Sachbericht zum Verwendungsnachweis Teil II

Eingehende Darstellung

Verbundname:

FLEXIBLE UTILITY – MIT SOZIO-TECHNISCHER FLEXIBILISIERUNG ZU MEHR KLIMARESILIENZ UND EFFIZIENZ IN DER STÄDTISCHEN INFRASTRUKTUR – UMSETZUNGSPHASE

Teilvorhaben:

Dezentrale Trinkwasserzwischenspeicher und Klimaresilienzbewertung technischer Infrastrukturen

(FLEXITILITY | AP1, AP6, AP7)

Ausführende Stelle	Brandenburgische Technische Universität Cottbus-Senftenberg Platz der Deutschen Einheit 1 03046 Cottbus Fachgebiet Infrastruktur und Mobilitätsplanung Fachgebiet Wassertechnik und Siedlungswasserbau
Förderkennzeichen	FKZ 01LR2019C
Laufzeit des Vorhabens	01.10.2022 bis 28.02.2025

Ansprechpartner

Prof. Dr.-Ing. Christine Eisenmann
Tel.-Nr. +49 (0) 355 69 3100
Christine.Eisenmann@b-tu.de

Cottbus, im August 2025

Bearbeitung

Jörg Walther

Volker Preuß

Max Wilhelm Theka

Carl Hertam

Philip Hammel

David Hoffmann

Inhaltsverzeichnis - lang

A. Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse 3

A.1 Zielsetzung des Vorhabens 3
A.2 Durchgeführte Arbeiten im AP 1 4
A.2.1 Ausführungsplanung und Errichtung, Inbetriebnahme und Erprobung (TAP 1.1) 4
A.2.2 Versuchsbetrieb (TAP 1.2) 20
A.2.3 Datengewinnung,-aufbereitung, -integration und –verwertung (TAP 1.3) 30
A.2.4 Systemeinbindung und –management (TAP 1.4) 32
A.2.5 Ökonomische Bewertung (TAP 1.5) 38
A.2.6 Mikrobielles Monitoring und Bewertung (TAP 1.6) 45
A.2.7 Rückbau und Anlagenverwertung nach Ablauf der Umsetzungsphase (TAP 1.7) 45
A.3 Durchgeführte Arbeiten im AP 6 46
A.3.1 Überprüfung und Justierung (TAP 6.1) 46
A.3.2 Erprobung und Bewertung (TAP 6.2) 48
A.3.3 Bewertung mit verändertem Bilanzgrenzen (TAP 6.3) 55
A.4 Durchgeführte Arbeiten im AP 7 56
A.5 Zusammenfassung der Erkenntnisse 57

B. Die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises 60

C. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit 60

D. Verwertungsplan 61

E. Während der Durchführung bekannt gewordene Fortschritte 61

F. Erfolgte und geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse 62

G. Literaturverzeichnis 63

Der vorliegende Teilprojektbericht enthält gegenüber den durch das Teilprojekt bereitgestellten Beiträgen eine weitergehende Erläuterung der durchgeführten Arbeiten.

A. Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse

A.1 Zielsetzung des Vorhabens

Aufbauend auf den in der Forschungs- und Entwicklungsphase getätigten Überlegungen zur technischen Planung und Auslegung der dezentralen Trinkwasserzwischenspeicher wurde in der Umsetzungsphase von FLEXIBLE UTILITY im Rahmen dieses Teilprojektes der Bau und Betrieb praktisch erprobt und Daten zur Technik und Ökonomie erhoben bzw. erstellt. Die Versuchsanlagen bildeten den Rahmen für die Durchführung eines mikrobiellen Monitorings der Speicher und der Pumpentechnik.

Im Detail sollten folgende Forschungsfragen beantwortet werden:

- Welche Wirkung entwickeln Zwischenspeicher in Hinblick auf den Ausgleich nachfragebedingt induzierter Nachfrageschwankungen im öffentlichen Versorgungsnetz?
- Welche Kosten entstehen im Anlagenbetrieb und wie können diese reduziert werden?
- Welche optimale Größe der Zwischenspeicherlösung resultiert daraus?
- Welche Mindestanforderungen an den Druck und die Leistung von Hausanschlüssen der öffentlichen TW-Versorgung bestehen bei einem Betrieb von Zwischenspeicherlösungen?
- Über welchen Zeitraum kann die Versorgung der Objekte bei klimabedingt reduzierter Trinkwassereinspeisung aus dem öffentlichen Netz durch den Betrieb der Zwischenspeicherung aufrechterhalten werden? (Wirkung auf objektbestimmte Bewältigungskapazität)

Durch die Anwendung der in den Versuchsanlagen erhobenen Messdaten in der Modellierung des Gesamtnetzes (siehe AP2) sollte abschließend bewertet werden, unter welchen Rahmenbedingungen der erwartete Nutzen der Anlagen die entstehenden Kosten überwiegt.

Ein zweiter Untersuchungsschwerpunkt lag in der Erprobung des in der FuE-Phase entwickelten Bewertungsmodells „Klimaresilienz technischer Infrastruktur“. Im Fokus

sollten die Überprüfung, Justierung und ggf. Weiterentwicklung des Modells anhand der im Projekt gewonnenen Messdaten aus der Trinkwasserversorgung liegen.

Weiterhin leistete das Teilprojekt Zuarbeiten zu den Arbeitspaketen 2 und 7, die primär der Verzahnung der Prozesse und der Verwertung der Erkenntnisse dienen.

A.2 Durchgeführte Arbeiten im AP 1

A.2.1 Ausführungsplanung und Errichtung, Inbetriebnahme und Erprobung (TAP 1.1)

Zielstellung:

Das TAP 1.1 „Ausführungsplanung und Errichtung, Inbetriebnahme und Erprobung“ beschäftigte sich mit der konkreten Umsetzung des Konzepts der Trinkwasserzwischenspeicheranlagen in Form von Pilotanlagen an den von der Stadt Herzberg zur Verfügung gestellten Standorten “Rathaus” und “Fahrzeugdepot der Freiwilligen Feuerwehr”. Des Weiteren beinhaltete dieses TAP die Durchführung von Durchflussmessungen an prinzipiell für Trinkwasserzwischenspeicher geeigneten Standorten wie Mehr- und Einfamilienhäusern, welche als virtueller Standort simuliert wurden. Die technische Planung der Anlagen, die Beschaffung der Komponenten, der Anlagenbau sowie deren Überwachung erfolgten durch die BTU in enger Absprache mit dem TZW Dresden, um die hygienische Unbedenklichkeit der Anlagen zu gewährleisten.

A.2.1.1 Versuchsanlage Rathaus

Anlagenstandort und Gegebenheiten vor Ort:

Der erste Pilotanlagenstandort ist das Rathaus der Stadt Herzberg (Elster). Der Standort wurde bei einem Vorortstermin am 17.11.2022 untersucht. Die für die Auslegung von Standort 1 wichtigen Parameter wurden bei dem obigen Termin geklärt und dokumentiert:

- TW-Nutzung am Standort 1 besteht aus:
  - Rathaus Herzberg ([aus Datenschutzgründen entfernt] Mitarbeiter)
  - Restaurant „Trattoria il Frattelli“
  - öffentliche Toiletten

- Aufnahme der am Standort vorhandenen Abnahmearmaturen (siehe Tabelle 1), diese werden für die Pumpenauslegung benötigt.
- Öffnungszeiten:
    - Rathaus Herzberg: montags bis donnerstags von 08:00 bis 17:00 Uhr und freitags von 08:00 bis 12:00 Uhr
    - Restaurant „Trattoria il Frattelli“: dienstags bis sonntags von 11:00 bis 23:00 Uhr
    - Öffentliche Toiletten: zu den Öffnungszeiten des Rathauses
- Das Rathaus und die öffentlichen Toiletten werden über denselben Anschluss mit Kalt- und Warmwasser versorgt.
- Die Pizzeria bezieht über diesen Anschluss nur ihr Warmwasser.

Als Anlagenstandort wurde der Rathauskeller ausgewählt, da hier optimale Bedingungen herrschen:

- dunkel
- kühl
- abschließbar
- verfügt über einen Strom- und Internetanschluss

Im Rathauskeller besteht die Möglichkeit, über einen Wasserzähler die über den Hausanschluss verteilten Wassermenge zu ermitteln.

Anlagenauslegung und Bau:

Der Keller wurde über eine schmale und gewundene Treppe erreicht. Die maximale Kellerhöhe betrug 2 m. Die Kellerdecke war bogenförmig. Um die Behälter der Anlage dimensionieren zu können, war es erforderlich gewesen festzulegen, welche maximalen Maße diese besitzen konnten, um bis in den Keller transportiert zu werden. Aus den vor Ort durchgeführten Messungen ergab sich, dass die Behälter maximal 130 cm lang, 130 cm hoch und 70 cm breit sein durften. Für die Dimensionierung der benötigten Behälteranzahl war es weiter notwendig gewesen, den mittleren Tagesbedarf für den Standort zu ermitteln. Hierfür wurden Angaben des örtlichen Wasserversorgers verwendet. Aus jährlichen Ablesungen des verbauten Wasserzählers konnte der mittlere Tagesbedarf auf 2,5 m^3 abgeschätzt werden.

Bei einer Marktrecherche konnten keine Behälter gefunden werden, welche ausreichend Volumen fassen konnten, in den Keller passten und über eine Trinkwasserzulassung

verfügten. Daher wurde der Beschluss gefasst, die Zentralwerkstatt der BTU Cottbus-Senftenberg mit dem Bau selbst entwickelter Behälter zu beauftragen. Insgesamt wurden vier Behälter mit einem maximalen Füllvolumen von jeweils 750 l an der BTU gebaut. Die Behälter bestanden aus 2 mm dickem Edelstahlblech. Sie waren 1000 mm lang, 1250 mm hoch und 600 mm breit. Die Behälterdeckel waren mit einer Be- und Entlüftung versehen.

Um die zur Anlage gehörenden Pumpen dimensionieren zu können, war es notwendig gewesen, den zu erwartenden Spitzenvolumenstrom und die Pumpenförderhöhe zu berechnen. Anhand der vor Ort vorhandenen Entnahmeapparaturen (siehe Tabelle 1) konnte mit Hilfe der DIN 1988-300 und der DIN EN 806-3 ein zu erwartender Spitzenvolumenstrom von 5 m³/h sowie die notwendige Pumpenförderhöhe von 35 m berechnet werden. Dieser Wert wurde anschließend mit dem am Standort vorherrschenden Ruhedruck abgeglichen. Dieser lag zwischen 3,0 bar (≙ 30 m) und 4,0 bar (≙ 40 m). Schließlich wurde die Pumpe auf eine Förderhöhe von 35 m ausgelegt. Nach einer einschlägigen Recherche wurde die Pumpe Comfort-Vario COR-1 MHIE 403-GE der Firma Wilo ausgewählt.

Verbraucher	Entnahmeapparatur	Anzahl
Rathaus	Auslaufventil ohne Strahlregler[1]	1
	Küchenspüle	2
	Urinal	3
	Waschbecken	7
	WC mit Spülkasten	7
Restaurant[2]	Geschirrspüler	2
	Küchenspüle	4
	Urinal	2
	Waschbecken	5
	WC mit Spülkasten	5
Öffentliche Toiletten	Urinal	3
	Waschbecken	3
	WC mit Spülkasten	4

Tabelle 1: Entnahmearmaturen Standort 1 Rathaus

[1] Der zum Rathaus gehörende Entnahmehahn zur Bewässerung von Grünflächen wurde als Auslaufventil ohne Strahlregler DN 15 bestimmt.

[2] Für die Pizzeria werde die angegebenen Entnahmeapparaturen vermutet.

Aufbau der Pilotanlage Rathaus:

Die Anlage bestand aus vier offenen Edelstahlbehältern mit einem maximalen Volumen von jeweils 750 l und einer Druckerhöhungspumpe des Typs Comfort-Vario COR-1 MHIE 403-GE der Firma WILO. Der grundlegende Aufbau der Anlage war in Abbildung 1 dargestellt. Die verbauten Komponenten und deren Funktion waren in Tabelle 2 aufgelistet. Die Befüllung und Entleerung der Anlage wurde über motorgetriebene Kugelhähne (DWH und ZWH) und eine speicherprogrammierbare Steuerungseinheit (SPS-Anlage) vom Typ Siemens-LOGO! automatisch geregelt. Insgesamt verfügte die Anlage über zwei motorgetriebene Dreiwegehähne (DWH) und einen motorgetriebenen Zweiwegehahn (ZWH). Zur Erfassung des Wasserverbrauches und der Befüllung waren zwei Ultraschall-Wasserzähler (UWZ) in der Verrohrung der Anlage integriert. Zur Steuerung und Regelung waren im Behälter 1 und im Behälter 4 jeweils zwei Schwimmschalter (SS) installiert.

Die im Behälter 4 installierten Schwimmschalter (SS) regelten den Trockenlaufschutz sowie den Beginn des Nachfüllvorganges. Mittels der im Behälter 1 verbauten Schwimmschalter (SS) wurde der Nachfüllvorgang beendet und der Überlaufschutz ausgelöst. In jedem Behälter war ein Probeentnahmehahn (PH) und ein Temperaturfühler (TF) verbaut. Ebenso befanden sich im Zu- und Ablauf der Anlage jeweils ein Probeentnahmehahn (PH). Diese dienten der Überwachung des hygienischen Zustandes der Pilotanlage und wurden vom TZW betreut.

Weiterhin verfügte jeder Behälter über ein Be- und Entlüftungsventil und einen Deckel. Zur Veranschaulichung des in den vier Behältern vorherrschenden Wasserstandes war an Behälter 4 eine Füllstandsanzeige angebracht. Alle verbauten Sensoren, Schalter und Messgeräte waren an die Siemens-LOGO! (SPS-Anlage) angeschlossen. In der Entnahmeleitung des Behälters 4 sowie zwischen den Behältern 2 und 3 befanden sich insgesamt drei Absperrklappen (AK), welche händisch bedient werden konnten. Die Behälter 1 und 2 sowie die Behälter 3 und 4 waren durch jeweils einen Kompensator (K) miteinander verbunden.

Komponente	Kürzel	Anzahl	Funktion
speicherprogrammierbare Steuerungseinheit Typ Siemens LOGO!	SPS-Anlage	1	Steuerung und Regelung, Speicherung der Messdaten
motorgetriebene Dreiwegehähne	DWH	2	Befüllung und Entleerung
Motorgetriebener Zweiwegehahn	ZWH	1	Befüllung
Schwimmschalter	SS	4	Steuerung und Regelung
Kompensator	K	4	Abfangen von Vibrationen
Absperrventil	AK	3	Steuerung des Durchflusses durch die Rohrleitung
Ultraschall-Wasserzähler Typ HDRUS 2.0	UWZ	2	Erfassung der Füll und Entnahmevolumina
Probeentnahmehahn	PH	6	Überwachung des hygienischen Zustandes
PT 100 Temperaturfühler	TF	4	Erfassen der Wassertemperatur in den einzelnen Behältern

Tabelle 2 Komponenten der Rathausanlage

Funktionsweise der Rathausanlage:

Während des Normalbetriebes entnahm die Pumpe das für das Rathaus benötigte Trinkwasser aus den vier installierten Behältern. Es kam dazu, dass sich die Behälter im Verlauf des Tages entleerten. Wurde ein Mindestfüllstand im ersten Behälter unterschritten, so löste der erste in Behälter 1 verbaute Schwimmschalter (SS1) ein Signal aus und öffnete den Zweiwegehahn (ZWH1), um ein Nachströmen von Wasser aus dem öffentlichen Versorgungsnetz einzuleiten. Der Behälter wurde aufgefüllt. Wurde im ersten Behälter ein Maximalfüllstand erreicht, so sendete der zweite Schwimmschalter (SS2) ein Signal an den Zweiwegehahn (ZWH1), um diesen zu schließen.

Sollte das Maximalbetriebsniveau zwischen 01:00 Uhr und 02:00 Uhr noch nicht erreicht gewesen sein, so öffnete über eine Zeitschaltuhr der Zweiwegehahn (ZWH1), um die Behälter bis zum maximalen Betriebsniveau aufzufüllen. Um ein Überlaufen der Behälter zu verhindern, war im vierten Behälter ein Überlaufschutz in Form eines Schwimmschalters (SS4) installiert. Wurde ein Maximalniveau unterhalb der Behälteroberkante überschritten, schlossen die Motorarmaturen (DWH und ZWH) und entkoppelten die Anlage so vollständig. Der Nachfüllvorgang wurde beendet und das Rathaus wurde wieder direkt über das öffentliche Trinkwassernetz versorgt. Anschließend musste das überflüssige Wasser mit Hilfe einer Söffelpumpe aus der Anlage entfernt werden.

Für den Fall, dass Wasser aus den Behältern austrat, war im Rathauskeller ein Feuchtigkeitsmessgerät installiert. Im Leckagefall wurde ein akustisches Warnsignal ausgelöst und die Anlage über die Dreiwegehähne (DWH1 und DWH2) entkoppelt.

Um zu verhindern, dass die eingesetzte Pumpe trocken lief und dadurch erheblich geschädigt wurde, war es vonnöten gewesen, einen Trockenlaufschutz zu integrieren. Hierfür war ein zweiter Schwimmschalter (SS3) in den vierten Behälter installiert worden. Dieser leitete ein Signal an die beiden Dreiwegehähne (DWH), um die Anlage zu entkoppeln und eine Versorgung des Rathauses durch das öffentliche Trinkwassernetz wiederherzustellen. Im Anschluss wurde die Pumpe ausgeschaltet.

Die Funktionsweise der Rathausanlage ist in der Abbildung 1 dargestellt. Die entsprechenden Füllniveaus mit den dazugehörigen Schwimmschaltern sind in der Abbildung 2 dargestellt.

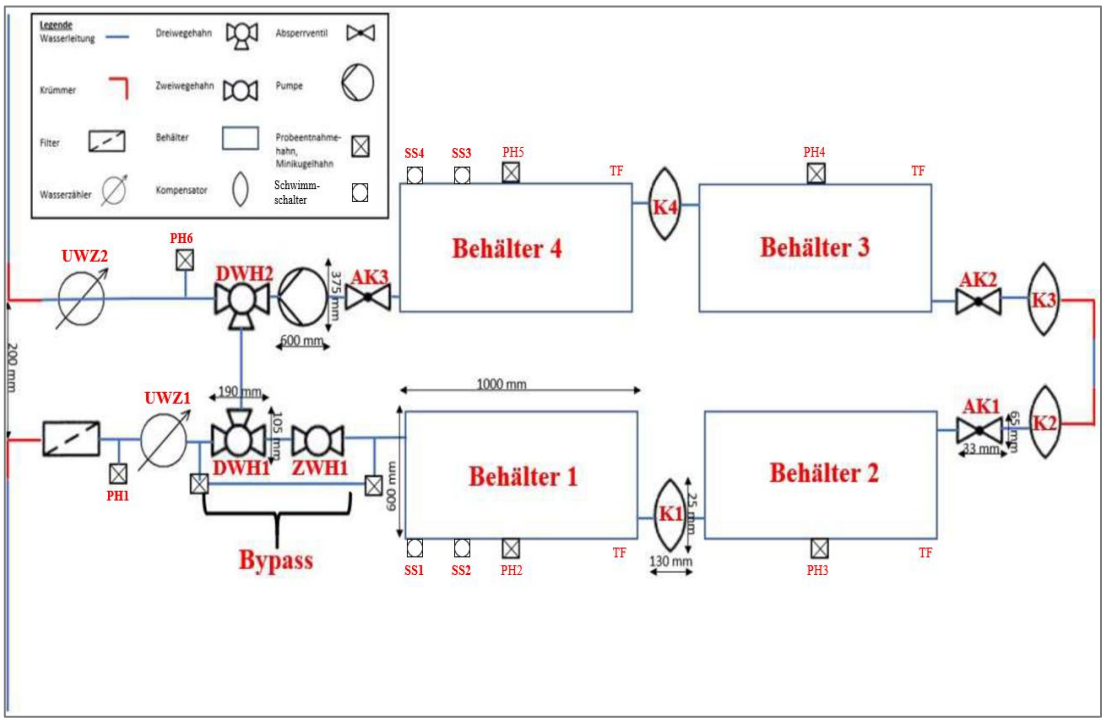


Abbildung 1: Aufbau der Rathausanlage, Quelle: eigene Darstellung

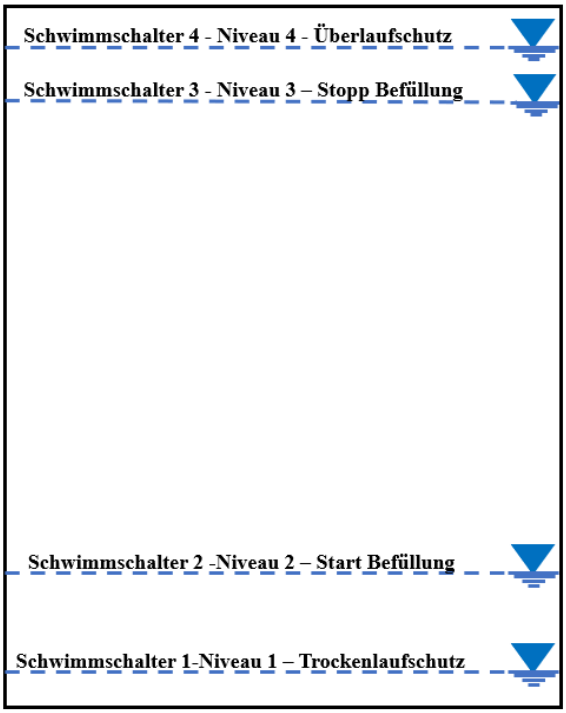


Abbildung 2 Füllniveaus der Rathausanlage, Quelle: eigene Darstellung

Probebetriebe und Montage:

Vor dem Beginn des eigentlichen Versuchsbetriebes wurde die Pilotanlage im Technikum der BTU aufgebaut, um einem Probebetrieb zu durchlaufen. Über insgesamt vier Wochen wurde die Funktionstüchtigkeit der Anlage getestet, die Steuerung und die Regelung optimiert, sowie mögliche Havariefälle und das Vorgehen bei diesen simuliert.

Die Erkenntnisse des Probebetriebes wurden in einer Anlagenbeschreibung mit konkreten Handlungsanweisungen zusammengetragen.

Anschließend wurde die Anlage mittels Wasserstoffperoxids desinfiziert, demontiert und im November 2023 nach Herzberg transportiert. Am 30. November 2023 konnte nach erfolgreicher Montage der Pilotanlage mit dem Versuchsbetrieb begonnen werden.

Beispiel Lastprofil:

In der Abbildung 3 ist ein typisches Lastprofil des stündlichen Wasserverbrauches des Versuchsstandortes Rathaus zu sehen.

