

Moderne Gebäudetechnik

Das Praxisjournal für TGA-Fachplaner

TOP-THEMA:

Wärme und Wasser systemisch denken S. 12

WÄRME SPEICHERN:

Bauteilaktivierung mit Photovoltaik S. 36

HEIZUNGSWASSER:

Sauerstoffkorrosion in der VDI 2035 S. 41

Erstklassige Wasserqualität durch zuverlässige Entsalzung

NEU



Umkehrosmoseanlage osmoliQ:LB

WERDE
WASSER-
WISSER®!

Umkehrosmoseanlage osmoliQ:LB

- ✓ Web-Anbindung und E-Mail-Versand für einen Überblick der Anlagendaten in Echtzeit
- ✓ verschleißfrei durch berührungslose Durchflussmessung
- ✓ lange Lebensdauer durch Hochdruckpumpe aus Edelstahl V4A

grünbeck

Wir bieten auch Online-Schulungen an.
Weitere Informationen finden Sie unter:
www.gruenbeck.de/schulungen

Recycling

Wärme und Betriebswasser aus dem Grauwasser

Das Abwasserrohr ist bei modernen Gebäuden mit hohem Energiestandard das größte Wärmeleck. Zugleich geht hier auch Wasser den Kanal hinunter, das nach entsprechender Behandlung noch sinnvoll genutzt werden könnte. Hier liegen buchstäblich mehrere Potenziale begraben.

An einem Passivhausprojekt in Frankfurt a. M. wurden Anlagen für die Wärmerückgewinnung und das Grauwasserrecycling installiert und in der Praxis erforscht. Ein Rück- und Ausblick nach vier Jahren Betriebserfahrungen.

1 – Blick auf das 2016 errichtete Passivhaus in der Frankfurter Salvador-Allende-Straße



Quelle: ABC, Herbert Kratzel

Warum Wasserrecycling mit integrierter Wärmerückgewinnung?

Der Klimawandel und die Agenda 2030 für nachhaltige Entwicklung stellen die Gesellschaft vor große Herausforderungen. Unter den 17 UN-Zielen der Sustainable Development Goals (SDGs), die für alle Staaten gelten, nimmt das Thema Energie, Klima und Wasser den zweiten Rang ein.¹⁾ Wohngebäude sollen bis 2050 CO₂-neutral und die Mieten auch für Menschen mit geringeren Einkommen bezahlbar sein. Der



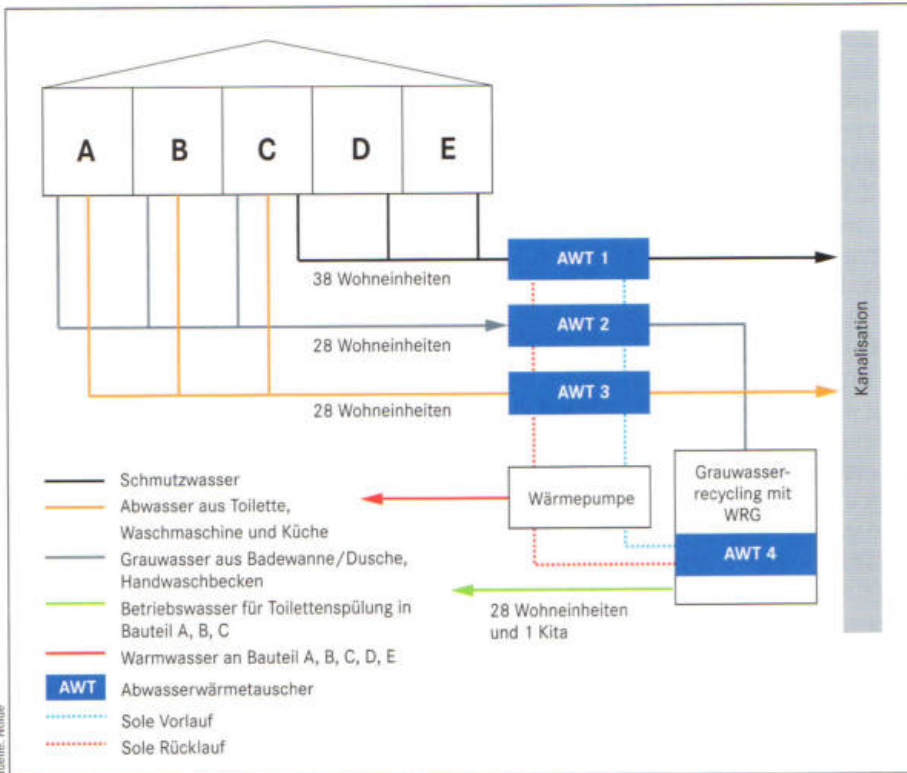
Autor
Dipl.-Ing. Erwin Nolde,
Nolde & Partner innovative
Wasserkonzepte, Berlin

Bestand soll altersgerecht umgebaut und eine hohe Wohnqualität garantiert werden. Die Wohnungswirtschaft soll ferner einen Beitrag für eine gute Nachbarschaft und sozialen Frieden leisten, schwarze Zahlen schreiben und zugleich auf Werterhaltung ausgerichtet sein. Damit die Gebäude all dies leisten können, müssen jetzt die Weichen richtig gestellt werden. In modernen Wohngebäuden mit hohem Energiestandard wird über die gesamte Außenhülle weit weniger Wärme an die Umwelt abgegeben als über das Abwasserrohr. Dass ein Mehrfamilienhaus einerseits von allen Seiten sehr aufwändig mit 25 cm Dämmung eingehüllt wird und andererseits durch das für die Wärmebilanz ebenso wichtige, im Durchmesser nur 15–20 cm schmale Abwasserrohr große

Mengen Wärme völlig ungehindert an die Umwelt abgeben kann, ist absolut inkonsequent.

Auch die **Wasserwirtschaft** wird mit diversen Herausforderungen konfrontiert. Sie rechnet durch den Klimawandel mit mehr und zugleich längeren Trockenzeiten und daher mit einem steigenden Trinkwasserbedarf, der vielerorts nicht aus dem eigenen Einzugsbereich gedeckt werden kann. Sie bedient sich deshalb dem Umland, wogegen es zahlreiche Proteste gibt.²⁾

Der Wassersektor gehört schon jetzt zu den größten kommunalen Stromverbrauchern.³⁾ Es gilt zudem als sicher, dass der Primärenergiebedarf trotz einiger Energieparmaßnahmen durch zusätzliche Anforderungen an die Abwasserbehandlung (Abwasserfiltration, Desinfektion, Ozon- und



Quelle: Nolde

2 – Wärmerückgewinnung und Grauwasserrecycling. Zuordnung zu den jeweiligen Bauteilen der SAS
**Tabelle 1
Daten zum Gebäude**

| | | |
|----------------|-----------------------|--|
| Wohnfläche | 6.161 m ² | insgesamt 66 WE mit je 51 bis 123 m ² |
| davon | 2.676 m ² | 28 WE und Kita mit Betriebswassernutzung |
| Fertigstellung | 11/2016 | nach Passivhausstandard |
| Photovoltaik | 10 kW _{peak} | |

Aktivkohlebehandlung usw.) in den kommenden Jahren nochmals signifikant steigen wird.

Die **Betriebswassernutzung im Gebäude** entlastet die Umwelt und bietet zugleich Vorteile für Mieter:innen sowie die Wohnungs- und Wasserwirtschaft – insbesondere in Zeiten, in denen Spitzenbelastungen z. B. in Trockenzeiten abgefordert werden. Für Anwendungsfälle wie die der Garten- und Gründachbewässerung, aber auch für die WC-Spülung und das Wäschewaschen, ist keine Trinkwasserqualität erforderlich. Allein die beiden letzteren machen jedoch nahezu 50 % des täglichen Haushaltwasserbedarfs aus. Abwassermeidung und -recycling – ganz nach dem Vorbild des Kreislaufwirtschaftsgesetzes⁴⁾, das bislang nur für feste Abfälle gilt, sollte künftig auch für Abwasser gelten. Prinzipiell müssten bereits im Gebäude die verschie-

denen Abwasserströme in Grau- und Schwarzwasser getrennt werden. Nur so lässt sich das Grauwasser dezentral zu hochwertigem Betriebswasser aufbereiten und für Zwecke nutzen, die nicht zwingend Trinkwasserqualität erfordern.

