



Kurzüberblick und Thesen

Zum EnEff:Wärme Verbundvorhaben

Energieeffizienz und Hygiene in der Trinkwasser-Installation

Im Kontext:

DHC Annex TS1 "Low Temperature District Heating for Future Energy Systems"

FKZ: 03ET1234 A bis D

Akronym: EE+HYG@TWI

Koordination: Dr.-Ing. Karin Rühling

Autoren:

Rühling, 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.

Die Verantwortung für den Inhalt liegt bei den Autoren.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Stand: 01. März 2018



Inhaltsverzeichnis

1	VORBEMERKUNGEN	4
2	ÜBERBLICK METHODIK DER UNTERSUCHUNGEN	6
2.1	SIMULATIONSSTUDIEN.....	6
2.2	FELDUNTERSUCHUNGEN	7
2.3	TECHNIKUMSVERSUCHE	10
2.4	EMULATORVERSUCHE UND LABOREXPERIMENTE	12
2.4.1	Emulatorversuche.....	12
2.4.2	Laborexperimente.....	16
3	ENERGETISCHE ASPEKTE, ERNEUERBARE ENERGIEN	17
3.1	TEMPERATURNIVEAU TWW – BILANZKREIS TWI.....	17
3.2	ANTEIL DES TRINKWARMWASSERS AM GESAMTWÄRMEBEDARF WOHNGBÄUDE.....	18
3.3	TEMPERATURNIVEAU TWW - ENERGETISCHES EINSARPOTENTIAL UND ANTEIL ERNEUERBARER ENERGIEN IM BILANZRAUM „GEBÄUDE“	19
3.4	TEMPERATURNIVEAU TWW – ENDENERGIEBEDARF UND TREIBHAUGAS-EMISSIONEN IM BILANZRAUM „DEUTSCHLAND“	20
4	AUSLEGUNG, INSTALLATION UND BETRIEB	22
4.1	TEMPERATUR DES TRINKWASSERS (KALT) FÜR AUSLEGUNG	22
4.2	TEMPERATUR TWK UND WÄRMEDÄMMUNG ROHRSYSTEM.....	22
4.3	TEMPERATUR TWK - EINFLUSS GETRENNTER FÜHRUNG TWW/TWK	24
4.4	TWK-TEMPERATUREN UND TWW-TEMPERATURREGIME 70 °C.....	26
4.5	EINFLUSS DER ART DES ZIRKULATIONSABGLEICHS.....	26
4.6	GLEICHZEITIGKEIT DER TRINKWARMWASSER-ENTNAHME.....	27
4.7	EINFLUSS DER TWW-TEMPERATUR AUF RAUMTEMPERATUREN	28
4.8	5-K-REGEL ZIRKULATION	29
4.9	WARTUNG UND ZIRKULATIONSBETRIEB	30
4.10	SCHULUNGSBEDARF BETREIBER.....	30
5	MIKROBIOLOGISCHE ANALYSEMETHODEN UND PROBENAHEME	32
5.1	NEUE MOLEKULARBIOLOGISCHE UND DURCHFLUSSZYTOMETRISCHE METHODEN	32
5.2	NACHWEISMETHODEN <i>PSEUDOMONAS AERUGINOSA</i>	33
5.3	REPRÄSENTATIVE, DEZENTRALE ENTNAHMESTELLEN	33
5.4	PROBENAHEME TWK.....	34
5.5	ÄNDERUNG PROBENAHEME FÜR ORIENTIERENDE, SYSTEMISCHE UNTERSUCHUNG NACH TRINKWV.....	34
5.6	KONTAMINATION ENDSTÄNDIGER BEREICH.....	35
6	TRINKWASSERHYGIENE – TEMPERATURNIVEAU, LAGE IM SYSTEM, LANGZEITEFFEKTE	36
6.1	TWW-TEMPERATUREN AM AUSTRITT TWE – NEUANLAGEN MIT EINHALTUNG DER A.A.R.D.T.....	36
6.2	TWW-TEMPERATUREN AM AUSTRITT TWE - BESTANDSANLAGEN	36
6.3	LANGZEITEFFEKT - RAUMMUSTER IM LEGIONELLENBEFUND	37
6.4	LANGZEITEFFEKT - ZEITMUSTER IM LEGIONELLENBEFUND.....	37
7	KONTAMINIERT ANLAGEN – ERKENNTNISSE, MAßNAHMEN	39
7.1	<i>L. PNEUMOPHILA</i> - TWW-TEMPERATUR ZUR UNTERSCHREITUNG TECHNISCHER MAßNAHMEWERT ENDSTÄNDIGER BEREICH	39
7.2	<i>L. PNEUMOPHILA</i> - WERKSTOFFEINFLUSS	40
7.3	<i>L. PNEUMOPHILA</i> - VOLUMEN DES NICHT ZIRKULIERENDEN ENDSTÄNDIGEN BEREICHS.....	40
7.4	<i>L. PNEUMOPHILA</i> – MEMBRANINTEGRITÄT	40

7.5	<i>L. PNEUMOPHILA</i> – VBNC.....	40
7.6	<i>P. AERUGINOSA</i> - TWW-TEMPERATUR.....	41
7.7	<i>P. AERUGINOSA</i> – ABSTERBEVERHALTEN.....	41
7.8	<i>P. AERUGINOSA</i> - TEMPERATURVORGESCHICHTE.....	42
7.9	<i>P. AERUGINOSA</i> UND KUPFER.....	43
8	ERKENNTNISSE, EMPFEHLUNGEN, AUSBLICK.....	45
9	GLOSSAR.....	49
10	FORMELZEICHEN, INDIZES UND ABKÜRZUNGEN.....	55
11	SCHRIFTTUM.....	57
11.1	VERORDNUNGEN, NORMEN, REGELWERKE.....	57
11.2	LITERATUR.....	58

1 Vorbemerkungen

Auslegungsleistung und Energiebedarf für Raumheizung und Klimatisierung von Gebäuden können durch die konsequente Anwendung der bei Neubau und Sanierung heute gültigen relevanten Verordnungen und Gesetze gegenüber Bestandsbauten drastisch reduziert werden. Damit eröffnen sich gleichzeitig zahlreiche Möglichkeiten zum Einsatz sogenannter LOW TEMPERATURE SYSTEME (teilweise auch als LOWEX-SYSTEME bezeichnet) für die aufgrund der klimatischen Bedingungen und Nutzeranforderungen erforderliche Wärmeversorgung. Wesentliches Merkmal dieser Systeme sind die niedrigen Vorlauftemperaturen, die wiederum zu geringeren Wärmeverlusten in den Verteilungs- und Speicherprozessen führen und die Nutzung regenerativer Energiequellen erleichtern.

Im Zusammenhang mit den sinkenden Energiebedarfswerten für die Raumheizung zeichnet sich für die zentrale Trinkwassererwärmung (TWE) der Trend ab, dass der Anteil der TWE am Gesamtwärmebedarf eines Gebäudes steigt. Außerdem wird die Vorlauftemperatur des Heizungssystems bei Konzepten der zentralen TWE von den allgemein anerkannten Regeln der Technik (a.a.R.d.T.) zur Trinkwasserhygiene vorgegeben (60 °C am Austritt der TWE, abgestellt auf das Bakterium *Legionella* spp.). Daher dominieren die Leistungsanforderungen und das Exergieniveau der Trinkwassererwärmung zunehmend die Dimensionierung der Wärmeerzeuger und den Primärenergiebedarf im Betrieb. Dies gilt für Wohngebäude und Nichtwohngebäude mit Trinkwarmwasserbedarf gleichermaßen. Die konsequente Umsetzung und Fortschreibung des LOW TEMPERATURE-Ansatzes in der Wärmeversorgung von Gebäuden scheitert somit an den unter Abwägung hygienischer und gesundheitlicher Aspekte formulierten Anforderungen an die Systemtemperaturen auf der Trinkwarmwasserseite. Die korrespondierenden Wirkungen auf das Trinkwasser (kalt) finden dabei bis heute leider kaum Berücksichtigung.

Gesamtziel des Vorhabens war deshalb die ganzheitliche und systemische Untersuchung der Trinkwasser-Installation für zukünftige LOW TEMPERATURE-Wärmeversorgungskonzepte, die Identifizierung von Ansätzen zur Nutzung erheblicher Energieeinsparpotentiale sowie zur Integration von erneuerbaren Energien bei Beachtung des Primats der menschlichen Gesundheit.

Mit dem hier vorgelegten Thesenpapier stellen die Forschungspartner die wesentlichen, heute schon konsensfähigen Erkenntnisse der Öffentlichkeit in kompakter Form zur Verfügung. Die detaillierte Darstellung der diesen Aussagen zugrundeliegenden Untersuchungsmethoden und -ergebnisse sowie offene Fragestellungen sind dem Schlussbericht des Forschungsprojektes zu entnehmen.

Die gewählte Struktur des Thesenpapiers wird aus Abb. 1 ersichtlich. Im Kapitel 2 wird zunächst ein Überblick über die Herangehensweise in den vier Hauptgruppen der Untersuchungen im Verbundvorhaben gegeben. Durch den interdisziplinären und breit angelegten Projektansatz wird es möglich, die Thesen – wie dargestellt – überwiegend auf Basis der Erkenntnisse von mehreren, im Charakter unterschiedlichen und über einen längeren Zeitraum andauernden Untersuchungen zu formulieren und in den Kapiteln 3 bis 7 zusammenzustellen. Um zu bestimmten, nicht allen Lesern gleichermaßen geläufigen Begriffen und Definitionen einen schnellen Zugang zu haben, wurde in Kapitel 9 ein Glossar erstellt.

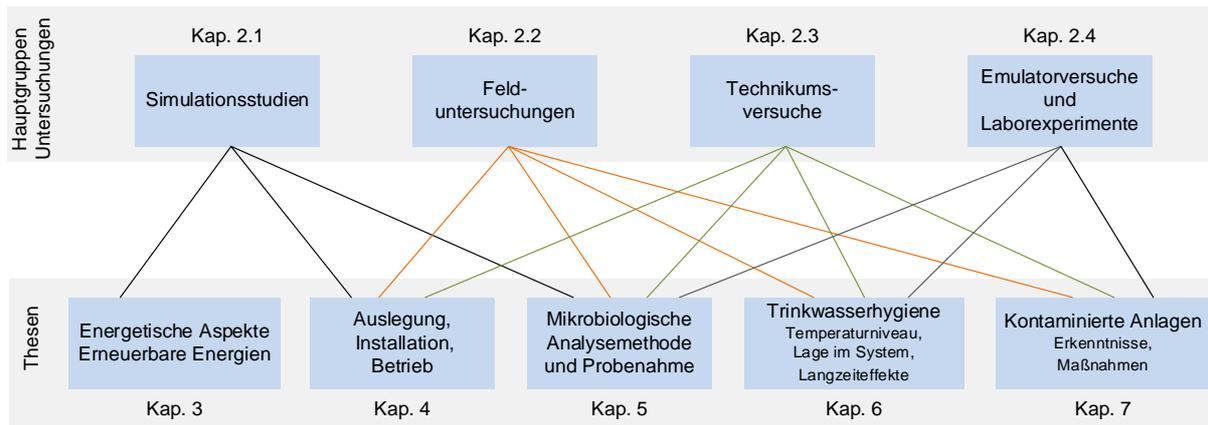


Abb. 1 Übersicht zu Verknüpfungen zwischen den Hauptgruppen von Untersuchungen und Thesen

Einige der Erkenntnisse sind zwar den einschlägigen Fachexperten schon bekannt und sind z. T. auch in Regelwerke umgesetzt, finden jedoch in der praktischen Umsetzung bei Rekonstruktion und Neubau bislang viel zu wenig Beachtung. Insofern war es die Aufgabe, wissenschaftliche Nachweise zu führen und vor allem mit der Quantifizierung der Einflüsse auf Energieeffizienz und Trinkwasserhygiene die Relevanz des Themas in den Fokus der Tätigkeit von Architekten, Bauingenieuren, Planungsbüros, Installationsbetrieben und der Anlagenbetreiber zu rücken.

An der Erarbeitung des Dokumentes waren beteiligt:

- Professur für Gebäudeenergie-technik und Wärmeversorgung der Technische Universität Dresden (GEWV)
- Institut für Hygiene und Öffentliche Gesundheit (Public Health) der Universität Bonn (IHPH)
- Institut für Medizinische Mikrobiologie und Hygiene der Technischen Universität Dresden (IMMH)
- Fraunhofer-Institut für Energiewirtschaft und Energiesystemtechnik Kassel (IEE)
- Rheinisch-Westfälisches Institut für Wasserforschung gGmbH Mülheim (IWW)

Die Verantwortlichkeiten für die Untersuchungen und die daraus abgeleiteten Thesen sind Tab. 1 zu entnehmen.

Tab. 1 Übersicht Verantwortlichkeiten

Simulationsstudien	IEE (Gesamtsystem und Gebäude), GEWV (Detailbe-trachtung Trinkwasser-Installation)
Felduntersuchungen	Alle, jedoch IHPH und IWW für weiterführende sowie GEWV für deskriptive Statistik
Technikumsversuche	GEWV, IMMh
Emulatorversuche und Labor-experimente	IMMH, IWW, GEWV

2 Überblick Methodik der Untersuchungen

2.1 Simulationsstudien

Die Simulationsstudien gliederten sich in folgende zwei Hauptgruppen:

- **GESAMTSYSTEM:** Wirkungen veränderter Trinkwarmwasser-Temperaturen auf den Energiebedarf im Kontext verschiedener Gebäudearten sowie in Überlagerungen mit exergetischen Aspekten auf die Energieversorgungskonzepte; Hochrechnung auf Wirkungen im Bilanzkreis der Wärmeversorgung Deutschlands (IEE)
- **TRINKWASSER-INSTALLATION:** Detaillierte Simulation einer Trinkwasser-Installation (TWI) in einer typischen Installationskanal- und Raumsituation mit dem Fokus der Ermittlung der zeit- und orts aufgelösten Temperaturverteilung (GEWV)

Gesamtsystem

Im Zuge der Arbeiten wurde die Wirkung der Betriebsweise der TWI im Gesamtsystem „Gebäude“ analysiert. Im Fokus standen Untersuchungen der Wechselwirkungen zwischen der Anlagentechnik zur Bereitstellung von Raumwärme und Trinkwarmwasser und der TWK/TWW-Installation. Im Rahmen eines simulationsunterstützten Technologievergleichs wurden unterschiedliche, praxisrelevante Szenarien zur Versorgung von Wohngebäuden gegenübergestellt. Die Analyse umfasst unterschiedliche Baualtersklassen und Sanierungsgrade der Gebäudehülle sowie das Übergabesystem der Raumheizung, die Art der Wärmeerzeugung, das Prinzip der Trinkwassererwärmung, das Speichervolumen und das Temperaturniveau des Trinkwarmwassers (vgl. Tab. 2).

Tab. 2 Untersuchungsvarianten zur Quantifizierung des Einflusses der Art der TWE und der Betriebsweise der TWI auf das Gesamtsystem bei gleicher Konfiguration der Wohneinheiten WE (grün hinterlegt = Referenzvariante; Temperatur des dem TWE zugeführten TWK $\vartheta_{\text{TWK,TWE}} = 10 \text{ °C}$)

Baualter- klasse	Anzahl WE x Personen je WE	Übergabe- system	Wärmeerzeuger	Speicher	TWE	TWW- Temp.
< 1978 (WSchVo77)		Heizkörper	NT-Kessel Erdgas	TWW-Speicher	Speicherprinzip	60 °C
			Fernwärme			55 °C 50 °C
1978-1994		Heizkörper	NT-Kessel Erdgas	TWW-Speicher	Speicherprinzip	60 °C 55 °C 50 °C
			Brennwertkessel Erdgas			
			Fernwärme			
KfW70		2 WE x 2 Pers. 2 WE x 4 Pers. 2 WE x 6 Pers.	Fußboden- heizung	Brennwertkessel Erdgas	TWW-Speicher	Speicherprinzip
	Wärmepumpe Solarthermie			Heizungs- Pufferspeicher	Zentr. Durchflussprinzip	
	Fernwärme			TWW-Speicher	Speicherprinzip	
				-	Zentr. Durchflussprinzip	
		Holzpellets Solarthermie	Heizungs- Pufferspeicher	Zentr. Durchflussprinzip		

Das Ziel der Analyse war die Abschätzung des Einflusses ausgewählter Erzeugerkonfigurationen auf den Jahresenergiebedarf. Darüber hinaus wurde eine kombinierte exergetische und energetische Analyse der Energieumwandlungskette vorgenommen.

Trinkwasser-Installation

Da weder in der Praxis noch an den Versuchsständen alle relevanten Einflussparameter wie z. B. Außenlufttemperatur, Raumtemperatur und Temperatur des Trinkwassers (kalt) im Tages- und Jahresgang konstant sind bzw. konstant gehalten werden können, war es notwendig eine Simulationsumgebung zu schaffen, die den Einfluss einzelner Parameter explizit herausarbeiten kann. Zusätzlich waren gezielt Installationscharakteristika wie die Güte der Rohrleitungsdämmung oder der gedämmten Trennwand zwischen TWW/TWZ und TWK zu variieren. Um dieses Ziel zu erreichen, wurde der reale Versuchstand TWI (s. Abschnitt 2.3) zunächst vollständig geometrisch erfasst und detailgetreu in ein virtuelles Simulationsmodell überführt.

Auf Grundlage dieses Modells wurde das Verhalten des Versuchsstandes TWI mit dem Simulationstool TRNSYS-TUD [Perschk 2010] quasi-dynamisch simuliert und die so erzeugten, virtuellen Messdaten mit den am Versuchsstand erfassten verglichen. Der Vergleich der sich einstellenden Masseströme und Temperaturen mit den real gemessenen Werten zeigt hierbei im Mittel eine Abweichung von weniger als 0,5 % und eine maximale Abweichung von weniger als 3 %. Die angegebenen Abweichungen beruhen auf zehn unterschiedlichen, real durchgeführten Versuchsreihen und belegen die hohe Güte der Simulation. Tab. 3 zeigt einen Überblick zu den untersuchten Parametern in drei Szenarien.

Tab. 3 Übersicht über relevante Einflussgrößen für die Variantenmatrix der Simulation in drei Szenarien

Temperatur am Austritt Trinkwassererwärmer ϑ_{TWW}		Szenario	Temperatur am Hausanschluss $\vartheta_{TWK,HA}$		Temperatur Raumluft ϑ_{Raum}	
Werte in Simulation	Bemerkung	Bezeichnung	Werte in Simulation	Bemerkung	Werte in Simulation	Bemerkung
60; 55; 50; 45	Variiert in der Realität wenig, ist von der Betriebsweise und nicht vom Standort abhängig.	Extremfall - Kalt	10	Variiert in der Realität und ist standortabhängig vom Jahreszeiteinfluss dominiert	17	Variiert in der Realität und ist vom Gebäudetyp, dem Nutzerverhalten und der Jahreszeit beeinflusst. Und kann in der Realität noch deutlich über 24°C liegen (Sommer)
		Durchschnitt	15		20	
		Extremfall - Warm	25		24	

2.2 Felduntersuchungen

Bei den Felduntersuchungen konnten in 101 Objekten jeweils mindestens eine Probenseerie zur Trinkwasserhygiene und eine 14-tägige thermohydraulische Messung bei Anlagen mit zentraler Trinkwassererwärmung durchgeführt werden. Überdies stehen Informationen zur Trinkwasser-Installation aus Begehungen und Betreiberinterviews zur Verfügung.

Abb. 2 zeigt eine Übersicht zu den entnommenen Proben Trinkwarmwasser (TWW) und kaltes Trinkwasser (TWK). Die Untersuchung erfolgte mittels des in der Trinkwasserverordnung und einschlägigen Regelwerken verankerten kulturellen Verfahrens und zusätzlich mittels qPCR auf Kontaminationen mit *Pseudomonas aeruginosa* und Legionellen (*Legionella* spp. sowie *L. pneumophila*) sowie mit Durchflusszytometrie hinsichtlich der Gesamtzellzahl (GZZ).

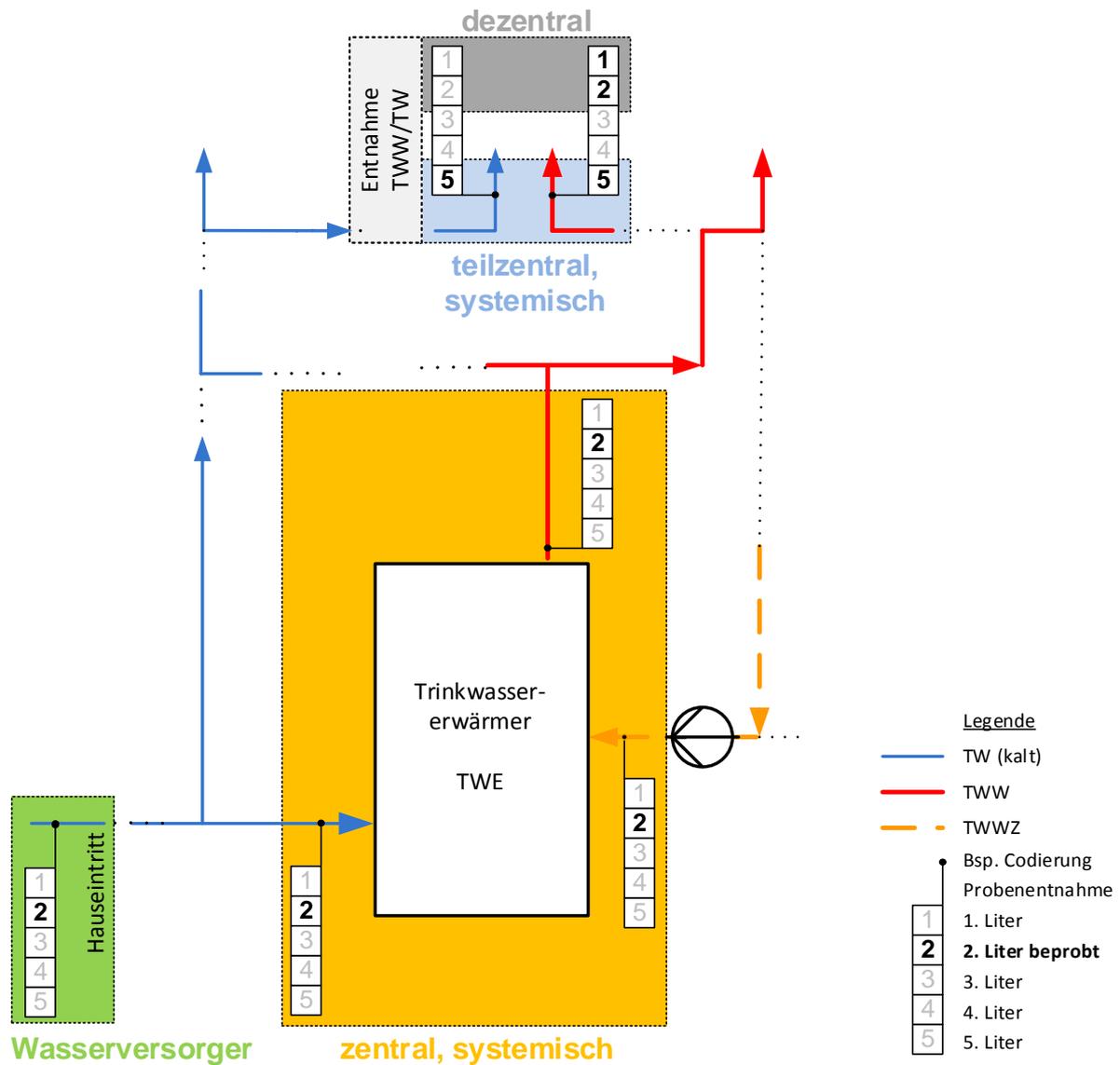


Abb. 2 Übersicht zu Entnahmeort sowie Liter der Probenahme und Zuordnung zu Klassen der Kontamination nach [Exner 2011]

Die thermohydraulischen Messungen wurden an den in Abb. 3 dargestellten Orten mit mobiler, auf die Außenoberfläche der Rohre applizierter Sensorik durchgeführt. Aus diesem Datenpool wurden für die Gesamtsystembeurteilung Minimal-, Maximal-, Mittel- und Medianwerte über den Gesamtzeitraum sowie getrennt nach den Zeiten mit aktiver TWW-Entnahme und denen der Nichtentnahme (reine Zirkulation) gebildet.

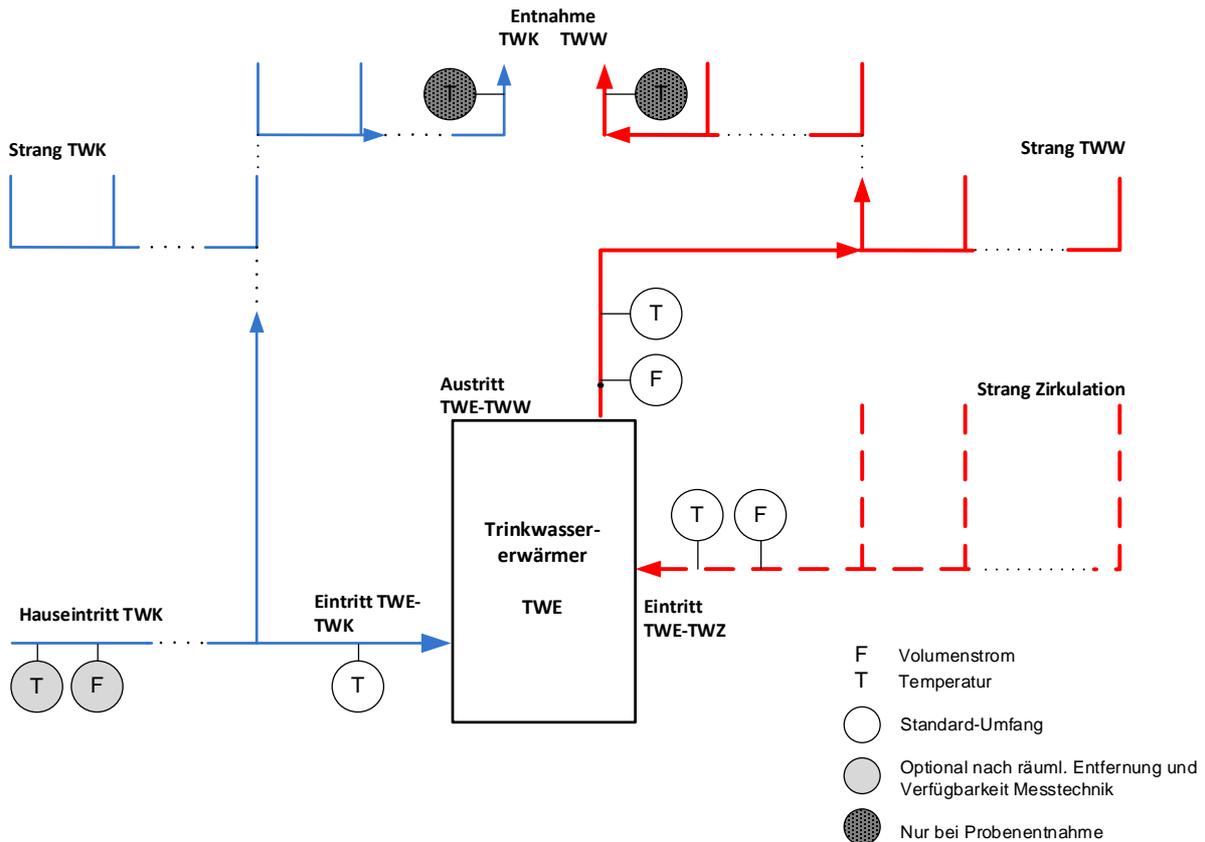


Abb. 3 Übersicht zu den Orten mobiler Sensorik der thermohydraulischen Messung

Die im Rahmen des Projektes durchgeführten Untersuchungen sind repräsentativ für den Objektbestand in Deutschland. 11 % der untersuchten Objekte weisen kulturelle Befunde über dem technischen Maßnahmenwert auf ($> 100 \text{ KbE}/100 \text{ mL}$). In insgesamt 25 % der Objekte sind kulturell *Legionella* spp. zu finden ($> 0 \text{ KbE}/100 \text{ mL}$). Dies deckt sich mit anderen Studien (z. B. [Wricke 2007, Hentschel 2011, Rühling 2012, Völker 2016, Dilger 2017]). Auch in der Teilauswahl der MFH für die weitergehende statistische Analyse (N=73) zeigten 25 % der Objekte einen positiven kulturellen Befund ($> 0 \text{ KbE}/100 \text{ mL}$); insofern sind auch die weiterführenden statistischen Ergebnisse als repräsentativ anzusehen.

