

Abschlussbericht

des Verbundprojekts

WaWaBe: Warmwasserbereitung als Hemmschuh
der Energiewende - Technische, hygienische und
rechtliche Konfliktpunkte zwischen
Wärmepumpeneinsatz und
Trinkwarmwasserbereitung

August 2023

Projektleitung

Prof. Dr. rer. nat. Oliver Opel, Fachhochschule Westküste, Institut für die Transformation des Energiesystems, Heide

Projektlaufzeit

01.01.2021 - 31.12.2022

Text

Genuardi MD, Wiegand M, Opel O, Hemmert-Halswick, M, Buchmüller C, Stegemann S, Hippelein M, Puls NJ

Projektpartner

 PPF INGENIEURE
PLANEN - PROZESSMANAGEMENT - CONSULTING

Dipl.-Ing. Architekt Norbert Jürgen Puls, PPF Ingenieure UG, Hamburg

 UK SH UNIVERSITÄTSKLINIKUM
Schleswig-Holstein

Dr. Martin Hippelein, Dr. Bärbel Christiansen, Universitätsklinikum Schleswig-Holstein, Medizinaluntersuchungsamt und Hygiene, Kiel

Hinweis: Aus Gründen der Lesbarkeit wurde in der Arbeit lediglich eine Form des Geschlechts gewählt und auf die gleichzeitige Verwendung der Sprachformen männlich, weiblich und divers (m/w/d) verzichtet. Sämtliche Personenbezeichnungen gelten gleichermaßen für alle Geschlechteridentitäten.

Zusammenfassung

Das Projekt fokussiert Hemmnisse bei der Nutzung von Wärmepumpen in der Praxis, denen eine Hauptrolle bei der Umsetzung der Wärmewende zukommt. Dieses sind neben Fragen der effizienten, aber hygienischen Trinkwarmwasserbereitung rechtliche Fragen und die energiesystemische Einbindung.

Zur Identifikation und Analyse entsprechender Hemmnisse wurde eine Umfrage sowie Untersuchungen an Fallbeispielen durchgeführt, mit denen verschiedene innovative Trinkwarmwasserkonzepte umgesetzt wurden. Teilweise sind die untersuchten Gebäude mit einer Ultrafiltrationsanlage ausgestattet, die geeignet ist, die Keimzahlen im Trink(warm)wasser deutlich zu reduzieren.

Beim Einsatz von Wärmepumpen für die gebäudenah zentrale Wärmeherzeugung von Bestandsgebäuden treten Herausforderungen einerseits bei einer niedrigen energetischen Qualität der **Gebäudehülle**, andererseits durch die erforderlichen **hohen Temperaturen** zur Sicherstellung eines **hygienischen Warmwassers** auf, welche zusätzlich durch **Sperrzeiten** des Wärmepumpenbetriebs z. T. schwer einzuhalten sind. Mit steigender Qualität des baulichen Wärmeschutzes steigt der Anteil des Wärmebedarfs für Warmwasser am Gesamtwärmebedarf, wobei ein hoher Anteil der gesamten Wärmemenge auf Zirkulationsverluste zurückzuführen ist (in einem in diesem Projekt betrachteten Mehrfamilienhaus (MFH) betrug der Wärmeverlust durch die Zirkulation 55 % der für die Warmwasserbereitung benötigten Wärmemenge). Während der bauliche Wärmeschutz technisch eine Absenkung der Vorlauftemperaturen der Heizkreise erlaubt, erfordert die Trinkwasserhygiene nach den allgemein anerkannten Regeln der Technik (a.a.R.T.) weiterhin eine Systemtemperatur von 55 °C, um durch **Legionellen** verursachten Lungenkrankheiten vorzubeugen.

Eine **Temperaturabsenkung** um 5 °C könnte einen erheblichen Beitrag zur **Steigerung der Energieeffizienz** bzw. Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe, zur **Energieeinsparung** und zur **Reduktion der CO₂-Emissionen** leisten. Das Einsparpotential für Deutschland wurde in dieser Arbeit auf 7,78 - 14,50 TWh pro Jahr bzw. 1,87 - 3,48 Mio. CO₂ Äquivalent errechnet, was etwa 10 % des Wärmebedarfs für die Warmwasserbereitung entspricht. Ein **vorangegangenes Forschungsprojekt** mit dem Kurztitel „*DFZ-Analytik zur Überwachung der Energieeffizienz*“ untersuchte, inwieweit **Ultrafiltrationsanlagen** (im Folgenden „UF-Anlagen“), welche Mikroben physikalisch vom System abtrennen, eine hygienisch unbedenkliche Absenkung der Wassertemperaturen in häuslichen Trinkwasseranlagen erlauben (Hippelein et al., 2018). In 13 **Modellobjekten** wurde der von den UF-Anlagen innerhalb der Trinkwasserinstallation erzielte Abreinigungseffekt (Änderung der

Gesamtzellzahl) mittels eines Laborzytometers ermittelt. Der Abreinigungseffekt betrug im Mittel 80 %, wobei auch die räumliche und zeitliche Variabilität betrachtet wurde. (Zur Einordnung: ein normaler Wert für eine Trinkwasser-Installation beträgt 100.000 - 250.000 Zellen/ml). Ein hygienisch sicherer Betrieb war in den Modellobjekten bei abgesenkten Warmwassertemperaturen und Absicherung mittels Ultrafiltrationsanlage und regelmäßiger Beprobung möglich (Hippelein et al., 2018).

Anknüpfend an diese frühere Arbeit wurde in diesem Projekt ein **mobiler Durchflusszytometer** im Vergleich zur Labormethode validiert. Das mobile Gerät soll den hygienischen Zustand des Trinkwassers im Schnellverfahren, bzw. deutlich schneller als per Ausplattieren, bestimmen, um eine Temperaturabsenkung im Sinne eines effizienten Betriebs des Wärmeerzeugers zu ermöglichen. Eine grundsätzliche Zulässigkeit der Abweichung von der normativen Temperaturanforderung nach den a.a.R.T. ergibt sich in Schleswig-Holstein aus: (Wasserhygienekommission des Landes Schleswig-Holstein, 2021)).

Die Ermittlung ergab, dass die Abweichung zwischen der im o. g. Projekt verwendeten Labormethode und der in diesem Projekt angewendeten mobilen Bestimmung als akzeptabel zu bewerten ist. **Die mobile Zytometrie liefert** in einem Büroraum durch einen vom Laborpersonal geschulten Probenehmer **vergleichbare Werte**. Somit steht eine Methode zur Verfügung, die kein spezialisiertes Hygienelabor erfordert und einen Beitrag zur Beschleunigung der Wärmewende und Sicherstellung der gesundheitlichen Unbedenklichkeit des Trinkwassers leisten kann.

Weiterhin wurde in diesem interdisziplinären Kooperationsprojekt aus **technisch-hygienischer** sowie **rechtlicher Sicht** untersucht, welche **Hemmnisse** eines beschleunigten **Wärmepumpenhochlaufs** für Bestandsgebäude und Quartiere in Schleswig-Holstein und darüber hinaus entgegenstehen und welche Faktoren das **Auftreten von Legionellen** beeinflussen. Der Fokus liegt auf der zentralen Warmwasserbereitung, da sie einen wesentlichen Anteil im Gebäudebestand einnimmt und auch im Neubau noch immer umfassende Anwendung findet.

Bei der **Planung der Wärmeversorgung mittels Wärmepumpe** können rein praktische Faktoren hinderlich für den Einbau von monovalenten Wärmepumpen in bestehenden **Mehrfamilienhäusern** (MFH) sein - sowohl als **einzelne Faktoren**, als auch durch ihren **kombinierten Effekt**.

MFH unterscheiden sich von Einfamilienhäusern (EFH) durch:

- die wesentlich höhere **benötigte Wärmemenge**
- die **Vielzahl an Nutzern**
- die höhere **Komplexität der Warmwasserinstallation**

- sowie größere **Mengen benötigtes Kältemittel**, deren Umgang ggf. einen „großen **Kälteschein**“ erforderlich macht und aufgrund derer eine Innenaufstellung der Wärmepumpe je nach Entflammbarkeit des Kältemittels nicht zulässig ist
- eine ggf. geringere **Verfügbarkeit von Grundstücksfläche** für die Außenaufstellung einer Wärmepumpe.

Der Installation von Wärmepumpen (insbesondere Luftwärmepumpen) stehen **grundsätzlich keine nennenswerten planungs- und genehmigungsrechtlichen Hürden** entgegen. Grundsätzlich sind **weder eine Baugenehmigung** (Ausnahme: Einhausung der Wärmepumpe) **noch eine immissionsschutzrechtliche Genehmigung** erforderlich. Für Wärmepumpen, die Wasser oder Erdwärme als Wärmeträger nutzen, können sich allerdings zusätzliche Anforderungen aus dem Wasserrecht (Wasserhaushaltsgesetz) bzw. dem Bergrecht (Bundesberggesetz) ergeben.

Strombetriebene Wärmepumpen profitieren vom allgemeinen Netzanschlussanspruch nach §§ 17, 18 EnWG. Ihnen darf schon nach geltendem Recht **nur im Ausnahmefall ein Netzanschluss versagt** werden. **Zukünftig** wird Netzbetreibern **voraussichtlich überhaupt nicht mehr** gestattet sein, Betreibern von Wärmepumpen den Netzanschluss zu verweigern.

Nach **bisheriger Rechtslage** kommt eine **Reduzierung des Strombezugs** regelmäßig nur dann in Betracht, wenn sich der Betreiber der Wärmepumpe **freiwillig** einer **Steuerbarkeit** durch den Netzbetreiber unterworfen hat. Ein entsprechender Anreiz ergibt sich seit einigen Jahren aus der Regelung des § 14a EnWG, der ein reduziertes Netzentgelt für steuerbare Verbrauchseinrichtungen vorsieht. **In der Regel** ist es noch so, dass die **Netzbetreiber feste Abschaltzeiten** festlegen, in denen die Anlage, zusammen mit allen anderen steuerbaren Verbrauchseinrichtungen im Netzgebiet abgeschaltet wird.

Durch die Steuerungsmöglichkeit kann der Verteilnetzbetreiber theoretisch eine Anpassung der Leistungsanspruchnahme an die **Belastungsverhältnisse im Verteilnetz** vornehmen, indem steuerbare Lasten zu- oder abgeschaltet werden. Durch eine intelligente Zuschaltung von Geräten könnte etwa die Gefahr einer Leitungsüberlastung durch einen Einspeiseüberhang, z.B. bei hohen PV-Erträgen, reduziert werden. In der Realität machen Netzbetreiber unterschiedlich Gebrauch von ihrer Steuerungsmöglichkeit (**regionale Unterschiede**). 2019 veröffentlichte die Mehrzahl der in einer Analyse betrachteten Netzbetreiber (n=80) keine konkreten Angaben zu Sperrzeiten von Wärmepumpen (Kropp et al., 2020).

Sperrzeiten sind für kleine bzw. leistungsschwache Wärmepumpen (Ein- bzw. Zweifamilienhäuser) aktuell recht unproblematisch. Für leistungsstarke Wärmepumpen können Sperrzeiten hingegen problematisch sein (Quartiere, mehrere Wohneinheiten). **Feste Sperrzeiten** sind wenig sinnvoll. Nach einer Abschaltung werden alle Wärmepumpen

gleichzeitig wieder eingeschaltet, was das Stromnetz belastet und mechanische Bauteile beansprucht. Ein weiterer Nachteil bei festen Sperrzeiten besteht darin, dass bei zeitgleicher Abschaltung der Wärmepumpen und maximaler Einspeisung der Photovoltaikanlagen die Gefahr einer Leitungsüberlastung durch einen **Einspeiseüberhang** bestehen könnte.

Die **Bundesnetzagentur** hat im November 2022 durch ihre Beschlusskammern 6 und 8 **zwei Festlegungsverfahren zur Konkretisierung des § 14a EnWG n.F. und damit zur Weiterentwicklung des Rechtsrahmens für steuerbare Verbrauchseinrichtungen** wie Wärmepumpen eingeleitet. Ein Inkrafttreten der beiden Festlegungen ist zum **1.1.2024** geplant. Für Betreiber von Wärmepumpen werden die geplanten Neuregelungen unter anderem folgende **Auswirkungen** haben:

- Die **Steuerbarkeit** wird **zukünftig** nicht mehr freiwillig, sondern **verpflichtend** sein.
- **Feste Abschaltzeiten** sind dagegen (nach einer Übergangsfrist) **nicht mehr zulässig**. **Stattdessen** darf der Netzbetreiber nur im Fall einer durch eine **Netzzustandsermittlung** festgestellten tatsächlichen Gefährdung oder Störung der Sicherheit oder Zuverlässigkeit des Netzes den netzwirksamen Leistungsbezug von Wärmepumpen im notwendigen Maß zu reduzieren.
- Es gibt in zeitlicher Hinsicht **keine Begrenzung von Zeiträumen der Leistungsreduzierung durch den Netzbetreiber**, solange diese notwendig ist. Allerdings ist ein **Mindeststrombezug von 4,2 kW** durchgängig **sichergestellt**. Eine **vollständige Abschaltung** wird es – anders als gegenwärtig – **nicht mehr** geben. Wärmepumpen und Wärmespeicher müssen zukünftig unter Berücksichtigung dieser Rahmenbedingungen **geplant und ausgelegt** werden.
- Wärmepumpenbetreiber müssen sich zukünftig zwischen **mehreren Varianten der Netzentgeltreduzierung** entscheiden. **Zusätzliche Chancen** können sich dabei für die Betreiber von Wärmepumpen aus einer **Nutzung zeitvariabler Netzentgelte** im Fall der **Lastverschiebung** ergeben.

Die **Rahmenbedingungen** für den Betrieb von Wärmepumpen und deren Wirtschaftlichkeit werden sich mit Inkrafttreten der **Festlegungen der Bundesnetzagentur grundlegend verändern**.

Technisch gesehen könnten **modulierende Wärmepumpen** mit variabler Drehzahl des Kompressormotors oder eine **Kaskadenschaltung** mehrerer Geräte Abhilfe schaffen. Modulierende Wärmepumpen (auch: Inverterwärmepumpen) können im Winter bei hoher Heizlast im optimalen Leistungsbereich arbeiten und dennoch im Sommer wirtschaftlich Trinkwasser erwärmen. Diese sind aber bisher nur bis zu einer Leistung von etwa 25 kW

erhältlich. Hier könnte sich die Industrie mit steigender Nachfrage weiterentwickeln. Zur Überbrückung der Sperrzeiten müssen Anschlussnehmer derzeit Pufferspeichersysteme einplanen und die Sperrzeiten bei der Effizienzberechnung berücksichtigen (anderenfalls handelt es sich um einen Planungsfehler). Das Erreichen der hygienischen Mindesttemperaturen ist i.d.R. nicht problematisch, vielmehr das Halten der Temperatur (Wärmeverluste, hoher Stromverbrauch, ineffizienterer Betrieb der Wärmepumpe). Bei gleichzeitiger Warmwassernutzung kann der Wärmebedarf nur durch ein ausreichend großes Speichervolumen gedeckt werden (ggf. Erhöhung der Investitionskosten), Abhilfe könnte eine geregelte Reduzierung der Warmwassertemperatur sein, dies ist aber nach a. a. R. d. T. nicht zulässig.

Im Hinblick auf die übergeordnete Forschungsfrage „wie lässt sich die Trinkwasserhygiene energieeffizient sicherstellen“ sind weitere, teilweise noch nicht in den a.a.R.d.T. und der Praxis ausreichend enthaltene und berücksichtigte Punkte relevant:

- Legionellen im **Kaltwasser** (eine ggf. angeordnete weitere Erhöhung der Warmwassertemperatur als Gegenmaßnahme wirkt sich negativ aus wegen eines ggf. stattfindenden erhöhten Wärmetransfers von Warmwasserleitungen zu den Kaltwasserleitungen, falls keine Trennung der Steigschächte besteht)
- Kaltwasserleitungen und Warmwasserleitungen sollten in verschiedenen Steigschächten verbaut sein
- Eine chemische Desinfektion ergibt selten Sinn, da oft eine rasche Wiederbesiedelung erfolgt
- End- bzw. Nebenprodukte durch die Desinfektion können mikrobiell verstoffwechselt werden (Wachstumsförderung)
- Mikroben passen sich genetisch an, Wachstum ist auch bei $>55^{\circ}\text{C}$ möglich
- Amöben sind thermostabil ($>80^{\circ}\text{C}$)
- Der Klimawandel könnte die Zusammensetzung der mikrobiellen Gemeinschaft verändern bzw. neuartige Mikroben könnten aufkommen
- Kaltwasser, das dem Haus zugeführt wird, könnte im Zuge des Klimawandels wärmer ankommen (etwa 14°C statt 10°C durch Aufheizung z.B. unter einer Straße)

In einem Altenwohnheim kam es zu Legionellenbefunden bei gleichzeitigem sehr geringem Wasserverbrauch in den betroffenen Wohneinheiten. Die Daten implizieren, dass ausgehend von den Entnahmearmaturen die Trinkwasserinstallation retrograd infiziert werden kann, wenn sehr wenig Wasser verbraucht wird, da sich Mikroorganismen bei langen Stagnationszeiten vermehren. Rechtlich besteht für den Mieter grundsätzlich keine Pflicht zum Gebrauch der

Mietsache oder der Warmwasserversorgung. Der Mieter ist aber zu einem pfleglichen Umgang mit der Mietsache verpflichtet. Dem Vermieter ist es möglich, Verhaltensvorgaben zu machen (vertraglichen Ausgestaltung im Mietvertrag), um die Gefahr einer Legionellenvermehrung einzudämmen.

Im Mehrfamilienhaus war es möglich, die Vorlauftemperatur um 5°C zu senken nach Einbau einer Ultrafiltrationsanlage. Der Abreinigungseffekt lag bei 91,15%.

Weitere Faktoren, die für den flächendeckenden Wärmepumpeneinsatz abgeschafft werden sollten, zeigten sich in einer in diesem Projekt durchgeführten Umfrage an Fachunternehmen. Der Umsatz von Wärmepumpen kann für Heizungstechnikunternehmen unterschiedliche finanzielle Relevanz mitführen. Zudem ist der Fachkräftemangel in der Branche bereits deutlich spürbar.

Eine systemdynamische Modellierung identifizierte die „Weiterentwicklung der technischen Regeln“ als einen stark-positiv gewichtender Faktor und deckte weitere positiv wirkende Treiber für den Wärmepumpeneinsatz auf, die kurz-, mittel- und langfristig gewichten können, um den Wärmepumpeneinsatz **langfristig** zu fördern. Dies könnte beispielsweise mit der Anerkennung der Ultrafiltrationstechnologie geschehen. **Kurzfristig** könnte Abhilfe geschaffen werden, wenn Richtlinien, wie die der Wasserhygienekommission des Landes Schleswig-Holstein, angewendet werden, da sie bereits jetzt den Einsatz neuer Technologien im Rahmen von Modellprojekten erlaubt.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.....	1
Abbildungsverzeichnis.....	9
Tabellenverzeichnis.....	10
Verzeichnis der Formelzeichen, Symbole und Indizes	12
Abkürzungsverzeichnis.....	13
1. Einleitung.....	1
1.1 Hintergrund	1
1.2 Zielsetzung.....	3
2. Methoden.....	4
2.1 Auswahl, Analyse und Begehung von Modellgebäuden	4
2.1.1 Auswahl der Modellgebäude	4
Mehrfamilienhaus	5
Altenwohnheim.....	6
Kindertagesstätte	8
2.1.2 Mikrobiologische und wasserchemische Untersuchungen.....	9
2.1.3 Temperaturabsenkung und Einsparpotential	11
2.2 Validierung der mobilen Durchflussszytometrie	12
2.3 Ultrafiltration.....	14
2.4 Systemdynamische Modellierung	16
3. Ergebnisse und Diskussion	17
3.1 Funktion und Einsatzgebiete von Wärmepumpen.....	17
3.2 Planungs- und genehmigungsrechtliche Rahmenbedingungen für die Installation einer Wärmepumpe	19
3.3 Energierechtliche Rahmenbedingungen für Installation und Betrieb von Wärmepumpen	20
3.3.1 Netzanschluss.....	20
3.3.2 Netzzugang.....	22

3.3.2.1	Steuerbare Verbrauchseinrichtungen - § 14a EnWG a.F.	22
3.3.2.2	Steuerbare Verbrauchseinrichtungen - Neufassung des § 14a EnWG	26
3.3.2.3	Festlegungsverfahren im Sinne des § 14a Abs.1 EnWG (n.F.)	27
3.4	Anforderungen an die Trinkwasserhygiene	29
3.4.1	Auswirkungen der Steuerungsprozesse auf die Trinkwasserhygiene	29
3.4.2	Hemmnisse für die Implementierung neuer Lösungsansätze.....	31
	Anforderungen an Vermieter und Mieter.....	31
	Zu erfüllende Rahmenbedingungen für Technologien außerhalb des Standards	42
	Alternative Technologien für die hygienische Sicherheit (z.B. Ultrafiltration)	44
	Validierung der mobilen Durchflusszytometrie	45
	Bewertung der mobilen Zytometrie und Entwicklung einer Qualitätskontrolle.....	55
	Systemdynamische Modellierung	57
3.5	Einsparpotentiale neuer Technologien	61
4.	Weitere Erkenntnisse	62
5.	Schlussfolgerungen und Ausblick	65
6.	Öffentlichkeitsarbeit und Nachwirkung	66
7.	Literaturverzeichnis	67
8.	Anhang.....	1

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Aufbau der Trinkwasserinstallation des Altenwohnheims..... 34

Abb. 2: Hygiene an der Einspeisung: GZZ (Zellen mL⁻¹) und Legionellenkonzentration (KBE 100 mL⁻¹). Die Werte an den Messpunkten stellen die Ergebnisse aus der Legionellen-Kultivierung dar [KBE 100 mL⁻¹]..... 35

Abb. 3: Hygiene an der Wohneinheit im dritten Stock: : GZZ (Zellen mL⁻¹) und Legionellenkonzentration (KBE 100 mL⁻¹). Die Werte an den Messpunkten stellen die Ergebnisse aus der Legionellen-Kultivierung dar [KBE 100 mL⁻¹]. Die gestrichelten Linien stellen folgende Events in Reihenfolge dar: Einbau einer UF in der Warmwasserzirkulation; Einbau einer UF in der Kaltwasserzirkulation; chemische Desinfektion der Trinkwasserinstallation; chemische Desinfektion der Entnahmestellen. 36

Abb. 4: Hygiene an der Wohneinheit im vierten Stock: GZZ (Zellen mL⁻¹) und Legionellenkonzentration (KBE 100 mL⁻¹). Die Werte an den Messpunkten stellen die Ergebnisse aus der Legionellen-Kultivierung dar [KBE 100 mL⁻¹]. Die gestrichelten Linien stellen folgende Events in Reihenfolge dar: Einbau einer UF in der Warmwasserzirkulation; Einbau einer UF in der Kaltwasserzirkulation; chemische Desinfektion der Trinkwasserinstallation; chemische Desinfektion der Entnahmestellen. 37

Abb. 5: Kaltwasserhygiene und Ablaufvolumina: GZZ (Zellen mL⁻¹) und Legionellenkonzentration (KBE 100 mL⁻¹). Die Werte auf den Balken stellen die Ergebnisse aus der Legionellen-Kultivierung dar [KBE 100 mL⁻¹]. 39

Abb. 6: Warmwasserhygiene und Ablaufvolumina: GZZ (Zellen mL⁻¹) und Legionellenkonzentration (KBE 100 mL⁻¹). Die Werte auf den Balken stellen die Ergebnisse aus der Legionellen-Kultivierung dar [KBE 100 mL⁻¹]. 39

Abb. 7: Vergleich der Gesamtzellzahlen der beiden Methoden in Phase 1..... 47

Abb. 8: Häufigkeitsverteilung der Abweichungen der GZZ zwischen den beiden Methoden in Phase 1..... 48

Abb. 9: Vergleich der Gesamtzellzahlen der beiden Methoden in Phase 3..... 49

Abb. 10: Häufigkeitsverteilungen der Abweichungen der GZZ zwischen den beiden Methoden in Phase 3. 50

Abb. 11: Vergleich der Gesamtzellzahlen der beiden Methoden in Phase 4..... 51

Abb. 12: Häufigkeitsverteilung der Abweichungen der GZZ zwischen den beiden Methoden in Phase 4..... 51

Abb. 13: Vergleich der Gesamtzellzahlen der beiden Methoden in Phase 5..... 52

Abb. 14: Häufigkeitsverteilung der Abweichungen der GZZ zwischen den beiden Methoden in Phase 5.....	53
Abb. 15: Prozentuale Häufigkeitsverteilung der absoluten Abweichungen der GZZ zwischen den beiden Methoden in Phasen 2 bis 5, d. h. Anwendung der mobilen Zytometrie durch Probennehmer.....	54
Abb. 16: Vergleich der Gesamtzellzahlen der beiden Methoden aller Messungen.....	54
Abb. 17: Häufigkeitsverteilung der Abweichungen der GZZ zwischen den beiden Methoden aller Messungen.	55
Abb. 18: Tornadodarstellung des Gesamtziels: Kurzfristig.	58
Abb. 19: Tornadodarstellung des Gesamtziels: Mittelfristig.....	58
Abb. 20: Tornadodarstellung des Gesamtziels: Langfristig.	59
Abb. 21: Tornadodarstellung des Faktors „Zulassung Ultrafiltration“: Kurzfristig.	60
Abb. 22: Tornadodarstellung des Faktors „Zulassung Ultrafiltration“: Langfristig.....	60
Abb. 23: Aufbau der Trinkwasserinstallation eines zusätzlichen untersuchten Gebäudes (MFH/Hotel).	64

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Wasserchemische Parameter.....	10
Tab. 2: Allgemeine Daten zu den verwendeten UF-Anlagen.	14
Tab. 3: Daten der GTS-Clean Barrier UF-Anlage. Stand 01.06.2023.	15
Tab. 4: Daten der GTS-Clean Circulation UF-Anlage. Stand 01.01.2023.	15
Tab. 5: Wasserchemische Daten im Altenwohnheim.	41
Tab. 6: Auswertung der Abweichungen der Gesamtzellzahl der beiden Methoden (%) in Phase 1.	47
Tab. 7: Wiederholungsmessungen am mobilen Durchflusszytometer durch externen Probennehmer.	48
Tab. 8: Auswertung der Abweichungen der Gesamtzellzahl der beiden Methoden (%) in Phase 3.	49
Tab. 9: Auswertung der Abweichungen der Gesamtzellzahl der beiden Methoden (%) in Phase 4.	50
Tab. 10: Auswertung der Abweichungen der Gesamtzellzahl der beiden Methoden (%) in Phase 5.	52
Tab. 11: Auswertung der Abweichung der Gesamtzellzahl der beiden Methoden (%) aller Messungen.	53
Tab. 12: Auswertung der Gesamtzellzahl (GZZ/ml) der beiden Methoden als regelmäßige Qualitätskontrolle.....	56

Tab. 13: Wasserchemische Daten im realen Objekt. 64

Verzeichnis der Formelzeichen, Symbole und Indizes

c_{Wasser}	spezifische Wärmekapazität von Wasser
L	Rohrlänge
m	Masse des Wassers
Q_{Bedarf}	Wärmebedarf der Warmwasserbereitung
$Q_{Erhitzung}$	Wärmemenge, um Kaltwasser zu erwärmen
Q_{Rohr}	Wärmeverluste der Wasserverteilung in den Rohren
$Q_{Speicher}$	Wärmeverluste im Warmwasserspeicher
r_A	Außenradius des Rohres
r_I	Innenradius des Rohres
r_M	Außenradius des Rohres bzw. Innenradius der Isolierung
α_{Luft}	Wärmeübergangskoeffizient der Luft
α_{Wasser}	Wärmeübergangskoeffizient des Wassers
$\varepsilon_{Erzeuger}$	Leistungszahl des Wärmeerzeugers
Q_{Cold}	Gemessener Kaltwasserverbrauch
Q_{Hot}	Gemessener Warmwasserverbrauch
λ_{Rohr}	Wärmeleitfähigkeit des Rohres
$\lambda_{Isolierung}$	Wärmeleitfähigkeit der Isolierung
$\vartheta_{Kaltwasser}$	Temperatur des Kaltwassers
ϑ_{Luft}	Temperatur der Umgebungsluft
$\vartheta_{Warmwasser}$	Temperatur des Warmwassers

Abkürzungsverzeichnis

a.a.R.d.T.	Allgemein-anerkannten-Regeln-der-Technik
DFZ..	Durchflusszytometrie
ES..	Entkalkungssystem
GZZ..	Gesamtzellzahl
H	Hotel
KW	Kaltwasser
MFH	Mehrfamilienhaus
n.F.	neue Fassung
QC	Quality Control
UF	Ultrafiltration
UF-B	Ultrafiltrationsanlage an der Kaltwassereinspeisung
UF-C	Ultrafiltrationsanlage in der Zirkulation (allgemein)
UF-C-Kalt	Ultrafiltrationsanlage der Kaltwasserzirkulation
UF-C-Warm	Ultrafiltrationsanlage der Warmwasserzirkulation
TIC	Total inorganic carbon
TOC	Total organic carbon
TW	Trinkwasser

1. Einleitung

1.1 Hintergrund

Elektrische Wärmepumpen müssen im Zuge der Energiewende in Deutschland die mit fossilen Brennstoffen befeuerten Kessel weitestgehend ersetzen. Zur Erreichung der Klimaziele muss eine Wärmepumpenlücke in der Größenordnung von ca. vier Mio. Wärmepumpen bis 2030 geschlossen werden (Fraunhofer IBP/IWES, 2017).

Aktuell bleibt der Wärmepumpenanteil im Gebäudebestand deutlich hinter dem im Neubausegment zurück. 50,6 % der im Jahr 2021 fertiggestellten Wohngebäude erhielten eine Wärmepumpe als primäre Heizung (Statistisches Bundesamt, 2022b). Demgegenüber betrug der Wärmepumpenanteil im Bestand 2021 mit 1,2 Mio. Exemplaren nur rund 5,6 % (Bundesverband der Deutschen Heizungsindustrie, 2022). Demzufolge schreitet die Umrüstung von Gebäuden trotz bestehender Förderprogramme für Sanierungen und Modernisierungen bisher nur unzureichend voran und die Klimaschutzziele würden bei gleichbleibender Umrüstungsrate um Jahrzehnte verfehlt werden.

Aus technischer Perspektive ist der Wärmepumpeneinsatz umso effizienter je niedriger die Systemtemperaturen sind. Für Raumheizungen gilt, dass der bauliche Wärmeschutz (z.B. durch Fassadendämmung) hohe Effizienzgrade von Wärmepumpen bewirkt. Zudem sind Flächentemperierungen beispielsweise mit Fußboden- oder Wandheizung anzustreben, da sie nur niedrige Vorlauftemperaturen von lediglich etwa 35 bzw. 36 °C benötigen (Miara et al., 2017), auch wenn durchaus auch Radiatoren zur Beheizung genutzt werden können, die ebenfalls eine Absenkung der Systemtemperaturen erlauben (Danny Günther, Jeannette Wapler, Robert Langner, Sebastian Helmling, Dr.-Ing. Marek Miara, Dr.-Ing. David Fischer, Dirk Zimmermann, Tobias Wolf, Dr.-Ing. Bernhard Wille-Hausmann) und moderne Wärmepumpen regelmäßig aber auch in der Lage sind, höhere Vorlauftemperaturen bereitzustellen. Im Gegensatz zur Raumwärmebereitstellung erfordert die Warmwasserbereitung je nach Systemvariante (siehe Kapitel 2.1.1) erheblich höhere Vorlauftemperaturen, da hygienisch bedingte Mindesttemperaturen eingehalten werden müssen. Obgleich es auch dezentrale Lösungen zur Warmwasserbereitung gibt, kann es besonders im MFH-Segment von Vorteil sein, bei einem zentralen System zu bleiben. Nachteilig an den dezentralen Lösungen sind die hohe Komplexität, da jede Wohnung eine eigene Wohnungsstation mit einem eigenen Wärmetauscher und eigenen Regelventilen benötigt. Dies kann hohe Investitions- und Installationskosten und darüber hinaus laufende Kosten durch den hohen Wartungsaufwand verursachen. Weiterhin wird gerade beim Heizungstausch und Umrüstung auf Wärmepumpen regelmäßig ein zentrales Trinkwarmwassersystem vorgefunden. Der ggf. als preiswerte Alternative

verfügbare Einsatz von elektrischen Durchlauferhitzern setzt gerade bei größeren Gebäuden ausreichend ausgelegte Stromversorgungen und Leitungen voraus (Umweltbundesamt, 2011). Aus energetischer Sicht nutzen dezentrale elektrische Durchlauferhitzer zudem im Gegensatz zur Wärmepumpe keine Umweltwärme für die Warmwasserbereitung und verursachen hohe Lastspitzen. Was die Hygiene anbelangt, kann es auch in dezentralen Trinkwassererwärmern und in den dahinterliegenden Leitungen zu einer Legionellenvermehrung kommen (Umweltbundesamt, 2018).

Für zentrale Trinkwasserinstallationen dürfen Temperaturen von 55°C (60/55°C) dauerhaft nicht unterschritten werden (DVGW W 551, 2004), um pathogene Mikroben wie Legionellen thermisch zu supprimieren. Der hydraulische Abgleich zur Aufrechterhaltung der Mindesttemperatur von 55°C ist umso aufwändiger, je größer und komplexer das Trinkwassersystem ist (Schauer & Rüschen, 2021). Das ist insbesondere in MFH der Fall, bei welchen zudem das Ziel einer gerechten Warmwasserabrechnung für alle Parteien besteht (Schauer & Rüschen, 2021). Laut Praxiserfahrungen sind dadurch die Strangkopftemperaturen in der Warmwasserzirkulation von MFH zwar gleich, aber oft höher als normativ gefordert (Schauer & Rüschen, 2021). Je höher diese tatsächlich benötigte Temperatur zur Sicherstellung der 55°C und der Gleichbehandlung aller Mietsparteien ist, desto schwieriger ist ggf. der Anlagentausch bzw. Umstieg auf ein Wärmepumpensystem.

Der Bundesverband Wärmepumpe e.V. (2021) gibt an, dass von rund 1,37 Mio. installierten Wärmepumpen im Jahre 2020 etwa 300.000 Anlagen reine Brauchwasserwärmepumpen sind. Die restlichen 1.070.000 Stück sind Heizungswärmepumpen. Wie hoch der Anteil der Wärmepumpen in Deutschland ist, die Wärme sowohl für die Raumheizung als auch das Warmwasser bereitstellen, wird in der Statistik des Bundesverbands Wärmepumpe (bwp) nicht gesondert ausgewiesen.

Die Zahlen legen nahe, dass noch einige Hürden für den Wärmepumpeneinsatz im Gebäudesektor bestehen. Insbesondere in Bestandsgebäuden schreitet der Anlagentausch zu langsam voran. Zudem stellt die höhere Temperaturanforderung für die Warmwasserbereitung eine Hürde für den Einsatz von Wärmepumpen dar. Das Aufdecken und Beheben von Hürden, die den anvisierten Hochlauf des Massenmarktes von Wärmepumpen bis 2030 bzw. bis 2050 und darüber hinaus beeinträchtigen, ist für das Gelingen der Energiewende im Gebäudesektor essentiell. In der Praxis hemmen Hindernisse die Installation von monovalenten Wärmepumpen im bestehenden Geschosswohnungsbau, sowohl als einzelne Faktoren, als auch durch ihren kombinierten Effekt.

Neben technischen Hürden können auch rechtliche Rahmenbedingungen den flächendeckenden Wärmepumpeneinsatz hemmen. Daher sind hier neben baurechtlichen Vorgaben (siehe: 3.2) insbesondere auch energierechtliche Rahmenbedingungen (siehe: **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**) in den Blick zu nehmen. So könnten etwa Abschaltvereinbarung zwischen Netzbetreibern und Anschlussnehmern nach § 14a EnWG ein planerisch-wirtschaftliches Hindernis

darstellen. Der Gesetzgeber wollte mit dieser flexiblen Laststeuerung eine der Netzstabilität dienende Maßnahme schaffen. Jedoch wird diese in der Praxis aus pragmatischen Gründen sowie einer verzögerten Ausgestaltung eines Flexibilitätsmechanismus nicht optimal umgesetzt (Antoni & Selinger, 2019) (siehe: **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**).

Der konkrete Ausgangspunkt für dieses Forschungsprojekt war eine energetische Sanierung und Modernisierung eines konventionellen MFH aus den späten 1960er Jahren mit 21 Wohnungen auf 1.626 m² Wohnfläche, welches ein Leuchtturmprojekt mit Vorbildcharakter werden sollte (Günther & Puls, 2020) (siehe: 3.4.1). Aus Sicht der Investorin¹, die zugleich Anlagenbetreiberin ist, ist es im Verlauf des Vorhabens zu Komplikationen gekommen, die z. T. erst im Verlauf des Planungs- und Ausführungsprozesses erkennbar geworden seien oder erst in der Betriebsphase aufgetreten sind (Günther & Puls, 2020). In einem Erfahrungsbericht zum o.g. Sanierungsprojekt konstatieren die Verfasser wirtschaftliche Risiken für Investoren, Architekten, Ingenieure und Fachunternehmen, die energetische Modernisierungen mit regenerativen Wärmeerzeugern wie monovalent betriebenen Wärmepumpen umzusetzen gedenken. Als Risikovermeidung könne es passieren, dass weiterhin konventionelle, CO₂-intensivere Techniken gewählt würden.

Es besteht somit ein Bedarf, einen praxisnahen Prozess zur Bewältigung der komplexen technischen, hygienischen und rechtlichen Bedingungen zu entwickeln. Im vorliegenden Forschungsprojekt wurden die Grundlagen dazu entwickelt, um die Beschleunigung der energetischen Sanierung von Bestandswohngebäuden und Quartieren in Schleswig-Holstein und darüber hinaus zu unterstützen.

1.2 Zielsetzung

Es besteht das übergeordnete Ziel, erhebliche Einsparungen beim Wärmebedarf und die Deckung des Wärmebedarfs durch strombetriebene Wärmepumpen im Gebäudesektor zu leisten.

Insbesondere für die Warmwasserbereitung sollen Energieeinsparungen dazu führen, dass Wärmepumpen vermehrt in sanierten Bestandsgebäuden eingesetzt werden. Dies kann an normativen Temperaturvorgaben scheitern, welche pathogenen Mikroorganismen im Trinkwasser vorbeugen sollen. In dieser Arbeit wird eine mobile Methode validiert, um das Auftrittsrisiko des Trinkwasserkeims *Legionella* zu prognostizieren. Es kann in der Folge abgeschätzt werden, ob hygienisches Trinkwasser auch bei niedrigen Warmwassertemperaturen mittels einer Ultrafiltrationsanlage bereitete werden kann. Es wurde außerdem überprüft, ob in den

¹ Pi55 Energie UG, Amtsgericht Hamburg HRB 152730, vertreten durch Dipl.-Ing. Architekt Jan Günther.

Modellgebäuden negative Einflussfaktoren auf die Trinkwasserhygiene auftreten, die nicht in den a.a.R.d.T. enthalten sind.

Zudem wird begleitend untersucht, inwieweit der bestehende Rechtsrahmen Umrüstungskonzepte zur Wärmepumpe sowie deren Wirtschaftlichkeit unterstützt bzw. hindert. Eine gesamtsystemische Modellierung wird angefertigt, um stark bzw. schwach gewichtende Einflussfaktoren zu beschreiben, welche den Wärmepumpeneinsatz betreffen.

2. Methoden

Neben Begehungen der Gebäude und Aufnahme der Technik wurden Pläne, Strangschemata, etc. studiert, Wasserbedarfe analysiert, und Daten aus mikrobiologischen Analysen ausgewertet. Zudem wurde das Mikrobiom in den Rohrleitungen mittels einer Literaturrecherche ermittelt (Liu et al., 2012; Liu et al., 2014; Röder, 2011; Rozej et al., 2015; Weber, 2005). Eine Liste mit 258 potentiell auftretenden Gattungen wurde erstellt, von denen *Legionella* spp. nur eine darstellt. Diese Liste wurde über eine bioinformatische Datenbank ausgewertet (KEGG – Kyoto Encyclopedia of Genes and Genomes), um die Gattungen zu kategorisieren (z.B. in die Kategorien „Biofilmbilder“ und „menschliche Gesundheitsgefährder“).

Zu Projektbeginn wurde auch eine explorative Studie anhand von Experteninterviews und einer anschließenden quantitativen Online-Umfrage durchgeführt, um die Narrationen der Projektbeteiligten extern zu validieren. Angewendet wurde außerdem eine gesamtsystemische Modellierung (system dynamics modelling, siehe auch: (Neumann et al., 2018), (Neumann & Hirschnitz-Garbers, 2022)). Das ausführliche Vorgehen bei diesen humanwissenschaftlichen Methoden ist im Anhang A3 näher erläutert. Die rechtswissenschaftliche Methodik beruht auf gängigen Standards und wird in dieser Arbeit nicht näher beschrieben.

2.1 Auswahl, Analyse und Begehung von Modellgebäuden

2.1.1 Auswahl der Modellgebäude

In diesem Forschungsvorhaben wurden reale Trinkwasserinstallationen von Modellgebäuden analysiert. Die Modellgebäude wiesen zum Teil Technologien auf, die aktuell noch nicht durch die a.a.R.d.T. gedeckt sind.

Einleitend wurden technisch-hygienische Eigenschaften beschrieben. Im Anschluss erfolgten energetische Bewertungen der Gebäude. Zudem wurde abgeschätzt, inwieweit

Energieeinsparmaßnahmen z. B. durch ein Temperaturabsenkung umsetzbar sind. Dazu wurden zunächst Modellgebäude ausgewählt, die für das Erreichen des Projektziels relevant waren.

Die energetische Versorgung von Trinkwasserinstallationen kann in unterschiedliche Bauweisen eingeteilt werden (Luka & Bohn, 2019). Die Installationen werden in Bezug auf die Wärmepumpenkonfiguration und/oder die Lage des Trinkwassererwärmers, Durchlauferhitzers und Frischwasserstationen unterschieden. Die Faktoren zur Unterscheidung sind folglich:

- Wärmepumpenkonfiguration:
 - Monovalente Wärmepumpe
 - Bivalente Wärmepumpe mit Heiz- oder Brennwertkessel
 - Keine Wärmepumpe
- Lage des Trinkwassererwärmers
 - Zentraler Trinkwassererwärmer
 - Dezentraler Trinkwassererwärmer
- Lage/Vorhandensein von elektrischen Durchlauferhitzern
 - Zentrale Durchlauferhitzer
 - Dezentrale Durchlauferhitzer
 - Keine Durchlauferhitzer
- Lage/Vorhandensein von Frischwasserstationen
 - Zentrale Frischwasserstation
 - Dezentrale Frischwasserstationen
 - Keine Frischwasserstationen
- Wärmenutzung aus dem Raumheizungssystem für das Trinkwassernetz
 - Wärme wird genutzt
 - Wärme wird nicht genutzt

Um möglichst unterschiedliche Typen von Trinkwasserinstallationen zu integrieren, wurden drei Gebäude genauer untersucht. Dazu gehörten ein MFH in Schleswig-Holstein sowie ein Altenwohnheim und eine Kindertagesstätte in Hamburg. Daten aus einem weiteren MFH, einem Hotel und einem Ferienwohngebäude in Schleswig-Holstein sowie einem Pflegeheim in Hessen wurden ebenfalls betrachtet, allerdings weniger ausführlich als die anderen drei Gebäude, die im Folgenden näher beschrieben werden.

Mehrfamilienhaus

Das Mehrfamilienhaus befindet sich in Wedel (Schleswig-Holstein). Es wurde in den 1960er-Jahren erbaut und 2018 energetisch modernisiert. Das Gebäude besteht aus drei gestaffelten Gebäudeteilen mit drei Stockwerken und einem Keller sowie insgesamt 21 Wohnungen.

Eine monovalente Luft/Wasser-Wärmepumpe versorgt das Trinkwassersystem sowie auch das Raumheizungssystem mit Wärme. Es handelt sich um ein Gerät des Herstellers Buderus (Buderus Logatherm WPL-A, Nennleistung: 31 kW, enthält 13 kg R404A (Buderus, o.J.), ein Gemisch aus den teilfluorierten Kohlenwasserstoffen HFKW-125, HFKW-143a und HFKW-134a. Diese Kältemittel dürfen ab dem 01.01.2022 nicht mehr in Neuanlagen verwendet werden. Bis zum Jahr 2030 dürfen diese Stoffe in wiederaufbereiteter Form noch zur Wartung von Anlagen verwendet werden (Verordnung (EU) Nr. 517/2014, 2014)). Ein Pufferspeicher ist vorhanden (Buderus Logalux pS500 EW, Nennvolumen: 485 L). Das Gebäude verfügt über eine zentrale Trinkwarmwasserinstallation mit Zirkulation. Warmwasser wird in einem Speicher mit einem Volumen von 750 L vorgehalten. Kalt- und Warmwasserleitungen bestehen aus Kupfer.

Die Warmwasserzirkulation wird mit einer Zirkulationspumpe betrieben (Grundfos UPS 25-60 B 180). In die Zirkulation wurde im Jahre 2018 eine Ultrafiltrationsanlage (GTS-Clean UF-C mit EXERGENE® Technology) installiert. Diese UF-Anlage enthält in Fließrichtung vor dem Filtrationsmodul eine dynamisch betriebene Pumpe, die dafür sorgt, dass ca. 30-70% des Zirkulationsstromes im Bypassprinzip über die UF-C gereinigt wird. Die Porengröße der Hohlfasermembranfilter beträgt 0,02 µm (Siehe: 2.3). Der Filtereffekt wird kontinuierlich durch eine spezielle elektronische Überwachung kontrolliert, so dass potentiell aufkommende Membranbrüche detektiert werden können. Ein differenzdruckgesteuertes Regenerations- und Spülsystem ist integriert, um Partikelablagerungen auf Membranoberflächen zu verhindern. Spülungen erfolgen im Zyklus von ca. 2-4 Stunden je nach Rohwasserqualität des Versorgers.

Die Kalt- und Warmwasserleitungen im Keller wurden im Zuge der Renovierung sachgemäß gedämmt. Es wurde ein volumenstromgesteuerter hydraulischer Abgleich der Trinkwarmwasserzirkulation installiert, um nahezu konstante Durchfluss- und Temperaturbedingungen an allen Stellen des Trinkwarmwassernetzes zu sichern.

Die Warmwassertemperatur wurde nach Stand der Technik auf 55/50°C eingeregelt (anstatt 60/55°C nach a.a.R.d.T.). Grundlage hierfür sind die Richtlinien der Wasserhygienekommission des Landes Schleswig-Holstein (2021), die eine solche Betriebsführung unter bestimmten Bedingungen ermöglichen. Somit liegt die Systemtemperatur planmäßig 5°C unter den üblichen Temperaturen in Trinkwarmwasserinstallationen (DVGW W 551, 2004).

Altenwohnheim

Das Altenwohnheim befindet sich in Hamburg. Das Gebäude wurde von 2012-2014 nach dem KFW-40-Standard errichtet und 2015 in Betrieb genommen. Da es sich um ein vergleichsweise neues Gebäude handelt, steht eine Vielzahl baulicher und betriebstechnischer Informationen zu Verfügung. Das Hauptgebäude besteht aus einem Erdgeschoss, vier Vollgeschossen sowie einem Staffelgeschoss.

Insgesamt existieren 84 Wohnungen, fünf Fäkalspülen mit Warmwasserbedarf, 32 Pflegezimmer sowie zwei Pflegebäder mit Badewanne. Sanitärräume sind auch für Personal und Besucher vorhanden und befinden sich im Erdgeschoss. Zudem sind Verwaltungs- und Personalräume vorhanden. Es befindet sich außerdem eine gewerbliche Großküche für Bewohner und Mitarbeitende in dem Gebäude.

Bei der Gebäudeheizung handelt es sich um ein bivalentes Heizsystem. Zwei Gasabsorptionswärmepumpen (Oertli, Nennleistung: jeweils 42,6 kW) arbeiten im parallelen Betrieb. Es sind zusätzlich zwei Brennwertthermen vorhanden (Nennleistung: 40 und 80 kW, modulierend), die nur für den Spitzenlastbetrieb vorgesehen sind. Energiequellen sind acht Lüftungsanlagen, die mit Wärmetauschern ausgerüstet und für die notwendige Be- und Entlüftung des Gebäudes im Dauerbetrieb sind. Beheizte Innenluft dient neben Außenluft somit als Wärmequelle, d.h. das Gebäude mit rund 26.000 m³ BRI fungiert als Kollektor.

