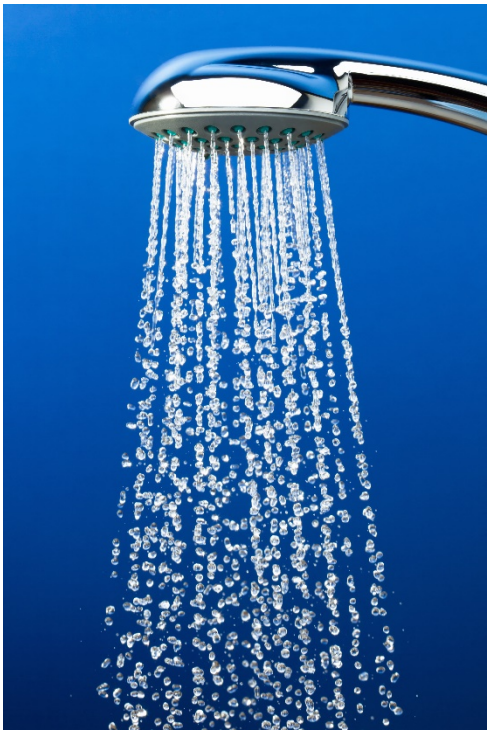


Koordinierter Schlussbericht zu 03ET1234 A bis D

EnEff: Wärme – Verbundvorhaben Energieeffizienz und Hygiene in der Trinkwasser-Installation

im Kontext: DHC Annex TS1 ”Low Temperature District Heating for Future Energy Systems“

Akronym: EE+HYG@TWI

Autoren

Rühling, K.; Rothmann, R.; Haupt, L.; Hoppe, S.; Löser, J. (03ET1234 A)
Schreiber, C.; Waßer, F.; Zacharias, N.; Kistemann, T. ((03ET1234 D)
Lück, C.; Koshkolda, T.; Petzold, M. (03ET1234 A)
Schaule, G.; Nocker, A.; Wingender, J. (03ET1234 C)
Kallert, A.; Schmidt, D.; Egelkamp, R. (03ET1234 B)

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Gefördert durch:

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Stand: 30.04.2018

Inhaltsverzeichnis

1 ZIELE DES VORHABENS, ARBEITSPAKETSTRUKTUR UND FORSCHUNGSPARTNER 1

1.1 GESAMTZIEL 1
1.2 WISSENSCHAFTLICH-TECHNISCHE ARBEITSZIELE DES VORHABENS 2
1.3 ARBEITSPAKETSTRUKTUR 4
1.4 FORSCHUNGSPARTNER, WISSENSCHAFTLICHE BEGLEITUNG UND AUTORENSCHAFT 6

2 METHODISCHE GRUNDLAGEN UND OBJEKTAKQUISE 8

2.1 KRITERIEN OBJEKTAUSWAHL 8
2.2 OBJEKTAKQUISE 9
2.3 VORGEHEN TRINKWASSERHYGIENE-BEPROBUNG UND BEGEHUNG 9
2.4 ANALYSEMETHODEN TRINKWASSERHYGIENE 13
2.4.1 Kulturverfahren 13
2.4.2 qPCR 14
2.4.3 Gesamtzellzahl 16
2.4.4 Methodenabgleich 16
2.5 THERMOHYDRAULISCHE MESSUNGEN 18

3 DATENBANK 22

3.1 RELATIONALE DATENBANK FELDUNTERSUCHUNGEN 22
3.2 DATENBANK DATA FÜR ERGEBNISSE THERMOHYDRAULISCHE MESSUNGEN 24
3.3 GLOBALE DATENBANK ZU AUSGEWÄHLTEN ERGEBNISSEN AUS PRAXIS UND SIMULATION 24

4 FELDUNTERSUCHUNGEN 25

4.1 ÜBERSICHT AKQUIRIERTE OBJEKTE 25
4.2 OBJEKTSPEZIFISCHE ERGEBNISSE 28
4.3 ERKENNTNISSE DESKRIPTIVE STATISTIK 36
4.3.1 Methodik 36
4.3.2 Trinkwasserhygienische Befunde 37
4.3.3 Temperatur Austritt TWE und Trinkwasserhygiene 40
4.3.4 Klassen der Kontamination 41
4.3.5 „Grüne“ versus „Graue“ Objekte 42
4.3.6 Weitere ausgewählte Erkenntnisse 45
4.4 WEITERFÜHRENDE STATISTISCHE AUSWERTUNG FÜR EINMAL-BEPROBUNG 48
4.4.1 Methodisches Vorgehen 48
4.4.2 Deskriptive Datenexploration 50
4.4.3 Angewandte inferenzstatistische Auswertungsmethoden 66
4.4.4 Vergleich der hygienisch-mikrobiologischen Parameter 70
4.4.5 Einfluss von Temperatur und Thermohydraulik auf eine Trinkwasserkontamination mit Legionellen 76
4.4.6 Einfluss des Probenahmeortes bzw. des beprobten Liters auf die Legionellenkontamination 103
4.4.7 Einfluss verschiedener Objektcharakteristika auf eine Legionellenkontamination 106
4.5 STATISTISCHE AUSWERTUNG LANGZEITBEPROBUNG 124
4.6 SCHLUSSFOLGERUNGEN FELDUNTERSUCHUNGEN UND HERAUSARBEITUNG VON THESEN 133

5 TECHNIKUMS-VERSUCHSSTAND TRINKWASSER-INSTALLATION AM ZET 143

5.1 TECHNISCH-WISSENSCHAFTLICHES KONZEPT 143
5.1.1 Allgemeines 143
5.1.2 Grundaufbau 143
5.1.3 Entnahmezyklen 154
5.1.4 Monitoring 161
5.2 VERSUCHSMATRIX 163

5.3 Ergebnisse thermohydraulische Auswertung 164
5.3.1 Temperaturen TWW 164
5.3.2 Temperaturen TWZ 165
5.3.3 Temperaturen TW (kalt) 166
5.3.4 Energiebilanzen 167
5.4 Ergebnisse Trinkwasserhygiene 170
5.4.1 Ausgangssituation 170
5.4.2 Einfluss der Außen- und Umgebungstemperatur um den Technikums-Versuchsstand auf die Legionellenkonzentration in der Zentrale (Legionella spp. qPCR) 170
5.4.3 Einfluss der TWE-Temperatur auf die Legionellenkonzentration in der Zentrale (Legionella spp. qPCR) 171
5.4.4 Einfluss der TWE-Temperatur, Stranglänge und Spülverhalten auf die Legionellenkonzentration in der Zentrale und Peripherie (Legionella spp./L. pneumophila qPCR, Kultur) 172
5.4.5 Einfluss der Art des hydraulischen Zirkulationsabgleiches auf die Legionellenkonzentration in der Zentrale und Peripherie (Legionella spp. qPCR) 177
5.5 Überlagerung Erkenntnisse Thermohydraulik und Trinkwasserhygiene 179
5.6 Schlussfolgerungen Technikumsversuche und Herausarbeiten von Thesen 180

6 SIMULATION TRINKWASSER-INSTALLATION IN TRNSYS-TUD 182

6.1 Allgemeines zu TRNSYS-TUD 182
6.2 Projektspezifische Weiterentwicklungen von TRNSYS-TUD 182
6.3 Modellierung des Versuchsstandes TWI im ZET 183
6.4 Parametrierung und Validierung mittels Versuchsergebnissen 189
6.4.1 Ausgangssituation 189
6.4.2 Vorbetrachtungen 189
6.4.3 Vergleich der gemessenen und simulierten Ergebnisse 193
6.4.4 Simulationsgüte 200
6.5 Simulationsstudie 201
6.5.1 Ziele und Grundansatz 201
6.5.2 Untersuchungsmatrix 202
6.5.3 Ergebnisse Energiebilanzen 206
6.5.4 Ergebnisse energetische Kopplung TWW – TWK 209
6.6 Schlussfolgerungen Simulation und Herausarbeiten von Thesen 212

7 EMULATIONSMODULE WERKSTOFFE UND ENDSTÄNDIGE ENTNAHME 213

7.1 Technisch-wissenschaftliches Konzept 213
7.1.1 Allgemeines 213
7.1.2 Grundaufbau 213
7.1.3 Entnahmezyklus 217
7.2 Untersuchungen zu *Legionella pneumophila* 218
7.2.1 Versuchsmatrix 218
7.2.2 Ergebnisse thermohydraulische Auswertung 221
7.2.3 Ergebnisse Trinkwasserhygiene 222
7.2.4 Überlagerung Erkenntnisse Thermohydraulik und Trinkwasserhygiene 234
7.3 Untersuchungen zu *Pseudomonas aeruginosa* 236
7.3.1 Allgemeines zu Pseudomonas aeruginosa (P. aeruginosa) 236
7.3.2 Einfluss der Temperatur auf P. aeruginosa unter trinkwasserrelevanten Bedingungen 237
7.3.3 Experimente im Emulationsmodul am IWW mit P. aeruginosa 239
7.3.4 Versuchsmatrix – Laborversuche 241
7.3.5 Eigene Laborexperimente am IWW 247
7.3.6 Ergebnisse thermohydraulische Auswertung 254
7.4 Schlussfolgerungen Betrieb Emulationsmodule und Herausarbeiten von Thesen 254

8 ERKENNTNISSE ZUR TRINKWASSER-INSTALLATION UND ZUM NUTZERVERHALTEN 257

8.1 Randbedingungen für die Analyse im internationalen Kontext ... 257
8.1.1 Übersicht der derzeitigen nationalen und internationalen Normen und Regelwerke ... 257
8.1.2 Übersicht gängiger Trinkwarmwasser-Installationen ... 261
8.1.3 Trinkwarmwasserinstallationen für die Anwendung im Niedertemperaturbereich ... 264
8.1.4 Zusammenfassung ... 273
8.2 Analyse gängiger Normen und Verordnungen zum Nutzerverhalten in Wohn- und Nichtwohngebäuden (IEE) ... 273
8.3 Ergebnisse Felduntersuchungen zu Betriebsparameter und Nutzerverhalten, bauseitige Maßnahmen 277
8.3.1 Datenbasis ... 277
8.3.2 Temperaturen ... 277
8.3.3 Volumen- und Wärmeströme ... 279
8.3.4 Gleichzeitigkeit der TWW-Entnahme ... 282
8.3.5 Bauseitige Ausführung und Betriebsregime 70 °C ... 283
8.4 Schlussfolgerungen Nutzerverhalten und Herausarbeitung von Thesen ... 284

9 WIRKUNGEN DER BETRIEBSWEISE DER TWI AUF DAS GESAMTSYSTEM ... 286

9.1 Auslegung und Modellierung des Gesamtsystems ... 286
9.1.1 Randbedingungen der Gebäudesimulation ... 286
9.1.2 Modellierung der Versorgungskette ... 293
9.1.3 Simulationsmatrix ... 302
9.2 Beschreibung der Bilanzierungsmethodik ... 309
9.2.1 Nutzenergiebedarf ... 311
9.2.2 Endenergiebedarf ... 314
9.2.3 Primärenergiebedarf ... 319
9.3 Primärenergetische und exergetische Wirkungen ... 320
9.3.1 Quantifizierung der Wechselwirkung zwischen Gebäude und TWV ... 320
9.3.2 Primärenergetische Bewertung der Varianten ... 328
9.3.3 Exergetische und energetische Bewertung der Varianten ... 333
9.3.4 Quantifizierung des Einsparpotenzials bei regenerativen Erzeugern ... 342
9.4 Abschätzung des Endenergiebedarfs und der Treibhausgasemissionen im Bilanzraum „Deutschland“ 344
9.5 Zusammenfassung ... 345

10 INTERNATIONALER WISSENSTRANSFER IEA DHC TS1 ... 347

10.1 Zusammenfassung der Projektergebnisse ... 347
10.2 Zeitplanung und internationaler Wissenstransfer ... 349
10.3 Veröffentlichungen und Durchführung von Konferenzsessions ... 351

11 ERKENNTNISSE, EMPFEHLUNGEN, AUSBLICK ... 353

12 AUSGEWÄHLTE BEGRIFFSDEFINITIONEN – GLOSSAR ... 357

13 FORMELZEICHEN, INDIZES UND ABKÜRZUNGEN ... 363

14 SCHRIFTTUM ... 369

14.1 Verordnungen, Normen, Regelwerke ... 369
14.2 Literatur ... 369

15 ANHANG ... 380

15.1 Anhang Objektakquise ... 380
15.1.1 Übersicht TWE-Systeme ... 380
15.1.2 Checkliste ... 381
15.1.3 Informationsschreiben für Betreiber ... 382
15.1.4 Informationsschreiben für Mieter ... 383

15.1.5 Einverständniserklärung ... *384*
15.1.6 Einbeziehung Industriepartner ... *385*
15.2 ANHANG PROTOKOLLE ... 386
15.2.1 Begehungsprotokoll ... *386*
15.2.2 Probenahmeprotokolle ... *387*
15.2.3 Laborprotokoll ... *388*
15.3 ANHANG THERMOHYDRAULISCHE MESSUNGEN ... 389
15.3.1 Messzeitraum ... *389*
15.3.2 Messdatenerfassung in DATA ... *396*
15.4 ANHANG VISITENKARTE OBJEKTE ... 398
15.5 ANHANG AUSWERTUNG LANGZEITOBJEKTE ... 399
15.6 ANHANG ZUORDNUNG PROTOKOLLE – DATENBANK SOWIE ÜBERSICHT ZU SPALTENINHALTEN INKL. ERLÄUTERUNGEN ZU DEN VERWENDETEN KENNZAHLEN ... 400
15.7 ANHANG KRITERIENKATALOG PLAUSIBILITÄT DATENBANK ... 401
15.8 ANHANG – SPEZIFIKATION DER MESSGERÄTE DES TWI-VERSUCHSSTANDES ... 402
15.9 ANHANG – SPEZIFIKATION DER A/D-WANDLER DES TWI-VERSUCHSSTANDES ... 405
15.10 ANHANG – SPEZIFIKATION DER MESSGERÄTE DES EMULATORS ... 406
15.11 ANHANG – SPEZIFIKATION DER A/D-WANDLER DES EMULATORS ... 407
15.12 ANHANG – EINZELHEITEN DES RÜCKKÜHLERS ... 408
15.13 ANHANG – R&I-SCHEMA VERSUCHSSTAND ... 409
15.13.1 Simulationsrelevante Sensoren zur Bewertung der Zirkulationsven tile ... *409*
15.13.2 Simulationsrelevante Temperatursensoren im TWK ... *410*
15.13.3 Simulationsrelevante Temperatursensoren im TWW-TWZ ... *411*
15.13.4 Simulationsrelevante Volumenstromsensoren im TWK ... *412*
15.13.5 Simulationsrelevante Volumenstromsensoren im TWW-TWZ ... *413*
15.13.6 Simulationsrelevante Volumenstromsensoren WE 1 – WE 6 ... *414*
15.14 DIAGRAMME DATA-SIMULATION ... 415
15.15 AUSGEWÄHLTE SIMULATIONSRELEVANTE SENSOREN IN 3D-DARSTELLUNG ... 423
15.16 ANHANG – EMULATIONSMODUL ... 424
15.17 LITERATURRECHERCHE ZUM EINFLUSS DER WASSERTEMPERATUR AUF WACHSTUM UND ÜBERLEBEN VON PSEUDOMONAS AERUGINOSA ... 427

DANKSAGUNG

Das Forschungsvorhaben EnEff: Wärme – Verbundvorhaben Energieeffizienz und Hygiene in der Trinkwasser-Installation im Kontext: DHC Annex TS1 "Low Temperature District Heating for Future Energy Systems" – kurz EE+HYG@TWI – wurde von fünf wissenschaftlichen Partnern an vier Institutionen bearbeitet.

Die mit dem Schlussbericht vorliegenden neuen Erkenntnisse waren nur dank des Engagements und der direkten finanziellen Förderung des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie sowie folgenden Verbänden und Herstellern (Nennung in alphabetischer Reihenfolge) möglich:

- AGFW | Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e. V., Frankfurt am Main
- Interessengemeinschaft Energie Umwelt Feuerungen GmbH im Auftrag des Bundesindustrieverband Deutschland Haus-, Energie- und Umwelttechnik e. V. – BDH, Köln
- Geberit AG, Konzernbereich SA & RLS, Jona (CH)
- Georg Fischer JRG AG, Sissach (CH)
- Gebr. Kemper GmbH + Co. KG, Metallwerke, Olpe
- HeiWaKo | Arbeitsgemeinschaft Heiz- und Wasserkostenverteilung e. V., Bonn
- SWM Infrastruktur GmbH, Endkundenstrategie, München
- Vattenfall Europe AG, Network Planning, Berlin
- Viega GmbH & Co. KG, Attendorn

Das Projektbearbeitungsteam möchte sich auf diesem Wege bei den vorgenannten Förderern des Vorhabens nicht nur für die finanzielle Unterstützung, sondern ebenso für die fachliche Begleitung des Vorhabens bedanken. Dank gilt auch den Mitgliedern des AK Wasseranalytik der figawa | Bundesvereinigung der Firmen im Gas- und Wasserfach e. V. Köln für die kostenfreie Bereitstellung von sehr gut untersetzten Daten aus Routinebeprobungen zur Erweiterung der statistischen Erkenntnisse.

Die Autoren des hier vorgelegten Berichtes möchten sich an dieser Stelle aber auch bei den Mitarbeitern in den eigenen Institutionen bedanken, ohne die diese umfängliche, fachwissenschaftlich anspruchsvolle Arbeit und das Vorlegen der Ergebnisse nicht möglich gewesen wäre.

- Dipl.-Ing. Knut Gietzelt, Thomas Unger (GEWV)
- Susan Wünsche, Kerstin Lück (IMMH)
- Heike Müller (M.Sc. Public Health), Kirsten Braun (Dipl.-Biol.), Alexandra Schmidt (M.Sc. Geographie), Regina Brang-Lamprecht (IHPH)
- Dr. Martin Strathmann, Kathrin Wiede (BTA), Dietmar Pütz (BTA)(IWW)
- Thies Bläse (M.Sc.), Dr. Juan Rodriguez Santiago (IEE)

Eine besondere Anerkennung und unser großer Dank gilt den verehrten Fachkollegen Herbert Bechem und Werner Nissing, die das Vorhaben in allen Phasen aktiv und stets fachlich fordernd und fördernd unterstützt haben. Hervorgehoben sei auch das Engagement von Herrn Dr. Carsten Magaß vom Projektträger Jülich, bei der fachwissenschaftlichen Begleitung von Herrn Prof. Hans-Curt Flemming, für sein engagiertes Wirken als Mitglied des wissenschaftlichen Beirates.

Dresden, April 2018
Im Namen aller Autoren des Schlussberichtes

Karin Rühling

1 Ziele des Vorhabens, Arbeitspaketstruktur und Forschungspartner

1.1 Gesamtziel

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 Wärmeverteilungs- und Wärmespeicherprozessen 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 Trinkwassererwärmung am Gesamtwärmebedarf eines Gebäudes ansteigt. 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 (abgestellt auf die Spezies *Legionella pneumophila*). Daher dominieren die Leistungsanforderungen und das Temperaturniveau 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.

Gesamtziel des Vorhabens ist die ganzheitliche und systemische Untersuchung der Trinkwarmwasser-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.

Das 6. Energieforschungsprogramm der Bundesregierung zielt auf „Forschung für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung“ ab [EFP11]. Dabei sind für zentrale Felder neue Akzente zu setzen. Das beantragte Forschungsverbundvorhaben gliedert sich in den strategisch wichtigen Forschungsbereich *EnEff:Wärme – FuE-Projekte* ein. Es wird in den Themenfeldern Rohrleitungs- und Verlegetechnik, LOWEX-Hausübergabestationen einschließlich verlustarmer Warmwasserbereitstellung, Strukturen und optimierte Betriebsweise sowie Gesamtsystemoptimierung wie folgt dazu beitragen:

1. Strategische Ausrichtung

   Im Gebäudebereich können sowohl der Anteil der erneuerbaren Energien als auch die Energieeffizienz der thermisch basierten Energieversorgung signifikant gesteigert werden, wenn es dem Forscherteam gelingt, für Systeme der zentralen

Trinkwassererwärmung systemtechnische Bedingungen zu formulieren unter denen auch in LOW TEMPERATURE SYSTEMEN eine hygienisch einwandfreie Versorgung mit erwärmtem und kaltem Trinkwasser möglich ist.

2. Ressortübergreifendes Zusammenwirken

   Der bisherige Wissensstand zur Problematik hat eindeutig gezeigt [z. B. Kistemann12, Rühling12, PWÜ04, Lück11, Flemming10], dass substanziell neue Lösungen das fachübergreifende Interagieren von national und international anerkannten Experten der Hygiene und Mikrobiologie, der Gebäudeenergietechnik und Wärmeversorgung sowie der Bauphysik erfordern. Das zusammengestellte Forscherteam ist transdisziplinär aufgestellt und erfüllt diese Grundvoraussetzung in exzellenter Weise.

3. Internationale Kooperation

   Einen immanenten Bestandteil des Projektes bildet die Kommunikation mit den internationalen Experten. Direkt in den Projektablauf integriert ist die Zusammenarbeit im Rahmen der IEA-District Heating and Cooling-Strukturen, speziell des Annex TS 1 “Low Temperature District Heating for Future Energy Systems“. Ein Verbundprojektpartner (IMMH) des Projekts ist überdies Mitglied im Steering Committee der ESCMID - Study Group for *Legionella* Infections – ESGLI. Insofern ist auch auf der internationalen Ebene das ressortübergreifende Zusammenwirken abgesichert. Ein weiterer Verbundpartner (IHPH) ist WHO Collaborating Centre for Health Promoting Water Management & Risk Communication und in dieser Funktion fortlaufend in die Kommunikationsprozesse der WHO zur Trinkwasserhygiene eingebunden.

Der Arbeitsplan des Projektes hebt gezielt auf eine grundlegende Systemanalyse im Bereich der Trinkwasser-Installation ab und wird in Feldversuchen sowie im Technikumsmaßstab die Methode des Technologie-Monitoring unter Nutzung neuer Methoden zur weitergehenden Bewertung des mikrobiologischen Systemzustandes einsetzen. Darauf aufbauend werden neue Simulationswerkzeuge entwickelt, die es erlauben, künftige Entwicklungen des gesamten Energiesystems „Gebäude“ abzubilden. Damit wird eine neuartige Wissensgrundlage für technisch-wirtschaftliche Entscheidungen und regulatorische Maßnahmen geschaffen.

1.2 Wissenschaftlich-technische Arbeitsziele des Vorhabens

Der Energiebedarf zur Trinkwassererwärmung zählt bezogen auf Tagesmittelwerte zur Kategorie des ganzjährigen Grundlastbedarfs mit geringen Schwankungsbreiten. Dominant sind im Wohngebäudebereich und ausgewählten gewerblichen Objekten die zentralen Trinkwasser-Erwärmungssysteme, sodass sich bei höherer zeitlicher Auflösung eine Differenzierung in

- echten Grundlastbedarf zur Deckung der Zirkulationsverluste und
- schwankenden Bedarf zur Deckung des eigentlichen Trinkwarmwasserbedarfs

ergibt.

Bezogen auf die jetzt gültigen Verordnungen und korrespondierenden Regelwerke (z. B. TrinkwV, DVGW W 551, DVGW W 553, DIN EN 806, DIN 1988) sind Trinkwasser-Erwärmungsanlagen

- mit einer Temperatur am Austritt des Trinkwarmwassers von ≥ 60 °C zu betreiben,
- darf der Eintritt der Zirkulationsleitung in den Trinkwassererwärmer 55 °C nicht unterschreiten und
- ist in öffentlichen und gewerblichen Objekten in regelmäßigen Abständen der Nachweis der Trinkwasser-Hygiene u. a. über die Unterschreitung des technischen Maßnahmewertes (> 100 KbE/100 mL) für Legionellen zu führen.

Diese vergleichsweise starren Temperaturregeln orientieren sich an der Wachstums- und Inaktivierungskinetik für *Legionella pneumophila* auf der Seite des erwärmten Trinkwassers und begrenzen dementsprechend das Energieeinsparpotential. Die zum Nachweis von Legionellen routinemäßig eingesetzten Kulturverfahren erbringen Analyseergebnisse für das Gesamtspektrum der Legionellen (*Legionella* spp.) und nicht spezifisch für die humanpathogene Art *Legionella pneumophila*.

Der Energiebedarf für die TWE und Zirkulation konnte und kann durch Maßnahmen wie hydraulischer Abgleich, Wärmedämmung der Rohrleitungen etc. gesenkt werden. Für die Primärenergieeffizienz ist jedoch überdies das Temperatur- und damit Energieniveau der TWE viel entscheidender (Abb. 1-1).

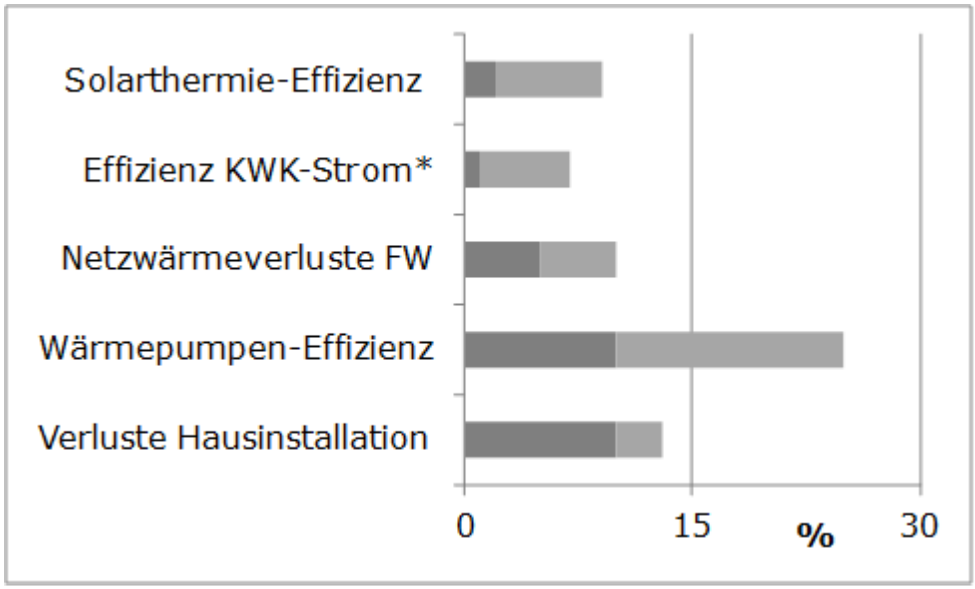


Abb. 1-1 Potential für Steigerung der Effizienz bzw. Senkung der Verluste bei Absenkung des Temperaturniveaus der TWE um 5 K (dunkle Balken minimaler; helle Balken maximaler Erwartungsbereich; KWK – Kraft-Wärme-Kopplung, * ohne etwaige Veränderung bzgl. Hilfsenergiebedarf Umwälzpumpen, FW – Fernwärme) [Rühling09]

Allein durch Senkung der Mitteltemperatur um 5 Kelvin sinken die Wärmeverluste im Bereich der Hausinstallation um 10 bis 13 %. In der Fern- und Nahwärmeversorgung (FW) reduzieren sich die anteiligen Netzverluste des Wärmetransportes etwa in der gleichen

Größenordnung. Hinzu kommen z. B. bei Anlagen der Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) mit Dampfturbinen Effekte der Erhöhung der Stromerzeugung um bis zu 6 %. Die Leistungszahl von Wärmepumpen zur Trinkwassererwärmung kann um 20 % und die Effizienz der Solarthermie im Mittel um 0,5 bis 2 %/K gesteigert werden. [Rühling09]

Das Verbundprojekt stellt sich deshalb die folgenden wesentlichen, in transdisziplinärer Zusammenarbeit zu realisierenden, wissenschaftlich-technischen Ziele:

- Neue Erkenntnisse durch umfassende und zeitgleiche thermohydraulische und hygienisch-mikrobiologische Untersuchung und Bewertung einer repräsentativen Anzahl von bundesweit verteilten Trinkwasser-Installationen und Vergleich mit den Daten von in der Projektlaufzeit zugängigen Ergebnissen der nach Trinkwasserverordnung verpflichtenden Untersuchungen hinsichtlich *Legionella* spp. bzw. *Legionella pneumophila*.
- Quantifizierung des Energieeinsparpotentials ohne Einsatz chemischer Desinfektionsmittel bei Nachweis der hygienisch-mikrobiologischen Unbedenklichkeit insbesondere durch umfangreiche gezielte Technikumsversuche bei verschiedenen Erzeugertechnologien und neuen Arten des adaptiven thermohydraulischen Abgleichs von Zirkulationssystemen.
- Nutzung neuer hygienisch-mikrobiologischer und molekularbiologischer Analysemethoden zur hygienisch-mikrobiologischen Beurteilung der Qualität des erwärmten und kalten Trinkwassers hinsichtlich der Parameter *Legionella* spp., *Legionella pneumophila* und *Pseudomonas aeruginosa*. Etablierung derselben in der gezielten Bewertung des Anlagenzustandes und Ableitung von Maßnahmen.
- Schaffung neuer Simulationswerkzeuge für die Abbildung der speziellen thermohydraulischen Vorgänge in der Trinkwarmwasser-Installation unter Berücksichtigung der wechselseitigen Beeinflussung der Installationen für erwärmtes und kaltes Trinkwasser. Nutzung von Experimenten und Praxismonitoring zur Parametrierung der Simulation und Validierung der Simulationsresultate.

Diese Ziele gilt es in transdisziplinärer Zusammenarbeit zu realisieren.

1.3 Arbeitspaketstruktur

Ziel ist die Identifikation des trinkwasserhygienisch abgesicherten Energiesparpotentials für zukünftig relevante Technologien der Trinkwarmwassererzeugung und –verteilung. Die Ableitung allgemeingültiger Aussagen für Mehrfamilienhäuser unterschiedlicher Größe sowie typische Nichtwohngebäude steht dabei im Fokus. Eine Gesamtübersicht über die in der Antragsphase konzipierten Arbeitspakete sowie deren Verknüpfung ist Abb. 1-2 zu entnehmen.

Grundsätzlich erfolgt auch die Berichterstattung in der Struktur der Arbeitspakete. Tab. 1-1 enthält die Übersicht zur Zuordnung. Eine Ausnahme bildet nur der Aspekt der wechselseitigen Beeinflussung von Trinkwarmwasser und Trinkwasser (kalt) im ursprünglichen Arbeitspaket AP VI: TW-TWW. Hier hat es sich als effektiv erwiesen, eine Bearbeitung integriert in das AP IV: Neue TWI vorzunehmen.

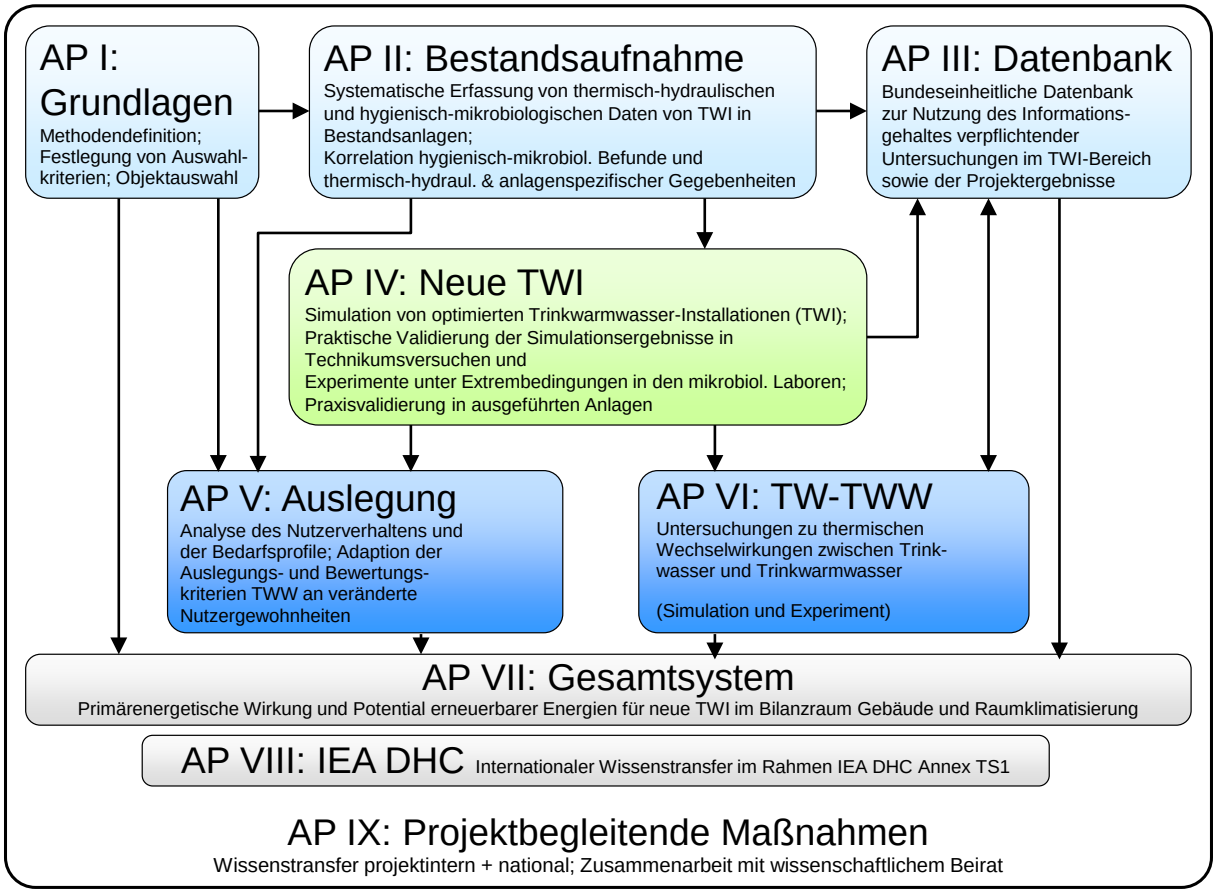


Abb. 1-2 Übersicht Hauptinhalte der Arbeitspakete und deren strukturelle Verknüpfung

Tab. 1-1 Zuordnung von Arbeitspaketen und Abschnitten der Methoden- und Ergebnisdarstellung

Arbeitspaket	Abschn.-Nr.	Titel
I	2	Methodische Grundlagen und Objektakquise
II	4	Felduntersuchungen
III	3	Datenbank
IV und VI	4.5	Statistische Auswertung Langzeitbeprobung
	5	Technikums-Versuchsstand Trinkwasser-Installation am ZET
	6	Simulation Trinkwasser-Installation in TRNSYS-TUD
	7	Emulationsmodule Werkstoffe und endständige Entnahme
V	8	Erkenntnisse zur Trinkwasser-Installation und zum Nutzerverhalten
VII	9	Wirkungen der Betriebsweise der TWI auf das Gesamtsystem
VIII	10	Internationaler Wissenstransfer IEA DHC TS1

1.4 Forschungspartner, wissenschaftliche Begleitung und Autorenschaft

Das Verbundvorhaben wird von vier Forschungsstellen, durch die Sondervorgaben für die TU Dresden aufgeteilt auf fünf Forschungspartner bearbeitet. Nachfolgende Tab. 1-2 enthält die Übersicht sowie die im Weiteren verwendeten Abkürzungen für die Forschungspartner (GEWV, IMMH, IHPH, IWW, IEE).

Das Projekt wurde von einem wissenschaftlichen Beirat (Prof. M. Exner, Prof. H.-C. Flemming und Dipl.-Ing. W. Nissing) beraten und stand über ¼-jährliche Projektinformationen und fünf Projekttreffen mit allen Mitförderern im ständigen Erfahrungsaustausch. Wertvoll war hierbei der sehr aktive Projektbegleitausschuss der Mitförderer unter Leitung von Herrn Dipl.-Ing. H. Bechem und Herrn Dipl.-Ing. W. Nissing (Stellvertreter).

Tab. 1-2 Übersicht Forschungspartner und Autoren

Forschungspartner	
GEWV	Technische Universität Dresden Fakultät Maschinenwesen Institut für Energietechnik Professur für Gebäudeenergietechnik und Wärmeversorgung Dr.-Ing. Karin Rühling, Dipl.-Inf. Regina Rothmann, Dipl.-Ing. Jan Löser, Dipl.-Math. Lars Haupt, Dipl.-Ing. Stefan Hoppe
IMMH	Technische Universität Dresden Institut f. Medizinische Mikrobiologie u. Hygiene Dr. med. Cristian Lück, Dr. rer. medic Markus Petzold, Dr. rer. nat. Tetyana Koshkolda
IHPH	Universität Bonn - Universitätsklinikum Institut für Hygiene und Öffentliche Gesundheit Prof. Dr. med. T. Kistemann, Dr. rer. nat. C. Schreiber, H. Müller (MSc Public Health), N. Zacharias (MSc Mikrobiologie), F. Waßer (BSc. Statistik)
IWW	IWW Rheinisch-Westfälisches Institut für Wasserforschung gemeinnützige GmbH Mülheim Dr. rer. nat. G. Schaule Dr. A. Nocker, Dr. rer. nat. J. Wingender
IEE	Fraunhofer-Institut für Energiewirtschaft und Energiesystemtechnik Kassel Abteilung Strom-Wärme-Systeme Dipl.-Ing. Anna Marie Kallert, Dr. Dietrich Schmidt, Robert Egelkamp B.Sc.

Tab. 1-3 Übersicht Autoren der Kapitel und Abschnitte

Kapitel, Abschnitt	**Autoren bzw. Institutionen**
1	GEWV: Rühling
2.1– 2.4	IHPH: Schreiber, Zacharias; IWW: Schaule IMMH: Lück, Petzold
2.5	GEWV: Rothmann, Rühling, Gietzelt
3	GEWV: Rothmann
4.1 - 4.3	GEWV: Rothmann, Rühling
4.4	IHPH: Schreiber, Waßer, Kistemann
4.5	IWW: Schaule,
4.6	IHPH: Schreiber, Waßer, Kistemann; IWW: Schaule; GEWV: Rühling, Rothmann
5.1 - 5.3	GEWV: Löser, Hoppe
5.4 - 5.6	IMMH: Lück, Petzold, Koshkolda
6	GEWV: Haupt
7.1	GEWV: Löser, Hoppe
7.2	IMMH: Lück, Koshkolda
7.3	IWW: Nocker, Schaule
8.1, 8.2	IEE: Kallert, Egelkamp, Schmidt
8.3, 8.4	GEWV: Rühling, Rothmann
9	IEE: Kallert, Egelkamp, Schmidt
10	IEE: Schmidt, Kallert
11	GEWV: Rühling

2 Methodische Grundlagen und Objektakquise

2.1 Kriterien Objektauswahl

Ein Teilziel im Rahmen von AP I war die Festlegung von Kriterien zur Auswahl geeigneter Untersuchungsobjekte. Entsprechend der unter 1.2 dargelegten Arbeitsziele des Projektes sollten vorrangig der Wohngebäudebereich, jedoch darüber hinaus ausgewählte gewerbliche Objekte mit zentralen Trinkwasser-Erwärmungssystemen (TWE) im Rahmen der Feldstudie erfasst und bewertet werden. Im Wohngebäudebereich lag dabei aufgrund der Anlagengrößen sowie der in der TrinkwV bereits festgelegten Überwachungspflicht für Betreiber gewerblicher Objekte (Mietwohnungen) der Fokus auf Mehrfamilienhäusern (MFH). Angestrebt wurde hier ein Anteil von 80 % an den ca. 100 Objekten. Darüber hinaus sollten eine kleinere Anzahl ausgewählter Ein- bzw. Zweifamilienhäuser und weitere anderweitig gewerblich genutzte Objekte untersucht werden.

Zusätzlich wurde eine Liste von Kriterien erarbeitet, von denen die Gesamtheit der ausgewählten Objekte eine große Bandbreite abdecken sollte.

- *Trinkwassererwärmung und Installation*
  Als Arten der Trinkwassererwärmung kommen in Betracht:
  1. Speicherprinzip (TWW-Speicher)
  2. Speicherladeprinzip
  3. Zentrale Durchflussprinzip
  4. dezentrale Durchflussprinzip

  Prinzipschaltbilder sind dem Anhang 15.1.1 zu entnehmen. Bei 1. bis 3. handelt es sich in der Regel um zentrale TWE-Systeme, die mit Zirkulationssystemen bzw. einer elektrischen Begleitheizung auszustatten sind. Für den hydraulischen Abgleich der Zirkulationssysteme kommen der manuelle hydraulische Abgleich und neuen Methoden (thermomechanisch, thermoelektrisch etc.) in Frage.
- *Erzeugertechnologien*
  1. Kessel (Brennwert-Kessel für Gas bzw. Öl, Holzpellet-Kessel)
  2. Fernwärme auf verschiedenen Exergieniveaus (konventionell, Niedertemperatur, LowEx)
  3. Wärmepumpen (elektrisch, gasmotorisch)
  4. Solarthermie in Kombination mit anderen Erzeugertechnologien
- *Temperatur am Austritt des Trinkwassererwärmers*
  Hier war es ausdrücklich Ziel, nicht nur Anlagen zu erfassen, die mit ≥ 60 °C am Austritt des Trinkwassererwärmers arbeiten, sondern auch solche zu erfassen, die bereits heute im nominellen Betrieb mit deutlich niedrigeren Temperaturen die Trinkwarmwasserbereitstellung realisieren.

Weitere Auswahlkriterien waren:

- Im Gebäude ist aktuell keine Legionellenproblematik bekannt und auch in der Vergangenheit lagen vorzugsweise nur Legionellenbefunde unterhalb des technischen Maßnahmewertes von 100 KbE/100 mL vor.

- Pläne der Trinkwasser-Installation sind vorhanden bzw. gemeinsam mit unserem Team bei der ersten Begehung leicht erstellbar.
- Probenahmeventile im Umfeld des Trinkwassererwärmers (Austritt TWE, Eintritt der Zirkulation in den TWE) sind vorhanden.

Eine Beratung zum methodischen Vorgehen bei Probenahme und für die Objektauswahl wurde zu einem Treffen am 19.06.2014 vorbereitet. Eine Konkretisierung erfolgte auch unter Berücksichtigung der Anregungen des Mitförderers HeiWaKo im Nachgang zum Auftakttreffen im Umlaufverfahren. Auch Erkenntnisse aus dem Projekt „Biofilm-Management“ sind in das Begehungs- und das Probenahmeprotokoll eingeflossen.

Weitergehend sollte im Rahmen von AP IV ein Langzeitmonitoring ausgewählter Objekte aus AP II über ein ganzes Jahr hinweg quartalsweise erfolgen. Für diese Teilstichprobe wurden - zusätzlich zu den oben genannten - die folgenden weitergehenden Auswahlkriterien definiert, von denen mindestens eines zutreffen sollte:

- Positiver Nachweis von Legionellen (Kultur und/oder qPCR)
- Niedrige TWW-Temperatur (≤ 55 °C) am Ausgang des TWE
- Neue Technologie für Zirkulationsabgleich eingesetzt

2.2 Objektakquise

Als Basis für die Objektakquise wurden zunächst vom Projekt-Konsortium umfangreiche Dokumente zur Mieter- und Betreiberinformation erstellt (Anhang 15.1.3 und 15.1.4). Dieses Informationsmaterial, inkl. Einverständnis- und Datenschutzerklärungen, wurde zum einen an alle Mitförderer sowie Partner in Deutschland, Österreich und der Schweiz mit der Bitte um Unterstützung versandt. Des Weiteren wurden diese Dokumente auch an diverse zusätzlich recherchierter Wohnungsgenossenschaften und eine Vielzahl weiterer potentieller „Objektlieferanten“ übermittelt. Die weitere, in vielen Fällen (zeit-) intensive Recherche, Korrespondenz und Akquise erfolgte in mehreren Runden per Telefon, E-Mail und in persönlichem Kontakt mit den Betreibern bzw. Unternehmern und sonstigen Inhabern (UsI) einer Trinkwasser-Installation, um das Projekt vorzustellen, Möglichkeiten auszuloten und ggf. auch gemeinsam geeignete Gebäude aus dem Pool eines UsI auszuwählen.

Die Akquise war auch deshalb aufwendig, da viele der privaten Mehrfamilienhäuser keine geeigneten oder gar keine Probenahmehähne aufwiesen bzw. keine Möglichkeit zur thermohydraulischen Messung einräumten.

2.3 Vorgehen Trinkwasserhygiene-Beprobung und Begehung

Entsprechend dem Ziel von AP II, eine systematische Erfassung von konstruktiven, thermisch-hydraulischen und hygienisch-mikrobiologischen Daten von Trinkwasser-Installationen in ca. 100 Bestandsobjekten vorzunehmen, erfolgte im Rahmen von AP I die Festlegung von einheitlichen Untersuchungsmethoden als Grundlage. Hierzu zählten neben der Definition einheitlicher Analysemethoden und Auswerteverfahren für die trinkwasserhygienischen Untersuchungen, die später dargelegt werden (2.4):

1) die Definition einheitlicher Parameter zur Charakterisierung der Objekte im Rahmen der Begehung,
2) die einheitliche Festlegung repräsentativer Orte der Probennahme und Definition des Probenahmeschemas,

3) die einheitliche Festlegung repräsentativer Orte der Messung und Messzeiträume zur thermo-hydraulischen Charakterisierung sowie
4) die einheitliche Festlegung des Dokumentationsumfangs aller Arbeiten 1) bis 3).

Die Details zu 3) sind 2.5 und die zu 4) 15.2 zu entnehmen. Erläutert werden nachfolgend 1) und 2).

1) Parameter zur Charakterisierung der Objekte

Das umfangreiche Begehungsprotokoll wurde bei der Begehung der Objekte durch erfahrene Projekt-Mitarbeiter erstellt (s. Anhang 15.2.1). I.d.R. erfolgte die Begehung in Begleitung des für die TWI zuständigen Objektpersonals, zumeist Verwalter, Haustechniker o.ä. Die Erhebung der Informationen erfolgte hierbei auf dreierlei Wegen: Eigene Beobachtung, Experteninterview vor Ort, entweder direkt mit dem UsI oder (meist) mit dem für die TWI zuständigen Mitarbeiter, sowie anhand vorliegender Steigleitungs- und Grundrisspläne, sowie ggf. technischer Zeichnungen/Pläne oder notfalls selbst erstellter Handskizzen, und detaillierter standardisierter Fotodokumentation. In der Checkliste erfasst wurden neben Adress- und Betreiberdaten die verfügbaren Detailinformationen der gesamten TWI zu folgenden Oberthemen:

- Art und Alter Objekt / TWI, evtl. Sanierungen
- Herkunft TW
- Nutzung und Verbrauch (Stagnation)
- Verwendete Materialien
- Leitungsführung und Isolation
- TWE und Speicher
- TWW-Installation
- Zirkulation, inkl. hydraulischer Abgleich und Schaltzeiten
- Aufbereitungsanlagen, Wasser verändernde Bauteile
- Angaben zur Trinkwasserbehandlung und Legionellen-Schutz bzw. Desinfektion (thermisch, chemisch)
- Wartung
- bekannte Probleme / Auffälligkeiten

Wiederholt kam es dabei im Rahmen der Begehung zu Unklarheiten bzw. Schwierigkeiten bei der Erhebung einiger Parameter, da die wenigsten UsI bzw. deren Beauftragte ihre TWI in dem im Protokoll abgefragtem Umfang kennen. Neben vielfach fehlender Plänen und mangelnder Wartung erwies sich v.a. die Kenntnis über die nicht-sichtbaren Teile der TWI (z. B. Fragen nach verwendeten Materialien, Leitungsführung und Isolation) und der Nutzung bzw. Nutzungsunterbrechungen als lückenhaft. Ebenso musste die Herkunft des Trinkwassers (Wasserversorger) für fast alle Objekte nachrecherchiert werden.

2) Probenahmeorte und -schema

Für die Probennahme wurden die nachfolgend aufgeführten Probenahmestellen (PNS) ausgewählt (Abb. 2-1), wobei die Probenahme und Temperaturmessung im zentralen Bereich nach Vorgabe der aktuell gültigen Trinkwasserverordnung im 2. Liter erfolgte. Peripher wurden sowohl dezentrale (1. bzw. 2. Liter) als auch teilzentrale (5. Liter) Proben entnommen. Beprobt wurden

- die Hauseingangsleitung (HEL) an der Übergabestelle zwischen Wasserversorger und Betreiber (i.d.R. nach der Wasseruhr)
- im zentralen Bereich unmittelbar an der Trinkwassererwärmungsanlage (TWE)

  - o den Eintritt des TWK
  - o den TWW-Austritt und
  - o den Eintritt der Zirkulation
- im peripheren Bereich
  - o am entferntesten Zapfhahn entsprechend allgemein anerkannter Regeln der Technik (meist ein Handwaschbecken (HWB) im Badezimmer) sowie
  - o je nach Größe des Objektes an einer bzw. mehreren weiteren Stellen eines anderen/anderer Steigstrangs/-stränge.

  Dabei muss die Armatur entweder separate TWK und TWW-Hähne besitzen bzw. bei Einhebelmischer die TWW und TWK–Seite vorgelagert jeweils separat absperrbar sein.

Die festgelegten PNS unmittelbar um den Trinkwassererwärmer wurden zudem als Bereich für die Applizierung der Sensoren für die THM definiert. Die HEL diente bei unmittelbarer räumlicher Nähe zum TWE als weitere, optionale Messstelle für die THM.

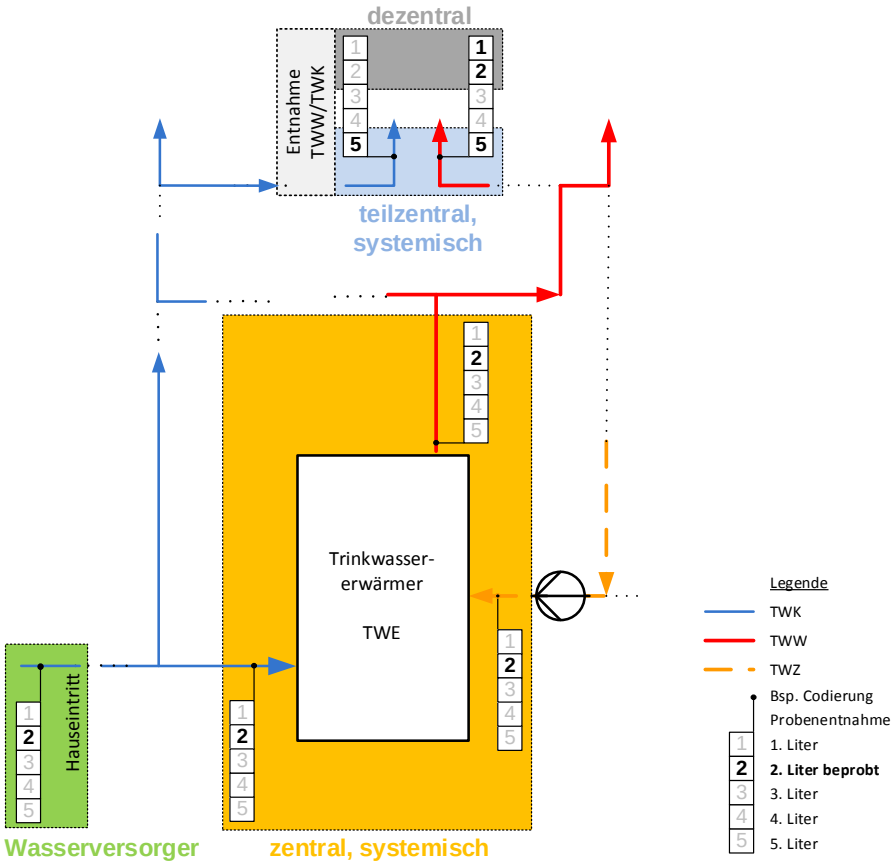


Abb. 2-1 Übersicht zu Entnahmeort sowie Liter der Probenahme und Zuordnung zu Klassen der Kontamination nach [Exner 2011]; unterteilt nach TWK, TWW, TWWZ und klassifiziert nach zentral bzw. peripher teilzentral oder dezentral

Um im Rahmen von AP II Erkenntnisse zum Zusammenhang von hygienisch-mikrobiologischen Befunden, thermisch-hydraulischen und anlagenspezifischen Gegebenheiten gewinnen sowie eine Datenbasis zur Festlegung von Nutzerverhalten und Bedarfsprofilen als Grundlage für AP IV schaffen zu können, wurde für die peripheren Entnahme-

stellen ein über die Anforderungen der TrinkwV hinausgehendes Beprobungsregime entwickelt. Es sollten hierbei in den ersten fünf bis zehn Litern möglichst engmaschig Daten zu Temperatur und Mikrobiologie erhoben werden, um den Unterschied bzw. Übergang von stagnierendem zu zirkulierendem Trinkwarmwasser zu erfassen. Dies war notwendig, da der endständige, nicht zirkulierende Bereich regelkonform bis zu 3 Liter Inhaltsvolumen besitzen darf und der nach TrinkwV vorgeschriebene 2. Liter so ggf. nur den nicht zirkulierenden Bereich erfasst und keine ausreichende Information zum systemischen Zustand der TWI gibt.

Zunächst wurde für gut 30 Objekte ein sehr differenziertes, kleinschrittiges mit Probennahmen im 1., 2., und 5. Liter sowie Temperaturmessungen im 1., 2., 3., 4., 5. und 10. Liter Probenahmeschema verwendet. Der 1. Liter TWW-Entnahme erfolgte dabei nach „Zweck c“ der TrinkwV, d. h. ohne vorherige Desinfektion, um den Einfluss des Zapfhahns mit zu erfassen. Von dem in ein steriles Gefäß entnommenen Gesamtvolumen wurden ca. 150-200 mL zur Temperaturmessung abgenommen, das restliche Volumen verblieb in der Probenahmeflasche für die mikrobiologische Analytik. Im Anschluss erfolgte eine Wischdesinfektion des Zapfhahns. Die Entnahme des 2. und 5. Liters erfolgte analog, im 3. und 4. Liter wurde nur jeweils die Temperatur in den ersten ca. 200 mL bestimmt und diese wurden ansonsten verworfen. Das Trinkwasser kalt (TWK) wurde im Anschluss an die TWW-Probenahme am selben Zapfhahn ohne erneute Desinfektion nach 10 Minuten Wartezeit zur Abkühlung der Leitungen im Bereich der Armatur im 5. Liter beprobt. Die Temperaturen im 5. und 10. Liter TWK wurden bestimmt.

Dieses Vorgehen stellte sich in der Praxis jedoch als sehr schwer umsetzbar heraus, da hierfür zu viele Temperaturmessungen und Handgriffe parallel erfolgen mussten. Auf dem zweiten Projektmeeting am 24.04.2015 in Frankfurt wurde daher das Probenahmeschema angepasst (Abb. 2-2), welches in dieser Form von dato bis Projektende angewendet wurde. Die Probenahme des 2. Liters TWW erfolgte damit analog zu den zentralen Probenahmestellen, zusätzlich wurde weiterhin der 5. Liter abgenommen sowie die Temperaturen im 5. und 10. Liter bestimmt.

Von dem jeweils abgenommenen Liter Probe wurden ca. 150-250 mL zur direkten Temperaturmessung in einen separaten Behälter gefüllt und je nach Analysespektrum 500-800 mL in sterile Probenahmegefäße abgefüllt. Für die Kultivierung notwendig waren minimal 201 mL. Für die qPCR wurden 500 mL Probe aufkonzentriert. Die Gesamtzellzahlbestimmung erforderte weitere ca. 5 mL.

Jede Probennahme wurde mittels standardisiertem Probenahmeprotokoll (Anhang 15.2.2) dokumentiert, auf welchem neben den gemessenen Wassertemperaturen auch weitere Informationen wie z. B. Außenlufttemperatur (Information für die Simulationen des IEE), Zählerstand Wasseruhr oder Besonderheiten/Auffälligkeiten bei der Probennahme notiert wurden.

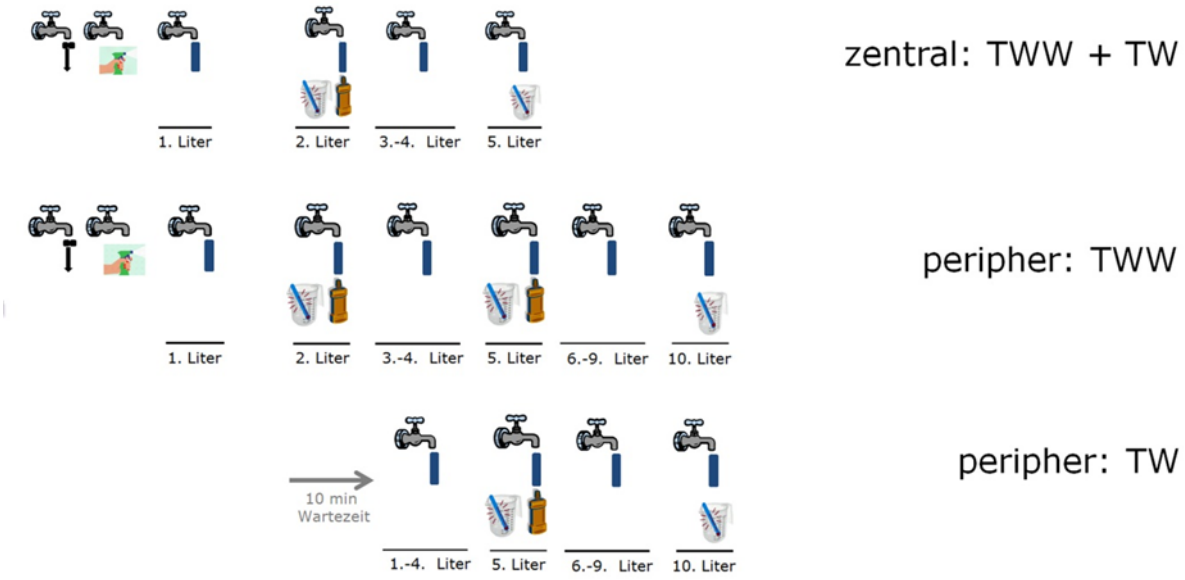


Abb. 2-2 Schema der Probenahmen Trinkwasserhygiene nach dem 24.04.2015

2.4 Analysemethoden Trinkwasserhygiene

2.4.1 Kulturverfahren

2.4.1.1 Allgemeine Grundlagen

Die Kultivierung gilt in den einschlägigen Regelwerken und Vorschriften (Gesetzen) derzeit als „Goldstandard“, auf welchem die für Deutschland aktuell existierenden Richt-, Maßnahme- und Grenzwerte für die verschiedenen Wassermatrices, aber auch für andere Umwelt- oder Lebensmittelproben etc., beruhen.

2.4.1.2 Legionella species

Die Kultivierung von *Legionella* species (spp.: naturwissenschaftlich korrekte Abkürzung der in der TrinkwV genannten Abkürzung *Legionella* spec.) erfolgte entsprechend der Vorgaben der aktuell gültigen TrinkwV 2001 nach DIN EN ISO 11731/-2 (2008) und Bundesgesundheitsblatt 43 [RKI2000] sowohl durch Direktnachweis in 1 mL Probevolumen nach Ausspateln als auch nach einer Aufkonzentration von 100 mL Probevolumen. Letzteres geschieht mittels Vakuumfiltration über schwarze Cellulosenitrat-Membranfilter (Porenweite 0,45 µm). Die anschließende Säurebehandlung des Filters unterdrückt das Wachstum der Begleitflora während der 10-tägigen Bebrütung auf dem selektiven Nähragar Glycine-Vancomycin-Polymyxin B-Cycloheximid-Agar (GVPC-Agar, Fa. Oxoid) bei 36 °C (± 2 °C) für 10 Tage. Gewachsene und als Legionellen verdächtige Kolonien werden mit Zusatztests geprüft. Dies geschieht durch Überimpfen auf cysteinfreien Nähragar (Blutagar/TSA-Nährboden; kein Legionellen-Wachstum) und auf cysteinhaltigem BCYE-Agar, auf welchem Legionellen wachsen können bzw. mittels Latex-Agglutations-Test (s. 2.4.1.3). Zur numerischen Auswertung wurden gemäß DIN EN ISO 8199 (2008) nur Platten mit weniger als 300 Kolonien herangezogen. Die Berechnung der Konzentration an Legionellen in 100 mL (KbE/100 mL) wurde nach Vorgabe des Umweltbundesamtes durchgeführt [UBA2012].

2.4.1.3 Legionella pneumophila

Die weitergehende Differenzierung der gewachsenen Legionellen-Kolonien wurde mittels Latex-Agglutinationstest-Kit (Fa. Oxoid) durchgeführt, welcher die Zuordnung zu *L. pneumophila* Serogruppe (SG) 1, *L. pneumophila* SG 2-14 bzw. anderen Arten von *Legionella* spp. ermöglicht. Zusätzlich erfolgte die Art-Identifizierung einiger Isolate mittels Maldi-TOF-MS (matrix-assisted laser desorption/ionization time-of-flight mass spectrometry). Die weitergehende Charakterisierung wurde durchgeführt, da zum einen der Erreger *L. pneumophila* SG 1 in > 80 % der klinisch detektierten *L. pneumophila*-Isolate gefunden wird und somit für den Großteil der Infektionen verantwortlich ist [Harrison09, Svarrer12, Phin14] und zum anderen die Kenntnis der Art für den späteren Vergleich mit den molekularbiologischen Analysen wichtig sein würde.

Ausgewählte Legionellen-Isolate wurden zudem zur weitergehenden Typisierung an das IMMH gesandt. Bei der Typisierung erfolgte eine Bestimmung der monoklonalen Subgruppe der Isolate mittels ELISA (Enzyme-linked immunosorbent assay) basierend auf deren Reaktivität mit einem Panel monoklonaler Antikörper.

2.4.1.4 Pseudomonas aeruginosa

Zum kulturellen Nachweis von *P. aeruginosa* wird gemäß DIN EN ISO 16266 (2008) ein Membranfilter aus Cellulosenitrat (Porenweite 0,45 µm) nach Abfiltration von 100 mL Probe auf Pseudomonas-Selektivagar/CN-Selektivagar (Fa. Xebios) aufgelegt, bzw. auf Cetrimid-Agar (Fa. Oxoid), welcher zudem Cetrimid und Nalidixinsäure enthält. Die Platten werden bei 36 ± 2 °C für 44 ± 4 h inkubiert. Eine zusätzliche Wachstumskontrolle wurde ggf. nach 22 h + 2 h durchgeführt. Je nach Koloniemorphologie wurden verdächtige Kolonien mittels Ammoniakbildung aus Acetamid, Oxidase-Test und Fluoreszenz auf King's B-Agar bestätigt. Blaugrün gewachsene Kolonien werden nach DIN EN ISO 16266 ohne weitere Tests als positiv gezählt. Alle nicht Pyocyanin-produzierenden Kolonien die fluoreszieren, werden als verdächtige *P. aeruginosa* gezählt und müssen durch Acetamid-Verwertung bestätigt werden. Die nicht fluoreszierenden, rötlich braun pigmentierten Kolonien werden ebenfalls als verdächtige *P. aeruginosa* gezählt und müssen durch Oxidase-Test, Acetamid-Verwertung und Fluoresceinbildung bestätigt werden. Zusätzlich wurden ausgewählte Kolonien vom IMMH mittels MALDI-TOF-MS überprüft. Die Berechnung der Konzentration in der Probe erfolgte ebenfalls gemäß DIN EN ISO 8199 (2008).

2.4.2 qPCR

2.4.2.1 Allgemeine Grundlagen

Die Polymerase-Ketten-Reaktion (engl.: polymerase chain reaction, PCR) beruht ganz allgemein betrachtet darauf, mittels komplementären DNA-Sequenzen und Enzymen eine vorliegende DNA-Matrize zu vervielfältigen. Mit der quantitativen real-time PCR (qPCR) kann durch den Vergleich mit Standards anhand einer Eichkurve auf die Konzentration an Ziel-DNA in einer Probe rückgeschlossen werden. Die Angabe der Ergebnisse wird auf Genkopien (Genomic units; GU) pro filtriertem Probevolumen bezogen, hier GU/500 mL.

Die Labore von IHPH, IWW und IMMH verwenden ausstattungsbedingt unterschiedliche Geräte zur Gen-Vervielfältigung (sog. PCR-Cycler) und damit einhergehend unterschiedliche Materialien (kommerzielle Kits, Primer/Sonden, Fluoreszenzfarbstoffe, etc.) für den Nachweis von Zielgenen. Dies machte zu Projektbeginn einen projektinternen Ringversuch für die qPCR-Analytik notwendig, um die Vergleichbarkeit der Analysen zu verifizieren (siehe 2.4.4).

Im Vorfeld einer DNA-Replikation (Vervielfältigung) muss die in der Wasserprobe vorhandene DNA zunächst extrahiert werden. Für diesen Schritt von Zellaufschluss und DNA-Aufreinigung wird im Projekt von IHPH und IWW das Aquadien-Kit (Fa. BioRad) eingesetzt. Nach Aufkonzentration des Probevolumens von 500 mL über eine Membran mit Vakuumfiltration erfolgt die Abtrennung und Konzentration aller in der Probe enthaltenen DNA in verschiedenen Schritten, nach Herstellerangaben, mittels Eluationslösungen und Zentrifugation über Säulen. Am IMMH wird zur Extraktion der DNA aus den Mikroorganismen der Wasserprobe ein GeneDisc DNA Extractor (Fa. Pall) mit zugehörigen Reagenzien (Fa. Pall) verwendet. Nach der Vakuumfiltration der Probe (Volumen 500 mL) über eine Membran ist eine Freisetzung der DNA aus den aufkonzentrierten Zellen durch eine Ultraschalbehandlung und Erhitzung sowie die DNA-Aufreinigung durch verschiedene Wasch- und Eluationsschritte nach Angaben des Herstellers möglich.

2.4.2.2 Legionella spp.

Zum Nachweis von *Legionella* spp. DNA wird am IHPH und am IWW ein kommerzielles Kit der Firma BioRad verwendet. Das „iQ Check *Legionella* spp.“ ist für den quantitativen Nachweisnach französischen Normen validiert (AFNOR; standard T90-471) und wird in Länder wie den Niederlanden und Frankreich bereits in der Routineanalytik zum Nachweis von Legionellen-DNA angewendet. Die Validierung besteht für eine Anwendung mit dem LightCycler CFX 96, welcher im Labor des IWW verwendet wird. Das Labor des IHPH verwendet den LightCycler 480 II der Firma Roche und konnte durch eine interne Validierung und Erstellung eines Auswerteprogramms, in Zusammenarbeit mit der Firma Bio-Rad, gewährleisten, dass die Analyseergebnisse ebenfalls dem Qualitätsstandard nach AFNOR entsprechen. Der Nachweis von *Legionella* spp.-DNA mittels iQ Check beruht auf dem Nachweis des konservierten Strukturgens ARNr 5S. Die genauen Primer- und Sondensequenzen werden vom Hersteller nicht angegeben.

Am IMMH wird der GeneDisc Cycler der Firma Pall genutzt. Dementsprechend wird für den Gennachweis von *Legionella* spp. ein zugehöriges kommerzielles Kit der gleichen Firma verwendet. Es handelt sich um das „GeneDisc Plate *Legionella* spp.“ Kit, das den Nachweis von *Legionella* spp. spezifischem 5S rDNA Zielgen ermöglicht. Die Sequenzen der angewendeten Primer und Sonden hält der Hersteller geheim. Das GeneDisc System ist ebenso wie das iQ Check von BioRad nach AFNOR (NF T90-471) validiert. Eine weitere Validierung für das Kit besteht nach ISO/TS 12869 Qualitätsstandard.

2.4.2.3 Legionella pneumophila

Der Nachweis von *L. pneumophila*-DNA wird analog zu *Legionella* spp. durchgeführt. Er beruht im Falle des kommerziellen Kits „iQ Check *L. pneumophila*“ (Fa. BioRad), das von IHPH und IWW verwendet wird, auf dem Nachweis des konservierten Virulenzgens mip. Die genaue Primer- und Sondensequenzen werden vom Hersteller nicht angegeben. Am IMMH wird das auf den vorhandenen Cycler abgestimmte kommerzielle Kit „GeneDisc Plate *L. pneumophila*“ der Fa. Pall verwendet. Zum Nachweis von *L. pneumophila*-DNA dient, analog dem BioRad System, das Zielgen mip.

2.4.2.4 Pseudomonas aeruginosa

Der Nachweis von *P. aeruginosa* wird nach dem Protokoll von Frösler et. al. [Frösler11] durchgeführt. Hierfür wird ein Reaktionsmix hergestellt, der den KAPA Probe Fast Universal Mastermix, den Forward und Reverse primer, die TaqMan-Sonde und Wasser enthält.