Es gibt in Deutschland eine nicht zu vernachlässigende Anzahl Objekte, die entgegen W 551 (und damit entgegen den a.a.R.d.T. und der TrinkwV) mit Temperaturen $< 45 \text{ °C}$ betrieben werden. Im Projekt wurden derartige Systeme in Mehrfamilienhäusern ausdrücklich in die Untersuchungen einbezogen. Das Objekt-Screening ergab, dass 7,7 % der TWI (7 von 91 Objekten, in denen thermohydraulische Messungen THM erfolgen konnten) am Austritt des TWE Mediantemperaturen $< 45 \text{ °C}$ aufwiesen. Damit liegen in diesen Objekten hohe Zeitanteile ($> 50 \%$) im Bereich des optimalen Legionellen-Wachstums vor. Mit steigender Median-Temperatur der THM sinken die Zeitanteile im Bereich des optimalen Legionellen-Wachstums; in bzgl. TWW-Vorlauf-temperatur (60 °C), Zirkulation und Isolation Regelwerk-konform ausgeführten Anlagen liegen die THM-Temperaturen immer oberhalb des Bereichs, in dem sich Legionellen optimal vermehren. Die Objekte mit niedrigerem Median der THM-Temperaturen zeigten jedoch nicht zwangsläufig auch alle eine Legionellen-Kontamination der TWI. Als mindestens ebenso kritisch wie geringe Temperaturen in der Zirkulation sind lange, nicht zirkulierende Lei-

tungsstränge anzusehen, in denen das Wasser bei Stagnation abkühlt und damit bei geringer TWW-Entnahme ebenfalls hohe Zeitanteile im für Legionellen-Wachstum optimalen Temperaturbereich aufweist.

2.3 Technikumsversuche

Am Zentrum für Energietechnik (ZET) der TU Dresden wurde zur systematischen Untersuchung des Einflusses der TWW-Temperatur ein kompakter Technikums-Versuchsstand „Trinkwasser-Installation eines Mehrfamilienhauses mit sechs Wohneinheiten“ (kurz Versuchsstand TWI) konzipiert, errichtet und betrieben.

Es ist gelungen, realitätsnah sowohl das Trinkwarmwasser-(TWW) und das Zirkulationssystem (TWZ) als auch die Verteilung des kalten Trinkwassers (TWK) nach den allgemein anerkannten Regeln der Technik zu errichten. Die Trinkwassererwärmung erfolgt nach dem Speicherladeprinzip. Wie Abb. 4 zeigt, wurde bewusst ein stark asymmetrisches Netz realisiert, um die differenzierten Wirkungen von Wohneinheiten (WE) mit geringer Entfernung zum Trinkwassererwärmer (WE 1 bis 3) und weit entfernten Entnahmestellen - wie beispielsweise WE 6 - abzubilden. Jede WE verfügt über zwei TWK- und zwei TWW-Zapfstellen, von denen jeweils eine die Zapfrate 5 L/min und die andere 10 L/min realisiert. Als Zapfprofile für das TWW wurden drei EU-reference tapping cycles (EU-r.t.c.) [EU-r.t.c.] verwendet, für TWK die der DVGW-Arbeitsblätter W 510/W 512 in leicht modifizierter Form. Die Zuordnung der Entnahmepprofile zu den WE ist Tab. 4 zu entnehmen. In den EU-r.t.c. für TWW sind für die einzelnen Entnahmeereignisse Energiebedarfswerte angegeben. Um die geforderte Entnahmetemperatur von 45 °C bei den unterschiedlichen TWW-Temperaturen am Austritt des Trinkwassererwärmers (TWE) $\vartheta_{TWW,TWE} = 45 \dots 60 \text{ °C}$ und der in den heutigen Regelwerken angenommenen TWK-Temperatur von 10 °C zu erhalten, müssen unterschiedlich große Mengen TWW und TWK miteinander gemischt werden. Da im Sinne vergleichbarer hydraulischer Ähnlichkeit bewusst mit konstanten Entnahmevolumenströmen gearbeitet werden sollte, waren somit die jeweiligen Zapfzeiten zu variieren. Der hydraulische Abgleich der Zirkulation und damit die gleichmäßige Versorgung der stark unterschiedlich langen Stränge wurde durch die in Tab. 5 dargestellten drei Methoden sichergestellt. Die vollständige Ausstattung der Trinkwarmwasserverteilung mit einem elektrischen Begleitheizband gestattete bei Wegschalten des Zirkulationssystems Versuche nach Variante 4.

Zur Beurteilung der Trinkwasserhygiene erfolgten Entnahmen von Wasserproben und deren Untersuchung auf Legionellen. Hierfür wurde der kulturelle Ansatz (DIN ISO 11731) erweitert sowie der gattungsspezifische DNA-Nachweis mittels qPCR (erfasst alle, auch schwer kultivierbare *Legionella* Arten) angewandt. Der Versuchsstand wurde über einen Zeitraum von 15 Monaten im dreiwöchigen Abstand beprobt. Jede Versuchskombination, bestehend aus der Art des hydraulischen Zirkulationsabgleichs und einer fest eingestellten Temperatur am TWE, konnte dabei einmalig durchgeführt werden (Tab. 5).

Tab. 4 Zuordnung der Entnahmecharakteristika zu den 6 Wohneinheiten

	Basis	WE 1	WE 2	WE 3	WE 4	WE 5	WE 6
TWW	EU-reference tapping cycle	2 mittel	3 hoch	1 niedrig	2 mittel	3 hoch	1 niedrig
TWK	DVGW W 510/W 512 modifiziert	mittel	hoch	niedrig	mittel	hoch	niedrig

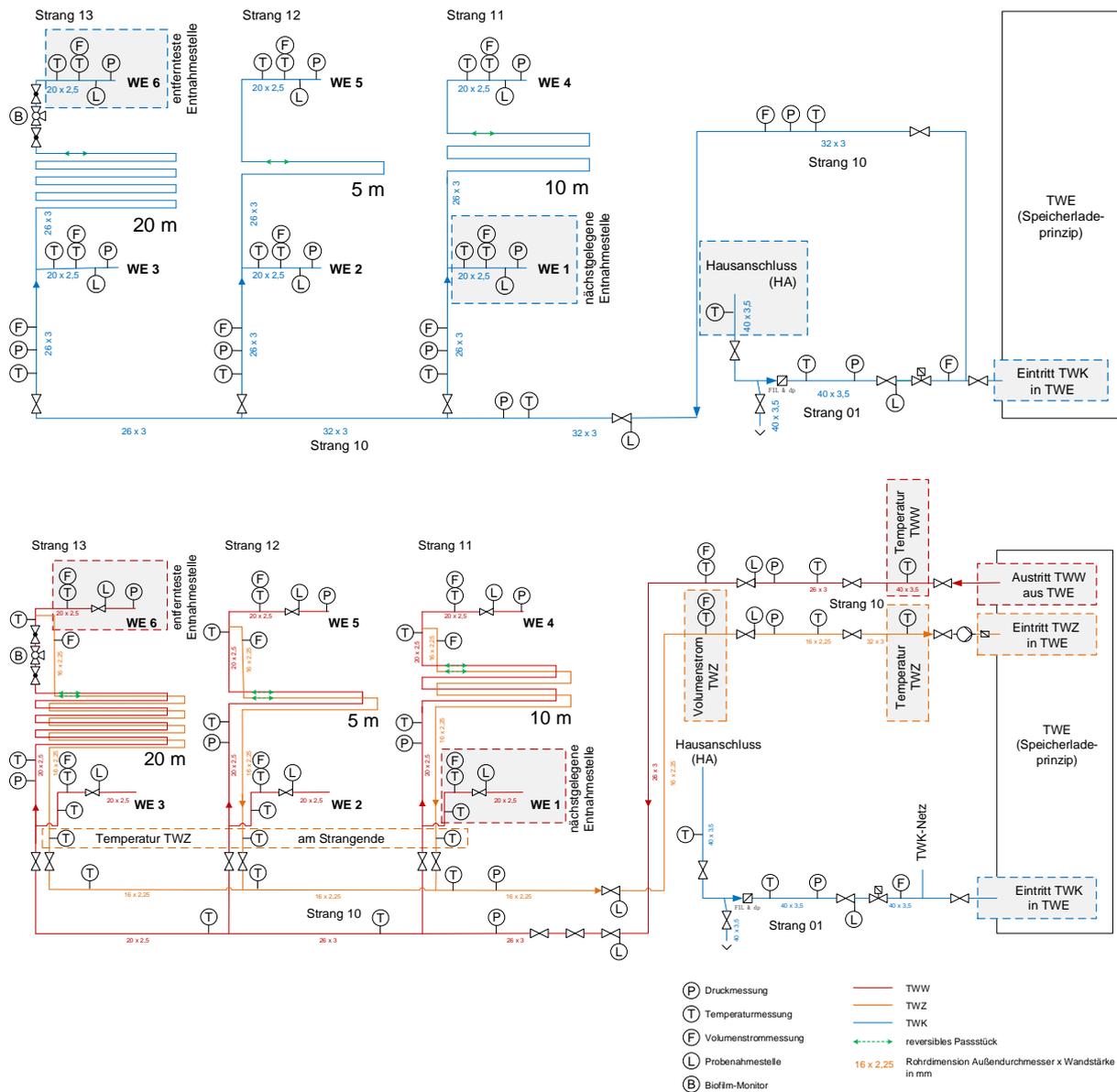


Abb. 4 Vereinfachtes Rohrleitungs- und Instrumentenfließschema (R&I-Fließschema) des TWK-Systems (oben) und TWW-Systems inklusive des Zirkulationssystems (unten) des TWI-Versuchsstands.

Tab. 5 Übersicht der Versuche mit zugehörigen Versuchsparametern und -kennungen

		<i>Temperatur am Austritt Trinkwassererwärmer</i>			
<i>Art des Zirkulationsabgleichs</i>		60 °C	55 °C	50 °C	45 °C
1	manuell	1_60	1_55	1_50	1_45
2	thermoelektrisch	2_60	2_55	2_50	2_45
3	thermomechanisch	3_60	3_55	3_50	3_45
4	elektr. Begleitheizung	4_60	4_55	4_50	4_45

2.4 Emulatorversuche und Laborexperimente

Weder im Feld noch in den Technikumsversuchen durfte mit gezielten Kontaminationen mit *Legionella spp.* bzw. *P. aeruginosa* gearbeitet werden. Deshalb wurden diese Untersuchungen in den für derartige Experimente zugelassenen Laboren des IMMH und des IWW durchgeführt. Zu diesem Zweck sind zwei identische Labor-Kompaktversuchsstände (Emulatoren) durch GEVV entwickelt, gebaut und in den jeweiligen Laboren in Betrieb genommen worden.

2.4.1 Emulatorversuche

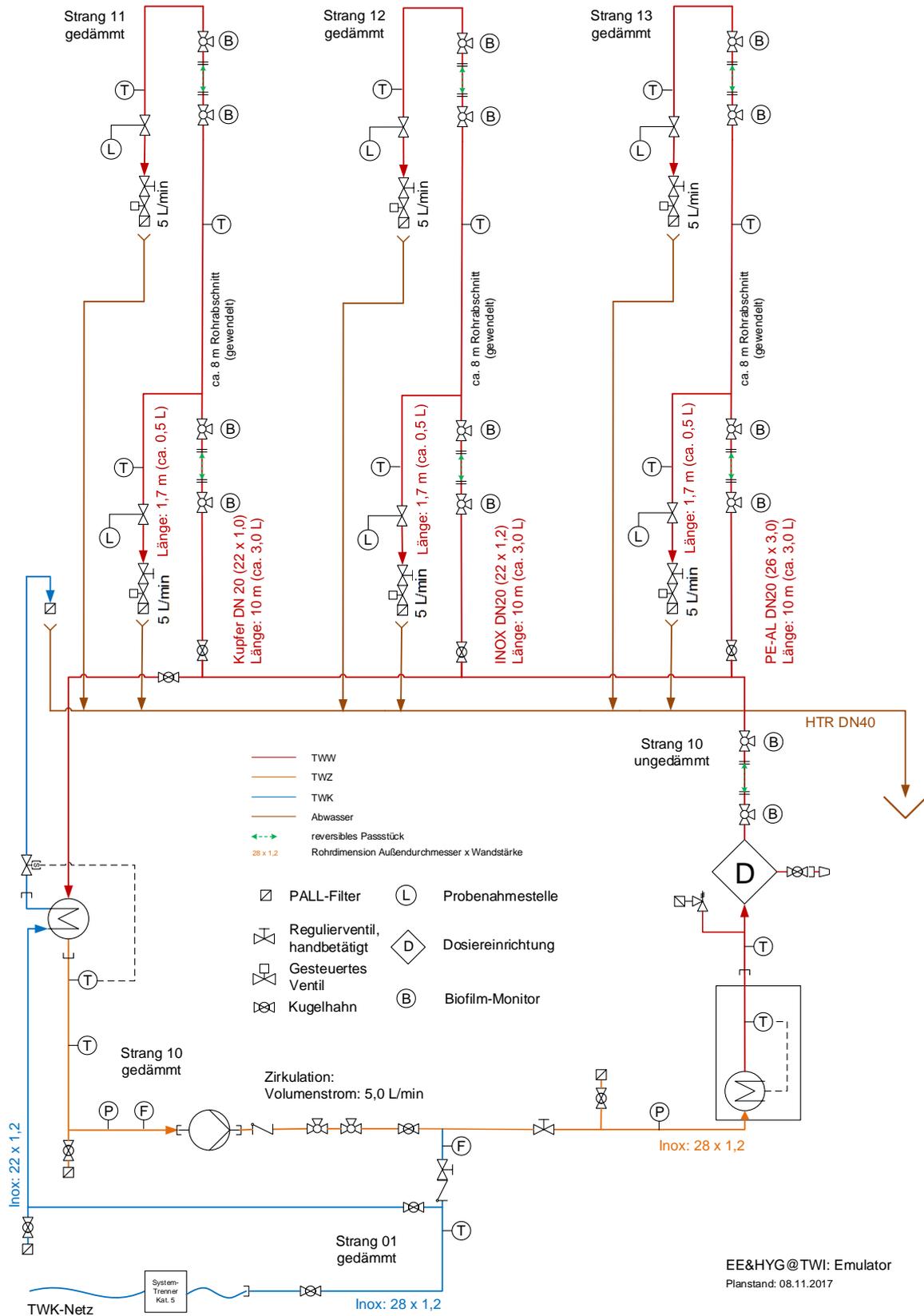
Ziel der systematischen Emulatorversuche war es, den Einfluss der Werkstoffe des Rohrleitungsmaterials und der Fittings sowie der Stranginhaltsvolumina (Stranglänge, feste Rohrdurchmesser) des nicht zirkulierenden, endständigen Bereichs bei Variation der Temperatur in einer kompakten Trinkwarmwasser-Installation zu erfassen.

Die beiden Emulatoren (Abb. 5) bestehen aus einem zirkulierenden (zentralen) und einem nicht zirkulierenden (endständigen) Bereich. Den endständigen Bereich stellen drei kurze (je ca. 0,5 Liter Wasservolumen) und drei lange Endstränge (je ca. 3 Liter Wasservolumen) dar. Diese wurden zu drei Paaren (je kurzer/langer Strang) zusammengefasst und in den Werkstoffen Kunststoff (PE), nichtrostender Stahl (NiRo) und Kupfer (Cu) ausgeführt. Die Wassererwärmung in dem Zirkulationskreis wurde durch einen Durchlauferhitzer ermöglicht. Da aufgrund der technischen Besonderheiten der Emulatoren die Temperatur der Zirkulation ($\vartheta_{\text{TWW,ein}}$) der Temperatur des TWE-Austrittes ($\vartheta_{\text{TWE,aus}}$) entspricht, findet im Weiteren für $\vartheta_{\text{TWE,aus}}$ und $\vartheta_{\text{TWW,ein}}$ vereinfachend der Begriff „Zirkulationstemperatur“ Verwendung.

Die Emulatoren wurden während des gesamten Testzeitraums an allen Entnahmestellen mit dem niedrigsten EU-reference tapping cycle (EU-r.t.c. Typ 1) betrieben (zeitversetzt, keine gleichzeitige Entnahme). Um eine Mischtemperatur von 45 °C bei 10 °C TWK-Temperatur zu erzielen, wurden die Volumenströme der jeweiligen TWW-Temperatur angepasst (s. Tab. 6). Die Dauer der einzelnen Entnahmen blieb – anders als beim TWI-Versuchsstand - jedoch konstant. Zur hygienisch-mikrobiologischen Analyse wurden Probenahmehähne (L) und Biofilmträger (B) eingebaut.

Tab. 6 Übersicht der Volumenströme und Tagessummen der TWW-Entnahme an den Emulatoren für unterschiedliche TWW-Temperaturen am Austritt TWE

TWW-Temperatur °C	Volumenstrom L/min	Tagessumme L
45	5,0	52,2
50	4,4	45,7
55	3,9	40,8
60	3,5	36,8



EE&HYG@TWI: Emulator
Planstand: 08.11.2017

Abb. 5 Vereinfachtes R&I-Fließschema der Emulatoren

Versuchsdesign IMMH

Der Emulator im IMMH wurde an die Wasserversorgung eines Gebäudes mit einer geringen Legionellenkonzentration ($< 10 \text{ KbE}/100 \text{ mL}$) angeschlossen. Eine Besiedlung des Emulators mit einer mikrobiellen Gemeinschaft inklusive Legionellen war erfolgreich. Nach dieser Etablierungsphase (Biofilm, Legionellen) wurde der Emulator wie in Abb. 6 dargestellt betrieben und beprobt.

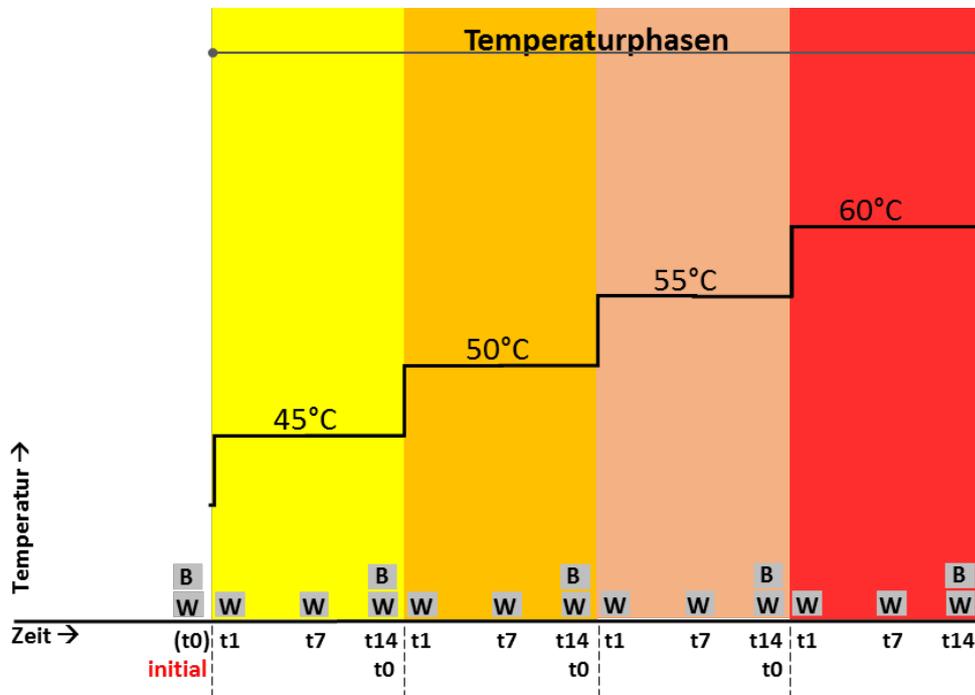


Abb. 6 Versuchsdurchführung am Emulator im IMMH (W: Wasserbeprobung, B: Biofilmbeprobung, t0-t14: Zeitpunkte der Beprobung in Tagen nach Versuchsbeginn)

Temperaturverteilung in den Endsträngen

Die in den Endsträngen erreichten Temperaturmittelwerte während jeder getesteten Temperaturphase wichen stark von den erzeugten Temperaturen in der Zirkulation ab (s. Tab. 7, Tab. 8). Diese lagen im Bereich zwischen $27,9 \text{ °C}$ und $38,3 \text{ °C}$ für den gesamten Testzeitraum. Somit ergaben sich Temperaturdifferenzen zwischen den Temperaturen in den nichtzirkulierenden Strängen und der zentral in der Zirkulation gemessenen in Höhe von $13,3 \text{ K}$ (45 °C -Versuch) bis $27,5 \text{ K}$ (60 °C -Versuch). Der Zeitanteil der Zirkulationstemperatur in den Endsträngen war dementsprechend sehr gering und wurde nur beim Wasserzapfen erreicht.

Tab. 7 Temperaturverteilungen in der Zirkulation und in den nicht zirkulierenden Endsträngen des Emulators (prozentual, bezogen auf einen repräsentativen Tag während der jeweiligen Temperaturtestphase). Der Temperaturbereich, in dem das Wachstumsoptimum für *Legionella pneumophila* liegt, ist rot markiert.

Temperaturphase	Aufteilung	Zirkulation (vor Pumpe)										
		Zirkulation	PE kurz	PE lang Mitte	PE lang	Cu kurz	Cu lang Mitte	Cu lang	NiRO kurz	NiRO lang Mitte	NiRO lang	
45 °C	<25	0,0	0,0	15,9	13,0	21,1	24,8	23,7	30,3	23,1	18,0	25,4
	≥25-45	68,7	84,9	84,0	87,0	78,9	75,2	76,3	69,7	76,8	82,0	74,6
	≥45-50	31,3	15,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0
	≥50-55	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	≥55-60	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	≥60	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
50 °C	<25	0,0	0,0	0,0	0,0	9,8	13,6	8,1	21,5	12,8	0,0	16,1
	≥25-45	0,0	0,5	93,4	97,3	89,3	77,0	88,0	76,8	76,4	93,3	81,4
	≥45-50	68,8	82,7	6,5	2,7	0,8	9,3	3,9	1,8	10,7	6,7	2,5
	≥50-55	31,2	16,6	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0
	≥55-60	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	≥60	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
55 °C	<25	0,0	0,0	0,0	0,0	2,8	0,7	0,0	17,9	0,0	0,0	6,2
	≥25-45	0,0	0,0	77,9	86,9	93,3	78,0	88,0	76,9	77,1	84,4	87,4
	≥45-50	0,0	0,7	17,6	11,4	3,4	14,2	9,7	4,3	14,2	12,1	4,8
	≥50-55	65,5	78,5	4,5	1,6	0,5	7,2	2,3	1,0	8,7	3,5	1,7
	≥55-60	34,5	20,4	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0
	≥60	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
60 °C	<25	0,0	0,0	0,0	0,0	10,8	0,0	0,0	15,7	0,0	0,0	12,1
	≥25-45	0,0	0,0	67,1	77,9	82,4	70,6	82,0	75,5	70,1	76,7	78,3
	≥45-50	0,0	0,0	17,4	15,2	5,1	12,1	11,2	4,6	11,9	14,1	4,8
	≥50-55	0,0	0,7	12,5	5,9	1,7	11,7	5,6	3,4	11,6	7,1	3,8
	≥55-60	62,2	73,7	3,0	0,9	0,1	5,6	1,2	0,7	6,3	2,1	1,0
	≥60	37,8	25,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Tab. 8 Mittelwert der Temperaturen in der Zirkulation und in den nicht zirkulierenden Endsträngen des Emulators (in °C, bezogen auf drei repräsentative Tage während der jeweiligen Temperaturtestphase).

Temperaturphase	Zirkulation (vor Pumpe)										
	Zirkulation	PE kurz	PE lang Mitte	PE lang	Cu kurz	Cu lang Mitte	Cu lang	NiRO kurz	NiRO lang Mitte	NiRO lang	
45 °C	44,5	44,1	30,6	30,4	28,0	30,2	29,7	27,9	30,3	30,8	28,5
50 °C	49,6	49,2	34,4	33,8	30,6	33,6	32,7	30,4	33,8	34,0	31,3
55 °C	54,5	54,2	36,3	35,5	31,6	35,2	34,1	31,4	35,6	35,6	32,4
60 °C	59,6	59,4	38,2	37,0	32,1	38,3	35,7	32,2	38,2	37,0	32,7

2.4.2 Laborexperimente

Der kulturelle Nachweis des fakultativ pathogenen Umweltbakteriums *P. aeruginosa* in Trinkwasser-Installationen wird als hygienisch-mikrobielle Auffälligkeit angesehen [DVGW 556; Exner 2016]. *P. aeruginosa* kann lokal oder systemisch im Kalt- und Warmwasserbereich vorkommen. Wegen des enormen Einflusses von durchaus regelkonformen Kupfergehalten im Trinkwasser auf die Kultivierbarkeit von *P. aeruginosa* war bei den Emulatorversuchen am IWW keine gezielte, langzeitstabile Ausgangskontamination zu etablieren. Um das Wissen zum Kupfereinfluss zu vertiefen, wurden deshalb Laboruntersuchungen zur Bewertung der inaktivierenden Wirkung TWW-relevanter Temperaturen auf das Wachstum und Überleben der Bakterien gezielt durchgeführt.