Das über 30 °C warme Grauwasser aus Badewannen, Duschen, Handwaschbecken usw. sollte, statt die Abwasserleitungen und den Boden zu erwärmen, zur Vorerwärmung des kalten Trinkwassers genutzt werden, bevor es im Boiler weiter auf die erforderliche Endtemperatur erhitzt wird.

Die Frankfurter ABG Frankfurt Holding stellt sich den Herausforderungen, baut in Passivhausbauweise und versucht das letzte Wärmeloch – das Abwasserrohr – zu schließen. Im Rahmen des Forschungsprojekts networks 3 wurden Investitionen für unterschiedliche Wärmerückgewinnungsvarianten aus Abwasser getätigt und

für einen Teilbereich des Gebäudes auch das Grauwasserrecycling realisiert.⁵⁾ Die Wärmerückgewinnung konnte anschließend über ein durch die DBU gefördertes Monitoring untersucht werden.

Dezentrale Wärmerückgewinnung aus häuslichem Abwasser

Die Wärmerückgewinnungs- wie auch die Grauwasserrecyclinganlage wurden im Mai 2016 als Forschungsanlagen installiert. Als individuell geplante, professionelle Anlagen können sie eine Lebensdauer von mindestens 30 Jahren erreichen. Für das Monitoring der anfallenden Abwassermengen wurden im Ablauf der Wärmetauscher (AWT 1 bis AWT 3) zeitweise Messeinrichtungen installiert.

Die einzelnen Wärmeernuten, die der Wärmepumpe über vier voneinander unabhängige Wärmetauscher zugeführt werden, werden über Wärmemengenzähler erfasst und, ebenso wie einige weitere Parameter, elektronisch aufgezeichnet. Während die Wärmepumpe die Vorerwärmung des Kaltwassers auf bis zu 40 °C übernimmt, sorgt ein nachgeschalteter Gasbrennwertkessel für die Erhitzung des Warmwassers auf mindestens 60 °C und gleicht Wärmeverluste aus, die durch die Warmwasserzirkulation entstehen.

Bild 2 illustriert die Installation zur getrennten Abwassererfassung in den einzelnen Gebäudeteilen und die Anordnung der einzelnen Wärmerückgewinnungsmodule. Die Bilder 3 und 4 zeigen die installierten Wärmetauscher, die die dem Abwasser entnommene Wärme an eine Wärmepumpe abgeben.

Ergebnisse der Wärmerückgewinnung

Der vorliegenden Untersuchung ging das Forschungsprojekt netWORKS 3 voraus.⁶⁾ Nach der Wärmemengenpotenzialabschät-

- 1) <https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/1494sgreportsdgs.pdf>
- 2) „Brauchen Frankfurter Klos Wasser aus dem Vogelsberg?“ https://www.deutschlandfunkkultur.de/30-jahre-kampf-gegen-wasserabbau-brauchen-frankfurter-klos.1001.de.html?dram:article_id=467919
- 3) https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/wa-wiflyer_uba_de_web.pdf
- 4) <https://www.gesetze-im-internet.de/krwg/>
- 5) <https://networks-group.de/de/networks-3/das-projekt.html>
- 6) <https://networks-group.de/de/networks-3/das-projekt.html>

zung, die im Rahmen dieses Forschungsprojekts erfolgte, wurde davon ausgegangen, dass mit insgesamt 32,7 MWh ca. 25 % des auf 131 MWh geschätzten Warmwasserwärmebedarfs aus Abwasser gewonnen werden könnte.

Abwasserwärmetauscher 1 (AWT 1 in DN 150; 12 m lang) soll aus dem Schwarzwasser 21,8 MWh/a bereitstellen und AWT 2 und AWT 3 (jeweils 6 m lang in DN 150) weitere 10,9 MWh/a. Tabelle 2 zeigt, dass im Betrachtungszeitraum 2018 mit AWT 1 (9 statt 21,8 MWh) nicht einmal halb so viel Wärme geerntet werden konnte wie zuvor angenommen. AWT 2 und AWT 3 blieben ebenfalls deutlich unter den Erwartungen.

Der größte Wärmeertrag kam mit 11,5 MWh aus der ursprünglich nicht vorgesehenen, nachgeschalteten Wärmerückgewinnung der Grauwasserrecyclinganlage, die mit dem Abwasserwärmetauscher 4 lediglich

die Restwärme nutzbar macht, die AWT 2 passieren lässt.

Die Wärmerückgewinnung aus dem Gesamtabwasser ist installationstechnisch vergleichsweise einfach, erbrachte mit 38 angeschlossenen Wohneinheiten (WE) (AWT 1) mit 2,75 kWh/m³ aber nur die geringsten spezifischen Wärmeerträge. Den besten Wirkungsgrad unter den Rohrwärmetauschern AWT 1 bis AWT 3 (siehe Tab. 3) erzielte der Grauwasserwärmetauscher AWT 2 mit 4,29 kWh/m³. Obgleich das Grauwasser schon über AWT 2 abgekühlt war, konnte mit dem im Betriebswassertank eingebrachten nachgeschalteten Wärmetauscher AWT 4 mit 14,39 kWh/m³ mehr als drei Mal so viel Wärme geerntet werden. Insgesamt konnten dem Grauwasser 18,68 kWh/m³ entnommen werden. Bild 5 zeigt, dass nach einer veränderten Kältemittelzuführung zu den Rohrwärmetauschern im September 2018 im darauf-

folgenden Jahr 2019 insgesamt höhere Wärmeerträge zu verzeichnen waren. In den Sommermonaten (aufgrund von Urlaubszeiten und etwas höheren Kaltwassertemperaturen) lagen die Wärmeerträge niedriger als im Winter.

Tabelle 4 zeigt, dass die monatlichen Wärmeerträge nach der Optimierung einiger Einstellungen ab September 2018 z. T. deutlich stiegen: in AWT 1 von 9.000 kWh (2017) über 10.400 kWh (2018) auf 14.300 kWh (2019) und 16.173 kWh (2020). Ab 2019 wurde der Planungszielwert von 32,7 MWh mit insgesamt 35 MWh Abwasserwärme erstmals sogar leicht überschritten. Dabei ist die der Grauwasserrecyclinganlage nachgeschaltete Wärmerückgewinnung AWT 4 wie zuvor am effizientesten und benötigte bis 2020 keinerlei Wartung. Mengenmäßig entfällt auf AWT 4 lediglich das bereits vorab schon leicht abgekühlte Grauwasser aus 28 WE (s. a. Tab. 4).

Als problematisch für die Hebeanlagen, die hier für Messzwecke den Wärmetauschern AWT 1 – 3 nachgeschaltet waren, erwies sich die Abkühlung der fetthaltigen Küchenabwässer. Wegen extrem starker Ablagerungen gingen die Pumpen der für Messzwecke installierten Hebeanlagen mehrfach auf Störung und mussten deshalb vorzeitig ausgebaut werden. Mit Blick auf Betriebssicherheit, Wartungsaufwand und Wärmeertrag sollte die Wärmerückgewinnung aus Küchen- und Waschmaschinenabwässern generell erst im Anschluss an die Grauwasserbehandlung vorgenommen werden.

Die Wärmepumpe hat – berechnet aus der dem Abwasser insgesamt entnommenen Wärmemenge und dem dafür erforderlichen Strombedarf in beiden Jahren – eine Jahresarbeitszahl (JAZ) von 4,43.