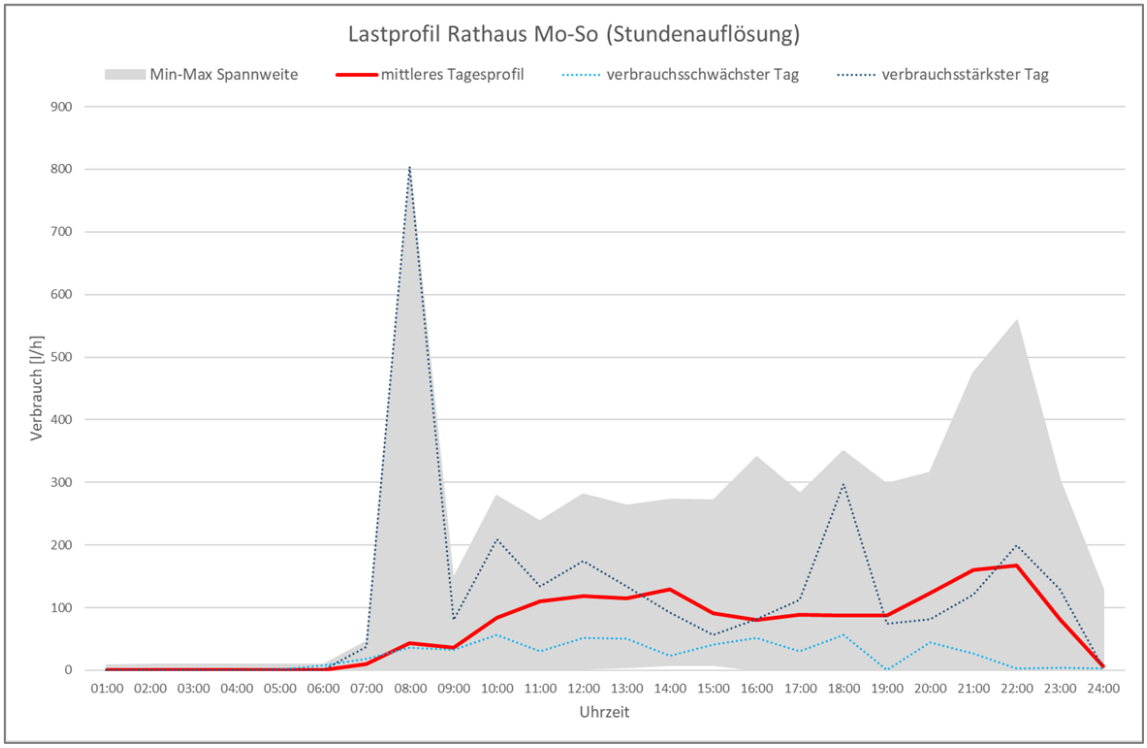


Abbildung 3 Spezifisches Lastprofil der Pilotanlage im Rathaus, Quelle: eigene Darstellung

A.2.1.2 Versuchsanlage Feuerwehr

Als zweiter Standort für eine Pilotanlage wurde die Freiwillige Feuerwehr Herzberg gewählt. Anders als die Pilotanlage am Standort Rathaus dient die Versuchsanlage im Rathaus nicht der Trinkwasserversorgung.

Da die Feuerwehr die Löschfahrzeuge ausschließlich zur Brandbekämpfung und nicht für die Notfalltrinkwasserversorgung der Bevölkerung verwendet, ist das in der Anlage zwischengespeicherte Wasser als Brauchwasser einzustufen und musste keine Trinkwasserqualität erreichen. Zu Erfüllung dieses Zweckes wurde ein großes Speichervolumen und eine leistungsstarke, für große Volumenströme geeignete Pumpe benötigt. Vor dem Forschungsprojekt war eine Betankung der Löschfahrzeuge in der Fahrzeughalle über die Hausanschlussleitung vorgesehen. Hierbei handelt es sich um eine nicht optimale Lösung. [aus Datenschutzgründen entfernt] Dieses Problem sollte durch die Errichtung eines Zwischenspeichers, welcher in den Ruhezeiten kontinuierlich nachgefüllt wird, gelöst werden. Dadurch sollte eine schnellere Betriebsbereitschaft der Fahrzeuge nach Einsätzen erreicht werden.

In der Freiwilligen Feuerwehr Herzberg war eine Aufstellung der Versuchsanlage ausschließlich innerhalb der Hallen im unmittelbaren Arbeitsbereich der Feuerwehrleute möglich. Aufgrund des exponierten Standortes war aus versicherungstechnischen Gründen keine Deklarierung als Versuchsanlage möglich gewesen, dementsprechend musste die Anlage bereits Anforderungen marktkonformer Anlagen erfüllen (z. B. Maschinenrichtlinie, CE-Kennzeichnung). Dementsprechend war ein Anlagenhersteller in einem Vergabeverfahren zu finden.

Anlagenstandort und Gegebenheiten vor Ort:

Die ursprüngliche Version der Versuchsanlage sah eine Aufstellung im Seitenstreifen der Fahrzeughalle vor. Der Seitenstreifen von 1,10 m Breite verlief entlang der Wand der Fahrzeughalle und wurde von ca. 38 cm breiten T-Säulen in 4,30 m lange Abschnitte unterteilt. Aus Arbeitsschutzgründen musste die komplette Anlage in den Teilflächen untergebracht werden. Grundvoraussetzung für die Auslegung der Pilotanlage war eine genaue Kenntnis über die Anforderungen der Feuerwehr. Die Anzahl an Löschfahrzeugen und deren Volumen war im Rahmen eines Vor-Ort-Termins am 17.11.2022 in einem Gespräch mit dem Ortswehrführer erfragt worden. Die Herzberger Wache bot Stellmöglichkeiten für acht Fahrzeuge, von denen drei Löschfahrzeuge mit Wassertank waren. Das größte Fahrzeug war vom Typ TLF 20/40 und verfügte über ein Speichervolumen von 4,5 m³. Zwei kleinere Löschfahrzeuge vom Typ LF 20 und HLF 20 verfügten jeweils über ein Speichervolumen von 2 m³. Insgesamt verfügten die Löschfahrzeuge über ein Speichervolumen von 8,5 m³.

Die Anlage sollte in der Lage sein, möglichst das gesamte Wasservolumen der Fahrzeuge zu fassen. Des Weiteren war sie so zu konzipieren, dass die Betankung des größten Löschfahrzeuges in einem annehmbaren Zeitraum möglich war. Die Befüllung der Fahrzeuge erfolgte über einen sogenannten B-Schlauch, mit welchem maximale Volumenströme von 600 l/min (entsprach 36 m³/h) möglich waren. Zur Minimierung der Befülldauer war der Betriebsvolumenstrom der Pumpe entsprechend auf den maximalen Volumenstrom von 36 m³/h auszulegen gewesen.

Anlagenauslegung:

Mit diesen Hintergrundinformationen konnte eine Marktrecherche nach geeigneten Behältern, Rohrleitungen und Armaturen durchgeführt werden und ein erster Entwurf der räumlichen Anordnung der Anlagen erstellt werden. Anschließend konnte die von der Pumpe aufzubringende Förderhöhe berechnet werden. Für die Pumpenauslegung waren genaue Kenntnisse der Rohrleitungsführung und der Fließwiderstände Grundvoraussetzung.

Bei der Marktrecherche wurde ersichtlich, dass die größten verfügbaren Behälter, welche im Randstreifen unterbringbar waren, jeweils nur 4 m³ Füllvolumen fassen konnten. Ausgewählt wurden zwei Raumspartanks der Firma GRAF. Aus Platzgründen wurde beschlossen, das Gesamtvolumen der Anlage auf 8 m³, bestehend aus zwei Behältern, zu beschränken. In den zwei Behältern wurde das Löschwasser zwischengespeichert und die Löschfahrzeuge wurden im Bedarfsfall über eine in die Versuchsanlage integrierte Pumpe befüllt. In den Ruhezeiten sollten die Behälter über die Hausanschlussleitung aufgefüllt werden.

Die Steuerung des automatischen Befüllvorganges erfolgte in der ersten Anlagenkonzeption über Schwimmschalter. Trockenlaufschutz und Überlaufschutz sollten ebenfalls mittels Schwimmschalter gesteuert werden. Für die Datenerfassung im Rahmen des Forschungsprojektes waren Temperatursensoren in den Behältern und ein Wasserzähler im Zulauf des Behälters vorgesehen. Für die hygienische Überwachung war die Anlage mit abflammbaren Probeentnahmehähnen versehen. Da die Feuerwehr von dem Löschwasser keine Trinkwasserqualität verlangte, konnten für die Pilotanlage Speicher aus Polyethylen ohne Trinkwasserzulassung verwendet werden. Zur Minimierung der Druckverluste wurden für die Verrohrung der Anlage DN 80 PVC/Kunststoff-Leitungen verwendet, welche über einen ähnlichen Innendurchmesser wie ein B-Schlauch verfügten.

Mit Kenntnis über die Rohrleitungsführung, dem Zielvolumenstrom und der im Fließweg verbauten Armaturen konnte die Pumpenauslegung erfolgen. Eine besondere Herausforderung bei den Berechnungen war die Rohrleitungsführung und die unbekannten verbauten Armaturen im Inneren der Löschfahrzeuge. Für die Pilotanlage

der Feuerwehr wurde eine Pumpe vom Typ TP 80-140/2 A-F-A-BQQE-IW1 des Herstellers Grundfos mit Betriebspunkt bei einem Volumenstrom von 44,02 m³/h und einer Förderhöhe von 11,45 m gewählt.

Anlagenbau und Ausschreibung:

Nach erfolgreicher Anlagenkonzeption war in einem Vergabeverfahren die Firma Simatec mit der Anlagenfertigung beauftragt worden. Diese entschied sich für die Verwendung von Radar-Füllstandsensoren zur Regelung der Anlagenbefüllung.

Zwischenzeitlich war aufgrund neuer versicherungsinterner Sicherheitsvorgaben für Arbeitsbereiche in Fahrzeughallen der Feuerwehr der Anlagenstandort verworfen und neu gesetzt worden. Dementsprechend wurde das Anlagenkonzept noch einmal an die neuen Standortanforderungen angepasst. Dies führte in der Summe zu erheblichen Verzögerungen des Projektablaufes.

Im März 2024 war die Anlage von Simatec fertiggestellt und anschließend nach Herzberg geliefert worden. Der Aufbau und Anschluss der Anlage in der Waschhalle erfolgten durch die BTU. Die für die Befüllung der Anlage nötigen Leitungen und Anschlüsse waren vom HWAZ verlegt worden. Die Datenerfassung der Pilotanlage erfolgte über eine von der BTU installierte SPS-Anlage des Typs Siemens LOGO!. In dieser wurden die Messdaten der Temperaturfühler gespeichert. Ursprünglich war außerdem geplant gewesen, einen Ultraschall-Durchflussmesser in die Befüllleitung zu installieren, dies war aus technischen Gründen jedoch nicht möglich.

Stattdessen erfolgte die Erfassung des Wasserverbrauchs über ein von der Feuerwehr geführtes Protokoll. Die Temperatursensoren konnten wie geplant installiert werden.

Anfang April 2024 waren die Feuerwehrleute von der BTU an der Anlage eingewiesen worden und der Versuchsbetrieb wurde offiziell gestartet. Die fertiggestellte Feuerwehranlage ist in der Abbildung 4 und 5 zu sehen.

Abbildung 4 und Abbildung 5 Versuchsanlage im Feuerwehrdepot, Quelle: eigene Darstellung

Temperaturverlauf Feuerwehr:

Ein Auszug der aufgenommenen Temperaturmesswerte eines Sensors aus der Feuerwehranlage ist in Abbildung 6 beispielhaft dargestellt. Insgesamt zeigte sich, dass die Temperatur im Speicher stark mit der Raumtemperatur korreliert. Einsatzbedingte Neubefüllungen führten zur Temperaturabsenkungen, die sich je nach Entnahmevolumen meist innerhalb des Tagesverlaufes wieder ausgeglichen.

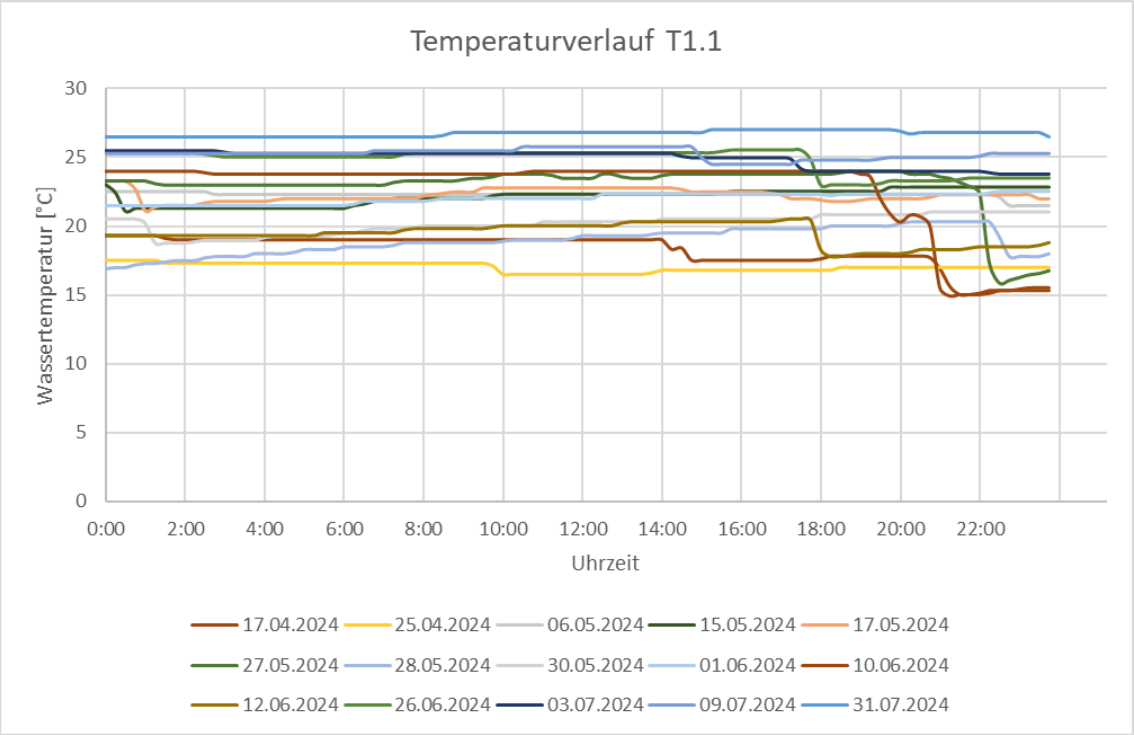


Abbildung 6 Temperaturverläufe in den Behältern der Feuerwehranlage an ausgewählten Tagen der Anlagenverwendung, Quelle: eigene Darstellung

A.2.1.3 Virtuelle Messstandorte

Bei der Evaluation eines potenziellen dritten Versuchsstandortes in einem Gebäude der Wohnungsgesellschaft wurde sich aus Kosten- und Zeitgründen dafür entschieden, auf die Errichtung einer dritten Pilotanlage zu verzichten und den dritten Versuchsstandort als virtuellen Speicher zu simulieren. Auch die Tatsache, dass bei einer Wohnanlage als Versuchsstandort der hygienische Aspekt strenger zu betrachten gewesen wäre und mögliche Kontaminierungen ein größeres Gefahrenpotential dargestellt hätten, stützte diese Entscheidung.

Als Messstandorte für die virtuelle Speichersimulierung wurden eine Wohnanlage mit insgesamt 42 Einwohnern [aus Datenschutzgründen entfernt] und ein Einfamilienhaus mit zwei Bewohnern im [aus Datenschutzgründen entfernt] gewählt. An den Standorten wurde der Wasserverbrauch mittels Ultraschall-Durchflussmessgeräten ermittelt. Aus den Durchflussdaten wurden die Lastprofile der Messstandorte erstellt. Die Lastprofile wurden anschließend in der Simulationssoftware STANET hinterlegt, um den Einfluss von Trinkwasserzwischenspeichern zur Lastspitzenminderung im Gesamtnetz zu simulieren.

Des Weiteren wurden die Lastprofile verwendet, um das optimale Speichervolumen von fiktiven Trinkwasserzwischenspeichern für die Verbrauchstypen Einfamilienhaus und Mehrfamilienhaus zu berechnen. Die Entwicklung der Mikrobiologie und der hygienischen Verhältnisse in den Behältern ließ sich durch den virtuellen Speicherbetrieb jedoch nicht simulieren.

Beispiel Lastprofile der virtuellen Messstandorte:

Das typisches Lastprofil des Einfamilienhauses innerhalb der Vegetationsperiode ist in Abbildung 7 dargestellt. Qh max stellt dabei den maximalen stündlichen Durchfluss, Qd min den geringsten, Qd mittel den mittleren und Qd max den maximalen täglichen Durchfluss dar. In Abbildung 8 ist ein typisches Lastprofil des Mehrfamilienhauses dargestellt.

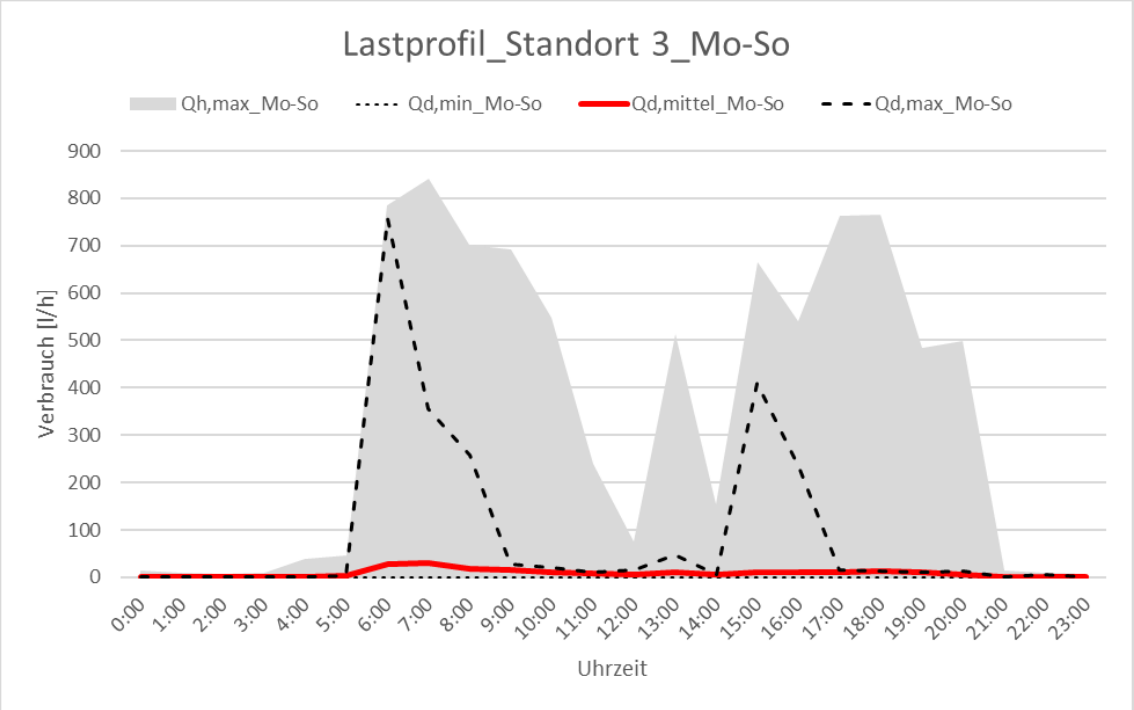


Abbildung 7 typisches Lastprofil Einfamilienhauses innerhalb der Vegetationsperiode, Quelle: eigene Darstellung

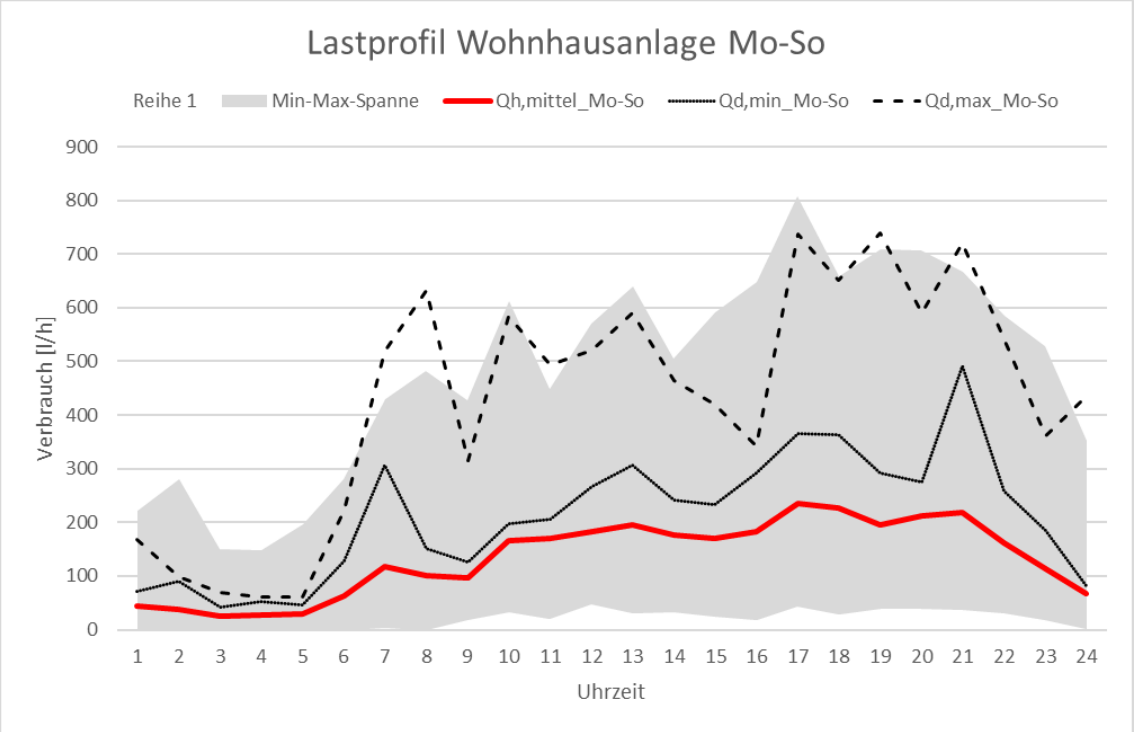


Abbildung 8 typisches Lastprofil des Mehrfamilienhauses, Quelle: eigene Darstellung

A.2.1.4 Weitere Messstandorte

Wasserturm Schöna-Kolpien:

Als Referenzobjekt für groß dimensionierten dezentralen Trinkwasserzwischenspeicher im ländlichen Raum wurde der Wasserturm in der [aus Datenschutzgründen entfernt] genutzt. Mittels Ultraschall-Durchflussmessern wurde im Rahmen des Forschungsprojektes der Volumenstrom in der Entnahmeleitung des Wasserturms gemessen und aufgezeichnet. Aus den gewonnenen Daten konnte ein für den ländlichen Bereich typisches Lastprofil erstellt werden, welches in der Abbildung 9 dargestellt ist. Zu beachten ist, dass etwa 60 % des Verbrauches der Ortschaft auf eine Agrargenossenschaft zurückzuführen sind.