3 Energetische Aspekte, Erneuerbare Energien

3.1 Temperaturniveau TWW – Bilanzkreis TWI

Die Veränderung des Temperaturniveaus des Trinkwarmwassers am Austritt des Trinkwassererwärmers hat bei gleichem Entnahmeverhalten nur einen geringen Einfluss auf den Energiebedarf zur Trinkwassererwärmung. Die Veränderung des Energiebedarfs resultiert aus der Minderung bzw. Erhöhung der Zirkulationswärmeverluste. (Simulation, Technikumsversuchsstand)

Ausgewählte Ergebnisse der Simulationsstudie TWI zeigt Tab. 9. Diskutiert sei zunächst nur das Szenario „Kalt“ nach Tab. 3 ($\vartheta_{\text{TWK}} = 10 \text{ °C}$; $\vartheta_{\text{Raum}} = 17 \text{ °C}$) ausgehend von der Referenztemperatur 60 °C am Austritt des Trinkwassererwärmers. Es wird deutlich, dass sich der Energiebedarf für die tatsächliche Trinkwarmwasser-Entnahme mit der Reduktion oder Erhöhung der Temperatur am Austritt des Trinkwassererwärmers nur marginal reduziert bzw. erhöht. Signifikant ist jedoch die durchschnittliche Minderung bzw. Erhöhung der Zirkulationsverluste um ca. 12,4 % je 5 K Absenkung bzw. Erhöhung der Temperatur am Ausgang des Trinkwassererwärmers.

Tab. 9 Relative Änderung des Tages-Energieverbrauchs bei Änderung der TWW-Temperatur; getrennt nach TWW-Entnahme und Zirkulation für verschiedene Szenarien (Tab. 3) und Referenz $\vartheta_{\text{TWW}} = 60 \text{ °C}$ (mit Trennwand)

Tages-Energieverbrauch							
Szenario $\vartheta_{\text{TWW}, \text{TWE}}$	TWW-Entnahme			Zirkulation			
	"Kalt"	"Durchschnitt"	"Warm"	"Kalt"	"Durchschnitt"	"Warm"	
kWh pro Tag	70	39.37	36.13	29.69	19.07	17.94	16.49
	60	39.40	35.51	27.74	15.26	14.13	12.64
	55	39.17	34.85	26.26	13.32	12.17	10.70
	50	39.23	34.36	24.66	11.39	10.26	8.77
	45	39.04	33.48	22.44	9.49	8.37	6.90
rel. Änderung in %	70	-0.1	+1.8	+7.0	+25.0	+27.0	+30.5
	60	<u>100</u>	<u>100</u>	<u>100</u>	<u>100</u>	<u>100</u>	<u>100</u>
	55	-0.6	-1.8	-5.3	-12.7	-13.9	-15.4
	50	-0.4	-3.2	-11.1	-25.3	-27.3	-30.6
	45	-0.9	-5.7	-19.1	-37.8	-40.7	-45.4

Vergleicht man mit den anderen beiden Szenarien, ist zwingend die Dominanz der Wirkung der erhöhten TWK-Temperatur von 15 °C bzw. 25 °C zu berücksichtigen. So muss zum Erreichen der Mischtemperatur von 45 °C ein kleinerer Volumenstrom Trinkwarmwasser beigemischt werden und der Energiebedarf für die tatsächliche TWW-Entnahme sinkt durch die Reduzierung des gezapften Volumens TWW. Der eigentliche Anteil der abgesenkten Temperatur ϑ_{TWW} an der Gesamtenergieeinsparung bleibt aber marginal. In den Phasen der Zirkulation wirkt - überlagert zur Absenkung von ϑ_{TWW} - eine geringere treibende Temperaturdifferenz zwischen kalter und warmer Seite der Trinkwasser-Installation. Dementsprechend sinkt der Energiebedarf für die Zirkulation stärker und die prozentualen Veränderungen fallen noch etwas höher aus. Damit wären zwar hohe Temperaturen des kalten Trinkwassers von 25 °C und mehr energetisch vorteilhaft, es ist jedoch zwingend zu beachten, dass damit das mikrobiologische Wachstum befördert wird

und deshalb Temperaturen von 20 °C und darunter anzustreben sind. Die Erkenntnisse decken sich mit den messtechnischen Ergebnissen der Technikumsversuche bei gleichen Randbedingungen.

3.2 Anteil des Trinkwarmwassers am Gesamtwärmebedarf Wohngebäude

Durch die Verbesserung des Gebäudeenergiestandards erhöht sich der Anteil der Trinkwassererwärmung am Gesamtenergiebedarf auf 50 % und mehr. (Simulation)

Der deutsche Wohngebäudebestand ist geprägt durch Gebäude, die vor Inkrafttreten der 1. Wärmeschutzverordnung von 1977 [BBSR 2015] errichtet wurden und einen für heutige Ansprüche geringen Energiestandard aufweisen. Der Anteil dieser Gebäude, welche zu 90 % mit Öl oder Gas beheizt werden, am gesamten Wohngebäudebestand beträgt 69 % [IWU 2015; BDEW 2016].

Die Gegenüberstellung verschiedener Gebäudeenergiestandards (Abb. 7) zeigt, dass bei einer guten oder sehr guten energetischen Sanierung der Gebäudehülle von Bestandsgebäuden der TWW-Energiebedarf unverändert bleibt. Der Endenergiebedarf für die Trinkwarmwasserbereitung am Gesamtenergiebedarf für Raumwärme und Trinkwarmwasser im Haushaltssektor im Bestand nimmt einen Anteil von ca. 20 % ein. Ausgehend von den im Projekt durchgeführten Simulationsstudien kann gezeigt werden, dass der relative Anteil in Neubauten oder sanierten Gebäuden mit einer guten Gebäudedämmung potenziell auf 50 % und höher ansteigen kann.

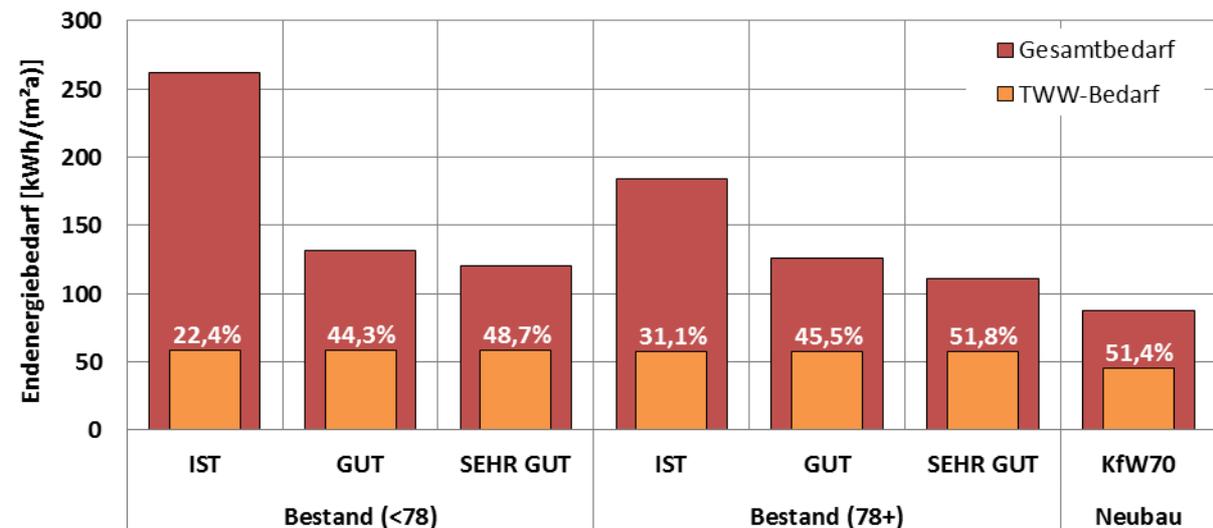


Abb. 7 Gegenüberstellung des flächenbezogenen Endenergiebedarfs für Raumheizung und TWE eines Mehrfamilienhauses und des TWE-Anteils für $\vartheta_{TWW,TWE} = 60 \text{ °C}$ bei Variation des Gebäudeenergiestandards¹

Hierdurch wird belegt, dass durch die fortschreitende Sanierung des Gebäudebestands die TWI und deren energetische Optimierung relativ gesehen maßgeblich an Bedeutung gewinnt und damit in Zukunft neue Anforderungen an die energetische Sanierung und den Neubau von Gebäuden und die TWI gestellt werden.

¹ Kategorien Gebäudeenergiestandard nach [IWU 2015]

3.3 Temperaturniveau TWW - Energetisches Einsparpotential und Anteil Erneuerbarer Energien im Bilanzraum „Gebäude“

Eine Absenkung des TWW-Temperaturniveaus erhöht das energetische Einsparpotential bei Betrachtung des Bilanzraumes Gebäude vor allem, weil es dadurch möglich ist, auf regenerativen Energien basierende Niedertemperatur-Wärmeversorgungssysteme einzusetzen. (Simulation)

In Abhängigkeit des Gebäudeenergiestandards ist bei einer Absenkung der Trinkwarmwassertemperatur um 5 K von 60 °C auf 55 °C ein Energieeinsparpotential von 2 % des Gesamtendenergiebedarfs im Bestand zu erwarten. In sanierten und neuen Gebäuden beträgt das Energieeinsparpotential bis zu 5 % am gesamten Endenergiebedarf. Bei einer Absenkung um 10 K auf 50 °C können bis zu 4,5 % im Bestand und bis zu 10 % in Gebäuden mit hohem Energiestandard am Gesamtenergiebedarf eingespart werden (vgl. Abb. 8). Im Fall von unter energetischen Aspekten sehr gut sanierten Gebäuden oder im Neubau, wenn die Raumwärme durch eine effiziente und auf regenerativen Energien basierende Heizungstechnik bereitgestellt wird, werden diese Effekte weiter verstärkt, da sich hier der Energieträger zusätzlich massiv auf den Primärenergiebedarf auswirkt. Im Fall von hocheffizienten Gebäuden dominiert das Temperaturniveau der zentralen TWW-Bereitung schon heute den Endenergiebedarf sowie die vorzuhaltende Heizleistung.

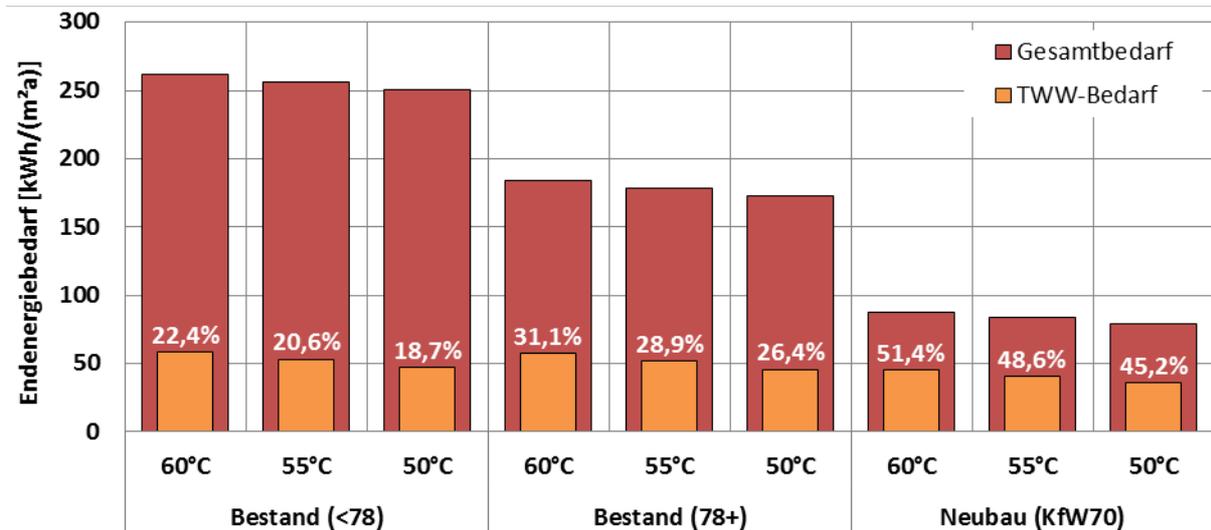


Abb. 8 Gegenüberstellung des flächenbezogenen Endenergiebedarfs eines MFH und dessen TWW-Anteil bei Absenkung des TWW-Temperaturniveaus

Regenerative Erzeugungstechnologien (insbesondere Wärmepumpe und Solarthermie) sind für einen effizienten Betrieb auf niedrige Systemtemperaturen angewiesen. Bei ihnen profitiert die Systemeffizienz zusätzlich zu den quantitativen Einsparpotenzialen massiv von einer Temperaturabsenkung. Dies ist damit zu begründen, dass sie bei niedrigeren Vorlauftemperaturen eine signifikante Effizienzsteigerung erfahren. Ebenso eröffnen sich neue Einsatzmöglichkeiten für die Wärmeversorgung durch Niedertemperatur-Wärmenetze, welche vor dem Hintergrund der Energiewende immer mehr an Bedeutung gewinnen [BMWi 2017]. Aus diesem Grund ist die Frage einer möglichen Temperaturabsenkung im TWW-Bereich vor allem als Wegbereiter für einen Energieträgerwechsel im Heizungsbereich generell von größter Bedeutung.

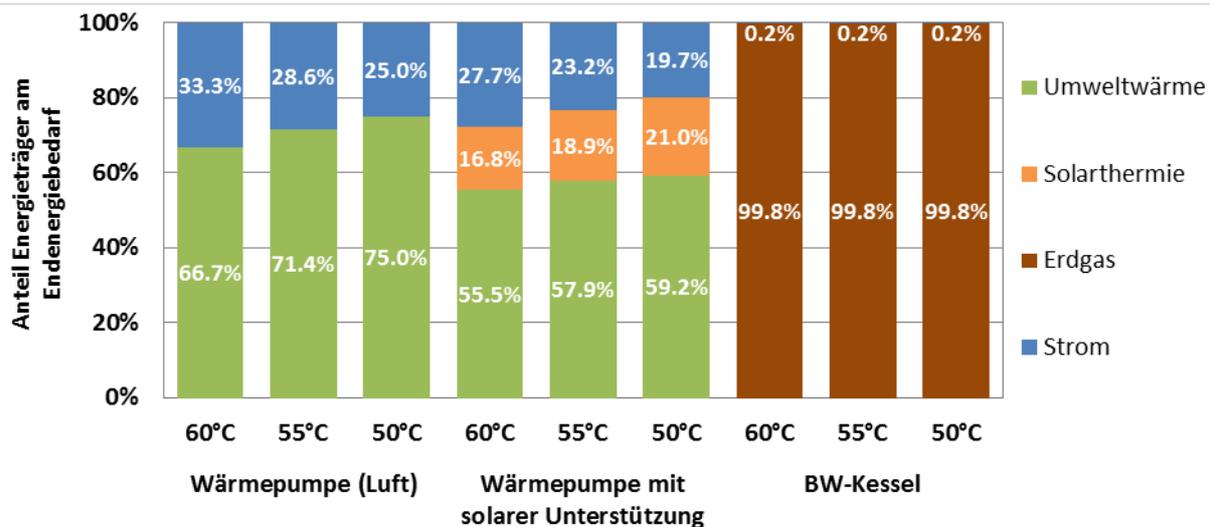


Abb. 9 Anteil regenerativer Energiequellen am gesamten Endenergiebedarf Gebäude bei Variation des Versorgungsszenarios und des TWW-Temperaturniveaus

Die Auswertung der im Projekt durchgeführten Simulationsstudien (Abb. 9) verdeutlicht, dass der relative solarthermische Beitrag am gesamten Endenergiebedarf eines Gebäudes bei einer Absenkung um 5 K von 17 % auf 19 % und bei einer Absenkung von 10 K von 17 % auf 21 % gesteigert werden kann. Weiterhin kann die Jahresarbeitszahl einer Luft-Wasser-Wärmepumpe im monovalenten Betrieb bei einer Temperaturabsenkung um 10 K um bis zu 18 % erhöht werden. Darüber hinaus bietet die Wärmepumpentechnologie den weiteren Vorteil, dass Strom aus bis zu 100 % erneuerbaren Energiequellen genutzt bzw. eine Optimierung des Eigenstrombedarfs vorgenommen werden kann. Die Wirkung der Absenkung der TWW-Temperaturen reicht damit in seiner Wirkung weit über den konkreten Anwendungsbereich hinaus.

3.4 Temperaturniveau TWW – Endenergiebedarf und Treibhausgasemissionen im Bilanzraum „Deutschland“

Eine Absenkung des TWW-Temperaturniveaus ermöglicht eine signifikante Reduzierung des Endenergiebedarfs und der Treibhausgasemissionen der Gebäude. Eine Reduzierung der TWW-Temperaturen kann damit entscheidend zu den Zielen der Energiewende beitragen. Die Erkenntnisse der Trinkwasserhygiene erlauben derzeit nur eine Absenkung um 5 K, wenn die a.a.R.d.T. eingehalten werden. (Simulation, Felduntersuchungen, Technikumsversuche)

Der jährliche Endenergiebedarf des Wohngebäudesektors beträgt 527,6 TWh/a (Stand 2015) [BDEW 2016], wovon ca. 436 TWh/a auf die Bereitstellung von Raumwärme und 91,6 TWh/a auf die Trinkwassererwärmung entfallen. Damit nimmt der Energiebedarf dieses Sektors einen Anteil von etwa 30 % am gesamten deutschen Endenergiebedarf ein. Bei der Absenkung der TWW-Temperatur von 60 °C auf 55 °C wird potentiell eine Reduktion des Energiebedarfes um 15,8 TWh/a (3 % des Sektorbedarfs) erreicht. Bei einer Absenkung von 10 K kann eine Verringerung um bis zu 31,4 TWh/a (6 %) erreicht werden². Wird dieses Einsparpotential auf das Minderungspotenzial von Treibhaus-

² Als Datengrundlagen wurden hierzu insbesondere die Gebäudestatistik aus [IWU 2015] und die Verteilung der Erzeugertechnologien im Bestand aus [BDEW 2016] verwendet. Weiterhin wird davon ausgegangen, dass jede Wohneinheit im Schnitt von vier Personen bewohnt wird.

gasemissionen³ umgerechnet, können bei einer Absenkung um 5 K etwa 4,5 Millionen Tonnen pro Jahr (Mio. t/a) CO₂ und bei einer Absenkung um 10 K ca. 9,0 Mio. t/a CO₂ vermieden werden. Darüber hinaus bietet die Absenkung des TWW-Temperaturniveaus ein erhöhtes Einsatzpotenzial für regenerative Erzeuger. Wird allein die Effizienzsteigerung bereits installierter regenerativer Wärmeerzeuger (siehe Abb. 9) berücksichtigt, könnten bei einer Temperaturabsenkung um 5 K zusätzlich bis zu 2 Mio. t/a CO₂ eingespart werden. Die Einsparpotenziale stehen einem gesamtdeutschen Treibhausgas-Ausstoß von ungefähr 900 Mio. t/a gegenüber. Diese Werte verdeutlichen, dass die Temperaturabsenkung des TWW ein relevantes Einsparpotenzial bietet und somit einen weiteren Schritt zur Erreichung der Klimaziele darstellt.

In Überlagerung mit These 6.1 kann derzeit aus trinkwasserhygienischer Sicht allerdings nur das Potential einer Absenkung um 5 K (von 60 °C auf 55 °C) als kurzfristig umsetzbar angesehen werden. Dies gilt zudem einschränkend nur für Gebäude, welche die aktuell gültigen a.a.R.d.T. einhalten.

³ Bei dieser Abschätzung wurde auf die Emissionskoeffizienten des Umweltbundesamts [UBA 2017_1] zurückgegriffen.

4 Auslegung, Installation und Betrieb

4.1 Temperatur des Trinkwassers (kalt) für Auslegung

Das Regelwerk Trinkwasser entspricht bzgl. der Temperaturen des Trinkwassers (kalt) nicht der Realität. Zur Auslegung der TWI sollte zukünftig als mittlere Temperatur für das Trinkwasser (kalt) 15 °C statt bisher 10 °C angenommen werden. (Felduntersuchungen, Technikumsversuche)

Das am Hausanschluss (HA) ankommende Trinkwasser (kalt) ist bedeutend wärmer als die nach Regelwerk festgelegten 10 °C. Der Median der in den Screening-Objekten gemessenen Temperaturen am HA beträgt 14,2 °C (n = 73 Objekte). Über ein Jahr hinweg betrachtet (Langzeitbeprobung, AP IV) liegen mehr als zwei Drittel der zentralen TWK-Proben oberhalb von 10 °C. Am Eintritt zum Versuchsstand sind es im Mittel 16,8 °C.

Eine Anhebung der Temperaturen des Trinkwassers am TWE in den Berechnungen zur Anlagenauslegung von 10 auf 15 °C bewirkt die in Abb. 10 dargestellte Veränderung der Masseströme TWK bzw. TWW bei einer Entnahmetemperatur von 40 °C an der Mischarmatur.

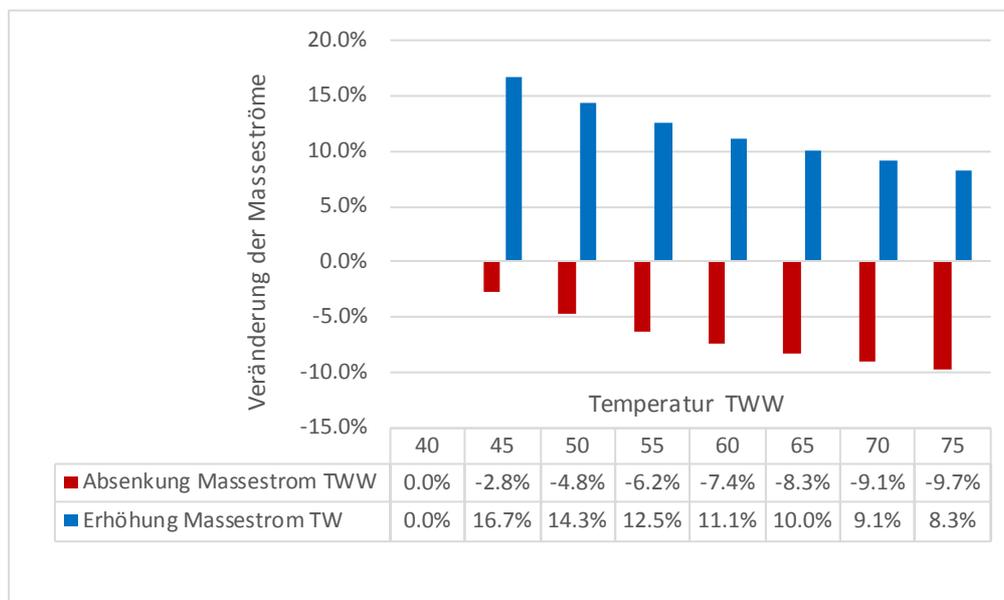


Abb. 10 Veränderung der Masseströme bei Anhebung der TWK-Temperaturen von 10 °C auf 15 °C für verschiedene Temperaturen TWW (40 °C Entnahmetemperatur)

4.2 Temperatur TWK und Wärmedämmung Rohrsystem

Die Qualität der Wärmedämmung der Rohrleitungen und Armaturen der Trinkwasser-Installation beeinflusst bei den in der Praxis heute entgegen den a.a.R.d.T. noch oft vorzufindenden parallelen Führungen der TWW und der TWK-Installation in einem gemeinsamen Schacht signifikant die Aufwärmung des Trinkwassers (kalt) aus der Trinkwarmwasser-Installation bis zum Teil deutlich über 25 °C. (Simulation, Technikumsversuche)

Bei den Versuchen am TWI-Versuchsstand mit gemeinsamer Führung von TWW und TWK (ohne Trennwand) wurden trotz korrekter Wärmedämmung der Rohrleitungen und Fittings in EnEV100 an vielen Stellen des Systems Temperaturen von deutlich über 25 °C

erreicht. In der Praxis wurden überdies häufig deutlich geringere Wandstärken der Wärmedämmung als EnEV100 vorgefunden.

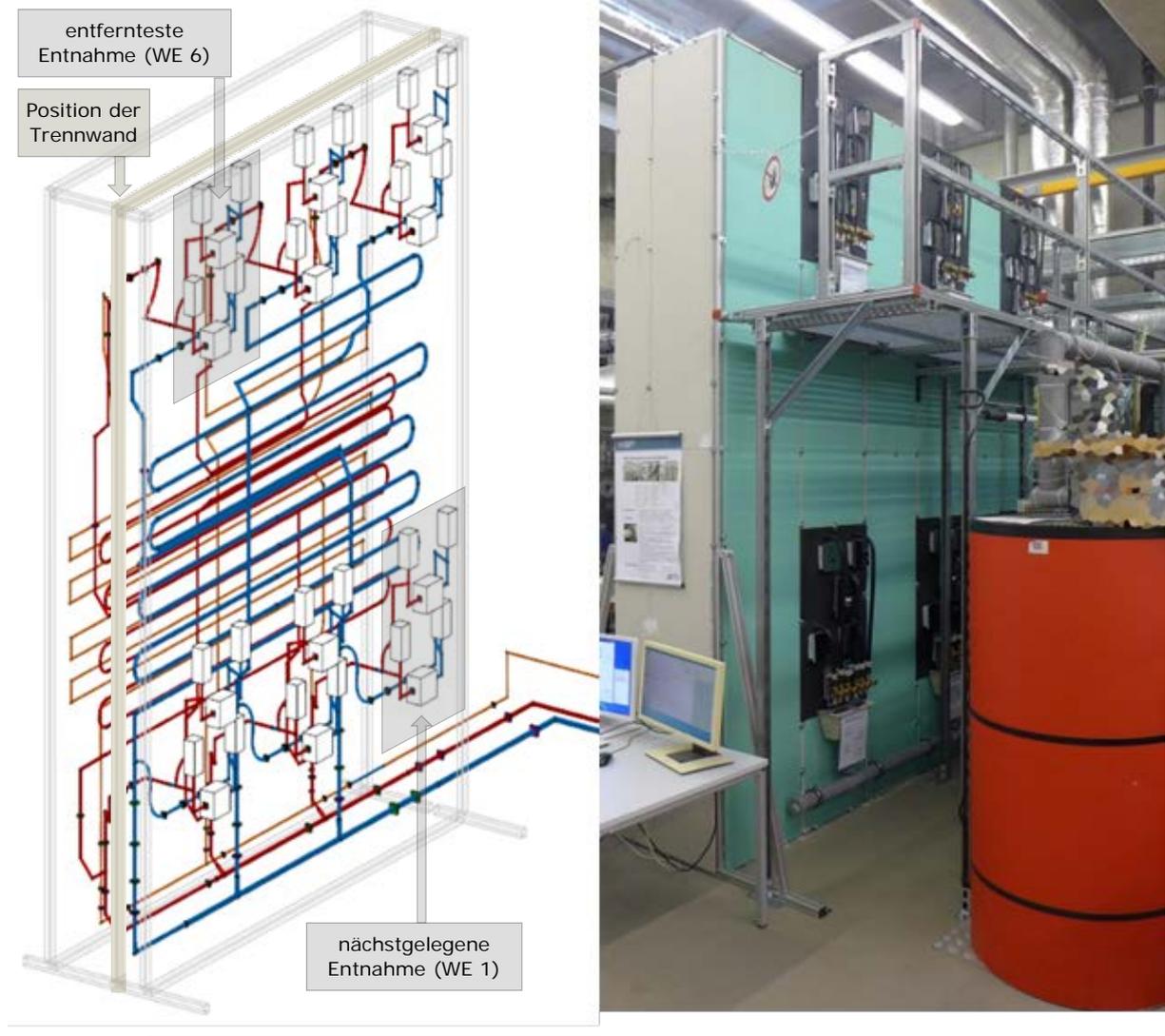


Abb. 11 TWI-Versuchstand – Versuche und Simulation mit und ohne Trennwand (links: 3D-Darstellung in SOLIDWORKS, rechts: Foto der Technikumsanlage im ZET der TU Dresden)

Die gezielte Simulationsstudie zur TWI hat gezeigt, dass in Abhängigkeit von der Parameterkombination eine ideal⁴ ausgeführte EnEV100-Wärmedämmung gegenüber einer ebenfalls ideal ausgeführten EnEV50-Dämmung eine ungewollte Aufwärmung des Trinkwassers (kalt) bei $60\text{ °C } \vartheta_{TWW, TWE}$ um bis zu 2 K reduziert, wenn TWW und TWK-Installation in einem Schacht geführt werden (s. a. Tab. 10). Eine Absenkung der TWW-Temperatur ausgehend von $\vartheta_{TWW, TWE} = 60\text{ °C}$ kann an den Entnahmestellen die Temperatur ϑ_{TWK} im Tagesmittel aber nur um ca. 0,5 K (entfernteste Entnahmestelle) bzw. 0,2 K (nächstgelegene Entnahmestelle) senken.