Dezentrales Wasserrecycling aus häuslichem Grauwasser

Bei der Planung ging man davon aus, dass in den 28 WE täglich ca. 3.000 l Grauwasser aus Duschen, Badewannen und Handwaschbecken anfallen und mit dem gereinigten Grauwasser (Betriebswasser) 28 Wohnungen und die Kita mit zehn Mitarbeiter:innen und 60 Kindern versorgt werden können.

Realisiert wurde eine Grauwasserrecyclinganlage gemäß Bild 6, die eine nachgeschaltete Wärmerückgewinnung im Betriebswassertank beinhaltet und mit der Wärmepumpe verbunden ist.

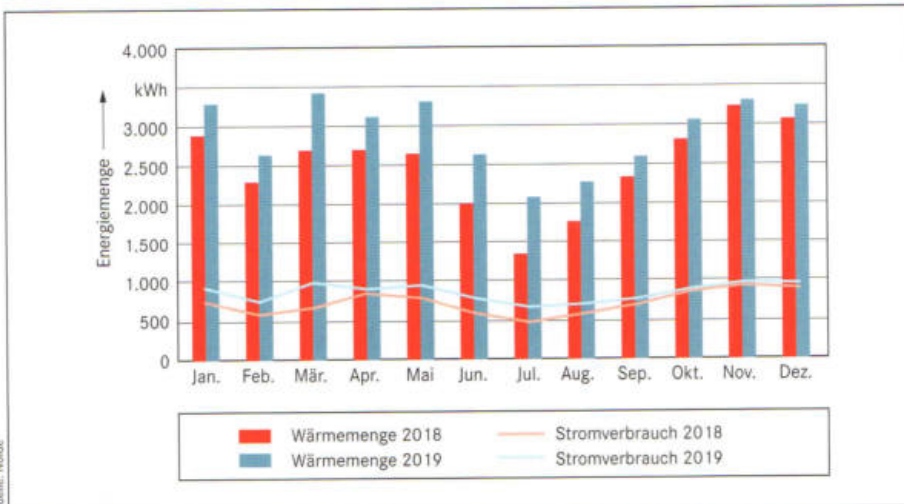
Die rein biologische Aufbereitung erfolgt über ein mehrstufiges Wirbelbett. Das



3 – Außenansicht des gedämmten Rohrwärmetauschers AWT 2 als SML-Rohr mit ummanteltem Wärmetauscher



4 – Innenansicht des gedämmten SML-Abwasserrohrwärmetauschers AWT 2 (links) und der im Betriebswassertank getauchte Rohrwärmetaucher AWT 4 (rechts) nach ca. zweijährigem Betrieb



5 – Wärmeerträge aus Energierückgewinnung 2018 und 2019 (Summen aus AWT 1 bis AWT 4); vor und nach einer Optimierung im September 2018

Tabelle 2

Wärmeerträge der Wärmetauscher und Vergleich der Wärmeerträge aus Grau- und Gesamtabwasser

Wärmeerträge aus Abwasser

| Jahr | AWT 1 | AWT 2 | AWT 3 | AWT 4 |
|-------------|--|------------------------------------|--|--------|
| 2018 | 9.000 | 3.437 | 4.177 | 11.520 |
| 2019 | 14.300 | 4.695 | 5.832 | 10.206 |
| 2020 | 16.173 | 4.869 | 5.840 | 12.044 |
| Wärmemengen | Wärme aus Grau- und Schwarzwasser aus 66 WE (Summe AWT 1, 2, 3, 4) | Wärme aus Gesamtabwasser aus 38 WE | Wärme nur aus Grauwasser aus 27 WE (AWT 2 + AWT 4) | |
| 2018 | 28.134 | 9.000 | 14.957 | |
| 2019 | 35.032 | 14.300 | 14.900 | |
| 2020 | 38.925 | 16.173 | 16.913 | |

Tabelle 3

Spezifische Wärmeerträge der vier Abwasserwärmetauscher in 2017/18

Wärmeeerträge pro m³ Abwasser

| | AWT 1 | AWT 2 | AWT 3 | AWT 4 |
|--------------------|-------|-------|-------|-------|
| kWh/m ³ | 2,75 | 4,29 | 2,79 | 14,39 |

hochwertig aufbereitete Wasser wird völlig chemikalienfrei mittels UVC-Licht desinfiziert. Das Betriebswasser ist klar, nahezu schwebstoff- und geruchsfrei. Dank der UV-Desinfektion liegen die Bakterienkonzentrationen des Betriebswassers deutlich unter den Hygieneanforderungen der EU-Richtlinie für Badegewässer und es kann somit ohne hygie-

nisches Risiko und Komfortverlust für die Mieter:innen zur Toilettenspülung eingesetzt werden.

Ergebnisse des Grauwasserrecyclings

Der tägliche Grauwasseranfall lag deutlich unter den ursprünglich angenommenen 3.000 l. Im Jahr 2018 wurden 2.008 l/d

und 2019 leicht vermindert 1.905 l/d gemessen. Der tägliche Betriebswasserbedarf lag bei 2.252 l/d in 2018 und leicht vermindert bei 2.177 l/d in 2019.

Differenzen zwischen dem tatsächlichen Betriebswasserbedarf und der Menge an eingeleitetem und zugleich aufbereitetem Grauwasser können durch Trinkwassernachspeisungen (TWN) ausgeglichen werden.

Tabelle 5 zeigt, dass der Trinkwasserbezug durch die Betriebswassernutzung – allein für die Toilettenspülung – um bis zu 935 m³/a reduziert wurde. Werden Waschmaschinen, wie anderswo bereits erfolgreich praktiziert, in das Wasserrecycling einbezogen, könnte das Recyclingpotenzial sogar nochmals um ca. 15 % steigen. Der wöchentliche Betriebswasserbedarf wird in Bild 8 von Anfang 2018 bis Ende 2020 vergleichend dargestellt.

Bis Ende September 2018 wurden wegen z. T. unvermieteter Wohnungen niedrige Grauwasserzuläufe in die Anlage registriert. Für vereinzelt außergewöhnlich hohe Trinkwassernachspeisungen waren in 2018 und 2019 defekte Spülkästen verantwortlich (2018 in KW 25 und 27 sowie 2019 in KW 45). Mehrfach wurde über ca. 10 h – ohne Unterbrechung – ein ständig erhöhter Betriebswasserstrom aufgezeichnet. Durch das automatisierte Monitoring werden erhöhte Wasserverbräuche sofort erkannt und gemeldet. Die Ursachen können damit zeitnah beseitigt werden. Die niedrigsten Verbräuche sind jeweils während der Sommerferien zu verzeichnen. Als pandemiebedingt 2020 über längere Zeit im Homeoffice gearbeitet wurde und das öffentliche Leben stark eingeschränkt war, wurden über mehrere Wochen hinweg deutlich höhere Betriebswassermengen als in den vorangegangenen Jahren bereitgestellt (2,8 m³/d), ohne dass hierfür Trinkwasser nachgespeist werden musste.

Optimierungspotenziale an der Versuchsanlage

Die Auswertungen der Wärmeerträge zeigen, dass die vorgenommenen Änderungen an den Ventileinstellungen der Wärmerückgewinnung ab September 2018 in höheren Wärmeerträgen resultierten. Die Temperaturaufzeichnungen machen ferner deutlich, dass die Wärmeerträge aus dem Grauwasser auch nach dieser Optimierung höher ausfallen könnten, sofern das Grauwasser im Anschluss an dessen Aufbereitung ständig auf 10 °C abgekühlt würde.