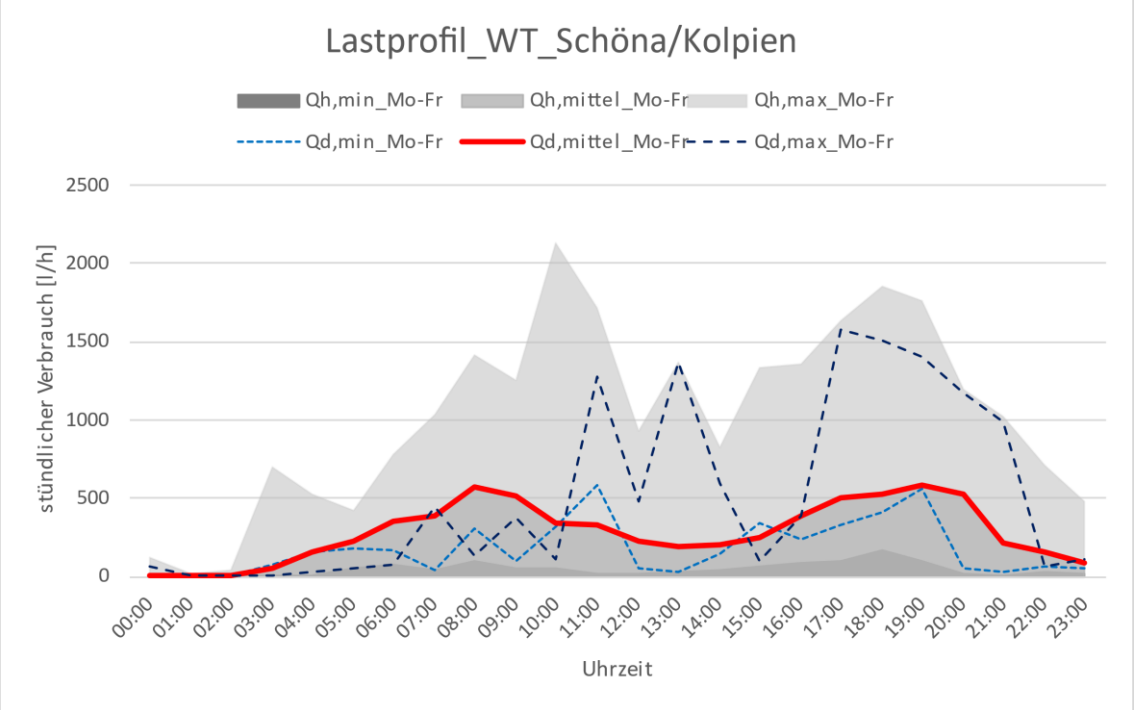


Abbildung 9 typisches Lastprofil des Wasserturms Schöna/Kolpien, Quelle: eigene Darstellung

Wasserwerk Herzberg:

Im Wasserwerk Herzberg wurden die Einspeisemengen ins Versorgungsnetz mittels Ultraschall-Durchflussmessern aufgezeichnet. Das aus diesen Daten erstellte Lastprofil bildete die Grundlage für eine Simulation des Herzberger Versorgungsgebietes in STANET und der Simulation des virtuellen Speicherbetriebes an den Versuchsstandortes Einfamilien- und Mehrfamilienhauses. Die Einspeisemengen des Wasserwerk Herzberg sind in der Abbildung 10 dargestellt. Diese enthalten neben dem Bedarf im Versorgungsnetz zeitpunktbezogene Belastungen. [aus Datenschutzgründen entfernt]

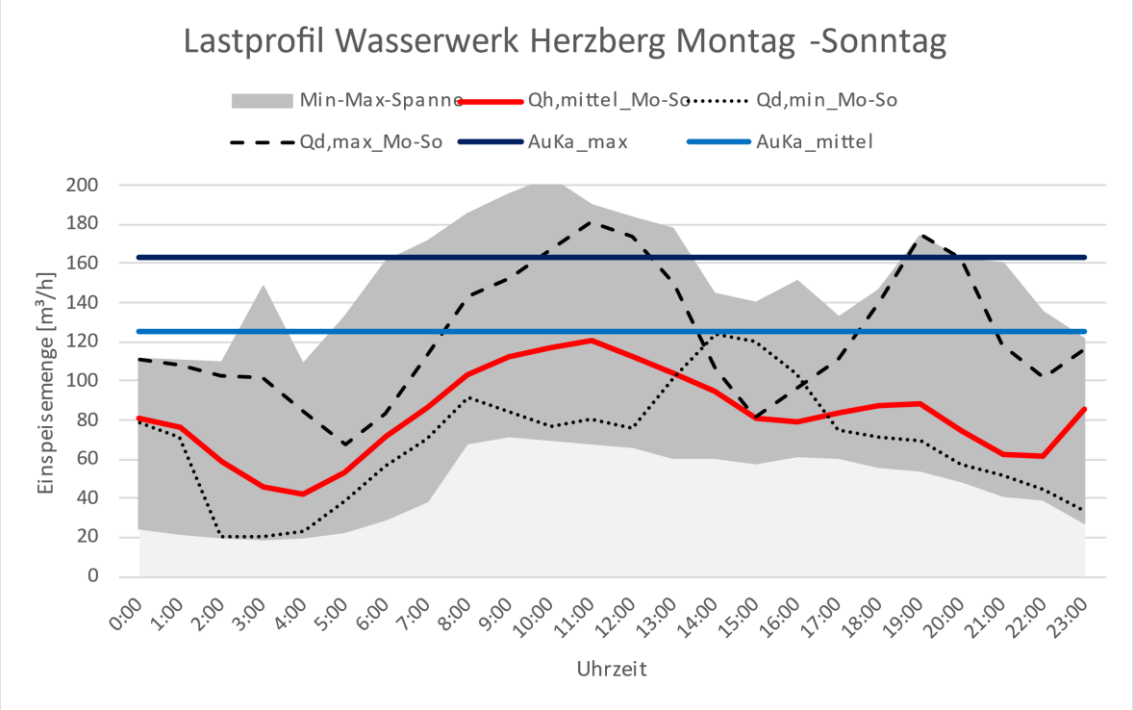


Abbildung 10 Lastprofil Wasser Herzberg, Quelle: eigene Darstellung

A.2.1.5 Erkenntnisse

Wie an den Beispielen der Pilotanlagen Feuerwehr und Rathaus deutlich wurde, sind Trinkwasserzwischenspeicheranlagen an die Bedingungen jeden Standortes individuell anzupassen und zu planen. Dieser Prozess hat sich besonders bei der Feuerwehranlage als zeitaufwendig herausgestellt. Auch sind auf dem Markt nur wenige Behälter in geeigneter Größe mit Trinkwasserzulassung verfügbar.

Für die Dimensionierung der Behälter ist die Kenntnis des Lastprofils des Verbrauchers wünschenswert, welches beispielsweise durch Messungen mit Ultraschall-Durchflussmesser als Aufschnall-Sensorik an der Hausinstallation ermittelt werden kann. Dabei ist jedoch zu beachten, dass diese Sensorik nicht bei allen Rohrmaterialien verwendet werden kann. So war eine Ultraschall-Durchflussmessung im Rathauskeller aufgrund von dort verbauten Verbundmaterial nicht möglich. In diesen Fällen sind die Verbrauchswerte auf andere Art und Weise, beispielweise aus Daten des Wasserversorgers, zu bestimmen.

Im Laufe des Versuchsbetriebes wurde ersichtlich, dass besonders der Befüllvorgang des Zwischenspeichers ein großes Risiko darstellt, dem in der Planung erhöhte

Aufmerksamkeit gewidmet werden sollte. Es sollte sichergestellt werden, dass der Befüllvorgang auch bei einem Stromausfall oder Versagen der Steuereinheit ordnungsgemäß beendet wird und ein Überlaufen des Behälters vermieden wird. Bei Verwendung von motorgetriebenen Armaturen in der Befüllleitung ist die Verwendung einer USV-Anlage zu empfehlen. Aus der Erfahrung des Anlagenbetriebs im Rathaus wird jedoch stattdessen empfohlen, auf die Verwendung von Motorarmaturen in der Befüllleitung zu verzichten und stattdessen mechanische Absperrarmaturen mit einer gespannten Feder zu verwenden, um so auf eine USV-Anlage verzichten zu können. Zusätzlich sollte der Analgenstandort über einen Abfluss verfügen, um mögliche Schäden durch Überlaufen zu verhindern.

Des Weiteren wurde ersichtlich, dass die Montage der Trinkwasserzwischenspeicher äußert umständlich sein kann. Besonders der Transport der Behälter in den Rathauskeller über eine enge und gewundene Treppe war mühsam. Bei der Serienfertigung von Trinkwasserzwischenspeicheranlagen sollte auch der Anlagenaufbau und Transport berücksichtigt werden und die Behälter bereits in der Produktion mit Tragegriffen versehen werden.

A.2.2 Versuchsbetrieb (TAP 1.2)

Zielstellung:

Im TAP 1.2 sollte durch den Versuchsbetrieb der Pilotanlagen im Rathaus und der Freiwilligen Feuerwehr Herzberg das Verhalten von Trinkwasserzwischenspeicheranlagen unter Realbedingungen sowie deren Beitrag zur Glättung von Lastspitzen untersucht werden. Um den Einfluss von verschiedensten technischen Parametern, wie der Förderhöhe der Pumpe oder der Verweilzeit des Wassers im Behälter, auf den Betrieb der Anlage und die Mikrobiologie ermitteln zu können, war ein Versuchsprogramm erstellt worden, welches über das Jahr 2024 hinweg abgearbeitet wurde. Aus dem Versuchsprogramm wurden Erkenntnisse über eine optimale Speichergröße und eine effiziente Fahrweise gewonnen. Von den zwei Pilotanlagen war nur die Rathausanlage für die Durchführung des Versuchsprogramms geeignet. Die Anlage am Versuchsstandort der Freiwilligen Feuerwehr war aufgrund ihres Einsatzzieles bzw. ihrer Nutzungsart nicht für die Veränderung von technischen Parametern ausgelegt gewesen. Die Löschfahrzeuge mussten möglichst schnell betankt werden, was eine Absenkung des Druckniveaus der Pumpe oder eine Reduzierung des Förderstroms ausschloss. Auch das Speichervolumen der Feuerwehr konnte nicht reduziert werden, da im Notfall möglichst viele Fahrzeuge betankt werden mussten. Da sich Löscheinsätze und damit die Benutzung der Anlage nicht planen ließen, war es

ebenfalls nicht möglich gewesen, den Parameter des Einflusses des Nachfüllintervalles zu untersuchen.

Folgende Aspekte wurden mit dem Trinkwasserzwischenspeicher im Rathaus untersucht:

- Die Zyklen der Speicherbe- und Entladung als Grundlage für die Berechnung der optimalen Speichergröße
- Unterschiedliche Pumpenleistungen zur Ermittlung der technischen Mindestanforderungen bei nachfrageseitigem Druckmanagement
- Die mikrobiologische Bewertung des Anlagenbetriebes (durch TZW)
- Untersuchung der Auswirkung einer längeren Stagnation auf Mikrobiologie und Wassertemperatur

Während des Versuchsbetriebes wurde dabei kontinuierlich der Volumenstrom in den Befüll- und den Entnahmeleitungen sowie die Temperatur in den Behältern gemessen. Die mikrobiologischen Parameter wurden vom TZW Dresden untersucht. Um ausreichend Daten über den Einfluss der Betriebsparameter sammeln zu können, betrug der Versuchszeitraum für jeden untersuchten Aspekt jeweils mehrere Wochen.

A.2.2.1 Versuchsprogramm

Die Durchführung des Versuchsprogramms an der Pilotanlage Rathaus begann im April 2024. Vor dem Start des Versuchsprogramms lief die Versuchsanlage im Zeitraum von 30. November 2023 bis zum 26. März 2024 im regulären Betrieb mit den ursprünglich konzipierten Einstellungen. Unter diesen Bedingungen ist im Normalfall nur eine Nachfüllung der Behälter im Zeitraum zwischen 01:00 und 02:00 Uhr nachts nötig. Aus den Messdaten des Regelbetriebes konnten die für den Standort Rathaus typischen Verbrauchswerte, Lastprofile und Spitzenfaktoren abgeleitet werden. Durch eine Gegenüberstellung der Messwerte des Regelbetriebes mit den Messwerten des Versuchsbetriebes wurde eine Quantifizierung der Auswirkung der Parameterveränderungen des Versuchsbetriebes ermöglicht. Der eigentliche Versuchsbetrieb begann am 1. April 2024 mit einer Reduzierung des Druckniveaus der in der Anlage integrierten Pumpe. So sollte untersucht werden, ob eine Absenkung des Versorgungsdruckes Auswirkungen auf den Wasserverbrauch der Nutzer hat. Auswirkungen auf den Stromverbrauch der Pumpe und damit auf die Effizienz der Anlage waren ebenfalls von Interesse. Im folgenden Monat wurde der Druck der Pumpe erneut abgesenkt. Diesmal auf das für den Standort Rathaus minimal mögliche Druckniveau. Dieses ist gerade ausreichend, um am hydraulisch ungünstigsten Punkt eine Abnahme gewährleisten zu können. Der Versuch erstreckte sich von Anfang Mai 2023 bis Anfang Juni 2023. Nachdem die Betrachtung des Versorgungsdruckes abgeschlossen war, wurde der Schwerpunkt der Versuche auf die Feststellung des Einflusses des Parameters Speichervolumen gelegt. Der Versorgungsdruck wurde

wieder auf das Ausgangsniveau gesetzt und das stattdessen das Nutzvolumen der Anlage reduziert. Durch die Verringerungen des Speichervolumens sollte eine häufigere Entleerung und Befüllung der Behälter erzwungen werden. Die Reduzierung des Nutzvolumens wurde erreicht, indem das Niveau des Schwimmschalters 3, welcher den Nachfüllvorgang beendet, abgesenkt wurde. Während dieses Teilversuches waren besonders die Veränderungen der Wassertemperatur und das Verhalten der Mikrobiologie bei einem häufigerem Wasseraustausch von Interesse. Um sicher zu gehen, dass die bis dato durchgeführte Beobachtungen auch tatsächlich auf das Versuchsprogramm und nicht auf jahreszeitliche Schwankungen zurückzuführen sind, war eine Referenzmessung notwendig. Diese bildet den normalen Betriebszustand der Anlage während der Sommermonate ab. Die Referenzmessung wurde von Anfang Juli bis Anfang August 2024 durchgeführt. Hierzu wurde die Anlage wieder in ihren Urzustand versetzt. Beendet wurde das Versuchsprogramm mit einem Stagnationsversuch. Von Anfang bis Ende August 2024 wurde die Anlage für insgesamt 23 Tage vom hauseigenen Trinkwassernetz entkoppelt und so eine komplette Stagnation des Nutzvolumens erzwungen. Während dieses Teilversuches erfolgte ein verschärftes Monitoring der mikrobiologischen Situation in der Anlage. Durch den Stagnationsversuch sollten die hygienischen Auswirkungen von längeren Standzeiten untersucht werden. Sollte die Wasserqualität nach der Stagnation vom TZW als unbedenklich eingeschätzt werden, so soll auf den Stagnationversuch ein abschließender Regelbetrieb folgen, um mögliche Auswirkungen auf die Hausinstallation zu untersuchen. Ende September 2024 wurde der Versuchsbetrieb im Rathaus schließlich beendet und die Pilotanlage im Rathaus demontiert und zurück zur BTU transportiert.

Versuchsprogramm der Simulationen der virtuellen Versuchsstandorte:

Während an den Versuchsstandorten Rathaus ein Versuchsprogramm mit Hilfe der Pilotanlagen praktisch durchgeführt wurde, wurden die Standorte Einfamilienhaus und Mehrfamilienhaus genutzt, um einen virtuellen Speicherbetrieb zu simulieren. Hierzu wurden die Verbrauchsdaten der Standorte erfasst und überprüft, inwiefern der anfallende Wasserverbrauch durch Trinkwasserzwischenspeicher abgedeckt werden könnte. Die Simulation des virtuellen Speicherbetriebes der Versuchsstandorten Einfamilienhaus und Mehrfamilienhaus wurde in Microsoft Excel durchgeführt. Für die Betrachtung des virtuellen Speicherbetriebes wurde der gemessene Wasserverbrauch der Standorte stundenweise aufsummiert und einem fiktiven Speichervolumen gegenübergestellt. Das fiktive Speichervolumen soll zu festgelegten Zeiten geringer Netznachfrage aufgefüllt werden, um in Zeiten erhöhter Netznachfrage die Wasserversorgung zu gewährleisten. Es wurden zwei Speichervarianten simuliert. Eine mit einem festgelegten Befüllzeitpunkt pro Tag und eine mit jeweils zwei

Befüllzeitpunkten pro Tag. Eine Analyse des Lastprofils der Einspeisemenge des Wasserwerkes Herzbergs hat ergeben, dass es nachts zwischen 0 und 5 Uhr und tagsüber zwischen 14 und 16 Uhr unkritische Zeiten geringer Nachfrage gibt, in denen eine Speicherbefüllung erfolgen kann (s. Abbildung 10). Für die Simulation wurde 1 Uhr nachts als Zeitpunkt der Behälterbefüllung festgelegt. Als zweiter zusätzlicher Befüllzeitpunkt wurde 15 Uhr festgelegt. Aufgrund der nächtlichen Befüllung [aus Datenschutzgründen entfernt] nicht als unkritischer Zeitpunkt definiert. Die simulierte Behälterbefüllung erfolgt bei vollständiger Kapazität der Rohrleitung, so dass die Behälter innerhalb einer Stunde vollständig gefüllt sind.

In der Simulation sind Formeln hinterlegt, die den gemessenen Wasserverbrauch und das fiktives Nutzvolumen gegenüberstellen. Das fiktive Nutzvolumen wird zu festgelegten Zeiten vollständig aufgefüllt und der anfallende Wasserverbrauch anschließend von diesem abgezogen. Sollte das Nutzvolumen durch den Verbrauch auf null fallen, wird dieses sofort wieder vollständig aufgefüllt. Dieses Prozedere wird für jeden Tag der Messreihe durchgerechnet. Anschließend wird ermittelt, wie oft außerhalb der vorgegebenen Zeiten nachgefüllt werden musste. Wenn bei einem simulierten Speichervolumen nicht mehr als 10 % aller Befüllvorgänge in kritischen Zeitpunkten fallen, so wird dieses Volumen als geeignet für den Verbrauchstypen angesehen. Die Simulation erfolgte in Stundenauflösung. Auf diese Art und Weise sollen geeignete Speichervolumina für die Verbrauchstypen gefunden werden.

A.2.2.2 Erkenntnisse aus dem Versuchsbetrieb

Rathausanlage:

Die Auswirkungen der Veränderungen der untersuchten Parameter während des Versuchsbetriebes sind in Tabelle 3 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass der mittlere Tagesverbrauch über den Großteil des Versuchszeitraum konstant im Bereich von 1,6 m³ lag. Nur während des Stagnationsversuches im Zeitraum vom 05.08.2024 bis zum 28.08.2024 sank der mittlere Tagesverbrauch aufgrund der urlaubsbedingten Schließung des Restaurants auf 1,3 m³ pro Tag. Der maximale Tagesverbrauch fluktuierte etwas mehr im Bereich von 2,3 m³ bis 2,8 m³. Die Absenkung des Druckniveaus von 3,5 bar auf 2,5 bar um 1 bar hatte zu keiner merklichen Veränderung des mittleren Tagesverbrauches geführt. Der mittlere Tagesverbrauch war vom Druck der anlageninternen Pumpe unabhängig. Zwischen dem maximalen gemessenen mittleren Tagesverbrauch von 1,664 m³ und den niedrigsten von 1,586 m³ liegt eine Differenz von 78 l. Diese geringe Differenz liegt im Bereich der Messungenauigkeit, welche in etwa 5 % beträgt. Es ist ebenfalls kein Zusammenhang zwischen dem

Pumpendruck und dem maximalen Tagesverbrauch zu erkennen. Sowohl zwischen dem spezifischen Stromverbrauch der Pumpe pro m³ als auch dem täglichen Stromverbrauch und dem Druck der Pumpe, ist hingegen ein Zusammenhang vorhanden. Mit einer Absenkung des Pumpendruckes um 1 bar konnten ca. 0,4 kwh/m³ eingespart werden. Während des Sagnationsversuches wurde deutlich, dass die verwendete Pumpe im Bereitschaftsbetrieb einen Mindeststromverbrauch von 0,17 kWh/d hat. Der Zusammenhang zwischen dem Nutzvolumen der Anlage und dem Rhythmus der Behälternachfüllung wird an der Häufigkeit der außerplanmäßigen Behälternachfüllungen deutlich. Bei einer vollständigen Auslastung der 2,05 m³ Nutzvolumen war während der kalten Jahreszeit nur an rund 14 % der Versuchstage eine Behälternachfüllung außerhalb des nächtlichen Standardbefüllzeitraumes nötig. Die Häufigkeit der außerplanmäßigen Nachfüllungen erhöhte sich mit dem Temperaturanstieg im Juli geringfügig auf 17 %. Eine Reduktion des Nutzvolumens um 0,55 m³ auf 1,5 m³ führte zu einer starken Erhöhung der Häufigkeit von außerplanmäßigen Behälterbefüllung auf 63,3% der Versuchstage. Durch den veränderten Befüllrythmus wurde die Aufenthaltszeit des Wassers in der Anlage reduziert. Auswirkungen auf das Temperaturniveau in den Behältern lassen sich jedoch nicht erkennen.

Aus der Tabelle 3 ist die maximale gemessene Wassertemperatur der Anlage zu entnehmen. Diese Temperatur wurde im Behälter 4 der Versuchsanlage, in welchem die Verweilzeit des Wassers am längsten ist, gemessen. Dem gegenüber gestellt ist die mittlere Lufttemperatur der Kläranlage Herzberg, mit Hilfe derer die jahreszeitlich bedingten Temperaturschwankungen dargestellt werden soll.