Von dem Reaktionsmix werden 18 µl mit 2 µl Template (unverdünnt) in die qPCR eingesetzt. Die Quantifizierung findet im Light Cycler CFX 96 von BioRad statt.

2.4.3 Gesamtzellzahl

Die Anzahl DNA-haltiger Partikel, im Folgenden kurz Gesamtzellzahl (GZZ) genannt, ist ein Maß für die unspezifische Belastung einer Probe mit Mikroorganismen. In diesem Projekt wurde fokussiert auf Bakterien. Diese können durchflusszytometrisch über die Eingrenzung der Partikelgröße und die Färbung DNA-haltiger Partikel mit Fluoreszenzfarbstoffen bestimmt werden. Die Durchflusszytometrie ist im Bereich der Wasserüberwachung ein relativ neues Verfahren, das besonders von Schweizer Forschern der EAWAG vorangetrieben wurde und dort inzwischen in der kontinuierlichen Prozessüberwachung zur Trinkwasseraufbereitung angewendet wird [Egli10, Egli13, Egli14]. Da zum einen kurze Analysedauer und geringe Analysekosten Vorteile gegenüber den heute in der TrinkwV vorgeschriebenen Kulturverfahren bieten, andererseits die Einsatzmöglichkeiten in der Objektüberwachung bisher wenig erforscht waren, ist bisher nur eine geringe Datenbasis gegeben. Insofern wurde die Gesamtzellzahl als Parameter im Projekt betrachtet, um ihr Potenzial in der Trinkwasserüberwachung abzuschätzen. Die Geräteeinstellungen bzw. Messprogramme sind bzgl. Triggern, Gainwerten, Thresholds und Gates gerätesowie farbstoffabhängig und wurden im Vorfeld im jeweiligen Labor intern optimiert und validiert.

Zur Bestimmung der Gesamtzellzahl wurde der grün fluoreszierende DNA-Farbstoff SYBR Green I verwendet (Fa. Sigma-Aldrich). 800 µL Probe wurde mit 8 µL SYBR Green Arbeitslösung (nach Herstellerangaben hergestellt aus 10 µL SYBR Green I Stammlösung und 990 µL steril filtriertem TRIS-Borat-EDTA(TBE)-Puffer (IHPH) bzw. mit DSMO (IWW)) versetzt, gevortext und 15 min bei Raumtemperatur (IHPH) bzw. 13 min bei 36 °C im Dunkeln inkubiert. Anschließend wurde die Probe zur Messung in das Durchflusszytometer (FCM) eingesetzt. Die Auswertung erfolgte als arithmetischer Mittelwert einer Dreifachmessung von jeweils 200 µl. Das Ergebnis wird als GZZ/1 mL angegeben.

Am IWW wurde zudem die Bestimmung der Konzentrationen membran-intakter Bakterien bzw. der relative Anteil membran-intakter Bakterien an der Gesamtpopulation mittels Durchflusszytometrie in Kombination mit Fluoreszenzfarbstoffen durchgeführt. Zur Bestimmung der Gesamtzellzahl (Bakterien mit intakter und geschädigter Zellmembran) wurde die Wasserprobe angefärbt mit SYBR Green I, während eine Kombination aus den Farbstoffen SYBR Green I und Propidium Iodid verwendet wurde zur selektiven Quantifizierung membran-intakter Bakterien. Das genaue methodische Vorgehen ist beschrieben in [Nocker17].

Alle durchflusszytometrischen Messungen erfolgten im Doppelansatz. Das Ergebnis wird als Anteil lebender bzw. Membran-geschädigter Zellen in Prozent (%) angegeben.

2.4.4 Methodenabgleich

Um eine Vergleichbarkeit der Daten zu gewährleisten, die in den drei Laboren von IHPH, IWW und IMMH generiert werden, bieten Ringversuche ein sinnvolles Instrument. Bezüglich der kulturellen Analysemethoden nach TrinkwV kann hier auf die offiziellen Ringversuche zurückgegriffen werden, an welchen die Labore aus Gründen der Qualitätssicherung regelmäßig teilnehmen und welche sie bestehen müssen, um behördlich anerkannte Befunde ausstellen zu dürfen. Ausrichter dieser Ringversuche ist das Niedersächsische Landesgesundheitsamt (NLGA). Für die „moderne Analytik“ qPCR und Durchflusszytomet-

rie dagegen werden bisher keine Ringversuche von offizieller Seite angeboten. Da besonders bei der qPCR die Projektpartner nicht nur verschiedene Geräte, sondern auch Kits unterschiedlicher Hersteller verwenden, wurde ein interner qPCR-Ringversuch mit Unterstützung des NLGA organisiert. Hierfür wurden durch das NLGA identische Proben mit zunächst unbekannter Konzentration von *L. pneumophila*-Zellen an IWW, IHPH und IMMH verschickt und von diesen mittels qPCR analysiert. DNA-Extraktion erfolgte aus 100 mL Probe, die qPCR selbst mit der unverdünnten extrahierten DNA sowie einer 1:10-Verdünnung. Die Ergebnisse wurden am IHPH gesammelt und statistisch ausgewertet. Die Durchschnitts-Konzentration und Standardabweichung betrug für alle Labore bei *Legionella* spp. 4,67 ± 0,35 $\log_{10}$ und bei 4,55 ± 0,49 $\log_{10}$ für *L. pneumophila*. Betrachtet man nur die Labore, die das BioRad-System nutzen, liegen die Ergebnisse trotz unterschiedlicher qPCR-Geräte mit 4,87 ± 0,05 $\log_{10}$ für *Legionella* spp. und 4,83 ± 0,13 $\log_{10}$ für *L pneumophila* ähnlich. Nach Einsendung der Ergebnisse an das NLGA konnte anhand des Zielwerts (durchflusszytometrisch gemessene GZZ von 81.200 Zellen/100 mL) eine Wiederfindung der qPCR Analyse für alle Partner mit 81,3 %– 100,2 % berechnet werden. Die Messunsicherheit liegt damit bei 15,8 % bzw. bei 0,32 $\log_{10}$. Eine Messunsicherheit von < 0,5 $\log_{10}$ gilt dabei im Rahmen der Qualitätssicherung als akzeptabel [Baume13].

Für die Untersuchungen mittels qPCR wurden Nachweisgrenzen (LD) als auch Quantifizierungsgrenzen (LQ) bestimmt. Das gefilterte Volumen hat einen wesentlichen Einfluss auf die proportional steigenden LQ- und LD-Werte. Die in diesem Projekt verwendeten Untersuchungsvolumina ergeben je nach verwendetem Kit unterschiedliche Nachweis- und Quantifizierungsgrenzen, die in Tabelle Tab. 2-1 aufgeführt sind.

Tab. 2-1 Übersicht Nachweis- und Quantifizierungsgrenzen qPCR der Labore sowie Labelung in der Datenbank und den Auswertungen

Institut	**Verwendetes Kit**	**LD [GU/500 mL]**	**LQ [GU/500 mL]**
IMMH	GeneDisc Plate *Legionella* spp. (Fa. Pall) GeneDisc Plate *L. pneumophila* (Fa. Pall)	190	950
IHPH	iQ Check *Legionella* spp. (Fa. BioRad) iQ Check *L. pneumophila* (Fa. BioRad)	80	608
IWW	iQ Check *Legionella* spp. (Fa. BioRad) iQ Check *L. pneumophila* (Fa. BioRad)	80	608
Label in der Datenbank und den Auswertungen		**> LD = 10**	**> LQ = 200**

LD= Limit of detection (dt. Nachweisgrenze)
LQ= Limit of quantification (dt. Quantifizierungsgrenze)

Der französische Aktionswert bezeichnet in diesem Zusammenhang eine Konzentration von 5000 GU/1 L (entsprechend 2500 GU/500 mL im vorliegenden Projekt). Dieser Wert wird auf Basis der von Lee et. al. 2011 durchgeführten Studien in der französischen Trinkwasserüberwachung angewendet [Lee11]. Er besitzt keinen bindenden Charakter für Deutschland und wird für die objektspezifische grafische Auswertung in Anhang 15.4 behelfsweise betrachtet, da bezüglich des Gennachweises in Trinkwasser keine Vorgaben einzuhaltender Konzentrationswerte für Deutschland existieren. Es können der Überschreitung dieses Wertes derzeit für Deutschland aus hygienisch-mikrobiologischer Sicht keine gesundheitlichen Implikationen zugeordnet werden.

2.5 Thermohydraulische Messungen

Unter den Projektpartnern wurde das standardisierte Vorgehen zur thermohydraulischen Charakterisierung der Objekte festgelegt.

Die thermohydraulischen Messungen (THM) erfolgten über einen Messzeitraum von mindestens 14 Tagen. Ausgewertet wurden die Messdaten jeweils von Montag 0:00 Uhr bis Sonntag 23:59 der zweiten Woche. Gemessen wurden die Temperaturen im Umfeld des TWE am Eintritt TWK, am Austritt TWW sowie dem Eintritt der Trinkwarmwasser-Zirkulation TWZ, wenn möglich am Hauseintritt und die Raumtemperatur im Raum des TWE. Die Volumenstrom-Messung war zeitgleich nur an zwei Stellen vorgesehen. In den meisten Objekten waren dies der TWW-Austritt und der TWZ- Eintritt am TWE, in einigen Objekten anstelle eines der beiden alternativ am Eintritt TWK (meist bedingt durch fehlende gerade Rohrleitungsstück ausreichender Länge).

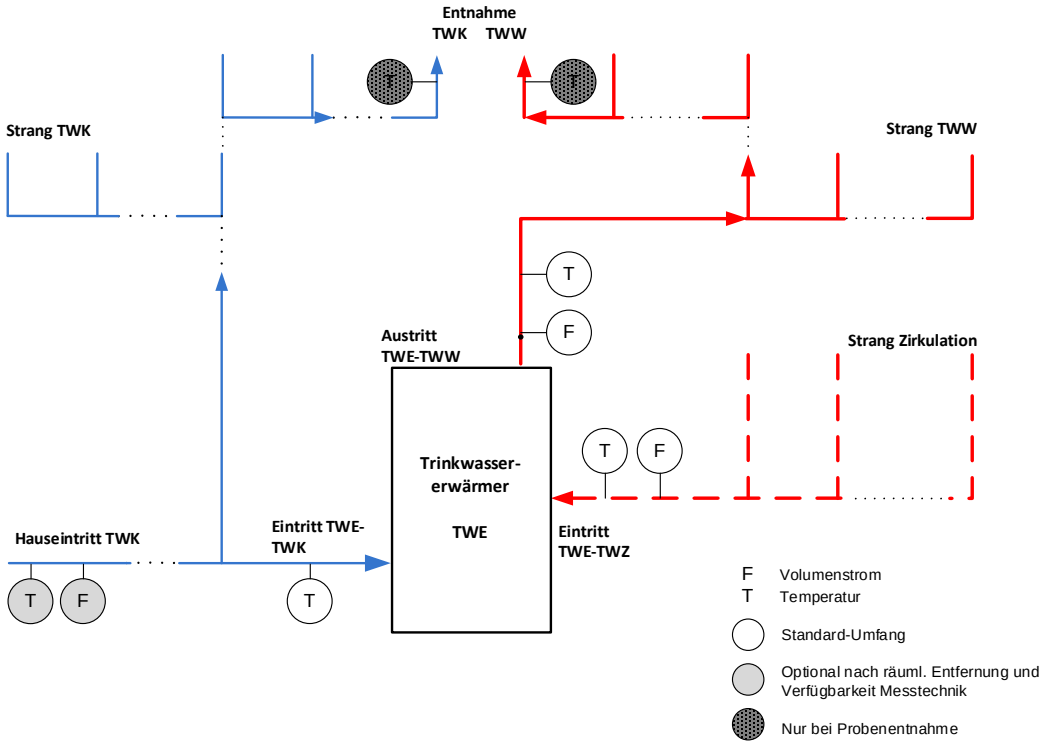


Abb. 2-3 Felduntersuchungen – Thermohydraulische Messungen (THM): Schema zur Lage der Messpunkte

Die Volumenströme wurden mit Ultraschall-Messtechnik mit externen Sensoren (Clamp-On-Technik, Fabrikat FLEXIM) aufgezeichnet. Für die Temperaturmessungen kamen direkt auf die Außenwand der Rohrleitungen applizierte und wärmegedämmte PT-100 Anlegefühler zum Einsatz. Es wurden jeweils 10-Sekunden-Mittelwerte erfasst.

Abb. 2-4 Ansicht Messaufbau, Messschrank und Messequipment (Bsp. Objekt 003)

Abb. 2-5 Links: Messungen TWW – Temperatur und Volumenstrom, Mitte: Details TWZ, Rechts: Messung Temperatur TW (kalt)

Am 05.11.15 wurde in einer gemeinsamen Diskussion der Projektpartner festgelegt, dass nachfolgende Messungen auch den Durchmesser der Rohrleitungen (meist Nenndurchmesser DN o. ä.) um den TWE zu erfassen und den Wasserverbrauch an der Wasseruhr zu Beginn und am Ende der thermohydraulischen Messungen abzulesen. Die TUD-GEWV hat dies übernommen, insofern Zähler zugängig waren (Dokumentation im Anhang 15.3).

In einigen Objekten gab es auf Grund des Rohrmaterials Probleme bei der Messung des Volumenstroms. Bei PP-Verbundrohren konnte keine externe Ultraschall-Durchflussmessung als Reflex-Messung durchgeführt werden. Dies war nur im TW (kalt) bei kleineren Durchmessern bis ca. 50 mm Durchmesser bei Übergang zu einer Durchstrahlmessung erfolgreich. Größere Rohrdurchmesser von PP-Verbundrohren konnten also nicht erfasst werden (z. B. Objekt 055).

Abb. 2-6 Durchflussmessung Volumenstrom, Links: Standard-Reflex-Messung, Rechts: Durchstrahl-Messung bei PP-Verbundrohr mit kleinem Durchmesser

Ein weiteres Problem bei den thermohydraulischen Messungen waren die oft extrem engen Platzverhältnisse in einzelnen Objekten. Insgesamt kamen vier Messequipments zum Einsatz (Abb. 2-7).

Ein mobiles Messequipment besteht aus:

- 4 bis max. 7 PT-100-Temperatur-Sensoren
- 1 Flexim F 601 mit bis zu zwei Sensorpaaren zur Volumenstrommessung
- 1 Ahlborn-Datenlogger Almemo 8590-9 mit 9 Eingangskanälen
- 1 verschließbarer Schrank

Die Einsatzzeiträume der Equipments 1 bis 4 sind Anhang 15.3 zu entnehmen.

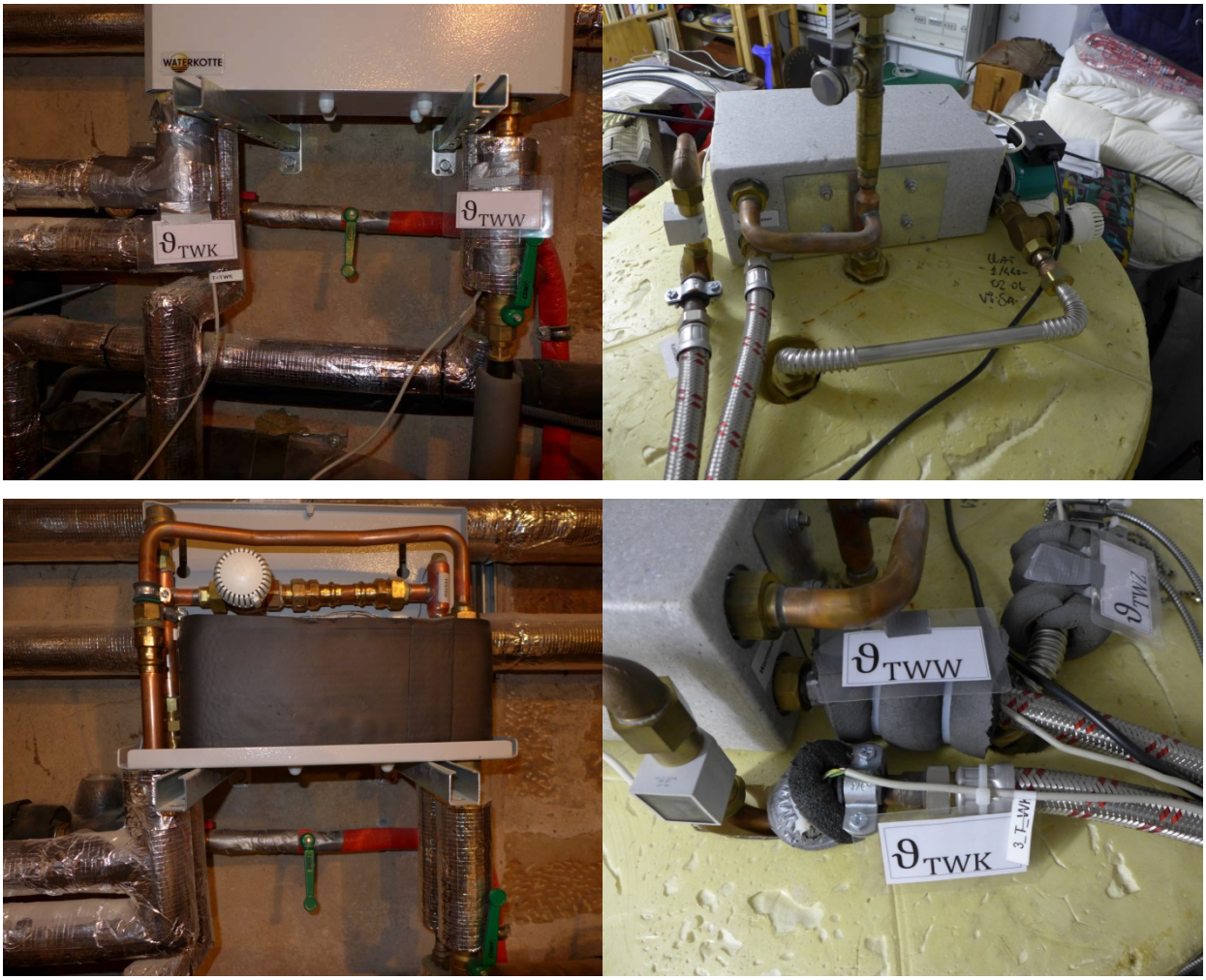


Abb. 2-7 THM – Beispiel für enge Platzverhältnisse

Für 88 Objekte erfolgten die thermohydraulischen Messungen durch die TUD-GEWV. Zwei Objekte hatten eigene thermohydraulischen Messungen über die Gebäudeleittechnik (GLT) bzw. es erfolgte ein Monitoring. In 7 Objekten erfolgt die Trinkwassererwärmung im dezentralen Durchflussprinzip und 4 Objekte sind baugleich mit anderen vermessenen Objekten.

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. Basis waren jeweils exakt 14 Tage (von Montag 0 Uhr bis 23:59 des übernächsten Sonntags).

3 Datenbank

3.1 Relationale Datenbank Felduntersuchungen

Die im Rahmen des Legionellen-Projektes [Rühling12] erstellte Grunddatenbankstruktur wurde an den Ergebnisumfang der verpflichtenden Untersuchungen nach TrinkwV (Routineuntersuchung) sowie unter Einbeziehung des Begehungs-, Probenahme- und Ergebnisprotokolls adaptiert. Die Datenbankstruktur wurde in enger Abstimmung mit den Projektpartnern erarbeitet und im Laufe des Projektes an die geänderten Eingaben angepasst.

Die Nomenklatur der Bezeichnung der Probenahmestellen ist aus Abbildung Abb. 3-1 ersichtlich.

Aus folgenden Datenquellen flossen Informationen in die Objekt-Datenbank ein:

- Checkliste für Gebäudeakquise (händisch)
- Begehungsprotokoll
- Probenahmeprotokoll
- Protokoll Laboranalytik
- Einsatz Messequipment (händisch)

Die Objekt-DB besteht aus folgenden Tabellen:

- Objekte
- Plaene
- Material
- Stagnation
- Probleme
- TWW_Speicher
- Wartung
- Druck_TWBehandlung
- Probe

Die ersten acht Tabellen werden aus dem Begehungsprotokoll (per Skript) und der Checkliste (nur Tabelle Objekte) gefüllt. Die Tabelle „Probe“ wird aus dem Probenahmeprotokoll und dem Protokoll Laboranalytik per Skript gefüllt. Die Zuordnung der Protokolle zu den Tabellen und Spalten in der DB steht im Anhang 15.6.

Da es in der Laufzeit des Projektes zu Inkonsistenzen in der Datenbank (DB) gekommen war, wurde diese auf Plausibilität und Korrektheit der Einträge von den einzelnen Hygienepartnern getestet, um eine sichere Datenbasis für die finale statistische Analyse zu haben. Dafür wurde ein Katalog mit Kriterien/Tipps zur Plausibilitätsprüfung erstellt (Anhang 15.7), der als gemeinsam vereinbarte minimale Grundlage der Prüfung diente. Die Datensätze wurden auf Vollständigkeit und Korrektheit im Vier-Augen-Prinzip kontrolliert (Begehung, Probenahme und Laborergebnisse). Zusätzlich wurden dabei die am weitesten entfernte Probenahmestelle sowie die am nächsten zur TWE gelegene Stelle angegeben und dafür eine neue Spalte in der Datenbank eingerichtet. Generell wurden dabei alle unklaren Angaben bei ALLEN Variablen mit „999“ kodiert. Alle Angaben aus der Checkliste wurden bis auf das Feld „Einteilung nach W551“ nicht übernommen, da sie oft zu ungenau waren. Es wurde eine weitere zusätzliche Spalte „W551_Begehg“eingefügt und die bestehende Spalte „W551“ umbenannt in „W551_Checkl“.

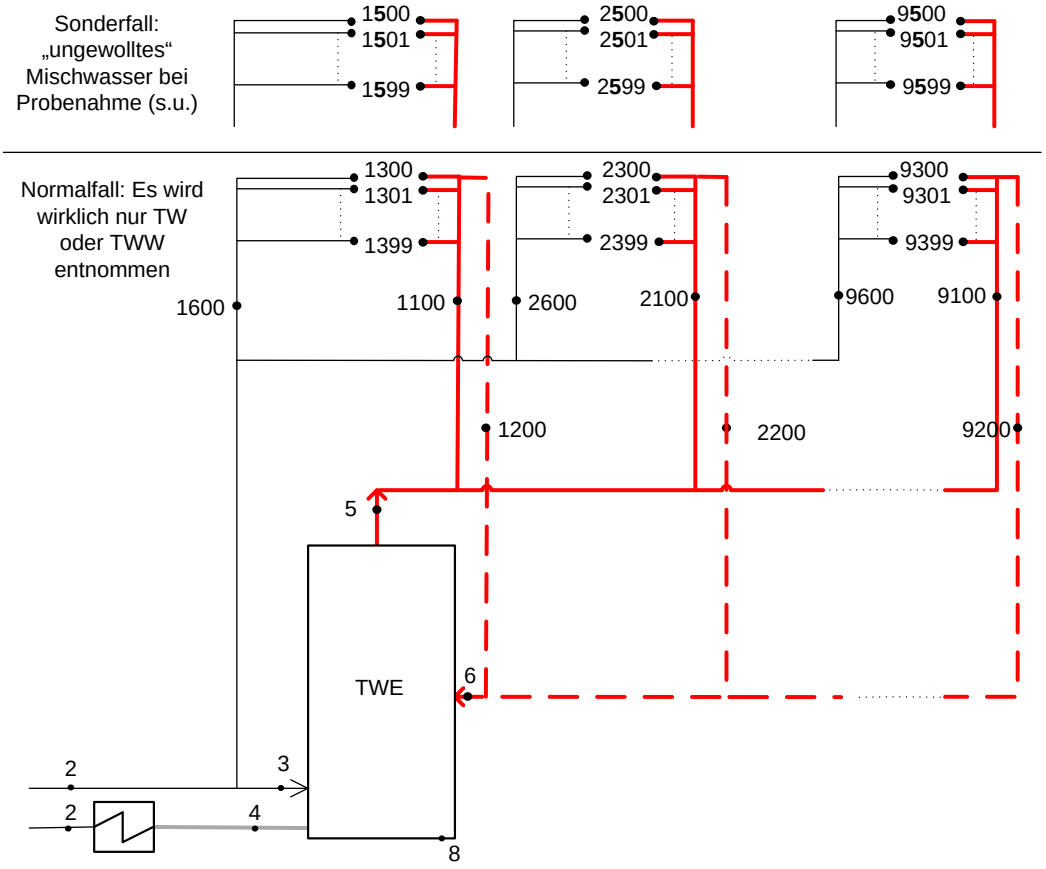


Abb. 1: Normallfall (Zuordnung der Entnahmestellen jeweils zu einem bestimmten Strang möglich) – Codierung der Probenahmestellen = Datenbankspalte 3 (PS_Char)

TWE - Trinkwassererwärmer, allgemein (z. B. Speicherprinzip, Speicherladeprinzip, Durchflussprinzip, Untertischgerät)

LEGENDE:

1 –		Allgemeine Angaben
2 –		HEL (Hauseinführungsleitung)
3 –		Zulauf TWE
4 –		Zulauf TWE (bei Anlagen mit Vorwärmstufe)
5 –		Austritt TWE
6 –		Zirkulation - Eintritt TWE
7 –		sonst. Technik
8 –		Entleerung TWE
1100, 2100 … 9100 –	———	Strangbeprobung TWW, Steigstrang 1 – 9
1200, 2200, … 9200 –	– – –	Strangbeprobung Zirkulation TWW
1300, 1301, ... 9399 –		Entnahmestellen im Strang, TWW/TW
1500, 1501, … 9599 -		Entnahmestellen bei denen keine Absperrung des nicht zu beprobenden Wassers möglich ist (TW kalt bei TWW-Beprobung bzw. TWW bei Beprobung TW kalt) bzw. Unklarheit über eindeutige Funktion Ein-Hebel-Mischer besteht
1600, 2600, … 9600 -	———	Strangbeprobung TW

Abb. 3-1 Nomenklatur Probenahmestellen

3.2 Datenbank DATA für Ergebnisse thermohydraulische Messungen

Die Daten aus den thermohydraulischen Messungen wurden in DATA aufgenommen. DATA ist eine Messdatenbank, die vorrangig die verschiedenen Messwerte und –systeme des „Zentrums für Energietechnik an der TU Dresden“ (ZET) sowie bei externen Monitoringaufgaben gewonnene Datensätze zusammenführt. Eine zentrale Verwaltung der Daten bietet im Nachgang von Messungen die Möglichkeit schnell weitere Recherchen anzustellen. Die Zuordnung der Messdaten zu den entsprechenden Sensoren in DATA steht in Anhang 15.3.2.

Genauso wurden die Messdaten des TWI-Versuchsstandes (siehe Kapitel 5) sowie der Emulatoren (siehe Kapitel 7) an die zentrale Messwertdatenbank DATA des Instituts für Energietechnik übertragen. Die Datenbankstruktur ermöglichte eine gezielte Analyse der großen Datenmenge in kurzer Zeit. Über eine Weboberfläche konnten die Daten schnell gesichtet und zur abschnittsweisen Auswertung exportiert werden.

Die Sicherung der Daten von DATA erfolgte zentral über das Rechenzentrum der TU Dresden.

3.3 Globale Datenbank zu ausgewählten Ergebnissen aus Praxis und Simulation

Es wurde eine webbasierte Globale Datenbank erarbeitet, die sowohl allgemeine Informationen zum Projekt, als auch die konkreten Ergebnisse der Felduntersuchungen (Begehung und hygienische Probenahme) sowie der Simulation (6.4.3) enthält.

In der GDB sind die Daten zu Projektende archiviert und können durch Einsatz von Filtern für weitergehende Untersuchungen genutzt werden.

Die Datenbank ist erweiterungsfähig und auch nach Ablauf des Projektes fortschreibbar und kann auch für die Erfassung der Daten aus ohnehin im Rahmen der Betreiberpflichten ausgeführten Untersuchungen zum Parameter *Legionella* spp. dienen.

Zu der GDB gibt es verschiedene Zugangsprofile, so dass gezielt unterschiedliche Rollen bei der Arbeit mit den Daten genutzt werden können.

Zugang: https://ee-hyg-at-twi.iet.mw.tu-dresden.de/webfdm/

4 Felduntersuchungen

4.1 Übersicht akquirierte Objekte

Insgesamt lieferte die intensive, zeitaufwändige Akquise der direkten Projektpartner und Mitförderer 116 grundsätzlich geeignete Objekte, für die mindestens die Checkliste und die Kooperationszusage des jeweiligen Betreibers oder Eigentümers vorliegen und die so auch in der Datenbank angelegt worden sind. Von diesen konnten letztlich 101 Objekte im Rahmen des Objektscreenings erfolgreich begangen und beprobt werden. Diese verteilen sich über ganz Deutschland, mit regionalen Schwerpunkten im Raum Rhein-Ruhr und in Sachsen bzw. um Dresden als direktem Einzugsbereich der Forschungspartner, sowie im Raum München (vgl. Abb. 4-1). Hinzu kommen einzelne Objekte in Österreich und der Schweiz.

Für jedes Objekt ist eine Fotodokumentation erstellt worden, die sich wie folgt gliedert:

- Fotodokumentation zentral
- Fotodokumentation dezentral und
- Fotodokumentation Thermohydraulische Messungen

Soweit möglich sind erfasst:

- Gesamt- und Teilansichten Aufstellraum Trinkwassererwärmer/-anlage
- Typenschilder des TWE
- Haus von außen, Hausnummer
- Anzahl Wohneinheiten
- Details Speicher (bei zentralen Durchflussprinzip auch heizungsseitiger Pufferspeicher)
- Entnahmestellen Beprobung Trinkwasserhygiene sowohl zentral als auch dezentral (hier insbesondere Details zur Art und Absperrbarkeit TWW/TWK an der Entnahmestelle)
- Messstellen für thermohydraulische Messung

Die Fotodokumentation aller Objekte ist nur intern verfügbar, wobei alle datenschutzrechtlich bedenklichen Fotos entfernt wurden.

Kritisch sei bereits hier angemerkt, dass eine umfassende statistische Auswertung die vollständige Ausfüllung der Begehungsprotokolle erfordert hätte. Es zeigte sich jedoch, dass durch die extreme Zeitknappheit der Objektmanager, die mit uns die Objektbegehungen durchführten, teilweise Informationen nicht bereitgestellt werden konnten bzw. nie vorlagen. Dies galt besonders für die kritische Hinterfragung vorhandener Schaltschemata, da es sich hier oft um Pläne aus der Planungsphase handelte, die im uns zugängigen Bereich teilweise offenkundig nicht dem tatsächlichen Bestand entsprachen. Teilweise konnte ergänzt werden, jedoch nicht bspw. bei der Art der Rohrverlegung in den Installationsschächten und der tatsächlichen Lage der Steig- und Etagenleitungen. Gleiches gilt für Art und Umfang der Wartung- und Instandhaltung.

Abb. 4-2 gibt einen Überblick über die Art der untersuchten Objekte sowie die Zuordnung zu Groß- oder Kleinanlage nach DVGW W 551 bzw. TrinkwV und zur Art des hydraulischen Zirkulationsabgleichs. Mit 78 von 101 Objekten (77 %) dominieren wie angestrebt die Mehrfamilienhäuser, gefolgt von 11 % Ein- und Zweifamilienhäusern (EFH), 3 % Ge-

meinschaftsunterkünften und 9 % sonstigen Objekten. Zu erläutern ist die Anzahl von 19 Kleinanlagen, die sich zusammensetzt aus

- 11 EFH
- 7 Objekte mit dezentraler TWE im Durchflussprinzip (s. Abb. 4-3)

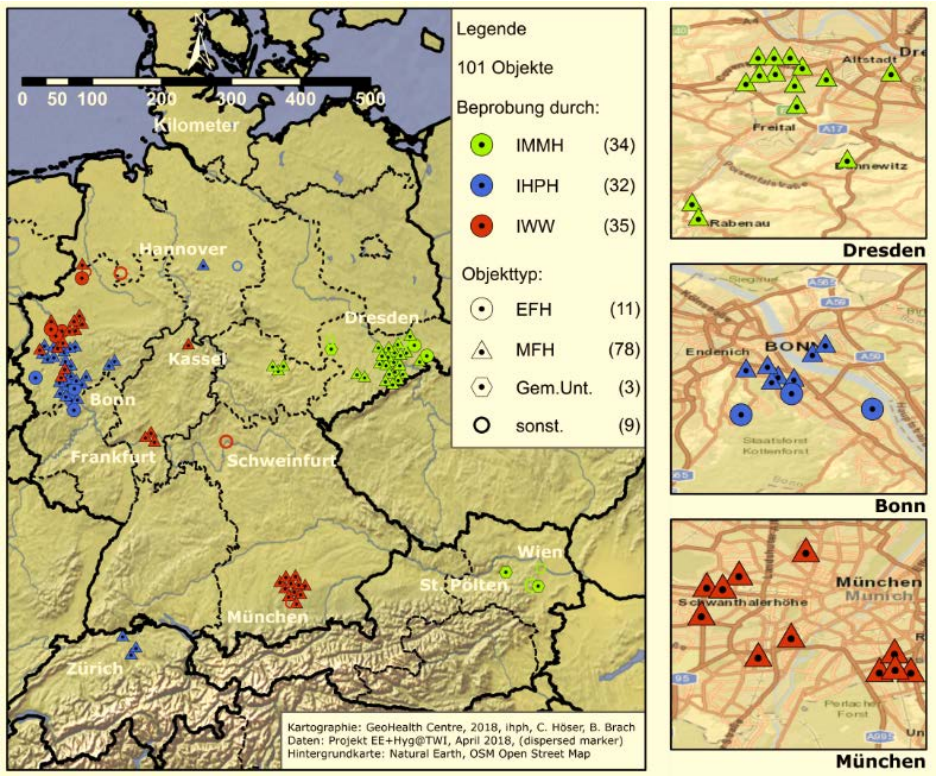


Abb. 4-1 Lage der im Rahmen des Objekt-Screenings untersuchten Objekte mit Unterteilung nach Objekttyp sowie Zuordnung zum betreuenden Projektpartner (Trinkwasserhygiene und Begehungsprotokoll)

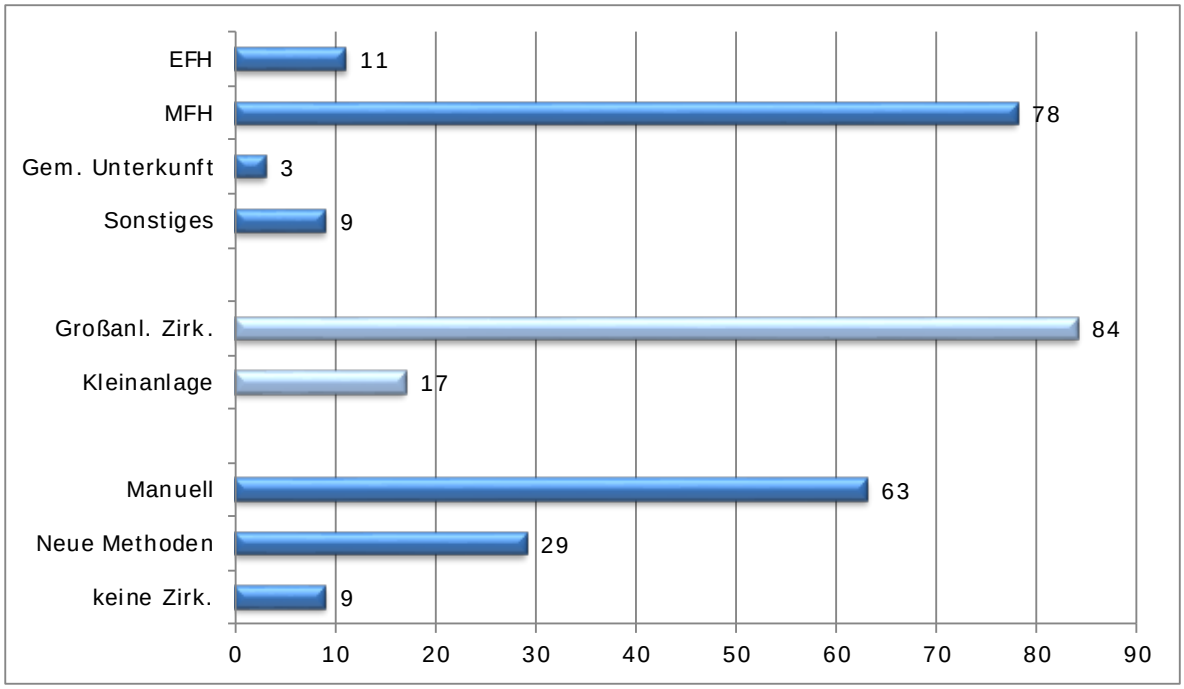


Abb. 4-2 Objektart, Einordnung der TWI nach DVGW W 551 und Art des Zirkulationsabgleichs

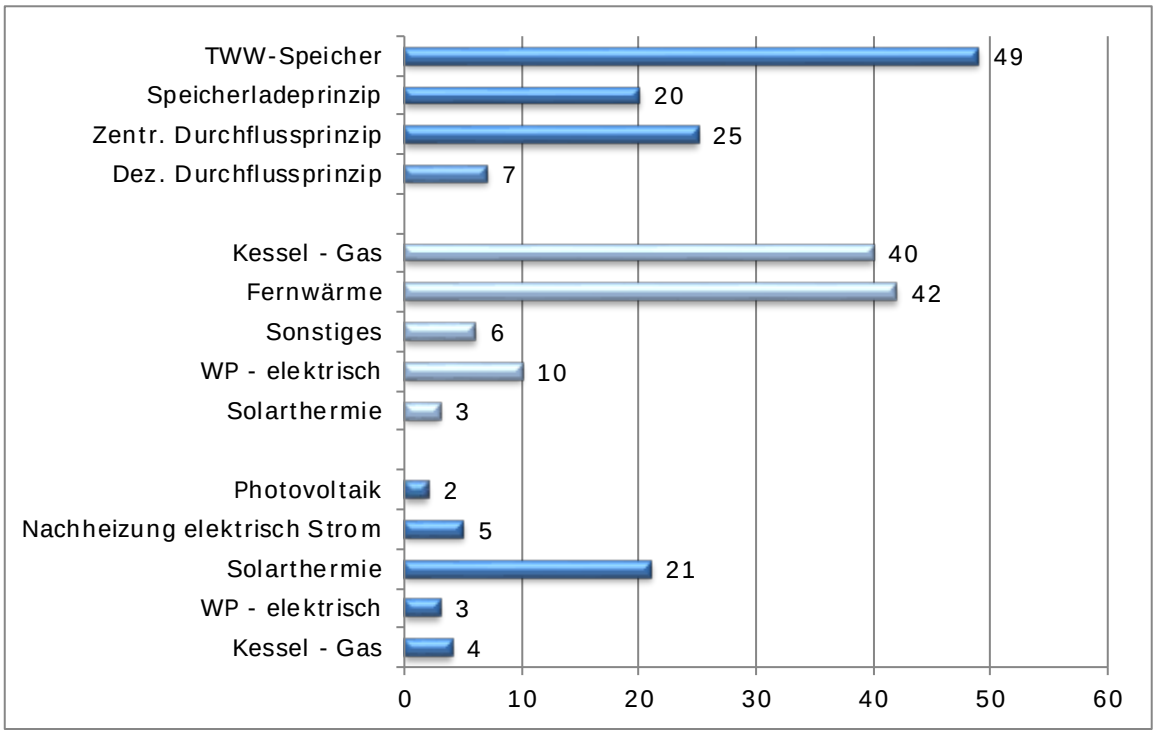


Abb. 4-3 Art der TWE, Erzeugertechnologie und Zusatzerzeuger Wärmebereitstellung

Der Kategorie „neue Methoden des Zirkulationsabgleiches“ sind Produkte der Firmen JRG, Kemper, Oventrop und Viega zuzuordnen. In 49 Objekten ist das „einfache“ TWW-Speicherprinzip installiert (Abb. 4-3). Dies ist bei einem Blick auf die Altersstruktur der

Trinkwasser-Installationen (Abb. 4-4) plausibel, da in den MFH nur 47 % nach 2004 – dem Erscheinungsjahr der jetzt gültigen DVGW W 551 – installiert worden sind (38 % vor 1998).

Abb. 4-3 zeigt auch die Verteilung der Art der Wärmebereitstellung in den Objekten. Grundsätzlich werden also Objekte mit heute typischen Varianten erfasst. Dies ist dem Umstand geschuldet, dass hier - anders als bei der TWI - aller 15 bis 30 Jahre ein vergleichsweise einfacher Austausch erfolgen kann. Die leichte Dominanz der Anzahl der fernwärmeversorgten Objekte resultiert aus der sehr guten Akquise“effektivität“ der im Projekt vertretenen Fernwärme-Versorgungsunternehmen sowie der Mitwirkung großer Wohnungsgenossenschaften.

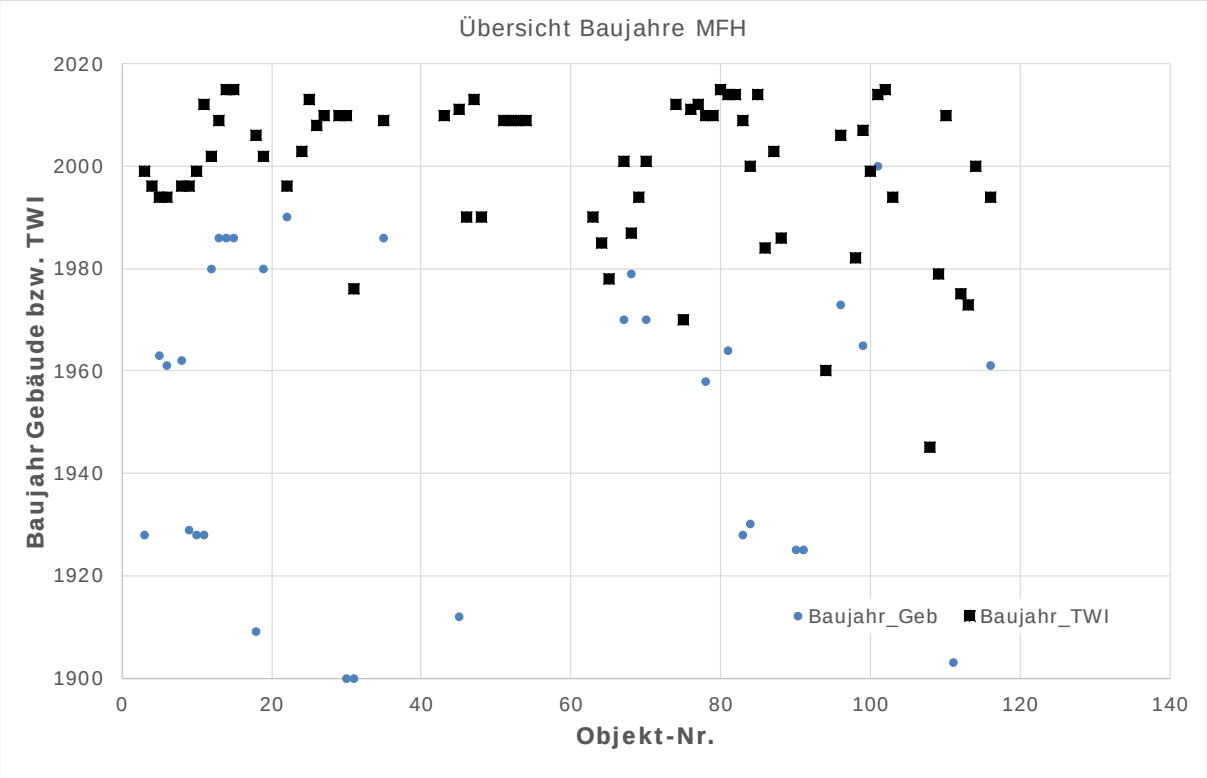


Abb. 4-4 Übersicht MFH: Baujahr der Gebäude sowie der Trinkwasser-Installation

4.2 Objektspezifische Ergebnisse

Für jedes Objekt wurde eine Visitenkarte mit den wichtigsten Eckdaten zur Anlage, zur Probenahme und den Ergebnissen der thermohydraulischen Messung (THM) erstellt (Anhang 15.4). Dazu muss nach den gültigen Vorschriften eigentlich auch ein Bestandsplan gehören. Es lagen aber 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 Nutzeinheiten oft auf die Gebäudekubatur zurückgegriffen werden und es konnte keine direkte Strangzuordnung erfolgen.

Zur besseren Lesbarkeit dieser Visitenkarten soll der Aufbau exemplarisch an einem Beispiel gezeigt werden.

Noch einmal kurz zur Erinnerung: In der THM (Abschnitt 2.5) wurden folgende Werte im direkten Umfeld der Trinkwassererwärmung als 10-Sekunden-Mittelwerte gemessen:

- TWW-Temperaturen am Ein- und Austritt in den TWE sowie am Eintritt TWW-Zirkulation,
- Volumenströme TWW und TWZ,
- Raumtemperatur des Aufstellortes der TWE sowie
- wenn möglich Temperatur am Hauseintritt

Die gemessenen Werte wurden in Diagrammen über einen 14-tägigen Zeitraum immer Montag 0:00 Uhr bis Sonntag 23:59 der zweiten Woche aufgetragen (Abb. 4-5) und zusätzlich in Histogrammen ausgewertet. Histogramme sind erstellt worden für:

- die Zeitanteile aller drei Temperaturen rund um den Trinkwassererwärmer in 5-Kelvin-Temperaturclustern (Abb. 4-6) und
- die Zeitanteile der Volumenstromcluster reine Trinkwarmwasserentnahme (bis 10 Liter/Minute 2 L/min-Cluster, darüber 5 L/min-Cluster). Die Basiswerte sind dabei als Differenz aus Zirkulations- und Trinkwarmwasser-Volumenstrom gebildet worden. (Abb. 4-7)

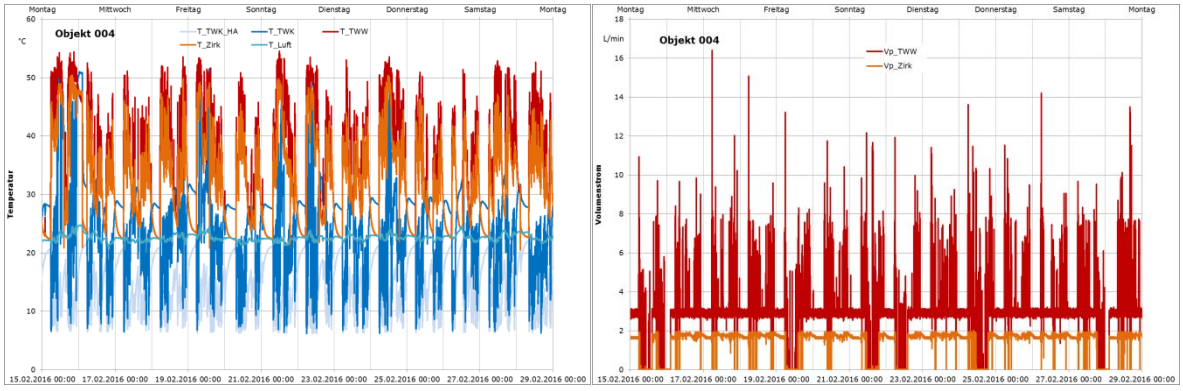


Abb. 4-5 Temperaturen und Volumenströme der THM im 14-Tage-Zeitraum für Objekt 004

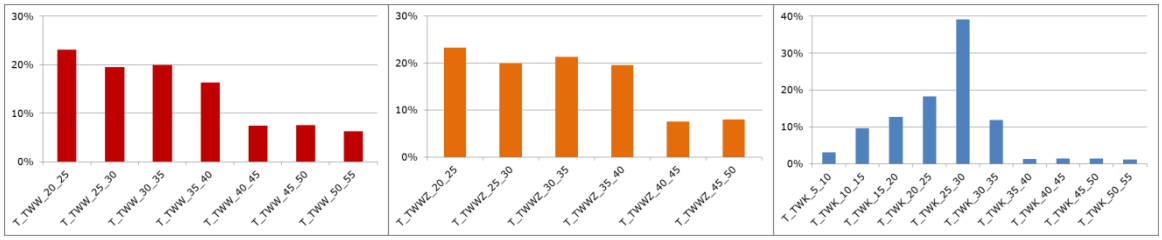


Abb. 4-6 Histogramme Temperatur – Zeitanteile des gesamten Messzeitraums in Temperaturclustern (TWW, TWZ, TWK) für Objekt 004

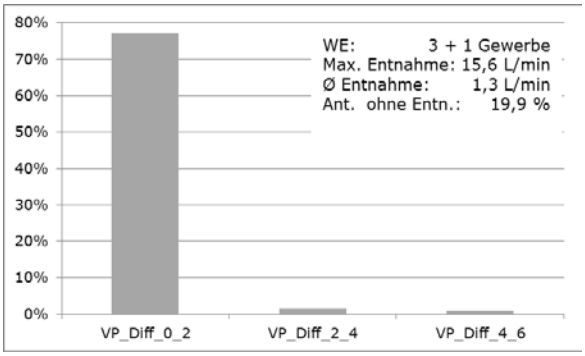


Abb. 4-7 Histogramm Volumenstrom – Zeitanteile des gesamten Messzeitraums in Volumenstromclustern für Objekt 004

Im Anschluss an die Auswertung der THM folgt die Gesamtübersicht der hygienisch-mikrobiologischen Untersuchung und der Temperaturen der Probenahme für alle Entnahmeorte. Dabei folgt die grafische Darstellung folgender Systematik:

- Rot = kultureller Befund *Legionella* spp.
- Blau = qPCR-Befund *Legionella pneumophila*
- Schwarz = Temperaturen
- Symbol Kreis = 1. Liter
- Symbol Viereck = 2. Liter
- Symbol Strich = 5. Liter
- Symbol Plus = 10. Liter

Da diese aufwändige objektspezifische Sicht vor der endgültigen Festlegung der Nomenklatur erstellt worden ist, gibt es folgende Zuordnung der Bezeichnungen auf der x-Achse:

- TW-Eing.: Eintritt TWK in den TWE
- TWW-Vorl.: Austritt TWW aus dem TWE
- TWW-Zirk.: Eintritt TWZ in den TWE
- Entn. TWW1: 1. Probenahmestelle peripher TWW
- Entn. TW1: 1. Probenahmestelle peripher TWK
- Entn. TWWn: n. Probenahmestelle peripher TWW
- Entn. TWn: n. Probenahmestelle peripher TWK

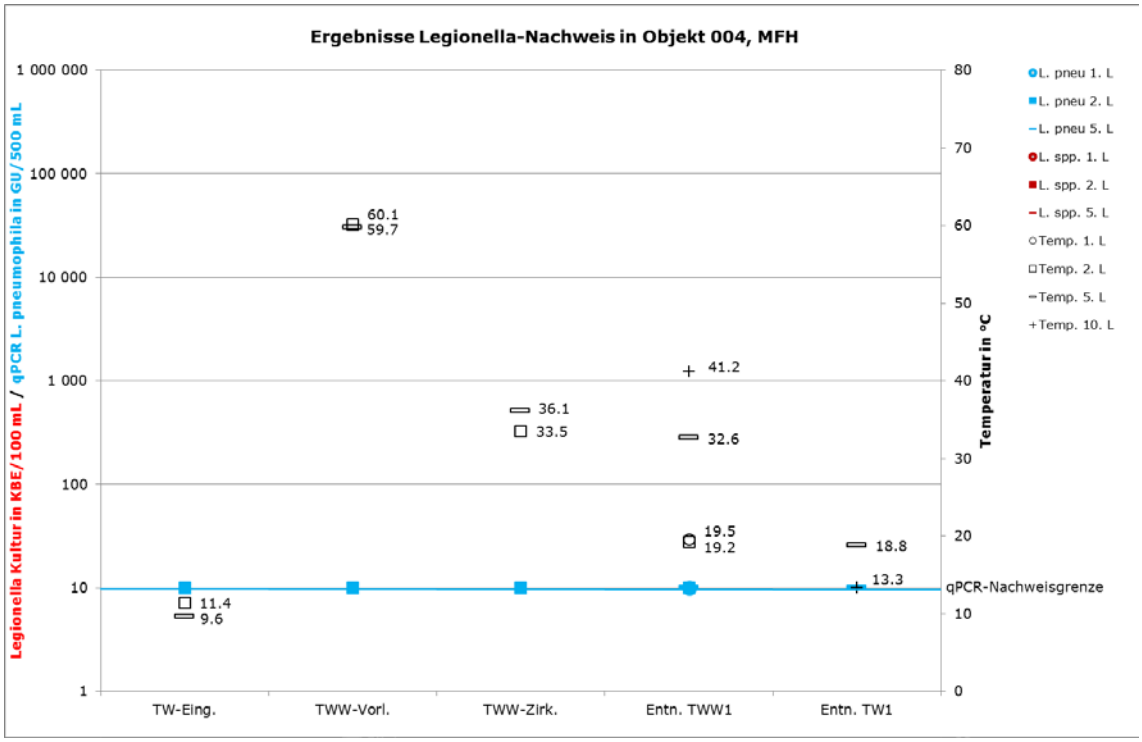


Abb. 4-8 Beispiel für gemeinsame grafische Darstellung der Ergebnisse der Legionellen-Befunde und der Probenahme-Temperaturen in Objekt 004

Im vorliegenden Beispiel (Objekt 004) gab es keinen positiven kulturellen Befund und auch die *L. pneumophila* qPCR-Befunde lagen unterhalb der Nachweisgrenze.

Eine weitere Auswertung stellt die Grafik zur Visualisierung des Verlaufs der peripher gemessenen TWW-Temperaturen der Probenahme im Vergleich zur Probenahme-Temperatur am Ausgang des TWE sowie die gleichzeitige Markierung von Legionellen-Befunden nach dem Ampelsystem dar. Im Beispiel in Abb. 4-9 sind alle Linien und Markierungen grau, also wie erläutert kein Legionellenbefund > 0 KbE/100 mL und qPCR unter der Nachweisgrenze. Beispiele für ein „Grünes Objekt“ ist Objekt 013, weitere mit Ampelkodierung 015, 033 und 038 (s. Anhang 15.4).

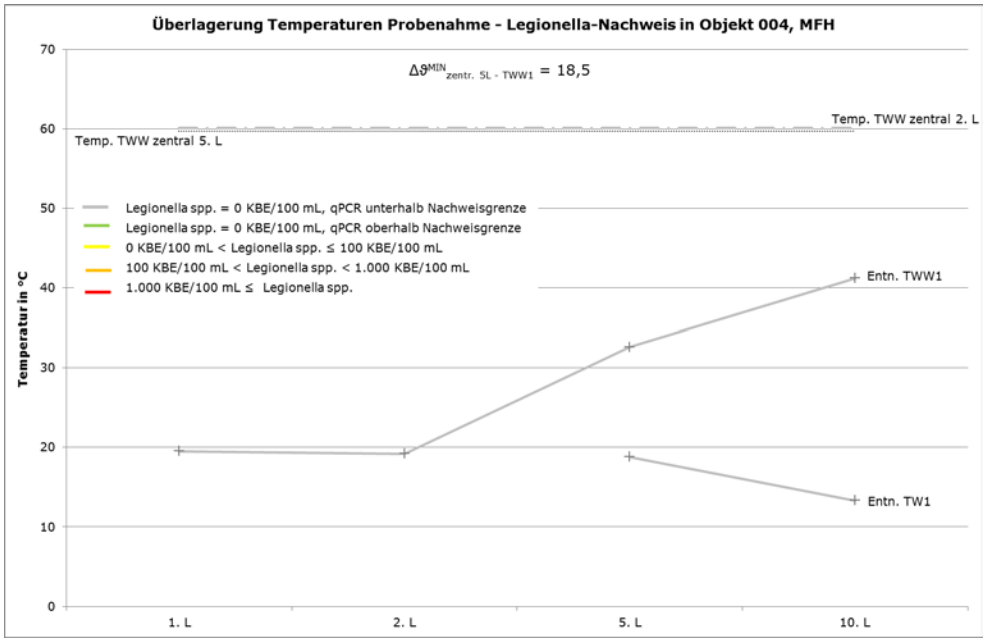


Abb. 4-9 Beispiel für Überlagerung Temperaturen Probenahme – Legionellen-Nachweis in Objekt 004

Auswertung Begehungsprotokolle:

Aus den Begehungsprotokollen geht die Sicht der Betreiber bzw. UsI´s einer Anlage hervor. In einigen Objekten weichen die Angaben zur Temperatur am Austritt des Trinkwassererwärmers im nominellen Betrieb erheblich von den dann in den konkreten THM-Messungen gefundenen Werten ab. Dies wird in Abschnitt 4.6 diskutiert.

- Es gibt 30 Objekte, die Temperaturen unter 55 °C am Austritt TWE angeben. Davon haben 70 % einen negativen kulturellen Befund *Legionella* spp., 10 % einen positiven Befund unter dem techn. Maßnahmewert, 17 % einen Wert von 101...1.000 KbE/100 mL und 3 % einen Befund >1.000 KbE/100 mL.
- Hinsichtlich der mikrobiologischen qPCR-Untersuchung auf *Legionella pneumophila* liegt folgendes Ergebnis vor: 63 % mit negativem Befund, 30 % mit Befund unter Quantifizierungsgrenze, 4 % über Quantifizierung, aber unter Aktionswert, 3 % oberhalb Aktionswert.
- 68 Objekte werden regelkonform am Austritt des TWE betrieben. Davon haben 76 % einen negativen kulturellen Befund *Legionella* spp., 16 % einen positiven Befund unter dem techn. Maßnahmewert, 4 % einen Wert von 101...1.000 KbE/100 mL und 3 % einen positiven Befund >1.000 KbE/100 mL.
- Hinsichtlich der mikrobiologischen qPCR-Untersuchung auf *Legionella pneumophila* liegt folgendes Ergebnis vor: 63 % mit negativem Befund, 16 % mit Befund unter Quantifizierungsgrenze, 6 % über Quantifizierung, aber unter Aktionswert, 15 % oberhalb Aktionswert.
- Drei Objekte haben Temperaturen über 65 °C am Austritt des TWE. Davon haben 2 Objekte einen negativen kulturellen Befund *Legionella* spp. (67 %) und 1 Objekt einen positiven Befund unter dem techn. Maßnahmewert. Ebenfalls 2 Objekte haben einen negativen qPCR-Befund *Legionella pneumophila* und bei einem Objekt liegt der positive Befund unterhalb der Quantifizierungsgrenze.

- 6 Objekte führen die Steigleitungen in separaten Schächten. In einem Objekt sind die Leitungen im Keller in separaten Schächten geführt und in 21 Objekten werden sowohl die Steigleitungen, als auch die Leitungen im Keller in separaten Schächten geführt. Von diesen Objekten haben 68 % einen negativen kulturellen Befund *Legionella* spp., 21 % einen positiven Befund unter dem techn. Maßnahmewert, 7 % mit einem Wert von 101...1.000 KbE/100 mL und 4 % mit einem positiven Befund >1.000 KbE/100 mL.
- Hinsichtlich der mikrobiologischen qPCR-Untersuchung auf *Legionella pneumophila* liegt folgendes Ergebnis vor: 54 % mit negativem Befund, 21 % mit Befund unter Quantifizierungsgrenze, 7 % über Quantifizierung, aber unter Aktionswert, 18 % oberhalb Aktionswert.

Tab. 4-1 Objekte mit positivem kulturellem Befund *Legionella* spp.

Objekt-Nr.	**Höchster kult. Befund in KbE/100 mL**	**Bemerkungen**	**Differenzierung**	**Höchster qPCR-Befund *L.pneu.* in GU/500 mL**	**Probenehmer**
008	18	TWW_5, Entn. 2 Mittelwert Temperatur am Austritt TWE: 58,4 °C	SG 6	Negativ	IMMH
010	**4**	**Nur TW_5**, Entn. 1 Mittelwert Temperatur am Austritt TWE: 60,6 °C	Andere	Negativ	IMMH
015	100	**TW_5**, Entn. 1 Mittelwert Temperatur am Austritt TWE: 56,7 °C	SG 1	6.500	IMMH
017	**1**	**Nur** TWW_2, Entn. 1 Mittelwert Temperatur am Austritt TWE: 41,3 °C	Andere	Negativ	IMMH
024	100	**Nur TW_2**, TW-Eing. Mittelwert Temperatur am Austritt TWE: 61 °C	Keine SG-Bestimmung	Negativ	IWW
026	300	**Nur TW_2**, TW-Eing. Mittelwert Temperatur am Austritt TWE: 62,3 °C	Keine SG-Bestimmung	Negativ	IWW
033	300	TWW_1, Entn. 3 Mittelwert Temperatur am Austritt TWE: 63,5 °C	SG 2-14, andere	200	IMMH
038	400	TWW_1, Entn. 1 Mittelwert Temperatur am Austritt TWE: 37,1 °C	Keine SG-Bestimmung	Negativ	IWW
040	**13.000**	TWW_2, Entn. 1 Dezentrales thermisches DFP	SG 1	35.000	IMMH
055	3.500	TWW_1, Entn. 2 Mittelwert Temperatur am Austritt TWE: 53,8 °C	Andere	Negativ	IMMH

Ob-jekt-Nr.	Höchster kult. Befund in KbE/ 100 mL	Bemerkungen	Differenzie-rung	Höchster qPCR-Befund *L.pneu*. in GU/500 mL	Probe-nehmer
062	300	TWW_2, Entn. 1 Mittelwert Temperatur am Austritt TWE: 47 °C	SG 2-14	200	IMMH
063	**3**	TWW_2, Entn. 2 Mittelwert Temperatur am Austritt TWE: 65 °C	SG 2-14	3.080	IHPH
065	200	TWW_2, Entn. 1 Mittelwert Temperatur am Austritt TWE: 67 °C	Andere	Negativ	IHPH
074	**1**	**Nur** TWW_5, Entn. 2 Mittelwert Temperatur am Austritt TWE: 65,5 °C	Keine SG-Bestimmung	Negativ	IWW
077	29	TWW_5, Entn. 1 Mittelwert Temperatur am Austritt TWE: 56,1 °C	L. anisa	Negativ	IHPH
085	1.100	TWW_2, Entn. 1 Mittelwert Temperatur am Austritt TWE: 60 °C	Andere	Negativ	IWW
086	400	TWW_2, Entn. 3 Mittelwert Temperatur am Austritt TWE: 55,3 °C	SG 2-14, andere	1.533	IWW
087	100	**Nur TW_5**, Entn. 1 Mittelwert Temperatur am Austritt TWE: 60 °C	Keine SG-Bestimmung	200	IWW
094	100	TWW_2 und TW_1, Entn. 1 Mittelwert Temperatur am Austritt TWE: 62,7 °C	SG 1	98.500	IWW
097	400	TWW_5, Entn. 3 Mittelwert Temperatur am Austritt TWE: 43,6 °C	SG 1	3.080	IHPH
103	**5**	**TW_2**, TW-Eing. Mittelwert Temperatur am Austritt TWE: 56,5 °C	SG 1	1.300	IMMH
108	100	TW_5, Entn. 1 Mittelwert Temperatur am Austritt TWE: 55 °C	L. anisa	Negativ	IMMH
109	200	**Nur** TWW_2, Entn. 1 Mittelwert Temperatur am Austritt TWE: 61 °C	SG 2-14	1.150	IWW
111	100	TW_5, Entn. 1 Mittelwert Temperatur am Austritt TWE: 57,3 °C	SG 1	200	IWW

Ob-jekt-Nr.	Höchster kult. Befund in KbE/ 100 mL	Bemerkungen	Differenzie-rung	Höchster qPCR-Befund *L.pneu*. in GU/500 mL	Probe-nehmer
116	**1**	**Nur** TW_5, Entn. 2 Mittelwert Temperatur am Austritt TWE: 58,4 °C	SG 6	Negativ	IMMH

Tab. 4-2 Positive qPCR-Befunde *Legionella pneumophila* (untere Quantifizierungsgrenze ist laborabhängig, im Projekt mit 200 GU/500 mL „gelabelt“)

Objekt-Nr.	Höchster qPCR-Befund *L.pneu*. in GU/500 mL	Bemerkungen	Höchster kult. Befund in KbE/100 mL	Probenehmer
002	200		Negativ	IMMH
003	200		Negativ	IMMH
009	200		Negativ	IMMH
012	2.150		Negativ	IMMH
013	3.250		Negativ	IMMH
014	1.150		Negativ	IMMH
015	6.500		100	IMMH
019	11.000		Negativ	IMMH
020	200		Negativ	IMMH
022	2.550		Negativ	IMMH
023	200		Negativ	IWW
025	200		Negativ	IWW
027	200		Negativ	IWW
029	200		Negativ	IWW
033	200		300	IMMH
035	6.00		Negativ	IMMH
039	200		Negativ	IMMH
040	35.000		13.000	IMMH
041	200		Negativ	IMMH
046	200		Negativ	IHPH
051	200		Negativ	IWW
052	200		Negativ	IWW
062	200		300	IMMH
063	3.080	Kult. Befund nicht an PNS mit höchstem qPCR-Befund	3	IHPH
064	289.0000	Hohe Temperaturen	Negativ	IHPH
075	200		Negativ	IWW
076	200		Negativ	IHPH
080	200		Negativ	IHPH
083	4.210		Negativ	IWW

Objekt-Nr.	Höchster qPCR-Befund *L.pneu.* in GU/500 mL	Bemerkungen	Höchster kult. Befund in KbE/100 mL	Probenehmer
086	1.533		400	IWW
087	200		100	IWW
094	98.500		100	IWW
097	3.080	Kult. Befund an PNS 2501: 300 KbE/100 mL	400	IHPH
100	200		Negativ	IHPH
103	1.300	Kult. Befund nicht an PNS mit höchstem qPCR-Befund	2	IMMH
109	1.150		200	IWW
111	200		100	IWW

In 4 Objekten gab es einen positiven Befund an *Pseudomonas aeruginosa*:

- Objekt 026: 01.07.15, 1300.K.5 - > 200 (IWW)
- Objekt 040: 16.04.15, 1300.W.1 – 1 (IMMH)
- Objekt 076: 07.12.15: 1500.W.2 – 90 und 1500.W.5 – 39 (IHPH)
- Objekt 115: 10.08.2017: 1300.W.2 – 160 und 1300.W.5 – 33000 (IWW)

4.3 Erkenntnisse deskriptive Statistik

4.3.1 Methodik

Die trinkwasserhygienische Beprobung in den 101 Objekten und die anschließende mikrobiologische Untersuchung im Labor erfolgte durch die 3 Hygienepartner (IHPH: 32 Objekte, IMMH: 34 Objekte und IWW: 35 Objekte).

Für alle Objekte liegen Ergebnisse der Kulturmethode *Legionella* spp. sowie qPCR *Legionella pneumophila* (ohne Differenzierung lebend/tot) vor.

Durchschnittlich wurden 9 Proben je Objekt entnommen und analysiert (3 am TWE, 2 periphere Entnahmen mit je 2. und 5. Liter TWW und 5. Liter TWK). Zur einheitlichen grafischen Darstellung erweist sich folgende Kodierung sowohl der kulturellen als auch der molekularbiologischen Befunde nach einem einheitlichen Ampelsystem als hilfreich (s. a. Abb. 4-10):

- Grün: negativer Befund
- Gelb: positiver Befund, jedoch unterhalb des technischen Maßnahmewertes bzw. zwischen Nachweis- und Quantifizierungsgrenze bei qPCR
- Orange–Rot: positiver Befund, Farbintensivität steigend nach Höhe des Befundes

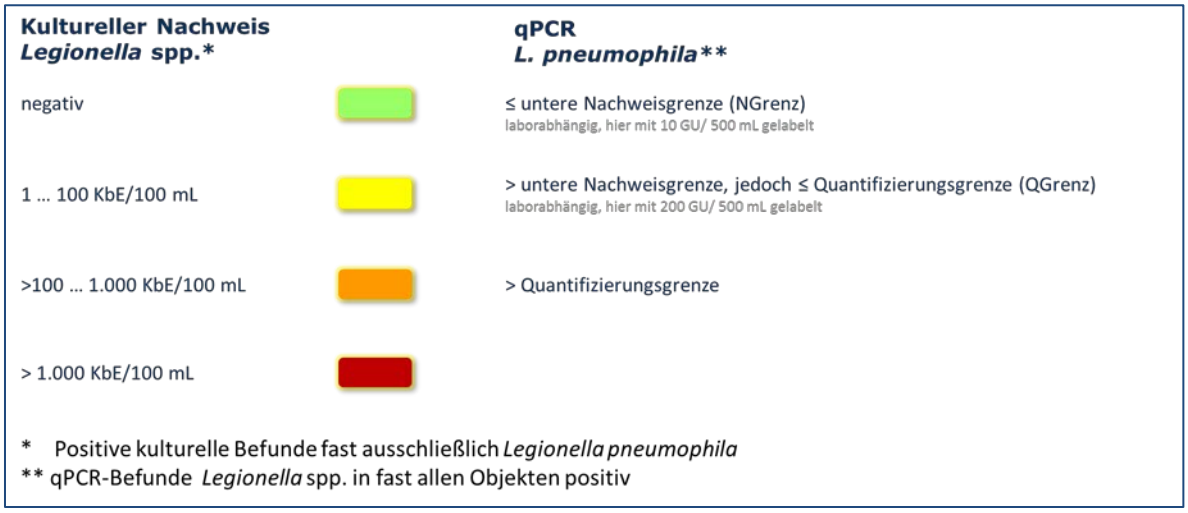


Abb. 4-10 Auswertung Trinkwasserhygiene – Farbkodierung nach Befunden

In den folgenden Abschnitten werden nicht nur globale Sichten auf die Gesamtheit der untersuchten Objekte (bei Objekten mit quartalsweiser Beprobung nur jeweils erste Probenahme herangezogen) hinsichtlich der trinkwasserhygienischen Befunde erstellt, sondern auch anhand der Erkenntnisse aus den thermohydraulischen Messungen sowie den Temperaturmessungen bei den Probenahmen Zusammenhänge abgeleitet und mit ausgewählten weiteren Parametern überlagert.