Für das Energiemanagement wurde auf dem Grundstück ein Solar-Eisspeicher errichtet (189 m³ Betonbehälter für 153 m³ Wasservolumen). Im Sommerbetrieb wird die überschüssige Wärmemenge im Speicher eingelagert, um sie im Winterbetrieb nach dem physikalischen Prinzip des Latentwärmeentzugs als Energiequelle zu nutzen. Der Solar-Eisspeicher stellt planmäßig rd. 135.000 kWh Energie zur Verfügung, bevor er in die Vereisung übergeht. Da die Anlage mit zwei getrennten Kreisläufen ausgerüstet wurde, kann durch einen sog. bidirektionalen Betrieb sowohl entzogen als auch eingespeist werden, um so jegliche zur Verfügung stehende Energie auch in den Wintermonaten zu nutzen.

Den Gefrierzustand erreicht der Solar-Eisspeicher nur bei kontinuierlichem Betrieb der Wärmepumpen. Allerdings war der geplante Heizbetrieb bis 2022 nicht möglich. Ursache hierfür sind betriebliche Auflagen des zuständigen Gesundheitsamtes, welches sich auf die Einhaltung von Systemtemperaturen nach a.a.R.d.T. (60/55°C) berief und eine Reduktion von Trinkwarmwassertemperaturen durch Auflagen verhinderte.

Der Eisspeicher kann nur einfrieren, wenn die Wärmepumpen im Winterbetrieb durchgängig laufen. Bis 2022 ist dies allerdings noch nicht geschehen. Ursache ist, dass die Verbrennungskessel noch den größten Anteil des Wärmebedarf liefern, da dieser zu hoch ist, um ihn mit der Wärmepumpe monovalent zu gewährleisten.

Das Raumheizungssystem und das Trinkwassersystem werden zentral versorgt. Ein heizungsseitiger Pufferspeicher umfasst 1500 L. Es ist zur Versorgung von Trinkwarmwasser ein Speicherladesystem (Danfoss Typ SEK-LK 1000-240) ausgeführt, das eine Kombination von Durchflusssystem und Speichersystem darstellt. Die Wasserversorgung für die Raumheizung als auch für die Warmwasserbereitung erfolgt über totraumfreie Verbundrohre (GTS-JRG-Sanipex PE-Xc) von der Technikzentrale zu den Entnahmestellen.

Die Gesamtlänge der Trinkwasserinstallation beträgt 3.229 m (1.523 m für Kaltwasserrohre, 1.263 m für Warmwasserrohre und 444 m für Zirkulationsrohre). Die Rohrnennweiten liegen zwischen DN-12 und DN-50. Das Gesamtvolumen beträgt 948 Liter (486 Liter für Kaltwasserrohre, 362 Liter für Warmwasserrohre und 101 Liter für Zirkulationsrohre). In den Kalt- und Warmwassersträngen sind 872 Fließwege, 1.696 Teilstrecken und 7.721 Bauteile vorhanden. Für die Zirkulation existieren 49 Fließwege, 147 Teilstrecken und 369 Bauteile.

Der Trinkwarmwasserspeicher umfasst 1000 Liter. Eine temperaturgesteuerte Zirkulationspumpe ist installiert. Neben der Trinkwarmwasserzirkulation enthält die Installation eine zirkulierende Kaltwasserleitung. Das zirkulierende Kaltwasser wird über einen Rückkühler geführt, sodass Temperaturerhöhungen im Kaltwasser durch Wärmeübertragungen aus der Umgebung entgegengewirkt wird.

Die Vorlauftemperatur des Warmwasserspeichers ist aktuell entsprechend dem vom Gesundheitsamt geforderten Standard (DVGW W 551, 2004) auf $>60^{\circ}\text{C}$ eingestellt, um minimal 55°C im gesamten Trinkwarmwassernetz sicherzustellen. Die Wärmepumpen erwärmen das Trinkwarmwasser auf ca. $45\text{-}50^{\circ}\text{C}$. Eine weitere Erwärmung erfolgt durch Brennwertthermen auf bis zu 62°C . Dieser Heizbetrieb wird über eine hydraulische Weiche gesteuert. In der Praxis ist eine Regelung sehr schwierig, so dass Störungen der Wärmeerzeugung regelmäßig eintreten. Im Testbetrieb mit den geplanten Systemtemperaturen von $48/43^{\circ}\text{C}$ funktionierte die Wärmebereitstellung bzw. der Wärmepumpenbetrieb völlig einwandfrei.

Der Temperaturabgleich der einzelnen Steigstränge erfolgt über Temperaturfühler, die über eine Regelung die Motorventile steuert (GF-Legiotherm). Damit wird sichergestellt, dass im Trinkwarmwassernetz die gleichen Temperaturen anliegen. Die Regelung wird über die Gebäudeleittechnik ausgelesen und überwacht.

Da es zu peripheren Kontaminationen durch Legionellen gekommen war (Armaturenverkeimung in Wohnungen), wurden im Jahr 2017 zur Abhilfe zwei Ultrafiltrationsanlagen (Typ GTS-Clean mit EXERGENE® Technology) eingebaut. Eine UF-Anlage ist als Barriere an der Kaltwasserhauseinspeisung installiert (Typ GTS-Clean UF-B), eine weitere UF-Anlage wurde in der Warmwasserzirkulation als Bypass-UF (Typ: GTS-Clean UF-C) ausgeführt. Die UF-B ist so ausgelegt, dass die Kaltwasserzirkulation eingebunden werden konnte, um diese kontinuierlich abzureinigen.

Sämtliche Leitungen wurden nach den aktuellen Regeln der Technik gedämmt und brandschutztechnisch geschützt.

Kindertagesstätte

Die untersuchte Kindertagesstätte befindet sich in Hamburg. Es handelt sich um einen 2017 errichteten Neubau mit einem Keller-, einem Erd- und einem Dachgeschoss. Die Wärmeversorgung

erfolgt mit einer monovalenten Wärmeerzeugung. Im Keller ist ein heizungsseitiger Speicher mit Trinkwarmwasserbereitung im Durchflusprinzip nach der 3-Liter-Regel vorhanden (DVGW W 551, 2004). Teilweise werden Entnahmestellen mit Klein-Durchlauferhitzern bedient. Der Keller enthält eine Waschküche und ein Badezimmer. Im Erdgeschoss befindet sich ein Badezimmer, eine Küche und ein Wickelraum. Eine weitere Küche und ein weiteres Badezimmer gibt es im Dachgeschoss. Im Außenbereich wurde eine Garage zur Umnutzung in ein Badezimmer umgebaut. In der Tagesstätte werden etwa 50 Kinder betreut. An der Entnahmestelle in der umgebauten Garage wird in regelmäßigen Abständen von Kindern und Angestellten gezapft. Es kann davon ausgegangen werden, dass Stagnationszeiten in den Leitungen sehr kurz sind. In den Ferienzeiten wird eine regelmäßige Wassernutzung durch das Personal gewährleistet.

2.1.2 Mikrobiologische und wasserchemische Untersuchungen

Die Trinkwasserinstallationen der Modellgebäude wurden mikrobiologisch sowie wasserchemisch bewertet. Mikroben und chemische Elemente wurden über Messmethoden nach gängigen Normen quantifiziert.

Die Probennahme für die mikrobiologischen Messungen erfolgte nach dem Standard (DIN EN ISO 19458, 2006; Umweltbundesamt, 2012). Dementsprechend wurden Entnahmestellen chemisch desinfiziert. Andere Lokalisationen der Trinkwasserinstallationen wiesen Probenahmeventile auf, die abgeflammt wurden. Gemäß dem Standard wurde vor der Probenahme 1 L Wasser verworfen. Diese Art der Probenahme zielt auf eine systemische Untersuchung der Trinkwasserinstallation ab anstatt einer lokalen Kontamination in der Peripherie, die eher Rückschlüsse auf das individuelle Nutzerverhalten zulässt. Jeder Steigstrang muss nach dem Standard in den Probenzugplan aufgenommen werden. Bei der begrenzten Auswahl einiger Steigstränge müssen diese eine repräsentative Aussage über alle Stränge liefern.

Die mikrobiologischen Untersuchungen wurden über die Kultivierung von Legionellen sowie über eine Bestimmung der Gesamtzellzahl (GZZ) mittels Durchflusszytometrie realisiert.

Die Kultivierung von Legionellen erfolgte nach Standards (DIN EN ISO 11731, 2019; Umweltbundesamt, 2012). Im Direktverfahren wurden je 0,5 mL der Wasserprobe auf zwei Platten BCYE+AB-Agar ausgespatelt und daraufhin bei 36+/-2°C inkubiert. Die Agarplatten wurden nur ausgewertet, wenn weniger als 300 Kolonien gebildet wurden, um die Messgenauigkeit einzuhalten. In einem zweiten Verfahrensansatz wurden 50 mL Wasserprobe filtriert und der Filter anschließend säurebehandelt. Der Filter wurde auf GVPS-Agar übertragen und wie oben inkubiert. Dieser Membranfiltrationsansatz wurde nur ausgewertet, wenn weniger als 80 Kolonien entstanden waren. Beide Verfahren wurden für jede Probe ausgeführt. Das höhere Ergebnis wurde für die Auswertung

angewendet. Der technische Maßnahmenwert der Trinkwasserverordnung liegt bei 100 KBE 100 mL⁻¹. Bei Überschreitung müssen entsprechende Maßnahmen getätigt werden (§ 16 TrinkwV).

Die Durchflusszytometrie erlaubte die Bestimmung der Gesamtzellzahlen im Trinkwasser und wurde zusätzlich ausgeführt. Das Verfahren ist nach Anfärben der Bakterienzellen fluoreszenz-basiert. Die Methode wurde bereits 2015 in Rahmen eines EKSH-Forschungsprojektes validiert (Hippelein et al., 2018).

Für die Probenahme zwecks der wasserchemischen Untersuchungen war eine Desinfektion nicht erforderlich. Die Probenahme wurde angepasst, sodass sie etwa dem Verfahren entsprach, das auch für die mikrobiologischen Untersuchungen angewendet wurde. Ziel war es, die Bedingungen der Probenahme nahezu gleich zu gestalten, da wasserchemische und mikrobiologische Parameter in Relation gesetzt werden sollten.

Die Proben wurden auf mehrere wasserchemische Parameter untersucht. Die Untersuchungen erfolgten nach den entsprechenden Normen (Tab. 1).

Tab. 1: Wasserchemische Parameter.

Anorganische Summenparameter	TIC (total inorganic carbon)	DIN EN 1484 (1997)
Anionen	Cl ⁻	DIN EN ISO 10304-1 (2009)
	NO ₃ ⁻	
	SO ₄ ²⁻	
	PO ₄ ³⁻	
	(P)	
Kationen	NH ₄ ⁺	DIN 38406-5 (1983)
Elemente aus dem oxidativen Säure-Aufschluss	Al ³⁺	DIN EN ISO 17294-2 (2017)
	Pb ²⁺ /Pb ⁴⁺	
	Ca ²⁺	
	Cr ²⁺ /Cr ³⁺ /Cr ⁶⁺	
	Fe ²⁺ (Fe ²⁺ -Fe ⁶⁺)	
	K/K ⁺	

Cu²⁺ (Cu⁺-Cu⁴⁺)

Mg²⁺

Mn²⁺/Mn⁴⁺/Mn⁷⁺

Mo (Mo³⁺-Mo⁵⁺)

Na⁺

Ni²⁺ (Ni⁺-Ni³⁺)

S (S²⁻-S⁶⁺)

Zn²⁺/Zn⁺

Elemente	aus	der	Fe ²⁺ (Fe ²⁻ -Fe ⁶⁺)	DIN EN ISO 17294-2 (2017)
Originalprobe				
Organische			TOC (total organic carbon)	DIN EN 1484 (1997)
Summenparameter				

2.1.3 Temperaturabsenkung und Einsparpotential

Eine Senkung der Vorlauftemperatur für die Warmwasserbereitung kann theoretisch eine wichtige Energieeinsparmaßnahme für Trinkwasserinstallationen darstellen. Zur Ermittlung des temperaturbedingten Potentials zur Energieeinsparung wurde ein theoretisches Modell angewendet.

Der auf die Warmwasserbereitung zurückzuführende Energiebedarf (Q_{Bedarf}) besteht im Wesentlichen aus drei Hauptfaktoren. Zum Ersten wird Energie zur Erhitzung des Kaltwassers benötigt, um an den Entnahmestellen Warmwasser bereitzustellen ($Q_{\text{Erhitzung}}$). Weiterhin entstehen Wärme- und Druckverluste in den Rohrverteilungsleitungen, da Wärme trotz Isolierungen an die Umgebung abgegeben wird (Q_{Rohr}). Zum Dritten treten Wärmeverluste während der Speicherung im Warmwassertank auf (Q_{Speicher}).

Der Wärmeerzeuger muss folglich eine ausreichende Wärmemenge generieren, um Verluste zu kompensieren. Dabei muss die Leistungszahl bzw. der COP ($\varepsilon_{\text{Erzeuger}}$) berücksichtigt werden. Es ergibt sich die Formel 1.

$$Q_{\text{Bedarf}} = \varepsilon_{\text{Erzeuger}} (Q_{\text{Erhitzung}} + Q_{\text{Rohr}} + Q_{\text{Speicher}}) \quad (1)$$

Für $\varepsilon_{\text{Erzeuger}}$ und Q_{Speicher} wurden die Produktdatenblätter der Hersteller verwendet. Die Leistungszahlen variieren in Abhängigkeit der Vorlauftemperatur, die der Erzeuger bereitstellen muss

und der produktspezifischen Nennleistung. Die Wärmeverluste während der Speicherung hängen ebenfalls von der Vorlauftemperatur ab. Zudem hat die Volumenkapazität einen Einfluss.

Die Wärmemenge ($Q_{Erhitzung}$), die für den eigentlichen Aufwärmvorgang des Kaltwassers notwendig war, wurde durch Multiplikation der spezifischen Wärmekapazität von Wasser (c_{Wasser}), der Masse (m) und der Temperaturänderung ($\vartheta_{Kaltwasser} - \vartheta_{Warmwasser}$) bemessen (Formel 2).

$$Q_{Erhitzung} = c_{Wasser} m (\vartheta_{Kaltwasser} - \vartheta_{Warmwasser}) \quad (2)$$

Zur Berechnung der Wärmeverluste, die durch die Warmwasserverteilung in den Rohrleitungen aufkamen (Q_{Rohr}), wurde Formel 3 verwendet. Die Formel lässt sich aus dem Fourier'sches Gesetz ableiten. Die Herleitung geht von einem statischen 3-Phasen-System aus, das den Wärmetransport durch die Rohrwand sowie den Wärmetransfer zur Rohrwand und dem zur Umgebungsluft einbezieht. Der genaue Vorgang der Herleitung ist in (Genuardi et al., 2023) beschrieben (Anhang A6).

$$Q_{Rohr} = \frac{(\vartheta_{Warmwasser} - \vartheta_{Luft}) 2 \pi L r_I}{r_I \left(\frac{1}{\alpha_{Wasser} r_I} + \frac{LN\left(\frac{r_M}{r_I}\right)}{\lambda_{Rohr}} + \frac{LN\left(\frac{r_A}{r_M}\right)}{\lambda_{Isolierung}} + \frac{1}{\alpha_{Luft} r_A} \right)} \quad (3)$$

Neben der Warmwassertemperatur wurde für die Berechnung die Temperatur der Umgebungsluft (ϑ_{Luft}) genutzt. Geometrische Faktoren wie die Rohrlänge (L), der Innenradius des Rohres (r_I), der Außenradius des Rohres bzw. Innenradius der Isolierung (r_M) und der Außenradius der Isolierung (r_A) wurden einbezogen.

Zusätzlich wurden die Wärmeübergangskoeffizienten von Wasser (α_{Wasser}) und von der Umgebungsluft (α_{Luft}) sowie die Wärmeleitfähigkeiten des Rohres (λ_{Rohr}) und der Isolierung ($\lambda_{Isolierung}$) genutzt.

2.2 Validierung der mobilen Durchflusszytometrie

Die hygienischen Bedingungen von Trinkwasserinstallationen werden heute im Rahmen der Trinkwasserverordnung mittels kultureller Nachweismethoden auf spezifischen oder unspezifischen Nährmedien und einer anschließenden Inkubation bestimmt.

Im Trinkwasser befinden sich jedoch nicht nur Mikroorganismen, die mittels Kulturverfahren erfassbar sind, sondern eine Vielzahl weiterer Bakterien, die nicht kultivierbar sind. Mittels Kulturverfahren werden weniger als 1 % der vorhandenen Bakterien in Trinkwasserinstallationen erfasst (Hippelein et al. 2018).

Die Durchflusszytometrie ist ein Messverfahren, das sich in der Medizin seit langem etabliert hat, in Trinkwasser in Forschungsprojekten angewandt wird, jedoch nicht in der Trinkwasserverordnung aufgeführt ist und damit in der offiziellen Überwachung durch die Gesundheitsbehörden keine

Verwendung findet. Vorteil des Messverfahrens ist, dass auch nicht kultivierbare Bakterien erfasst werden. Das Verfahren kann rapide durchgeführt werden, da Zellen nicht erst inkubiert werden müssen.

Auf bestehende Erkenntnisse aus einem vorangegangenen Forschungsprojekt (DFZ-Analytik zur Überwachung der Energieeffizienz) der Gemeinschaft für Energie und Klimaschutz Schleswig-Holstein GmbH (EKSH) kann zurückgegriffen werden, in dem bereits die Durchflusszytometrie für den Einsatz für Trinkwasserproben validiert wurde (Hippelein et al., 2018). Der genutzte Durchflusszytometer ist allerdings ausschließlich für den Laborbetrieb konzipiert. Das im Labor angewendete Verfahren ist an der MUAHYG durch die Deutsche Akkreditierungsstelle akkreditiert und unterliegt dadurch einer anerkannten Validierung und Qualitätskontrolle. Zur Bestimmung der Gesamtzellzahl werden 500 μL der Probe in Reaktionsgefäße übertragen und anschließend mit einem fluoreszierenden Farbstoff (SYBR Green I) versetzt. Die Gefäße werden für 15 min bei 37°C inkubiert. Nach der Inkubation werden die Reaktionsgefäße in das Zytometer (Agilent NovoCyte) überführt. Das Gerät nutzt 20 μL für den eigentlichen Messvorgang. Es wurde ein Fließmittel (Agilent NovoFlow Solution, Artikelnummer: 871B607), ein Reinigungsmittel (Agilent NovoClean, Artikelnummer: 872B609) und ein Spülmittel (Agilent NovoRinse, Artikelnummer: 872B610) verwendet. Die folgende Bestimmung der Gesamtzellzahl erfolgt vollautomatisch mit einem automatischen Probengeber und gerätespezifischer Software.

Die Quantifizierungsgrenze des Laborgeräts liegt bei 1.500 Zellen mL^{-1} . Die Zellzahlen der öffentlichen Wasserversorgung in Schleswig-Holstein und Hamburg liegen in der Größenordnung von 70.000-200.000 Zellen mL^{-1} .

In diesem Forschungsprojekt wurde ein mobiles Gerät (rqMicro Count®, genannt Cellstream) zur Durchführung der Durchflusszytometrie vor-Ort validiert. Zur Bestimmung der Gesamtzellzahl mit dem Cellstream wird 1 mL Wasserprobe in ein mitgeliefertes Reaktionsröhrchen pipettiert, welches bereits die notwendigen Reagenzien enthält. Die gut gemischten Reaktionsröhrchen werden für 30 Minuten bei Raumtemperatur stehen gelassen. Nach erneutem Schütteln wird der Inhalt der Reaktionsgefäße nach Proben getrennt in Messkartuschen überführt. Die Messkartuschen werden zu je acht Stk. auf einer Kunststoffplatte zusammengefasst, welche anschließend in die Messkammer des mobilen Zytometers eingebracht wird.

Zu Vergleichsmessungen zwischen der akkreditierten Labormethode und der mobilen Zytometrie wurden Proben aus realen Trinkwasserinstallationen entnommen. Diese Proben wurden zunächst mittels des mobilen Gerätes gemessen, um anschließend bzw. zeitgleich am Laborgerät die Gesamtzellzahl der Proben zu bestimmen.

Der Validierungsprozess des mobilen Zytometers erfolgte in sechs Phasen: Nach Schulung eines Probenehmers im Labor führte dieser selbständig Messungen am mobilen Zytometer durch. Anschließend wurde das Gerät in das Büro des Projektpartners transportiert und dort die Messungen mit dem mobilen Durchflusszytometer durchgeführt. Die entnommenen Proben wurden gekühlt zur Vergleichsmessung in das Labor transportiert. Weitere Probenehmer wurden im Ingenieurbüro angeleitet und diese führten dann sowohl Messungen unter Aufsicht von geschultem Laborpersonal im Labor durch, als auch selbständig im Ingenieurbüro. Zum Abschluss erfolgte in Phase 6 nach Transport des mobilen Zytometers und sämtlichen Zubehörs ins Labor eine abschließende Qualitätskontrolle durch das geschulte Laborpersonal und Vergleich mit der im Labor akkreditierten Methode.

Bakterien können sich bei zu warmem oder zu langem Transport in den Probenahmegefäßen vermehren oder absterben. Aus diesem Grund wurde der zeitliche Rahmen des Prozesses, auch bei gekühltem Transport der Proben ins Labor, so gering wie möglich gehalten, damit die Proben sich nicht maßgeblich verändern.

2.3 Ultrafiltration

In den betrachteten Gebäuden kommen UF-Anlagen des Herstellers GTS Green Technology Solutions GmbH zum Einsatz. Weitere Anbieter für UF-Anlagen sind die Firma Seccua GmbH und die KEBOS Group GmbH. GTS bietet Anlagen für verschiedene Einbaustellen innerhalb der Trinkwasserinstallation an: sogenannte „UF-Barrier Anlagen“, die sich hinter dem Hausanschluss an das kommunale Wasserversorgungsnetz befinden und somit eine Abreinigung für das Kalt- und das Warmwasser bewirken und die „UF-Circulation Anlagen“, die sich im Rücklauf der Warmwasserzirkulation befinden (im Teilstrom). Nach Angaben des Herstellers verfügen alle medienberührten Bauteile über eine DVGW / KIWA bzw. KTW-Zulassung. Weitere technische Daten sind Tab. 2 zu entnehmen.

Tab. 2: Allgemeine Daten zu den verwendeten UF-Anlagen.

GTS-Clean UF-Anlagen	
Filtrationsverfahren	Ultrafiltration im Crossflowbetrieb mit Hohlfasermembran Filtrationsgrad 0,02 µm
Membranmaterial	PTFE
Länge der Röhren [mm]	von 40 cm bis 980 cm, je nach Filterflächenbedarf
Membranfläche [m²]:	0.5 bis 10 m² pro Modul, je nach Filterflächenbedarf
Lebensdauer	6-36 Monate (abhängig von der Qualität des Leitungswassers, TOC / Huminstoffe)

Material Gehäuse, Endkappen	PVC
Dichtungsmaterial	EPDM
retrograde Verkeimung	EXERGENE Schutzverfahren gegen retrograde Verkeimung
Pumpe	Integrierte Pumpe vor den UF-Modulen für geregelten und zapfungsabhängigen Ausgleich des Filterwiderstand
Spannung [V]	230
Max. Leistungsaufnahme [W]	140 ²
Verhinderung Rückfluss	Prüfbare Rückflussverhinderer am Zu- und Ablauf zur UF-Anlage
Ort der Produktion	Hergestellt in Deutschland

Tab. 3: Daten der GTS-Clean Barrier UF-Anlage. Stand 01.06.2023.

Bezeichnung	Schrankmaße BxHxT [m]	Gesamthöhe (wandhängend/auf Ständerwerk) [m]	Leistung bei max. Druckabfall 1 bar [m ³ /h]	Wohnhaus Anzahl WE (typisch)	Rohran- schlüsse AG [Zoll]	Zuleitungen (Minimum)	Gewicht [kg]
GTS-Clean UF-B 90	0.8x1.2x0.4	1.95	2.0	14	1"	DN 32	120
GTS-Clean UF-B 110	0.8x1.2x0.4	1.95	4.0	24	1 1/4"	DN 32	120
GTS-Clean UF-B 125	0.8x1.2x0.4	1.95	5.0	35	1 1/4"	DN 40	130
GTS-Clean UF-B 140	1.0x1.4x0.4	1.95	7.5	70	1 1/2"	DN 50	140
GTS-Clean UF-B 160	1.0x1.4x0.4	1.95	10.0	120	2 3/8"	DN 50	150

Tab. 4: Daten der GTS-Clean Circulation UF-Anlage. Stand 01.01.2023.

Bezeichnung	Schrankmaße BxHxT [m]	Gesamthöhe (wandhängend) [m]	Filtrations- leistung [m ³ /h]	Wohnhaus Anzahl WE (typisch)	Rohran- schlüsse [Zoll]	Zuleitungen (Minimum)	Gewicht [kg]
GTS-Clean UF-C 20	0.6x1.2x0.3	1.95	0.5	30	3/4"	DN15	75
GTS-Clean UF-C 30	0.6x1.2x0.3	1.95	0.5	50	3/4"	DN15	75
GTS-Clean UF-C 60	0.6x1.2x0.3	1.95	1.5	80	3/4"	DN20	80

² Kropp et al. (2020) rechnen mit einer durchschnittlichen Leistungsaufnahme von 50 W.

2.4 Systemdynamische Modellierung

Systemdynamische Modellierung ist eine etablierte Methode u.a. in den Umweltwissenschaften, die implizites Wissen („mental model“ oder auch „cognitive map“) von Stakeholdern durch partizipative Workshops ‚hervorlockt‘, um Systemwissen zu generieren, welches den ersten Schritt zu Problemlösungen bildet (LaMere et al., 2020). Neben der Funktion der verbesserten Lösungsfindung durch Berücksichtigung mehrerer Perspektiven werden noch weitere Vorteile der Methode darin gesehen, die Legitimität von Entscheidungen verstärkt wird, Beziehungen zwischen Stakeholdern geknüpft werden und der Prozess einen edukativen Erfahrung darstellen kann (LaMere et al., 2020).

Eine Modellierung wurde mithilfe des iModelers der CONSIDEO GmbH erstellt, die Zusammenhänge zwischen einer Vielzahl von Faktoren kombinierte.

In das Programm wurde das übergeordnete Ziel eingegeben, den Energiebedarf der Warmwasserbereitung abzusenken und aus regenerativen Quellen bereit zu stellen ohne die Bedingungen der Trinkwasserhygiene zu beeinträchtigen. Das Programm ermöglichte es, Eingaben aus fachlichen Besprechungen zu dokumentieren. Die Eingaben wurden als Einflussfaktoren im Modell definiert. Zudem wurden diese mit weiteren Faktoren im Modell verknüpft, sodass Abhängigkeiten bestimmt werden können. Es wurde für die Abhängigkeiten eine grobe Einflussstärke festgelegt, die sich in der Gewichtung des Modells widerspiegelte:

- 1 – 10 %: sehr schwacher Einfluss
- 15 %: schwacher Einfluss
- 20 – 30 %: mittelstarker Einfluss
- 50 %: starker Einfluss
- 75 %: sehr starker Einfluss

Zusätzlich zur Einflussstärke wurden proportionale (je mehr, desto mehr) sowie antiproportionale (je mehr, desto weniger) Zuordnungen gedeutet.

In der Folge wurden diese Ursache-Wirkungszusammenhänge modelliert sowie visualisiert. Das Programm analysierte über eine Erkenntnis-Matrix effektive Maßnahmen zur Erreichung des Gesamtziels (Energieeinsparung, Steigerung der Wärmepumpeneffizienz) sowie maßgebliche Risikofaktoren (z.B. Risiko der Legionellen-Vermehrung in Trinkwasserinstallationen). Abschließend konnten die einflussreichsten Maßnahmen ausgelesen werden. Das Programm differenzierte zwischen effektivsten Maßnahmen im kurz-, mittel- bzw. langfristigen Zeitraum.

Über das Modell wurde eine gesamtsystemische Sichtweise erstellt. Im Gesamtmodell wurden Risiken und wirksame Hebel identifiziert.

3. Ergebnisse und Diskussion

3.1 Funktion und Einsatzgebiete von Wärmepumpen

Die Wärmepumpe entzieht einer Wärmequelle (Luft, Erde, Grundwasser) thermische Energie und macht diese für das Gebäude nutzbar. Das Prinzip ist der Joule-Thomson-Effekt, der besagt, dass ein Gas durch Druckänderung eine Temperaturänderung erfährt. Dazu ist die Wärmepumpe mit einem Kältemittel gefüllt, das seinen Aggregatzustand bei niedrigen Temperaturen ändert.

Umweltwärme wird über einen Wärmetauscher aufgenommen, der von einem Kältemittel durchströmt wird. Das Kältemittel erwärmt sich und wechselt vom flüssigen in den gasförmigen Aggregatzustand. Um die dabei entstehende Wärme nochmals hinsichtlich ihres Temperaturniveaus zu erhöhen, wird ein Verdichter verwendet. Im Verdichter wird das Gas komprimiert, sodass der Druck sowie die Temperatur des gasförmigen Kältemittelgases steigen. Ein weiterer Wärmetauscher (Verflüssiger) überträgt die Wärme aus dem Kältemittelgas auf den Heizkreislauf des Gebäudes (Fußbodenheizung, Warmwasserspeicher etc.). Die Temperatur des Kältemittelgases nimmt durch die Wärmeabgabe ab, sodass es wieder in den flüssigen Aggregatzustand übergeht. Das Kältemittel wird in einem Expansionsventil wieder entspannt. In der Folge kann der Kreislauf erneut beginnen.

Wärmepumpenanlagen können theoretisch in beide Richtungen betrieben werden, sodass im Winter geheizt und im Sommer gekühlt werden kann. Da Umweltenergie nutzbar gemacht wird, machen Wärmepumpenanlagen essentielle Elemente von Nullenergie- bzw. Energieplusgebäuden aus. Bei Sole/Wasser-Wärmepumpen liegt der jahresbedingte Leistungsfaktor bei deutlich über dem bei Luft/Wasser-Wärmepumpen (Miara et al., 2017). Der Wärmepumpenmarkt bietet bezüglich Hersteller, Wärmequellen, Nennleistungen und Kältemittel eine Vielzahl von Möglichkeiten an. Weiterhin ist auch eine Kaskadierung von mehreren Wärmepumpen technisch möglich.

Das Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (ISE) forscht seit 2006 am Einsatz von Wärmepumpen in Einfamilienhäusern. Es wurden etwa 250 Luft/Wasser und Sole/Wasser-Wärmepumpensysteme in Gebäuden mit unterschiedlichen energetischen Zuständen untersucht (Niedrigenergiehaus, unsanierte Altbauten, Gebäude mit hohem Energiebedarf). Generell können Wärmepumpenanlagen hohe Effizienzwerte erreichen, wenn sie korrekt geplant, installiert und betrieben werden. Ein relevanter Unterschied der Effizienz ergibt sich im unsanierten Altbau im Vergleich zum Neubau (Danny Günther, Jeannette Wapler, Robert Langner, Sebastian Helmling, Dr.-Ing. Marek Miara, Dr.-Ing. David Fischer, Dirk Zimmermann, Tobias Wolf, Dr.-Ing. Bernhard Wille-Hausmann).

Im Gegensatz zu Einfamilienhäusern (EFH) erfordern andere Gebäudearten oft leistungsstärkere Wärmepumpen. Im Rahmen der Stichprobenbefragungen wurden Hürden zusammengetragen, die die Installation von leistungsstarken Wärmepumpen hemmen, die MFH, mehrere Wohneinheiten oder ganze Wohnquartiere versorgen. Basierend auf der explorativen Analyse anhand von Experteninterviews sowie der anschließenden Befragung von Fachunternehmen des Wärmesektors wurde ermittelt, dass aktuell kaum technische Hürden für den Wärmepumpeneinsatz bestehen. Alle Branchen geben an, mit Wärmepumpen generell eher gute Erfahrungen gemacht zu haben. Je mehr Wärmepumpen installiert werden, desto besser waren auch die gemachten Erfahrungen. Die Umschulung der Beschäftigten scheint für alle Branchen unproblematisch zu sein. Allerdings wird die Verfügbarkeit von qualifizierten Arbeitskräften von allen Branchen des Sektors als besonders kritisch bewertet. Die Befragten geben an, dass zu wenige Bewerbungen bei den Fachunternehmen eingehen. Neben der Anzahl der Bewerbungen erscheinen den Befragten die Qualifikation der Bewerber:innen nicht zufriedenstellend. Der Mangel an Fachkräften wird hinsichtlich der eigenen Betriebssituation als noch dringlicher wahrgenommen als für die jeweilige Branche insgesamt.

Im Hinblick auf planungs- und genehmigungsrechtliche Vorgaben scheint es für die Umrüstung von Gebäuden auf die Wärmepumpe in der Praxis kaum Schwierigkeiten zu geben. Es scheint, dass Fachunternehmen insbesondere mit den Schallregelungen in Wohngebieten umgehen können, da die Schalleistungspegel der Wärmepumpen eher unproblematisch bewertet wurden. Weiterhin werden zumindest bislang keine flächendeckenden Probleme in den Lastspitzen der Wärmepumpen und der damit verbundenen Stromnetzstabilität lokaler Netze gesehen. Schallschutzmaßnahmen und die Stromnetzstabilität lokaler Netze können mit dem zu erwartenden Markthochlauf der Wärmepumpe an Relevanz gewinnen. Sollten Fachunternehmen künftige vermehrt mit Stromabschaltungen umgehen müssen (vgl. dazu unten 3.3.2.3.), wird es für sinnvoll erachtet, wenn gesetzliche Regelungen vorgeben, welche Voraussetzungen hierfür in einem Wärmepumpenstromtarifvertrag vorgesehen werden müssen. Durch eine angemessene Transparenz können Fachunternehmen Abschaltungen einplanen und technisch kompensieren.

Lediglich die Planung bei horizontal verlegten Erdwärmekollektoren konnte als Hürde für den Wärmepumpeneinsatz detektiert werden, da große Flächen benötigt werden.

Die detaillierten Ergebnisse aus der Stichprobenbefragung sind im Artikel in den Proceedings der 1. Konferenz zur Norddeutschen Wärmeforschung veröffentlicht (Anhang A6 [1]).

3.2 Planungs- und genehmigungsrechtliche Rahmenbedingungen für die Installation einer Wärmepumpe

Voraussetzung für die Installation einer Wärmepumpe ist, dass alle planungs- und genehmigungsrechtlichen Vorgaben eingehalten werden. Insofern ergeben sich allerdings regelmäßig nur geringe Hürden:

Wärmepumpen bedürfen in Schleswig-Holstein keiner Baugenehmigung. Zwar handelt es sich um „bauliche Anlagen“, die nach § 62 Abs. 1 der Landesbauordnung Schleswig-Holstein (LBO SH) grundsätzlich genehmigungsbedürftig sind. „Wärmepumpen“ sind jedoch aufgrund von § 61 Abs. 1 Nr. 4 lit. c) LBO SH von der Genehmigungspflicht ausgenommen.³ Zu beachten sind in baurechtlicher Hinsicht lediglich die Vorgaben zu Abstandsflächen und Rücksichtnahme. Baurechtliche Besonderheiten können sich allerdings dann ergeben, wenn Wärmepumpen außerhalb von Gebäuden innerhalb gesonderter „baulicher Anlagen“ (z.B. Garagen, Container) errichtet werden. In diesem Fall kann eine Baugenehmigung erforderlich werden, die nach allgemeinen baurechtlichen Regelungen jedoch erfolgreich beantragt werden kann.

Die Installation einer Wärmepumpe bedarf grundsätzlich auch keiner immissionsschutzrechtlichen Genehmigung nach § 22 BImSchG. Zu beachten ist aber, dass die immissionsschutzrechtlichen Grenzwerte eingehalten werden müssen (insbesondere Schallschutz).⁴

Zusätzliche genehmigungsrechtliche Anforderungen können sich aus dem Wasserrecht (Wasserhaushaltsgesetz) ergeben, wenn Wasser als Wärmequelle für die Wärmepumpe eingesetzt wird. Bei der Nutzung von Erdwärme können aus dem Bergrecht (Bundesberggesetz) Anzeige-, Genehmigungs- und Betriebsplanpflichten resultieren.⁵

Festzuhalten ist aber, dass jedenfalls der in der Praxis weit verbreiteten Installation von Luftwärmepumpen keine nennenswerten planungs- und genehmigungsrechtlichen Hürden entgegenstehen.

³ Dies gilt – jedenfalls dem Wortlaut nach – auch für Großwärmepumpen. Vgl. dazu Hemmert-Halswick/Freitag, ZNER 2021, 549, 551 f.

⁴ Zu Einzelheiten vgl. Hemmert-Halswick/Freitag, ZNER 2021, 549, 551.

⁵ Zu Einzelheiten vgl. Hemmert-Halswick/Freitag, ZNER 2021, 549, 552.

3.3 Energierechtliche Rahmenbedingungen für Installation und Betrieb von Wärmepumpen

Strombetriebene Wärmepumpen stellen erhebliche zusätzliche Lasten dar, die in den nächsten Jahren an die Stromverteilernetze (Niederspannung und – bei größeren Anlagen - Mittelspannung) angeschlossen werden. Dies stellt die für die Netzstabilität verantwortlichen Verteilnetzbetreiber einerseits vor Herausforderungen, solange und soweit der notwendige Ausbau der Netze (noch) nicht erfolgt ist. Andererseits kann ein flexibler Betrieb von Wärmepumpen (in Verbindung mit einem Wärmespeicher) durch Lastverschiebungen zukünftig dazu beitragen, eine immer volatiler werdende und auf erneuerbaren Energiequellen basierende Stromerzeugung mit dem Stromverbrauch zusammenzuführen. Vor dem Hintergrund dieses Spannungsfeldes unterscheidet sich der Anschluss einer Wärmepumpe vom Anschluss „herkömmlicher“ Verbraucher an das Stromnetz.

Von besonderem Interesse ist – sowohl für Stromnetzbetreiber als auch Wärmepumpenbetreiber zunächst, ob – und wenn ja unter welchen Voraussetzungen – Netzbetreiber einseitig den Strombezug von Wärmepumpen ganz oder anteilig reduzieren dürfen. Dies gilt insbesondere deshalb, da die (ungewollte) Abschaltung von Wärmepumpen zu Effizienzverlusten sowie zu Herausforderungen in Bezug auf die Trinkwasserhygiene führen kann. Von besonderem Interesse ist darüber hinaus, ob es zukünftig Anreize (z.B. variable Netzentgelte) dafür geben wird, dass Betreiber von Wärmepumpen aus eigenem Antrieb ihr Verbrauchsverhalten flexibilisieren und an die Verfügbarkeit von erneuerbarem Strom anpassen.

Im Folgenden wird vor diesem Hintergrund die rechtlichen Rahmenbedingungen für

- den Netzanschluss von Wärmepumpen (3.3.1.) sowie für
- die Netznutzung durch Wärmepumpen einschließlich der dafür zu entrichtenden Netzentgelte (3.3.2)

näher beleuchtet.

3.3.1 Netzanschluss

Grundvoraussetzung für den Strombezug von Wärmepumpen ist zunächst ein Anschluss an das öffentliche Stromnetz. Die Wärmepumpe kann dabei entweder als zusätzlicher Verbraucher in einer Kundenanlage im Sinne des § 3 Nr. 24a EnWG hinter einem bestehenden Netzanschluss (z.B. für ein Wohngebäude) oder über einen separaten Netzanschluss mit dem Stromnetz verbunden werden.⁶

⁶ Der Zubau einer Wärmepumpe wäre nach § 19 Abs. 2 S. 1 StromNAV dem Stromnetzbetreiber mitzuteilen.

Grundsätzlich besteht für jedermann ein Anspruch auf Netzanschluss gemäß § 17 EnWG, für die Niederspannungsebene, die für viele Wärmepumpen die relevante Netzebene sein dürfte, konkretisiert durch § 18 EnWG und näher ausgestaltet in der Niederspannungsanschlussverordnung (NAV). Der Anspruch besteht praktisch voraussetzungslos. Nur unter besonderen Bedingungen kann der Anschluss abgelehnt werden. Dies können wirtschaftliche Gründe sein, in Form erdrückend hoher Kosten für die Bereitstellung des Anschlusses. Je nach Höhe der Kosten kann der Netzbetreiber aber auch verlangen, dass sich der Anschlusspetent an den Kosten beteiligt.⁷ Mit einem Verweis auf fehlende Kapazitäten kann der Netzbetreiber den Anschluss nur zeitweise verhindern⁸; er ist dann verpflichtet, ausreichende Kapazitäten zu schaffen.⁹

Unter gewissen Umständen kann der Netzbetreiber eine angeschlossene Anlage auch vom Netz trennen, vgl. § 17 NAV. Damit ist aber nicht der vorliegend thematisierte Fall der Reduzierung des Strombezugs bei Netzengpässen gemeint. Eine solche Unterbrechung des Anschlusses ist nur im Falle von notwendigen Bau- und Wartungsarbeiten möglich. Hieraus wird im Umkehrschluss deutlich, dass der Anspruch auf Netzanschluss auch den Anspruch beinhaltet, am Netz angeschlossen zu bleiben.

Detaillierte Regelungen für den Netzanschluss, die vor allem technischer Natur sind, beinhalten die technischen Anschlussbedingungen der jeweiligen Netzbetreiber. Hier können die Netzbetreiber Regelungen betreffend die jeweils anzuschließende Anlagenart festlegen. Gesetzliche Regelungen müssen hierbei jedoch beachtet werden. Die (vorformulierten) Regelungen des BDEW, die von vielen Netzbetreibern benutzt werden, enthalten insofern auch Regelungen für den Anschluss von steuerbaren und schaltbaren Verbrauchseinrichtungen.¹⁰ Hierbei werden jedoch keine vertraglichen Ausgestaltungen wie etwa bestimmte Abschaltzeiten vorgenommen (bzw. betreffend die Trennung des Netzanschlusses).

Festzuhalten ist somit, dass strombetriebene Wärmepumpen vom allgemeinen Netzanschlusserfordernis nach §§ 17, 18 EnWG profitieren und ihnen schon nach geltendem Recht nur im Ausnahmefall ein Netzanschluss versagt werden darf. Zukünftig wird Netzbetreibern voraussichtlich überhaupt nicht mehr gestattet sein, Betreibern von Wärmepumpen den Netzanschluss zu verweigern. Wie sogleich ausführlich dargestellt wird, plant die Bundesnetzagentur, ab dem 1.1.2024 für neu installierte Wärmepumpen eine zwingende Steuerbarkeit durch den Verteilnetzbetreiber

⁷ BerIKommEnR/Säcker/Boesche EnWG § 17 Rn. 73.

⁸ BerIKommEnR/Säcker/Boesche EnWG § 17 Rn. 58.

⁹ BerIKommEnR/Säcker/Boesche EnWG § 17 Rn. 60.

¹⁰ BDEW, 2019, 9.

vorzuschreiben. Vor dem Hintergrund der dann bestehenden Eingriffsmöglichkeiten soll es Netzbetreibern untersagt werden, Betreibern von Wärmepumpen den Netzanschluss zu verweigern.

3.3.2 Netzzugang

Zu unterscheiden vom Netzanschluss ist der Netzzugang, d.h. die Durchleitung und die Entnahme von Strom aus dem Netz. Die Verteilnetzbetreiber sind verpflichtet, jedermann nach sachlich gerechtfertigten Kriterien diskriminierungsfrei Netzzugang zu gewähren, § 20 Abs. 1 S. 1 EnWG. Netzzugang meint dabei die vertraglich ausgestaltete Nutzung des Stromnetzes. Der Netzzugangsvertrag kann entweder direkt mit dem Netzbetreiber oder über einen Lieferanten in einem sog. Lieferantenrahmenvertrag geschlossen werden (vgl. Legaldefinition in § 20 Abs. 1a S. 2 EnWG). Ähnlich wie § 17 EnWG enthält auch § 20 EnWG Ausnahmebestimmungen, unter denen der Netzzugang verweigert werden kann. Auch diesbezüglich werden jedoch ähnlich hohe Hürden gestellt: Der Netzbetreiber muss nachweisen, dass ihm die Gewährung des Netzzugangs aus betriebsbedingten oder sonstigen Gründen nicht möglich oder nicht zumutbar ist. Im Falle eines Kapazitätsmangels muss der Netzbetreiber aufzeigen, welche Maßnahmen und damit verbundene Kosten zum Ausbau des Netzes erforderlich wären (§ 20 Abs. 2 S. 3 EnWG). Eine Ablehnung muss der Netzbetreiber begründen, er müsste also darlegen, dass durch die Wärmepumpe Engpässe entstünden. Dies ist bei einer gewissen Anzahl von Wärmepumpen durchaus möglich – das Phänomen wird unter dem Stichwort „Zahnarztallee“ beschrieben. Dennoch sind die Anforderungen an eine Einschränkung des Netzzugangs für Betreiber von Wärmepumpen, d.h. konkret die anteilige oder vollständige Reduzierung der Stromdurchleitung an die Wärmepumpe durch den Stromnetzbetreiber, sehr hoch.

3.3.2.1 Steuerbare Verbrauchseinrichtungen - § 14a EnWG a.F.

Nach bisheriger Rechtslage kommt eine Reduzierung des Strombezugs regelmäßig nur dann in Betracht, wenn der Betreiber der Wärmepumpe sich freiwillig einer Steuerbarkeit durch den Netzbetreiber unterworfen hat. Ein entsprechender Anreiz ergibt sich seit einigen Jahren aus der Regelung des § 14a EnWG, der ein reduziertes Netzentgelt für steuerbare Verbrauchseinrichtungen vorsieht. Damit soll genau das oben angesprochene „Zahnarztallee“-Problem behoben werden. Dann, wenn ein Netznutzer eine Verbrauchseinrichtung (hier: Wärmepumpe) steuerbar macht, muss er nur noch ein **niedrigeres Netznutzungsentgelt** an den Verteilnetzbetreiber entrichten. Stromlieferanten bieten unter Berücksichtigung des reduzierten Netzentgelts häufig einen „Wärmepumpentarif“ an. Bei der Möglichkeit zur Teilnahme am Mechanismus nach § 14a EnWG handelt es sich bislang nur um ein Angebot – es besteht keine Verpflichtung, die Wärmepumpe steuerbar zu machen.¹¹ Projektierer

¹¹ Sötebier, 2015, Rn. 11.

sollten sich dabei im Vorhinein im Klaren über die Bedingungen für eine Netzentgeltreduktion und einen daraus resultierenden Wärmepumpentarif machen. In der Regel ist es noch so, dass die Netzbetreiber feste Abschaltzeiten festlegen, in denen die Anlage, zusammen mit allen anderen steuerbaren Verbrauchseinrichtungen im Netzgebiet abgeschaltet wird. Für den Netzbetreiber bedeutet diese Form der „Steuerbarkeit“ eine konstante Kalkulationsgrundlage, um die Last möglichst gleich zu halten. Für den Netznutzer kann dies allerdings zu Schwierigkeiten beim Betrieb der Wärmepumpe führen.¹²

Die Inanspruchnahme eines reduzierten Netzentgelts war nach § 14a EnWG in der bis zum 31.12.2022 geltenden Fassung insbesondere von zwei Voraussetzungen abhängig, nämlich von einer „netzdienlichen Steuerung“ sowie davon, dass die Wärmepumpe als steuerbare Verbrauchseinrichtung über einen separaten Zählpunkt an das öffentliche Stromnetz angeschlossen ist. Auf den Aspekt der Netzdienlichkeit wird im Rahmen eines Exkurses insbesondere vor dem Hintergrund weit verbreiteter starrer Abschaltzeiten im Folgenden näher eingegangen:

Exkurs: Netzdienlichkeit der Steuerung

Bis zum 31.12.2022 war die Gewährung einer Netzentgeltreduktion nach § 14a EnWG von einer Netzdienlichkeit der Steuerung abhängig¹³:

„Betreiber von Elektrizitätsverteilernetzen haben denjenigen Lieferanten und Letztverbrauchern im Bereich der Niederspannung, mit denen sie Netznutzungsverträge abgeschlossen haben, ein reduziertes Netzentgelt zu berechnen, wenn mit ihnen im Gegenzug die netzdienliche Steuerung von steuerbaren Verbrauchseinrichtungen, die über einen separaten Zählpunkt verfügen, vereinbart wird.“

Eine Definition dieses Begriffs – insbesondere eine solche, die eine eindeutige und einfache Handhabung in der Praxis ermöglicht – ist keine triviale Angelegenheit. Im Folgenden sollen die Eckpunkte und bisherigen Erfahrungen mit dem Begriff dargestellt werden. Auch die Kommentarliteratur besteht im Wesentlichen aus grundsätzlichen Überlegungen zum Begriff, ohne konkrete Maßnahmen zu formulieren.

Schon heute ist das Niederspannungsnetz regelmäßig Höchstlasten ausgesetzt. Solche Höchstlasten sind kapazitäts- und kostentreibend. Durch die faktische Kapazitätsgrenze bestehender Netze und der fortlaufenden Flexibilisierung der Belastungen, bedarf es Maßnahmen, um die Stabilität zu gewährleisten und die Kapazitäten zu managen. So stellen regelbare Trafos Tools dar, um Einfluss auf

¹² Zu den potenziellen Auswirkungen der Steuerung auf die Warmwasserhygiene siehe: 3.4.1.