Es ist zu erkennen, dass sowohl die Temperatur in der Versuchsanlage als auch die Lufttemperatur über den Versuchszeitraum jahreszeitlich bedingt anstiegen. Eine mögliche Auswirkung des Behältervolumens und der damit einhergehenden Nachfüllzyklen wurde im Juni durch eine Reduzierung des Behältervolumens auf 1,5 m³ untersucht. Im Vergleich zwischen den Monaten Mai und Juli wird ersichtlich, dass die Absenkung des Nutzvolumens um 0,55 m³ und der damit einhergehende häufigere Wasseraustausch keinen Einfluss auf die Wassertemperatur haben. Im Mai betrug die mittlere Lufttemperatur in Herzberg 18,11 °C und Temperatur in den Behältern 14,3 °C. Im Juni stiegen, so wohl die Außentemperatur als auch die Behältertemperatur um ca. 1,3 °C auf 19,46 °C bzw. 15,65 °C an. Die Differenz zwischen der Wassertemperatur und der Außentemperatur hat sich trotz eines erhöhten Wasseraustausches nicht verändert und beträgt für beide Zeiträume 3,81 K. Ebenfalls konnte festgestellt werden, dass die mittlere Wassertemperatur in den Behältern über den gesamten Versuchszeitraum, zusammen mit der mittleren Lufttemperatur, konstant ansteigt. Eine Reaktion der Wassertemperatur auf das Versuchsprogramm ist nicht zu erkennen. Beim Stagnationsversuch konnte ein Anstieg der mittleren Temperatur im Behälter 4 auf 18,83

°C beobachtet werden. Die kritische Temperaturgrenze von 25°C für Kaltwasser wurde nicht erreicht. Insgesamt zeigt dies, dass der kühle Rathauskeller besonders gut für die Unterbringung einen Trinkwasserzwischenspeichers geeignet ist.

Die Urlaubszeit des Restaurants fiel in den Zeitraum des Stagnationsversuches, was zu einem Rückgang des mittleren Wasserverbrauches auf 1,312 m³ pro Tag führte. Das Restaurant war vom 19.08.2024 bis zum 09.09.2024 im Betriebsurlaub. Eine bedenkliche Veränderung der mikrobiellen Situation in der Anlage konnte ebenfalls nicht festgestellt werden. So dass die Versuchsanlage am 28.08.2024 ein letztes Mal in Betrieb genommen werden konnte. Als zentrale Erkenntnis des Stagnationsversuches kann festgehalten werden, dass eine längere Standzeit bei einer Trinkwasserzwischenspeicheranlage mit Behältern aus Edelstahl und Wasser mit den Eigenschaften des Herzberger Leitungswassers hygienisch unbedenklich ist.

Obwohl das Wasser nach dem Stagnationsversuch als hygienisch unbedenklich eingeschätzt wurde, erfolgte vor der Wiederinbetriebnahme sicherheitshalber ein vollständiger Austausch der Behältervolumens.

Tabelle 3: Veränderungen während des Versuchsbetriebes

Parameter/ Zeitraum	30.11.2023 bis 26.03.2024	26.03.2023 bis 30.04.2024	30.04.2023 bis 03.06.2024	**03.06.2024 bis 01.07.2024**	01.07.2024 bis 05.08.2024	05.08.2024 bis 28.08.2024	28.08.2024 bis 23.09.2024
Druck [bar]	3,5	3	2,5	**3,5**	3,5	/	3,5
Nutzvolumen [m³]	2,05	2,05	2,05	**1,5**	2,05	2,05	2,05
relative Häufigkeit außerplanmäßiger Befüllungen [%]	14,5	14,3	14,7	**63,3**	17,14	/	
Mittlerer Tagesverbrauch [m³]	1,607	1,664	1,586	**1,606**	1,635	1,312	
Maximaler Tages verbrauch [m³]	2,793	2,376	2,599	**2,251**	2,848	2312	
mittlere Temperatur Behälter 4 [°C]	10,94	12,48	14,3	**15,65**	16,88	18,83	
mittlere Lufttemperatur Herzberg [°C]	4,71	11,78	18,11	**19,46**	18,94	22,48	
täglicher Stromverbrauch [kWh/d]	2,06	1,72	1,44	**2,07**	1,99	0,17	
spez. Stromverbrauch [kWh/m³]	1,3	1,06	0,91	**1,33**	1,24	/	

Feuerwehranlage:

Das durchschnittliche wöchentlich aus der Feuerwehranlage entnommene Volumen und die durchschnittliche, von den einzelnen Temperatursensoren registrierte, Wochentemperatur ist in der Abbildung 11 dargestellt.

Während des Messzeitraums von 141 Tagen wurde die Anlage insgesamt 20 mal genutzt, um Löschfahrzeuge aufzufüllen. Damit kam es rund alle sieben Tage zu einer Befüllung. Insgesamt wurden dabei 34 m³ Wasser aus der Anlage entnommen, was einem durchschnittlichen Entnahmevolumen von 1,7 m³ pro Befüllung entspricht. Eine komplette Auffüllung aller Löschfahrzeuge der Freiwilligen Feuerwehr und eine vollständige Entleerung der Anlage konnte nur einmal beobachtet werden. Es ist festzustellen, dass die Fahrzeuge der Freiwilligenfeuerwehr nur selten vollständig entleert vom Einsatzort zurückkommen und somit nur selten ein vollständiger Austausch des in der Anlage zwischengespeicherten Wassers stattfindet. Bei der Analyse der in

der Anlage verbauten Temperatursensoren konnte festgestellt werden, dass sich in den Behältern eine vertikale Temperaturschichtung ausbildet. Wie in der Abbildung 12 zu erkennen ist, war das Wasser im oberen Drittel der Behälter beim Sensor T 1.1 und T 2.1 konstant um ca. 3 K wärmer als das Wasser im unteren Bereich der Behälter, wo die sich die Sensoren T 1.3 und T3.3 befanden. Des weiteren konnte festgestellt werden, dass selbst bei einer großen Abnahme im oberen Bereich des linken Behälters der Versuchsanlage kein vollständiger Austausch des zwischengespeicherten Wassers stattfindet.

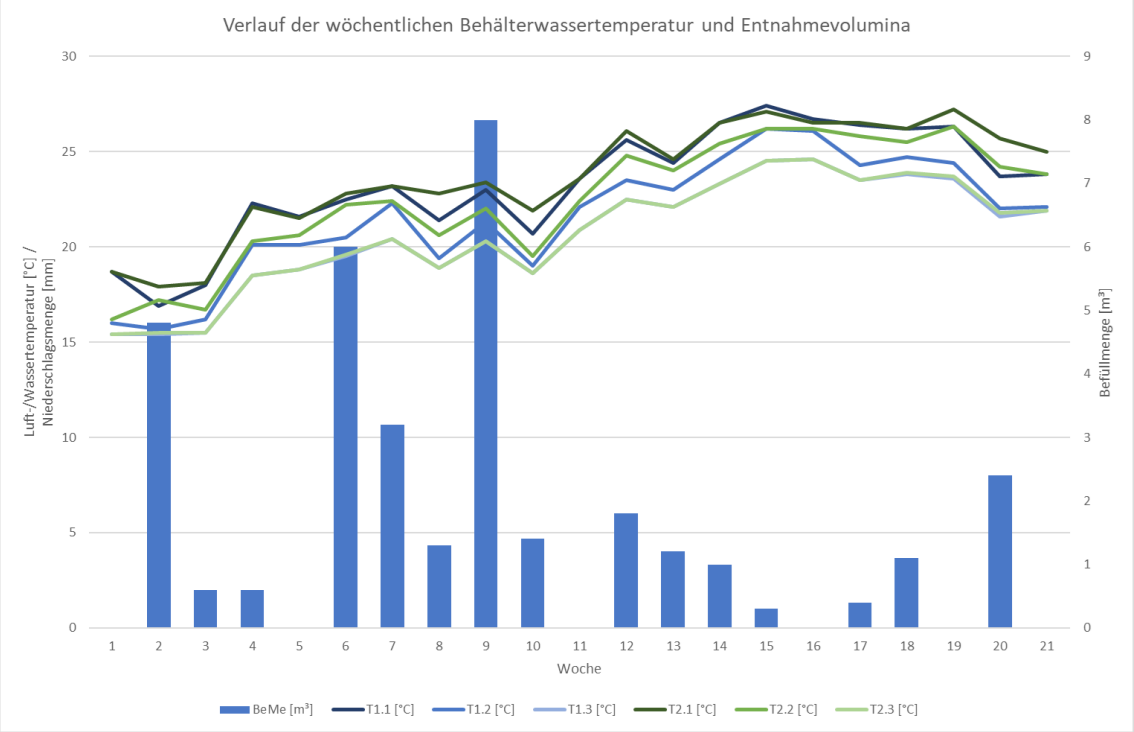


Abbildung 11: Entnahmevolumen und Temperaturverlauf der Feuerwehranlage in Wochenauflösung, Quelle: eigene Darstellung

In der Abbildung 12 ist der Temperaturverlauf während eines solchen Ereignisses exemplarisch dargestellt. Abgebildet ist die Veränderung des Temperaturniveaus am 10.06.2024, an dem 8 m³ Wasser aus der Anlage entnommen wurden. Es ist zu erkennen, dass die Sensoren, welche im rechten Behälter und im unteren Bereich des linken Behälters installiert sind bei Einsetzen des Befüllvorganges einen Temperaturabfall von ca. 7 Kelvin registriert haben. Der im oberen Teil des linken Behälters installierte Sensor T 2.1 konnte jedoch nur einen deutlich geringeren Temperaturabfall von ca. 1 K von 24 °C auf 23 °C registrieren. Diese geringe Temperaturveränderung deutet darauf hin, dass sich im linken Behälter aufgrund der Dichteschichtung und der Strömungsverhältnisse ein Totvolumen gebildet hat, welches bei einer Benutzung der Anlage kaum ausgetauscht wird. Die Bildung des Totvolumens

ist in der Konstruktion der Anlage begründet. Entnahme und Befüllung erfolgen im rechten Behälter und ein Volumenaustausch im linken Behälter kann nur über die zwei DN 125 Leitungen erfolgen. Um eine bessere Durchmischung des Behältervolumens zu garantieren und so mögliche Gesundheitsrisiken durch die Bildung von Totvolumina zu vermeiden, ist beim Bau von Anlagen darauf zu achten, dass Befüllung und Entnahmeleitungen nicht im selben Behälter bzw. auf derselben Seite der Anlage untergebracht sind. Insgesamt lagen die durchschnittlichen Wassertemperaturen in der Anlage mit 22 °C unterhalb der kritischen Trinkwassertemperatur von 25 °C. Für Brauchwasser hygienische bedenkliche mikrobielle Entwicklungen konnten während des Versuchsbetriebes nicht beobachtet werden.

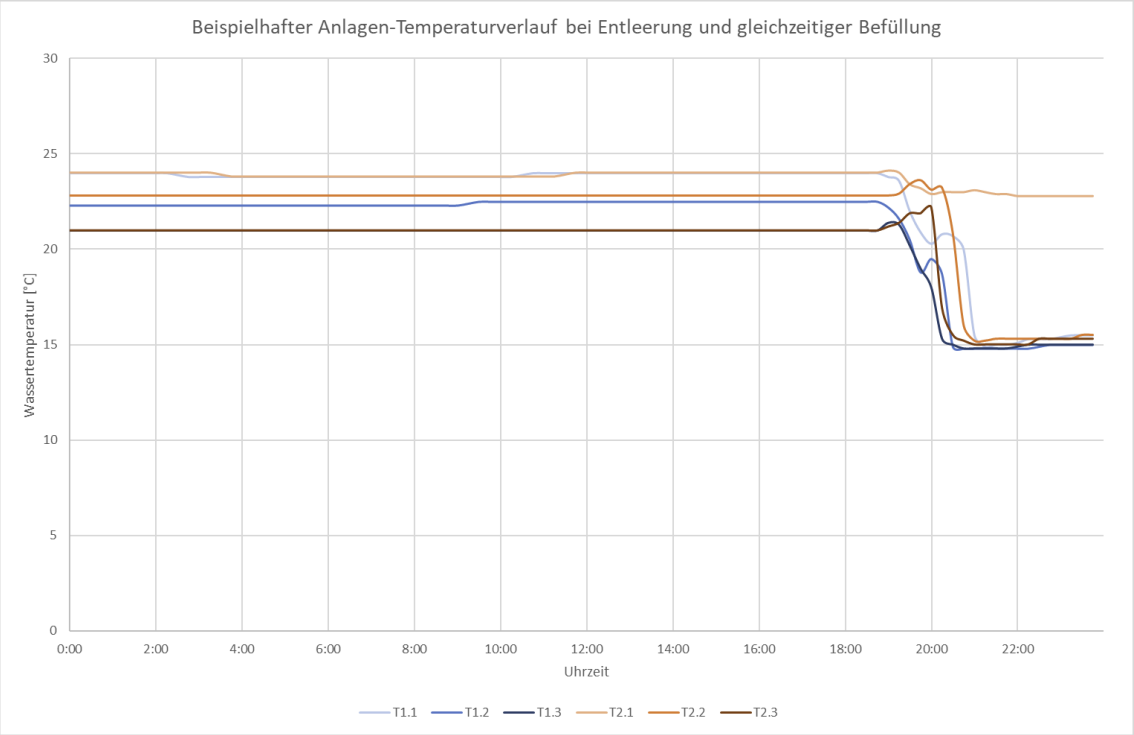


Abbildung 12 Temperaturverlauf Feuerwehrdepot Versuchsanlage 10.06.2024, Quelle: eigene Darstellung

Virtuelle Versuchsstandorte:

Die Simulationsergebnisse der virtuellen Zwischenspeicher sind in den nachfolgenden Abbildungen dargestellt. Abbildung 13 stellt den Verbrauchstypen Einfamilienhaus und Abbildung 14 den Verbrauchertypen Mehrfamilienhaus dar. Es wurden verschiedene fiktive Nutzvolumina simuliert, welche ins Verhältnis mit dem mittleren Tagesverbrauch der Standorte gesetzt einen „Formfaktor“ ergeben. Dieser ist als rote Linie dargestellt. Die Ergebnisse der Simulation mit einer Behälterbefüllung um 1 Uhr nachts sind in Grüntönen dargestellt und die der Simulation mit einer zweiten zusätzlichen

Behälterbefüllung um 15 Uhr sind in Blautönen dargestellt. Die Datengrundlage umfasste 278 Messtage und erstreckte sich von November 2023 bis Ende August 2024.

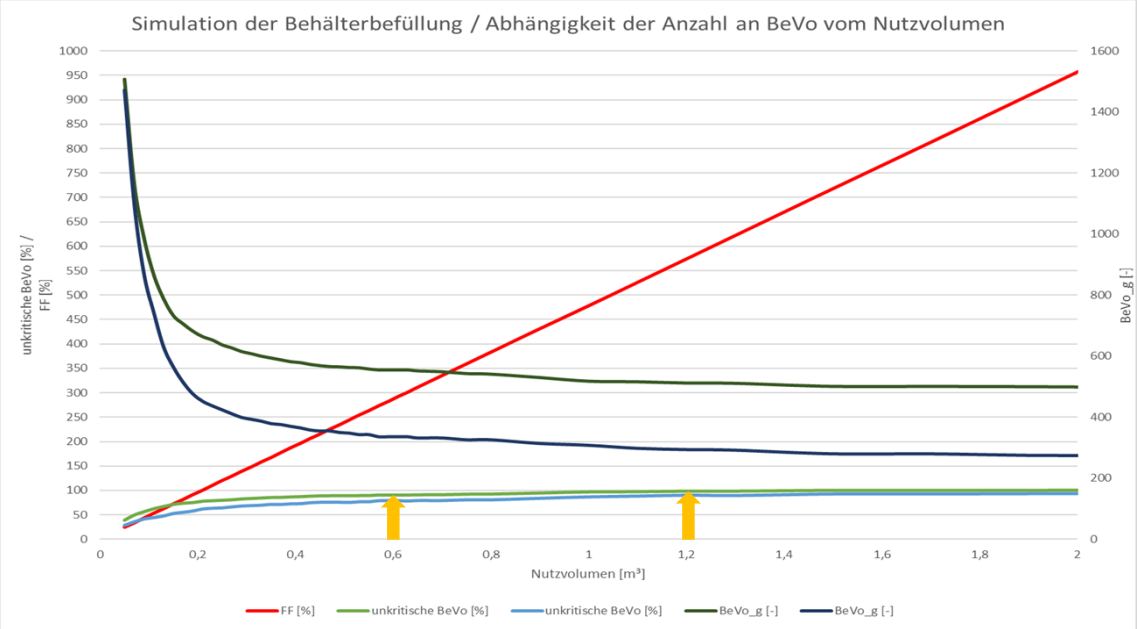


Abbildung 13 Simulation Behälterfüllung für EFH, Quelle: eigene Darstellung

Aus der Abbildung 13 ist zu entnehmen, dass sich für das Versuchsobjekt Einfamilienhaus bei einer einmaligen Befüllung ein optimales Speichervolumen von 1,2 m³ ergibt. Dieses Volumen entspricht einem Formfaktor von 570 % d.h. das Speichervolumen entspräche dem 5,7 Fachen des mittleren Tagesverbrauchs. Bei zwei planmäßigen Befüllungen läge das optimale Speichervolumen bei 0,6 m³ was dem 2,8 Fachen des mittleren Tagesverbrauches entspricht. Diese großen Speichervolumina sind vornehmlich auf die große Schwankungsbreite des beim Einfamilienhaus zu beobachtenden Wasserverbrauches zurückzuführen. Diese liegt in den hohen Wasserabnahmen durch die Gartenbewässerung begründet.

Aus der Abbildung 14 ist für das Mehrfamilienhaus bei einer einmaligen Befüllung ein optimales Speichervolumen von 3,9 m³ zu entnehmen, was einem Formfaktor von 310% entspricht. Bei zwei planmäßigen Befüllungen läge das optimale Speichervolumen bei 1,8 m³ was einem Formfaktor von 55 % entspricht.

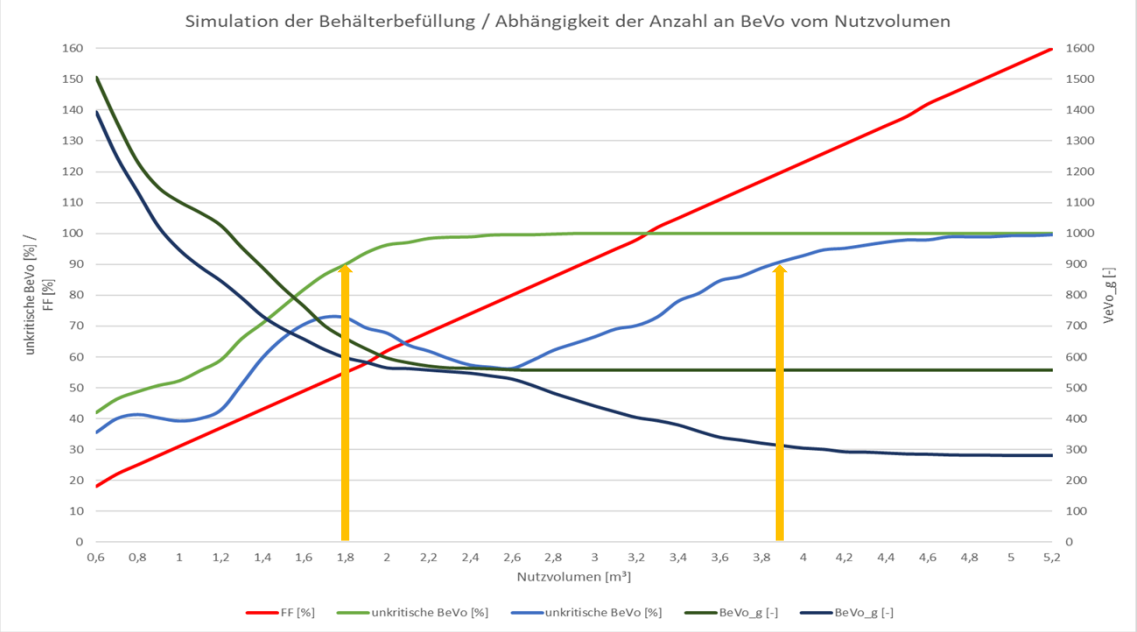


Abbildung 14 Simulation Behälterfüllung für MFH, *Quelle: eigene Darstellung*

Die für das Mehrfamilienhaus benötigten Zwischenspeicher fielen im Verhältnis zum mittleren Tagesverbrauch deutlich kleiner aus als beim Einfamilienhaus. Dies spricht dafür, dass der Verbrauchstyp Mehrfamilienhaus eher für die Verwendung von dezentralen Trinkwasserzwischenspeichern geeignet ist, als der des Einfamilienhauses. Es wurde ebenfalls deutlich, dass eine zweifache Speicherbefüllung am Tag möglich ist und diese aufgrund der deutlich geringeren benötigten Speichervolumina zu präferieren ist.

A.2.3 Datengewinnung,-aufbereitung, -integration und –verwertung (TAP 1.3)

Dieses TAP umfasste alle Tätigkeiten zur Datengewinnung, Datenauswertung und -aufbereitung.

Mit Hilfe der ausgewerteten Daten wurde der Anlagenbetrieb technisch optimiert. Des weiteren wurden die gewonnen Daten in Form von Lastprofilen des Wasserverbrauchs für die Modellierung des Gesamtnetzes aufbereitet und bereitgestellt (Teilprojekt TZW).

A.2.3.1 Datengewinnung

In der Pilotanlage Rathaus wurden mittels Ultraschall-Durchflussmesser die Volumenströme in der Befüll- und in der Entnahmeleitung in l/min gemessen und minütlich aufgezeichnet. Die Temperatur in den vier Teilbehältern wurde mittels PT 100 Temperaturfühler kontinuierlich in der Einheit °C gemessen und ebenfalls im Minutentakt

gespeichert. Die Datenerfassung und Speicherung erfolgte über eine SPS-Anlage vom Typ Siemens LOGO!. Diese sicherte die Rohdaten im CSV-Format auf einer Speicherkarte. Aus technischen Gründen musste die Speicherkarte regelmäßig manuell ausgelesen werden. In der Feuerwehranlage wurde das Temperaturniveau in den Behältern mittels PT 100 Temperaturfühlern gemessen und ebenfalls auf einer SPS-Anlage des Typs Siemens LOGO! auf einer Speicherkarte gesichert. Die aus der Anlage entnommene Wassermenge wurde von den Feuerwehrleuten protokolliert. Bei den Messstandorten Einfamilien- und Mehrfamilienhaus erfolgte ebenfalls eine Durchflussmessung mittels Ultraschall-Durchflussmesser. Gespeichert wurden die Daten auf einem KIMO Multifunktions-Datenlogger, welcher manuell ausgelesen werden musste. Die Messanordnung am Einfamilienhaus ist in der Abbildung 15 dargestellt.