Tabelle 4

Wärmeerträge der 4 unterschiedlichen Rückgewinnungsmodulen – alle Angaben in kWh/Monat

AWT 1: gesamtes Abwasser aus 38 Wohneinheiten (WE)
 AWT 2: Grauwasser aus 28 WE aus Duschen/Badewannen und Handwaschbecken aus dem Zulauf der Grauwasseranlage
 AWT 3: Toiletten-, Küchen- und Waschmaschinenabwasser aus 27 WE
 AWT 4: Grauwasser aus 28 WE aus dem Ablauf der Grauwasseranlage

| Monat | Wärmemenge 2018 | | | | | | | Wärmemenge 2019 | | | | | | | |
|---------------------|-----------------|---------------|--------------|--------------|---------------|---------------|---------------------|-----------------|---------------|--------------|--------------|---------------|---------------|---------------------|---------------|
| | AWT 1 | AWT 2 | AWT 3 | AWT 4 | AWT 2 + AWT 4 | gesamt | Stromverbrauch 2018 | AWT 1 | AWT 2 | AWT 3 | AWT 4 | AWT 2 + AWT 4 | gesamt | Stromverbrauch 2019 | |
| 1 | Januar | 900 | 400 | 500 | 1.100 | 1.500 | 2.900 | 755 | 1.400 | 434 | 547 | 907 | 1.341 | 3.288 | 917 |
| 2 | Februar | 800 | 300 | 300 | 900 | 1.200 | 2.300 | 604 | 1.200 | 404 | 503 | 539 | 942 | 2.645 | 740 |
| 3 | März | 900 | 300 | 400 | 1.100 | 1.400 | 2.700 | 668 | 1.300 | 437 | 542 | 1.141 | 1.578 | 3.420 | 988 |
| 4 | April | 900 | 300 | 400 | 1.100 | 1.400 | 2.700 | 861 | 1.200 | 410 | 527 | 987 | 1.397 | 3.124 | 910 |
| 5 | Mai | 800 | 265 | 419 | 1.174 | 1.439 | 2.658 | 798 | 1.300 | 433 | 561 | 1.018 | 1.451 | 3.313 | 954 |
| 6 | Juni | 600 | 200 | 259 | 945 | 1.145 | 2.004 | 604 | 1.200 | 412 | 507 | 525 | 938 | 2.645 | 795 |
| 7 | Juli | 300 | 139 | 169 | 751 | 890 | 1.358 | 481 | 700 | 315 | 362 | 718 | 1.033 | 2.095 | 657 |
| 8 | August | 500 | 173 | 206 | 905 | 1.078 | 1.784 | 568 | 1.000 | 364 | 408 | 508 | 871 | 2.279 | 694 |
| 9 | September | 800 | 360 | 342 | 844 | 1.204 | 2.346 | 692 | 1.000 | 341 | 406 | 855 | 1.195 | 2.601 | 762 |
| 10 | Oktober | 1.200 | 434 | 453 | 737 | 1.171 | 2.824 | 827 | 1.300 | 377 | 471 | 923 | 1.300 | 3.071 | 890 |
| 11 | November | 1.300 | 450 | 522 | 962 | 1.412 | 3.234 | 933 | 1.400 | 382 | 500 | 1.024 | 1.407 | 3.307 | 949 |
| 12 | Dezember | 1.400 | 437 | 539 | 696 | 1.133 | 3.073 | 910 | 1.300 | 385 | 498 | 1.061 | 1.447 | 3.245 | 957 |
| Jahressummen | | 10.400 | 3.757 | 4.510 | 11.215 | 14.971 | 29.881 | 8.702 | 14.300 | 4.695 | 5.832 | 10.206 | 14.900 | 35.032 | 10.213 |

Tabelle 5

Wasserbezüge, dargestellt für das Gesamtobjekt mit insgesamt 66 WE mit 28 WE sowie einer Kita

| Wasserbezüge | 2018 | 2019 | 2020 |
|-------------------------------------|----------|----------|----------|
| TW-Bezug vom städt. Wasserversorger | 5.276,00 | 5.691,00 | 6.530,00 |
| KW und WW für 66 WE | 5.187,46 | 5.459,94 | 6.161,02 |
| WW | 1.684,26 | 1.795,82 | 2.093,03 |
| 28 WE und Kita | | | |
| KW und WW | 2.034,95 | 2.008,31 | 2.861,01 |
| Kaltwasser | 1.256,25 | 1.247,36 | 2.027,98 |
| Warmwasser | 778,70 | 760,95 | 833,03 |
| Betriebswasser | 827,84 | 935,65 | 896,19 |
| gesamt | 2.862,79 | 2.943,96 | 3.757,20 |
| % TW-Einsparung | 28,9 | 31,8 | 23,9 |

Quelle: Betriebskostenabrechnung der ABG Frankfurt Holding

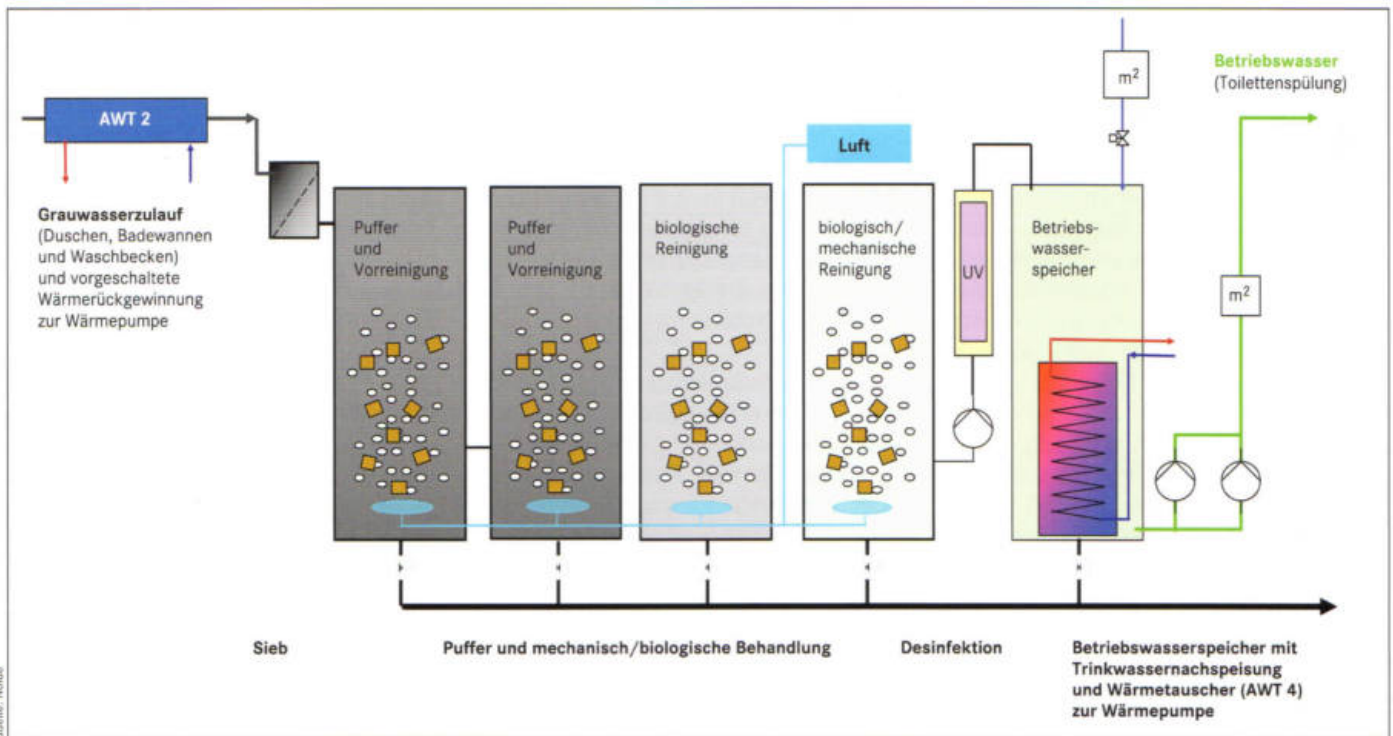
lich gewesen, was auch aus Gewährleistungsgründen in diesem Rahmen nicht möglich war.