¹³ In der Neufassung des § 14a EnWG wird der Begriff der „netzdienlichen Steuerung“ ersetzt durch den Begriff der „netzorientierten Steuerung“, wobei sich die Begriffe überwiegend überschneiden dürften.

die Kapazität zu nehmen. Zu beachten sind zudem umwelttechnische Variablen, wie z.B. Außentemperaturen, welche Auswirkungen auf die Kapazitäten haben. Sind die Maßnahmen nicht ausreichend, bedarf es des Ausbaus der kapazitätsbezogenen Netzinfrastruktur, § 11 EnWG.

Netzdienliches Verhalten zeichnet sich vor allem dadurch aus, dass bestehende Netzinfrastruktur so gemanagt wird, dass kostentreibende Netzausbauten vermieden werden. Dabei kann sowohl auf Seiten der Einspeisung gesteuert werden als auch auf Seiten der Nachfragenden. Mit dem § 14a EnWG zielt der Gesetzgeber auf ein netzdienliches Management der Lastseite innerhalb der Niederspannungsebene ab. Durch die Steigerung des Anteils erneuerbarer Energien, werden die Niederspannungsnetze mittlerweile nicht mehr nur aus der Mittelspannungsebene gespeist, sondern auch dezentral aus einzelnen Anlagen, die an das Niederspannungsnetz angeschlossen sind. Durch die Volatilität der erneuerbaren Energien, überwiegend durch Wettereinflüsse, sieht der Elektrizitätsverteilnetzbetreiber sich der Herausforderung gegenüber, das Energieversorgungsnetz sicher, zuverlässig, leistungsfähig zu betreiben – ausgeglichen zu halten. Zusätzlich zu der volatilen Einspeisung durch die erneuerbaren Energien, stellen die inkonstanten Lasten weitere Herausforderungen für den Netzbetreiber dar. Um ein sicheres und zuverlässiges Energieversorgungsnetz zu gewährleisten, sind Managementsysteme hilfreich und somit netzdienlich, die eine Steuerung erlauben. Da die Einspeisung durch die erneuerbaren Energien zumeist nicht genau vorhersehbar ist, bietet sich eine Steuerung auf der Nachfrageseite an – dies genau sieht § 14a EnWG für Wärmepumpen vor.

Das Kriterium der Netzdienlichkeit ist dann erfüllt, wenn die Maßnahme die Arbeit des Verteilnetzbetreibers unterstützt.¹⁴ Durch die Steuerbarkeit von Verbrauchseinrichtungen wird ermöglicht, die Lasten koordinieren zu können. Die Verteilnetzbetreiber können somit über steuerbare Verbrauchseinrichtungen ihren Strombedarf vor oder nach dem Zeitpunkt der Höchstlast decken lassen und somit eine Netzüberlastung vermeiden. Die Steuerbarkeit stellt somit eine netzdienliche Maßnahme dar, allerdings ist die alleinige Steuerung auf Nachfragerseite nicht ausreichend. Durch die volatile Einspeisung von dezentralen erneuerbaren Energieanlagen, wie beispielsweise Photovoltaikanlagen auf dem Dach, kann dies zur zeitgleichen Einspeisung elektrischer Energie führen. Dies belastet das Elektrizitätsverteilnetz ebenfalls, nur umgekehrt. Dies kann bei zu geringer Last zur Umkehr des Stromflusses führen und wichtige, wesentliche Netzelemente überlasten. Um dies zu verhindern, können Zuschaltungen, in der Nähe der Energieanlage, hilfreich sein.

Die Schwelle zur Erfüllung des Kriteriums der Netzdienlichkeit ist – wie dargestellt - niedrig, da dieses letztlich schon erreicht wird, wenn die Maßnahme einen positiven Effekt auf das Stromnetz

¹⁴ BerKommEnR/Franz/Boesche EnWG § 14a Rn. 13.

hat.¹⁵ Bisher besteht die Steuerung allerdings hauptsächlich in starrten Abschalt- bzw. Sperrzeiten, was gerade nicht einer ausgewogenen „Steuerung“ entsprechen dürfte. Zudem moderieren die Verteilnetzbetreiber zumeist in der Mittagszeit (10-14 Uhr)¹⁶. Im Hinblick auf die steigende Zahl volatiler, dezentraler Einspeiseanlagen, wie Photovoltaikanlagen, welche im selbigen Zeitraum ihre maximale Produktion erzielen, erscheint der Zeitkorridor langfristig als nicht praktikabel¹⁷. Durch die schnelle Erreichung eines netzdienlichen Verhaltens werden Anreize zur Optimierung von Abschaltzeitmodellen bislang verhindert.

Die Berechtigung zur Steuerung von steuerbaren Verbrauchseinrichtungen setzt das Kriterium der Netzdienlichkeit voraus. Fraglich ist jedoch, ob ein Modell mit starren Abschaltzeiten netzdienlich sein kann. Die Steuerung der steuerbaren Verbrauchseinrichtungen führt zu einer Entlastung des Stromnetzes, insbesondere des Niederspannungsnetzes, aufgrund der Verringerung der Last. Netzdienliches Management ist dann notwendig, wenn eine Lastreduktion erforderlich ist. Die meisten Netzbetreiber führen ihre Abschaltungen mittags und abends durch¹⁸, was mit Blick auf das Standardlastprofil zunächst sinnvoll erscheint.¹⁹ Parallel zu den Abschaltungen mittags, erreichen die Photovoltaikanlagen ihren Leistungspeak, ohne Berücksichtigung der volatilen Wetterbedingungen. Bei zeitgleicher Abschaltung der Wärmepumpen und maximaler Einspeisung der Photovoltaikanlagen besteht die Gefahr einer Leitungsüberlastung durch einen Einspeiseüberhang. Alternativ können die Photovoltaikanlagen ebenfalls gemanagt, also vom Netz genommen werden. Dies würde die Netzbelastung wieder verringern, allerdings im Rahmen der Potenzialausschöpfung nicht sinnvoll. Die Betrachtung des netzdienlichen Verhaltens lässt sich zudem nicht einfach auf einen durchschnittlichen Wert betrachten, da die Lastenprofile sich Wochentags abhängig unterscheiden. Während zwischen Montag und Freitag ähnliche Lastprofile festzustellen sind, unterscheiden sich der Samstag und Sonntag wiederum²⁰. Unter Berücksichtigung der unsicheren Rahmenbedingungen, im Hinblick auf den Ausbau von steuerbaren Verbrauchseinrichtungen sowie von dezentralen Einspeiseanlagen und der unterschiedlichen wochentags bedingten Lastprofile, erscheinen starre Steuerungszeiten als nicht zukunftsfähig und schon jetzt kritisch. Die Problematik hinsichtlich der Netzdienlichkeit kann zudem zu einer Steuerung ohne Rechtsgrundlage führen, eben in diesen Zeiten, in denen eine Steuerung nicht netzdienlich ist.

¹⁵ BerKommEnR/Franz/Boesche EnWG § 14a Rn. 13.

¹⁶ Becker, 2020, Abbildung 1.

¹⁷ Vgl. Becker, 2020. Auswertung der Untersuchungsszenarien, Feste Sperrzeiten.

¹⁸ Becker, 2020, Abbildung 1.

¹⁹ Standardlastprofil H0 nach VDEW.

²⁰ Standardlastprofil H0 nach VDEW.

Vor dem Hintergrund der steigenden Belastung der Niederspannungsnetze erscheinen dynamische Steuerungsmodelle als optimale Lösung. Diese stehen im Einklang mit der Entwicklung der Netzinfrastruktur zum Smart Grid. Zwar sieht der § 14a EnwG durch den Begriff der Steuerung unterschiedliche Steuerungsmaßnahmen wie Abschaltungen, Lastreduktion oder Teilabschaltungen vor, praktisch werden die steuerbaren Verbrauchseinrichtungen bislang meist einfach abgeschaltet. Der Einsatz intelligenter Messsysteme ermöglicht eine bedarfsgerechte Steuerung und unterstützt den Einsatz flexibler Steuerungszeiten²¹. Diese ist zwingend notwendig um das Kriterium der Netzdienlichkeit, welches als Voraussetzung zur Steuerung gilt, auch in Zukunft zu erfüllen.

3.3.2.2 Steuerbare Verbrauchseinrichtungen - Neufassung des § 14a EnWG

Der Gesetzgeber hat die Regelung des § 14a EnWG mit Geltung seit dem 1.1.2023 geändert. Die Neufassung des § 14a EnWG²² sieht wesentliche Änderungen und Verschärfungen vor. Insbesondere die Bundesnetzagentur als Regulierungsbehörde (§ 54 Abs. 1 EnWG) erhält bedeutende Kompetenzzuwächse. So ist es ihr gem. § 14a Abs. 1 S. 1 EnWG (n.F.) erlaubt, nach § 29 Abs. 1 EnWG bundeseinheitliche Regelungen durch Festlegung zu treffen, nach denen Betreiber von Elektrizitätsverteilernetzen und diejenigen Lieferanten oder Letztverbraucher, mit denen sie Netznutzungsverträge abgeschlossen haben, verpflichtet sind, nach den Vorgaben der Bundesnetzagentur Vereinbarungen über die netzorientierte Steuerung von steuerbaren Verbrauchseinrichtungen oder von Netzanschlüssen mit steuerbaren Verbrauchseinrichtungen (steuerbare Netzanschlüsse) im Gegenzug für Netzentgeltreduzierungen abzuschließen.

Der Gesetzgeber erlaubt der Bundesnetzagentur in ihrer Festlegung spezielle Regelungen über einen abschließenden Katalog an Themengebieten (§ 14a Abs. 1 S. 3 Nr. 1 – 9 EnWG n.F.) zu treffen. Darunter fallen Definitionen und Voraussetzungen für steuerbare Verbrauchseinrichtungen oder steuerbare Netzanschlüsse (Abs. 1 Nr. 4) sowie Voraussetzungen der netzorientierten Steuerung durch den Netzbetreiber (Abs. 1 Nr. 5) können durch die Bundesnetzagentur in deren Festlegung integriert werden.

Bis zu der Festlegung bundeseinheitlicher Regelungen nach § 14a Abs. 1 EnWG (n.F.), gilt, dass Betreiber von Elektrizitätsverteilernetzen denjenigen Lieferanten und Letztverbrauchern im Bereich der Niederspannung, mit denen sie Netznutzungsverträge abgeschlossen haben, ein reduziertes Netzentgelt zu berechnen haben, wenn mit ihnen im Gegenzug die netzorientierte Steuerung von steuerbaren Verbrauchseinrichtungen, die über einen separaten Zählpunkt verfügen, vereinbart wird

²¹ Beispielsweise BMWK, 2018, 6.2.1.

²² Geltung ab 01.01.2023.

(Abs. 2 S. 1), mit Ausnahme der nun netzorientierten Steuerung. Darüber hinaus kann die Bundesnetzagentur durch Festlegung nach § 29 Absatz 1 Regelungen zu Definition und Voraussetzungen für steuerbare Verbrauchseinrichtungen, zum Umfang einer Netzentgeltreduzierung nach Satz 1 oder zur Durchführung von Steuerungshandlungen treffen und Netzbetreiber verpflichten, auf Verlangen Vereinbarungen gemäß Satz 1 nach diesen Regelungen anzubieten. Durch den Satz 2 findet eine Verschärfung der Regelung im Vergleich zur derzeitigen Handhabung statt, da die Bundesnetzagentur den Netzbetreibern nun bundeseinheitlich direkte Vorgaben machen darf.

Die Neufassung des § 14a EnWG sieht im Absatz 3 einen nicht abschließenden Katalog an steuerbaren Verbrauchseinrichtungen vor, in dem Wärmepumpen ausdrücklich genannt sind. Dieser Katalog gilt so lange, bis die Bundesnetzagentur nach Abs. 1 oder 2 in ihrer Festlegung etwas anderes vorsieht.

Gemäß § 14a Abs. 4 S. 1 EnWG (n.F.) hat, sobald die Messstelle mit einem intelligenten Messsystem ausgestattet wurde, die Steuerung entsprechend den Vorgaben des Messstellenbetriebsgesetzes und der konkretisierenden Technischen Richtlinien und Schutzprofile des Bundesamtes für Sicherheit in der Informationstechnik sowie gemäß den Festlegungen der Bundesnetzagentur über ein Smart-Meter-Gateway zu erfolgen. Im Hinblick des Aufbaus eines Smart Grids stellt die neue Fassung eine wesentliche Grundlage dar. Für Vereinbarungen, die vor Inkrafttreten der Festlegung geschlossen werden, kann die Bundesnetzagentur Bestands- und Übergangsregelungen treffen.

Die Bundesnetzagentur ist in ihren Ausgestaltungsmöglichkeiten im Rahmen der Festlegung nicht mehr auf die Niederspannungsebene begrenzt. Während die Übergangsregelung im Absatz 2 noch die Beschränkung auf den Bereich der Niederspannung vorsieht, liegt es im Ermessen der Bundesnetzagentur, die Festlegung nach Absatz 1 auch auf andere Spannungsebenen im Elektrizitätsverteilnetz auszuweiten. Dies ist naheliegend, da lastseitig steuerbare Verbrauchseinrichtungen wie Wärmepumpen zukünftig verstärkt nicht mehr nur kleine Letztverbraucher versorgen werden, sondern durch ihre Größe an die Mittelspannung angeschlossen werden. Insofern liegt aufgrund der höheren Höchstlast dieser Anlagen ein großes Potenzial zur netzorientierten Flexibilisierung.

3.3.2.3 Festlegungsverfahren im Sinne des § 14a Abs.1 EnWG (n.F.)

Die Bundesnetzagentur hat im November 2022 durch ihre Beschlusskammern 6 und 8 zwei Festlegungsverfahren zur Konkretisierung des § 14a EnWG n.F. eingeleitet. Mittlerweile haben die beiden Beschlusskammern jeweils bereits zweite Entwürfe ihrer beabsichtigten Festlegungen zur

Konsultation gestellt (BK6-22-300 sowie BK8-22/010-A). Ein Inkrafttreten der beiden Festlegungen ist derzeit (August 2023) zum 1.1.2024 geplant.

Im Folgenden sollen einige wesentliche Eckpunkte der im Entwurf vorliegenden Festlegungen der Bundesnetzagentur grob skizziert und im Anschluss eingeordnet werden:

- Wärmepumpen werden als steuerbare Verbrauchseinrichtungen definiert.
- Betreiber von Wärmepumpen, die nach dem 31.12.2023 in Betrieb genommen werden, müssen zwingend eine Vereinbarung über eine netzorientierte Steuerung mit dem Stromnetzbetreiber abschließen (und über eine entsprechend erforderliche Messeinrichtung gemäß Messstellenbetriebsgesetz verfügen).
- Ein separater Zählpunkt ist keine zwingende Teilnahmevoraussetzung mehr, allerdings setzen bestimmte Netzentgeltvergünstigungen einen separaten Zählpunkt voraus.
- Im Fall einer durch eine Netzzustandsermittlung festgestellten Gefährdung oder Störung der Sicherheit oder Zuverlässigkeit des Netzes ist der Netzbetreiber zukünftig berechtigt, aber auch verpflichtet, den netzwirksamen Leistungsbezug von Wärmepumpen (ebenso wie von Ladepunkten für Elektromobile oder Energiespeichern) im notwendigen Maß zu reduzieren. Feste Abschaltzeiten sind dagegen (nach einer Übergangsfrist) nicht mehr zulässig.
- Jeder steuerbaren Verbrauchseinrichtung – also auch Wärmepumpen – wird auch im Fall der Leistungsreduzierung stets ein Leistungsbezug von maximal 4,2 kW garantiert („Dimmen“). Bei mehreren steuerbaren Verbrauchseinrichtungen hinter einem Netzanschluss kann am entsprechenden Netzanschluss unter bestimmten Voraussetzungen auch ein Leistungsbezug von mehr als 4,2 kW zulässig sein.
- Eine vollständige Abschaltung steuerbarer Verbrauchseinrichtungen ist nicht mehr zulässig.
- In zeitlicher Hinsicht erfolgt – einen Netzengpass unterstellt – keine zeitliche Begrenzung möglicher Eingriffe durch die Netzbetreiber.
- Eine Kompensation der Betreiber der Wärmepumpe erfolgt durch eine Netzentgeltreduktion. Dabei können Betreiber wählen:
 - Modul 1: Pauschale Netzentgeltreduzierung in Euro/Jahr unter Berücksichtigung der Mehrkosten für Mess- und Steuereinrichtung
 - Modul 2 (nur bei separatem Netzanschluss): Reduzierung der Arbeitspreiskomponente des Netzentgelts auf 60 %
 - Modul 3 (kombinierbar mit Modul 1): zeitvariables Netzentgelt als Anreiz zur Lastverschiebung

- Für bereits abgeschlossene Vereinbarungen nach § 14a EnWG soll Bestandschutz bis zum 31.12.2028 gelten, sofern die Betreiber der steuerbaren Verbrauchseinrichtungen nicht schon vorher freiwillig in das neue Modell wechseln.

Für Betreiber von Wärmepumpen werden die geplanten Neuregelungen unter anderem folgende Auswirkungen haben:

- Die Steuerbarkeit wird zukünftig nicht mehr freiwillig, sondern verpflichtend sein.
- Es gibt in zeitlicher Hinsicht keine Begrenzung von Zeiträumen der Leistungsreduzierung durch den Netzbetreiber, solange diese notwendig ist. Allerdings ist ein Mindeststrombezug von 4,2 kW durchgängig sichergestellt. Eine vollständige Abschaltung wird es – anders als gegenwärtig – nicht mehr geben. Wärmepumpen und Wärmespeicher müssen zukünftig unter Berücksichtigung dieser Rahmenbedingungen geplant und ausgelegt werden (vgl. dazu auch unten Ziffer 3.4). Zusätzliche Chancen können sich für die Betreiber von Wärmepumpen aus einer Nutzung zeitvariabler Netzentgelte im Fall der Lastverschiebung ergeben.
- Wärmepumpenbetreiber müssen sich zukünftig zwischen mehreren Varianten der Netzentgeltreduzierung entscheiden.

Es ist offensichtlich, dass sich die Rahmenbedingungen für den Betrieb von Wärmepumpen und deren Wirtschaftlichkeit mit Inkrafttreten der Festlegungen der Bundesnetzagentur grundlegend verändern werden.

3.4 Anforderungen an die Trinkwasserhygiene

3.4.1 Auswirkungen der Steuerungsprozesse auf die Trinkwasserhygiene

Auswirkungen der (netzdienlichen) Steuerungsprozesse müssen in der Heizanlage technisch kompensiert werden. Dazu wird bei Bau- bzw. Umrüstungsprojekten ein Puffersystem eingeplant, das das Heizsystem ausreichend mit Wärme versorgt, während die Wärmepumpenanlage vom Stromnetz getrennt ist.

In dem untersuchten Mehrfamilienhaus in Wedel (Kapitel 3.2.1.1) ergab sich durch die starren Abschaltzeiten eine Kaskade unerwünschter Effekte auf den monovalenten Wärmepumpenbetrieb (Günther & Puls, 2020). Diese technischen Effekte summierten sich in der Praxis auf.

Die Wärmepumpe musste größer dimensioniert werden, da die benötigte Wärmemenge in kürzerer Frist erzeugt werden muss. Dies betraf zusätzlich alle leistungsabhängigen Bauteile der Anlage (Rohre, Pumpen). Weitere Schallschutzmaßnahmen wurden erforderlich, da die leistungsstärkere

Wärmepumpe einen höheren Schalleistungspegel mit sich brachte (Günther & Puls, 2020). Zudem verursachte die leistungsstärkere Wärmepumpe im Moment des Anschaltens größere Lastspitzen. Um diese Lastspitze abzufangen, musste seitens der Stadtwerke ein eigenes Trafohäuschen auf dem Grundstück aufgestellt werden. Weiterhin war die überdimensionierte Wärmepumpe im Betrieb weniger effizient (Stromverbrauch pro erzeugte Wärmeeinheit).

Die versorgerseitig vorgebenden Abschaltzeiten (dreimal täglich für zwei Stunden) lagen u.a. mittags, während der höchsten Photovoltaik-Erträge des Gebäudes. Zudem ist die Effizienz der Luft/Wasser-Wärmepumpe mittags tendenziell größer, da zu dieser Tageszeit auch die Außentemperaturen höher sind und da so ein kleinerer Temperaturhub im Vergleich zum Nachtbetrieb bereitgestellt werden muss.

Insbesondere für die Warmwasserbereitung dürfen hygienisch bedingte Mindesttemperaturen im System während einer Abschaltung nicht unterschritten werden. Dies kann generell in Großobjekten wie z.B. Mehrfamilienhäusern oder Wohnquartieren zu rechtlichen Konflikten führen. Die TrinkwV verweist auf die a.a.R.d.T., die für zentrale Trinkwasserinstallationen $>60^{\circ}\text{C}$ am Warmwasseraustritt des Trinkwassererwärmers bzw. $>55^{\circ}\text{C}$ im gesamten Trinkwassersystem vorschreiben. Der Hintergrund ist, dass pathogene Mikroben wie Legionellen durch die hohen Temperaturen thermisch unterdrückt werden.

Auch während einer Abschaltung dürfen diese Temperaturen aus normativen Vorgaben nicht unterschritten werden. Sind mehrere Wohneinheiten und/oder mehrere Stockwerke vorhanden, können Wärmeverluste in den Verteilungsrohren ausschlaggebend sein, sodass die Einhaltung der Temperatur maßgeblich erschwert bzw. verunmöglicht wird.

Diese Verteilungsverluste machen in realen Gebäuden einen signifikanten Anteil der Energieverluste aus. In einigen Fällen überschreiten diese Verluste, die besonders in den Warmwasserzirkulationsleitungen vorkommen, sogar die Energie, die für den Endnutzung benötigt wird (Pomianowski et al., 2020). Untersuchungen an mehreren Gebäuden in Lublin zeigten, dass die Verluste 56,7-70,5% der gesamten benötigten Wärmemenge in Mehrfamilienhäusern betragen (Cholewa et al., 2019).

Betreiber von Trinkwasserinstallationen könnten auf dezentrale Trinkwassersysteme setzen (Frischwasserstationen, Wohnungsstationen), da bei diesen Anlagen die thermischen Verluste deutlich geringer sind. Dezentrale Trinkwassererwärmer haben die Reputation hygienisch sicher zu sein, dies wird jedoch durch neue Untersuchungen widerlegt (Umweltbundesamt, 2018). Zudem verursachen dezentrale Durchlauferhitzer hohe Lasten im Stromnetz, sodass die Netzstabilität lokaler Stromnetze wiederum beeinträchtigt wird (Zapfevent mit 15 L min^{-1} auf $40\text{-}45^{\circ}\text{C}$ z.B. Duschen oder Füllen einer Badewanne entspricht 30 kW Spitzenlast, mehr als das Laden eines Elektromobils).

Während dieser Konflikt zwischen effizienter Stromnetznutzung sowie der Einhaltung der Trinkwasserhygiene im Einfamilienhausbereich in den meisten Fällen vernachlässigt werden kann, erfordert dieser in Großobjekten, bei denen eine monovalente Wärmepumpe mehrere Wohneinheiten oder ganze Wohnquartiere versorgen muss, neue Lösungsansätze, um den geplanten Wärmepumpen-Markthochlauf bis 2050 und darüber hinaus in Deutschland zu sichern.

Dieser Konflikt wurde in diesem Forschungsprojekt im Rahmen der explorativen Interviews und der Stichprobenbefragung verdeutlicht. Von 200 befragten Akteuren gingen je nach Branche (Energieberatung, Heizungstechnik, Fachplanung) etwa 44,8-60,6% von einem limitierenden Effekt für die Wärmepumpentechnologie in Großobjekten aus. Zusätzliche Ergebnisse sind einem Artikel in den Proceedings der 1. Konferenz zur Norddeutschen Wärmeforschung zu entnehmen (Anhang A6 [1]).

3.4.2 Hemmnisse für die Implementierung neuer Lösungsansätze

Anforderungen an Vermieter und Mieter

Auch wenn der Gesetzgeber eine generelle Sanierungspflicht für Bestandsgebäude auf Bundesebene nicht verankert hat, so sind im Gebäudeenergiegesetz 2020 indirekt Anforderungen an neue und bestehende Gebäude vorgesehen. Mit dem Betriebsverbot für betroffene Heizkessel (§ 72 GEG) und Anforderungen an die Wärme- und Kälte­dämmung von Leitungen (§§ 70, 71 GEG) sind Nachrüstungen auf den Weg gebracht. Vermieter von neuen oder bestehenden Gebäuden werden sich daher zukünftig mit Wärmepumpen beschäftigen müssen. Aufgrund der wirtschaftlichen Attraktivität des sogenannten Wärmepumpentarifs (siehe: **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**), durch den die Steuerung der Anlage durch den Netzbetreiber ermöglicht wird, können dem Vermieter hygienische Probleme entgegenstehen, insbesondere die Vermehrung von Legionellen sind hier zu nennen. Folgend werden Anforderungen an den Vermieter, sowie für den Mieter betrachtet.

Zusätzlich zu den Vorgaben aus dem BGB ergeben sich Verpflichtungen aus der Trinkwasserverordnung. Entsprechend § 4 Abs. 1 S.1 TrinkwV muss Trinkwasser so beschaffen sein, dass durch seinen Genuss oder Gebrauch eine Schädigung der menschlichen Gesundheit insbesondere durch Krankheitserreger nicht zu besorgen ist. Unternehmer und sonstige Inhaber einer Wasserversorgungsanlage zur ständigen Wasserverteilung²³ unterliegen gem. § 14b Abs. 1 TrinkwV Untersuchungspflichten in Bezug auf Legionella spec., wenn die Wasserversorgungsanlage Duschen oder andere Einrichtungen enthält, in denen es zu einer Vernebelung des Trinkwassers kommt, aus der Wasserversorgungsanlage Trinkwasser im Rahmen einer gewerblichen oder öffentlichen Tätigkeit abgegeben wird oder die Wasserversorgungsanlage eine Großanlage (§ 3 Nr. 12 TrinkwV) zur

²³ Vgl. § 3 Nr. 2 lit. E TrinwV.

Trinkwassererwärmung darstellt. Der Adressat dieser Pflicht²⁴, gem. § 3 Nr. 10 TrinkwV in der Regel der Vermieter, hat die Untersuchungen gemäß § 14b Abs. 4 TrinkwV in einer bestimmten Häufigkeit durchzuführen. So müssen Anlagen zur ständigen Wasserverteilung mindestens alle drei Jahre, wenn das Trinkwasser im Rahmen einer gewerblichen, nicht aber öffentlichen Tätigkeit abgegeben wird (Nr. 2 lit. a) und im Übrigen mindestens einmal jährlich (Nr. 2 lit. b), sofern nicht das Gesundheitsamt ein längeres Untersuchungsintervall festlegt, untersucht werden. Für ab dem 9. Januar 2018 neu in Betrieb genommene Wasserversorgungsanlagen ist die erste Untersuchung innerhalb von drei bis zwölf Monaten nach der Inbetriebnahme durchzuführen. Ausgenommen sind von den Pflichten Anlagen in Ein- und Zweifamilienhäusern sowie Anlagen, die nicht alle Kriterien des § 14b Abs. 1 TrinkwV erfüllen. Allerdings gelten auch ohne Untersuchungspflicht die Anforderungen aus § 4 TrinkwV für diese Anlagen²⁵.

Flankierend zu den Maßnahmen von Energieversorger und Vermieter sollen Maßnahmen in die Betrachtung mit einbezogen werden, die vom Mieter ergriffen werden können. Das Verbrauchsverhalten ist sehr entscheidend für den Erfolg von energieeffizienten Lösungen. Aus mikrobiologischen Gründen ist es wichtig, dass Mieter in regelmäßigen Abständen warmes Wasser durch die Leitungen befördern, um Keimen entgegenzuwirken. Zu überlegen ist daher, ob Vermieter Vorgaben für das mieterseitige Verbrauchsverhalten machen können.

Es besteht für den Mieter grundsätzlich **keine Pflicht zum Gebrauch der Mietsache**²⁶ und entsprechend auch nicht zum Gebrauch bestimmter Einrichtungen der Mietsache, wie etwa der Warmwasserversorgung. Der Mieter ist aber zu einem **pfleglichen Umgang mit der Mietsache** verpflichtet.²⁷ Dazu gehört auch der Schutz vor elementaren Gefahren, wie etwa das Schließen der Türen und Fenster bei starkem Regen.²⁸ Der BGH hat auch eine Pflicht des Mieters dahingehend bejaht, dass er eine längere Abwesenheit im Winter anzeigen muss, damit der Vermieter ausreichende Vorkehrungen bezüglich Frostschutz treffen kann.²⁹ Andererseits muss der Vermieter in den Grenzen des § 538 BGB (Abnutzung der Mietsache durch vertragsgemäßen Gebrauch) Substanzbeeinträchtigungen hinnehmen. Zwischen diesen Polen ist es dem Vermieter durchaus möglich, Verhaltensvorgaben zu machen. Prüfungsmaßstab sind die §§ 305 ff. BGB, die die in AGB zulässigen Inhalte regeln. Im Falle der Gefahr von Legionellenvermehrung ist es also an der **vertraglichen Ausgestaltung**, abwehrendes Nutzerverhalten vorzuschreiben. Noch dürften derartige

²⁴ Pfeifer, 2022, TrinkwV § 14b Rn. 29-32.

²⁵ Pfeifer, 2022, TrinkwV § 14b Rn. 15-17.

²⁶ Häublein, MüKo-BGB, § 535 Rn. 208.

²⁷ Häublein, MüKo-BGB, § 535 Rn. 210.

²⁸ Häublein, MüKo-BGB, § 535 Rn. 211.

²⁹ BGH NJW 1972, 34.

Maßnahmen nicht etabliert und überraschend für Mieter sein. Eine Haftung für eventuelle Folgeschäden dürfte den Mietern derzeit nicht zuzumuten sein. Allerdings erscheinen derartige Pflichten vor dem Hintergrund der Klima- und Energiekrise über kurz oder lang wohl nicht unzumutbar.

Nach derzeitigem Stand legt die Trinkwasserverordnung Unternehmer oder sonstige Inhaber von Trinkwasserinstallationen für die hygienischen Zustände bis in entfernteste Entnahmestellen der Wohnungen sowie Stockwerksleitungen als Verantwortliche fest. Allerdings sind die Einflussmöglichkeiten auf den letzten Rohrabschnitten begrenzt.

Vielmehr beeinflussen Nutzer/Mieter mit ihren Wasserverbräuchen direkt die hygienischen Bedingungen im System, da übermäßige Stagnationen des Wassers zu mikrobiellen Verkeimungen führen. Es ist zu vermuten, dass Warmwasserrohre auf Temperaturen abkühlen, die die Vermehrung mesophiler Bakterien wie Legionellen fördern. Nach längeren Nutzungsunterbrechungen sind entsprechende Maßnahmen vorzunehmen wie z.B. ein vollständiger Wasseraustausch und/oder eine Absperrung der Leitungen. Es wird Nutzern empfohlen bei längeren Stagnationszeiten das Wasser nicht zur Zubereitung von Säuglingsnahrung zu verwenden und zusätzlich durch Ablaufenlassen auszutauschen (VDI 6023 Part 1, 2022).

Bei längeren Stagnationszeiten kann auch eine Dämmung keinen dauerhaften Schutz vor z.B. der Erwärmung der Kaltwasserrohre leisten (DIN 1988-200, 2012; DIN EN 806-5, 2012).

Was ein bestimmungsgemäßer Betrieb einer Trinkwasserinstallation ist, wird in einzelnen Regelwerken unterschiedlich definiert. Gemäß DIN 1988-100 (2011) bedeutet ein bestimmungsgemäßer Betrieb, dass alle Installationsbereiche durchströmt (d.h. genutzt) werden müssen. Bei selten genutzten Leitungen muss mindestens alle vier Wochen ein Wasserwechsel vorgenommen werden. Nach DIN 1988-200 (2012) bzw. DIN EN 806-5 (2012) liegt bei einer Nutzungsunterbrechung von sieben Tagen kein bestimmungsgemäßer Betrieb mehr vor. Wird der Wasseraustausch einer zentralen Anlage alle drei Tage realisiert, können Betriebstemperaturen um 5°C auf 50°C abgesenkt werden, da die Gefahr von Verkeimungen gesenkt wird. Die VDI 6023 Part 1 (2022) fordert einen regelmäßigen Wasseraustausch alle drei Tage. Nur unter Nachweis, dass die Trinkwasserbeschaffenheit erhalten bleibt, darf die Frist auf maximal sieben Tage verlängert werden.

Nutzerseitige Abnahmen sind in der Regel Betreibern nicht bekannt. Selten ist Nutzern/Mietern die Mitwirkungsverantwortung bekannt, die sich aus Vertragsverhältnissen mit Betreibern ergeben kann. Zudem sind sie vornehmlich zum „Wassersparen“ bzw. „Energiesparen“ angehalten, was dem bestimmungsgemäßen Betrieb von Trinkwasserinstallationen entgegenstehen kann. Aus diesem Grund sollten neue Lösungsansätze, die die Trinkwasserhygiene aus Großanlagen sichern sollen, die Mieter bzw. Nutzer mit einbeziehen.

Anhand eines Modellgebäudes wird in diesem Kapitel dargelegt, welchen Einfluss eine unzureichende Wasserabnahme durch Nutzer/Mieter auf die Trinkwasserhygiene einnehmen kann. Es wurde ein reales Altenwohnheim untersucht (Kapitel 2.1.1). In diesem Gebäude kam es vermehrt zu Legionellenverkeimungen im Warm- und Kaltwasser, mutmaßlich durch die geringe Wasserabnahme. Der jährliche Warmwasserverbrauch (ρ_{Hot}) lag bei 1.004 L yr^{-1} , der Kaltwasserverbrauch (ρ_{Cold}) belief sich auf 10.542 L yr^{-1} . Im Folgenden wird die technisch-hygienische Auswertung des Modellgebäudes dargestellt.

Der Aufbau der Trinkwasserinstallation des Altenwohnheims ist Abb. 1 zu entnehmen.

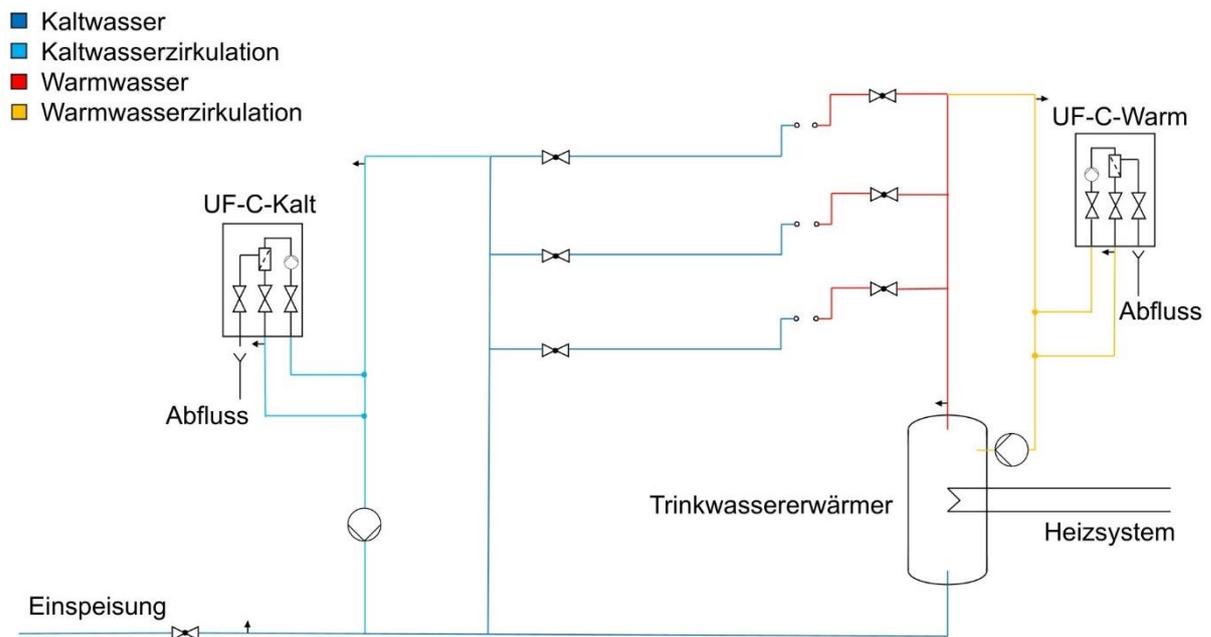


Abb. 1: Aufbau der Trinkwasserinstallation des Altenwohnheims.

Kaltwasser wird an der Einspeisung vom lokalen Wasserversorger zur Verfügung gestellt. Über Verteilleitungen im Keller wird Kaltwasser senkrecht über Steigstränge in fünf Stockwerken gefördert. Es werden 82 Wohnungen, drei barrierefreie Badezimmer, fünf Fäkalspülen, 32 Pflegebäder, eine Großküche, zwei Pflegebäder mit Badewanne sowie Sanitärräume für Personal und Besucher versorgt. Es ist eine Kaltwasserzirkulation vorhanden. Damit soll verhindert werden, dass bei längerer Standzeit Kaltwasser durch die Umgebung erwärmt wird. Überschüssige Wärme wird mit einem Wärmetauscher vom Kaltwassernetz abgegeben (Kapitel 2.1.1).

Kaltwasser wird ebenfalls in Trinkwassererwärmern erhitzt und gespeichert, um Warmwasser an den Entnahmestellen des Gebäudes bereitzustellen. Es ist eine Warmwasserzirkulation enthalten. Sowohl die Kaltwasserzirkulation als auch die Warmwasserzirkulation enthalten seit 2017 je eine Ultrafiltrationsanlage (UF-C-Kalt, UF-C-Warm), die Mikroben aus dem System entfernen.

Der Temperaturabgleich der einzelnen Steigstränge erfolgt über Temperaturfühler, die über eine Regelung und entsprechende Motorventile gesteuert werden. Warm- und Kaltwasserleitungen der Großküche, der Personal- und Besucher-WCs werden durchgeschleift, da diese sich weit von der Technikzentrale entfernt befinden. Das Rohrsystem ist nach a.a.R.d.T. isoliert und brandschutztechnisch geschützt.

Der lokale Wasserversorger stellte von September 2017 bis Februar 2022 kontinuierlich sicheres Trinkwasser zur Verfügung (Abb. 2).

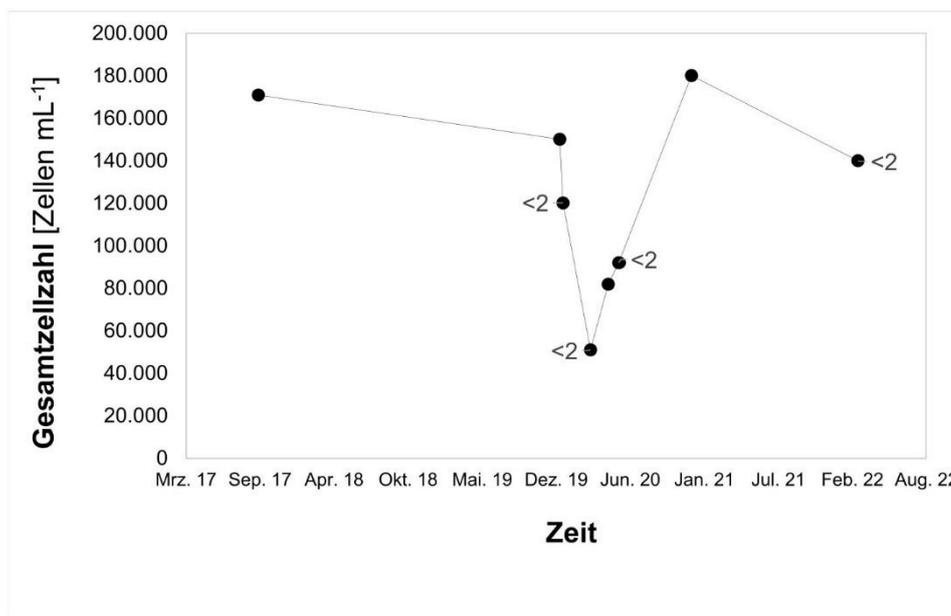


Abb. 2: Hygiene an der Einspeisung: GZZ (Zellen mL⁻¹) und Legionellenkonzentration (KBE 100 mL⁻¹). Die Werte an den Messpunkten stellen die Ergebnisse aus der Legionellen-Kultivierung dar [KBE 100 mL⁻¹].

Der Zeitraum und die entsprechende Gesamtzellzahl [Zellen mL⁻¹] werden auf den Achsen dargestellt. Die Gesamtzellzahl umfasst alle Zelltypen. Die Werte, die auf den Messwerten im Diagramm angezeigt werden, stellen die Ergebnisse der Legionellen-Kultivierung dar [KBE 100 mL⁻¹].

In der Einspeisung variieren die Gesamtzellzahlen zwischen 51.000 und 180.000 Zellen mL⁻¹. Legionellen konnten in diesen Zeitraum nicht detektiert werden (<2 KBE 100 mL⁻¹).

Demgegenüber wurden Verkeimungen an den Entnahmestellen des Gebäudes aufgedeckt (Abb. 3+4). Um auf die Verkeimungen zu reagieren, wurden Anfang bzw. Mitte November 2017 Ultrafiltrationsanlagen in der Warmwasserzirkulation und anschließend in der Kaltwasserzirkulation eingebaut. Im Dezember 2019 wurde die Trinkwasserinstallation chemisch desinfiziert. Im Februar

2020 erfolgte eine chemische Desinfektion an den Entnahmestellen. Diese Events werden mit gepunkteten Strichen verdeutlicht.

Auf die Entnahmestellen zweier Wohnungen wird an dieser Stelle genauer eingegangen. Die Wohnungen befinden sich im dritten (Abb. 3) und im vierten Stockwerk (Abb. 4). Beprobungen fanden in Warmwasser- wie auch in Kaltwasserleitungen statt.

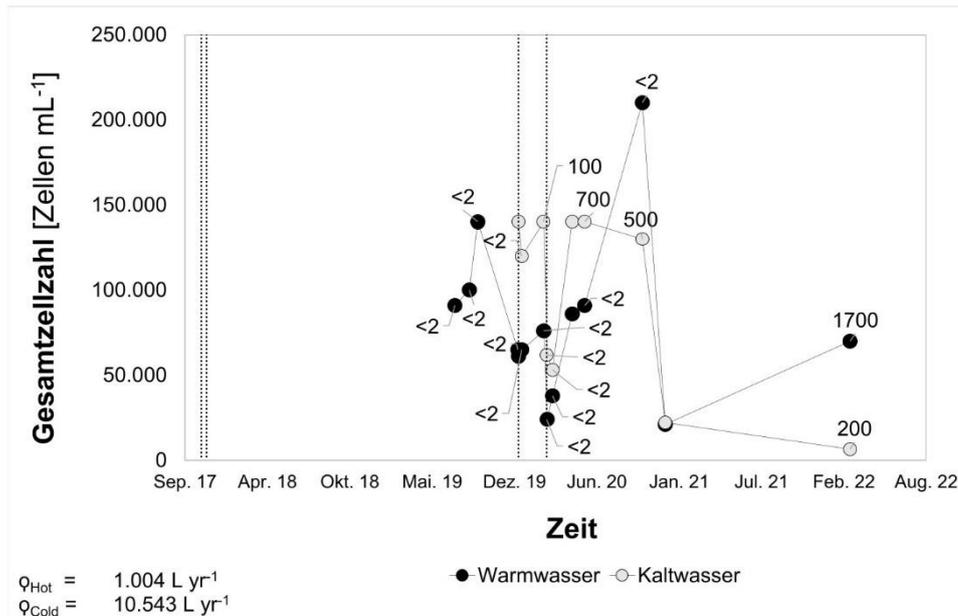


Abb. 3: Hygiene an der Wohneinheit im dritten Stock: : GZZ (Zellen mL⁻¹) und Legionellenkonzentration (KBE 100 mL⁻¹). Die Werte an den Messpunkten stellen die Ergebnisse aus der Legionellen-Kultivierung dar [KBE 100 mL⁻¹]. Die gestrichelten Linien stellen folgende Events in Reihenfolge dar: Einbau einer UF in der Warmwasserzirkulation; Einbau einer UF in der Kaltwasserzirkulation; chemische Desinfektion der Trinkwasserinstallation; chemische Desinfektion der Entnahmestellen.

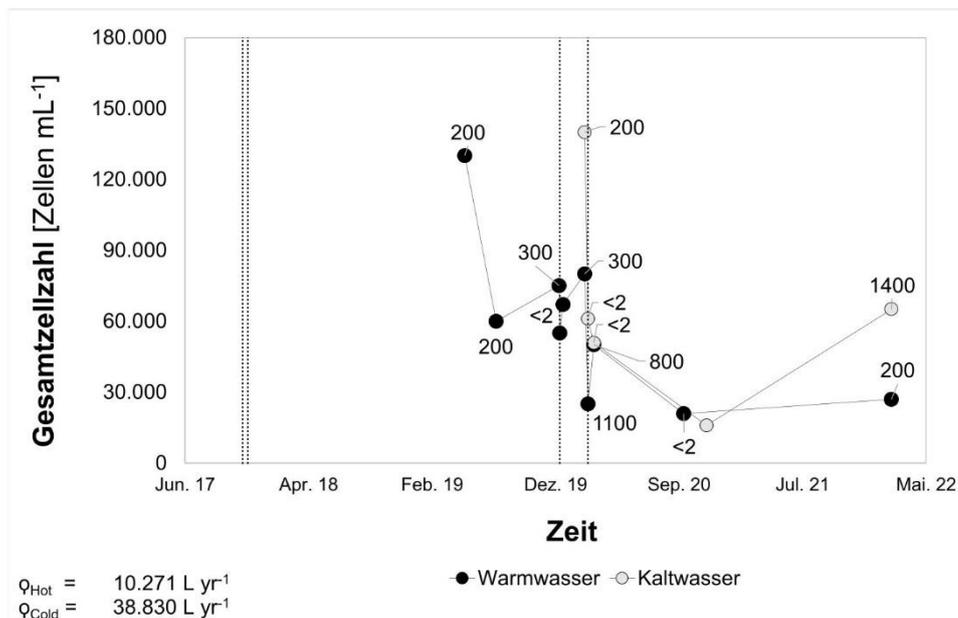


Abb. 4: Hygiene an der Wohneinheit im vierten Stock: GZZ (Zellen mL⁻¹) und Legionellenkonzentration (KBE 100 mL⁻¹). Die Werte an den Messpunkten stellen die Ergebnisse aus der Legionellen-Kultivierung dar [KBE 100 mL⁻¹]. Die gestrichelten Linien stellen folgende Events in Reihenfolge dar: Einbau einer UF in der Warmwasserzirkulation; Einbau einer UF in der Kaltwasserzirkulation; chemische Desinfektion der Trinkwasserinstallation; chemische Desinfektion der Entnahmestellen.

An den Entnahmestellen der Wohneinheit im dritten Stockwerk werden seit einigen Jahren Legionellen detektiert. Im Warmwasser wurde zuletzt im Feb. 22 eine Legionellenkonzentration von 1700 KBE 100 mL⁻¹ aufgedeckt. Der technischen Maßnahmenwert ist mit 100 KBE 100 mL⁻¹ definiert. Im Kaltwasser wurde dieser an vier Messungen überschritten (Feb. 20: 100; Mai 20: 700; Okt. 20: 500; Feb. 22: 200 KBE mL⁻¹).

Demgegenüber liegen die Gesamtzellzahlen, die neben *Legionella spp.* auch andere Zelltypen erfassen, zwischen 24.000-210.000 im Warm- bzw. 6.600-140.000 Zellen mL⁻¹ im Kaltwasser.

Zu beachten ist, dass die Gesamtzellzahlen im Warmwasser in diesem Gebäude niedriger als die im Kaltwasser sind. In diesem Gebäude wurde das Warm- wie auch das Kaltwasser zusätzlich je durch eine Ultrafiltrationsanlage gefiltert, die sich in den entsprechenden Zirkulationsleitungen befanden.

Auch die Desinfektion der Trinkwasserinstallation und der Entnahmestellen (gepunktete Striche) zeigte nicht den gewünschten langfristigen Effekt. Vielmehr stieg die Gesamtzellzahl im Warmwasser sogar an. Dies ist ein Indiz, dass der abgebaute Biofilm, d.h. die durch die Desinfektion freigesetzten Nährstoffe, von Mikroorganismen verwertet und für die Vermehrung verwendet wurde. Zudem könnten Abbau- und/oder Zwischenprodukte der chemischen Desinfektionsmoleküle verwertet werden.

In dieser Wohnung wird nur geringfügig Wasser gezapft. Der jährliche Warmwasserverbrauch (φ_{Hot}) liegt bei nur 1.004 L yr⁻¹. Der Kaltwasserverbrauch (φ_{Cold}) beläuft sich auf 10.542 L yr⁻¹.