Der Einfluss der Wärmedämmung auf die TWK-Temperatur nimmt zwar mit sinkender Trinkwarmwassertemperatur $\vartheta_{TWW, TWE}$ ab, kann jedoch auch bei hoher Qualität (EnEV100-

⁴ Ideal heißt hierbei ohne Fehlstellen und Wärmebrücken.

Ausführung) bei typischen sommerlichen Verhältnissen ($\vartheta_{\text{TWK}} = 25 \text{ °C}$; $\vartheta_{\text{Raum}} = 24 \text{ °C}$) nicht verhindern, dass die tagesmittleren Temperaturen im kalten Trinkwasser an den Entnahmestellen 25 °C zum Teil signifikant überschreiten.

Bei hohen Raumtemperaturen und hohen Temperaturen des TWK am Hauseintritt wird die empfohlene maximale Temperatur von 25 °C des TWK überschritten (bis zu 4,5 K bei EnEV50- und bis zu 3 K bei EnEV100-Dämmung). Eine ideale Dämmung allein ist also nicht geeignet, die empfohlene Maximaltemperatur für TWK einzuhalten, da selbst bei auf 45 °C abgesenkten TWW-Temperaturen am Austritt des Trinkwassererwärmers die Überschreitung im TWK an der entferntesten Entnahmestelle noch 2,7 bzw. 1,6 K beträgt.

In der Praxis sind sommerliche Raumtemperaturen und Temperaturen am Hauseintritt von bis zu 30 °C zu beobachten, sodass sich ein noch gravierenderes Verschieben der mittleren TWK-Temperaturen in den Bereich des optimalen Legionellenwachstums von 25 bis 45 °C ergeben kann.

Tab. 10 Einfluss einer idealen Wärmedämmung (EnEV50 und EnEV100) der Rohrleitungen auf die Tagesmitteltemperaturen des Trinkwassers (kalt) an den Entnahmestellen für ausgewählte Parameterkombinationen $\vartheta_{\text{TWW,TWE}}$; ϑ_{TWK} ; ϑ_{Raum}

Mittelwertvergleich ausgewählter Temperaturen ohne Kanaltrennwand									
Temperatur			Kanal	Nächstgelegene Entnahmestelle			Entfernteste Entnahmestelle		
-			EnEV 50 - EnEV 100	EnEV 50	EnEV 100	-	EnEV 50	EnEV 100	-
ϑ_{TWW}	$\vartheta_{\text{TW,HA}}$	ϑ_{Raum}	$\Delta\bar{\vartheta}_{\text{Kanal,gesamt}}$	$\bar{\vartheta}_{\text{TWK,WE 1}}$	$\bar{\vartheta}_{\text{TWK,WE 1}}$	$\Delta\bar{\vartheta}$	$\bar{\vartheta}_{\text{TWK,WE 6}}$	$\bar{\vartheta}_{\text{TWK,WE 6}}$	$\Delta\bar{\vartheta}$
70	15	20	2,2	20,8	19,1	1,7	25,5	23,0	2,5
			1,7	20,0	18,6	1,4	24,0	22,0	2,0
			1,4	19,6	18,4	1,2	23,3	21,5	1,8
			1,1	19,3	18,2	1,1	22,6	21,0	1,6
			1,0	19,3	18,2	1,1	22,3	20,9	1,4
70	25	24	2,0	28,2	27,0	1,2	31,0	29,1	1,9
			1,5	27,4	26,5	0,9	29,5	28,0	1,5
			1,3	27,0	26,2	0,8	28,8	27,5	1,3
			1,0	26,6	26,0	0,6	28,0	27,0	1,0
			0,9	26,3	25,8	0,5	27,4	26,6	0,8

4.3 Temperatur TWK - Einfluss getrennter Führung TWW/TWK

Die Qualität der Ausführung einer Kanaltrennung von TWW und TWK ist für die Vermeidung der Aufwärmung des kalten Trinkwassers wesentlich wichtiger als die Absenkung der Vorlaufemperatur des Trinkwarmwassers. Architekten, Planer und Bauherren müssen die Ausführung einer ausreichend gedämmten Trennwand der TWK-Installation zur TWW-Installation und anderen warmgehenden Leitungen (Heizung, Solarthermie etc.) realisieren bzw. die räumlich getrennte Führung des TWK umsetzen. (Simulation, Technikumsversuche, Felduntersuchungen)

Nach den a.a.R.d.T. sind Trinkwarmwasser-Installation und die Installation Trinkwasser (kalt) in getrennten Kanälen mit räumlicher Trennung oder zwischenliegender Dämmung zu führen. Dies wird jedoch selten realisiert, z. B. nur in 28 der 101 Feldobjekte⁵.

Die Ergebnisse der Simulationsstudie in Tab. 11 zeigen trotz Annahme einer idealen EnEV100-Wärmedämmung recht deutlich den Einfluss der Kanaltrennwand auf die für das Trinkwasser (kalt) relevante Kanaltemperatur. Damit wird erreicht, dass bei korrekt mit Kanaltrennwand ausgeführten Installationen die Temperatur des Trinkwassers (kalt) selbst im Szenario „Extremfall warm“ maximal bei 25,3 K liegt. Bei $\vartheta_{TWW,TWE} = 50\text{ °C}$ bzw. 45 °C dominiert sogar der Wärmeverlust an den Raum (24 °C), sodass theoretisch eine Temperaturabsenkung um $0,3\text{ K}$ gegenüber dem Hauseintritt (25 °C) erreicht werden würde.

Tab. 11 Einfluss der Kanaltrennwand auf die Tagesmitteltemperaturen des Trinkwassers (kalt) an den Entnahmestellen für ausgewählte Parameterkombinationen $\vartheta_{TWW,TWE}$; ϑ_{TWK} ; ϑ_{Raum} bei idealer EnEV100-Wärmedämmung der TWI

Mittelwertvergleich ausgewählter Temperaturen ohne und mit Kanaltrennwand											
Temperatur			Kanal			Nächstgelegene Entnahmestelle			Entfernteste Entnahmestelle		
-			ohne -	mit - Trennwand		ohne -	mit -	-	ohne -	mit -	-
ϑ_{TWW}	$\vartheta_{TW,HA}$	ϑ_{Raum}	$\bar{\vartheta}_{Kanal,gesamt}$	$\bar{\vartheta}_{Kanal,TWW}$	$\bar{\vartheta}_{Kanal,TWK}$	$\bar{\vartheta}_{TWK,WE 1}$	$\bar{\vartheta}_{TWK,WE 1}$	$\Delta\bar{\vartheta}$	$\bar{\vartheta}_{TWK,WE 6}$	$\bar{\vartheta}_{TWK,WE 6}$	$\Delta\bar{\vartheta}$
70	15	20	28,0	31,2	20,8	19,1	16,9	2,2	23,0	18,6	4,4
			26,3	29,0	20,5	18,6	16,8	1,8	22,0	18,5	3,5
			25,5	27,8	20,4	18,4	16,8	1,6	21,6	18,4	3,2
			24,6	26,7	20,3	18,2	16,8	1,4	21,1	18,3	2,8
			23,8	25,6	20,1	18,3	17,0	1,3	21,0	18,5	2,5
70	25	24	31,7	34,3	25,5	27,0	25,1	1,9	29,1	25,3	3,8
			30,0	32,1	25,2	26,5	25,0	1,5	28,1	25,1	3,0
			29,2	30,9	25,0	26,3	25,0	1,3	27,6	25,0	2,6
			28,4	29,8	24,9	26,0	24,9	1,1	27,1	24,9	2,2
			27,5	28,7	24,7	25,9	24,9	1,0	26,7	24,8	1,9

Besonders wichtig sind demzufolge die Existenz und die Qualität dieser Trennwand bei den heute nominell mit 60 °C TWW-Temperatur betriebenen Anlagen. Mehr als bislang sollte bei Problemanlagen deshalb die Behebung dieses Mangels in den Fokus gerückt werden. Angeordnete Maßnahmen der thermischen Desinfektion ohne vorherige Ertüchtigung der Trennwand können hier zwar ggf. ein vorhandenes Problem im TWW-System beheben, aber bei unangemessen langer Dauer dieser Betriebsweise in das Kaltwassersystem verlagern.

⁵ 6 Objekte mit Steigleitung getrennt, 1 Objekt mit Leitung im Keller getrennt, 21 Objekte mit beidem getrennt

4.4 TWK-Temperaturen und TWW-Temperaturregime 70 °C

Der Betrieb des TWW-Systems mit 70 °C am Austritt des TWE bewirkt eine Aufwärmung des TWK in einen trinkwasserhygienisch kritischen Bereich und erhöht die Zirkulationswärmeverluste signifikant. Ein vorbeugender Einsatz ohne gleichzeitiges Spülen an den Entnahmestellen ist deshalb abzulehnen. (Simulation, Felduntersuchungen)

Eine eventuell im Betriebsregime integrierte regelmäßige Temperaturerhöhung (z. B. jede Nacht oder wöchentlich für eine Stunde auf 70 °C ohne mikrobiologischen Befund - oft fälschlicherweise als „Legionellen-Schutzschaltung“ oder „vorbeugende thermische Desinfektion“ bezeichnet - wirkt gleichsinnig zu den in These 4.3 beschriebenen Fakten. Die sich im TWK einstellenden Temperaturen liegen wegen der überwiegend fehlenden nächtlichen Entnahme durch den Nutzer insbesondere bei sommerlichen Bedingungen deutlich über 25 °C. Zu berücksichtigen sind überdies die Tatsachen, dass eine thermische Desinfektion nur bei zeitgleicher Spülung auch der nicht zirkulierenden Sticheleitungen in der TWW-Peripherie, wo zumeist ein Legionellenbefall zu lokalisieren ist, Wirkung zeigt und der Zirkulationswärmebedarf um 25 bis 30 % gegenüber einem 60 °C-Betrieb steigt (s. These 3.1). Entnahmen des Nutzers in diesen Zeiten bergen überdies eine Verbrühungsgefahr. Das Entfallen dieser „vorbeugenden“, in keinem trinkwasserhygienischen Regelwerk enthaltenen, Temperaturerhöhung auf 70 °C sollte objektkonkret überdacht werden und bei Neuanlagen gänzlich entfallen. Auch Zeiträume der thermischen Desinfektion im Fall einer Überschreitung des technischen Maßnahmewertes für Legionellen nach TrinkwV sollten genau deshalb auf ein Minimum beschränkt werden. Überdies ist vorher zu prüfen, ob die eingesetzten Werkstoffe und Installationsarten dafür geeignet sind. Es sollte geprüft werden, ob nicht schon ein Spülen mit 60 °C erfolgreich sein kann (s. a. These 7.1). Generell wird nach derartigen Spülprozessen empfohlen, eine Spülung der TWK-Seite vorzunehmen um das unzulässig hoch erwärmte TWK auszustoßen.

4.5 Einfluss der Art des Zirkulationsabgleichs

In einer nach den a.a.R.d.T. gebauten und betriebenen TWI ist die Legionellenkonzentration nicht von der Art der eingesetzten Technik zur Erzielung des hydraulischen Zirkulationsabgleichs abhängig. (Technikumsversuche)

Die drei technisch korrekt ausgeführten Methoden des Zirkulationsabgleichs zeigten im TWI-Versuchsstand bei gleichen Temperatur- und Entnahmebedingungen kein erkennbar unterschiedliches Vermehrungs- oder Abtötungspotential bezüglich Legionellen in der Zirkulation oder in den peripheren Wohneinheiten.

Dies gilt auch für die Versuche mit elektrischer Begleitheizung, trotz der deutlich verminderten TWW-Temperaturen (Abb. 12). Es sollte in weiteren Untersuchungen geprüft werden, ob dies auch für Untersuchungszeiträume von deutlich mehr als drei Wochen bestätigt werden kann.

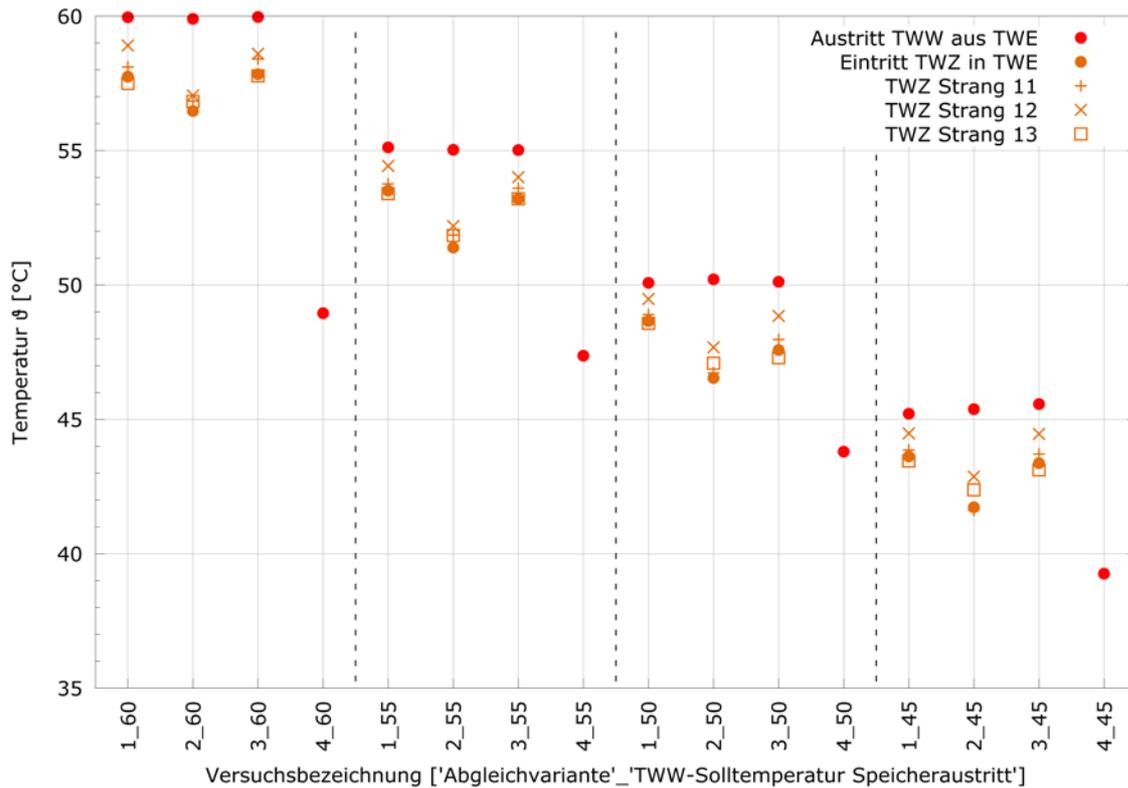


Abb. 12 Tagesmitteltemperaturen des TWW-Systems im Technikumsversuchsstand. Gemessen wurden die Temperaturen am Speicheraustritt, dem Zirkulationseintritt sowie peripher in den drei Zirkulationssteigsträngen 11, 12 und 13 (kurz vor den WE 4 bis 6); Versuchskenung s. Tab. 5.

4.6 Gleichzeitigkeit der Trinkwarmwasser-Entnahme

Die heutigen Annahmen zur Gleichzeitigkeit der Entnahme von Trinkwarmwasser bei Auslegung und Sanierung einer Trinkwasser-Installation (z. B. DIN 1988-200, -300) sind für den untersuchten Gebäudebestand im Wohnungsbau als tendenziell zu hoch einzustufen. Infolgedessen treten erhöhte Zirkulationswärmeverluste auf. (Felduntersuchungen)

Entscheidend für die Auslegung der Trinkwarmwasser-Installation ist die Gleichzeitigkeit der Entnahme in einem Objekt. Die Gleichzeitigkeit der Entnahme von Trinkwarmwasser lag in den Felduntersuchungen der THM zufolge teilweise erheblich unter den heutigen Vorgaben z. B. nach EN 806 und DIN 1988-200, -300. Besonders kritisch ist die daraus resultierende Überdimensionierung der zentralen TWW-Leitungen im Umfeld des Trinkwassererwärmers, da sich wegen der daraus resultierenden größeren Rohroberfläche unmittelbar höhere Zirkulationsverluste ergeben.

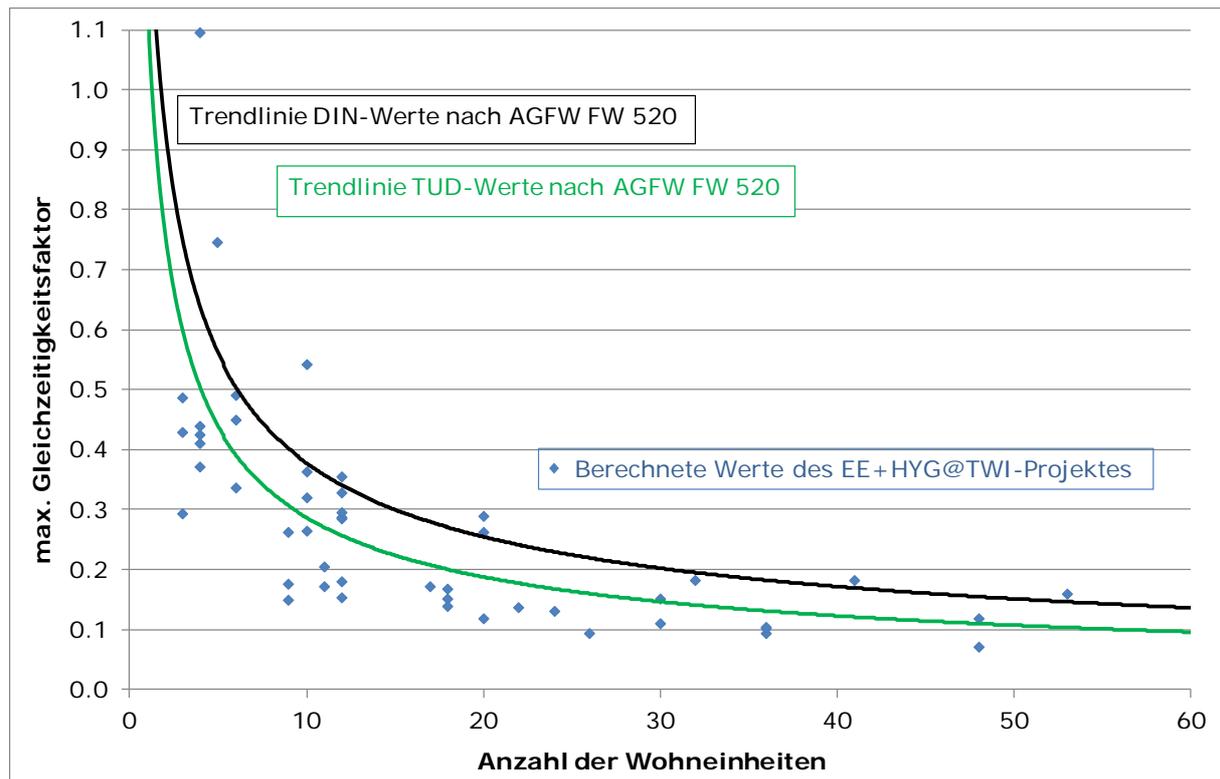


Abb. 13 Spitzenentnahmen Trinkwarmwasser der Mehrfamilienhäuser bei zentraler TWE (Auswertung 14-tägige Messungen von 10-Sekunden-Mittelwerten) im Vergleich zu den Daten nach AGFW FW 520

Abb. 13 zeigt, dass bei Auswertung der thermohydraulischen Messungen in 80 Mehrfamilienhäusern (10-Sekunden-Mittelwerte) die DIN-Werte und sogar die TUD-Werte aus Messungen Ende der 1990er Jahre bei dem heutigem Abnehmerverhalten überwiegend unterschritten werden. Der prozentuale Zeitanteil dieser Spitzenentnahmen an der gesamten Entnahmezeit liegt überwiegend unter 0,1 %. Zu diskutieren ist deshalb auch, auf welches Zeitintervall der Mittelwertbildung die Ableitung von Gleichzeitigkeitsfaktoren abstellen soll.

4.7 Einfluss der TWW-Temperatur auf Raumtemperaturen

Die Wärmeverluste des Trinkwarmwassersystems führen im Sommer zu einer ungewollten Aufheizung der Räume. (Simulation)

Die Trinkwarmwasser führenden Rohrleitungen geben Wärme an ihre Umgebung ab. Sind sie innerhalb der thermischen Hülle verlegt, reduziert diese Wärmeabgabe den Heizwärmebedarf, den die Raumheizung decken muss (ungeregelte Wärmeeinträge). Diese Reduzierung repräsentiert im Gebäudebestand ca. 0,7 % und in neuen bzw. sanierten Gebäuden bis zu 1,2 % des Gesamtnutzwärmebedarfs (Abb. 14). Die Differenz zwischen den Werten entsteht, da der Gesamtnutzwärmebedarf als Bezugsgröße in starker Abhängigkeit zu dem Gebäudeenergiestandard des Gebäudes steht. Bei diesen Angaben wird bereits berücksichtigt, dass die Wärmeeinträge der TWW-Verteilung nur innerhalb der saisonalen Heizperiode zu einer Senkung des Heizbedarfs führen. Außerhalb dieser Heizperiode und infolge der sommerlichen Erwärmung der Innenraumluft erzeugen die Wärmeeinträge der Verteilung hingegen einen zusätzlichen Kühlbedarf, der bei der Verwendung eines Kühlsystems berücksichtigt werden muss. Bei einer Reduzierung des TWW-Temperaturniveaus werden die Effekte der thermischen Interaktion zwischen TWW-

Verteilung und Gebäude geringer, wie Abb. 14 verdeutlicht. Grundsätzlich sind diese Effekte bezüglich ihrer Auswirkungen auf den Gesamtenergiebedarf bzw. die Gesamtenergiebilanz eines Gebäudes zwar als gering einzustufen, bei einer detaillierten energetischen Bewertung eines Wohngebäudes sollte die thermische Interaktion zwischen Verteilung und Gebäude jedoch berücksichtigt werden.

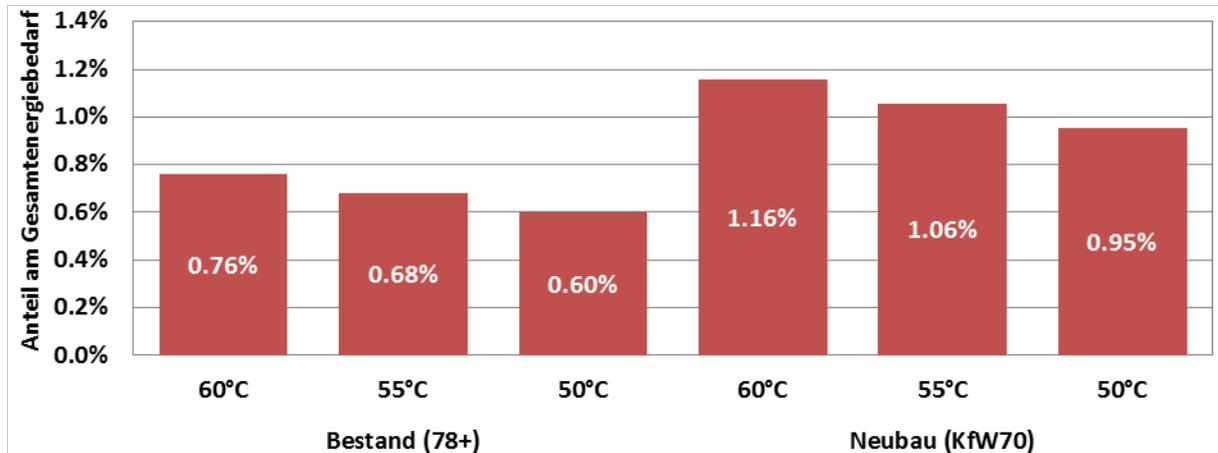


Abb. 14 Prozentualer Anteil der Wärmeverluste der TWV-Verteilung am Gesamtnutzwärmebedarf gemäß DIN V 18599-5 eines Wohngebäudes bei Variation des Gebäudeenergiestandards und des TWV-Temperaturniveaus

Bei der Bewertung der Interaktion von Verteilung und Gebäude ist hinsichtlich hygienischer Anforderungen zu beachten, dass das Trinkwasser bei einer entsprechenden Stagnationszeit (bspw. über Nacht) die Temperatur der Umgebung annimmt, woraus ein erhöhtes Risiko hygienisch relevanter Kontamination resultiert. Eine Abschwächung dieser Temperaturangleichung kann insbesondere durch eine thermische Entkopplung der Rohrleitungen realisiert werden. Die Verlegung von TWV- und TWK-Leitungen in separaten Installationsschächten erweist sich dabei gegenüber einer Verbesserung der Rohrleitungsdämmung als effektivere Maßnahme (vgl. These 4.3).

4.8 5-K-Regel Zirkulation

Es gibt keinen statistischen Zusammenhang zwischen der Einhaltung der sogenannten 5-K-Regel z. B. nach DVGW W 551 und Legionellenkontamination. (Felduntersuchungen)

Die sogenannte 5-K-Regel fordert, dass die Temperaturdifferenz zwischen Ausgang Trinkwassererwärmer und Wiedereintritt der Zirkulation in den TWE (i.d.R. erfolgt die Abkühlung des TWV im Zirkulationssystem) nicht mehr als 5 K betragen darf. In den thermohydraulischen Messungen wurden sowohl deutliche Unterschreitungen als auch Überschreitungen der Temperaturdifferenz gemessen. Interpretiert man den Bereich von 4 bis 6 K (Medianwert über 14 Tage) als Erfüllung der 5-K-Regel, so liegen trotzdem noch 28,4 % der Objekte oberhalb von 6 K und 48,4 % der Objekte unterhalb von 4 K.