Bei der Beurteilung von positiven Befunden erweist es sich als hilfreich, die mit [Exner11] eingeführte und bereits in [Rühling12] mit Erfolg angewandte Methodik der Zuordnung zu Klassen der Kontamination zu übernehmen. Tab. 4-3 zeigt die Zuordnung der im Projekt entnommen Proben zu den vier Klassen. Wie bereits in Abb. 2-1 eingeführt, werden dabei die Klassen 2 und 3 übergeordnet zur Gruppe der systemischen Kontamination zusammengefasst.

Tab. 4-3 Klassen der Kontamination und Zuordnung Probenahmen

Nr.	Kategorie	Probe-nahme	Probenahmestelle
1	Kontamination aus zentraler Wasserversorgung	2. L	TWK am Hauseintritt/HEL
2	Zentrale systemische Kontamination der Trinkwasser-Installation	2. L	TWK am Eintritt in den TWE, TWW am Austritt TWE, TWZ am Eintritt TWE
3	Teilzentrale Kontamination	5. L	TWW und TWK peripher
4	Dezentrale Kontamination	2. L	TWW peripher

4.3.2 Trinkwasserhygienische Befunde

Ergebnisse Kulturverfahren

Als erste wichtige Auswertung wird eine Zuordnung der Feldobjekte entsprechend der kulturellen Befunde vorgenommen. Die Befunde zu *Pseudomonas aeruginosa* war nur in vier Objekten und dort auch nur im peripheren Bereich positiv. Systemische Effekte liegen mithin nicht vor, sodass auf eine weitere statistische Auswertung verzichtet werden

konnte. Alle nachfolgenden Auswertungen beziehen sich dem entsprechend auf *Legionella* spp.

Die Objektzuordnung zur Farbcodierung richtet sich nach dem höchsten kulturellen Befund der jeweiligen Probenserie. Wie in Abb. 4-11 auf der linken Seite dargestellt, haben 75 % der Objekte einen negativen kultureller Befund und 11 % der Objekte einen kulturellen Befund, der über dem technischem Maßnahmewert (> 100 KbE/100 mL) liegt. 89 % der untersuchten Objekte sind als TrinkwV-konform einzustufen. Überdies decken sich die Ergebnisse mit anderen Studien (z. B. [Wricke07, Hentschel11, Rühling12, Völker16, Dilger17]). Auch in der Teilauswahl der MFH für die weitergehende statistische Analyse (N=73) zeigten 25 % der Objekte einen positiven kulturellen Befund (> 0 KbE/100 mL). Insofern sind die im Folgenden erarbeiteten deskriptiven und weiterführenden statistischen Ergebnisse als repräsentativ für den Objektbestand Deutschlands anzusehen.

Wertet man alle 952 Befunde der trinkwasserhygienischen Analysen der 101 Objekte aus (Abb. 4-11 rechts), so ergeben sich nur 2,7 % Überschreitungen des technischen Maßnahmewertes.

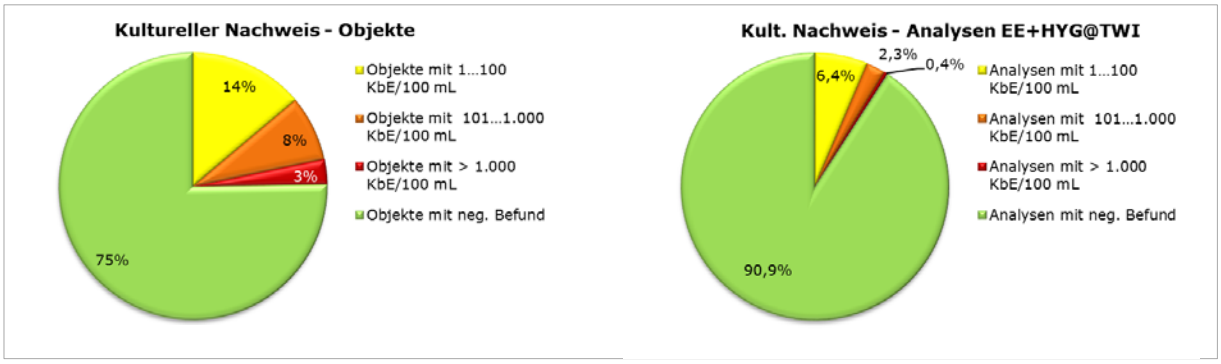


Abb. 4-11 Statistik kulturelle Befunde. links: Objektsicht, rechts: Analysen

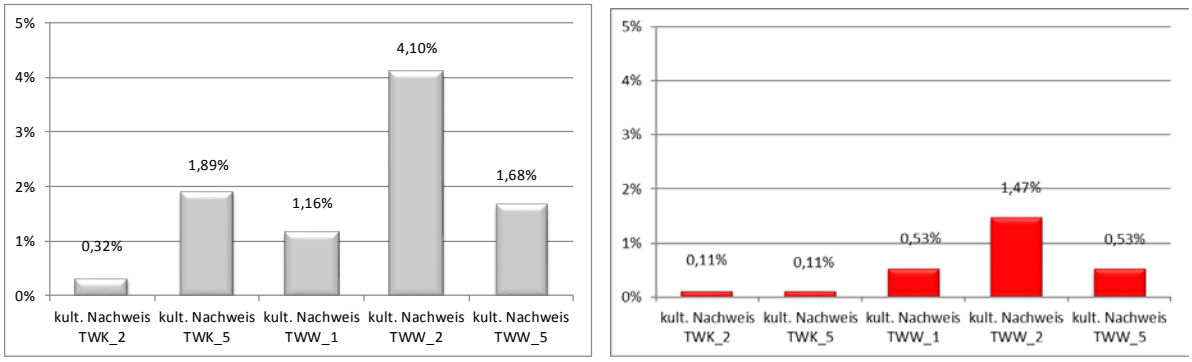


Abb. 4-12 Statistik positiver kultureller Befunde: Prozentuale Anteile an Gesamtanalysen für verschiedene Entnahmevolumina und Unterscheidung TWK/TWW links: > 0 KbE/100 mL, rechts: > 100 KbE/100 mL (90,86 % negative Befunde)

Abb. 4-12 unterteilt die Analysensicht weiter nach den unterschiedlichen Entnahmevolumina. So liegt der prozentual niedrigste Anteil an den Gesamtanalysen bei den Entnah-

mestellen des kalten Trinkwassers im 2. Liter (0,32 %). Betrachtet man nur die Analysen, die im 2. Liter TWK genommen wurden (Abb. 4-13), so zeigt die statistische Auswertung, dass 2,86 % aller Analysen mit dieser Charakteristik einen positiven kulturellen Befund aufweisen. Betrachtet man nur die positiven Analysen, die über dem technischen Maßnahmewert liegen, so reduzieren sich bei allen Sichten die prozentualen Anteile weiter. Generell haben die Proben TWW_2 die höchsten prozentualen Anteile. Jedoch ist zu beachten, dass in beiden Abbildungen bei TWW_2 die Proben zentral und dezentral zusammengefasst wurden, wobei bis auf 9 positive Proben zentral alle anderen dem dezentralen 2. Liter zuzuordnen sind (insgesamt 39 pos. Kulturbefunde; davon 9 zentral und 30 dezentral > 0 KbE/100 mL – s.a. Abschnitt 4.4.2). Alle anderen Probenahmestellen sind eindeutig der Lage im System zugeordnet.

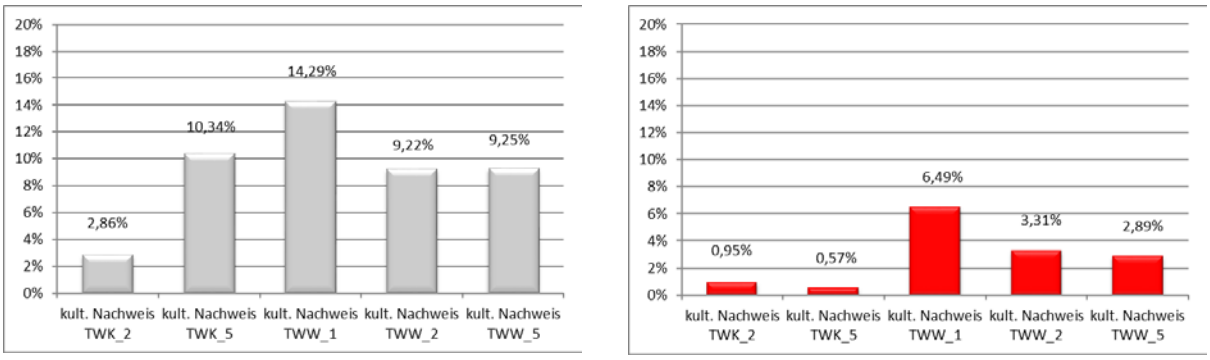


Abb. 4-13 Statistik positiver kultureller Befunde: Prozentuale Anteile an Analysen je Entnahmevolumen TWK bzw. TWW, links: > 0 KbE/100 mL, rechts: > 100 KbE/100 mL

Ergebnisse qPCR Legionella pneumophila

Die zuvor für die Kulturverfahren erläuterte Methode soll nun auf die molekularbiologischen Ergebnisse für *Legionelle pneumophila* angewandt werden.

In 62 % der Objekte ergab sich ein negativer qPCR-Befund, 22 % liegen über der Nachweis-, aber unter der Quantifizierungsgrenze. 16 % der Objekte weisen molekularbiologische Befunde über der Quantifizierungsgrenze auf. Im Vergleich mit Abb. 4-11 (links) wird deutlich, dass die qPCR *L. pneumophila* häufiger positive Ergebnisse liefert als die Kulturmethode, wobei zu beachten ist, dass keine Differenzierung live/dead erfolgte.

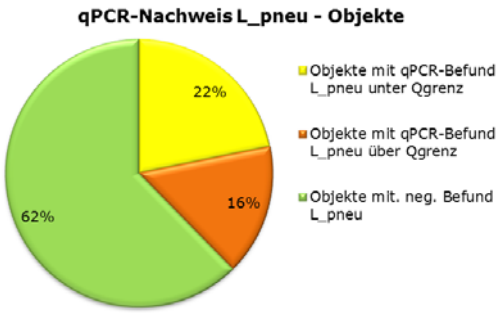


Abb. 4-14 qPCR-Nachweis *Legionella pneumophila* in Objekten

4.3.3 Temperatur Austritt TWE und Trinkwasserhygiene

Auch wenn bereits heute bekannt ist, dass neben den Temperaturen auf der Trinkwarmwasserseite viele Faktoren (Trinkwasserverbrauch - respektive Verweilzeit, hydraulischer Abgleich, Art der Leitungsführung und Wärmedämmung etc.) das Vorkommen von *Legionella* spp. – nachgewiesen über die Kulturverfahren – beeinflussen, so sei hier zunächst der Zusammenhang zwischen dem Temperaturniveau am Ausritt der Trinkwassererwärmer und den verschiedenen im Projekt erhobenen Legionellenbefunden hergestellt.

Tab. 4-4 Zuordnung Objekte zu Temperaturclustern der THM am Austritt TWE

Temp. TWW	Anz. Objekte
> 65 ° C	8
> 60 - 65 °C	32
> 55 - 60 °C	29
> 50 - 55 °C	9
≥ 45 - 50 °C	6
< 45 °C	7

61 Objekte werden mit derzeit gültigem Temperaturniveau am TWE betrieben, wenn man die Objekte mit > 55 - 60 und > 60 - 65 °C am Austritt TWE zusammenfasst. 22 Objekte liegen unterhalb dieses Temperaturniveaus und 8 Objekte sogar noch oberhalb.

Betrachtet man etwas feiner aufgelöst die 80 Mehrfamilienhäuser und Gemeinschaftsunterkünfte sowie ein Studentenwohnheim, so ergibt sich die in Tab. 4-5 zusammengefasste Situation. Positive Legionellenbefunde findet man prozentual ziemlich gleichverteilt über die Objekte im weiten Temperaturbereich von > 50 bis > 65 °C (23,6 % der Objekte in diesem Bereich). Betrachtet man die Befunde oberhalb des technischen Maßnahmewertes, so fallen insbesondere die drei Objekte im Bereich > 61 °C bis > 65 °C auf. Auch wenn die Stichprobenmenge gering ist, so gibt die Auswertung doch erste Anhaltspunkte dafür, dass einfaches Freigeben des Temperaturbereichs Trinkwarmwasser von > 60 °C ohne jegliche Beschränkung zu überdenken ist. Von 6 Objekten ist bekannt, dass mit einer vorbeugenden wöchentlichen Temperaturanhebung auf ca. 70 °C gearbeitet wird. Von diesen Objekten weisen 50 % einen positiven kulturellen Befund auf.

Tab. 4-5 Statistik MFH, Gemeinschaftsunterkunft und Studentenwohnheim (N=80): Temperaturen am Austritt TWE aus den THM und *Legionella* spp.-Befunde kulturell

Temp. TWW Austritt TWE (Median THM)	**Anzahl Objekte im T-Bereich**	**davon Objekte > 0 KbE/ 100 mL**		**davon Objekte > 100 KbE/ 100 mL**	
°C		**Anzahl**	**%**	**Anzahl**	**%**
< 45	1	0	0,0	0	0,0
> 45 - 50	1	0	0,0	0	0,0
> 50 - 55	6	2	33,3	1	16,7
> 55 - 57	11	2	18,2	0	0,0
> 57 - 59	13	3	23,1	0	0,0

Temp. TWW Austritt TWE (Median THM)	Anzahl Objekte im T-Bereich	davon Objekte > 0 KbE/ 100 mL		davon Objekte > 100 KbE/ 100 mL	
°C		Anzahl	%	Anzahl	%
> 59 - 61	15	4	26,7	1	6,7
> 61 - 63	15	3	20,0	2	13,3
> 63 - 65	10	2	20,0	0	0,0
> 65	8	2	25,0	1	12,5
Gesamt	**80**	**18**	22,5	**5**	6,3

4.3.4 Klassen der Kontamination

Für die Objekte mit positivem kulturellem Befund erfolgt in Tab. 4-6 eine Zuordnung zu den Klassen der Kontamination und deren Überlagerung. Hierbei wird in der rechten Spalte nur der im Sinne einer Überschreitung des Maßnahmewertes nach TrinkwV relevante Anteil dargestellt.

Tab. 4-6 Zuordnung der Objekte mit pos. kulturellem Befund zu Klassen der Kontamination.
* 3 Objekte > 1.000 KbE/100 mL dezentral; höchster Befund: 13.000 KbE/100 mL dezentral

	Bezeichnung	> 1 KbE/100 mL	> 100 KbE/100 mL
	Objekte mit pos. Befund	**25**	**11***
-	nur am Hauseintritt pos. Befunde	0	0
-	**nur dezentral pos. Befunde = dezentrale Kontamination**	**3**	**2**
=	**Objekte mit pos. systemischen Befund**	**22**	**9**
-	nur am TWK Eintritt TWE pos. Befunde + nur TWK Eintritt TWE als auch positive Befunde dezentral	2+1	1 + 0
-	nur zentral TWW bzw. TWZ pos. Befunde	0	0
-	nur sowohl zentral TWW bzw. TWZ pos. Befunde als auch pos. Befunde dezentral	1	1
=	**Objekte auch mit teilzentraler Kontamination**	**18**	**7**

Aus dieser Auflistung folgt, dass es zwar auch Objekte mit ausschließlich dezentraler Kontamination gibt (3 bzw. 2), überwiegend jedoch eine systemische Kontamination vorliegt (22 bzw. 9 Objekte). Davon abgezogen werden die verschiedensten Kombinationen von zentraler und dezentraler Kontamination. Damit wird auf die Anzahl der auch teil-

zentral kontaminierten Anlagen geschlossen. In 18 bzw. 7 Objekten (72 % bzw. 64 %) liegen die Probleme also auch im teilzentralen Bereich.

Besonders zu beachten ist, dass in 16 der 25 positiv kulturell getesteten Objekte eine teilzentrale Kontamination im TWK vorliegt (1 Objekt mit Überschreitung techn. Maßnahmewert). In 3 Objekten gibt es sogar nur im dezentralen Bereich TWK eine Kontamination. Im Objekt mit dem höchsten kulturellen Befund von 13.000 KbE/100 mL erfolgt die Trinkwasser-Erwärmung dezentral, also auch der alleinige Übergang zur dezentralen TWE erfordert eine Beachtung der Legionellenproblematik (Leitungsführung TWK, Entnahmehäufigkeit).

4.3.5 „Grüne“ versus „Graue“ Objekte

In aktiver Vorbereitung des ersten Clustermeetings „Statistik“ wurden umfangreiche Vorarbeiten zur statistischen Auswertung der Daten als Überlagerung aus Thermohydraulik-Messergebnissen und Trinkwasserhygiene-Untersuchungen erstellt.

U. a. lag ein Fokus auf der einfachen Visualisierung mittels des schon mehrfach genutzten Ampelsystems für die trinkwasserhygienische Wertung. Dabei muss differenziert werden zwischen Objekten bei denen weder im Kulturverfahren noch in der *L. pneumophila* qPCR positive Befunde ermittelt worden sind (graue Objekte) und Objekten, die nur im Kulturverfahren negative Befunde haben (grüne Objekte). Für graue Objekte bleibt die Frage offen, ob die vorgefundene Thermohydraulik unter anderen System- und Wassereingangsbedingungen ebenfalls gleichartige trinkwasserhygienische Ergebnisse generieren würde. Folgende Intention steht hinter der Farbgebung: angezeigt werden soll keine generelle Kontamination mit Legionellen, sondern eine für das Objekt/die Betriebsweise relevante Kontamination der TWI und somit die Eignung des Gebäudes und der TWI an sich.

Noch einmal zur Verdeutlichung:

- Grau: Objekte mit Werten unterhalb der qPCR-Nachweisgrenze für *L. pneumophila* liegen in einem Graubereich und sind somit für das Projekt nur bedingt bewertbar.
- Grün: Gebäude mit Werten oberhalb der qPCR-Nachweisgrenze weisen zwar eine Kontamination auf, aber in einem unbedenklichen Bereich, also liegt „alles noch im grünen Bereich“.
- Gelb, Orange, Rot: Eingruppierung nach den positiven kulturellen Befunden (≤ 100, 101 - 1.000, > 1.000 KbE/100 ml)

Beispielhaft erfolgte eine statistische Auswertung der Daten der Probenahme in Überlagerung mit den Zeitanteilen der Temperaturcluster aus den THM. Hier sollte in einer gemeinsamen Darstellung für bestimmte Objektgruppen geschaut werden, ob die Zeitanteile im Bereich des optimalen Legionellenwachstums von > 25 bis 45 °C eine gewisse Signifikanz zeigen.

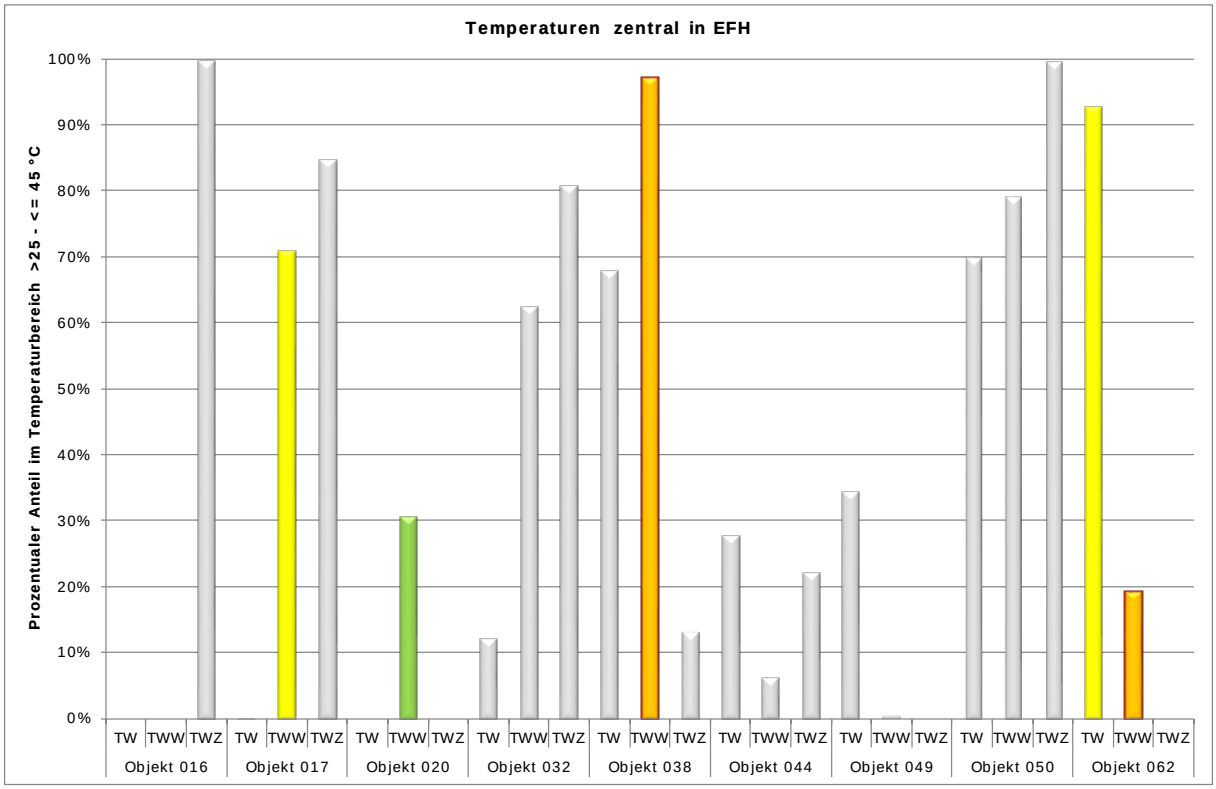


Abb. 4-15 Statistik Einfamilienhäuser getrennt nach den TWI-Teilen TWK=TW, TWW und TWZ zu Anteilen der THM-Messungen im optimalen Bereich des Legionellenwachstums, überlagert mit Farbkodierung höchster Befund

Die Ergebnisse zur Gruppe der Einfamilienhäuser werden in Abb. 4-15 dargestellt. Hier scheinen selbst hohe Zeitanteile im Wachstumsbereich – egal welcher Teil der Installation – nicht immer kritisch. Erst die Kombination mit der Übersicht aller Temperaturcluster in Abb. 4-16 gibt etwas mehr Aufschluss, warum manche Objekte „grau“ sind. Bei Objekt 016 wird klar, dass TWK und TWW Temperaturen deutlich unter bzw. über dem optimalen Legionellenwachstum vorherrschen, sodass offenkundig die Zeiten in der Zirkulation abgefedert werden. Bei Objekt 050 hingegen gilt dies nicht. Objekt 062 als „rotes“ Objekt ist von den TWK-seitigen Temperaturen äußerst kritisch, Objekt 038 unter extrem tiefe TWW-Temperaturen einzustufen. Warum Objekt 050 keinen positiven Kulturbefund aufweist, kann jedoch auch damit nicht erklärt werden.

Abb. 4-17 zeigt für eine Auswahl von Mehrfamilienhäusern ein ebenso heterogenes Ergebnisbild. Die Objekte 076 und 080 mit nur ca. 47 °C am Austritt TWW sind „grüne“ Objekte, während Objekt 086 mit ca. 59 °C mittlerer TWW-Temperatur am Austritt TWE einen positiven kulturellen Befund aufweist.

Dieses heterogene Bild untermauert auch nochmals die Abb. 4-18. Hier zeigt sich nur bei den kulturellen Befunden im Bereich von 101 bis 1.000 KbE/100 mL ein höherer prozentualer Anteil bei Anlagen mit Temperaturen > 65 °C am Austritt TWE. Hier ist die Stichprobenanzahl allerdings mit 3 extrem gering.

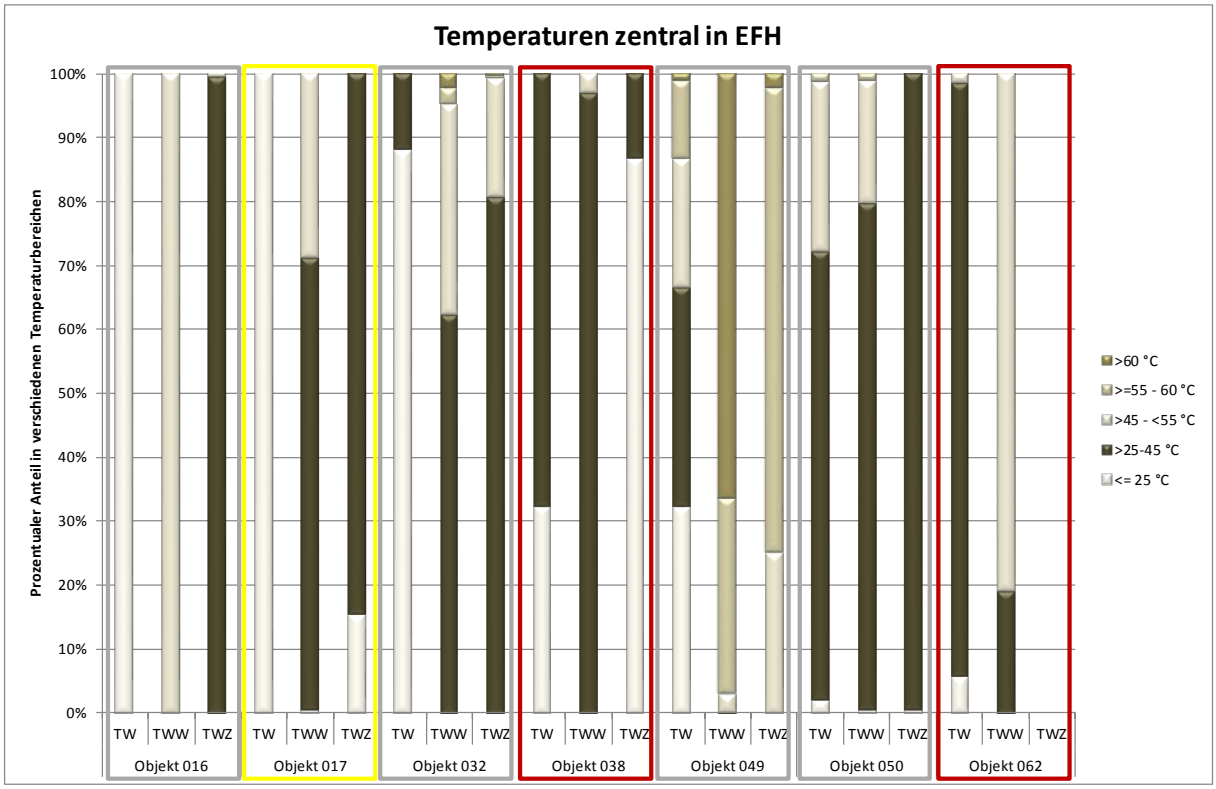


Abb. 4-16 Statistik der Einfamilienhäuser: Zeitcluster der Temperaturen der THM-Messungen TWK=TW, TWW und TWZ am TWE; Anwendung „graue/“grüne“ Objekte und der Ampel

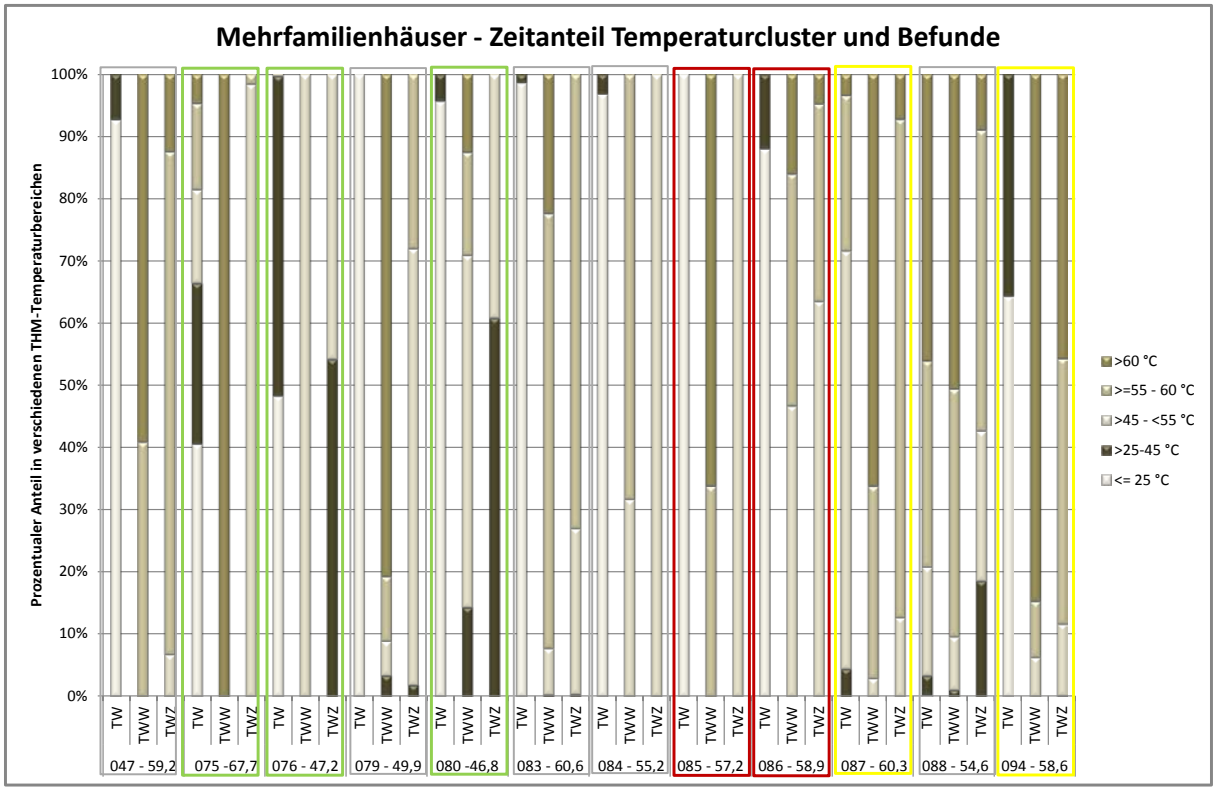


Abb. 4-17 Statistik ausgewählter Mehrfamilienhäuser: Zeitcluster der Temperaturen der THM-Messungen TWK=TW, TWW und TWZ am TWE; Anwendung der Ampel (x-Achse: Objektnummer – Mittelwert der TWW-Temperatur am Austritt TWE in °C)

4.3.6 Weitere ausgewählte Erkenntnisse

Einfluss Methoden Zirkulationsabgleich

Ein Untersuchungsgegenstand war auch die Herausarbeitung eines eventuell positiven Einflusses beim Einsatz neuer Methoden des Zirkulationsabgleichs. Es kann über den einfachen Vergleich der prozentualen Anteile positiver kultureller Befunde der Objekte mit und ohne Zirkulationsabgleich kein klarer Vorteil herausgearbeitet werden. Dies verdeutlicht auch die Darstellung in Abb. 4-18.

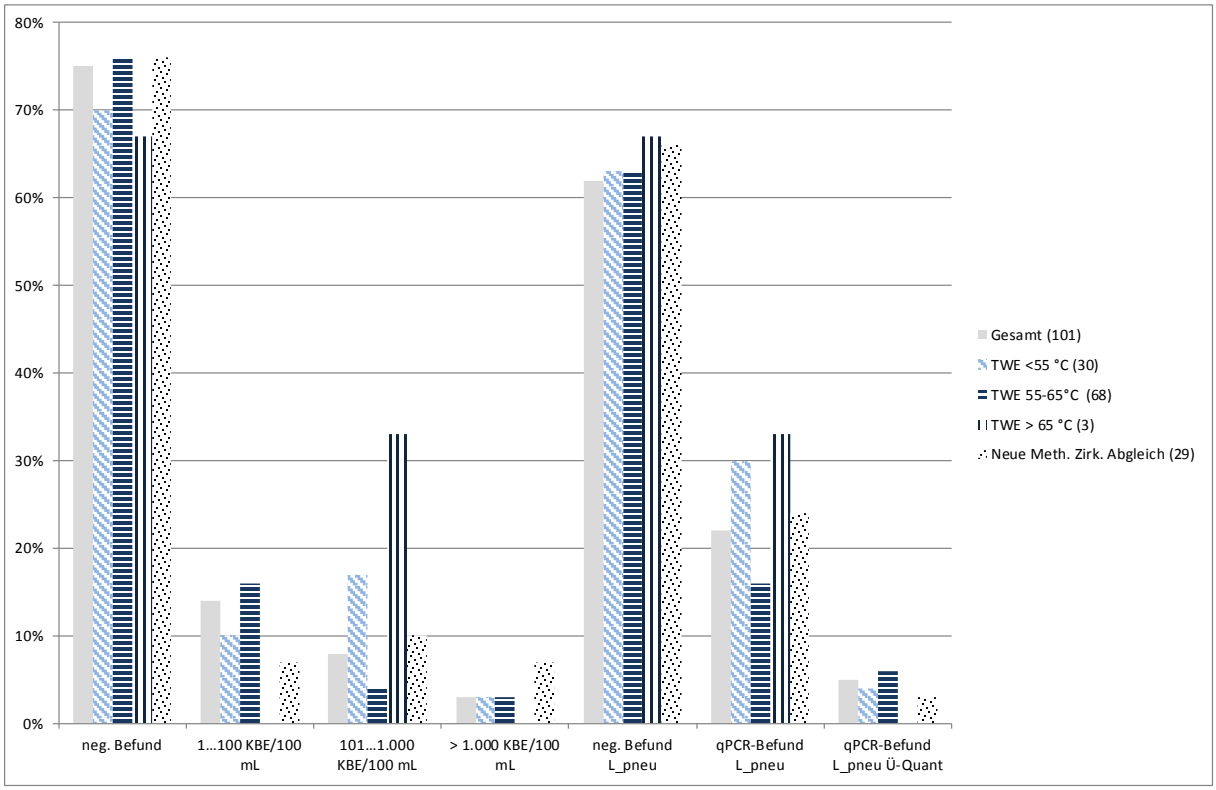


Abb. 4-18 Alle Objekte: Prozentuale Anteile in den einzelnen Befundgruppen *Legionella* spp. kulturell und qPCR *L. pneumophila* sowie Differenzierung nach Temperaturclustern TWW-Austritt TWE und neue Methoden Zirkulationsabgleich

Aussagekraft Probenentnahme TWW 2. Liter peripher und Konstant-Temperatur

Weiterhin galt es die Aussagekraft des 2. Liters der Probenentnahme für orientierende, systemische Untersuchungen nach TrinkwV zu hinterfragen. Nach den a.a.R.d.T. dürfen die endständigen, nicht zirkulierenden Leitungen der Trinkwarmwasserinstallation ein Inhaltsvolumen 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. Temperaturen wurden sogar für den 1., 2., 5. und 10. Liter TWW gemessen. Wie beispielhaft Abb. 4-9 zeigt, ist auf der TWW-Seite die Probenahmetemperatur im ersten Liter am geringsten, steigt im 2. Liter leicht und bis zum 5. Liter signifikant an, dann nur noch geringfügig bis zum 10. Liter. Dies wird durch die statistische Auswertung in Abb. 4-19 untermauert. Während der Medianwert der Temperaturdifferenz zwischen 2. und 1. Liter 9,6 K beträgt und der zwischen 5. und 2. immerhin noch 7,3 K, sind es bis zum 10. Liter nur noch 1,5 K.

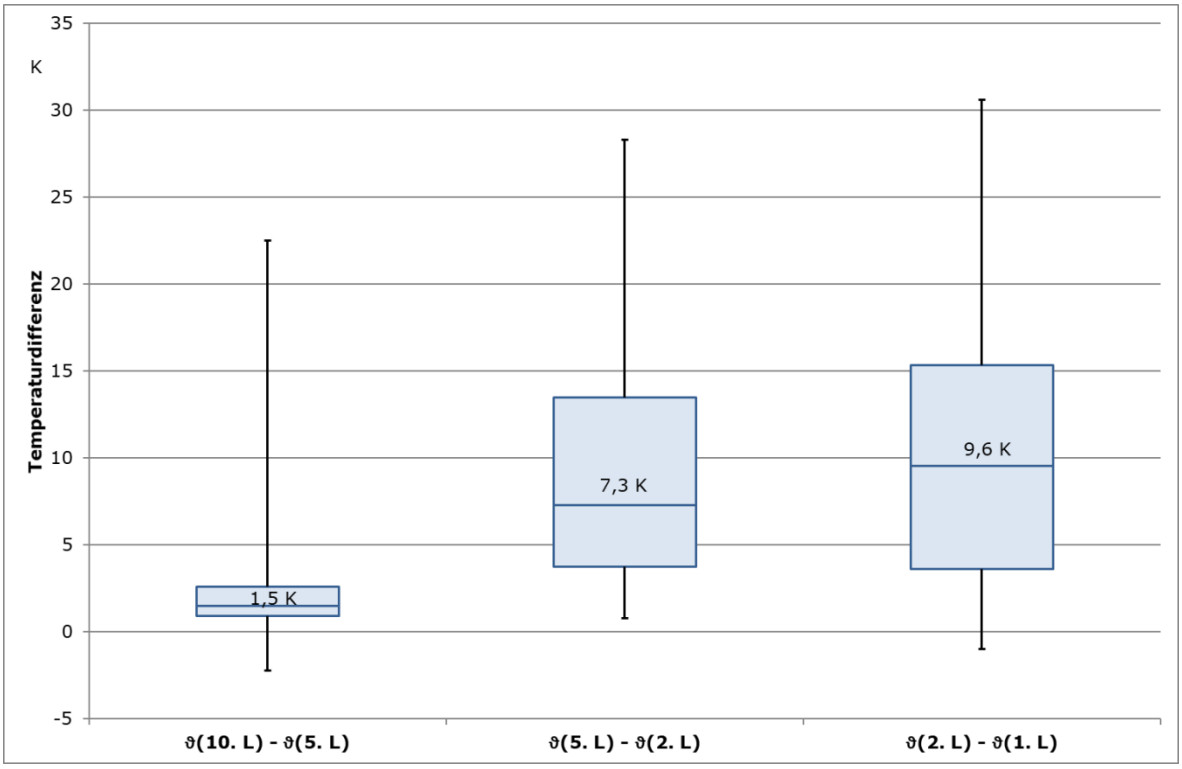


Abb. 4-19 Temperaturdifferenzen zwischen den unterschiedlichen Litern der peripheren Probenahme

Vergleicht man nun noch die Temperaturen der Peripheren Probenahme mit den der zentralen Probenahme am Austritt TWE ergibt sich folgendes (s. a. Abb. 4-20):

- 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 weichen aber dezentral nur noch um 5,3 K ab.

Der 10. Liter bildet die Temperaturen der Zentrale noch genauer ab, weil hier die Abweichungen noch geringer ausfallen, da instationäre Einflüsse im endständigen, nicht zirkulierenden Bereich (z. B. kapazitive Effekte) dann weitgehend abgeklungen sind und nun die Wärmeverluste auf dem Transportweg wirken.

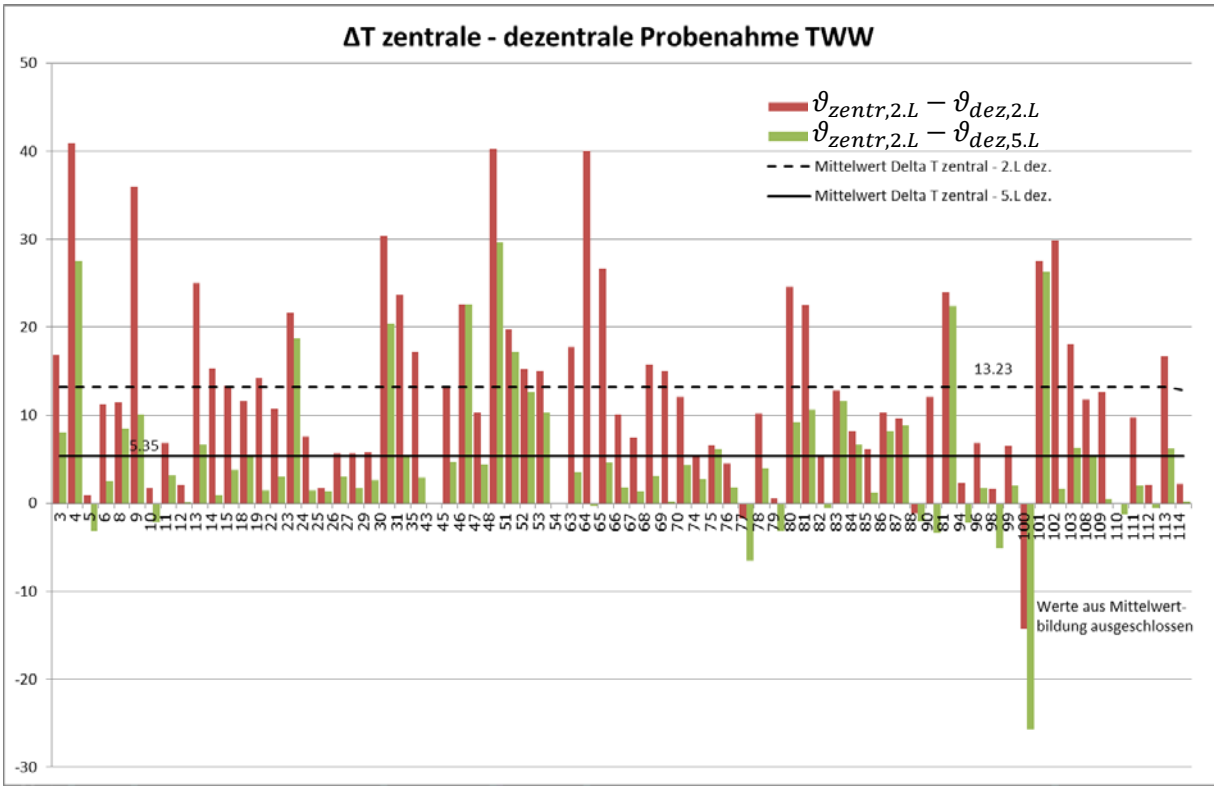


Abb. 4-20 Temperaturdifferenzen zwischen Messwerten am Probenahmetag zwischen: 2. und 5. Liter dezentral und dem 2. Liter zentral am Austritt TWE

Wie in 4.3.4 gezeigt wurde, ist teilzentrale Kontamination – hier bestimmt auf Basis der Ergebnisse des 5. Liters in der Peripherie - 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.

4.4 Weiterführende statistische Auswertung für Einmal-Beprobung

4.4.1 Methodisches Vorgehen

Alle Berechnungen wurden, soweit machbar und sinnvoll, mit folgenden Differenzierungen des TWI-Teils (TWK, TWW), des Liters und der Entnahmestelle der Probe (Abb. 4-21), sowie für die drei Parameter

1) *Legionella* spp. (über das Kulturverfahren nach TrinkwV ermittelt, welches bevorzugt *Legionella pneumophila* detektiert),
2) *Legionella pneumophila* (spezifische Detektion der Gene mittels qPCR) sowie
3) die im Durchflusszytometer bestimmte Gesamtzellzahl durchgeführt.

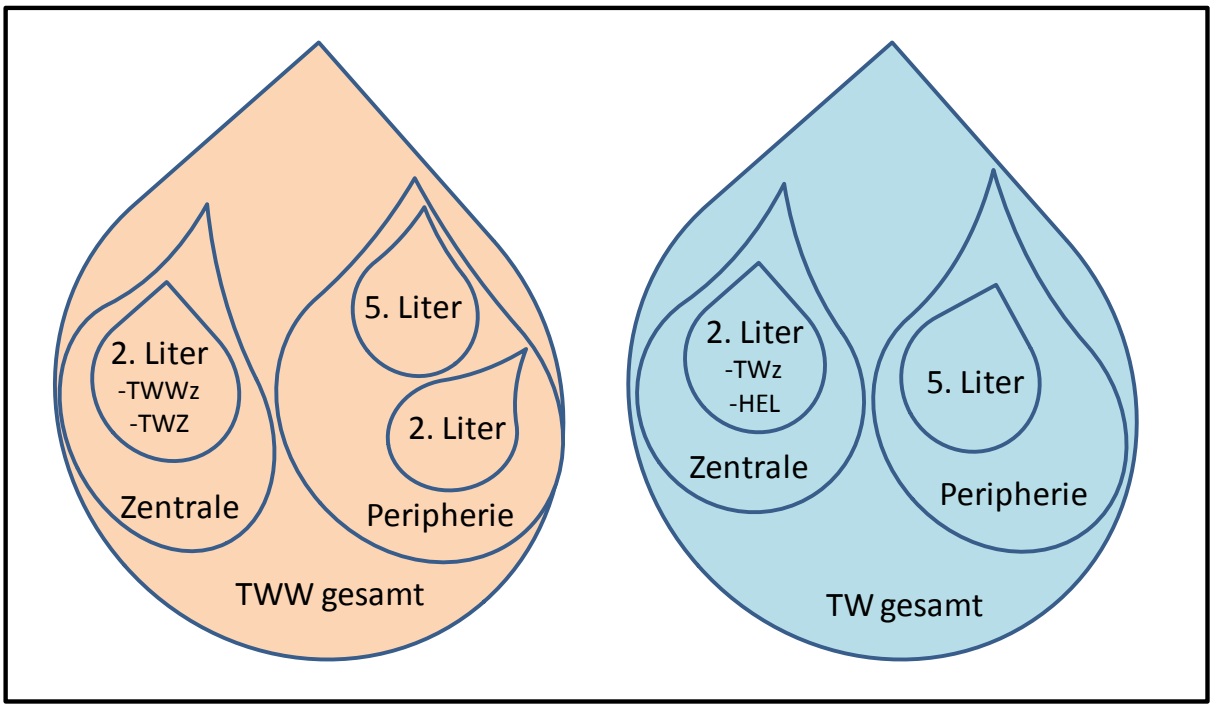


Abb. 4-21 Übersicht der für die Berechnungen genutzten Teilstichproben, differenziert nach TWI-Teil (TW=TWK/TWW), des Liters und der Entnahmestelle

In diesem Abschnitt wird der Begriff „Kontamination“ für Proben verwendet, die sich im Kulturverfahren positiv zeigten (> 0 KbE/100 mL) bzw. für qPCR-Proben, in denen *Legionella pneumophila*-Gene gefunden wurden (d. h. Werte oberhalb der Nachweisgrenze, welche für die Datenbank einheitlich definiert wurde: 200 GU/500 mL). Eine genauere Betrachtung der Teilstichprobe im Kulturverfahren mit Konzentrationen oberhalb des technischen Maßnahmenwertes nach TrinkwV von 100 KbE/100 mL war für die weitergehenden statistischen Betrachtungen nicht zielführend, da die Anzahl der diesen Wert überschreitenden Proben in der untersuchten Gruppe der Mehrfamilienhäuser zu gering ist (N = 7). **Die Erkenntnisse aus diesem Abschnitt bieten insofern nur eingeschränkt Erkenntnisse für das Regelwerk (TrinkwV bzw. DVGW W 551), da dort der technische Maßnahmenwert von > 100 KbE/100 mL bzw. ≥ 100 KbE/100 mL gilt.**

Es werden im Folgenden nur die statistisch signifikanten und insofern interessanten Ergebnisse dargestellt. Berechnungen ohne statistisch aussagefähige Ergebnisse werden vernachlässigt, da deren Darstellungen den Rahmen des vorliegenden Berichtes sprengen würden. Dies betrifft neben einzelnen zum Vergleich herangezogenen Temperatur-Mikroorganismen-Konzentrationen oder Korrelationen der Mikrobiologie zu verschiedenen Variablen der Haustechnik z. B. die Durchführung von ROC-Analysen mit Temperaturparametern zur Bestimmung einer optimalen Grenztemperatur. Diese lieferte keine brauchbaren Ergebnisse.

<u>Prüfung möglicher Ergebnis-Verzerrungen durch unterschiedliche Anzahl beprobter peripherer Entnahmestellen</u>

Bei der Datenexploration wurde zunächst die Verteilung der Anzahl von beprobten Entnahmestellen in der Peripherie je Objekt geprüft. Dem zugrunde lag die Hypothese, dass

große Gebäude überdurchschnittlich oft beprobt wurden und somit die Ergebnisse bei Vorliegen einer Kontamination verzerrt werden könnten. In der folgenden Abbildung (Abb. 4-22) sind die 73 untersuchten und in die weitergehende Analyse einbezogenen Gebäude nach Anzahl der Entnahmestellen in der Peripherie klassifiziert und hinsichtlich einer Kontamination dargestellt.

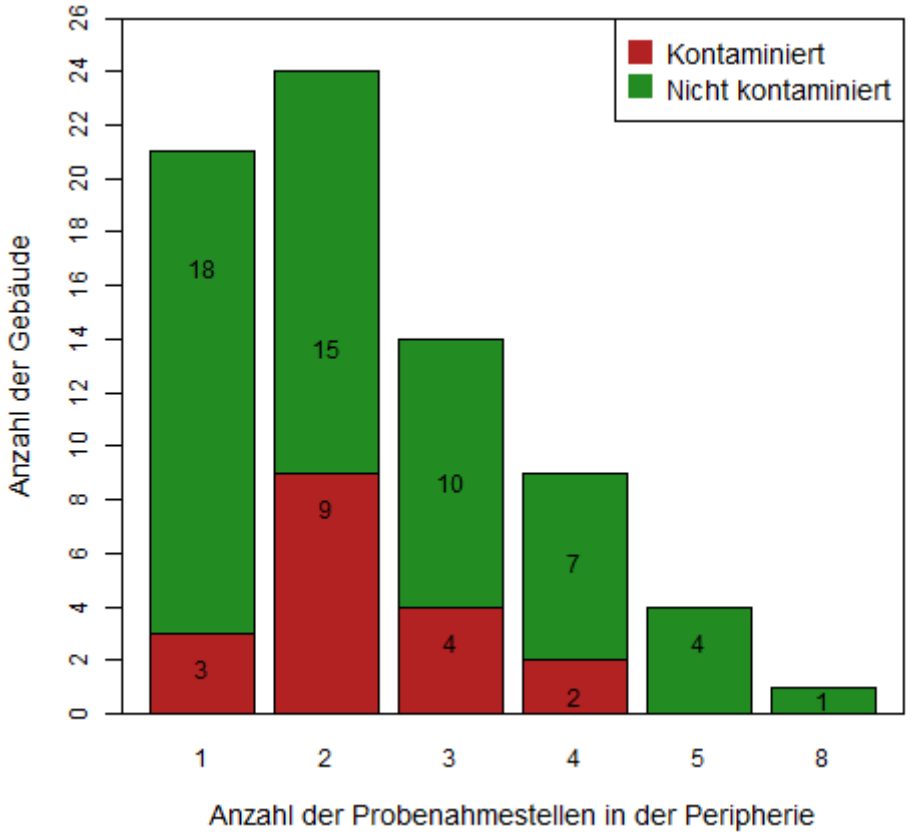


Abb. 4-22 Anzahl der Entnahmestellen in einem Objekt getrennt nach kontaminierten und nicht kontaminierten Proben.

Die Graphik zeigt, dass ein Drittel der Gebäude zwei Entnahmestellen in der Peripherie hatte, maximal wies ein Gebäude acht Entnahmestellen auf. Erkennbar ist auch, dass sich die fünf Objekte mit den meisten peripheren Entnahmestellen kulturell als nicht kontaminiert erwiesen. Eine Verzerrung der Ergebnisse durch die Anzahl beprobter Entnahmestellen kann demnach nicht bestätigt werden. Eine weitere Restriktion bzgl. der statistischen Auswertung der Objekte ist daher nicht notwendig.

4.4.2 Deskriptive Datenexploration

Objekte

Von den insgesamt 101 im Rahmen des Screenings beprobten Objekten entsprachen 78 Gebäude der im Fokus stehenden Gebäudeart „Mehrfamilienhaus“. Zusätzlich wurden noch drei Gemeinschaftsunterkünfte sowie ein Studentenwohnheim aus den Felduntersuchungen mit in die Berechnungen einbezogen, da diese ebenfalls mit Mehrfamilienhäusern vergleichbare, große Gebäude mit Wohnnutzung sind. Von diesen 82 Gebäuden

mussten allerdings neun Gebäude aus verschiedenen Gründen aus den Berechnungen ausgeschlossen werden:

- Sechs Gebäude hatten eine dezentrale anstatt einer zentralen Trinkwassererwärmung und
- drei weitere Gebäude wiesen einen unklaren Status bzgl. thermischer Desinfektion auf.

Somit konnten insgesamt 73 Objekte der Felduntersuchungen in die statistische Analyse einbezogen werden. In 18 dieser Gebäude (25 %) wurden mindestens einmal Legionellen nachgewiesen. In fünf Gebäuden (7 %) lag mit >100 KbE/100 mL eine Kontamination oberhalb des technischen Maßnahmenwerts vor.

Proben und Entnahmestellen

In den 73 Gebäuden wurden an 389 Entnahmestellen (213 in der Zentrale, 175 in der Peripherie) insgesamt 640 Proben genommen, davon 213 Proben in der Zentrale und 427 Proben in der Peripherie. Eine Aufteilung der Proben auf die verschiedenen Wasserarten und Probenahmestellen findet sich in Tab. 4-7 und Tab. 4-8.

Tab. 4-7 Abkürzungen der für die Berechnungen genutzte Teilstichproben, differenziert nach der Wasserart, des Liters und der Entnahmestelle; getrennt nach Trinkwarmwasser (rot schattiert) und Trinkwasser kalt (blau schattiert).

Kürzel	Proben-Entnahmestelle	
TWW Gesamt	Trinkwarmwasser aller Proben gesamt	**Trinkwarmwasser**
TWW Zentral, davon	Trinkwarmwasser aus der Zentrale (nur 2. Liter beprobt)	
TWWz (Vorlauf)	Trinkwarmwasser zentral, Vorlauf Zirkulation (= Abgang TWE)	
TWZ (Rücklauf)	Trinkarmwasser zentral, Rücklauf Zirkulation (=Rücklauf TWE)	
TWW Peripher, davon	Trinkarmwasser aus der Peripher, Proben gesamt	
TWW P. 2. Liter	Trinkarmwasser Peripherie, Proben nur 2. Liter	
TWW P. 5. Liter	Trinkarmwasser Peripherie, Proben nur 5. Liter	
TW Gesamt	Trinkwasser (kalt) aller Proben gesamt	**Trinkwasser (kalt)**
TW Zentral, davon	Trinkwasser (kalt) aus der Zentrale (nur 2. Liter beprobt)	
TWz (Zulauf)	Trinkwasser (kalt) zentral, Zulauf zum TWE	
HEL	Trinkwasser (kalt) zentral, an der Hauseingangsleitung	
TW Peripher	Trinkwasser (kalt) aus der Peripher (nur 5. Liter beprobt)	

Tab. 4-8 Anzahl an positiven und negativen Proben getrennt nach den mikrobiologischen Parametern und der Entnahmestelle.

Teil-Stichprobe	*Legionella* spp. (Kultur)				*L. pneumophila* (qPCR)			
	positiv in 100 mL		> 100 KbE/100 mL		positiv in 500 mL		≥ 2500 GU/500 mL	
	Nein	Ja	Nein	Ja	Nein	Ja	Nein	Ja
TWW Gesamt	407	31	432	6	303	90	377	16
TWW Zentral, davon	133	4	137	0	109	28	132	5
TWWz (Vorlauf)	67	2	69	0	55	14	66	3
TWZ (Rücklauf)	66	2	68	0	54	14	66	2
TWW Peripher, davon	274	27	295	6	194	62	245	11
TWW P. 2. Liter	157	18	170	5	99	33	126	6
TWW P. 5. Liter	117	9	125	1	95	29	119	5
TW Gesamt	187	15	201	1	175	27	198	4
TW Zentral, davon	74	2	75	1	69	7	74	2
TWz (Zulauf)	37	2	38	1	35	4	38	1
HEL	37	0	37	0	34	3	36	1
TW Peripher	113	13	126	0	106	20	124	2

Von den 389 Entnahmestellen wurden an insgesamt 29 (7 %, 6 Zentrale, 23 Periphere) mindestens einmal kulturell Legionellen nachgewiesen. Bezogen auf die 640 Proben waren dies 46 Proben (7 %, 6 Zentrale, 40 Periphere).

In der Teilauswahl der MFH für die weitergehende statistische Analyse (N=73) waren bei 25 % der Objekte kulturell *Legionella* spp. zu finden (>0 KbE/100 mL). 7 % der inkludierten Proben wiesen kulturelle Befunde auf, davon 1,4 % über dem technischen Maßnahmenwert (>100 KbE/100 mL). Dies entspricht wie auch der Kontaminationsstatus aller 101 Screening-Objekte in etwa dem Ergebnis anderer Studien (z. B. [Wricke07, Hentschel11, Rühling12, Völker16, Dilger17]). Insofern sind die Untersuchungen des Projektes als repräsentativ anzusehen.

Variablen

Die Proben wurden nicht nur hinsichtlich der in Kapitel 2 genannten hygienisch-mikrobiologischen Parameter statistisch analysiert, sondern auch zu diversen erhobenen thermo-hydraulischen und technischen Parametern in Beziehung gesetzt.

Von den mehr als 160 erhobenen Variablen konnte aufgrund ihrer Vollständigkeit oder Merkmalsausprägung mit 82 Parametern nur etwa die Hälfte sinnvoll in die statistische Analyse einbezogen werden (vgl. Tab. 4-9). Es handelt sich dabei um nominale, dichotome sowie metrische Variablen, die dementsprechend mit unterschiedlichen Ansätzen ausgewertet wurden.

Parameter, die deutlich weniger als ein Viertel des Datenkollektivs repräsentieren, wurden nicht zuletzt wegen der Heterogenität der Objekte als nicht aussagekräftig für eine weitergehende statistische Auswertung gesehen. Es wurden 47 Variablen aus den Analysen ausgeschlossen, weil sie mit weniger als 24 Einträgen in der Datenbank ein zu kleines N besaßen (Tab. 4-10). Außerdem gab es 20 Variablen, bei denen zwar ausreichend viele Informationen vorlagen, die aber zu einseitige Merkmalsausprägungen (bei dichotomen Variablen Werte-Cluster bei 0 bzw. 1) aufwiesen und somit ebenfalls nicht in die Berechnungen einfließen konnten (Tab. 4-11).

Neben vielen technisch ausgerichteten Variablen, die im Rahmen der Begehung erhoben wurden, betrifft dies auch den mikrobiologischen Parameter *Pseudomonas aeruginosa*, da von insgesamt 802 Wasserproben nur acht Proben aus drei verschiedenen Entnahmehähnen positiv ausfielen (vgl. Tab. 4-12). Andererseits fielen die Ergebnisse für das Vorkommen von *Legionella*-Genen auf Gattungsebene mittels qPCR, die in den ersten 30 untersuchten Objekten durchgeführt wurde, bei 327 Proben bis auf 3 allesamt positiv aus (vgl. Tab. 4-13). Unabhängig von der Probenart fällt die Konzentrationsverteilung dabei in allen Fällen sehr ähnlich aus. Dies ist auf die unterschiedliche Ökologie der derzeit bekannten 59 Arten von Legionellen [Mercante 2015] zurückzuführen, die offenbar als Träger des konservierten 5S-Zielgens (Kapitel 2.4.2.2) mehrheitlich detektiert werden können. Eine Indikatorfunktion hinsichtlich Kontamination gesundheitsrelevanter Legionellen lässt sich hieraus nicht ableiten. Zur weiteren Charakterisierung der möglichen Arten wären beispielsweise Metagenomanalysen notwendig. Aus diesem Grund wurde auch die Konzentration von *Legionella* spp. (qPCR) nicht in die weiterführende statistische Analyse einbezogen. In der untenstehenden Tabelle sind die Kennzahlen der Verteilung von *Legionella* spp. zu finden.

Schließlich wurden noch einige wenige Variablen aufgrund von ungenügender Informationstiefe, fehlendem Kausalzusammenhang (z. B. allgemeine Liegenschaftsinformationen) oder nicht dichotom bzw. ordinal recodierbare Variablen, z. B. mit Zeichenfolge, aus der Analyse ausgeschlossen (Tab. 4-9). Andererseits wurden anhand der thermohydraulischen Messdaten zusätzliche Variablen berechnet und in die Analysen einbezogen.

Tab. 4-9 Variablen, die in die statistische Analyse einbezogen werden konnten

Variable	Wertelabel
1. t_TW_2	Temperatur bei Probenahme TW 2. Liter
2. t_TW_5	Temperatur bei Probenahme TW 5. Liter
3. t_TW_10	Temperatur TW im 10. Liter
4. t_TWW_1	Temperatur bei Probenahme TWW 1. Liter
5. t_TWW_2	Temperatur bei Probenahme TWW 2. Liter
6. t_TWW_5	Temperatur bei Probenahme TWW 5. Liter
7. t_TWW_10	Temperatur TWW im 10. Liter
8. L_spp_TW_5	qPCR *Legionella* spp. TW 5. Liter
9. L_spp_TW_2	qPCR *Legionella* spp. TW 2. Liter
10. L_spp_TWW_2	qPCR *Legionella* spp. TWW 2. Liter

Variable	Wertelabel
11. L_spp_TWW_5	qPCR *Legionella* spp. TWW 5. Liter
12. L_pneu_TW_5	qPCR *L. pneumophila* TW 5. Liter
13. L_pneu_TW_2	qPCR *L. pneumophila* TW 2. Liter
14. L_pneu_TWW_2	qPCR *L. pneumophila* TWW 2. Liter
15. L_pneu_TWW_5	qPCR *L. pneumophila* TWW 5. Liter
16. KbE_TW_2_UBA	Kultur Legionellen TW 2. Liter, UBA 2012
17. KbE_TW_5_UBA	Kultur Legionellen TW 5. Liter, UBA 2012
18. KbE_TWW_2_UBA	Kultur Legionellen TWW 2. Liter, UBA 2012
19. KbE_TWW_5_UBA	Kultur Legionellen TWW 5. Liter, UBA 2012
20. GZZ_TW_2	Durchflusszytometrie GZZ TW 2. L
21. GZZ_TW_5	Durchflusszytometrie GZZ TW 5. L
22. GZZ_TWW_2	Durchflusszytometrie GZZ TWW 2. L
23. GZZ_TWW_5	Durchflusszytometrie GZZ TWW 5. L
24. t_aussen	Außenlufttemperatur bei Probenahme
25. Datum_PN_mon	Monat der Probenahme
26. Anz_Whg	Anzahl der Wohnungen im MFH
27. Baujahr_Geb	Baujahr des Gebäudes
28. Baujahr_TWE	Baujahr TWE
29. Sanierung	letzte Sanierung/Umbaumaßnahme (Jahr)
30. V_Sp	Inhalt Trinkwasserspeicher gesamt (Liter)
31. Baujahr_Sp	Baujahr des Speichers
32. Anz_Steigstr	Anzahl der TWW-Steigstränge
33. Anz_Zirkstr	Anzahl der Zirkulationsteilstränge
34. Anz_Partikelf	Anzahl Partikelfilter
35. Anz_Duschen	Anzahl der Duschen
36. O_char	Objektart
37. PS_Nr	Probenahmestellen-Nr.
38. PS_Nr_2	Probenahmestellennummer kodiert
39. PS_Nr_3	Probenahmestelle dichotom (zentral/peripher)
40. Raum	Ort der Probenahme
41. Platz	Punkt der Probenahme
42. Armatur	Art der Armatur an der Probenahmestelle
43. TWW_Grenz	TWW-Temperaturbegrenzung
44. Zust_Zirk	Aktueller Zustand Zirkulation bei PN
45. W551_Begehg	Einteilung nach W551 Begehung
46. Zirk	Zirkulation

Variable	Wertelabel
47. TWE_Art	Art der Trinkwassererwärmung
48. GLT	GLT-Überwachung
49. Art_Filter	Art der Filter
50. Art_Partikelf	Art Partikelfilter
51. Legio_praev	technische Legionellenprävention
52. Heizbef	Heizungsbefüllung mit Nachspeisung aus dem TW-System
53. Abgl_Zirk	Art des hydraulischen Abgleichs der Zirkulation
54. Stagnation	Stagnation an der PNS
55. untersch_Alter	Gebäudeteile bestehen aus untersch. Altersstufen
56. verz_Stahl	Verbautes Rohrmaterial: Verzinkter Stahl
57. Edelstahl	Verbautes Rohrmaterial: Edelstahl
58. Cu	Verbautes Rohrmaterial: Kupfer
59. Kunststoff	Verbautes Rohrmaterial: Kunststoffe
60. Wasser_Oeff	Wasser für die Öffentlichkeit
61. Nutzungsunterbr	Regelmäßige Nutzungsunterbrechung
62. Unterbr_kompl_teil	Nutzungsunterbrechung komplett oder eines Teils
63. Nutzg_Straenge	Vorhandensein nicht genutzter Stränge
64. leere_Whg	Leer stehende Wohnung oder Betriebseinheit
65. Ent_selten	Selten genutzte Entnahmestellen vorhanden
66. wasserspar_Arm	Wassersparende Armaturen vorhanden
67. Spuelplan	Umsetzung aktueller Spülpläne
68. TWW_gering	TWW-Temperatur zu gering bzw. Erreichen der T-Konstant im TWW dauert zu lange
69. Probleme	Probleme/Beschwerden bekannt
70. 3_Liter_Stich	Alle Stichleitungen < 3 Liter
71. DurchStroem_Memb	Membranausdehnungsgefäß bei TWW durchströmt
72. Membr	Membranausdehnungsgefäß vorhanden
73. Druckmin	Druckminderer vorhanden
74. Druckerh	Druckerhöhung vorhanden
75. Enthaert	Enthärtungsanlage vorhanden
76. therm_desi	Thermische Desinfektion vorhanden
77. Regenwasser	Regen-/Dachablaufwasser
78. Grauwasser	Grauwassernutzung vorhanden
79. Stag_Probl	Hinweis auf Stagnationsprobleme
80. offen_Schlauch	offen hängende Schlauchverbindungen
81. K-5-R	5-K-Regel eingehalten

Tab. 4-10 Variablen, die wegen zu kleinem N (N < 24) nicht in die statistische Analyse einfließen konnten

Variable	N
1. Erzeugertechnologie 3 (Erz3)	4
2. Anzahl Personal (Personalanz)	5
3. Prozentuale Auslastung (Auslastg)	3
4. Anzahl Bewohner (Bewohneranz)	5
5. Maximale Bettenanzahl (Bettenanz)	4
6. Mitarbeiter täglich vor Ort (mitarbeiteran)	5
7. Schichtbetrieb 24/7 (Schicht 24_7)	4
8. Gewerbenutzung Beginn (Gew_Beg)	3
9. Gewerbenutzung Ende (Gew_Ende)	4
10. Volumen TWW-Speicher 3 (Vol_Sp_3)	5
11. Volumen TWW-Speicher 4 (Vol_Sp_4)	0
12. Zeitraum aktive Zirkulation Beginn 3 (Akt_Zirk_Beg_3)	8
13. Zeitraum aktive Zirkulation Ende 3 (Akt_Zirk_End_3)	8
14. Datum thermische Desinfektion	2
15. Zeitintervall zwischen Messungen chemische Desinfektion (Interv_Messg)	1
16. DVGW-Prüfzeichen für chemische Desinfektion vorhanden (DVGW_c_desi)	1
17. Desinfektions-Protokoll und –anweisung vorhanden (Desi_prot)	1
18. Wartung chemische Desinfektion (Wartg_c_desi)	1
19. Wartung Geräte, die mit TW-Leitung verbunden (Wartg_Ger_TW)	4
20. Vollständige Trennung vom TW-Leitungssystem (Trenng_TW_L)	8
21. Löschwasserversorgung vorhanden (Loeschw)	7
22. Löschwasserleitung gemäß DIN 1998 von TWI getrennt (Trenng_Loesch)	9
23. Intervall Spülungen Löschwasserleitung (Interv_Spuel_loeschw)	2
24. Lage Temperatur-Fühler Bereitschaftsteil (Lage_Bereitsch)	9
25. Einschalttemperatur Bereitschaftsteil	7
26. Wasserversorgungsgebiet	0
27. Art der Messung Desinfektionsmittelmessung (Art_Messung)	0
28. Nutzeranzahl Öffentlichkeit (Nutzeranz)	11
29. Täglicher TW-Verbrauch (TW_Verbr)	16
30. TWW-Verbrauch (TWW_Verbr)	12
31. Parallel-oder Reihenschaltung TWE (Schaltg_TWE)	15
32. Volumen TWW-Speicher 2 (Vol_Sp_2)	13
33. Zeitraum aktive Zirkulation Beginn 1 (Akt_Zirk_Beg_1)	13

Variable	N
34. Zeitraum aktive Zirkulation Ende 1 (Akt_Zirk_End_1)	13
35. Zeitraum aktive Zirkulation Beginn 2 (Akt_Zirk_Beg_2)	10
36. Zeitraum aktive Zirkulation Ende 2 (Akt_Zirk_End_2)	10
37. Wartung der TWW-Installation (Wartung_TWW)	12
38. Wartung/Spülung/Wechsel Filter (Wartg_Filter)	10
39. Art Duschkopf (Duschkopf)	18
40. Wartung Zirkulations(regulier)ventil (Wartg_ZirkV)	21
41. Wartung Löschwasserversorgung (Wartg_Loeschw)	12
42. Spülleitung Löschwasserversorgung vorhanden (Spuel_Loeschw)	13
43. Besonderheiten Löschwasserversorgung (Bes_loeschw)	13
44. Lage der Reinigungsöffnungen (Reinig_Sp)	17
45. Abschalttemperatur oberer Temperatur-Fühler (Abschalttemp)	11
46. DVGW-Prüfzeichen am TWW-Speicher (DVGW_Sp)	15
47. Dauer der Nutzungsunterbrechung	16

Tab. 4-11 Variablen, die wegen zu einseitiger Merkmalsausprägung nicht in die statistische Analyse einfließen konnten.