Im Vergleich dazu lag der Warmwasserverbrauch in einer Wohneinheit im untersuchten Mehrfamilienhaus im Mittel bei 24.010 L yr⁻¹ (φ_{Hot}) (vgl. Genuardi et al., 2023). Die Verbräuche variierten zwischen 2.100 und 43.000 L yr⁻¹. Folglich war der Warmwasserverbrauch in der Wohnung des Altenwohnheims mit 1.004 L yr⁻¹ nur etwa halb so hoch wie der unterste, im MFH bestimmte Wert.

Ein ähnliches Bild ergibt sich in Abb. 4, das die Ergebnisse der Entnahmestellen einer Wohnung im vierten Stockwerk darstellt. Kontamination sind trotz Ultrafiltrationsanlagen sowie Desinfektionsmaßnahmen im Warm- (200-1100 KBE 100 mL⁻¹) und Kaltwasser (200-1400 KBE 100 mL⁻¹) zu finden. Die Wasserverbräuche betragen $\varphi_{\text{Hot}}=10.271$ L yr⁻¹ bzw. $\varphi_{\text{Hot}}=38.830$ L yr⁻¹.

Durch die geringen Verbräuche stagniert Wasser längere Zeit in den Leitungen. In der Folge kühlen Warmwasserrohre ab bzw. werden Kaltwasserrohre erwärmt. Es wird sich ein Temperaturniveau einstellen, das für die Vermehrung mesophiler Mikroben, zu denen auch Legionellen gehören, förderlich ist.

In einem weiteren realen Modellgebäude, der Kindertagesstätte (Kapitel 2.1.1.), wurden Wasserverbräuche als sehr hoch eingestuft. In dem kleinen Gebäude hatten etwa 50 Kinder Zugriff auf eine Entnahmemarmatur. An dieser wurden <2 KBE 100 mL⁻¹ bzw. nur 47.000 Zellen mL⁻¹ bestimmt.

Im Altenwohnheim wurden weitere Beprobungen an anderen Stellen der Trinkwasserinstallation ausgeführt. Diese waren der Ausgang des Speichers, die beiden Ausgänge der Ultrafiltrationsanlagen in den Warm- und Kaltwasserzirkulationsleitungen (UF-C-Warm bzw. UF-C-Kalt) sowie beide Zirkulationsrückläufe. An diesen Stellen wurden keine Legionellen nachgewiesen. Zudem sind die Gesamtzellzahlen gering, was darauf hinweist, dass ein hygienisch sauberes System vorliegt. Die entsprechenden Diagramme sind dem Anhang A6 zu entnehmen. Im Fazit liegt in dem Altenwohnheim ein hygienisch sauberes Trinkwassersystem vor. Lediglich zwei Wohneinheiten zeigen über die Jahre hinweg hohe Legionellen-Konzentrationen im Trinkwasser. Obwohl zwei Ultrafiltrationsanlagen eingebaut sind, sowie chemische Desinfektionen in der Trinkwasser-Installation und an den Entnahmestellen erfolgten, konnten Verkeimungen an den Entnahmestellen nicht verhindert werden. Dies impliziert, dass Verkeimungen in dem Altenwohnheim eher lokal auftreten statt systemisch. Die lokalen Verkeimungen könnten auf die sehr geringen Wasserverbräuche zurückzuführen sein, da lange Stagnationszeiten des Trinkwassers, Mikroorganismen die Möglichkeit geben, sich zu vermehren.

Es kann somit zwischen einer systemischen und einer lokalen Kontamination unterschieden werden (Umweltbundesamt, 2012). Die lokalen Entnahmestellen in dem Altenwohnheim wurden nach verschiedenen Ablaufvolumina überprüft, um die mikrobiologischen Verhältnisse näher zu

beschreiben. Dazu wurde zunächst an Entnahmestellen verschiedener Stockwerke nach 100, 1.000 und 5.000 mL beprobt und anschließend mikrobiologisch getestet.

Abb. 5 zeigt die Ergebnisse aus den Kaltwasserleitungen (03.03.2020), während in Abb. 6 die Ergebnisse aus den Warmwasserleitungen zu sehen sind (09.07.2019).

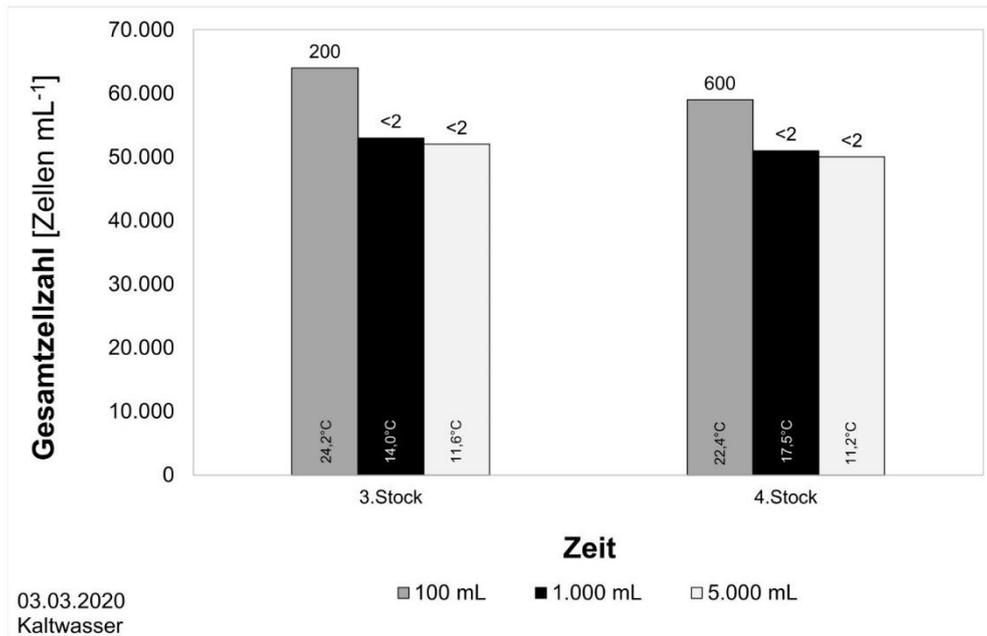


Abb. 5: Kaltwasserhygiene und Ablaufvolumina: GZZ (Zellen mL⁻¹) und Legionellenkonzentration (KBE 100 mL⁻¹). Die Werte auf den Balken stellen die Ergebnisse aus der Legionellen-Kultivierung dar [KBE 100 mL⁻¹].

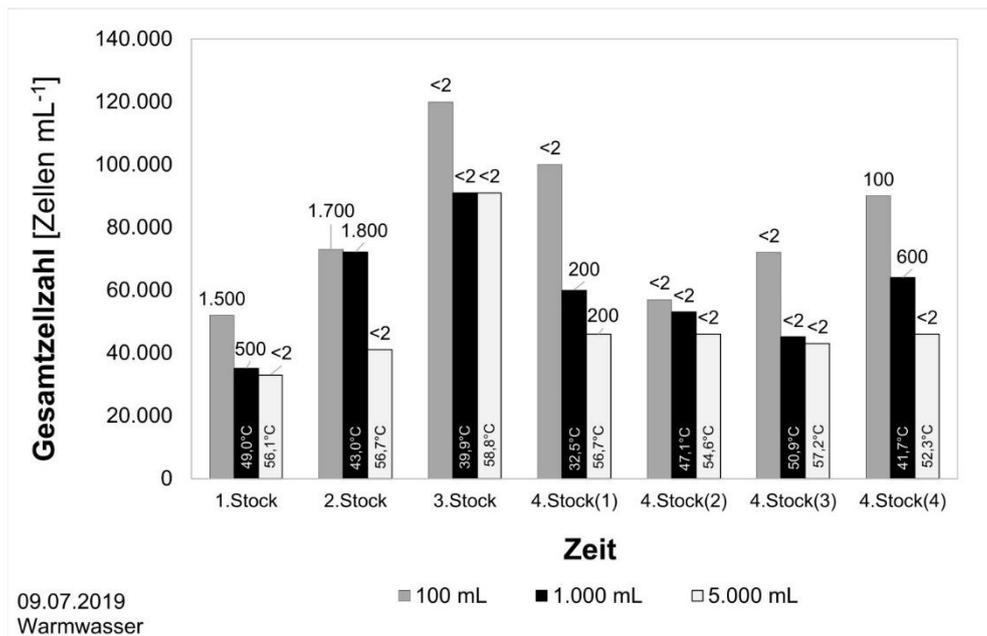


Abb. 6: Warmwasserhygiene und Ablaufvolumina: GZZ (Zellen mL⁻¹) und Legionellenkonzentration (KBE 100 mL⁻¹). Die Werte auf den Balken stellen die Ergebnisse aus der Legionellen-Kultivierung dar [KBE 100 mL⁻¹].

Die Gesamtzellzahl [Zellen mL⁻¹] umfasst alle Zelltypen, während die Werte auf den Säulen die Ergebnisse aus der Legionellen-Kultivierung [KBE 100 mL⁻¹] darstellt. Innerhalb der Säulen sind die entsprechenden Temperaturen dargestellt, die während der Beprobung gemessen wurden.

Wird an den Entnahmestellen im dritten und vierten Stock nur 100 mL Kaltwasser gezapft, liegen die Gesamtzellzahlen am höchsten. Zudem konnten Legionellen in beiden Stockwerken nachgewiesen werden (200-600 KBE 100 mL⁻¹). Werden 1000 oder 5000 mL abgelassen, verringerten sich die Gesamtzellzahlen um 8.000 bzw. 9.000 Zellen mL⁻¹. Legionellen konnten nicht mehr nachgewiesen werden (<2 KBE 100 mL⁻¹).

Zudem ändert sich die Temperatur deutlich. Im dritten Stockwerk liegen Temperaturen um 10,2°C bzw. um 12,6°C unter dem Ausgangswert von 24,2°C. Im vierten Stockwerk verringern sich die Temperaturen um 4,9°C bzw. um 11,2°C. Diese Temperaturveränderungen lassen sich unmittelbar auf längere Stagnationszeiten des Wassers in den Armaturen und den in Fließrichtung davor gelagerten Rohrendleitungen zurückführen.

Für das Warmwasser ergibt sich ein ähnliches Bild. Es wurde im ersten bis zum vierten Stockwerk geprüft, wobei im vierten gleich vier Wohnungen in die Analyse integriert wurden. Die Gesamtzellzahlen nehmen mit zunehmenden Ablaufvolumen ab. Mit Ausnahme von „4.Stock(1)“ trifft dies auch auf die Legionellen-Konzentrationen zu. Die Temperatur nimmt stetig zu, was erneut auf lange Stagnationszeiten des Wassers zurückgeführt werden kann. In „4.Stock(1)“ liegt die Temperatur besonders niedrig (32,5°C). Dieser Bereich liegt im optimalen Wachstumsbereich der Legionellen (RKI, 2019). Weiterhin ist die Gefahr erhöht, dass sich ein stabiler Biofilm bildet. Biofilme bieten Mikroben ein Habitat, da höhere Nährstoffkonzentrationen zu finden sind (Fish et al., 2016).

Um das Trinkwasser im Altenwohnheim umfassend zu beschreiben, wurde an den betroffenen Entnahmestellen das Kalt- und Warmwasser auf ihre wasserchemischen Eigenschaften überprüft. Es wurden keine signifikanten Unterschiede detektiert (Tab. 2).

Die Summe der Kationen und der Anionen sind i.d.R. in einer Wasserprobe gleich, da eine ausgeglichene Ionenbilanz vorhanden ist. In dieser Analyse wurde keine Ionenkonzentration des Hydrogencarbonats (HCO₃⁻) bestimmt, welches einen wesentlichen Anteil der Anionenkonzentration des Wassers ausmacht.

Die Ultrafiltrationsanlage der Warmwasserzirkulation (UF-C-Warm) zeigt leicht verringerte Konzentrationen an. Atomradien liegen bei etwa 186 pm (Na) bis 231 pm (K). Die Poren der Membranfilter haben eine Größe von 20.000 pm (0.02 µm). Aus diesem Grund ist ein Filtereffekt nicht zu erwarten.

Die Wasserhärten an den Entnahmestellen der Wohnungen im dritten und vierten Stock variieren von 71,22-76,83 mg L⁻¹. Die Summe der Kationen ist im dritten Stock (Kaltwasser) leicht verringert. Kationen werden in Biofilmen für den Zusammenhalt der extrapolymere Substanzen verwendet, wodurch der Biofilm stabilisiert wird. Die Summe der Anionen ist im dritten Stock (Warmwasser) verringert. TIC (total inorganic carbon) und TOC (total organic carbon) variieren in allen Proben nur geringfügig (39,4-40,5 bzw. 1,8-2,2 mg L⁻¹).

Tab. 5: Wasserchemische Daten im Altenwohnheim.

	Wasserhärte* [mg L ⁻¹]	Σ(Kationen)** [mmol L ⁻¹]	Σ(Anionen)** [mmol L ⁻¹]	TIC [mg L ⁻¹]	TOC [mg L ⁻¹]
Einspeisung	75,60	5,00	1,64	39,4	2,2
UF-C-Warm (Ausgang)	72,80	4,83	1,52	40,2	1,9
3.Stock (Warmwasser)	76,72	5,09	0,85	40,5	2,2
3.Stock (Kaltwasser)	71,22	4,72	1,47	39,7	2,1
4.Stock (Warmwasser)	77,71	5,15	1,65	40,3	2,0
4.Stock (Kaltwasser)	76,83	5,10	1,57	39,4	1,8

* Die Wasserhärte ergab sich aus der Summe der Konzentrationen von Ca²⁺ und Mg²⁺

** Die Summe der Kationen bzw. Anionen wurden aus den entsprechenden Elementen aus Tab. 1 entnommen.

Abschließend lassen sich für das Altenwohnheim lediglich die geringen Wasserverbräuche als Ursache der Verkeimungen bestimmen. Ausreichend hohe Verbräuche sollten gewährleistet werden. Dies könnte über manuelle Spülpläne oder über automatisierte Spülmaßnahmen realisiert werden.

Eine Lösung könnte sein, Nutzer aktiv für den bestimmungsgemäßen Betrieb in die Verantwortung miteinzubeziehen oder mindestens gezielt zu informieren. Dazu könnte der Ratgeber des Umweltbundesamtes „Trinkwasser aus dem Hahn“ verwendet werden (https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/421/publikationen/uba_trinkwasser_ratgeber_2020-04-07_web_barrierefrei.pdf).

Zu erfüllende Rahmenbedingungen für Technologien außerhalb des Standards

Wie bereits erläutert, sollten neue, energiesparende Ansätze entwickelt werden, die den Konflikt zwischen der Einhaltung der Trinkwasserhygiene und der Effizienz leistungsstarker Wärmepumpen, die mehrere Wohneinheiten oder ganze Quartiere versorgen müssen, lösen.

Schon jetzt gibt es innovative Verfahren, welche sogar einen besseren Einfluss auf die Trinkwasserhygiene haben als konventionelle Verfahren, jedoch nicht den allgemein anerkannten Regeln der Technik entsprechen. DIN 1988-200 (2012) bzw. DVGW W 551 (2004) geben folgenden Wortlaut an: „Grundsätzlich besteht die Möglichkeit, auch mit anderen technischen Maßnahmen und Verfahren die Trinkwasserhygiene sicherzustellen. In diesen Fällen müssen die einwandfreien Verhältnisse durch mikrobiologische Untersuchungen nachgewiesen werden.“ Daraus lässt sich schließen, dass durchaus auf alternative Technologien zurückgegriffen werden kann bzw. muss.

An den allgemein anerkannten Regeln der Technik wird, insbesondere im Baurecht, die Qualität gemessen, die Anlagen im Rahmen einer baulichen Leistung mindestens erfüllen müssen. § 13 Abs. 1 S. 2 VOB/B. Auch wenn diese Vorschrift lediglich die anerkannten Regeln der Technik benennt, sind hierunter die allgemein anerkannten Regeln der Technik zu verstehen³⁰, da es die anerkannten Regeln der Technik nicht gibt³¹.

So sind Anlagen für die Gewinnung, Aufbereitung oder Verteilung von Trinkwasser mindestens nach den allgemein anerkannten Regeln der Technik zu planen, zu bauen und zu betreiben, § 17 Abs. 1 TrinkwV. Für Unternehmer und sonstige Inhaber ist und wird von Interesse sein, ab wann innovative Anlagen den allgemein anerkannten Regeln der Technik zugerechnet werden und unter welchen Rahmenbedingungen diese schon jetzt eingesetzt werden dürfen. Hilfreich ist, die Drei-Stufen-Theorie der Technikstandards zu beachten, welche als Orientierungspunkt dient, da eine Legaldefinition für die allgemein anerkannten Regeln der Technik nicht existiert.

Im Wesentlichen verwendet das deutsche Recht drei Technikstandards:

- Stand von Wissenschaft und Technik
- Stand der Technik
- Allgemein anerkannten Regeln der Technik (a.a.R.d.T.)

Auf der obersten Stufe steht demnach der Stand von Wissenschaft und Technik. Dieser orientiert sich an den neusten technischen und wissenschaftlichen Erkenntnissen. Da eine Begrenztheit auf die

³⁰ Seibel, 2019, VOB/B § 13 Rn. 56.

³¹ Seibel, 2019, VOB/B § 13 Rn. 62.

Praktikabilität nicht besteht, ist diese Stufe sehr dynamisch, führt wiederum im frühen Stadium zum Erreichen des Standes von Wissenschaft und Technik³². Die Bedeutung auf das Baurecht ist allerdings sehr gering.

Auf der mittleren Stufe ist der Stand der Technik, welcher einen bedeutenderen Bezug auf das Baurecht aufweist. Erreicht wird diese Stufe, wenn die Wirksamkeit der technischen und wissenschaftlichen Verfahren in der betrieblichen Praxis zuverlässig nachgewiesen werden können. Für den Nachweis der Wirksamkeit reichen experimentelle Tests aus.³³

Auf der untersten Stufe stehen die allgemein anerkannten Regeln der Technik. Diese sind erfüllt, wenn die theoretischen und praktischen Kriterien erfüllt sind. Die theoretische Bestätigung gilt als gegeben, wenn die Technik in der Wissenschaft anerkannt wird.³⁴ Das praktische Kriterium ist erfüllt, wenn die technische Regel in der Praxis erprobt wurde, sich bewährt hat und der überwiegenden Ansicht der technischen Fachleute entspricht.³⁵ Umgangssprachlich entsprechen die allgemein anerkannten Regeln der Technik dem „Gewohnheitsrecht im technischen Bereich“.³⁶ Dies bedeutet, dass die verbindlichen Regeln nicht verschriftlicht sein müssen. Bei der Suche nach Konkretisierungshilfen sind technische Regelwerke wie die Anweisungen und Publikationen der Fachverbände, Arbeitsgemeinschaften oder des Umweltbundesamtes heranzuziehen. Auch DIN-Vorschriften kommen in Betracht, allerdings können diese durch den ständigen Fortschritt der Technik hinter dem aktuellen Stand der allgemein anerkannten Regeln der Technik zurückbleiben.³⁷ Zudem haben diese lediglich einen Empfehlungscharakter, wobei die Vermutung gilt, dass diese die Regeln wiedergeben.³⁸

Die hohe Hürde zur Erreichung des Standes der allgemein anerkannten Regeln der Technik sind als Schutz des Auftragnehmers sowie der Nutzenden zu verstehen. Insbesondere in sensiblen technischen Bereichen wie dem Trinkwasser soll die Hygiene durch die allgemeine Anerkennung gewährleistet werden. Allerdings ergibt sich daraus die Problematik für innovative technische Ansätze, die aufgrund der konservativen Integration neuer technischer Ansätze Schwierigkeiten haben in die allgemein anerkannten Regeln der Technik integriert zu werden.

Die Wasserhygienekommission des Landes Schleswig-Holstein (2021) erlaubt den Einbau, im Rahmen von Modellprojekten, nach Regeln, die noch nicht den allgemein anerkannten Regeln der

³² Seibel, 2019, VOB/B § 13 Rn. 60.

³³ Merkens, 2022, VOB/B § 4 Rn. 56.

³⁴ Pfeifer, 2022, TrinkwV § 4 Rn. 5.

³⁵ Seibel, 2019, VOB/B § 13 Rn. 54, 55.

³⁶ Pfeifer, 2022, TrinkwV § 4 Rn. 6.

³⁷ Seibel, 2019, VOB/B § 13 Rn. 63-66.

³⁸ Pfeifer, 2022, TrinkwV § 4 Rn. 7.

Technik entsprechen, um so die Möglichkeit der Bewährung und dadurch die resultierende Verbreitung zu unterstützen. Dabei listet die Kommission eine nicht abschließende Liste an Beispielen von alternativen Verfahren, darunter Ultrafiltrationsanlagen zur Temperaturabsenkung im Warmwassersystem der Trinkwasserinstallation, auf³⁹. Die Richtlinien umfassen beispielsweise eine Abstimmung mit dem Gesundheitsamt, den Landesbehörden und der für die Hygiene zuständigen sowie der dafür verantwortlichen Person des betreffenden Gebäudes. Ebenso sind Verbraucher durch den Unternehmer oder sonstigen Inhaber aktiv über das Modellprojekt zu informieren⁴⁰. Erforderlich ist, dass durch die alternativen Verfahren die gleiche oder bessere Wirkung und hygienische Sicherheit erreicht wird als bei Anlagen, die den allgemeinen anerkannten Regeln der Technik entsprechen, um die Anforderungen der TrinkwV zu erfüllen.

Alternative Technologien für die hygienische Sicherheit (z.B. Ultrafiltration)

Auftraggeber (Unternehmer und sonstige Inhaber) können im Einzelfall prüfen, ob sie im Rahmen von Modellprojekten nicht nur die Mindestanforderung nach den a.a.R.d.T. für die Trinkwasserinstallation stellen, sondern alternative Technologien integrieren, die dem Stand der Technik entsprechen.

Der Stand der Technik stehen bereits einige alternative, technische Lösungen zur Verfügung. Beispielsweise werden bereits elektronische Regelventile eingesetzt, um einen hydraulischen Abgleich in Wassersystemen zu gewährleisten und Einsparpotentiale zu heben.

Um die Effizienz leistungsstarker Wärmepumpen zu fördern, ist aus rein energetischer Perspektive eine Reduzierung der Warmwassertemperatur auf 35-45°C wünschenswert. Allerdings folgt das Umweltbundesamt (2011) den a.a.R.d.T. und hält eine Warmwassertemperatur von 60-55°C für Großanlagen entsprechend § 3 Nr. 12 TrinkwV für notwendig. Für alternative Verfahren wird ein wissenschaftlicher Nachweis der hygienischen Unbedenklichkeit gefordert. Inzwischen werden Forschungsprojekte mit dem Ziel durchgeführt, neue technische Ansätze zur hygienisch sicheren Temperaturabsenkung des Warmwassers zu erlauben, welche sich in der Bearbeitung befinden (Umweltbundesamt, 2020).

Auf Basis der Richtlinie der Wasserhygienekommission des Landes Schleswig-Holstein (2021) wurde in dieser Arbeit die Ultrafiltration für ihren hygienischen Einsatz in Trinkwasserinstallationen eines Modellgebäudes überprüft. Bei dem Modellgebäude handelt es sich um ein Mehrfamilienhaus (Kapitel 2.1.1), bei dem der Einfluss der Ultrafiltration auf die Hygiene überprüft wurde. Die Ultrafiltration

³⁹ Wasserhygienekommission, 2021, Einleitung.

⁴⁰ Wasserhygienekommission, 2021, Anforderungen an Modellprojekte.

wurde in die Warmwasserzirkulation eines Mehrfamilienhauses installiert. Gleichzeitig wurde die Warmwassertemperatur um 5°C auf 55-50°C aus Energiespargründen abgesenkt. Filtriertes Warmwasser war an allen gemessenen Stellen frei von Legionellen. Die Gesamtzellzahlen wurden mittels der Durchflusszytometrie bestimmt und wurden maßgeblich durch die Ultrafiltrationsanlage reduziert (-91,15%). Warmwasserverbräuche waren im Vergleich zu denen im Altenwohnheim deutlich höher.

Im Kaltwasser kam es zu Verkeimungen. Kaltwasser wurde weder erhitzt noch gefiltert. Allerdings waren die Temperaturen des Wassers an den Entnahmestellen zu hoch. Da in den Steigsträngen der Trinkwasserinstallation Rohre für Warmwasser (inklusive Warmwasserzirkulation) und Kaltwasser eingebettet waren, war eine Aufwärmung der Kaltwasserrohre durch die Warmwasserrohre wahrscheinlich. Dadurch ergaben sich förderliche Wachstumstemperaturen für Mikroben. In diesem Fall ist von einer Erhöhung der Warmwassertemperatur abzuraten, da somit auch Kaltwasserrohre stärker erwärmt werden, insbesondere bei längeren Stagnationszeiten bzw. Nutzungsunterbrechungen. Eine Alternative könnte sein, eine zweite Ultrafiltrationsanlage zur mikrobiellen Barriere in Kaltwasserleitungen zu installieren. Detailliertere Ergebnisse aus diesem Modellgebäude sind in (Genuardi et al., 2023) zu finden.

Die Ultrafiltrationsanlage könnte demnach eine alternative Methode zur Einhaltung der Trinkwasserhygiene darstellen. Zudem ist eine Temperaturabsenkung um 5°C möglich. Die daraus ergebenden Einsparpotenziale werden in Kapitel 3.5 demonstriert. Allerdings sollte das Gebäude den a.a.R.d.T. entsprechen, d.h. ein durch Temperaturmessungen nachgewiesener hydraulischer Abgleich sollte gegeben sein. Außerdem sollte ein regelmäßiger Wasseraustausch sichergestellt werden.

Die Implementierung einer neuen Technologie in den Markt erfordert gewöhnlich mehrere Jahre bis Jahrzehnte. Die Integration in die a.a.R.d.T. könnte voraussichtlich mindestens den gleichen Zeitraum einnehmen. In Hinblick auf die Klimaziele bis 2030, 2050 und darüber hinaus, sollten diese Zeiträume jedoch möglichst geringgehalten werden, um einen Beitrag zur Energiewende in Deutschland im erwünschten Zeitraum zu ermöglichen. Um diese bessere und schnellere Durchdringung des Marktes zu ermöglichen, könnte bundesweit eine Richtlinie gemäß der schleswig-holsteinischen Richtlinie zu Modellprojekten (Wasserhygienekommission des Landes Schleswig-Holstein (2021)) Anwendung finden.

Validierung der mobilen Durchflusszytometrie

Die Bestimmung der Gesamtzellzahl mittels mobilem Zytometer (Cellstream) durch Probenehmer vor Ort wurde in mehreren Schritten durch Vergleichsuntersuchungen mit der akkreditierten Methode

im Labor der MUAHYG entwickelt. Zum Abschluss wurde ein Kontrollverfahren für im Einsatz befindliche Zytometer und Reagenzien etabliert.

Vergleich zwischen Laborgerät und mobilen Gerät im Labor durch Labormitarbeiter (Phase 1):

Von November 2020 bis März 2021 wurden Routineproben des Wasserlabors der MUAHYG von ausgebildetem Laborpersonal parallel mit der Labormethode und dem mobilen Zytometer untersucht.

Die Auswertung der Vergleichsmessungen erfolgte unter anderem durch die Bestimmung der Abweichungen der Gesamtzellzahlen nachfolgender Gleichung:

$$Abw. = \frac{GZZ(Labor) - GZZ(Cellstream)}{(GZZ(Labor) + GZZ(Cellstream))/2} \times 100\%$$

Es wurden nur Abweichungen aus Wertepaare ermittelt, die für beide Messverfahren eine Quantifizierung oberhalb der Bestimmungsgrenze von 1500 GZZ/ml ergaben. Negative Abweichungen (%) zeigen, dass der Cellstream (Fa. rqmicro) höhere GZZ-Werte als die Labormethode ergab, positive Abweichungen, niedrigere GZZ-Werte. Aus diesen Abweichungen wurden dann statistische Kennwerte wie in Tab. 6 dargestellt ermittelt.

Tab. 6: Auswertung der Abweichungen der Gesamtzellzahl der beiden Methoden (%) in Phase 1.

Anzahl (n)	Mittelwert	Median	Min	Max
74	4,0	3,7	-45	68

In Phase 1 wurden GZZ-Werte zwischen $<1500 \text{ ml}^{-1}$ und 600.000 mL^{-1} ermittelt. Die berechneten Abweichungen zeigten in 74% der auswertbaren Proben eine Abweichung von $<20\%$. Aus den folgenden beiden Abb. 7 und Abb. 8 ist keine Tendenz zu systematisch höheren Werten für eines der beiden Verfahren erkennbar.

20% Abweichung zweier Einzelmessungen wird als strenges Kriterium für den Vergleich unterschiedlicher Zytometer bei gleichen Vorbereitungsschritten von der MUAHYG in der Qualitätskontrolle des akkreditierten Verfahrens angewandt. Da im untersuchten Fall unterschiedliche Reagenzien verwendet werden, sind auch höhere Abweichungen als akzeptabel anzusehen, so dass die in Phase 1 ermittelten GZZ-Werte vergleichbar waren.

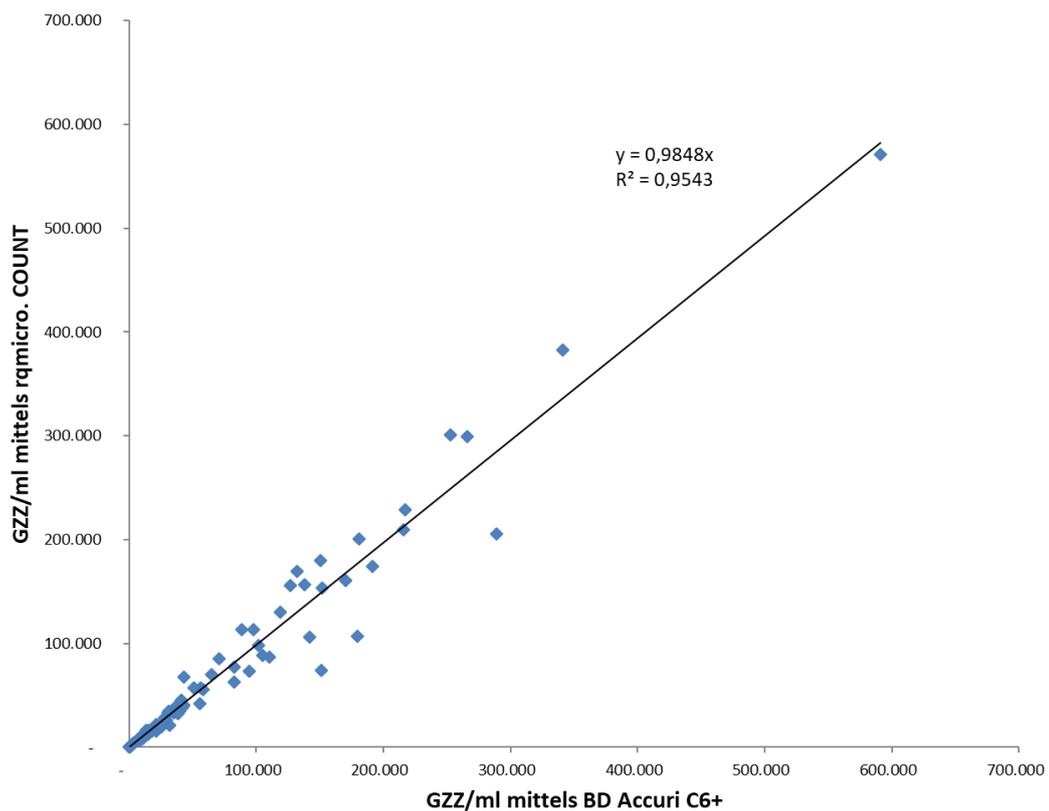


Abb. 7: Vergleich der Gesamtzellzahlen der beiden Methoden in Phase 1.

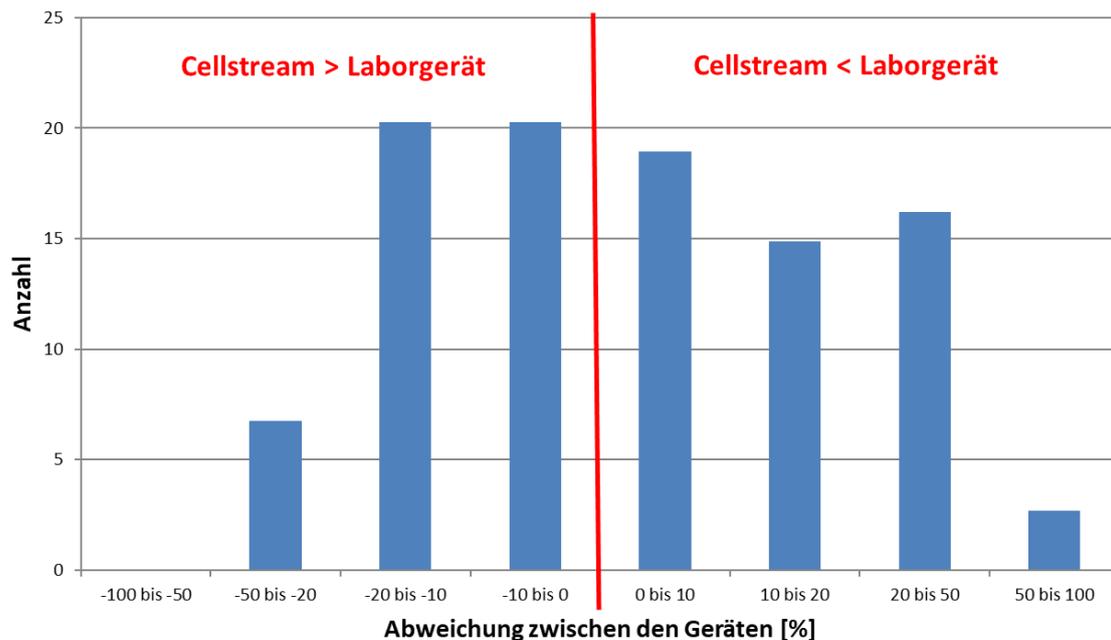


Abb. 8: Häufigkeitsverteilung der Abweichungen der GZZ zwischen den beiden Methoden in Phase 1.

Einweisung Probenehmer in Funktion des mobilen Zytometers und Untersuchungsverfahren (Phase 2): Am 02.06.2021 wurde ein Probenehmer vom ausgebildeten Laborpersonal in die Methode des mobilen Zytometers mittels 16 Proben eingewiesen und vom Probenehmer erste selbstständige Messungen unter Anleitung des Laborpersonals durchgeführt. Nach Übergabe des mobilen Gerätes führte der Probenehmer im eigenen Ingenieurbüro-Raum Doppelbestimmungen durch. Tab. 4 zeigt bei einer mittleren Abweichung von 12% zwischen den Parallelmessungen akzeptable Ergebnisse.

Tab. 7: Wiederholungsmessungen am mobilen Durchflusszytometer durch externen Probenehmer.

Probe	Messung 1 GZZ mL ⁻¹	Messung 2 GZZ mL ⁻¹	Abw. (%)
1	<1.500	<1.500	Nicht bestimmbar
2	<1.500	<1.500	Nicht bestimmbar
3	265.368	211.285	23
4	17.784	19.467	-9
5	20.798	13.734	41
6	120.811	91.117	28
7	18.878	19.956	-6
8	20.674	21.983	-6
Mittelwert			12

Vergleich zwischen Labormessung und mobiler Anwendung des Zytometers (Phase 3): Am 07.06.2021, 29.09.2021., 25.01.2022, 26.01.2022 und 23.02.2022 wurden Routineproben des Wasserlabors der MUAHYG mittels akkreditierter Labormethode im Vergleich zu Messungen des geschulten Probenehmers im Büroraum nahe der Probenahmestellen gemessen. Dabei stand das mobile Durchflusszytometer dauerhaft am gleichen Platz in einem Büro. Die Messungen mit dem

mobilen Gerät erfolgten nach Lagerung während der Transportzeit zeitgleich mit den Labormessungen.

Tab. 8: Auswertung der Abweichungen der Gesamtzellzahl der beiden Methoden (%) in Phase 3.

Anzahl (n)	Mittelwert	Median	Min	Max
23	8,9	5,3	-46	56

In Phase 3 wurden GZZ-Werte zwischen $<1500 \text{ mL}^{-1}$ und 240.000 mL^{-1} ermittelt. Die berechneten Abweichungen zeigten in 82% der auswertbaren Proben eine Abweichung von $<20\%$.

Aus den folgenden beiden Abb. 9 und Abb. 10 ist keine Tendenz zu systematisch höheren Werten für eines der beiden Verfahren erkennbar.

Die in Phase 3 ermittelten Abweichungen zwischen den beiden Methoden sind als akzeptabel zu bewerten, so dass die mobile Zytometrie in einem Büroraum durch einen vom Laborpersonal geschulten Probenehmer vergleichbare Werte liefert.

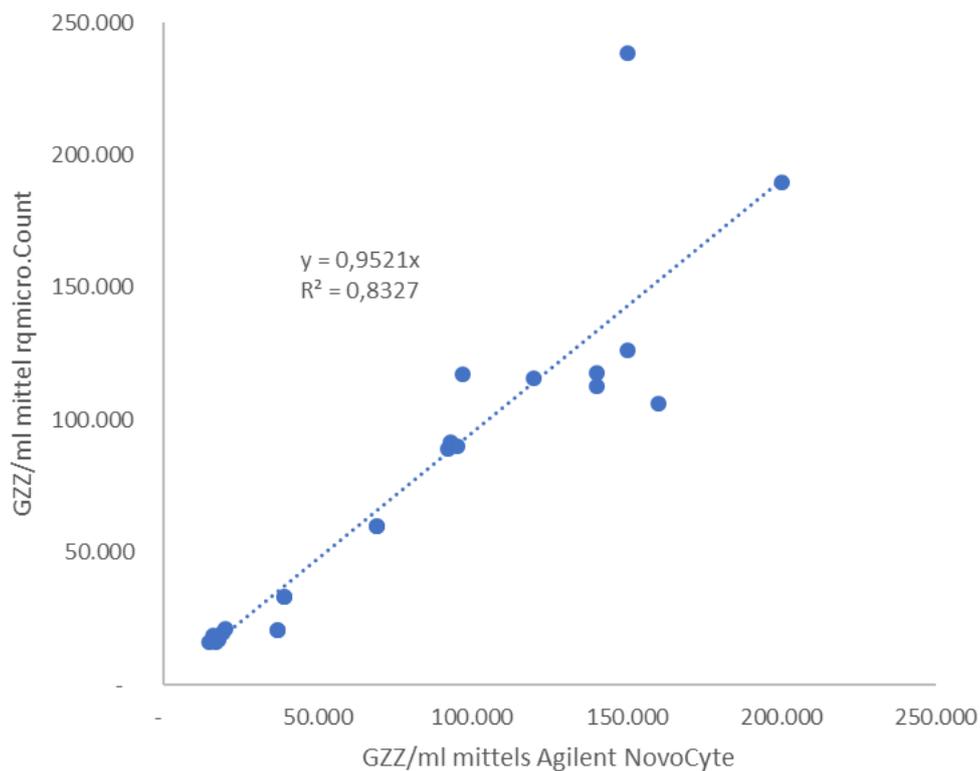


Abb. 9: Vergleich der Gesamtzellzahlen der beiden Methoden in Phase 3.

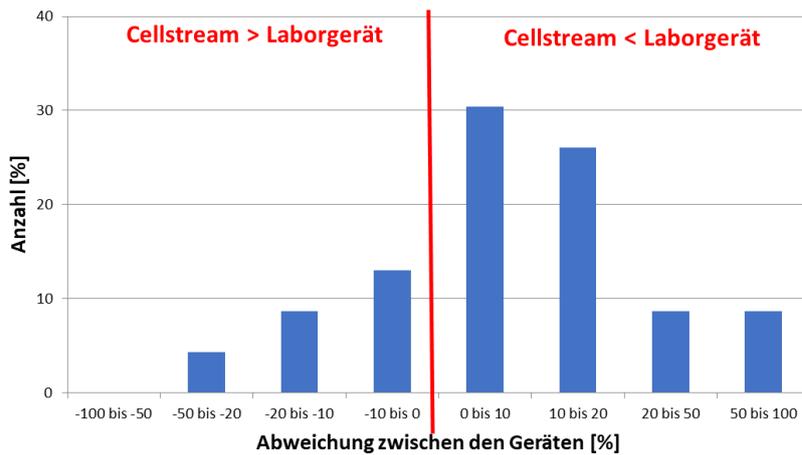


Abb. 10: Häufigkeitsverteilungen der Abweichungen der GZZ zwischen den beiden Methoden in Phase 3.

Vergleich zwischen Labormessung und Messung durch einen zweiten Probenehmer im Labor (Phase 4): In Eigenregie wurde vom Ingenieurbüro ein zweiter Probenehmer in die Methode der mobilen Zytometrie eingewiesen. Am 08.08.2022 und 19.09.2022 erfolgten Vergleichsmessungen von Routineproben aus dem Wasserlabor der MUAHYG zwischen akkreditierter Labormethode und Messung durch den in Eigenregie eingewiesenen Probenehmer. Dabei stand das mobile Durchflusszytometer nach Rücktransport im Labor. Die Messungen mit mobilem Gerät durch den zweiten Probenehmer erfolgten zeitgleich mit den Labormessungen. Gegenüber den Phasen 1 bis 3 wurden vom Hersteller rqmicro die Reagenzien an eine einfachere Handhabung im Feld angepasst. Die Reagenzien mussten in Phase 1 bis 3 noch in eigene Röhrchen zur Wasserprobe hinzu pipettiert werden. Ab Phase 4 war das Reagenz in konservierter Form bereits in der anzuwendenden Menge in den Röhrchen vorgelegt.

Tab. 9: Auswertung der Abweichungen der Gesamtzellzahl der beiden Methoden (%) in Phase 4.

Anzahl (n)	Mittelwert	Median	Min	Max
46	-9,2	-20	-82	45

In Phase 4 wurden GZZ-Werte zwischen $<1500 \text{ mL}^{-1}$ und 196.000 mL^{-1} ermittelt. Die berechneten Abweichungen zeigten in nur 20% der auswertbaren Proben eine Abweichung von $<20\%$. Aus den folgenden beiden Abb. 11 und Abb. 12 ist keine Tendenz zu systematisch höheren Werten für eines der beiden Verfahren erkennbar.

Die in Phase 4 ermittelten Abweichungen zwischen den beiden Methoden zeigten höhere Abweichungen als in Phase 3, was durch die in Eigenregie erfolgte Einweisung eines zweiten Probenehmers bedingt sein könnte. Weiterhin könnte der Wechsel zu anders vorgelegenen

Reagenzien ein Grund für die höheren Abweichungen gegenüber Phase 3. Da keines der beiden Verfahren systematisch höhere Werte ergab, sind die Abweichungen letztendlich nicht eindeutig erklärbar. Die Schulung von neuen Probenehmern und Anwendern der mobilen Zytometrie sollte zukünftig durch ausgebildetes und erfahrenes Laborpersonal erfolgen, da sonst wichtige Informationen und Vorgehensweisen möglicherweise nicht weitergegeben werden.

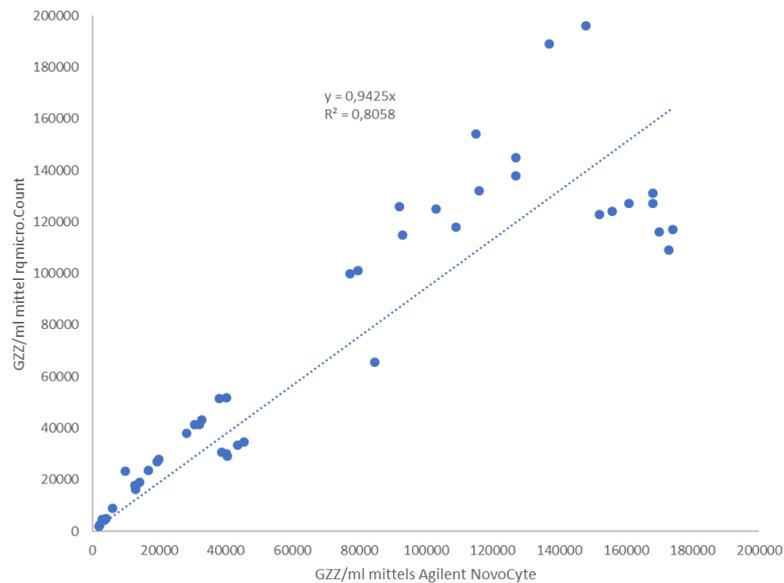


Abb. 11: Vergleich der Gesamtzellzahlen der beiden Methoden in Phase 4.

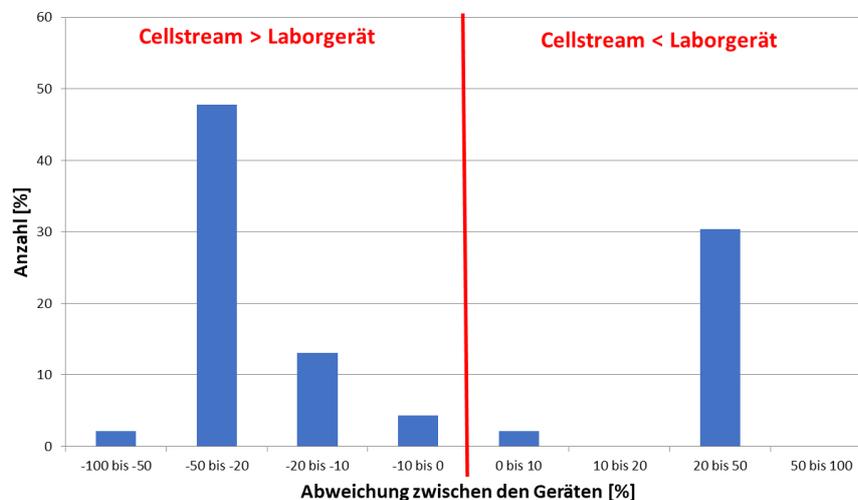


Abb. 12: Häufigkeitsverteilung der Abweichungen der GZZ zwischen den beiden Methoden in Phase 4.

Vergleich zwischen Labormessung und Messung durch einen dritten Probenehmer im Labor (Phase 5): In Eigenregie wurde vom Ingenieurbüro ein dritter Probenehmer in die Methode der mobilen Zytometrie eingewiesen. Am 08.11.2022 erfolgten Vergleichsmessungen von Routineproben aus dem Wasserlabor der MUAHYG zwischen akkreditierter Labormethode und Messung durch den in Eigenregie eingewiesenen Probenehmer. Dabei stand das mobile Durchflusszytometer nach

Abtransport und erneutem Rücktransport im Labor. Die Messungen mit mobilem Gerät durch den dritten Probenehmer erfolgten zeitgleich mit den Labormessungen.

Tab: 10: Auswertung der Abweichungen der Gesamtzellzahl der beiden Methoden (%) in Phase 5.

Anzahl (n)	Mittelwert	Median	Min	Max
19	-6,6	-18	-31	44

In Phase 5 wurden GZZ-Werte zwischen $<1500 \text{ mL}^{-1}$ und 178.000 mL^{-1} ermittelt. Die berechneten Abweichungen zeigten in nur 31% der Proben eine Abweichung von $<20\%$. Aus den folgenden beiden Abb. 13 und Abb. 14 ist keine Tendenz zu systematisch höheren Werten für eines der beiden Verfahren erkennbar. Die in Phase 5 beim dritten Probenehmer ermittelten Abweichungen zwischen den beiden Methoden zeigten vergleichbare Abweichungen wie in Phase 4 beim zweiten Probenehmer. Da keines der beiden Verfahren systematisch höhere Werte ergab, sind die Abweichungen jedoch letztendlich nicht eindeutig erklärbar. Wie in Phase 4 könnten die geänderten Reagenzien oder eine unvollständige Schulung Gründe für die höheren Abweichungen sein.

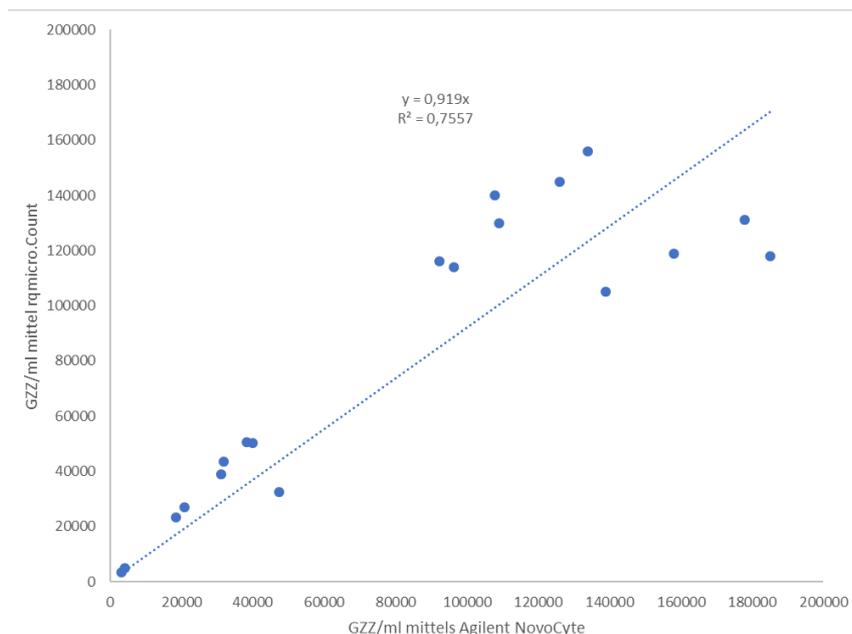


Abb. 13: Vergleich der Gesamtzellzahlen der beiden Methoden in Phase 5.