Es wurde mittels statistischer Tests (Chi-Quadrat-Unabhängigkeitstest) geprüft, ob eine Legionellen-Kontamination der TWI in Abhängigkeit zu einer Nicht-Einhaltung der 5-K-Regel steht. Jedoch konnte kein signifikanter Einfluss (Signifikanz: $p=0,334$) festgestellt werden. Somit ist die Einhaltung der sogenannten 5-K-Regel kein notwendiges Kriterium, um eine Legionellen-Kontamination der TWI sicher auszuschließen. Zu beachten ist, dass die 5-K-Regel jedoch im Gesamtkontext des TWI-Systems ein hinreichendes Kriterium für die korrekte Funktion des Gesamtsystems der TWI darstellen kann.

Dies gilt sowohl für die herkömmliche Auslegungsweise (Betrachtung der Temperaturdifferenz unabhängig von der absoluten Vorlauftemperatur) als auch für Objekte mit TWZ ≥ 60 °C bzw. ≥ 55 °C. Diese These wird auch durch Ergebnisse der Langzeituntersuchungen unterstützt, da hier in den quartalsweise über ein Jahr untersuchten Objekten auftretende positive Legionellenbefunde mit >100 KbE/100 mL im 2. Liter und im 5. Liter der Peripherie nicht in einem statistisch signifikanten Zusammenhang mit der Temperatur der Zirkulation stehen. Aus diesem fehlenden statistischen Zusammenhang lässt sich jedoch nicht schließen, dass die TWW-Temperatur keinen Einfluss auf die Legionellenkontaminationen hat. Vielmehr unterstützt dies die Annahme, dass das Auftreten von Legionellen in der TWI ein multifaktorielles Geschehen darstellt (d.h. verschiedene Einflussfaktoren führen in ihrer Summe zu einem erhöhten Legionellenrisiko) und nicht unikausal zu erklären ist. Neben den absoluten TWW-Temperaturen kommen z. B. die eingehende Trinkwasserqualität, der Wasserverbrauch (Stagnation), Leitungslängen, Werkstoffe der TWI und auch Temperaturdynamiken im kalten und warmen Trinkwasser in Betracht. Dies zu klären, bedarf es einer Überlagerung aller wissenschaftlich belegten Einflüsse auf die Auslegung der TWI [z. B. Völker 2016] sowie weiterer empirischer Forschung.

4.9 Wartung und Zirkulationsbetrieb

Die Wartung der TWI (z. B. nach VDI 6023) ist wichtig zur Vermeidung von Legionellen-Kontaminationen. Ein installiertes Trinkwarmwasser-Zirkulationssystem muss auch aktiv betrieben werden, da es sonst zu einer Erhöhung des Kontaminationsrisikos kommt. (Felduntersuchungen)

Im Vergleich zu 31 % der TrinkwV-konformen TWW-Proben von Großanlagen ohne aktive Zirkulation (2. Liter zentral und peripher; 6/19 Proben positiv) wiesen in Großanlagen mit aktiver Zirkulation nur 6 % der TrinkwV-konformen TWW-Proben (2. Liter zentral und peripher; 15/252 Proben) Legionellen auf. Der aktive Betrieb einer Zirkulation, welcher nach a.a.R.d.T. für Großanlagen verbindlich ist, senkt das Risiko einer Legionellenkontamination somit drastisch und unabhängig von ggf. weiteren, additiv im Sinne eines multifaktoriellen Geschehens möglichen, die Legionellenkontaminationen beeinflussen den TWI-Parametern.

Das Relative Risiko RR einer Kontamination ist um 68 % höher, wenn keine Wartung der TWI vorgenommen wurde (p-Wert: 0,00; RR = 1,68). Als weitere Objektparameter mit signifikantem Einfluss auf eine Kontamination haben sich folgende Aspekte herausgestellt: Bei Objekten mit vorhandenen Probenahmestellen in der Zentrale ist das Relative Risiko einer Kontamination im 2. Liter TWW um 60 % geringer als in Objekten ohne diese Probenahmeöhne. Gibt es keine Verbraucherbeschwerden (z. B. verfärbtes Wasser, zu geringer Wasserdruck, zu niedrige TWW-Temperaturen, etc.) oder Probleme im Betrieb der TWI (z. B. Rohrbrüche etc.), halbiert sich das RR einer Kontamination im 2. Liter TWW (RR = 0,52).

4.10 Schulungsbedarf Betreiber

Die Unternehmer oder sonstigen Inhaber einer Anlage (UsI) und auch die von Ihnen mit dem Betrieb und der Wartung Beauftragten verfügen oft nicht zuverlässig über ausreichende Informationen zu ihrer Trinkwasser-Installation und deren Betriebsweise. Es besteht ein hoher Aufklärungs- und Schulungsbedarf der Betreiber hinsichtlich der Vorgaben der TrinkwV einerseits und ihrer eigenen Anlagen andererseits. Für Neuanlagen und umfassende Sanierungen muss bei der Übergabe der Anlage eine entsprechende Dokumentation inkl. einer

mikrobiologischen Beprobung zwingend abgefordert werden (siehe z. B. VDI 6023). (Felduntersuchungen)

Für die 101 Objekte, in denen die trinkwasserhygienische Beprobung und die thermohydraulischen Messungen durchgeführt werden konnten, lagen nur in 49 Objekten Strangschemata und in 31 Objekten Schaltpläne zur Trinkwassererwärmung selbst vor. So musste bei der Festlegung der dezentralen Probenahmestellen in den Wohn- und Nuteinheiten oft auf die Gebäudekubatur zurückgegriffen werden und es konnte keine direkte Stranguordnung erfolgen.

Die Informationen, die die UsI bzw. deren Beauftragte in die *Checklisten* einzutragen hatten, enthielten nur wenige Abfragen (s. Abb. 15). Die Auswertungen der dort für den Austritt des Trinkwassererwärmers (TWE-TWW) angegebenen Temperaturbereiche zeigten im Vergleich mit denen im *Begehungsprotokoll* und auch den thermohydraulischen Messungen über mindestens 2 Wochen (THM) teilweise gravierende Abweichungen. Die Differenz zwischen den Angaben im *Begehungsprotokoll* und dem Mittelwert der THM betrug bis zu 28,7 K, durchschnittlich immerhin ± 3,6 K.

Checkliste zur Objektauswahl EE+HYG@TWI
(Zutreffendes bitte ankreuzen, für jedes Objekt ein separates Blatt ausfüllen)

Objektnummer	Wird vom Projektteam vergeben!	
Name Objekt-„Lieferant“		
Postleitzahl, Ort		
Objektart	<input type="radio"/> Mehrfamilienhaus <input type="radio"/> Krankenhaus <input type="radio"/> Pflegeheim <input type="radio"/> Ein- oder Zweifamilienhaus <input type="radio"/> Schule, Kindergarten <input type="radio"/> Turnhalle <input type="radio"/> Hallenbad <input type="radio"/> Freibad <input type="radio"/> Arztpraxis <input type="radio"/> Gewerbl. Räume, Firma <input type="radio"/> Gemeinschaftsunterk. <input type="radio"/> Hotel <input type="radio"/> Gaststätte <input type="radio"/> Campingplatz <input type="radio"/> Sonstiges	
Temperatur Trinkwarmwasser (TWW) am Austritt TWE (im nominellen Betrieb, nicht Auslegungsfall)	<input type="radio"/> 45 - 50 °C <input type="radio"/> 50 - 55 °C <input type="radio"/> 55 - 60 °C <input type="radio"/> 60 - 65 °C	
Einteilung nach W551	<input type="radio"/> Großanlage <input type="radio"/> Kleinanlage <input type="radio"/> Mit Zirkulation <input type="radio"/> Mit elektr. Begleitheizung	
Zirkulation	<input type="radio"/> Manueller hydraulischer Abgleich <input type="radio"/> Neue Methoden des Zirkulationsabgleichs Fabrikat/Typ:	
Art der TWE	<input type="radio"/> TWW-Speicher <input type="radio"/> Dezentrales Durchflussprinzip <input type="radio"/> Speicherladeprinzip <input type="radio"/> Zentrales Durchflussprinzip	
Erzeugertechnologien	<input type="checkbox"/> Kessel <input type="radio"/> Gas <input type="radio"/> Holzpellets <input type="radio"/> Öl <input type="radio"/> Biomasse allgemein <input type="checkbox"/> Fernwärme Vorlauftemperatur Netz: °C <input type="checkbox"/> Wärmepumpe <input type="radio"/> gasmotorisch <input type="radio"/> elektrisch <input type="checkbox"/> Solarthermie <input type="checkbox"/> Nachheizung elektrisch Stromnetz <input type="checkbox"/> Photovoltaik <input type="checkbox"/> Sonstiges (bitte benennen):	

Abb. 15 Checkliste zur Objektauswahl für UsI bzw. Beauftragte

Auch die Ermittlung der Art der Trinkwassererwärmung lt. *Checkliste* und insbesondere die Beurteilung des gespeicherten Trinkwasservolumens im Rahmen des *Begehungsprotokolls* erwiesen sich auf Grund der fehlenden Schemata als kompliziert. So mussten oft Speichercharakterisierungen über Typenschilder und eine Leitungsverfolgung durchgeführt werden, um im Rahmen der Felduntersuchung Skizzen der TWE zu erstellen.

Die Installation der Entnahmestellen für die Legionellen-Beprobung im Umfeld des TWE ist sehr heterogen. So existieren bei engen Platzverhältnissen oft gar keine Entnahmestellen für TWE-TWW (4 EFH, 4 MFH [davon 3 in der Schweiz]) und die für den Eintritt der Zirkulation in den TWE (TWE-TWZ) ist nicht immer auf der Saugseite der Zirkulationspumpe angeordnet (nur 50 %).

Die Installation der Entnahmestellen für die Legionellen-Beprobung im Umfeld des TWE ist sehr heterogen. So existieren bei engen Platzverhältnissen oft gar keine Entnahmestellen für TWE-TWW (4 EFH, 4 MFH [davon 3 in der Schweiz]) und die für den Eintritt der Zirkulation in den TWE (TWE-TWZ) ist nicht immer auf der Saugseite der Zirkulationspumpe angeordnet (nur 50 %).

Fazit

Die Kenntnisse vieler Betreiber über ihre TWE sind nicht ausreichend als Basis für eine sichere Prävention vor Legionellen-Kontaminationen bzw. den gezielten Umgang mit positiven Legionellen-Befunden. Dies äußert sich z. B. in starken Abweichungen der Temperaturangabe laut Betreiber bei der Begehung zu den gemessenen realen Werten, aber auch in vielen lückenhaften oder fehlenden Antworten bei der Befragung. Die Betreiberreaktionen im Rahmen der Objekt-Akquise haben weiterhin gezeigt, dass viele Betreiber keine oder nur unzureichende Kenntnis ihrer Pflichten nach TrinkwV besitzen, v. a. was Überwachung und Betrieb ihrer TWI betrifft. Hier herrscht ein hoher Aufklärungs- und Schulungsbedarf.

5 Mikrobiologische Analysemethoden und Probenahme

5.1 Neue molekularbiologische und durchflusszytometrische Methoden

Molekularbiologische und durchflusszytometrische Methoden können das etablierte und nach TrinkwV geforderte Kultivierungsverfahren bei der Überwachung von TWI hinsichtlich Legionellen derzeit unterstützen, aber nicht ersetzen. (Felduntersuchungen, Emulatorversuche und Laborexperimente)

Die Kultivierung gilt derzeit als „Goldstandard“ der Legionellen-Detektion in der deutschen Trinkwasserüberwachung. Dabei schreibt die TrinkwV vor, dass Trinkwasser auf die Anwesenheit der gesamten Gattung *Legionella* spp. überprüft werden soll. Durch die festgelegten Methoden nach ISO 11731 bzw. UBA-Empfehlung [UBA 2012] kommt es dabei zu einer gewissen Gewichtung in Richtung *L. pneumophila*.

Als alternative und kulturunabhängige molekularbiologische Methode zur spezifischen Legionellen-Detektion könnte die qPCR eingesetzt werden, welche die in der Probe vorhandene DNA spezifisch detektiert und quantifiziert. Die Untersuchungen auf Basis der Gattung *Legionella* spp. zeigen allerdings durchgängig für fast alle untersuchten Objekte und unabhängig von einem kulturellen Nachweis die Anwesenheit der Gattung *Legionella* spp. in hohen Konzentrationen von im Mittel 10^4 bis maximal 10^5 GU/500 mL.

Bzgl. *L. pneumophila* lieferte die qPCR im Rahmen der Objektuntersuchungen mit 38 % häufiger positive Ergebnisse als die Kultur (25 %). Allerdings sind die Analyseergebnisse bzgl. der Positiv-Proben nicht deckungsgleich: nur 76 % der Proben wurden in beiden Verfahren identisch klassifiziert. Dabei waren 42 % der positiven Kultur-Proben auch in der qPCR positiv, aber nur 17 % der positiven qPCR-Proben wurden auch durch das Kulturverfahren als positiv ausgewiesen. Es besteht kein signifikanter statistischer Zusammenhang des Gehaltes an *Legionella* spp.-DNA bzw. *L. pneumophila*-DNA in den Proben zu kulturell nachweisbarem Befall, der für eine Ergebnisinterpretation im Sinne der Beurteilung nach TrinkwV verwertet werden könnte. Ähnliche Diskrepanzen zwischen Ergebnissen von Kultivierung und qPCR zeigte auch [Schreiber 2012] schon auf. Der Wert einer DNA-Konzentration lässt sich daher derzeit weder im Sinne eines gesundheitlich begründeten Grenzwertes noch im Sinne eines technischen Maßnahmenwerts bewerten.

Die GZZ, welche das Vorhandensein jedweder Mikroorganismen in der Probe misst, ist wegen unsicherer und teilweise widersprüchlicher statistischer Beziehungen zu kulturell gefundenen Legionellenkonzentrationen ebenfalls nicht einfach als Surrogatparameter für Legionellen (Kultur) gemäß TrinkwV nutzbar ($p > 0,05$). Eine ergänzende Heranziehung scheitert zurzeit an fehlenden Bewertungsmaßstäben z. B. in Form eines Grenzwertes. Die GZZ kann jedoch, ähnlich wie die allgemeine Koloniezahl, die Überwachung unterstützen, da eine Änderung der GZZ im Langzeitmonitoring auf Änderungen im System und damit mögliche Probleme hinweist. Auch für vergleichende Untersuchungen ist die GZZ zweifellos sehr hilfreich.

Die molekularbiologischen Methoden sind nicht gleichwertig mit dem Kulturverfahren zu verwenden bzw. zu bewerten, sie können jedoch hilfreich sein, da sie wichtige Zusatzinformationen über (kulturell nicht nachweisbare) Besiedlung der TWI mit Legionellen geben. Ihr gezielter Einsatz z. B. bei tiefergehenden Untersuchungen, in Sanierungsfällen oder im Langzeit-Monitoring kann daher nützlich sein und wird empfohlen.

Für den Technikums-Versuchsstand wurde die *Legionella* spp.-spezifische qPCR als Detektionsmethode neben dem Kulturverfahren eingesetzt. Mittels *Legionella* spp. qPCR

wurde ein stetiger und gleichbleibender Eintrag von Legionellen am TWK-Zulauf mit Werten im Bereich von 10^4 GU/500 mL detektiert, der kulturell nicht bestätigt wurde. Während der Versuche bei absteigender TWE-Temperatur konnten im Intervall $60\text{ °C} - 50\text{ °C}$ kulturell nur vereinzelt gewachsene Legionellen-Kolonien nachgewiesen werden. Die qPCR zeigte demgegenüber Konzentrationen, die je nach Versuch auf bis zu 10^5 GU/500 mL anstiegen. Der kulturelle Nachweis von *L. pneumophila* bei 45 °C TWE-Temperatur wurde nicht durch die qPCR für *Legionella* spp. vorhergesehen oder bestätigt; es gab keine statistisch signifikante Korrelation zwischen der Anzahl an Kolonien und den genomischen Einheiten in einer Wasserprobe.

Somit eignet sich das qPCR-System für *Legionella* spp. nicht als Monitoringsystem für Trinkwassersysteme. Die spezifische qPCR für den Nachweis von *L. pneumophila* hingegen erwies sich als gute Methode, um das Aufkeimen von Legionellen im Versuchsstand zu erkennen. Bei Kontamination einer TWI mit non-pneumophila-Stämmen ist auch die *L. pneumophila* qPCR nicht zielführend.

5.2 Nachweismethoden *Pseudomonas aeruginosa*

Die kulturelle Nachweishäufigkeit von *P. aeruginosa* ist bei Trinkwasser-Installationen im Gebäudebestand gering. Der kulturelle Nachweis zeigt das Vorkommen von *P. aeruginosa* jedoch nicht immer sicher an. (Felduntersuchungen)

P. aeruginosa wurde in 4 der 100 Objekte mit positivem kulturellem Befund an sechs PNS nachgewiesen. Dies liegt in der Größenordnung des bundesweiten Durchschnitts bzgl. Pseudomonaden-Befall von 2,9 %, wie er durch die Gesundheitsämter im Rahmen der öffentlichen Überwachung bundesweiter Analysen aufgedeckt wird [Kistemann 2010; Völker 2010]. Alle Stellen lagen in der Peripherie. Es ist kein statistischer Zusammenhang zwischen den Jahreszeiten und den positiven Befunden gegeben.

Bei den Objekten mit positivem kulturellem Befund und zwei weiteren, kulturell negativ getesteten Gebäuden wurden zusätzlich zu dem kulturellen Nachweis die Wasserproben mittels spezifischer qPCR analysiert. Anders als bei kulturellem Nachweis werden hier nicht nur gerade aktiv wachsende Zellen detektiert, sondern alle lebenden (inkl. VBNC) und toten Zellen.

Es wurden mittels der spezifischen, sensitiven qPCR-Methode weitaus mehr Stellen in Objekten als positiv für *P. aeruginosa* eingestuft als mittels Kultivierung. Die Konzentrationen liegen – wie auch bei *Legionella* - höher als die Koloniezahlen, und lassen damit keinen quantitativen Vergleich der Ergebnisse Koloniezahl und genomische Einheit zu. Anders als bei Legionellen traten im Falle von *P. aeruginosa* jedoch keine falsch-negativen PCR-Ergebnisse auf, d.h. kulturell positive Proben wurden auch mit qPCR als positiv erkannt.

Die Hinzunahme der spezifischen qPCR zum Untersuchungsumfang liefert somit weitere Informationen zum örtlichen Vorkommen von *P. aeruginosa*. Insofern ist die qPCR eine methodische Erweiterung, welche die Risikoeinschätzung z. B. in öffentlichen Einrichtungen, wie sie in der Empfehlung des Umweltbundesamtes [UBA 2017] aufgeführt werden, erleichtern kann und daher z. B. vor der Festlegung aufwändiger Sanierungsmaßnahmen zur Problemeingrenzung genutzt werden sollte.

5.3 Repräsentative, dezentrale Entnahmestellen

Die Zirkulationsstranglänge (Länge der TWW- und der Zirkulationsleitung) und das Entnahmeverhalten beeinflussen das Legionellenvorkommen. Periphere

Probenahmestellen (PNS) mit großen Zirkulationsstranglängen sowie PNS mit geringem Verbrauch sind häufiger und stärker mit Legionellen kontaminiert. Solche PNS erlauben mit höherer Sicherheit die Erkennung von Legionellen-Kontaminationen in der TWI. (Technikumsversuche)

Der kulturelle Nachweis von Legionellen ist vorwiegend an PNS mit großen Zirkulationsstranglängen bzw. an PNS mit geringem Verbrauch möglich gewesen. Auch der DNA-Nachweis mittels gattungsspezifischer qPCR (*Legionella* spp.) zeigte, dass trotz gleichen Entnahmeprofils (gilt sowohl für hohe als auch für niedrige Wasserentnahme) die Wohnungen mit langen Strängen (WE 4 bis 6) höhere Legionellenkonzentrationen aufwiesen als WE mit kürzeren Zuleitungen (WE 1 bis 3). Dies gilt sowohl für TWW als auch TWK. Daher erscheint es sinnvoll, zur hygienischen Beurteilung einer Trinkwasser-Installation vom TWE weit entfernte PNS zu beproben. Auch von [Völker 2016] wurden Stagnation und Leitungslänge als wichtige Prädiktoren für Legionellen-Kontaminationen zusätzlich zur Wassertemperatur identifiziert.

5.4 Probenahme TWK

In Trinkwasser-Installationen sind auch im kalten Trinkwasser (TWK) Legionellen in nicht zu vernachlässigender Häufigkeit und Konzentration zu finden. Daher ist das TWK in die Überwachung verbindlich einzubeziehen. (Felduntersuchungen)

In 9 % aller peripheren TWK-Proben und 10 % aller peripheren TWW-Proben konnten kulturell Legionellen nachgewiesen werden. Mittels Sensitivitätsanalysen konnte gezeigt werden, dass in 84 % der peripheren TWK- und TWW-Proben, die an der gleichen Probenahmestelle (PNS) genommen wurden, eine Übereinstimmung bzgl. Kontamination gegeben ist. Mit einem Kontingenzkoeffizienten von 0,54 sind Warm- und Kaltwasserproben an derselben PNS damit nicht unabhängig voneinander. Wechselseitige Einflüsse von Zapfstelle oder Endstrang sind daher nicht auszuschließen. Zur Bewertung der TWI-Systeme (TWK oder TWW) bei weitergehenden Untersuchungen sind daher zwar nahe beieinanderliegende, aber unterschiedliche Entnahmestellen ohne Mischarmatur für TWK- und TWW-Proben zu verwenden.

5.5 Änderung Probenahme für orientierende, systemische Untersuchung nach TrinkwV

An dezentralen Entnahmestellen ist der 2. Liter nicht geeignet, sicher eine Probe aus dem Zirkulationssystem zu entnehmen und die Temperaturverteilung in der Zirkulation zu beurteilen. Für eine orientierende Untersuchung nach TrinkwV zur systemischen Beurteilung sollte daher dezentral wieder der 5. Liter beprobt werden. (Felduntersuchungen)

Nach den a.a.R.d.T. dürfen die endständigen, nicht zirkulierenden Leitungen der Trinkwarmwasser-Installation ein Inhaltvolumen von bis zu drei Litern besitzen. Im Projekt wurde deshalb nicht nur der 2. Liter an den endständigen Entnahmestellen beprobt, sondern in Anlehnung an die vor 2013 gültige UBA-Empfehlung auch der 5. Liter.

Im Mittel weichen die Temperaturen TWW im 2. Liter dezentral um 13,2 K von der Temperatur am Austritt des TWE ab, die Temperaturen im 5. Liter aber dezentral nur noch um 5,3 K. Der 10. Liter bildet die Temperaturen der Zentrale noch genauer ab, da hier die Abweichungen noch geringer ausfallen, da instationäre Einflüsse im endständigen, nicht zirkulierenden Bereich (z. B. kapazitive Effekte) dann weitgehend abgeklungen sind.

Teilzentrale Kontamination – hier bestimmt auf Basis der Ergebnisse des 5. Liters in der Peripherie - ist häufiger vorzufinden als zentrale Kontamination oder ausschließlich dezentrale Kontamination im 2. Liter. Für die orientierende Untersuchung nach TrinkwV zur systemischen Beurteilung sollte daher dezentral eher der 5. als der 2. Liter beprobt werden. Zur Beurteilung des Temperatur-Regimes wird aus Gründen der Daten-Vergleichbarkeit anstelle der bisherigen Konstant-Temperatur die des 10. Liters empfohlen.

Aktuell wird nach UBA-Empfehlung (08/2012) und DVGW twin Nr.06 (2011) an dezentralen Entnahmestellen der 2. Liter beprobt und analysiert [UBA 2012; twin06]. Die Ergebnisse (Temperatur und *Legionella* spp. kulturell) können nur sehr eingeschränkt zur Beurteilung des systemischen Zustandes des Trinkwarmwasser-Zirkulationssystems herangezogen werden. Sie können jedoch erste wichtige Informationen zur trinkwasserhygienischen Beurteilung des nicht zirkulierenden endständigen Bereichs geben.

5.6 Kontamination endständiger Bereich

Der 2. Liter der Probenahme an dezentralen Stellen ist geeignet, dezentrale Kontaminationen zu erfassen und deshalb für weiterführende Untersuchungen gut geeignet. (Felduntersuchungen)

Im 2. Liter sind kulturell doppelt so häufig Legionellen zu finden wie im 5. Liter, und die maximalen Legionellenkonzentrationen wurden peripher im 2. Liter nachgewiesen. Dabei wurden 83 % der Proben, die im 5. Liter kontaminiert waren, auch im 2. Liter als kontaminiert ausgewiesen, aber nur 50 % der kontaminierten Proben im 2. Liter waren auch im 5. Liter kontaminiert. Das Relative Risiko einer Kontamination ist zudem am TWE im TWW 2. Liter 60 % geringer als in der Peripherie TWW 2. Liter (p -Wert: 0,04; RR = 0,4). Die Analyse des 2. Liters dezentral besitzt das Potential, neben den zentral lokalisierten Kontaminationen auch dezentral in den Stichsträngen vorliegende Kontaminationen anzuzeigen und ist deshalb für weiterführende Untersuchungen nach TrinkwV bzw. W 551 ein sehr guter Beurteilungsparameter.

6 Trinkwasserhygiene – Temperaturniveau, Lage im System, Langzeiteffekte

6.1 TWW-Temperaturen am Austritt TWE – Neuanlagen mit Einhaltung der a.a.R.d.T

In einer nach den a.a.R.d.T. gebauten und betriebenen TWI sollte die TWE-Temperatur über 55 °C liegen, um einen Schutz vor Legionellen (Einhaltung des technischen Maßnahmewertes) zu gewährleisten. (Technikumsversuche)

Der TWI-Versuchsstand wurde nach den a.a.R.d.T. gebaut und betrieben (s. a. Abb. 12). Bei Temperaturen am Austritt des TWE von $\vartheta_{TWE,aus} = 55 \dots 60 \text{ °C}$ bei gleichzeitiger Einhaltung von Temperaturen $> 50 \text{ °C}$ im zirkulierenden System konnte der Legionelleneintrag (gemessen durch qPCR *Legionella* spp.) aus dem TWK-Zulauf ($< 25 \text{ °C}$) reduziert werden. Der TWE fungierte dabei als Barriere zwischen dem TWK-Zulauf und dem TWW-System.

Bei abnehmender TWE-Temperatur gleichen sich die Legionellenkonzentrationen des TWE-Austritts an die des TWK-Zulaufs an. Bei niedrigen TWE-Temperaturen (45 und 50 °C) sind die Konzentrationen (*Legionella* spp. qPCR, teilweise auch kulturell) im TWE sogar höher als im TWK-Zulauf oder in der Zirkulation. Der TWE trägt in diesem Temperaturbereich demnach zur Vermehrung von Legionellen bei.

6.2 TWW-Temperaturen am Austritt TWE - Bestandsanlagen

Eine Grenztemperatur am Austritt des Trinkwassererwärmers, unterhalb welcher es zur Kontamination kommt, bzw. oberhalb derer eine Kontamination ausgeschlossen werden kann, lässt sich für Bestandsobjekte nicht ableiten. Erst die Kombination von Temperaturen und Analysen diverser weiterer Systemparameter bietet ein aussagekräftigeres Bild zur Beurteilung einer TWI. (Felduntersuchungen)

Es ließen sich anhand der Screening-Objekte einige statistisch signifikante Zusammenhänge zwischen gemessenen Temperaturen und Legionellenkonzentrationen im Wasser aufzeigen: Je höher die Probenahmetemperatur einer TWW-Probe, desto niedriger ist tendenziell die kulturell nachweisbare Legionellenkonzentration ($p=0,019$); gleiches gilt für die TWW-Proben der Zentrale bzgl. der THM-Mediantemperatur im Objekt ($p=0,022$). Signifikante Verteilungsunterschiede bestätigen: Positive TWW-Proben haben tendenziell niedrigere Temperaturen.

