktags)

In **Abbildung 26** ist die aus diesem Ansatz resultierende prozentuale Aufteilung der Trinkwassermenge auf die verschiedenen Nutzungen dargestellt. Hierbei ist zu erkennen, dass an Werktagen mit 39 % der gesamten Trinkwassermenge die Handwaschbecken den größten Verbraucher darstellen. An zweiter Stelle stehen mit 21 % die WC-Spülungen, gefolgt von den Steckbettenspüler (8%), der Wäscherei (8%), der Küche (6%), der Zentralsterilisation (6%) und den Duschen (5%).

Prozentuale Aufteilung der berechneten Trinkkaltwassermenge nach Nutzung für Werktag

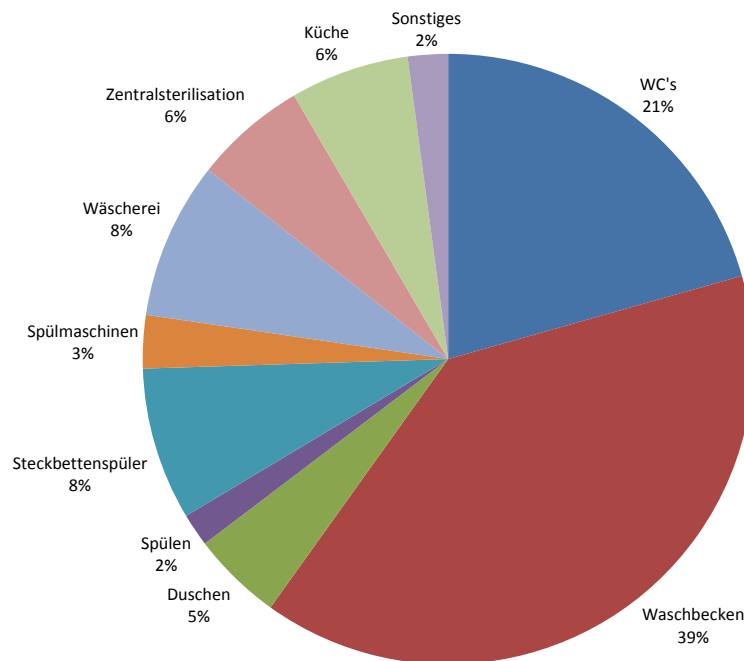
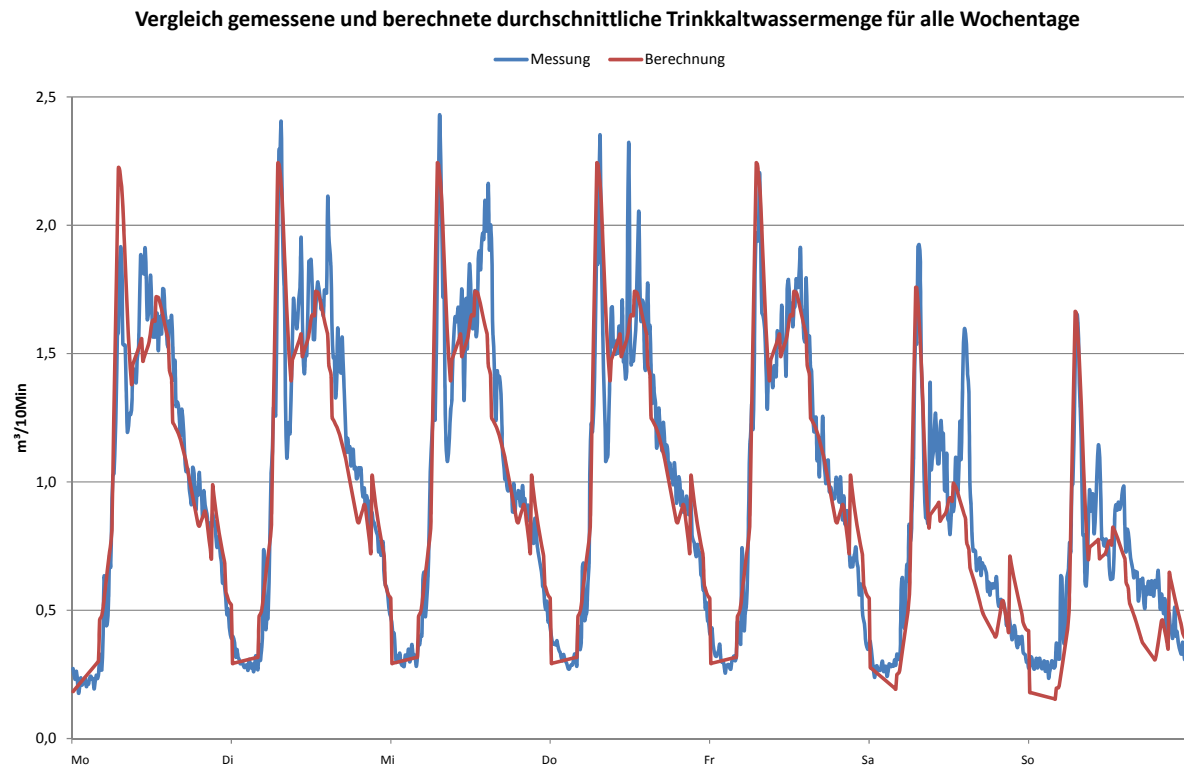


Abbildung 26: Luisenhospital, Prozentuale Aufteilung der Trinkkaltwassermenge nach Nutzung (werktags)

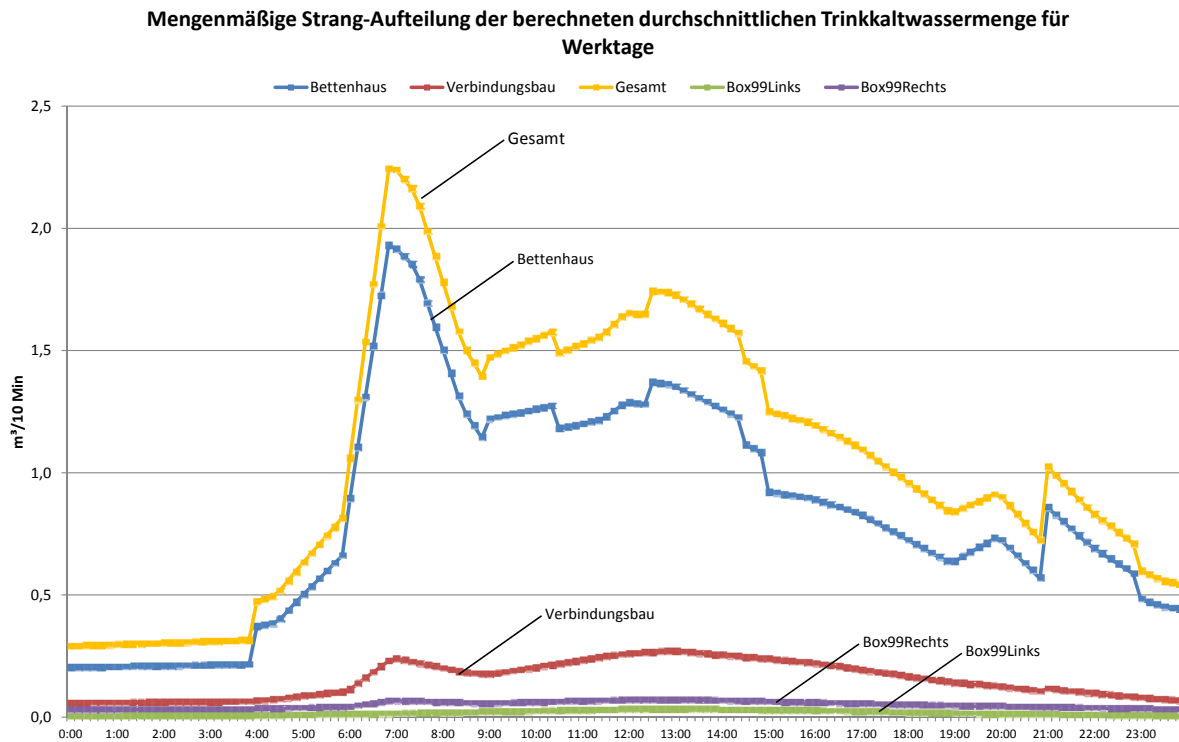
Aus den Nutzungsprofilen lassen sich nun Durchflussprofile für den Trinkwasserverbrauch der einzelnen Wochentage berechnen. **Abbildung 27** zeigt einen Vergleich der auf Grundlage der erstellten Nutzungsprofile berechneten Durchflussprofile mit den gemessenen Trinkwasserdurchflussprofilen auf Basis von Zehnminutenmittelwerten für eine Woche. Es zeigt sich eine gute Übereinstimmung der beiden Profile, wobei die Gesamtmengenbilanz gleich ist.



Der Durchfluss ist im Diagramm als Zehnminutenmittelwert mit der Einheit m^3 pro Zehnminuten angegeben. Aus Gründen der Übersichtlichkeit sind die Zehnminutenwerte als Liniendiagramm dargestellt.

Abbildung 27: Luisenhospital, Vergleich gemessene und berechnete Trinkkaltwassermenge

Da bekannt ist, wohin die einzelnen Verbraucher entwässern, kann auf Basis der Nutzungsprofile das gemessene Trinkwasser auf die vier Abwasserstränge aufgeteilt werden. In **Abbildung 28** ist die mengenmäßige Aufteilung der berechneten durchschnittlichen Trinkwassermenge auf die vier Stränge an einem Werktag dargestellt. Es ist zu erkennen, dass der größte Teil des Abwassers durch den Hauptabwasserstrang im Bettenhaus (durchschnittlich 77,6 %) abgeführt wird. An zweiter Stelle steht der Abwasserstrang des Verbindungsbaus mit durchschnittlich 15,1 %. Die beiden Abwasserstränge im Gebäudeteil „Box99“ führen nur 5,5 % (Box99Rechts) bzw. 1,8 % (Box99Links) des anfallenden Abwassers ab.



Der Durchfluss ist im Diagramm als Zehnminutenmittelwert mit der Einheit m^3 pro Zehnminuten angegeben. Aus Gründen der Übersichtlichkeit sind die Zehnminutenwerte als Liniendiagramm mit Markierung der Einzelwerte dargestellt.

Abbildung 28: Luisenhospital, Aufteilung der Trinkkaltwassermenge nach Strang (werktags)

Auf Grundlage der überlagerten Nutzungsprofile wird für jeden Fünfsekundenwert des Durchflusses ein Verteilungsschlüssel auf die vier Abwasserteilstränge berechnet. **Abbildung 29** zeigt die aus diesem Verteilungsschlüssel resultierende prozentuale Aufteilung der berechneten durchschnittlichen Trinkkaltwassermenge auf die vier Stränge beispielhaft für einen Werktag.

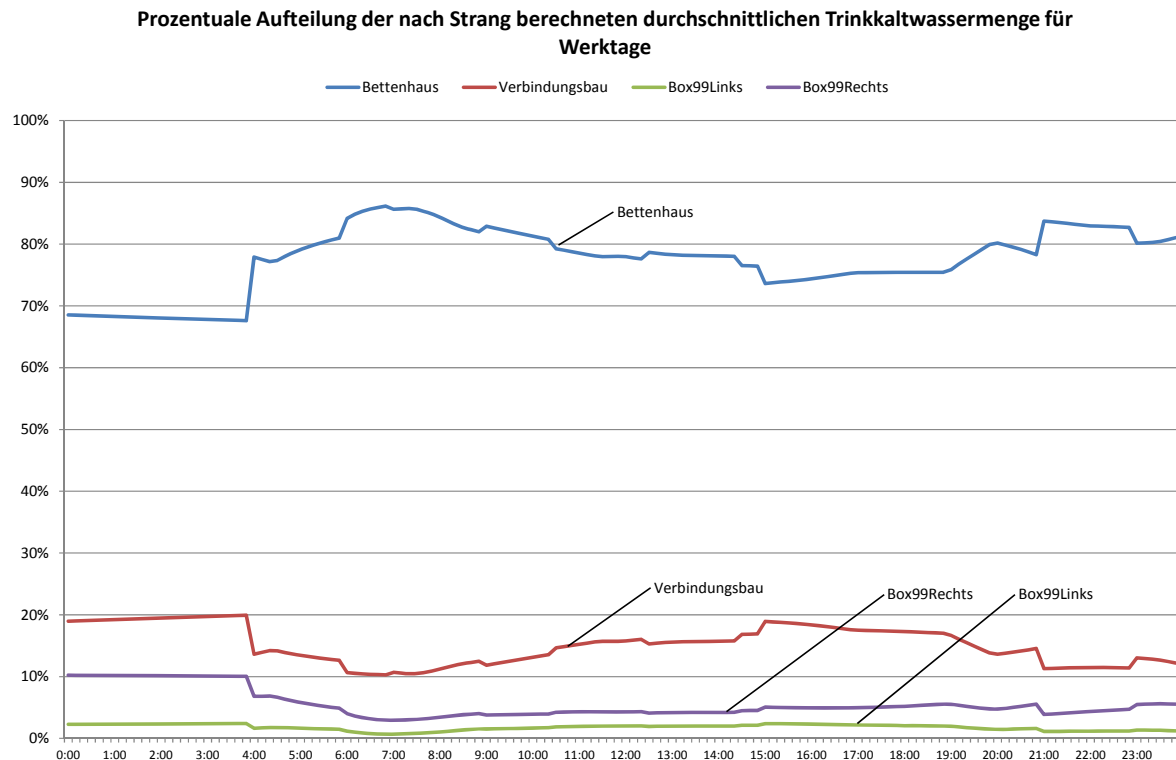


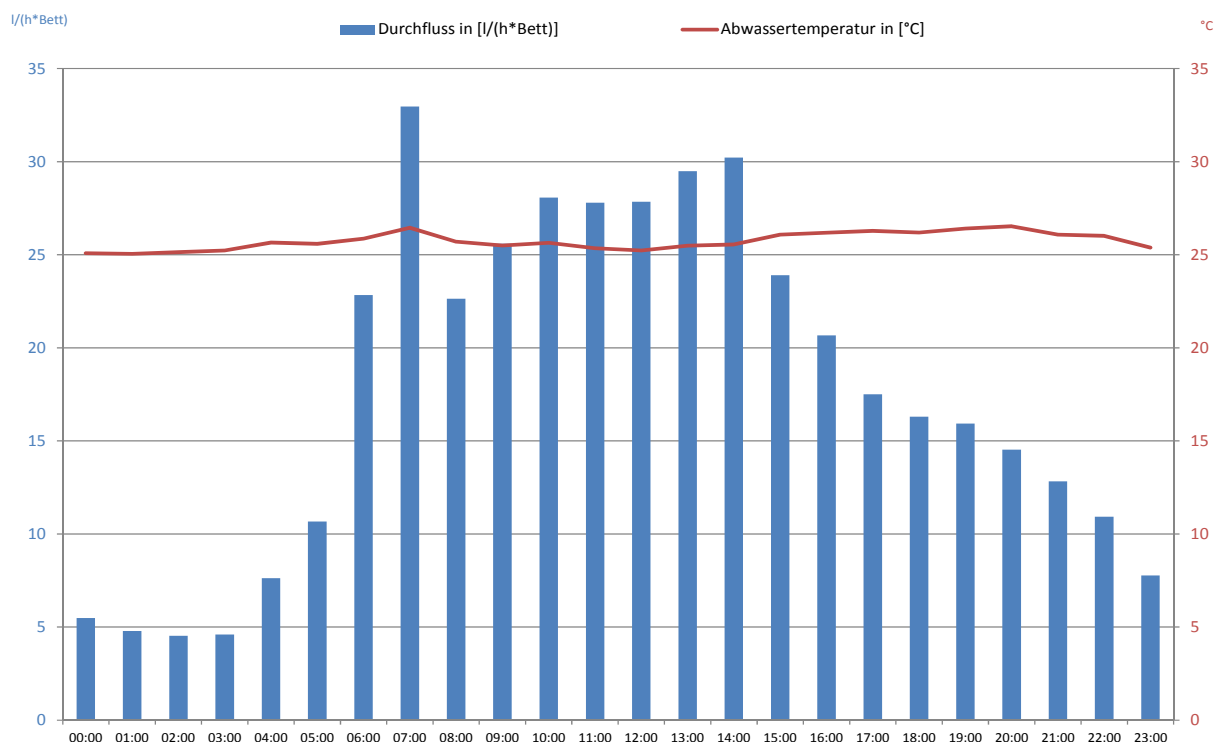
Abbildung 29: Luisenhospital, Prozentuale Aufteilung der Trinkkaltwassermenge nach Strang (werktags)

Auf Basis dieser Gewichtung können die Ganglinien von Durchfluss und Abwassertemperatur für Werktage, Samstage und Sonntage erstellt werden. Die Ganglinien zeigen die Gesamtdurchflussmenge und die Abwassertemperatur auf Basis von Stundenwerten. Die Abwassertemperatur gibt die mittlere Temperatur aller vier Abwasserteilstränge an, d.h. die gemessenen Abwassertemperaturen werden mit dem in jedem Abwasserteilstrang anfallenden Durchfluss gewichtet.