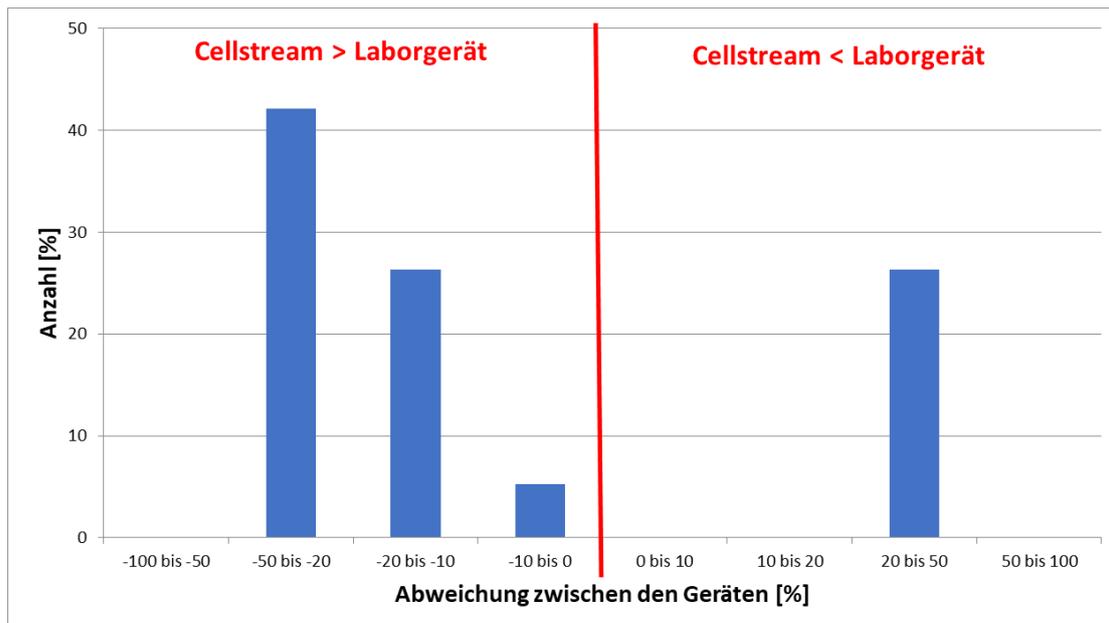


Abb. 14: Häufigkeitsverteilung der Abweichungen der GZZ zwischen den beiden Methoden in Phase 5.

Vergleich zwischen Labormessung und Messung mit mobilem Gerät durch verschiedene Probenehmer: Im Folgenden werden alle im Verlauf der Projektlaufzeit durchgeführten Vergleichsmessungen der drei Probenehmer ausgewertet.

Tab. 11: Auswertung der Abweichung der Gesamtzellzahl der beiden Methoden (%) aller Messungen.

Anzahl (n)	Mittelwert	Median	Min	Max
88	-3,9	-13	-82	56

In den Phasen 2 bis 5 wurden GZZ-Werte zwischen $<1500 \text{ mL}^{-1}$ und 240.000 mL^{-1} ermittelt. Die berechneten Abweichungen zeigten in 24% der Proben eine Abweichung von $>30\%$ und 63% von $>20\%$ (Abb. 15). In Phase 1 zeigten bei ausschließlichen Messungen durch ausgebildetes Laborpersonal lediglich 26% der Proben eine Abweichung von $>20\%$ und damit eine deutlich bessere Übereinstimmung.

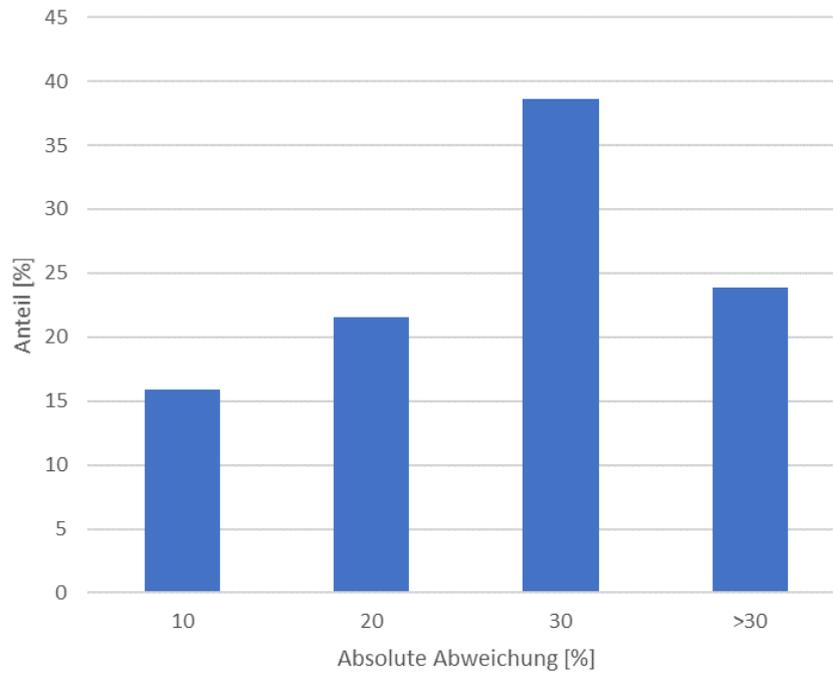


Abb. 15: Prozentuale Häufigkeitsverteilung der absoluten Abweichungen der GZ in den beiden Methoden in Phasen 2 bis 5, d. h. Anwendung der mobilen Zytometrie durch Probenehmer.

Aus den folgenden beiden Abb. 16 und Abb. 17 ist keine Tendenz zu systematisch höheren Werten für eines der beiden Verfahren erkennbar.

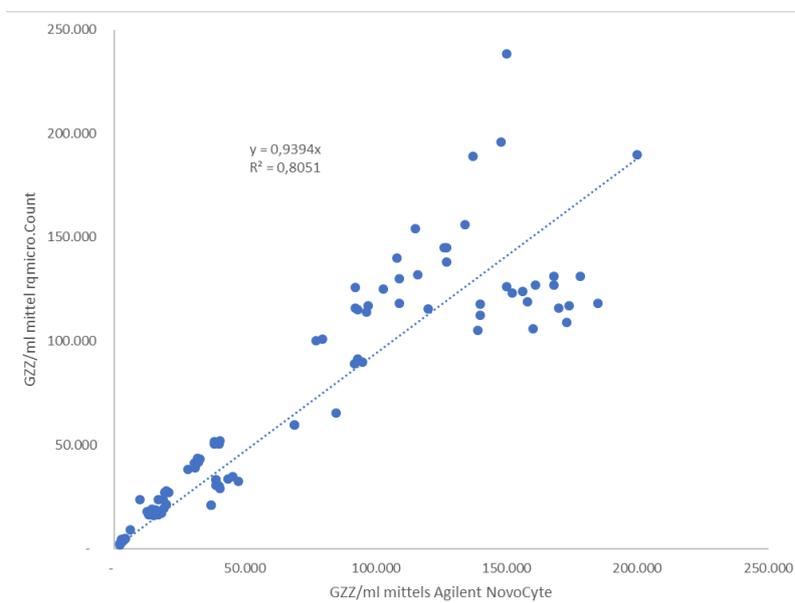


Abb. 16: Vergleich der Gesamtzellzahlen der beiden Methoden aller Messungen.

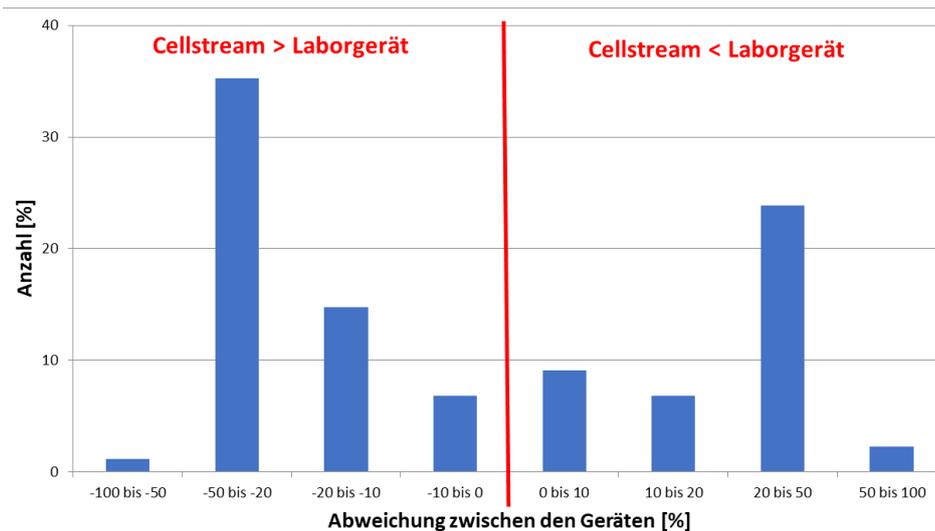


Abb. 17: Häufigkeitsverteilung der Abweichungen der GZZ zwischen den beiden Methoden aller Messungen.

Zusammenfassend zeigen die Vergleiche zwischen der akkreditierten Labormethode zur Bestimmung der Gesamtzellzahl und der mobilen Zytometrie am Cellstream relativ hohe Abweichungen in ¼ der Fälle von über 30% bei Anwendung vor-Ort durch Probenehmer. Daher wird vorgeschlagen, dass sämtliche Probenehmer bzw. Anwender der mobilen Zytometrie von ausgebildetem Personal der ZE Medizinaluntersuchungsamt und Hygiene, Kiel oder dem Hersteller rqmicro eingewiesen werden.

Bewertung der mobilen Zytometrie und Entwicklung einer Qualitätskontrolle

Ausgehend von der Schulung durch ausgebildetes Laborpersonal mit Erfahrung in der mobilen Zytometrie kann das Cellstream der Fa. rqmicro in Büroräumen nahe von Probenahmestellen eingesetzt werden und erzielt vergleichbare Gesamtzellzahlen mit der akkreditierten Labormethode. Denkbar ist ebenfalls der Einsatz in einem mobilen Laborfahrzeug. Für die Durchführung der Messungen sind Raumtemperatur, d.h. etwa 20°C notwendig, so dass eine Durchführung in z. B. ungeheizten Keller- und anderen Räumen und Fahrzeugen, aber auch überheizten Heizungs- und Technikräumen nicht möglich ist. Ein häufiger Wechsel zwischen z.B. Keller- bzw. Technikräumen in Gebäuden kann auf Grund der wenig praxisnahen Transportmöglichkeit des Zytometers nicht empfohlen werden. Dazu ist das Gerät zu schwer, sperrig, anfällig und ungeschützt. Außerdem muss Laborausrüstung, wie Probengefäße und Pipette, mitgeführt werden.

Nach Beendigung der Versuchsphasen 1 bis 5 wurde in diesem Forschungsprojekt nach knapp zwei Jahren vor-Ort-Einsatz die mobile Zytometrie durch ausgebildetes Laborpersonal überprüft. Tab. 9 zeigt die vom Laborpersonal gemessene GZZ-Werte sowohl für die akkreditierte Labormethode als auch die mobile Zytometrie im Vergleich.

Tab. 12: Auswertung der Gesamtzellzahl (GZZ/ml) der beiden Methoden als regelmäßige Qualitätskontrolle.

Probe	Labormethode	Mobile DFZ	Differenz	Abw. (%)
Wasser dest 0,1 µm filtriert	< 1.500	< 1.500	Nicht bestimmbar	
QC-Kontrolle, Raum 109 KW	127.000	103.000	24.000	21
Bekannte Probe, Kurssaal KW	436.000	422.000	14.000	3,3
UF Reinwasser	< 1.500	< 1.500	Nicht bestimmbar	
TW Gebäude A Zirkulation	16.300	18.289	-1.989	-12
TW Gebäude B Zirkulation	30.100	25.450	4.650	17
TW Gebäude C Bad WT KW	179.000	138.000	41.000	26
TW Gebäude C Küche Spüle KW	142.000	136.000	6.000	4,3
			Mittelwert	9,9

Das mobile Zytometer fand niedrige Konzentrationen unterhalb der Quantifizierungsgrenze korrekt und zeigte daher keine Kontamination mit Bakterien. Die mit beiden Methoden ermittelten Gesamtzellzahlen waren vergleichbar und ergaben im Mittel eine Abweichung von 9,9 %. Diese Abweichungen liegen besser oder im gleichen Bereich wie diejenigen in Phase 1 bzw. einer erfolgreichen Qualitätskontrolle im akkreditierten Bereich der ZE Medizinaluntersuchungsamt und Hygiene. Die Zytometrieplots zeigten keine wesentlichen Abweichungen voneinander. Damit ergab das mobile Zytometer nach knapp zwei Jahren Nutzungszeit vor Ort vergleichbare Werte wie die akkreditierte Labormethode, wenn der Vergleich im Labor durch ausgebildetes Fachpersonal durchgeführt wurde.

Die Bedienung des Zytometers selbst und der Software ist nach einer Einweisung einfach und selbsterklärend. Jedoch zeigen die Vergleichsuntersuchungen mit der akkreditierten Labormethode, dass relativ hohe Abweichungen zwischen den beiden Verfahren auftreten, die in 63 % der Fälle über 20 % lagen. Die Ursachen für diese Unterschiede konnten mit den durchgeführten Untersuchungen nicht eindeutig geklärt werden. Bei einer relativ geringen Probenanzahl könnte ein Wechsel zu vorgelegten, konservierten Reagenzien in den Reaktionsröhrchen oder eine unzureichende Schulung der Anwender durch Nicht-Fachkräfte ursächlich sein. Eine eventuelle Instabilität der vorgelegten Reagenzien durch Temperaturunterschiede und Lagerungsbedingungen oder noch nicht erkannte Einflüsse könnten ebenfalls zu den Unterschieden beitragen.

Wird ein mobiler Zytometer über längere Zeit von einem Probenehmer eingesetzt, ist in regelmäßigen Abständen eine Qualitätskontrolle von Reagenzien, Ausrüstung und Zytometer durch Vergleichsmessungen mit einer akkreditierten Labormethode durchzuführen. Die Messungen umfassen eine zeitgleiche Messung am Laborstandort durch den Anwender der mobilen Zytometrie im Vergleich zur akkreditierten Methode durch Laborpersonal. Für die Festlegung eines fachgerechten Abstands dieser Qualitätskontrolle wurden in diesem Forschungsprojekt noch zu wenige dieser

Kontrollen durchgeführt, so dass es an entsprechender Erfahrung fehlt. Es wird vorgeschlagen mindestens folgende Trinkwasserproben vergleichend zu untersuchen:

1. Blindwertprobe mit einer Gesamtzellzahl von $<1.500 \text{ GZZ mL}^{-1}$
2. Trinkwasserprobe mit sehr niedriger Gesamtzellzahl, z. B. Reinwasser einer Ultrafiltrationsanlage
3. QC – Vergleichsprobe des Labors im akkreditierten System mittlerer Gesamtzellzahl, welche wöchentlich im Labor gemessen wird.
4. Trinkwasserprobe bekannter Zusammensetzung aus dem Labor, möglichst mit hoher Gesamtzellzahl und Partikelbelastung
5. Mindestens vier weitere Trinkwasserproben beliebiger Herkunft aus verschiedenen Wasserversorgungsanlagen, möglichst unterschiedlich hoher Gesamtzellzahlen

Für die Beurteilung der mobilen Zytometrie werden folgende Kriterien herangezogen:

Die Blindwertprobe muss $<1.500 \text{ GZZ mL}^{-1}$ erreichen um eine Kontamination der mobilen Zytometrie auszuschließen. Die ermittelten Abweichungen der beiden Messungen dürfen 30% nicht überschreiten, sollten idealerweise 20% unterschreiten. Die Plots der mobilen Zytometrie werden vom Laborpersonal auf ihre Plausibilität und Vergleichbarkeit mit den Plots der akkreditierten Methode verglichen.

Systemdynamische Modellierung

Mithilfe des iModelers der CONSIDEO GmbH wurde ein Einflussmodell erstellt. Zugrunde gelegt wurde eine gesamtsystemische Perspektive. Folglich sind technische, hygienische, rechtliche sowie finanzielle Faktoren im Modell enthalten.

Das Modell ist dynamisch. Die Beziehungen zwischen den Einflussfaktoren wurden als proportional / antiproportional definiert sowie gewichtet (sehr schwach: 1-10%; schwach: 15%; mittelstark: 20-30%; stark: 50%; sehr stark: 75%). Differenziert wurde außerdem zwischen einer kurz-, mittel- bzw. langfristigen Wirkung.

Unter dem Gesamtziel wurde definiert: „Sanierung des Gebäudebestands inkl. Warmwasserbereitung mittels Wärmepumpe im monovalenten Betrieb unter Ausschluss von gesundheitlichen Risiken durch pathogene Bakterien“.

Zur Anschaulichkeit sind in Anhang A5 einige Ausschnitte des Modells beigefügt.

Weitere Ziele sind im Modell farblich (gelb) markiert: z.B. Anteil erneuerbare Energie am Stromnetz (steigern), Nutzung regenerativer Wärmequellen, Effizienz (von) Wärmepumpen, Netzdienlichkeit (lokaler Stromnetze), Einhaltung der technischen Regeln.

Problematische Faktoren wurden in Rot kenntlich gemacht: z.B. CO₂ aus Gasverbrauch, Wärmeverluste, Verkeimung auch von Kaltwasser, Biofilme, Amöben.

Erforderliche Maßnahmen wurden grün markiert: Isolierung, Steuerung (von) Wärmepumpen, Smart-Meter-Rollout, Weiterentwicklung der technischen Regeln.

Aus dem Modell wurden sogenannte Tornadodarstellungen extrahiert, die sich auf das definierte Gesamtziel beziehen (Abb. 19-20). Die Tornadodarstellungen zeigen auf, welche Faktoren am stärksten im Modell gewichtet, um das Gesamtziel negativ (links, rot) bzw. positiv (rechts, grün) zu beeinflussen. Es wird zwischen kurzfristigen (Abb. 17), mittelfristigen (Abb. 18) und langfristigen (Abb. 19) unterschieden.

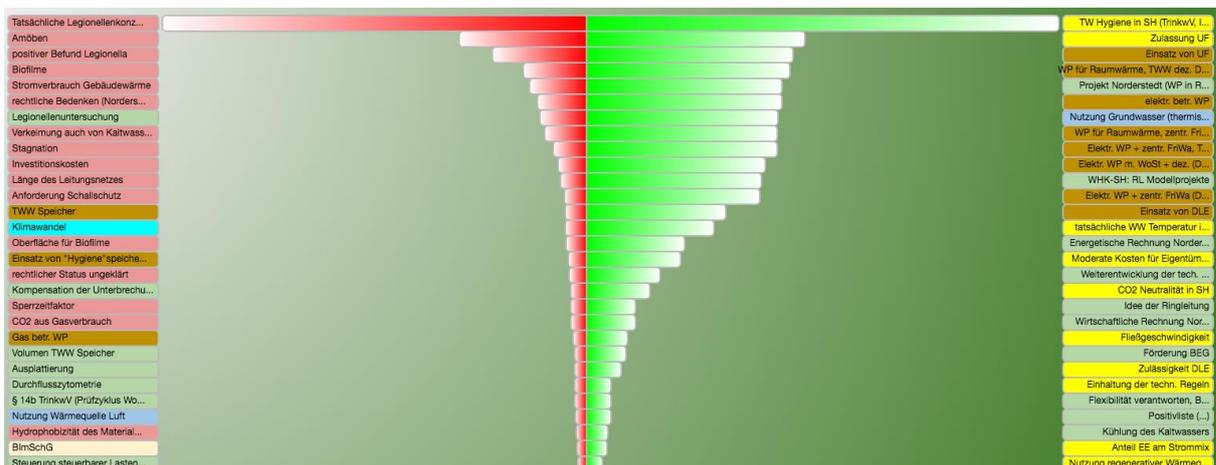


Abb. 18: Tornadodarstellung des Gesamtziels: Kurzfristig.

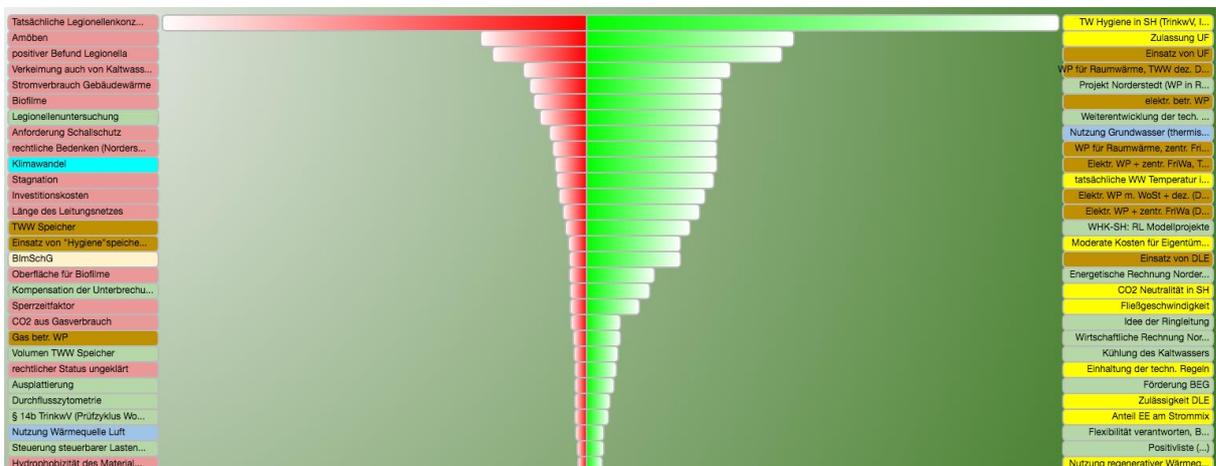


Abb. 19: Tornadodarstellung des Gesamtziels: Mittelfristig.

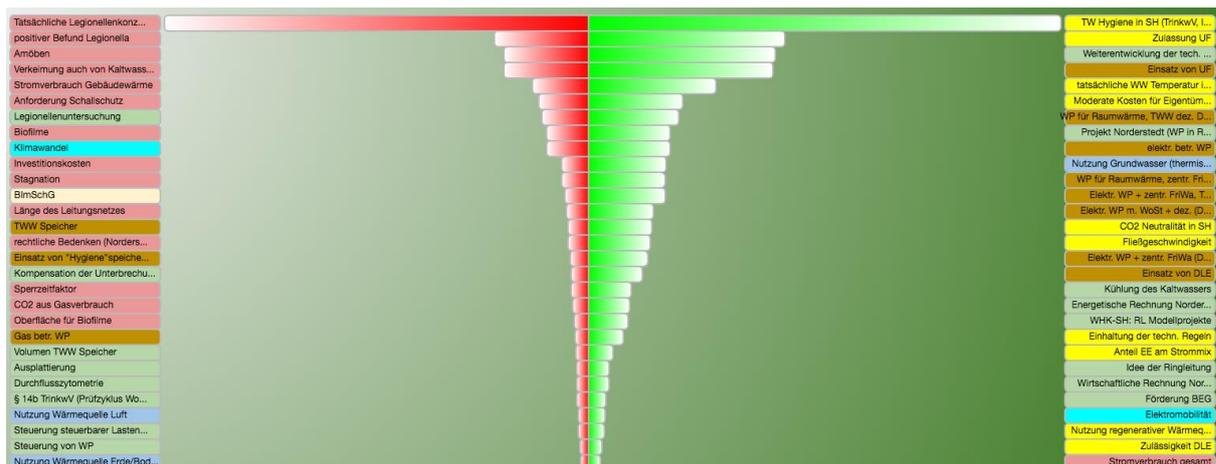


Abb. 20: Tornadodarstellung des Gesamtziels: Langfristig.

Stark gewichtende negative Effekte sind in allen drei Zeitfenstern „tatsächliche Legionellenkonzentration“, „Amöben“, „Biofilme“ und „Verkeimungen im Kaltwasser“. Legionellen weisen einen sogenannten „viable but not culturable“-Status auf, in dem sie zwar vorhanden, aber nicht kultivierbar sind. Auch können Legionellen intrazellulär in Amöben anwachsen. Diese Zellen werden in Detektionsmethoden gewöhnlich nicht miterfasst.

Weitere **negative** Effekte auf das Gesamtziel sind: „Investitionskosten“, „Stromverbräuche“, „Anforderungen am Schallschutz“.

Stark gewichtende **positive** Effekte auf das Gesamtziel haben: „Wärmepumpeneinbau in verschiedenen Anlagentypen“ (braun dargestellt) und „Einsatz bzw. Zulassung von Ultrafiltration“. Auffällig ist, dass die „Weiterentwicklung der technischen Regeln“ zwar ein stark gewichtender Faktor im langfristigen Zeitraum ist, jedoch kurzfristig nur einen geringen Effekt hat. Das könnte daran liegen, dass die Etablierung neuer Technologie meist mehrere Jahre bis Jahrzehnte dauern kann. Kurzfristig gewichtet die Richtlinienempfehlung der Wasserhygienekommission des Landes Schleswig-Holstein, die in diesem Kapitel bereits beschrieben wurde, da sie bereits jetzt den Einbau neuer Technologien im Rahmen von Modellprojekten erlaubt.

Der Einsatz bzw. die Zulassung der Ultrafiltration stellt gemäß dem Modell ein stark gewichtender Faktor dar, der für das Erreichen des Gesamtziels förderlich ist. Im Folgenden sind die entsprechenden Tornadodarstellungen des Faktors kurzfristig (Abb. 21) sowie langfristig aufgezeigt (Abb. 22).

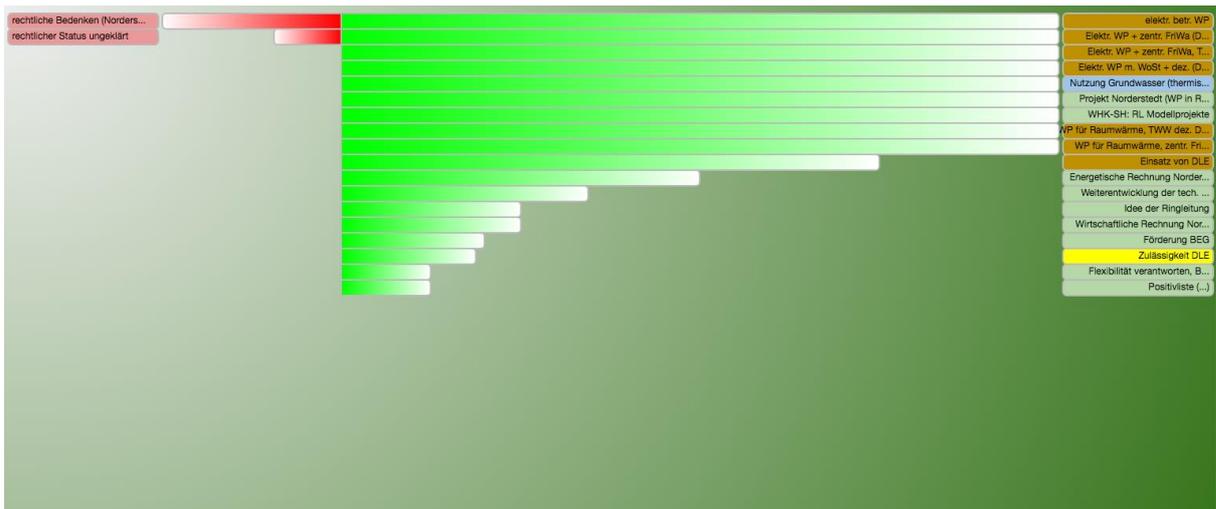


Abb. 21: Tornadodarstellung des Faktors „Zulassung Ultrafiltration“: Kurzfristig.

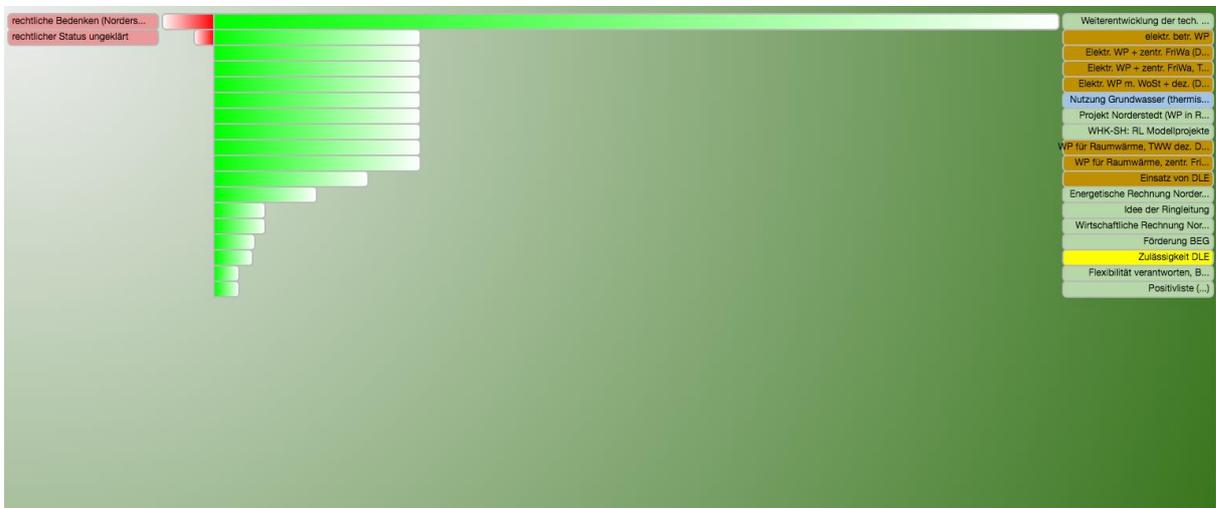


Abb. 22: Tornadodarstellung des Faktors „Zulassung Ultrafiltration“: Langfristig.

Hauptsächlich ist der Aspekt hinderlich, den die an der Modellerstellung Beteiligten unter „rechtliche Bedenken“ verstehen, da die Ultrafiltration noch nicht den a.a.R.d.T. angehört. Damit dieses Kriterium erfüllt ist, muss gegeben sein (siehe: Abschnitt „Zu erfüllende Rahmenbedingungen für Technologien außerhalb des Standards“), dass die technische Regel in der Praxis erprobt wurde, sich bewährt hat und der überwiegenden Ansicht der technischen Fachleute entspricht. Die UF wurde in der Praxis erprobt (Kropp et al., 2020). Der überwiegenden Ansicht der technischen Fachleute entspricht sie allerdings nicht, da es auch Fälle wie das beschriebene Altenwohnheim gibt, in dem Legionellen in einzelnen Wohnungen trotz UF-Anlagen vorgefunden wurden. Es stellt sich insoweit die Aufgabe, diesen Befund einzuordnen (Zusammenhang des Legionellenvorkommens mit der geringen Wasserabnahme).

Kurzfristig gewichtet sind erneut die Richtlinien der Wasserhygienekommission des Landes Schleswig-Holstein. Langfristig verlieren sie jedoch an Gewicht. Demgegenüber gewinnt die Weiterentwicklung technischer Regeln an Einfluss.

3.5 Einsparpotentiale neuer Technologien

Wird die Warmwassertemperatur z.B. nach Einbau einer Ultrafiltrationsanlage abgesenkt, ergibt sich ein Einsparpotential bezüglich des Energiebedarfs von Gebäuden. Wie das Projekt EE+HYG@TWI der TU Dresden (Karin Rühling, 2018) bestätigt hat, ist „eine risikolose Absenkung von Trinkwarmwasser-Temperaturen unter die Schwellentemperaturen von $\vartheta(TWE,aus)/\vartheta(Zirk,min) = 55\text{ °C}/50\text{ °C}$ aus trinkwasser-hygienischer Sicht weder in Neubau- noch in Bestandsinstallationen [zu empfehlen]“, sofern keine weiteren Maßnahmen zur Kontrolle der hygienischen Risiken ergriffen werden.

In dieser Arbeit wurde bereits ein MFH vorgestellt, in dem die Warmwassertemperatur um 5°C abgesenkt wurde. Die Daten aus diesem Modellgebäude sind Teil der Veröffentlichung (Genuardi et al., 2023) (A6 [2]). Dort findet sich auch eine Kalkulation des Einsparpotentials, die auf einem statischen Modell beruht (Kapitel 3.2.3).

Für dieses Gebäude wurde eine Ersparnis von 7.355 kWh yr⁻¹ kalkuliert. Mit einem Emissionsfaktor von 240 g CO₂e kWh⁻¹, wenn Gas als Wärmequelle genutzt wird (GEG, 2020), ist die Ersparnis äquivalent zu 1,77 t CO₂e yr⁻¹ in diesem Gebäude. Die Ersparnis kann größtenteils auf Wärmeverluste in den Rohrleitungen zurückgeführt werden, die bei niedrigeren Temperaturen um rund 5.005,8 kWh yr⁻¹ gesenkt werden können. Die Wärmeverluste machen 55,3% der gesamten Wärmemenge aus, die für die Warmwasserbereitung in diesem Gebäude gebraucht wird (Genuardi et al., 2023).

Werden die Ergebnisse auf die gesamte Bundesrepublik Deutschland extrapoliert, ergibt sich ein Einsparpotenzial von **7,78 - 14,50 TWh yr⁻¹** bzw. **1,87 - 3,48 Mio. CO₂e yr⁻¹**. Die Einsparung variiert je nachdem, welche Gebäudegrößen einbezogen werden (22.700.534 Wohnungen in Gebäuden mit drei oder mehr Wohnungen und 510.606 Wohnungen in Wohnheimen bzw. 40.875.313 insgesamt (Statistisches Bundesamt, 2022a)).

Die Hochrechnung basiert auf einem Gebäude, das kürzlich saniert wurde (Rohrisolierung etc.). Der Gebäudebestand in Deutschland umfasst allerdings eine Vielzahl unsanierter Gebäude. Aus diesem Grund liegt das Potenzial vermutlich höher. K. Rühling et al. (2018/2018) kalkulierten eine Einsparung von **18 TWh yr⁻¹** bzw. 5,2 Mio. t CO₂e yr⁻¹ bei einer Temperaturabsenkung von 5°C.

Für Schleswig-Holstein kann die Ersparnis ausgehend von 1.517.232 Wohnungen auf 0,5 TWh yr⁻¹ bzw. 0,13 Mio. t CO₂e yr⁻¹ geschätzt werden.

Die genaue Berechnung wird in der obengenannten Veröffentlichung dargestellt. Entsprechende Vergleiche mit der Literatur werden zudem in der Diskussion aufgestellt.

4. Weitere Erkenntnisse

Die explorative Analyse (Experteninterviews und Stichprobenbefragung) beschränkte sich nicht nur auf technisch, hygienisch und rechtliche Hürden für den Einsatz von leistungsstarken Wärmepumpen. Der sektorenübergreifende Blick lieferte weitere Hemmnisse für den Wärmepumpen-Massenmarkthochlauf.

Diese wurden beschrieben und näher untersucht. Diese thematisiert betriebsrelevante Faktoren wie z.B. einen Fachkräftemangel, Erfahrungen und Umschulungen zur Wärmepumpentechnologie von vorhandenen Fachkräften sowie betriebswirtschaftliche Umsätze bei Handwerksbetrieben bei der Installation von Wärmepumpen bzw. Brennwertkesseln.

Der Fachkräftemangel wird bereits jetzt von den Betrieben wahrgenommen. Dennoch seien bereits gute Erfahrungen mit der Wärmepumpentechnologie gesammelt worden, sodass Mitarbeiterumschulungen als unproblematisch angesehen werden. Bezüglich der Umsätze, die mit einer Wärmepumpe bzw. mit einem Verbrennungskessel erzielt werden können, lieferte die Analyse für verschiedene Sektoren unterschiedliche Ergebnisse. Genauere Darstellungen zu den Ergebnissen aus der Stichprobenbefragung sind im Artikel in den Proceedings der 1. Konferenz zur Norddeutschen Wärmeforschung veröffentlicht (Anhang A6[1]).

Neben der Ultrafiltration, intelligenten elektrischen Strangregulierventilen, der Durchflusszytometrie zur Bestimmung der mikrobiologischen Verhältnisse im Trinkwasser sowie der Miteinbeziehung der Nutzer, da sie maßgeblich mit ihrem Wasserverbrauch die Trinkwasserhygiene steuern, gibt es weitere Faktoren, die die Vermehrung von Legionellen in Wasserleitungen maßgeblich beeinflussen und noch nicht (adäquat) in die a.a.R.d.T. integriert sind. Es findet sich z.B. die Aussage, dass die Nährstoffzufuhr für mögliche Keime in der Trinkwasserinstallation limitiert werden sollte (Bäcker et al., 2018; DVGW W 270, 2007). Mindestens in den hier untersuchten Fällen wurden jedoch sehr niedrige TOC-Gehalte gefunden, wobei es in einem Fall dennoch zu einer Verkeimung mit Legionellen kam.

Immer öfter werden sogenannte berührungslos-gesteuerte Entnahmearmaturen (Armaturen mit Annäherungselektronik) verbaut (Halabi et al., 2001), die besonders im öffentlichen Bereich empfohlen werden (Bauer et al., 2013) und nach Herstellerangaben bis zu 70% Wasser sparen verglichen mit einem Einhebelmischer (TGA+E Fachplaner, 2023). Vorteile sind bei diesen Armaturen der geringe Wasserverbrauch sowie, dass ein Anfassen der Armatur vermieden wird (physisch-hygienische Intervention). Es gibt Hinweise, dass berührungslos-gesteuerte Entnahmearmaturen nicht immer hygienischer sind (Johns Hopkins University, 2011). In einem Krankenhaus wurden Legionellen in 50 % aller optisch gesteuerten Entnahmearmaturen bestimmt (n=20), während bei den

traditionellen Armaturen nur 15 % betroffen waren (n=20) (Johns Hopkins University, 2011). Aufgrund dieser Hinweise sollten die unterschiedlichen Armaturentypen in den a.a.R.d.T ausführlicher behandelt werden, da diese zu lokalen Verkeimungen führen können. Möglicherweise sind Mischarmaturen mit einer thermischen Separierung von Warm- und Kaltwasser eine Alternative (Bäcker et al., 2018).

Habers (2021) beschreibt die Anwendung eines digital gesteuerten Zirkulationsregelsystem (Hycleen Automation System von GF Piping Systems) in einem Mehrparteienhaus in München (55 Wohnungseinheiten). Zirkulationsregler mit Temperatursensoren, die sich selbstständig öffnen und schließen, stimmen den Durchfluss in Abhängigkeit zur Wassertemperatur ab.

Für Stockwerksleitungen empfehlen Bäcker et al. (2018), Ringleitungen einzubauen im Gegensatz zu Stich- oder Reihenleitungen, um den Wasserwechsel zu erhöhen.

Grundsätzlich kann (bis auf Schwermetalle wie Blei) fast alles, was den Leitungen zugeführt wird, mikrobiologisch abgebaut bzw. verstoffwechselt werden. Dazu gehören auch Zwischenprodukte und/oder Abbauprodukte von Desinfektionsmitteln. Es besteht zudem die Möglichkeit, dass Bestandteile des Rohrmaterials in das Wasser ausdiffundieren können, insbesondere bei längeren Stagnationszeiten. Das eingespeiste Trinkwasser selbst mit den damit zugeführten lebenden und toten Mikroorganismen kann eine Nahrungsquelle für Mikroben sein.

Eine Untersuchung der mikrobiologischen Gemeinschaft, die sich im Trinkwasser befindet, basierte auf 705 Literaturangaben und beinhaltete 258 Gattungen, von denen *Legionella* nur eine darstellt. Eine ausführliche Darstellung dieser Auswertung ist Teil eines aus diesem Forschungsvorhaben resultierenden Promotionsvorhabens (Kapitel 7). 43,4% der Gattungen könnten aktiv Biofilm bilden. 13,2% können für den Menschen ein Gesundheitsrisiko darstellen (fakultativ pathogen). Die Analyse ergab, dass der Stickstoff-Stoffwechsel dominant auftritt, gefolgt von Schwefel-; Wasserstoff- und Methanstoffwechsel.

Weiterhin wurden wasserchemische Daten in einem weiteren realen Gebäude in Hamburg untersucht. Die Trinkwasserinstallation beanspruchte eine Hauseinspeisung und versorgte ein Mehrfamilienhaus sowie ein Hotel (Abb. 23).

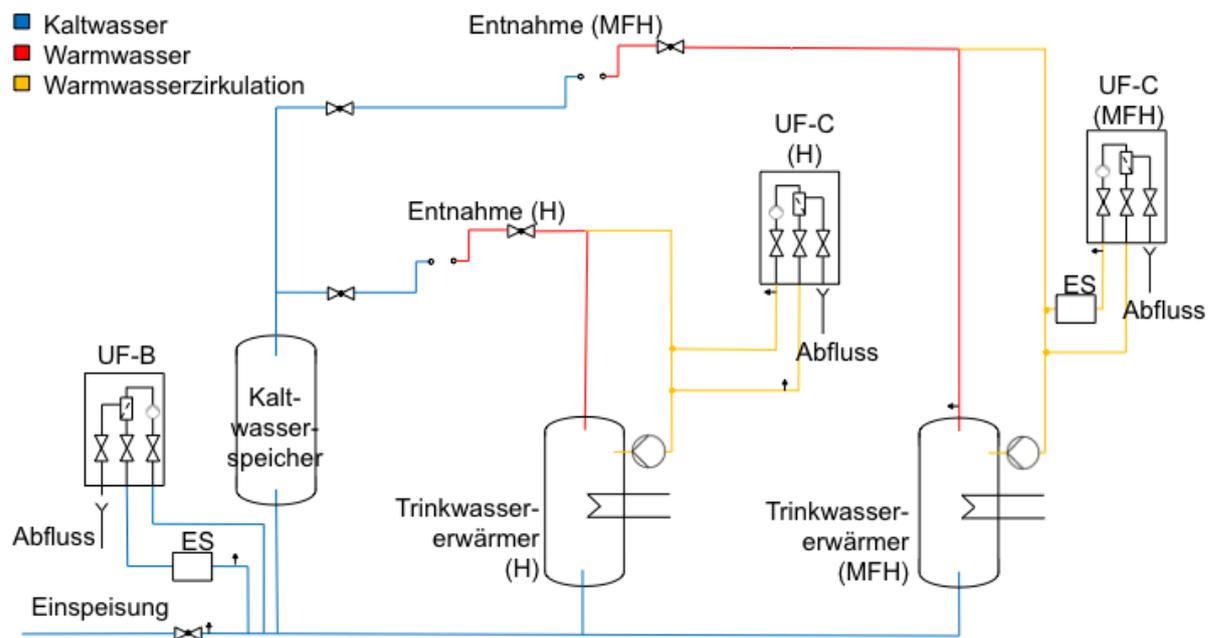


Abb. 23: Aufbau der Trinkwasserinstallation eines zusätzlichen untersuchten Gebäudes (MFH/Hotel).

Das Mehrfamilienhaus (MFH) als auch das Hotel (H) haben ein eigenes Warmwassersystem. Beide weisen eine eigene Warmwasserzirkulation auf, in der je eine Ultrafiltrationsanlage (UF-C) verbaut ist.

Eine weitere Ultrafiltrationsanlage fungiert als mikrobiologische Barriere nach der Kaltwassereinspeisung (UF-B). Ein Kaltwasserspeicher ist vorhanden. Zwei Entkalkungssysteme (ES) sind zusätzlich integriert (AQUABION®). Kalk gilt für sensible Anlagenteile als kritisch, da die Funktion von z.B. Ventilen beeinträchtigt werden kann. Kalkablagerungen hängen von der Temperatur ab. Höhere Temperaturen führen zu stärkeren Kalkablagerungen.

Es wurde an mehreren Stellen der Anlage beprobt (12.07.2022) und vermessen (Tab. 10).

Tab. 13: Wasserchemische Daten im realen Objekt.

	Wasserhärte*	$\Sigma(\text{Kationen})^{**}$	$\Sigma(\text{Anionen})^{**}$	TIC	TOC
	[mg L ⁻¹]	[mmol L ⁻¹]	[mmol L ⁻¹]	[mg L ⁻¹]	[mg L ⁻¹]
Einspeisung	115,72	7,58	1,98	39,1	3,2
UF-B (Ausgang)	103,04	6,81	2,06	41,7	2,7
UF-C (MFH) (Eingang)	105,77	6,97	2,14	41,4	3,0
Trinkwassererwärmer (MFH)	106,41	7,04	2,12	41,6	2,7
UF-C (H) (Eingang)	98,68	6,47	2,09	39,9	2,6

Entnahme-Kalt (H)	110,30	7,26	2,07	41,8	2,9
Entnahme-Warm (H)	102,57	6,74	2,04	40,0	3,0

* Die Wasserhärte ergab sich aus der Summe der Konzentrationen von Ca^{2+} und Mg^{2+}

** Die Summe der Kationen bzw. Anionen wurden aus den entsprechenden Spurenelementen aus Tab. 1 entnommen.

Die Summe der Kationen und der Anionen sind i.d.R. in einer Wasserprobe gleich, da die Ionenbilanz ausgeglichen ist. In dieser Analyse wurde kein HCO_3^- gemessen, welches einen wesentlichen Anteil der Anionenkonzentration des Wassers ausmacht.

Die Wasserhärte ist in der Anlage um etwa 5-17 mg L^{-1} geringer als in der Einspeisung. Die Kristallstruktur von Calciumcarbonat (CaCO_3) kann die Struktur von Calcit oder Aragonit (oder sehr selten Vaterit) annehmen. Aragonit gilt als anhaftungsneutraler, so dass CaCO_3 in der Anlage wieder ausgespült wird. Calcit führt hingegen zu Kalkablagerungen.

Das AQUABION®-Gerät (ES) arbeitet mit einer Zinkopferanode, sodass Zink in das Wasser abgegeben wird. Tatsächlich ist in der Anlage die Zinkkonzentration etwas größer als in der Gebäudeeinspeisung. Zink fällt als Zinkcarbonat (ZnCO_3) aus, dieses Kristall ist dem Calcitkristall sehr ähnlich und verhindert die Nukleation des Calciumcarbonats und provoziert dadurch das Ausfällen in Form von Aragonit.

Generell liegen TIC- und TOC-Werte der Anlage im ähnlichen Bereich. Dies ist ein Indikator, dass wasserchemische Parameter im System nur geringfügig durch das Anlagensystem verändert wurden.

5. Schlussfolgerungen und Ausblick

Der Markthochlauf von Wärmepumpen erfolgt insbesondere in Bestandsgebäuden noch nicht ausreichend schnell, um die politisch gesetzten und rechtlich bindenden Klimaziele zu erreichen. Es bestehen aktuell noch Hürden, die sich gegenseitig aufsummieren können und besonders stark wiegen, wenn leistungsstarke Wärmepumpen benötigt werden, die mehrere Wohneinheiten oder ganze Wohnquartiere versorgen sollen.

Anforderungen zur Stromnetzstabilität und zur Trinkwasserhygiene stellen eine Hürde für den Einbau leistungsstarker Wärmepumpen dar. Dieser könnte entgegengewirkt werden, wenn Warmwassertemperaturen in Trinkwasserinstallationen abgesenkt werden. Dies ist aktuell außerhalb von Modellvorhaben durch die a.a.R.d.T noch nicht vorgesehen. Rechtliche Rahmenbedingungen zu Sperrzeiten, die den Einbau und Betrieb von leistungsstarken Wärmepumpen fördern, müssen bereits jetzt definiert werden, um den Markthochlauf abzusichern. Insofern werden die endgültigen

Festlegungen der Bundesnetzagentur zur Steuerung von steuerbaren Verbrauchseinrichtungen von entscheidender Bedeutung sein, die voraussichtlich zum 1.1.2024 in Kraft treten werden.

Die Regulatorik und a.a.R.d.T. sind somit noch nicht immer ausreichend, um einen effizienten Einsatz leistungsstarker Wärmepumpen zu ermöglichen. Alternative Technologien sollten herangezogen werden, um den geplanten Wärmepumpen-Markthochlauf verbessert ermöglichen zu können.

Dazu kann der Stand der Technik herangezogen werden, der bereits einige alternative Lösungsansätze anbietet. Es erfordert jedoch voraussichtlich noch einige Zeit, bis sich alternative Lösungsansätze in der Praxis etablieren. Beispiele sind die Ultrafiltration zur Absenkung der Warmwassertemperatur, die thermische Regulierung von Trinkwasserinstallationen über Motorventile sowie die Durchflusszytometrie zur rapiden Bestimmung der mikrobiellen Verhältnisse im Trinkwasser. Generell empfiehlt es sich, Nutzer der Trinkwasserinstallationen in die Verantwortung miteinzubeziehen, da sie durch ihr Zapfverhalten die hygienischen Bedingungen beeinflussen. Die Wasserhygienekommission des Landes Schleswig-Holstein stellt eine Richtlinie zur Verfügung, die es ermöglicht, bereits jetzt im Rahmen von Modellprojekten alternative Technologien anzuwenden.