Variable	Anzahl der Werte 1 /0
1. Nachweis von *Pseudomonas aeruginosa* mit Kultivierung	8 / 802
2. DVGW-Prüfzeichen für Filter vorhanden (DVGW_Filter)	24 / 0
3. Enteisenung vorhanden (Enteisenung)	84 / 0
4. Phosphatdosierungsanlage vorhanden (Phosphat)	82 / 1
5. Kondensationsbildung am Leitungssystem (Kondensat)	83 / 1
6. Allgemeine Sauberkeit zu beanstanden (Sauberkeit)	84 / 0
7. Direkt an die TWI angeschlossene Nicht-TW-Anlagen (nicht_TW_Anl)	83 / 1
8. Hinweise auf Undichtigkeit des Leitungssystems (Undicht)	84 / 0
9. Hinweise auf problematische Leitungsmaterialien /-bearbeitung (Probl_Mat)	84 / 0
10. Wasserfärbung (Wasserfarb)	75 / 2
11. Geruchsbeeinträchtigung (Geruch)	76 / 1
12. Geschmacksbeeinträchtigung (Geschmack)	76 / 1
13. Nachlassender Wasserdruck (nachl_Druck)	75 / 1
14. Leckage/Rohrbrüche (Leck)	77 / 0
15. TW-Temperatur zu hoch (TW_hoch)	76 / 2

Variable	Anzahl der Werte 1 /0
16. Betriebsbuch vorhanden (Betriebsbuch)	84 / 2
17. Verbautes Rohrmaterial: Blei (blei)	84 / 1
18. Material nicht erkennbar (Mat_nicht_erk)	81 / 3
19. Herkunft des Trinkwassers (Herkunft TW)	86 / 0
20. Andere Art des Druckausgleichs (Druckausgl)	82 / 2

Tab. 4-12 Anzahl positiver und negativer Proben der Kulturergebnisse von *Pseudomonas aeruginosa*, getrennt nach der Entnahmestelle.

Teilstichprobe	***P. aeruginosa* (Kultur)**		
	Nachweis in 100 mL		
	Negativ	**Positiv**	**N**
TWW Gesamt	533	2	535
TWW Zentral, davon	158	0	158
TWWz (Vorlauf)	83	0	83
TWZ (Rücklauf)	75	0	75
TWW Peripher, davon	375	2	377
TWW P. 2. Liter	210	1	211
TWW P. 5. Liter	165	1	166
TW Gesamt	266	1	267
TW Zentral, davon	99	0	99
TWz (Zulauf)	50	0	50
HEL	49	0	49
TW Peripher	167	1	168

Legende: Schattierungen: rot= Trinkwarmwasser, blau= Trinkwasser (kalt)

Legionella spp. qPCR

Tab. 4-13 Anzahl positiver und negativer Proben der qPCR von *Legionella* spp., getrennt nach der Entnahmestelle.

Teilstichprobe	*Legionella* spp. (qPCR)		
	Nachweis in 500 mL		
	Negativ	Positiv	N
TWW Gesamt	2	212	214
TWW Zentral, davon	0	77	77
TWWz (Vorlauf)	0	39	39
TWZ (Rücklauf)	0	38	38
TWW Peripher, davon	2	135	137
TWW P. 2. Liter	1	69	70
TWW P. 5. Liter	1	66	67
TW Gesamt	1	112	113
TW Zentral, davon	0	44	44
TWz (Zulauf)	0	28	28
HEL	0	16	16
TW Peripher	1	68	69

Legende: Schattierungen: rot= Trinkwarmwasser, blau= Trinkwasser (kalt)

Tab. 4-14 Kennzahlen der Verteilung von *Legionella* spp.-Gene, aufgeteilt nach Entnahmestellen

Teilstichprobe	*Legionella* spp. (Kultur)						
	Konzentration in [GU/500 mL]						
	Min.	25	Median	Arithm. Mittel	75	Max.	N
TWW Gesamt	10	2.767	7.545	40.349	18.813	581.000	214
TWW Zentral, davon	200	3.500	7.300	37.710	16.000	527.000	77
TWWz (Vorlauf)	200	3.650	7.850	34.943	12.975	527.000	39
TWZ (Rücklauf)	200	2.863	7.250	40.550	20.421	480.500	38
TWW Peripher, davon	10	2.500	7.880	41.832	19.000	581.000	137
TWW P. 2. Liter	10	2.362	8.040	45.520	22.525	546.000	70
TWW P. 5. Liter	10	2.768	7.800	37.980	17.725	581.000	67

Teilstichprobe	*Legionella* spp. (Kultur)						
	Konzentration in [GU/500 mL]						
	Min.	25	Median	Arithm. Mittel	75	Max.	N
TW Gesamt	10	5.000	13.650	48.044	33.200	742.000	113
TW Zentral, davon	200	2.877	10.750	33.326	24.125	370.500	44
TWz (Zulauf)	200	6.175	13.000	15.092	22.500	50.000	28
HEL	686	1.175	6.850	65.235	66.638	370.500	16
TW Peripher	10	5.350	13.750	57.430	35.100	742.000	69

Legende: Schattierungen: rot= Trinkwarmwasser, blau= Trinkwasser (kalt); Min. = Minimum (mit 10 = kein Nachweis, 200 = nicht quantifizierbar), 25 bzw. 75= 25 %- bzw. 75 %-Quantil, Max. = Maximum

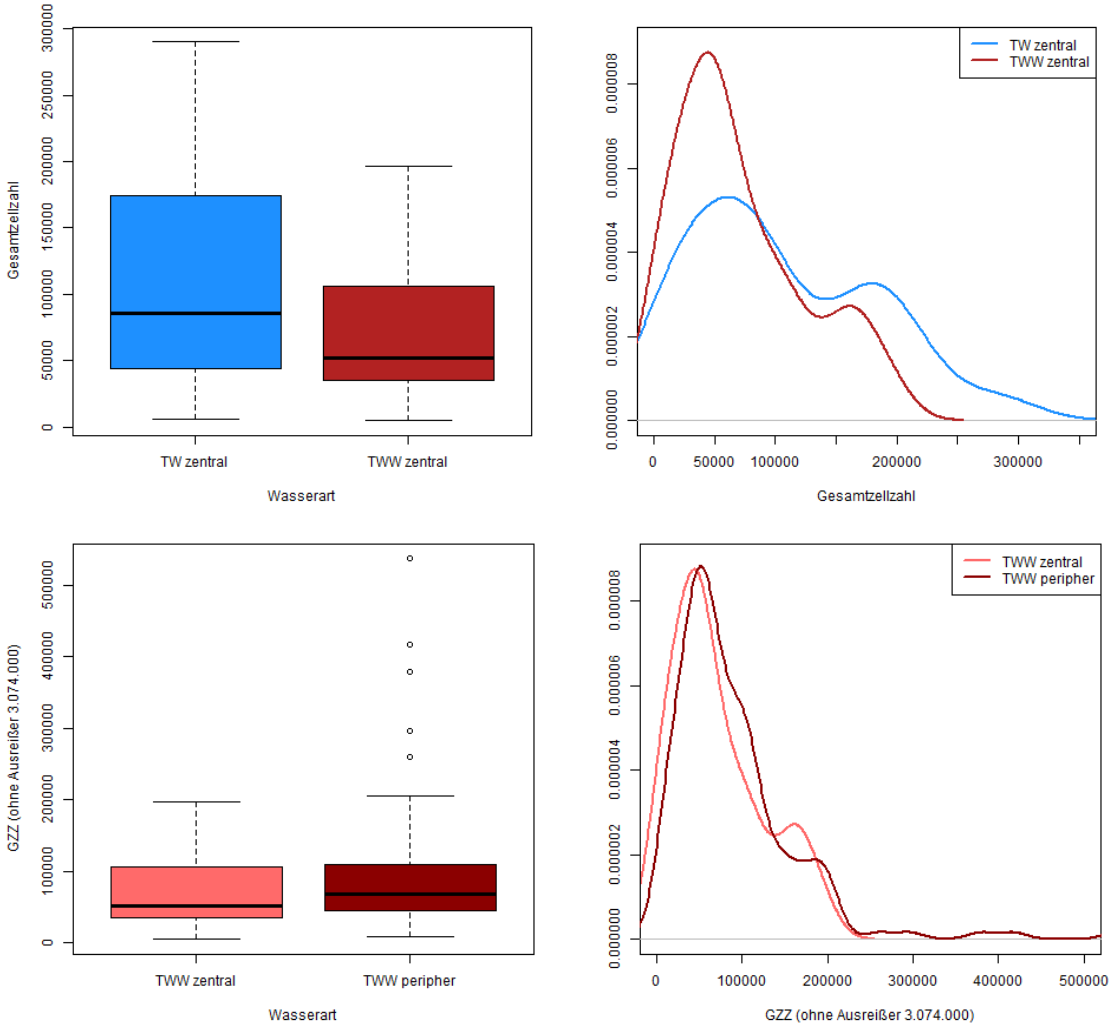
Tab. 4-15 Variablen, die aus anderen Gründen nicht mit in die Analyse eingeflossen sind.

Variable	Wertelabel
1. Uhrzeit_PN	Uhrzeit der Probenahme
2. T_TWE	Temperatur TWE in Klassen laut Vorab-Checkliste durch Betreiber
3. W551_Checkl	Einteilung nach W 551 Checkliste
4. T_FW	Fernwärme Vorlauftemperatur Netz
5. Haushaltgr	Personenhaushaltsgröße
6. Anz_TWE	Anzahl TWE
7. Vol_Sp1	Volumen TWW-Speicher 1 (Liter)
8. Thermohyd_Beginn_2	Thermohydraulik Beginn
9. Thermohyd_Ende_2	Thermohydraulik Ende
10. Art_Mischb	Art der Mischbatterie an peripherer PNS
11. Wartg_TWI	Wartung TWI
12. Plan_Install	Aktuelle Bestandspläne TWI vorhanden
13. Plan_TWW	Aktueller Plan TWW-Erzeugung /-Verteilung vorhanden
14. Betriebsanw	Arbeitsanweisung für den Betrieb vorhanden
15. Art_Dusche	Art der Dusche

Gesamtzellzahl

Als allgemeiner hygienisch-mikrobiologischer Parameter wurde die Gesamtzellzahl (GZZ) durchflusszytometrisch untersucht. Eine Charakterisierung von TWW und TW bzgl. der Konzentrationen der GZZ, ihr Zusammenhang mit Legionellen-Konzentrationen (Kulturverfahren bzw. qPCR) und mögliche auffällige Abweichungen der GZZ im Falle einer Legionellen-Kontamination sollen über die statistischen Analysen geklärt werden.

Mit 3.074.000 Zellen wurde die höchste GZZ in der Peripherie im TWW 2. Liter gemessen. Der geringste Wert lag mit 4.960 Zellen in einem TWE-Vorlauf vor. Aufgrund der linksschiefen Verteilung unterscheiden sich Median und arithmetisches Mittel um 15.000 – 50.000 Zellen/mL. Die GZZ in der Peripherie liegt für alle Wasserprobenarten höher als die GZZ in der Zentrale. Ein deutlicher Unterschied ist im TWW auch zwischen dem 2. und dem 5. Liter in der Peripherie zu sehen. Hier liegt der Wert im 2. Liter TWW im Median um 10.000 und im arithmetischen Mittel um fast 50.000 Zellen/mL über dem Wert des 5. Liters TWW. Die Verteilung der GZZ-Konzentrationen der einzelnen Probenarten ist in Tab. 4-16 dargestellt.



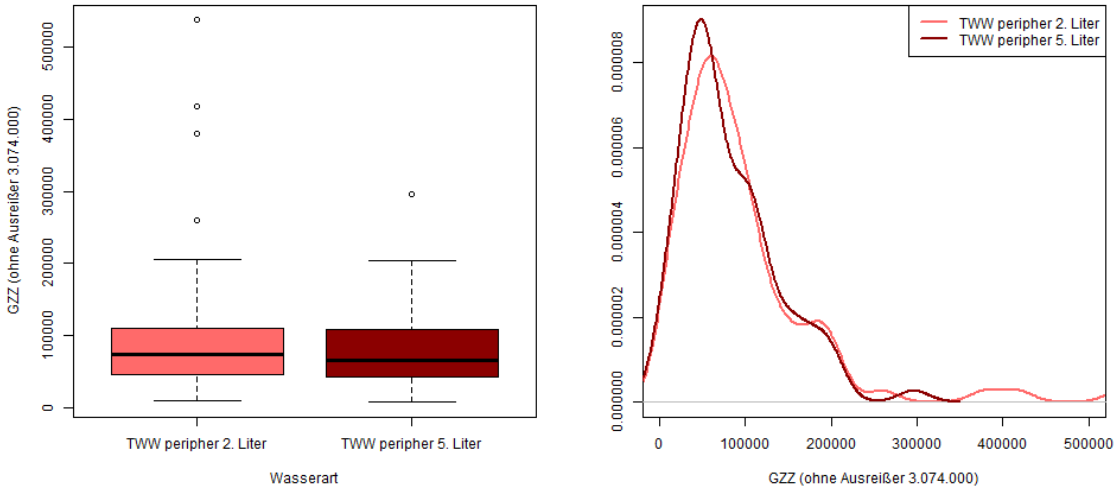


Abb. 4-23 Vergleich der GZZ-Konzentrationen in den Wasserproben, jeweils als Boxplot (links) zum Medianvergleich und als Häufigkeitsdiagramm (rechts) zur Erkennung von Verteilungsunterschieden dargestellt.

Tab. 4-16 Kennzahlen der Verteilung der Gesamtzellzahl, aufgeteilt nach Entnahmestellen.

Teilstichprobe	Gesamtzellzahl GZZ (FCM)						
	Konzentration in [Zellen/1 mL]						
	Min.	25	Median	Arith. Mittel	75	Max.	N
TWW Gesamt	4.960	42.000	65.330	94.833	108.523	3.074.000	257
TWW Zentral, davon	4.960	35.364	52.233	71.941	105.056	196.380	84
TWWz (Vorlauf)	4.960	36.000	51.148	70.760	102.931	181.860	42
TWZ (Rücklauf)	5.180	35.121	57.674	73.121	105.149	196.380	42
TWW Peripher, davon	8.000	45.000	68.920	105.949	110.885	3.074.000	173
TWW P. 2. Liter	10.000	47.095	75.838	129.190	110.920	3.074.000	89
TWW P. 5. Liter	8.000	42.965	65.349	81.325	107.875	296.000	84
TW Gesamt	6.000	44.431	90.620	105.454	168.050	290.020	134
TW Zentral, davon	6.000	44.052	85.644	106.148	173.285	290.020	50
TWz (Zulauf)	6.000	20.250	72.500	89.573	120.155	290.020	16
HEL	6.880	57.920	98.697	113.949	174.616	279.620	34
TW Peripher	7.000	44.897	93.554	105.041	166.565	279.460	84

Legende: Schattierungen: rot= Trinkwarmwasser, blau= Trinkwasser (kalt); Min. = Minimum, 25 bzw. 75= 25 %- bzw. 75 %-Quantil, Max. = Maximum

Temperaturen

In der statistischen Analyse wurde zunächst, entsprechend dem Projektfokus einer möglichen Temperaturabsenkung, der Einfluss von vier verschiedenen Temperaturtypen auf die Wasserkontamination mit Legionellen untersucht. Die untersuchten Temperaturtypen sind 1.) die Temperatur bei Probenahme, 2.) die Temperatur im 10. Liter als standardisiertes Maß für die Konstanz-Temperatur, 3.) die Mediantemperatur der Thermohydraulischen Messung (THM) und 4.) die Mediantemperatur der THM bei Nichtentnahme. Die beiden letzteren bilden im Vergleich zu den Momentaufnahmen (1.-3.) einen stabileren Langzeit-Temperaturtrend ab, da sie über einen Zeitraum von 14 Tagen bestimmt wurden. Die „Temperatur im 10. Liter“ wurde nur in der Peripherie und die „Mediantemperaturen der THM (bei NE)“ nur zentral im Warmwasser bestimmt. Die Verteilungen dieser Temperaturparameter sind am Beispiel der Temperatur bei Probenahme in Abb. 4-24 graphisch dargestellt. Weitere Kennzahlen der Temperaturverteilungen sind in Tab. 4-17 aufgeführt.

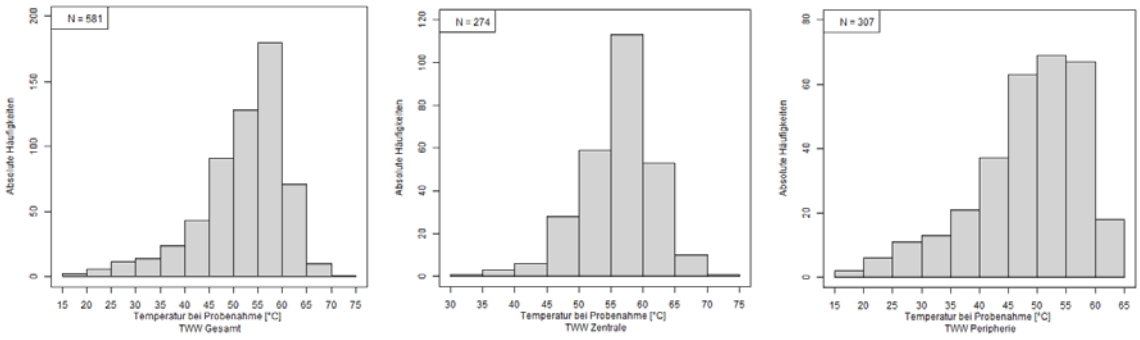


Abb. 4-24 Verteilung der Temperatur der Wasserproben bei Probenahme [°C] klassifiziert in 5-K-Schritten für a) alle gewonnenen Warmwasserproben (TWW) sowie unterteilt nach b) TWW-Proben aus der Zentrale und c) TWW-Proben aus der Peripherie.

Betrachtet man die gemessenen Temperaturen bei Probenahme, so fällt auf, dass in der Zentrale im TWW-Vorlauf eine mittlere Temperatur von 57,8 °C herrscht. Knapp 25 % der Daten unterschreiten 55 °C im TWWz (Vorlauf) (25 %-Perzentil = 55,0 °C). Im Rücklauf sind es im Median 54,4 °C. Die maximal zulässige Abkühlung in der Zirkulation wird damit im statistischen Mittel nicht erreicht. Bei objektspezifischer Betrachtung wird in 29 % der TWI (n =19/66) die 5-K-Regel nicht eingehalten.

In der Peripherie wurde im TWW 2. Liter eine Minimaltemperatur von 19,2 °C gemessen und ein Median von 47 °C. Nur rund ein Viertel der Temperaturen bei Probenahme aus dem 2. Liter überschreitet die 55 °C (75-Perzentil = 51,1 °C). Der 5. Liter zeigt sich im Schnitt etwas wärmer.

Für die Temperatur im 10. Liter TWW wurden Werte zwischen 28,9 und 66,8 °C gemessen. Das Mittel erreicht mit knapp 57 °C fast die Mediantemperatur des TWW-Vorlaufs. Der Unterschied zur Temperatur bei Probenahme im 2. Liter beträgt im Mittel ca. 10 °C. Zur Temperatur bei Probenahme im 5. Liter bestehen ca. 2 °C Differenz. Der Temperatur-Unterschied zwischen 5. und 10. Liter ist damit geringer, aber gegeben.

Die Messdaten der Temperaturen aus der THM zeigen mit Medianen um 60 °C nur sehr geringe Unterschiede zwischen TWW-Vorlauf und TWW-Rücklauf an. Die THM bei Nichtentnahme (Median um 59 °C) weicht nur geringfügig hiervon ab. Dabei zeigt die THM (NE) höhere Minimum-Temperaturen sowie größere Streuungsbreiten. Die maximal gefundene Temperatur liegt mit 0,4 °C Differenz in beiden Fällen bei 69 °C und die Minimaltemperatur bei 32 bzw. 40 °C.

Die Temperatur im Kaltwasser (TW) beträgt im Schnitt 16 °C. Auffällig ist hier eine Maximaltemperatur bei Probenahme von 58,2 °C, welche in der Zentrale im Zulauf zum TWE (TWz) gemessen wurde und nur durch retrograde Erwärmung vom TWE ausgehend zu erklären ist. Die Minimaltemperatur liegt für die verschiedenen Entnahmestellen zwischen 6 – 9 °C.

Im TW ist die Temperatur bei Probenahme (im 5. Liter) im Mittel knapp 2 °C wärmer als die Temperatur im 10. Liter. Auch hier sind keine größeren Unterschiede in der Verteilung zu erkennen. Das TW kommt an der Hauseingangsleitung (HEL) mit mittleren Temperaturen von 14 °C an, mehr als ein Viertel liegt oberhalb von 17 °C (75-Perzentil=17,2 °C). Weniger als ein Viertel der Werte zeigt Werte unter 10 °C (25-Perzentil = 11,6).

Tab. 4-17 Kennzahlen der Temperaturverteilungen für die verschiedenen Temperaturparameter und Entnahmestellen.

	Teilstichprobe	Temperatur-Werte						
		Min.	25	Medi-an	Arithm. Mittel	75	Max.	N
Temperatur bei Probenahme	**TWW Gesamt**	19,2	48,0	54,1	52,1	58,1	72,3	581
	TWW Zentral, davon	33,5	53,1	56,9	56,1	59,8	72,3	274
	TWWz (Vorlauf)	37,9	55,0	59,0	57,8	61,1	72,3	138
	TWZ (Rücklauf)	33,5	51,9	55,4	54,4	57,6	69,8	136
	TWW Peripher, davon	19,2	43,1	50,1	48,4	55,8	64,8	307
	TWW P. 2. Liter	19,2	39,8	47,0	44,8	51,1	63,1	175
	TWW P. 5. Liter	27,9	50,7	55,0	53,3	58,1	64,8	132
	TW Gesamt	6,4	13,0	15,5	16,1	18,8	58,2	280
	TW Zentral, davon	6,4	11,7	14,5	15,1	17,9	58,2	154
	TWz (Zulauf)	6,4	11,8	14,6	15,9	18,0	58,2	78
	HEL	6,4	11,6	14,4	14,2	17,6	23,3	76
	TW Peripher	8,5	14,4	16,3	17,4	20,5	33,3	126

	Teilstichprobe	Temperatur-Werte						
		Min.	25	Medi-an	Arithm. Mittel	75	Max.	N
Temperatur im 10. Liter bei Probenahme	**TWW Gesamt**	28,9	52,1	56,9	55,6	59,5	66,8	126
	TWW Zentral, davon							
	TWWz (Vorlauf)							
	TWZ (Rücklauf)							
	TWW Peripher, davon	28,9	52,1	56,9	55,6	59,5	66,8	126
	TWW P. 2. Liter							
	TWW P. 5. Liter							
	TW Gesamt	7,0	12,9	15,1	15,6	18,6	25,3	98
	TW Zentral, da-von							
	TWz (Zulauf)							
	HEL							
	TW Peripher	7,0	12,9	15,1	15,6	18,6	25,3	98
Mediantemperatur der THM	**TWW Gesamt**	32,0	56,6	60,3	59,6	62,4	69,1	377
	TWW Zentral, davon	32,0	57,2	60,3	59,6	62,5	69,1	208
	TWWz (Vorlauf)	32,0	57,2	60,3	59,6	62,5	69,1	67
	TWZ (Rücklauf)	32,0	57,4	60,4	59,8	62,5	69,1	66
	TWW Peripher, davon							
	TWW P. 2. Liter							
	TWW P. 5. Liter							
	TW Gesamt							
	TW Zentral, da-von							
	TWz (Zulauf)							
	HEL							
	TW Peripher							
Mediantem-peratur der THM bei Nicht-entnahme	**TWW Gesamt**	40,6	55,8	58,9	58,3	62,6	69,5	314
	TWW Zentral, davon	40,6	56,2	59,0	58,5	62,6	69,5	314
	TWWz (Vorlauf)	40,6	56,2	59,2	58,6	62,6	69,5	56
	TWZ (Rücklauf)	40,6	56,3	59,4	58,6	62,6	69,5	54

	Teilstichprobe	Temperatur-Werte						
		Min.	25	Medi-an	Arithm. Mittel	75	Max.	N
	TWW Peripher, davon							
	TWW P. 2. Liter							
	TWW P. 5. Liter							
	TW Gesamt							
	TW Zentral, davon							
	TWz (Zulauf)							
	HEL							
	TW Peripher							

Legende: rot= Trinkwarmwasser, blau= Trinkwasser (kalt), dunkelgrau = keine Werte vorhanden; Min. = Minimum, 25 bzw. 75= 25 %- bzw. 75 %-Quantil, Max. = Maximum

4.4.3 Angewandte inferenzstatistische Auswertungsmethoden

Die im vorliegenden Projekt zur weitergehenden statistischen Auswertung des Gesamt-Datensatzes der Felduntersuchungen des Objekt-Screenings angewandten Methoden werden im Folgenden kurz erläuternd eingeführt. Welche der beschriebenen Methoden für eine spezifische Fragestellung zur Anwendung kam, ist von der Art der Variablen, seiner Merkmalsausprägung und dem Skalenniveau abhängig. Als Signifikanzniveau, welches den Fehler erster Art beschreibt, wurde für alle durchgeführten statistischen Tests p = 0,05 als Grenze verwendet. Das bedeutet, man erlaubt sich bei einem Test eine Irrtumswahrscheinlichkeit, die Null-Hypothese zu verwerfen, in maximal 5 % der Fälle und spricht dann von einem signifikanten Ergebnis. Allgemein gilt, je kleiner p ist, desto besser ist die Informationsqualität eines signifikanten Ergebnisses zu bewerten.

Tab. 4-18 Übersicht über die Klassifizierung der verwendeten Signifikanzen bei der Dateninterpretation

Signifikanzniveau	Irrtumswahrscheinlichkeit	Aussagekraft
p > 0,05	höher als 5%	nicht signifikant
p < 0,05	geringer als 5%	signifikant
p < 0,01	geringer als 1%	hoch signifikant
P < 0,001	Geringer als 0,1%	höchst signifikant

Der Kendall‘sche Rangkorrelationskoeffizient

Der Rangkorrelationskoeffizient nach Kendall (auch Kendall‘s Tau genannt) ist ein Maß für den Zusammenhang zwischen zwei nicht normalverteilten Variablen. Er wird für Daten verwendet, die, wie in diesem Projekt, viele Bindungen und häufig Clusterung der

Daten bei 0 aufweisen. Berechnet wird er, indem innerhalb der beiden gegeneinander zu prüfenden Merkmale (z. B. Temperatur und Legionellen-Konzentration) Ränge vergeben werden (z. B. entsprechend aufsteigender Konzentration) und anschließend die Beobachtungspaare nach einem Merkmal der Größe nach sortiert werden. Für das so sortierte andere Merkmal wird für jeden Wert überprüft, wie viele Werte kleiner oder gleich dem betrachteten Wert sind und in der Sortierung unterhalb diesem liegen. Der Koeffizient wird aus der Summe dieser Werte gebildet und liegt durch Korrekturterme zwischen -1 und +1, wobei -1 für eine perfekte negative und +1 für eine perfekte positive Korrelation steht [Hartung09].

Tab. 4-19 Übersicht über die Klassifizierung der verwendeten Korrelationskoeffizienten bei der Dateninterpretation

Rangkorrelationskoeffizient	**Zusammenhangsstärke**	**Richtung**
0 < r < 0,2	sehr schwach	positiver Zusammenhang
0,2 < r < 0,5	schwach	positiver Zusammenhang
0,5 < r < 0,7	mittel	positiver Zusammenhang
0,7 < r < 0,9	stark	positiver Zusammenhang
0,9 < r ≤ 1	sehr stark	positiver Zusammenhang
0 > r > - 0,2	sehr schwach	negativer Zusammenhang
-0,2 > r > - 0,5	schwach	negativer Zusammenhang
-0,5 > r > - 0,7	mittel	negativer Zusammenhang
- 0,7 > r > - 0,9	stark	negativer Zusammenhang
- 0,9 > r ≥ - 1	sehr stark	negativer Zusammenhang

Der Chi-Quadrat-Test in Vier- oder Mehrfeldertafeln

Der Chi-Quadrat-Test überprüft, ob zwei nominal skalierte Merkmale in einer Vier- oder Mehrfeldertafel abhängig voneinander sind. Der Test berechnet in einer Kontingenztafel die Abweichung jedes Wertes von dem unter Unabhängigkeit zu erwartenden Wert. Die resultierende Teststatistik besteht im Wesentlichen aus der Summe der Abweichungen. Die Hypothese der Unabhängigkeit wird verworfen, wenn der p-Wert unter dem gewählten Signifikanzniveau (*hier:* p=0,05) liegt [Hartung09].

Der U-Test von Mann-Whitney

Der Mann-Whitney-U-Test vergleicht die Lage zweier Stichproben. Getestet wird, ob der Lageunterschied größer ist als Null. Dazu werden für beide Merkmale Ränge in der Gesamtstichprobe vergeben. Als Teststatistik wird im Wesentlichen die Summe der Ränge eines Merkmals verwendet. Ist diese besonders groß oder besonders klein unterscheiden sich die Verteilungen der beiden Merkmale deutlich. Die Hypothese der gleichen Vertei-

lung wird entsprechend verworfen, wenn der p-Wert unter dem gewählten Signifikanzniveau (*hier*: p=0,05) liegt [Hartung09].

Relatives Risiko

Das Relative Risiko bezeichnet das Verhältnis der Risiken zweier Gruppen, dass ein Zielereignis (hier: Kontamination mit Legionellen) eintritt. Die beiden Gruppen, die vergleichend untersucht werden, sind zum Beispiel die Verwendung von Bauteilen oder Materialien in der TWI (z. B. TWI mit Isolation vs. TWI ohne Isolation). Anhand einer Vierfeldertafel (Tab. 4-20) wird das Risiko beider Gruppen berechnet aus dem Verhältnis der Anzahl der kontaminierten Proben zur Gesamtzahl der Proben dieser Gruppe. Das Relative Risiko wird dann aus dem Verhältnis der beiden Risiken errechnet. Liegt das Relative Risiko bei +1, so unterscheiden sich die Gruppen nicht. Liegt das Risiko unter +1, so hat die erste Gruppe ein geringeres Risiko. Liegt das Risiko über +1, so hat die zweite Gruppe ein höheres Risiko. Aus dem logarithmierten Relativen Risiko kann ein Konfidenzintervall und somit ein statistischer Test konstruiert werden, der prüft, ob das Relative Risiko signifikant verschieden von eins ist [Schumacher07].

Tab. 4-20 Beispiel einer Vierfeldertafel zur Berechnung des Relativen Risikos.

		Risikomerkmal Gruppe 1	**Risikomerkmal Gruppe 2**	
Kontamination bzw. Aktionswertüberschreitung	**Ja**	**a**	**b**	a + b
	Nein	c	d	c + d
		a + c	**b + d**	

Das Risiko einer Kontamination berechnet sich für Gruppe 1 aus RR1 = a/(a+c). Für Gruppe 2 berechnet sich das Risiko aus RR2 = b/(b+d). Das Relative Risiko berechnet sich aus dem Quotienten RR1/RR2. Ist das Relative Risiko größer als 1, so ist das Risiko in der Gruppe 1 größer, also erhöht. Liegt das Risiko unter 1, so ist das Risiko in der Gruppe 1 niedriger als in Gruppe 2.

Sensitivitätsanalyse

Die Sensitivitätsanalyse wird in der Medizin verwendet, um z. B. zwei diagnostische Testverfahren miteinander zu vergleichen. Analog zur Diagnose einer Krankheit wird hier die Legionellenkontamination verwendet. Verglichen werden dann zum Beispiel qPCR mit Kulturverfahren oder unterschiedliche Probenahmestellen. Zur Berechnung wird eine Vierfeldertafel erstellt, aus der dann mehrere Werte abgeleitet werden können. Im Folgenden ist ein Beispiel einer Vierfeldertafel (Tab. 4-21) mit den berechneten Werten aufgezeigt [Schumacher07].

Tab. 4-21 Beispiel einer Vierfeldertafel für Sensitivitätsanalysen.

		Gruppe 2: Kontamination		
		Ja	**Nein**	
Gruppe 1: Kontamination	**Ja**	a	b	a + b
	Nein	c	d	c + d
		a + c	b + d	

Sensitivität: Der Anteil der in beiden Gruppen Kontaminierten Proben an der Gesamtanzahl der Kontaminierten in Gruppe 2, a / (a+c).

Spezifität: Der Anteil der in beiden Gruppen nicht Kontaminierten Proben an der Gesamtanzahl der nicht Kontaminierten in Gruppe 2, d / (b+d).

Positiver-Vorhersagewert: Der Anteil der in beiden Gruppen Kontaminierten Proben an der Gesamtanzahl der Kontaminierten in Gruppe 1, a / (a+b).

Negativer-Vorhersagewert: Der Anteil der in beiden Gruppen nicht Kontaminierten Proben an der Gesamtanzahl der nicht Kontaminierten in Gruppe 1, d / (c+d).

Korrektklassifikationsrate: Anteil der in beiden Gruppen gleich klassifizierten Proben an der Gesamtanzahl der Proben, (a + d) / (a+b+c+d).

ROC-Analyse

Die Receiver Operating Characteristic (ROC)-Analyse wird verwendet, um die Qualität eines Tests als Vorhersage für ein bestimmtes Ereignis zu bewerten. In diesem Projekt soll sie verwendet werden, um zu überprüfen, ob die Temperatur ein geeigneter Parameter zur Vorhersage der Legionellenkontamination ist und ob gegebenenfalls ein kritischer Temperaturgrenzwert bestimmt werden kann.

Dazu werden für jeden möglichen Temperaturwert zwei Gruppen gebildet. Eine Gruppe von Werten liegt oberhalb und eine unterhalb dieses zu testenden Temperaturwertes. Anschließend wird eine Vierfeldertafel der Kontamination erstellt. Aus dieser Tafel wird die Sensitivität und Spezifität (siehe oben) berechnet. Danach wird für jeden Temperaturwert die Sensitivität auf der y-Achse und 1-Spezifität auf der x-Achse abgetragen. Es entsteht eine Kurve, die im Punkt (0/0) startet und konkav zum Punkt (1/1) verläuft.

Je stärker die Kurve gewölbt ist, desto besser ist das untersuchte Testverfahren. Die idealtypische ROC-Kurve steigt anfangs senkrecht an, die Falsch-Positiv-Rate jedoch erst verzögert. Dies entspricht einer Trefferquote nahe 100 % bei sehr geringer Falsch-positiv-Rate (anfangs nahe bei 0 %). Die schlechteste mögliche Kurve ist die Winkelhalbierende. Bewertet wird die Kurve mit dem „Area-Under-Curve“-(AUC)-Kriterium. Für dieses wird die Fläche unter der Kurve ermittelt. Liegt der AUC-Wert zwischen 0,5 und 0,6, spricht man von einer wertlosen Kurve. 0,6-0,7 ist ein schlechter AUC-Wert, 0,7-0,8 akzeptabel und ab 0,8 spricht man von einem guten bis sehr gutem AUC-Wert. Der optimale Trennwert wäre dann der Punkt der Kurve, der am nächstem am Punkt (0/1) liegt [Schumacher07].

4.4.4 Vergleich der hygienisch-mikrobiologischen Parameter

Im Folgenden wird zunächst auf die Vergleichbarkeit der Ergebnisse der verschiedenen durchgeführten hygienisch-mikrobiologischen Analysen eingegangen. Hierzu lieferten Korrelationen, Medianvergleiche auf Grundlage des U-Tests von Mann-Whitney und Sensitivitätsanalysen verwertbare Aussagen.

Mit Hilfe der Rangkorrelationen nach Kendall sowie der Medianvergleiche wurde untersucht, wie sich die Konzentration der GZZ bzw. die Genkopienzahl von *L. pneumophila* (qPCR) in einer Probe zur kulturell ermittelten Legionellen-Konzentration verhält bzw. zu einer Grenzwertüberschreitung der Legionellen (Kultur; nach UBA 2012 „zu beanstanden“) verhält. Beantwortet werden sollten damit die Folgenden Forschungsfragen:

- Ist die qPCR von *Legionella pneumophila* geeignet, um eine Bewertung analog zu TrinkwV durchzuführen?
- Ist die qPCR von *Legionella pneumophila* geeignet, um eine hygienische Bewertung der Trinkwasserqualität abzugeben? Wenn ja, als alleiniger Parameter oder in Kombination mit Kultur?
- Ist die GZZ geeignet, um eine Bewertung analog zu TrinkwV durchzuführen?
- Ist die GZZ geeignet, um eine hygienische Bewertung der Trinkwasserqualität abzugeben? Wenn ja, welche Bedingungen müssen ggf. hierfür formuliert werden?

Ein möglicher direkter Zusammenhang der mikrobiologischen Parameter untereinander, welcher eine einfache Möglichkeit böte, eine Bewertung von qPCR-Ergebnissen und GZZ analog zu TrinkwV durchzuführen, kann anhand von **Korrelationen** überprüft werden. In Tab. 4-22 sind die Korrelationen nach Kendalls-Tau zwischen den Konzentrationen von *Legionella* spp. im Kulturverfahren, *L. pneumophila-Genen* (qPCR) und GZZ (Durchflusszytometer) dargestellt.

Signifikante, allerdings sehr schwache Korrelationen ($p \leq 0,05$; Tau-Wert = 0,13 bis 0,18) konnten nur zwischen der GZZ und der qPCR *L. pneumophila* für verschiedene Teilproben im TWW (TWW gesamt, TWW peripher, TWW peripher im 2. Liter) gefunden werden. Der Zusammenhang ist dabei positiv, d. h. je höher die GZZ, desto höher tendenziell auch der Gehalt an *L. pneumophila*-DNA in einer TWW-Probe. Nicht signifikant hingegen fielen die Berechnungen für die verschiedenen Teilproben des TWW hinsichtlich *L. pneumophila*-qPCR *und Legionella*-Kultur sowie GZZ und *Legionella*-Kultur aus. In der Literatur wird von Zusammenhängen zwischen Legionellen und heterotrophen Bakterien (HPC) nur vereinzelt bei sehr hohen Legionellen-Konzentrationen berichtet [Bargellini11].

Tab. 4-22 Korrelationen nach Kendalls-Tau zwischen den Ergebnissen der mikrobiologischen Parameter.

	Teilstichprobe	GZZ (FCM)			*Legionella* spp. (Kultur)			*L. pneumophila* (qPCR)		
		p	Tau	N	p	Tau	N	p	Tau	N
GZZ (FCM)	**TWW Gesamt**				0,203	0,06	257	***0,012***	***0,13***	***255***
	TWW Zentral, davon				0,992	0,00	84	0,144	0,13	84
	TWWz (Vorlauf)				0,976	0,00	42	0,158	0,18	42
	TWZ (Rücklauf)				0,976	0,00	42	0,579	0,07	42
	TWW Peripher, davon				0,223	0,07	173	***0,040***	***0,13***	***171***
	TWW P. 2. Liter				0,135	0,13	89	***0,030***	***0,18***	***89***
	TWW P. 5. Liter				0,986	0,00	84	0,429	0,07	82
	TW Gesamt				0,658	0,03	133	0,516	-0,05	133
	TW Zentral, davon				0,300	-0,12	49	0,358	-0,11	49
	TWz (Zulauf)				0,692	-0,08	16			
	HEL							0,208	-0,18	33
	TW Peripher				0,268	0,10	84	0,679	-0,04	84
Legionella spp. (Kultur)	**TWW Gesamt**	0,203	0,06	257				0,940	0,00	393
	TWW Zentral, davon	0,992	0,00	84				0,848	-0,02	137
	TWWz (Vorlauf)	0,976	0,00	42				0,890	-0,02	69
	TWZ (Rücklauf)	0,976	0,00	42				0,875	-0,02	68
	TWW Peripher, davon	0,223	0,07	173				0,980	0,00	256
	TWW P. 2. Liter	0,135	0,13	89				0,966	0,00	132
	TWW P. 5. Liter	0,986	0,00	84				0,843	-0,02	124
	TW Gesamt	0,658	0,03	133				0,767	0,02	201
	TW Zentral, davon	0,300	-0,12	49				0,648	-0,05	75
	TWz (Zulauf)	0,692	-0,08	16				0,629	-0,08	39
	HEL									
	TW Peripher	0,268	0,10	84				0,186	0,12	126

	Teilstichprobe	GZZ (FCM)			*Legionella* spp. (Kultur)			*L. pneumophila* (qPCR)		
		p	Tau	N	p	Tau	N	p	Tau	N
L. pneumophila (qPCR)	**TWW Gesamt**	***0,012***	***0,13***	***255***	0,940	0,00	393			
	TWW Zentral, davon	0,144	0,13	84	0,848	-0,02	137			
	TWWz (Vorlauf)	0,158	0,18	42	0,890	-0,02	69			
	TWZ (Rücklauf)	0,579	0,07	42	0,875	-0,02	68			
	TWW Peripher, davon	***0,040***	***0,13***	***171***	0,980	0,00	256			
	TWW P. 2. Liter	***0,030***	***0,18***	***89***	0,966	0,00	132			
	TWW P. 5. Liter	0,429	0,07	82	0,843	-0,02	124			
	TW Gesamt	0,516	-0,05	133	0,767	0,02	201			
	TW Zentral, davon	0,358	-0,11	49	0,648	-0,05	75			
	TWz (Zulauf)				0,629	-0,08	39			
	HEL	0,208	-0,18	33						
	TW Peripher	0,679	-0,04	84	0,186	0,12	126			

Legende: Schattierungen: rot= Trinkwarmwasser, blau= Trinkwasser (kalt), dunkelgrau = keine Werte berechenbar bzw. Berechnung nicht sinnvoll, keine= signifikante Ergebnisse (p< 0,05); Tau= Korrelationskoeffizient (keine Aussage über die Stärke der Korrelation, nur über die Richtung); fett kursiv = signifikantes Ergebnis (p<0,05)

Es wurde zudem untersucht, ob es hinsichtlich des Kulturverfahrens oder der qPCR Unterschiede in der Verteilung der Gesamtzellzahl zwischen den Gruppen „kontaminiert“ und „nicht kontaminiert“ gibt. Die Ergebnisse sind in Tab. 4-23 dargestellt.

Tab. 4-23 Ergebnisse der Medianvergleiche zwischen den mikrobiologischen Parametern.

	Teilstichprobe	GZZ (FCM)				
		N1	M1	N0	M0	p
Legionella spp. (Kultur)	**TWW Gesamt**	22	89.328	235	63.580	0,198
	TWW Zentral, davon	4	84.050	80	52.233	0,992
	TWWz (Vorlauf)	2	83.300	40	51.148	1,000
	TWZ (Rücklauf)	2	86.060	40	57.674	1,000
	TWW Peripher, davon	18	89.328	155	68.920	0,213
	TWW P. 2. Liter	12	126.638	77	73.325	0,126
	TWW P. 5. Liter	6	58.868	78	65.349	0,993

	TW Gesamt	9	99.000	124	88.873	0,619
	TW Zentral, davon	2	51.000	47	88.340	0,324
	TWz (Zulauf)	2	51.000	14	73.000	0,817
	HEL					
	TW Peripher	7	119.000	77	89.405	0,261
***L. pneumophila* (qPCR)**	**TWW Gesamt**	***45***	***95.040***	***210***	***59.134***	***0,027***
	TWW Zentral, davon	13	78.000	71	50.390	0,178
	TWWz (Vorlauf)	7	95.295	35	50.000	0,212
	TWZ (Rücklauf)	6	67.378	36	54.279	0,627
	TWW Peripher, davon	32	96.814	139	63.580	0,080
	TWW P. 2. Liter	***18***	***102.206***	***71***	***67.736***	***0,045***
	TWW P. 5. Liter	14	68.235	68	58.628	0,618
	TW Gesamt	11	78.840	122	93.114	0,511
	TW Zentral, davon	1	39.037	48	91.367	0,377
	TWz (Zulauf)					
	HEL	1	39.037	32	103.100	0,303
	TW Peripher	10	97.162	74	93.554	0,679

Legende: Schattierungen: rot= Trinkwarmwasser, blau= Trinkwasser (kalt), dunkelgrau = keine Werte vorhanden bzw. nicht berechenbar; N1 bzw. M1= N bzw. Median in der Gruppe „kontaminiert, N0 bzw. M0= N bzw. Median in der Gruppe „nicht kontaminiert“; fett kursiv = signifikantes Ergebnis ($p<0,05$)

Insgesamt sind im Warmwasser die Mediane der Gruppe „kontaminiert“ in allen Probentypen höher als in der Gruppe nicht-kontaminierter Proben. Die Unterschiede sind jedoch in den meisten Fällen nicht signifikant, d. h. als zufällig zu bewerten. Hinsichtlich des Kulturverfahrens zeigt sich kein einziger signifikanter Unterschied zwischen den Verteilungen der GZZ der beiden untersuchten Gruppen. Bei der qPCR finden sich zwei signifikante Ergebnisse: Im Warmwasser gesamt hat die Gruppe der kontaminierten Proben eine mediane GZZ von 95.040 (n=45) gegenüber 59.134 (n=210) in der Gruppe der Nicht-Kontaminierten ($p = 0,027$; Abb. 4-25). Dieser Unterschied tritt in der Teilstichprobe von TWW im 2. Liter in der Peripherie deutlicher zutage ($p = 0,045$). Hier liegt die mediane GZZ in der Gruppe der Kontaminierten (n=18) bei 102.206 gegenüber 67.736 in der Gruppe der Nicht-Kontaminierten (n=71). Tendenziell lässt sich damit für die nicht zirkulierenden Steigstränge eine hohe GZZ auch *L. pneumophila*-Gene im Wasser vermuten.

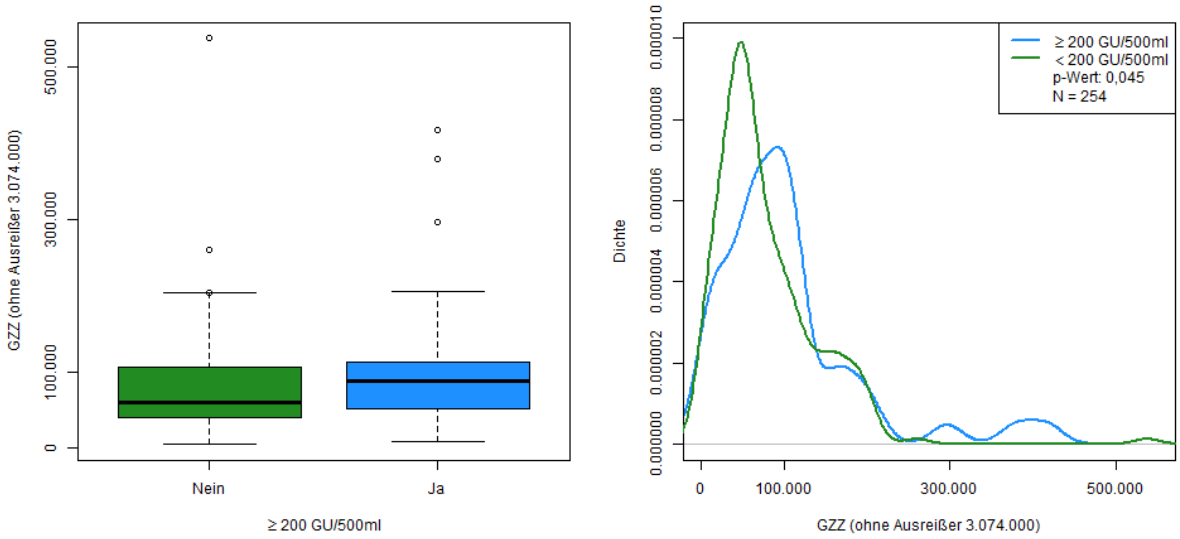


Abb. 4-25 Vergleich der GZZ in den Gruppen qPCR negativ (≥ 200 GU/500 mL = Nein, grün) und qPCR positiv (≥ 200 GU/500 mL = Ja, blau) dargestellt als Boxplot (links) mit 25-75 %-Perzentil-Box und Median (dicke waagerechte Linie) sowie als Dichtefunktion (rechts).

Vergleicht man die Ergebnisse der Methoden qPCR und Kulturverfahren mit einer **Sensitivitätsanalyse** (Tab. 4-24), so fällt auf, dass die qPCR deutlich häufiger positive Werte ausgibt als die Kultur (Wert n01). Andererseits gibt es aber auch viele Werte, für welche die Kultur positiv und die qPCR negativ ist (Wert n10). Hieraus ergeben sich niedrige, d. h. hinsichtlich der Aussagekraft sehr schwache, Werte für die Sensitivität und den Positiven-Vorhersage-Wert. Für die Sensitivität ergeben sich in den relevanten, in keiner Klasse mit „0“ besetzten Vierfeldertafeln mit 17-36 % nur sehr niedrige Werte. Der Positive-Vorhersage-Wert liegt insgesamt zwischen 33 und 68 %. Durch die hohe Anzahl an negativen Proben, die zum Großteil von beiden Verfahren erkannt werden, liegt die Spezifität bei sehr hohen 92 bis 97 % und auch der Negative-Vorhersage-Wert liegt zwischen 79 und 88 %. Insgesamt werden in der untersuchten Stichprobe ca. 80 % der Proben von beiden Verfahren gleich klassifiziert.

Hinsichtlich der Teilstichproben aus der Zentrale sind die kulturell positiven Befunde zu selten (die entsprechenden Zellen in Tab. 4-24 zu gering bzw. mit „0“ besetzt), um einen aussagefähigen Methodenvergleich liefern zu können.

Betrachtet man die Proben aus der Peripherie, so treten auch Proben in nicht zu vernachlässigender Zahl auf, die kulturell als positiv bewertet wurden, ohne *L. pneumophila*-Gene nachweisen zu können. Diese Befundkonstellation kann durch die höhere Bestimmungsgrenze in der qPCR (>200 GU/500 mL) im Vergleich zur Kultur (1 KbE/100 mL, entspricht hochgerechnet auf das in der qPCR eingesetzte Volumen 5 KbE/500 mL) und eine heterogenen Verteilung von Bakterien im Probenmaterial verbunden mit sehr unterschiedlichen eingesetzten Volumina (vgl. Kapitel 2) erklärt werden. Eine Störung der qPCR durch sogenannte Matrix-Effekte kann aufgrund des verwendeten, im Analyse-Kit enthaltenen, internen Standards ausgeschlossen werden. Der Unterschied ist überdies darin begründet, dass kulturell nach TrinkwV eben nicht – wie bei den gewählten Zielgenen der qPCR - ausschließlich *L. pneumophila* nachgewiesen wird, sondern vielmehr po-

tentiell verschiedene existierenden *Legionellen*-Spezies mit dem Kulturverfahren erfasst werden sollen. Diese Erkenntnisse bestätigen, dass die Kultur nicht eins zu eins durch die qPCR zu ersetzen ist.

Tab. 4-24 Ergebnisse der Sensitivitätsanalysen für den Nachweis von *Legionella* spp. (Kultur) im Vergleich zu *L. pneumophila* (qPCR)

Teilstichprobe	***Legionella* spp. (Kultur) mit *L. pneumophila* (qPCR)**									
	Vierfeldertafel					**Werte**				
	n11	**n10**	**n01**	**n00**	**N**	**Sens**	**Spez**	**PPV**	**NPV**	**KKR**
TWW Gesamt	21	10	69	293	393	0,23	0,97	0,68	0,81	0,80
TWW Zentral, davon	4	0	24	109	137	0,14	1,00	1,00	0,82	0,82
TWWz (Vorlauf)	2	0	12	55	69	0,14	1,00	1,00	0,82	0,83
TWZ (Rücklauf)	2	0	12	54	68	0,14	1,00	1,00	0,82	0,82
TWW Peripher, davon	17	10	45	184	256	0,27	0,95	0,63	0,80	0,79
TWW P. 2. Liter	12	6	21	93	132	0,36	0,94	0,67	0,82	0,80
TWW P. 5. Liter	5	4	24	91	124	0,17	0,96	0,56	0,79	0,77
TW Gesamt	5	10	22	164	201	0,19	0,94	0,33	0,88	0,84
TW Zentral, davon	0	2	7	66	75	0,00	0,97	0,00	0,90	0,88
TWz (Zulauf)	0	2	4	33	39	0,00	0,94	0,00	0,89	0,85
HEL	0	0	3	33	36	0,00	1,00	-	0,92	0,92
TW Peripher	5	8	15	98	126	0,25	0,92	0,38	0,87	0,82

Legende: Schattierungen: rot= Trinkwarmwasser, blau= Trinkwasser (kalt), dunkelgrau= Zelle(n) zu schwach besetzt → Berechnung nicht aussagekräftig; n11= positiv in beiden Verfahren; n10= positive Kultur, negative qPCR; n01= negative Kultur, positive qPCR; n00= negativ in beiden Verfahren; Sens= Sensitivität; Spez= Spezifität; PPV= Positiv-prädiktiver Wert; NPV= Negativ-prädiktiver Wert; KKR= Korrektklassifikationsrate

Für den vorliegenden Datensatz können damit keine direkten Rückschlüsse von den Konzentrationen der im Projekt angewandten molekularbiologischen und durchflusszytometrischen Bestimmungsmethoden auf das Ergebnis des nach TrinkwV vorgeschriebenen Kulturverfahrens gezogen werden. Ähnliche Diskrepanzen zwischen Ergebnissen von Kultivierung und qPCR zeigte auch [Schreiber12] schon auf. Eine hygienisch-mikrobiologische Bewertung der Wasserproben ausschließlich anhand der neuen Verfahren erscheint damit derzeit nicht möglich. Davon abgesehen liefert die qPCR in manchen Fällen allerdings wertvolle zusätzliche Information über eine versteckte, kulturell noch nicht manifestierte Legionellen-Kontamination.

Da die oben beschriebenen statistisch auswertbaren Tests nicht in der Lage sind, die im Projekt getesteten modernen Nachweisverfahren zu dem bisher nach TrinkwV geltenden kulturellen Ergebnis statistisch stabil und belastbar in Beziehung zu setzen, ist es auch nicht möglich, eine Art „Grenzwert“ für Ergebnisse aus qPCR oder durchflusszytometrischen Analysen abzuleiten, welcher sicher den Anforderungen der TrinkwV für die stichprobenartig durchgeführten Routineuntersuchungen gerecht wird.

Jedoch ist, wie die Medianvergleiche eindrücklich zeigen, die GZZ geeignet, eine Tendenz der Trinkwasserqualität im Langzeitmonitoring anzuzeigen. Die GZZ ist somit geeignet, als preisgünstiger und schnell bestimmbarer Warn-Parameter herangezogen zu werden, z. B. im Rahmen des HACCP-Konzepts bzw. eines Wassersicherheitsplans in der Trinkwasserüberwachung eines Wasserversorgers [WHO07, Egli10, Egli13, Egli14]: Verschlechtern sich über einen längeren Zeitraum stabile Werte plötzlich, sollte eine mögliche Legionellen-Konzentration in Betracht gezogen und bei einer folgenden tiefer gehenden Analyse ggf. zusätzlich zur Kultur einen qPCR-Nachweis geführt werden.

Die qPCR für *L. pneumophila* scheint aufgrund der oben dargestellten Ergebnisse und v.a. der häufigeren Positivbefunde zusätzlich im Rahmen der Objektsanierung geeignet, einmal Legionellen-kontaminierte TWI sanieren zu helfen, indem sie die Detektion versteckter Kontaminationen bzw. kulturell nicht lokalisierbarer Kontaminationsherde sinnvoll ergänzen können.

4.4.5 Einfluss von Temperatur und Thermohydraulik auf eine Trinkwasserkontamination mit Legionellen

Nachdem die Vergleichbarkeit der verschiedenen im vorliegenden Projekt parallel angewandten Labormethoden zur Erkennung einer Legionellen-Kontamination analysiert und diskutiert wurde, wird nun die Temperatur als Stellschraube für eine Energie-effizientere Warmwasserbereitstellung näher betrachtet. Im Vordergrund für die Bewertung steht, den in Kapitel 4.4.4 erörterten Rahmenbedingungen folgend, der Zusammenhang der Wassertemperatur mit dem kulturellen Legionellen-Nachweis. Das Vorkommen von Legionellen wurde in Abhängigkeit von Kalt- und Warmwasser-Matrix, Temperatur einer Probe bzw. des TWI-Systems bei Probennahme sowie von verschiedenen gemessenen sowie berechneten hydraulischen Kenndaten und Temperaturen der Daten aus der thermohydraulischen Messung (THM) betrachtet. Es wurde zudem untersucht, welchen Einfluss die Einhaltung der 5-K-Regel auf eine Kontamination des TWI-Systems hat. Idealerweise sollte eine Art „Grenztemperatur“ ermittelt werden, oberhalb derer Kontaminationen mit ausreichender Sicherheit auszuschließen sind.

Daneben wurde auch versucht, das Vorkommen von *L. pneumophila*-Genen und die GZZ in Abhängigkeit von Temperaturen und hydraulischen Kenndaten zu setzen. Methodisch erwiesen sich wiederum Korrelationen, Medianvergleiche und Vierfeldertafeln sowie Chi-Quadrat-Tests und die Berechnung Relativer Risiken als zielführend.

Temperaturen

Tab. 4-25 Korrelationen nach Kendalls-Tau zwischen den verschiedenen Temperaturparametern und den mikrobiologischen Parametern getrennt nach Entnahmestelle.

	Teilstichprobe	Temperatur bei Probenahme			Temperatur im 10. Liter			Median-temperatur THM		
		p	Tau	N	p	Tau	N	p	Tau	N
GZZ (FCM)	**TWW Gesamt**	0,553	0,03	257	***0,000***	***0,23***	***168***	***0,040***	***0,09***	***257***
	TWW Zentral, davon	0,802	-0,02	84				0,380	0,07	84
	TWWz (Vorlauf)	0,820	0,03	42				0,529	0,07	42
	TWZ (Rücklauf)	0,795	-0,03	42				0,494	0,07	42
	TWW Peripher, davon	0,078	0,09	173	***0,000***	***0,23***	***168***	***0,017***	***0,12***	***173***
	TWW P. 2. Liter	0,442	0,06	89	***0,001***	***0,24***	***84***	***0,048***	***0,14***	***89***
	TWW P. 5. Liter	***0,004***	***0,21***	***84***	***0,003***	***0,22***	***84***	0,175	0,10	84
	TW Gesamt	***0,000***	***0,25***	***134***	***0,000***	***0,31***	***75***			
	TW Zentral, davon	0,110	0,16	50						
	TWz (Zulauf)	0,344	0,18	16						
	HEL	0,066	0,22	34						
	TW Peripher	***0,000***	***0,30***	***84***	***0,000***	***0,31***	***75***			
Legionella spp. (Kultur)	**TWW Gesamt**	***0,019***	***-0,09***	***438***	0,126	-0,08	252	***0,007***	***-0,11***	***422***
	TWW Zentral, davon	0,919	0,01	137				***0,022***	***-0,16***	***133***
	TWWz (Vorlauf)	0,775	-0,03	69				0,177	-0,16	67
	TWZ (Rücklauf)	0,599	0,05	68				0,096	-0,17	66
	TWW Peripher, davon	0,098	-0,08	301	0,126	-0,08	252	0,056	-0,09	289
	TWW P. 2. Liter	0,399	-0,05	175	0,455	-0,05	126	0,163	-0,09	169
	TWW P. 5. Liter	0,156	-0,10	126	0,129	-0,11	126	0,196	-0,10	120
	TW Gesamt	***0,045***	***0,11***	***202***	0,154	0,12	98			
	TW Zentral, davon	0,052	0,19	76						
	TWz (Zulauf)	0,086	0,23	39						
	HEL									
	TW Peripher	0,435	0,06	126	0,154	0,12	98			

	Teilstichprobe	Temperatur bei Probenahme			Temperatur im 10. Liter			Median-temperatur THM		
		p	Tau	N	p	Tau	N	p	Tau	N
L. pneumophila (qPCR)	**TWW Gesamt**	0,135	0,06	393	0,067	0,09	250	0,374	0,04	377
	TWW Zentral, davon	***0,022***	***0,16***	***137***				0,733	0,02	133
	TWWz (Vorlauf)	0,332	0,09	69				0,939	0,01	67
	TWZ (Rücklauf)	***0,006***	***0,27***	***68***				0,631	0,05	66
	TWW Peripher, davon	0,445	0,04	256	0,067	0,09	250	0,379	0,04	244
	TWW P. 2. Liter	0,524	-0,04	132	0,312	0,07	126	0,561	0,04	126
	TWW P. 5. Liter	***0,030***	***0,16***	***124***	0,114	0,11	124	0,509	0,05	118
	TW Gesamt	***0,022***	***-0,13***	***202***	0,359	0,08	98			
	TW Zentral, davon	***0,011***	***-0,24***	***76***						
	TWz (Zulauf)	0,071	-0,24	39						
	HEL	0,075	-0,24	37						
	TW Peripher	0,075	-0,13	126	0,359	0,08	98			

Legende: Schattierungen: rot= Trinkwarmwasser, blau= Trinkwasser (kalt), dunkelgrau= nicht berechenbar bzw. Berechnung nicht sinnvoll; p =Signifikanzniveau; Tau= Korrelationskoeffizient; fett schwarz = signifikantes Ergebnis (p<0,05)

In Tab. 4-25 sind die Korrelationen nach Kendall-Tau zwischen der Konzentration an Legionellen (Kulturverfahren), *L. pneumophila*-Genen (qPCR) bzw. der GZZ und verschiedenen im Projekt ermittelten Temperaturarten aufgetragen.

Die untersuchten Temperaturarten umfassen die Temperatur bei Probenahme in der Probe selbst (im 2. bzw. 5. Liter) sowie im 10. Liter und zusätzlich die Objekt-spezifische Mediantemperatur der THM sowie die Mediantemperatur der THM bei Nichtentnahme (THM NE). Letztere liefert sehr ähnliche Ergebnisse wie die Mediantemperatur der THM.

Bei Betrachtung der Legionellen-Konzentrationen im Kulturverfahren stellen sich nur wenige Zusammenhänge als signifikant dar; diese sind zudem sehr schwach (vgl. Abb. 4-26). Für die Temperatur bei Probenahme ist die Korrelation im Warmwasser (TWW gesamt) signifikant negativ, im Kaltwasser (TW gesamt) dagegen signifikant positiv. Der negative Einfluss höherer Temperaturen auf die Legionellenkonzentration stellt sich auch für die Mediantemperatur der THM dar. Hier gibt es signifikant negative Korrelationen für das Warmwasser Gesamt und in der Zentrale. Die Temperatur im 10. Liter liefert hingegen keine signifikanten Ergebnisse.

Daraus folgt für das Kulturverfahren und die vorliegenden Daten mit TWW-Temperaturen zwischen 19,2 und 72,3 °C (vgl. Kapitel 4.4.2) in der Tendenz: je höher die Temperatur im Warmwasser ist, desto niedriger ist die Anzahl wachsender Legionellen-Kolonien. Dies entspricht dem Konzept einer Kontaminationsvermeidung durch hohe Temperaturen, die hinter den z.Zt. nach a.a.R.d.T. geltenden 60 °C am Ausgang des TWE bei Großanlagen stehen. Zudem korrespondiert es gut mit den häufiger in der Peripherie als in der Zentrale auftretenden kulturellen Legionellen-Nachweisen, da zentral insgesamt höhere Tempe-

raturen vorherrschen (vgl. Kapitel 4.4.2). *Legionella* spp. besitzen als mesophile Bakterien ein Wachstumsoptimum im Bereich zwischen 25-40 °C [Ohno03], *L. pneumophila* im speziellen wachsen optimal zwischen 32-42 °C [WHO07]. Die Bakterien sind allerdings thermotolerant und können hohe Temperaturen über einen gewissen Zeitraum überstehen, 50 °C sogar für einige Stunden [WHO07].

Im Kaltwasser, welches insgesamt ein Temperaturspektrum von 6,4-33,3 °C (Ausreißer-Wert bis 58,2 °C) aufweist, ist der Zusammenhang umgekehrt: Je höher die Temperatur im Kaltwasser, desto höher ist die Anzahl kultivierbarer Legionellen. Für die meisten Bakterien ist erst bei Temperaturen oberhalb von 4 °C überhaupt aktives Wachstum möglich, welches sich, in seinen Grundzügen der sogenannten RGT-Regel (Reaktionsgeschwindigkeit-Temperatur; [Holleman95]) folgend, im moderaten Temperatur-Bereich mit steigender Temperatur erhöht, da Stoffwechsel und Zellteilung rascher ablaufen. Dies zeigt sich auch im Wachstum für Legionellen bzw. *L. pneumophila*; bei Temperaturen unterhalb von 20 °C wurde nur selten und wenn ein sehr geringes Wachstum beobachtet [WHO07].

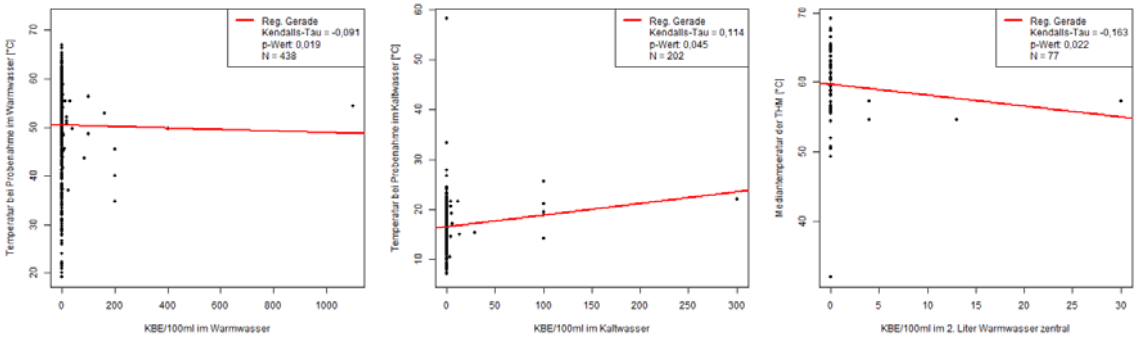


Abb. 4-26 Signifikante Rang-Korrelationen nach Kendall-Tau zwischen der Konzentration an *Legionella* spp. (Kultur) und Wassertemperatur verschiedener Temperaturtypen. Die Regressionsgerade (rote Linie) indiziert die Richtung des Zusammenhangs.