Der Messzeitraum umfasst 70 Tage vom 23.05.2011 bis zum 31.07.2011. Die Auswertung einer vollständigen Jahresperiode erfolgt im Rahmen des Folgeprojektes „Dezentrale Abwasserwärmerückgewinnung zur Steigerung der Energieeffizienz von Gebäuden“. Für den Gesamtmeszeitraum ergibt sich ein durchschnittlicher Trinkwasserverbrauch von 129,2 m³ pro Tag bzw. 371,2 Liter pro Tag und Bett. Die durchschnittliche Abwassertemperatur berechnet sich für den Gesamtmeszeitraum zu 25,8°C.

Während der Werktage Montag bis Freitag ist ein durchschnittlicher Trinkwasserverbrauch von 148,1 m³ pro Tag bzw. 425,6 Liter pro Tag und Bett feststellbar. Die dazugehörige Abwassertemperatur beträgt 25,8 °C. D.h. werktags stellen sich höhere Wasserverbräuche ein als an Wochenenden. In **Abbildung 30** ist der repräsentative Tagesgang von Trinkwasserdurchfluss und Abwassertemperatur für einen Werktag dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die morgendlichen Trinkwasserzapfungen bereits ab 4:00 Uhr beginnen. Das Maximum wird zwischen 7:00 und 8:00 Uhr mit 33,0 Liter pro Stunde und Bett erreicht. Danach bleibt der Trinkwasserdurchfluss bis 15:00 Uhr auf hohem Niveau, wobei zwischen 14:00 und 15:00 Uhr mit 30,2 Liter pro Stunde und Bett eine zweite

Spitze erreicht wird. Ab 15:00 Uhr findet ein stetiges Absinken des Trinkwasserverbrauchs bis in die Nacht statt. Das Minimum liegt zwischen 2:00 und 3:00 Uhr bei 4,5 Liter pro Stunde und Bett. Die Abwassertemperatur ist ganztägig auf einem hohen Niveau von über 25 °C. Während der morgendlichen Trinkwassernachfragespitze zwischen 7:00 und 8:00 Uhr ist auch eine Spitze in der Abwassertemperatur von 26,5 °C feststellbar. In der Mittagstunde zwischen 12:00 und 13:00 Uhr ist ein Absinken der Abwassertemperatur auf 25,2 °C zu erkennen, worauf in den Abendstunden zwischen 20:00 und 21:00 Uhr mit 26,5 °C der höchste Stundenmittelwert auftritt.

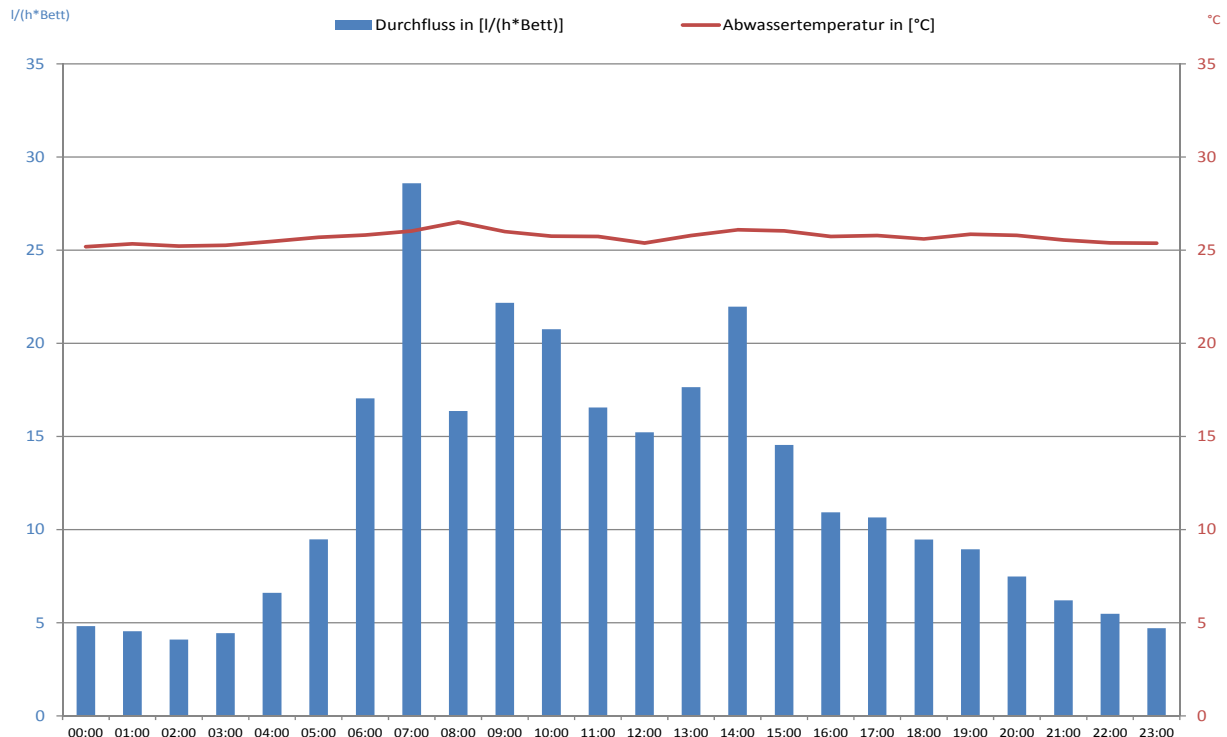


Ermittelt aus Messdaten von Mai bis Juli 2011. Der Durchfluss ist als Stundenmittelwert auf Basis von Messungen in 5-Sekunden-Intervallen in l/(h*Person) angegeben. Der Stundenmittelwert der mit dem Durchfluss gewichteten Abwassertemperatur basiert ebenfalls auf Messungen in 5-Sekunden-Intervallen.

Abbildung 30: Luisenhospital, Ganglinie Werktag

An Samstagen ist ein durchschnittlicher Trinkwasserverbrauch von 100,5 m³ pro Tag bzw. 288,7 Liter pro Tag und Bett feststellbar. Die durchschnittliche Abwassertemperatur ergibt sich zu 25,8 °C. Der Durchfluss beträgt somit nur etwa Zweidrittel vom Durchfluss eines Werktages. In **Abbildung 31** ist die repräsentative Ganglinie von Durchfluss und Abwassertemperatur für Samstag dargestellt. Es ist zu erkennen, dass ebenfalls zwischen 7:00 und 8:00 Uhr die Spitze der morgendlichen Trinkwasserverbrauchsperiode liegt, welche mit 28,6 Liter pro Stunde und Bett etwas geringer ausfällt als an Werktagen. Am Samstag ist der Durchfluss wesentlich geringer als an Werktagen. Zwischen 12:00 und 13:00 Uhr ist mit 15,2 Liter pro Stunde und Bett eine Senke zu erkennen. Ebenfalls wie an Werktagen flacht der Durchfluss ab 15:00 Uhr bis in die Nachtstunden deutlich ab. Zwischen 2:00 und 3:00 Uhr wird mit 4,1 Liter pro Stunde und Bett das Minimum erreicht. Die durchschnittlichen Abwassertemperaturen des Samstags verlaufen

ganztätig auf hohem Niveau von über 25 °C. Die Spitze verläuft zwischen 8:00 und 9:00 Uhr mit 26,5 °C.



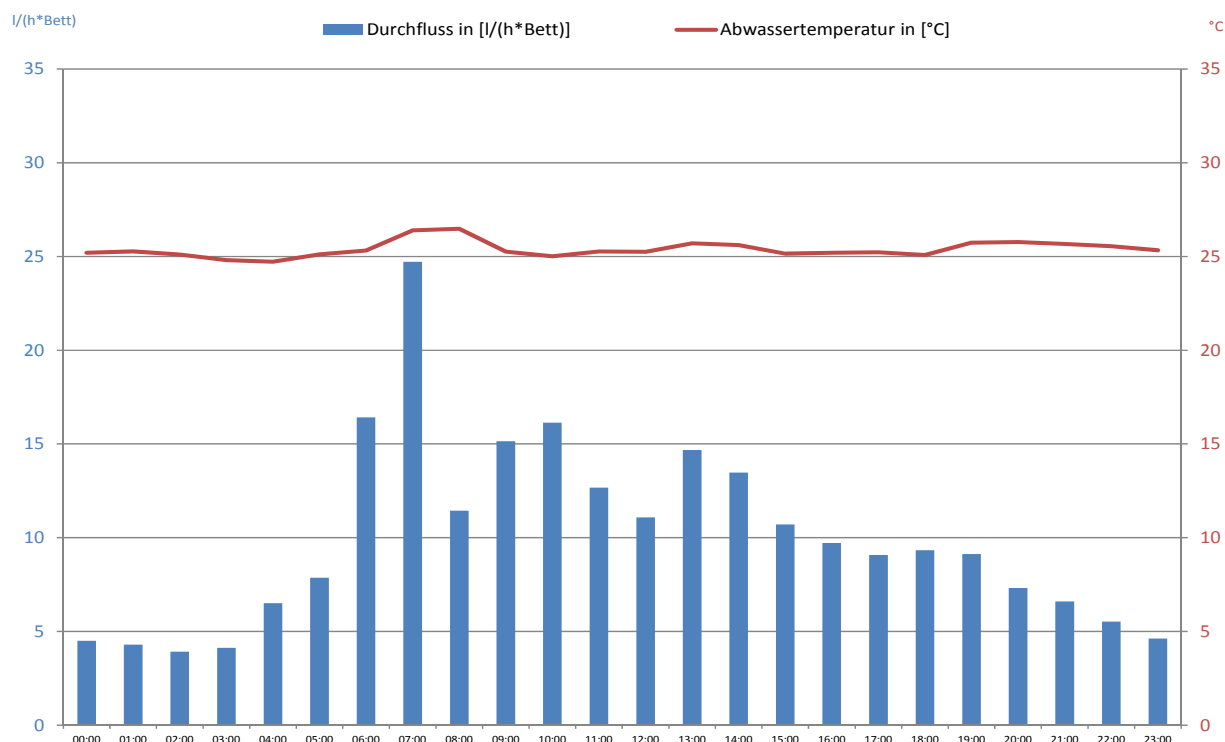
Ermittelt aus Messdaten von Mai bis Juli 2011. Der Durchfluss ist als Stundenmittelwert auf Basis von Messungen in 5-Sekunden-Intervallen in l/(h*Person) angegeben. Der Stundenmittelwert der mit dem Durchfluss gewichteten Abwassertemperatur basiert ebenfalls auf Messungen in 5-Sekunden-Intervallen.

Abbildung 31: Luisenhospital, Ganglinie Samstag

An Sonntagen wird mit einem durchschnittlichen Trinkwasserverbrauch von 83,2 m³ pro Tag bzw. 239,1 Liter pro Tag und Bett weniger Wasser verbraucht als an Samstagen. Die durchschnittliche Abwassertemperatur beträgt 25,5 °C. In **Abbildung 32** ist die repräsentative Ganglinie von Trinkwasserdurchfluss und Abwassertemperatur für Sonntage dargestellt. Ebenfalls, wie an den anderen Tagen, liegt zwischen 7:00 und 8:00 Uhr die Spitze der morgendlichen Trinkwasserverbrauchsperiode, welche mit 24,7 Liter pro Stunde und Bett geringer als an Werk- und Samstagen ausfällt. Zwischen 12:00 und 13:00 Uhr ist mit einem Durchfluss von 11,1 Liter pro Stunde und Bett eine Senke zu erkennen. Ab 15:00 Uhr flacht der Trinkwasserdurchfluss wie an den anderen Tagen ab. Die Abwassertemperatur liegt auch an Sonntagen auf einem hohen Niveau von 25,0 °C. Das Maximum der Stundenmittelwerte wird zwischen 8:00 und 9:00 Uhr mit 26,5 °C erreicht.

Der geringere Durchfluss an Wochenendtagen lässt sich mit der reduzierten Anzahl an Personal im Gebäude, vor allem beim Pflegepersonal, erklären. Hieraus resultiert eine schwächere Nutzung von Handwaschbecken und WC's. Zusätzlich werden an Wochenendtagen weniger Untersuchungen und Operationen durchgeführt, was zu einem geringeren Wasserverbrauch der Zentralsterilisation führt. Zudem wird die Wäscherei seltener genutzt. Demgegenüber bleibt der Trinkwasserverbrauch während der Morgen-

spitze von 7:00 bis 8:00 Uhr, welcher vorrangig auf Dusch- und Waschvorgänge der Patienten zurückgeht, bei nahezu unverändertem Patientenbelegungsgrad an Wochenendtagen auf einem hohen Niveau. Die Unterschiede während der Morgenspitze lassen sich mit dem geringeren Trinkwasserverbrauch der Küche, welche an Wochenendtagen weniger Essen herstellt, erklären.



Ermittelt aus Messdaten von Mai bis Juli 2011. Der Durchfluss ist als Stundenmittelwert auf Basis von Messungen in 5-Sekunden-Intervallen in $l/(h \cdot Person)$ angegeben. Der Stundenmittelwert der mit dem Durchfluss gewichteten Abwassertemperatur basiert ebenfalls auf Messungen in 5-Sekunden-Intervallen.

Abbildung 32: Luisenhospital, Ganglinie Sonntag

In **Tabelle 4** sind die Tagesdurchschnittswerte von Durchfluss und Abwassertemperatur für den Gesamtmesszeitraum, für Werktage, für Samstage und für Sonntage zusammengefasst.

Tabelle 4: Luisenhospital, Tagesdurchschnittswerte Monitoring

Zeitraum	Durchfluss	Abwassertemperatur
Gesamtmesszeitraum	129,2 m ³ /d 371,2 l/d-Bett	25,8 °C
Werktage	148,1 m ³ /d 425,6 l/d-Bett	25,8 °C
Samstage	100,5 m ³ /d 288,7 l/d-Bett	25,8 °C
Sonntage	83,2 m ³ /d 239,1 l/d-Bett	25,5 °C

4.4 Zusammenfassung

Zusammenfassend ist festzustellen, dass alle vorgestellten Ganglinien in den Morgenstunden eine ausgeprägte Trinkwasserverbrauchsspitze zeigen. Bei der Wohn- und Hotelnutzung kommt es abends zu einer zweiten, schwächeren Verbrauchsspitze. Beim Krankenhaus sind über den gesamten Tag hohe Wasserverbräuche zu erkennen. Während bei der Wohnnutzung die durchschnittliche tägliche Pro-Kopf-Trinkwasserverbrauchsmenge von 122 Litern, welche vom Statistischen Bundesamt für Deutschland herausgegeben wird, erreicht wird, sind bei der Hotel- und Krankenhausnutzung höhere Verbrauchswerte festzustellen.²⁷ 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 zweistündigen 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 23 bis 26 °C zeigen das im Vergleich zu anderen regenerativen Energiequellen hohe Temperaturniveau der Wärmequelle Abwasser. Die höchsten stündlichen Mittelwerte der Abwassertemperatur von über 28 °C treten während der Trinkwasserverbrauchsspitzen auf. D.h. in Zeitperioden mit hohem Durchfluss werden größere Warmwassermengen verbraucht als in Zeiträumen mit geringem Durchfluss.

Als maßgebende Einflussgrößen auf den Verlauf der Abwasserwärmeprofile sind die Nutzungsart, die Nutzeranzahl, der Wochentag und die Art der sanitären Ausstattung zu nennen. Darüber hinaus wurde im Rahmen des Forschungsvorhabens eine starke Korrelation der Verschiebung der Abwassertemperaturprofile mit der gemessenen Trinkkaltwassertemperatur, welche jahreszeitlichen Schwankungen unterliegt, festgestellt.

Im Folgeforschungsvorhaben „Dezentrale Abwasserwärmerückgewinnung zur Steigerung der Energieeffizienz von Gebäuden“ werden weitere Wohngebäude in das Monitoring aufgenommen. Der Fokus liegt hierbei auf kleine Mehrfamilienhäuser, um die Ganglinien auf Wohngebäude mit geringerer Nutzerzahl zu erweitern. Zusätzlich werden die Messungen an den bisherigen Monitoringobjekten fortgeführt, um an allen Gebäuden eine vollständige Jahresperiode zu vermessen und eine Aussage über jahreszeitliche Schwankungen von Abwassermenge und Abwassertemperatur zu ermöglichen und die maßgeblichen Einflussgrößen wie beispielsweise die jahreszeitliche Schwankung der Trinkkaltwassertemperatur bei der energetischen Auswertung zu berücksichtigen.

²⁷ Vgl. o.V., Statistisches Jahrbuch 2010 für die Bundesrepublik Deutschland mit internationalen Übersichten, Statistisches Bundesamt (Hrsg.), 2010, S. 307.

5 Analyse von Abwasserwärmepumpensystemen

Am Lehrstuhl für Baubetrieb und Gebäudetechnik werden im Rahmen des Forschungsvorhabens verschiedene Systeme zur Abwasserwärmenutzung mittels Wärmepumpentechnologie mit Hilfe eines Analysekonzeptes untersucht. Ziel der Analyse ist eine Aussage zur Vorteilhaftigkeit der dezentralen Nutzung von Abwasserwärme.

Zu Beginn des Kapitels werden das Analysekonzept und das Berechnungstool für dezentrale Abwasserwärmepumpensysteme beschrieben, worauf die Präsentation der Ergebnisse folgt. Anschließend wird eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung am Beispiel des Theodore von Kármán Haus durchgeführt. Das Kapitel schließt mit einer Zusammenfassung.