Im Kaltwasser existiert ein umgekehrter Zusammenhang zur Temperatur: Je höher die Probenahmetemperatur, desto höher tendenziell die kulturell nachgewiesene Legionellenkonzentration ($p=0,045$).

Für bestimmte Temperaturen bzw. Temperaturbereiche lassen sich erhöhte bzw. verringerte Kontaminationsrisiken ableiten:

Hinsichtlich der Gesamtheit aller TWW-Proben in Bestandsobjekten unterschiedlichen Alters und unterschiedlicher Bauweise für einen kulturellen Legionellen-Befund lässt sich bzgl. der Median-Temperaturen der THM jeweils für 57 °C, 58 °C, 59 °C, 60 °C und 61 °C als „Grenztemperatur“ ein verringertes relatives Risiko der Objekte oberhalb der Grenztemperatur im Gegensatz zur Gruppe der Objekte mit jeweils darunterliegenden Temperaturen feststellen. Entsprechendes gilt für 58 °C - 60 °C bzgl. THM bei Nicht-

entnahme, 56 °C und 58 °C bzgl. der Temperatur bei Probenahme im 10. Liter, sowie 50 °C – 57 °C bzgl. der Temperatur bei PN.

Ebenfalls ein verringertes relatives Risiko für kulturelles Legionellen-Wachstum wurde im Falle einiger Teilproben und Temperaturen beobachtet, dies lässt sich jedoch nicht als durchgängiges Muster auf allen Stichprobenebenen sowie Temperaturen darstellen.

Eine eindeutige Grenztemperatur, unterhalb welcher es zur Kontamination kommt, bzw. oberhalb derer eine Kontamination nicht auftritt, lässt sich aus den Resultaten jedoch nicht sicher ableiten. In Bestandsobjekten, die in der überwiegenden Zahl aus unterschiedlichen Gründen die a.a.R.d.T. nicht einhalten, kann aus hygienisch-mikrobiologischer Sicht daher nach derzeitigem Kenntnisstand für Großanlagen nach TrinkwV eine Empfehlung zur Temperaturabsenkung unter die derzeit geltenden 60 °C am Austritt des Trinkwassererwärmers nicht gegeben werden.

6.3 Langzeiteffekt - Raummuster im Legionellenbefund

Entnahmestellen mit hohen positiven kulturellen Befunden bleiben ohne Veränderung der Betriebsweise über den Messzeitraum der Langzeituntersuchung (4 Quartale) hinweg kontaminiert. (Felduntersuchungen)

Stark Legionellen-kontaminierte Probenahmestellen (PNS) zeigen tendenziell die Kontamination, wenn auch in sehr unterschiedlich hohen Konzentrationen, kulturell durchweg an. Es wird abgeleitet, dass es Maßnahmen (z.B. Veränderungen in der Betriebsweise) braucht, um die Kontamination zu „eliminieren“. Andere, oft geringer kontaminierte PNS, zeigen Legionellen in der TWI nicht immer sicher kulturell an, bedingt durch die zeitliche Variation in den Konzentrationen kultivierbarer Legionellen. Dies bedeutet, dass der fehlende kulturelle Nachweis hier nicht sicher auf Kontaminationsfreiheit schließen lässt, wobei gering kontaminiert i.d.R. kleiner dem technischen Maßnahmewert bedeutet. Solche Schwankungen an ein und derselben Probenahmestelle wurden auch in anderen F&E-Studien gefunden [Völker 2016, 2017]. Während sich die Befunde dieses Forschungsvorhabens auf zeitliche Aspekte der Legionellen-Konzentrationen beziehen, haben andere Studien auch große örtliche Schwankungen zwischen verschiedenen PNS innerhalb eines Gebäudes berichtet [Völker 2016, 2017].

6.4 Langzeiteffekt - Zeitmuster im Legionellenbefund

Die qPCR-Befunde auf Gattungsebene (für *Legionella* spp.) zeigen keine Saisonalität. Die qPCR-Befunde auf Artebene - spezifisch für *Legionella pneumophila* - zeigen eine leichte jahreszeitliche Änderung im Rahmen des Langzeitmonitorings im Feld. (Felduntersuchungen, Technikumsversuche)

Es ist im Langzeitmonitoring kein statistisch signifikanter Unterschied in der Legionellenkonzentration (basierend auf qPCR-Ergebnissen für *Legionella* spp.) in der saisonalen, quartalsweisen Beprobung von 20 Objekten zu erkennen. Auch TWK-Zulauf, TWW-Vorlauf und TWW-Zirkulationsrücklauf im Technikumsversuchsstand TWI, welcher alle drei Wochen beprobt und kulturell sowie mittels qPCR für *Legionella* spp. untersucht wurde, zeigte keine Saisonalität, d.h. keine Beziehung zwischen der Umgebungs- bzw. Außentemperatur und *Legionella* spp. im DNA-Nachweis. Die einmalige Beprobung der Objekte kann daher als repräsentativ für das jeweilige Objekt angesehen werden [Statistik Software].

Diese Aussage beruht auf Ergebnissen gattungsspezifischer-qPCR für Legionellen in Bezug zu weiteren Variablen: „Es ist kein starker Zusammenhang zwischen den logarithmierten Werten von "qPCR L. spp." und dem meteorologischen Quartal zu erkennen“ wie

in nachfolgender Abbildung aufgezeigt ist. Zudem zeigt sich kein deutlicher Zusammenhang zwischen den logarithmierten Werten von *Legionella* spp. (qPCR) und der Temperatur der Probe (Abb. 16).

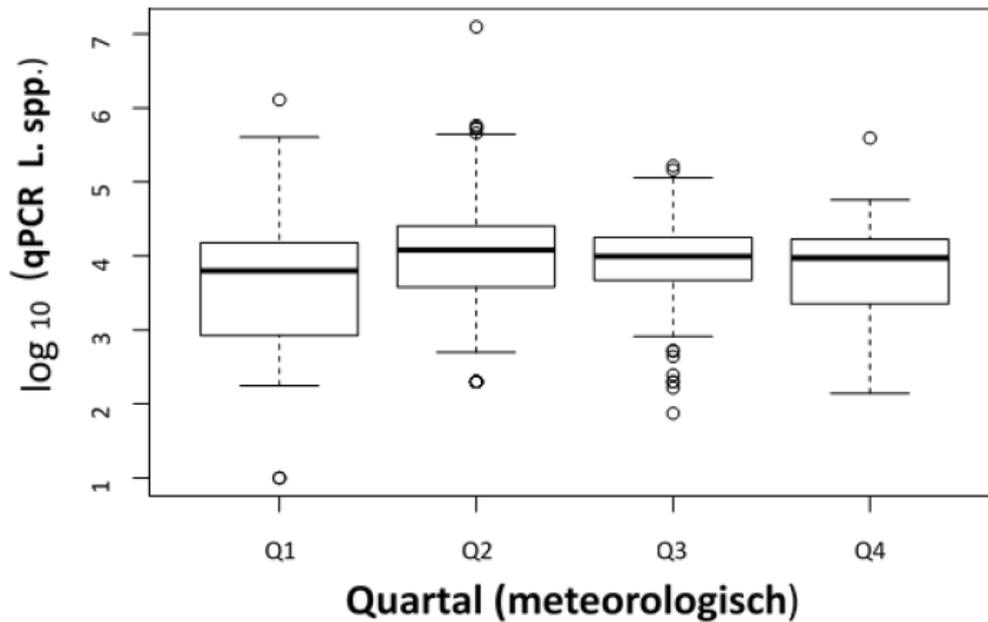


Abb. 16 Es ist statistisch kein Verteilungsunterschied zwischen den logarithmierten Werten von *Legionella* spp. (qPCR) in den verschiedenen meteorologischen Quartalen zu erkennen.

Die Beprobung des 2. und 5. Liters der quartalsweise über ein Jahr beprobten Objekte zeigte bei den Messstellen im 2. und 5. Liter der Peripherie für das zweite Quartal leicht höhere qPCR-Werte von *Legionella pneumophila* (n = 802) [R-Paket openxlsx].

7 Kontaminierte Anlagen – Erkenntnisse, Maßnahmen

7.1 *L. pneumophila* – Notwendige TWW-Temperatur zur Unterschreitung des technischen Maßnahmewertes im endständigen Bereich

Bei Versuchen mit einem Legionellen-kontaminierten Emulator ist für eine deutliche Reduktion der Legionellen (≤ 100 KbE/100 mL) in den nicht zirkulierenden endständigen Bereichen eine TWW-Temperatur von ≥ 60 °C am TWE notwendig. (Emulatorversuche)

Die im Emulator getesteten Zirkulationstemperaturen zeigten eine negative Korrelation zur Vermehrungsrate bzw. Persistenz der Legionellen in den Endsträngen. Eine nennenswerte Abnahme der Koloniezahl (um 1 Log_{10} -Stufe) wurde erst ab einer TWW-Temperatur von 55 °C in allen endständigen Bereichen festgestellt (Abb. 17). Die ermittelten Werte blieben dennoch über 100 KbE/100 mL. Ein Rückgang der Legionellenkonzentration auf einen Wert unter 100 KbE/100 mL konnte erst durch eine Zirkulationstemperatur von 60 °C und den damit einhergehenden höheren Zeitanteilen von Temperaturen > 45 °C gemäß Tab. 7 erzielt werden. Es ist zu berücksichtigen, dass die Versuche am Emulator mit hoher Legionellenbelastung durchgeführt wurden, wie sie aber auch real in Objekten auftreten, welche aus unterschiedlichen Gründen die a.a.R.d.T. nicht einhalten [vgl. Völker 2016].

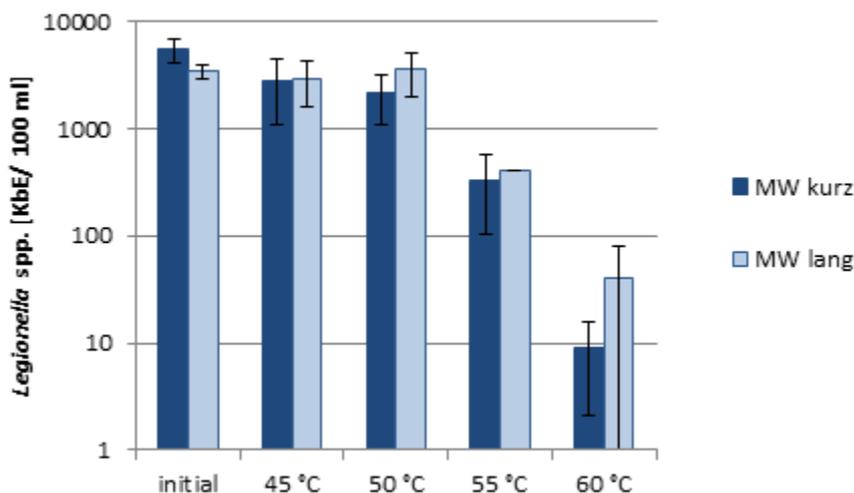


Abb. 17 Mittelwerte (MW) der kulturell nachgewiesenen Legionellen im 1. Liter aus den Endsträngen (kurz ca. 0,5 L und lang – ca. 3 L Wasservolumen) des Emulators (n=3, t14 Werte von allen Werkstoffleitungen).⁶

⁶ Die hohe Standardabweichung bei 60 °C im langen Endstrang ergibt sich aufgrund einer einzelnen Kolonie im Direktansatz (2 x 0,5 mL) des Cu-Stranges. Die Hochrechnung dieses Ansatzes auf KbE/100 mL verschiebt den Mittelwert nach oben und erhöht dementsprechend die Standardabweichung.

7.2 *L. pneumophila* - Werkstoffeinfluss

Ein Werkstoffeinfluss auf die kultivierbaren Legionellen im endständigen Bereich konnte bei den Emulatorversuchen nicht nachgewiesen werden. (*Emulatorversuche*)

Die ermittelten Werte des kulturellen Nachweises von Legionellen waren annähernd identisch für die Stränge aus Kupfer, Edelstahl und Kunststoff (s.a. geringe Standardabweichung in Abb. 17). Aufgrund der in allen Strängen gemessenen Kupferkonzentrationen (0,14 – 0,89 mg/L) kann zudem davon ausgegangen werden, dass Kupfer in diesen Konzentrationen keinen wachstumshemmenden Einfluss auf Legionellen hat.

7.3 *L. pneumophila* - Volumen des nicht zirkulierenden endständigen Bereichs

Die unterschiedlichen Volumina der Stränge von ca. 0,5 bzw. 3 Liter zeigen sich als ein untergeordneter Faktor bei der Besiedlung endständiger Bereiche mit *Legionella* spp. (*Emulatorversuche*)

Die Analyse des für den Endnutzer als hygienisch-relevant angesehenen 1. Liters der Endstränge zeigte größtenteils minimale Unterschiede bezüglich der kulturell nachweisbaren Legionellenkonzentration zwischen den kurzen und langen Strängen (s. a. Abb. 17). Insofern geben die Emulatorversuche keinen Anlass, die sogenannte 3-Liter-Regel nach bspw. DVGW W 551 zu ändern.

7.4 *L. pneumophila* – Membranintegrität

***L. pneumophila* verliert bei steigender Zirkulationstemperatur $\geq 55^{\circ}\text{C}$ die Membranintegrität.** (*Emulatorversuche*)

Mittels der kultur-unabhängigen „lebend/tot qPCR-Methode“, welche zwischen Zellen mit intakter Zellmembran (lebend) und Zellen ohne intakte Membran (tot) unterscheidet, konnte tendenziell ein Rückgang der *L. pneumophila*-Zellen mit intakter Membran mit steigender Zirkulationstemperatur nachgewiesen werden. Ab 55°C konnte eine Diskrepanz zwischen der Zahl an Legionellen (Kulturansatz) und der Anzahl Membran-intakter Legionellen (lebend/tot qPCR), unabhängig vom eingesetzten Werkstoff in den Endsträngen, festgestellt werden. Dies deutet darauf hin, dass ein Teil von *L. pneumophila* infolge des Temperaturstresses in das VBNC-Stadium gegangen ist.

7.5 *L. pneumophila* – VBNC

Die Ergebnisse deuten auf Übergang der Legionellen in das VBNC-Stadium bei hohen TWW-Temperaturen hin. Molekulare Methoden bringen hier zusätzliche Sicherheit. (*Emulatorversuche*)

Es ist systemimmanent, dass die am TWE-Ausgang eingestellten Temperaturen in den nicht zirkulierenden, endständigen Strängen nur zeitweilig erreicht werden.

Die Temperaturüberwachung zeigte folgerichtig, dass die Zirkulationstemperatur in der Peripherie nur selten ankommt, i.d.R. nur bei Zapfung, in langen Strängen sogar nur bei langer Zapfung bzw. großem Zapfvolumenstrom. Der Zeitanteil hoher Temperaturen in den peripheren Strängen ist dabei abhängig von der Stranglänge. Die Zirkulation hingegen erreicht die eingestellte Temperatur relativ sicher. Die Zeitintervalle mit Temperaturphasen im Bereich des *L. pneumophila*-Wachstum-Optimums sind bei 45°C und 60°C dabei etwa gleich lang, v. a. bei langen Strängen (Tab. 7). Die Laborversuche zeigten eine Abtötung der Legionellen nach 24 h bei 60°C . Deshalb ist in der TWI eher vom Übergang in einen VBNC-Zustand, also einer temporären Unterdrückung der Kultivie-

rungsfähigkeit auszugehen. Hierfür sprechen auch die qPCR-Ergebnisse aus Felduntersuchungen sowie Technikums- und Laborversuchen.

7.6 *P. aeruginosa* - TWW-Temperatur

Laborexperimente zeigen, dass ein Wachstum von *P. aeruginosa* bei Temperaturen > 44 °C nicht zu erwarten ist. (Laborexperimente)

Mit Reinkulturen von *P. aeruginosa* (DSM 50071) wurden auf verschiedenen Festmedien (R2A, TSA mit und ohne Supplement) Wachstumsversuche bei folgenden Temperaturen durchgeführt: 20 °C, 28 °C, 37 °C, 44 °C, 47 °C und 50 °C. Die günstigste Wachstumstemperatur auf Festmedium lag bei 44 °C, wobei das beste Wachstum auf TSA-Nährmedium war. Dies gilt auch für das Wachstum von *P. aeruginosa* in Flüssigkultur. Bei 47 °C war keine Koloniebildung, d. h. kein Wachstum mehr zu verzeichnen. Die Temperatur um 44 °C kann als Grenztemperatur für Wachstum angesehen werden.

In der Literatur beschriebene Laborversuche an planktonischen Zellen zeigten, dass *P. aeruginosa* über einen weiten Bereich von Umgebungstemperaturen vermehrungsfähig ist, wie sie auch in wasserführenden Systemen anzutreffen sind [Rajkowski 2001]). Die minimale Wachstumstemperatur liegt bei 8,9 °C (bestimmt auf CASO-Agar; [Elliot 1963]). Die optimale Wachstumstemperatur liegt bei etwa 37 °C, aber auch bei 45 °C erfolgt noch eine Vermehrung [Kropinski 1987]. In Wachstumsexperimenten in einem Vollmedium (CASO-Bouillon) betragen die Generationszeiten von *P. aeruginosa* (Stamm PA01) bei 10 °C, 15 °C, 25 °C, 35 °C und 45 °C 2,1 Tage, 225 min, 96 min, 54 min bzw. 98 min [Kropinski 1987]. Es wurde keine Vermehrung bei 4 °C oder 50 °C festgestellt. Ein Wachstum von *P. aeruginosa* ist in einer TWW-Zirkulation, welche mit 55 °C im Vorlauf und 50 °C im Rücklauf betrieben wird, daher nicht zu erwarten. Ein Überleben in die TWI eingebrachter Zellen (Persistenz) ist jedoch nicht vollständig auszuschließen.

7.7 *P. aeruginosa* – Absterbeverhalten

Analog zur chemischen Desinfektion kann das Absterbeverhalten von *P. aeruginosa* mit einem Temperatur-Zeit-Konzept (T x t-Konzept) beschrieben werden. Für die thermische Desinfektion gibt es einen linearen Zusammenhang zwischen Temperatur und Einwirkzeit. Aus langen Einwirkzeiten resultiert bereits ab 50 °C ein Absterben. (Laborexperimente)

Das Überleben von Teilen der Population von *P. aeruginosa* bei 50 °C bzw. 55 °C ist potentiell möglich; dies ist abhängig von der Expositionszeit. Diese Erkenntnis wurde aus durchflusszytometrischen Analysen gewonnen. Durch die Einwirkung von heißem Wasser wird die Membran von Bakterien geschädigt, so dass die sogenannte Membranintegrität, wie sie z. B. durch das „Live-Dead“-Kit geprüft wird, verloren geht. Für die Verminderung von $3,9 \times 10^4$ auf $1,2 \times 10^2$ Membran-intakten *P. aeruginosa*-Bakterien/mL (ca. 2 log-Stufen oder 99 %) konnte mittels Laborexperimenten ein Temperatur-Zeit-Konzept erstellt werden (Abb. 18). Bis zu 55 °C folgt dies einem linearen Zusammenhang.

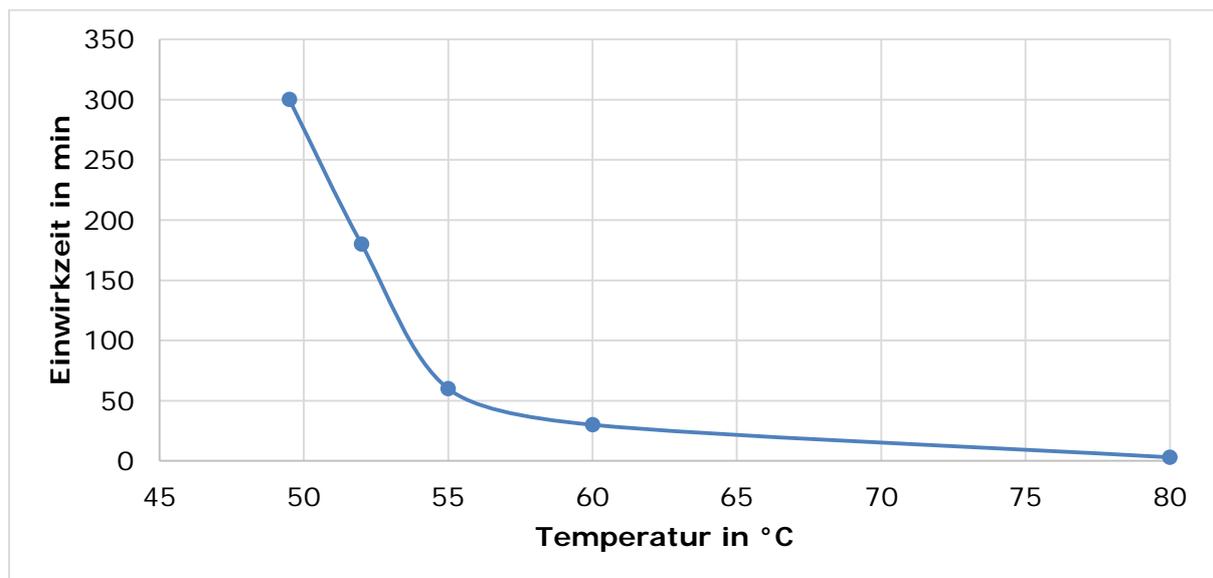


Abb. 18 Bezug zwischen Einwirkzeit und Temperatur, um eine Verminderung von ca. 99 % der intakten Bakterienzellen von *P. aeruginosa* in membrangeschädigte und daher nicht kultivierbare *P. aeruginosa* zu erzielen.

Dies bedeutet, dass ein Überleben von *P. aeruginosa* in der Zirkulation verhindert werden kann, indem die Sicherstellung einer ausreichenden Aufenthaltszeit gewährleistet wird. Ein Speicher kann so bei passendem Zusammenspiel von Temperatur und Aufenthaltszeit als Barriere fungieren.

In Laborexperimenten konnte wiederholt aufgezeigt werden, dass bei knapp 50 °C und einer Einwirkzeit von ca. fünf Stunden eine Schädigung von 99 % der Population erfolgte. Bei 60 °C waren dafür noch 30 Minuten Einwirkzeit nötig. Der Verlust der Kultivierbarkeit von *P. aeruginosa* erfolgte zeitlich vor dem Verlust der Zellmembran-Integrität und damit können keine Kolonien mehr wachsen, obwohl sie noch lebend sind.

7.8 *P. aeruginosa* - Temperaturvorgeschichte

Die thermische Anfälligkeit von *P. aeruginosa* wird von seiner Temperaturvorgeschichte beeinflusst. (Laborexperimente)

P. aeruginosa wurde als Reinkultur entweder bei 28 °C oder bei 39 °C angezchtet, in Wasser suspendiert und einer Temperatur von 50 °C für unterschiedlich lange Zeit ausgesetzt. Die Proben wurden mittels Durchflusszytometrie auf die Anzahl Membran intakter Bakterien analysiert.

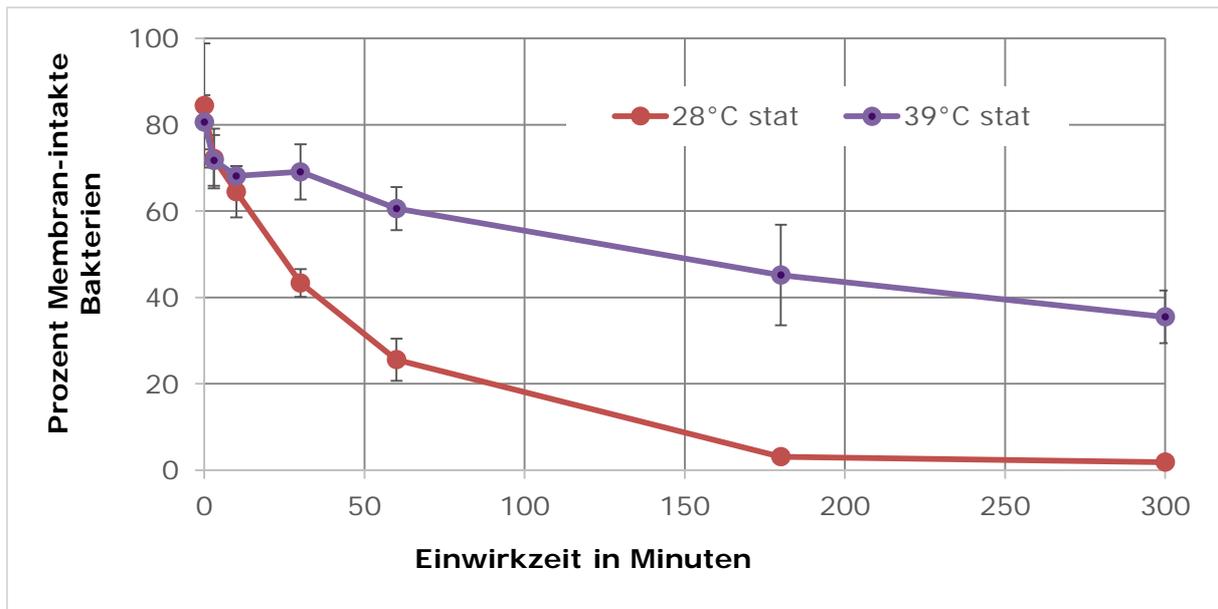


Abb. 19 Effekt von 50 °C auf die planktonischen Bakterien nach Anzucht von *P. aeruginosa* bei 28 °C respektive 39 °C bis zur stationären Phase, gemessen an deren Membran-Intaktheit. Je länger die Einwirkdauer von 50 °C, desto weniger Membran-intakte Bakterien liegen vor, wobei zuvor wärmer angezüchtete Zellen länger intakt bleiben.

7.9 *P. aeruginosa* und Kupfer

Kupferionen im Wasser vermindern die Kultivierbarkeit von *P. aeruginosa* drastisch und verhindern zudem die Adhäsion vieler der planktonischen Bakterien an die Oberfläche von Werkstoffen (PE, Edelstahl, Kupfer). Der Verlust der Kultivierbarkeit von *P. aeruginosa* in Anwesenheit von Kupferionen kann schnell (Minuten–Stunden) erfolgen. Die Kinetik des Übergangs in das VBNC-Stadium ist abhängig von der Kupfer-Konzentration und der Einwirkzeit. (Emulatorversuche und Laborexperimente)

Bei Anwesenheit von Kupferionen ab einer Konzentration von ca. 0,64 mg/L Cu (10 µmolar Kupfersulfat) wurden in Laborversuchen wie auch im Emulator eine drastische Abnahme des Anteils kultivierbarer *P. aeruginosa* innerhalb von Minuten gemessen. Auch die Adhäsionsfähigkeit von *P. aeruginosa* war im Experiment verringert.