Die qPCR liefert dem Kulturverfahren genau entgegengesetzte Ergebnisse. Signifikant sind dabei nur die Ergebnisse für Temperatur bei Probenahme. Anders als bei der Kultur sind hier die Korrelationen im TWW (Zentrale, Rücklauf, Peripherie 5. Liter) signifikant positiv, sodass eine höhere Temperatur bei Probenahme eine höhere Anzahl von Genen (Genomic Units) bedeutet. Im Kaltwasser (Gesamt, Zentrale) ist die Korrelation signifikant negativ, sodass eine Erhöhung der Temperatur eine Senkung der Anzahl der Genomic Units bewirkt. Dies kann verschiedene Ursachen haben, die mit den Temperaturfenstern für Legionellen-Wachstum [WHO07] zusammenhängen, wie z. B. eine Verschiebung von aktiv wachsenden Legionellen in Richtung des VBNC-(viable-but-non-culturable) -Zustands der Zellen [Oliver05], Effekt geänderter Lebend-Tod-Verhältnisse der Bakterien sein [Zacharias15], oder Ausdruck geänderter Artenzusammensetzungen [Lesnik16]. Betrachtet man die zu den Korrelationen gehörigen graphischen Darstellungen der Werte, lässt sich jedoch auch erkennen, dass der statistische Effekt stark von wenigen quantifizierbaren positiven Proben beeinflusst ist, während der Großteil der positiven Proben als Cluster unterhalb der Nachweisgrenze auftritt (Wert „200“). Im Kaltwasser scheinen zudem die quantifizierbaren Proben der HEL die Richtung des Zusammenhangs stark zu

beeinflussen (Tab. 4-27). Zur Verifikation bzw. Absicherung der gefundenen Zusammenhänge wäre daher eine größere Anzahl quantifizierbarer positiver Proben erforderlich.

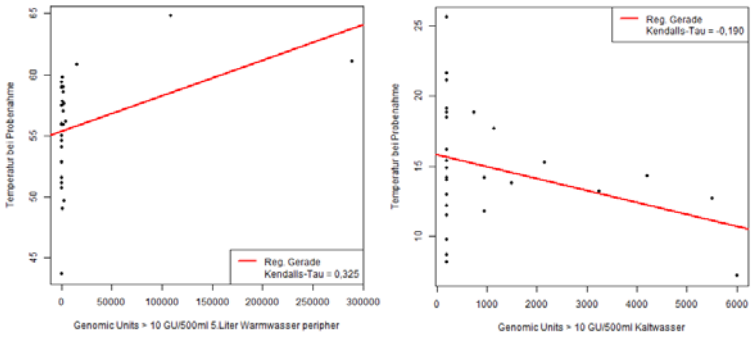


Abb. 4-27 Signifikante Rang-Korrelationen nach Kendall-Tau zwischen der Konzentration an *Legionella pneumophila* (qPCR) und Wassertemperatur bei Probennahme am Beispiel der Teilstichproben TWW peripher 5. Liter (links) sowie TW gesamt (rechts). Die Regressionsgerade (rote Linie) indiziert die Richtung des Zusammenhangs.

Für die GZZ ergeben sich bei allen Temperaturtypen nur sehr vereinzelt signifikante Ergebnisse (Abb. 4-28). Für die Temperatur bei Probenahme sind die Ergebnisse des 5. Liter TWW peripher, TW gesamt und TW peripher signifikant, im Falle der Temperatur im 10. Liter sind alle Ergebnisse signifikant. Für die Mediantemperatur der THM ergeben sich signifikante Zusammenhänge bei TWW gesamt, sowie in der Peripherie, speziell im 2. Liter. Alle Korrelationen sind positiv, d. h. je höher die Temperatur, desto höher ist die Gesamtzellzahl; dies gilt sowohl im Warm- als auch im Kaltwasser.

Die Stärke der Zusammenhänge ist mit maximal 0,31 (TW peripher; Temperatur bei Probenahme sowie im 10. Liter) jedoch in allen Fällen als sehr schwach anzusehen. Verbunden mit dem äußerst heterogenen Muster der signifikanten Zusammenhänge zwischen Nachweisverfahren und Temperaturtyp ist dies ein Hinweis darauf, dass die Temperatur zwar eine Rolle im Kontaminationsgeschehen spielt, das Auftreten einer Legionellen-Kontamination in einer TWI aber sicher von mehr als nur diesem einen Parameter beeinflusst wird.

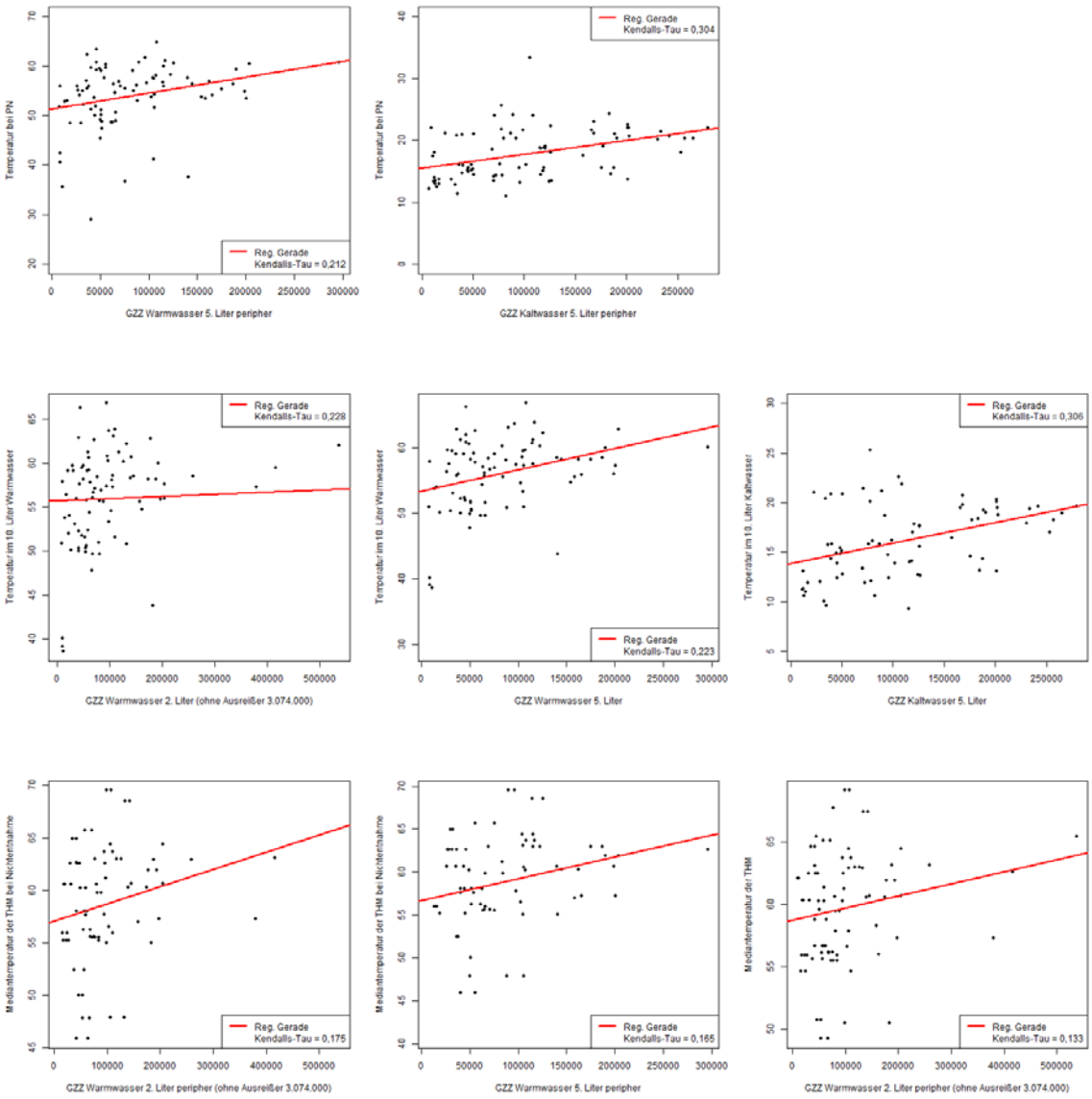


Abb. 4-28 Signifikante Rang-Korrelationen nach Kendall-Tau zwischen der Gesamtzellzahl in der Probe und der gemessenen Wassertemperatur für verschiedene Temperaturarten und Teilstichproben TWW sowie TW. Die Regressionsgerade (rote Linie) indiziert die Richtung des Zusammenhangs.

Zur Verifikation des Temperatureinflusses wurden die Legionellen-Daten aus Kultivierung und qPCR jeweils auf signifikante Verteilungsunterschiede zwischen den Gruppen „kontaminiert“ und „nicht kontaminiert“ untersucht. Die Ergebnisse dazu sind für die verschiedenen Temperaturtypen in der folgenden Tabelle dargestellt.

Tab. 4-26 Ergebnisse der Medianvergleiche zwischen den kontaminierten und nicht kontaminierten Proben aus Kultur und qPCR aufgeteilt nach Entnahmestellen und Temperaturparametern.

	Teilstichprobe	*Legionella* spp. (Kultur)					*L. pneumophila* (qPCR)				
		N1	M1	N0	M0	p	N1	M1	N0	M0	p
Temperatur bei Probennahme	**TWW Gesamt**	*31*	*48,7*	*407*	*53,1*	*0,018*	90	55,0	303	53,1	0,274
	TWW Zentral, davon	4	56,1	133	55,9	0,903	28	57,8	109	55,6	0,050
	TWWz (Vorlauf)	2	57,2	67	58,0	0,802	14	59,0	55	58,0	0,526
	TWZ (Rücklauf)	2	56,1	66	55,3	0,599	*14*	*57,1*	*54*	*54,3*	*0,010*
	TWW Peripher, davon	27	48,4	274	50,2	0,088	62	50,9	194	50,9	0,616
	TWW P. 2. Liter	18	44,5	157	47,1	0,323	33	45,4	99	47,1	0,443
	TWW P. 5. Liter	9	51,3	117	55,3	0,185	29	56,2	95	54,8	0,063
	TW Gesamt	15	19,2	187	15,7	0,052	*27*	*14,2*	*175*	*16,2*	*0,027*
	TW Zentral, davon	2	20,7	74	14,5	0,056	*7*	*11,5*	*69*	*15,1*	*0,013*
	TWz (Zulauf)	2	20,7	37	14,6	0,098	4	12,1	35	15,6	0,071
	HEL						3	8,7	34	14,7	0,090
	TW Peripher	13	18,8	113	16,2	0,461	20	15,1	106	17,0	0,094
Temperatur im 10.Liter	**TWW Peripher, davon**	27	55,5	225	57,2	0,127	61	57,6	189	56,6	0,189
	TWW P. 2. Liter	18	55,7	108	57,2	0,393	32	57,3	94	56,8	0,569
	TWW P. 5. Liter	9	54	117	57,2	0,157	29	58,2	95	56,6	0,194
	TW Peripher	11	17,0	87	15,0	0,182	7	17,8	91	15,1	0,338
Mediantemperatur der THM	**TWW Gesamt**	*28*	*57,3*	*394*	*60,4*	*0,008*	87	60,5	290	60,2	0,865
	TWW Zentral, davon	*4*	*55,9*	*129*	*60,4*	*0,022*	27	60,5	106	60,3	0,909
	TWWz (Vorlauf)	2	55,9	65	60,4	0,117	14	60,5	53	60,2	0,694
	TWZ (Rücklauf)	2	55,9	64	60,5	0,104	13	60,5	53	60,3	0,796
	TWW Peripher, davon	24	57,3	265	60,4	0,062	60	60,5	184	60,2	0,740
	TWW P. 2. Liter	16	57,3	153	60,5	0,155	32	60,5	94	59,7	0,816
	TWW P. 5. Liter	8	56,9	112	60,4	0,232	28	60,5	90	60,3	0,817

	Teilstichpro-be	*Legionella* spp. (Kultur)					*L. pneumophila* (qPCR)				
		N1	M1	N0	M0	p	N1	M1	N0	M0	p
Mediantemperatur der THM bei NE	**TWW Gesamt**	27	57,3	326	59,5	0,249	*73*	*50,6*	*242*	*58,7*	*0,022*
	TWW Zentral, davon	4	56,6	106	59,8	0,127	23	60,6	87	58,9	0,242
	TWWz (Vorlauf)	2	56,6	54	59,6	0,299	12	59,8	44	59,2	0,704
	TWZ (Rücklauf)	2	56,6	52	59,9	0,282	11	62,6	43	58,9	0,205
	TWW Peripher, davon	23	57,3	220	59,2	0,624	*50*	*60,2*	*155*	*58,7*	*0,039*
	TWW P. 2. Liter	16	57,3	126	58,9	0,961	28	59,8	78	58,5	0,130
	TWW P. 5. Liter	7	56,9	94	59,6	0,370	22	61,2	77	58,7	0,156

Legende: Schattierungen: rot= Trinkwarmwasser, blau= Trinkwasser (kalt), dunkelgrau= nicht berechenbar, keine= signifikante Ergebnisse (p< 0,05); N1 bzw. M1= N bzw. Median in der Gruppe „kontaminiert, N0 bzw. M0= N bzw. Median in der Gruppe „nicht kontaminiert“

Für die Temperatur bei Probenahme ergibt sich im Falle des Kultur-Nachweises nur ein einziges signifikantes Ergebnis für TWW gesamt (p = 0,018); hier liegt der Median der Gruppe der kontaminierten Proben bei 48,7 °C und jener der Gruppe der Nicht-Kontaminierten bei 53,1 °C. Somit weisen die kontaminierten Proben im Mittel eine um 5,4 K geringere Temperatur auf als nicht kontaminierte Proben (Abb. 4-29). Bei weiterer Unterteilung nach Probentypen jedoch zeigen sich keine Signifikanzen mehr. Dies lässt auf einen stärkeren Einfluss der Klassifikation Zentral-Peripher schließen als der Temperaturunterschiede selbst.

Im Falle der qPCR-Methodik gibt es im TWW signifikante Ergebnisse bei den Proben des TWW Zentral (p = 0,05; Abb. 4-30), welche maßgeblich durch die Verteilungsunterschiede der Proben des Zirkulationsrücklaufs (TWZ; p = 0,01) als Teilprobe von TWW Zentral beeinflusst sind. Entsprechend dem oben festgestellten positiven Zusammenhang zwischen Genkonzentration und Temperatur weist die Gruppe der Kontaminierten eine um 2,8 °C höhere Mediantemperatur auf als nicht kontaminierte Proben.

Im Kaltwasser bestehen für die qPCR-Befunde signifikante Medianunterschiede in den Teilstichproben TW gesamt und – deutlicher ausgeprägt - TW zentral (je p < 0,03; Abb. 4-31). Hier liegt die mediane Temperatur in der Gruppe der Kontaminierten bei 14,2 bzw. 11,5 °C und in der Gruppe der nicht Kontaminierten bei 16,2 bzw. 15,1 °C. Somit umfasst hier, in Übereinstimmung mit den Ausführungen zur Korrelation, die Gruppe der Nicht-Kontaminierten die höheren Temperaturen.

Die Mediantemperatur der THM, welche sich aus den beiden punktuellen, über vierzehn Tage Dauer durchgeführten Messungen in der Zentrale am Ausgang des TWE und am Zirkulationsrücklauf des TWW kurz vor Wiedereintritt in den TWE (s. Abschnitt 2.5) berechnet, aber nicht individuell für jede Probenahmestelle vorliegt, liefert im Kulturverfahren für TWW gesamt und TWW Zentrale signifikante Ergebnisse; hier zeigt die Gruppe der Nicht-Kontaminierten jeweils die höhere Median-Temperatur (60,4 °C zu 57,3 bzw. 55,9 °C). Für die qPCR-Daten ergeben sich keine signifikanten Verteilungsunterschiede. Die Mediantemperatur der THM bei Nichtentnahme zeigt nur für die qPCR signifikante Verteilungsunterschiede (je p<0,04): in TWW gesamt sowie in der Teilstichprobe TWW Peripher hat die Gruppe der Kontaminierten mit ca. 60 °C jeweils die etwas mehr als 1 K

höhere Median-Temperatur (vgl. Abb. 4-32). Beides spiegelt generell die oben für Kultur bzw. qPCR gefundenen Korrelationen mit der Temperatur wider.

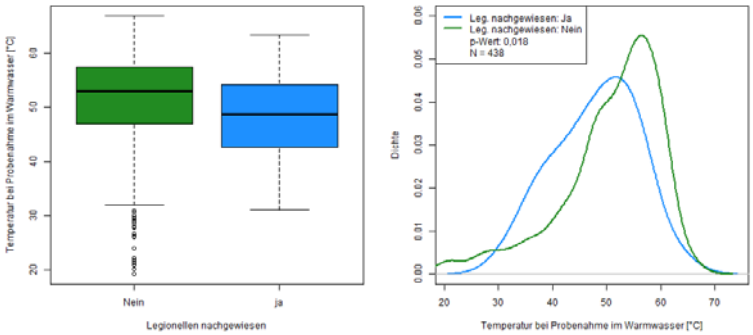


Abb. 4-29 Vergleich der Temperaturen bei Probennahme bei den Warmwasserproben (gesamt) in den Gruppen Kultur negativ (0 KbE/100 mL = Nein, grün) und Kultur positiv (>0 KbE/100 mL = Ja, blau) dargestellt als Boxplot (links) mit 25-75 %-Perzentil-Box und Median (dicke waagerechte Linie) sowie als Dichtefunktion (rechts).

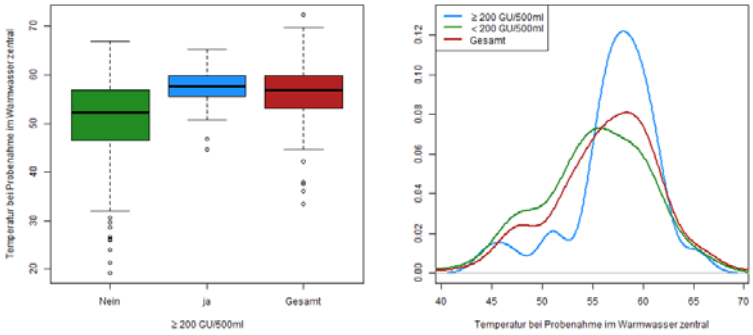


Abb. 4-30 Vergleich der Temperaturen bei Probennahme bei den TWW-Proben der Zentrale in den Gruppen qPCR *L. pneumophila* negativ (<200 GU/500 mL = Nein, grün) und qPCR positiv (≥200 GU/500 mL = Ja, blau) dargestellt als Boxplot (links) mit 25-75 %-Perzentil-Box und Median (dicke waagerechte Linie) sowie als Dichtefunktion (rechts).

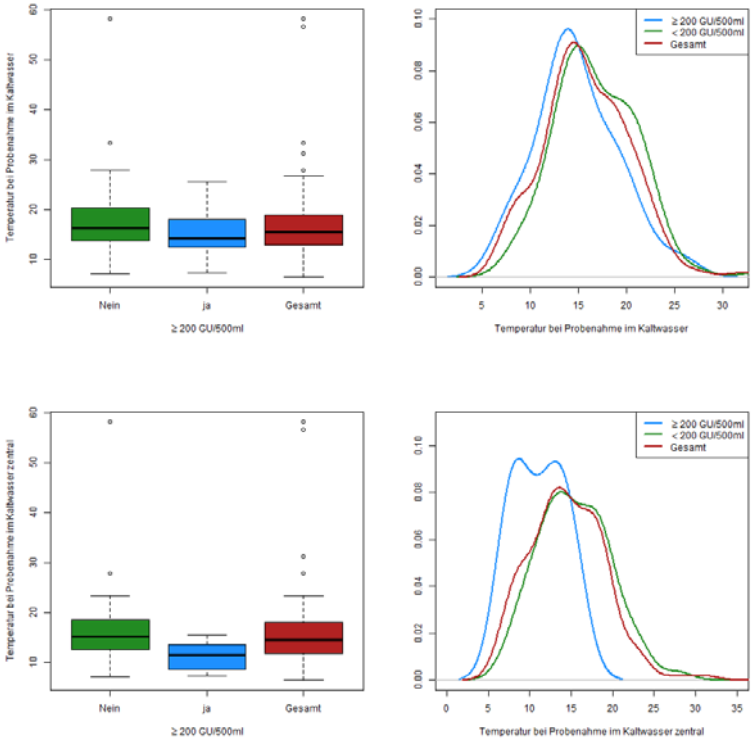


Abb. 4-31 Vergleich der Temperaturen bei Probennahme bei den TW-Proben der gesamt (oben) sowie zentral (unten) in den Gruppen qPCR negativ (<200 GU/500 mL = Nein, grün) und qPCR positiv (≥200 GU/500 mL = Ja, blau) dargestellt als Boxplot (links) mit 25-75 %-Perzentil-Box und Median (dicke waagerechte Linie) sowie als Dichtefunktion (rechts).

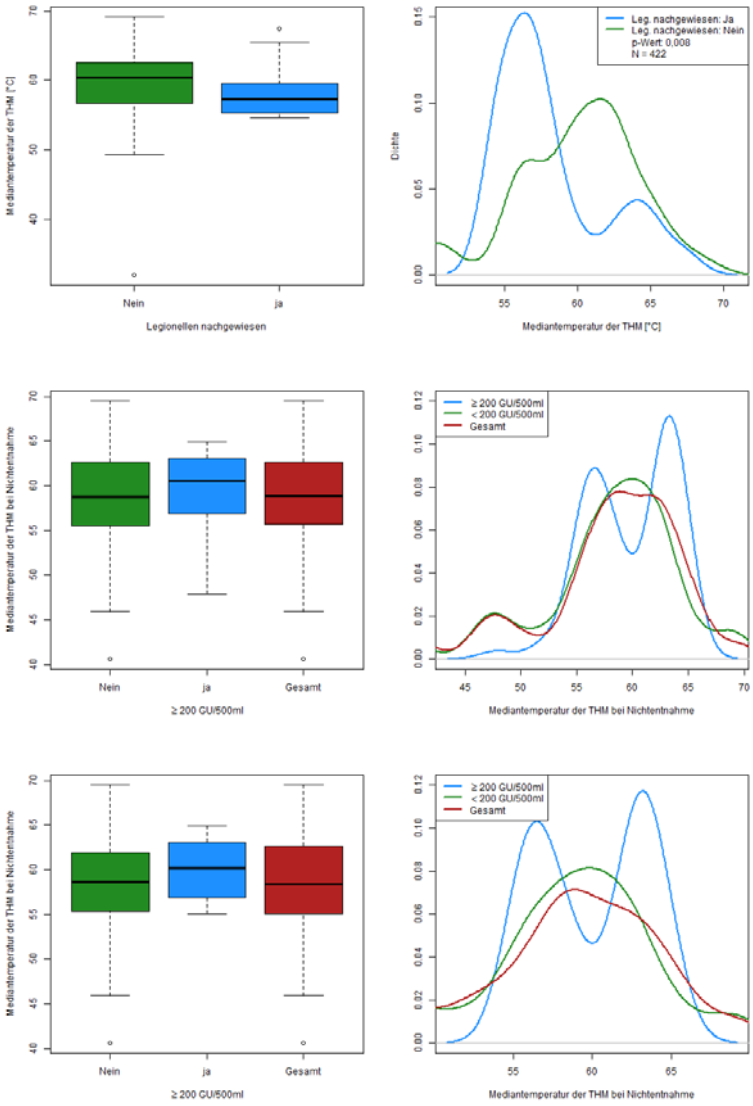


Abb. 4-32 Vergleich der Median-Temperaturen aus der thermo-hydraulischen Messung in den Warmwasserproben TWW gesamt untersucht mit Kulturverfahren (oben) sowie der Median-Temperaturen aus der thermo-hydraulischen Messung bei Nichtentnahme (THM NE) in den Warmwasserproben TWW gesamt bzw. TWW peripher untersucht mit qPCR (Mitte und unten) in den Gruppen negativ (0 KbE/100 mL bzw. <200 GU/500 mL = Nein, grün) und positiv (>0 KbE/100 mL bzw. ≥200 GU/500 mL = Ja, blau) dargestellt als Boxplot (links) mit 25-75 %-Perzentil-Box und Median (dicke waagerechte Linie) sowie als Dichtefunktion (rechts).

Einfluss von Einhaltung der 5-K-Regel

Für 66 der untersuchten 73 Gebäude konnte überprüft werden, ob die (Nicht-)Einhaltung der 5-K-Regel einen Einfluss auf die kulturell nachweisbare Legionellen-Kontamination der TWI hat. Hierzu wurden die Objekte dichotom in kontaminiert (mindestens eine Probe aus dem Objekt positiv) und nicht-kontaminiert (alle Proben negativ) eingeteilt. Es

zeigte sich, dass 83 % der kontaminierten Gebäude die 5-K-Regel eingehalten haben. Aber nur 33 % der Gebäude, die die 5-K-Regel nicht eingehalten haben, waren kontaminiert (Abb. 4-33). Dies ließ vermuten, dass die Einhaltung oder Nichtbeachtung der 5-K-Regel keinen signifikanten Einfluss auf eine Legionellen-Kontamination der TWI hat. Um diese Vermutung statistisch abzusichern, wurde der Chi-Quadrat-Test verwendet. Dieser fällt mit einem p-Wert von 0,305 nicht signifikant aus, was die genannte Hypothese bestätigt.

		Einhaltung 5-K-Regel (Anzahl Gebäude)		
		Ja	Nein	**Σ**
Nachgewiesene Legionellen Kulturverfahren (Anzahl Gebäude)	Ja	15	3	**18**
	Nein	32	16	**48**
	Σ	**47**	**19**	**66**

Abb. 4-33 Vierfeldertafel der Variablen "Einhaltung der 5-K-Regel" und "Nachgewiesene Legionellen".

Die Untersuchung wurde zusätzlich unter Anwendung eines Filters für die Vorlauftemperatur durchgeführt. Als Filterwert wurden 55 und 60 °C Vorlauftemperatur eingesetzt. Hierdurch sollte eine etwaige Abweichung von den in den a.a.R.d.T. vorgeschriebenen Temperaturen am Ausgang des TWE (Großanlagen 60 °C, Kleinanlagen 55 °C) als unabhängiger zusätzlicher Einflussfaktor auf das Kontaminationsgeschehen ausgeschlossen werden. Um diese Fallunterscheidung zu treffen, wurde die Temperatur bei Probenahme im TWW-Vorlauf zur Klassifikation herangezogen.

Betrachtet man die Ergebnisse für 55 °C als Trennwert, ist das Ergebnis jeweils nicht signifikant. Auch bei 60 °C als Trennwert für die Temperaturklassen bleiben die Ergebnisse nicht signifikant. Zudem ähneln sich die Verteilungsmuster der Fallzahlen in den Vier-Felder-Tafeln (Abb. 4-34 und Abb. 4-35). Z. B. hat in allen Tafeln jeweils rund die Hälfte der Gebäude (46-57 %) die 5-K-Regel eingehalten und ist gleichzeitig nicht kontaminiert. Andererseits halten 16-28 % der Objekte ohne nachgewiesene Legionellen-Kontamination die 5-K-Regel nicht ein; und in allen Gruppierungen gibt es mehr Objekte mit Legionellen-Kontamination, die die 5-K-Regel einhalten, als Objekte, die dies nicht tun. Da aus diesen Vergleichen keine Unterschiede herausgearbeitet werden können, lässt sich schlussfolgern, dass auch bei hohen TWW-Vorlauftemperaturen kein unikausaler Zusammenhang zwischen der Einhaltung der 5-K-Regel und den nachgewiesenen Legionellen hergestellt werden kann.

		Einhaltung 5-K-Regel < 55 °C (Anzahl Gebäude)			Einhaltung 5-K-Regel > 55 °C (Anzahl Gebäude)		
		Ja	Nein	Σ	Ja	Nein	Σ
Nachgewiesene Legionellen Kulturverfahren (Anzahl Gebäude)	Ja	2	0	**2**	13	3	**16**
	Nein	8	4	**12**	24	12	**36**
	Σ	**10**	**4**	**14**	**37**	**15**	**52**

Abb. 4-34 Vierfeldertafel der Variablen "Einhaltung der 5-K-Regel" und "Nachgewiesene Legionellen" getrennt nach der Vorlauftemperatur: > 55 °C vs. < 55 °C.

		Einhaltung 5-K-Regel < 60 °C (Anzahl Gebäude)			Einhaltung 5-K-Regel > 60 °C (Anzahl Gebäude)		
		Ja	Nein	Σ	Ja	Nein	Σ
Nachgewiesene Legionellen Kulturverfahren (Anzahl Gebäude)	Ja	9	1	**10**	6	2	**8**
	Nein	20	12	**32**	12	4	**16**
	Σ	**29**	**13**	**42**	**18**	**6**	**24**

Abb. 4-35 Vierfeldertafel der Variablen "Einhaltung der 5-K-Regel" und "Nachgewiesene Legionellen" getrennt nach der Vorlauftemperatur: > 60 °C vs. < 60 °C.

Weiterhin wurde eine mögliche Abhängigkeit der beiden Variablen „Einhaltung der 5-K-Regel“ und „Wartung der TWI“ betrachtet (Abb. 4-36). Es zeigte sich hier, dass in über der Hälfte (n=28) der 54 diesbezüglich auswertbaren Gebäude sowohl die 5-K-Regel eingehalten wurde als auch die TWI gewartet. Ca. 30 % der Gebäude, die die 5-K-Regel eingehalten haben, wurden nicht gewartet. Über die Hälfte der Gebäude, die die 5-K-Regel nicht eingehalten haben, wurden auch einer Wartung unterzogen. Der Chi-Quadrat-Test fällt mit einem p-Wert von 0,334 nicht signifikant aus. Es ist also nicht davon auszugehen, dass vorrangig Objekte, welche nicht gewartet werden, auch die 5-K-Regel nicht einhalten.

		Einhaltung 5-K-Regel (Anzahl Gebäude)		
		Ja	Nein	Σ
Wartung der TWI	Ja	28	8	**36**
	Nein	11	7	**18**
	Σ	**39**	**15**	**54**

Abb. 4-36 Vierfeldertafel der Variablen "Einhaltung der 5-K-Regel" und "Wartung der TWI".

Die Frage nach dem Einfluss der TWW-Temperaturen auf das Vorkommen von Legionellen wurde über die Berechnung von **ROC-Kurven** sowie **Relativen Risiken** beleuchtet. Dahinter steht die Frage, ob es eine eindeutige Grenztemperatur gibt, oberhalb derer eine Legionellen-Kontamination ausreichend sicher ausgeschlossen werden kann. Die ROC-Analysen lieferten sowohl für die *Legionella* spp. (Kultur) als auch *L. pneumophila* (qPCR) allesamt schlechte bis wertlose Ergebnisse mit Fläche unter der Kurve (AUC) zwischen 0,501 und 0,659 mit einem Kurvenverlauf nahe an der Winkelhalbierenden. Sie werden daher an dieser Stelle nicht näher behandelt. Zwei Beispiele zur Veranschaulichung sind in Abb. 4-37 dargestellt.

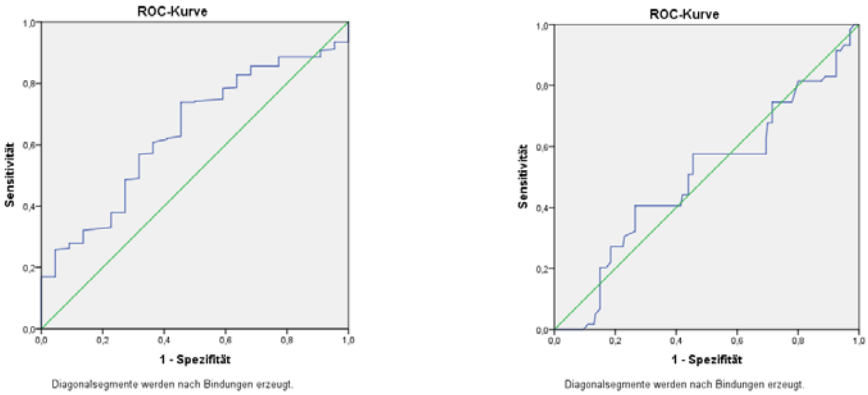


Abb. 4-37 ROC-Kurve hinsichtlich einer Kontamination der Zustandsvariablen Konzentration *Legionella* spp. (Kultur) im TWW 2. Liter und zugehörigen Testvariablen Temperatur bei Probenahme im TWW 2. Liter (n=312) (links) und Zustandsvariablen Konzentration *L. pneumophila* (qPCR) im TWW 2. Liter und zugehörigen Testvariablen Median-Temperatur der THM (n=259). Entsprechend der Fläche unter der Kurve von 0,640 (links) und 0,51 (rechts) wurden die Kurven als schlecht (links) bzw. wertlos (rechts) eingestuft.

Im Folgenden werden die Ergebnisse der berechneten Relativen Risiken in unterschiedlicher Detailtiefe bzgl. des Stichprobenumfangs aufgeführt. Die Betrachtung erfolgt wiederum ausgehend von allen TWW-Proben im Objekt gemeinsam, dann getrennt nach Zentrale und Peripherie sowie weiter eingegrenzt auf die unterschiedlichen entnommenen Liter bzw. Probenahmestellen. Es wurde jeweils für die Temperatur bei Probenahme, die Temperatur im 10. Liter (nur verfügbar für Peripherie), die Mediantemperatur der THM und die Mediantemperatur der THM bei Nichtentnahme analysiert. Alle Berechnungen wurden soweit möglich sowohl für das Kulturverfahren als auch für die qPCR (sowohl positiv (≥ 200 GU/500 mL) als auch Überschreitung des französischen Aktionswertes von > 2.500 GU/500 mL) durchgeführt. Nimmt man als Beispiel 50 °C, so werden die Daten in die Gruppen > 50,0 °C und ≤ 50,0 °C aufgeteilt (Spalten) sowie in die Gruppen „kontaminiert“ und „nicht kontaminiert“ (Zeilen). Ist der ausgegebene Wert für das Relative Risiko größer als 1, heißt das, dass Temperaturen oberhalb des getesteten Trennwerts ein höheres Risiko für einen positiven Legionellen-Nachweis haben. Liegt das Risiko unter 1, so haben Temperaturen oberhalb des getesteten Trennwerts ein geringeres Risiko. In der Tab. 4-28 sind nur die relevanten, d. h. statistisch signifikanten Ergebnisse dargestellt.

Die Ergebnisse berechnen sich entsprechend der eingangs genannten Formel (Kapitel 4.4.3) wie folgt: Für jede Temperaturklasse (in 1 K-Schritten), zu der es Messpunkte gibt, wird eine Vierfeldertafel erstellt (Tab. 4-27).

Tab. 4-27 Muster einer Vierfeldertafel zur Untersuchung des Temperatureinflusses auf das Vorkommen von Legionellen.

		Gruppe 1: über Temperatur-trennwert	**Gruppe 2: unter Temperaturtrennwert**	
Kontamination / Überschreitung Franz. Aktionswert	Ja	a	b	a + b
	Nein	c	d	c + d
		a + c	b + d	

Nimmt man als Beispiel 50 °C, so werden die Daten in die Gruppen > 50,0 °C und ≤ 50,0 °C aufgeteilt (Spalten) sowie in die Gruppen „kontaminiert“ und „nicht kontaminiert“ (Zeilen). Ist der ausgegebene Wert für das Relative Risiko größer als 1, heißt das, dass Temperaturen oberhalb des getesteten Trennwerts ein höheres Risiko für einen positiven Legionellen-Nachweis haben. Liegt das Risiko unter 1, so haben Temperaturen oberhalb des getesteten Trennwerts ein geringeres Risiko.

Tab. 4-28 Signifikante Ergebnisse der Berechnungen der Relativen Risiken getrennt nach den mikrobiologischen Parametern und den Entnahmestellen für die Temperatur bei Probenahme in °C.

	Temperatur bei Probenahme						
	Teilstichprobe	**Temp.**	**p**	**Ri**	**RR**	**N**	**N Min.**
***Legionella* spp. (Kultur)**	**TWW Gesamt**	46	0,015	S	0,43	469	13
		47	0,049	S	0,50	469	13
		50	0,032	S	0,47	469	13
		51	0,034	S	0,47	469	12
		52	0,024	S	0,43	469	10
		53	0,029	S	0,43	469	9
		54	0,045	S	0,45	469	8
	TWW Peripher	52	0,049	S	0,41	328	6
		53	0,043	S	0,38	328	5
	TW Gesamt	19	0,023	E	3,05	217	7
***L. pneumophila* (qPCR)**	**TWW Gesamt**	56	0,034	E	1,48	463	38
	TWW Zentral	55	0,021	E	2,90	165	5
		56	0,012	E	2,61	165	8
		57	0,018	E	2,31	165	10
	TWW Peripher	57	0,008	E	3,44	82	6
	TWW P. 5. Liter	57	0,042	E	1,91	153	13
	TW Gesamt	15	0,033	S	0,46	229	11
***L. pneumophila* (qPCR) oberhalb franz. Aktionswert**	**TWW Gesamt**	55	0,029	E	3,17	409	5
		56	0,005	E	4,45	409	5
		57	0,010	E	3,53	409	7
		58	0,034	E	2,82	409	7
		59	0,005	E	3,85	409	7
		60	0,008	E	3,90	409	5
		56	0,027	E	3,68	267	5

Legende: Schattierungen: rot= Trinkwarmwasser, blau= Trinkwasser (kalt), dunkelgrau= nicht berechenbar; Temp= Signifikanter Temperaturtrennwert; Ri= Richtung mit S: Senkung des Relativen Risikos für die Gruppe > Temperaturwert und E: Erhöhung des Relativen Risikos > Temperaturwert; RR= Wert des Relativen Risikos mit RR < 1 = Senkung des Risikos um (1 – RR)% und RR > 1 = Erhöhung des Risikos um das RR-fache; N Min.= kleinster Wert in der Vierfeldertafel

Alle statistisch signifikanten Ergebnisse ($p < 0,05$) Berechnungen mit ausreichend besetzten Feldern der Vierfeldertafeln ($N > 5$) sind in Tab. 4-29 aufgeführt. Es zeigt sich, dass für den Parameter „Temperatur bei Probenahme“ hinsichtlich der Kultivierbarkeit von Legionellen das Relative Risiko positiver Nachweise im Kulturverfahren bei Temperaturen oberhalb des Wachstums-Optimums für *Legionella pneumophila* (bis ca. 45 °C) abnimmt. Dabei ist das jeweilige Risiko in der Gruppe oberhalb des Trennwerts um 50 - 79 % geringer als in der Gruppe unterhalb des Trennwerts. Die qPCR liefert gegensätzliche Ergebnisse.

Für die qPCR stellt sich das Risiko für einen positiven Nachweis anders dar. Signifikante Ergebnisse werden erst im Grenzbereich einer Wassertemperatur erzielt, bei der Legionellen-Reproduktion möglich ist [WHO07]. Bei Warmwasser-Temperaturen von 54-57 °C haben Proben oberhalb des jeweiligen Trennwertes ein 1,5-5,0faches Risiko einer Kontamination im Vergleich zu Proben unterhalb des Temperatur-Trennwertes. Dies mag u.U. mit der in den Emulatorversuchen festgestellten Abkühlung des TWW auf Temperaturen im Bereich des Legionellen-Wachstumsoptimums in den peripheren Rohrleitungen liegen, welcher dort im Rahmen der Versuche bei Stagnation in großen Zeitanteilen gemessen wurde (Kapitel 7.2.4).

Mit Blick auf das Kaltwasser (TW) zeigt sich für das Kulturverfahren im Kaltwasser gesamt lediglich ein signifikanter Temperaturtrennwert bei 19 °C. Dies liegt an der unteren Grenze des Temperatur-Wachstumsoptimums für *L. pneumophila* [WHO07], bzw. in der Nähe der unteren Grenze für Legionellen [Ohno03]. Hier ist das Risiko für die Gruppe >19 °C ca. dreimal so hoch, wie für die Gruppe ≤ 19 °C. Der Gennachweis (qPCR) ist bei Temperaturen oberhalb 15 °C signifikant verringert, was mit dem rascheren Abbau freigesetzter DNA bei gleichzeitig geringer Wachstumsrate (weit unter dem Optimum) erklärt werden kann.

Für die Temperatur im 10. Liter, welche im Wesentlichen die Temperatursituation im zirkulierenden Warmwasser zum Zeitpunkt der Probenahme widerspiegelt, ergeben sich kaum belastbare Ergebnisse, da die Besetzung der Vierfeldertafel oft zu gering ist. Zwei verwertbare Ergebnisse bestätigen allerdings im Wesentlichen die Ergebnisse aus der Temperatur bei Probenahme. So ist das Relative Risiko für einen positiven Nachweis mittels Kultur bei >56 °C Wassertemperatur im 10. Liter bei PN im Falle peripherer TWW-Proben geringer als bei niedrigeren Temperaturen ($p=0,037$; $RR=0,46$; $n=279$, $N_{min}=10$). Für die qPCR zeigt sich bei einer Temperatur im 10.Liter von > 52 °C in etwa eine Verdoppelung des Risikos eines *L. pneumophila*-Gennachweises ($p=0,044$; $RR=1,95$; $n=311$, $N_{min}=9$). Alle anderen Ergebnisse sind entweder nicht signifikant ($p>0,05$) oder aufgrund der ungünstig verteilten Ausprägungen ($N_{min}\leq5$) nicht aussagekräftig.

Tab. 4-29 Signifikante Ergebnisse der Berechnungen der Relativen Risiken getrennt nach den mikrobiologischen Parametern und den Entnahmestellen für die Mediantemperatur der THM.

	Mediantemperatur der THM						
	Teilstichprobe	**Temp.**	**p**	**Ri**	**RR**	**N**	**N Min.**
***Legionella* spp. (Kultur)**	**TWW Gesamt**	55	0,008	S	0,34	447	7
		57	0,016	S	0,42	447	13
		58	0,000	S	0,25	447	10
		59	0,000	S	0,22	447	7
		60	0,003	S	0,28	447	7
		61	0,034	S	0,38	447	6
	TWW Peripher	57	0,046	S	0,46	313	11
		58	0,010	S	0,36	313	10
		59	0,005	S	0,29	313	7
		60	0,017	S	0,36	313	7
	TWW P. 2. Liter	59	0,031	S	0,33	185	5
***L. pneumophila* (qPCR)**	**TWW Gesamt**	55	0,026	S	0,58	464	13

Legende: Schattierungen: rot= Trinkwarmwasser, blau= Trinkwasser (kalt), dunkelgrau= nicht berechenbar; Temp= Signifikanter Temperaturtrennwert; Ri= Richtung mit S: Senkung des Relativen Risikos für die Gruppe > Temperaturwert und E: Erhöhung des Relativen Risikos > Temperaturwert; RR= Wert des Relativen Risikos mit RR < 1 = Senkung des Risikos um (1 – RR)% und RR > 1 = Erhöhung des Risikos um das RR-fache; N Min.= kleinster Wert in der Vierfeldertafel

Betrachtet man die Mediantemperatur der THM, welche die Temperatur des zirkulierenden TWW noch genauer charakterisiert, als dies der 10. Liter bei PN vermag, so zeigt sich für die Kultur ab einem Trennwert von > 55 °C ein signifikant geringeres Relatives Risiko für die jeweils höhere Temperatur für die Teilstichproben TWW gesamt und TWW zentral; bei TWW peripher verschiebt sich diese Signifikanz auf > 57 °C bzw. weiter eingegrenzt auf TWW peripher im 2. Liter auf > 59 °C. Die Risiko-Absenkung zwischen den Gruppen liegt zwischen 58 % (TWW gesamt) und 89 % (TWW Zentrale).

Für die qPCR zeigt sich ebenfalls eine Senkung des Risikos einer Kontamination bei höheren Temperaturen; signifikant sind > 55 °C für alle TWW-Proben; Teilstichproben hiervon liefern keine signifikanten Ergebnisse oder weisen hinsichtlich der Kontamination zu kleine n auf.

Die Werte für die „Mediantemperatur der THM bei Nichtentnahme“ (Tab. 4-30) zeigen signifikante Ergebnisse für das Kulturverfahren bei Temperaturen von > 58–60 °C. Die

Senkung des Risikos liegt dabei zwischen 62 und 71 %. Im qPCR-Nachweis ist das Risiko eines positiven Befunds im Temperaturbereich > 61–63 °C als Trennwert um das 2-3fache erhöht.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass sich das Relative Risiko einer Legionellen-Kontamination je nach betrachtetem Temperaturtyp und verwendeter Nachweismethodik unterschiedlich darstellt. Signifikante Ergebnisse möglicher Trennwerte fanden sich über eine Temperaturspanne von 55 °C bis 63 °C. Daraus lässt sich nicht sicher eine Temperatur ermitteln, welche als Grenztemperatur zur Vermeidung einer Kontamination einen allgemeingültigen Charakter für sich beanspruchen kann. Insgesamt stellen sich die Ergebnisse als zu inkonsistent dar, um verallgemeinerbare Schlussfolgerungen hinsichtlich einer „Grenztemperatur“ ziehen zu können.

Tab. 4-30 Signifikante Ergebnisse der Berechnungen der Relativen Risiken getrennt nach den mikrobiologischen Parametern und den Entnahmestellen für die Mediantemperatur der THM bei Nichtentnahme.

	Mediantemperatur der THM bei Nichtentnahme						
	Teilstichprobe	**Temp.**	**p**	**Ri**	**RR**	**N**	**N Min.**
***Legionella* spp. (Kultur)**	**TWW Gesamt**	58	0,014	S	0,38	380	9
		59	0,006	S	0,29	380	6
		60	0,021	S	0,35	380	6
	TWW Peripher	59	0,031	S	0,37	266	6
***L. pneumophila* (qPCR)**	**TWW Gesamt**	61	0,008	E	1,72	388	35
		62	0,000	E	2,10	388	35
		63	0,000	E	2,56	388	23
		62	0,048	E	2,05	133	11
	TWW Zentral	63	0,000	E	3,29	133	9
	TWZ (Rücklauf)	61	0,017	E	1,78	255	24
	TWW Peripher	62	0,002	E	2,13	255	24
		63	0,001	E	2,27	255	14
	TWW P. 2. Liter	62	0,018	E	2,10	134	13
		63	0,036	E	2,02	134	7
	TWW P. 5. Liter	62	0,032	E	2,19	121	11
		63	0,008	E	2,61	121	7
***L. pneu.* (qPCR) > frAW**	**TWW Gesamt**	63	0,000	E	11,12	330	5
	TWW Peripher	62	0,002	E	10,38	216	5

Legende: Schattierungen: rot= Trinkwarmwasser, blau= Trinkwasser (kalt), dunkelgrau= nicht berechenbar; *L. pneu* (qPCR) > frAW = *L. pneumophila* oberhalb des franz. Aktionswertes (5000GU/1L); Temp.=

Signifikanter Temperaturtrennwert; Ri= Richtung mit S: Senkung des Relativen Risikos für die Gruppe > Temperaturwert und E: Erhöhung des Relativen Risikos > Temperaturwert; RR= Wert des Relativen Risikos mit RR < 1 = Senkung des Risikos um (1 – RR)% und RR > 1 = Erhöhung des Risikos um das RR-fache; N Min.= kleinster Wert in der Vierfeldertafel

Weitere hydraulische Kenndaten

Da die diversen vor Ort gemessenen Temperaturen sich für die Suche nach einer Grenztemperatur als nicht zielführend erwiesen, wurden mit Hilfe der Daten aus den THM-Messungen die in Tab. 4-31 aufgeführten Hilfsvariablen zur genaueren thermohydraulischen Charakterisierung der TWI seitens GEWV berechnet und in die statistische Auswertung seitens IHPH einbezogen. Grundansatz sollte die Bewertung des Einflusses der reinen Zirkulation, also ohne aktive Entnahme an TWW sein – im Weiteren vereinfacht als Nichtentnahme (NE) bezeichnet-

Tab. 4-31 Übersicht über die mit Hilfe der Daten aus den thermohydraulischen Messungen neu erzeugten Hilfsvariablen zur Charakterisierung der TWI

Variable	Erklärung
nV1	Nichtentnahme (NE) Vp-TWZ in l/min Median *Entspricht dem Medianwert des Zirkulationsvolumenstroms in Zeiten ohne Entnahme.*
nV2	Nichtentnahme DeltaT-TWW Median *Entspricht der Temperaturdifferenz von TWW-Austritt und Wiedereintritt TWZ in den TWE.*
nV3	Nichtentnahme V*DeltaT-TWW Median *Ist nur ein Zwischengröße, die das Produkt aus den Medianwerten des Zirkulationsvolumenstroms (nV1) und Temperaturdifferenz von TWW-Austritt und Wiedereintritt TWZ in den TWE (nV2) für NE-Zeiten darstellt.*
nV4	Prozentualer Anteil Nichtentnahme *Ist der prozentuale Zeitanteil in denen während der THM keine TWW-entnahme stattfand.*
nV5	Mitteltemperatur Stoffwerte Median *Mitteltemperatur für die Berechnung der Stoffwerte zur Ermittlung der Wärmeströme. Statistisch irrelevant.*
nV6	Wärmestrom Zirkulation Nichtentnahme *Aus nV2 und nV5 berechneter Medianwert des für die Deckung der Zirkulationsverluste benötigten Wärmestroms in NE-Zeiten.*
nV7	Wärmestrom Zirkulation Nichtentnahme in W (Stoffwerte Fluidexcel) *Identsich mit nV6, nur andere Einheit.*
nV8	WE-spezifischer Volumenstrom Zirkulation Nichtentnahme in l/min und WE *Quotient aus nV7 und der Anzahl der Wohneinheiten im Objekt.*

Mit diesen neuen Variablen (nV) 1-8 wurden zum einen Korrelationen mit den mikrobiologischen Parametern berechnet, zum anderen Medianvergleiche durchgeführt. Die detaillierten relevanten Ergebnisse sind Tab. 4-32 und Tab. 4-33 zu entnehmen.

Die Variablen nV3, nV5 und nV7 sind Hilfsvariablen zur Berechnung weiterer Variablen und werden insofern statistisch nicht weiter gesondert betrachtet. Der Medianwert des

Zirkulationsvolumenstroms in Zeiten ohne Entnahme **Median NE Vp-TWZ** (nV1) korreliert nicht statistisch signifikant mit den kulturellen *Legionella*-Befunden, jedoch in den TWW-Proben mit qPCR und GZZ. Im Falle der mittels qPCR bestimmten Konzentrationen an *L. pneumophila*-Genen stellt sich der Zusammenhang dabei sowohl mit den Proben der Peripherie als auch dadurch beeinflusst in TWW gesamt als schwach positiv dar (jedoch nicht mit den zentralen TWW-Proben). Schwach positive Zusammenhänge mit statistischer Signifikanz für beide Nachweismethoden sind außerdem für den **Wärmestrom Zirkulation Nichtentnahme** (nV6) (TWW gesamt) sowie für den **WE-spezifischen Volumenstrom Zirkulation Nichtentnahme** (nV8) (TWW gesamt, TWW Peripherie, TWW peripher 2. Liter) zu finden. Generell bedeutet dies, je höher diese thermohydraulischen Kenndaten bei Nichtentnahme ausfallen, desto mehr Legionellen lassen sich in den Wasserproben nachweisen. Inwiefern dies ggf. ein Artefakt der Objekt-/Anlagengröße generell darstellt, kann nicht beantwortet werden.

Der **Median NE DeltaT-TWW** (nV2), welcher der Temperaturdifferenz von TWW-Austritt und Wiedereintritt TWZ in den TWE entspricht, und somit die 5-K-Regel in Zeiten der Nichtentnahme darstellt, liefert einen schwach negativen statistischen Zusammenhang mit der Konzentration an kultivierbaren Legionellen-Kolonien (TWW gesamt, TWW zentral, TW peripher) sowie nachweisbaren Genen von *L. pneumophila* (TWW gesamt). Dies bedeutet, je höher dieses Temperaturverhältnis bei Nichtentnahme ausfällt, desto weniger Legionellen lassen sich in den Wasserproben nachweisen. Nicht ersichtlich ist hier wiederum, ob es sich ggf. um einen Nebeneffekt handelt, falls bei höheren Austrittstemperaturen die Temperaturdifferenz größer ist. Der **prozentuale Anteil der Nichtentnahme** (nV4) wirkt sich nicht statistisch signifikant auf die Legionellen aus.

Die GZZ korreliert signifikant negativ mit den Variablen **Median NE Vp-TWZ, und Wärmestrom Zirkulation Nichtentnahme** (nV1, nV6): je höher der Wert der hydraulischen Kennzahlen, desto geringer fällt GZZ aus. Zudem gibt es ausgeprägte positive Korrelationen der GZZ mit dem **prozentualen Anteil der Nichtentnahme** (nV4). Keinerlei statistische Korrelation hingegen wurde zwischen GZZ und **Median NE DeltaT-TWW** (nV2) gefunden (Tab. 4-32).

Medianvergleiche lassen sich wiederum für die Parameter bestimmen, bei denen Nachweisgrenzen vorhanden sind, und die damit in zwei Gruppen (kontaminiert vs. nicht kontaminiert) eingeteilt werden können. Signifikante Medianunterschiede können hinsichtlich der kulturellen Befunde mehrheitlich nicht belegt werden. Am interessantesten stellt sich hier die Variable **WE-spezifischer Volumenstrom der Zirkulation bei Nichtentnahme** (nV8) dar. Statistisch signifikante geringe Medianunterschiede (Differenz 0,1 L/min·WE) mit jeweils höheren Werten in der Gruppe der kontaminierten Proben lassen sich hier im Warmwasser (TWW gesamt und TWW peripher 2. Liter) finden, etwas höhere signifikante Unterschiede von 0,77 bzw. 0,40 L/min·WE im Kaltwasser (TW gesamt bzw. TW peripher).

Hinsichtlich im Wasser vorhandener *L. pneumophila*-Gene lassen sich statistisch ausgeprägtere Medianunterschiede mit ebenfalls jeweils höheren Werten in der Gruppe der kontaminierten Proben für diese Parameter: **Median NE Vp-TWZ** (nV1) und **WE-spezifischen Volumenstrom Zirkulation Nichtentnahme** (nV8) belegen. Die Verteilungsunterschiede gelten jeweils für TWW gesamt sowie für die Peripherie, wobei sich nV8 nicht mehr auf die Genkonzentration im 5. Liter TWW peripher auswirkt. Insgesamt stellen sich somit die Aussagen, welche mit Hilfe von nV8, dem WE-spezifischen Volumenstrom der Zirkulation bei Nichtentnahme, gemacht werden können, am belastbarsten

dar. Der oben vermutete Einfluss der generellen Objekt- bzw. Anlagengröße ist hier durch die Umrechnung auf die Wohneinheiten am geringsten.

Tab. 4-32 Korrelationen der hygienisch-mikrobiologischen Parameter *Legionella* spp. (Kultur), *L. pneumophila* (qPCR) sowie GZZ (Durchflusszytometrie) mit den auf Grundlage thermohydraulischer Messungen erzeugten Hilfsvariablen zur genaueren thermohydraulischen Charakterisierung der TWI

	Teilstichprobe	GZZ (FCM)			*Legionella* spp. (Kultur)			*L. pneumophila* (qPCR)		
		p	Tau	N	p	Tau	N	p	Tau	N
nV1	**TWW Gesamt**	*0,000*	*-0,197*	*257*	0,070	0,078	438	*0,000*	*0,177*	*393*
	TWW Zentral, davon	*0,003*	*-0,244*	*84*	0,281	0,085	137	0,063	0,142	137
	TWWz (Vorlauf)	*0,022*	*-0,267*	*42*	0,440	0,086	69	0,243	0,125	69
	TWZ (Rücklauf)	0,057	-0,226	42	0,450	0,085	68	0,144	0,161	68
	TWW Peripher, davon	*0,001*	*-0,190*	*173*	0,172	0,071	301	*0,001*	*0,189*	*256*
	TWW P. 2. Liter	*0,027*	*-0,174*	*89*	0,209	0,085	175	*0,029*	*0,168*	*132*
	TWW P. 5. Liter	*0,011*	*-0,205*	*84*	0,570	0,046	126	*0,008*	*0,212*	*124*
	TW Gesamt	0,141	-0,094	134	0,659	0,028	202	0,494	0,044	202
	TW Zentral, davon	0,346	-0,102	50	0,134	0,159	76	0,854	0,020	76
	TWz (Zulauf)	0,212	-0,294	16	0,061	0,299	39	0,422	0,129	39
	HEL	0,892	0,017	34				0,755	-0,045	37
	TW Peripher	0,239	-0,095	84	0,768	-0,024	126	0,511	0,053	126
nV2	**TWW Gesamt**	0,785	0,012	257	*0,014*	*-0,106*	*438*	*0,039*	*-0,092*	*393*
	TWW Zentral, davon	0,680	0,034	84	*0,021*	*-0,181*	*137*	0,194	-0,099	137
	TWWz (Vorlauf)	0,673	0,049	42	0,098	-0,183	69	0,533	-0,067	69
	TWZ (Rücklauf)	0,831	0,025	42	0,114	-0,178	68	0,237	-0,130	68
	TWW Peripher, davon	0,984	0,001	173	0,095	-0,087	301	0,113	-0,088	256
	TWW P. 2. Liter	0,919	-0,008	89	0,132	-0,102	175	0,166	-0,107	132
	TWW P. 5. Liter	0,845	0,016	84	0,491	-0,056	126	0,386	-0,069	124
	TW Gesamt	0,285	-0,068	134	0,059	-0,121	202	0,112	-0,101	202
	TW Zentral, davon	0,845	-0,021	50	0,700	-0,041	76	0,979	-0,003	76
	TWz (Zulauf)	0,061	-0,440	16	0,624	-0,078	39	0,858	0,029	39
	HEL	0,458	0,097	34				1,000	0,000	37
	TW Peripher	0,210	-0,101	84	*0,045*	*-0,163*	*126*	0,071	-0,146	126
nV3	**TWW Gesamt**	*0,000*	*-0,193*	*257*	0,068	0,079	438	*0,000*	*0,181*	*393*
	TWW Zentral, davon	*0,004*	*-0,233*	*84*	0,411	0,065	137	*0,032*	*0,164*	*137*
	TWWz (Vorlauf)	*0,045*	*-0,234*	*42*	0,581	0,061	69	0,160	0,151	69

	Teilstichpro-be	GZZ (FCM)			*Legionella* spp. (Kultur)			*L. pneumophila* (qPCR)		
		p	Tau	N	p	Tau	N	p	Tau	N
	TWZ (Rücklauf)	*0,039*	*-0,244*	*42*	0,536	0,070	68	0,098	0,182	68
	TWW Peripher, davon	*0,001*	*-0,190*	*173*	0,158	0,073	301	*0,001*	*0,183*	*256*
	TWW P. 2. Liter	*0,028*	*-0,172*	*89*	0,236	0,081	175	*0,030*	*0,167*	*132*
	TWW P. 5. Liter	*0,012*	*-0,203*	*84*	0,419	0,066	126	*0,012*	*0,200*	*124*
	TW Gesamt	0,171	-0,087	134	0,960	-0,003	202	0,649	0,029	202
	TW Zentral, davon	0,410	-0,089	50	0,169	0,146	76	0,773	0,031	76
	TWz (Zulauf)	0,061	-0,440	16	0,130	0,241	39	0,284	0,172	39
	HEL	0,458	0,097	34				0,708	-0,054	37
	TW Peripher	0,275	-0,088	84	0,376	-0,072	126	0,790	0,022	126
nV4	**TWW Gesamt**	*0,000*	*0,292*	*257*	0,919	-0,004	438	0,571	0,023	393
	TWW Zentral, davon	*0,000*	*0,321*	*84*	0,687	0,029	137	0,949	-0,004	137
	TWWz (Vorlauf)	*0,005*	*0,304*	*42*	0,782	0,028	69	0,491	0,068	69
	TWZ (Rücklauf)	*0,002*	*0,336*	*42*	0,778	0,029	68	0,404	-0,084	68
	TWW Peripher, davon	*0,000*	*0,282*	*173*	0,775	-0,014	301	0,435	0,040	256
	TWW P. 2. Liter	*0,000*	*0,266*	*89*	0,801	-0,016	175	0,248	0,082	132
	TWW P. 5. Liter	*0,000*	*0,299*	*84*	0,883	-0,011	126	0,920	-0,007	124
	TW Gesamt	*0,000*	*0,282*	*134*	0,473	0,042	202	0,125	-0,090	202
	TW Zentral, davon	*0,031*	*0,213*	*50*	0,442	0,075	76	*0,039*	*-0,199*	*76*
	TWz (Zulauf)	0,074	0,341	16	0,499	0,095	39	0,184	-0,185	39
	HEL	0,292	0,127	34				0,107	-0,222	37
	TW Peripher	*0,000*	*0,317*	*84*	0,630	0,036	126	0,653	-0,033	126
nV5	**TWW Gesamt**	*0,029*	*0,100*	*257*	0,730	-0,015	438	*0,000*	*0,180*	*393*
	TWW Zentral, davon	0,522	0,052	84	0,487	-0,055	137	*0,029*	*0,167*	*137*
	TWWz (Vorlauf)	0,733	0,040	42	0,675	-0,046	69	0,209	0,135	69
	TWZ (Rücklauf)	0,599	0,062	42	0,567	-0,065	68	0,059	0,208	68
	TWW Peripher, davon	*0,014*	*0,137*	*173*	0,971	-0,002	301	*0,001*	*0,190*	*256*
	TWW P. 2. Liter	0,061	0,147	89	0,589	0,037	175	*0,011*	*0,194*	*132*
	TWW P. 5. Liter	0,119	0,126	84	0,419	-0,066	126	*0,020*	*0,186*	*124*
	TW Gesamt	*0,000*	*0,285*	*134*	0,086	0,110	202	*0,035*	*0,135*	*202*
	TW Zentral, davon	*0,020*	*0,250*	*50*	0,145	0,155	76	0,248	0,122	76
	TWz (Zulauf)	0,435	0,183	16	*0,040*	*0,325*	*39*	0,372	0,143	39
	HEL	*0,018*	*0,299*	*34*				0,574	0,082	37

	Teilstichpro-be	GZZ (FCM)			*Legionella* spp. (Kultur)			*L. pneumophila* (qPCR)		
		p	Tau	N	p	Tau	N	p	Tau	N
	TW Peripher	*0,000*	*0,308*	*84*	0,238	0,096	126	0,075	0,144	126
nV6	**TWW Gesamt**	*0,000*	*-0,172*	*257*	*0,027*	*0,094*	*438*	*0,047*	*0,086*	*393*
	TWW Zentral, davon	*0,013*	*-0,201*	*84*	0,336	0,074	137	0,386	0,064	137
	TWWz (Vorlauf)	0,075	-0,205	42	0,516	0,070	69	0,561	0,061	69
	TWZ (Rücklauf)	0,074	-0,209	42	0,474	0,079	68	0,497	0,073	68
	TWW Peripher, davon	*0,002*	*-0,173*	*173*	0,075	0,091	301	0,088	0,092	256
	TWW P. 2. Liter	*0,048*	*-0,154*	*89*	0,142	0,098	175	0,192	0,098	132
	TWW P. 5. Liter	*0,019*	*-0,188*	*84*	0,304	0,082	126	0,269	0,086	124
	TW Gesamt	0,163	-0,088	134	0,755	0,020	202	0,376	-0,055	202
	TW Zentral, davon	0,401	-0,088	50	0,148	0,149	76	0,434	-0,080	76
	TWz (Zulauf)	0,063	-0,412	16	0,114	0,243	39	0,428	-0,121	39
	HEL	0,465	0,091	34				0,860	-0,025	37
	TW Peripher	0,243	-0,093	84	0,608	-0,041	126	0,526	-0,050	126
nV7	**TWW Gesamt**	0,070	-0,083	257	0,544	0,026	438	*0,001*	*0,155*	*393*
	TWW Zentral, davon	*0,049*	*-0,161*	*84*	0,864	-0,014	137	0,200	0,099	137
	TWWz (Vorlauf)	0,117	-0,183	42	0,911	-0,013	69	0,518	0,070	69
	TWZ (Rücklauf)	0,217	-0,146	42	0,907	-0,013	68	0,240	0,131	68
	TWW Peripher, davon	0,539	-0,034	173	0,483	0,037	301	*0,001*	*0,182*	*256*
	TWW P. 2. Liter	0,947	-0,005	89	0,308	0,069	175	*0,007*	*0,211*	*132*
	TWW P. 5. Liter	0,454	-0,060	84	0,787	-0,022	126	*0,065*	*0,149*	*124*
	TW Gesamt	0,494	0,044	134	0,384	0,056	202	0,791	-0,017	202
	TW Zentral, davon	0,786	0,029	50	0,073	0,192	76	0,904	0,013	76
	TWz (Zulauf)	0,761	-0,091	16	0,071	0,292	39	0,711	0,060	39
	HEL	0,415	0,103	34				0,661	-0,064	37
	TW Peripher	0,577	0,045	84	0,945	0,006	126	0,662	-0,036	126
nV8	**TWW Gesamt**	0,150	0,062	257	*0,019*	*0,094*	*438*	*0,007*	*0,113*	*393*
	TWW Zentral, davon	0,253	0,087	84	0,183	0,098	137	0,387	0,062	137
	TWWz (Vorlauf)	0,621	0,054	42	0,331	0,101	69	0,651	0,045	69
	TWZ (Rücklauf)	0,300	0,114	42	0,362	0,096	68	0,429	0,081	68
	TWW Peripher, davon	0,263	0,059	173	0,050	0,095	301	*0,006*	*0,141*	*256*
	TWW P. 2. Liter	0,488	0,051	89	*0,022*	*0,145*	*175*	*0,007*	*0,195*	*132*
	TWW P. 5. Liter	0,428	0,060	84	0,872	0,012	126	0,263	0,083	124

	Teilstichpro-be	GZZ (FCM)			*Legionella* spp. (Kultur)			*L. pneumophila* (qPCR)		
		p	Tau	N	p	Tau	N	p	Tau	N
	TW Gesamt	*0,033*	*0,127*	*134*	*0,008*	*0,159*	*202*	0,468	-0,043	202
	TW Zentral, davon	0,258	0,113	50	0,095	0,165	76	0,511	-0,065	76
	TWz (Zulauf)	0,119	0,296	16	0,100	0,236	39	0,359	-0,131	39
	HEL	0,840	0,025	34				0,841	-0,028	37
	TW Peripher	0,073	0,136	84	*0,034*	*0,161*	*126*	0,649	-0,034	126

Legende: nV1= Nichtentnahme (NE) Vp-TWZ in l/min Median, nV2 = Nichtentnahme DeltaT-TWW Median, nV3 = Nichtentnahme V*DeltaT-TWW Median, nV4 = Prozentualer Anteil Nichtentnahme, nV5 = Mitteltemperatur Stoffwerte Median, nV6 = Wärmestrom Zirkulation Nichtentnahme, nV7 = Wärmestrom Zirkulation Nichtentnahme in W (Stoffwerte Fluidexcel), nV8 = WE-spezifischer Volumenstrom Zirkulation Nichtentnahme in l/min und WE; Schattierungen: rot= Trinkwarmwasser, blau= Trinkwasser (kalt), dunkelgrau= nicht berechenbar bzw. Berechnung nicht sinnvoll, kursiv = signifikante Ergebnisse (p< 0,05); Tau= Korrelationskoeffizient (keine Aussage über die Stärke der Korrelation, nur über die Richtung)

Tab. 4-33 Medianvergleiche der hygienisch-mikrobiologischen Parameter *Legionella* spp. (Kultur), *L. pneumophila* (qPCR) sowie GZZ (Durchflusszytometrie) mit den auf Grundlage thermohydraulischer Messungen erzeugten Hilfsvariablen zur genaueren thermohydraulischen Charakterisierung der TWI

	Teil-Stichprobe	*Legionella* spp. (Kultur) Positive Proben					*L. pneumophila* (qPCR) Quantifizierbare Proben				
		N1	M1	N0	M0	p	N1	M1	N0	M0	P
nV1	**TWW Gesamt**	27	9,21	326	8,98	0,087	*73*	*13,82*	*242*	*6,92*	*0,000*
	TWW Zentral, davon	4	96,21	106	8,86	0,281	23	13,57	87	5,61	0,068
	TWWz (Vorlauf)	2	96,21	54	8,58	0,440	12	12,23	44	5,40	0,272
	TWZ (Rücklauf)	2	96,21	52	8,90	0,478	11	13,57	43	5,61	0,144
	TWW Peripher, davon	23	9,21	220	9,10	0,220	*50*	*16,11*	*155*	*8,86*	*0,000*
	TWW P. 2. Liter	16	9,21	126	8,98	0,259	*28*	*16,11*	*78*	*8,86*	*0,026*
	TWW P. 5. Liter	7	8,86	94	9,29	0,630	*22*	*16,11*	*77*	*6,92*	*0,002*
	TW Gesamt	12	9,04	150	9,21	0,673	20	12,23	142	8,93	0,514
	TW Zentral, davon	2	35,39	59	8,98	0,145	5	13,57	56	8,96	0,885
	TWz (Zulauf)	2	35,39	26	9,07	0,074	2	15,99	26	9,07	0,448
	HEL						3	9,36	30	8,64	0,731
	TW Peripher	10	7,89	91	9,36	0,807	15	10,88	86	8,93	0,528
nV2	**TWW Gesamt**	27	2,42	326	3,95	0,015	*73*	*3,21*	*242*	*3,96*	*0,018*
	TWW Zentral, davon	*4*	*1,91*	*106*	*3,96*	*0,022*	23	3,21	87	3,96	0,126
	TWWz (Vorlauf)	2	1,91	54	3,96	0,107	12	2,99	44	3,96	0,491
	TWZ (Rücklauf)	2	1,91	52	3,96	0,114	11	3,21	43	3,96	0,144