5.1 Analysekonzept

Das Analysekonzept beschreibt ein dezentrales Wärmepumpensystem mit der Wärmequelle Abwasser. Es bietet sich an, die Wärmepumpe zur Erzeugung des Trinkwarmwassers des Gebäudes zu nutzen. Hierdurch wird ein Wärmekreislauf aufgebaut, d.h. die Wärme des Trinkwarmwassers wird aus den Abwasserströmen zurückgewonnen und wieder zur Trinkwarmwassererwärmung genutzt. Es ist davon auszugehen, dass sowohl Wärmeverluste, wie die Abkühlung des Trinkwarmwassers während Übergabe, Nutzung und Verteilung, als auch Wärmegewinne beispielsweise durch elektrische Wassererwärmung in Waschmaschinen oder durch Aufwärmung von Toilettenspülkästen auf Raumtemperatur auftreten. Es ist zu erwarten, dass die Wärmequelle Abwasser ausreichend Energie zur Erwärmung des Trinkwarmwassers bereitstellt, d.h. Energieangebot und Energienachfrage gleichen sich größtmäßig aus, wie folgende überschlägliche Bilanz zeigt.

Annahmen:

- Abkühlung Abwasser um 15 K von 25 °C auf 10 °C
- Erwärmung Trinkwarmwasser um 50 K von 10 °C auf 60 °C
- Leistungszahl der Wärmepumpe $\varepsilon_{WP} = 3,5$
- gleicher Massenstrom Abwasser und Trinkwasser: $\dot{m}_{Abwasser} = \dot{m}_{Trinkwasser}$
- gleiche spez. Wärmekapazität von Abwasser und Trinkwasser: $c_{p,Abw} = c_{p,Trinkwasser}$

Bilanz:

$$\begin{aligned}\dot{Q}_{Abkühlung, 15 K} &= \dot{Q}_{Erwärmung, 50 K} \\ \dot{m}_{Abwasser} \cdot c_p \cdot \Delta\vartheta_{Abkühlung} &= \dot{m}_{Trinkwarmwasser} \cdot c_p \cdot \Delta\vartheta_{Erwärmung} \\ \dot{m}_{Abwasser} \cdot 15 K &= \dot{m}_{Trinkwarmwasser} \cdot 50 K \\ \frac{\dot{m}_{Trinkwarmwasser}}{\dot{m}_{Abwasser}} &= \frac{15 K}{50 K} = 0,3\end{aligned}$$

Bilanziell könnten 30 % des Trinkkaltwassers aufgeheizt werden, wobei im Wohnbereich lediglich mit einem Trinkwarmwasseranteil am Wasserverbrauch von ca. 20 bis

25 % (auf dem Temperaturniveau von 60 °C) zu rechnen ist. Die zeitliche Verschiebung des Anfalls von Abwasser und dem Bedarf von Trinkwarmwasser ist durch Speicher abzudecken.

Abbildung 33 zeigt das Analysekonzept zur Wärmerückgewinnung aus Abwasser. Die Wärmequelle Abwasser kann hinsichtlich Menge und Temperatur durch das Monitoring an den Beispielgebäuden beschrieben werden. Die Abwasserströme werden in einem Abwasserspeicher zwischengespeichert. Dort ist der abwasserseitige Wärmeübertrager installiert, welcher die Abwasserwärme über einen Zwischenwasserkreislauf zum Verdampfer der Wärmepumpe überträgt. Die Wärmepumpe hebt unter Aufnahme von elektrischer Leistung das Temperaturniveau an und übergibt die Wärme auf hohem Temperaturniveau an den Trinkwarmwasserspeicher. Die Effizienz dieses Prozesses wird durch die Leistungszahl (Heizleistung/elektrische Leistungsaufnahme) beschrieben. Entscheidend für eine hohe Systemeffizienz sind die jeweiligen Temperaturniveaus von Wärmequelle und Wärmesenke. Vorteilhaft ist die hohe Wärmequellentemperatur des Abwassers von ca. 25 °C, nachteilig wirkt sich eine hohe Trinkwarmwassertemperatur aus, welche aus hohen Hygieneanforderungen resultiert. Der Trinkwarmwasserspeicher wird gemäß einem Trinkwarmwasserentnahmeprofil entleert. Für die Ermittlung des Trinkwarmwasserbedarfsprofils stehen verschiedene Ansätze beispielsweise nach DIN 4708, VDI 2067 oder aus der einschlägigen Fachliteratur zur Verfügung.²⁸ Darüber hinaus kann ein Trinkwarmwasserbedarfsprofil für die vier Monitoringobjekte aus den Messdaten von Trinkwassermenge und Abwassertemperatur unter Berücksichtigung von Temperaturverlusten berechnet werden.

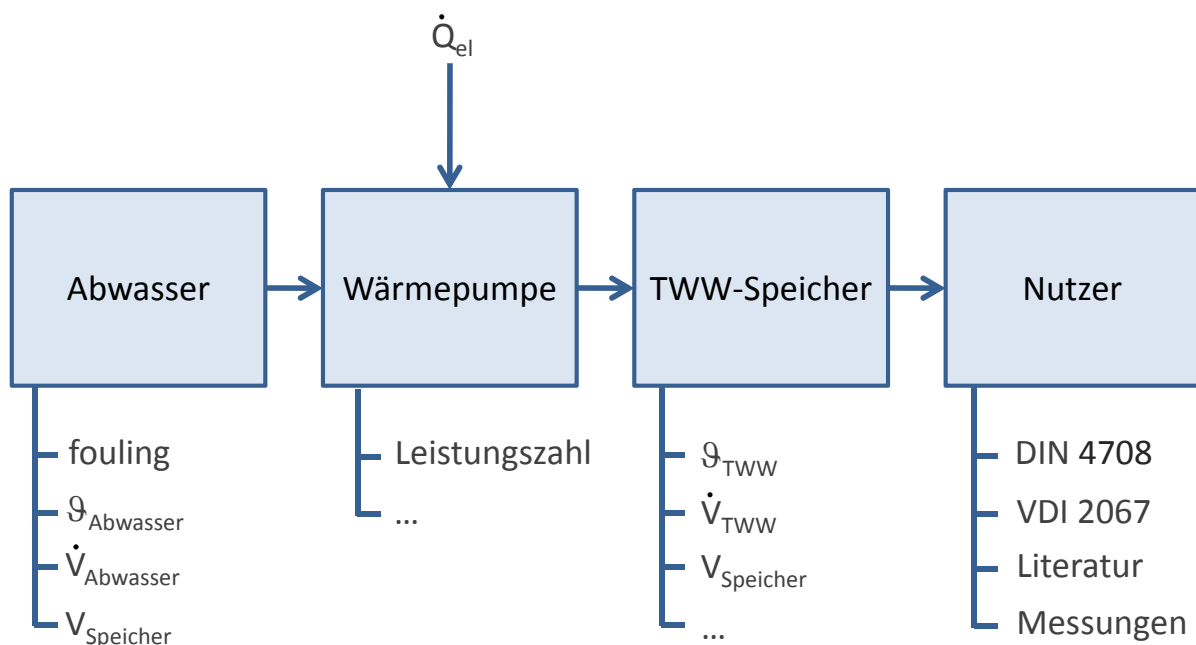


Abbildung 33: Analysekonzept zur Abwasserwärmerückgewinnung

²⁸ Vgl. DIN 4708-2: 1994 und VDI 2067-12: 2000.

Die Anforderungen an die Trinkwarmwasserhygiene resultieren maßgeblich aus den technischen Regeln des DVGW Arbeitsblattes W 511 „Technische Maßnahmen zur Verminderung des Legionellenwachstums in Neuanlagen“ und der DIN 1988 Teil 200 „Technische Regeln für Trinkwasser-Installationen“.²⁹ Hierin wird gefordert, dass ab einem Trinkwarmwasserspeichervolumen von über 400 Liter eine Austrittstemperatur des Trinkwarmwassers von 60 °C eingehalten werden muss. Die Temperaturanforderung ist auf die Vermeidung des Legionellenwachstums im Trinkwarmwasser zurückzuführen. Legionellen sind Keime, die bei Aufnahme über die menschlichen Atemwege zur Krankheit Legionellose führen können. Ausschlaggebend ist hierbei die Konzentration der Keime im Trinkwasser. Ab einer Temperatur von 55 °C sterben die Keime ab. In der Analyse wird daher eine Trinkwarmwassertemperatur von 60 °C zugrunde gelegt.

Am abwasserseitigen Wärmeübertrager ist die Bildung von Biofilmen, sog. Biofouling, zu erwarten. Grundsätzlich enthalten alle wärmeübertragenden Fluide gelöste oder suspendierte Materialien oder ermöglichen das Wachstum von Mikro- oder Makroorganismen im Wärmeübertrager, sodass der Wärmedurchgang behindert wird.³⁰ Das Medium Abwasser begünstigt aufgrund des Nährstoffreichtums die Bildung von Biofilmen mit Schichtdicken von mehreren Millimetern, was den Wärmedurchgang vom Abwasser zum Wärmeträgermedium erheblich verschlechtert.³¹ Dieser Biofilm besteht vorrangig aus mehreren Schichten von Mikroorganismen, darüber hinaus sind auch vereinzelt anorganische Ablagerungen zu beobachten. Der Literatur sind Wärmeleitfähigkeiten für Biofilm von 0,5 bis 0,7 W/m·K zu entnehmen.³² Bei der zentralen Abwasserwärmerückgewinnung in der Straßenkanalisation ist dieser Effekt bereits bekannt. Als Möglichkeiten, die Biofilmbildung zu reduzieren sind in der Literatur beispielsweise die Variation der Fließgeschwindigkeit des Abwassers zum Aufbau einer kurzfristigen hohen hydraulischen Belastung oder eine Anpassung der Oberflächengüte des Wärmeübertragermaterials zu finden.³³ Daneben sind mechanische Reinigungsverfahren denkbar.³⁴ In der hier durchgeführten Analyse wird die isolierende Wirkung der Biofilmbildung durch eine Temperaturbarriere zwischen Abwassertemperatur und Solevorlauftemperatur zur Wärmepumpe von zunächst 5 bis 7 K angesetzt.

5.2 Berechnungstool

Die Analyse wird mit Hilfe eines am Lehrstuhl für Baubetrieb und Gebäudetechnik entwickelten MS-Excel-basierten Berechnungstools durchgeführt. Mittels des Berechnungstools wird auf Basis von Stundenwerten der Betrieb des Abwasserwärmepumpensystems abgebildet. Die Auswertung erfolgt auf Grundlage einer eingeschwungenen durchschnittlichen Woche, welche die verschiedenen Trinkwarmwasserbedarfe und Abwas-

²⁹ Vgl. DVGW Arbeitsblatt W 511, 2004 und DIN 1988-200: 2011 (Entwurf v. Juni 2011).

³⁰ Vgl. o.V., VDI-Wärmeatlas, Verein Deutscher Ingenieure VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen (GVC) (Hrsg.), 2006, S. Od1.

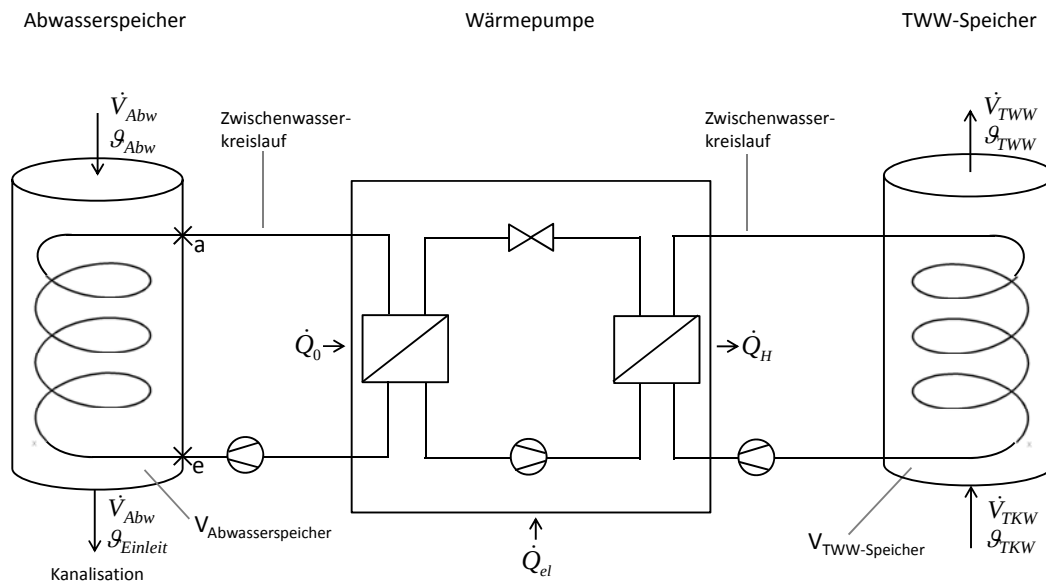
³¹ Vgl. Wanner, O., Wärmerückgewinnung aus Abwassersystemen, 2004, S. 37ff.

³² Vgl. o.V., VDI-Wärmeatlas, Verein Deutscher Ingenieure VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen (GVC) (Hrsg.), 2006, S. Od2.

³³ Vgl. Wanner, O., Wärmerückgewinnung aus Abwassersystemen, 2004, S. 47-54.

³⁴ Vgl. Vgl. o.V., VDI-Wärmeatlas, Verein Deutscher Ingenieure VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen (GVC) (Hrsg.), 2006, S. Od 26f.

serprofile von Werktagen und Wochenendtagen berücksichtigt. Die einzelnen Komponenten des Anlagenkonzeptes, welches in **Abbildung 34** dargestellt ist, werden im Folgenden erläutert.



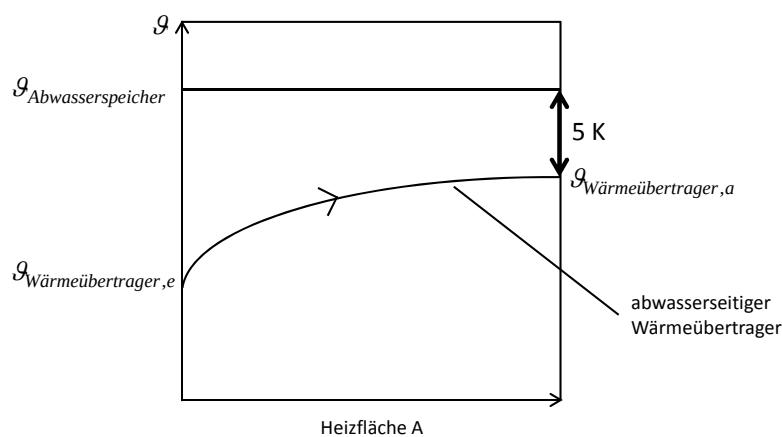
a	=	Austritt abwasserseitiger Wärmeübertrager
e	=	Eintritt abwasserseitiger Wärmeübertrager
ϑ_{Abw}	=	Abwassertemperatur
$\vartheta_{Einleit}$	=	Einleittemperatur Kanalisation
ϑ_{TKW}	=	Trinkkaltwassertemperatur
ϑ_{TWW}	=	Trinkwarmwassertemperatur
$\dot{V}_{Abw}$	=	Abwasservolumenstrom
$\dot{V}_{TKW}$	=	Trinkkaltwasservolumenstrom
$\dot{V}_{TWW}$	=	Trinkwarmwasservolumenstrom
$V_{Abwasserspeicher}$	=	Abwasserspeichervolumen
$V_{TWW-Speicher}$	=	Trinkwarmwasserspeichervolumen
$\dot{Q}_0$	=	Kühlleistung Wärmepumpe
$\dot{Q}_{el}$	=	Elektrische Antriebsleistung Wärmepumpe
$\dot{Q}_H$	=	Heizleistung Wärmepumpe

Abbildung 34: Anlagenkonzept dezentrales Abwasserwärmepumpensystem

Die Abwasserströme werden zur Überbrückung der zeitlichen Diskrepanz zwischen Energieangebot und –nachfrage in einem Abwasserspeicher gesammelt. Das Volumen des Abwasserspeichers kann im Berechnungstool in ganzzahligen Schritten von 1 bis 20 m³ variiert werden. Ist der Abwasserspeicher einmal gefüllt, wird zu jeder Stunde der

anfallende Abwasserstrom in den Speicher eingeführt und gleichzeitig eine identische Abwassermenge mit der Mischtemperatur der Vorperiode abgelassen und in die Kanalisation geleitet. Der Speicher ist somit dauerhaft vollständig gefüllt. Mit Hilfe eines Wärmeübertragers wird dem Abwasser Energie entzogen. Mit dem Berechnungstool wird die aus der Kühlleistung der Wärmepumpe resultierende Temperatursenkung des Abwasserspeichers ermittelt. Hierbei werden die Wärmespeicherfähigkeit und die Dichte des Abwassers mit den Werten von Wasser angenommen. Zusätzlich werden Wärmeverluste des Abwasserspeichers berechnet. Hierbei wird angenommen, dass der Abwasserspeicher zylindrische Form hat und über eine 10 cm dicke Dämmschicht mit einer Wärmeleitfähigkeit von 0,03 W/(m·K) verfügt.