Reproduzierbar führte die Anwesenheit von Kupferionen in den Emulatorversuchen zum Verlust der Kultivierbarkeit, während bei Anwesenheit eines effektiven Chelators der Effekt aufgehoben wurde (Abb. 20). Eine Einnistung in die vorhandenen Trinkwasserbiofilme und Vermehrung im Emulator konnte somit kulturell nicht nachverfolgt werden.

Die Befunde bestätigen und ergänzen Ergebnisse vorheriger Untersuchungen, in denen festgestellt wurde, dass *P. aeruginosa* in kupferhaltigem Trinkwasser (Kalt- und Warmwasser aus Trinkwasser-Installationen) und in Deionat mit Zugabe von Kupfersulfat eine Hemmung der Kultivierbarkeit erfährt. Dabei ist ein Hemmeffekt ab Konzentrationen von etwa 0,02 mg/L (0,3 µM) Kupfer festgestellt worden [Dwidjosiswojo 2011; Bédard 2014; Hippelein 2014]. Als neue Erkenntnis wurde jetzt die kupferbedingte Hemmung der bakteriellen Adhäsion an Werkstoffoberflächen gezeigt.

Mit kultivierungsunabhängigen Fluoreszenzfärbetechniken wurde nachgewiesen, dass sowohl die Membranintegrität als auch die 16S rRNA der Ribosomen der kupfergestress-

ten, nicht kultivierbaren Zellen von *P. aeruginosa* intakt blieben [Dwidjosiswojo 2011]. Dieser Effekt wurde an Kupfer-exponierten planktonischen Zellen und Biofilmen gezeigt. Der durch Kupferionen hervorgerufene, nicht kultivbare Zustand war reversibel, da durch Zugabe eines Kupferchelators die Kultivierbarkeit von *P. aeruginosa* wiederhergestellt wurde. Kupfer-gestresste Bakterien zeigten keine zytotoxische und genotoxische Wirkung gegenüber humanen Bronchialepithelzellen, während unbehandelte und auch wieder kultivbare *P. aeruginosa* eine Schädigung der Bronchialepithelzellen aufwies. Alle Ergebnisse weisen darauf hin, dass Kupferionen im Wasser den Übergang von *P. aeruginosa* in einen VBNC-Zustand induzieren, in dem die Bakterien nicht mehr kultivierbar und toxisch sind, und ihre Fähigkeit zur Adhäsion verloren haben. Der Prozess ist reversibel, da sie nach Aufhebung des Kupferstress ihre Kultivierbarkeit und Infektiosität wiedererlangen können.

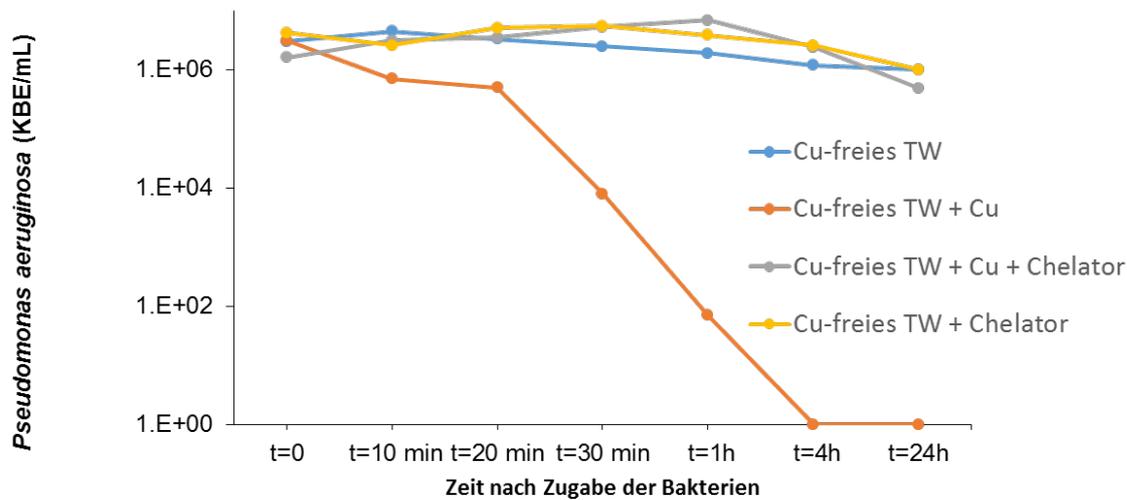


Abb. 20 Effekt von Kupfersulfat (10 µmolar Cu) auf die Kultivierbarkeit planktonischer *P. aeruginosa* Zellen bei 20 °C und unterschiedlichen Einwirkzeiten

8 Erkenntnisse, Empfehlungen, Ausblick

Gesamtziel des Vorhabens war die ganzheitliche und systemische Untersuchung der Trinkwasser-Installation für zukünftige LOW TEMPERATURE-Wärmeversorgungskonzepte, die Identifizierung von Ansätzen zur Nutzung erheblicher Energieeinsparpotentiale sowie zur Integration von erneuerbaren Energien bei Beachtung des Primats der menschlichen Gesundheit. Im Fokus standen Wohngebäude, insbesondere Mehrfamilienhäuser bei Betriebsweisen mit verschiedenen Temperaturen am Austritt der Trinkwasser-Erwärmungsanlagen und die damit korrespondierende Befundsituation zu den Bakterien *Legionella* spp., *Legionella pneumophila* und *Pseudomonas aeruginosa* an den zentralen und peripheren Entnahmeorten.

Der umfangreiche Abschlussbericht nebst Anlagen gibt dem Fachpublikum einen vertieften Einblick in die Herangehensweise, die Ergebnisse im Einzelnen sowie die jeweils daraus abgeleiteten Thesen. Da es naturgemäß nur einen kleinen Kreis von Experten geben wird, dem es - schon in Anbetracht des damit verbundenen Zeitaufwands - möglich sein wird, den gesamten Bericht zu studieren, wurde von den Projektpartnern deshalb im Nachgang zum Projekt auf Eigeninitiative dieser „Kurzüberblick und Thesen“ erstellt.

An dieser Stelle seien nun schlaglichtartig wichtige Fragestellungen und die darauf im Projekt gefundenen Antworten für Mehrfamilienhäuser mit zentraler Trinkwassererwärmung (Großanlagen) in Kurzform zusammengestellt, wobei die Reihung keinerlei Wichtigkeit darstellt und kein Anspruch auf vollständige Wiedergabe aller Erkenntnisse erhoben werden kann:

a) Welche Wirkungen auf Energiebedarf, Primärenergieeinsatz und CO₂-Emission sind mit einer Absenkung der Trinkwarmwassertemperatur am Ausgang der Trinkwasser-Erwärmungsanlage $\vartheta_{TWW,TWE}$ – ausgehend vom jetzigen Niveau von 60 °C - verbunden?

- Der eigentliche Energiebedarf für das entnommene Trinkwarmwasser sinkt nur geringfügig (z. B. Simulationsstudie Durchschnitt: 0,6 bis 2,5 % je 5 K Absenkung $\vartheta_{TWW,TWE}$).
- Im Bereich der Trinkwasser-Installation selbst resultiert das Energieeinsparpotential vor allem aus der Senkung der Zirkulationsverluste (z. B. Simulationsstudie „Durchschnitt mit Kanaltrennwand“: 13 % je 5 K Veränderung).
- Im Bilanzraum Gebäude sinkt dadurch der wohnflächenbezogene Primärenergiebedarf (Raumheizung und Trinkwassererwärmung) (z. B. Simulationsstudie je nach Gebäudestandard von Bestandsgebäuden mit Erdgasversorgung: 1,4 bis 2,3 % je 5 K Absenkung $\vartheta_{TWW,TWE}$).
- Im Bilanzraum Deutschland ergaben sich ca. 18 TWh/a Einsparpotential je 5 K Temperaturabsenkung und ein damit einhergehendes CO₂-Emissionsminderungspotential von durchschnittlich 5,2 Mio. t CO₂/a.
- Der Anteil von Wärmepumpen und Solarthermieranlagen an der Deckung des Endenergiebedarfs der Wärmebereitstellung kann signifikant gesteigert werden (z. B. Simulationsstudie rel. Steigerung des Anteils je 5 K: Wärmepumpen 5 bis 7 %; Solarthermie 11 bis 12,5 %).

b) Welche bauseitigen Maßnahmen sind effektiv, um die Aufwärmung des Trinkwassers (kalt) auf dem Abschnitt vom Hauseingang bis zur Entnahmestelle möglichst gering zu halten?

- Eine EnEV100-Wärmedämmung im gesamten TWI-Bereich ist ein Muss.
- Diese allein kann aber gerade in den nächtlichen Phasen ohne bzw. mit wenigen Trinkwasserentnahmen die Aufwärmung des TWK in Bereiche des optimalen Legionellenwachstums (25 bis 45 °C) nicht vermeiden.
- Erforderlich ist es, die TWK-Seite konsequent in separaten, gut gedämmten Schächten zu führen. Dies heißt nicht nur getrennt von den Leitungen der Trinkwarmwasser-Installation, sondern auch von anderen warmgehenden Leitungen (Heizung, Solarthermie etc.).
- Im Bereich des Trinkwassererwärmers selbst sind im Rahmen der Felduntersuchungen teilweise extrem hohe Temperaturen gemessen worden. Es ist darauf zu achten, dass effektive Maßnahmen zur thermischen Entkopplung im Anschlussbereich des Trinkwassers (kalt) vorgesehen werden, um Rückwirkungen auf die TWK-Installation zu minimieren.

c) Stellt eine Temperatur am Austritt des Trinkwassererwärmers $\vartheta_{TWW, TWE} \geq 60 \text{ °C}$ aus trinkwasserhygienischer Sicht ein MUSS dar?

- Für kontaminierte Anlagen gilt aus jetziger Sicht ein klares Ja. Dies haben die Versuche an den gezielt kontaminierten Emulatoren deutlich gezeigt, da nur so im nicht zirkulierenden, endständigen Bereich ausreichende Zeitanteile von Temperaturen oberhalb des Bereichs des Legionellenwachstums wirken können.
- Ansonsten ist das Fazit der Auswertungen der Felduntersuchungen: Das Temperatur-Regime der TWI beeinflusst die Legionellenkonzentrationen im Trinkwarmwasser (TWW). Eine Grenztemperatur am Austritt des Trinkwassererwärmers, unterhalb welcher es zur Kontamination kommt, bzw. oberhalb derer eine Kontamination ausgeschlossen werden kann, lässt sich für Bestandsobjekte nicht ableiten.
- Erst die Kombination von Temperaturen und Analysen diverser weiterer Systemparameter bietet ein aussagekräftigeres Bild zur Beurteilung einer TWI.
- Für Neuanlagen spielt die Einhaltung der a.a.R.d.T – hier z.B. der Nachweis des hydraulischen Abgleichs über strangweise Temperaturüberwachung in der Zirkulation – eine entscheidende Rolle. Ist dies wie im Technikumsversuchstand gegeben, so sollte die Temperatur am Austritt des TWE bei $\geq 55 \text{ °C}$ liegen, um durch einen ausreichenden Temperatur-Sicherheitsabstand einen Schutz vor Legionellen (Einhaltung des technischen Maßnahmewertes) zu gewährleisten.

d) Ist eine „technische Desinfektion“ (vorbeugende thermische Desinfektion ohne Befund z. B. einmal täglich oder wöchentlich) trinkwasserhygienisch sinnvoll und energetisch zeitgemäß?

- Nein!
- Der Betrieb des TWW-Systems mit bspw. 70 °C am Austritt des TWE bewirkt eine Aufwärmung des TWK in einen trinkwasserhygienisch kritischen Bereich und erhöht die Zirkulationswärmeverluste signifikant.
- Ein vorbeugender Einsatz ohne gleichzeitiges Spülen an den Entnahmestellen ist deshalb abzulehnen, da die Wirksamkeit nicht nachgewiesen ist.
- Hier sind gerade im Bereich der fernwärmeversorgten Objekte signifikante, in der Simulationsstudie zum Gesamtsystem noch gar nicht enthaltene Energieeinsparungen und CO₂-Minderungspotentiale zu heben.

e) Ist die nach Trinkwasserverordnung und den zugehörigen Normen und Regelwerken vorgeschriebene Art der Beprobung und Analytik geeignet,

um eine systemische Beurteilung der Trinkwasser-Installation im Rahmen von orientierenden Untersuchungen vorzunehmen?

- Die Felduntersuchungen haben gezeigt, dass an dezentralen Entnahmestellen der 2. Liter nicht geeignet ist, sicher eine Probe aus dem Zirkulationssystem zu entnehmen und die Temperaturverteilung in der Zirkulation zu beurteilen. Für eine orientierende Untersuchung nach TrinkwV zur systemischen Beurteilung sollte daher dezentral wieder der 5. Liter beprobt werden.
- Das Kulturverfahren für *Legionella* spp. stellt nach wie vor den „Goldstandard“ dar. Molekularbiologische und durchflusszytometrische Methoden können das etablierte und nach TrinkwV geforderte Kultivierungsverfahren bei der Überwachung von TWI hinsichtlich Legionellen derzeit unterstützen, aber nicht ersetzen.

f) Welche Einflüsse sind im endständigen, nicht zirkulierenden Bereich zu erwarten (Stichpunkt 3-L-Regel)?

- Die Versuche an einem gezielt kontaminierten Emulator ergaben, dass sich unterschiedliche Volumina der Stränge von ca. 0,5 bzw. 3 Liter als ein untergeordneter Faktor bei der Besiedlung endständiger Bereiche mit *Legionella* spp. zeigen.
- Ein Werkstoffeinfluss auf die kultivierbaren Legionellen in der Wassersäule des endständigen Bereiches konnte nicht nachgewiesen werden.

g) Gibt es einen Handlungsbedarf bzgl. *Pseudomonas aeruginosa* im systemischen Bereich der Trinkwasser-Installation?

- Aus den untersuchten Feldobjekten kann kein Handlungsbedarf abgeleitet werden. Bei den vier Objekten mit *P. aeruginosa* handelte es sich ausschließlich um positive kulturelle Befunde aus Entnahmen im endständigen Bereich.
- Ein Grund könnte der Verlust der Kultivierbarkeit von *P. aeruginosa* in Anwesenheit von Kupfer im Trinkwasser sein, der sowohl im Laborexperiment als auch in den Emulatorexperimenten nachgewiesen werden konnte. Da in der Praxis kupferfreie Trinkwässer im Bereich der TWI äußerst selten sind (Kupfermigration z. B. durch Armaturen, Fittings, Pumpen) ist diese hemmende Wirkung wahrscheinlich überwiegend ausreichend, um positive systemische Befunde gegen Null tendieren zu lassen.

Generell ist der altbekannte Grundsatz zu beachten „Wasser muss fließen“. Das heißt: eine noch so gut geplante, gebaute und systemisch korrekt betriebene Trinkwasser-Installation wird zur trinkwasserhygienischen Problemanlage, wenn eine oder mehrere Entnahmestellen selten oder nie benutzt werden.

In den Regelwerken ist zwar der Rückbau dieser Abschnitte vorgesehen und im Bereich des Leerstandes können Spülpläne umgesetzt werden.

Aber was ist mit dem vermieteten Bereich? Könnte hier ein aktenkundiger Hinweis bei Übergabe der Wohnung hilfreich sein, der auf das Abfließen weniger Liter vor Nutzung nach den täglichen Phasen der Nichtnutzung und auf kräftiges Spülen nach längerer Abwesenheit hinweist und zur Mitwirkungspflicht erhebt?

Mit dem Verbundprojekt konnten viele Fragestellungen beantwortet werden, gleichzeitig sind neue entstanden. In einem Feldobjekt war eine Ultrafiltrationsanlage im Einsatz. Können derartige Anlagen eine Absenkung bis auf 45 °C – also nahe am Temperaturniveau der eigentlichen Nutzung – bei unbedenklicher Trinkwasserhygiene erreichen? Wei-

sen diese dann in der Gesamtbilanz wirkliche Netto-Energieeinsparung (hier sind insbesondere die Hilfsenergiebedarfswerte und der Spülwasserbedarf zu beachten) auf? Wie wirken diese Anlagen im endständigen, nicht zirkulierenden Bereich? Können Experimente an der Technikumsanlage die Wirkungen von extrem hohen Temperaturen von 70 °C auf das Trinkwasser (kalt) zeigen und die Erkenntnisse zum plötzlichen Auffinden von *L. pneumophila* im Probenahmewasser bei $\vartheta_{T_{WW}, T_{WE}} = 45 \text{ °C}$ und sonst korrekten Bedingungen reproduzieren und vertieft Ursachen finden?

9 Glossar

5 K-Regel

Beim Vorliegen einer Trinkwasser-Installation mit einem Wasservolumen von mehr als 3 L zwischen Trinkwassererwärmer und einer Entnahmestelle muss ein Zirkulationssystem eingebaut werden. Das Zirkulationssystem ist so zu bemessen und zu betreiben, dass im zirkulierenden Wasser die Temperatur zwischen Ausgang und Wiedereintritt am Trinkwassererwärmer um nicht mehr als 5 Kelvin verringert wird. (s. a. DVGW W 551, DIN 1988-300 etc.)

AOC

Der AOC (assimilable organic carbon) ist eine Fraktion des DOC (dissolved organic carbon; gelöster organischer Kohlenstoff) und umfasst leicht assimilierbare organische Kohlenstoffverbindungen. Dies sind niedermolekulare, mikrobiell leicht verwertbare Substanzen, z. B. organische Säuren und Aminosäuren. Der AOC ist somit ein Indikator für die Nährstoffverfügbarkeit und damit für die Neigung zur Wiederverkeimung von Wasser. Trinkwasser mit einer AOC-Konzentration von kleiner 5 µg/L_{Acetateinheiten} und DOC-Konzentration von 0,6 mg/L gilt als nährstoffarm.

Biofilm

Unter „Biofilm“ werden alle Ansammlungen von Mikroorganismen an Grenzflächen (häufig: fest/flüssig) verstanden. Im Biofilm sind die Organismen in eine wasserhaltige Matrix aus extrazellulären polymeren Substanzen (EPS) eingebettet.

Biofilm-Populationen/ Biozönose

Die Biozönose eines Biofilms besteht aus mikrobiellen Populationen und stellt die Gesamtheit aller Organismen dar, die eine Grenzfläche besiedeln. Die wichtigsten Vertreter in Trinkwasserbiofilmen sind Bakterien, Protozoen (Amöben, Flagellaten und Ciliaten) sowie auch Pilze. Diese verschiedenen Organismen bilden komplexe Lebensgemeinschaften (Biozönosen), die in vielfältiger Weise interagieren.

Chelator

Als Chelatoren bezeichnet man (meist organische) Verbindungen, die zwei oder mehr freie Elektronenpaare aufweisen und damit mehr als eine koordinative Bindung mit einem zentralen Metall-Ion eingehen können. Damit haben sie die Fähigkeit, zwei- oder mehrwertige Kationen in stabilen, ringförmigen Komplexen (sogenannte Chelate) zu fixieren. Beispiele: Natriumdiethyldithiocarbamat (DDTC), Ethylendiamin-tetra-acetat (EDTA).

Chelatoren haben die Fähigkeit, in Lösung vorkommende freie Ionen (z. B. Cu^{2+}) zu binden und damit chemisch zu inaktivieren. Diese Eigenschaft wird häufig genutzt, um Ionen aus der Lösung auszukomple-

	<p>xieren und ihre toxische Wirkung auf den Organismus damit zu unterbinden.</p>
Desinfektion	<p>Desinfektion ist ein Prozess, durch den die Anzahl vermehrungsfähiger Mikroorganismen infolge Abtötung/Inaktivierung unter Angabe eines standardisierten, quantifizierbaren Wirkungsnachweises reduziert wird mit dem Ziel, einen Gegenstand/Bereich/Medium in einen Zustand zu versetzen, sodass von ihm keine Infektionsgefährdung mehr ausgehen kann. Ziel der Desinfektion ist die definierte Verminderung der Anzahl pathogener oder fakultativ-pathogener Mikroorganismen, nicht aber die Eliminierung von Umweltkeimen ohne Bedeutung für die menschliche Gesundheit.</p>
Dezentrale Kontamination (periphere ~)	<p>Positiver kultureller Befund für <i>Legionella</i> spp. im Bereich des endständigen, nicht zirkulierenden Leitungsabschnitts (Trinkwasserentnahme durch den Nutzer) der Trinkwarmwasserinstallation (≤ 3 Liter Wasserinhalt)</p>
Einnistung	<p>Als Einnistung wird in diesem Projekt der Vorgang bezeichnet, bei dem sich hygienisch relevante Mikroorganismen (hier <i>P. aeruginosa</i>, <i>L. pneumophila</i>) in einen bestehenden Biofilm integrieren, so dass sie darin zeitweise oder dauerhaft vorhanden sind (Persistenz).</p>
EnEV100, EnEV50	<p>Diese Abkürzungen stehen seit Einführung der Energieeinsparverordnung EnEV in der Praxis für die Einhaltung der Mindestdämmung der Rohrleitung und Armaturen nach Anlage 5, Tabelle 1 der EnEV die gleich 100 % gesetzt werden (EnEV100). Für eine Wärmeleitfähigkeit von 0,035 W/(m·K) bedeutet dies bspw. für Innendurchmesser bis 22 mm eine Dämmstärke von 20 mm; für Innendurchmesser > 22 bis 35 mm ergeben sich 30 mm Dämmstärke. Im Bereich > 35 bis 100 mm ist die Dämmstärke gleich dem Innendurchmesser. Für Kreuzungsbereiche etc. ist teilweise der Einsatz von EnEV50-Wärmedämmung, also einer um 50 % reduzierten Dämmung möglich.</p>
Fakultativ pathogene Erreger	<p>Erreger, die zur Auslösung von Infektionskrankheiten spezifische Voraussetzungen benötigen, aber auch bei fehlender Immunkompetenz Infektionskrankheiten auslösen können (z. B. <i>P. aeruginosa</i>, <i>L. pneumophila</i>, <i>Klebsiella</i> spp., <i>Enterobacter</i> spp.). Beispiele für spezifische Voraussetzungen: das Eröffnen des Zugangs zu normalerweise sterilen Körperbereichen (z. B. durch Kathetersysteme bzw. Fremdkörper), das Abtöten der physiologischen Mikroflora durch Antibiotika, Wunden oder eine Veränderung der physiologischen und immunologischen Abwehr</p>

Hygienisches Risiko

Der Begriff „Risiko“ umfasst entsprechend dem Bericht der Risikokommission (2003) die qualitative und/oder quantitative Charakterisierung eines Schadens hinsichtlich der Möglichkeit seines Eintreffens und der Tragweite der Schadenswirkung. Die Weltgesundheitsorganisation definiert Risiko als die Wahrscheinlichkeit eines Ereignisses, einen Schaden in einer exponierten Population innerhalb eines bestimmten Zeitraumes und unter Berücksichtigung der Größe des Schadens auszulösen. Die Wahrscheinlichkeit, dass es in einem bestimmten Zeitraum zu Schäden bei einer Person, einer Gruppe von Personen, Pflanzen, Tieren und/oder der Ökologie in einer spezifischen exponierten Region auf eine spezifische Dosis oder Konzentration von einem schädigenden Agens kommt, hängt sowohl von dem Grad der Toxizität eines Agens als auch dem Ausmaß der Exposition ab.

Das „hygienische Risiko“ beschreibt die Wahrscheinlichkeit, dass ein Gesundheitsschaden sowohl Individuen als auch die öffentliche Gesundheit betrifft. Die Wahrscheinlichkeit eines Schadens bezieht sich hierbei z. B. auf Infektionen, Erkrankung, Tod oder Behinderung, welche in einem spezifischen Zeitraum auftreten.

Jahresarbeitszahl (JAZ)

Die Jahresarbeitszahl (JAZ) ist ein Effizienzmaßstab für eine Kompressions-Wärmepumpenanlage. Die JAZ gibt an, wie viel Nutzenergie (in Anlehnung an VDI 4650) im Verhältnis zur eingesetzten elektrischen Energie bereitgestellt wurde.

Koloniezahl, Koloniebildende Einheiten (KbE)

Die Koloniezahl ist die Zahl von sichtbar werdenden Kolonien, die sich aus einer definierten Probenmenge bei festgelegtem Nährstoffangebot, festgelegter Bebrütungstemperatur und innerhalb einer bestimmten Zeit in oder auf einem Agar-Nährmedium entwickeln. Es handelt sich um eine Methode zur Bestimmung der Konzentration kultivierbarer Mikroorganismen. Die Angabe der Konzentration erfolgt als koloniebildende Einheiten (KbE) bezogen auf ein Volumen oder eine Fläche und dient als Maßeinheit für die Konzentrationsangabe jedweder auf Agar-Platten kultivierbaren Bakterien.

Die Bestimmung der „Allgemeinen Koloniezahl“ (heterotrophic plate count, HPC) als Indikatorparameter nach der Trinkwasserverordnung in 1 mL des zu untersuchenden Wassers dient zur Erfassung von bestimmten, hygienisch relevanten Mikroorganismen auf einem definierten, relativ nährstoffreichen Nährmedium.

Zur Erfassung eines erweiterten Spektrums heterotropher Bakterien in Wasser- und Biofilmpflanzen werden abweichend häufig ein nährstoffarmes Nährmedium (R2A-Medium), längere Bebrütungszeiten (z. B. 7 Tage) und/oder niedrige Bebrütungstemperaturen (z. B. 20 °C) verwendet.

Legionellen, *L. pneumophila*

Der Begriff Legionellen bezeichnet im deutschen Sprachgebrauch die Gattung *Legionella*. Diese gramnegativen, stäbchenförmigen, aeroben Bakterien mit komplexen Nährstoffanforderungen sind monopolar begeißelt und damit beweglich. Man unterscheidet 60 verschiedene Arten anhand unterschiedlicher morphologischer, physiologischer und genetischer Charakteristika. Legionellen sind an feuchten und bevorzugt warmen Standorten zu finden. Natürliches Habitat sind Gewässer und feuchte Böden. Kühltürme, Klimaanlage, Trinkwasser-Installationen etc. stellen durch Aerosolbildung eine Infektionsgefahr für den Menschen dar.

L. pneumophila ist ein fakultativ intrazelluläres humanpathogenes Bakterium innerhalb der Gattung *Legionella*, das 80 – 85 % aller Legionellose (meist in Form einer atypischen Pneumonie) verursacht. Auch wenn in Dokumentation und Sprachgebrauch der Sammelbegriff „Legionellen“ weit verbreitet ist, werden Trinkwasserproben z.T. speziell auf die Art *L. pneumophila* hin untersucht.

Legionellen-Analysen

Ergebnis der hygienisch-mikrobiologischen Untersuchung der an einer definierten Probenahmestelle entnommenen Trinkwasserprobe, die in einem akkreditierten Labor auf eine Kontamination mit Legionellen untersucht worden ist. Es liegen in der Regel Angaben zu weiteren Beurteilungskriterien vor.

Polymerase-Kettenreaktion (PCR)

Die Polymerase-Kettenreaktion (englisch Polymerase Chain Reaction, PCR) ist eine molekularbiologische Methode zur Vervielfältigung von spezifischen DNA-Abschnitten.