Die Grauwasserrecyclinganlage wurde steuerungs- und softwaremäßig auf einen Tagesdurchsatz von 3.000 l/d ausgeliefert und ist nach dem aktuellen Grauwasseranfall bis 2019 nur zu 2/3 ihrer Nennleistung ausgelastet. Ein höherer Grauwasseranfall (durch z. B. höhere Wohnungsbelegungsraten usw.) würde die Wirtschaftlichkeit ohne technische Änderungen automatisch erhöhen. Selbst bei den zurzeit noch vergleichsweise niedrigen Frankfurter Wasserkosten in Höhe von 3,55 € pro Kubikmeter und entsprechenden Aufwendungen für Wartung und Reparaturen, lassen sich für das Grauwasserrecycling bei Investitions- und Installationskosten in Höhe von 23.300 € (netto ohne Wärmerückgewinnung) prinzipiell Amortisationszeiten von unter zehn Jahren realisieren.

Durch den niedrigen Grauwasseranfall besteht momentan noch ein gewisses, aber eher geringes Potenzial für Energieeinsparungen, indem die Belüftungszeiten der Wasseraufbereitung reduziert werden.

Weitere Optimierungen der Wärmeausbeuten scheinen durch veränderte Parametereinstellungen an der Wärmepumpensteuerung möglich, die ggf. durch weitere

installationstechnische Maßnahmen zu unterstützen wären. Hierzu wären experimentelle Veränderungen am Gesamtsystem der Wärmerückgewinnung erforder-



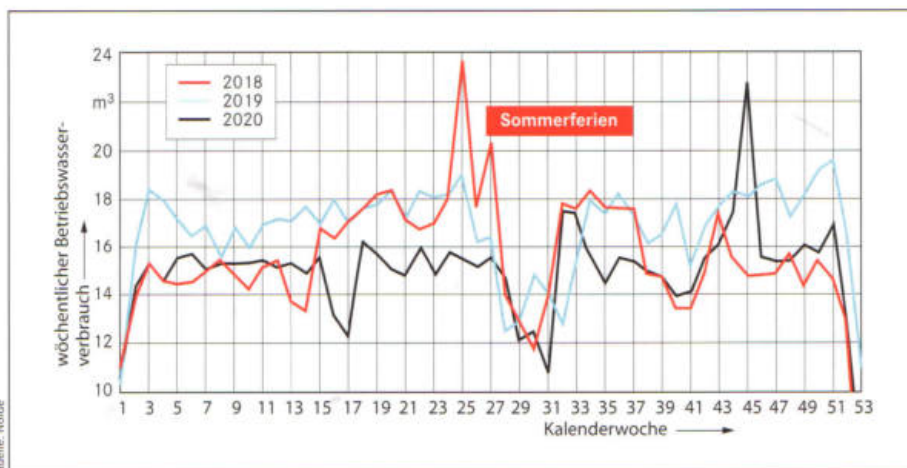
Quelle: Noelle

6 – Prinzip der Grauwasserrecyclinganlage mit nachgeschalteter Wärmerückgewinnung aus dem Betriebswassertank



Quelle: Noelle

7 – Blick in die biologische Grauwasseraufbereitungsstufe. Das Wirbelbett mit Schaumstoffwürfeln nach einer 15-jährigen Betriebszeit ohne bisherigen Austausch der Reinigungskörper



Quelle: Noelle

8 – Betriebswasserbedarf für die Toilettenspülwasserversorgung von 28 WE und einer Kita – dargestellt über die letzten 3 Jahre

Überlegungen zur Wirtschaftlichkeit

Jeder Mensch ist nach dem Wasserhaushaltsgesetz § 5 Abs. 2 dazu verpflichtet, eine mit Rücksicht auf den Wasserhaushalt gebotene sparsame Verwendung des Wassers sicherzustellen.⁷⁾ Insbesondere in Ballungsgebieten, die ihren Wasserbedarf nicht ausschließlich aus eigenen Ressourcen decken können, sind gerade im Kontext des Klimawandels und damit einhergehenden häufigeren und zugleich längeren Trockenzeiten enorme Investitionen seitens der Wasserindustrie erforderlich. Dies bringt Endverbraucher:innen eine Erhöhung der Wasserkosten in noch unbekannter Höhe.

Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen werden i. d. R. maßgeblich durch die Grenzen der Systembetrachtung und durch die Betrachtungszeiträume beeinflusst. Allein auf die momentan eingesparten Energie- und Wasserkosten zu schauen und Umweltaspekte auszuklammern, ignoriert die Agenda 2030, die zudem explizit dazu auffordert „zu Hause beginnen.“⁸⁾ Ferner verteuert seit Januar 2021 der neue CO₂-Preis das Heizen mit Öl und Gas. Auch wenn über dessen Höhe über das Jahr

7) <https://dejure.org/gesetze/WHG/5.html>

8) http://www.bmz.de/de/themen/2030_agenda/

2025 hinaus und die Aufteilung zwischen Mieter:innen und Vermietern noch Unklarheit besteht, muss der Bezug von Wasser und Energie reduziert werden; das ist dauerhaft nur durch Recyclingmaßnahmen zu erreichen.

Für die Wohnungswirtschaft stehen bisher lediglich die gesetzlich geforderten energetischen Klimaziele im Vordergrund. Wasserwirtschaftliche Vorgaben, etwa zum maximalen Wasserbezug, sind als Posten, die an die Mieter weitergegeben werden, bisher kaum Gegenstand der Überlegungen.

Für die ABG in Frankfurt stellt sich, nachdem die Investitionen für die Prototypen bereits getätigt wurden, zunächst die Frage, in welchem Verhältnis die realen Betriebs- und Wartungskosten zu den tatsächlich erzielten Einsparungen stehen, ob es sich künftig lohnt, auf Grauwasserrecycling mit Wärmerückgewinnung zu setzen und wenn ja, wie das zukünftige Konzept aussehen könnte. Dabei darf nicht nur der Zeitraum der Herstellergewährleistung gesehen, sondern die Gesamtlebenszeit von ca. 30 Jahren ebenso betrachtet werden.

Der laufende Wartungs- und Überwachungsaufwand, die Betriebsmittel für Strom, Chemikalien und den ggf. erforderlichen Austausch bzw. die Regenerierung von Anlagenkomponenten bestimmen neben erforderlichen Reparaturen die Wirtschaftlichkeit wesentlich.

Die Projektergebnisse zeigen, dass Wartungsintervalle von mehr als einem Jahr vertretbar sind, wenn die Anlage wie hier einem automatisierten Monitoring unterliegt, so dass jede Abweichung vom Normalbetrieb per Mail an den Betreiber versandt wird.

Wärmerückgewinnung und CO₂-Reduzierung

Durch die zurückgewonnenen jährlichen Wärmeerträge in Höhe von 35 MWh wird, unter dem Einsatz der Wärmepumpe und einem zusätzlichen Energieaufwand von 10 MWh, das Wasser auf ein Temperaturniveau von 40 °C gehoben. Der Wärmeentzug aus dem Abwasser entspricht etwa den Jahreserträgen einer ca. 100 m² großen Flachkollektor-Solarthermieanlage.

Mit Solarthermie werden zwar höhere Temperaturen erzeugt und die Warmwasserbereitung erfordert i. d. R. keine weitere Nacherwärmung. Allerdings liefert sie in den Wintermonaten, in denen besonders viel Wärme im Gebäude benötigt wird, nahezu keine Erträge. Speziell in den Sommern, wenn die höchsten Solarerträge erzielt werden und bei leicht erhöhten Kaltwassertemperaturen der Warmwasserbedarf sinkt (Bild 9), kann die erzeugte Wärme oft nicht genutzt werden. Demgegenüber werden bei der dezentralen Wärmerückgewinnung aus Abwasser gerade in den Wintermonaten die höchsten Erträge erzielt und die vorhandenen Wärmeenergiepotenziale effektiv ausgeschöpft.