	Teil-Stichprobe	*Legionella* spp. (Kultur) Positive Proben					*L. pneumophila* (qPCR) Quantifizierbare Proben				
		N1	M1	N0	M0	p	N1	M1	N0	M0	P
	TWW Peripher, davon	23	2,42	220	3,95	0,103	5	3,21	155	3,96	0,073
	TWW P. 2. Liter	16	2,78	126	3,95	0,131	28	3,21	78	3,96	0,142
	TWW P. 5. Liter	7	2,42	94	3,95	0,521	22	3,22	77	3,96	0,295
	TW Gesamt	12	2,90	150	3,96	0,059	20	3,18	142	3,96	0,111
	TW Zentral, davon	2	3,26	59	3,70	0,700	5	3,95	56	3,66	0,990
	TWz (Zulauf)	2	3,26	26	3,96	0,623	2	3,76	26	3,96	0,893
	HEL						3	3,95	30	3,58	0,977
	TW Peripher	*10*	*2,90*	*91*	*3,96*	*0,047*	15	2,66	86	3,96	0,060
nV3	**TWW Gesamt**	27	42,35	326	32,51	0,082	*73*	*58,39*	*242*	*21,58*	*0,000*
	TWW Zentral, davon	4	208,19	106	21,58	0,411	23	37,69	87	19,79	0,062
	TWWz (Vorlauf)	2	208,19	54	21,25	0,581	12	37,27	44	19,73	0,231
	TWZ (Rücklauf)	2	208,19	52	22,92	0,567	11	37,69	43	19,79	0,156
	TWW Peripher, davon	23	42,35	220	35,94	0,199	*50*	*58,39*	*155*	*30,67*	*0,001*
	TWW P. 2. Liter	16	38,69	126	34,68	0,299	*28*	*58,39*	*78*	*30,67*	*0,048*
	TWW P. 5. Liter	7	42,35	94	35,94	0,454	*22*	*58,39*	*77*	*24,26*	*0,010*
	TW Gesamt	12	20,69	150	35,03	0,934	20	37,69	142	32,51	0,669
	TW Zentral, davon	2	123,46	59	21,58	0,181	5	37,69	56	22,92	0,762
	TWz (Zulauf)	2	123,46	26	17,62	0,153	2	58,68	26	17,62	0,305
	HEL						3	36,85	30	31,59	0,731
	TW Peripher	10	19,79	91	36,85	0,384	15	37,69	86	35,94	0,848
nV4	**TWW Gesamt**	28	22,50	394	26,00	0,940	87	24,00	290	27,00	0,862
	TWW Zentral, davon	4	29,50	129	26,00	0,697	27	20,00	106	27,50	0,962
	TWWz (Vorlauf)	2	29,50	65	26,00	0,810	14	31,50	53	26,00	0,440
	TWZ (Rücklauf)	2	29,50	64	26,50	0,778	13	16,00	53	29,00	0,391
	TWW Peripher, davon	24	22,50	265	26,00	0,802	60	24,50	184	27,00	0,786
	TWW P. 2. Liter	16	22,50	153	26,00	0,830	32	25,00	94	26,50	0,370
	TWW P. 5. Liter	8	22,50	112	26,50	0,903	28	20,00	90	28,00	0,588
	TW Gesamt	13	37,00	181	25,00	0,512	27	18,00	167	28,00	0,133
	TW Zentral, davon	2	37,50	72	25,50	0,442	*7*	*2,00*	*67*	*30,00*	*0,040*
	TWz (Zulauf)	2	37,50	35	21,00	0,499	4	5,50	33	34,00	0,209

	Teil-Stichprobe	*Legionella* spp. (Kultur) Positive Proben					*L. pneumophila* (qPCR) Quantifizierbare Proben				
		N1	M1	N0	M0	p	N1	M1	N0	M0	P
	HEL						3	2,00	34	29,50	0,100
	TW Peripher	11	34,00	109	25,00	0,698	20	25,00	100	26,50	0,682
nV5	**TWW Gesamt**	27	55,62	326	56,99	0,714	*73*	*59,21*	*242*	*56,43*	*0,001*
	TWW Zentral, davon	4	55,63	106	56,99	0,487	23	59,21	87	56,67	0,071
	TWWz (Vorlauf)	2	55,63	54	56,95	0,675	12	58,73	44	56,54	0,407
	TWZ (Rücklauf)	2	55,63	52	57,13	0,598	11	59,97	43	56,67	0,086
	TWW Peripher, davon	23	55,62	220	56,99	0,953	*50*	*58,73*	*155*	*56,43*	*0,003*
	TWW P. 2. Liter	16	56,02	126	56,99	0,651	*28*	*58,73*	*78*	*55,90*	*0,029*
	TWW P. 5. Liter	7	55,29	94	56,99	0,462	*22*	*59,11*	*77*	*56,67*	*0,041*
	TW Gesamt	12	59,42	150	56,79	0,081	*20*	*58,73*	*142*	*56,55*	*0,039*
	TW Zentral, davon	2	60,15	59	56,67	0,156	5	60,41	56	56,79	0,264
	TWz (Zulauf)	2	60,15	26	56,42	0,050	2	58,41	26	56,55	0,397
	HEL						3	61,75	30	57,43	0,614
	TW Peripher	10	57,82	91	56,92	0,213	15	58,25	86	56,41	0,076
nV6	**TWW Gesamt**	*27*	*2.908*	*345*	*2.102*	*0,033*	86	3.194	247	1.438	0,079
	TWW Zentral, davon	4	14.300	112	1.397	0,336	27	2.523	89	1.347	0,444
	TWWz (Vorlauf)	2	14.300	57	1.355	0,516	14	2.529	45	1.347	0,656
	TWZ (Rücklauf)	2	14.300	55	1.438	0,501	13	2.523	44	1.351	0,536
	TWW Peripher, davon	23	2.908	233	2.224	0,097	59	3.809	158	1.665	0,136
	TWW P. 2. Liter	16	2.653	133	2.224	0,183	32	3.816	80	1.883	0,298
	TWW P. 5. Liter	7	2.908	100	2.163	0,331	27	3.809	78	1.665	0,294
	TW Gesamt	12	1.419	160	2.102	0,782	25	1.482	147	2.102	0,407
	TW Zentral, davon	2	8.460	63	1.355	0,159	7	2.523	58	1.460	0,465
	TWz (Zulauf)	2	8.460	28	982	0,134	4	2.000	26	1.207	0,482
	HEL						3	2.523	32	1.883	0,883
	TW Peripher	10	1.355	97	2.398	0,618	18	1.482	89	2.224	0,540
nV7	**TWW Gesamt**	27	132,10	322	79,80	0,615	*73*	*140,20*	*238*	*74,90*	*0,001*
	TWW Zentral, davon	4	101,85	104	79,55	0,877	23	117,30	85	74,90	0,254
	TWWz (Vorlauf)	2	101,85	53	79,80	0,946	12	115,95	43	74,90	0,639
	TWZ (Rücklauf)	2	101,85	51	79,30	0,907	11	140,20	42	73,90	0,259

	Teil-Stichprobe	*Legionella* spp. (Kultur) Positive Proben					*L. pneumophila* (qPCR) Quantifizierbare Proben				
		N1	M1	N0	M0	p	N1	M1	N0	M0	P
	TWW Peripher, davon	23	132,10	218	79,80	0,575	*50*	*159,30*	*153*	*74,90*	*0,001*
	TWW P. 2. Liter	16	145,70	125	79,30	0,391	*28*	*159,30*	*77*	*74,90*	*0,008*
	TWW P. 5. Liter	7	67,90	93	89,00	0,771	22	149,75	76	74,90	0,055
	TW Gesamt	12	132,35	148	89,00	0,401	20	81,95	140	84,40	0,761
	TW Zentral, davon	2	260,70	58	84,40	0,080	5	117,30	55	79,80	0,936
	TWz (Zulauf)	2	260,70	25	74,90	0,087	2	152,80	25	79,30	0,746
	HEL						3	117,30	30	112,25	0,638
	TW Peripher	10	64,25	90	92,55	0,931	15	74,90	85	96,10	0,653
nV8	**TWW Gesamt**	*28*	*0,36*	*386*	*0,26*	*0,025*	*87*	*0,43*	*282*	*0,26*	*0,004*
	TWW Zentral, davon	4	0,73	125	0,26	0,183	27	0,43	102	0,25	0,295
	TWWz (Vorlauf)	2	0,73	63	0,26	0,331	14	0,39	51	0,25	0,648
	TWZ (Rücklauf)	2	0,73	62	0,27	0,383	13	0,43	51	0,25	0,306
	TWW Peripher, davon	24	0,33	261	0,26	0,065	*60*	*0,66*	*180*	*0,26*	*0,005*
	TWW P. 2. Liter	*16*	*0,36*	*151*	*0,26*	*0,028*	*32*	*0,79*	*92*	*0,26*	*0,006*
	TWW P. 5. Liter	8	0,27	110	0,28	0,927	28	0,49	88	0,27	0,232
	TW Gesamt	*12*	*1,04*	*178*	*0,27*	*0,008*	27	0,29	163	0,28	0,477
	TW Zentral, davon	2	1,17	70	0,28	0,102	7	0,18	65	0,29	0,516
	TWz (Zulauf)	2	1,17	34	0,25	0,115	4	0,09	32	0,28	0,399
	HEL						3	0,43	33	0,55	0,819
	TW Peripher	*10*	*0,65*	*108*	*0,26*	*0,032*	20	0,29	98	0,28	0,674

Legende: Schattierungen: rot= Trinkwarmwasser, blau= Trinkwasser (kalt), dunkelgrau= nicht berechenbar, kursiv = signifikante Ergebnisse ($p < 0,05$); N1 bzw. M1= N bzw. Median in der Gruppe „kontaminiert, N0 bzw. M0= N bzw. Median in der Gruppe „nicht kontaminiert“

4.4.6 Einfluss des Probenahmeortes bzw. des beprobten Liters auf die Legionellenkontamination

Im Folgenden wurde anhand von Sensitivitätsanalysen der Fragestellung nachgegangen, inwiefern der Nachweis von Legionellen (Vorkommen generell oder Überschreitung des technischen Maßnahmenwertes) von der gewählten Probenahmeart bzw. Probenahmestelle beeinflusst wird. Folgende Fragen standen dabei im Raum:

- Mit welcher Wahrscheinlichkeit entdeckt der 1., 2. bzw. 5. beprobte Liter eine Legionellen-Kontamination bzw. welcher Liter ist am besten geeignet, eine Kontamination zu erkennen?
- Ist eine Probe vom 2. Liter einer peripheren Zapfstelle geeignet, um eine Kontamination im 5. Liter zu erkennen und zu bewerten, und umgekehrt?

– Sind Proben der Peripherie geeignet, um eine zentrale Kontamination zu erkennen, und umgekehrt?

Auf der Ebene der Entnahmestellen ergibt der Vergleich von zu einer peripheren Entnahmestelle gehörigen Proben des 2. und 5. Liters TWW (n= 133) eine Sensitivität von 0,83 bei einer Spezifität von 0,92 und einer Korrekt-Klassifikations-Rate von 0,91. Mit einem Positiven Prädiktiven Wert (PPV) von 0,5 ist die Chance, wenn im 2. Liter kulturell Legionellen nachgewiesen wurden, diese auch in der Probe des 5. Liters am selben Zapfhahn zu finden, allerdings nicht sehr hoch. Dies lässt vermuten, dass die im 2. Liter nachgewiesenen Kontaminationen häufig eher lokal an der Entnahmestelle oder im Bereich der nicht zirkulierenden Stichleitungen ansässig sind und mit vermehrter Wasserentnahme ausgespült werden. Analysen zum technischen Maßnahmenwert ergaben in Ermangelung statistisch ausreichend häufiger Überschreitungen keine Resultate.

Der molekulare Nachweis von *L. pneumophila*-Genen (qPCR) im 2. und 5. Liter TWW derselben peripheren Entnahmestelle (n=131) ist hinsichtlich Sensitivität (0,83), Spezifität (0,93) und Korrekt-Klassifikations-Rate (0,91) fast identisch zur Kultivierung ausgeprägt. Der Positive Prädiktive Wert (PPV) ist aufgrund der häufigeren Positivnachweise im Vergleich zur Kultur mit 0,78 allerdings besser ausgeprägt; von 32 im 2. Liter nachgewiesenen Kontaminationen konnten 25 auch im 5. Liter noch gefunden werden.

Tab. 4-34 Werte der Vierfeldertafeln die in die Sensitivitätsanalysen einflossen, zur Beantwortung der Frage "Wenn im 5. Liter eine Kontamination angezeigt wird, entdeckt dann auch der 2. Liter diese schon?"; oben: Kulturverfahren *Legionella* spp., unten: qPCR-Nachweis *L. pneumophila*

	***Legionella* spp. (Kultur) TWW 5. Liter positiv**	***Legionella* spp. (Kultur) TWW 5. Liter negativ**	**Gesamt**
***Legionella* spp. (Kultur) TWW 2. Liter positiv**	10	10	20
***Legionella* spp. (Kultur) TWW 2. Liter negativ**	2	111	113
Gesamt	12	121	133
Sensitivität	**Spezifität**	**PPV / NPV**	**KKR**
0.83	0.92	0.5 / 0.98	0.91
	***L. pneumophila* (qPCR) TWW 5. Liter positiv**	***L. pneumophila* (qPCR) TWW 5. Liter negativ**	**Gesamt**
***L. pneumophila* (qPCR) TWW 2. Liter positiv**	25	7	32
***L. pneumophila* (qPCR)**	5	94	99

TWW 2. Liter negativ			
Gesamt	30	101	131
Sensitivität	**Spezifität**	**PPV / NPV**	**KKR**
0.83	0.93	0.78 / 0.95	0.91

Tab. 4-35 gibt einen Überblick über die signifikanten Testergebnisse auf Objektebene. Zu beachten ist, dass die Felder der Vierfeldertafeln teilweise niedrig besetzt sind (v.a. hinsichtlich positiver kultureller Nachweise); insofern sind die Ergebnisse unter Vorbehalt und nur als Hinweis zu bewerten.

Es lässt sich für den kulturellen Nachweis nur eine sehr schwache Sensitivität im Vergleich von zentralen (2. Liter) und peripheren (2. bzw. 5. Liter) Probenahmestellen des TWW feststellen. Dasselbe gilt für TW kalt bei Kultur und Gen-Nachweis (qPCR). Viele Objekte sind in der Peripherie kontaminiert, aber in der Zentrale nicht. Eine in der Stichleitung eines Steigstrangs peripher entdeckte Kontamination bedeutet demnach nicht notwendig ein Problem in der zentralen TWW-Zirkulation.

Vergleicht man die peripheren Proben selbst miteinander (2. und 5. Liter TWW an derselben Entnahmestelle), so liegt der Positiv-Prädiktive-Wert nur bei 58 %. Folglich sind 42 % der im 2. Liter positiven Objekte im 5. Liter nicht positiv. Dagegen ist nur ein Objekt im 5. Liter kontaminiert, im 2. Liter aber nicht. Insgesamt liegt die Korrektklassifikationsrate, also der Anteil der in beiden Litern bzw. Probenahmestellen identisch klassifizierten Proben, in allen Vergleichen bei hohen 83–92 %, was allerdings auf die recht hohe Anzahl negativer Nachweise zurückzuführen ist.

Der 2. Liter ist demnach nur sehr eingeschränkt geeignet, um eine Kontamination zu erkennen, die auch im 5. Liter gefunden wird, welcher zirkulierendes TWW repräsentiert. Dies gilt sowohl hinsichtlich der Entnahmestellen als auch mit Blick auf die Objekte. Der Gennachweis liefert im Vergleich zum Kulturverfahren das sicherere Ergebnis. Hinsichtlich des Verbrauchers zeigt jedoch der 2. Liter sicherer das Vorhandensein von Legionellen im genutzten Wasser an.

Tab. 4-35 Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse für den Vergleich zwischen 2. und 5. Liter sowie Zentrale und Peripherie hinsichtlich der Parameter *Legionella* spp. (Kultur) und *L. pneumophila* (qPCR).

Verglichene Teilstichproben	**Vergleich der Probenahmeorte und der Liter nach Objekten**									
	Vierfeldertafel					**Werte**				
	n11	**n10**	**n01**	**n00**	**N**	**Sens**	**Spez**	**PPV**	**NPV**	**KKR**
Kultur TWW Z. 2. L. vs. P. 2. L.	2	0	10	59	71	0,17	1,00	1,00	0,86	0,86
Kultur TWW Z. 2. L. vs. P. 5. L.	2	0	6	63	71	0,25	1,00	1,00	0,91	0,92
Kultur TWW P. 2. L. vs. P. 5. L.	7	5	1	60	73	0,88	0,92	0,58	0,98	0,92
Kultur TW Z. 2. L. vs. P. 5. L.	0	2	10	58	70	0,00	0,97	0,00	0,85	0,83

Verglichene Teilstichproben	Vergleich der Probenahmeorte und der Liter nach Objekten									
	Vierfeldertafel					Werte				
	n11	n10	n01	n00	N	Sens	Spez	PPV	NPV	KKR
qPCR TWW Z. 2. L. vs. P. 2. L.	14	4	6	47	71	0,70	0,92	0,78	0,89	0,86
qPCR TWW Z. 2. L. vs. P. 5. L.	12	5	6	47	70	0,67	0,90	0,71	0,89	0,84
qPCR TWW P. 2. L. vs. P. 5. L.	14	5	4	49	72	0,78	0,91	0,74	0,92	0,88
qPCR TW Z. 2. L. vs. P. 5. L.	4	3	9	54	70	0,31	0,95	0,57	0,86	0,83

Legende: Schattierungen: rot= Trinkwarmwasser, blau= Trinkwasser (kalt); n11= positiv in beiden Verfahren; n10= positive Kultur, negative qPCR; n01= negative Kultur, positive qPCR; n00= negativ in beiden Verfahren; Sens= Sensitivität; Spez= Spezifität; PPV= positiv prädiktiver Wert; NPV= Negativ-prädiktiver Wert; KKR= Korrektklassifikationsrate

4.4.7 Einfluss verschiedener Objektcharakteristika auf eine Legionellenkontamination

Wie die vorangehenden Analysen gezeigt haben, wird das Vorkommen von Legionellen in der TWI nicht ausschließlich von der Trink(warm)wasser-Temperatur beeinflusst. Aus diesem Grunde wird im Folgenden der Frage nachgegangen, ob bei den im Rahmen des durchgeführten Projektes untersuchten MFH eine Abhängigkeit des Vorkommens von Legionellen, bzw. der Überschreitung des technischen Maßnahmenwertes, in Abhängigkeit von Objekt-spezifischen Merkmalen, Anlageteilen oder TWI-technischen Parametern statistisch belegbar ist. Zudem sollte ermittelt werden, wie hoch das Relative Risiko bzgl. einer Legionellen-Kontamination für mögliche relevante Parameter ist.

Ursprünglich sollte ein multivariates, Binär Logistisches Regressionsmodell für den Einfluss der Objektparameter auf eine Legionellen-Kontamination berechnet werden, um einen gemeinsamen Effekt der Objektparameter zu ermitteln. Aufgrund der unvollständigen Datenstruktur konnte dieses Vorhaben nicht realisiert werden. Als Alternative wurde für jeden Objektparameter ein univariates logistisches Regressionsmodell berechnet, um den Einfluss jedes einzelnen Parameters auf die Kontamination des Wassers mit Legionellen separat zu untersuchen.

Für die Objektparameter, welche sich dabei signifikant zeigten, und sich zudem dichotom einteilen ließen, wurde im Weiteren eine Analyse hinsichtlich des Relativen Risikos durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Tab. 4-36 zusammengefasst und sollen im Folgenden kurz erläutert werden.

Tab. 4-36 Ergebnisse der Berechnungen der Relativen Risiken für Legionellen-positive Proben für verschiedene Objektparameter getrennt nach den mikrobiologischen Parametern.

Objekt-charakteristik	Teilstichprobe	*Legionella* spp. (Kultur)				*L. pneumophila* (qPCR)			
		p	Ri	RR	N	P	Ri	RR	N
Art des hydraulischen Abgleichs der Zirkulation: Manuell (im Vgl. zu „neuen Methoden“)	**TWW Gesamt**	0,065	S	0,53	438	***0,002***	***E***	***2,09***	***393***
	TWW Zentral, davon	0,467	S	0,49	137	0,077	E	2,25	137
	TWWz (Vorlauf)	0,618	S	0,50	69	0,127	E	3,00	69
	TWZ (Rücklauf)	0,596	S	0,48	68	0,347	E	1,75	68
	TWW Peripher, davon	0,111	S	0,56	301	***0,009***	***E***	***2,06***	***256***
	TWW P. 2. Liter	0,259	S	0,61	175	***0,028***	***E***	***2,34***	***132***
	TWW P. 5. Liter	0,250	S	0,48	126	0,137	E	1,79	124
	TW Gesamt	0,457	E	1,52	202	0,066	E	2,38	202
	TW Zentral					0,333	E	2,77	76
	HEL					0,946	E	1,08	37
	TW Peripher	0,610	E	1,34	126	0,100	E	2,38	126
Art der Filter: Partikelfilter (im Vgl. zu Feinfilter)	**TWW Gesamt**	***0,000***	***S***	***0,10***	***390***	***0,000***	***S***	***0,31***	***351***
	TWW Zentral, davon	***0,000***	***S***	***0,03***	***121***	0,094	S	0,41	121
	TWWz (Vorlauf)	***0,005***	***S***	***0,03***	***61***	0,232	S	0,41	61
	TWZ (Rücklauf)	***0,006***	***S***	***0,03***	***60***	0,241	S	0,41	60
	TWW Peripher, davon	***0,000***	***S***	***0,13***	***269***	***0,000***	***S***	***0,28***	***230***
	TWW P. 2. Liter	***0,000***	***S***	***0,12***	***156***	***0,000***	***S***	***0,29***	***119***
	TWW P. 5. Liter	***0,001***	***S***	***0,13***	***113***	***0,000***	***S***	***0,26***	***111***
Druckminderer: Nicht vorhanden (im Vgl. zu vorhanden)	**TWW Gesamt**	0,143	E	1,70	409	***0,014***	***E***	***1,65***	***367***
	TWW Zentral, davon	0,314	E	2,69	129	0,103	E	1,79	129
	TWWz (Vorlauf)	0,454	E	2,82	65	0,252	E	1,76	65
	TWZ (Rücklauf)	0,499	E	2,56	64	0,243	E	1,83	64
	TWW Peripher, davon	0,215	E	1,62	280	0,060	E	1,59	238
	TWW P. 2. Liter	0,216	E	1,79	163	0,126	E	1,65	123
	TWW P. 5. Liter	0,628	E	1,39	117	0,241	E	1,52	115
	TW Gesamt	0,052	E	2,59	190	0,068	E	1,97	190
	TW Zentral, davon					0,694	S	0,66	73
	TWz (Zulauf)					0,887	E	1,18	37

Objekt-charakteristik	Teilstichprobe	*Legionella* spp. (Kultur)				*L. pneumophila* (qPCR)			
	TW Peripher	***0,023***	***E***	***3,24***	***117***	***0,025***	***E***	***2,50***	***117***
Edelstahl: Nicht verwendet (im Vgl. zu verwendet)	**TWW Gesamt**	0,458	E	1,29	438	***0,021***	***S***	***0,64***	***393***
	TWW Zentral, davon					0,195	S	0,64	137
	TWWz (Vorlauf)					0,220	S	0,54	69
	TWZ (Rücklauf)					0,551	S	0,75	68
	TWW Peripher, davon	0,944	E	1,03	301	0,060	S	0,65	256
	TWW P. 2. Liter	0,818	E	1,11	175	0,319	S	0,73	132
	TWW P. 5. Liter	0,843	S	0,88	126	0,096	S	0,56	124
	TW Gesamt					***0,003***	***S***	***0,25***	***202***
	TW Zentral					0,099	S	0,18	76
	TWz (Zulauf)					0,507	S	0,48	39
	TW Peripher	0,489	S	0,69	126	***0,015***	***S***	***0,27***	***126***
Enthärtungsanlage: Nicht vorhanden (im Vgl. zu vorhanden)	**TWW Gesamt**	***0,008***	***S***	***0,36***	***438***	0,792	S	0,93	393
	TWW Zentral, davon	***0,018***	***S***	***0,10***	***137***	0,801	S	0,87	137
	TWWz (Vorlauf)	0,108	S	0,11	69	0,550	S	0,68	69
	TWZ (Rücklauf)	0,083	S	0,10	68	0,808	E	1,26	68
	TWW Peripher, davon	0,082	S	0,48	301	0,912	S	0,96	256
	TWW P. 2. Liter	0,153	S	0,48	175	0,475	E	1,48	132
	TWW P. 5. Liter	0,320	S	0,47	126	0,309	S	0,66	124
	TW Gesamt	0,530	E	1,89	202	0,208	E	3,51	202
	TW Zentral	0,143	S	0,13	76				
	TWz (Zulauf)	0,150	S	0,15	39				
	TW Peripher					0,340	E	2,57	126
Selten genutzte Entnahme-stelle: Nein	**TWW Gesamt**	***0,022***	***E***	***5,23***	***415***	***0,005***	***E***	***2,26***	***373***
	TWW Zentral, davon					***0,029***	***E***	***4,65***	***129***
	TWWz (Vorlauf)					0,147	E	4,24	65
	TWZ (Rücklauf)					0,104	E	5,09	64
	TWW Peripher, davon	***0,037***	***E***	***4,52***	***286***	0,067	E	1,78	244
	TWW P. 2. Liter	0,125	E	3,07	166	0,208	E	1,66	126
	TWW P. 5. Liter					0,177	E	1,96	118
	TW Gesamt	0,605	S	0,76	192	***0,047***	***E***	***4,19***	***192***
	TW Peripher	0,866	E	1,11	120	0,205	E	2,50	120

Objekt-charakteristik	Teilstichprobe	*Legionella* spp. (Kultur)				*L. pneumophila* (qPCR)			
GLT-Überwachung: Nicht vorhanden (im Vgl. zu vorhanden/aktiv)	**TWW Gesamt**	***0,000***	***S***	***0,18***	***438***	***0,001***	***S***	***0,52***	***393***
	TWW Zentral, davon	0,430	S	0,14	137	***0,015***	***S***	***0,42***	***137***
	TWWz (Vorlauf)	0,166	S	0,15	69	0,272	S	0,55	69
	TWZ (Rücklauf)	0,139	S	0,13	68	***0,016***	***S***	***0,33***	***68***
	TWW Peripher, davon	***0,000***	***S***	***0,19***	***301***	***0,020***	***S***	***0,58***	***256***
	TWW P. 2. Liter	***0,000***	***S***	***0,20***	***175***	0,280	S	0,69	132
	TWW P. 5. Liter	***0,005***	***S***	***0,17***	***126***	***0,024***	***S***	***0,48***	***124***
	TW Gesamt	0,601	S	0,73	202	0,121	E	4,71	202
	TW Peripher	0,570	S	0,71	126	0,164	E	4,02	126
Kunststoffe: Nicht verwendet	**TWW Gesamt**	0,222	E	1,89	438	***0,003***	***E***	***2,67***	***393***
	TWW Zentral, davon					0,106	E	2,54	137
	TWWz (Vorlauf)					0,343	E	1,96	69
	TWZ (Rücklauf)					0,191	E	3,68	68
	TWW Peripher, davon	0,400	E	1,55	301	***0,013***	***E***	***2,73***	***256***
	TWW P. 2. Liter	0,712	E	1,25	175	0,104	E	2,23	132
	TWW P. 5. Liter	0,401	E	2,39	126	0,059	E	3,76	124
	TW Gesamt	0,724	E	1,25	202	0,063	E	3,79	202
	TW Zentral					0,552	E	1,86	76
	TWz (Zulauf)					0,713	E	1,50	39
	TW Peripher	0,996	-	1,00	126	0,340	E	2,57	126
Technische Legionellenprävention: Nicht vorhanden (im Vgl. zu aktiv)	**TWW Gesamt**	***0,000***	***S***	***0,20***	***438***	***0,008***	***S***	***0,58***	***393***
	TWW Zentral, davon	0,069	S	0,17	137	0,066	S	0,51	137
	TWWz (Vorlauf)	0,196	S	0,17	69	0,391	S	0,62	69
	TWZ (Rücklauf)	0,200	S	0,17	68	0,081	S	0,43	68
	TWW Peripher, davon	***0,000***	***S***	***0,20***	***301***	0,052	S	0,62	256
	TWW P. 2. Liter	***0,001***	***S***	***0,24***	***175***	0,241	S	0,66	132
	TWW P. 5. Liter	***0,002***	***S***	***0,14***	***126***	0,112	S	0,57	124
	TW Gesamt	0,907	E	1,09	202	0,141	E	4,36	202
	TW Zentral					0,926	S	0,91	76
	HEL					0,607	S	0,55	37
	TW Peripher	0,974	S	0,98	126				

Objekt-charakteristik	Teilstichprobe	*Legionella* spp. (Kultur)				*L. pneumophila* (qPCR)			
Membranausdehnungsgefäß: Nicht vorhanden (im Vgl. zu vorhanden)	**TWW Gesamt**	0,852	S	0,94	432	***0,004***	***E***	***1,77***	***387***
	TWW Zentral, davon	0,988	E	1,01	135	0,375	E	1,35	135
	TWWz (Vorlauf)	1,000	-	1,00	68	0,551	E	1,33	68
	TWZ (Rücklauf)	0,983	E	1,03	67	0,510	E	1,37	67
	TWW Peripher, davon	0,826	S	0,92	297	***0,004***	***E***	***2,02***	***252***
	TWW P. 2. Liter	0,979	S	0,99	173	***0,032***	***E***	***2,07***	***130***
	TWW P. 5. Liter	0,730	S	0,80	124	0,051	E	1,96	122
	TW Gesamt	0,484	E	1,43	199	0,199	S	0,56	199
	TW Zentral					0,192	S	0,35	75
	TWz (Zulauf)					0,823	E	1,24	38
	TW Peripher	0,770	E	1,17	124	0,334	S	0,67	124
Regelm. Nutzungsunterbrechung: Nein	**TWW Gesamt**	0,095	E	2,22	428	***0,005***	***E***	***2,08***	***385***
	TWW Zentral, davon					***0,038***	***E***	***3,33***	***133***
	TWWz (Vorlauf)					0,118	E	4,78	67
	TWZ (Rücklauf)					0,180	E	2,61	66
	TWW Peripher, davon	0,169	E	1,93	295	0,050	E	1,77	252
	TWW P. 2. Liter	0,377	E	1,62	171	0,222	E	1,59	130
	TWW P. 5. Liter	0,255	E	3,27	124	0,121	E	2,01	122
	TW Gesamt	0,685	S	0,81	198	***0,028***	***E***	***4,85***	***198***
	TW Zentral	0,506	S	0,40	74				
	TWz (Zulauf)	0,404	S	0,32	37				
	TW Peripher	0,884	S	0,92	124	0,084	E	3,48	124
Probleme /Beschwerden: Nein	**TWW Gesamt**	***0,001***	***S***	***0,30***	***430***	***0,000***	***S***	***0,44***	***385***
	TWW Zentral, davon					***0,014***	***S***	***0,45***	***133***
	TWWz (Vorlauf)					0,092	S	0,46	67
	TWZ (Rücklauf)					0,072	S	0,43	66
	TWW Peripher, davon	***0,011***	***S***	***0,39***	***297***	***0,000***	***S***	***0,44***	***252***
	TWW P. 2. Liter	***0,036***	***S***	***0,39***	***173***	***0,029***	***S***	***0,53***	***130***
	TWW P. 5. Liter	0,149	S	0,40	124	***0,002***	***S***	***0,36***	***122***
	TW Gesamt	0,086	S	0,43	198	***0,000***	***S***	***0,21***	***198***
	TW Zentral, davon	0,598	S	0,48	74	0,537	S	0,64	74
	TWz (Zulauf)	0,906	S	0,85	37	0,863	S	0,85	37

Objekt-charakteristik	Teilstichprobe	*Legionella* spp. (Kultur)				*L. pneumophila* (qPCR)			
	HEL					0,508	S	0,47	37
	TW Peripher	0,100	S	0,42	124	***0,000***	***S***	***0,12***	***124***
Umsetzung aktueller Spülpläne: Nein	**TWW Gesamt**	0,798	S	0,89	391	***0,000***	***S***	***0,47***	***354***
	TWW Zentral, davon					***0,020***	***S***	***0,46***	***122***
	TWWz (Vorlauf)					***0,035***	***S***	***0,39***	***62***
	TWZ (Rücklauf)					0,237	S	0,56	60
	TWW Peripher, davon	0,364	S	0,66	269	***0,001***	***S***	***0,47***	***232***
	TWW P. 2. Liter	0,538	S	0,70	155	***0,012***	***S***	***0,46***	***120***
	TWW P. 5. Liter	0,459	S	0,57	114	***0,032***	***S***	***0,48***	***112***
	TW Gesamt	0,179	S	0,47	182	***0,000***	***S***	***0,27***	***182***
	TW Zentral, davon					0,098	S	0,32	68
	TWz (Zulauf)					0,914	E	1,12	33
	HEL					***0,013***	***S***	***0,06***	***35***
	TW Peripher	0,311	S	0,54	114	***0,000***	***S***	***0,23***	***114***
Gebäudeteile bestehen aus unterschiedlichen Altersstufen: Nein	**TWW Gesamt**	***0,000***	***S***	***0,28***	***383***	0,081	S	0,70	347
	TWW Zentral, davon	0,095	S	0,20	121	0,671	S	0,83	121
	TWWz (Vorlauf)	0,235	S	0,02	61	0,912	E	1,08	61
	TWZ (Rücklauf)	0,240	S	0,20	60	0,469	S	0,67	60
	TWW Peripher, davon	***0,002***	***S***	***0,31***	***262***	0,086	S	0,66	226
	TWW P. 2. Liter	***0,009***	***S***	***0,31***	***151***	0,355	S	0,73	117
	TWW P. 5. Liter	0,077	S	0,31	111	0,129	S	0,59	109
	TW Gesamt	0,598	S	0,75	178	0,241	E	1,99	178
	TW Peripher	0,503	S	0,69	111	0,473	E	1,53	111
Wartung der TWI: Nein	**TWW Gesamt**	***0,033***	***E***	***2,10***	***357***	0,878	E	1,03	326
	TWW Zentral, davon					0,755	E	1,12	112
	TWWz (Vorlauf)					0,971	S	0,98	57
	TWZ (Rücklauf)					0,611	E	1,28	55
	TWW Peripher, davon	0,276	E	1,48	245	0,950	S	0,98	214
	TWW P. 2. Liter	0,307	E	1,57	140	0,462	E	1,27	111
	TWW P. 5. Liter	0,729	E	1,25	105	0,398	S	0,73	103
	TW Gesamt	0,465	E	1,48	166	0,509	S	0,74	166
	TW Zentral					0,401	S	0,41	61

Objekt-charakteristik	Teilstichprobe	*Legionella* spp. (Kultur)				*L. pneumophila* (qPCR)			
	TWz (Zulauf)					0,965	S	0,95	29
	TW Peripher	0,411	E	1,56	105	0,784	S	0,87	105

Legende: Schattierungen: v, dunkelgrau= nicht berechenbar bzw. nicht sinnvoll, fett kursiv= signifikante Ergebnisse (p< 0,05); Ri= S: Senkung des Relativen Risikos für die Gruppe > Temperaturwert; E: Erhöhung des Relativen Risikos > Temperaturwert; RR= Wert des Relativen Risikos, RR < 1 Senkung des Risikos um (1 – RR)%, RR > 1 Erhöhung des Risikos um das RR-fache

Art des hydraulischen Abgleichs der Zirkulation

Unterteilt man die „Art des hydraulischen Abgleichs der Zirkulation“ danach, ob der hydraulische Abgleich manuell ausgeführt wurde oder automatische Regulierventile o.ä. für den hydraulischen Abgleich verbaut wurden („Neue Methoden“), so ergeben sich für den kulturellen Legionellen-Nachweis nach TrinkwV keine signifikanten Unterschiede. Verwendet man die molekularbiologisch erhobenen Daten (qPCR *L. pneumophila*), so zeigt sich jedoch für die Teilstichproben TWW Gesamt, TWW Peripher sowie 2. Liter TWW Peripherie eine signifikante Erhöhung des RR bei manuellem Abgleich. Hier steigt das Risiko einer Kontamination um das 2,06 bis 2,34-fache, wenn der Abgleich manuell erfolgt. Der Einsatz neuer Methoden des hydraulischen Abgleichs verringert demnach die Wahrscheinlichkeit, *L. pneumophila*-Gene im TWW zu finden.

GLT-Überwachung

Die Überwachung der TWI durch Gebäudeleittechnik (GLT) führt statistisch zu einem höheren (!) Relativen Risiko im Vergleich zu Anlagen, welche nicht über eine GLT-Überwachung verfügen. Für das Kulturverfahren liegt die signifikante Risikosenkung bei ca. 80 % im gesamten Warmwassersystem sowie in den peripheren Bereichen, selbst im 5. Liter (RR = 0,17-0,20). Für die qPCR fällt diese Senkung mit 42-67 % zwar geringer aus, der Effekt ist aber zusätzlich in der TWW-Zentrale und v.a. im Rücklauf der Zirkulation (TWWz; RR = 0,33) signifikant, in der Peripherie im 2. Liter jedoch nicht belegbar. Dieses auf den ersten Blick paradoxe Phänomen lässt sich technisch zunächst nicht erklären. Es lässt sich aber vermuten, dass entweder GLT-Anlagen vorrangig in komplexe Objekte eingebaut werden, die per se ein erhöhtes Kontaminationsrisiko aufgrund anderer Merkmale aufweisen (z. B. frühere Legionellenkontamination, komplexe TWI-Struktur o.ä.), oder aber, dass aufgrund vermeintlich besserer Sicherheit durch das moderne Überwachungssystem andere Bereiche der a.a.R.d.T. tendenziell vernachlässigt werden, wie z. B. Wartung.

Wartung der TWI

Findet **keine** Wartung der TWI statt, so erhöht sich das Risiko einer mit Kulturverfahren nachweisbaren Kontamination mit Legionellen signifikant um das 2,1-fache in der Gesamtstichprobe aller Warmwasserproben (TWW Gesamt). Eine Signifikanz für Zentrale oder Peripherie separat konnte hingegen nicht gefunden werden.

Gebäudeteile unterschiedlichen Alters

Wenn Objekte **nicht** Gebäudeteile unterschiedlichen Altershaben, sinkt das Risiko einer kulturell nachweisbaren Legionellen-Kontamination um ca. 70 % (RR = 0,28-0,32). Signifikant sind diese Ergebnisse für TWW gesamt sowie deren Teilstichproben TWW Peripherie und speziell im 2. Liter. Komplexere Gebäudestrukturen (hier: verschiedene Bau-

abschnitte bzw. Anbauten) begünstigen demnach statistisch gesehen eine Legionellen-Kontamination.

Aufbereitungsanlagen und Einbau von Wasser verändernden Bauteilen

Art der Filter

Hinsichtlich der Filtration ließen sich signifikante Ergebnisse für TWW berechnen. Werden Partikelfilter verwendet, so sinkt das Risiko einer kulturell nachweisbaren Kontamination mit Legionellen signifikant um 59-97 % im Vergleich zu solchen TWI, bei denen Feinfilter eingesetzt sind. Auch beim molekularbiologischen Nachweis der *L. pneumophila*-Gene (qPCR) sind die Ergebnisse der RR-Analyse deutlich signifikant für die Gesamtstichprobe TWW sowie die verschiedenen Teilstichproben der Peripherie, mit einer Absenkung des Risikos zwischen 69-97 %, wenn ein Partikelfilter anstelle eines Feinfilters verwendet wird.

Druckminderer

Ist **kein** Druckminderer vorhanden, so erhöht sich das Risiko einer Kontamination des Wassers mit Legionellen bzw. *L. pneumophila*-Genen. Signifikant ist die Erhöhung des Risikos jedoch nur im Kaltwasser in der Peripherie (Erhöhung um das 2,50- bzw. 3,24-fache) sowie im Warmwasser Gesamt für qPCR (Erhöhung um das 1,65-fache).

Membranausdehnungsgefäß

Ist **kein** Membranausdehnungsgefäß vorhanden, verdoppelt sich das Risiko einer Kontamination in etwa. Dieses Ergebnis ist signifikant für die Daten der qPCR im Warmwasser Gesamt (RR = 1,77) sowie Peripherie (RR = 2,02), speziell im 2. Liter (RR=2,07). Aus ingenieurtechnischer Sicht wäre dies eigentlich nur damit zu erklären, dass ohne MAG das Sicherheitsventil häufig anspricht und ggf. nicht dicht schließt. Damit wäre eine faktisch permanente Verbindung zur Umgebung gegeben.

Enthärtungsanlage

Das Risiko einer kulturell nachweisbaren Kontamination mit Legionellen sinkt signifikant, wenn **keine** Enthärtungsanalage in der TWI vorhanden ist. Dies gilt für die Teilstichproben TWW Gesamt (Absenkung RR um 64 %) sowie TWW Zentral (Absenkung RR um 90 %), jedoch nicht für TWW Peripherie oder TW kalt. Auf Ebene des Gennachweises lässt sich kein signifikanter Effekt finden.

Technische Legionellenprävention

Die Variable „technische Legionellenprävention“ war in den Merkmalsausprägungen „nicht vorhanden“ und „aktiv“ in den Begehungsprotokollen für Analysezwecke häufig genug besetzt. Ist **keine** technische Legionellenprävention vorhanden, so sinkt das Relative Risiko signifikant um 40-80 % für TWW Gesamt (Kulturverfahren, qPCR) und TWW Peripherie (Kulturverfahren). Die signifikanten Daten aus der Peripherie bzw. des peripheren 2. und 5. Liters indizieren dabei, dass es sich v.a. um eine dezentrale Beeinflussung der nicht zirkulierenden Stichstränge handelt. Da das Hochheizen des TWE zur thermischen Desinfektion zumeist in der Nacht bei sehr geringer Abnahme in der Peripherie aktiv sind, liegt es nahe, dass die Aufwärmung die peripheren Entnahmestellen mangels Durchströmung nicht vollständig erfolgt und möglicherweise eher für ein Legionellenwachstum förderliche Temperaturen – insbesondere im TWK - erreicht.

Verwendete Materialien/ Werkstoffe der Trinkwasser-Installation

Das Relative Risiko einer Kontamination erhöht sich für die einzelnen verwendeten Materialien bezüglich der kulturell nachweisbaren Legionellen statistisch nicht signifikant. Hinsichtlich des Gennachweises von *L. pneumophila* im TWW Gesamt und TWW peripher ergab die statistische Analyse eine Erhöhung des Risikos, wenn **keine** Kunststoffe in der TWI verbaut worden waren. Nach sorgfältiger Prüfung der Rohdatensätze ist dieser vermeintliche Zusammenhang jedoch nicht verwertbar, denn die 26 Objekte des Gesamtdatensatzes, in welchen den Betreiberinformationen (Begehungsprotokolle) zufolge Kunststoffe verschiedener Art verbaut waren, hatten allesamt sanierte TWI bzw, nach 2013 neu erbaute TWI (bis auf zwei Ausnahmen mit Baujahr TWI 2006 und 2008). Verwendung von Kunststoff korreliert also sehr stark mit relativ geringem Alter der Installation. Der Einsatz von Edelstahl liefert für den Gennachweis entgegengesetzte Ergebnisse. Wird **kein** Edelstahl in der TWI verwendet, so ist das Risikonachweisbarer *L. pneumophila*-Gene sowohl in TWW Gesamt als auch in TW Gesamt bzw. TW Peripher statistisch signifikant niedriger. Auch hier zeigte jedoch eine sorgfältige Prüfung der Rohdaten, dass ein Schein-Risiko anzunehmen ist, welches durch andere TWI-Charakteristika bedingt wird, die mit der Verwendung von Edelstahl verbunden sind. Insbesondere wies mehr als zwei Drittel der TWI, in denen Edelstahl verbaut ist, unterdurchschnittlich niedrige Wassertemperaturen bei Probenahme auf. Aufgrund dieses deutlichen Zusammenhangs zwischen Edelstahl und Temperatur kann ein Rückschluss hinsichtlich der Bedeutung dieses Materials für das Legionellenrisiko keinesfalls gezogen werden. Für die übrigen in den TWI verbauten Materialien mit ausreichend großer Anzahl von Nennungen (verzinkter Stahl, Kupfer) gab es keine statistisch signifikanten Ergebnisse eines möglichen Risikos, der Einfluss von Blei konnte aufgrund zu einseitiger Merkmalsausprägung nicht untersucht werden.

Nutzungs-assoziierte Parameter

Bekannte regelmäßige Nutzungsunterbrechung

Berichtete regelmäßige Nutzungsunterbrechungen, die den Betreibern also bekannt sind wirken sich statistisch signifikant, jedoch kontra-intuitiv auf die Gennachweise von *L. pneumophila* im Wasser aus. Das Relative Risiko erhöht sich, wenn **keine** bekannte regelmäßige Nutzungsunterbrechung stattfindet, im Warmwasser um das 1,7fache (TWW Peripher) bis 3,3fache (TWW Zentral), im Kaltwasser um das 4,9fache (TW gesamt). Dies deutet möglicherweise darauf hin, dass Objekte mit bekannter regelmäßiger Nutzungsunterbrechung entsprechend den a.a.R.d.T. vor Wiederinbetriebnahme gezielt gespült werden. Unregelmäßige oder den Betreibern nicht bekannte Nutzungsunterbrechungen einzelner Teilabschnitte der TWI (Wohneinheiten), die sich etwa aus dem nicht bekannten Nutzerverhalten ergeben (z. B. Wochenendpendler), wurden hingegen in der Studie nicht erfasst und der Betreiber kann auch keine angemessenen Spülmaßnahmen ergreifen. Gerade diese „verborgenen“ Unterbrechungen sind aber hygienisch problematisch und wirken ungünstig hinsichtlich des Legionellenvorkommens der TWI.

Selten genutzte Entnahmestelle

Bezüglich der Nutzungsfrequenz einzelner Entnahmestellen wurde im Zuge der Begehung beim Betreiber, USI oder deren Beauftragten erfragt, ob im Objekt selten genutzte Entnahmestellen vorhanden seien. Den Antworten der zufolge erhöht sich das Risiko einer Kontamination mit Legionellen statistisch gesehen, im Warmwassersystem um ein Vielfa-

ches, wenn für das Objekt **keine** selten genutzte Entnahmestelle angegeben wurde. Im Falle des kulturellen Legionellen-Nachweises erhöht sich demnach das Risiko signifikant um das 4,5fache (TWW peripher) bzw. 5,3fache (TWW gesamt). Im Falle der qPCR (Gennachweis *L. pneumophila*) erhöht sich das Risiko signifikant um das 2,3fache für TWW gesamt, um das 4,5fache bei TWW Zentral (jedoch mit p=0,67 nicht signifikant im Falle von TWW peripher), sowie für TW gesamt um das 4,2-fache. Da die Beantwortung der Frage nach „selten genutzten Entnahmestellen“ zum einen aus dem Experten bei der Begehung unmittelbar sichtbarer Nicht-/Seltennutzung resultiert, zum anderen aber auch aus der rein subjektiven Sicht des Betreibers bzw. Begehungspartners beantwortet wurde, muss dieser statistisch gegebene Zusammenhang fachlich hinterfragt und bei künftigen Auswertungen besser verifiziert werden, z.B. über genaue Definitionen, ggf. auch Kategorisierung (z.B. 1 x wöchentlich, monatlich, nie) ab wann ein Zapfhahn als selten genutzt eingestuft wird.

Probleme/Beschwerden

Liegen bekannte Probleme oder Beschwerden der Nutzer über die TWI oder hinsichtlich der Wasserqualität vor, steigt auch die Wahrscheinlichkeit einer Kontamination mit Legionellen. Das Risiko eines positiven kulturellen Nachweises von Legionellen sinkt demnach signifikant um 70 % (TWW gesamt) bzw. 61 % (TWW peripher bzw. TWW peripher 2. Liter), wenn es **keine** Beschwerden oder Probleme gab. Im Falle des *L. pneumophila*-Gennachweises ist das Relative Risiko dann signifikant um 47-56 % abgesenkt für alle Teilstichproben des TWW-Systems mit ausreichender Stichprobengröße. Die Absenkung des Relativen Risikos eines positiven Gennachweises im Kaltwassersystem, wenn es **keine** Beschwerden oder Probleme gab, fällt mit 79 % (TW gesamt) und 88 % (TW peripher) Risikoverringerung noch deutlicher aus.

Aktuell (bei Begehung) Umsetzung von Spülpläne

Werden im Objekt aktuell **keine** Spülpläne umgesetzt, so wirkt sich dies statistisch nicht auf die kulturelle Nachweisbarkeit von Legionellen aus, jedoch besteht im Falle des Gennachweises von *L. pneumophila* statistisch signifikant ein geringeres Risiko positiver Gennachweise. Im TWW-System und seinen Teilstichproben sinkt das Risiko um 52-61 % (RR = 0,39-0,48) und im TW-System bzw. dessen peripherer Teilstichprobe um 73-77 % (RR = 0,27 und 0,23). Spülpläne werden offensichtlich nicht oder nur selten vorsorglich umgesetzt, sondern erst bei bekannten Problemen mit Legionellen-Kontamination in der TWI. Diese regelmäßigen Spülungen tragen statistisch gesehen dazu bei, das Vorkommen kulturell nachweisbarer Legionellen auf das Niveau nicht problembelasteter Objekte anzugleichen; eine Dekontamination der TWI kann auf diese Weise jedoch nicht erreicht werden, da sich die Gene von *L. pneumophila* weiterhin statistisch signifikant häufiger in Objekten mit aktuellen Spülplänen zeigen.

Neben den signifikanten Variablen aus den univariaten logistischen Regressionsmodellen, die eine dichotome Ausprägung aufwiesen, ließen sich auch signifikante polytome Variablen identifizieren. Deren Einfluss auf eine Legionellen-Kontamination der TWI wurde mit Hilfe des Chi-Quadrat Tests für Mehrfeldertafeln näher untersucht. Nur zwei dieser Objektmerkmale lieferten statistisch signifikante Ergebnisse, die im Folgenden vorgestellt werden (Tab. 4-37).

Tab. 4-37 Ergebnisse der Berechnungen aus den Mehrfeldertafeln für verschiedene Objektparameter und Kulturverfahren.

Objekt-charakteristik	Teilstichprobe	*Legionella* spp. (Kultur)						
		p	K/N1	A1	K/N2	A2	K/N3	A3
Heizungsbefüllung mit Nachspeisung aus dem TW-System 1: Rohrtrenner bei ständiger Verbindung 2: Zapfventil mit Schlauch temporär 3: dauerhaft	**TWW Gesamt**	***0,004***	***11/59***	***18,6***	***6/141***	***4,3***	***3/33***	***9,1***
	TWW Zentral, davon	0,402	2/17	11,8	2/46	4,3	0/8	0,0
	TWWz (Vorlauf)	0,661	1/9	11,1	1/23	4,3	0/4	0,0
	TWZ (Rücklauf)	0,605	1/8	12,5	1/23	4,3	0/4	0,0
	TWW Peripher, davon	***0,007***	***9/42***	***21,4***	***4/95***	***4,2***	***3/25***	***12,0***
	TWW P. 2. Liter	0,125	5/24	20,8	3/54	5,6	2/15	13,3
	TWW P. 5. Liter	***0,045***	***4/18***	***22,2***	***1/41***	***2,4***	***1/10***	***1,0***
	TW Gesamt	0,063	1/28	3,6	3/68	4,4	3/15	20,0
	TW Zentral, davon	0,194	1/10	10,0	0/27	0,0	0/5	0,0
	TWz (Zulauf)	0,186	1/5	20,0	0/15	0,0	0/1	0,0
	HEL	-	0/5	0,0	0/12	0,0	0/4	0,0
	TW Peripher	***0,023***	***0/18***	***0,0***	***3/41***	***7,3***	***3/10***	***30,0***
Art des TW-Erzeugers 1: TWW-Speicher 2: Speicherladeprinzip 3: Zentrales Durchflussprinzip	**TWW Gesamt**	0,177	15/221	6,8	5/115	4,3	11/102	10,8
	TWW Zentral, davon	0,269	2/69	2,9	0/38	0,0	2/30	6,7
	TWWz (Vorlauf)	0,555	1/35	2,9	0/18	0,0	1/16	6,3
	TWZ (Rücklauf)	0,479	1/34	2,9	0/20	0,0	1/14	7,1
	TWW Peripher, davon	0,425	13/152	8,5	5/77	6,5	9/72	12,5
	TWW P. 2. Liter	0,433	9/89	10,1	3/46	6,5	6/40	15,0
	TWW P. 5. Liter	0,851	4/63	6,3	2/31	6,5	3/32	9,4
	TW Gesamt	0,824	7/100	7,0	5/54	9,3	3/48	6,3
	TW Zentral, davon	0,094	0/37	0,0	2/23	8,7	0/16	0,0
	TWz (Zulauf)	0,152	0/14	0,0	2/14	14,3	0/11	0,0
	HEL	-	0/23	0,0	0/9	0,0	0/5	0,0
	TW Peripher	0,957	7/63	11,1	3/31	9,7	3/32	9,4

Legende: Schattierungen: rot= Trinkwarmwasser, blau= Trinkwasser (kalt), fett kursiv= signifikante Ergebnisse (p< 0,05); K/N= Kontaminierte/Gesamtanzahl in der jeweiligen Gruppe; A= Anteil der kontaminierten in % in der jeweiligen Gruppe

Tab. 4-38 Ergebnisse der Berechnungen aus den Mehrfeldertafeln für verschiedene Objektparameter und molekularen Gennachweis von *L. pneumophila* (qPCR).

Objekt-charakteristik	Teilstichprobe	*L. pneumophila* (qPCR)						
		p	K/N1	A1	K/N2	A2	K/N3	A3
Heizungsbefüllung mit Nachspeisung aus dem TW-System 1: Rohrtrenner bei ständiger Verbindung 2: Zapfventil mit Schlauch temporär 3: dauerhaft	**TWW Gesamt**	***0,007***	***21/53***	***39,6***	***39/129***	***30,2***	***2/29***	***6,9***
	TWW Zentral, davon	0,102	7/17	41,1	13/46	28,3	0/8	0,0
	TWWz (Vorlauf)	0,415	3/9	33,3	7/23	30,4	0/4	0,0
	TWZ (Rücklauf)	-	-	-	-	-	-	-
	TWW Peripher, davon	0,060	14/36	38,9	26/83	31,3	2/21	9,5
	TWW P. 2. Liter	0,220	7/18	38,9	14/44	31,8	1/11	9,1
	TWW P. 5. Liter	0,273	7/18	38,9	12/39	30,8	1/10	10,0
	TW Gesamt	0,060	1/28	3,6	14/67	20,9	1/15	6,7
	TW Zentral, davon	0,480	1/10	10,0	5/26	19,2	0/5	0,0
	TWz (Zulauf)	0,497	0/5	0,0	3/15	20,0	0/1	0,0
	HEL	0,640	1/5	20,0	2/11	18,2	0/4	0,0
	TW Peripher	0,080	0/18	0,0	9/41	22,0	1/10	10,0
Art des TW-Erzeugers 1: TWW-Speicher 2: Speicherladeprinzip 3: Zentralem Durchflussprinzip	**TWW Gesamt**	***0,000***	***25/197***	***12,7***	***42/102***	***41,2***	***23/104***	***24,5***
	TWW Zentral, davon	***0,034***	***9/69***	***13,0***	***13/38***	***34,2***	***6/30***	***20,0***
	TWWz (Vorlauf)	0,062	4/35	11,4	7/18	38,9	3/16	18,8
	TWZ (Rücklauf)	-	-	-	-	-	-	-
	TWW Peripher, davon	***0,000***	***16/128***	***12,5***	***29/64***	***45,3***	***17/64***	***26,6***
	TWW P. 2. Liter	***0,007***	***9/65***	***13,8***	***14/33***	***42,4***	***10/34***	***29,4***
	TWW P. 5. Liter	***0,000***	***7/63***	***11,1***	***15/31***	***48,4***	***7/30***	***23,3***
	TW Gesamt	***0,000***	***6/101***	***5,9***	***17/54***	***31,5***	***4/47***	***8,5***
	TW Zentral, davon	0,264	2/38	5,3	4/23	17,4	1/15	6,7
	TWz (Zulauf)	0,814	1/14	7,1	2/14	14,3	1/11	9,1
	HEL	0,196	1/24	4,2	2/9	22,2	0/4	0,0
	TW Peripher	***0,000***	***4/63***	***6,3***	***13/31***	***41,9***	***3/32***	***9,4***

Legende: Schattierungen: rot= Trinkwarmwasser, blau= Trinkwasser (kalt), fett kursiv = signifikante Ergebnisse (p< 0,05); K/N= Kontaminierte/Gesamtanzahl in der jeweiligen Gruppe; A= Anteil der kontaminierten in % in der jeweiligen Gruppe; SLP = Speicherladeprinzip, Zentr. DF = Zentrales Durchflussprinzip

Art der zentralen Trinkwassererwärmung

Die Art der zentralen Trinkwassererwärmung, unterteilt in die Ausprägungen TWW-Speicher, Speicherladeprinzip (SLP) und Zentrales Durchflussprinzip (Zentr. DF), führt

hinsichtlich der im Wasser nachweisbaren *L. pneumophila*-Gene zu höchst signifikanten Verteilungsunterschieden. Der größte Anteil Gen-positiver Proben ist mit 34-48 % (je nach Teilstichprobe) bei TWI mit Speicherladeprinzip zu finden. In TWW-Systemen mit TWW-Speicher lassen sich hingegen nur in 11-14 % der Proben *L. pneumophila*-Gene nachweisen. TWI mit zentralem Durchflussprinzip liegen mit 20-29 % dazwischen.

Für das Kulturverfahren nach TrinkwV zeigt die Art der zentralen Trinkwassererwärmung hingegen keinerlei statistisch signifikanten Einfluss auf eine Legionellen-Kontamination auf.

Die qPCR liefert hinsichtlich der Art des TW-Erzeugers in fast allen Teilstichproben der Wasserarten signifikante Ergebnisse. Hier liegt der Anteil der kontaminierten Proben für die Ausprägung „TWW-Speicher“ zwischen 6 und 14 %. Für die Ausprägung Speicherladeprinzip (SLP) sind es 32–48 % und für TWI mit zentralem Durchflussprinzip (Zentr. DF) 9–29 %.

Existenz weiterer relevanter Anlagen

Bei der Begehung ebenfalls aufgenommen wurde die Existenz weiterer Anlagen wie Geräte, die direkt mit der Trinkwasser-Installation verbunden sind, weitere wasserführende Systeme wie z. B. zur Grau- oder Regenwassernutzung im Haus, Heizungsbefüllung mit Nachspeisung aus dem TW-System und Löschwasserversorgung. Hier zeigte sich ein signifikanter Einfluss hinsichtlich der Ausführung zur Heizungsbefüllung mit Nachspeisung aus dem TW-System auf die mittels Kulturverfahren nachweisbare Legionellenkontamination der Proben. Zapfventile mit nur temporär zur Befüllung angeschlossenen Schläuchen wiesen mit 2-4 % nur geringe Anteile Legionellen-positiver Proben auf und konnten von solchen mit ständiger Verbindung (9-22 %) unterschieden werden. Sind bei ständiger Verbindung Rohrtrenner eingebaut, ist dabei der Anteil Legionellen-positiver Proben im Gebäude rund doppelt so hoch wie bei dauerhaften Verbindungen ohne solchen Rohrtrenner (19-22 % vs. 9-12 %). Dies lässt sich fachlich sinnvoll nur darüber erklären, dass die eingebauten Rohrtrenner nach dem Nachfüllen der Heizungsanlage nicht dicht schließen und von daher eine ebenso permanente Verbindung darstellen wie bei den permanent verbundenen TWI ohne dieses Bauteil. Beides entspricht in keiner Weise den a.a.R.d.T., da eine retrograde Kontamination des Trinkwassers aus dem Heizungswasser möglich ist und zudem die in Heizungskellern oft vorhandenen hohen Raumtemperaturen eine Aufwärmung des stagnierenden Wassers im Verbindungsschlauch und damit eine Vermehrung potentiell pathogener Bakterien fördern.

Für den molekularen Nachweis der *L. pneumophila*-Gene ist dieser Verteilungsunterschied nur noch im Falle von TWW signifikant. TWI, bei denen Rohrtrenner mit ständiger Verbindung zur Heizung vorhanden sind, weisen auch hier mit knapp 40 % die höchsten Anteile positiver Proben auf. Dauerhafte Verbindungen ohne Trenneinrichtung sind mit 7 % ähnlich hoch belastet wie im Kulturverfahren. TWI, die jedoch nur temporär über Schläuche mit dem Heizsystem verbunden werden, sind mit rund einem Drittel der Proben recht häufig betroffen.

Beim Kaltwasser liefern die peripheren Proben ebenfalls ein signifikantes Ergebnis, jedoch mit anderem Verteilungsmuster. Temporäre Schlauchverbindungen zur Heizungsbefüllung sind mit 7 % ähnlich kontaminiert wie im TWW, jedoch ließen sich in 18 peripheren TW-Proben aus TWI, die eine ständige Verbindung mit Rohrtrenner zwischen der Heizungsbefüllung und dem TW-System aufwiesen, keine Legionellen nachweisen, die peripheren TW-Proben der TWI mit dauerhaften Verbindungen ohne Rohrtrenner hingegen

waren zu rund einem Drittel kontaminiert. Ein technischer Zusammenhang im Sinne retrograder lokaler Kontamination ist jedoch unwahrscheinlich, da die PNS und die Zapfventile zur Heizungsbefüllung weder identisch noch in den meisten Fällen benachbart gelegen sind.

Schließlich wurden auch stetige Variablen in der univariaten Regressionsanalyse untersucht. Als für weiterführende Betrachtung interessant stellten sich dabei die folgenden Objekt-Merkmale heraus: Anzahl der Wohnungen, Anzahl der Steigstränge, Anzahl der Zirkulationsstränge, Baujahr der TWI, Baujahr des TWE-Speichers, sowie Außentemperatur bei Probennahme. Diese Variablen wurden jeweils, eingeteilt in die Gruppen „kontaminiert“ (KbE > 0 bzw. GU ≥ 200) und „nicht kontaminiert“ (Kultur bzw. qPCR negativ), mit dem Mann-Whitney-U Test analysiert.

Anzahl der Steigstränge

Die Anzahl der Steigstränge innerhalb einer TWI wirkt sich statistisch gesehen signifikant auf eine Legionellen-Kontamination im TWW aus. Sowohl die kulturellen Legionellen-Nachweise (Median kontaminiert = 11 Steigstränge vs. Median nicht Kontaminiert = 6 Steigstränge) als auch die Gen-Analysen von *L. pneumophila* (Median kontaminiert = 8 Steigstränge vs. Median nicht kontaminiert = 6 Steigstränge) führen für TWW gesamt zu der Aussage, dass positive Objekte **mehr** Steigstränge aufweisen als TWI ohne Legionellen. Dieser Effekt scheint sich insbesondere in der Peripherie bemerkbar zu machen.

Anzahl der Wohnungen

Für die Anzahl der Wohnungen im Objekt konnten bei Medianen von 32 Wohnungen (Gruppe kontaminiert) vs. 18 Wohnungen (Gruppe nicht kontaminiert) signifikante Medianunterschiede hinsichtlich des kulturellen Nachweises gefunden werden, sofern man alle TWW-Proben gesamt betrachtet. Dieser scheint auf die Legionellennachweise in der Peripherie zurückzuführen zu sein, jedoch sind die Verteilungsunterschiede TWW Peripher zwischen den Gruppen hier mit identischen Medianen, aber p= 0,061 knapp nicht signifikant. Hinsichtlich der molekularen Analytik sowie sämtlicher Befunde im TW (kalt) stellt sich dieses Merkmal hingegen als nicht statistisch relevant dar.

Anzahl der Zirkulationsstränge

Umgekehrt zu der Anzahl der Wohnungen im Objekt liefert der Vergleich der Anzahl der Zirkulationsstränge ein signifikanten Medianunterschied für die Gennachweise von *L. pneumophila* bei TWW gesamt (Median kontaminiert = 8 Zirkulationsstränge vs. Median nicht Kontaminiert = 6 Zirkulationsstränge), welcher sich jedoch in keiner der Teilproben auf detaillierterer Betrachtungsebene signifikant bestätigen lässt. Auf die Legionellen-Nachweise im Kultivierungsverfahren hingegen wirkt sich die Anzahl von Zirkulationssträngen nicht signifikant aus. Auch das TW (kalt) zeigt sich hier unbeeinflusst.

Baujahr der TWI und des TWE-Speichers

Die Genanalysen auf *L. pneumophila*-Vorkommen lassen signifikante Verteilungsunterschiede hinsichtlich des Alters des TWE-Speichers erkennen. Proben mit positivem Gennachweis entstammen im Median einer TWI mit TWE-Speichern vom Anfang der 1990er Jahre (TWW gesamt 1994, TWW peripher bzw. dort 2. und 5. Liter 1991), während Proben, in denen sich keine *L. pneumophila*-Gene finden ließen, aus TWI mit im Median rund 15 Jahre jüngeren TWE-Speichern stammten (TWW gesamt, TWW peripher bzw. dort 2. Liter aus 2006 bzw. 5. Liter aus 2007). Somit sind die Speicher in der Gruppe der Kon-

taminierten signifikant älter als die Speicher der nicht Kontaminierten. Auf die kulturelle Nachweisbarkeit der Legionellen hat das Baujahr des TWE-Speichers jedoch keinen Einfluss, auch für das TW (Kalt)-System waren die Ergebnisse nicht signifikant. Hinsichtlich des Baujahrs der TWI wurden keine signifikanten Medianunterschiede gefunden.

Außentemperatur bei Probennahme

Neben baulichen Merkmalen zeigte sich außerdem die Außentemperatur bei Probennahme als nicht zu vernachlässigender Parameter für das Auffinden einer Legionellen-Kontamination. Es ergaben sich höchst signifikante Ergebnisse bezüglich des kulturellen Legionellen-Nachweises sowohl für TWW gesamt als auch für TWW Peripher und dessen Teilstichprobe des 2. Liters mit einer Temperaturdifferenz von im Median 5 °C zwischen den kontaminierten und nicht-kontaminierten Teilstichproben. Dabei war im Falle der kontaminierten Proben die Außentemperatur im Median ca. 5 °C kälter (Median kontaminiert 9 °C vs. Median nicht kontaminiert 14 °C). Im Falle der Teilstichprobe TWW zentral wies die Temperatur der Außenluft bei Probenahme signifikant eine noch größere Temperaturdifferenz von 11 °C auf (Median kontaminiert 3 °C vs. Median nicht kontaminiert 14 °C). Erklärbar ist dieser Effekt damit, dass eine geringere Temperatur der Außenluft mit einer erhöhten Umgebungstemperatur der TWI einhergeht, da die Räume geheizt werden. Dies bedingt – gerade im Fall mit der Heizung im gleichen Schacht verlegten Leitungen – aber auch durch die Aufheizung der Räume und Wände eine langsamere Abkühlung des TWW, besonders bei schlecht isolierten TWW-Leitungen. TWW-Temperaturen im Bereich des Wachstumsoptimums für Legionellen werden somit gerade bei langer Stagnationszeit/gerimnger Abnahme länger gehalten. Die höhere Temperaturdifferenz in der TWW-Zentrale hängt dabei mit der höheren TWW-Temperatur im unmittelbaren Einfluss der TWE bzw. des zirkulierenden Bereichs zusammen.

Der Effekt im zentralen Kaltwasser ist mangels ausreichender positiver Legionellen-Nachweise (die Gruppe der Kontaminierten umfasst nur zwei Proben) nicht aussagekräftig.