Der abwasserseitige Wärmeübertrager führt die Energie des Abwassers über einen Zwischenwasserkreislauf zur Kompressionswärmepumpe. Die Temperatur am Austritt des abwasserseitigen Wärmeübertragers ergibt sich, wie in **Abbildung 35** dargestellt, aus der Temperatur des Abwasserspeichers abzüglich einer Temperaturbarriere aufgrund der Biofilmbildung. Die Temperaturbarriere kann ganzzahlig zwischen 5 und 7 K variiert werden. Zur Ermittlung der Kühl- und Heizleistung sowie der elektrischen Leistungsaufnahme in Abhängigkeit der Quellen- und Senkentemperatur wurde ein Wärmepumpenrechner in das MS-Excel-basierte Analysetool implementiert. Der Wärmepumpenrechner greift auf ein empirisches Modell einer Wärmepumpe zurück, welches auf realen Messwerten einer Wärmepumpe mit 8 kW Nennleistung basiert.



- a = Austritt abwasserseitiger Wärmeübertrager
- e = Eintritt abwasserseitiger Wärmeübertrager
- ϑ = Temperatur

Abbildung 35: Foulingeffekt am abwasserseitigen Wärmeübertrager

Die Wärmepumpe speist die Energie auf hohem Temperaturniveau über einen Zwischenwasserkreislauf in den Trinkwarmwasserspeicher ein. Im Gegensatz zu Wärmepumpenanlagen zu Heizzwecken ist bei der Trinkwarmwassererzeugung am Verflüssiger ein Zwischenwasserkreislauf zwischen Kältemittel und Trinkwasser notwendig, um

einen Kontakt des Trinkwassers mit dem Kältemittel zu verhindern.³⁵ Als Trinkwarmwasserspeicher stehen dem Berechnungstool ein Einzelspeicher oder ein Kaskadensystem von mehreren kleineren Trinkwarmwasserspeichern zur Verfügung (in Abbildung 34 nicht dargestellt). Das gesamte Speichervolumen wird mit maximal 15 m³ angenommen. Der Trinkwarmwasserspeicher bzw. das Kaskadensystem wird in 2 bis 6 Segmente mit mindestens jeweils 1,5 m³ Inhalt unterteilt. Die Unterteilung des Trinkwarmwasserspeichers in unterschiedlich viele Teilsegmente und die Wahl der Dauer der Beladungszeit eines Teilsegments gibt die Regelstrategie des Gesamtsystems vor. Der Beladevorgang des Trinkwarmwasserspeichers dauert so lange, bis kein vollständig leeres Teilsegment auf Trinkkaltwassertemperaturniveau mehr zur Verfügung steht. Ist ein Teilsegment vollständig nur mit Trinkkaltwasser gefüllt, beginnt der Beladevorgang. Während eines Beladevorgangs können gleichzeitig ein oder mehrere der Segmente durch Trinkwarmwasserzapfungen entladen werden, so dass während eines Beladevorgangs mehrere Segmente hintereinander erwärmt werden können. Analog zum Abwasserspeicher werden auch beim Trinkwarmwasserspeicher Transmissionswärmeverluste berücksichtigt. Hierbei wird wie zuvor von einer zylindrischen Bauform und einer 10 cm dicken Wärmedämmung mit einer Wärmeleitfähigkeit von 0,03 W/(m·K) ausgegangen. Unter Vorgabe eines auf Stundenwerten basierenden Trinkwarmwasserbedarfsprofils für die unterschiedlichen Gebäude werden die Trinkwarmwasserzapfungen simuliert, welche folglich die Anforderungen an das Trinkwarmwassererzeugungssystem stellen. Zusätzlich ist die Variation der Trinkwarmwassertemperatur in der Bandbreite von 45 bis 60 °C möglich. Bei Systemen mit Temperaturen unterhalb von 60 °C leistet die Wärmepumpe eine Vorerwärmung des Trinkwarmwassers und das System benötigt einen zweiten Erzeuger (Nacherhitzer) zur Sicherstellung der Trinkwarmwassertemperatur von 60 °C. Der Einbau einer Vorwärmstufe ermöglicht eine Verbesserung der Leistungszahl der Wärmepumpe unter Berücksichtigung der zusätzlichen Energieaufwendungen des zweiten Erzeugers (Nacherhitzer).

Die notwendige Beladung des Trinkwarmwasserspeichers stellt die Vorgabe an die Heizleistung der Wärmepumpe zur Sicherstellung der Trinkwarmwasserversorgung dar. Hierbei ist unter Berücksichtigung von kurzen Stagnationszeiten im Trinkwarmwasserspeicher aufgrund der Hygieneanforderungen eine möglichst gleichmäßige Beladung des Speichers anzustreben. Hierdurch wird einerseits die zu installierende Wärmepumpenleistung reduziert und andererseits ein häufiges Takten der Maschine vermieden, was die Lebensdauer erhöht und Anlaufverluste minimiert.

Mit Hilfe des Berechnungstools können verschiedene Abwasserwärmepumpensysteme mit zahlreichen Parametervariationen und Regelstrategien auf ihre Vorteilhaftigkeit untersucht werden.

³⁵ Vgl. Recknagel, H./ Sprenger, E./ Schramek, E.-R. (Hrsg.), Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik, 2009, S. 690ff und S. 1906f.

5.3 Bewertungsgrößen

Die Leistungszahl ε_{WP} der Wärmepumpe gibt das Verhältnis von der nutzbaren Heizleistung zu der elektrischen Antriebsleistung des Verdichters wieder.

$$\varepsilon_{WP} = \frac{\text{Heizleistung}}{\text{Antriebsleistung}}$$

Diese Leistungszahl bezieht sich auf einen definierten Zeitpunkt. Die nutzbare Heizleistung bzw. Wärmeleistung setzt sich aus der Leistung, die der Wärmequelle entzogen wird, und der Leistung, die durch Kompression zugeführt wird, zusammen. Die Leistungszahl ε_{WP} ist umso höher, je kleiner die Differenz zwischen der Quellen- und Senktemperatur ist. Deshalb sind eine Wärmequelle auf relativ hohem Temperaturniveau und eine relativ geringe Vorlauftemperatur des zu erwärmenden Mediums zu wählen.

Im Gegensatz zur Leistungszahl bezieht sich die Jahresarbeitszahl nicht auf einen bestimmten Arbeitszeitpunkt, sondern als Mittelwert auf ein gesamtes Jahr. Sie gibt das Verhältnis der über ein Jahr abgegebenen Heizenergie zu der innerhalb dieses Jahres aufgenommenen elektrischen Leistung wieder. In Abhängigkeit von den bei der Berechnung einbezogenen weiteren elektrischen Verbrauchern wie nötige Umwälzpumpen und Wärmeverlusten können hierbei unterschiedliche Jahresarbeitszahlen definiert werden.

Als weitere Bewertungsgröße des Wärmepumpensystems ist der Deckungsgrad anzugeben. Dieser ergibt sich aus dem Verhältnis der erbrachten Heizarbeit der Wärmepumpe zu der für die Trinkwarmwasserspeicherbeladung erforderlichen Energie. Der Deckungsgrad gibt Auskunft über den prozentualen Anteil der erforderlichen Energie, welcher von der Wärmepumpe erbracht wird und welcher von einem zweiten Erzeuger aufgebracht werden muss. Im Rahmen der Analyse wird ein hoher Deckungsgrad angestrebt, wobei aber zu keiner Stunde eine Überdeckung eintreten sollte, da sonst die Wärmepumpe abschalten und somit häufiger takten würde.

Mit Hilfe der Jahresarbeitszahl und der erzeugten Wärmemenge kann das Wärmepumpensystem gegenüber konventionellen Energieträgern hinsichtlich Energiekosten und CO₂-Ausstoß verglichen werden und eine Aussage über die ökonomische und ökologische Vorteilhaftigkeit getroffen werden.

5.4 Ergebnisse

Im folgenden Kapitel werden die Ergebnisse der Analyse für die vier Monitoringobjekte Theodore von Kármán Haus, Otto Petersen Haus, Business Hotel Aachen City und Luisenhospital vorgestellt.

Die grafischen Darstellungen der Ergebnisse (siehe z.B. **Abbildung 36**) zeigen jeweils eine durchschnittliche eingeschwungene Woche von Montag bis Sonntag. Das oberste Teildiagramm zeigt den Abwasserdurchfluss und die Abwassertemperatur der einzelnen Monitoringobjekte auf Grundlage der repräsentativen Ganglinien nach Kapitel 4. Der Durchfluss bezieht sich auf die linke Ordinate mit der Skalierung 0 bis 7 m³/h für die ersten drei Gebäude und 0 bis 35 m³/h für das Luisenhospital. Die Abwassertemperatur bezieht sich auf die rechte Ordinate mit der Skalierung 0 bis 35 °C für alle vier Gebäude. Auf Grundlage des gemessenen Durchflusses und der Abwassertemperatur wird der Trinkwarmwasserbedarf auf dem Temperaturniveau von 60 °C gegenüber der Trinkkaltwassertemperatur von 10 °C wie folgt berechnet:

$$\dot{m}_{Abwasser} \cdot c_p \cdot (\vartheta_{Abwasser} - \vartheta_{TKW}) = 0,9 \cdot \dot{m}_{TWW} \cdot c_p \cdot (\vartheta_{TWW} - \vartheta_{TKW})$$

$$\dot{m}_{TWW} = \dot{m}_{Abwasser} \cdot \frac{(\vartheta_{Abwasser} - \vartheta_{TKW})}{0,9 (\vartheta_{TWW} - \vartheta_{TKW})}$$

$$\dot{m}_{TWW} = \dot{m}_{Abwasser} \cdot \frac{(\vartheta_{Abwasser} - 10^{\circ}\text{C})}{0,9 (60^{\circ}\text{C} - 10^{\circ}\text{C})}$$

Hierbei werden Wärmeverluste mit einem pauschalen Verlustfaktor von 10 % berücksichtigt.

Das zweite Diagramm zeigt den Wärmepumpenbetrieb unter Angabe der Heiz- und Kühlleistung sowie der elektrischen Antriebsleistung. Die Ordinatenkalierung beträgt 0 bis 50 kWh/h für die ersten drei Gebäude und 0 bis 250 kWh/h für das Luisenhospital. Das darunter angeordnete Teildiagramm zeigt die erreichten Leistungszahlen des Wärmepumpenbetriebs mit der Ordinatenkalierung von 0 bis 6 für alle Szenarien. Aus dem untersten Teildiagramm ist die Einleittemperatur des abgekühlten Abwassers in die Straßenkanalisation mit der Ordinatenkalierung 0 bis 30 °C abzulesen.

Als Ergebnis der Analyse werden neben der grafischen Abbildung die Jahresarbeitszahl und der Deckungsgrad des Wärmepumpensystems angegeben. Es werden jeweils zwei Szenarien vorgestellt. Zum Einen wird ein System mit einer Vorerwärmung des Trinkwarmwassers auf 45 °C durch die Wärmepumpe und einer weiteren Erwärmung des Trinkwarmwassers auf 60 °C durch einen zweiten Erzeuger (Nacherhitzer) vorgestellt. Demgegenüber wird ein System mit einer alleinigen Trinkwarmwassererwärmung auf 60 °C durch die Wärmepumpe gezeigt.

5.4.1 Theodore von Kármán Haus

Abbildung 36 zeigt die Ergebnisse der Trinkwarmwasservorerwärmung auf 45 °C für das Theodore von Kármán Haus. Das System weist ein Trinkwarmwasserspeichervolumen von 7 m³ auf. Der Speicher ist unterteilt in 4 Teilsegmente von jeweils 1,75 m³ Größe. Ein Teilsegment wird innerhalb von 3 Stunden vollständig auf die Vorerwärmungstemperatur von 45 °C erwärmt. Das Abwasserspeichervolumen beträgt 5 m³. Als Temperaturbarriere infolge des Foulingeffektes werden 5 K angenommen. Die Nennleistung der Wärmepumpe beträgt 17,8 kW. Der Mittelwert der Temperatur des in die Kanalisation abfließenden Abwassers liegt bei 16,3 °C. Das Minimum der Abflusstemperatur beträgt 8,7 °C. Die Jahresarbeitszahl dieser Systemkonfiguration berechnet sich zu 4,5 bei einem Deckungsgrad von 89,1 %.

Die Wärmepumpe läuft bei diesem Szenario auf einem hohen Leistungszahlniveau zwischen 4 und 5. Innerhalb der Woche wird ein konstanter Betrieb der Wärmepumpe mit wenig Ein- und Ausschaltvorgängen erreicht.

In **Abbildung 37** sind die Ergebnisse für die vollständige Trinkwarmwassererzeugung auf ein Temperaturniveau von 60 °C durch die Wärmepumpe dargestellt. Das Trinkwarmwasserspeichervolumen beträgt hierbei 7 m³, welches in 3 Teilsegmente von jeweils 2,33 m³ unterteilt ist. Ein Teilsegment wird innerhalb von 3 Stunden auf die Trinkwarmwassertemperatur von 60 °C erwärmt. Das Abwasserspeichervolumen beträgt 5 m³. Die Temperaturbarriere infolge des Foulingeffektes wird mit 5 K angenommen. Die Nennleistung der Wärmepumpe liegt bei 35,9 kW. Die mittlere Temperatur des abfließenden Abwassers beträgt 14,5 °C. Das Minimum der Abflusstemperatur wird mit 6,8 °C erreicht. Die Jahresarbeitszahl des Systems beträgt 3,0 bei einem Deckungsgrad von 86,2 %.

Aufgrund des großen Temperaturhubs der Wärmepumpe werden geringere Leistungszahlen im Bereich von 3 erreicht. Aufgrund der größeren Heiz- und Kühlleistung der Wärmepumpe wird das Abwasser stärker abgekühlt als bei der Trinkwarmwasservorerwärmung auf 45 °C.

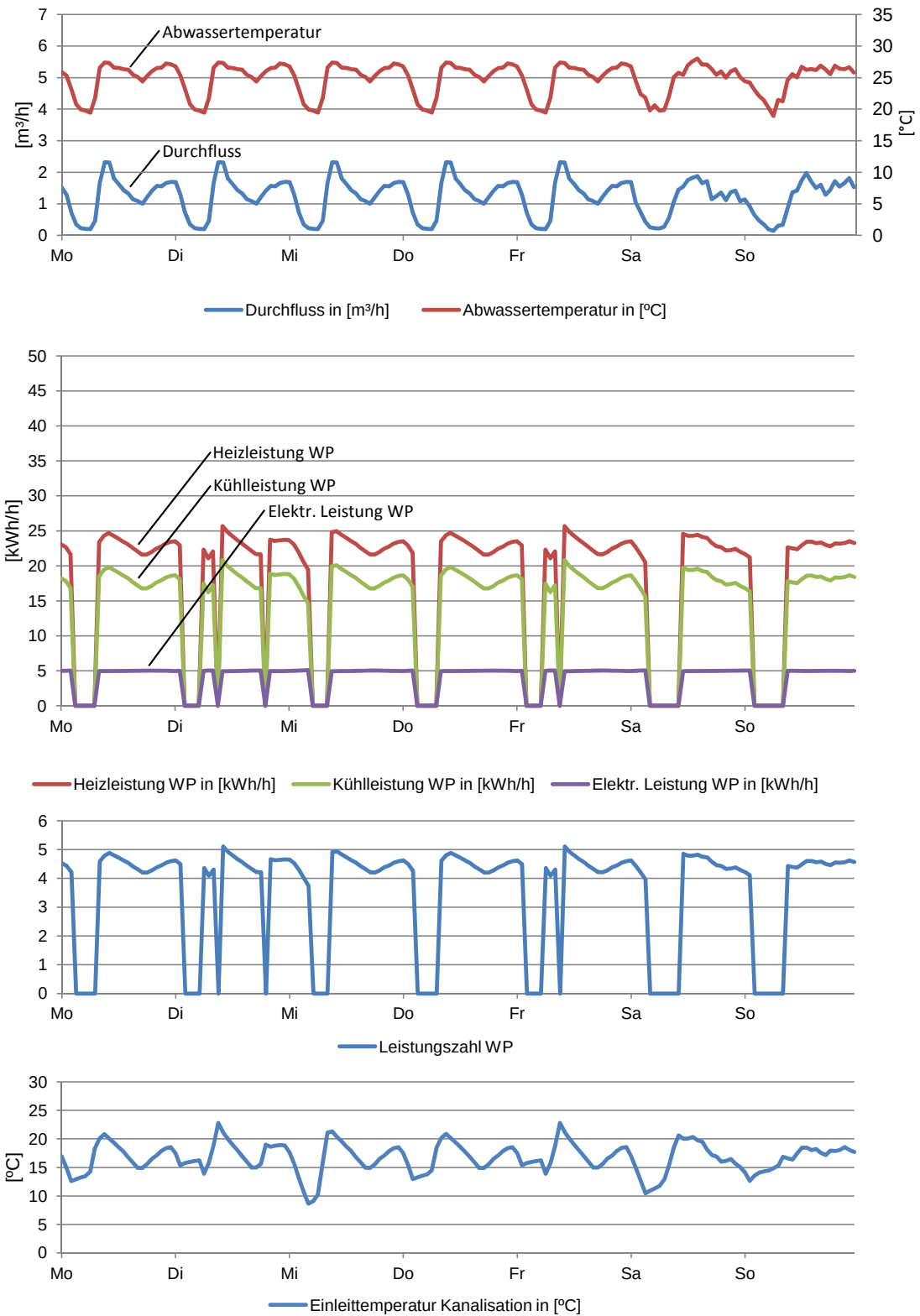


Abbildung 36: Theodore von Kármán Haus, TWW-Vorerwärmung auf 45 $^{\circ}\text{C}$