Für den Ansatz der Filtration wird empfohlen, weitere Methoden zu entwickeln, die kleinere Porengrößen ermöglichen. Aktuell ist diese 0,02 µm.

Es wird für die Praxis empfohlen, den Stand der Technik heranzuziehen, um den hygienischen Anforderungen z.B. während einer Moderation von Wärmepumpen in MFH zu begegnen. Der wissenschaftliche Anspruch sollte aktuell sein, praktische Szenarien z.B. über ein ausführlich ausformuliertes Lastenheft zu erstellen, die die Etablierung neuer Ansätze anwenden bzw. beschleunigen. Dies könnte Gegenstand neuer Forschungsprojekte sein.

Eine Vor-Ort-Durchflusszytometrie wurde mit der Labormethode validiert, sodass diese auch von nicht-spezialisierten Personen verwendet werden kann, um die hygienischen Verhältnisse des Trinkwassers besser zu beschreiben.

6. Öffentlichkeitsarbeit und Nachwirkung

Das Projekt wurde beim Future Energies Science Match 2020 sowie 2021 vorgestellt. Zudem wurde eine Präsentation während des Events „Wärmeforschungskolloquium – Hamburg meets Westküste 2021“ gehalten. Projektergebnisse wurden auf der Norddeutschen Wissenschaftsministerkonferenz 2021 präsentiert. Es wurde an der Arbeitsgruppe „TriWaExpert“ mitgewirkt (<https://triwaexpert.de/>).

Es wurden zwei Veröffentlichungen vorbereitet, in denen Ergebnisse dieses Vorhabens publiziert werden (Anhang A6).

Eine kooperative Promotion zwischen der Fachhochschule Westküste und der technischen Universität Braunschweig resultierte aus diesem Forschungsprojekt. In dieser werden alternative Technologien zur Sicherstellung der Trinkwasserhygiene untersucht. Dazu werden weitere Modellgebäude analysiert. Zudem werden Risikomanagementkonzepte erstellt, die eine Absenkung der Warmwassertemperaturen in Bestandsgebäuden fördern sollen. Ziel ist die Reduzierung des Energiebedarfs und die Förderung des Wärmepumpeneinsatzes.

7. Literaturverzeichnis

- Antoni, J. & Selinger, J. (2019). *Bereitstellung von Flexibilität in der Niederspannung - Status Quo, Wechselwirkungen und Ausblick*. IKEM. https://www.ikem.de/wp-content/uploads/2020/02/20200129_ENavi_14a_EnWG.pdf
- Bäcker, C., Kirchhoff, T., Mathys, W. & Rickmann, B. (2018). Rohrführung für Erhalt der Trinkwasserhygiene entscheidend. *BTGA Almanach 2018*, 14–20.
- Bandilla, W. (2015). *Online-Befragungen*. Mannheim. GESIS Leibniz Institute for the Social Sciences (SDM-Survey Guidelines). https://doi.org/10.15465/gesis-sg_003
- Bauer, M., Möhle, P. & Schwarz, M. (2013). *Green Building*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-38297-0>
- Bogner, K. & Landrock, U. (2015). *Antworttendenzen in standardisierten Umfragen*. Mannheim. GESIS Leibniz Institute for the Social Sciences (SDM-Survey Guidelines). https://doi.org/10.15465/gesis-sg_016
- Buderus. (o.J.). *Produktdatenblatt Logatherm WPL-A 18kW - 31kW*. https://www.buderus.lu/de/kataloge/80698_logatherm-wpl-a-18kw-31kw#downloads
- Bundesverband der Deutschen Heizungsindustrie. (2022). *Heizungsbestand 2021: Zeit, dass sich was tut! Pressemitteilung*. <https://www.bdh-industrie.de/presse/pressemeldungen>
- Bundesverband Wärmepumpe e.V. (2021). *Branchenstudie 2021: Marktanalyse - Szenarien - Handlungsempfehlungen*. <https://www.waermepumpe.de/verband/publikationen/fachpublikationen/>
- Cholewa, T., Siuta-Olcha, A. & Anasiewicz, R. (2019). On the possibilities to increase energy efficiency of domestic hot water preparation systems in existing buildings – Long term field research. *Journal of Cleaner Production*, 217, 194–203. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.138>

- Danny Günther, Jeannette Wapler, Robert Langner, Sebastian Helmling, Dr.-Ing. Marek Miara, Dr.-Ing. David Fischer, Dirk Zimmermann, Tobias Wolf, Dr.-Ing. Bernhard Wille-Hausmann. Wärmepumpen in Bestandsgebäuden: Ergebnisse aus dem Forschungsprojekt "WPsmart im Bestand" (Abschlussbericht).
- DIN 1988-100 (2011). *Technische Regeln für Trinkwasser-Installationen - Teil 100: Schutz des Trinkwassers, Erhaltung der Trinkwassergüte; Technische Regel des DVGW* (Deutsche Norm). Deutsches Institut für Normung e. V.
- DIN 1988-200 (2012). *Technische Regeln für Trinkwasser-Installationen - Teil 200: Installation Typ A (geschlossenes System) - Planung, Bauteile, Apparate, Werkstoffe; Technische Regel des DVGW* (Deutsche Norm). Deutsches Institut für Normung e. V.
- DIN 38406-5 (1983). *Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung; Kationen (Gruppe E): Bestimmung des Ammonium-Stickstoffs (E 5)*.
- DIN EN 1484 (1997). *Wasseranalytik: Anleitung zur Bestimmung des gesamten organischen Kohlenstoffs (TOC) und des gelösten organischen Kohlenstoffs (DOC)*.
- DIN EN 806-5 (2012). *Technische Regeln für Trinkwasser-Installationen - Teil 5: Betrieb und Wartung; Deutsche Fassung EN 806-5:2012*.
- DIN EN ISO 10304-1 (2009). *Wasserbeschaffenheit: Bestimmung von gelösten Anionen mittels Flüssigkeits-Ionenchromatographie - Teil 1: Bestimmung von Bromid, Chlorid, Fluorid, Nitrat, Nitrit, Phosphat und Sulfat (ISO 10304-1:2007); Deutsche Fassung EN ISO 10304-1:2009*.
- DIN EN ISO 11731 (2019). *Wasserbeschaffenheit: Zählung von Legionellen (ISO 11731:2017); Deutsche Fassung EN ISO 11731:2017*.
- DIN EN ISO 17294-2 (2017). *Wasserbeschaffenheit: Anwendung der induktiv gekoppelten Plasma-Massenspektrometrie (ICP-MS) - Teil 2 (Bestimmung von ausgewählten Elementen einschließlich Uran-Isotope (ISO 17294-2:2016); Deutsche Fassung EN ISO 17294-2:2016)*.
- DIN EN ISO 19458 (2006). *Wasserbeschaffenheit: Probenahme für mikrobiologische Untersuchungen (ISO 19458:2006); Deutsche Fassung EN ISO 19458:2006*.
- DVGW W 270 (2007). *Vermehrung von Mikroorganismen auf Werkstoffen für den Trinkwasserbereich - Prüfung und Bewertung* (Technische Regel).
- DVGW W 551. (2004). *Trinkwassererwärmungs- und Trinkwasserleitungsanlagen; Technische Maßnahmen zur Verminderung des Legionellenwachstums; Planung, Errichtung, Betrieb und Sanierung von Trinkwasser-Installationen: Technische Regel. Arbeitsblatt W551*.
- Fish, K. E., Osborn, A. M. & Boxall, J. (2016). Characterising and understanding the impact of microbial biofilms and the extracellular polymeric substance (EPS) matrix in drinking water distribution systems. *Environmental Science: Water Research & Technology*, 2(4), 614–630. <https://doi.org/10.1039/C6EW00039H>

- Fraunhofer IBP/IWES. (2017). *Wärmewende 2030: Schlüsseltechnologien zur Erreichung der mittel- und langfristigen Klimaschutzziele im Gebäudesektor*. Studie im Auftrag von Agora Energiewende.
- GEG (2020). Gesetz zur Einsparung von Energie und zur Nutzung erneuerbarer Energien zur Wärme- und Kälteerzeugung in Gebäuden. <https://www.gesetze-im-internet.de/gg/GG.pdf> (Gebäudeenergiegesetz vom 8. August 2020).
- Genuardi, M. D., Wiegand, M. & Opel, O. (2023). Installation of an ultrafiltration plant in a multi-family house to reduce the hot-water temperature and energy demand: A case study in Germany. *Journal of Building Engineering*, 66, 105898. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.105898>
- Gläser, J. & Laudel, G. (2010). Eine umstrittene Entscheidung: Ein oder mehrere Interviewer? In VS Verlag für Sozialwissenschaften Wiesbaden (Hrsg.), *Lehrbuch. Experteninterviews und qualitative Inhaltsanalyse: als Instrumente rekonstruierender Untersuchungen* (4. Aufl.). VS Verlag.
- Günther, J. & Puls, N. (2020, 10. September). *Temperaturreduktion im Trinkwarmwassernetz eines Mehrfamilienhauses zur Vermeidung von Komplikationen mit einem Wärmepumpen- & PV-Energiekonzept*. Hamburg / Wedel.
- Habers, R. (2021). Zuverlässig keimfreies Trinkwasser für die Bewohner eines Münchner Mehrparteienhauses: Digital gesteuerte Sanität-Automation stellt hohe Trinkwasserhygiene sicher. *BTGA Almanach*, 56–57.
- Halabi, M., Wiesholzer-Pittl, M., Schöberl, J. & Mittermayer, H. (2001). Non-touch fittings in hospitals: A possible source of *Pseudomonas aeruginosa* and *Legionella spp.* *Journal of Hospital Infection*, 49(2), 117–121. <https://doi.org/10.1053/jhin.2001.1060>
- Hippelein, M., Puls, N. & Fickenscher, Helmut, Christiansen, Bärbel. (2018). *Einsatz der Zytometrie zur Überwachung der Substitution energieintensiver Hygienisierung häuslicher Trinkwasser-Installationen: DFZ-Analytik zur Überwachung der Energieeffizienz* [Endbericht 19.12.2018]. Christian-Albrechts-Universität Kiel; Universitätsklinikum Schleswig-Holstein.
- Hoffmeyer-Zlotnik, J. H. P. (2015). *Standardisierung und Harmonisierung sozio-demographischer Variablen*. Mannheim. GESIS Leibniz Institute for the Social Sciences (SDM-Survey Guidelines). https://doi.org/10.15465/gesis-sg_012
- Jäger, U. & Reinecke, S. (2009). Expertengespräch. In *Empirische Mastertechniken* (S. 29–76). Gabler Verlag, Wiesbaden. https://doi.org/10.1007/978-3-8349-8278-0_2
- Kropp, M., Hörnle, O., Lämmle, M., Wapler, J. & Hess, S. (Hrsg.) (2020). *Einfluss der Trinkwasser-Systemvariante auf die Performance von Wärmepumpen in Mehrfamilienhäusern: AA IV.07*.

- LaMere, K., Mäntyniemi, S., Vanhatalo, J. & Haapasaari, P. (2020). Making the most of mental models: Advancing the methodology for mental model elicitation and documentation with expert stakeholders. *Environmental Modelling & Software*, 124, 104589. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2019.104589>
- Lenzner, T. & Menold, N. (2015). *Frageformulierung*. Mannheim. GESIS Leibniz Institute for the Social Sciences (SDM-Survey Guidelines). https://doi.org/10.15465/gesis-sg_017
- Johns Hopkins University. (2011, 4. April). *Electronic faucets hinder, not help, hospital infection control* [Pressemitteilung]. Baltimore. <https://gazette.jhu.edu/2011/04/04/electronic-faucets-hinder-not-help-hospital-infection-control/>
- Liu, R., Yu, Z., Guo, H., Liu, M., Zhang, H. & Yang, M. (2012). Pyrosequencing analysis of eukaryotic and bacterial communities in faucet biofilms. *The Science of the total environment*, 435-436, 124–131. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.07.022>
- Liu, R., Zhu, J., Yu, Z., Joshi, D., Zhang, H., Lin, W. & Yang, M. (2014). Molecular analysis of long-term biofilm formation on PVC and cast iron surfaces in drinking water distribution system. *Journal of Environmental Sciences*, 26(4), 865–874. [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(13\)60481-7](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(13)60481-7)
- Luka, J. & Bohn, C. (2019). *Ein simulationsbasiertes Verfahren für den Effizienzvergleich von Heizungsanlagen mit Wärmepumpen in Mehrfamilienhäusern (Fac3-19-01)* [Technical Report Series]. Technische Universität Clausthal, Clausthal-Zellerfeld.
- McBride, L. & Moran, G. (1967). Double agreement as a function of item ambiguity and susceptibility to demand implications of the psychological situation. *Journal of Personality and Social Psychology*, 6(1), 115–118. <https://doi.org/10.1037/h0024533>
- Menold, N. & Bogner, K. (2015). *Gestaltung von Ratingskalen in Fragebögen*. Mannheim. GESIS Leibniz Institute for the Social Sciences (SDM-Survey Guidelines). https://doi.org/10.15465/gesis-sg_015
- Miara, M., Günther, D., Langner, R., Helmling, S. & Wapler, J. (Hrsg.) (2017). *10 years of heat pumps monitoring in Germany. Outcomes of several monitoring campaigns. From low-energy houses to unretrofitted single-family dwellings*.
- Neumann, K., Anderson, C. & Denich, M. (2018). Participatory, explorative, qualitative modeling: application of the iMODELER software to assess trade-offs among the SDGs. *Economics*, 12(1), Artikel 20180025. <https://doi.org/10.5018/economics-ejournal.ja.2018-25>
- Neumann, K. & Hirschnitz-Garbers, M. (2022). Material efficiency and global pathways towards 100% renewable energy systems – system dynamics findings on potentials and constraints. *Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems*, 10(4), Artikel 1100427, 1–20. <https://doi.org/10.13044/j.sdewes.d10.0427>

- Pomianowski, M. Z., Johra, H., Marszal-Pomianowska, A. & Zhang, C. (2020). Sustainable and energy-efficient domestic hot water systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 128, 109900. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109900>
- RKI. (2019). *RKI-Ratgeber Legionellose*.
https://www.rki.de/DE/Content/Infekt/EpidBull/Merkblaetter/Ratgeber_Legionellose.html;jsessionid=094B75A66734E465BF8E7D7A9C3FC9B3.internet061#doc2387614bodyText3
- Röder, R. (2011). *Biofilmpopulationen in der häuslichen Trinkwasserinstallation: Untersuchung der Auswirkung von eingesetzten Materialien und Desinfektionsmaßnahmen* [Dissertation]. Technische Universität Berlin, Berlin.
- Rozej, A., Cydzik-Kwiatkowska, A., Kowalska, B. & Kowalski, D. (2015). Structure and microbial diversity of biofilms on different pipe materials of a model drinking water distribution systems. *World journal of microbiology & biotechnology*, 31(1), 37–47.
<https://doi.org/10.1007/s11274-014-1761-6>
- Rühling, K [K.], Haupt, L., Hoppe, S., Löser, J., Rothmann, R., Lück, C., Koshkolda, T., Petzold, M., Schreiber, C., Kistemann, T., Schaule, G., Nocker, A., Wingender, J., Kallert, A., Schmidt, D., Sager-Klauß, C. & Bechem, H. (2018, 1. März). *EnEff: Wärme Verbundvorhaben: Energieeffizienz und Hygiene in der Trinkwasser-Installation, Kurzüberblick und Thesen*. Im Kontext: DHC Annex TS1 "Low Temperature District Heating for Future Energy Systems" [Pressemitteilung].
- Rühling, K [Karin]. (2018). *Projekt "ULTRA-F": EnOB: ULTRA-F - Ultrafiltration als Element der Energieeffizienz in der Trinkwasserhygiene*. <https://tu-dresden.de/ing/maschinenwesen/iet/gewv/forschung/forschungsprojekte/ultra-f>
- Schauer, C. & Rüschen, D. (2021). Einregulierung von Zirkulationssystemen für Trinkwasser warm. *HLH*, 82(4), 44–48. <https://doi.org/10.37544/1436-5103-2021-04-44>
- Schütze, F. (1983). Biographieforschung und narratives Interview. *Neue Praxis*, 13(3), 283–293.
- Statistisches Bundesamt. (2022a). *Gebäude und Wohnungen: Bestand an Wohnungen und Wohngebäuden - Bauabgang von Wohnungen und Wohngebäuden*. Lange Reihen ab 1969 - 2014.
- Statistisches Bundesamt. (2022b, 2. Juni). *Mehr als die Hälfte der im Jahr 2021 gebauten Wohngebäude heizen mit Wärmepumpen: Pressemitteilung Nr. 226 vom 2. Juni 2022*. https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2022/06/PD22_226_31121.html
- TGA+E Fachplaner. (2023). *Mit berührungslosen Armaturen -bis zu 70 % Wasser sparen*. <https://www.tga-fachplaner.de/meldungen/schell-mit-beruehrungslosen-armaturen-bis-zu-70-wasser-sparen>

- TrinkwV. (2021). *Trinkwasserverordnung in der Fassung der Bekanntmachung vom 10. März 2016 (BGBl. I S. 459), die zuletzt durch Artikel 1 der Verordnung vom 22. September 2021 (BGBl. I S. 4343) geändert worden ist.: Verordnung über die Qualität von Wasser für den menschlichen Gebrauch.*
- Trott, D. M. & Jackson, D. N. (1967). An experimental analysis of acquiescence. *Journal of Experimental Research in Personality*, 2(4), 278–288. <https://psycnet.apa.org/record/1968-08972-001>
- Umweltbundesamt. (2011). *Energiesparen bei der Warmwasserbereitung: Vereinbarkeit von Energieeinsparung und Hygieneanforderungen an Trinkwasser*. Stellungnahme des UBA.
- Umweltbundesamt. (2012, 23. August). *Systemische Untersuchungen von Trinkwasser-Installationen auf Legionellen nach Trinkwasserverordnung: Empfehlung des Umweltbundesamtes nach Anhörung der Trinkwasserkommission*. Empfehlung [Pressemitteilung]. Bad Elster.
- Umweltbundesamt. (2018, 18. Dezember). *Vorkommen von Legionellen in dezentralen Trinkwassererwärmern: Mitteilung des Umweltbundesamtes nach Anhörung der Trinkwasserkommission vom 18.12.2018*.
- Umweltbundesamt. (2020). *Kollisionsregel Trinkwasserverordnung und Gebäudeenergiegesetz - Mindesttemperatur von erwärmtem Trinkwasser aus Großanlagen zur Trinkwassererwärmung: Mitteilung des Umweltbundesamtes nach Anhörung der Trinkwasserkommission*. 11.12.2020.
- VDI 6023 Part 1 (2022). *Hygiene in Trinkwasser-Installationen: Anforderungen an Planung, Ausführung, Betrieb und Instandhaltung*.
- Verordnung (EU) Nr. 517/2014 (2014). Verordnung (EU) Nr. 517/2014 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 16. April 2014 über fluorierte Treibhausgase und zur Aufhebung der Verordnung (EG) Nr. 842/2006.
- Wasserhygienekommission des Landes Schleswig-Holstein. (2021). *Richtlinien zur Durchführung von Modellprojekten: Anforderungen an Aufbereitungsanlagen oder sonstige Geräte in der Trinkwasserversorgung, die nicht den allgemein anerkannten Regeln der Technik entsprechen*.
- Weber, U. (2005). *Trinkwasser-Pathogene in öffentlichen Einrichtungen - Untersuchungen zur Wasserdesinfektion und zur Begründung eines Water Safety Plans* [Dissertation]. Ernst-Moritz-Arndt Universität, Greifswald.

8. Anhang

A1.	Danksagung	2
A2.	Meilensteine im Projektablauf	2
A3.	Ausführliche Darstellung der explorativen Interviews und der Stichprobenbefragung	3
A4.	Zusätzliche Diagramme zur Hygiene in dem Altenwohnheim	7
A5.	Modellausschnitte des iModelers.	10
A6.	Publikationen im Rahmen des Projekts.....	15

A1. Danksagung

Es wird Herrn Jan Günther, Architekt der Arbeitsgemeinschaft Energetische Sanierung (AGES), gedankt für die Bereitstellung von Gebäudedaten, die für die Durchführung des Forschungsprojektes unerlässlich waren.

Für die Bereitstellung relevanter Informationen bezüglich des iModelers wird Herrn Kai Neumann, Consideo GmbH, gedankt.

Zudem wird die Zuarbeit aller Personen gewürdigt, die gebäuderelevante Daten zur Verfügung gestellt haben. Aus datenschutzrechtlichen Gründen werden diese nicht namentlich genannt.

A2. Meilensteine im Projektablauf

In der Antragsphase wurden sechs Meilensteine definiert und in der 24-monatige Projektlaufzeit (01.01.2021- 31.12.2022) erreicht.

1. Erstellung einer systemdynamischen Modellierung mit Hilfe des Consideo-iModelers von realisierten Niedertemperaturkonzepten, die hinter dem erwünschten Optimum zurückbleiben

Entscheidende Hemmnisse und ihre Wechselwirkungen werden aufgedeckt und gesamtsystemisch modelliert.

2. Analyse von anlagentechnischen und rechtlichen Hemmnissen für den Einsatz von Wärmepumpen aufgrund von Wechselwirkungen zwischen Trinkwasser- und Energietechnik

Reale Gebäude aus Schleswig-Holstein bzw. Hamburg wurden auf ihre technisch-hygienischen Eigenschaften charakterisiert, analysiert und energetisch bewertet. Zum Einsatz kam das im Meilenstein 3 erprobte Analyseverfahren. Zudem wurden rechtlich aufkommende Fragestellungen bearbeitet und auf die erfolgreiche Umsetzung der Energiewende bezogen.

3. Validierung einer mobilen Analysenmethode auf Basis der Durchflusszytometrie zur präventiven Bestimmung von Verkeimungsrisiken in Trinkwasserinstallationen

Ein mobiles Vor-Ort-Zytometer (Cellstream, Fa. rQMicro) kann mikrobiologische Verhältnisse von Trinkwasserinstallationen rapide und ohne anschließende Inkubation von Bakterien bestimmen. Dabei werden sämtliche Bakterienzellen in 1 mL Wasser erfasst. Das Gerät wird unter Realbedingungen im stationären Betrieb eines Ingenieurbüros eingesetzt, um die Validität der Ergebnisse im direkten Vergleich mit einer akkreditierten Labormethode zu vergleichen. Es wird dabei auf die bestehenden Erkenntnisse aus dem abgeschlossenen Forschungsprojekt „DFZ-Analytik zur Überwachung der Energieeffizienz“ zurückgegriffen, das ebenfalls von der Gemeinschaft für Energie und Klimaschutz Schleswig-Holstein GmbH (EKSH) gefördert wurde.

4. Analyse von Hemmnissen für den Einsatz von Wärmepumpen aufgrund der geltenden rechtlichen Rahmenbedingungen

Es wurde untersucht, inwieweit der bestehende Rechtsrahmen den Erfolg von innovativen Sanierungs- und Energiekonzepten hindert bzw. fördert. Dabei spielen vertragliche Vereinbarungen zu steuerbaren Lasten, die der Stabilität lokaler Stromnetze dienen sollen, eine entscheidende Rolle. Zudem wird der Übergang von innovativen Sanierungskonzepten bis zur Akzeptanz in den allgemein-anerkannten-Regeln-der-Technik rechtlich bewertet.

5. Formulieren des Prozesses zur präventiven rechtlichen, hygienischen und technischen Absicherung und Optimierung von Wärmepumpen-PV/Power-to-Heat-Konzepten

Technisch, hygienische und rechtliche Prozessschritte werden zusammengefasst, um diese auf ihre Relevanz für den Wärmepumpen-Markthochlauf zu bewerten.

A3. Ausführliche Darstellung der explorativen Interviews und der Stichprobenbefragung

a. Experteninterviews

Initial wurde eine explorative Studie anhand von Experteninterviews und einer anschließenden Umfrage durchgeführt. Die Befragung richtete sich an Planer und Errichter von Wärmepumpenanlagen, da diese über praktische Erfahrungen aus erster Hand verfügen. Ziel war es, systematische Hürden für den Markthochlauf von Wärmepumpen zu ermitteln.

Bei den narrativen Experteninterviews wurden nicht nur Narrationen überprüft (Jäger & Reinecke, 2009; Schütze, 1983). Vielmehr wurde die Expertise aus vorangegangenen Forschungen und Tätigkeiten der Autoren in entsprechenden Fachkreisen extern geprüft.

Zur Sicherstellung der Reliabilität der Datenaufnahme wurde ein Leitfaden erstellt. Somit wurde vermieden, dass Interviewer Fragen situativ umformulieren und dadurch der Informationsgehalt abnimmt (Gläser & Laudel, 2010). Der Leitfaden beinhaltete offene Abschlussfragen, die es den Interviewten ermöglichten, ergänzende Information zu äußern.

Es wurden drei Experten aus verschiedenen Bundesländern und Branchen ausgewählt, um eine überregionale und branchenübergreifende Gültigkeit der Datenerhebung zu sichern. Weiterhin wurde so eine gegenseitige Einflussnahme der Interviewten ausgeschlossen⁴¹. Die Interviews wurden aus praktischen Gründen im Webkonferenzformat abgewickelt.

Unmittelbar im Anschluss der Interviews wurden potentielle Hürden für den Einsatz von Wärmepumpen erfasst und dokumentiert. Um die Objektivität zu intensivieren, wurde die anschließende qualitative Inhaltsanalyse im Team vorgenommen (Jäger & Reinecke, 2009). Aus der Inhaltsanalyse wurde ein Fragenkatalog für eine quantitative Befragung des Wärmepumpensektors erstellt.

b. Fragebogenerstellung und Stichprobenrekrutierung

Der Fragebogen enthält nominale Fragen, bei denen Antworten vorformuliert wurden, aus denen die Teilnehmenden diejenige auszuwählen hatten, die ihrer Meinung nach am besten passte. Darüber hinaus wurden ordinale Fragen gestellt, bei denen gemäß einer Fünfer-Skala bewertet werden sollte („Stimme voll und ganz zu“, „Stimme zu“, „Teils/teils“, „Stimme nicht zu“, „Stimme überhaupt nicht zu“).

Die Bewertungsskala sowie die Formulierungen der Fragen beruhte auf Empfehlungen (Lenzner & Menold, 2015; Menold & Bogner, 2015). Entgegen den Empfehlungen wurde allerdings auf eine zahlenmäßige Bewertungsskala verzichtet, um hinsichtlich der Vielfalt der Fragen eine kompakte Darstellung zu ermöglichen. Die Möglichkeit der Enthaltung („Keine Angabe“) wurde gegeben, da einige Fragen ein intensives Vorwissen erforderten oder sich kontextgebunden ambivalent darstellten.

Die Gefahr zur Akquieszenz bzw. Zustimmungstendenz (Bogner & Landrock, 2015) wurde reduziert, indem Items vermieden wurden, die widersprüchlich formuliert sind (McBride & Moran, 1967) und aus

⁴¹ Folgende Experten wurden interviewt: Gründer eines Heizungsbauunternehmens in Baden-Württemberg, der nach eigenen Angaben über 100 Wärmepumpen im Jahr installiert; Prokurist eines Kältetechnikbetriebes in Schleswig-Holstein, dessen Portfolio die Wärmepumpentechnologie seit über 20 Jahren beinhaltet; wissenschaftlicher Mitarbeiter bzw. Doktorand eines thematisch relevanten Forschungsinstitutes in Bayern.

vielen Worten bestehen (Trott & Jackson, 1967). Tendenzen zur Mitte und zur Milde bzw. Härte auf den Skalen könnten im Einzelfall auftreten.

Verzerrungen könnten durch die Reihenfolge der Fragen sowie durch die Reihenfolge der Antworten entstehen, da vorangegangene Items den Kontext für nachfolgende bilden (Bogner & Landrock, 2015). Aus diesem Grund wurden Fragen und Antworten stets in der gleichen Reihenfolge gestellt, sodass diese Effekte uniform auftreten.

Die Fragen wurden thematisch in mehreren Blöcken aufgeteilt. Zu jedem Block wurde ein Kommentarbereich eingegliedert, um den Befragten zu ermöglichen, weitere Informationen zu äußern.

Die Befragung wurde über die Applikation LimeSurvey erstellt, sodass ein Online-Link generiert werden konnte. Online-Umfragen sind nur sinnvoll, wenn möglichst alle infrage kommenden Zielpersonen einen Internetzugang haben (Bandilla, 2015). Es wurde angenommen, dass der Anteil Nicht-Internetnutzender Betriebe im Sektor sehr klein ist, sodass dieser Faktor vernachlässigt wurde.

Eine Kontrollfrage testete die Aufmerksamkeit der Befragten, deren Antworten bei falscher Beantwortung ausgegliedert wurden. Zwecks demografischer Standardisierung bzw. Harmonisierung (Hoffmeyer-Zlotnik, 2015) wurde das ansässige Bundesland, der Tätigkeitsbereich (regional bis bundesweit) sowie die Branche (Energieberatung, Fachplanung etc.) abgefragt. Weiterhin schätzen die Teilnehmer ein, mit welchen Wärmepumpen-Heizleistungen sie arbeiten (weniger als 20 kW bis mehr als 100 kW). Die Heizleistungen wurden als Indiz verstanden, für welche Gebäudetypen (Einfamilienhaus, Mehrfamilienhaus etc.) geplant wird. Zudem wurde befragt, ob die Heizungsplanung zu den Hauptaufgabenfeldern des Unternehmens gehört und wie viele Wärmepumpen etwa im Jahr eingeplant bzw. eingebaut werden. (<10, <50, <100, >100, keine Angabe).

Zielgruppe waren alle infrage kommende Planer und Errichter von Wärmepumpenanlagen. Einige Verbände des Sektors teilten nach Anfrage den Link zur Befragung über ihre Kanäle⁴². Zudem wurden Internetseiten von weiteren Verbänden genutzt, die relevante Betriebe präsentierten und der Zielgruppe entsprachen⁴³. Diese Betriebe wurden direkt kontaktiert.

⁴² Folgende Verbände teilten den Link über ihre Kanäle: Bundesverband Wärmepumpe e.V. (BWP); Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena); Verband Deutscher Architekten- und Ingenieure e.V. (DAI); Verband Deutscher Kälte-Klima-Fachbetriebe e.V. (VDKF); TGA Fachplaner-Magazin für Technische Gebäudeausrüstung des Alfons W. Gentner Verlag GmbH & Co. KG, Fachverbände Sanitär Heizung Klima der Bundesländer (SHK-Verbände).

⁴³ Internetseiten der folgenden Verbände wurden genutzt: Bundesverband Altbauerneuerung e.V. (BAKA); Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena); Gesamtverband Gebäudetechnik e.V.; QualitätsVerbund Planer am Bau

c. Statistische Analyse

Die Befragung wurde nach 3,5 Monaten geschlossen (Februar 2022). Die Ergebnisse wurde über die Software „Statistical Package for the Social Sciences (SPSS)“ ausgewertet.

Die Antwortoptionen der nominalen Fragen wurden als Prozentanteile angegeben. Die Antworten der ordinalen Skalen wurden nach dem folgenden Schema codiert: Stimme voll und ganz zu – 5; Stimme zu – 4; Teils/teils – 3; Stimme nicht zu – 2; Stimme überhaupt nicht zu – 1. Die Antwort „keine Angabe“ wurde als „ungültig“ codiert. Dadurch variiert die Stichprobengröße bei jeder einzelnen Frage. Über die Codierung der Skala wurde eine Reihenfolge zwischen 5 und 1 gebildet. Allerdings lassen sich die Abstände der Reihenglieder nicht interpretieren.

Die Mittelwerte der Antworten wurden dennoch errechnet, wobei diese folglich nicht das arithmetische Mittel der Statistik präsentierten. Vielmehr erlaubten die Mittelwerte bei Gruppenvergleichen der ordinalen Fragen, Differenzierungstrends zu verdeutlichen.

Um Beziehungen zwischen spezifischen Fragen und Antworten zu untersuchen, wurden statistische Zusammenhangsmaße berechnet. Diese geben die Stärke des Zusammenhangs zwischen zweien Variablen an.

Zudem wird gezeigt, in welcher Richtung der Zusammenhang ausgeprägt ist. Weiterhin ergibt sich die Frage, ob der Zusammenhang signifikant ist und sich folglich auf die Grundgesamtheit übertragen lässt. Dazu muss, wie in diesem Fall, keine repräsentative Stichprobe vorliegen. Lediglich die jeweils betrachteten Merkmale müssen repräsentativ sein.

Die Zusammenhangsmaße Lambda und Goodman-Kruskal-Tau wurden berechnet. Diese beruhen auf proportionaler Fehlerreduktion. Ein Wert von 0 demonstriert, dass die analysierten Variablen stochastisch unabhängig sind. Wird ein Wert von 1 erreicht, kann die abhängige Variable vollständig durch die unabhängige Variable vorhergesagt werden.

A4. Zusätzliche Diagramme zur Hygiene in dem Altenwohnheim

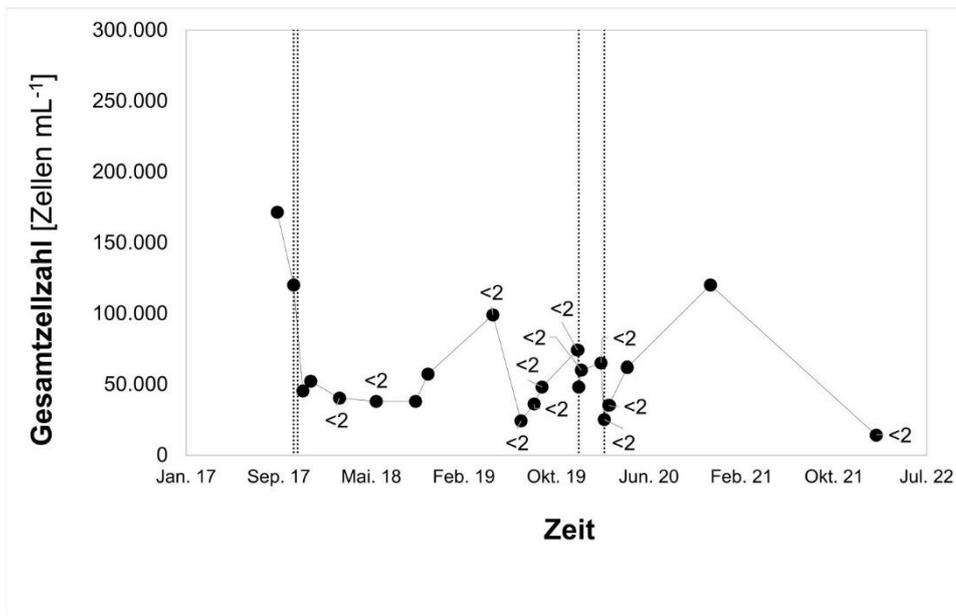


Abb. Hygiene am Speicherausgang: GZZ (Zellen mL⁻¹) und Legionellenkonzentration (KBE 100 mL⁻¹). Die Werte an den Messpunkten stellen die Ergebnisse aus der Legionellen-Kultivierung dar [KBE 100 mL⁻¹].

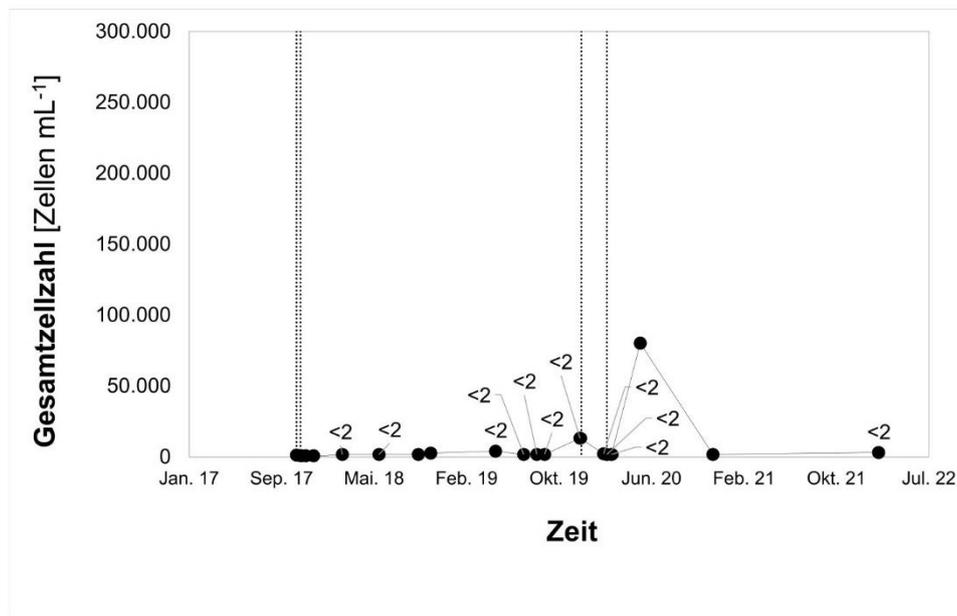


Abb. Hygiene am Ausgang der Ultrafiltrationsanlage in der Warmwasserzirkulation (UF-C-Warm): GZZ (Zellen mL⁻¹) und Legionellenkonzentration (KBE 100 mL⁻¹). Die Werte an den Messpunkten stellen die Ergebnisse aus der Legionellen-Kultivierung dar [KBE 100 mL⁻¹].

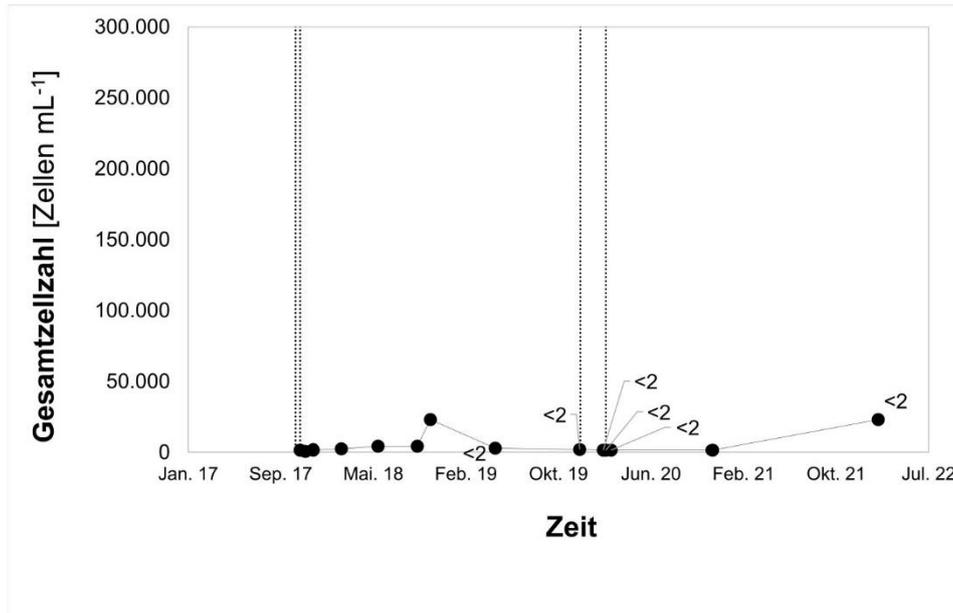


Abb. Hygiene am Ausgang der Ultrafiltrationsanlage in der Kaltwasserzirkulation (UF-C-Kalt): GZZ (Zellen mL⁻¹) und Legionellenkonzentration (KBE 100 mL⁻¹). Die Werte an den Messpunkten stellen die Ergebnisse aus der Legionellen-Kultivierung dar [KBE 100 mL⁻¹].

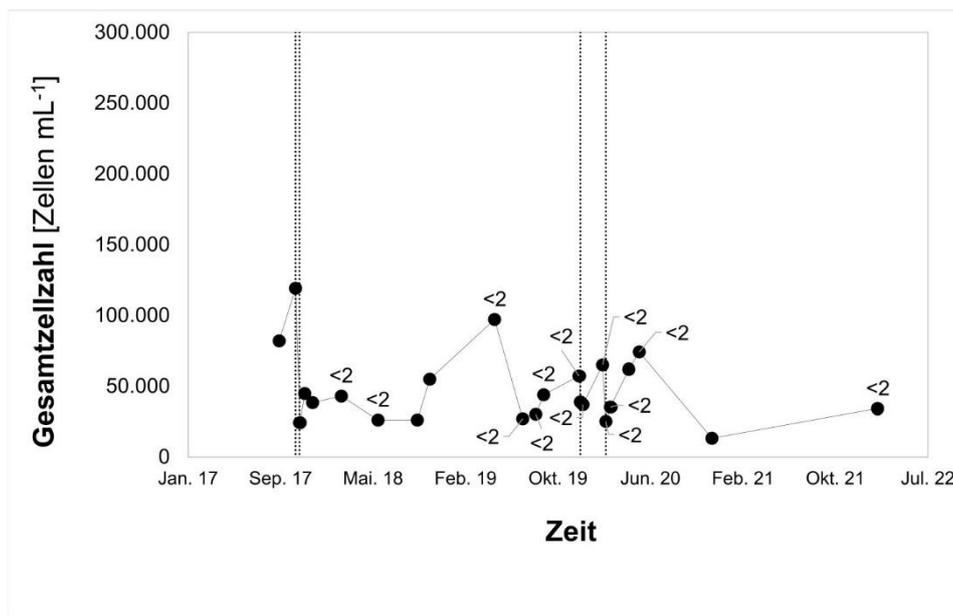


Abb. Hygiene im Rücklauf der Warmwasserzirkulation: GZZ (Zellen mL⁻¹) und Legionellenkonzentration (KBE 100 mL⁻¹). Die Werte an den Messpunkten stellen die Ergebnisse aus der Legionellen-Kultivierung dar [KBE 100 mL⁻¹].

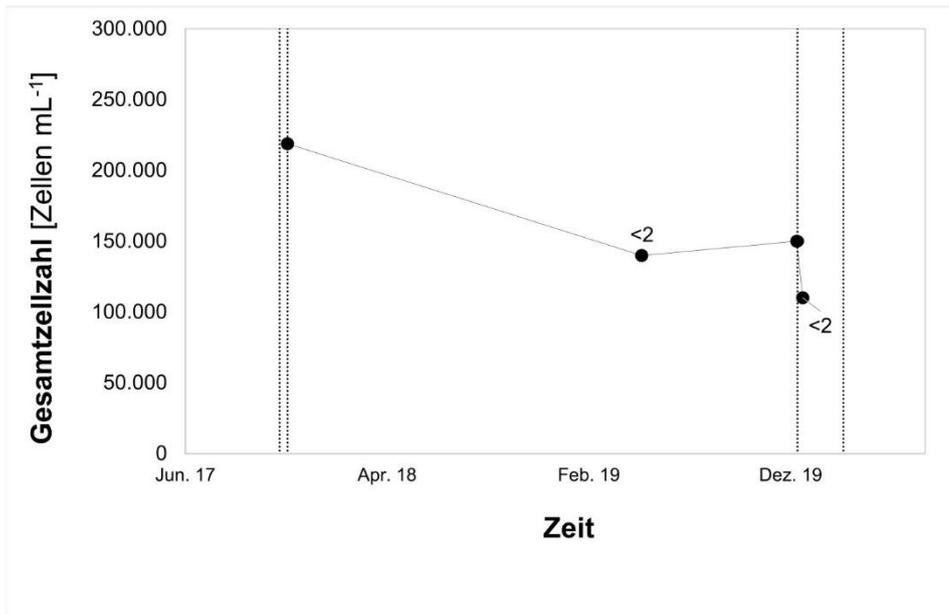


Abb. Hygiene im Rücklauf der Kaltwasserzirkulation: GZZ (Zellen mL⁻¹) und Legionellenkonzentration (KBE 100 mL⁻¹). Die Werte an den Messpunkten stellen die Ergebnisse aus der Legionellen-Kultivierung dar [KBE 100 mL⁻¹].

A5. Modellausschnitte des iModelers.

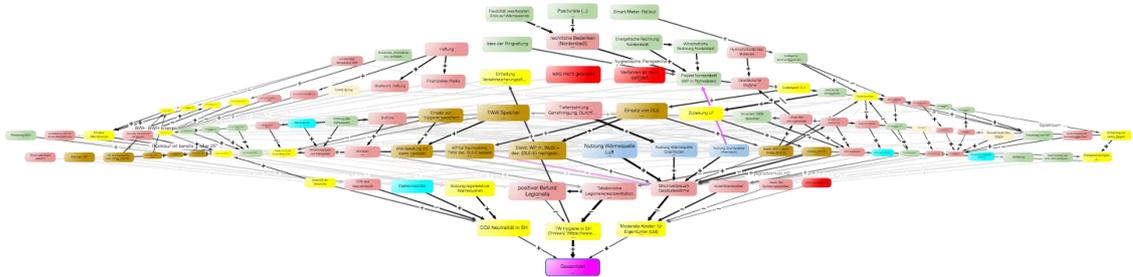


Abb. Gesamtansicht des Modells.

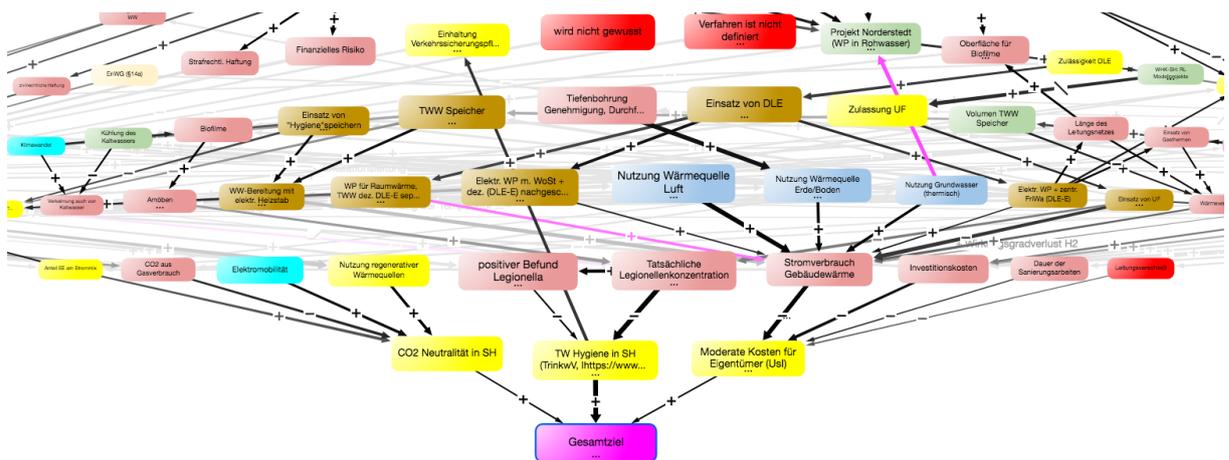


Abb. Ansicht aus dem Faktor „Gesamtziel“.

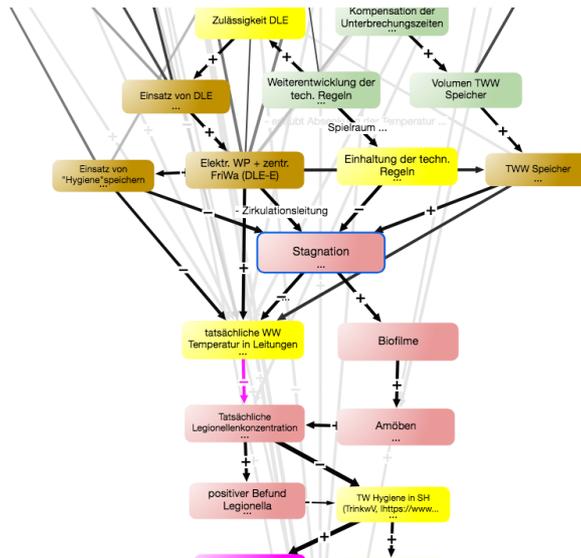


Abb. Ansicht aus dem Faktor „Stagnation“.

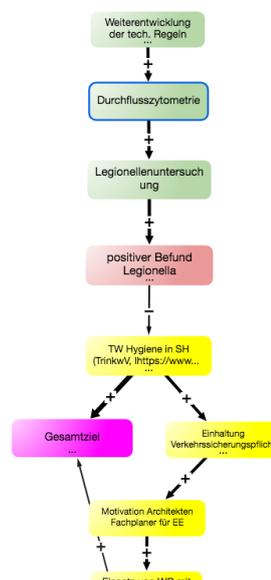


Abb. Ansicht aus dem Faktor „Durchflusssyztometrie“.