Die Analyse der qPCR-Daten bestätigt den Einfluss der Außenluft hinsichtlich der Verteilungsunterschiede Gen-positiver und Gen-negativer Proben. Der signifikante Medianunterschied von 1,6 °C (Median kontaminiert 12,0 °C vs. Median nicht kontaminiert 13,6 °C) für die Teilstichproben TWW gesamt, TWW peripher sowie TWW peripher 5. Liter zeigt aber auch, dass der Einfluss der Umgebungstemperatur auf genetischer Ebene einen deutlich geringeren Effekt besitzt, als die für die Kultivierbarkeit der Fall ist.

Tab. 4-39 Ergebnisse der Medianvergleiche zwischen den kontaminierten und nicht kontaminierten Proben für das Kulturverfahren und verschiedene Objektparameter.

Objekt-charakteristik	Teilstichprobe	*Legionella* spp. (Kultur)				
		N1	M1	N0	M0	p
Anzahl Steigstränge	**TWW Gesamt**	***31***	***11***	***407***	***6***	***0,041***
	TWW Zentral, davon	4	500	133	6	0,944
	TWWz (Vorlauf)	2	500	67	6	0,971
	TWZ (Rücklauf)	2	500	66	6	0,971
	TWW Peripher, davon	27	11	274	7	0,051

Objekt-charakteristik	Teilstichprobe	*Legionella* spp. (Kultur)				
		N1	M1	N0	M0	p
	TWW P. 2. Liter	18	11	157	7	0,229
	TWW P. 5. Liter	9	12	117	7	0,101
	TW Gesamt	15	9	187	7	0,677
	TW Zentral, davon	2	10	74	7	0,407
	TWz (Zulauf)	2	10	37	6	0,292
	HEL					
	TW Peripher	13	6	113	8	0,392
Anzahl Wohnungen	**TWW Gesamt**	***31***	***32***	***407***	***18***	***0,032***
	TWW Zentral, davon	4	91	133	16	0,649
	TWWz (Vorlauf)	2	91	67	16	0,761
	TWZ (Rücklauf)	2	91	66	16	0,757
	TWW Peripher, davon	27	32	274	18	0,061
	TWW P. 2. Liter	18	32	157	18	0,218
	TWW P. 5. Liter	9	32	117	18	0,135
	TW Gesamt	15	20	187	18	0,849
	TW Zentral, davon	2	30	74	17	0,455
	TWz (Zulauf)	2	30	37	12	0,355
	HEL					
	TW Peripher	13	15	113	20	0,508
Anzahl Zirkulationsstränge	**TWW Gesamt**	31	11	407	6	0,072
	TWW Zentral, davon	4	500	133	6	0,974
	TWWz (Vorlauf)	2	500	67	6	0,986
	TWZ (Rücklauf)	2	500	66	6	1,000
	TWW Peripher, davon	27	11	274	7	0,087
	TWW P. 2. Liter	18	11	157	7	0,327
	TWW P. 5. Liter	9	12	117	7	0,125
	TW Gesamt	15	10	187	7	0,932
	TW Zentral, davon	2	505	74	7	0,152
	TWz (Zulauf)	2	505	37	6	0,117
	HEL					
	TW Peripher	13	6	113	8	0,598
Baujahr Speicher	**TWW Gesamt**	15	2007	273	1999	0,572
	TWW Zentral, davon					
	TWWz (Vorlauf)					
	TWZ (Rücklauf)					

Objekt-charakteristik	Teilstichprobe	*Legionella* spp. (Kultur)				
		N1	M1	N0	M0	p
	TWW Peripher, davon	15	2007	179	2000	0,522
	TWW P. 2. Liter	10	1999	102	2001	0,562
	TWW P. 5. Liter	5	2007	77	1999	0,761
	TW Gesamt	10	2003	123	2000	0,734
	TW Zentral, davon	1	2009	50	2001	0,584
	TWz (Zulauf)	1	2009	23	1999	0,424
	HEL					
	TW Peripher	9	1999	73	2000	0,758
Außenluft-temperatur	**TWW Gesamt**	***26***	***9,0***	***406***	***13,6***	***0,000***
	TWW Zentral, davon	***2***	***3,0***	***133***	***13,5***	***0,020***
	TWWz (Vorlauf)	1	3,0	67	13,5	0,108
	TWZ (Rücklauf)	1	3,0	66	13,6	0,103
	TWW Peripher, davon	***24***	***9,0***	***273***	***13,6***	***0,004***
	TWW P. 2. Liter	***16***	***9,0***	***157***	***14,0***	***0,019***
	TWW P. 5. Liter	8	10,5	116	13,2	0,084
	TW Gesamt	13	12	186	13,6	0,962
	TW Zentral, davon	***2***	***27,7***	***73***	***14,0***	***0,030***
	TWz (Zulauf)	***2***	***27,7***	***36***	***13,2***	***0,033***
	HEL					
	TW Peripher	11	9,0	113	13,3	0,441

Legende: Schattierungen: rot= Trinkwarmwasser, blau= Trinkwasser (kalt), dunkelgrau= nicht berechenbar, fett kursiv= signifikante Ergebnisse (p< 0,05); N1 bzw. M1= N bzw. Median in der Gruppe „kontaminiert, N0 bzw. M0= N bzw. Median in der Gruppe „nicht kontaminiert“

Tab. 4-40 Ergebnisse der Medianvergleiche zwischen den kontaminierten und nicht kontaminierten Proben für die qPCR und verschiedene Objektparameter.

Objekt-charakteristik	Teilstichprobe	*L. pneumophila* (qPCR)				
		N1	M1	N0	M0	p
Anzahl Steigstränge	**TWW Gesamt**	***90***	***8***	***303***	***6***	***0,031***
	TWW Zentral, davon	28	8	109	6	0,160
	TWWz (Vorlauf)	14	8	55	6	0,305
	TWZ (Rücklauf)	14	8	54	6	0,345
	TWW Peripher, davon	62	8	194	7	0,139
	TWW P. 2. Liter	33	8	99	8	0,845
	TWW P. 5. Liter	29	9	95	6	0,053
	TW Gesamt	27	8	175	7	0,528

Objekt-charakteristik	Teilstichprobe	*L. pneumophila* (qPCR)				
		N1	M1	N0	M0	p
	TW Zentral, davon	7	8	69	7	0,692
	TWz (Zulauf)	4	7	35	8	0,780
	HEL	3	8	34	7	0,343
	TW Peripher	20	8	106	8	0,289
Anzahl Wohnungen	**TWW Gesamt**	90	21	303	18	0,101
	TWW Zentral, davon	28	18	109	15	0,185
	TWWz (Vorlauf)	14	17	55	16	0,437
	TWZ (Rücklauf)	14	19	54	14	0,281
	TWW Peripher, davon	62	32	194	20	0,341
	TWW P. 2. Liter	33	16	99	22	0,870
	TWW P. 5. Liter	29	32	95	18	0,117
	TW Gesamt	27	15	175	20	0,633
	TW Zentral, davon	7	18	69	18	0,753
	TWz (Zulauf)	4	14	35	15	0,610
	HEL	3	20	34	22	0,911
	TW Peripher	20	12	106	20	0,274
Anzahl Zirkulationsstränge	**TWW Gesamt**	***90***	***8***	***303***	***6***	***0,025***
	TWW Zentral, davon	28	8	109	6	0,132
	TWWz (Vorlauf)	14	8	55	6	0,206
	TWZ (Rücklauf)	14	8	54	6	0,398
	TWW Peripher, davon	62	8	194	7	0,127
	TWW P. 2. Liter	33	8	99	8	0,701
	TWW P. 5. Liter	29	9	95	6	0,070
	TW Gesamt	27	8	175	7	0,656
	TW Zentral, davon	7	8	69	7	0,732
	TWz (Zulauf)	4	7	35	8	0,763
	HEL	3	8	34	7	0,371
	TW Peripher	20	8	106	8	0,439
Baujahr Speicher	**TWW Gesamt**	***68***	***1994***	***194***	***2006***	***0,000***
	TWW Zentral, davon	21	1996	73	2006	0,145
	TWWz (Vorlauf)	10	1997	37	2006	0,264
	TWZ (Rücklauf)	11	1996	36	2003	0,355
	TWW Peripher, davon	***47***	***1991***	***121***	***2006***	***0,001***
	TWW P. 2. Liter	***24***	***1991***	***62***	***2006***	***0,022***
	TWW P. 5. Liter	***23***	***1991***	***59***	***2007***	***0,017***

Objekt-charakteristik	Teilstichprobe	*L. pneumophila* (qPCR)				
		N1	M1	N0	M0	p
	TW Gesamt	21	1996	113	2005	0,131
	TW Zentral, davon	7	1998	45	2005	0,433
	TWz (Zulauf)	4	1498	20	2003	0,129
	HEL	3	2009	25	2005	0,707
	TW Peripher	14	1996	68	2006	0,247
Außenluft-temperatur	**TWW Gesamt**	***86***	***12,0***	***301***	***13,6***	***0,005***
	TWW Zentral, davon	26	12,0	109	13,6	0,228
	TWWz (Vorlauf)	13	12,0	55	13,6	0,532
	TWZ (Rücklauf)	13	12,0	54	13,8	0,281
	TWW Peripher, davon	***60***	***12,0***	***192***	***13,6***	***0,012***
	TWW P. 2. Liter	31	12,0	99	13,6	0,124
	TWW P. 5. Liter	***29***	***12,0***	***93***	***13,6***	***0,044***
	TW Gesamt	25	12,0	174	13,8	0,053
	TW Zentral, davon	7	13,1	68	14,0	0,407
	TWz (Zulauf)	4	12,0	34	13,8	0,378
	HEL	3	15,0	34	16,5	0,717
	TW Peripher	18	10,5	106	13,4	0,087

Legende: Schattierungen: rot= Trinkwarmwasser, blau= Trinkwasser (kalt), fett kursiv= signifikante Ergebnisse (p< 0,05); N1 bzw. M1= N bzw. Median in der Gruppe „kontaminiert, N0 bzw. M0= N bzw. Median in der Gruppe „nicht kontaminiert“

4.5 Statistische Auswertung Langzeitbeprobung

Im Rahmen des Langzeitmonitoring wurden 20 der 101 Objekte aus dem AP II aufgrund projektintern definierter Kriterien ausgewählt (siehe Tab. 4-41). Bei diesen 20 Objekten wurden im Verlauf eines Jahres je Quartal an 8 (bzw. 9) Mess-Stellen Wasserproben entnommen und analysiert. Die Analysen entsprachen im Umfang den hygienischen Beprobungen wie sie in AP II durchgeführt wurden. Die Ergebnisse wurden in einer Datenbank zusammengestellt. Mit der statistischen Auswertung der Daten mit Fokus auf hygienisch relevante Fragestellungen wurde die „Fakultät Statistik“ der Technische Universität Dortmund durch den Projektpartner IWW beauftragt.

Auswahlkriterien für die Wahl der Langzeitobjekte

Die Auswahlkriterien für die 20 ausgewählten Langzeitobjekte sind in nachfolgender Tabelle zusammen mit dem jeweiligen zuständigen Forschungspartner dargelegt, welcher auch die Beprobungen durchgeführt hat. Zudem sind die jeweilige Objektnummer und die spezifischen Auswahlkriterien gelistet.

Tab. 4-41 Auflistung der 20 Objekte der Langzeitbeprobung mit Kriterien, welche für die Auswahl dieser Objekte herangezogen wurden

Nr	Partner	Objekt-Nr.	Objekt-art	Erzeuger	niedr. Temp.	neue Art TWZ	positive Kultur *Legionella* spp.	positive qPCR L. spp.	Beson-derheit	Zutref-fende Kriterien
1	IHPH	16	EFH	WP	X				K. Vor R.	2
2	IHPH	17	EFH	G,ST	X		X			2
3	IHPH	32	EFH	G	X					2
4	IHPH	63	MFH	NW	X		X	X	DS	2
5	IHPH	64	MFH	BHK, G				X		1
6	IHPH/IWW	69	MFH	G	X	X				1
7	IHPH	77	MFH	WP, ST	X	X	X			3
8	IHPH	80	MFH	ST, FWS,ZD	X	X		X		1
9	IHPH	81	MFH	ST, FWS,ZD	X	X			FWS	1
10	TUD	06	MFH	G			X	X		3
11	TUD	08	MFH	FW			X	X		2
12	TUD	15	MFH	FW			X	X		2
13	TUD	20	EFH	WP	X			X		2
14	TUD	33	Sonst	FW		X	X	X		2
15	IWW	94	MFH	G			X	X		3
16	IWW	23	MFH	FW				X		2
17	IWW	43	MFH	ST						1
18	IWW	83	MFH	FW, ZD		X				2
19	IWW	84	MFH	FW, ZD		X	X 85,86	X 85, 86		1
20	IWW	38	EFH	G,ST	X	X	X			1

Legende zu vorhergehender Tabelle:

WP=Wärmepumpe; G=Gas; St= Solarthermie; SLP=Speicherladeprinzip; HP=Holzpellets; Ge=Gewerbe; NW=Nahwärme; BHK=Blockheizkraftwerk; DS=Dachstation; BWK=Brennwertkessel; FWS=(dezentrale) Frischwasserstation; pos. P.a.= positiver *Pseudomonas aeruginosa* Befund; ZD= zentrales Durchflussprinzip; FW= Fernwärme.

Geographische Verteilung

Die 20 Objekte der Langzeitbeprobung waren in Deutschland wie in nachfolgender Abbildung dargelegt verteilt.

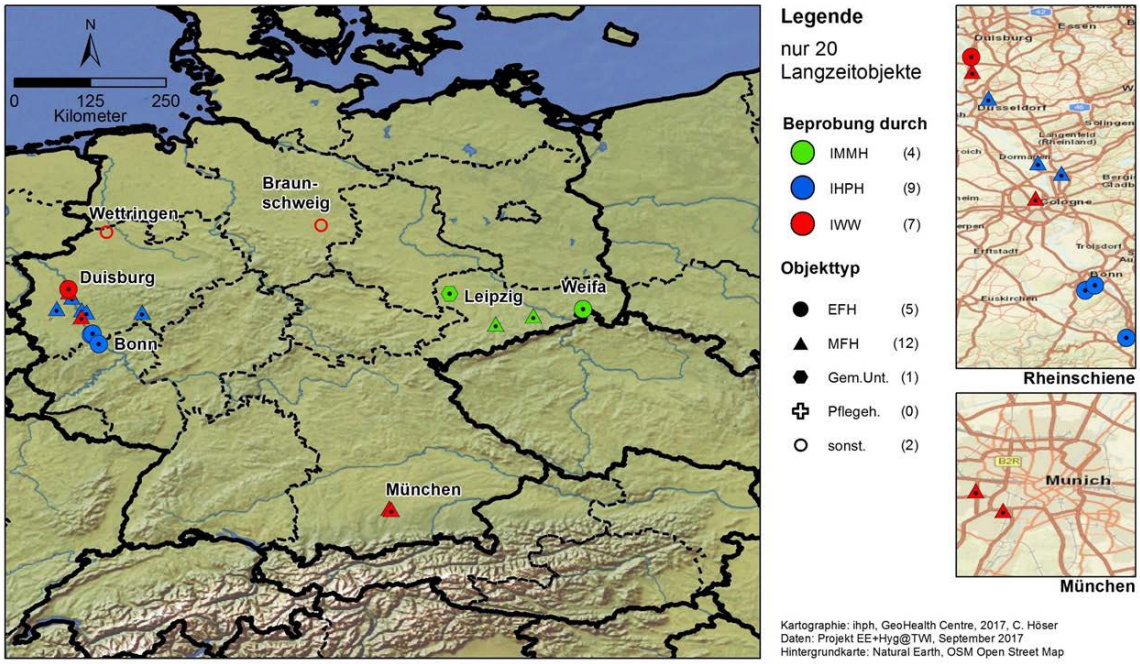


Abb. 4-38 Verteilung der 20 Langzeitobjekte

Auswertung der Fakultät Statistik der TU Dortmund

Die Fakultät Statistik der Technische Universität Dortmund, mit der Postanschrift Vogelpothsweg 87, D-44221 Dortmund, vertreten durch Dr. Uwe Ligges und Veronika Schmidt hatten als Grundlage für die Auswertung die Datenbank der Langzeitobjekte in Exceltabellenform erhalten und zudem weitreichende Informationen zu den Fragestellungen des Forschungsprojektes. Der Datenbank zugrunde liegen 812 (Proben) mit jeweils ca. 11 Analysenwerten pro Objekt d. h. 8.932 Objektdaten. Bei diesen Objektdaten handelt es sich um Temperaturwerte, Analysendaten zu *Legionella* spp. bzw. *Legionella pneumophila*, sowie zu *Pseudomonas aeruginosa*. Ebenfalls ermittelt worden waren nahezu durchgängig die Gesamtzellzahl an Bakterien.

Für die statistische Auswertung konnten nicht alle Datensätze herangezogen werden, da die Voraussetzung um sie in die Modelle einsetzen zu können, nicht jeweils gegeben waren. Die Prüfung erfolgte durch den Unterauftragnehmer.

Die Benennung der Probenahmestellen und Objektdaten lehnt sich an die intern getroffene Nomenklatur an und ist in nachfolgender Abbildung dargestellt. Zudem ist beispielhaft für Objekt Nr. 23, Beprobung 2. und 3. Quartal (Q2, Q3)

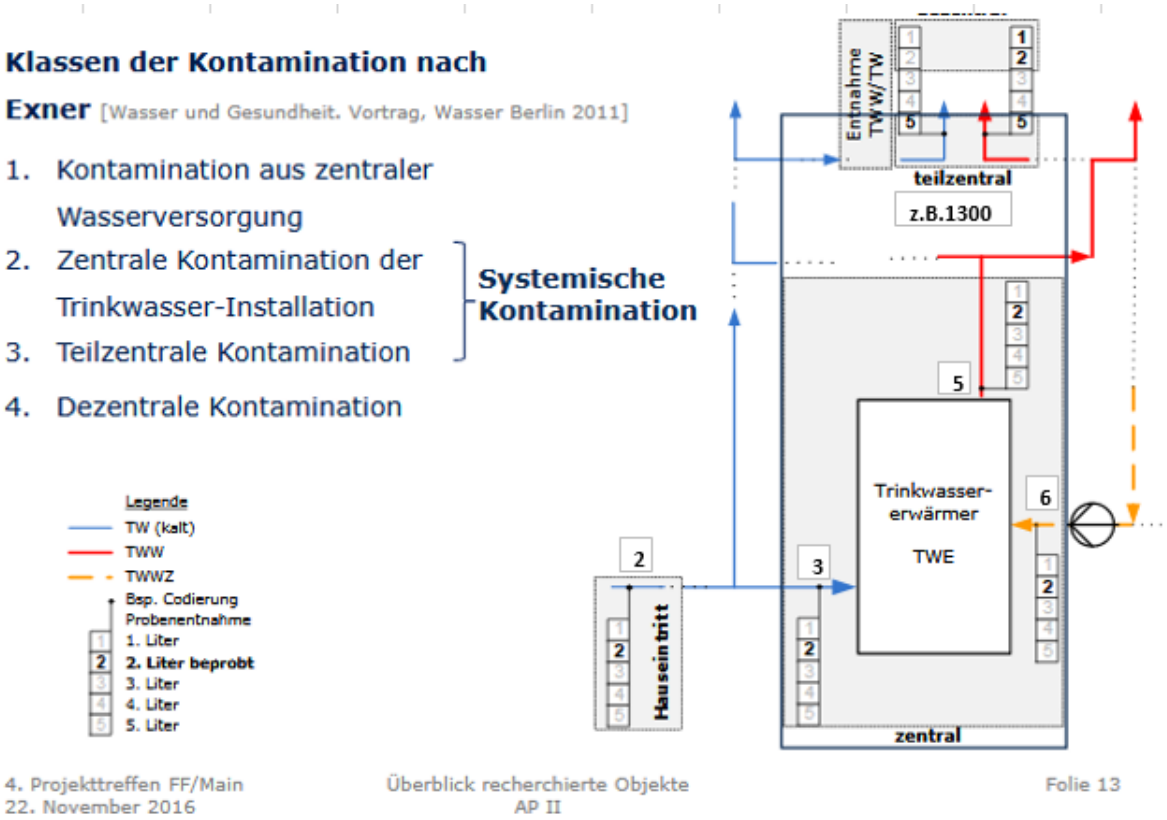


Abb. 4-39 Schematische Darstellung einer Trinkwasser-Installation und Trinkwasser-erwärmer (TWE) mit Probenbezeichnung und Nummerierung: Hauseinführungsleitung (2); Zulauf TWE (3); Austritt TWE (5) und Zirkulation – Eintritt TWE (6)

Beispielhaft sind für Objekt 6 spezifische Proben-Identifikationsnummern und Kodierungen aufgeführt, wie sie im Nachfolgenden auch in den Graphiken verwandt wurden. Beispielhaft ausgeführt: PW1[1] entspricht der Zuordnung zu „Potable Water warm 1. Liter“; PK1[2] entspricht Potable Water cold 1. Liter.

Tab. 4-42 Darlegung der Proben-Identifikationsnummern und Kodierungen beispielhaft aufgezeigt am Objekt Nr. 6 und den beiden Beprobungszeiten 17.06.2015 sowie dem 13.03.2016. Die Kodierung ist in Abb. 4-39 erläutert.

Objekt jekt-num-mer	Datum	Interne La-bornummer	Proben-ID	kurze Proben-ID	Codierung Proben-ID	Quar-tal	T (außen)	T (Pro-be)
6	17.06.2015	W15-781	006.0003.K.2	3	3	Q3	13	27,8
6	17.06.2015	W15-782	006.0005.W.2	5	5	Q3	13	59,2

[1] entspricht in der deutschen Nomenklatur des Projektes: TWW, 1. Liter

[2] entspricht in der deutschen Nomenklatur des Projektes: TW kalt, 1. Liter

Objekt jekt-num-mer	Datum	Interne La-bornummer	Proben-ID	kurze Proben-ID	Codierung Proben-ID	Quar-tal	T (außen)	T (Pro-be)
6	17.06.2015	W15-783	006.0006.W.2	6	6	Q3	13	57,1
6	17.06.2015	W15-788	006.1300.W.1	1300	PW1	Q3	13	47,5
6	17.06.2015	W15-789	006.1300.W.2	1300	PW2	Q3	13	47,9
6	17.06.2015	W15-790	006.1300.W.5	1300	PW5	Q3	13	56,7
6	17.06.2015	W15-791	006.1300.K.5	1300	PK5	Q3	13	16,2
6	13.03.2016	W16-368	006.0003.K.2	3	3	Q2	8	27,8
6	13.03.2016	W16-369	006.0005.W.2	5	5	Q2	8	59,2
6	13.03.2016	W16-370	006.0006.W.2	6	6	Q2	8	57,1
6	13.03.2016	W16-371	006.1300.W.1	1300	PW1	Q2	8	48,9
6	13.03.2016	W16-372	006.1300.W.2	1300	PW2	Q2	8	47,4
6	13.03.2016	W16-373	006.1300.W.5	1300	PW5	Q2	8	57,5
6	13.03.2016	W16-374	006.1300.K.5	1300	PK5	Q2	8	13,6

Statistische Auswertemodelle

Die Auswertungen wurden mit unterschiedlichen Modellen vorgenommen. Diese sind in folgenden Publikationen erläutert:

- 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/.

- R-Paket openxlsx

Alexander Walker (2017): *openxlsx: Read, Write and Edit XLSX Files*, R package version 4.0.17, URL https://CRAN.R-project.org/package=openxlsx.

- R-Paket lmerTest

Alexandra Kuznetsova, Per Bruun Brockhoff und Rune Haubo Bojesen Christensen (2016): *lmerTest: Tests in Linear Mixed Effects Models*, R package version 2.0-33, URL https://CRAN.R-project.org/package=lmerTest.

Zusammenfassung der Ergebnisse der statistischen Auswertung

- **Daten der Quartale**
  - Es ist kein Unterschied der Daten aus den 4 Jahreszeiten-Quartalen gegeben.
- ***Pseudomonas aeruginosa* kulturell**
  - Auf die Werte (Analyseergebnisse) von *P. aeruginosa* hat keine Variable einen signifikanten Einfluss.
    Die Anzahl positiver Befunde an *P. aeruginosa ist gering.*

- ***Legionella* spp. (nach UBA) kulturell**
  - Die Temperatur des Austritts Trinkwassererwärmer (Proben-ID 5) steht in keinem signifikanten Zusammenhang zu den kulturellen Befunden an *Legionella* spp. (nach UBA) im 2. Liter wie im 5. Liter der Peripherie.

    Grundlage für diese Aussage sind die positiven Befunde mit > 100 KbE/100 mL *Legionella* spp.

- ***Legionella* spp. mittels qPCR (deskriptiv)**
  - Die Werte von „qPCR *Legionella* spp.“ wurden logarithmiert, damit die Normalverteilungsannahme für die Modelle getroffen werden kann. Damit zeigt sich:
  - Es ist kein Zusammenhang zwischen den logarithmierten Werten von „qPCR *Legionella* spp.“ und der Außentemperatur zu erkennen.
  - Es ist kein starker Zusammenhang zwischen den logarithmierten Werten von „qPCR *Legionella* spp.“ und dem meteorologischen Quartal zu erkennen“.
  - Es ist kein starker Zusammenhang zwischen den logarithmierten Werten von „qPCR *Legionella* spp.“ und der Proben-ID zuerkennen (siehe nachfolgende Abbildung).

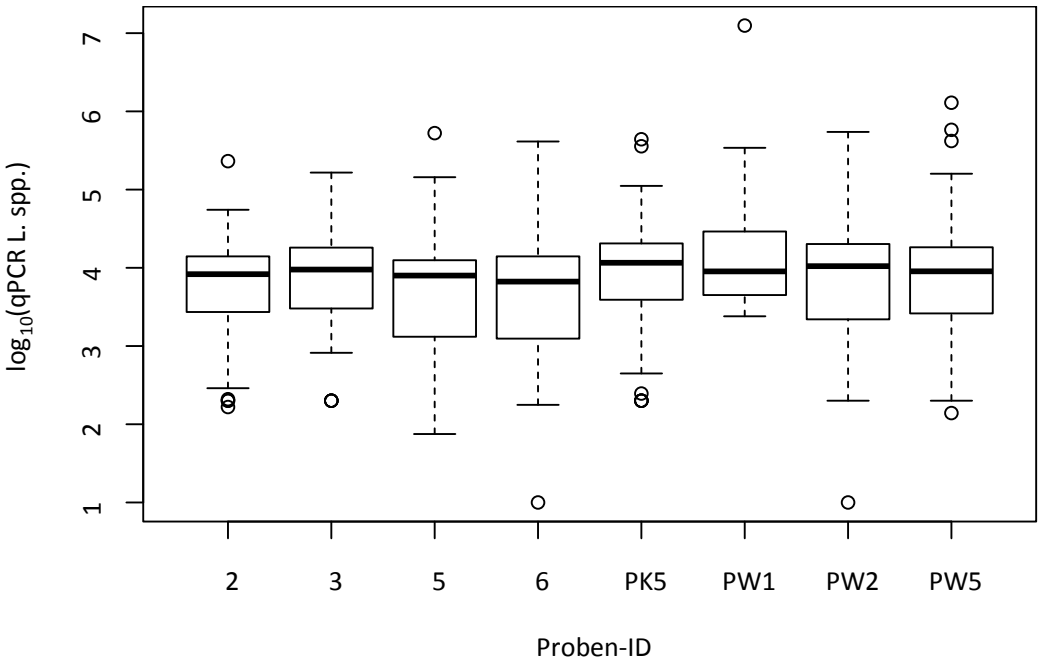


Abb. 4-40 Es ist kein starker Zusammenhang zwischen den logarithmierten Werten von „qPCR *Legionella* spp.“ und der Proben-ID zu erkennen (Boxplot Diagramm mit 50 % der Daten ober- und 50 % der Daten unterhalb des Medians).

  - Es ist kein starker Zusammenhang zwischen den logarithmierten Werten von „qPCR *Legionella* spp.“ und dem kalendarischen Quartal zu erkennen.
  - Es ist kein starker Zusammenhang zwischen den logarithmierten Werten von „qPCR *Legionella* spp.“ und dem meteorologischen Quartal zu erkennen.
  - Es scheint ein Zusammenhang zwischen den logarithmierten Werten von „qPCR *Legionella* spp.“ und dem Institut bzw. dahinterliegender latenter Variablen zu bestehen.

- Es ist kein deutlicher Zusammenhang zwischen den logarithmierten Werten von „qPCR *Legionella* spp.“ und der Temperatur der Probe zu erkennen.

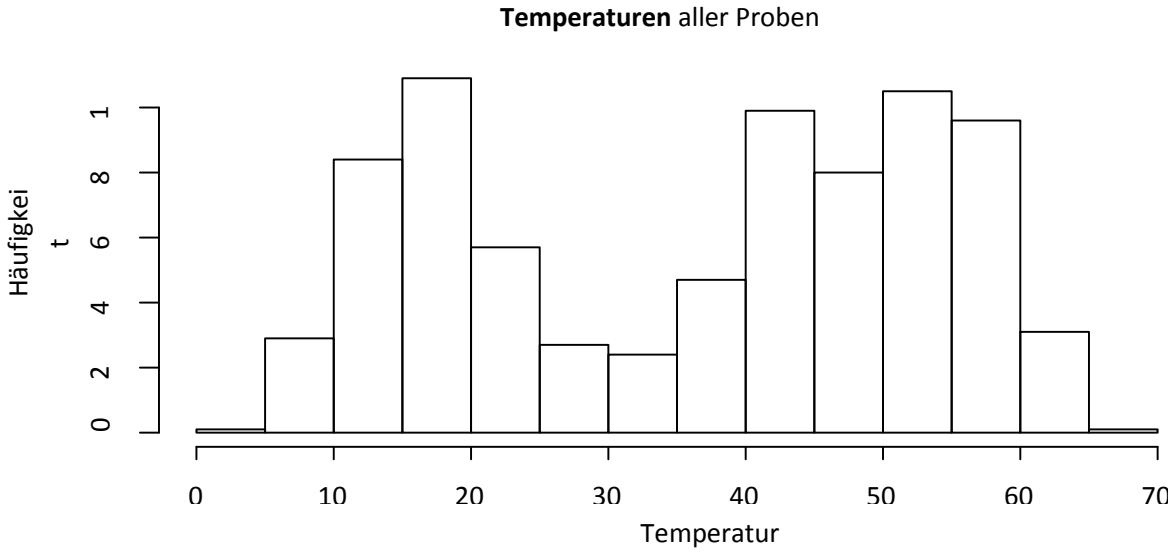


Abb. 4-41 Temperatur der einzelnen Proben in Bezug zur Häufigkeit an Proben

Im Mosaik-Plot ist zu erkennen, dass *Legionella* spp. bei Proben-Temperaturen zwischen 40 und 45 Grad relativ weniger häufig nachgewiesen werden konnten, als bei Proben-Temperaturen, die **nicht** zwischen 40 und 45 Grad liegen (Tab. 4-43). Insgesamt wurden meistens keine Legionellen nachgewiesen, was natürlich, aufgrund der relativ geringen Fallzahlen von 790 Proben, die Aussage der statistischen Auswertung einschränkt.

Tab. 4-43 Statistische Auswertung von 790 *Legionella* spp. positiven Proben in Bezug auf die Signifikanz ihres Vorkommens im Temperaturbereich 40°C bis 45°C bzw. darunter und darüber

		Legionella spp.		
		nicht vorhanden	vorhanden	Summe
Temperatur in Grad Celsius der Proben	(40,45)	570 (82.251 %)	123 (17.749 %)	693 (100 %)
	(-Inf, 40], [45, Inf)	66 (68.041 %)	31 (31.959 %)	97 (100 %)
	Summe	636 (80.506 %)	154 (19.494 %)	790 (100 %)

- ***Legionella* spp. mittels qPCR**
  - Die Temperatur des Zirkulationsrücklaufes steht nicht in einem signifikanten Zusammenhang zu den kulturellen Befunden an *Legionella* spp. (nach UBA) im 2. Liter wie im 5. Liter der Peripherie.

    Folgerung: die positiven Legionellenbefunde sind ursächlich nicht allein auf die Temperatur der Zirkulation zurückzuführen.
    Grundlage sind die Ergebnisse der qPCR *Legionella* spp. Daten in Bezug zu weiteren Variablen.

- ***Legionella pneumophila* mittels qPCR**
  - Bei den Messstellen PW2 und PW5 sind leicht höhere logarithmierte Werte von „qPCR *Legionella pneumophila*“ gemessen worden.
  - Es ist kein starker Zusammenhang zwischen den logarithmierten Werten von „qPCR *Legionella* spp.“ und dem meteorologischen Quartal zu erkennen“.
  - Die Temperatur des Zirkulationsrücklaufes steht nicht in einem signifikanten Zusammenhang zu den kulturellen Befunden an *Legionella* spp. (nach UBA) im 2. Liter wie im 5. Liter der Peripherie. Daraus ist zu folgen

    Folgerung: die positiven Legionellenbefunde sind ursächlich nicht allein auf die Temperatur der Zirkulation zurückzuführen.
    Grundlage sind die Ergebnisse der qPCR *Legionella* spp. Daten in Bezug zu weiteren Variablen.

2. Statistische Auswertung mittels Modellen

Lineares Modell mit zufälligen Effekten für „qPCR *Legionella* spp. [GU/500 mL]“

In einem linearen Modell mit zufälligen Effekten wird der Einfluss der mehrfach gemessenen Objekte (Langzeitbeprobung) miteinbezogen. Die Objektnummer wurde als zufälliger Effekt mitbetrachtet.

Der lineare Einfluss der interessierenden Variablen Proben-ID, Außentemperatur, Proben-Temperatur, quadrierte Proben-Temperatur und Institut auf die logarithmierten Werte von „qPCR L. spp. [GU/500 mL]“ wird dabei dargestellt:

Die Koeffizienten der Variablen Proben-ID und Institut sind im Vergleich zu einer Referenzkategorie (Proben-ID 2 bzw. Institut IHPH) zu interpretieren. Wird anstelle der Referenzkategorie eine andere Ausprägung der Variable angenommen und alle übrigen Variablen behalten die gleichen Werte, so erhöht sich der logarithmierte Wert von „qPCR *Legionella* spp. [GU/500 mL]“ um den Koeffizienten. Bei den Variablen Außentemperatur, Temperatur der Probe und quadrierte Temperatur der Probe stellt der Koeffizient den Wert dar, um den sich der logarithmierte Wert von „qPCR *Legionella* spp. [GU/500 mL]“ erhöht, wenn die Variable um eine Einheit erhöht wird und die übrigen Variablen ihren Wert beibehalten.

- **Signifikanz – p-Wert**

  Am p-Wert ist zu erkennen, welche Variablen einen signifikanten Einfluss auf den logarithmierten Wert von „qPCR *Legionella* spp. [GU/500 mL]“ haben.

  - Ist der p-Wert kleiner als eine bestimmte Grenze (hier 5 % = 0.05), dann wird der Einfluss als signifikant angesehen (grün markiert).

Signifikante Variablen in diesem Modell sind die Außentemperatur, die quadrierte Temperatur der Probe, das Institut und die Probe-ID. Ein signifikanter Unterschied ist bei einem Wert von $p < 0,05$ gegeben.

Tab. 4-44 Statistische Auswertung der Ergebnisse an qPCR *Legionella* spp. Werten in Zusammenhang zur Proben-ID; p < 0,05 bedeutet ein signifikanter Unterschied

„qPCR L. spp. [GU/500 mL]“	Koeffizient	Standardfehler	Teststatistik t	p-Wert
Intercept	3.807	0.170	22.443	$<10^{-16}$
Proben-ID: 3	0.101	0.111	0.916	0.360
Proben-ID: 5	0.162	0.158	1.026	0.305
Proben-ID: 6	0.066	0.156	0.424	0.672
Proben-ID: PK5	0.205	0.079	2.587	0.010
Proben-ID: PW1	0.646	0.164	3.951	$8.6 \cdot 10^{-5}$
Proben-ID: PW2	0.189	0.135	1.395	0.163
Proben-ID: PW5	0.263	0.149	1.769	0.077
Außentemperatur	0.009	0.002	3.763	$1.8 \cdot 10^{-4}$
Temperatur der Probe	0.017	0.010	1.658	0.098
quadrierte Temperatur der Probe	$-3.1 \cdot 10^{-4}$	$1.3 \cdot 10^{-4}$	-2.476	0.014
Institut: IMMH	-0.339	0.194	-1.746	0.099
Institut: IWW	-0.920	0.183	-5.027	$1.1 \cdot 10^{-4}$

Lineares Modell mit zufälligen Effekten für „qPCR *Legionella* spp. [GU/500 mL]“

Hier wurde als Zielvariable der logarithmierte Wert von „qPCR *Legionella* spp. [GU/500 mL]“ gewählt.

- Keine der Variablen hat einen signifikanten Einfluss auf das Ergebnis der qPCR.

Lineares Modell mit zufälligen Effekten für „qPCR *Legionella* spp. [GU/500 mL]“ an PW2

In diesem Modell wurde die Messstelle PW2 einzeln betrachtet. Es wurde der Einfluss der Variablen Außentemperatur, Temperatur an Messstelle 5 und Institut auf den logarithmierten Wert von „qPCR L. spp. [GU/500 mL]“ betrachtet. Der zufällige Einfluss der einzelnen Objekte wurde miteinbezogen. Hier ist nur der Einfluss der Variable Institut signifikant.

- Keine der Variablen außer Institut hat einen signifikanten Einfluss darauf.

Lineares Modell mit zufälligen Effekten für „qPCR L. *pneumophila* [GU/500 mL]“ an PW2

Hier wurde als Zielvariable der logarithmierte Wert von „qPCR L. *pneumophila* [GU/500 mL]“ an der Messstelle PW2 gewählt

- Keine der Variablen hat einen signifikanten Einfluss darauf.

Logistisches Modell mit zufälligen Effekten

In diesem Modell werden die Log-Odds, also das logarithmierte Chance dafür, dass der Wert von „qPCR L. *pneumophila* [GU/500 mL]“ an der Stelle PW2 (HEL) größer als 10 ist, modelliert. Diese steigen bei Veränderung der Variable um eine Einheit bzw. Annahme einer Kategorie statt der Referenz um den Faktor exp(Koeffizient). Anhand der p-Werte ist erkennbar, dass keine der betrachteten Variablen einen signifikanten Einfluss auf die Log-Odds hat.

In diesem Modell werden die Log-Odds, also das logarithmierte Chance dafür, dass der Wert von „L. spp. [KbE/100 mL] (UBA)“ an der Stelle PW2 größer als 100 ist, modelliert. Diese steigen bei Veränderung der Variable um eine Einheit bzw. Annahme einer Kategorie statt der Referenz um den Faktor exp(Koeffizient). Anhand der p-Werte ist erkennbar, dass keine der betrachteten Variablen einen signifikanten Einfluss auf die Log-Odds hat.

4.6 Schlussfolgerungen Felduntersuchungen und Herausarbeitung von Thesen

Die in den Kapiteln 4.1 bis 4.3.6 dargestellten Ergebnisse flossen in die Beantwortung der eingangs dargestellten Forschungsfragen ein. In manchen Fällen war es dabei möglich, aus den Ergebnissen der Felduntersuchung separat genommen bereits Interpretationen und Thesen abzuleiten, in anderen Fällen wurden die Thesen durch Triangulation der Ergebnisse von Felduntersuchung, Simulation, Teststand und/oder Emulator generiert. In jedem Falle erfolgte jedoch eine intensive Diskussion der Ergebnisse im gesamten Projektkonsortium. Die hier in Form von Thesen kompakt aufbereitete Ergebnis-Interpretation[3] ist auch in einem separaten Thesenpapier nachzulesen.

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 Trinkwarmwasserinstallation ein Inhaltsvolumen 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. kapazitiven Effekte) dann weitgehend abgeklungen sind.

[3] Teilweise werden Passagen aus dem Abschnitt 3 wortgleich übernommen um dem Leser hier nochmals einen Überblick zu geben.

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 [UBA2012; 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.

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.

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 [Kistemann10; Völker10]. 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 Kultur 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 mittels qPCR ermittelten Konzentrationen liegen – wie auch bei *Legionella* - höher als die Koloniezah-

len, 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 [UBA2017] aufgeführt werden, erleichtern kann und daher z. B. vor der Festlegung aufwändiger Sanierungsmaßnahmen zur Problemeingrenzung genutzt werden sollte.

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 [UBA2012] 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 [Schreiber12] 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 Gesamtzellzahl, 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) gem. TrinkwV nutzbar ($p > 0,05$). Eine ergänzende Heranziehung scheitert zurzeit an fehlenden Bewertungsmaßstäben z. B. in Form eines Grenzwertes. Die Gesamtzellzahl kann jedoch, ähnlich wie die allgemeine Koloniezahl, die Überwachung unterstützen, da eine Änderung der GZZ im Langzeitmonitoring auf Ände-

rungen im System und damit mögliche Probleme hinweist. Auch für vergleichende Untersuchungen ist die Gesamtzellzahl zweifellos sehr hilfreich.

Die molekularbiologischen Methoden sind also 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 °C-50 °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 jedoch ist auch die *L. pneumophila* qPCR nicht zielführend.

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 etwa doppelt so häufig Legionellen zu finden wie im 5. Liter, und die maximalen Legionellen-Konzentrationen 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 in der Zentrale 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.

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 (p-Wert Korrelation: 0,15). *(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 TWW 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) im Sinne einer Erhaltung der 5-K-Regel, so liegen trotzdem noch 28,4 % der Objekte oberhalb von 6 K.

Es wurde mittels statistischer Tests (Chi-Quadrat) geprüft, ob eine Legionellenkontamination 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 sog. 5-K-Regel kein notwendiges Kriterium, um eine Legionellenkontamination 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 Legionellen-Kontaminationen hat. Vielmehr unterstützt dies die Annahme, dass das Auftreten von Legionellen in der TWI ein multifaktorielles Geschehen darstellt (d. h. verschiedene Einflussfaktoren in ihrer Summe zu einem erhöhten Legionellenrisiko führen) 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. Völker16] sowie weiterer empirischer Forschung.

TWW-Temperaturen am Austritt TWE - Temperaturregime bei TWI-Bestandsanlagen

Das Temperatur-Regime der TWI beeinflusst die Legionellenkonzentrationen im Warmwasser (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.

(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 Legionellen-Konzentration (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 Legionellen-Konzentration (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 Grenztemperatur im Gegensatz zur Gruppe der Objekte mit jeweils darunterliegenden Temperaturen feststellen. Entsprechendes gilt für 58 °C - 60 °C bzgl. THM bei Nichtentnahme, 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 lasst 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.

Wartung und Zirkulationsbetrieb

Die korrekte 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.

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 Probenahmehähne. 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)

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 Temperaturanhebung (z. B. jede Nacht oder wöchentlich für eine Stunde auf 70 °C ohne mikrobiologischen Befund (oft fälschlicher Weise als „Legionellen-Schutzschaltung“ oder „vorbeugende thermische Desinfektion“ bezeichnet) wirkt gleichsinnig zu den in Kapitel 6.5.4 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 Stichleitungen 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. Kapitel 6.6). Entnahmen des Nutzers in diesen Zeiten bergen überdies eine Verbrühungsgefahr. Das Entfallen dieser vorbeugenden, in keinem trinkwasserhygienischen Regelwerk enthaltenen Temperaturanhebung 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. Kapitel 7.4). Generell wird nach derartigen Spülprozessen empfohlen, eine Spülung der TWK-Seite vorzunehmen um das unzulässig hoch erwärmte TWK auszustoßen.

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 Nutzeinheiten oft auf die Gebäudekubatur zurückgegriffen werden und es konnte keine direkte Strangzuordnung erfolgen.

Die Informationen, die die UsI bzw. deren Beauftragte in die Checklisten einzutragen hatten, enthielten nur wenige Abfragen. Die Auswertungen der dort für den Austritt des Trinkwassererwärmers (TWE-TWW) angegebenen Temperaturbereiche zeigten im Ver-

gleich 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.

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 Trinkwassererwärmung zu erstellen.

Die Installation der Entnahmestellen für die Legionellen-Beprobung im Umfeld des Trinkwassererwärmers 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 Befragung. Die Betreiber-Reaktionen 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.

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 stetig an. Es wird abgeleitet, dass die Konzentrationen vorwiegend durch Maßnahmen, die die z. B. die Betriebsweise verändern, beeinflusst werden. Andere, oft geringer kontaminierte PNS, zeigen Legionellen in der TWI nicht immer sicher kulturell an. Dies bedeutet, dass der örtlich fehlende kulturelle Nachweis nicht sicher auf Kontaminationsfreiheit schließen lässt, wobei gering kontaminiert i.d.R. bedeutet kleiner dem technischen Maßnahmewert. Dies ergänzt Ergebnisse anderer F&E-Projekte, die große örtliche Schwankungen innerhalb eines Gebäudes sowie an ein und derselben PNS über einen längeren Zeitraum hin beobachtet haben, nur sehr selten traten stetige Nachweise in allen Proben einer Zapfstelle auf [Völker16, Völker17].

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 Zirkulationsversuchsstand, 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 gattungsspezifischen-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“. Zudem zeigt sich kein deutlicher Zusammenhang zwischen den logarithmierten Werten von *Legionella* spp. (qPCR) und der Temperatur der Probe. 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].

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 2016b], 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 werden[4]. Wird dieses Einsparpotential auf das Minderungspotenzial von Treibhausgasemissionen[5] umgerechnet, können bei einer Absenkung um 5 K etwa 4,5 Millionen

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

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

Tonnen pro Jahr (Mio. t/a) CO_2 und bei einer Absenkung um 10 K ca. 9,0 Mio. t/a CO_2 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. 9-43) berücksichtigt, könnten bei einer Temperaturabsenkung um 5 K zusätzlich bis zu 2 Mio. t/a CO_2 eingespart werden. Diese 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 Kapitel 5.6 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.

5 Technikums-Versuchsstand Trinkwasser-Installation am ZET

5.1 Technisch-wissenschaftliches Konzept

5.1.1 Allgemeines

Im Technikum der Professur für Gebäudeenergietechnik und Wärmeversorgung des Institutes für Energietechnik der TU Dresden wurden unter Einbezug eines bereits vorhandenen Versuchsstandes zur Untersuchung von Trinkwasser-Zirkulationssystemen und –armaturen Erweiterungen dahingehend vorgenommen, die komplette Trinkwasser-Installation eines 6-Familien-Hauses realitätsnah abzubilden und nach den allgemein anerkannten Regeln der Technik auszuführen.

5.1.2 Grundaufbau

Unter Verwendung großhandelsüblicher Produkte und Materialien des Handwerkes wurde ein deutlich asymmetrisches Netz für Trinkwasser kalt (TWK), Trinkwarmwasser (TWW) und zugehöriger Zirkulation (TWZ) für sechs Wohneinheiten (WE) installiert. Als Rohrmaterial diente Metall-Verbundrohr (PE-X/ Al/ PE-X) in Bördel-Klemmverbindungs-Technik mit Rotguss- (DIN EN 1982) und Kunststofffittings (wasserberührende Teile PPSU), nach Herstellerangaben weitgehend totraumfrei (Hersteller JRG, Material Sanipex MT, siehe Abb. 5-12 am Ende dieses Abschnittes).

Es wurden drei Steigstränge unterschiedlicher Länge (5 m, 10 m, 20 m) mit je zwei übereinander angeordneten WE aufgebaut.

Zur Veranschaulichung des Netzes dienen die Ausschnitte der Rohrleitungs- und Instrumentenfließschemata (R&I-Schemata) in Abb. 5-1, Abb. 5-2 und Abb. 5-3.

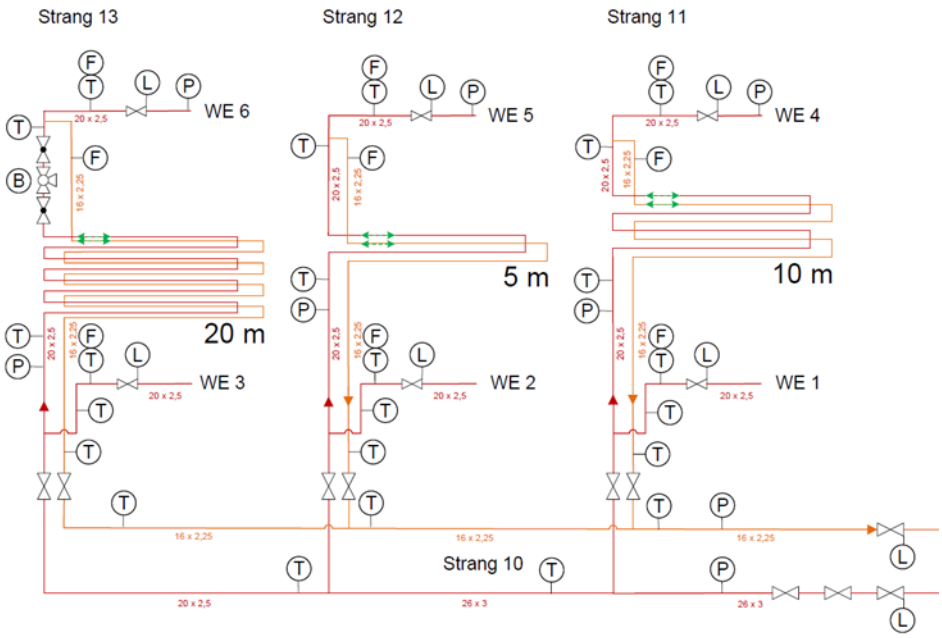


Abb. 5-1 R&I-Schema des TWW und TWZ-Netzes

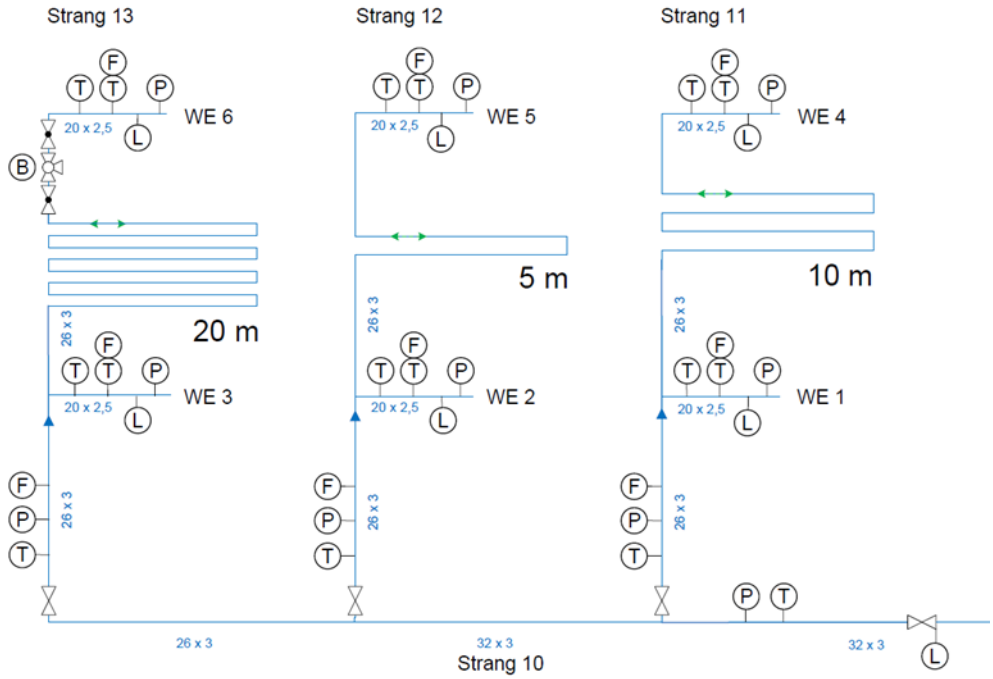


Abb. 5-2 R&I-Schema des TWK-Netzes

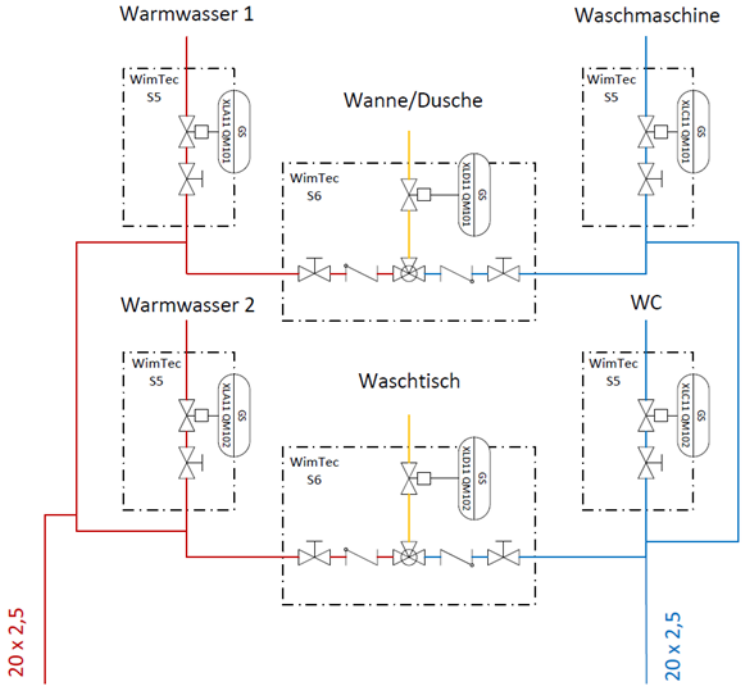


Abb. 5-3 R&I-Schema der Zapfstellen

Jede WE wurde mit je sechs magnetventilgesteuerten Zapfstellen des Herstellers WimTec (Unterputz-Ausführungen S5 und S6) ausgerüstet. Somit verfügt jede WE über

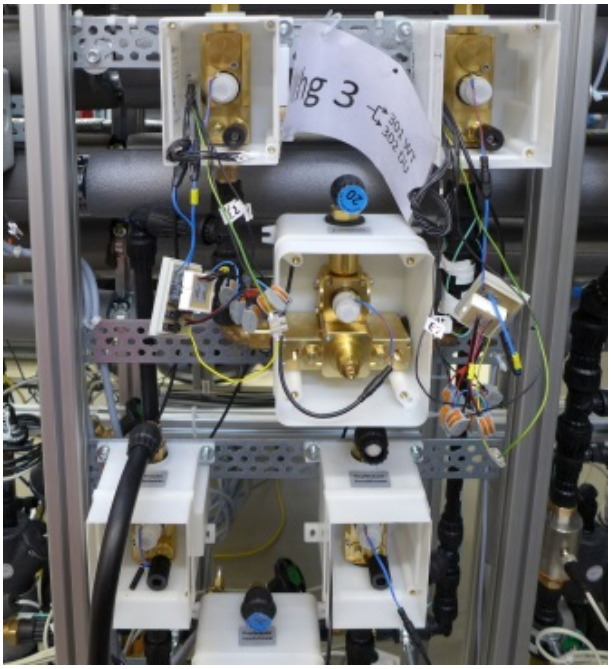
- 2 TWK-,
- 2 TWW- und
- 2 Mischwasserzapfstellen,

von denen jeweils eine die Zapfrate

- 5 L/min (entspricht der Zapfung an einem Waschtisch) und die andere
- 10 L/min (entspricht der Zapfung an einer Dusche oder Wanne)

abbildet.

Abb. 5-4 zeigt Einzelheiten. Die Rohrwege zwischen den Zapfstellen sind kurz gehalten. Das Flächenelement im Bereich der Unterputz-Körper wurde mit einer hinreichend strömungsdichten Matte aus geschäumtem Kautschuk verkleidet. Die Fertigmontage-Sets aus vernickeltem Blech bilden den sicheren Abschluss der Unterputz-Kästen. Die Auslaufrohre aus Mehrschichtverbundrohr enden über einem gemeinsamen Becken. Die Rohrenden wurden mit über Innensechskant einstellbare Ventile versehen, die die wiederholgenaue Einstellung der o. g. Zapfraten von 5 L/min und 10 L/min zuließen.



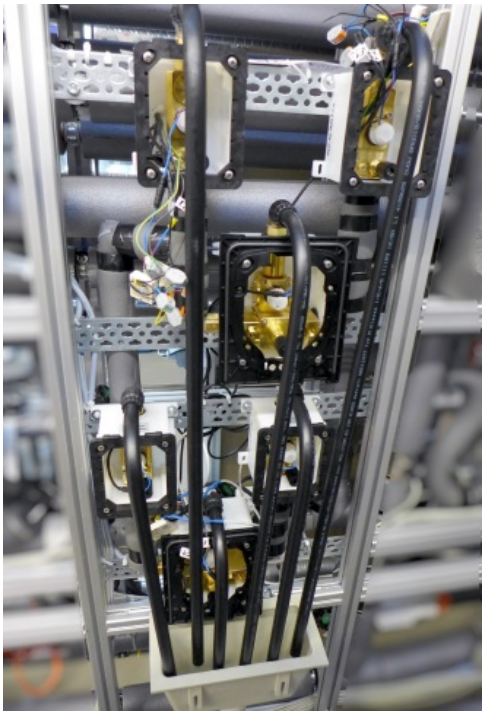


Abb. 5-4 Zapfstellen, technische Einzelheiten und Baufortschritt

Strahlregler als Abschluss über dem Becken sorgten für stabile und gleichmäßige Strahlausbildung und somit für hinreichend konstanten Zapfvolumenstrom. Nach dem Test von insgesamt fünf Modellen, eignete sich schließlich der des Herstellers NEOPERL, Typ Cascade-E SLC, am besten (Abb. 5-5).

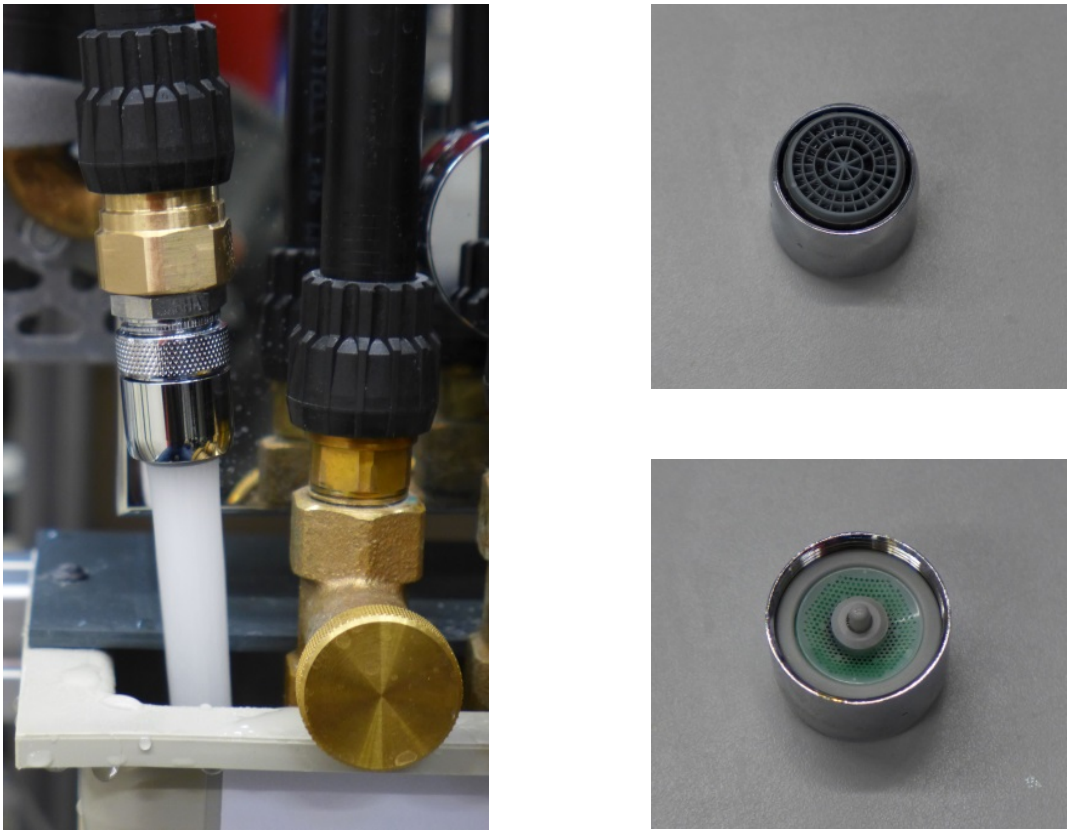


Abb. 5-5 Strahlregler NEOPERL Cascade-E SLC

Um den **hydraulischen Abgleich der Zirkulation** und damit die gleichmäßige Versorgung der stark unterschiedlich langen Stränge zu gewährleisten, wurden je Versuch drei Methoden angewandt.

Das sind im Einzelnen:

1. der manuelle hydraulische Abgleich (statisch zu 1,5 L/min je Strang),
2. der thermohydraulische Abgleich mittels eines elektronischen Zirkulationsregelsystems mit Hilfsenergie (thermoelektrisch, dynamisch) und
3. der thermohydraulische Abgleich mittels für die jeweilige TWW-Temperatur geeigneten selbsttätigen Abgleichventils ohne Hilfsenergie (thermomechanisch, dynamisch).

Abb. 5-6 schematische Schnittdarstellung der Armatur zum händischen hydraulischen Abgleich (Bild: JRG)

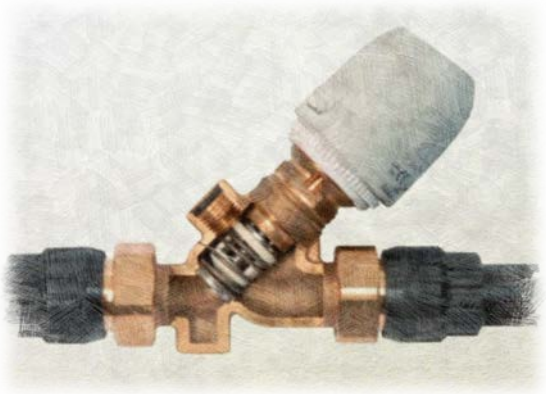


Abb. 5-7 schematische Schnittdarstellung der Armatur zum thermohydraulischen Abgleich mittels eines elektronischen Zirkulationsregelsystems mit Hilfsenergie (Bild: JRG)

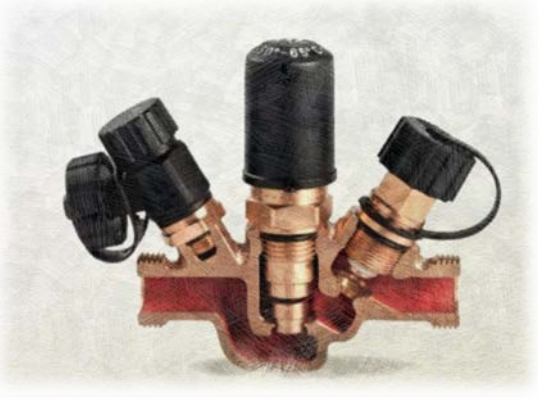


Abb. 5-8 schematische Schnittdarstellung der Armatur für die jeweilige TWW-Temperatur geeignetem selbsttätigen Abgleichventils ohne Hilfsenergie (Bild: Kemper)

Um den vierten Fall „keine Zirkulationsleitung“ abbilden zu können, wurde das TWW-Netz vom TWW-Speicher-Ausgang ausgehend, vollständig mit einem **elektrischen Begleitheizband** des Herstellers PENTAIR/ RAYCHEM, Typ HWAT-M, ausgestattet, in Abb. 5-9 orange. Bei 20 °C Umgebungstemperatur wäre mit diesem Typ eine maximale TWW-Temperatur von 55 °C zu halten. Es ist ein strangweiser Betrieb der Heizung möglich. Die Montage des Heizbandes erfolgte im Bereich der waagerechten Rohrführung unterhalb des Rohres. Abb. 5-9 zeigt Teile des Heizband-Systems. Die Nennleistungsabgabe des selbstregelnden Systems beträgt 9 W/m bei 55 °C.

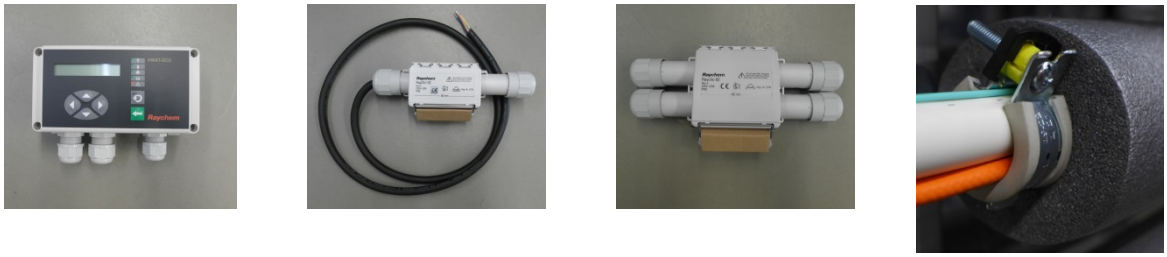


Abb. 5-9 Teile des Heizband-Systems (v. l. n. r: Steuerung, elektrischer Anschluss, Verzweigung) und Anwendung

Die **Wärmedämmung** aller Rohrleitungen und Armaturen erfolgte praxisgerecht mit handelsüblicher Dämmung der nennweitenabhängigen Dämmstärke „EnEV 100 %“.

Die Netze wurden durchgängig aufwändig **messtechnisch instrumentiert**. Es wurden insgesamt

- 50 Temperatur-,
- 23 piezoelektrische Druck-,
- 22 Volumenstrommessstellen (MID und Vortex) und
- 4 zur Erfassung der elektrischen Leistung/Arbeit

eingebaut, deren Daten alle 2 s abgefragt, aufgezeichnet und paketweise in der zentralen Messdatenbank DATA (siehe Kapitel 3.2) abgelegt wurden. Diese Aufgaben konnten durch Nutzung eines MOD-Bus-fähigen TCP-Modulbaukastens (Hersteller ICP DAS) langzeitstabil realisiert werden.

Die Spezifikation der Messgeräte ist dem Anhang 15.8 zu entnehmen.

Für die Weiterverarbeitung der Messsignale, also der Analog-digital-Wandlung, wurden die in 15.10 aufgeführten Module des Herstellers ICP DAS verwendet.

Die Mess-, Steuer- und Regeltechnik bzw. bei dezentraler Montage deren Auswerteeinheit wurde in einem externen Schaltschrank untergebracht, der thermisch rückwirkungsfrei neben dem Versuchsstand steht. Die Signalleitungen aller Sensoren und Aktoren laufen dort auf. Dort erfolgt auch die Umsetzung der analogen Messsignale in digitale. Ein angeschlossener PC, auf dem der TWI-Versuchsstand visualisiert ist, dient der Überwachung des Versuchsbetriebes und dem Messdatenmanagement. Die dafür notwendige Software wurde im Rahmen des Forschungsvorhabens entwickelt.

Abb. 5-10 Schaltschrank des TWI-Versuchsstandes

Außerdem erfolgte die komplette Ausrüstung des TWW-, TWZ- und TWK-Netzes mit **faseroptischer Temperaturmessleitung** (Distributed Temperature Sensing, DTS), in Abb. 5-9, rechtes Bild. Dort ist ein wärmegedämmtes Mehrschichtverbundrohr mit Begleitheizband (orange) und DTS (grün) zu sehen. Die faseroptische Temperaturmessung ermöglicht es, die Temperatur entlang eines langen Glasfaserkabels fein orts- und zeitaufgelöst zu erfassen. Die genaue Beschreibung der Messmethode und weitere technologische Einzelheiten sind [Herwig15] zu entnehmen.

Durch eine geeignete Anordnung des Glasfaserkabels können mit dieser Methode daher ausgedehnte Temperaturverteilungen detailliert aufgenommen werden. Hier wurden je Versuch über zwei Tage hinweg alle 5 s für einen Abschnitt von 126 mm die Mitteltemperaturen an der Außenwand der Rohre aufgenommen. Es wurden insgesamt ca. 240 m Messleitung so verlegt, dass im Verlauf der Leitung keine Knicke oder Druckstellen vorlagen, die das Messsignal zu stark beeinflusst hätten. Deshalb wurde im Bereich von Rohrschellen auch die in Abb. 5-9 gezeigte Art der Verlegung gewählt. Die Messwertaufnahme erfolgte durch das DTS-Messgerät der Firma SILIXA.

Die Auswertung der umfangreichen Messdaten erfolgte grafisch über Rasterdiagramme.

Durch die hinreichend dichte **äußere Beplankung** des Versuchsstandes mit 9,5 mm bzw. 12,5 mm dicken, teilweise imprägnierten Gipskartonplatten wurde die Installation von seiner Umgebung strömungstechnisch abgeschirmt und außerdem die Schachtsituation dargestellt (Abb. 5-11).