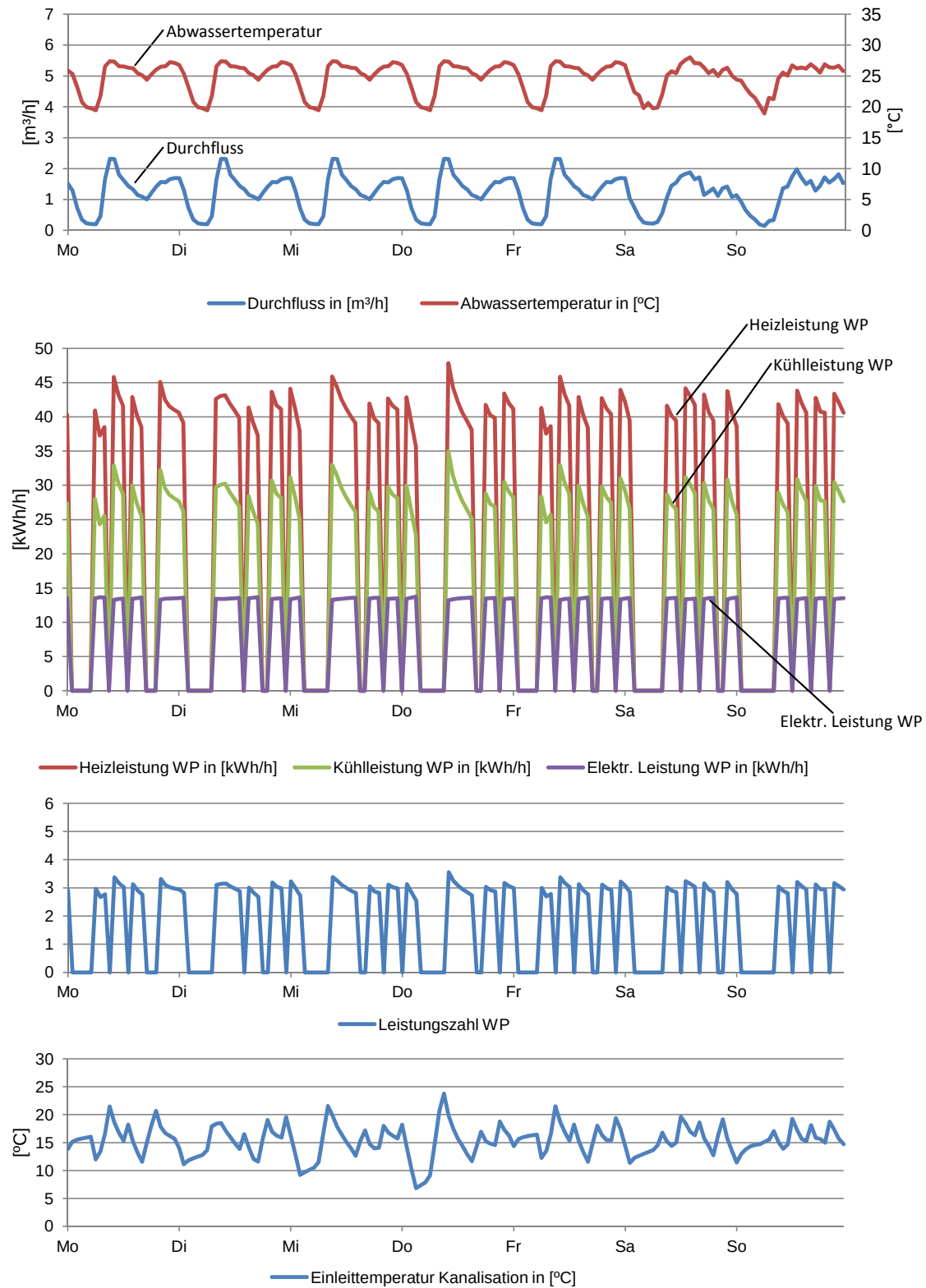


Abbildung 37: Theodore von Kármán Haus, TWW-Erwärmung auf 60 °C

5.4.2 Otto Petersen Haus

Abbildung 38 zeigt die Ergebnisse der Trinkwarmwasservorerwärmung auf 45 °C für das Otto Petersen Haus. Das System weist ein Trinkwarmwasserspeichervolumen von 5 m³ auf. Der Speicher ist unterteilt in 3 Teilsegmente von jeweils 1,67 m³ Größe. Ein Teilsegment wird innerhalb von 3 Stunden vollständig auf die Vorerwärmungstemperatur von 45 °C erwärmt. Das Abwasserspeichervolumen beträgt 5 m³. Als Temperaturbarriere infolge des Foulingeffektes werden 5 K angenommen. Die Nennleistung der Wärmepumpe beträgt 17,6 kW. Der Mittelwert der Temperatur des in die Kanalisation abfließenden Abwassers liegt bei 15,9 °C. Das Minimum der Abflusstemperatur beträgt 9,9 °C. Die Jahresarbeitszahl dieser Systemkonfiguration berechnet sich zu 4,5 bei einem Deckungsgrad von 92,0 %.

In **Abbildung 39** sind die Ergebnisse für die vollständige Trinkwarmwassererzeugung auf ein Temperaturniveau von 60 °C durch die Wärmepumpe dargestellt. Das Trinkwarmwasserspeichervolumen beträgt hierbei 5 m³, welches in 3 Teilsegmente von jeweils 1,67 m³ unterteilt ist. Ein Teilsegment wird innerhalb von 3 Stunden auf die Trinkwarmwassertemperatur von 60 °C erwärmt. Das Abwasserspeichervolumen beträgt 5 m³. Die Temperaturbarriere infolge des Foulingeffektes wird mit 5 K angenommen. Die Nennleistung der Wärmepumpe liegt bei 27,6 kW. Die mittlere Temperatur des abfließenden Abwassers beträgt 14,0 °C. Das Minimum der Abflusstemperatur wird mit 7,4 °C erreicht. Die Jahresarbeitszahl des Systems berechnet sich zu 2,9 bei einem Deckungsgrad von 90,7 %.

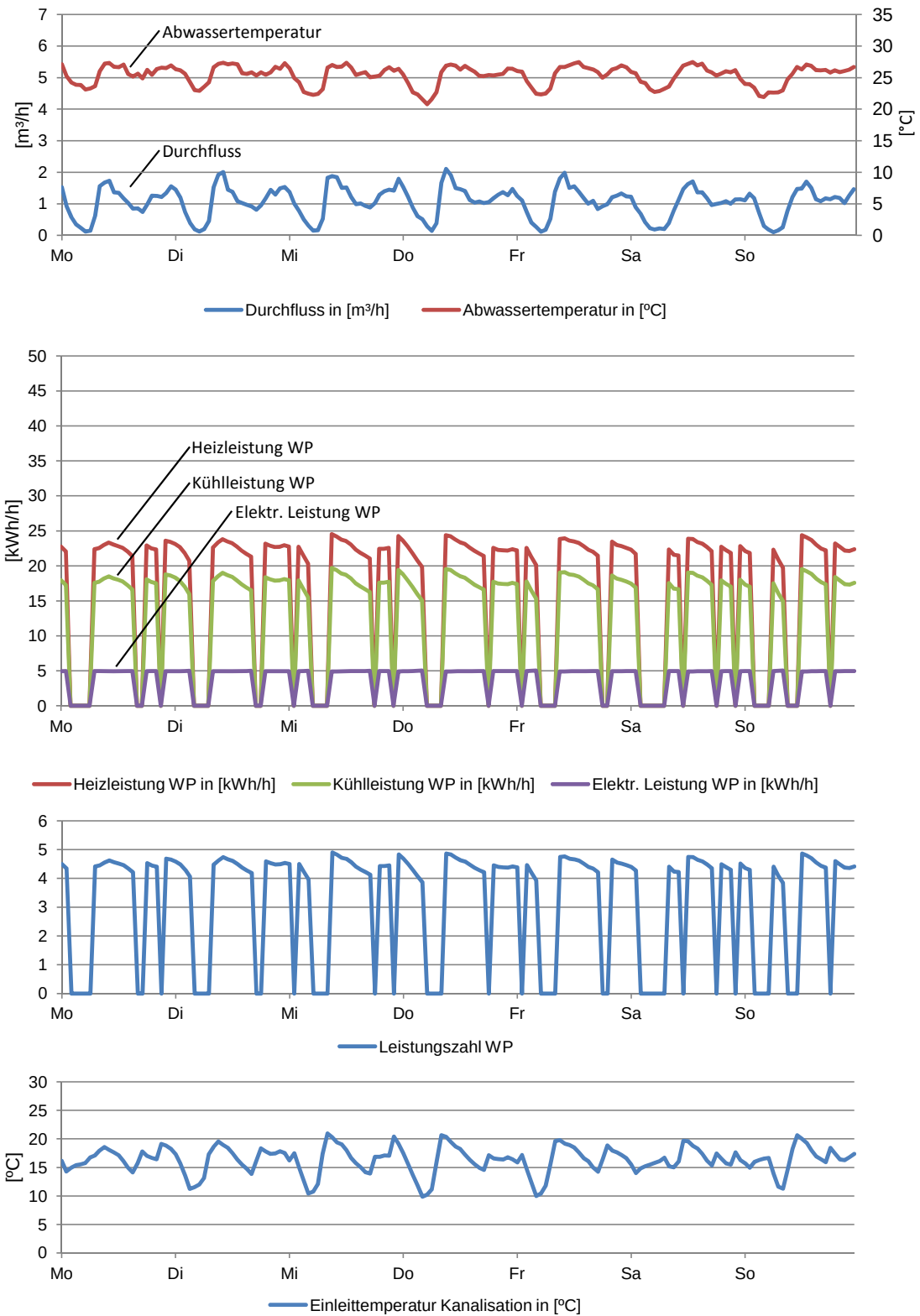


Abbildung 38: Otto Petersen Haus, TWW-Vorerwärmung auf 45 $^{\circ}\text{C}$

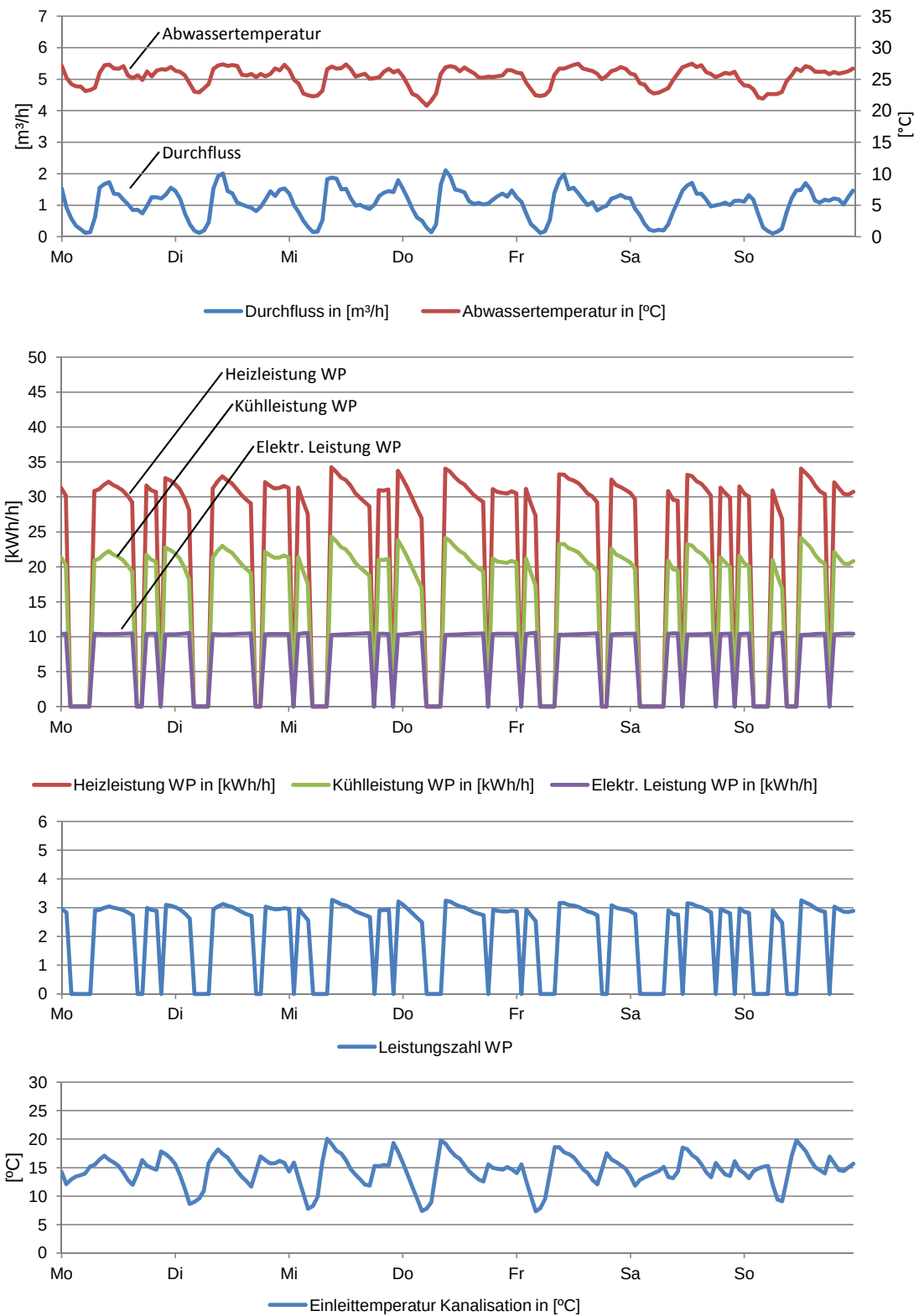


Abbildung 39: Otto Petersen Haus, TWW-Erwärmung auf 60 °C

5.4.3 Business Hotel Aachen City

Abbildung 40 zeigt die Ergebnisse der Trinkwarmwasservorerwärmung auf 45 °C für das Business Hotel Aachen City. Das System weist ein Trinkwarmwasserspeichervolumen von 6 m³ auf. Der Speicher ist unterteilt in 3 Teilsegmente von jeweils 2 m³ Größe. Ein Teilsegment wird innerhalb von 3 Stunden vollständig auf die Vorerwärmungstemperatur von 45 °C erwärmt. Das Abwasserspeichervolumen beträgt 5 m³. Als Temperaturbarriere infolge des Foulingeffektes werden 5 K angenommen. Die Nennleistung der Wärmepumpe beträgt 19,4 kW. Der Mittelwert der Temperatur des in die Kanalisation abfließenden Abwassers liegt bei 16,5 °C. Das Minimum der Abflusstemperatur beträgt 8,3 °C. Die Jahresarbeitszahl dieser Systemkonfiguration berechnet sich zu 4,4 bei einem Deckungsgrad von 83,4 %.

Die Wärmepumpe läuft auf einem hohen Leistungszahlniveau zwischen 4 und 5,5. Aufgrund der großen Trinkwarmwasserbedarfsspitzen in den Morgenstunden der Dienstage bis Freitage unterliegt das System im Vergleich zu den Studentenwohnheimen größeren Schwankungen. So ergeben sich auch im Abwasserspeicher große Temperaturunterschiede, welche zu großen Schwankungen der Heiz- und Kühlleistung der Wärmepumpe führen. Daher ist mit der auf Stundenwerten basierenden Berechnung nur ein geringer Deckungsgrad darstellbar.

In **Abbildung 41** sind die Ergebnisse für die vollständige Trinkwarmwassererzeugung auf ein Temperaturniveau von 60 °C durch die Wärmepumpe dargestellt. Das Trinkwarmwasserspeichervolumen beträgt hierbei 6 m³, welches in 3 Teilsegmente von jeweils 2 m³ unterteilt ist. Ein Teilsegment wird innerhalb von 3 Stunden auf die Trinkwarmwassertemperatur von 60 °C erwärmt. Das Abwasserspeichervolumen beträgt 5 m³. Die Temperaturbarriere infolge des Foulingeffektes wird mit 5 K angenommen. Die Nennleistung der Wärmepumpe liegt bei 30,1 kW. Die mittlere Temperatur des abfließenden Abwassers beträgt 15,1 °C. Das Minimum der Abflusstemperatur wird mit 6,2 °C erreicht. Die Jahresarbeitszahl des Systems berechnet sich zu 2,9 bei einem Deckungsgrad von 81,9 %.