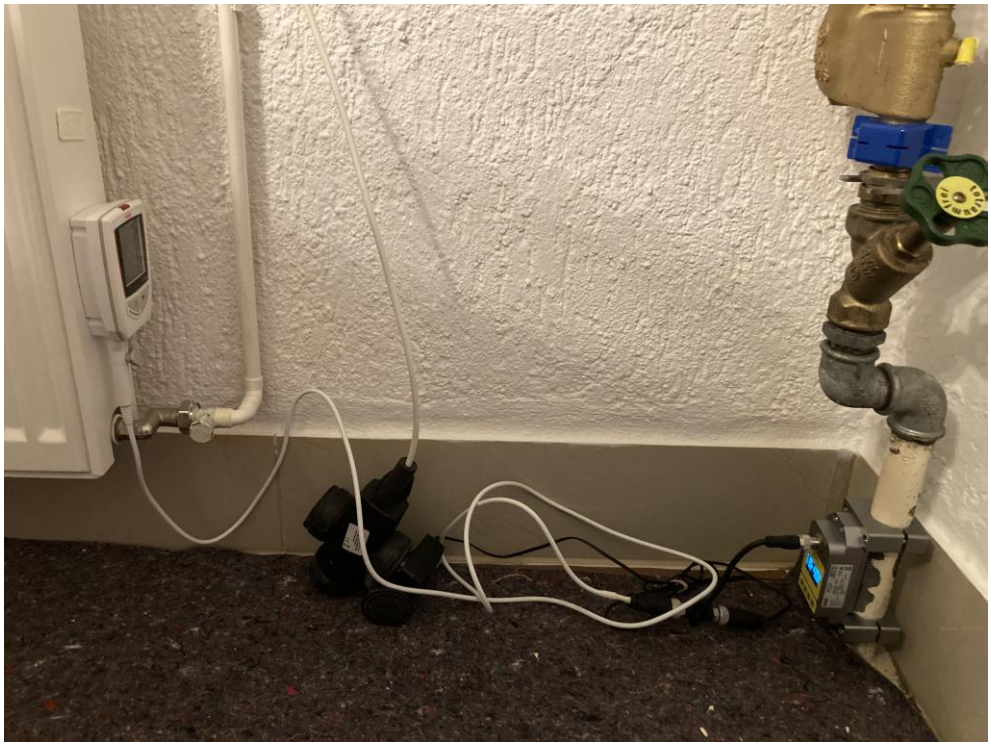


Abbildung 15: Ultraschall-Durchflussmesser und Datenlogger am Standort Einfamilienhaus, Quelle: eigene Darstellung

Im Laufe des Projektes hat sich gezeigt, dass für den Betrieb der Forschungsanlagen sowie die Verarbeitung und Erfassung der Messdaten keine Serverstruktur notwendig war. Die dezentrale Datenspeicherung auf Speicherkarten hat sich als akzeptable Lösung erwiesen. Die verwendeten Messanordnungen bieteten genug Speicherplatz, um die Datenmenge von eine gesamten Versuchsjahr bei kontinuierlicher Datenerfassung im Minutentakt zwischenzuspeichern, ehe ein Auslesen der Speicher notwendig wäre. Die Rohdaten mussten anschließend nur in die erstellten Excelfiles

eingelesen werden. Die dezentrale Struktur der Datenerfassung hat es ermöglicht, auch an Standorten ohne Internetzugang Messungen durchzuführen.

A.2.3.2 Datenaufarbeitung

Die Aufbereitung und Auswertung der Rohdaten erfolgte in Microsoft Excel.

Für alle Messstandorte wurden Lastprofile des Wasserverbrauches erstellt. Des Weiteren wurden absolute, einwohnerbezogene, mittlere und maximale Tagesverbräuche ermittelt und diese grafisch dargestellt. Die Temperaturniveaus der Standorte Rathaus und Feuerwehr wurden ebenfalls grafisch dargestellt. Für jeden Messstandort, außer der Freiwilligen Feuerwehr, wurde der Stunden- und Tagesspitzenfaktor des Wasserverbrauchs bestimmt. Für den Standort Rathaus wurde weiterhin der tägliche und spezifische Stromverbrauch der Druckerhöhungsanlage ermittelt.

Bei allen Messstandorten erfolgte die Aufbereitung aller vorhandenen Daten gebündelt über den gesamten Projektzeitraum hinweg. Für den Messstandort Rathaus wurden die Messdaten zusätzlich im Rahmen des Versuchsprogramm für jeden Untersuchungszeitraum abschnittsweise aufbereitet. Durch einen Vergleich der Daten der einzelnen Untersuchungszeiträume konnten die Einflüsse der einzelnen Anlagenparameter veranschaulicht werden.

A.2.3.3 Datenintegration und Verwertung

Die Messdaten wurden aufbereitet, validiert und visualisiert und mit dem mikrobiellen Monitoring des TZW verknüpft, um die Wirkung von dezentralen Trinkwasserzwischenspeicheranlagen einzuschätzen und zu bewerten. Die aus den Rohdaten gewonnen Lastprofile wurden im Rahmen des TAP 2 „hydraulisches Modell“ in die Simulationssoftware STANET integriert und für eine Darstellung des Versorgungsgebietes Herzberg verwendet.

A.2.4 Systemeinbindung und –management (TAP 1.4)

Damit dezentrale Trinkwasserzwischenspeicher in Extremsituationen entlastend auf dien Lastgang wirken können, müssen sie in die übergeordnete Netzsteuerung integriert werden. Dies erfordert technische Anpassungen auf Ebene der Hausinstallation, eine abgestimmte Interaktion mit den Steuerungszentralen sowie eine verlässliche Daten- und Kommunikationsinfrastruktur.

Darüber hinaus entstehen neue Anforderungen an Betrieb, Wartung und Verantwortlichkeiten. Fragen nach Instandhaltungsintervallen, Zuständigkeiten und der Sicherstellung hygienischer Standards sind ebenso zu klären wie Aspekte der IT-Sicherheit und Datenintegration. TAP 1.4 hat diese Schnittstellen zwischen Gebäuden, Netz und Betreiberorganisation untersucht und zeigt auf, wie durch geeignete Steuerungs- und Managementkonzepte ein Smart-Grid-Ansatz im Trinkwassernetz etabliert werden kann.

Technische Einbindung in die gebäudeinterne Trinkwasserinstallation:

Die Nachrüstung von Gebäuden mit Trinkwasser-Zwischenspeichern erfordert eine technische Integration in die bestehende Installation. Die Speicher werden typischerweise im Keller oder einem Technikraum eingebunden. Sie sind über Regelarmaturen an die Versorgungsleitung angeschlossen, sodass sie bei Bedarf Wasser aus dem Netz aufnehmen oder an das Haus abgeben können. Wichtig ist, dass ein Rückflussverhinderer installiert wird, um ein Zurückdrücken von Wasser aus dem Speicher ins öffentliche Netz zu vermeiden (Schutz der Netzqualität). Zusätzlich sind eine Steuereinheit (z.B. SPS), Sensoren (z. B. Füllstandssensoren) und Aktoren (Ventile, Pumpen) notwendig, um den Speicherbetrieb zu steuern und zu überwachen. Die Hausanlagen werden durch diese Speicherkomponente ergänzt und technisch aufgerüstet, was eine Digitalisierung der Steuerung und geeignete Schnittstellen zum Versorger voraussetzt.

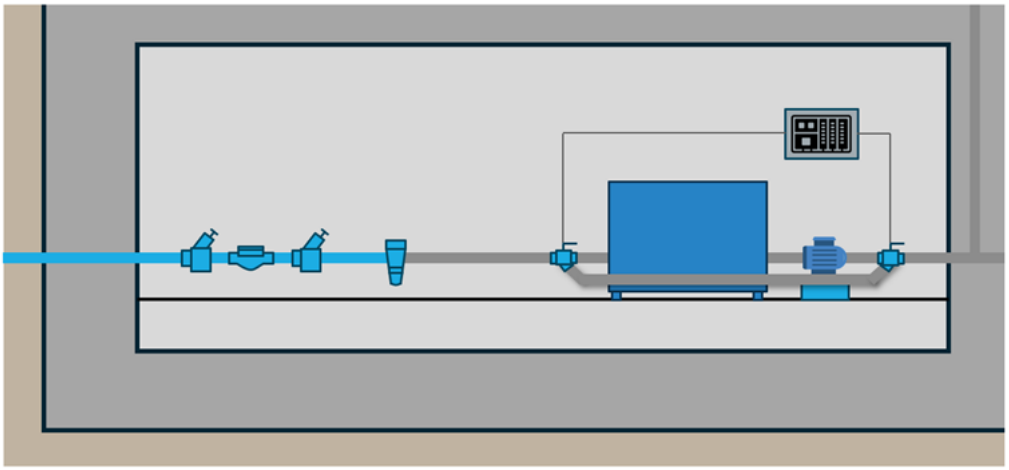


Abbildung 16: Beispielhafte Anordnung eines dezentralen Trinkwasserzwischenspeichers im Gebäude, Quelle: eigene Darstellung

Technische Einbindung in die städtische Trinkwasserversorgung und -steuerung:

In vielen Versorgungsgebieten, insbesondere wenn kein natürliches Gefälle oder Wasserturm ausreichend Druck bereitstellt, sorgen Druckerhöhungsanlagen (DEA) dafür, dass auch entlegene oder höher gelegene Abnehmer mit genügend Druck versorgt werden. Auch diese Anlagen verfügen über einen Speicher, den sogenannten Vorlagebehälter, aus dem die Druckerhöhung im Netz stattfindet. Technisch ist diese Anlage dem hier untersuchten Trinkwasserzwischenspeicher sehr ähnlich, nur für einen anderen Zweck (Druckhaltung, keine Resilienzsteigerung!) und eine andere Abnahme (i.d.R. kleine Teilnetze) ausgelegt. [aus Datenschutzgründen entfernt] Im Normalfall werden die Speicher der DEA planmäßig in verbrauchsschwachen Zeiten (i. d. R. nachts) befüllt. Sollte jedoch ein Speicher außerplanmäßig einen niedrigen Füllstand erreichen (z. B. durch hohen Verbrauch nachgelagerter Abnehmer), griff eine zweite Steuerungs-Ebene: Die DEA schaltet bedarfsgerecht auf eine höhere Förderleistung, um den Speicher wieder aufzufüllen. Eine vollautomatische Steuerung der Pumpen ist hierbei essenziell, moderne Prozessleitsysteme (z. B. Software FlowChief in der Leitwarte) erlauben es, komplexe Parametrierungen vorzunehmen und Betriebszustände detailliert zu programmieren.

Auf ähnliche Weise können die dezentralen Trinkwasserzwischenspeicher in das Netz integriert werden. Die Regelung erfolgt in dem Fall zwischen den DEA und den dezentralen Trinkwasserzwischenspeichern. In Netzen ohne separate Druckerhöhung könnte alternativ direkt vom Wasserwerk ausgehend eine Steuerung der Speicher erfolgen. Dadurch würde sich der Auffüllprozess nicht doppeln. Im untersuchten HWAZ-Netz jedoch sind die DEA zwischengeschaltet, weshalb eine direkte Ansteuerung einzelner Speicher vom Wasserwerk nicht vorgesehen ist (stattdessen erfolgt die Regelung lokal in der Versorgungszone). Insgesamt könnte hier ein Smart Grid im Trinkwassernetz entstehen: Die dezentralen Speicher und die Pumpstation bilden eine Regelstrecke, die vollautomatisch im Sinne des Gesamtsystems agiert (siehe Abb. 16).

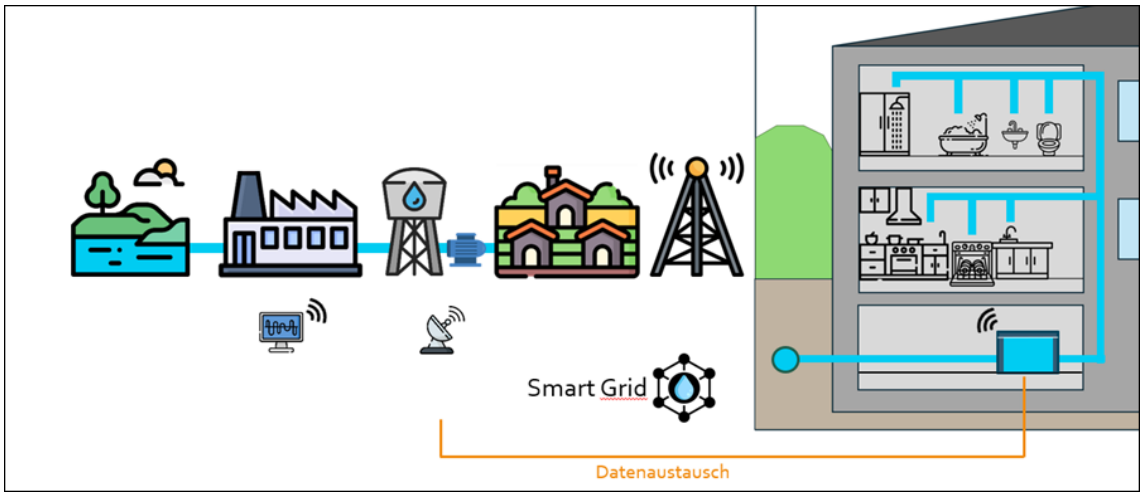


Abbildung 17 Integration der dezentralen Trinkwasserzwischenspeicher in das Versorgungsnetz, Quelle: eigene Darstellung

Kommunikation und Datenübertragung:

Grundvoraussetzung für diese koordinierte Steuerung ist die durchgängige Vernetzung aller relevanten Komponenten. Füllstandssensoren an den Zwischenspeichern müssen ihre Daten zuverlässig an die Steuerzentrale (lokale DEA oder Leitwarte) weiterleiten. Ebenso müssen Steuerbefehle (z. B. Ventil auf/zu) die Speicher erreichen. In städtischen Regionen bieten sich etablierte Funknetze an: Denkbar ist der Einsatz von Low Power Wide Area Networks wie LoRaWAN für Batteriebetrieb und große Reichweite, oder klassische Mobilfunkstandards (GSM/LTE) über vorhandene Netze. Letzteres könnte bevorzugt werden, da vielerorts bestehende Mobilfunkanbindungen etwa zur Fernsteuerung von Pumpwerken bereits genutzt werden, so steuert der HWAZ seine dezentralen Pumpstationen i. d. R. über Mobilfunk an. In ländlichen Gebieten kann die Funkabdeckung allerdings herausfordernd sein. Wo eine kabelgebundene Kommunikation (Glasfaser, Ethernet) verfügbar ist, wäre sie am zuverlässigsten. Diese wäre aber aufgrund der Kosten und der nötigen Infrastruktur meist nur in Ausnahmefällen realisierbar. Daher werden vorhandene offene Funknetze (Mobilfunk) zur Anbindung der Speicher vorgeschlagen. Cybersecurity spielt hierbei ebenfalls eine Rolle: Durch die Vernetzung entstehen potenzielle Angriffspunkte, weshalb die Datenübertragung verschlüsselt und die Steuerkomponenten abgesichert sein müssen. Letztlich soll die Kommunikation so ausgelegt sein, dass nahezu in Echtzeit Informationen ausgetauscht werden können. Dies ermöglicht perspektivisch eine Echtzeit-Optimierung des Netzbetriebs auf Basis von Speicherfüllständen und Verbrauchsprognosen.

Betrieb und Wartung der Zwischenspeicher:

Die Betriebsführung dezentraler Trinkwasserspeicher erfordert neue Prozesse und in der Folge die Klärung der damit verbundenen Verantwortlichkeiten. Im Projekt Flexitility wurde vereinfacht davon ausgegangen, dass die Motivation der hier angestrebten Resilienzsteigerung bei Versorgungsunternehmen liegt und damit der Wasserversorger die Verantwortung für die Speicheranlagen übernimmt, weil so u.a ein einheitlicher Wartungs- und Überwachungsstandard sichergestellt werden kann. Es wird unabhängig davon darauf hingewiesen, dass die rechtliche Zuständigkeit auch anders definiert, z.B. seitens des Immobilieneigentümers liegen kann. Welche Besitz- und Verantwortungsstrukturen in der Praxis in den jeweiligen regionalen Versorgungsstrukturen und Rahmenbedingungen zum Tragen kommen können, war nicht Gegenstand der Untersuchung, hat aber Einfluss auf folgende Ausführungen.

Die Wartungsintervalle der Zwischenspeicher orientieren sich an bestehenden Regelungen für Trinkwasserbehälter. Nachfolgend eine Kurzeinschätzung, die sich aus Interviews mit Wasserversorgern ergeben hat: Eine vollständige Reinigung und Inspektion des Speichertanks soll demnach alle 5 Jahre erfolgen, um Ablagerungen, Biofilme oder Korrosion rechtzeitig zu beseitigen. Pumpen und elektrische Komponenten können in regelmäßigen Abständen (z. B. alle 4 Jahre) von Fachpersonal geprüft werden, um die Betriebssicherheit zu gewährleisten. Diese Intervalle müssen nochmal mit den gängigen Praxisempfehlungen abgeglichen und in die Instandhaltungspläne des Versorgers integriert werden. Bei einer größeren Anzahl an dezentralen Speichern erfordert dies zusätzliche Ressourcen. Während in der Anfangsphase Dienstleister für Reinigungen und Prüfungen herangezogen werden können, könnte ein Versorger ab einer gewissen Skalierung eigenes Personal und Equipment für diese Aufgaben vorhalten. Hier bieten sich Synergien an, etwa könnten die bestehenden Teams, die Hochbehälter und Wasserwerke warten, entsprechend geschult werden, oder neue Mitarbeiter speziell für den Betrieb der dezentralen Infrastruktur eingestellt werden. Wichtig ist auch die Dokumentation: Jede Anlage muss inventarisiert, ihre Wartungshistorie aufgezeichnet und eventuelle Störungen müssen zeitnah erfasst und behoben werden.

Ein weiterer zentraler Aspekt des Systemmanagements ist das Monitoring der Wasserqualität in den Zwischenspeichern. Da das Trinkwasser unter Umständen länger im Speicher verbleibt als in einer herkömmlichen Leitung, sind mikrobiologische und physikalisch-chemische Parameter regelmäßig zu überprüfen. Im Pilotbetrieb der dezentralen Trinkwasserzwischenspeicher wurde hierzu ein intensives begleitendes Monitoring durch den Verbundpartner TZW durchgeführt (TAP 1.6). Alle detaillierteren Daten inklusive deren Bewertung und Schlussfolgerungen hinsichtlich der Umsetzbarkeit von dezentralen Trinkwasserzwischenspeichern wurden von TZW geleistet. Eine genaue Beschreibung der Zielstellungen, der angewendeten Methodik

sowie der Erkenntnisse sind im Sachbericht des Verbundpartners enthalten. Langfristig besteht Forschungsbedarf, wie ein effizientes Monitoring direkt in den Speichern gestaltet werden kann, beispielsweise durch den Einsatz neuer Sensoren oder durch adaptive Prüfintervalle je nach Risikoprofil des Speichers.

Selbiges gilt auch für die technische Performance der Speicher. Über Sensoren und Datenlogger könnten Betriebsdaten wie Füllstand, Ein- und Ausströme, Pumpenlaufzeiten, Drücke und Temperaturen erfasst. Diese Daten fließen in die Steuerzentrale (lokale DEA oder Leitwarte) und können dort von Software automatisch ausgewertet werden. Ungewöhnliche Betriebswerte, etwa ein unerwartet schneller Füllstandsabfall oder lange Pumpenlaufzeiten, lösen Alarmmeldungen aus, sodass Techniker schnell reagieren können. Moderne Prozessleitsysteme erlauben es zudem, Ferndiagnosen durchzuführen: Viele Probleme (z. B. ein festsitzendes Ventil oder eine Störung an der Pumpe) können bereits remote eingegrenzt werden.

Erkenntnisse:

Die konzeptionellen Untersuchungen zeigen, dass eine Integration dezentraler Speicher in Gebäuden und Versorgungszonen grundsätzlich technisch umsetzbar ist. Hydraulisch erfolgt die Einbindung über Armaturen mit Rückflussverhinderer, steuerungstechnisch über Sensorik, Aktorik und SPS-gestützte Automatisierung. Auf Netzebene kann die Regelstrecke DEA ↔ Zwischenspeicher das zentrale Element bilden. Die zweistufige Fahrweise (planmäßige Nachtbefüllung, ereignisbasierte Nachladung) erweist sich als praktikables Grundprinzip und lässt sich in bestehende Leitsysteme integrieren.

Eine wesentliche Voraussetzung ist eine verlässliche Kommunikation zwischen Speicher, DEA und Leitwarte. Mobilfunknetze bieten derzeit die beste Kombination aus Verfügbarkeit und Praxiserfahrung, während Kabel nur in Ausnahmefällen wirtschaftlich ist. Gleichzeitig rückt die IT-Sicherheit durch die zunehmende Vernetzung stärker in den Fokus.

Im Betrieb stellen sich vor allem Fragen nach Zuständigkeiten und Instandhaltung. Die Nutzung von in der Praxis bereits etablierter Technik und Verfahrensweisen lässt eine hohe Kompatibilität mit Unternehmensprozessen der Trinkwasserversorgung erwarten.

Für die praktische Umsetzung ist es wichtig, die Frage des Besitzes und der Verantwortung für die Zwischenspeicher zu klären. Die genannten Wartungsintervalle sind Orientierungspunkte, müssen aber an bestehende Regelwerke und risikobasierte Konzepte angepasst werden.

Besonderes Augenmerk gilt der hygienischen Sicherheit. Da Wasser im Speicher länger verweilen kann als im Leitungsnetz, sind zusätzliche Maßnahmen zur Qualitätssicherung notwendig. Erste Pilotversuche mit begleitendem Monitoring belegen die grundsätzliche

Machbarkeit, machen aber auch den Forschungsbedarf bei effizienten Monitoringstrategien deutlich.

Unabhängig davon eröffnen Zwischenspeicher die Möglichkeit, innovative Betriebsweisen zu testen. Beispielsweise könnten Versorger in Zukunft tarifliche Anreize setzen, um flexible Verbrauchsverlagerungen zu fördern – ähnlich dem Lastmanagement im Stromnetz. Kunden mit Speichern könnten vergünstigte Tarife erhalten, wenn sie dem Versorger erlauben, die Befüllung zeitlich zu steuern (ähnlich wie Nachtstromtarife). Dies setzt allerdings ein hohes Maß an Digitalisierung voraus, inklusive Smart Metering und vertraglicher Regelungen.