Statt einer Solarthermieanlage wurde in diesem Projekt eine 10 kWp PV-Anlage installiert, die den Jahresstrombedarf für die Wärmerückgewinnung in Höhe von 9,75 MWh rechnerisch zu 89,3 % deckt. Im Zeitraum von Oktober bis Ende Februar muss jedoch ein nennenswerter Teil des Strombedarfs aus dem Netz bezogen werden, während von April bis September überschüssiger Strom ins Netz eingespeist wird (Tab. 6).

Zur Vorerwärmung des Warmwassers wurden 2018 insgesamt 45 MWh mittels Wärmepumpe aus dem häuslichen Abwasser bereitgestellt. Gegenüber der Erwärmung mit Erdgas wurden damit ein CO₂-Ausstoß von 10 t vermieden und Energiekosten in Höhe von 2.701 € gespart. Der Einsatz einer Wärmepumpe mit Netzstrom (Strommix) reduziert die CO₂-Emissionen um 61 % bei leicht erhöhten Energiekosten.

Der größte Nutzen ergibt sich, wenn die Wärmerückgewinnung aus Abwasser weitgehend durch Eigenstrom aus einer PV-Anlage gedeckt werden kann. Im Vergleich zur Erdgaslösung sinken die CO₂-Emissionen um 93 %.

Grauwasserrecycling

Auch wenn das Grauwasser direkt im Gebäude recycelt wird und damit lange Wege zur Kläranlage vermieden werden, sind allein durch kleinräumiges Grauwasserrecycling im Vergleich zur zentralen Wasserversorgung und Abwasserbehandlung nur geringe Energie- und CO₂-Einsparungen zu erwarten. Grund ist, dass die Qualität des Betriebswassers aus der hier vorgestellten Grauwasserrecyclinganlage wesentlich höher ist als aus einer kommunalen Kläranlage.

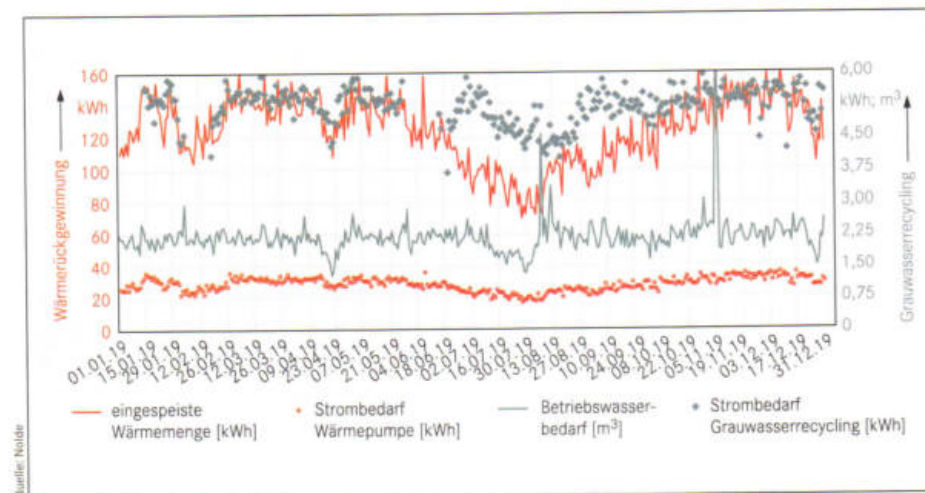
Durch Grauwasserrecycling wird weniger Trinkwasser benötigt und es muss entsprechend weniger Abwasser zentral aufbereitet werden. Dies entlastet die Gewässer qualitativ wie quantitativ, zumal die Grauwasseraufbereitung mittels Wirbelbettverfahren ohne Chemikalien auskommt.

Wasserspitzenbedarfe, die teuer durch die zentrale Infrastruktur abgefangen und i. d. R. aus dem städtischen Umland importiert werden müssten, werden durch Grauwasserrecycling deutlich reduziert. Kurzzeitige Verbrauchsspitzenwerte (z. B. Toilettengänge während der Pause im Fußballländerspiel) haben hier i. d. R. keine Auswirkungen mehr auf die zentrale Trinkwasserversorgung.

Neben der Umwelt profitieren auch Endkund:innen von geringeren Betriebskosten. Je mehr Wasser aufbereitet und wiederverwendet wird, je zuverlässiger die Recyclinganlage arbeitet, desto höher der Nutzen.

Online-Monitoring

Zur Effizienzsteigerung des Wasserrecyclings hat sich das Online-Monitoring bewährt. Betreiber sind so ständig über das Betriebsergebnis d. h. Betriebswasserbedarf (BW), Trinkwassernachspeisung (TWN), Gesamtstrombedarf (Strom) usw. informiert. Durch regelmäßige Aufwands-



9 - Jahresverlauf des Betriebswasserbedarfs der 28 WE, die mit Grauwasserrecycling ausgerüstet wurden. Stromverbrauch der Grauwasseranlage, eingespeiste Wärmemenge für 66 WE und der dafür erforderliche Energiebedarf für die Wärmepumpe.

Tabelle 6

Monatliche Betrachtung zum Energiebedarf, den CO₂-Emissionen unterschiedlicher Warmwasserbereitungsvarianten sowie einem Kostenvergleich. Energiepreise je kWh: Erdgas 0,06 €, Strom aus Strommix: 0,30 € und PV-Strom aus Eigenerzeugung: 0,10 €.

| 2018 | ermittelte Werte | | | | CO ₂ -Emissionen (kg) für Warmwasservorwärmung auf 40 °C | | |
|--|--------------------------------|--|----------------------------|---------------------------------------|---|---|---|
| | eingespeiste Wärme-menge (MWh) | PV-Anlage Ertrag aus 10 kWp (SAS 2017) (MWh) | Strom-bedarf für WRG (MWh) | Strom Zukauf (-) Überschuss (+) (MWh) | Erdgas-heizung (247 g CO ₂ /kWh) | Strom für WP nur aus Strom-mix (401 g CO ₂ /kWh) | WRG mit 10 kWp-PV (50 g CO ₂ /kWh) und Strommix (401 g CO ₂ /kWh) |
| Januar | 3,961 | 0,222 | 0,862 | -0,640 | 880 | 345,7 | 267,7 |
| Februar | 3,644 | 0,356 | 0,768 | -0,412 | 810 | 308,0 | 183,0 |
| März | 4,227 | 0,784 | 0,922 | -0,138 | 939 | 369,7 | 94,5 |
| April | 4,053 | 1,068 | 0,881 | 0,187 | 901 | 353,3 | -65,6 |
| Mai | 4,157 | 1,285 | 0,892 | 0,393 | 924 | 357,7 | -137,9 |
| Juni | 3,580 | 1,392 | 0,777 | 0,615 | 796 | 311,6 | -215,9 |
| Juli | 2,795 | 1,188 | 0,614 | 0,574 | 621 | 246,2 | -201,5 |
| August | 3,005 | 0,975 | 0,656 | 0,319 | 668 | 263,1 | -112,0 |
| September | 3,396 | 0,72 | 0,733 | -0,013 | 755 | 293,9 | 41,2 |
| Oktober | 3,884 | 0,449 | 0,836 | -0,387 | 863 | 335,2 | 177,6 |
| November | 4,243 | 0,181 | 0,916 | -0,735 | 943 | 367,3 | 303,8 |
| Dezember | 4,082 | 0,091 | 0,896 | -0,805 | 907 | 359,3 | 327,4 |
| Jahresbilanz | 45,027 | 8,711 | 9,753 | -1,042 | 10.006 | 3.911,0 | 662,4 |
| CO ₂ -Reduktion im Vergleich zur Erdgastherme (90 % Wirkungsgrad) | | | | | 0 % | -61 % | -93 % |
| Energiekosten für 45 MWh Wärme | | | | | 2.701,62 € | 2.925,90 € | 1.183,70 € |

und Ertragsmeldungen wird zudem bestätigt, dass die Fernverbindung nicht unterbrochen ist. Alle Daten werden in ein- oder zweiminütigen Intervallen auf einer SD-Karte gespeichert; im Servicefall ist eine zielsichere Prognose durch den Hersteller möglich.