Pseudomonaden, *P. aeruginosa*

Der Begriff Pseudomonaden im morphologischen Sinne bezeichnet allgemein alle gramnegativen, stäbchenförmigen Bakterien mit geringen Nährstoffanforderungen, die polar begeißelt und damit beweglich sind. Pseudomonaden sind ubiquitär verbreitet, also im Boden und Wasser sowie assoziiert mit Pflanzen, Tieren und Menschen zu finden.

P. aeruginosa ist ein fakultativ humanpathogenes, aerobes Bakterium innerhalb der Gattung *Pseudomonas*, das häufig nosokomiale Infektionen im Krankenhaus verursacht und bevorzugt immunsupprimierte

Menschen infiziert. Pyocyanin- und Fluoreszeinbildung sind charakteristische Merkmale, welche die Unterscheidung zu anderen Vertretern der Gattung ermöglichen und auf die im kulturellen Nachweis geprüft wird. Auch wenn in Dokumentation und Sprachgebrauch der Sammelbegriff „Pseudomonaden“ weit verbreitet ist, werden Trinkwasserproben meist speziell auf die Art *P. aeruginosa* hin untersucht.

p-Wert

Signifikanzniveau bei statistischen Tests. Ab p-Werten < 0,05 werden die Ergebnisse statistischer Tests als signifikant, also als nicht zufällig entstanden, bewertet.

Quantitative PCR (qPCR)

Bei der quantitativen Polymerase Chain Reaction (qPCR) wird mit Hilfe eines Fluoreszenzsignals die vervielfältigte Menge der DNA bei der Vervielfältigung mitgemessen. Die Anzahl der vervielfältigten DNA-Abschnitte kann z. B. als genomische Einheit pro Volumen oder Oberfläche angegeben werden.

R&I -Fließschema

Rohrleitungs- und Instrumentenfließschema

RR

Das Relative Risiko gibt an, um welchen Faktor sich ein Risiko (z. B. einer Kontamination) in zwei Gruppen hinsichtlich eines Merkmals (*hier*: z. B. Vorhandensein eines Bauteils in der TWI oder Über-/Unterschreitung einer Temperatur) unterscheidet. Es errechnet sich anhand einer Vierfeldertafel als Quotienten der beiden Eintrittswahrscheinlichkeiten und ermöglicht hier Aussagen über die Stärke der Assoziation zwischen Exposition gegenüber einem Merkmal und Kontamination: $RR = P(\text{Kontamination mit Merkmal})/P(\text{Kontamination ohne Merkmal})$

Liegt das Relative Risiko bei eins, so unterscheiden sich die Gruppen nicht (*hier*: das getestete Merkmal hat keinen Einfluss auf die Kontamination). Liegt das Risiko unter eins, trägt das Merkmal zur Verringerung des Risikos bei. Liegt das Risiko über eins erhöht das getestete Merkmal hingegen das Risiko.

Technischer Maßnahmenwert für Legionellen

In der Trinkwasserverordnung besteht für *Legionella* spp. ein technischer Maßnahmenwert, der 100 KBE pro 100 mL Trinkwasser beträgt. Der technische Maßnahmenwert ist der Wert, bei dessen Überschreitung Maßnahmen zur hygienisch-technischen Überprüfung der Trinkwasser-Installation im Sinne einer Gefährdungsanalyse eingeleitet werden müssen.

Teilzentrale Kontamination

Positiver kultureller Befund für *Legionella* spp. im Bereich der Stränge und Stockwerksleitungen der Trinkwasser-Installation.

Thermohydraulische Messung THM	Messung von drei Temperaturen am zentralen Trinkwassererwärmer (Trinkwarmwasser-Austritt, Eintritt des Trinkwassers (kalt), Eintritt der Zirkulation) sowie vorzugsweise zwei der zugehörigen Volumenströme.
Trinkwasser-Installation TWI	Trinkwasser-Installation ist die Gesamtheit aller Rohrleitungen, Armaturen und Geräte, die sich zwischen dem Punkt der Entnahme von Wasser für den menschlichen Gebrauch durch den Verbraucher und dem Punkt der Übergabe von Trinkwasser aus einer Wasserversorgungsanlage an den UsI befindet. (s. TrinkwV)
TWE-Anlagen	TWE-Anlagen sind jeweils einem Trinkwassererwärmer zugeordnete Trinkwasser-Installationen, von denen mindestens zu zwei Probenahmestellen trinkwasserhygienische Analyseergebnisse vorliegen. Ein Objekt kann mehrere TWE-Anlagen besitzen.
UsI	Unternehmer und sonstiger Inhaber einer Trinkwasser-Installation, i.A. auch als „Betreiber“ bezeichnet (s. TrinkwV)
VBNC ("viable but nonculturable"; lebend, aber nicht kultivierbar)	Zustand von Bakterien, die sich normalerweise auf konventionellen Nährmedien unter üblichen Bebrütungsbedingungen kultivieren lassen, sich aber nun im Erhaltungsstoffwechsel befinden und nicht mehr vermehren. Deshalb bilden sie auch keine Kolonien auf Agar-Nährmedien, obwohl ihre Lebensfähigkeit (Vitalität) potenziell erhalten bleibt. VBNC-Bakterien lassen sich mit kultivierungsunabhängigen (häufig biochemischen oder molekularbiologischen) Verfahren nachweisen. Bakterien im VBNC-Zustand besitzen funktionelle Zellmembranen, intakte DNA und weisen noch Stoffwechsel- und Atmungsaktivität auf. Den VBNC-Zustand auslösende Faktoren sind ungünstige Umgebungstemperatur, Nährstoffmangel oder die Anwesenheit von Desinfektionsmitteln und toxischen Metallionen. Der VBNC-Zustand ist reversibel. Unter günstigen Umweltbedingungen können VBNC-Zellen wieder kultivierbar und im Fall von Krankheitserregern potenziell infektiös werden.
Zentrale Kontamination	Positiver kultureller Befund für <i>Legionella</i> spp. am Trinkwassererwärmer (Eintritt Trinkwasser (kalt), Austritt Trinkwarmwasser, Eintritt Zirkulation)

10 Formelzeichen, Indizes und Abkürzungen

Formelzeichen

G	Gesamtzahl der Datensätze bzw. TWE-Anlagen
H	Enthalpie
\dot{m}	Massestrom
T, t	Temperatur in K bzw. °C
\dot{V}	Volumenstrom

Indizes

Aus, aus	Austritt
Ein, ein	Eintritt
HA/HEL	Hausanschluss bzw. Hauseingangsleitung des TWK
TWE	Trinkwassererwärmer allgemein
TWK	Trinkwasser (kalt)
TWW	erwärmtes Trinkwasser /Trinkwarmwasser
TWZ	Trinkwarmwasser-Zirkulation
u	Umgebung
Zirk	Zirkulation

Abkürzungen

a.a.R.d.T.	allgemein anerkannten Regel der Technik
EFH	Einfamilienhaus
EU-r.t.c.	EU-reference tapping cycles
GEVV	Professur für Gebäudeenergie-technik und Wärmeversorgung der TU Dresden
GU	Genomic units (genomische Einheiten)
GZZ	Gesamtzellzahl
HA/HEL	Hausanschluss bzw. Hauseingangsleitung des TWK
IEE	Fraunhofer-Institut für Energiewirtschaft und Energiesystemtechnik Kassel
IHPH	Institut für Hygiene und Öffentliche Gesundheit (Public Health) der Universität Bonn
IMMH	Institut für Medizinische Mikrobiologie und Hygiene der TU Dresden

IWW	Rheinisch-Westfälisches Institut für Wasserforschung gGmbH Mülheim
JAZ	Jahresarbeitszahl
KbE	Kolonie bildende Einheit
LDL	Lower detection limit; untere Nachweisgrenze (dt. auch NWG)
LQL	Lower quantification limit; untere Quantifizierungsgrenze
MFH	Mehrfamilienhaus
NWG	Nachweisgrenze
Sg	(Legionella) Serogruppe
ST	(Legionella) Sequenztyp
THM	Thermohydraulische Messung
TrinkwV	Trinkwasserverordnung
TUD	Technische Universität Dresden
TWE	Trinkwassererwärmer allgemein
TWI	Trinkwasser-Installation
TWK	Trinkwasser (kalt)
TWW	erwärmtes Trinkwasser /Trinkwarmwasser
TWZ	Trinkwarmwasser-Zirkulation
UBA	Umweltbundesamt
WE	Wohneinheit
Zirk.	Zirkulation

11 Schrifttum

11.1 Verordnungen, Normen, Regelwerke

DIN 1988	DIN 1988 – Technische Regeln für Trinkwasser-Installationen. Deutsche Normenreihe mit Ergänzungsfestlegungen zur DIN EN 806
DIN EN 806	Technische Regeln für Trinkwasser-Installationen. Europäische Normenreihe in der jeweils deutschen Fassung.
DIN EN ISO 11731	Wasserbeschaffenheit - Nachweis und Zählung von Legionellen (ISO 11731: 2004); Deutsche Fassung EN ISO 11731-2:2008
DIN EN ISO 19458	Wasserbeschaffenheit – Probenahme für mikrobiologische Untersuchungen (ISO 19458:2006); Deutsche Fassung EN ISO 19458:2006
DIN V 18599 – 5 (2011)	DIN V 18599 - Energetische Bewertung von Gebäuden - Teil 5: Endenergiebedarf von Heizsystemen, DIN-Normenreihe, Fassung von Dezember 2011.
DVGW W 270	DVGW-Arbeitsblatt W 270: Vermehrung von Mikroorganismen auf Werkstoffen für den Trinkwasserbereich – Prüfung und Bewertung. Ausgabe 11-2007
DVGW W 553	DVGW-Arbeitsblatt W 553: Bemessung von Zirkulationssystemen in zentralen Trinkwassererwärmungsanlagen.
DVGW W 556	DVGW-Arbeitsblatt W 556: Hygienisch-mikrobielle Auffälligkeiten in Trinkwasser-Installationen; Methodik und Maßnahmen zu deren Behebung. Ausgabe Dezember 2015
DVGW W 551	DVGW-Arbeitsblatt W 551: Trinkwassererwärmungs- und Trinkwasserleitungsanlagen. Technische Maßnahmen zur Verminderung des Legionellenwachstums; Planung, Errichtung, Betrieb und Sanierung von Trinkwasser-Installationen. Ausgabe 2004
ISO 11731 (2007)	Water Quality - Enumeration of Legionella. International Standard.
TrinkwV 2011	Trinkwasserverordnung in der Fassung der Bekanntmachung vom 28. November 2011 (BGBl. I S. 2370), die durch Artikel 2 Absatz 19 des Gesetzes vom 22. Dezember 2011 (BGBl. I S. 3044) geändert worden ist
TrinkwV 2001	Verordnung über die Qualität von Wasser für den menschlichen Gebrauch (Trinkwasserverordnung – TrinkwV 2001) vom 21. Mai 2001. BGBl. I (2001) ; S. 959–980.
VDI 6023	VDI/DVGW-Richtlinie 6023 (2013) Hygiene in Trinkwasser-Installationen. Anforderungen an Planung, Ausführung, Betrieb und Instandhaltung. Beuth Verlag, Berlin.

11.2 Literatur

- [BBSR 2015] Wärmeschutzverordnung (WärmeschutzV). Hg. v. Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR). Online verfügbar unter http://www.bbsr-energieeinsparung.de/EnEVPortal/DE/Archiv/WaermeschutzV/wschr_node.html, zuletzt geprüft am 9/4/2017.
- [BDEW 2016] Entwicklung des Wärmeverbrauchs in Deutschland. Basisdaten und Einflussfaktoren. Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V., Berlin. Dezember 2016.
- [Bédard 2014] Bédard, E., Charron, D., Lalancette, C., Déziel, E., Prévost, M.: Recovery of *Pseudomonas aeruginosa* culturability following copper- and chlorine-induced stress. FEMS Microbiol. Lett. 356: 226-234, 2014.
- [BMWi 2017] Förderbekanntmachung zu den Modellvorhaben Wärmenetzsysteme 4.0 („Wärmenetze 4.0“). Hg. v. Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi). Online verfügbar unter http://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/B/bundesanzeiger-foerderbekanntmachung-waermenetz-40.pdf?__blob=publicationFile&v=4, zuletzt geprüft am 9/4/2017.
- [Charron 2015] Charron, D., Bédard, E., Lalancette, C., Laferrière, C., Prévost, M.: Impact of electronic faucets and water quality on the occurrence of *Pseudomonas aeruginosa* in water: a multi-hospital study. Infect. Control Hosp. Epidemiol. 36: 311-319, 2015.
- [Dilger 2017] Dilger, T., Melzl, H., Gessner, A.: *Legionella* contamination in warm water systems: A species level survey. International Journal of Hygiene and Environmental Health, in press, 2017
<https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2017.10.011>
- [Dwidjosiswojo 2011] Dwidjosiswojo, Z., Richard, J., Moritz, M. M., Dopp, E., Flemming, H-C., Wingender, J.: Influence of copper ions on the viability and cytotoxicity of *Pseudomonas aeruginosa* under conditions relevant to drinking water environments. Int. J. Hyg. Environ. Health 214, 485-492, 2011.
- [EFP 2011] 6. Energieforschungsprogramm der Bundesregierung. Stand Juli 2011, Herausgeber Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi), Berlin
- [Elliott 1963] Elliott, R. P.: Temperature-gradient incubator for determining the temperature range of growth of microorganisms. J. Bacteriol. 85: 889-894, 1963.
- [EU-r.t.c.] Mandate to CEN and CENELEC for the elaboration and adoption of measurement standards for household appliances, Water-heaters, hot water storage appliances and water heating systems, Brüssel 2002
- [Exner 2009] Exner, M.: Hygiene in Trinkwasser-Installationen - Erfahrungen aus Deutschland. Legionellen-Fachgespräch UBA/BfR am 20.10.2009 in Berlin
- [Exner 2011] Exner, M.: Wasser und Gesundheit. Vortrag, Wasser Berlin 2011; 02 bis 05. Mai 2011
- [Exner 2016] Exner, M., Nissing, W., Behringer, K., Engelhart, S., Pleischl, S., Koch, C., Trautmann, M., Kramer, A., Walger, P., Martiny, H., Jatzwauk, L. (2016) Gesundheitliche Bedeutung, Prävention und Kontrolle Wasser-assoziiertes *Pseudomonas aeruginosa*-Infektionen. Hyg. Med. 41, Suppl. 2, 1-32.

- [Flemming 2010] Flemming, H.-C. (Hrsg.) Vermeidung und Sanierung von Trinkwasser-Kontaminationen durch hygienisch relevante Mikroorganismen aus Biofilmen der Hausinstallation, 2010, IWW Schriftenreihe, Band 54, Mülheim an der Ruhr, Eigenverlag, ISSN 0941-0961
- [Harmuth 2006] Harmuth, M.: Untersuchungen über das Vorkommen von Legionellen in Warmwassersystemen von Ein- und Zweifamilienhäusern. Dissertation Westfälische Wilhelms-Universität Münster, 2006
- [Hentschel 2011] Hentschel, W., Heudorf, U.: Allgemein anerkannte Regeln der Technik und Legionellen in Trinkwasser – Untersuchungsergebnisse aus Frankfurt am Main. Bundesgesundheitsblatt 54: 717-723, 2011
<https://doi.org/10.1007/s00103-011-1281-6>
- [Hippelein 2014] Hippelein, M., Matthiessen, A., Christiansen, B.: Methodische Untererfassung von *Pseudomonas aeruginosa* in der Trinkwasser-Installation mit Kupferleitungen. Vom Wasser 112: 99-100, 2014.
- [IWU 2015] Loga, T.; Stein, B., Diefenbach, N., Born, R.: Deutsche Gebäudetypologie. Beispielhafte Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz von typischen Wohngebäuden, zweite erweiterte Auflage. Institut Wohnen und Umwelt (IWU), Darmstadt, Februar 2015.
- [Kistemann 2010] Kistemann, T., Schreiber, C., Völker, S.: Vorkommen mikrobieller Trinkwasserkontaminationen in Hausinstallationen, 2010, in: Vermeidung und Sanierung von Trinkwasser-Kontaminationen durch hygienisch relevante Mikroorganismen aus Biofilmen der Hausinstallation (Hrsg. H.-C. Flemming), IWW Schriftenreihe, Band 54, Mülheim an der Ruhr, Eigenverlag, ISSN 0941-0961
- [Kropinski 1987] Kropinski, A. M. B., Lewis, V., Berry, D.: Effect of growth temperature on the lipids, outer membrane proteins, and lipopolysaccharides of *Pseudomonas aeruginosa* PAO. J. Bacteriol. 169: 1960-1966, 1987.
- [Kruse 2016] Kruse, E.A., Wehner, A., Wisplinghoff, H.: Prevalence and distribution of *Legionella* spp in potable water systems in Germany, risk factors associated with contamination, and effectiveness of thermal disinfection. American Journal of Infection Control, 44(4):470-474, 2016
<https://doi.org/10.1016/j.ajic.2015.10.025>
- [Lee 2011] Lee, J.V., Lai, S., Exner, M., Lenz, J., Gaia, V., Casati, S., Hartemann, P., Lück, C., Pangon, B., Ricci, M.L., Scaturro, M., Fontana, S., Sabria, M., Snchez, I., Assaf, S. and Surman-Lee, S. (2011) An international trial of quantitative PCR for monitoring Legionella in artificial water systems. J Appl Microbiol.
- [Lück 2012] Lück, Ch.: Mikrobiologische Untersuchungen an Wassersystemen und unter in-vitro Bedingungen. Zwischenbericht zum gleichlautenden Teilprojekt im BMWi-Forschungsvorhaben 0327831B, Tu Dresden, Institut für Medizinische Mikrobiologie und Hygiene, März 2012
- [Lück et.al. 2010] Lück, P.C., Jacobs, E., Röske, I., Schröter-Bobsin, U., Dumke, R. and Gronow, S. (2010) *Legionella dresdenensis* sp. nov., isolated from river water. International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology 60, 2557-2562.
- [Lück et.al. 2011] Lück, C.: *Legionella pneumophila*: genetic diversity of patients and environmental isolates. Bundesgesundheitsblatt, Gesundheitsforschung, Gesundheitsschutz 2011; 54 (6):693-698

- [Miyamoto97] Miyamoto, H., Yamamoto, H., Arima, K., Fujii, J., Maruta, K., Izu, K., Shimomori, T. and Yoshida, S. (1997) Development of a new seminested PCR method for detection of Legionella species and its application to surveillance of legionellae in hospital cooling tower water. *Appl Environ Microbiol* 63, 2489-2494.
- [Park 2011] Park, H., Park, H.-J., Kim, J. A., Lee, S. H., Kim, J. H., Yoon, J., Park, T. H. (2011) Inactivation of *Pseudomonas aeruginosa* PAO1 biofilms by hyperthermia using superparamagnetic nanoparticles. *J. Microbiol. Methods*. 84, 41-45.
- [Perschk 2010] Perschk, A.: Gebäude- und Anlagensimulation - Ein „Dresdner Modell“ - Gesundheits-Ingenieur - Haustechnik - Bauphysik - Umwelttechnik 131 (2010), Nr. 4, S. 178–183
- [Pleischl 2004] Pleischl, Stefan: Zum Vorkommen von Legionellen in wasserführenden, technischen Systemen und der Wirksamkeit von Sanierungsmaßnahmen unter Praxisbedingungen. Rheinische Friedrich-Wilhelm-Universität Bonn, 2004, urn:nbn:de:hbz:5N-04395
- [PWÜ04] Allgaier, W.; Erning, J.W.; Köhler, S.; Pareidt, H.; Rühling, K.: Bau, Einsatz und Einbau gelöteter PWÜ: Untersuchungen an gelöteten Plattenwärmeübertragern (PWÜ). *EuroHeat & Power*, 33. Jg. (2004) Heft 3, Seite 84 ff; Veröffentlichung zum AiF-IGF-Forschungsvorhaben FKZ 13019B
- [Rajkowski 2001] Rajkowski, K. T., Rice, E. W.: Growth and recovery of selected gram-negative bacteria in reconditioned wastewater. *J. Food Prot.* 64: 1761-1767, 2001.
- [R-Paket ImerTest] R-Paket ImerTest
Alexandra Kuznetsova, Per Bruun Brockhoff und Rune Haubo Bojesen Christensen (2016): *ImerTest: Tests in Linear Mixed Effects Models*, R package version 2.0-33, URL <https://CRAN.Rproject.org/package=ImerTest>.
- [R-Paket openxlsx] R-Paket openxlsx
Alexander Walker (2017): *openxlsx: Read, Write and Edit XLSX Files*, R package version 4.0.17, URL <https://CRAN.Rproject.org/package=openxlsx>.
- [Rühling 2012] Rühling, K.; Rothmann, R.: Untersuchungen zur Verifizierung von Sicherheitsabständen zur Zone des Legionellenwachstums in der Trinkwassererwärmung. Teilbericht im BMWi-Forschungsvorhaben FKZ 0327400B, TU Dresden, Professur für Gebäudeenergie-technik und Wärmeversorgung, Dezember 2012
- [Rühling 2009] Rühling, K.; Nissing, W.: Wirkungen von Hygieneanforderungen auf Energieeinsparung und Energieeffizienz. WAT Wasserfachliche Aussprachetaugung 2009, Berlin 31.03. – 01.04.2009
- [Schreiber 2012] Schreiber, C.; Völker, S.; Kistemann, T.: Kontamination von Trinkwasser-Installationen mit Legionellen – Möglichkeiten und Grenzen konventioneller Nachweisverfahren und molekularer Diagnostik. *Umweltmedizin in Forschung und Praxis* 17(5): 292, 2012
- [Spinks 2006] Spinks, A. T., Dunstan, R. H., Harrison, T., Coombes, P., Kuczera, G.: Thermal inactivation of water-borne pathogenic and indicator bacteria at sub-boiling temperatures. *Water Res.* 40:1326-1332, 2006.
- [Statistik software] Statistik-Software R. R Core Team (2017): *R: A Language and Environment for Statistical Computing*, R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, URL <https://www.R-project.org/>.

- [Suchenwirth 2012] Suchenwirth, R.: Kurzbeschreibung der Probenbearbeitung im Labor – Legionella spec. Niedersächsisches Landesgesundheitsamt; Stand 09/2008 in der überarbeiteten Fassung vom 30.04.2011
- [techem 2011] Energiekennwerte 2011, Hilfen für den Wohnungswirt, Eine Studie von techem, Bestellkennziffer: 9982074
- [TUD 2006] Wünsche, N.; Davids, A.; Lück, C.: Neuartige thermische Desinfektion im Durchflusssprinzip für zentrale Trinkwassererwärmungsanlagen. AiF-Projekt der industriellen Gemeinschaftsforschung. TU Dresden, Professur für Energiesystemtechnik und Wärmewirtschaft, 2006
- [twin05] twin Nr. 05 - Informationen des DVGW zur Trinkwasser-Installation: Desinfektion von Trinkwasser-Installationen zur Beseitigung mikrobieller Kontaminationen. DVGW Bonn, April 2009
- [twin06] twin Nr. 06 - Informationen des DVGW zur Trinkwasser-Installation: Durchführung der Probennahme zur Untersuchung des Trinkwassers auf Legionellen (ergänzende systemische Untersuchung von trinkwasser-Installationen) DVGW Bonn, November 2011
- [UBA 2012] Systemische Untersuchungen von Trinkwasser-Installationen auf Legionellen nach Trinkwasserverordnung. Empfehlung des Umweltbundesamtes nach Anhörung der Trinkwasserkommission vom 23. August 2012 zu Probennahme, Untersuchungsgang und Angabe des Ergebnisses.
<https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/419/dokumente/internet-legionellen-empfehlung.pdf> (Download 05.02.2015)
- [UBA 2017] Umweltbundesamt: Empfehlung zu erforderlichen Untersuchungen auf *Pseudomonas aeruginosa*, zur Risikoeinschätzung und zu Maßnahmen beim Nachweis im Trinkwasser Empfehlung des Umweltbundesamtes nach Anhörung der Trinkwasserkommission. Bundesgesundheitsblatt 60: 1180-1183, 2017
- [UBA 2017_1] Memmler, M.; Lauf, T.; Wolf, K.; Schneider, S.: Emissionsbilanz erneuerbarer Energieträger. Bestimmung der vermiedenen Emissionen im Jahr 2016. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau. Oktober 2017.
- [UBA2000] Nachweis von Legionellen in Trinkwasser und Badebeckenwasser. Empfehlung des Umweltbundesamtes nach Anhörung der Trink- und Badewasserkommission des Umweltbundesamtes. Bundesgesundheitsbl - Gesundheitsforsch – Gesundheitsschutz, 2000 · 43:911–915
- [UBA2005] Empfehlung des Umweltbundesamtes nach Anhörung der Trinkwasserkommission des Bundesministeriums für Gesundheit. Periodische Untersuchung auf Legionellen in zentralen Erwärmungsanlagen der Hausinstallation nach § 3 Nr. 2 Buchstabe c TrinkwV 2001, aus denen Wasser für die Öffentlichkeit bereitgestellt wird. Bundesgesundheitsbl. – Gesundheitsforsch. - Gesundheitsschutz 2005 · 49:697–700, DOI 10.1007/s00103-006-1295-7, © Springer Medizin Verlag 2006
- [UBA2010] Leitlinie zur hygienischen Beurteilung von organischen Beschichtungen im Kontakt mit Trinkwasser (Beschichtungsleitlinie). Umweltbundesamt 30.11.2010 sowie aktuelle Ergänzungen der Anlage 5 vom 15.11.2011; Bundesgesundheitsblatt Gesundheitsforschung Gesundheitsschutz 2007 50:1152-1176, 2008 51: 689-690, 2009: 52: 960, 2011:54:243
- [Völker 2010] Völker, S., Schreiber, C., Kistemann, T.: Drinking Water quality in household supply infrastructure - A survey of the current situation in Germany. International Journal of Hygiene and Environmental Health 213(3): 204-9, 2010

Kurzüberblick und Thesen „Energieeffizienz und Hygiene in der Trinkwasser-Installation“

- [Völker 2016] Völker, S., Schreiber, C., Kistemann, T.: Modelling characteristics to predict *Legionella* contamination risk - Surveillance of drinking water plumbing systems and identification of risk areas. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 219 (1):101-109, 2016
<https://doi.org/10.1007/s00103-011-1281-6>
- [Völker 2017] Völker, S., Schreiber, C., Müller, H., Zacharias, N., Kistemann, T.: Identifikation systemweiter Kontaminationen mit *Legionella spec.* in Trinkwasser-Installationen: Untersuchungsstrategien und korrespondierende Parameter, *Das Gesundheitswesen* 79(05): 407-414, 2017.
- [wiki] <http://de.wikipedia.org/wiki/Paretoprinzip> (Download 22.02.2012)
- [Wricke 2007] Wricke, B., Petzoldt, H., Hambsch, B.: Mikrobiologische Situation n Hausinstallationen – Ergebnisse einer Bestandsaufnahme. *gwf Wasser, Abwasser* 148, Nr. 13, S. 50-55, 2007
http://www.tzw.de/demibi_pr_mikrobiologische_situa-145/