A.2.5 Ökonomische Bewertung (TAP 1.5)

Zielstellung:

Ziel dieses Arbeitspakets ist die ökonomische Bewertung von dezentralen Trinkwasserzwischenspeicherlösungen zur Stärkung der Klimaresilienz technischer Infrastruktur am Beispiel der Trinkwasserversorgung. Im Mittelpunkt steht die Kostenanalyse. Die Ergebnisse sollen eine fundierte Aussage zur Wirtschaftlichkeit und bilanziellen Erfassung der Maßnahmen ermöglichen.

Methodik:

Die ökonomischen Untersuchungen einer dezentralen Trinkwasserzwischenspeicheranlage wurden für zwei Anwendungsfälle betrachtet: ein Einfamilienhaus (eine Wohneinheit) und ein Mehrfamilienhaus (36 Wohneinheiten). Für beide Fälle kann zur Dimensionierung auf Messwerte der TAP zurückgegriffen werden. Für das Einfamilienhaus wurden die Kosten für einen Trinkwasserzwischenspeicher mit einem Volumen von 200 Litern untersucht, für das Mehrfamilienhaus 1800 Liter.

Grundsätzlich konnte bei der Kostenberechnung nicht auf die Daten der Pilotanlagen zurückgegriffen werden. Die in der prototypischen Herstellung und Installation generierten Kosten sind mit Kosten, die in einer Serienfertigung standardisierter Elemente erreichbar wären nicht vergleichbar. Die Kosten stützen sich auf eine Recherche technisch ähnlicher Bauteile, die z.B. in der Lebensmittelverarbeitenden Industrie bereits etabliert sind (siehe auch Erläuterungen in den nachfolgenden Tabellen)

Die Gesamtkosten der Trinkwasserzwischenspeicheranlage werden zunächst in Investitions- und Betriebskosten unterteilt. Zu den Investitionskosten gehören die Anschaffungskosten sowie die Kosten für den Auf- und Abbau der Anlage. Zu den

Betriebskosten zählen Kosten für Wartung und Inspektion, Instandsetzung, elektrische Energie sowie Mikrobielles Monitoring. Für die verschiedenen Kostenkomponenten werden die Kosten aus den oben genannten Gründen abgeschätzt. Die Vorgehensweisen sind in den Tabellen 4 und 6 dargestellt. Im Anschluss werden die Investitionskosten anhand der Lebensdauern der Kostenkomponenten linear auf eine Gesamtlebensdauer von 20 Jahren verteilt, sodass jährliche Kosten berechnet und eingeschätzt werden können. Abschließend werden die jährlichen Kosten pro Wohneinheit betrachtet und die Relevanz anhand aktueller Trinkwasserpreise abgeschätzt.

Investitionskosten

Nachfolgend werden die Vorgehensweisen bei der Kostenabschätzung der unterschiedlichen Kostenkomponenten der Investitionskosten tabellarisch erläutert.

Komponente	**Vorgehensweise**
Aufbau der Anlage	Eigene Abschätzung der Personal- sowie Materialkosten für den Steuerungs- und Netzwerkaufbau, die Elektro- sowie die Wasserinstallation anhand von Richtlinien sowie Marktpreisen.
Abbau der Anlage	Eigene Abschätzung der Personal- sowie Materialkosten für den Steuerungs- und Netzwerkaufbau, die Elektro- sowie die Wasserinstallation anhand von Richtlinien sowie Marktpreisen.
Behälter	Die Abschätzung erfolgt durch eine Marktrecherche zu einsatzbaren Trinkwasserbehältern oder vergleichbaren Behältervarianten. In einem Mehrfamilienhaus werden mehrere kleinere Behälter kombiniert, um den Transport in enge Räume zu ermöglichen. Die weiterverarbeiteten Behälterkosten ergeben sich als Mittelwert verschiedener Materialien und technischer Ausstattungsmerkmale.
Pumpe	Zunächst werden die Anforderungen an die Förderhöhe sowie Fördermenge nach DIN 1988-300 festgelegt (Hoffmann et al. 2013). Dazu werden auch die Anzahl und Aufteilung der Trinkwasserentnahmestellen innerhalb der Wohneinheit festgelegt. Die Kostenabschätzung erfolgt durch eine Marktrecherche geeigneter Trinkwasserpumpen. Dabei werden

	für das Mehrfamilienhaus auch mehrere Pumpen kombiniert, um die Anforderungen effizient zu erfüllen.
Steuerung	Eigene Abschätzung anhand der Erfahrungen aus der gebauten Anlage im Rathauskeller.
Messtechnik	Eigene Abschätzung anhand der Erfahrungen aus der gebauten Anlage im Rathauskeller. Die Messtechnik wird im Vergleich zur gebauten Anlage jedoch auf die in der Praxis benötigten Komponenten reduziert.
Sonstige Kosten	Eigene Abschätzung anhand der Erfahrungen aus der gebauten Anlage im Rathauskeller. Dazu gehören alle Komponenten, die noch nicht erfasst wurden, wie z. B. Verbindungsteile.

Tabelle 4 Methodik der Ermittlung der Investitionskosten

Mithilfe der beschriebenen Vorgehensweisen ergeben sich folgende Investitionskosten:

Aufbau:	**EFH**	**MFH**
Steuerungs- und Netzwerkaufbau	420	630
Elektroinstallation	280	420
Wasserinstallation	560	840
Summe:	**1260**	**1890**
Abbau:		
Steuerungs- und Netzwerkabbau	420	630
Elektrodeinstallation	280	420
Wasserdeinstallation	560	840
Summe:	**1260**	**1890**
Anschaffungskosten:		
Behälter	393	1653
Pumpe	254	841
Steuerungseinheit	1500	1500
Messtechnik	116	116
Sonstige Komponenten	1500	2000
Summe:	**3762**	**6110**
Gesamtsumme:	**6282**	**9890**

Tabelle 5 Zusammensetzung der Investitionskosten [€]

Die Verteilung der Anschaffungskosten des Trinkwasserzwischenspeichers wird nochmal gesondert dargestellt:

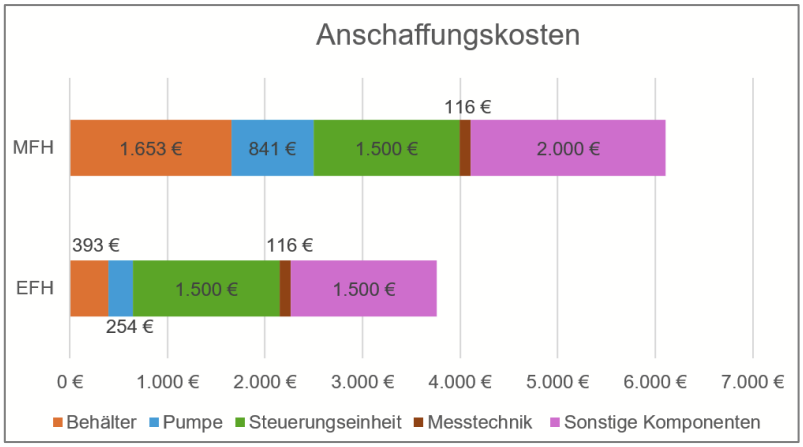


Abbildung 18 Zusammensetzung der Anschaffungskosten, Quelle: eigene Darstellung

Betriebskosten

Nachfolgend werden die Vorgehensweisen bei der Kostenabschätzung der unterschiedlichen Kostenkomponenten der Betriebskosten tabellarisch erläutert.

Komponente	**Vorgehensweise**
Wartung / Inspektion	Eigene Abschätzung der Personal- sowie Materialkosten anhand von Richtlinien sowie Marktpreisen.
Instandsetzung	Eigene Abschätzung der Personal- sowie Materialkosten anhand von Richtlinien sowie Marktpreisen.
Energie	Abschätzung der Stromkosten anhand der theoretisch ermittelten Stromverbräuche aus den Messstandorten.
Mikrobielles Monitoring	Abschätzung der Messparameter sowie -häufigkeiten und den daraus resultierenden Kosten mithilfe des Projektpartners TZW.

Tabelle 6 Methodik zur Bilanzierung der Komponenten

Mithilfe der beschriebenen Vorgehensweisen ergeben sich folgende Betriebskosten:

Jährliche Betriebskosten:	EFH	MFH
Wartung/Inspektion	290	290
Instandsetzung	200	200
Energiekosten	120	164
Mikrobielles Monitoring	360	360
Summe:	**970**	**1014**

Tabelle 7: Zusammensetzung der Betriebskosten [€]

Die Aufteilung wird nachfolgend für das Szenario Einfamilienhaus grafisch dargestellt:

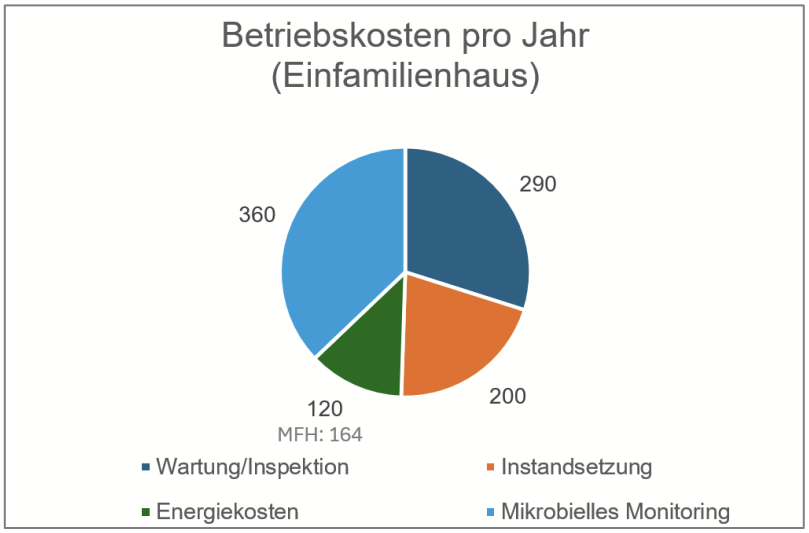
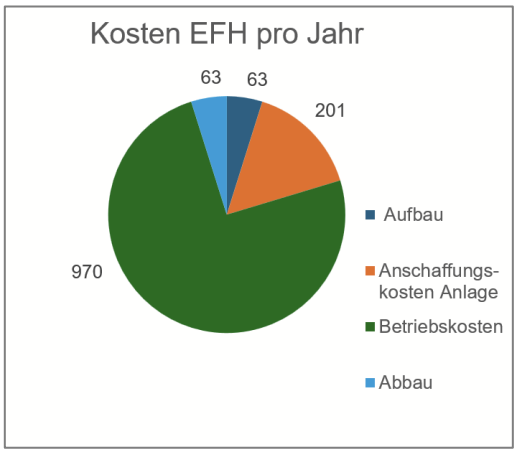


Abbildung 19 Zusammensetzung der Betriebskosten im EFH [€], Quelle: eigene Darstellung

Verteilung der Investitionskosten auf die gesamte Lebensdauer:

Es wird davon ausgegangen, dass alle Komponenten der Trinkwasserzwischenspeicheranlage eine Lebensdauer von 20 Jahren aufweisen. Die einzige Ausnahme ist die Pumpe, für welche eine Lebensdauer von 10 Jahren angewendet wird. Mithilfe dieser Lebensdauern werden die Investitionskosten auf die Gesamtlebensdauer von 20 Jahren linear verteilt.



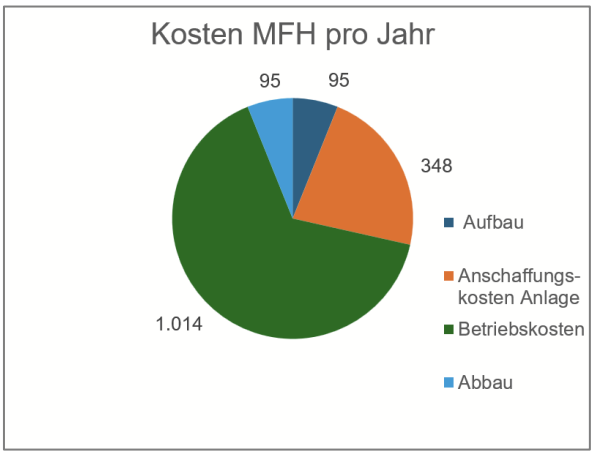


Abbildung 20 und 21 Zusammensetzung der jährlichen Gesamtkosten [€], Quelle: eigene Darstellung

Insgesamt ergeben sich für das Einfamilienhaus jährliche Kosten von ca. 1.300 € und für das Mehrfamilienhaus ca. 1.550 €. Es ist erkennbar, dass in beiden Szenarien der jährlichen Kosten durch die laufenden Betriebskosten entsteht. Im Einfamilienhaus beträgt der Anteil ca. 75% und im Mehrfamilienhaus ca. 65%.

Kostenauswertung:

In der nachfolgenden Tabelle wird abgeschätzt, wie viel Kosten sich jährlich pro Wohneinheit und je Kubikmeter Trinkwasser ergeben. Für das Einfamilienhaus wird dabei von einem jährlichen Trinkwasserverbrauch von ca. 77 m^3 ausgegangen, für das Mehrfamilienhaus ca. 36 m^3 je Wohneinheit (Destatis 2023, Statistik BW 2025, BDEW 2025).

	EFH	**MFH**
Jährliche Gesamtkosten	1297	1550
Jährliche Kosten je WE	1297	43
Kosten je m^3 Wasser	16,92	1,20

Tabelle 8 Kostenauswertung

Die jährlichen Kosten pro Wohneinheit sind im Mehrfamilienhaus deutlich geringer als im Einfamilienhaus. Dies liegt vor allem daran, dass die gesamten Betriebskosten bei einer höheren Zahl an Abnehmern nur geringfügig steigen und sich somit auf die 36 Wohneinheiten verteilen. Da im Einfamilienhaus zudem von einem höheren Wasserverbrauch pro Wohneinheit ausgegangen wird als in einer Wohnung eines

Mehrfamilienhauses, verringert sich die prozentuale Differenz zwischen beiden Gebäudetypen, wenn die Kosten auf den tatsächlich verbrauchten Kubikmeter Wasser bezogen werden. Dennoch zeigen sich erhebliche Unterschiede: Im Einfamilienhaus entstehen mit rund 17 € je m³ Wasser deutlich höhere Kosten, während im Mehrfamilienhaus die Kosten mit etwa 1,20 € je m³ Wasser erheblich niedriger ausfallen.

Es ist zu berücksichtigen, dass der Bilanzrahmen der vorliegenden Betrachtung ausschließlich die Anlage selbst umfasst. Potenzielle Effizienzsteigerungen und damit verbundene Kosteneinsparungen auf Seiten des Wasserversorgers wurden nicht einbezogen. Es ist jedoch nicht davon auszugehen, dass sich dadurch die in Mehrfamilienhäusern anfallenden Mehrkosten von 1,20 € je m³ kompensieren ließen. Im Untersuchungsgebiet Herzberg betragen die Wasserkosten derzeit 0,96 €/m³ zuzüglich 7 % MwSt. und liegen damit unterhalb der berechneten Zusatzkosten (HWAZ 2024). Selbst in Regionen mit höheren Trinkwasserpreisen, wie beispielsweise in Baden-Württemberg mit durchschnittlich rund 3 € je m³, liegen die Anlagenkosten noch bei mehr als einem Drittel der Gesamtkosten für Trinkwasser (Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft - BW 2023).

Das Einsparpotenzial bei den jährlichen Kosten für die dezentrale Trinkwasser-Zwischenspeicheranlage ist zudem vergleichsweise gering, da der überwiegende Anteil der Kosten nicht durch die Materialkosten des Speichers, sondern durch die laufenden Betriebskosten verursacht wird.

Erkenntnisse:

Die ökonomische Analyse zeigt, dass der Betrieb dezentraler Trinkwasserzwischenspeicheranlagen mit erheblichen jährlichen Kosten verbunden ist, die maßgeblich durch die laufenden Betriebskosten bestimmt werden. Während im Einfamilienhaus jährliche Kosten von rund 1.300 € entstehen, liegen diese im Mehrfamilienhaus mit ca. 1.550 € nur geringfügig höher. Bezogen auf die Wohneinheit ergibt sich jedoch ein deutlicher Unterschied: Die Kosten im Einfamilienhaus betragen etwa 17 € je m³ Wasser, während sie im Mehrfamilienhaus mit ca. 1,20 € je m³ deutlich niedriger ausfallen.

Die Skaleneffekte im Mehrfamilienhaus zeigen, dass sich die Wirtschaftlichkeit dezentraler Speicherlösungen vor allem bei einer größeren Zahl von Abnehmern verbessert. Dennoch sind die berechneten Zusatzkosten auch für das Mehrfamilienhaus-Szenario im Vergleich zu den ausschlaggebenden Trinkwasserpreisen hoch, sodass sich die Maßnahmen wohl nach rein ökonomischen Kriterien (die positiven Effekte konnten nicht gegengerechnet werden) nicht als wirtschaftlich darstellen lassen.

Darüber hinaus besteht nur ein begrenztes Einsparpotenzial an den Gesamtkosten, da die laufenden Betriebskosten den größten Anteil der Gesamtkosten ausmachen. Selbst bei reduzierten Investitionskosten bleibt die Kostenbelastung somit hoch.

A.2.6 Mikrobielles Monitoring und Bewertung (TAP 1.6)

Das mikrobielle Monitoring, bzw. die vollumfängliche Projektbegleiten von Beginn der Anlagenplanung bis hin zur Analyse und Auswertung des Versuchsbetriebes wurde durch den Verbundpartner TZW durchgeführt. Alle detaillierteren Daten inklusive deren Bewertung und Schlussfolgerungen hinsichtlich der Umsetzbarkeit von dezentralen Trinkwasserzwischenspeichern wurden von TZW geleistet. Eine genaue Beschreibung der Zielstellungen, der angewendeten Methodik sowie der Erkenntnisse sind im Sachbericht des Verbundpartners enthalten.

A.2.7 Rückbau und Anlagenverwertung nach Ablauf der Umsetzungsphase (TAP 1.7)

Nach Beendigung der letzten Phase des Stagnationsversuchs im Versuchsbetrieb und der Wiederinbetriebnahme wurde die Pilotanlage im Rathaus außer Betrieb genommen und zurückgebaut. Einzelne Komponenten sollen in anderen Versuchsanlagen weiterverwendet werden. So wurde im Anschluss an den Versuchsbetrieb im Laboratorium der BTU ein Versuchsaufbau geplant und realisiert, mit dem eine mögliche Reduzierung des Strombedarfs der Pumpen analysiert wurde. Mit den bestehenden Einzelkomponenten wurde eine modifizierte Pumpenanlage und -steuerung gebaut. Mithilfe dieser wurde analysiert, ob hinsichtlich der Pumpenauslegung noch Einspareffekte möglich sind. Die abschließende Auswertung dieser Versuchsreihe steht dabei noch aus. Weitere Verwertungen o. Ä. erfolgten nicht.

Die Versuchsanlage in der Feuerwehr soll mindestens 1 Betriebsjahr weiter untersucht werden. Ziel ist es, Strategien zu entwickeln, mit denen die Einsatzbereitschaft von Feuerwehren (Löschwasser) auch bei (extremwetterbedingten) Versorgungsengpässen im Trinkwasserbereich schnell wieder hergestellt werden kann. Die Anforderungen sind hinsichtlich des Gebrauchswertes in dem Bereich sehr hoch, sodass Betriebserfahrungen über einen längeren Zeitraum zur Bewertung der Eignung des Systems unerlässlich sind.

A.3 Durchgeführte Arbeiten im AP 6

Zielstellung:

Das Arbeitspaket 6 und dessen Zielsetzung stehen in einem übergeordneten Zusammenhang zu den übrigen Arbeitspaketen. Der inhaltliche Fokus liegt dabei auf der Bewertung der Klimaresilienz technischer Infrastrukturen am Beispiel der Trinkwasserversorgung. Grundlage hierfür bildet das Bewertungsmodell für ein Trinkwasserversorgungssystem, welches bereits in der F&E-Phase des Projektes FLEXITILITY entwickelt wurde. Ziel des Arbeitspakets war es, die Erkenntnisse aus dem Betrieb der Zwischenspeicher sowie aus der Netzmodellierung nach Möglichkeit in das bestehende Bewertungsmodell zu integrieren. Darüber hinaus sollte auch die Perspektive der anderen am Prozess der Trinkwasserversorgung beteiligten Akteure in den Bewertungsprozess untersucht und ggf. im Modell aufgenommen werden. Bislang erfolgte die Bewertung aus der Perspektive des Wasserversorgungsunternehmens. Abschließend wurde angestrebt, das Bewertungsmodell zu einem gebrauchstauglichen Ansatz weiterzuentwickeln bzw. dieses in bestehende Arbeitsabläufe der Unternehmen und Verwaltungen einzubinden.

A.3.1 Überprüfung und Justierung (TAP 6.1)

Ziel dieses Teilarbeitspaketes war es, die gewonnenen Erkenntnisse aus dem Betrieb der Zwischenspeicher sowie der Netzmodellierung in das Bewertungsmodell zu integrieren. Im Fokus stand die Frage: Bildet das Modell die Veränderung der Bewältigungskapazität des Trinkwasserversorgungssystems ab, wenn Zwischenspeicher dezentral im Netz platziert werden?

Zunächst wurde untersucht, an welcher Stelle die an den verschiedenen Messstellen gewonnenen Messdaten in das Bewertungsmodell einfließen können. Hauptaugenmerk lag hierbei auf den Einspeisemengen aus dem Wasserwerk Herzberg (siehe Kapitel 2.1.4). Diese können für das Klimamonitoring im Abschnitt Strategische Klimaresilienz des Bewertungsmodells herangezogen werden. Ziel des Klimamonitorings ist es, mithilfe historischer Daten Erkenntnisse darüber zu gewinnen, wie stark das Trinkwasserversorgungssystem in der Vergangenheit durch Extremwetterereignisse oder andere klimatische Einflüsse betroffen war. Solche Erkenntnisse lassen sich etwa durch die zeitliche Überlagerung von Wetter- und Systemdaten ableiten. Auf diese Weise können Rückschlüsse gezogen werden, welche Auswirkungen Ereignisse wie Hitzeperioden auf das Versorgungssystem haben.

Die Durchführung des Klima Monitorings wurde teilweise durch die Verfügbarkeit des Einspeiseprofils des Wasserwerkes ermöglicht. Eine beispielhafte Analyse hierzu ist in Abbildung 22 dargestellt. Dabei wird die Netzeinspeisung (m³/d) mit der mittleren Tagestemperatur (°C) und der täglichen Niederschlagsmenge (mm/d) überlagert. In dieser Analyse zeigen sich klare Abhängigkeiten zwischen der Temperatur und dem Wasserbedarf: Beispielsweise ist ein Anstieg der mittleren Tagestemperatur bis auf 27,3 °C am 09.07.2023 zu erkennen, wodurch auch die tägliche Netzeinspeisung deutlich auf über 2900 m³/d anstieg. Solche Zusammenhänge lassen sich nicht nur während der Sommermonate (z.B. August 2023), sondern auch im Frühjahr (z.B. April 2024) feststellen. Zusätzlich besteht ein Zusammenhang mit der Niederschlagsmenge, der sich meist darin äußert, dass der Wasserbedarf nach Regenereignissen trotz steigender Temperaturen kaum zunimmt.