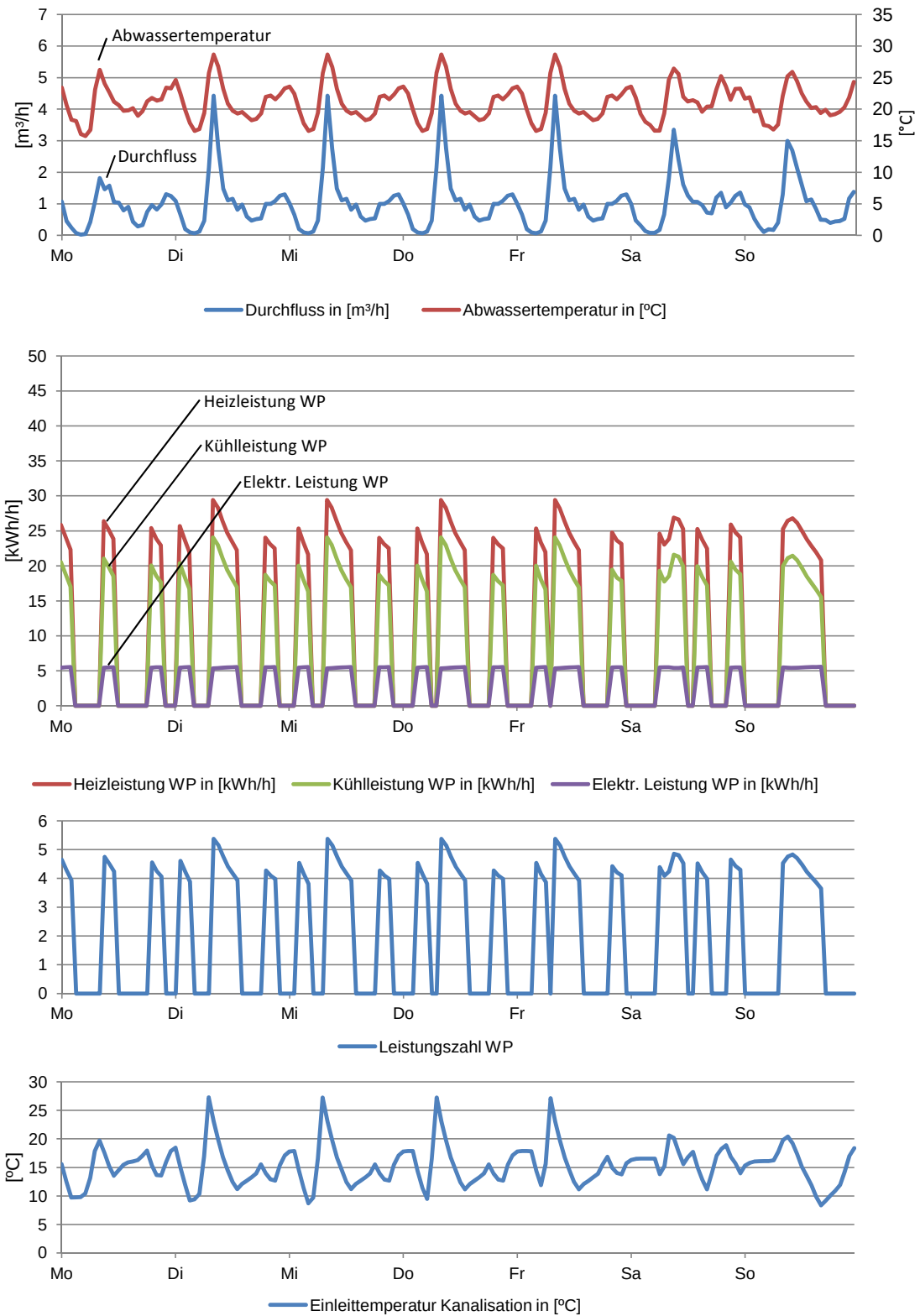


Abbildung 40: Business Hotel Aachen City, TWW-Vorerwärmung auf 45 $^{\circ}\text{C}$

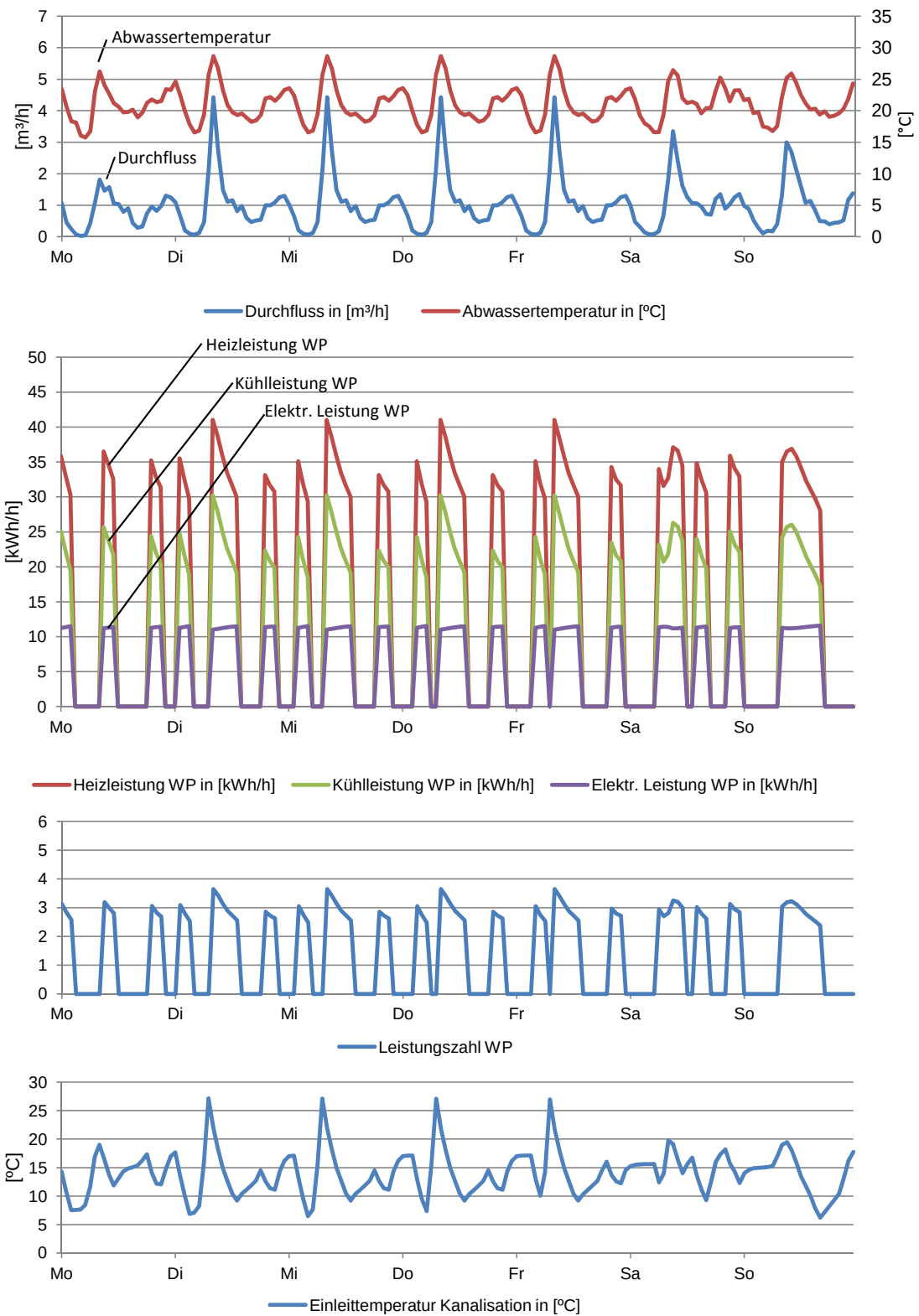


Abbildung 41: Business Hotel Aachen City, TWW-Erwärmung auf 60 $^{\circ}\text{C}$

5.4.4 Luisenhospital Aachen

Abbildung 42 zeigt die Ergebnisse der Trinkwarmwasservorerwärmung auf 45 °C für das Luisenhospital Aachen. Das System weist ein Trinkwarmwasserspeichervolumen von 13 m³ auf. Der Speicher ist unterteilt in 4 Teilsegmente von jeweils 3,25 m³ Größe. Ein Teilsegment wird innerhalb von einer Stunde vollständig auf die Vorerwärmungstemperatur von 45 °C erwärmt. Das Abwasserspeichervolumen beträgt 13 m³. Als Temperaturbarriere infolge des Foulingeffektes werden 5 K angenommen. Die Nennleistung der Wärmepumpe liegt bei 100 kW. Der Mittelwert der Temperatur des in die Kanalisation abfließenden Abwassers beträgt 15,8 °C. Das Minimum der Abflusstemperatur wird mit 12,5 °C erreicht. Die Jahresarbeitszahl dieser Systemkonfiguration berechnet sich zu 4,7 bei einem Deckungsgrad von 93,5 %.

Im Vergleich zu den anderen Gebäuden sind beim Luisenhospital aufgrund des hohen Trinkwarmwasserbedarfs größere Speichervolumina notwendig. Die Wärmepumpe läuft auf einem hohen Leistungszahlniveau zwischen 4 und 5. Aufgrund der vergleichsweise geringen Trinkwarmwasserzapfung an Samstagen und Sonntagen arbeitet die Wärmepumpe an diesen Wochentagen nur in Ein- oder Zweistundenintervallen.

In **Abbildung 43** sind die Ergebnisse für die vollständige Trinkwarmwassererzeugung auf ein Temperaturniveau von 60 °C durch die Wärmepumpe dargestellt. Das Trinkwarmwasserspeichervolumen beträgt hierbei 13 m³, welches in 4 Teilsegmente von jeweils 3,25 m³ unterteilt ist. Ein Teilsegment wird innerhalb von einer Stunde auf die Trinkwarmwassertemperatur von 60 °C erwärmt. Das Abwasserspeichervolumen beträgt 13 m³. Die Temperaturbarriere infolge des Foulingeffektes wird mit 5 K angenommen. Die Nennleistung der Wärmepumpe liegt bei 146,4 kW. Die mittlere Temperatur des abfließenden Abwassers beträgt 14,4 °C. Das Minimum der Abflusstemperatur wird mit 10,2 °C erreicht. Die Jahresarbeitszahl des Systems berechnet sich zu 3,1 bei einem Deckungsgrad von 87,2 %.