Über einen gesicherten VPN-Zugang haben befugte Personen jederzeit Fernzugriff auf die Anlage. Alle elektrisch steuerbaren Aggregate können angesprochen, der aktuelle Anlagenzustand sekundengenau angezeigt und individuelle Programmoptimierungen vorgenommen werden. Im Störfall kann im Betriebsraum per WLAN eine Verbindung zum Hersteller aufgebaut werden, der ggf. die erforderlichen Anweisungen erteilt. Mit diesem Support können Wartungsarbeiten und Reparaturen auch von Handwerker:innen durchgeführt werden, die noch keine praktischen Erfahrungen mit der Technik haben.

Ähnlich komfortabel wurde der Fernzugriff auf die Wärmerückgewinnungsanlage realisiert. Die Steuerung der Grauwasser-

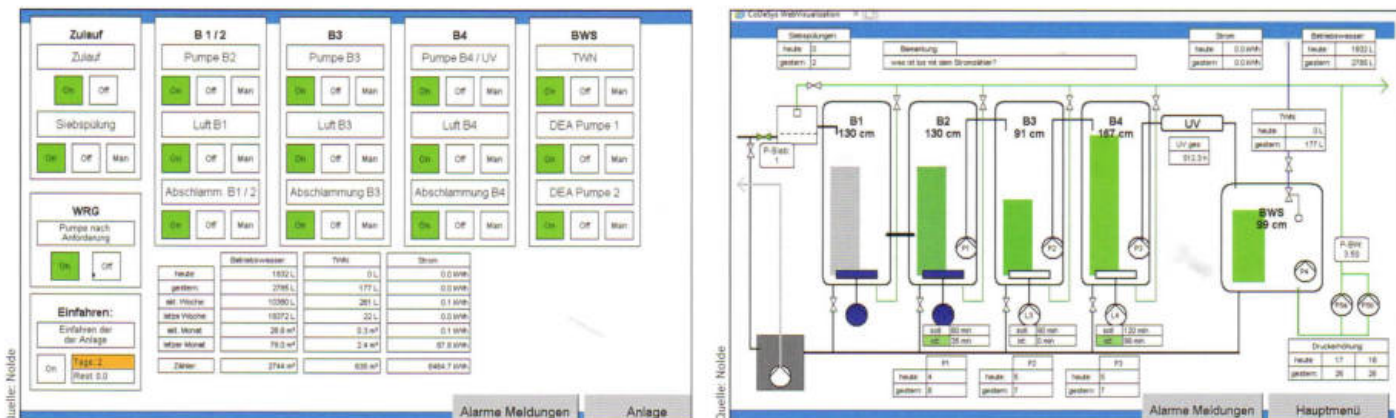
recycling- und der Wärmerückgewinnungsanlage sollten jedoch künftig auch aus Kostengründen in einer Einheit zusammengefasst werden.

Perspektivische Anlagenerweiterung

Reparaturen an der Wärmerückgewinnungs- und an der Grauwasserrecyclinganlage waren seit der Inbetriebnahme in 2016 bis zum Frühjahr 2021 nicht erforderlich. Dies spricht für ihre Zuverlässigkeit. An der Grauwasserrecyclinganlage war in den vier Betriebsjahren eine einzige Anlagenwartung erforderlich (Ende 2018), bei der sie umfassenden Funktionstests unterzogen wurde (Materialkosten 150 €, Lohnkosten 450 € zzgl. Fahrkosten, die den größten Teil der Gesamtrechnung ausmachten). Durch den Betrieb der Grauwasserrecyclinganlage sinken der Trinkwasserbedarf in den 28 mit Betriebswasser versorgten Wohnungen um ca. 30 % und die Betriebskosten jährlich um ca. 2.000 €. Dies ist aus Sicht von Nutzer:innen

ein deutliches Signal, die Forschungsanlage weiterhin zu betreiben.

Auf Basis der in diesem Forschungsprojekt gewonnenen Erkenntnisse würde man künftig sicher alle 66 Wohnungen mit der getrennten Erfassung des Grauwassers aus Badewannen, Duschen, Handwaschbecken und Waschmaschinen ausrüsten. Die Grauwasserrecyclinganlage für ca. 200 Bewohner wäre etwas größer als die Versuchsanlage und würde eine reine Stellfläche von ca. 25 m² benötigen. Sie hätte eine Aufbereitungsleistung von etwa 8 m³/d und würde die Bewohner:innen mit einem hochwertig aufbereitetem Betriebswasser versorgen, das sich qualitativ nur geringfügig vom Trinkwasser unterscheidet. Dieses würde in erster Linie für die Toilettenspülung verwendet und darüber hinaus auch zum Wäschewaschen angeboten werden. Überschüssiges Betriebswasser würde für die Bewässerung des Gründachs bzw. der Gartenanlagen und für Reinigungszwecke verwendet. Damit würde sich der Trinkwasserbezug gegen-



10 – Screenshots zur Fernsteuerung der Grauwasserrecyclinganlage

über dem bundesweiten Durchschnitt um ca. 40 % reduzieren.

Die Mehrkosten für zusätzliche Leitungen (Grauwassersammel- und Betriebswasserleitungen sowie die Grauwasserrecyclinganlage mit Wärmepumpe inkl. Installation und Inbetriebnahme) liegen im Bereich um 2.000 €/WE bzw. 20 €/m² Wohnfläche.

Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen der Forschungstätigkeiten wurden unterschiedliche Varianten der Wärmerückgewinnung aus häuslichem Abwasser untersucht. Diese waren gemeinsam an eine 7,7 kW Wärmepumpe mit einer JAZ von 4,43 angeschlossen.

Ein 12 m langer Rohrwärmetauscher (AWT 1), der mit dem gesamten Abwasser von 38 WE (3.492 m² WF) beschickt wurde, erzielte einen Wärmeertrag von nur 2,75 kWh/m³ Abwasser bzw. 4,63 kWh/a pro m² Wohnfläche. Die Untersuchungen zeigten, dass eine etwas stärkere Abkühlung etwa durch eine Verlängerung des Wärmetauschers technisch prinzipiell möglich ist. Dabei besteht jedoch die Gefahr, dass abgekühlte Fettanteile sich an der Rohrwand anlagern, den Wärmeübergang verschlechtern und damit den Wartungsbedarf erhöhen.

Die deutlich effizientere Variante basiert auf einer getrennten Erfassung der Abwasserteilströme aus 28 WE (2.676 m² Wfl.). Hier wurden einerseits die Toiletten-, Waschmaschinen- zusammen mit dem Küchenabwasser und andererseits das Grauwasser aus Badewannen, Duschen und Handwaschbecken aus 28 WE getrennt erfasst und durch jeweils 6 m lange Rohrwärmetauscher geleitet. Der höhere Wärmeertrag mit 4,29 kWh/m³ wurde im Grauwasserstrang ermittelt. Das aufbereitete Grauwasser ist bereits rein optisch kaum vom Trinkwasser zu unterscheiden, und

selbst nach vier Jahren wurden nur unwesentliche Ablagerungen an dem im Betriebswassertank installierten, äußerst kompakten Wellrohrwärmetauscher festgestellt. Sie zu entfernen, war bisher nicht notwendig. Die Wärmeentnahme aus zuvor behandeltem Grauwasser lieferte einen Ertrag von 14,4 kWh/m³. Der Wärmeentzug aus Grauwasser betrug in diesem Pilotprojekt insgesamt 6,32 kWh/a pro m² Wohnfläche; das Wärmepotenzial (aus Badewanne, Dusche und Handwaschbecken) könnte jedoch bei einer Abkühlung um insgesamt 20K auf 8,1 kWh/a/m² optimiert werden. Weitere Wärmeressourcen ließen sich durch zusätzliche Grauwasserquellen wie etwa die Waschmaschinen generieren. Damit käme man auch der CO₂-neutralen Warmwasserbereitung schrittweise näher.