Dieser Zusammenhang wurde in der FuE-Phase bereits anhand der Daten eines anderen Versorgungsgebietes durch Fraunhofer Institut für Energiewirtschaft und Energiesystemtechnik IEE untersucht und mathematisch erfasst (Knorr et al. 2023). Hier wurde (neben der Temperatur) die Dauer der Trockenheit als Parameter für die Beschreibung der Trinkwassernachfrage eingeführt. Durch die in diesem Projekt durchgeführten Messungen an der Einspeisung des Wasserwerkes lagen erstmalig hochauflösende Daten zum Einspeiseprofil des Trinkwasserversorgungsnetzes Herzberg vor, anhand derer der Zusammenhang bestätigt werden konnte.

[aus Datenschutzgründen entfernt]

Abbildung 22 tägliche Netzeinspeisung WW Herzberg und Wetterdaten, Quelle: eigene Darstellung

Diese ursprünglich für die Wasserbedarfsprognose analysierten Zusammenhänge können für das Klimamonitoring genutzt werden, die Erfassung der Daten ist Voraussetzung für das Monitoring selbst. Diese beispielhafte Analyse zeigt, wie ein Klima Monitoring im Rahmen der Klimaresilienzbewertung aussehen kann. Es wird deutlich, dass sich konkrete temperatur- oder niederschlagsabhängige Abhängigkeiten mit vergleichsweise geringem Aufwand identifizieren lassen. Der Prozess des Klimamonitorings ist damit praktikabel umsetzbar. Der Trinkwasserbedarf ist bei Kenntnis der Wetterprognosen aus der Analyse vergangener Daten quantitativ mindestens für den nächsten Tag und qualitativ für die nächsten Tage prognostizierbar. Nachfragebedingte Lastspitzen sind im Voraus erkennbar und können (wenn vorhanden) in ein Ressourcen- oder sogar Krisenmanagement einbezogen werden.

Ungeachtet des Erkenntnisgewinns ergeben sich für das untersuchte Versorgungsgebiet „HWAZ Herzberg/Elster“ aufgrund der technischen Ausgangslage und der bestehenden siedlungsstrukturellen Entwicklung keine Handlungserfordernisse, diese Datenanalyse

und die damit verbundene Bewertung durchzuführen. Das existierende Versorgungsnetz ist historisch bedingt überdimensioniert, wodurch ausreichende Kapazitätsreserven vorhanden sind, auch bei extremwetterbedingten Lastspitzen hinreichend Bewältigungskapazität zur Verfügung zu stellen. Hier zeigt sich die Notwendigkeit weiterer Untersuchungen in Versorgungsgebieten, in denen eine deutlich "zugespitztere" Ausgangslage vorliegt, d.h. Versorgungsengpässen bei Hitze zu erwarten sind.

Die Daten aus den verbrauchspunktbezogenen Messstellen, die Wirkzusammenhänge aus dem Versuchsbetrieb sowie die aus den Simulationen der virtuellen Versuchsstandorte und der Netzmodellierung gewonnenen Erkenntnisse zeigen mittelbar eine Anschlussfähigkeit im Klimaresilienzbewertungsmodell. Der Grund hierfür liegt darin, dass im Bereich der strategischen Klimaresilienz ausschließlich Prozessabläufe betrachtet werden, während konkrete Netzveränderungen oder technische Anpassungen nicht berücksichtigt werden. Ansatzknüpfungspunkte dieser technischen Anpassungen bestehen im Rahmen der operativen Klimaresilienz, da hier das konkrete Maßnahmenportfolio zur Erhöhung der Klimaresilienz von Versorgungsunternehmen abgebildet wird. So könnten beispielsweise dezentrale Trinkwasserzwischenspeicher aufgrund ihrer positiven Wirkungen an geeigneten Standorten als zusätzliche Maßnahme integriert werden. Sie sind EINE der möglichen technischen Maßnahmen, die zu einer höheren Bewertung der operativen Klimaresilienz im Modell führen. Die Wirkung ist damit nachweisbar, sie steht aber nicht in einem unmittelbaren mathematischen Zusammenhang mit dem Bewertungsergebnis, sondern fließt als qualitativer Faktor in einen durch den Anwendenden zu durchlaufenden gebietsspezifischen Bewertungsprozess ein.

A.3.2 Erprobung und Bewertung (TAP 6.2)

Ziel dieses Teilarbeitspakets war es, ein vollständiges Bild aller relevanten Akteure für eine klimaresiliente Trinkwasserversorgung zu erzeugen. Nachdem in der F&E-Phase bereits die Verbraucher/Eigentümer und das Versorgungsunternehmen abgebildet wurden, sollte nun der Akteur Verwaltung/Behörde ergänzt werden. Abschließend war vorgesehen, das Bewertungsmodell hinsichtlich seiner gebrauchstauglichen Anwendung bzw. Integration in bestehende Prozesse weiterzuentwickeln.

Zur Abbildung des Akteurs Verwaltung/Behörde sollte folgende Fragestellung beantwortet werden: Welche Handlungsmöglichkeiten besitzt derzeit die Verwaltung/Behörde, um zur klimaresilienteren Trinkwasserversorgung beizutragen? Je nach Tiefe der Ergebnisse sollte dabei auch die Wirkung der identifizierten Maßnahmen untersucht werden.

Zunächst erfolgte dazu eine Literatur- und Medienanalyse zum Thema Aktivitäten und Handlungsrahmen von Kommunen bei der Trinkwasserversorgung während Hitze und Trockenheit. Dabei rückte insbesondere die Maßnahme der Allgemeinverfügung in den Fokus, da sie bereits weit verbreitet Anwendung findet und spätestens seit der Corona-Pandemie gesellschaftlich an Bekanntheit gewann. Bei einer Allgemeinverfügung handelt es sich um einen Verwaltungsakt, der sich an die Allgemeinheit oder bestimmte Personenkreise richtet und für einen festgelegten Zeitraum die Nutzung einer Sache oder immaterieller Güter regelt (Alexy et al. 2024). Bezogen auf die Trinkwasserversorgung kann eine Allgemeinverfügung auf Grundlage des Wasserhaushaltsgesetzes (WHG § 100 Abs. 1 Satz 2) gerechtfertigt werden, um Beeinträchtigungen des Wasserhaushaltes sowie der Schutzgüter zu vermeiden. Dieser gilt als Ermächtigungsgrundlage für den Einsatz auf Ebene eines Landkreises. In der Praxis bedeutet dies meist eine zeitlich begrenzte oder vollständige Untersagung der Nutzung von Trinkwasser, Oberflächenwasser oder Grundwasser für bestimmte Zwecke. Deshalb wird dieses Instrument in Zeiten hoher Hitzebelastung und Dürre eingesetzt, um den Trinkwasserverbrauch zu beeinflussen und zu reduzieren.

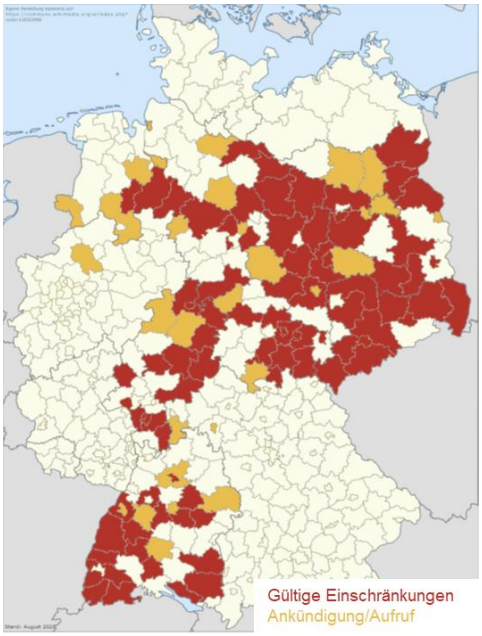


Abbildung 23 Landkreise mit Allgemeinverfügungen im Sommer 2023, Quelle: Ruge et al. 2023

Eine Analyse aus dem Jahr 2023 (s. Abbildung 23) zeigt, welche Landkreise und kreisfreien Städte eine solche Allgemeinverfügung umgesetzt oder geplant hatten. Dabei wurden Unterschiede zwischen den Bundesländern deutlich. Besonders in Regionen, die in den letzten fünf Jahren verstärkt von Trockenheit betroffen waren, fand die Allgemeinverfügung Anwendung. Was bisher noch unbeantwortet blieb, war die Fragestellung nach der Wirksamkeit dieses Instrumentes.

Deshalb wurden im Sommer 2024 insgesamt vier leitfadengestützte Interviews in Landkreisen durchgeführt, die eine entsprechende Allgemeinverfügung umgesetzt haben. Die Auswahl der Landkreise, beziehungsweise die gezielte Anfrage, erfolgte auf der Grundlage mehrerer Kriterien. Dabei wurde darauf geachtet, dass innerhalb der Allgemeinverfügungen unterschiedliche Regularien abgedeckt werden, um eine möglichst breite Perspektive zu gewinnen. Ein Beispiel dafür sind Allgemeinverfügungen mit temporären Einschränkungen bis hin zu Allgemeinverfügungen, die an Wetterparameter gekoppelt sind. Zudem spielte die administrative Vielfalt eine Rolle, sodass gezielt Landkreise aus verschiedenen Bundesländern berücksichtigt wurden. Ein weiteres Auswahlkriterium war die unterschiedliche räumliche und topografische Lage der Regionen, um mögliche Einflüsse geografischer Gegebenheiten zu erfassen. Darüber hinaus wurden die Rahmenbedingungen im Hinblick auf die Anforderungen durch unterschiedliche Nutzergruppen, wie Privathaushalte, Unternehmen, Landwirtschaft etc. Berücksichtigt. So hatten zwei Regionen eine starke landwirtschaftliche Prägung, deren künstliche Feldbewässerungen im Sommer einen erheblichen Wasserbedarf erzeugen und somit die Grundwasserleiter belasten. Des Weiteren wurde eine Kommune in einer Weinanbauregion ausgewählt, deren Winzer einen hohen Trinkwasserbedarf für die Herstellungsprozesse haben und gleichzeitig viele künstliche Bewässerungen von Rasen- und Grünflächen betrieben werden. All diese Regionen haben eine Allgemeinverfügung erlassen, da sie den Verbrauch der Ressource Wasser, insbesondere in den Sommermonaten, einschränken wollten und mussten, um ihre Grundwasserspeicher zu schützen.

Interviewpartner waren jeweils die Verantwortlichen für die inhaltliche Ausgestaltung der Allgemeinverfügungen, in drei Fällen aus der Leitungsebene der unteren Wasserbehörden und in einem Fall aus der Leitung eines Kreiswerks. Die Telefoninterviews wurden mit Akteuren aus folgenden Landkreisen geführt: LK Cochem-Zell, LK Nienburg/Weser, LK Havelland und LK Lüneburg.

Der Hauptgrund für den Einsatz von Allgemeinverfügungen war für die meisten Akteure eine zu hohe Spitzennachfrage nach Wasser in den Sommermonaten. Hierbei ist zu beachten, dass sich untere Wasserbehörden grundsätzlich umfassend mit allen Belangen der Ressource Wasser beschäftigen. Dadurch betrachten sie einen ganzheitlicheren Ansatz des Wasserkreislaufes, der über die reine Bilanzierung des Systems Trinkwasserversorgung hinausgeht. Daher wurden ebenfalls Allgemeinverfügungen erlassen, um einem verschwenderischen Umgang entgegenzuwirken und den langfristigen Schutz des Grundwasserkörpers sicherzustellen.

Ausschließlich auf die Trinkwasserversorgung bezogen wird zum Beispiel in der Allgemeinverfügung des Landkreises Cochem-Cell folgendes geregelt:

"...Entnahme von Trinkwasser aus dem Wasserversorgungsnetz der Kreiswerke Cochem-Zell – Eigenbetrieb Wasserversorgung - für folgende Verwendungen bis auf Weiteres untersagt ist:

1. Die Bewässerung von Rasen- und Grünflächen (Sträucher, Bäume, Blumenbeete und Zierpflanzen) im öffentlichen sowie im privaten Eigentum,

2. die Bewässerung von öffentlichen und privaten Sportstätten sowie Spiel und Freizeitplätzen,

3. das Befüllen von Pools, ausgenommen Kinderplanschbecken mit einer maximalen Füllmenge von 300 Litern,

4. das Waschen von Fahrzeugen auf privaten und öffentlichen Grundstücken, es sei denn, es handelt sich hierbei um eine ausdrücklich genehmigte Waschanlage,

5. das Reinigen und Abspritzen von Terrassen und Hofflächen,

6. die Entnahme von Wasser für Übungszwecke der Feuerwehren." (Kreiswerke Cochem-Zell 2022)

Diese Allgemeinverfügung tritt mit dem Datum der Veröffentlichung in Kraft und gilt bis zur Bekanntmachung ihrer Aufhebung. Sie kann somit flexibel je nach Wetterlage und Prognosen angewendet werden und enthält detaillierte Vorgaben, insbesondere für den Privatbereich.

Zusammenfassend lassen sich aus der Analyse der vier Allgemeinverfügungen und den Interviews folgende zentrale Erkenntnisse ableiten:

1. **Es ist ein Flexibles Instrument, welches an örtliche Bedingungen anpassbar ist.**
   Die Allgemeinverfügungen stellen ein flexibles Steuerungsinstrument dar, das sich an die örtlichen Gegebenheiten anpassen lässt. Abhängig von ökologischen, sozioökonomischen und technischen Rahmenbedingungen – wie etwa der Mächtigkeit des Grundwasserkörpers oder den regionalen Wirtschaftsstrukturen – können Inhalte und Zielstellungen entsprechend ausgestaltet werden. So ist beispielsweise eine Differenzierung zwischen der Nutzung von Trinkwasser, Oberflächenwasser und Grundwasser möglich. Darüber hinaus lassen sich die Regularien inhaltlich flexibel gestalten: Neben zeitlichen Vorgaben, etwa zur Tageszeit, können auch witterungsabhängige Kriterien wie bestimmte Tagestemperaturen in die Regelungen aufgenommen werden.
2. **Eine Schnelle Handlungsfähigkeit zur Reaktion auf Hitze und Dürreperioden ist gegeben.**
   Die Einführung einer Allgemeinverfügung kann, je nach Größe der Verwaltungseinheit und Anzahl der einzubindenden Akteure, innerhalb eines

Zeitraums von etwa einer Woche erfolgen. Maßgeblich für die Umsetzungsdauer ist auch der Erfahrungsstand der zuständigen Verwaltung – insbesondere, wie häufig dieser Prozess bereits durchlaufen wurde. In der Praxis zeigt sich, dass sich die Abläufe mit zunehmender Anwendung beschleunigen.

3. **Wirksamkeit im Hinblick auf die Reduktion des Wasserverbrauchs während des Geltungszeitraums**
   Die angestrebte Senkung des Trinkwasserbedarfs kann dadurch erreicht werden, dass bestimmte Wasserentnahmen entweder vollständig unterbleiben oder zeitlich in Perioden verlagert werden, in denen die Verdunstungsrate geringer ist. Tageszeitabhängige Verbote – beispielsweise im Bereich der Bewässerung – ermöglichen zudem eine Verschiebung von Verbrauchsspitzen in netzdienlichere Zeitfenster. Auch eine Reduktion der Entnahmen aus Oberflächengewässern und dem Grundwasser kann durch optimierte Bewässerungszeiten mit geringerer Verdunstung erreicht werden.
4. **Die Sensibilisierung der Bevölkerung gelingt weitgehend ohne aufwendige Kontrollmechanismen**
   Die rechtliche Verbindlichkeit der Allgemeinverfügung sowie eine implizite soziale Kontrolle in der Bevölkerung führen dazu, dass die Vorgaben in der Regel breit umgesetzt werden. Eine intensivere Kontrolle war vor allem bei der erstmaligen Einführung des Instruments erforderlich, da dessen Bekanntheitsgrad zu diesem Zeitpunkt noch gering war.
5. **Ergänzende Informations- und Kommunikationsangebote stärken die Akzeptanz und Verständlichkeit**
   Webbasierte Informationsplattformen unterstützen die Nachvollziehbarkeit der Maßnahmen für die Bevölkerung, indem sie den aktuellen Zustand des Wasserhaushaltes transparent darstellen und auf Schwellenwerte hinweisen. Diese Plattformen können gleichzeitig als ergänzende Regelungsgrundlage dienen. Beispiele hierfür sind visuelle Systeme wie die „Wasserampel“ im Landkreis Cochem-Zell oder interaktive Dashboards wie im Landkreis Nienburg.

Diese Erkenntnisse verdeutlichen, dass der Akteur Verwaltung bzw. Behörde bereits über ein Instrument verfügt, das kurzfristig umsetzbar und zugleich wirkungsvoll ist, um einem steigenden Wasserbedarf infolge von Hitze- und Dürreperioden aktiv entgegenzuwirken. Zwar unterscheiden sich die Anforderungen regional teils erheblich, doch bietet die Allgemeinverfügung ausreichend Flexibilität, um an die jeweiligen Gegebenheiten angepasst zu werden. Zudem zeigte sich, dass die Kontrollmechanismen und Schwellenwerte zur Aktivierung der Verfügung sehr unterschiedlich ausfallen können: von Beobachtungen des Oberflächenabflusses der Fließgewässer bis hin zu täglich aktualisierten Grundwassermessstellen. Vor diesem Hintergrund war es für das Klimaresilienzmodell nicht mehr erforderlich, neue Prozesse

innerhalb des Akteurs Verwaltung bzw. Behörde zu entwickeln. Der Fokus bleibt auf den Unternehmen.

Veränderungen im Stand der Forschung und regulatorischen Rahmenbedingungen – Klima- und Wettereffekte im Risikomanagement der Trinkwasserversorgung

Nach der abschließenden Betrachtung aller drei Akteure bestand der Ansatz darin, das Klimaresilienzmodell zu einer gebrauchstauglichen Anwendung weiterzuentwickeln beziehungsweise in bestehende Betriebs- oder Verwaltungsprozesse zu integrieren. Zu diesem Zweck wurde anhand einer Literaturrecherche sowie im Austausch innerhalb des Konsortiums erneut analysiert, welcher aktuelle Stand in Forschung und Praxis in Bezug auf die Integration von Klimaresilienz in Betriebs- und Verwaltungsprozesse vorliegt.

Dabei bestätigte sich – wie bereits in der F&E-Phase dargelegt –, dass erste Ansätze zur Integration der Klimaanpassung in die Betriebsführung beziehungsweise das Risikomanagement bereits existieren. Die Anforderungen an das Risikomanagement haben sich mit dem Inkrafttreten der neuen Trinkwasserverordnung im Jahr 2023 verändert: Seitdem sind alle Wasserversorgungsunternehmen (WVU) gemäß § 34 TrinkwV verpflichtet, ein kontinuierliches Risikomanagement für ihre Wasserversorgungsanlagen umzusetzen. Da dies jedoch mit einem erheblichen Aufwand verbunden ist, gelten zunächst gestufte Anforderungen, die einzelne Teilbereiche der Versorgungsunternehmen betreffen. So müssen gemäß der aktuellen Trinkwassereinzugsgebietsverordnung alle WVU bis zum 12. November 2025 eine Risikobewertung ihrer Trinkwassereinzugsgebiete unter Einhaltung definierter Mindestanforderungen durchführen.

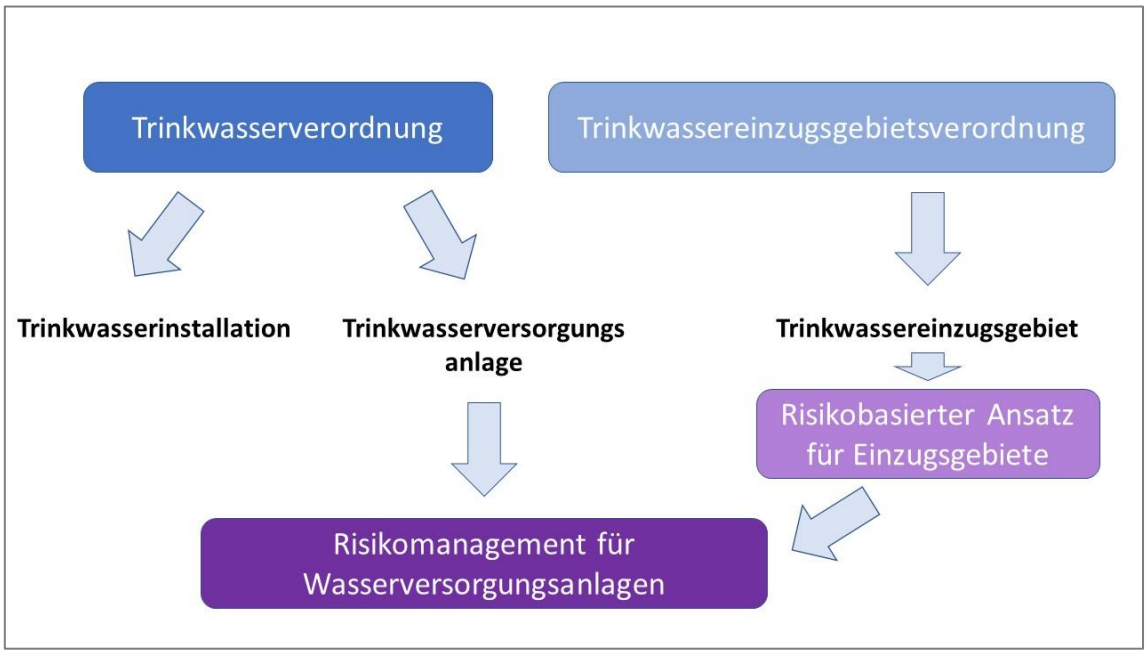


Abbildung 24 Zusammenhang der Verordnungen im Risikomanagement der Trinkwasserversorgung, Quelle: eigene Darstellung

Die Abbildung 24 veranschaulicht die Komplexität der derzeit geltenden regulatorischen Anforderungen. Das Thema Klimaresilienz und Klimaanpassung wird dabei in ein ganzheitliches Risikomanagement eingebettet, das von den WVU bis zum Jahr 2029 vollständig implementiert sein soll. Aktuell konzentrieren sich die Unternehmen vorrangig auf die Umsetzung der ersten Stufe – der Risikobewertung der Trinkwassereinzugsgebiete –, bevor sie im Anschluss eine umfassende Analyse des gesamten Versorgungssystems vornehmen.