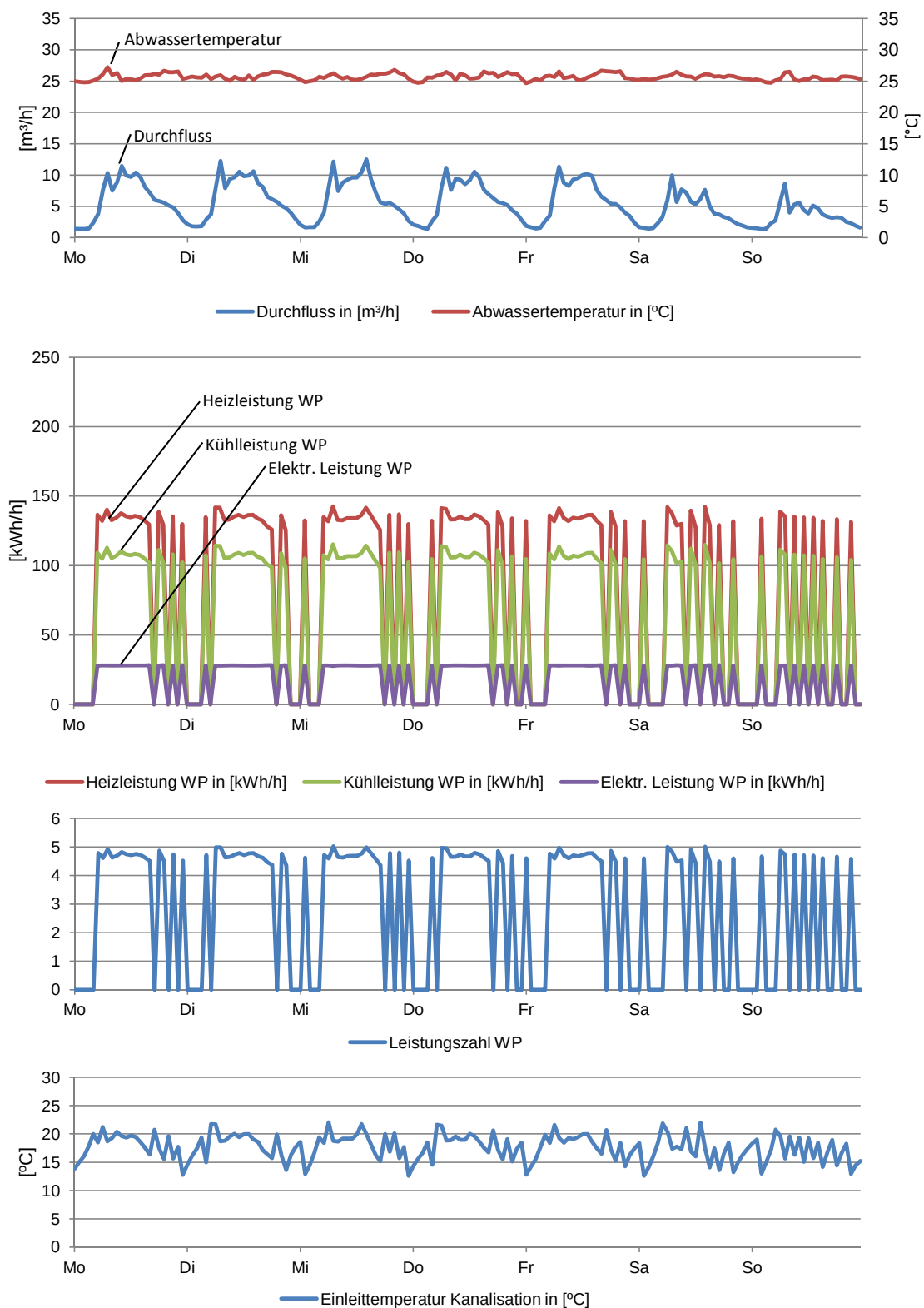


Abbildung 42: Luisenhospital, TWW-Vorerwärmung auf 45 $^{\circ}\text{C}$

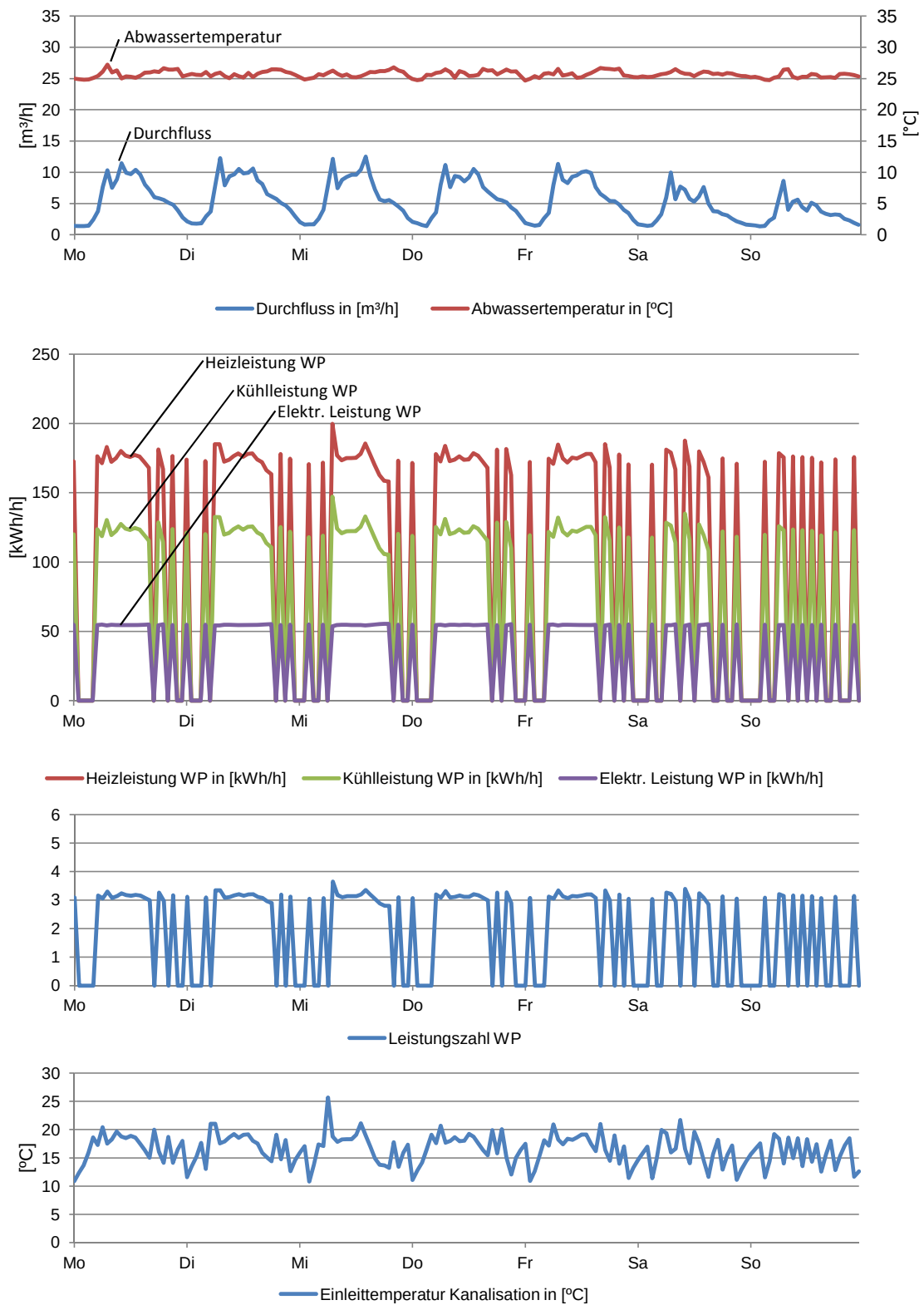


Abbildung 43: Luisenhospital, TWW-Erwärmung auf 60 °C

5.5 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung und CO₂-Emissionen

Die Bewertung der ökologischen und ökonomischen Vorteilhaftigkeit der dezentralen Abwasserwärmepumpentechnologie wird beispielhaft für das Theodore von Kármán Haus mit 246 Bewohnern gezeigt. Grundlage der Wirtschaftlichkeitsberechnung ist ein Pro-Kopf-Trinkwarmwasserbedarf von 40 Litern pro Tag auf einem Temperaturniveau von 60 °C.³⁶ Hieraus berechnet sich der Pro-Kopf Jahresenergiebedarf zur Trinkwarmwassererzeugung zu 848,8 kWh. Die Literaturangaben zum Trinkwarmwasserbedarf sind stark schwankend. Neben Wohnungsgröße und Personenanzahl sind beispielsweise Lebensstandard, Alter und Beruf der Bewohner Einflussgrößen auf den Trinkwarmwasserbedarf. So sind Schwankungsbreiten des Warmwasserbedarfs von 30 bis 60 Liter pro Tag und Person auf einem Temperaturniveau von 40 bis 60 °C³⁷ oder Bandbreiten des Pro-Kopf-Jahresenergiebedarfs von 190 bis 860 kWh³⁸ zu finden. Bei letzterer Quelle ist zu beachten, dass die Nutzungsfrequenz von Duschen mit 0,5mal pro Person und Tag angenommen wird. Eine Untersuchung zur Ermittlung von Benchmarks für Studentenwohnheime stellt einen höheren durchschnittlichen Pro-Kopf Jahresendenergiebedarf von 1.198 kWh fest.³⁹ Die weiteren Bezugsgrößen zur Wirtschaftlichkeitsbetrachtung sind in **Tabelle 5** zusammengefasst. Hierbei wird zur Verdeutlichung und Darstellung der Vorteilhaftigkeit einer dezentralen Wärmepumpentechnologie von den in **Tabelle 5** exemplarisch festgeschriebenen Bezugsgrößen wie Energiebedarf für Trinkwarmwasser pro Person und Jahr, Nutzungsgraden von Kesseln, angesetzten Energiepreisen, CO₂-Emissionen der verschiedenen Energieträger und einem erreichbaren Deckungsgrad der Trinkwarmwasserbereitstellung bei angenommenen Szenario von 60 °C bzw. 45 °C entsprechend der durchgeführten Simulationen nach Kapitel 5.4.1 ausgegangen.

Im Rahmen der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung werden drei Szenarien gerechnet.

Das erste Szenario beschreibt die konventionelle Trinkwarmwassererzeugung mit Gaskessel in Brennwertechnik, ölbefeuertem Konstanttemperaturkessel und mit elektrischem Strom (Direktheizung), d.h. ohne Einsatz der Abwasserwärmepumpe.

Im zweiten Szenario wird eine Abwasserwärmepumpe, welche die Trinkwarmwassererzeugung auf dem Temperaturniveau von 60 °C mit einem Deckungsgrad von 86,2 % leistet, mit einem zweiten Erzeuger als Nacherhitzer (Gas, Öl oder Strom (direkt)) zur Deckung des Restbedarfs kombiniert.

Das dritte Szenario beschreibt eine Abwasserwärmepumpe, welche aus Systemeffizienzgründen eine Teilerwärmung des Warmwassers auf dem Temperaturniveau von 45 °C mit einem Deckungsgrad von 90 % durchführt. Der Temperaturhub auf die Zapftemperatur von 60 °C wird ebenfalls von einem zweiten Erzeuger als Nacherhitzer (Gas, Öl oder Strom (direkt)) geleistet.

³⁶ Vgl. Lüdemann, B., Auslegung, Energiebedarf und Komfort von Anlagen zur Heizung und Warmwasserbereitung im Niedrigenergiehaus bei Berücksichtigung des Nutzerverhaltens, 2002, S. 98.

³⁷ Vgl. Recknagel, H./ Sprenger, E./ Schramek, E.-R. (Hrsg.), Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik, 2009, S. 1728.

³⁸ Vgl. VDI 2067-12: 2000, Tabelle 2, S. 10.

³⁹ Vgl. Voss, K., Helbich, U., Benchmarks für die Sanierung und den Neubau von Wohnheimen für Studierende, 2011, S. 20.

Die Ergebnisse hinsichtlich CO₂-Emissionen und Brennstoffkosten der konventionellen Trinkwarmwassererzeugung (Szenario 1) sind in **Tabelle 6** angegeben. Die Warmwasserversorgung mit Gas und Öl verursacht Kosten in Höhe von ca. 70 € pro Jahr und Person. Erfolgt die Warmwasserversorgung mit elektrischem Strom erhöhen sich die Kosten auf 206 € pro Jahr und Person. Die CO₂-Emissionen betragen 176 kg (Gas), 266 kg (Öl) und 483 kg (Strom (direkt)) pro Jahr und Person.

Tabelle 5: Bezugsgrößen Wirtschaftlichkeitsberechnung

Gebäude	Theodore von Kármán Haus
Bewohnerzahl	246 Personen
Energiebedarf Trinkwarmwassererzeugung Q_{TWW} bei $V_{TWW}=40$ Liter/(Tag·Person), $\vartheta_{TWW}=60^{\circ}\text{C}$	848,8 kWh/(a·Person)
Jahresnutzungsgrad Gaskessel, η_{Gas}	0,97
CO ₂ -Emissionen Gas	0,201 kg/kWh ⁴⁰
Gaspreis	0,08 €/kWh
Jahresnutzungsgrad Ölkessel, $\eta_{\text{Öl}}$	0,85
CO ₂ -Emissionen Öl	0,266 kg/kWh ⁴¹
Ölpreis	0,07 €/kWh
Jahresnutzungsgrad Strom, η_{Strom}	0,99
CO ₂ -Emissionen Strom	0,563 kg/kWh ⁴²
Strompreis	0,24 €/kWh
Strompreis Sondertarif für Wärmepumpen	0,185 €/kWh
Szenario 1: TWW-Erwärmung mit Gas, Öl oder Strom (direkt) auf 60 °C	
durch TWW-Erzeuger gedeckte Energiemenge Q_{TWW}	848,8 kWh/(a·Person)
Szenario 2: TWW-Erwärmung mit Wärmepumpe auf 60 °C und 2.Erzeuger Gas, Öl oder Strom (direkt)	
Jahresarbeitszahl Wärmepumpe	3,0
Deckungsgrad Wärmepumpe	86,2%
durch Wärmepumpe gedeckte Energiemenge $Q_{TWW,WP}$	731,7 kWh/(a·Person)
durch 2.Erzeuger gedeckte Energiemenge $Q_{TWW,Rest}$	117,1 kWh/(a·Person)
Szenario 3: TWW-Erwärmung mit Wärmepumpe und 2.Erzeuger Gas, Öl oder Strom (direkt); Wärmepumpe leistet Teilerwärmung des TWW auf 45°C	
Jahresarbeitszahl Wärmepumpe	4,5
Deckungsgrad Wärmepumpe	90%
durch Wärmepumpe gedeckte Energiemenge $Q_{TWW,WP}$	534,7 kWh/(a·Person)
durch 2.Erzeuger gedeckte Energiemenge $Q_{TWW,Rest}$	314,1 kWh/(a·Person)

⁴⁰ Bezogen auf den Brennstoffbedarf des Kessels. Vgl. o.V., Energie Erdgas: Effiziente Technik und erneuerbare Energien, Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V. (Hrsg.), 2007, S. 5.

⁴¹ Ebd.

⁴² Bezogen auf den Strombedarf der Wärmepumpe. Vgl. o.V., Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emission des deutschen Strommix 1990-2009 und erste Schätzung 2010, Umweltbundesamt (Hrsg.), 2011.

Tabelle 6: Theodore von Kármán Haus, Kosten und CO₂-Emission, Szenario 1

TWW-Erwärmung durch Gas, Öl oder Strom (direkt) auf 60 °C				
		Gas	Öl	Strom
durch TWW-Erzeuger gedeckte Energiemenge Q_{TWW}	kWh/(a-Person)	848,8	848,8	848,8
Jahresnutzungsgrad		0,97	0,85	0,99
resultierender Brennstoffeinsatz		1,03	1,18	1,01
Brennstoffkosten	€/kWh	0,08	0,07	0,24
CO ₂ -Emissionen	kg/kWh	0,201	0,266	0,563
Brennstoffbedarf $Q_{Brennstoff}$	kWh/(a-Person)	875,1	998,6	857,4
CO₂-Emissionen	kg/(a-Person)	175,9	265,6	482,7
Brennstoffkosten	€/a-Person)	70,01	69,90	205,78

Die Ergebnisse des zweiten Szenarios sind in **Tabelle 7** zusammengestellt. Die Wärmepumpe arbeitet mit einer Jahresarbeitszahl von 3,0 und einem Deckungsgrad von 86,2 % (Vgl. Kapitel 5.4.1) und deckt somit die Energiemenge von 731,7 kWh pro Jahr und Person. Als Nacherhitzer, welcher eine Energiemenge von 117,1 kWh liefert, werden Gas, Öl und elektrischer Strom (Direktheizung) gerechnet. Die kombinierten Systeme Wärmepumpe (1.Erzeuger) und Gas (2.Erzeuger) sowie Öl (2.Erzeuger) verursachen CO₂-Emissionen von 162 bzw. 174 kg pro Jahr und Person sowie Kosten der Warmwassererzeugung von ca. 55 € pro Jahr und Person. Die Kombination von Wärmepumpe und elektrischem Strom (bspw. elektrischer Direktheizung) führt zu CO₂-Emissionen von 204 kg pro Jahr und Person und zu Kosten von ca. 74 € pro Jahr und Person.

Tabelle 7: Theodore von Kármán Haus, Kosten und CO₂-Emission, Szenario 2

TWW-Erwärmung mit Wärmepumpe auf 60 °C und Nacherhitzer (Gas, Öl oder Strom (direkt))					
		Wärme- pumpe	Gas	Öl	Strom
durch Wärmepumpe gedeckte Energiemenge $Q_{TWW,WP}$	kWh/(a·Person)	731,7			
durch Nacherhitzer gedeckte Energiemenge $Q_{TWW,Rest}$	kWh/(a·Person)		117,1	117,1	117,1
Jahresarbeitszahl		3,0			
Jahresnutzungsgrad			0,97	0,85	0,99
resultierender Brennstoffein-satz			1,03	1,18	1,01
Antriebs- und Brennstoffkosten	€/kWh	0,185	0,08	0,07	0,24
CO ₂ -Emissionen	kg/kWh	0,563	0,201	0,266	0,563
Brennstoffbedarf $Q_{Brennstoff}$	kWh/(a·Person)		120,7	137,8	118,3
Strombedarf $Q_{el,Wärmepumpe}$	kWh/(a·Person)	243,9			
CO ₂ -Emissionen	kg/(a·Person)	137,31	24,27	36,66	66,61
Antriebs- und Brennstoffkosten	€/(a·Person)	45,12	9,66	9,65	28,40
		Wärmepumpe und Nacherhitzer (Gas)			
CO ₂ -Emissionen	kg/(a·Person)	161,6			
Antriebs- und Brennstoff-kosten	€/(a·Person)	54,78			
		Wärmepumpe und Nacherhitzer (Öl)			
CO ₂ -Emissionen	kg/(a·Person)	173,9			
Antriebs- und Brennstoff-kosten	€/(a·Person)	54,77			
		Wärmepumpe und Nacherhitzer (Strom (direkt))			
CO ₂ -Emissionen	kg/(a·Person)	203,9			
Antriebs- und Brennstoff-kosten	€/(a·Person)	73,52			

Tabelle 8 enthält die Ergebnisse des dritten Szenarios. Die Wärmepumpe leistet hierbei eine Teilerwärmung des Warmwassers auf 45 °C mit einer Jahresarbeitszahl von 4,5 und einem Deckungsgrad von 90 % (Vgl. Kapitel 5.4.1). Die gedeckte Energiemenge reduziert sich daher auf 534,7 kWh pro Jahr und Person, der Nacherhitzer (Gas, Öl oder Strom (direkt)) deckt die restliche Energiemenge von 314,1 kWh pro Jahr und Person. Die Kombination Wärmepumpe (1.Erzeuger) und Gas (2.Erzeuger) verursacht CO₂-Emissionen von 132 kg pro Jahr und Person und Kosten von ca. 48 € pro Jahr und Person. Die Kombination Wärmepumpe (1.Erzeuger) und Öl (2.Erzeuger) liefert CO₂-Emissionen von 165 kg pro Jahr und Person und Kosten von ca. 48 € pro Jahr und Person. Die Kombination von Wärmepumpe und Strom (bspw. elektrischer Direktheizung) führt zu CO₂-Emissionen von 246 kg pro Jahr und Person und zu Kosten von ca. 98 € pro Jahr und Person.

In **Tabelle 9** sind die Einsparungen an CO₂-Emissionen und Brennstoffkosten durch die Einführung des Abwasserwärmepumpensystems (Szenario 3) gegenüber den konventionellen Erzeugern (Szenario 1) dargestellt. Die möglichen Einsparungen an CO₂-Emissionen liegen im Bereich von 25 bis 73 %. Die möglichen Kosteneinsparungen betragen 32 bis 77 %.

Die Berechnungen wurden auf Grundlage des Gebäudes Theodore von Kármán Haus mit 246 Bewohnern, den Annahmen nach **Tabelle 5** und den Simulationsergebnissen nach Kapitel 5.4.1 durchgeführt. Für dieses Gebäude ergeben sich CO₂-Einsparungen von 10,8 t pro Jahr durch das Abwasserwärmepumpensystem bei einer angenommenen Kombination mit einem gasbefeuerten zweiten Erzeuger gegenüber einer alleinigen Trinkwarmwassererzeugung mit Gaskessel. Die Kosteneinsparungen würden sich auf 5.451 € pro Jahr belaufen. Unter Annahme von Investitionskosten für Wärmepumpe, Speicherbauteile und Montage von 25.000 € und einem Kapitalmarktzinssatz von 5 % ist eine Amortisation der Investition innerhalb von 5,3 Jahren möglich.

Das Potential zur bundesweiten Reduktion der CO₂-Emissionen beträgt hochgerechnet auf den deutschen Gebäudebestand unter Annahme einer anlagenspezifischen Einsparung des CO₂-Ausstoßes von 25 % (vgl. Tabelle 9) und einem Anteil der Trinkwarmwassererzeugung am gesamten bundesweiten CO₂-Ausstoß von 5 % (vgl. Kapitel 1) ca. 1,25 % bezogen auf die CO₂-Gesamtemission Deutschlands. Die Größe des Einsparpotentials ist insbesondere abhängig von den CO₂-Emissionen des eingesetzten Strommix. Darüber hinaus sind bautechnische Restriktionen, beispielsweise das Vorhandensein einer zentralen oder dezentralen Trinkwarmwassererzeugung im Gebäude, zu beachten.