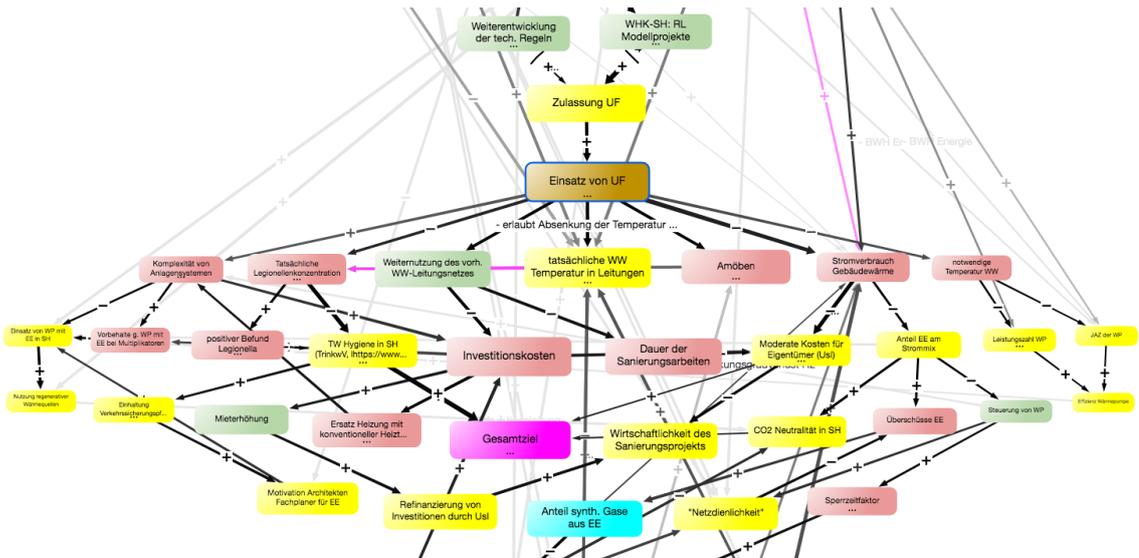


Abb. Ansicht aus dem Faktor „Einsatz von Ultrafiltration“.

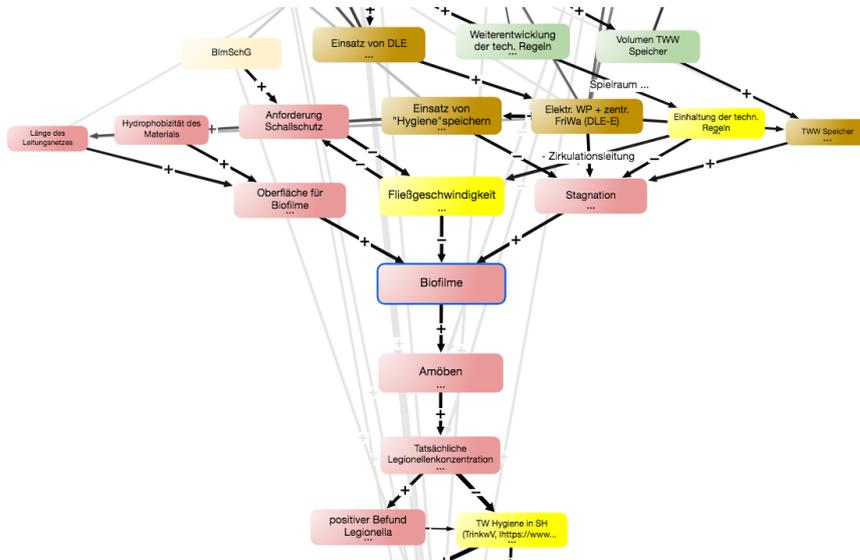


Abb. Ansicht aus dem Faktor „Biofilme“.

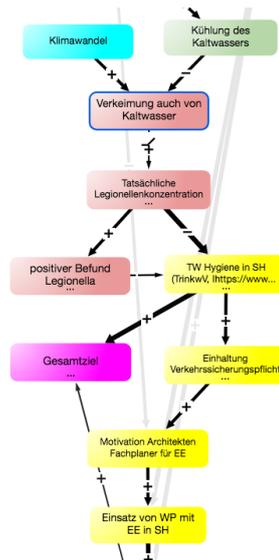


Abb. Ansicht aus dem Faktor „Verkeimung auch im Kaltwasser“.

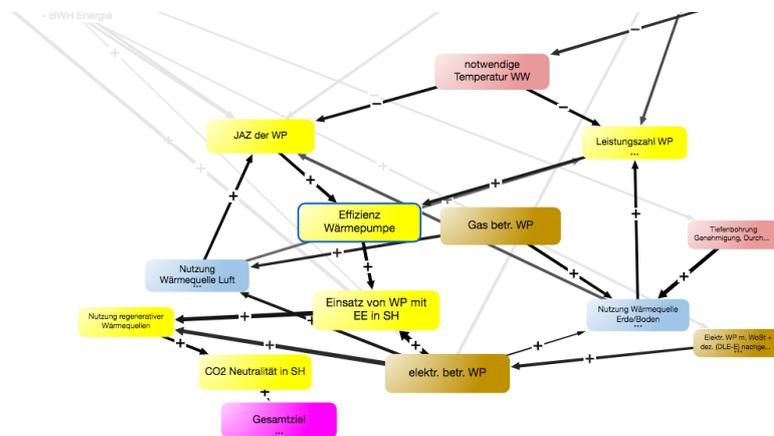


Abb. Ansicht aus dem Faktor „Effizienz Wärmepumpe“.



Abb. Ansicht aus dem Faktor „EnWG (§14a)“.

A6. Publikationen im Rahmen des Projekts

[1] Titel:

Betriebliche Hürden für die Installation von Wärmepumpen: Eine explorative Analyse

Inhalt:

Basierend auf Experteninterviews und einer Stichprobenbefragung wurden betriebliche relevante Faktoren für den Wärmepumpeneinbau aufgedeckt. Diese Faktoren betreffen Erfahrungen, Umschulungen, Umsätze und das Vorhandensein von Fachkräften sowie Schall- bzw. Abstandsregelungen, die Netzstabilität lokaler Stromnetze sowie die Sicherstellung der Trinkwasserhygiene. Anhand einer statistischen Analyse wurden Hürden und entsprechende Lösungsansätze beschrieben.

[2] Titel:

Installation of an ultrafiltration plant in a multi-family house to reduce the hot-water temperature and energy demand: A case study in Germany. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.105898>

Inhalt:

Eine Fallstudie eines Mehrfamilienhauses wird vorgesehlt. In der Warmwasserzirkulation der Trinkwasserinstallation wurde eine Ultrafiltrationsanlage installiert, die Mikroben aus dem System physikalisch abtrennt. Die Temperatur des Warmwassers wurde um 5°C abgesenkt, um den Energiebedarf zu senken. Das Einsparpotential wurde anhand eines statischen Modells berechnet und für Deutschland hochgerechnet.

[3] Titel: **Betriebliche Hürden für die Installation von Wärmepumpen: Eine explorative Analyse**

(angehängt)

[4] Titel: **Absenkung der Warmwassertemperatur in Trinkwasserinstallationen zur Erhöhung der Energieeffizienz von Wärmepumpen im Gebäudesektor**

(angehängt)

Betriebliche Hürden für die Installation von Wärmepumpen: Eine explorative Analyse

Genuardi M. D.¹⁾, Schiller F.¹⁾, Wiegand M.¹⁾, Opel O.¹⁾, Warszta T.¹⁾

¹⁾FH Westküste, ITE, Markt 18, 25746 Heide, Genuardi, genuardi@fh-westkueste.de, 0481 123769 45

Kurzfassung

Insbesondere die Umrüstung von Bestandsgebäuden auf Wärmepumpen schreitet unzureichend voran, um die Energiewende umzusetzen. Eine explorative Analyse wurde anhand von qualitativen Experteninterviews und einer anschließenden quantitativen Befragung an Fachunternehmen des Sektors durchgeführt. Es wurden Hürden für den Wärmepumpeneinsatz aufgedeckt, die Fachunternehmen daran hindern könnten, diese einzuplanen. Beispielsweise kann der Umsatz von Wärmepumpen für einige Heizungstechnikunternehmen unterschiedlich finanzielle Bedeutung haben. Generell wurden mit Wärmepumpen gute Erfahrungen gemacht, allerdings ist der Fachkräftemangel in allen Branchen bereits deutlich wahrnehmbar. Es scheint, kaum planerische Hürden für Wärmepumpen zu geben. Lediglich Schallschutzbedingungen und Abschaltzeiten, die auf Wärmepumpentarife zurückzuführen sind, könnten künftig an Relevanz gewinnen.

Schlagworte

Wärmewende, Gebäudesektor, Wärmepumpen, KMU Technologieakzeptanz, Fachkräftemangel, Umfrageergebnisse

1 Einleitung

Bis 2030 muss eine Wärmepumpenlücke von bis zu 4 Mio. Wärmepumpen geschlossen werden, damit die Energiewende in Deutschland umsetzbar bleibt [1]. Die Umrüstung von Gebäuden auf Wärmepumpen schreitet jedoch bisher trotz bestehender Förderprogramme für Sanierungen und Modernisierungen nur unzureichend voran. Während Wärmepumpen in 50,6% der im Jahre 2021 fertiggestellten Wohngebäude als primäre Heizung eingebaut wurden [2], betrug ihr Anteil am Bestand mit 1,2 Mio. Wärmepumpen nur rund 5,6% [3]. Fachunternehmen müssen dafür Umrüstungskonzepte entwickeln und ausführen. Sie nehmen folglich eine entscheidende Rolle in der Energiewende ein und verfügen aus erster Hand über Erfahrungen mit Wärmepumpen.

In dieser Arbeit werden anhand von qualitativen Experteninterviews und einer anschließenden quantitativen Befragung des Wärmesektors Hürden identifiziert, die Fachunternehmen daran hindern könnten, Gebäude auf Wärmepumpen umzurüsten.

2 Material und Methoden

2.1 Leitfadengestützte Experteninterviews

Es wurde die Methode des narrativen Interviews angewandt [4-5]. Folglich war der Verlauf der Interviews offen, sodass die interviewten Personen zum Erzählen angeregt wurden. Dabei diente ein Leitfaden dazu, situative Umformulierungen der Fragen durch gegenseitige

Einflussnahme zu vermeiden [6]. Die Gültigkeit der Interviews wurde durch eine branchenübergreifende Auswahl der Interviewpartner gewährleistet (Heizungstechnik, Kältetechnik, Forschung). Eine gegenseitige Einflussnahme der interviewten Personen bestand nicht. Im Anschluss an die Interviews erfolgte eine qualitative Inhaltsanalyse der Interviews durch mehrere Auswerter, um die Objektivität zu stärken [4].

2.2 Erstellung der Befragung

Für die anschließende Befragung wurden Fragen ausschließlich so formuliert, dass diese sich nur nominal oder ordinal interpretieren ließen [7-8]. Weitergehende (direkte) Ratingskalen wurden nicht angewandt. Die Möglichkeit der Enthaltung war gegeben. Die Gefahr zur Zustimmungstendenz [9] wurde reduziert, indem fünfwertige Skalen vorgegeben wurden [10-11]. Offene (kategoriale) Fragen ermöglichten ferner, die Fachunternehmen detaillierter zu beschreiben oder die Antworten zu spezifizieren. Die Befragungskategorie „Anzahl der verbauten Wärmepumpen pro Jahr“ könnte ein Indikator sein, wie intensiv sich Fachunternehmen bereits mit Wärmepumpen auseinandergesetzt haben. Die Kategorie „Durchschnittliche Heizleistung der geplanten Wärmepumpen“ impliziert, für welche Gebäudetypen vorwiegend geplant wird (Einfamilienhäuser, Mehrfamilienhäuser, Hochhäuser). Größere Gebäude benötigen i.d.R. Wärmepumpen mit höherer Heizleistung. Der Befragungsbogen wurde über das Portal „LimeSurvey“ erstellt und über die Verbände der Branchen verteilt. Die Umfrage lief von 01.11.2021 bis 14.02.2022.

2.3 Auswertung der Befragung

Die ordinalen Fragen wurden, wie bereits erwähnt, fünfstufig codiert (5: Höchste Zustimmung; 1: Höchste Ablehnung). Das Mittel (M) bzw. die Standardabweichung der Stichprobe (S) dienten dazu, die Branchen des Sektors zu vergleichen. Sie sind nicht als absolute Werte zu interpretieren. Die Stichprobengröße wurde jeweils mit „n“ angegeben.

Da die Bedingungen für einen Chi-Quadrat-Test nicht gegeben waren [12], wurden mögliche Abhängigkeiten zwischen den erhobenen Variablen über Zusammenhangsmaße berechnet. Dazu wurde Lambda (λ) und Goodman-Kruskal-Tau (τ) verwendet, die auf proportionaler Fehlerreduktion beruhen. Bei 0 sind die Variablen stochastisch unabhängig. Bei 1 kann die abhängige Variable vollständig durch die unabhängige Variable vorhergesagt werden. Lambda lässt sich umso genauer interpretieren, je regelmäßiger die Randverteilungen in der Kreuztabelle sind. Der Nachteil von Lambda ist, dass der Wert 0 angenommen werden kann, obwohl eine stochastische Abhängigkeit der Variablen besteht (z.B. wenn die abhängige/unabhängige Variable missinterpretiert wird). Um Fehlinterpretationen zu vermeiden, wird Goodman-Kruskal-Tau zusätzlich angegeben. Beide Maße werden auf gleicher Weise interpretiert und ähnlich berechnet. Goodman-Kruskal-Tau wird im Gegensatz zu Lambda nicht über den Modalwert der abhängigen Variablen [13], sondern über die Randverteilung berechnet [14]. Während bei Lambda ein Wert von beispielsweise 0,20 angibt, dass ein Vorhersagefehler mit Kenntnis des Zusammenhangs um 20% reduziert wird, bedeutet ein solcher Wert bei Goodman-Kruskal-Tau, dass der Zusammenhang um 20% besser vorhergesagt werden kann. Allgemein zeigen Werte von $<0,30$ einen nur schwachen Zusammenhang an. In den Sozialwissenschaften treten höhere Werte dennoch nur selten auf.

3 Ergebnisse

3.1 Erfassung der Stichprobe

Es gingen 200 gültige Fragebögen ein. Die Fachunternehmen stammten vorwiegend aus den Branchen Energieberatung (39%), Heizungstechnik (29%), und Fachplanung (14%) (**Abb. 1**).

Um die Branchenverteilung der Stichprobe zu bewerten, wurde eine Recherche durchgeführt. Gemäß deren Ergebnisse, wäre die Branche „Architektur“ in der Stichprobe stark unterrepräsentiert. Allerdings ist diese Branche kaum in Planung und Ausführung der Haustechnik eingebunden, was ggf. auch den geringen Rücklauf aus der Branche erklären könnte. Die Stichprobe erfüllt letztlich nicht die Kriterien der Repräsentativität, da sie zu klein ist. Zur Bewertung der Repräsentativität wurde die Gesamtpopulation anhand von Angaben entsprechender Verbände individuell für jede Branche abgeschätzt. Trotz fehlender Repräsentativität lassen

sich klare Tendenzen erkennen und entsprechende Aussagen ableiten.

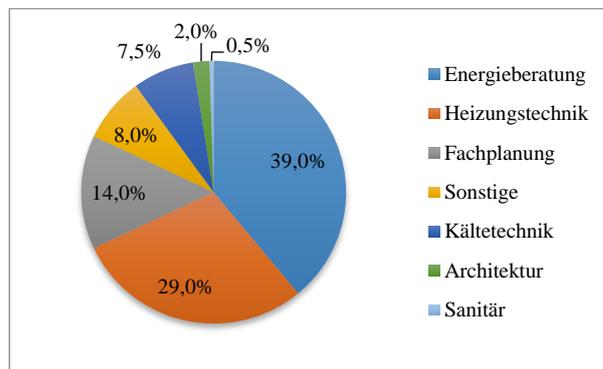


Abb. 1: Verteilung der Stichprobe nach Branche. Die Stichprobengröße beträgt 200. Im Zusammenhang mit „Sonstige“ (Branche) wurden von mehreren Befragten die Möglichkeit genutzt, weitergehende Angaben zu machen. Dabei wurde deutlich, dass die Befragten ihren Betrieb häufiger mehreren Branchen zurechneten. Wo derartige Angaben erfolgten, wurden diese statistisch berücksichtigt, indem die jeweiligen Antworten den genannten Branchen neu und ggf. gewichtet zugeordnet wurden.

Viele der Befragten konnten oder mochten keine klaren Grenzen zwischen den Branchen ziehen, wodurch sich viele der Gruppe „Sonstige“ zuordneten. Sofern die Befragten parallel die Möglichkeit nutzen, weitergehende Angaben zur Branchenzugehörigkeit zu machen, wurden diese Angaben berücksichtigt, sofern sie eindeutig waren. Die entsprechenden Antworten wurden dann nachträglich den genannten Branchen zugeordnet. Dies erfolgte ggf. mit Gewichtung. Bei zwei genannten Branchen (z.B. Fachplanung und Kältetechnik) wurden diese mit jeweils 0,5 gewichtet den angeführten Branchen zugeordnet. Alternativ blieb die Zuordnung zu „Sonstige“ bestehen. Schließlich wurden die Branchen Kältetechnik, Sanitär und Architektur in die (verbleibende) Gruppe „Sonstige“ integriert, da dies eine gleichmäßigere Randverteilung bei der Berechnung der Zusammenhangsmaße ermöglichte und die Zuverlässigkeit (Reliabilität) der Zusammenhangsmaße erhöht.

3.2 Betrieblich-ökonomische Hürden

Die Fachunternehmen bewerteten die Umsätze, die sie jeweils mit Wärmepumpen oder mit Verbrennungskesseln generieren. Die Ergebnisse in **Tab. 1** implizieren, dass einige Unternehmen in der Heizungstechnik, mit dem Verbrennungskessel einen höheren Umsatz als mit Wärmepumpen generieren.

Für Heizungstechnikunternehmen wurde ein Zusammenhang zwischen der Angabe zum Umsatz und der Anzahl verbauter Wärmepumpen pro Jahr detektiert ($\lambda=0,282$; $\tau=0,118$). Heizungstechnikunternehmen, die vergleichsweise weniger Wärmepumpen pro Jahr einbauen (<10 , <20 statt bis zu >100 Stück), gaben eher an, dass der Umsatz der Wärmepumpen geringer sei. Insgesamt fällt die gesamtübergreifende Stichprobengröße klein aus ($n=134$).

Tab. 1: Umsatz. Die Aussage konnte mit Werten von 1-5 von höchster Zustimmung(5) und höchster Ablehnung (1) bewertet werden.

Unser Unternehmen macht mit dem Verbrennungskessel mehr Umsatz als mit Wärmepumpen.							
Energieberatung		Heizungstechnik		Fachplanung		Alle	
n	M, S	n	M, S	n	M, S	n	M, S
33	2,40 ±1,273	57	3,06 ±1,390	24	1,88 ±1,036	134	2,47 ±1,353

Alle Branchen gaben an, mit Wärmepumpen eher gute Erfahrungen gemacht zu haben (**Tab. 2**).

Tab. 2: Erfahrungen. Die Aussage konnte mit Werten von 1-5 von höchster Zustimmung(5) und höchster Ablehnung (1) bewertet werden.

Wir haben generell mit Wärmepumpen gute Erfahrungen gemacht.							
Energieberatung		Heizungstechnik		Fachplanung		Alle	
n	M, S	n	M, S	n	M, S	n	M, S
68	3,86 ±1,006	58	3,62 ±1,191	29	3,99 ±1,000	181	3,82 ±1,171

Es wurde die Hypothese überprüft, ob die gemachten Erfahrungen mit der Wärmepumpen-Heizleistung zusammenhängen, die Fachunternehmen im Schnitt etwa einplanen. Leistungsstarke Wärmepumpen erfordern in der Regel eine aufwendigere Planung, da sie in der Regel mehrere Wohneinheiten bzw. ganze Quartiere versorgen. Diese Hypothese wurde jedoch widerlegt ($\lambda=0,058$; $\tau=0,016$). Dagegen konnte ein leichter Zusammenhang ($\lambda=0,162$; $\tau=0,061$) zwischen der Anzahl der Wärmepumpen, die die Betriebe pro Jahr planen, und den gemachten Erfahrungen ermittelt werden. Je mehr Wärmepumpen installiert werden, desto größer ist die Zustimmung zu guten Erfahrungen.

Die Umschulung der Mitarbeiter:innen erscheint den Akteuren generell unproblematisch (**Tab. 3**). Insgesamt fällt die gesamtübergreifende Stichprobengröße klein aus (n=143).

Tab. 3: Umschulung. Die Aussage konnte mit Werten von 1-5 von höchster Zustimmung(5) und höchster Ablehnung (1) bewertet werden.

Die Umschulung unserer Mitarbeiter:innen zur Wärmepumpentechnologie ist zu teuer und zeitaufwendig.							
Energieberatung		Heizungstechnik		Fachplanung		Alle	
n	M, S	n	M, S	n	M, S	n	M, S
42	2,24 ±0,756	55	2,34 ±1,077	24	1,97 ±0,999	143	2,17 ±0,957

3.3 Vorhandene Fachkräfte

Die Fachunternehmen geben an, dass sie zu wenige Bewerbungen potenziell neuer Mitarbeiter:innen bekommen (**Tab. 4**).

Tab. 4: Anzahl der Bewerbungen. Die Aussage konnte mit Werten von 1-5 von höchster Zustimmung(5) und höchster Ablehnung (1) bewertet werden. Aufgrund von Rundungsfehlern können die einzelnen Prozentanteile geringfügig von 100% abweichen. Es nahmen 78 Energieberater:innen, 58 Heizungstechniker:innen und 28 Fachplaner:innen teil.

Wir bekommen generell zu wenige Bewerbungen. Unser Handwerk braucht Fachkräfte.				
	Energieberatung	Heizungstechnik	Fachplanung	Alle
1	0%	1,8%	0%	0,6%
2	3,9%	1,8%	3,8%	3,1%
3	9,8%	8,8%	0%	8,0%
4	43,1%	19,3%	30,8%	30,2%
5	43,1%	68,4%	65,4%	58,0%

Neben der Anzahl der Bewerbungen wurde nach der Qualifikation der Bewerber:innen gefragt. Die Antworten legen nahe, dass die Qualifikation der Bewerber:innen für die Fachunternehmen nicht zufriedenstellend ist (**Tab. 5**).

Tab. 5: Qualifikation der Bewerber:innen. Die Aussage konnte mit Werten von 1-5 von höchster Zustimmung(5) und höchster Ablehnung (1) bewertet werden. Aufgrund von Rundungsfehlern können die einzelnen Prozentanteile geringfügig von 100% abweichen. Es nahmen 78 Energieberater:innen, 58 Heizungstechniker:innen und 28 Fachplaner:innen teil.

Es ist schwer für uns guten Nachwuchs zu bekommen. Unsere Bewerber:innen sind immer weniger qualifiziert.				
	Energieberatung	Heizungstechnik	Fachplanung	Alle
1	0%	0%	3,7%	0,6%
2	7,5%	3,5%	3,7%	4,8%
3	24,5%	26,3%	29,6%	22,4%
4	34,0%	22,8%	25,9%	30,9%
5	34,0%	47,4%	37,0%	41,2%

Neben der individuellen Betriebssituation wurde die Einschätzung der Befragten zur Situation in der gesamten Branche aufgenommen. Die Einschätzungen zur individuellen bzw. zur Branchensituation divergieren leicht (**Tab. 6**).

Die Fragestellungen zu den Fachkräften war das am stärksten befürwortete Thema mit der geringsten Standardabweichung in der gesamten Befragung.

Tab. 6: Branchensituation zum Fachkräftemangel. Die Aussage konnte mit Werten von 1-5 von höchster Zustimmung(5) und höchster Ablehnung (1) bewertet werden. Aufgrund von Rundungsfehlern können die einzelnen Prozentanteile geringfügig von 100% abweichen. Es nahmen 78 Energieberater:innen, 58 Heizungstechniker:innen und 28 Fachplaner:innen teil.

Ich glaube, die Bewerber:innen in der gesamten Branche sind immer weniger qualifiziert.				
	Energieberatung	Heizungstechnik	Fachplanung	Alle
1	1,7%	0%	0%	0,6%
2	15,5%	15,5%	20,7%	15,5%
3	32,8%	24,1%	24,1%	25,3%
4	36,2%	31,0%	27,6%	33,9%
5	13,8%	29,3%	27,6%	24,7%

3.4 Betrieblich-planerische Hürden

Luft/Wasser-Wärmepumpen weisen Schallleistungspegel auf, die bei der Planung aufgrund von Schallregelungen in z.B. Wohngebieten berücksichtigt werden müssen. Es liegt eine leichte Ablehnung in der Stichprobe vor, sodass die Schallleistungspegel generell unproblematisch erscheinen (**Tab. 7**).

Tab. 7: Schallregelungen. Die Aussage konnte mit Werten von 1-5 von höchster Zustimmung(5) und höchster Ablehnung (1) bewertet werden.

Luft/Wasser-Wärmepumpen stören die Nachbarschaft wegen ihrer Lautstärke.							
Energieberatung		Heizungstechnik		Fachplanung		Alle	
n	M, S	n	M, S	n	M, S	n	M, S
78	2,70 ±0,995	58	2,79 ±1,097	31	3,07 ±0,989	197	2,80 ±1,014

Nur in einigen Einzelprojekten könnten Schallregelungen einen planerischen Mehraufwand bedeuten. Es wurde geprüft, ob es in der Stichprobe einen Zusammenhang zwischen der Schallbedingung und der Wärmepumpen-Heizleistung gibt, die Fachunternehmen im Schnitt etwa einplanen. Höhere Heizleistungen sind in der Regel mit höheren Schallleistungspegeln verbunden. Es besteht allerdings kein maßgeblicher Zusammenhang ($\tau=0,038$). Lambda (λ) konnte an dieser Stelle nicht berechnet werden, da der asymptotische Standardfehler gleich Null war.

Im Gegensatz zu Luft/Wasser-Wärmepumpen, müssen bei Sole/Wasser-Wärmepumpen Erdwärmekollektoren in das Erdreich gelegt werden bzw. Erdwärmesonden in Bohrungen in den Untergrund gesetzt werden. Horizontale Erdwärmekollektoren benötigen viel Platz. Die Ergebnisse aus **Tab. 8** implizieren, dass Sole/Wasser-Wärmepumpen häufig mehr Fläche für Erdwärmekollektoren brauchen, als um ein Mehrfamilienhaus herum vorhanden ist.

Tab. 8: Erdwärmekollektoren. Die Aussage konnte mit Werten von 1-5 von höchster Zustimmung(5) und höchster Ablehnung (1) bewertet werden.

Sole/Wasser-Wärmepumpen brauchen häufig mehr Fläche für die Erdwärmekollektoren als um ein Mehrfamilienhaus herum vorhanden ist.							
Energieberatung		Heizungstechnik		Fachplanung		Alle	
n	M, S	n	M, S	n	M, S	n	M, S
77	3,50 ±0,960	58	3,56 ±0,996	30	3,47 ±1,147	190	3,55 ±0,979

Wird eine Wärmepumpe eingeschaltet, wird dem lokalen Stromnetz eine kurzzeitig auftretende hohe Leistungsnachfrage (Lastspitze) angerechnet. Die Stichprobe erscheint unstimmtig, ob Lastspitzen ein Problem darstellen können (**Tab. 9**). Leistungsstarke Wärmepumpen verursachen wegen ihrer höheren Heizleistungen stärkere Lastspitzen. Werden Zusammenhangsmaße zwischen den vornehmlich geplanten Heizleistungen und der Lastspitzen-Fragestellung berechnet, fallen die Ergebnisse nur in Hinblick auf die Lastspitzenproblematik als abhängige Variable eindeutig aus (signifikant, $p < 0,05$; $\lambda = 0,128$).

Tab. 9: Lastspitzen. Die Aussage konnte mit Werten von 1-5 von höchster Zustimmung(5) und höchster Ablehnung (1) bewertet werden.

Die Lastspitzen von großen Wärmepumpen stellen ein Problem dar.							
Energieberatung		Heizungstechnik		Fachplanung		Alle	
n	M, S	n	M, S	n	M, S	n	M, S
59	3,02 ±1,086	51	3,20 ±1,056	28	3,22 ±1,386	161	3,08 ±1,162

Betreibende von Elektrizitätsverteilernetzen können mit Letztverbrauchende Nutzungsverträge abschließen, in denen ein reduziertes Entgelt berechnet wird. Die Akteure der Stichprobe gaben an, dass Wärmepumpentarife, oft nicht ausreichend formuliert sind und gesetzliche Regelungen notwendig sind (**Tab. 10**).

Tab. 10: Wärmepumpentarife. Die Aussage konnte mit Werten von 1-5 von höchster Zustimmung(5) und höchster Ablehnung (1) bewertet werden.

Wärmepumpentarife sind oft nicht ausreichend ausformuliert. Gesetzliche Regelungen sollten klären, was alles aufgeführt werden muss.							
Energieberatung		Heizungstechnik		Fachplanung		Alle	
n	M, S	n	M, S	n	M, S	n	M, S
56	3,90 ±0,848	45	3,81 ±1,160	26	3,90 ±0,995	152	3,86 ±0,986

4 Diskussion

Eine Befragung wurde basierend auf leitfadengestützte Experteninterviews erstellt und in der Branche verteilt

(**Abb. 1**). Die Intention war die Aufdeckung von Hürden, die Fachunternehmen daran hindern könnten, Gebäude auf Wärmepumpen umzurüsten. Die Stichprobe erfüllt nicht die Kriterien der Repräsentativität, da die Stichprobengröße zu klein ist ($n=200$). Dennoch konnten aussagekräftige Schlussfolgerungen abgeleitet werden. Zu beachten ist, dass eine Verzerrung der Ergebnisse bestehen könnte, da Personen, die nicht an der Befragung teilnehmen wollten, eine systematische Unterscheidung gegenüber Teilnehmenden aufzeigen könnten.

Im Gebäudesektor hat der fossil betriebene Heizkessel noch unterschiedliche finanzielle Bedeutung für die einzelnen Branchen. Einzig Fachunternehmen aus der Heizungstechnik bejahten, dass solche Kessel derzeit immer noch mehr Umsatz als Wärmepumpen generieren (**Tab. 1**). Diese finanzielle Bedeutung könnte auf vertragliche Vereinbarungen zwischen Heizungstechnikunternehmen und Kesselhersteller zurückzuführen sein. Diese lassen sich jedoch nicht belegen. Ein anderer Grund könnte in den Wartungsroutinen der Kessel liegen, deren Zündmechanik regelmäßig gereinigt bzw. deren mechanische Bauteile ersetzt werden müssen. Weiterhin könnten betriebsinterne Abläufe bei fossil betriebenen Heizkesseln auch sehr effizient ausgelegt sein, sodass die Planung einer Wärmepumpe demgegenüber einen Mehraufwand für die Unternehmen bedeutet. Ein zusätzlicher Aufwand in Projekten könnte dazu führen, dass Fachunternehmen Erfahrungen mit Wärmepumpen als schlechter bewerten.

Allerdings zeigen die Umfrageergebnisse, dass alle Branchen (inklusive der Heizungstechnik) mit Wärmepumpen generell überdurchschnittlich gute Erfahrungen gemacht haben (**Tab. 2**). Der Ausdruck „gute Erfahrungen“ wurde nicht näher definiert. Da allerdings keine absolute Zustimmung ermittelt wurde, wurde die Hypothese überprüft, ob die gemachten Erfahrungen mit der installierten Heizleistung der Wärmepumpen zusammenhängen könnten. Leistungsstärkere Wärmepumpen erfordern in der Regel eine aufwendigere Planung, da sie meist mehrere Wohneinheiten bzw. ganze Wohnquartiere versorgen müssen. Die Hypothese wurde jedoch widerlegt ($\lambda=0,058$; $\tau=0,016$). Es ist davon auszugehen, dass sowohl für leistungsschwache als auch für leistungsstarke Wärmepumpen gute bis sehr gute Erfahrungen gemacht werden. Werden Wärmepumpen korrekt geplant, installiert und betrieben, sind hohe Effizienzgrade möglich [15]. Auffällig ist, dass ein leicht positiver Zusammenhang ($\lambda=0,162$; $\tau=0,061$) zwischen den gemachten Erfahrungen und der Anzahl der Wärmepumpen, die die Betriebe pro Jahr verbauen, besteht. Je mehr Wärmepumpen installiert werden, desto größer ist die Zustimmung zu der Aussage, dass die damit gemachten Erfahrungen gut seien. Allerdings könnten Akteure einseitig vorgeprägt sein, da kritische Fälle ohnehin schon ohne Wärmepumpe ausgestattet werden, und sich die guten Erfahrungen lediglich auf unbedenk-

liche Installationsvorhaben beziehen. Umgekehrt machen Fachunternehmen, die weniger Wärmepumpen im Jahr verbauen, auch weniger gute Erfahrungen. Mögliche Ursachen könnten sein, dass diesen Betrieben die nötige technische Kompetenz fehlt oder die für problemlose Installationen notwendige Lernprozesse auf betrieblicher Ebene (Aus- und Fortbildungen) nicht hinreichend eingefordert oder unterstützt werden. Dem steht jedoch die Aussage entgegen, dass den Unternehmen die Umschulung von Mitarbeiter:innen generell unproblematisch erscheint (**Tab. 3**).

Dagegen schätzten die Unternehmen die Verfügbarkeit von qualifizierten Arbeitskräften mit den notwendigen Kompetenzen über alle Branchen des Wärmesektors hinweg als sehr kritisch ein. Beispielsweise besteht in der Energietechnik für Arbeitskräfte mit geringem Anforderungsprofil ein bundesweiter Mangel, da auf 100 offene Stellen nur 56 arbeitslose Fachkräfte zur Verfügung stehen [16].

Zudem wurde gefragt, ob die Unternehmen selbst einen Fachkräftemangel verspüren. Dies wird von allen Branchen bejaht (**Tab. 4**). Zugleich ist dies das am stärksten befürwortete Thema mit der deutlichsten Zustimmung und der geringsten Standardabweichung in der Befragung. Ein verstärkender Faktor des Fachkräftemangels im betrachteten Sektor könnte zudem die Akademisierung von Ausbildungsberufen sein. Zu dem allgemeinen Mangel an Fachkräften, trotz anerkannter Relevanz der Branche, könnte beitragen, dass die allgemeinen Studienanfängerquoten seit 2000 von 33,3% auf 54,8-58,5% gestiegen sind [17]. Diese Personen könnten der Branche neben der demographisch bedingten Lücke zusätzlich als Fachkräfte fehlen. Studienabbruchquoten verbleiben in einem Bachelorstudium auf einem hohen Niveau von rund 28% [18]. Studienabbrecher:innen könnten andere Studiengänge wählen oder sich doch einer Berufsausbildung zuwenden. Doch die Befragung legt nahe, dass die Qualifikation der Bewerber:innen ohnehin nicht zufriedenstellend für die Fachunternehmen ist (**Tab. 5**). Die Einschätzung der individuellen Betriebssituation und der Branche divergieren bezüglich des Qualifikationsniveaus nur leicht. Der Mangel an Fachkräften wird im Hinblick auf die eigene Betriebssituation als noch dringlicher wahrgenommen als für die jeweilige Branche insgesamt. Diese Tendenz zeigt sich über alle befragten Branchen hinweg gleich (**Tab. 6**).

Besonders vom Fachkräftemangel betroffen ist das Handwerk. Gemäß einer Studie des Kompetenzzentrum Fachkräftesicherung gibt es seit dem Jahr 2015 mehr offene Stellen als arbeitslose Handwerker:innen. Im Jahr 2021 standen 201.411 Stellen nur 139.256 arbeitslose Handwerker:innen gegenüber. Sowohl auf Fachkräfte- als auch auf Meisterebene ist dabei der Bereich der Sanitär-, Heizungs- und Klimatechnik mit einer Fachkräftelücke von 12.977 Fachkräften bzw. 1.251 Meister:innen besonders betroffen [19]. Dies eröffnet

die Frage, ob entsprechende Schulungen für Arbeitssuchende Abhilfe schaffen könnten.

Neben diesen Problemen könnten auch planerische Hürden für den Wärmepumpeneinsatz bestehen. Die TA Lärm begrenzt die Gesamtbelastung durch Schallmissionen eines schutzbedürftigen Raumes [20]. Dabei gilt nicht die einzelne Schallquelle. Für allgemeine Wohngebiete gelten 55 db (A) im Tagbetrieb. Dabei ist zu beachten, dass sich der Schalldruckpegel mit zunehmendem Abstand verringert. Die Schallleistungspegel marktverfügbarer Luft/Wasser-Wärmepumpen können zwischen 45 und 78 db (A) für Heizleistungen bis 90 kW variieren. 44% der Geräte zeigen Pegel von 55-65 db (A). Unter 50 db (A) werden von nur 3% der Luft/Wasser-Wärmepumpen dargestellt [21]. Der Einfluss von Schallemissionen kann durch entsprechende Schallschutzmaßnahmen, wie z.B. die bauliche Behausung der Wärmepumpe, reduziert werden. Dabei ist zu beachten, dass die Entfernung zusätzlich eine Rolle einnimmt, da der Schalldruckpegel mit zunehmendem Abstand verringert wird. Abstände zu Nachbargrundstücke müssen eingehalten werden. Diese sind im Landesbaurecht definiert. Im Rahmen der Umfrage wurde gefragt, ob die Unternehmen die Schallleistungspegel von Wärmepumpen als problematisch ansehen. Dies wurde allerdings insbesondere von der Energieberatung sowie der Heizungstechnik verneint (**Tab. 7**). Es besteht die Möglichkeit, dass die Akteure einseitig vorgeprägt sind, da kritische Fälle zum Schall im vorneherein ohne Wärmepumpen geplant werden. Lediglich die Bewertung der Akteure aus der Fachplanung lässt den Schluss zu, dass es einzelne Projekte geben könnte, in denen die Schallregelungen relevant sein könnten. Schallleistungspegel hängen von der Wärmepumpen-Heizleistung ab. Es konnte in dieser Analyse jedoch kein maßgeblicher Zusammenhang zwischen der Fragestellung zum Schall und der Wärmepumpen-Heizleistung ermittelt werden ($\tau=0,036$). Folglich kann davon ausgegangen werden, dass Fachunternehmen mit den Schallemissionen der Wärmepumpen generell umgehen können.

Allerdings ist mit dem Markthochlauf der Wärmepumpe zu erwarten, dass in Wohngebieten mehr Wärmepumpen aufgestellt werden, sodass sich Gesamtschallbelastungen erhöhen könnten. Regelungen von Schallmissionen könnten demzufolge in den nächsten Jahren insbesondere in Reihenhäusern und/oder in dicht besiedelten Wohngebieten notwendig werden. Es sollte generell geklärt werden, wo Wärmepumpen aufgestellt werden dürfen. Gebäudedächer könnten in einigen Einzelfällen bereits durch Photovoltaik-Anlagen belegt werden. Schallemissionen sind bei Sole/Wasser-Wärmepumpen irrelevant. Im Gegenzug müssen Erdwärmekollektoren in das Erdreich gelegt werden bzw. Erdwärmesonden in Bohrungen in den Untergrund gesetzt werden. Horizontal verlegte Erdwärmekollektoren benötigen viel Fläche. Die Befragten gaben mit leichter Zustimmung an, dass diese häufig mehr Fläche

benötigen als um ein Mehrfamilienhaus herum vorhanden ist (**Tab. 8**). Erdwärmesonden werden senkrecht in die Erde gebracht. Bei den notwendigen Bohrungen sind Bohrabstände zu Nachbargrundstücken zu berücksichtigen. In einigen Bundesländern gibt es generelle Bohrtiefenbeschränkungen. In Sonderfällen müssen behördliche Auflagen zum Grundwasserschutz berücksichtigt werden [22].

Fachunternehmen müssen Wärmepumpen in vielen Fällen an lokale Stromnetze anbinden. Wird eine Wärmepumpe eingeschaltet, wird aus dem lokalen Stromnetz eine kurzzeitig hohe Leistungsnachfrage (Lastspitze) angefordert. Die Teilnehmer:innen der Umfrage wurde befragt, ob sie die Lastspitzen als problematisch wahrnehmen. Die Antworten tendierten jedoch zur Mitte und damit zur Indifferenz (**Tab. 9**). Da leistungsstarke Wärmepumpen auch stärkere Lastspitzen verursachen, wurde nach einem Zusammenhang mit Wärmepumpen-Heizleistung gesucht. Nur im Hinblick auf die Lastspitzenproblematik als abhängige Variable fallen die Ergebnisse eindeutig (signifikant, $p < 0,05$) aus ($\lambda=0,128$). Wenn Strom in Gebäudenähe produziert wird (Photovoltaik, Wind), müssen Wärmepumpen nicht ausschließlich aus lokalen Stromnetzen versorgt werden. Kosten- bzw. Amortisationsberechnungen sind für den Einzelfall zu ermitteln. Unklar ist aktuell noch, inwiefern lokale Stromnetze ausgebaut werden. Erfolgt dies nicht, können modulierbare Wärmepumpen zur Stromnetzstabilität beitragen, da starke Anlaufströme und Maximallasten vermieden werden. Modulierbare Wärmepumpen sind in der Regel teurer, setzen sich am Markt allerdings verstärkt durch. Eine Recherche zeigte jedoch, dass kaum modulierbare Wärmepumpen für Nennleistungen >25 kW auf dem Markt verfügbar sind.

Abschaltvereinbarungen können nützlich für die gesamtsystemische Effizienz und die Stromnetzstabilität sein. Diese sind im Gegensatz zu Wärmepumpentarifen vom Gesetzgeber vorgesehen. Aber Elektrizitätsverteilernetzbetreiber:innen können auch so mit Letztverbrauchenden Nutzungsverträge abschließen, in denen ein reduziertes Entgelt berechnet wird, wenn eine netzdienliche Steuerung zugelassen und bei Bedarf vollzogen wird. Es ist zu vermuten, dass Wärmepumpentarife mit dem Markthochlauf der Wärmepumpe an Bedeutung gewinnen werden [23]. Abschaltungen des Stroms können dann technisch über Pufferspeicher kompensiert werden, um den Wärmebedarf auch während einer Abschaltung zu decken. Wärmepumpentarife sollten folglich transparent gestaltet werden, damit Fachunternehmen Abschaltungen bemessen können. Die Unternehmen wurden gefragt, ob gesetzliche Regelungen klären sollten, was alles in Wärmepumpentarifen aufzuführen ist. Dies befürworteten alle Branchen (**Tab. 10**). Insofern scheint es geboten, zeitnah eine Strategie zu Abschaltzeiten im Rahmen eines Lastenmanagements seitens der Netzbetreibenden aufzustellen [24].

5 Zusammenfassung

Die Hürden, die Fachunternehmen beim Einbau von Wärmepumpen überwinden müssen, sind vielfältig. Die Überwindung dieser Hürden liegt nicht ausschließlich im Handlungsbereich der Fachunternehmen. Die Ergebnisse dieser explorativen Analyse implizieren, dass der Umsatz von Wärmepumpen für einige Heizungstechnikunternehmen unterschiedlich finanzielle Bedeutung haben kann. Alle Branchen geben an, mit Wärmepumpen generell eher gute Erfahrungen gemacht zu haben. Dabei besteht kein Zusammenhang zwischen diesen Erfahrungen und der Wärmepumpen-Heizleistung. Allerdings zeigte sich, dass je mehr Wärmepumpen installiert werden, desto besser die gemachten Erfahrungen sind. Die Umschulung der Mitarbeiter:innen erscheint allen Branchen des Wärmesektors unproblematisch. Allerdings wird die Verfügbarkeit von qualifizierten Arbeitskräften von allen Branchen sehr kritisch bewertet.

Aus planerischer Sicht scheint es, für die Umrüstung von Gebäuden auf die Wärmepumpe kaum Hürden zu geben. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass Fachunternehmen mit den Schallregelungen in Wohngebieten umgehen können. Weiterhin werden keine eindeutige Problematiken in den Lastspitzen der Wärmepumpen und die damit verbundene Stromnetzstabilität lokaler Netze erkennbar. Sollten Fachunternehmen künftig vermehrt mit Stromabschaltungen umgehen müssen, wird es für sinnvoll erachtet, dass gesetzliche Regelungen inhaltliche Vorgaben zu Wärmepumpentarifen machen. Durch angemessene Transparenz können Fachunternehmen aber gegebenenfalls Abschaltungen einplanen und technisch kompensieren.

6 Danksagung

Die Unterstützung der Gesellschaft für Energie und Klimaschutz Schleswig-Holstein GmbH (EKSH) wird gewürdigt.

7 Literaturverzeichnis

- [1] Fraunhofer IBP/IWES. Wärmewende 2030: Schlüsseltechnologien zur Erreichung der mittel- und langfristigen Klimaschutzziele im Gebäudesektor: Studie im Auftrag von Agora Energiewende. https://static.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2016/Sektoruebergreifende_EW/Waermewende-2030_WEB.pdf (2017).
- [2] Statistisches Bundesamt. (2022, 2. Juni). *Mehr als die Hälfte der im Jahr 2021 gebauten Wohngebäude heizen mit Wärmepumpen: Pressemitteilung Nr. 226 vom 2. Juni 2022.* https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2022/06/PD22_226_31121.html
- [3] Bundesverband der Deutschen Heizungsindustrie. (2022, 15. Juli). *Heizungsbestand 2021: Zeit, dass sich was tut! Pressemitteilung.* <https://www.bdh-industrie.de/presse/pressemeldungen/artikel/heizungsbestand-2021-zeit-dass-sich-was-tut>
- [4] Jäger, U. & Reinecke, S. (2009). Expertengespräch. In *Empirische Mastertechniken* (S. 29–76). Gabler Verlag, Wiesbaden. https://doi.org/10.1007/978-3-8349-8278-0_2
- [5] Schütze, F. (1983). Biographieforschung und narratives Interview. *Neue Praxis*, 13(3), 283–293.
- [6] Gläser, J. & Laudel, G. (2010). Eine umstrittene Entscheidung: Ein oder mehrere Interviewer? In VS Verlag für Sozialwissenschaften Wiesbaden (Hrsg.), *Lehrbuch. Experteninterviews und qualitative Inhaltsanalyse: als Instrumente rekonstruierender Untersuchungen* (4. Aufl.). VS Verlag.
- [7] Menold, N. & Bogner, K. (2015). *Gestaltung von Ratingskalen in Fragebögen*. Mannheim. GESIS Leibniz Institute for the Social Sciences (SDM-Survey Guidelines). https://doi.org/10.15465/gesis-sg_015
- [8] Lenzner, T. & Menold, N. (2015). *Frageformulierung*. Mannheim. GESIS Leibniz Institute for the Social Sciences (SDM-Survey Guidelines). https://doi.org/10.15465/gesis-sg_017
- [9] Bogner, K. & Landrock, U. (2015). *Antwortendenzen in standardisierten Umfragen*. Mannheim. GESIS Leibniz Institute for the Social Sciences (SDM-Survey Guidelines). https://doi.org/10.15465/gesis-sg_016
- [10] McBride, L. & Moran, G. (1967). Double agreement as a function of item ambiguity and susceptibility to demand implications of the psychological situation. *Journal of Personality and Social Psychology*, 6(1), 115–118. <https://doi.org/10.1037/h0024533>
- [11] Trott, D. M. & Jackson, D. N. (1967). An experimental analysis of acquiescence. *Journal of Experimental Research in Personality*, 2(4), 278–288. <https://psycnet.apa.org/record/1968-08972-001>
- [12] Klemm, E. (2002). Zusammenhangsanalyse in Kreuztabellen. In: Einführung in die Statistik. VS Verlag für Sozialwissenschaften. https://doi.org/10.1007/978-3-322-83376-1_15

- [13] Backhaus, K.; Erichson, B.; Gensler, S.; Weiber, R.; Weiber, T. (2002). Kontingenzanalyse. In: Multivariate Analysemethoden. Springer Gabler, Wiesbaden. https://doi.org/10.1007/978-3-658-32425-4_6
- [14] Klemm, E. (2002). Assoziationsmaße für nominale Merkmale in Kreuztabellen. In: Einführung in die Statistik. VS Verlag für Sozialwissenschaften. https://doi.org/10.1007/978-3-322-83376-1_15
- [15] Miara M., Günther D., Langner R., Helmling S., Wapler J. (Hrsg) (2017) 10 years of heat pumps monitoring in Germany. Outcomes of several monitoring campaigns. From low-energy houses to unretrofitted single-family dwellings.
- [16] Lutz C., Becker L., Lehr U. (2018) Mögliche Engpässe für die Energiewende; GWS Research Report 2018/08, Osnabrück. <https://www.gws-os.com/de/publikationen/gws-research-reports/detail/2018-moegliche-engpaesse-fuer-die-energiewende>
- [17] Statistisches Bundesamt (2020a) Bildung und Kultur; Schnellmeldungsergebnisse der Hochschulstatistik zu Studierende und Studienanfänger/-innen - vorläufige Ergebnisse - https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Bildung-Forschung-Kultur/Hochschulen/Publikationen/Downloads-Hochschulen/schnellmeldung-ws-vorl-5213103238004.pdf?__blob=publicationFile
- [18] Heublein, U. & Schmelzer, R. (2018) Die Entwicklung der Studienabbruchquoten an den deutschen Hochschulen; Berechnungen auf Basis des Absolventenjahrgangs 2016. <https://idw-online.de/en/attachmentdata66127.pdf>
- [19] Malin, L. & Hickmann, H. (2022) Fachkräftemangel und Ausbildung im Handwerk. KOFA Kompakt 5/2022. https://www.kofa.de/media/Publikationen/KOFA_Kompakt/Fachkraeftemangel_und_Ausbildung_im_Handwerk.pdf
- [20] TA Lärm. (2017). *Sechste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz: Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm - TA Lärm. Geändert durch Verwaltungsvorschrift vom 01.06.2017 (BAnz AT 08.06.2017 B5).*
- [21] Dott, R.; Afjei, T.; Hafner, G. (2014). Stadtverträgliche Luft/Wasser-Wärmepumpen als Hauptwärmeerzeuger. Vorab-Onlinepublikation. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4378.0005>
- [22] Bundesverband Wärmepumpe e.V. (2016). *Leitfaden Erdwärme: Grundlagen und Praxistipps.* https://www.waermepumpe.de/uploads/tx_bcp_ageflip/2016_Leitfaden_Erdwaerme_dritte_Auflage_web.pdf
- [23] Becker, M.; Hobert, A.; Müller, T.; Wintzek, P.; Zdrallek, M.; Knoll, C.; Boden, E. (2020). *Nutzen des Sperrzeitenmodells für Wärmepumpen zur Minimierung der Belastung zukünftiger Stromnetze am Beispiel eines realen Ortsnetzes.*
- [24] Becker, M.; Jung, D.; Wintzek, P.; Müller, T.; Zdrallek, M. (2021). Rechtliche Rahmenbedingungen zur Anwendung von Sperrzeiten bei Wärmepumpen für die Integration in ein Lastmanagement. *Zeitschrift für Energiewirtschaft*, 45(4), 271–285. <https://doi.org/10.1007/s12398-021-00310-3>

Absenkung der Warmwassertemperatur in Trinkwasserinstallationen zur Erhöhung der Energieeffizienz von Wärmepumpen im Gebäudesektor

Genuardi M. D.¹⁾, Wiegand M.¹⁾, Opel O.¹⁾¹⁾FH Westküste, ITE, Markt 18, 25746 Heide, Genuardi, genuardi@fh-westkueste.de, 0481 123769 45

Kurzfassung

Die Warmwasserbereitung senkt die Wärmepumpeneffizienz. Hohe Systemtemperaturen sind zur thermischen Desinfektion gegen pathogene Mikroorganismen gefordert. Über einen empirischen Datensatz wird die Hypothese aufgestellt, dass die Ultrafiltration eine Absenkung der Warmwassertemperatur zulassen kann, wenn zusätzliche Einflussfaktoren eingehalten werden. Beispielsweise muss der hydraulische Abgleich vorliegen, was den Anteil kontaminierter Trinkwasserinstallationen um rund 12% senkt. Zudem scheint Wasser vorwiegend in den Endleitungen zu stagnieren. Dadurch wird mikrobiologisches Wachstum gefördert und lokale Kontaminationen entstehen. Durch Verhindern dieser mikrobiologischen Ausschläge, z.B. durch automatisierte Hygienespülungen, wird der Anteil kontaminierter Installationen um rund 22,4% verkleinert. Eine Erhöhung des Ablaufvolumens auf 3-5 L bei der Probenahme könnte Abhilfe schaffen.