Parallel zu diesen Entwicklungen werden derzeit Werkzeuge wie das Tool „RISKplus“ veröffentlicht, das in seiner finalen Version den Aufbau eines vollumfänglichen Risikomanagements ermöglichen soll. Um die Berücksichtigung klimatischer Einflussfaktoren – insbesondere von Hitze- und Dürreperioden – innerhalb des Risikomanagements zu untersuchen, wurde ein fachlicher Austausch mit dem Technologiezentrum Wasser (TZW) initiiert. Hier ist abzugrenzen, dass es sich bei dem an FLEXITILITY beteiligten und mit der mikrobiellen Bewertung betrauten Projektpartner TZW um eine an einem anderen Standort tätige Fachabteilung handelt, weshalb diese Aspekte nicht in FLEXITILITY eingebracht wurden. Grundsätzlich ist anzumerken, dass das TZW als Forschungsinstitut des DVGW, dem Verband der Trinkwasserversorgungsunternehmen, über den Verband Regelsetzungen vorbereitet und begleitet und somit unmittelbaren “Durchgriff” auf für die Unternehmen geltenden bzw. Zu beachtenden Rahmenbedingungen für Errichtung und Betrieb der Infrastruktur hat. Aktivitäten finden vor diesem Hintergrund hohe Beachtung und Berücksichtigung. Stand Ende 2024 laufen dort bereits Forschungsprojekte, deren Inhalte teilweise direkt

an die Klimaresilienzbewertung anschließen und perspektivisch in das Tool RISKplus integriert werden sollen.

Ein Beispiel hierfür ist das vom Bundesministerium für Gesundheit geförderte Projekt „RISTKLI“, das sich mit der Frage befasst, wie Klimaaspekte systematisch in das Risikomanagement eingebunden werden können. Inhaltlich entspricht dies im Klimaresilienzmodell dem Prozess der „Projektion zukünftiger Klimafolgen“. Im Rahmen von RISTKLI wird vertieft analysiert, welche vorhandenen Klimainformationen genutzt werden können, um belastbare Zukunftsszenarien für Versorgungssysteme und deren Auslastung zu entwickeln. Damit bestehen deutliche inhaltliche Überschneidungen mit dem Resilienzmodell, wobei RISTKLI diese Fragestellungen vertiefter bearbeitet und gezielt auf eine Integration in das Tool RISKplus ausgerichtet ist.

Ein weiteres Projekt, „ResilJetzt!“, verfolgt das Ziel, Wasserversorgungsunternehmen und weitere relevante Akteure für klimaresiliente Entscheidungen, Planungsprozesse und Maßnahmenentwicklungen zu sensibilisieren und zu unterstützen. Hierzu werden Optionen für eine zukunftsfähige Trinkwasserversorgung erarbeitet, die in hohem Maße den Maßnahmen der operativen Klimaresilienz des Resilienzmodells ähneln.

Die dargestellten Projekte verdeutlichen, dass die Integration von Klimaresilienz in die Praxis durch das TZW bereits über verschiedene Forschungsvorhaben hinweg in anwendungsorientierte Werkzeuge überführt wird. Aufgrund der inhaltlichen Nähe zur Methodik des Resilienzmodells sowie der bereits laufenden Weiterentwicklung und Anwendung des Tools RISKplus durch die WVU wurde die Entwicklung eines zusätzlichen Instruments im Rahmen des Projekts aufgrund geringer Anwendungschancen als nicht zielführend erachtet. Vielmehr wurden im Rahmen der Vernetzungsaktivitäten der Ansatz des FLEXITILITY-Modells im Rahmen des Interviews dem TZW-Team vorgestellt und diskutiert, damit der bisher verfolgte Modellansatz und die darin getätigten Überlegungen ggf. dort Verwertung finden können.

A.3.3 Bewertung mit verändertem Bilanzgrenzen (TAP 6.3)

Nach Abschluss der ersten Pilotphase der flexiblen Wasserwiederverwendung (ReUse) im Jahr 2023 wurde gemeinsam mit den Projektpartnern erörtert, inwieweit die aus der praktischen Anwendung gewonnenen Erfahrungen in das Resilienzmodell integriert werden können. Dabei traten mehrere methodische Hürden zutage. Das Klimaresilienzmodell erfasst ausschließlich Prozesse, die in einem Unternehmen durchgeführt oder nicht durchgeführt werden. Die flexible Wasserwiederverwendung stellt jedoch eine eigenständige Maßnahme mit spezifischen Wirkungen auf den Wasserkreislauf dar. Methodisch lässt sich diese Maßnahme mit ihren Auswirkungen nicht in das bestehende Modell integrieren.

Eine weitere Herausforderung stellt der Bilanzrahmen der Maßnahme dar. Das Klimaresilienzmodell bezieht sich ausschließlich auf die Trinkwasserversorgung mit den daran angeschlossenen Verbrauchern. Die Bewässerung landwirtschaftlicher Flächen ist nicht regulärer Bestandteil der Versorgungsaufgabe. Die Einsparpotenziale der Wasserwiederverwendung liegen jedoch primär in der Substitution direkter Grund- oder Oberflächenwasserentnahmen. Diese Nutzungen sind systemisch von der Trinkwasserversorgung zu trennen – es sei denn, der Bilanzrahmen umfasst den gesamten Wasserkreislauf einschließlich der Grundwasserkörper. Ein solcher umfassender Bilanzrahmen ist im Klimaresilienzmodell nicht angelegt. Aus diesem Grund ist eine Bewertung von Wasserwiederverwendungsmaßnahmen in der Landwirtschaft im Modell nicht möglich und eine Implementierung der Maßnahme in das Modell nicht vorgesehen.

A.4 Durchgeführte Arbeiten im AP 7

Im Rahmen des Arbeitspakets 7 wurden drei Videos produziert, die das Forschungsprojekt vorstellen und anschaulich die Funktionsweise sowie die Anwendung der dezentralen Trinkwasserzwischenspeicher erläutern. Die Videos richten sich bewusst an ein Publikum ohne spezielles Fachwissen und versuchen, Forschungserkenntnisse einem möglichst breiten Kreis interessierter Personen zugänglich zu machen. Die Inhalte sind thematisch gegliedert:

- Video 1: Einführung in das Thema
- Video 2: Technischer Aufbau
- Video 3: Zentrale Erkenntnisse

Die Umsetzung erfolgte mithilfe dynamischer PowerPoint-Präsentationen. Die Inhalte wurden überwiegend im Cartoon-Stil gestaltet und durch vielfältige Icons, eigene Darstellungen und Bildmaterial ergänzt. Die Vertonung wurde auf Grundlage selbst erstellter Skripte mithilfe des KI-Chatbots ChatGPT (OpenAI) generiert.

Die fertigen Videos sollen auf der Projektwebsite sowie auf der Website des BTU-Fachgebiets veröffentlicht werden.

A.5 Zusammenfassung der Erkenntnisse

Dezentrale Trinkwasserzwischenspeicher im TW-Versorgungsnetz

Technische Bewertung

Für Installationen in der Trinkwasserversorgung gelten u.a. über die technischen Regelwerke formulierte hohe Anforderungen, die auf neue Komponenten, wie einem Trinkwasserspeicher angewendet werden müssen. Dieses Regelwerk bietet einen hinreichenden Rahmen, unter dessen Beachtung betriebsfähige Speicher entwickelt und regelkonform betrieben werden können.

Dezentrale Trinkwasserspeicher können Tages-Schwankungen, insbesondere Nachfragespitzen im Trinkwasserversorgungsnetz reduzieren. Dafür muss eine Mindestanzahl an Hausanschlüssen mit einem Speicher nachgerüstet werden. Anhand von Simulationen des Projektpartners TZW, die mit realen Messdaten dieses Teilprojektes gespeist wurden, konnte diese Wirkung bei einem "Anschlussgrad" von 30% nachgewiesen werden. Für weitere Ergebnisse in diesem Zusammenhang wird auf den Ergebnisbericht des Projektpartners TZW verwiesen.

Für einen Ausgleich zeitlich länger andauernder Verbrauchsänderungen z.B. infolge längerer Trocken- oder Hitzeperioden ist ein dezentraler Trinkwasserzwischenspeicher aufgrund der großen vorzuhaltenden Mengen im Gebäudebereich und aufgrund des dafür fehlenden Platzes, ungeachtet wirtschaftlicher Herausforderungen, nicht realisierbar. Der Nachfrage-Ausgleich der erprobten Speicher war deshalb auf Tagesschwankungen ausgelegt.

Die Erhöhung der Bewältigungskapazität wird durch diese Systementscheidung bei allen technischen Komponenten erreicht, die sich in ihrer Dimensionierung am Tagesverbrauch und dessen Schwankungen orientieren und auf den Wassertransport ausgelegt sind. Dies gelingt, weil die Speicher in Zeiten geringer Wassernachfrage gefüllt werden, und in der Folge der durch den Speicher versorgte Verbraucher keine netzwirksamen Lastspitzen mehr generiert, d.h. das Netz zu Spitzenlastzeiten entlastet wird.

Zusätzlich werden durch dezentrale Trinkwasserspeicher die “Notlaufeigenschaften” des Trinkwassernetzes im Havariefall bis zum Aufbrauchen des Speichervolumens, i.d.R. ein Tag, verbessert.

Aus hygienischer Sicht kann die Versorgung durch einen Speicher während extremwetterbedingter Versorgungsengpässe oder dem Ausfall der Trinkwasserversorgung über mehrere Tage problemlos weitergeführt werden.

Ökonomische Bewertung

Dezentrale Trinkwasserzwischenspeicher verursachen als zusätzliche Systemkomponente im Vergleich zu einer konventionellen Hausinstallation hohe Anschaffungs- und Herstellungskosten und hohe Betriebskosten.

Die Wirtschaftlichkeitsrechnungen auf Basis der Messdaten aus dem virtuellen Speicherbetrieb zeigen sowohl technisch wie auch ökonomisch Skalierungseffekte bei dem Aufwand pro Nutzende. Im Nutzungszweck Wohnen ergibt sich im Einfamilienhausbereich aufgrund sehr hoher und individueller Lastspitzen, der damit verbundenen Speichergröße und des technischen Aufwandes insgesamt kein Anwendungsszenario. Die zusätzlichen Kosten pro m³ Trinkwasser übersteigen den aktuellen TW-Preis um ein Vielfaches. Erst bei einer breiteren Abnehmerstruktur, wie sie im Mehrfamilienhaus untersucht wurde, entstehen zusätzliche Kosten pro m³ in der Größenordnung des aktuellen Trinkwasserpreises.

Ein wirtschaftlicher Betrieb, d.h. eine Deckung der speicherbedingten Kosten durch vermiedene Kosten beim Versorgungsunternehmen oder beim Verbraucher, kann bei keiner der untersuchten Varianten erreicht werden. Dies liegt insbesondere daran, dass durch die Anlagen selbst ohne Veränderung der Betriebsweise des Trinkwasserversorgungssystems keine messbaren Kostenreduzierungen erreicht werden, die eine Refinanzierung der Kosten erwarten lassen. Hierfür wäre z.B. eine Druckreduzierung o.ä. zur Betriebskostenreduktion erforderlich. Weiterhin erfolgt keine “Einpreisung” der durch das System erreichten Zunahme der Bewältigungskapazität bzw. der dezentralen Sicherheitsreserve durch den Nutzer. Ohne eine “Nutzenbewertung” dieser Faktoren ist die Umlagefähigkeit der zusätzlichen Kosten nicht zu erwarten.

Der Betrieb von Speichern kann in Ausnahmefällen wirtschaftlich sein, wenn besondere Rahmenbedingungen wie eine punktuell hohe Trinkwassernachfrage oder versorgungsnetzbedingte Engpässe für beispielsweise Großkunden einen Netzausbau erfordern und der dadurch vermieden werden kann. Auch hier werden die vermiedenen Kosten an anderer Stelle in die Refinanzierungsrechnung einbezogen.

Klimaresilienzbewertung

Die im Klimaresilienzmodell entwickelten Ansätze und Zielstellungen (z.B. Klima Monitoring) werden durch die Anforderungen der Trinkwasserverordnung in das Risikomanagement der Wasserversorgungsunternehmen integriert. Der Sachverhalt findet damit über einen von der in FLEXITLITY entwickelten Modell abweichenden, aber vielversprechenden und robusten Pfad Eingang in das Handeln der WVU.

Der im Akteurs-Dreiklang (Verbraucher/Eigentümer, WVU, Verwaltung/Behörde) der TW-Versorgung wichtige Aufgabenträger der Daseinsvorsorge “Verwaltung/Behörde” hat bereits heute die Möglichkeit, den Trinkwasserbedarf bspw. während Extremwetterereignisse zu beeinflussen, bzw. zu reduzieren und damit auf eine höhere Bewältigungskapazität hinzuwirken. Hier wird kein instrumenteller Weiterentwicklungsbedarf gesehen.

Forschungsfragen

Bezugnehmend auf die anfangs genannten Forschungsfragen ergeben sich aus den Darlegungen folgende Antworten:

- Welche Wirkung entwickeln Zwischenspeicher in Hinblick auf den Ausgleich nachfragebedingt induzierter Nachfrageschwankungen im öffentlichen Versorgungsnetz?

  Die Verschiebung des Trinkwasserverbrauches einzelner Verbraucher in Zeiten geringer Nachfrage kann durch dezentrale Trinkwasserzwischenspeicher erreicht werden. Messbar werden diese Effekte im Netz, d.h. eine Glättung des Trinkwassernachfragelastgangs erst, wenn eine höhere Anzahl an Speichern zwischen Verbrauchern und Netz installiert wird.

- Welche Kosten entstehen im Anlagenbetrieb und wie können diese reduziert werden?

  Dezentrale Trinkwasserzwischenspeicher verursachen hohe Investitions- und Betriebskosten. Spezifische Kosteneinsparungen können durch Skalierungseffekte erschlossen werden. Hier wird eine Mindestabnahme eines Mehrfamilienhauses als “sinnvoll” erachtet.

- Welche optimale Größe der Zwischenspeicherlösung resultiert daraus?

  Eine optimale Größe lässt sich aufgrund der Wechselwirkungen zwischen den Dimensionierungsfaktoren nur Standortspezifisch berechnen.

- Welche Mindestanforderungen an den Druck und die Leistung von Hausanschlüssen der öffentlichen TW-Versorgung bestehen bei einem Betrieb von Zwischenspeicherlösungen?

  Es ergibt sich ein theoretisches, d.h. rein rechnerisches Potenzial, den Druck und damit die Nachspeiseleistung von Hausanschlüssen zu reduzieren. Die Regelkonformität wurde nicht untersucht.

- Über welchen Zeitraum kann die Versorgung der Objekte bei klimabedingt reduzierter Trinkwassereinspeisung aus dem öffentlichen Netz durch den Betrieb der Zwischenspeicherung aufrechterhalten werden? (Wirkung auf objektbestimmte Bewältigungskapazität)

  Die Anlagen können die Bewältigungskapazität der TW-Versorgung im Tageslastgang erhöhen. Der Ausgleich einer fiktiven Mangellage kann aufgrund der technischen Auslegung für wenige Tage erfolgen.

B. Die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Bei der Nutzung des Gesamtbudgets ergaben sich im Projekt teilweise Abweichungen zur ursprünglichen Planung. Die dabei zwingend erforderlichen Kosten für Personal ergaben den geplanten Rahmen. Es gab keine größeren Abweichungen. Das Budget für den investiven Bereich wurde hingegen nicht vollständig ausgeschöpft, da sich die Anlagenplanung im Vergleich zur ursprünglichen Planung anders entwickelte. Die folgenden Gründe sind dafür zu nennen:

- Mehrfache Anpassungen der Planung an den Standorten durch veränderte Anforderungen seitens des Praxispartners
- Verzicht auf die Realisierung eines dritten Trinkwasserzwischenspeichers und Durchführung der “virtuellen Speicherbetriebe” inkl. Beschaffung entsprechender Messtechnik
- Veränderung der Anschaffungs- und Herstellungskosten der Komponenten

C. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die durchgeführten Arbeiten sowie die dafür aufgewandten Ressourcen waren notwendig und angemessen, da sie soweit möglich der im Projektantrag detailliert

dargelegten Planung entsprachen. Darüber hinaus mussten keine zusätzlichen Ressourcen zur Durchführung des Vorhabens aufgewandt werden.

D. Verwertungsplan

Die angestrebte wissenschaftliche Verwertung konnte in ihren Grundzügen umgesetzt werden. Die Ergebnisse der Planung und des Betriebs der Trinkwasserzwischenspeicher liefern klare Erkenntnisse über deren möglichen Einsatzbereich in der Praxis. Hierzu liegen ausreichend Informationen vor, um eine Empfehlung für deren Anwendung zu erstellen. Hinsichtlich der Klimaresilienzbewertung werden die definierten Anforderungen zum Teil in weitere ausgelagerte Prozesse des Risikomanagements der WVU eingebunden. Die Erkenntnisse fließen zudem im Rahmen wissenschaftlicher Aktivitäten in Vorträge ein, die beispielsweise auf öffentlichen Tagungen gehalten werden. Die Ergebnisse wurden beispielsweise im Forschungskolloquium an der Fakultät 6 der BTU präsentiert. Im Rahmen mehrerer Bachelor- und Masterstudiengänge, u. a. Stadt- und Regionalplanung, Bauingenieurwesen und Klimagerechtes Bauen, wurden die Ergebnisse des Verbundprojektes in die akademische Ausbildung und in studentische Arbeiten integriert. In diesem Zusammenhang wurden Masterarbeiten zur Bearbeitung von Teilaspekten ausgelobt, die sich aus dem Projekt ergeben haben, darunter zur extremwetterbedingten Infrastrukturbelastung. Weitere Untersuchungsmöglichkeiten sind die Analyse und Verschneidung der Messdaten von Ein- und Mehrfamilienhäusern hinsichtlich des Nutzerverhaltens bei bestimmten Ereignissen. Die erhobenen Messdaten sind in diesem Zusammenhang Grundlage für die Optimierung des Anlagenbetriebes der Trinkwasserversorgung.

E. Während der Durchführung bekannt gewordene Fortschritte

Für die durchgeführten Arbeiten im Arbeitspaket 6 (AP 6) sind während der Forschungsarbeiten neue Erkenntnisse bekannt geworden. Die im Förderprogramm „DVGW-Zukunftsprogramm Wasser“ durchgeführten Tätigkeiten, die durch den Projektpartner TZW bekannt geworden sind, haben parallele Forschungen zu den Inhalten des AP 6 aufgezeigt. Eine genauere Erläuterung des Vorgehens und des Umgangs mit diesen Erkenntnissen ist im Kapitel „3.2 Erprobung und Bewertung – Veränderungen im Stand der Forschung und der regulatorischen Rahmenbedingungen“ zu finden.

F. Erfolgte und geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse

Erfolgt:

Preuß, Volker; Hoffmann, David (2024): Vortrag und Vorstellung der Projektergebnisse beim Fachtechnischer Erfahrungsaustausch Wasser

Darstellung des Klimaresilienzmodelles auf der InfraSpree Messe am 15. Oktober 2024

Beitrag in der Lausitzer Wasserzeitung im Juli 2025

Geplant:

Veröffentlichung der Einzeldokumentationen (Videos) zum Thema der dezentralen Trinkwasserzwischenspeicher (AP7) auf der Projektwebsite und der Website des Fachgebietes Infrastruktur- und Mobilitätsplanung bis Oktober 2025

Veröffentlichung anonymisierter Messdaten (Rathaus, EFH, MFH) auf OpenSource Plattformen zur weiteren Verwendung bis Dezember 2025

Veröffentlichung zum Thema: „Einsatz und Wirkung der dezentralen Trinkwasserzwischenspeicher“ in der Energie-Wasser-Praxis Zeitschrift bis erstes Quartal 2026

G. Literaturverzeichnis

Alexy, Lennart; Fisahn, Andreas; Hähnchen, Susanne; Mushoff, Tobias; Trepte, Uwe (2024): Das Rechtslexikon. Begriffe, Grundlagen, Zusammenhänge. Verlag J.H.W. Dietz Nachf. , Bonn, 2. Auflage.

BDEW. (2025): Entwicklung des Wasserverbrauchs pro Einwohner und Tag in Deutschland in den Jahren 1990 bis 2024 (in Litern). Statista. Statista GmbH. [online] https://de.statista.com/statistik/daten/studie/12353/umfrage/wasserverbrauch-pro-einwohner-und-tag-seit-1990/ [letzter Zugriff am 24.07.2025]

DESTATIS (2023): Wohnungsbestand nach Anzahl und Quadratmeter Wohnfläche [online] https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Wohnen/Tabellen/wohnungsbestand-deutschland.html [letzter Zugriff am 24.07.2025]

Hoffmann, Frank; Karger, Rosmarie (2013): Wasserversorgung: Gewinnung – Aufbereitung – Speicherung – Verteilung, 14. Auflage, Seite 254

HWAZ (2024): Trinkwasserpreise Tarifgebiet A [online] https://www.hwaz.de/seite/687583/trinkwasserpreise-tarifgebiet-a.html [letzter Zugriff am 19.08.2025]

Knorr, Kaspar, Giron, Pedro, Wiemer, Martin (2023): Integrierte Simulationen und Ergebnisinterpretation. In: Mohajeri, Shahrooz: *Verbundschlussbericht für die F+E Phase Flexible Utility Mit sozio-technischer Flexibilisierung zu mehr Klimaresilienz und Effizienz in der Städtischen Infrastruktur (Flexitility), S. 68 - 76*

Kreiswerke Cochem-Zell (2022): Öffentliche Bekanntmachung der Kreiswerke Cochem-Zell – Eigenbetrieb Wasserversorgung Allgemeinverfügung vom 08.08.2022 zur Einschränkung des Gebrauchs von Trinkwasser aus dem Netz der Kreiswerke Cochem-Zell

Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft - Baden-Württemberg (2023): Wasserpreisübersicht 2023 [online] https://um.baden-wuerttemberg.de/de/presse-service/presse/pressemitteilung/pid/wasserpreisuebersicht-2023 [letzter Zugriff am 19.08.2025]

Ruge, Kay; Wilcken, Christine; Düsterdiek, Bernd; Abel, Thomas (2023): Handreichung Einschränkung der Trinkwasserversorgung in Hitzesommern. VKU Verlag

Statistik BW - Statistisches Landesamt Baden-Württemberg (2025): Wohnkosten- und verhältnisse. [online] https://www.statistik-bw.de/Wohnen/WkostenVerhaeltnis/BW-BT_belegungsdichte.jsp [letzter Zugriff am 24.07.2025]