In einem ähnlichen Projekt mit 4.600 m² Wohnfläche in Berlin wird die Grauwasserwärme (hier nur aus Badewannen und Duschen) ohne Wärmepumpe – lediglich über Wärmetauscher – mit einer kleinen Umwälzpumpe gewonnen, um das kalte Trinkwasser auf 25 °C vorzuwärmen, bevor es in einem BHKW auf über 60°C Endtemperatur erhitzt wird. Mit diesem „einfachen“ System wurden 2020 insgesamt 15.345 kWh Wärme eingespart. Das entspricht mit 3,33 kWh/a/m² also etwa einem Drittel des Warmwasserwärmebedarfs.⁹⁾

Kritische Stimmen aus der Wohnungswirtschaft weisen teils zu Recht darauf hin, dass durch höhere Investitionen auch die Kaltmiete ansteige, die für moderne, anspruchsvolle Wohnungen in Frankfurt/Main bei 15 €/m² liegt.

Dem ist entgegenzuhalten, dass die Grauwasserrecyclingversuchsanlage allein durch den Einsatz von Betriebswasser zur Toilettenspülung eine Trink- und Abwasserwassereinsparung von durch-

schnittlich 30 % erzielte, ohne hygienisches Risiko oder Komfortverlust. Die Einsparungen an Wasser- und Energiekosten von ca. 3 €/m²/a sind deutlich höher als die u. U. höhere Kaltmiete in Höhe von ca. 1 €/m²/a.

Die Wärmerückgewinnung generiert weitere finanzielle Einsparungen und leistet einen maßgeblichen Beitrag zur Reduzierung der CO₂-Emissionen bei der Warmwasserbereitung. Die tatsächlichen Einsparungen können je nach Gebäudetyp und Nutzungsverhalten individuell etwas schwanken. Entscheidend ist, dass der damit verbundene Betriebsaufwand für Energie und insbesondere der Wartungsaufwand gering und die Anlage resistent gegen Störstoffe ist.

Es ist leider nie völlig auszuschließen, dass Feststoffe wie Haarknäuel und -zöpfe, Q-Tips, Teile von Kinderspielzeug, Rückstände von Bastelarbeiten, aber auch flüssige Substanzen wie Badeöle, Reinigungsmittel usw. in haushaltsunüblichen Mengen bewusst oder versehentlich eingeleitet werden. Das hier vorgestellte Wirbelbettverfahren mit Schaumstoffwürfel als Trägermaterial hat sich jedoch seit 15 Jahren selbst dort bewährt, wo ständig fetthaltige Küchenabwässer mit dem übrigen Grauwasser behandelt wurden. Bislang war an keiner der Anlagen ein Austausch der Reinigungskörper erforderlich.

Grauwasserrecycling und Wärmerückgewinnung sind noch kein Serienprodukt, stellten aber hier ihre Zuverlässigkeit erneut unter Beweis. Beide Verfahren tragen bei vergleichsweise geringen Investitionskosten von einmalig ein bis zwei Monatsmieten deutlich zur Umweltentlastung und zugleich zur Reduzierung der Betriebskosten bei und sollten deshalb zur Standardausstattung im mehrgeschossigen Wohnungsbau gehören.

MEHR DRIN...



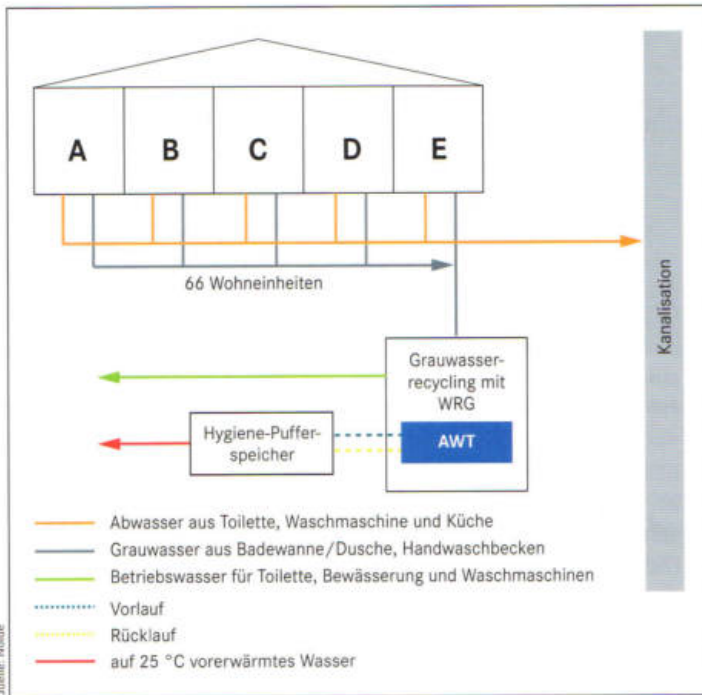
mobiheat
mobile Wärme



ALS MAN DENKT...

Mobile Wärme
Jetzt unverbindlich
Sofortangebot online anfordern!

www.mobiheat.de
info@mobiheat.de
Tel.: 0 821 710 11 - 0



11 – Empfehlung – basierend auf den Forschungsergebnissen für ein weitgehend identisches Projekt im mehrgeschossigen Wohnungsbau mit 66 WE

Hemmnisse abbauen

Seitens der Wasserwirtschaft behaupteten einige Kritiker:innen anlässlich des Weltwassertags, dass Grauwasserrecycling ein Schritt zurück ins Mittelalter oder dezentrales Wasserrecycling unwirtschaftlich sei.¹⁰⁾ Keiner von ihnen zeigte jedoch Alternativen zum energie- und kostensparenden Umgang mit den knapper werdenden Wasserressourcen und der Umsetzung der SDGs der UNO.

Die Investitionskosten für Grauwasserrecyclinganlagen werden bei Serienfertigung vermutlich ähnlich sinken wie die von PV-Anlagen. Zugleich steigen die Wasserkosten bereits seit Jahren und der CO₂-Preis wird auch die Energiekosten beeinflussen.

Mit Blick auf die SDGs und die nationale Agenda 2030 gehört zur richtigen politischen Weichenstellung, dass in Neubauten Grauwasser stets getrennt vom Toilettenabwasser erfasst wird und dessen Recyclingpotenziale bezüglich Wasser und Energie entsprechend genutzt werden. Städte brauchen Wasserspeicher für die Bewässerung von Bäumen und Grünanlagen im öffentlichen Raum und Wasser für begrünte Dächer und Fassaden.¹¹⁾

Einer breiten Einführung von Grauwasserrecycling mit integrierter Wärmerückgewinnung steht technisch nichts im Weg. Wohnungsgenossenschaften haben die Vorteile auch für Nutzer:innen erkannt, legen die Investition auf die Kaltmiete um und reduzieren so die Betriebskosten. Andere Investoren scheuen dies noch, da sie

keinen sofortigen finanziellen Nutzen erkennen.

Als Defizite sind zudem die mangelnde Erfahrung vieler Planender und Handwerksbetriebe und der generelle Fachkräftemangel zu beklagen, daher sind Weiterbildungsmaßnahmen und Initiativen der Nachwuchsgewinnung dringend gefordert.

Danksagung

Der Autor dankt der Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU), die die Untersuchung unter dem AZ 34056701 fördert, Herrn Köhler von der ABG Frankfurt Holding sowie Frau Kunkel von der ABGnova GmbH für die kooperative Zusammenarbeit.



9) <https://www.dbu.de/OPAC/ab/DBU-Abchlussbericht-AZ-28201.pdf>

10) <https://www.bdew.de/presse/presseinformationen/wiederverwendung-von-grauwasser-ware-ruckschritt-ins-mittelalter/>

11) Harting, M.: Wasserspeicher anlegen, Gärten weniger bewässern
<https://www.faz.net/aktuell/rhein-main/region-und-hessen/folgen-des-klimawandels-staedte-sollen-wasserspeicher-anlegen-16789168.html>