Schlagworte

Warmwasserbereitung, Energieeinsparung, Trinkwasserhygiene, Ultrafiltration, Risikoabschätzung

1 Einleitung

Um die Energiewende in Deutschland umzusetzen, muss eine Wärmepumpenlücke von bis zu 4 Mio. Wärmepumpen bis 2030 geschlossen werden [1]. Es können hohe Effizienzgrade erreicht werden, wenn Wärmepumpen angemessen geplant, installiert und betrieben sind [2]. Der Fokus von Energiesparmaßnahmen lag bisher bei der Raumheizung, da sie rund 70% der benötigten Energie im europäischen Gebäudebestand ausmacht [3]. Die Warmwasserbereitung wurde vernachlässigt. Jedoch steigt ihr relativer Anteil am Gesamtenergiebedarf fortlaufend, da der Anteil anderer Segmente wie die Raumheizung stetig sinkt [4]. In modernen energieeffizienten Gebäuden ist der relative Anteil der Warmwasserbereitung auf 40-50% angestiegen [4-7].

Die Wärmepumpeneffizienz hängt maßgeblich von der Systemtemperatur ab, die für das Heizsystem benötigt wird. Niedrigere Systemtemperaturen führen zur Erhöhung der Energieeffizienz [4]. Für die Raumheizung kann eine Systemtemperatur von 35-36°C genügen, wenn Flächenheizungen genutzt werden [2]. Demgegenüber erfordert die Warmwasserbereitung 55°C, um die Trinkwasserhygiene einzuhalten [8]. Durch die hohen Temperaturen erfolgt eine thermische Desinfektion, um Kontaminationen durch pathogene Mikroorganismen wie *Legionella pneumophila* vorzubeugen [9].

Um die Trinkwasserhygiene bei abgesenkter Warmwassertemperatur abzusichern, bewerteten die Autoren den Einsatz der Ultrafiltration in einem realen Modellge-

bäude. Dazu wurde eine Ultrafiltrationsanlage in der Warmwasserzirkulation installiert und fungierte als mikrobiologische Barriere. Die Warmwassertemperatur wurde von 55°C auf 50°C reduziert, sodass in dem Gebäude mit 21 Wohnungen eine Energieeinsparung von über 7300 kWh a⁻¹ errechnet werden konnte [10].

Modellgebäude stellen nur einen Teil der realen Bedingungen dar. Um das Potenzial der Ultrafiltration zu Energieeinsparungen weitergehend zu bewerten, erfolgt in dieser Arbeit eine statistische Untersuchung eines empirischen Datensatzes. Es werden 1361 mikrobiologische Proben aus 204 realen Trinkwasserinstallationen ausgewertet. Neben der Ultrafiltration werden die signifikantesten Faktoren bestimmt, die auf die mikrobiologischen Verhältnisse in den Rohrleitungen wirken.

2 Material und Methoden

Der Datensatz umfasste 1361 Proben aus mikrobiologischen Routineuntersuchungen an 204 realen Trinkwasserinstallationen im Großraum Hamburg. Bei der Auswertung kann jedoch die Anzahl der Proben von 1361 abweichen, da Daten vereinzelt fehlen können. Die Methoden zur Probenahme und zur Bestimmung der *Legionella*-Konzentration wurden bereits publiziert [10] und entsprechen den technischen Normen [11,12]. Dementsprechend wurden die Probenahmestellen desinfiziert. *Legionella* species wurden unter Laborbedingungen über Kultivierungsmethoden quantifiziert. Gesamtzellzahlen wurden über die Durchflusszytometrie ausgezählt. Die Fluoreszenzfarbstoff-basierte Methode

wurde im Rahmen eines Drittmittelprojektes validiert [13]. In 14 der 204 erprobten Trinkwasserinstallationen wurden Ultrafiltrationsanlagen eingebaut (Abb. 1).

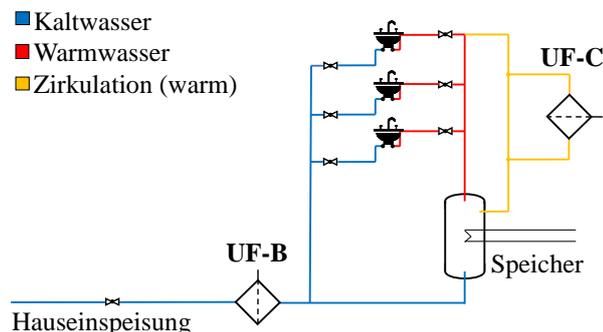


Abb. 1: Einbaumöglichkeiten von Ultrafiltrationsanlagen. Es ist eine zentrale Trinkwarmwasserbereitung dargestellt. Ultrafiltrationsanlagen können unmittelbar nach der Hauseinspeisung (UF-B) und/oder in der Warmwasserzirkulation im Bypass-Prinzip (UF-C) eingebaut werden.

Die Ultrafiltrationsanlagen befanden sich entweder unmittelbar nach der Hauseinspeisung (UF-B) oder in der Warmwasserzirkulation im Bypass-Prinzip (UF-C). In zehn Trinkwasserinstallationen ist eine UF-B verbaut, während zwei Installationen eine UF-C integriert haben. Zwei weitere Installationen enthalten sowohl eine UF-B als auch eine UF-C. In 190 Trinkwasserinstallationen befindet sich keine Ultrafiltrationsanlage. Die Bauweisen der UF-B sowie der UF-C sind nahezu identisch. Die UF-B filtert 100% des Volumenstromes. Die UF-C filtert nur etwa 70% des Volumenstroms, da ein Bypass-Prinzip vorliegt, um die hydraulischen Eigenschaften nicht wesentlich zu verändern.

3 Ergebnisse

3.1 Legionella-Konzentration und Gesamtzellzahl
 Während die Legionella-Konzentration nur Bakterien innerhalb dieser Gattung aufnimmt, umfasst die Gesamtzellzahl alle sich im Trinkwasser befindenden Zellen. Die 1361 Proben wurden auf beide Parameter hin überprüft (Abb. 2).

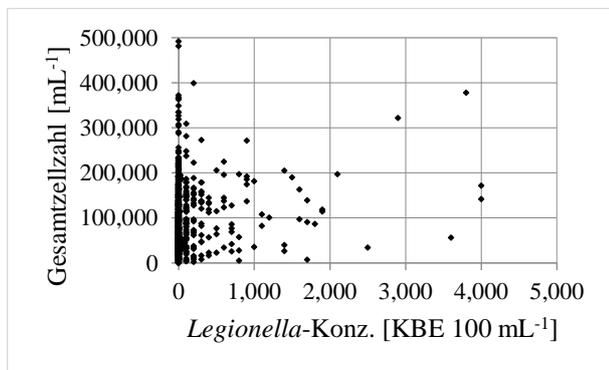


Abb. 2: Legionella-Konzentration und Gesamtzellzahl. Die Punkte stellen Proben dar, bei denen jeweils die Legionella-Konzentration und die Gesamtzellzahl bestimmt wurde. Aus Gründen der Übersicht wurden vereinzelt Messwerte über 500.000 Zellen mL⁻¹ und 5.000 KBE 100 mL⁻¹ entfernt.

Ein Punkt stellt eine Probe dar. Die Lage des Punktes zeigt die Legionella-Konzentration sowie die Gesamtzellzahl der Proben. Abb. 2 zeigt, dass keine Korrelation zwischen den beiden Messgrößen besteht. Der Anteil der Legionella an die Gesamtzellzahl scheint folglich stark zu variieren. In vielen Proben werden Legionella nicht nachgewiesen (0 KBE 100 mL⁻¹), wodurch in vielen Fällen keine Auswertung erfolgen kann. In dieser Arbeit werden beide Messgrößen abhängig von den Darstellungsmöglichkeiten angewandt.

3.2 Ultrafiltration von Trinkwasser

Der Einfluss der Ultrafiltration auf die Entnahmestellen wird überprüft. Trinkwasserinstallationen, die keine Ultrafiltrationsanlagen verbaut haben („Keine“), dienen als Referenz. Zunächst wird die Gesamtzellzahl an den Entnahmestellen (kalt) anhand von Box-Plots analysiert (Abb. 3). Die Größe n stellt die Anzahl der Proben dar.

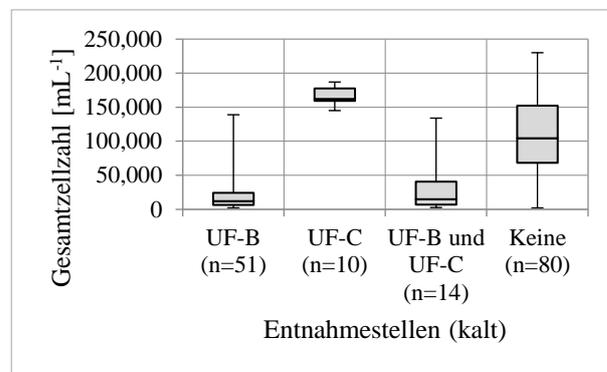


Abb. 3: Einfluss der Ultrafiltration auf die Entnahmestellen (kalt). Die Größe n stellt die Anzahl der Proben dar.

Die UF-B wirkt auf die Gesamtzellzahl an den Entnahmestellen (kalt), da sie sich unmittelbar nach der Hauseinspeisung befindet. An der Hauseinspeisung (n=36) liegt ein Median von 133.000 Zellen mL⁻¹ vor. Die UF-B reduziert den Median deutlich (<50.000 Zellen mL⁻¹).

Demgegenüber ist die UF-C auf der Warmwasserseite verbaut und sollte aus diesem Grund an den Entnahmestellen (warm) wirken (Abb. 4).

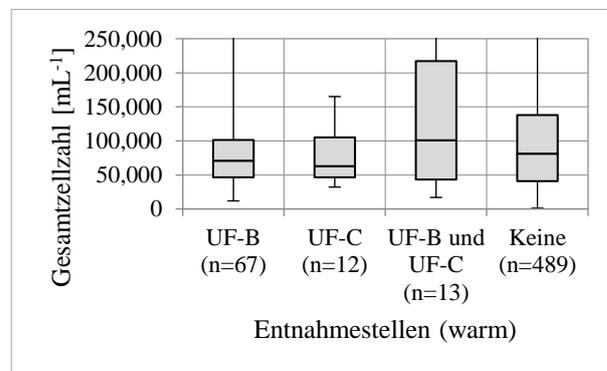


Abb. 4: Einfluss der Ultrafiltration auf die Entnahmestellen (warm). Die Größe n stellt die Anzahl der Proben dar.

Es ist kein Einfluss der UF-C auf die Entnahmestellen (warm) zu erkennen.

3.3 Temperatur und Stagnation

Jede Probe wurde auf ihre direkte Temperatur überprüft. Die Auswirkung der direkten Temperatur auf die Gesamtzellzahl ist in **Abb. 5** dargestellt.

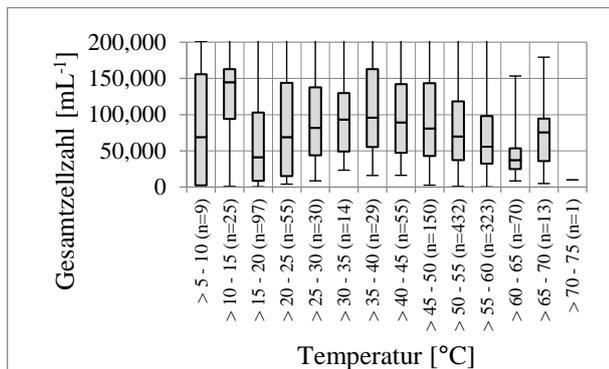


Abb. 5: Einfluss der direkten Temperatur auf die Gesamtzellzahl. Es handelt sich um die direkt gemessene Temperatur der Probe. Die Größe n stellt die Anzahl der Proben dar.

Es ergibt sich eine Kurve, die ein Maximum bei 35-40°C führt (Median: 96.000 Zellen mL⁻¹). Die Kurve zeigt Ausschläge (unter 15°C und über 65°C), die auf kleinere Stichprobengrößen (n) beruhen.

Bei der Probenahme wurde neben der direkten Temperatur, die konstante Temperatur gemessen. Dazu wurde solange Wasser abgezapft, bis sich eine konstante Temperatur festigte. Die Differenz der direkten und der konstanten Temperatur stellt die Temperaturänderung dar. Um den Einfluss der Temperaturänderung auf das mikrobiologische Wachstum an den Entnahmestellen zu überprüfen, muss die Gesamtzellzahl relativ betrachtet werden. Daher dient die Gesamtzellzahl am Warmwasserspeicher als Referenz und wird von der Gesamtzellzahl an den Entnahmestellen (warm) subtrahiert. In **Abb. 6** ist die Differenz der Gesamtzellzahl als Anreicherung [mL⁻¹] definiert.

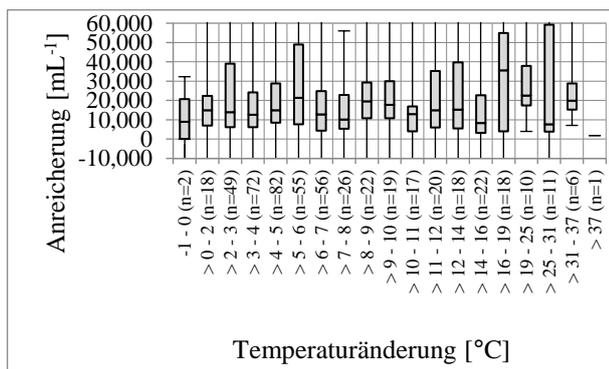


Abb. 6: Einfluss der Temperaturänderung auf die Gesamtzellzahl. Die Temperaturänderung [°C] stellt die Differenz der direkten und der konstanten Temperatur dar. Die Anreicherung [mL⁻¹] zeigt die Differenz zwischen der Gesamtzellzahl an der Entnahmestelle (warm) und der Gesamtzellzahl an dem Ausgang des Warmwasserspeichers. Die Größe n stellt die Anzahl der Proben dar.

Die Temperaturänderung zeigt keinen Einfluss auf die mikrobiologischen Verhältnisse an den Entnahmestellen (warm).

3.4 Hydraulischer und mikrobiologischer Abgleich

Die Trinkwasserinstallationen wurden auf ihren hydraulischen Abgleich bewertet. Die Bewertung erfolgt über Temperaturmessungen an mehreren Stellen der Trinkwasserinstallation. Der prozentuale Anteil von *Legionella*-Kontaminationen (Überschreitungen des technischen Maßnahmenwertes) sind in **Abb. 7** dargestellt. Da die Trinkwasserinstallationen spezifisch betrachtet werden, verändert sich die Größe n und zeigt nun die Anzahl der Trinkwasserinstallationen auf.

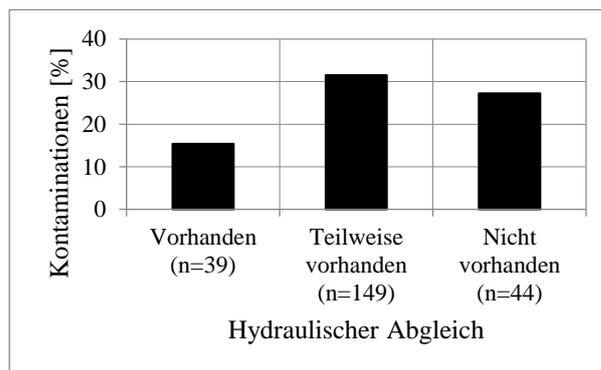


Abb. 7: Hydraulischer Abgleich und Legionella. Der hydraulische Abgleich wird über Temperaturmessungen ermittelt. Der Abgleich gilt als vorhanden, wenn die Speicherausgangstemperatur >60°C beträgt sowie wenn die Temperaturspreizung zwischen dem Speicherausgang und dem Zirkulationsrücklauf <5°C ist. Wird die Temperaturspreizung eingehalten, jedoch die Speicherausgangstemperatur nicht, liegt ein teilweiser Abgleich vor. Alle anderen Installationen sind nicht hydraulisch abgeglichen. Wird in einer Installation an mindestens einer Stelle der technische Maßnahmenwert für Legionella von 100 KBE 100 mL⁻¹ überschritten, gilt diese als kontaminiert. Die Größe n stellt die Anzahl der Trinkwasserinstallationen dar. 204 Trinkwasserinstallationen wurden erprobt (28 Doppelmessungen).

In 15,4% der hydraulisch abgeglichenen Trinkwasserinstallationen liegt mindestens eine Überschreitung des technischen Maßnahmenwertes für *Legionella* vor (n=39). Dieser Anteil liegt bei teilweise abgeglichenen und bei nicht abgeglichenen Installationen bei 31,5% und 27,3% (n=149 bzw. n=44).

Neben dem hydraulischen Abgleich wird in dieser Arbeit der mikrobiologische Abgleich definiert und bemessen (**Abb. 8**). In 16,8% der mikrobiologisch abgeglichenen Trinkwasserinstallationen liegt mindestens eine Überschreitung des technischen Maßnahmenwertes für *Legionella* vor (n=131). Dieser Anteil liegt bei nicht abgeglichenen Installationen bei 39,1% (n=110).

Bei dem hydraulischen Abgleich und dem mikrobiologischen Abgleich handelt es sich um zwei unabhängige Faktoren. Es besteht kein signifikanter Zusammenhang (**Abb. 9**).

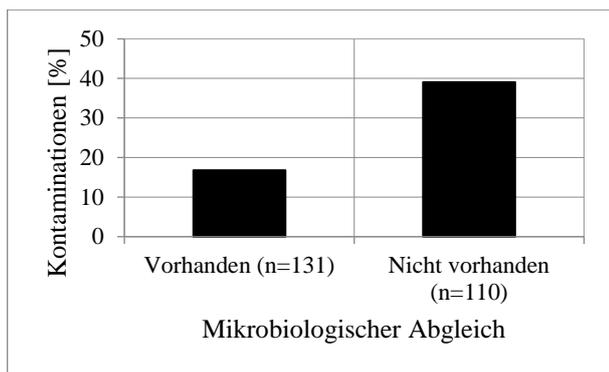


Abb. 8: Mikrobiologischer Abgleich und Legionella. Der mikrobiologische Abgleich wird über die Gesamtzellzahl ermittelt. Der Abgleich gilt als vorhanden, wenn die Gesamtzellzahl an den Entnahmestellen (warm) um <25% steigt. Als Referenz dient die Gesamtzellzahl am Speicherausgang. Wird in einer Installation an mindestens einer Stelle der technische Maßnahmenwert für Legionella von 100 KBE 100 mL⁻¹ überschritten, gilt diese als kontaminiert. Die Größe n stellt die Anzahl der Trinkwasserinstallationen dar. 204 Trinkwasserinstallationen wurden erprobt (37 Doppelmessungen).

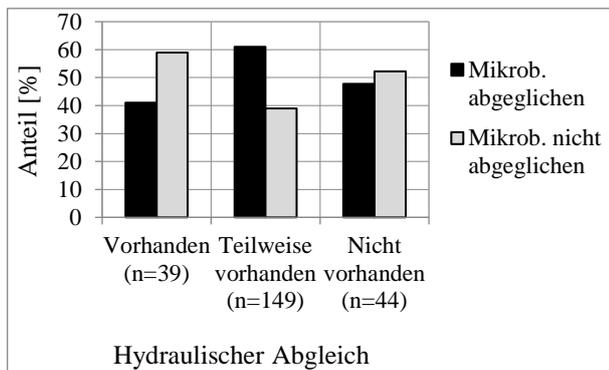


Abb. 9: Hydraulischer und mikrobiologischer Abgleich. Der hydraulische sowie mikrobiologischer Abgleich wurde über Temperaturmessungen und über die Gesamtzellzahl an verschiedenen Stellen in der Trinkwasserinstallation bestimmt. Die Größe n stellt die Anzahl der Trinkwasserinstallationen dar. 204 Trinkwasserinstallationen wurden erprobt (28 Doppelmessungen).

3.5 Ablaufvolumen der Probenahme

Es wird der Einfluss des Ablaufvolumens bei der Probenahme untersucht. **Abb. 10** zeigt Proben, die im System genommen wurden. Die Entnahmestellen sind nicht inkludiert. Die Größe n stellt die Anzahl der Proben dar.

Werden 1 L oder 0,1 L abgelassen, kommt es zu höheren Streuungen der Messdaten im System. Die Streuung verkleinert sich, wenn das Ablaufvolumen 3-5 L beträgt. Der Median liegt bei allen Ablaufvolumina etwa gleich (55.490, 53.150, 52.990 Zellen mL⁻¹).

Weitergehende Untersuchungen des Ablaufvolumens werden an den Entnahmestellen (kalt) durchgeführt. An gleicher Entnahmestelle wird zu gleicher Zeit bei 1 L sowie bei 3-5 L Ablaufvolumen getestet. Dadurch wird individuell für die Entnahmestelle überprüft, ob das Ablaufvolumen einen Einfluss auf Legionella-

Konzentrationen hat (**Abb. 11**). Die Größe n stellt die Anzahl der erprobten Entnahmestellen dar.

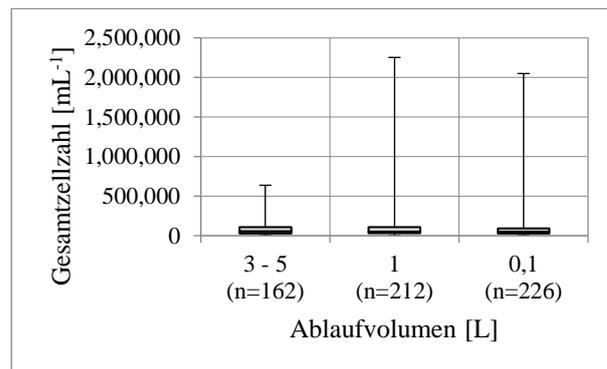


Abb. 10: Ablaufvolumen bei der Probenahme im System. Das System umfasst Proben an der Hauseinspeisung, am Austritt des Warmwasserspeichers, an Zirkulationsregelventilen sowie am Zirkulationsrücklauf. Die Größe n stellt die Anzahl der Proben dar.

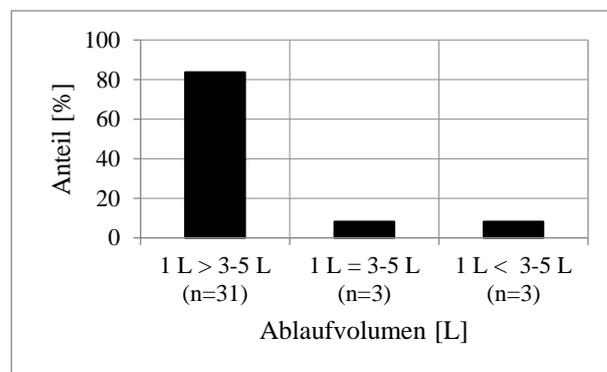


Abb. 11: Ablaufvolumen bei der Probenahme an den Entnahmestellen (kalt). An gleicher Entnahmestelle (kalt) wird zu gleicher Zeit bei 1 L sowie bei 3-5 L getestet. Es wird individuell überprüft, ob die Legionella-Konzentration größer, gleich oder kleiner wird, wenn das Ablaufvolumen auf 3-5 L erhöht wird. Die Größe n stellt die Anzahl der erprobten Entnahmestellen dar. 63 Entnahmestellen wurden erprobt. Bei 26 Entnahmestellen ergibt sich für beide Ablaufvolumina 0 KBE 100 mL⁻¹. Diese Wertepaare wurden in der Darstellung entfernt, da ohne Nachweis, kein Unterschied erkannt werden kann.

In 83,8% der Entnahmestellen (n=37) wird die Legionella-Konzentration reduziert, wenn das Ablaufvolumen von 1 L auf 3-5 L erhöht wird. Dies impliziert, dass Kontaminationen durch Legionella vermehrt an den lokalen Stellen zu finden sind.

Insgesamt sind die meisten Kontaminationen (Überschreitungen des technischen Maßnahmenwertes) an den Entnahmestellen zu finden (**Abb. 12**). Die Größe n stellt die Anzahl der Proben dar.

In 23,1% der Proben aus den Entnahmestellen kommt es zu einer Kontamination durch Legionella (n=706). Im System liegt der prozentuale Anteil der Kontaminationen bei 0,7% (n=571). In der Hauseinspeisung beträgt der Anteil 8,3% (n=36).

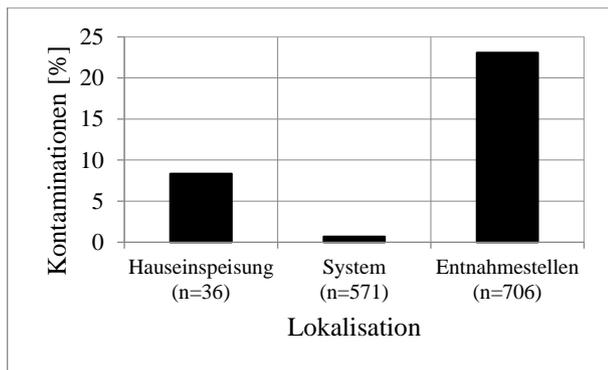


Abb. 12: Stelle der Kontaminationen/Überschreitungen des technischen Maßnahmenwertes. Eine Überschreitung des technischen Maßnahmenwertes liegt vor, wenn die Legionella-Konzentration 100 KBE 100 mL⁻¹ erreicht. Die Größe n stellt die Anzahl der Proben dar.

4 Diskussion

Eine Absenkung der Warmwassertemperatur führt zu einer Steigerung der Energieeffizienz von Wärmepumpen [4]. Durch die Temperaturabsenkung erhöht sich das Krankheitsrisiko, da die Vermehrung pathogener Mikroorganismen bei niedrigeren Temperaturen höher ausfällt [8]. Die Ultrafiltration könnte die Trinkwasserhygiene bei abgesenkten Warmwassertemperaturen absichern. Obwohl die Ultrafiltration bereits in der Abwasserbehandlung und -wiederverwendung Anwendung findet [14], ist ihr Einfluss auf die Hygiene in häuslichen Trinkwasserinstallationen unklar. In einem realen Modellgebäude konnte ihr Einsatz zwar erfolgreich dargestellt werden [10], allerdings können Modellgebäude sehr unterschiedliche Voraussetzungen mitführen. Um eine mögliche Fehlinterpretation für den Ultrafiltrationseinsatz in Trinkwasserinstallationen zu verhindern, wurde ihre Wirkungsweise anhand eines empirischen Datensatzes weitergehend untersucht.

Die mikrobiologische Bewertung der Proben erfolgte über die Legionella-Kultivierung und die Bestimmung der Gesamtzellzahl über die Durchflusszytometrie. Es wurde keine Korrelation zwischen diesen beiden Messgrößen detektiert (Abb. 2). Der relative Anteil der Legionella an der Gesamtzellzahl scheint, intensiv zu variieren. Die Weltgesundheitsorganisation gibt an, dass sich die mikrobiologische Trinkwasserqualität rapide verändern kann sowie kurzzeitige Spitzenwerte in der Konzentration einiger Mikroorganismen entstehen können, die ernste Gesundheitsrisiken darstellen [15]. Dabei befinden sich nur etwa 5% der Mikroorganismen im Trinkwasser, während 95% im Biofilm auftreten [16]. Eine umfassende Aufarbeitung der mikrobiologischen Gemeinschaft, die im Trinkwasser zu finden ist, steht noch aus. Legionella werden in vielen Trinkwasserproben nicht nachgewiesen, weshalb ihre Konzentration nicht immer zu Analysezwecken genutzt werden kann. Abhilfe schafft die Durchflusszytometrie, die die Gesamtzellzahl bestimmt.

Wird eine Ultrafiltrationsanlage unmittelbar nach der Hauseinspeisung verbaut (UF-B), werden Gesamtzellzahlen an den Entnahmestellen (kalt) erheblich reduziert. Während der Median bei der Hauseinspeisung 133.000 Zellen mL⁻¹ beträgt, liegt dieser bei den Entnahmestellen (kalt) deutlich unter 50.000 Zellen mL⁻¹ (Abb. 3). Auf der Warmwasserseite kann die Ultrafiltrationsanlage in der Warmwasserzirkulation eingebaut werden (UF-C). Jedoch wurde kein Einfluss der UF-C auf die Entnahmestellen (warm) detektiert (Abb. 4). Andere Einflussfaktoren scheinen im Warmwasser, stärker zu gewichten. Zum Ersten wird die UF-C in einem Bypass-Prinzip installiert (Abb. 2). Daher passiert nur etwa 70% des Volumenstroms die UF-C. Bei der UF-B werden 100% des Volumenstroms gefiltert. Zum Zweiten sind mikrobiologische Wachstumsraten bei Warmwassertemperaturen höher. Mikroorganismen vermehren sich schneller, wodurch die Stagnationszeit des Wassers eine größere Rolle einnimmt. Zum Dritten ist zu beachten, dass die statistische Genauigkeit bei der Analyse der Entnahmestellen (warm) geringer ausfällt. Nach dem besten Wissen der Autoren stehen in der Literatur keine vergleichbaren Analysen zur Verfügung, die an dieser Stelle herangezogen werden können. Es besteht eine Diskrepanz zwischen den Ergebnissen aus dem Modellgebäude [10] sowie den Ergebnissen dieser Datensatz-Analyse. Es wird daher die Hypothese aufgestellt, dass die Ultrafiltration zwar eine Absenkung der Warmwassertemperatur zulässt, jedoch müssen zusätzliche Einflussfaktoren eingehalten werden.

Die direkte Temperatur der Probenflüssigkeit hat einen Einfluss auf das Ergebnis. Gesamtzellzahlen sind bei mittleren Temperaturen höher (Abb. 5). Es entsteht eine Kurve, die im Temperaturbereich von 35-40°C ein Maximum erreicht (Mesophilie). Der Median beträgt in diesem Bereich 96.000 Zellen mL⁻¹. Die Kurve zeigt bei den kleinsten und größten Temperaturbereiche (<15°C, >65°C) Ausschläge. Diese könnten auf statistische Ungenauigkeiten zurückzuführen sein (kleine n).

Die Temperaturänderung wurde in dieser Analyse als Differenz der direkten und der konstanten Temperatur definiert, die während der Probenahme gemessen wurden. Sie dient als Indiz für den Dämmungsgrad der Rohre sowie für die Stagnationszeit des Wassers vor der Probenahme. Um die Auswirkung der Temperaturänderung auf die Gesamtzellzahl an den Entnahmestellen (warm) zu bewerten, muss diese relativ betrachtet werden. Die Gesamtzellzahl an der Entnahmestelle (warm) wurde mit der am Austritt des Warmwasserspeichers verrechnet. Somit wird die mikrobiologische Anreicherung beschrieben, die in den Warmwasserleitungen auftritt, bis die Entnahmestelle (warm) erreicht wird.

Die Temperaturänderung zeigte keine Auswirkung auf die Gesamtzellzahl an den Entnahmestellen (warm) (Abb. 6). Das kann einerseits bedeuten, dass die Abkühlung des Warmwassers auf niedrigere Temperaturen,

die Gesamtzellzahl nicht wesentlich verändert. Andererseits könnte die Stagnation des Wassers der bestimmende Einflussfaktor sein. Dem Datensatz ist der Zeitraum, wie lange das Wasser in den Rohrleitungen vor der Probenahme stand, nicht zu entnehmen. Eine Temperaturänderung von z.B. 10°C kann sowohl auf eine unzureichende Rohrdämmung als auch auf eine längere Standzeit des Wassers hindeuten. Mikrobiologisches Wachstum wird in der Regel exponentiell oder logistisch beschrieben. Populationsdynamiken sind Zeitabhängig. In Laboruntersuchungen werden verschiedene Nährmedien verwendet, um das Wachstum zu beschreiben. Exemplarisch kann die Verdopplungszeit von *Legionella* 4,1 h (42°C, YEB-Medium) [17], 13,0 h (45°C, MDM-Medium) oder 2,8 h (45°C, AYE-Medium) [18] betragen. Bei Verwendung von MDM- und AYE-Medium wurde bei einer Temperatur von 50°C kein Wachstum unter Laborbedingungen detektiert [18]. Laboruntersuchungen können jedoch nicht auf reale Bedingungen transferiert werden. *Legionella pneumophila* ist in der Lage bei 50°C im Biofilm auf synthetischen Oberflächen zu überleben [19]. Eine thermophile *Legionella*-Gemeinschaft konnte bei über 63°C überleben oder wachsen [20].

Ist der hydraulische Abgleich nicht oder nur teilweise vorhanden, kommt es in 27,3% (n=44) bzw. 31,5% (n=149) der Installationen zu mindestens einer Überschreitung des technischen Maßnahmenwertes von *Legionella*. Dieser Anteil kontaminierter Trinkwasserinstallationen wird auf 15,4% (n=39) reduziert, wenn der hydraulische Abgleich geschafft wird (**Abb. 7**). Trinkwasserinstallationen müssen hydraulisch abgeglichen sein, um angemessene Zirkulationsvolumenströme zu realisieren [8]. Bei fehlendem hydraulischem Abgleich kann es zu mikrobiologischen Beeinträchtigungen kommen, da eine unzureichende Durchströmung zur verstärkten Biofilmbildung führt [21]. Zudem werden kritische Temperaturbereiche erreicht, die das Wachstum der Mikroorganismen verstärken [22].

Neben dem hydraulischen Abgleich wurde in dieser Arbeit der mikrobiologische Abgleich definiert. Dieser ist vorhanden, wenn die Gesamtzellzahl an den Entnahmestellen (warm) um <25% steigt. Als Referenz dient die Gesamtzellzahl am Speicherausgang. Fehlt der mikrobiologische Abgleich, findet sich in 39,1% der Trinkwasserinstallationen (n=110) mindestens eine Überschreitung des technischen Maßnahmenwertes von *Legionella*. Dieser Anteil wird auf 16,8% (n=131) reduziert, wenn ein mikrobiologischer Abgleich vorliegt (**Abb. 8**). Dies impliziert, dass Überschreitungen des technischen Maßnahmenwertes in vielen Fällen durch mikrobiologische Ausschläge resultieren können. Mikrobiologische Ausschläge zeigen sich, wenn an den Entnahmestellen (warm) der Trinkwasserinstallation deutlich höhere Gesamtzellzahlen zu finden sind als am Austritt des Warmwasserspeichers (>25%). Die Ausschläge könnten durch lokal begrenzte Biofilme resul-

tieren. Zudem ist zu erwarten, dass Nutzer/innen von Entnahmestellen die mikrobiologischen Verhältnisse in den Endleitungen maßgeblich beeinflussen, da sie durch ihren Wasserverbrauch, die Stagnationszeit des Wassers steuern. Manuelle Spülpläne oder automatisierte Hygienespülungen könnten den mikrobiologischen Abgleich wieder herstellen. Der mikrobiologische Abgleich erscheint in keiner technischen Norm. Die Analyse zeigt jedoch, dass der mikrobiologische Abgleich von dem hydraulischen Abgleich abzugrenzen ist, da es sich um zwei unabhängige Faktoren handelt (**Abb. 9**).

Die technische Norm erfordert, dass vor der Probenahme 1 L Wasser abgelaufen wird [11]. Damit wird verhindert, dass Wasser beprobt wird, das sich innerhalb der Entnahmemarmatur befindet. Es zeigte sich in den Proben aus dem System eine hohe Streuung der Gesamtzellzahlen. Die Streuung wurde reduziert, wenn das Ablaufvolumen auf 3-5 L erhöht wurde. Dabei lag die eigentliche Messgröße (Gesamtzellzahl) etwa im gleichen Bereich (Median, 1. und 3. Quartil) (**Abb. 10**). Dieser Unterschied bei der Streuung könnte auf Ungenauigkeiten beim Vorgang der Probenahme zurückzuführen sein.

Die Entnahmestellen (kalt) wurden individuell auf ihr Ablaufvolumen geprüft. An gleicher Entnahmestelle wurde zu gleicher Zeit Proben bei 1 L und bei 3-5 L Ablaufvolumen entnommen. In 83,8% der Entnahmestellen (kalt) (n=37), wird die *Legionella*-Konzentration reduziert, wenn mehr Wasser abläuft (**Abb. 11**). Dies ist ein Indikator, dass eher lokale statt systemische Kontaminationen auftreten. Wasser, das sich in den Entnahmestellen und in den davorliegenden Endleitungen befindet, könnte für längere Zeiträume in den Rohrleitungen stagnieren. Dies bekräftigt die Ergebnisse zum mikrobiologischen Abgleich. Nutzer/innen scheinen einen wesentlichen Einfluss auf die Gesamtzellzahlen an den Entnahmestellen zu haben. Zudem zeigt die Analyse, dass die meisten Überschreitungen des technischen Maßnahmenwertes an den Entnahmestellen auftreten. In 23,1% der Proben aus den Entnahmestellen (n=706) kommt es zur Kontamination. Im System und in der Hauseinspeisung liegt der kontaminierte Anteil bei 0,7% (n=571) und 8,3% (n=36) (**Abb. 12**). In der Literatur liegt aktuell keine vergleichbare Analyse vor, die die Einflussfaktoren auf die Trinkwasserhygiene statistisch überprüft.

5 Zusammenfassung

Die mikrobiologischen Verhältnisse in Trinkwasserinstallationen stellen einen multifaktoriellen Sachverhalt dar. Über eine Datensatz-Analyse wird die Hypothese aufgestellt, dass die Ultrafiltration eine Absenkung der Warmwassertemperatur aus Energieeinspargründen zulassen kann. Allerdings müssen zusätzliche Faktoren eingehalten werden. Beispielsweise muss ein hydraulischer Abgleich vorliegen, was den Anteil kontaminierter Trinkwasserinstallationen um rund 12% senkt. Mikro-

biologische Ausschläge können an den Entnahmestellen und in den Endleitungen auftreten. Diese Ausschläge treten eher lokal auf und erhöhen den Anteil kontaminierter Installationen um 22,4%. Die Ausschläge könnten durch Stagnationszeiten entstehen, wenn Wasser für eine längere Zeit nicht gezapft wird. Dem Einfluss lokaler Kontaminationen könnte entgegen gewirkt werden, wenn das Ablaufvolumen bei der Probenahme von 1 L auf 3-5 L erhöht wird.

6 Danksagung

Die Unterstützung der Gesellschaft für Energie und Klimaschutz Schleswig-Holstein GmbH (EKSH) wird gewürdigt. Ein zusätzlicher Dank wird für Norbert Jürgen Puls, PPF Ingenieure UG, und für Dr. Martin Hippelein, Universitätsklinikum Schleswig Holstein (UKSH) für die kooperative Zusammenarbeit ausgedrückt. Ein Dank gilt auch dem Bauverein der Elbgemeinden eG. (BVE) und weiteren Wohnungsbaugenossenschaften für die Bereitstellung von Projektdaten.

7 Literaturverzeichnis

- [1] Fraunhofer IBP/IWES, Wärmewende 2030: Schlüsseltechnologien zur Erreichung der mittel- und langfristigen Klimaschutzziele im Gebäudesektor: Studie im Auftrag von Agora Energiewende, (2017). https://static.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2016/Sektoruebergreifende_EW/Waermewende-2030_WEB.pdf (letzter Zugriff am 20. Januar 2023).
- [2] M. Miara, D. Günther, R. Langner, S. Helmling, J. Wapler, 10 years of heat pumps monitoring in Germany. Outcomes of several monitoring campaigns. From low-energy houses to unretrofitted single-family dwellings, in: M. Miara, D. Günther, R. Langner, S. Helmling, J. Wapler (Eds.), 12th IEA Heat Pump Conf. 2017, 2017: p. K.1.5.1. <https://heatpumpingtechnologies.org/publications/k-1-5-1-10-years-of-heat-pumps-monitoring-in-germany-outcomes-of-several-monitoring-campaigns-from-low-energy-houses-to-unretrofitted-single-family-dwellings/> (letzter Zugriff am 12 Juni 2023).
- [3] D. D'Agostino, L. Mazzarella, What is a nearly zero energy building? Overview, implementation and comparison of definitions, *J. Build. Eng.* 21 (2019) 200–212. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2018.10.019>.
- [4] M.Z. Pomianowski, H. Johra, A. Marszal-Pomianowska, C. Zhang, Sustainable and energy-efficient domestic hot water systems: A review, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 128 (2020) 109900. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109900>.
- [5] B. Bøhm, F. Schrøder, N.C. Bergsøe, Varmt Brugsvand: Måling af forbrug og varmetab fra cirkulationsledninger, *Varmt Brugsvand Måling Af Forbrug Og Varmetab Fra Cirkulationsledninger.* (2009) 220. https://vbn.aau.dk/ws/portalfiles/portal/17689984/SBi_2009-10.pdf (letzter Zugriff am 12 Juni 2023).
- [6] B. Bøhm, Production and distribution of domestic hot water in selected Danish apartment buildings and institutions. Analysis of consumption, energy efficiency and the significance for energy design requirements of buildings, *Energy Convers. Manag.* 67 (2013) 152–159. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2012.11.002>.
- [7] H. Erhorn, H. Erhorn-Klutzig, Selected examples of nearly zero-energy buildings: Detailed report, (2014). http://www.rehva.eu/fileadmin/news/CT5_Report_Selected_examples_of_NZEBs-final.pdf (letzter Zugriff am 12 Juni 2023).
- [8] DIN 1988-200, Codes of practice for drinking water installations - Part 200: Installation Type A (closed system) - Planning, components, apparatus, materials; DVGW code of practice: (Technische Regeln für Trinkwasser-Installationen - Teil 200: Installation Typ A (gesch, (2012)).
- [9] B. Hadengue, E. Morgenroth, T.A. Larsen, How to get your feet wet: Integrating urban water and building engineering for low-energy domestic hot water systems, *Energy Build.* 271 (2022) 112318. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112318>.
- [10] M.D. Genuardi, M. Wiegand, O. Opel, Installation of an ultrafiltration plant in a multi-family house to reduce the hot-water temperature and energy demand : A case study in Germany, *J. Build. Eng.* 66 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.105898>.
- [11] DIN EN ISO 19458, Water quality - Sampling for microbiological analysis (ISO 19458:2006); German version EN ISO 19458:2006): (Wasserbeschaffenheit - Probenahme für mikrobiologische Untersuchungen (ISO 19458:2006); Deutsche Fassung EN ISO 19458:2006), (2006).
- [12] DIN EN ISO 11731, Water quality - Enumeration of Legionella (ISO 11731:2017); German version EN ISO 11731:2017: (Wasserbeschaffenheit - Zählung von Legionellen (ISO 11731:2017); Deutsche Fassung EN ISO 11731:2017), (2019). <https://doi.org/10.31030/3019913>.

- [13] M. Hippelein, N. Puls, H. Fickenscher, B. Christiansen, Einsatz der Zytometrie zur Überwachung der Substitution energieintensiver Hygienisierung häuslicher Trinkwasser-Installationen: DFZ-Analytik zur Überwachung der Energieeffizienz, (2018). https://www.eksh.org/fileadmin/redakteure/downloads/foerderung/Endbericht_DFZ_Analytik_zur_Überwachung_der_Energieeffizienz_2018_12_19.pdf (letzter Zugriff am 20 Januar 2023).
- [14] J. Davey, A.I. Schäfer, Ultrafiltration to supply drinking water in international development: A review of opportunities, in: E.K. Yanful (Ed.), *Approp. Technol. Environ. Prot. Dev. World*, Springer Netherlands, Dordrecht, 2009: pp. 151–168. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-9139-1_16.
- [15] World Health Organization, *Guidelines for drinking-water quality: Fourth edition incorporating the first addendum*, Licence: CC BY-NC-SA 3.0 IGO, Geneva, 2017.
- [16] H.-C. Flemming, S.L. Percival, J.T. Walker, Contamination potential of biofilms in water distribution systems, *Water Supply*. 2 (2002) 271–280. <https://doi.org/10.2166/ws.2002.0032>.
- [17] Y. Sharaby, S. Rodríguez-Martínez, O. Oks, M. Pecellin, H. Mizrahi, A. Peretz, I. Brettar, M.G. Höfle, M. Halpern, Temperature-dependent growth modeling of environmental and clinical *Legionella pneumophila* multilocus variable-number tandem-repeat analysis (MLVA) genotypes, *Appl. Environ. Microbiol.* 83 (2017). <https://doi.org/10.1128/AEM.03295-16>.
- [18] R. Hochstrasser, H. Hilbi, The *Legionella* Lqs-LvbR regulatory network controls temperature-dependent growth onset and bacterial cell density, *Appl. Environ. Microbiol.* 88 (2022). <https://doi.org/10.1128/aem.02370-21>.
- [19] J. Rogers, A.B. Dowsett, P.J. Dennis, J. V. Lee, C.W. Keevil, Influence of temperature and plumbing material selection on biofilm formation and growth of *Legionella pneumophila* in a model potable water system containing complex microbial flora, *Appl. Environ. Microbiol.* 60 (1994) 1585–1592. <https://doi.org/10.1128/aem.60.5.1585-1592.1994>.
- [20] R. Lesnik, I. Brettar, M.G. Höfle, *Legionella* species diversity and dynamics from surface reservoir to tap water: from cold adaptation to thermophily, *ISME J.* 10 (2016) 1064–1080. <https://doi.org/10.1038/ismej.2015.199>.
- [21] VDI/DVGW 6023, *Hygiene in drinking-water installations: Requirements for planning, execution, operation and maintenance: (Hygiene in Trinkwasser-Installationen: Anforderungen an Planung, Ausführung, Betrieb und Instandhaltung)*, (2013).
- [22] DVGW W 556, *Hygienic-microbial irregularities in drinking water installations; Methods and measures to remedy: (Hygienisch-mikrobielle Auffälligkeiten in Trinkwasser-Installationen; Methodik und Maßnahmen zu deren Behebung)*, (2015).