Tabelle 8: Theodore von Kármán Haus, Kosten und CO₂-Emission, Szenario 3

TWW-Erwärmung mit Wärmepumpe auf 45 °C und Nacherhitzer (Gas, Öl oder Strom (direkt)); (Wärmepumpe leistet nur Teilerwärmung des TWW auf 45°C)					
		Wärme- pumpe	Gas	Öl	Strom
durch Wärmepumpe gedeckte Energiemenge $Q_{TWW,WP}$	kWh/(a·Person)	534,7			
durch Nacherhitzer gedeckte Energiemenge $Q_{TWW,Rest}$	kWh/(a·Person)		314,1	314,1	314,1
Jahresarbeitszahl		4,5			
Jahresnutzungsgrad			0,97	0,85	0,99
resultierender Brennstoffein-satz			1,03	1,18	1,01
Antriebs- und Brennstoffkosten	€/kWh	0,185	0,08	0,07	0,24
CO ₂ -Emissionen	kg/kWh	0,563	0,201	0,266	0,563
Brennstoffbedarf $Q_{Brennstoff}$	kWh/(a·Person)		323,8	369,5	317,2
Strombedarf $Q_{el,Wärmepumpe}$	kWh/(a·Person)	118,8			
CO ₂ -Emissionen	kg/(a·Person)	66,90	65,08	69,28	178,61
Antriebs- und Brennstoffkosten	€/(a·Person)	21,98	25,90	25,86	76,14
		Wärmepumpe und Nacherhitzer (Gas)			
CO ₂ -Emissionen	kg/(a·Person)	131,9			
Antriebs- und Brennstoff-kosten	€/(a·Person)	47,89			
		Wärmepumpe und Nacherhitzer (Öl)			
CO ₂ -Emissionen	kg/(a·Person)	165,2			
Antriebs- und Brennstoff-kosten	€/(a·Person)	47,85			
		Wärmepumpe und Nacherhitzer (Strom (direkt))			
CO ₂ -Emissionen	kg/(a·Person)	245,5			
Antriebs- und Brennstoff-kosten	€/(a·Person)	98,12			

Tabelle 9: Einsparungen an CO₂-Emissionen und Brennstoffkosten

Einsparungen bei der TWW-Erwärmung mit Wärmepumpensystem (Szenario 3) gegenüber konventioneller Erzeugung (Szenario1)				
Einsparungen an:		WP/Gas ggü. Gas	WP/Öl ggü. Öl	WP/Strom (di- rekt) ggü. Strom (direkt)
CO ₂ -Emissionen	kg/(a·Person)	43,91	100,44	237,21
	%	25,0	37,8	49,1
Brennstoffkosten	€/a·Person)	22,12	22,05	107,66
	%	31,6	31,5	52,3
Einsparungen an:		WP/Gas ggü. Öl	WP/Gas ggü. Strom (direkt)	
CO ₂ -Emissionen	kg/(a·Person)	133,65	350,7	
	%	50,3	72,7	
Brennstoffkosten	€/a·Person)	22,01	157,89	
	%	31,5	76,7	

5.6 Zusammenfassung

Abwasser stellt aufgrund des Temperaturniveaus eine ideale Wärmequelle für eine Wärmepumpe dar. Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurde am Lehrstuhl für Baubetrieb und Gebäudetechnik ein Analysekonzept entwickelt, um eine energetische Beurteilung einer Wärmerückgewinnung aus Abwasser zu ermöglichen. Hierbei werden die messtechnisch ermittelten Ganglinien von Abwassermenge und -temperatur als Basis verwendet. Die Ergebnisse verschiedener gerechneter Szenarien zeigen hohe Leistungszahlen der Wärmepumpen, die hochgerechnet auf ein Betriebsjahr in Jahresarbeitszahlen von 3,0 bis 4,7 enden. In **Tabelle 10** sind die Ergebnisse der Berechnung für die vier Monitoringobjekte zusammengefasst. Bei Wärmepumpensystemen, welche eine Vorerwärmung des Trinkwarmwassers auf 45 °C leisten, sind Jahresarbeitszahlen von ca. 4,5 zu erreichen. Das Konzept der Trinkwarmwasservorerwärmung mit Wärmepumpe sieht einen zweiten Erzeuger (Nacherhitzer), beispielsweise einen Gaskessel, vor, welcher den Temperaturhub von der Vorerwärmungsstufe auf die Zapftemperatur von 60 °C leistet, um somit ein hinsichtlich des Legionellenwachstums hygienisch unbedenkliches Versorgungssystem zu gewährleisten. Die Systeme zur vollständigen Trinkwarmwassererzeugung auf dem Temperaturniveau von 60 °C erzielen Jahresarbeitszahlen von ca. 3,0. Bei allen Szenarien wurde die Temperaturbarriere am abwasserseitigen Wärmeübertrager infolge des isolierenden Biofilms mit 5 K abgeschätzt. Die Reduktion der Biofilmbildung beispielsweise durch innovative automatisierte Reinigungsverfahren ist maßgebend für die Systemeffizienz. Das Abwasser wird durch die Wärmepumpe auf durchschnittlich 15 °C abgekühlt, so dass von keiner Beeinträchtigung der nachgeschalteten Abwasserreinigungsprozesse im Klärwerk auszugehen ist.

Tabelle 10: Zusammenfassung der Simulationsergebnisse (vgl. Kap. 5.4.1)

	<i>Theodore von Kármán Haus</i>		<i>Otto Petersen Haus</i>		<i>Business Hotel Aachen City</i>		<i>Luisenhospital Aachen</i>	
ϑ_{TWW} [°C]	60	60	60	60	60	60	60	60
$\vartheta_{Vorerwärmung}$ [°C]	45	-	45	-	45	-	45	-
$V_{TWW-Speicher}$ [m³]	7,0	7,0	5,0	5,0	6,0	6,0	13,0	13,0
$V_{Abw.-Speicher}$ [m³]	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	13,0	13,0
$\Delta\vartheta_{fouling}$ [K]	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
Nennleistung WP [kW]	17,8	35,9	17,6	27,6	19,4	30,1	100,0	146,4
Jahresarbeitszahl	4,5	3,0	4,5	2,9	4,4	2,9	4,7	3,1
Deckungsgrad [%]	89,1	86,2	92,0	90,7	83,4	81,9	93,5	87,2

In Kapitel 5.5 ist eine vergleichende Übersicht erarbeitet worden zur wirtschaftlichen und ökologischen Bewertung verschiedener Systemlösungen zur Trinkwarmwassererzeugung. Insgesamt lässt sich ein Reduktionspotential der CO₂-Gesamtemission der BRD von mindestens 1 % abschätzen.

Das verwendete Analysetool basiert auf einer Berechnung auf Basis von Stundenmittelwerten. Im Rahmen des Folgeforschungsvorhabens „Dezentrale Abwasserwärmerückgewinnung zur Steigerung der Energieeffizienz von Gebäuden“ erfolgt eine detaillierte Simulationsrechnung der Wärmepumpensysteme mit wesentlich kleineren zeitlichen Diskretisierungsschritten.

6 Fazit und Ausblick

Abwasser besitzt innerhalb von Gebäuden mit einem durchschnittlichen Temperaturniveau von 23 bis 26 °C ein hohes energetisches Potential, welches mit dezentraler Wärmepumpentechnologie effizient genutzt werden kann. Die berechneten Jahresarbeitszahlen der Wärmepumpensysteme von 3,0 bis 4,7 lassen einen wirtschaftlichen Betrieb erwarten. Zudem kann die dezentrale Abwasserwärmerückgewinnung einen erheblichen Beitrag zur Reduktion des CO₂-Ausstoßes von Gebäuden beitragen. Die Reduktion der Biofilmbildung am abwasserseitigen Wärmeübertrager ist maßgebend für die Systemeffizienz. Aufgrund der moderaten Abkühlung des Abwassers ist keine Beeinträchtigung des Kläranlagenbetriebs zu erwarten. Des Weiteren bietet der zu erwartende hohe Sanierungsbedarf bei Grundstücksentwässerungsanlagen Möglichkeiten zur Installation von dezentralen Abwasserwärmepumpensystemen. Dabei ist der zusätzliche Platzbedarf für die Anlagentechnik zu berücksichtigen.

In dem ebenfalls vom Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung geförderten Folgeforschungsvorhaben⁴³ zur dezentralen Abwasserwärmerückgewinnung werden neben weitreichenden Simulationsrechnungen weitere Wohngebäude in das Monitoring aufgenommen. Der Fokus liegt hierbei auf kleine Mehrfamilienhäuser, um die Ganglinien von Abwassermenge und -temperatur auf Wohngebäude mit geringerer Nutzerzahl zu erweitern. Es ist zu erwarten, dass Gebäude mit geringer Bewohnerzahl aufgrund der größeren zeitlichen Diskrepanz zwischen Trinkwarmwasserzapfung und Abwasseranfall höhere Anforderungen an die Speicherkonzepte stellen. Zusätzlich werden die Messungen an den bisherigen Monitoringobjekten fortgeführt, um an allen Gebäuden eine vollständige Jahresperiode zu vermessen und eine Aussage über jahreszeitliche Schwankungen von Abwassermenge und -temperatur zu ermöglichen und die maßgeblichen Einflussgrößen zu identifizieren.

Ziel des Forschungsvorhabens ist die weitreichende Nutzung des Wertstoffs Abwasser. Die dezentrale Abwasserwärmerückgewinnung stellt eine zukunftsweisende Technologie zur Steigerung der Energie- und Ressourceneffizienz von gebäudetechnischen Anlagen dar.

⁴³ Förderkennzeichen: SF-10.08.18.7-11.38, Bewilligungszeitraum: Dezember 2011 – Mai 2013, Projektleitung: Lehrstuhl für Baubetrieb und Gebäudetechnik RWTH Aachen University

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 (links): Wärmetauscherelement zum nachträglichen Einbau.....	2
Abbildung 2 (rechts): Wärmetauscherelemente in der Kanalwandung.....	2
Abbildung 3: Anlagekonzept zentrale Abwasserwärmerückgewinnung	3
Abbildung 4: Defektes Grundleitungsnetz	8
Abbildung 5: Anlagenkonzept für das Otto Petersen Haus.....	9
Abbildung 6: Monitoringkonzept.....	10
Abbildung 7: Schnitt Einbau Temperaturanlegefühler	11
Abbildung 8: Theodore von Kármán Haus, Trinkkaltwasserverbrauch, 31.05.2011	15
Abbildung 9: Theodore von Kármán Haus, Temperaturmessung, 31.05.2011.....	15
Abbildung 10: Theodore von Kármán Haus, Ganglinie Werktag	18
Abbildung 11: Theodore von Kármán Haus, Ganglinie Samstag.....	19
Abbildung 12: Theodore von Kármán Haus, Ganglinie Sonntag.....	20
Abbildung 13: Theodore von Kármán Haus, Konfidenzintervalle Werktag	21
Abbildung 14: Theodore von Kármán Haus, Periodenvergleich Werktag	23
Abbildung 15: Otto Petersen Haus, Ganglinie Werktag	24
Abbildung 16: Otto Petersen Haus, Ganglinie Samstag	25
Abbildung 17: Otto Petersen Haus, Ganglinie Sonntag	26
Abbildung 18: Otto Petersen Haus, Konfidenzintervalle Werktag	27
Abbildung 19: Otto Petersen Haus, Periodenvergleich Werktag	28
Abbildung 20: Business Hotel Aachen City, Ganglinie Dienstag - Freitag.....	30
Abbildung 21: Business Hotel Aachen City, Ganglinie Montag	31
Abbildung 22: Business Hotel Aachen City, Ganglinie Samstag	32
Abbildung 23: Business Hotel Aachen City, Ganglinie Sonntag.....	33
Abbildung 24: Business Hotel Aachen City, Periodenvergleich Dienstag - Freitag.....	34
Abbildung 25: Luisenhospital, Aufteilung der Trinkwassermenge	36
Abbildung 26: Luisenhospital, Proz. Aufteilung der Trinkkaltwassermenge.....	37
Abbildung 27: Luisenhospital, Gemessene und berechnete Trinkkaltwassermenge.....	38
Abbildung 28: Luisenhospital, Aufteilung der Trinkkaltwassermenge nach Strang	39
Abbildung 29: Luisenhospital, Proz. Aufteilung d. Trinkkaltwassermenge nach Strang	40
Abbildung 30: Luisenhospital, Ganglinie Werktag	41
Abbildung 31: Luisenhospital, Ganglinie Samstag	42

Abbildung 32: Luisenhospital, Ganglinie Sonntag	43
Abbildung 33: Analysekonzept zur Abwasserwärmerückgewinnung.....	46
Abbildung 34: Anlagenkonzept dezentrales Abwasserwärmepumpensystem.....	48
Abbildung 35: Foulingeffekt am abwasserseitigen Wärmeübertrager.....	49
Abbildung 36: Theodore von Kármán Haus, TWW-Vorerwärmung auf 45 °C.....	54
Abbildung 37: Theodore von Kármán Haus, TWW-Erwärmung auf 60 °C.....	55
Abbildung 38: Otto Petersen Haus, TWW-Vorerwärmung auf 45 °C.....	57
Abbildung 39: Otto Petersen Haus, TWW-Erwärmung auf 60 °C	58
Abbildung 40: Business Hotel Aachen City, TWW-Vorerwärmung auf 45 °C	60
Abbildung 41: Business Hotel Aachen City, TWW-Erwärmung auf 60 °C	61
Abbildung 42: Luisenhospital, TWW-Vorerwärmung auf 45 °C	63
Abbildung 43: Luisenhospital, TWW-Erwärmung auf 60 °C	64

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Theodore von Kármán Haus, Tagesdurchschnittswerte Monitoring.....	23
Tabelle 2: Otto Petersen Haus, Tagesdurchschnittswerte Monitoring	28
Tabelle 3: Business Hotel Aachen City, Tagesdurchschnittswerte Monitoring.....	34
Tabelle 4: Luisenhospital, Tagesdurchschnittswerte Monitoring	43
Tabelle 5: Bezugsgrößen Wirtschaftlichkeitsberechnung	67
Tabelle 6: Theodore von Kármán Haus, Kosten und CO2-Emission, Szenario 1	68
Tabelle 7: Theodore von Kármán Haus, Kosten und CO2-Emission, Szenario 2	69
Tabelle 8: Theodore von Kármán Haus, Kosten und CO2-Emission, Szenario 3	71
Tabelle 9: Einsparungen an CO2-Emissionen und Brennstoffkosten.....	72
Tabelle 10: Zusammenfassung der Simulationsergebnisse	73

Literaturverzeichnis

ATV-DVWK-Arbeitsgruppe ES-8.8, Merkblatt ATV-DVWK-M 143-1, ATV-DVWK Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., Hennef, 2004

Berger, C., Zustand der Kanalisation 2009, in: wwt – wasserwirtschaft wassertechnik, Ausgabe 06/2011, HUSS-MEDIEN GmbH, Berlin

Diefenbach, N., Loga, T., Basisdaten für Hochrechnung mit der Deutschen Gebäudetypologie des IWU: Neufassung August 2011, Institut Wohnen und Umwelt (Hrsg.), Darmstadt, 2011

DIN 1988: Technische Regeln für Trinkwasser-Installationen, Teil 200: Installation Typ A (geschlossenes System) – Planung, Bauteile, Apparate, Werkstoffe; Technische Regel des DVGW, Entwurf vom Juni 2011, Normenausschuss Wasserwesen (NAW) und Normenausschuss Heiz- und Raumluftechnik (NHRS) im DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (Hrsg.), Beuth Verlag, Berlin, 2011

DIN 4708: Zentrale Wassererwärmungsanlagen, Teil 2: Regeln zur Ermittlung des Wärmebedarfs zur Erwärmung von Trinkwasser in Wohngebäuden, Normenausschuss Heiz- und Raumluftechnik (NHRS) im DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (Hrsg.), Beuth Verlag, Berlin, 1994

Dr. Mertsch, Ministerium für Umwelt, Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz NRW, Interview mit KomNetGEW, 22.09.2011, <http://www.komnetgew.de>

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

Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts (Wasserhaushaltsgesetz - WHG) vom 31.07.2009 (BGBl. I 2585) zuletzt geändert durch Artikel 2 Abs. 67 des Gesetzes vom 22.12.2011 (BGBl. I 3044)

Lüdemann, B., Auslegung, Energiebedarf und Komfort von Anlagen zur Heizung und Warmwasserbereitung im Niedrigenergiehaus bei Berücksichtigung des Nutzerverhaltens, Books on Demand GmbH, 2002

o.V., Anwendungsbilanzen für die Endenergiesektoren in Deutschland im Jahr 2008, AG Energiebilanzen e.V. (Hrsg.), Berlin, 2011

o.V., Branchenbild der deutschen Wasserwirtschaft, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (Hrsg.), wvgw Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser, Bonn, 2008

o.V., CO₂-Gebäudereport 2007, Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (Hrsg.), vierC print + mediafabrik, Berlin, 2007

o.V., Energie aus Kanalabwasser, Deutsche Bundesstiftung Umwelt DBU (Hrsg.), Osnabrück, 2005

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

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

o.V., Gebäudebezogene Nutzung von Abwasserwärme, Berliner Netzwerk E (Hrsg.), Berlin, 2011

o.V., Gesundheit, Grunddaten der Krankenhäuser 2010, Statistisches Bundesamt (Hrsg.), Fachserie 12, Reihe 6.1.1, Wiesbaden, 2012

o.V., Heizen und Kühlen mit Abwasser, Deutsche Bundesstiftung Umwelt DBU (Hrsg.), Marketing + Wirtschaft Verlagsgesellschaft Flade + Partner, München, 2009

o.V., Hotelmarkt Deutschland 2012, Hotelverband Deutschland (IHA) e.V. (Hrsg.), IHA-Service GmbH, Bonn, 2012

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

o.V., VDI-Wärmeatlas, Verein Deutscher Ingenieure VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen (GVC) (Hrsg.), Springer, Berlin, 2006

o.V., Wohnraum für Studierende – Statistische Übersicht 2011, Deutsches Studentenwerk (Hrsg.), Köllen Druck+Verlag GmbH, Berlin, 2011

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

Rometsch, L., Wärmegewinnung aus Abwasserkanälen – Kurzbericht, IKT – Institut für unterirdische Infrastruktur (Hrsg.), 2005

VDI 2067: Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen, Blatt 12: Nutzenergiebedarf für die Trinkwassererwärmung, Verein Deutscher Ingenieure VDI-Gesellschaft Technische Gebäudeausrüstung (Hrsg.), Beuth Verlag, Berlin, 2000

Voss, K, Helbich, U., Benchmarks für die Sanierung und den Neubau von Wohnheimen für Studierende, Endbericht der Bergischen Universität Wuppertal, Lehrgebiet Bauphysik und Technische Gebäudeausrüstung im Forschungsprogramm Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesministeriums für Verkehr, Bau, Stadtentwicklung, Wuppertal, 2011

Wanner, O., Wärmerückgewinnung aus Abwassersystemen, Schlussbericht der Eidgenössischen Anstalt für Wasserversorgung Abwasserreinigung und Gewässerschutz (EAWAG) im Forschungsprogramm UAW Umgebungswärme, WKK, Kälte des Bundesamtes für Energie (BFE), Schweiz, Dübendorf, 2004