Das Rahmengestell besteht aus Profilen des Herstellers ITEM. Die Außenmaße betragen:

- Breite: 3,00 m
- Höhe: 4,00 m
- Tiefe: 0,65 m.

Die Interaktionsfläche zur Außenluft beträgt ca. 32 m², zum Betonfußboden ca. 2 m² und innerhalb der Einhausung zwischen warm- und kaltgängigen Rohrleitungen ca. 12 m² (Trennwand).

Abb. 5-11 Außenansichten des TWI-Versuchsstandes

Weiterhin sorgte eine zweiteilige wärmegedämmte, jederzeit **reversible Trennwand** zwischen TWW/TWZ und TWK dafür Situationen darzustellen, bei denen warm- und kaltgehende Rohrleitungen in voneinander getrennten Schächten verlaufen. Der U-Wert betrug etwa 0,8 W/m²·K. So war es möglich, ohne aufwändige bauliche Änderungen an den Rohrnetzen, auch diesen Einfluss messtechnisch zu untersuchen. Ein Teil der Trennwand, kurz vor dem Einschieben in den TWI-Versuchsstand, ist in Abb. 5-13 zu sehen.

Der U-Wert der Trennwand berechnet sich wie folgt:

Schichtdicke Gipskarton:	$s_{\mathrm{GK}} = 9{,}5\ \mathrm{mm}$	
Wärmeleitfähigkeit Gipskarton:	$\lambda_{\mathrm{GK}} = 0{,}25\ \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m \cdot K}}$	(Angabe Knauf)
Schichtdicke EPS-Dämmung:	$s_{\mathrm{EPS}} = 30{,}0\ \mathrm{mm}$	
Wärmeleitfähigkeit EPS:	$\lambda_{\mathrm{EPS}} = 0{,}035\ \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m \cdot K}}$	(Angabe Hersteller)
Praxiszuschlag:	$10\ \%$ (Stöße, Spalte, Montageunzulänglichkeiten, …)	
Wärmeübergangskoeffizient:	innen und außen etwa gleich groß	
WÜK-Ansatz:	$\alpha(\Delta\vartheta) = 3{,}5 + 0{,}09 \cdot \Delta\vartheta \ \mathrm{in} \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m^2 \cdot K}}$	(nach Schack)
Temperaturdifferenz:	$45\ °\mathrm{C}$-Fall: $\Delta\vartheta = 3\ \mathrm{K}$	
	$60\ °\mathrm{C}$-Fall: $\Delta\vartheta = 7\ \mathrm{K}$	
Wärmeübergangskoeffizient:	$\alpha(3\ \mathrm{K}) = 3{,}77\ \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m^2 \cdot K}}$ und $\alpha(7\ \mathrm{K}) = 4{,}13\ \frac{W}{\mathrm{m^2 \cdot K}}$	
U-Wert:	$\frac{1}{U} = \frac{1}{\alpha_{\mathrm{i}}} + \frac{s_{\mathrm{EPS}}}{\lambda_{\mathrm{EPS}}} + \frac{s_{\mathrm{GK}}}{\lambda_{\mathrm{GK}}} + \frac{1}{\alpha_{\mathrm{a}}}$ $U = 0{,}701 \ldots 0{,}725\ \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m^2 \cdot K}}$	
mit Praxiszuschlag somit:	$\mathrm{ca.}\ 0{,}8\ \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m^2 \cdot K}}$	

Dieser Wert findet in den Simulationsrechnungen Anwendung. Einzelheiten dazu befinden sich im Kapitel 6.

Außerdem wurden, um die umfangreiche mikrobiologische Beprobung zu ermöglichen, **praxisübliche Probenahmestellen** im Versuchsstand installiert, beispielhaft in Abb. 5-14 zu sehen. Im TWW- und TWZ-Netz wurden 10 Stück und im TWK-Netz 8 Stück, sowie in TWW und TWK je ein Biofilm-Monitor eingebaut. Die periodischen Probenahmen und deren mikrobiologische Weiterbearbeitung und Untersuchung sowie die Auswertung erfolgte durch das Institut für Medizinische Mikrobiologie und Hygiene der TU Dresden.

Die insgesamt 36 Zapfstellen, für die Versuche wurden nur die 24 ungemischten (12 Stück TWK und 12 Stück TWW) benutzt, sind **programmgesteuert** und somit in der Lage, definierte Zapfprofile wiederholgenau abzubilden. Den Bedienplatz des TWI-Versuchsstandes zeigt Abb. 5-15.

Das gezapfte Wasser fließt zum jeweiligen Rohrnetz rückwirkungsfrei je Zapfstelle und Wohnung in ein gemeinsames Becken und von dort ins Abwassernetz des Technikums.

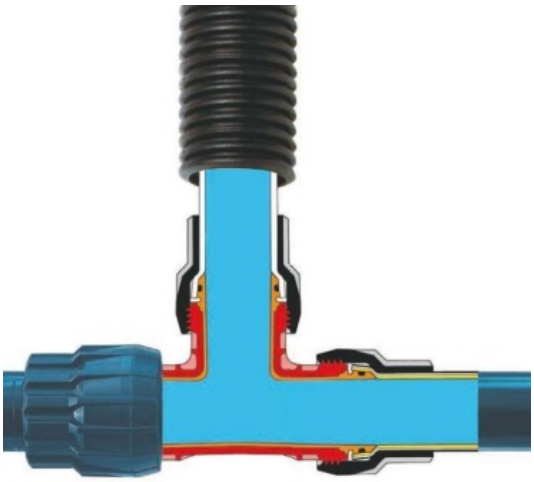


Abb. 5-12 T-Stück, Schnittdarstellung (Bild: JRG)

Abb. 5-13 reversible Trennwand vor dem Einschieben

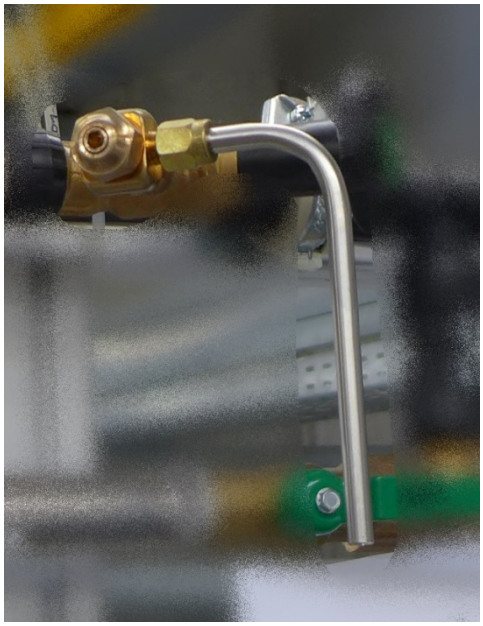


Abb. 5-14 eingebaute Probenahmestelle

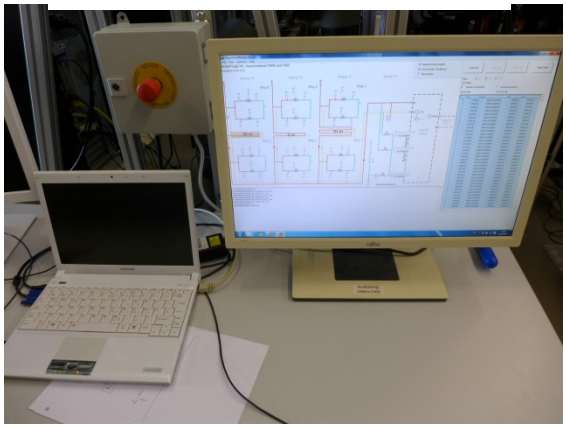


Abb. 5-15 Kontrollmonitor und Anlagenvisualisierung

5.1.3 Entnahmezyklen

5.1.3.1 Trinkwarmwasser

Als Zapfprofile für das TWW wurden EU-reference tapping cycles [EU-r.t.c.] ausgewählt. Die drei ausgewählten Typtage wurden zeitversetzt für je zwei WE verwendet. Sie stellen sehr niedrigen, mittleren und sehr hohen TWW-Verbrauch dar. Umgesetzt wurden die Zapfprofile wie folgt:

Tab. 5-1 Verwendete TWW-Zapfprofile mit Wasserverbrauch bei 60 °C

	Basis	**WE 1**	**WE 2**	**WE 3**	**WE 4**	**WE 5**	**WE 6**
TWW	EU-reference tapping cycle	typ 2 mittel	typ 3 hoch	typ 1 niedrig	typ 2 mittel	typ 3 hoch	typ 1 niedrig
	Verbrauch [Liter]	102	204	37	102	204	37
	Zeitversatz zur Reduzierung der Gleichzeitigkeit [mm:ss]	02:00	04:30	00:00	12:00	14:30	10:00

Somit wurden eine realistische Verteilung der Lasten über das TWW-Netz, eine plausible Gleichzeitigkeit der Zapfungen und schließlich realistische Entnahmedauern und Entnahmevolumina und nicht zuletzt kurzzeitig hohe Fließgeschwindigkeiten in der Verteilleitung und den Steigsträngen erreicht.

In den EU-r.t.c. sind Energie- aber keine Zapfmengen angegeben, die durch die jeweilige Zapfung von TWW verbraucht werden sollen. Abb. 5-16 zeigt einen Ausschnitt.

Explanatory table

The 3 tapping cycles are based on the following assumptions for volumes

Volumes, draw-off times indicated below are indicative and not prescribed

Cold water temperature = 10 °C

type of draw-off	*energy (kWh)*	*volume (litres)*	*Δ T desired(K)*	*draw-off time in minutes at flow rate indicated*			
				3.5 l/min	*5.5 l/min*	*7.5 l/min*	*9 l/min*
small	0,105	3	30	0,9	0,5	0,4	0,3
floor	0,105	3	30	0,9	0,5	0,4	0,3
clean	0,105	2	45	0,6	0,4	0,3	0,2
small dishwash	0,315	6	45	1,7	1,1	0,8	0,7
medium dishwash (cycle 1)	0,420	8	45	2,3	1,5	1,1	0,9
larger dishwash	0,735	14	45	4,0	2,5	1,9	1,6
"large" (in cycle 1)	0,525	15	30	4,3	2,7	2,0	1,7
shower	1,400	40	30	11,4	7,3	5,3	4,4
bath	3,605	103	30	29,4	18,7	13,7	11,4

Abb. 5-16 Ausschnitt Tabelle der EU-r.t.c

Ziel war die tägliche Entnahme der gleichen Wärmemenge im Sinne eines gleich großen Enthalpiestroms (unabhängig von der TWW-Temperatur) aus dem TWW-Netz. Abb. 5-17 zeigt das als Grafiken beispielhaft für die TWW-Temperatur von 60 °C. Dort ist zu erkennen, dass sich so zu bestimmten Zeiten eine maximale Zapfrate von 15 L/min ergibt, und dass maximal zwei Wohnungen gleichzeitig TWW zapfen.

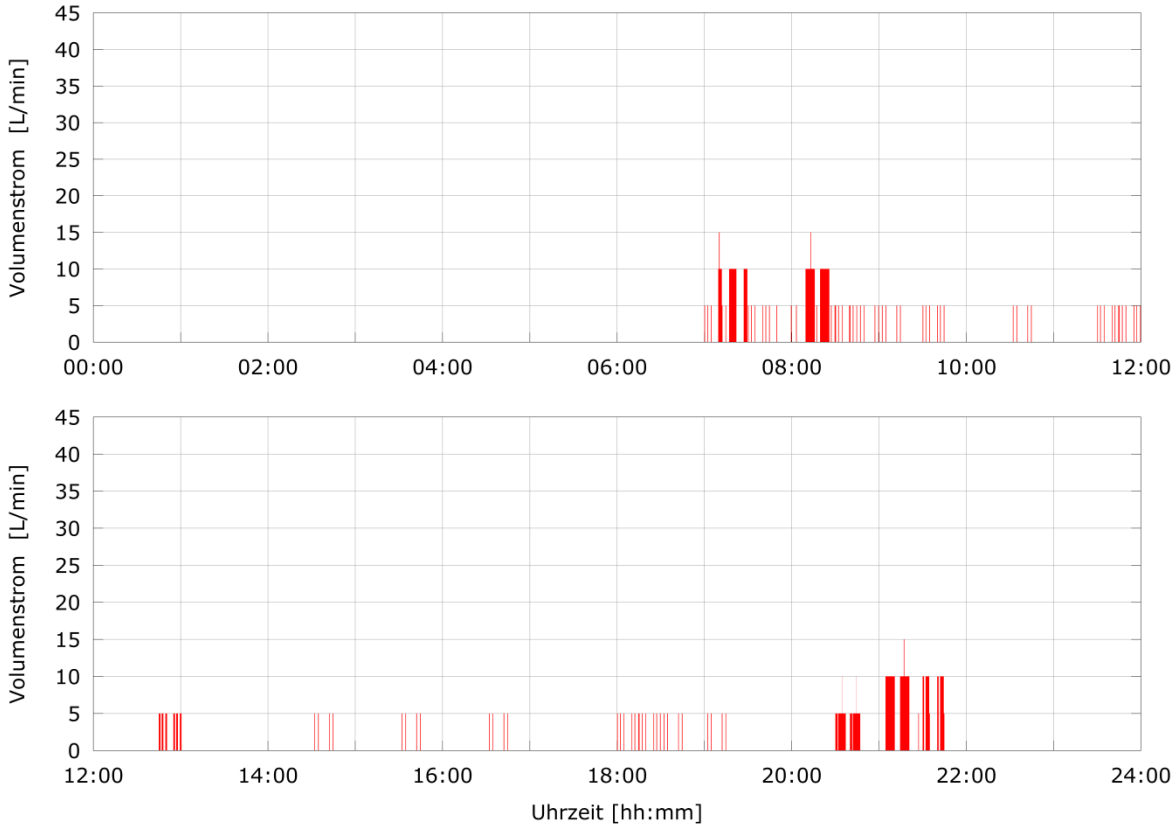


Abb. 5-17 tägliche Zapfungen aller WE, TWW über 24 h bei TWW 60 °C

Bedingt durch die fest eingestellten Zapfraten an den Armaturen von 5 L/min und 10 L/min (vgl. Abschnitt 5.1.2) werden die aus dem System auszuschleusenden Enthalpieströme je nach TWW-Temperatur durch entsprechend angepasste Zapfzeiten realisiert.

Die Zapfzeiten TWW wurden wie folgt berechnet:

$$\tau_{\mathrm{TWW,i}} = \frac{Q_{\mathrm{i}}}{\dot{V}_{\mathrm{i}} \cdot \varrho_{\mathrm{H2O}} \cdot c_{\mathrm{p}} \cdot (\vartheta_{\mathrm{TWW}} - \vartheta_{\mathrm{TWK}})}$$

$\tau_{\mathrm{TWW,i}}$ notwendige Zapfzeit TWW in s

Q_{i} auszuschleusende Energiemenge lt. EU-r.t.c. in W

$\dot{V}_{\mathrm{i}}$ Volumenstrom (Zapfrate), $5\ \mathrm{L/min}$ oder $10\ \mathrm{L/min}$

ϱ_{H2O} mittlere Dichte des Wassers (Stoffwert) in $\mathrm{kg/m^3}$

c_p mittlere spezifische Wärmekapazität des Wassers (Stoffwert) in $\mathrm{J/(kg \cdot K)}$

ϑ_{TWW} Temperatur des TWW $60/55/50/45\,°C$

ϑ_{TWK} Temperatur des TWK $10\,°C$ aus EU-r.t.c.

Die Auswertung der umfangreichen Messdaten hat gezeigt, dass die jeweils eingestellte Temperatur TWW im Speicher sehr genau eingehalten und über den Tag auch konstant vorgehalten werden konnte. Es sind maximale Schwankungen von ± 1 K zu beobachten gewesen.

So ergaben sich folgende tägliche Zapfvolumina TWW und –zeitensummen am TWI-Versuchsstand:

Tab. 5-2 tägliche Zapfvolumina und –zeiten TWW in Abhängigkeit der TWW-Temperatur

bei TWW-Temperatur (in °C)	tägliches Zapfvolumen TWW (in L)	tägliche Gesamtzeit, in der TWW gezapft wurde (in min)
60	686	95,5
55	761	105,8
50	854	118,8
45	974	135,4

5.1.3.2 Trinkwasser (kalt)

Für TWK wurden die Zapfprofile des DVGW-Arbeitsblattes W510/W512 in leicht modifizierter Form angesetzt. Ebenso wie für TWW wurden drei Typtage für je zwei WE unterschiedlichen Verbrauchs entwickelt. Sie stellen sehr niedrigen, normalen und sehr hohen TWW-Verbrauch dar. Umgesetzt wurden die Zapfprofile wie folgt:

Tab. 5-3 Verwendete TWK-Zapfprofile mit Wasserverbrauch

	Basis	**WE 1**	**WE 2**	**WE 3**	**WE 4**	**WE 5**	**WE 6**
TWK	DVGW 510/W512 modifiziert	mittel	hoch	niedrig	mittel	hoch	niedrig
	Verbrauch (in L)	245	586	73	245	586	73
	Zeitversatz zur Reduzierung der Gleichzeitigkeit (in mm:ss)	00:00	02:42	01:14	10:00	12:42	11:14

Somit wurden eine realistische Verteilung der Lasten über das TWW-Netz, eine plausible Gleichzeitigkeit der Zapfungen und schließlich realistische Entnahmedauern und Entnahmevolumina und nicht zuletzt kurzzeitig hohe Fließgeschwindigkeiten in der Verteilleitung und den Steigsträngen erreicht.

In Tab. 5-4 sind für das Zapfprofil TWK folgende tägliche Zapfvolumen und die tägliche Zapfzeitensumme am TWI-Versuchsstand aufgeführt.

Tab. 5-4 tägliche Zapfvolumina und –zeiten TWK in Abhängigkeit der TWK-Temperatur

bei TWK-Temperatur (in °C)	tägliches Zapfvolumen TWK (in L)	tägliche Gesamtzeit, in der TWK gezapft wurde (in min)
10	1808	243

Das TWK wurde direkt aus dem TW-Netz des Technikums entnommen. Die Überwachung der Eintrittstemperatur TWK hat gezeigt, dass die in den Regelwerken angenommene TWK-Temperatur von 10 °C sehr selten anliegt. Vielmehr liegt die jahresdurchschnittliche Temperatur hier bei 16… 17 °C. Siehe hierzu auch Abb. 5-20.

Die Zapftemperatur warmen Wassers aus der Entnahmearmatur ist mit 45 °C festgelegt.

Für das Erreichen dieser geforderten Zapftemperatur ist es notwendig, dem TWW, insofern es eine Temperatur größer 45 °C hat, eine bestimmte Menge TWK zuzumischen.

Das benötigte Äquivalent an TWK bei vorgegebener TWW-Temperatur geht nur als gezapftes Volumen TWK ein und hat keinen Einfluss auf die Energiemenge. Dieses Volumen kommt zum gezapften Volumen TWK aus Abschnitt 5.1.3.2 hinzu.

Die Zapfung TWK, die dem TWW zum Einstellen der Zapftemperatur von 45 °C beigemischt werden musste, beginnt mit der jeweiligen Zapfung TWW und endet nach Erreichen des zur Mischung notwendigen Volumens vor dem Zapfende TWW.

Je höher die Temperatur des TWW im Speicher umso länger sind die Zapfzeiten des TWK zum Beimischen im Sinne des Erreichens der Zapftemperatur von 45 °C. Bei einer TWW-Temperatur im Speicher von 45 °C erfolgt keine Zapfung TWK.

Ohne Berücksichtigung des Einflusses der Temperatur auf die spezifische Wärmekapazität des Wassers (Stoffwerte) lässt sich das Mischungsverhältnis $\frac{m_{\mathrm{TWW}}}{m_{\mathrm{TWK}}}$ zwischen TWW und TWK wie folgt vereinfacht berechnen:

$$\frac{m_{\mathrm{TWW}}}{m_{\mathrm{TWK}}} = \frac{(\vartheta_{\mathrm{Mix}} - \vartheta_{\mathrm{TWK}})}{(\vartheta_{\mathrm{TWW}} - \vartheta_{\mathrm{Mix}})}$$

m_{TWW} Masse des TWW in der Mischung in kg

m_{TWK} Masse des TWK in der Mischung in kg

ϑ_{Mix} Zapftemperatur, Mischung aus TWW und TWK, $45\ °C$

ϑ_{TWW} Temperatur des TWW $60/55/50/45\ °C$

ϑ_{TWK} Temperatur des TWK $10\ °\mathrm{C}$ aus EU-r.t.c.

Ein Beispiel mit TWW-Temperatur 60 °C und TWK-Temperatur 15 °C um die Zapftemperatur von 45 °C zu mischen:

$$\frac{m_{\mathrm{TWW}}}{m_{\mathrm{TWK}}} = \frac{\vartheta_{\mathrm{Mix}} - \vartheta_{\mathrm{TWK}}}{\vartheta_{\mathrm{TWW}} - \vartheta_{\mathrm{Mix}}} = \frac{(45\ °\mathrm{C} - 10\ °\mathrm{C})}{(60\ °\mathrm{C} - 45\ °\mathrm{C})} = \frac{35\ \mathrm{K}}{15\ \mathrm{K}} = \frac{7}{3}$$

Es müssen demnach 7 Masseanteile TWW mit 3 Masseanteilen TWK gemischt werden, um die Zapftemperatur von 45 °C zu erzielen. Bei gleichen Zapfraten von TWW und TWK bedeutet das, dass bei gemeinsamen Zapfbeginn TWK nach knapp der Hälfte der Zeit abgesperrt werden muss. Somit lässt sich dieses Verhältnis auch auf die Zapfzeiten anwenden.

In Analogie zu Abschnitt 5.1.3.1 ergab sich für die Zapfzeit TWK(Mix) dann:

$$\tau_{\mathrm{TWK(Mix),i}} = \tau_{\mathrm{TWW,i}} \cdot \frac{\vartheta_{\mathrm{TWW}} - \vartheta_{\mathrm{Mix}}}{\vartheta_{\mathrm{Mix}} - \vartheta_{\mathrm{TWK}}}$$

$\tau_{\mathrm{TWK(Mix),i}}$ notwendige Zapfzeit TWK in s

$\tau_{\mathrm{TWW,i}}$ notwendige Zapfzeit TWW in s

ϑ_{Mix} Zapftemperatur, Mischung aus TWW und TWK, $45\,°C$

ϑ_{TWW} Temperatur des TWW $60/55/50/45\,°C$

ϑ_{TWK} Temperatur des TWK $10\,°\mathrm{C}$ aus EU-r.t.c.

Somit ergaben sich die in Tab. 5-5 aufgeführten täglichen Zapfvolumina TWK(Mix) und –zeitensummen am TWI-Versuchsstand.

Tab. 5-5 tägliche Zapfvolumina und –zeiten TWK(Mix) in Abhängigkeit der TWW-Temperatur

bei TWW-Temperatur (in °C)	tägliches Zapfvolumen TWK(Mix) zur Herstellung der Zapftemperatur 45 °C (in L)	tägliche Gesamtzeit, in der TWK(Mix) gezapft wurde (in min)
60	294	40,9
55	217	30,2
50	122	17,0
45	0	0,0

5.1.3.3 Überlagerung

TWK und TWK(Mix):

Das Zapfprofil TWK (reine Kaltwasserzapfungen) wurde mit dem Zapfprofil TWK(Mix) vereint und so gefahren. Abb. 5-18 zeigt beispielhaft den Fall bei TWW 60 °C.

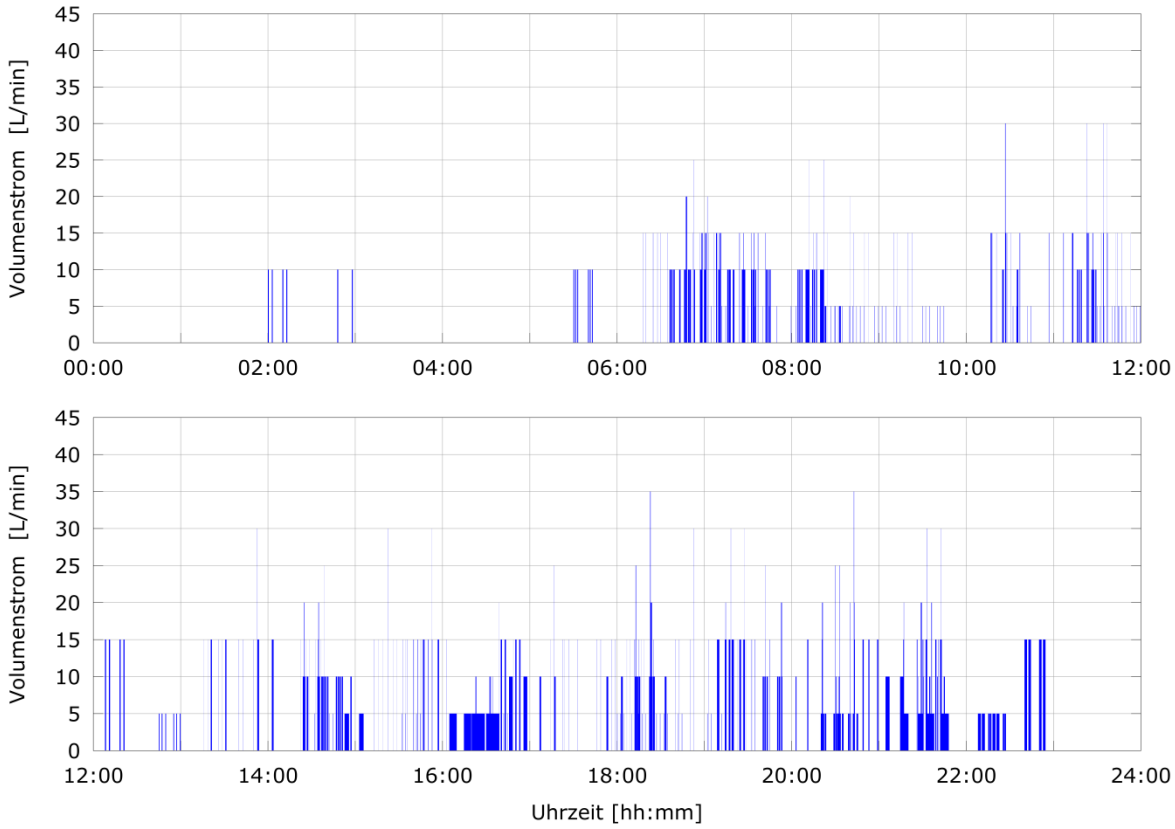


Abb. 5-18 tägliche Zapfungen aller WE, TWK und TWK(Mix) über 24 h bei TWW 60 °C

TWW und TWK mit TWK(Mix):

Schließlich wurden die Zapfprofile der warm- und kaltgängigen Rohrleitungssysteme miteinander vereinigt (Abb. 5-19). Sie liefen also parallel zueinander ab.

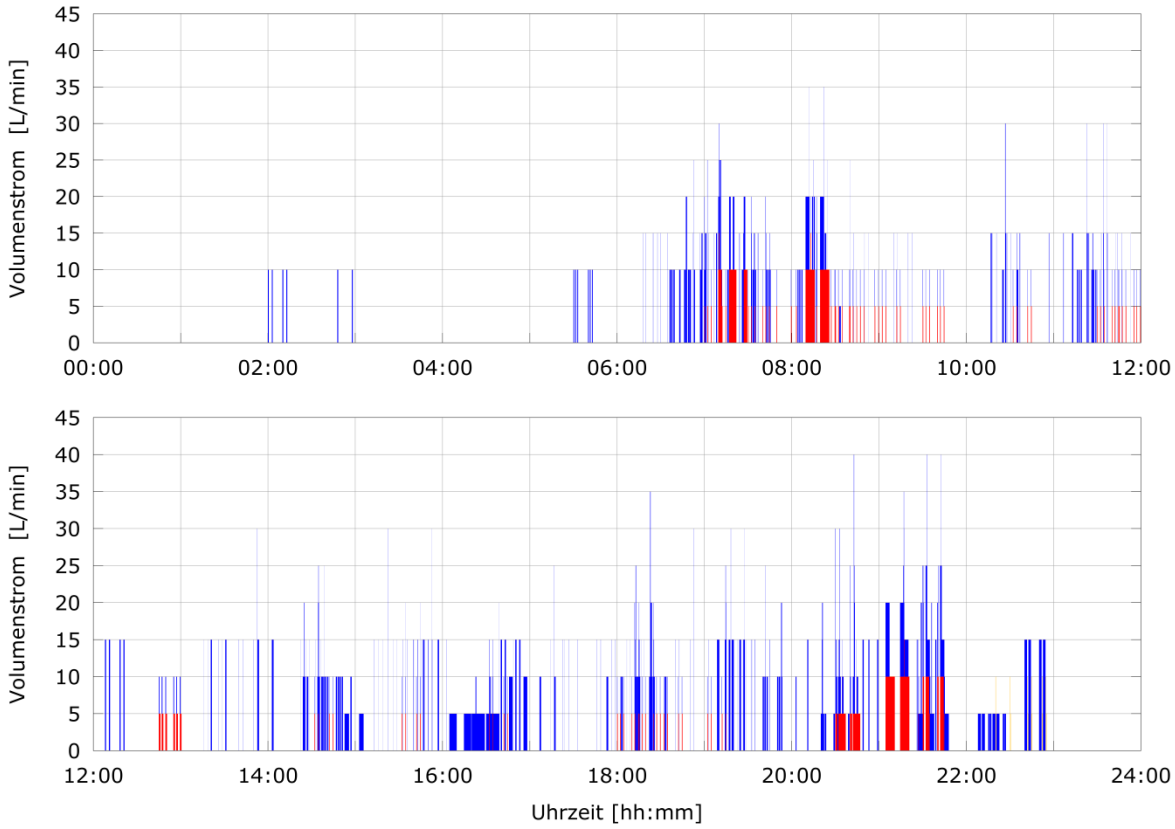


Abb. 5-19 tägliche Zapfungen aller WE, TWW und TWK mit TWK(Mix) über 24 h bei TWW 60 °C

Damit ergaben sich folgende tägliche Zapfvolumina TWW und TWK mit TWK(Mix) und –zeitensummen am TWI-Versuchsstand:

Tab. 5-6 tägliche Zapfvolumina TWW und TWK mit TWK(Mix) und –zeitensummen in Abhängigkeit der TWW-Temperatur

bei TWW-Temperatur (in °C)	gesamtes tägliches Zapfvolumen (in L)	tägliche Gesamtzeit, in der gezapft wurde (in min)
60	2788	379,4
55	2786	379,0
50	2784	378,7
45	2781	378,4

Durch die Überlagerung der drei Zapfprofile ergab sich kurzzeitig in der Zuleitung TW ein Spitzenvolumenstrom von 40 L/min.

5.1.4 Monitoring

Zentraler Untersuchungsgegenstand war der Einfluss der TWW-Temperatur auf die Wasserhygiene ordnungsgemäß nach den allgemein anerkannten Regeln der Technik installierter und hydraulisch abgeglichener TW-Netze.

Demzufolge wurden Versuche gefahren, bei denen die TWW-Temperatur beginnend bei 60 °C in Schritten zu 5 K bis 45 °C abgesenkt wurde. Je Temperaturschritt wurden alle drei Abgleichmethoden und die Variante ohne Zirkulation mit Heizband für je drei Wochen im Dauerversuch nacheinander gefahren und lückenlos messtechnisch erfasst.

Vor Beginn der Versuchsreihe erfolgte eine initiale mikrobiologische Beprobung. Weitere folgten am Ende eines jeden Versuches. Insgesamt wurden durch unseren Projektpartner über 1 000 Proben entnommen und mikrobiologisch untersucht und ausgewertet.

In den gewählten EU-reference tapping cycles für TWW sind Energiemengen angegeben, die durch die jeweilige Zapfung aus dem System „Netz“ entnommen werden sollen. Die geforderte Zapftemperatur (Mix aus TWW und TWK) beträgt 45 °C.

Das Vorstehende zusammenfassend nochmals der Wirkmechanismus: Um diese Temperatur bei den unterschiedlichen TWW-Temperaturen (60, 55, 50, 45 °C) und der von uns angenommenen TWK-Temperatur von 10 °C zu erhalten, müssen unterschiedlich große Mengen TWW mit TWK gemischt werden. Bei TWW von 45 °C erfolgte somit keine Zapfung TWK. Um die erforderliche Energiemenge aus dem System abzuführen, müssen demnach mit fallender TWW-Temperatur immer größer werdende TWW-Mengen gezapft werden.

Bei über alle Versuche fest eingestellten Volumenströmen TWW und TWK von jeweils 5 L/min und 10 L/min (diese stehen stellvertretend für kleine und große Zapfraten) bleibt somit nur die Variation der jeweiligen Zapfzeiten. Die gemäß der gewählten EU-r.t.c. zu verbrauchende Energiemenge wurde allein durch die errechnete Zapfzeit für TWW generiert. Parallel zur Zapfung TWW beginnt die Zapfung TWK und endet entsprechend früher, sobald die zur Herstellung der Mix-Temperatur von 45 °C erforderliche Menge TWK gezapft wurde.

Die TWK-Temperatur konnte während der Versuche nicht auf normgerechten 10 °C gehalten werden. Wie unsere Langzeitmessungen über ein Jahr zeigten, ist eine mittlere TWK-Temperatur am Gebäudeeintritt von 16… 17 °C realistisch (vgl. hierzu Abb. 5-20). In der Tendenz wurde also in den Versuchen (10 °C angenommen) gegenüber der Realität (16… 17 °C gemessen) zu wenig TWK gezapft, um die Mix-Temperatur von 45 °C zu erzielen.

Ziel:

Der Betrieb des TWI-Versuchsstandes diente thermohydraulischen Untersuchungen des Zirkulations- und Entnahmefalles durch Aufprägen von verschiedenen Entnahmeprofilen auf die Netze sowie durch Variation installationstechnischer Details, wie dem Einsatz von unterschiedlichen Armaturen und Methoden zum hydraulischen Abgleich oder dem Betrieb der elektrischen Begleitheizung anstatt eines Zirkulationssystems.

Ein Teil der Untersuchungen widmete sich den thermischen Wechselwirkungen zwischen warm- und kaltgehendem Rohrnetz im Schacht, wobei im Wesentlichen die Einbausituationen mit Trennwand betrachtet wurden.

Zur Beurteilung der jeweiligen Gesamtsituation und der auftretenden thermischen Effekte, hauptsächlich konvektiver Natur, eignen sich Rasterdiagramme besonders gut, die aus den Daten der DTS-Messungen generiert wurden. Hier stellt sich engmaschig und in hinreichender Genauigkeit die thermische Situation entlang der Rohrleitungen der Netze zeitlich sehr fein aufgelöst dar.

Randbedingung:

Den beiden Umständen geschuldet, dass sowohl die Eintrittstemperatur des TWK nicht auf den normgerechten 10 °C gehalten werden konnte als auch die Umgebungstemperatur des Technikums jahreszeitlich schwankte und so Einfluss auf die jeweiligen Schachttemperaturen der warm- und kaltgängigen Netze hatte, wurden immer Situationen messtechnisch erfasst, die in gewissen Randparametern variieren. Trotzdem stellten sie eine wertvolle Datenmenge dar, die der im Abschnitt 6.3 beschriebenen Simulation des TWI-Versuchsstandes als Validierung und Beurteilung der Simulationsergebnisse dienen, wenn dort diese Randbedingungen genau so eingestellt sind. Stimmen die Werte der Messungen und Simulationen hinreichend genau für viele Momentaufnahmen verschiedener Randbedingungen überein, so ist davon auszugehen, dass die Simulationsergebnisse mit in einer gewissen sinnvollen Bandbreite beliebig eingestellten Randbedingungen auch valide sind. Der Versuchsstand dient somit auch der Justierung des Simulationsmodells.

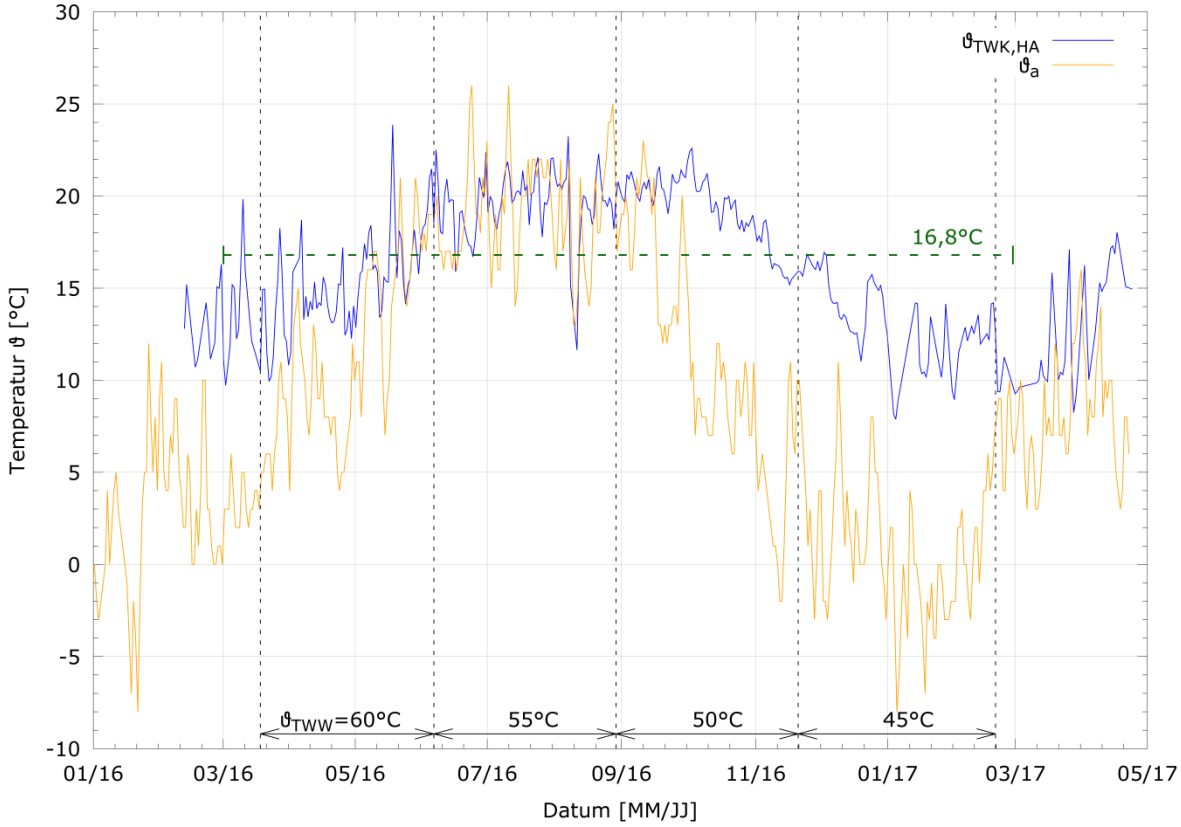
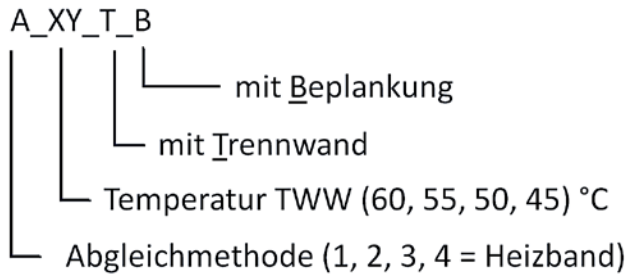


Abb. 5-20 jahreszeitlicher Verlauf von Außentemperatur und TWK-Temperatur am Gebäudeeintritt

5.2 Versuchsmatrix

Um die durchgeführten Versuche eindeutig zu beschreiben, wurde eine Versuchsmatrix erarbeitet, die es anhand eines Kürzels erlaubt, den Versuch zu identifizieren und Datenmaterial eindeutig zuzuordnen.

Es wurde folgender Index vereinbart:



A – Abgleichmethoden:

- 1: Betrieb mit Zirkulation, manueller hydraulischer Abgleich (statisch zu 1,5 L/min je Strang)
- 2: Betrieb mit Zirkulation, thermohydraulischer Abgleich mittels eines elektronischen Zirkulationsregelsystems mit Hilfsenergie (thermoelektrisch, dynamisch)
- 3: Betrieb mit Zirkulation, thermohydraulische Abgleich mittels für die jeweilige TWW-Temperatur geeigneten selbsttätigen Abgleichventils ohne Hilfsenergie (thermomechanisch, dynamisch)
- 4: Betrieb ohne Zirkulation, Heizband in Betrieb

XY – TWW-Temperatur am Austritt des Trinkwassererwärmers:

- 60 °C
- 55 °C
- 50 °C
- 45 °C

T – Trennwand:

- T: mit eingeschobener Trennwand
- oT: ohne eingeschobener Trennwand (nur zu Inbetriebnahmezwecken)

B – äußere Beplankung des Versuchsstandes:

- B: mit Beplankung und
- oB: ohne Beplankung (nur zu Test- und Inbetriebnahmezwecken)

Zu Beginn wurden zu Test- und Inbetriebnahmezwecken auch Versuche ohne Beplankung und ohne Trennwand durchgeführt, messtechnisch erfasst und dokumentiert.

Für die Untersuchung hinsichtlich der Trinkwasserhygiene und Energieeffizienz waren aber nur die Versuche von Bedeutung, die mit Beplankung (B) und mit isolierter Trennwand (T) durchgeführt wurden.

Somit ergab sich folgender Versuchsplan für den Betrieb der Anlage:

Tab. 5-7 Versuchsplan TWI-Versuchsstand

Index	Zeitraum der Versuchsfahrt
2_60_T_B	18.03.2016 – 04.04.2016
4_60_T_B	08.04.2016 – 25.04.2016
3_60_T_B	27.04.2016 – 17.05.2016
1_60_T_B	19.05.2016 – 06.06.2016
2_55_T_B	08.06.2016 – 27.06.2016
1_55_T_B	01.07.2016 – 18.07.2016
3_55_T_B	19.07.2016 – 08.08.2016
4_55_T_B	11.08.2016 – 29.08.2016
1_50_T_B	30.08.2016 – 15.09.2016
2_50_T_B	19.09.2016 – 10.10.2016
3_50_T_B	11.10.2016 – 01.11.2016
4_50_T_B	02.11.2016 – 21.11.2016
1_45_T_B	22.11.2016 – 14.12.2016
3_45_T_B	15.12.2016 – 09.01.2017
2_45_T_B	09.01.2017 – 30.01.2017
4_45_T_B	31.01.2017 – 20.02.2017

Zur Beurteilung der Trinkwasserhygiene erfolgten Entnahmen von Wasserproben und deren Untersuchung auf Legionellen und Pseudomonaden. Hierfür wurde der kulturelle Ansatz (siehe Abschnitt 2.4.1) teilweise erweitert (Legionellen: Inkubationstemperatur 30 °C, zusätzlicher Nährboden MWY) sowie der DNA-Nachweis mittels *Legionella* spp.-spezifischen qPCR (erfasst alle, auch schwer kultivierbare *Legionella* Arten) angewandt. Die Proben wurden außerdem stichprobenartig mittels *L. pneumophila*-spezifischer qPCR untersucht (siehe Abschnitt 2.4.2). Der Versuchsstand wurde über einen Zeitraum von 15 Monaten im dreiwöchigen Abstand beprobt. Die Probenahme erfolgte analog dem entwickelten Probenahmeprotokoll für die Objekte im Rahmen von AP II (siehe Abschnitt 2.3, Abb. 2-2).

5.3 Ergebnisse thermohydraulische Auswertung

5.3.1 Temperaturen TWW

Auswertung der Messdaten über Rasterdiagramm:

örtlicher und zeitlicher Temperaturverlauf: TWW, 28.05.2016, 00:00 bis 23:59 Uhr:

Abb. 5-21 zeigt die Temperaturen des TWW-Netzes am 28.05.2016. Das im TWW-Speicher bereitgestellte TWW hat am Speicheraustritt eine Temperatur von 60 °C. Zu-

nächst fällt auf, dass sich bei diesem Versuch die gemessenen TWW-Temperaturen (äußere Rohroberfläche) fast überall und zeitlich überwiegend, auch zu Zeiten ausgedehnter Zapfpausen zwischen 02:00 Uhr und 05:50 Uhr, im Bereich von 56… 59 °C befinden. Das ist ein Zeichen dafür, dass das Netz ordnungsgemäß abgeglichen und die Zirkulation mit hinreichendem Volumenstrom in Betrieb war.

So ließen sich eventuelle Mängel im hydraulischen Abgleich leicht identifizieren.

Es wird also durch den Betrieb der Zirkulation ständig Wärme in das TWW-Netz nachgeschoben, weshalb Zonen übermäßiger Abkühlung im Bild nicht zu sehen sind. Niedrigere Umgebungstemperaturen als TWW vorausgesetzt (hier waren das 26 °C), bildet sich ein Wärmestrom vom TWW über das Rohr und die Dämmung weiter über die TWW-Schachtluft, die wärmegedämmte Trennwand und die TWK- Schachtluft an die Dämmung und das Rohr TWK an das TWK, der zu einer Erwärmung des TWK führt.

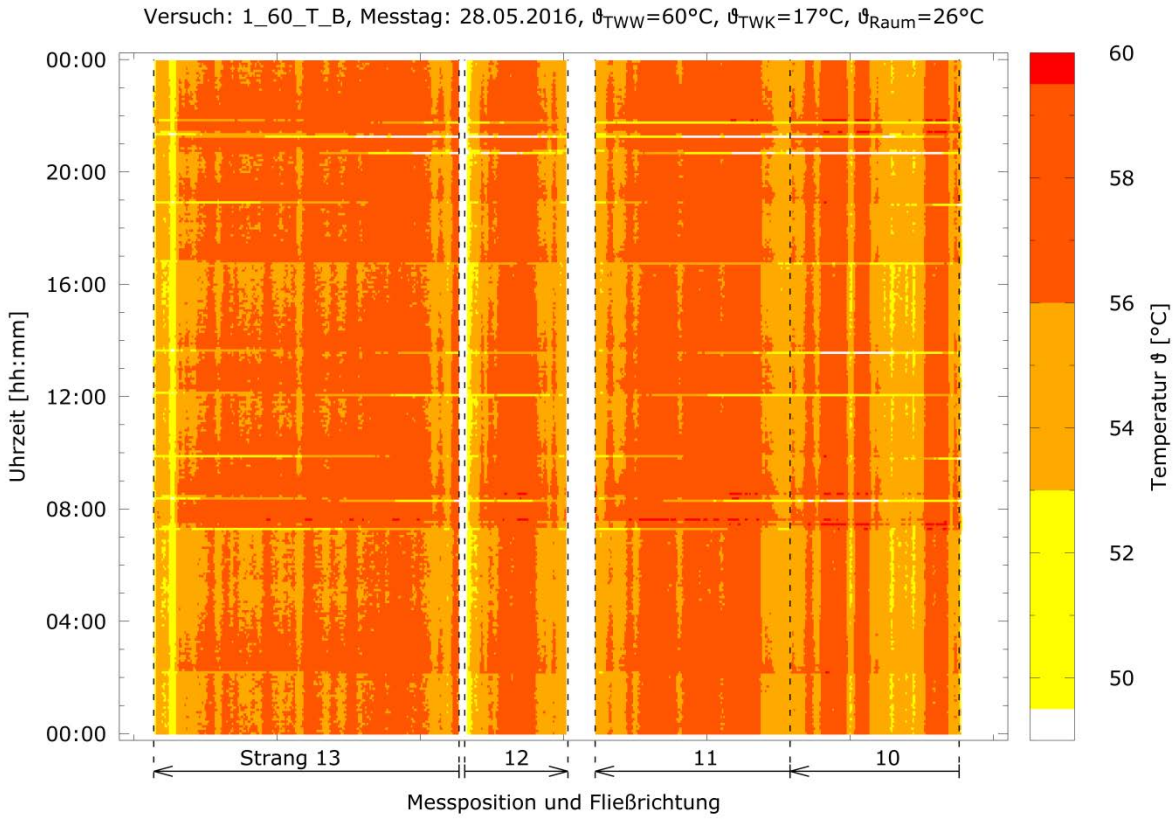


Abb. 5-21 Rasterdiagramm der Temperaturen des TWW-Netzes über 24 h, 28.05.2016

5.3.2 Temperaturen TWZ

Auswertung der Messdaten über Rasterdiagramm:

<u>örtlicher und zeitlicher Temperaturverlauf: TWZ, 28.05.2016, 00:00 bis 23:59 Uhr:</u>

Abb. 5-22 zeigt die Temperaturen des TWZ-Netzes am 28.05.2016. Auch im gesamten TWZ-Netz kann ein gleichmäßiges Temperaturbild festgestellt werden. Der Zirkulationsabgleich funktionierte also wie gewünscht.

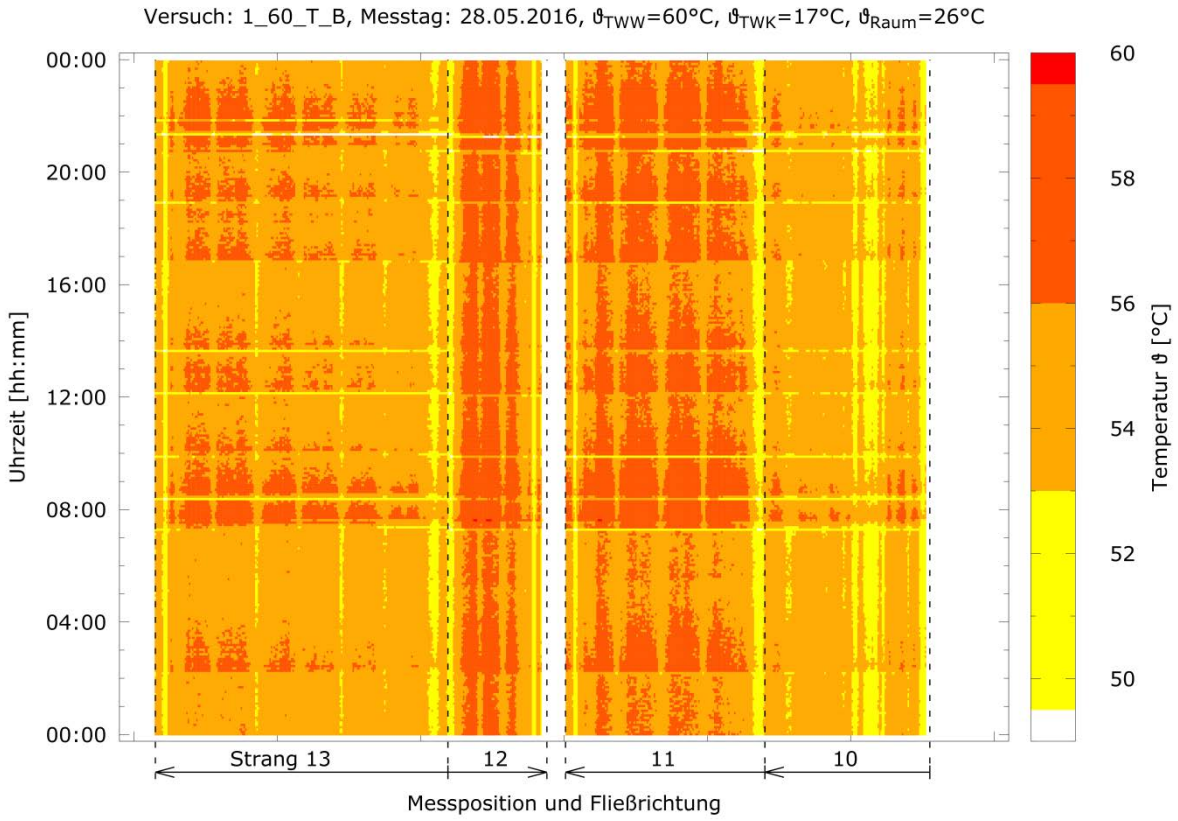


Abb. 5-22 Rasterdiagramm der Temperaturen des TWZ-Netzes über 24 h, 28.05.2016

5.3.3 Temperaturen TW (kalt)

Auswertung der Messdaten über Rasterdiagramm:

<u>örtlicher und zeitlicher Temperaturverlauf: TWK, 28.05.2016, 00:00 bis 23:59 Uhr:</u>

In Abb. 5-23 ist im Strang 13 zwischen 02:00 Uhr und 05:50 Uhr zu sehen (ein Zeitraum, in dem keine Zapfung TWK stattfand), dass die TWK-Temperatur dort über diese Zeit und über den gesamten Abschnitt zwischen 25… 30 °C und zum Teil darüber liegt. TWK trat an diesem Tag mit etwa 17 °C in das Gebäude ein. Bedingt durch die Umgebungstemperatur und die Temperatur des in diesem Abschnitt korrespondierenden TWW-Netzes von etwa 56… 58 °C erfolgte in dieser Zapfpause von TWK eine deutliche Erwärmung des TWK. Erst mit wiedereinsetzenden Zapfungen des TWK ab 05:50 Uhr kühlte sich das TWK wieder in den Bereich 20… 25 °C ab und erreicht erst ab 08:00 Uhr (Beginn häufiger Zapfungen) Temperaturen unterhalb 20 °C.

In Strang 11 und 12 sind diese Effekte auch zu erkennen, jedoch sind sie nicht so deutlich ausgeprägt. Gründe dafür sind zum einen, dass diese beiden Stränge deutlich kürzer sind als Strang 13 und damit auch die Verweilzeiten bei Zapfung des TWK im Rohr kürzer waren. Zum anderen findet in den Strängen 11 und 12 gegen 02:00 Uhr eine Zapfung statt, so dass die Zapfpause deutlich kürzer ausfällt.

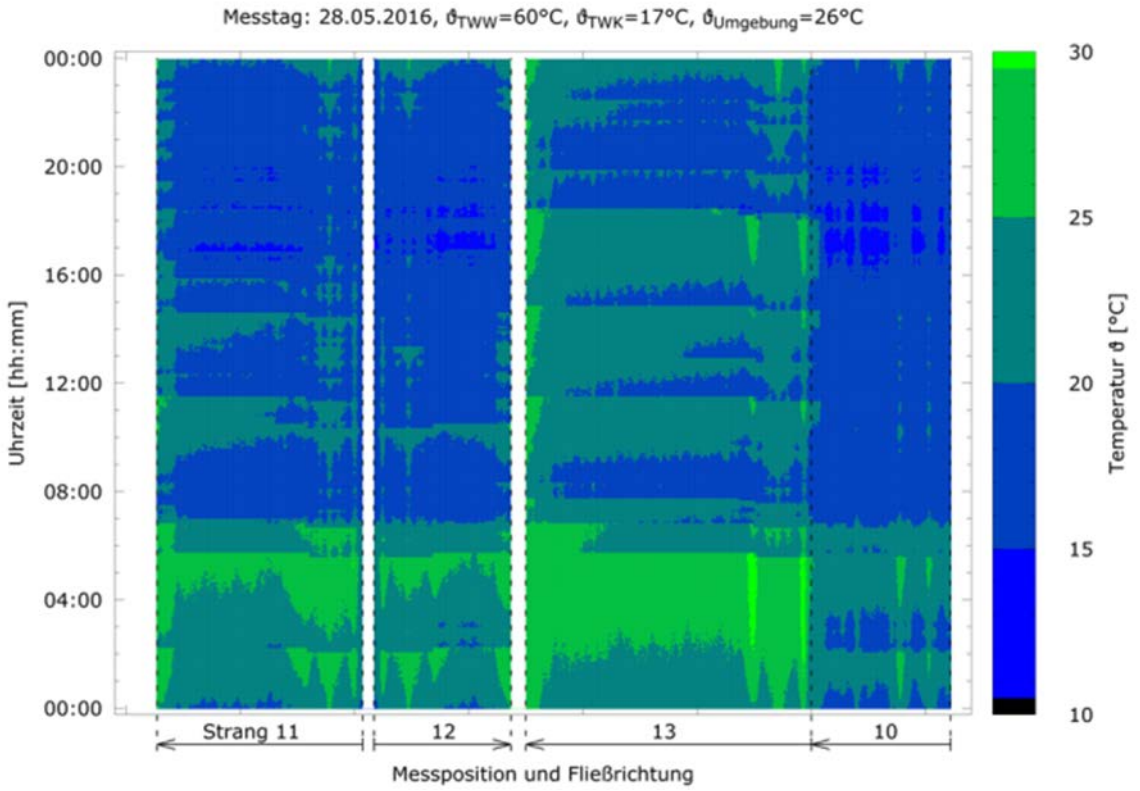


Abb. 5-23 Rasterdiagramm der Temperaturen des TWK-Netzes über 24 h, 28.05.2016

5.3.4 Energiebilanzen

Die energetische Bilanzierung des TWI-Versuchsstandes erfolgt anhand des TWW-Speichers. Die Wärmeverluste des Speichers selbst werden im Vergleich zum Energiebedarf des Versuchsstandes als sehr klein eingestuft und bleiben daher unberücksichtigt. In Abb. 5-24 ist der Bilanzkreis schematisch dargestellt. Den eintretenden Stoffströmen des TWZ und des TWK wird ein Wärmestrom $\dot{Q}_{Zu}$ zugeführt, so dass der Stoffstrom des TWW bei TWW-Temperatur aus dem Speicher austritt.

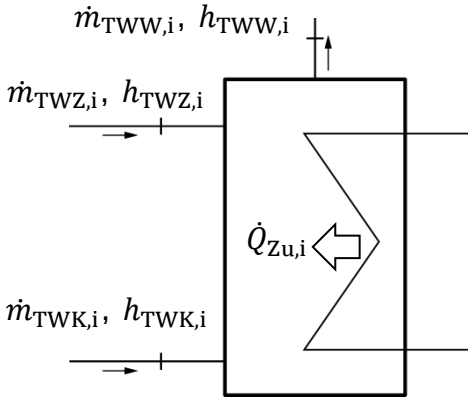


Abb. 5-24 Schematische Darstellung des Bilanzkreises zur energetischen Bilanzierung des TWI-Versuchsstandes

$\dot{m}_{\mathrm{TWW,i}}$ Massestrom des TWW zum Zeitschritt i

$\dot{m}_{\mathrm{TWZ,i}}$ Massestrom des TWZ zum Zeitschritt i

$\dot{m}_{\mathrm{TWK,i}}$ Massestrom des TWK zum Zeitschritt i

$h_{\mathrm{TWW,i}}$ spezifische Enthalpie des TWW zum Zeitschritt i als $h\left(p_{\mathrm{TWW,i}}, \vartheta_{\mathrm{TWW,i}}\right)$

$h_{\mathrm{TWZ,i}}$ spezifische Enthalpie des TWZ zum Zeitschritt i als $h\left(p_{\mathrm{TWZ,i}}, \vartheta_{\mathrm{TWZ,i}}\right)$

$h_{\mathrm{TWK,i}}$ spezifische Enthalpie des TWK zum Zeitschritt i als $h\left(p_{\mathrm{TWK,i}}, \vartheta_{\mathrm{TWK,i}}\right)$

$\dot{Q}_{\mathrm{Zu,i}}$ zugeführter Wärmestrom zum Zeitschritt i

Dies kann zunächst mit den Bilanzen der Massesträme (Gl. (5.1)) und der Enthalpieströme (Gl. (5.2)) beschrieben werden:

$$0 = -\dot{m}_{\mathrm{TWW,i}} + \dot{m}_{\mathrm{TWZ,i}} + \dot{m}_{\mathrm{TWK,i}} \tag{5.1}$$

$$0 = -\dot{H}_{\mathrm{TWW,i}} + \dot{H}_{\mathrm{TWZ,i}} + \dot{H}_{\mathrm{TWK,i}} + \dot{Q}_{\mathrm{Zu,i}} \tag{5.2}$$

Das Einsetzen von Gleichung (5.1) bringt die Enthalpiebilanz in die nachfolgende Form (Gl. (5.4)). Durch Umstellen wird ersichtlich, dass zwei Wärmeströme berechnet werden können, Wärmestrom $\dot{Q}_{\mathrm{TWZ,i}}$ zur Erwärmung des TWZ-Stoffstroms auf TWW-Temperatur und Wärmestrom $\dot{Q}_{\mathrm{TWK,i}}$ zur Erwärmung des TWK-Stoffstroms auf TWW-Temperatur (siehe Gl. (5.4)).

$$\dot{Q}_{\mathrm{Zu,i}} = \left(\dot{m}_{\mathrm{TWZ,i}} + \dot{m}_{\mathrm{TWK,i}}\right) \cdot h_{\mathrm{TWW,i}} - \dot{m}_{\mathrm{TWZ,i}} \cdot h_{\mathrm{TWZ,i}} - \dot{m}_{\mathrm{TWK,i}} \cdot h_{\mathrm{TWK,i}} \tag{5.3}$$

$$\dot{Q}_{\mathrm{Zu,i}} = \dot{m}_{\mathrm{TWK,i}} \cdot \left(h_{\mathrm{TWW,i}} - h_{\mathrm{TWK,i}}\right) + \dot{m}_{\mathrm{TWZ,i}} \cdot \left(h_{\mathrm{TWW,i}} - h_{\mathrm{TWZ,i}}\right) \tag{5.4}$$

$$\dot{Q}_{\mathrm{Zu,i}} = \dot{Q}_{\mathrm{TWK,i}} + \dot{Q}_{\mathrm{TWZ,i}}$$

Das Bilden einer Tagessumme mit Gleichung (5.5) führt zu Tagesenergieverbräuchen, die wiederum für zirkulierendes (Q_{TWZ}) und für nachgespeistes Trinkwasser (Q_{TWK}) getrennt berechnet werden.

$$Q = \sum_{i=1}^{n} \dot{Q}_{\mathrm{i}} \cdot \Delta\tau_{\mathrm{i}} \tag{5.5}$$

Die Ergebnisse aller durchgeführten Technikumsversuche mit Zirkulationsabgleich sind in Abb. 5-25 graphisch aufbereitet.

Auf der Grundlage der entwickelten Entnahmeprofile (siehe Abschnitt 5.1.3), welche unabhängig von der eingestellten TWW-Temperatur eine gleichbleibende Wärmemenge vorgeben, stellen sich theoretisch konstante Energieverbräuche für die Entnahme Q_{TWK} ein. Die Basis dieser Entnahmeprofile stellt jedoch eine konstante TWK-Temperatur von $\vartheta_{\mathrm{TWK,HA}} = 10\,°\mathrm{C}$ dar. Wie in Abschnitt 5.1.4 gezeigt, spiegelt diese nicht die Realität am Versuchsstand wieder. Das bedeutet, je höher die TWK-Temperatur am Hausanschluss, umso weniger Energie Q_{TWK} muss dem Trinkwasser bis zum Erreichen der TWW-Temperatur zugeführt werden.

Um die Einzelversuche dennoch energetisch miteinander vergleichen zu können, wird der Versuch einer Normierung unternommen. Unter Verwendung der minimal aufgetretenen TWK-Temperatur $\vartheta_{\mathrm{TWK,HA,min}} = \vartheta_{\mathrm{TWK,min}}$ wird für jeden Einzelversuch die Energie $Q_{\mathrm{TWK,min}}$ ermittelt, die erforderlich gewesen wäre, um die Differenz zur tatsächlich gemessenen TWK-Temperatur $\vartheta_{\mathrm{TWK,HA}}$ zu erbringen (grüner Balken in Abb. 5-25, siehe Gl. (5.6)):

$$\dot{Q}_{\mathrm{TWK,min,i}} = \dot{m}_{\mathrm{TWK,i}} \cdot \left(h_{\mathrm{TWK,i}} - h_{\mathrm{TWK,min}}\right) \tag{5.6}$$

Danach werden die Energieverbräuche durch Zirkulation Q_{TWZ} in die Darstellung übernommen.

Bei sinkender TWW-Temperatur stellt sich ein leicht reduzierter Gesamtenergiebedarf ein. Diese Einsparung resultiert aus den dadurch verminderten Zirkulationswärmeverlusten. Aufgrund der darüber hinaus schwankenden Raumtemperatur um den Versuchsstand wird für die konkrete Bezifferung der Energieeinsparung allerdings auf die Erkenntnisse der Simulation im nachfolgenden Abschnitt verwiesen.

Untereinander zeigen die drei Abgleichtechnologien keine interpretierbaren Abweichungen.

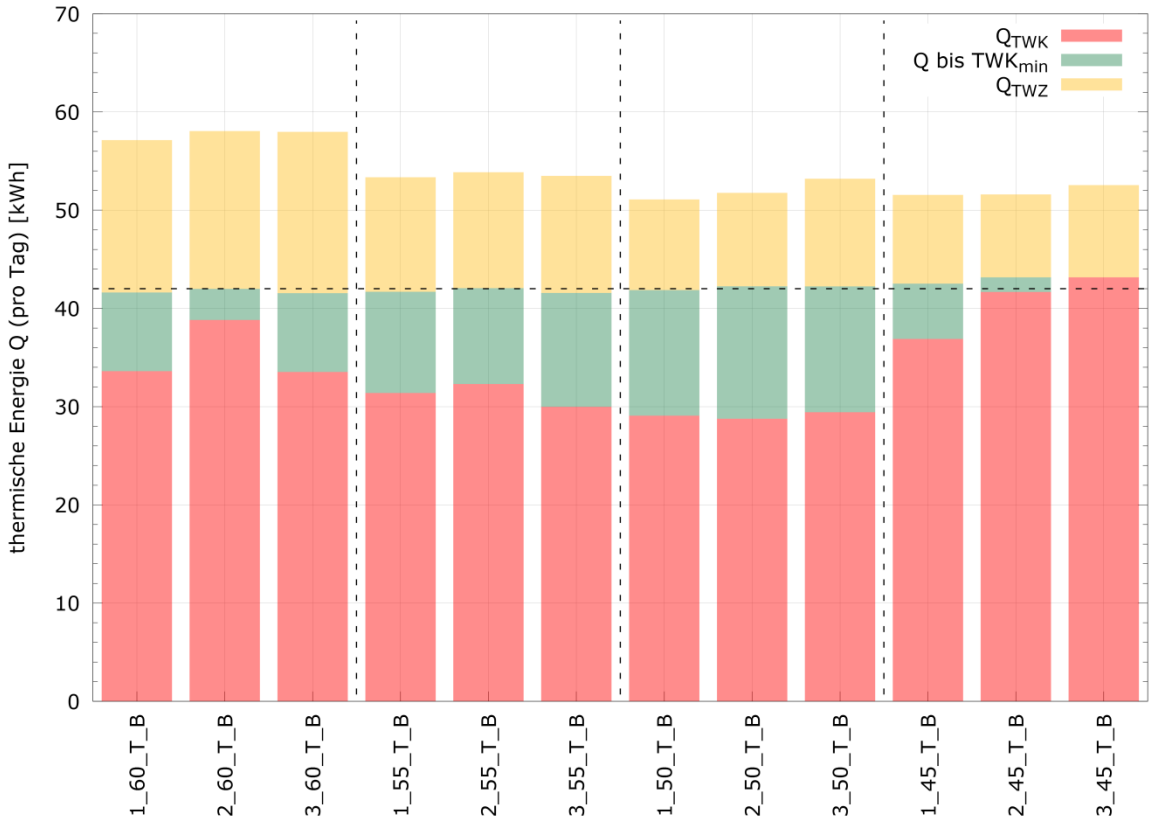


Abb. 5-25 Tagesenergieverbrauch aller durchgeführten Technikumsversuche mit Zirkulationsabgleich

5.4 Ergebnisse Trinkwasserhygiene

5.4.1 Ausgangssituation

Unter diesen o.g. realitätsnahen Bedingungen der Dauerversuche ging es gleichermaßen um den Nachweis der Einhaltung der Hygieneanforderungen. Am TWI-Versuchstand konnten jedoch nicht alle relevanten Einflussparameter wie z. B. Außenlufttemperatur, Raumtemperatur und Temperatur des Trinkwassers (kalt) im Tages-und Jahresgang konstant gehalten werden. Gleiches galt natürlich für die mikrobiologische Charakteristik des Trinkwassers am Eintritt der Versuchsanlage.

Die periodischen Probenahmen und deren mikrobiologische Untersuchung sowie die Auswertung erfolgte durch das IMMH. Es war im Vorfeld bekannt, dass sich die Spezies *Legionella anisa*, also eine non-pneumophila-Spezies, im Trinkwassernetz des ZET befindet. Das Ansiedeln dieser Spezies in der Anlage war gewünscht.

5.4.2 Einfluss der Außen- und Umgebungstemperatur um den Technikums-Versuchsstand auf die Legionellenkonzentration in der Zentrale (*Legionella* spp. qPCR)

Die gemessenen Temperaturen in den Proben des TWK-Zulaufes, die in den Sommermonaten entnommen wurden, zeigten deutlich höhere Werte im Vergleich zu den Temperaturen der Proben, die im Winter oder Frühjahr entnommen wurden. Dieser saisonale Temperaturverlauf spiegelte sich aber nicht in den Legionellenkonzentrationen (*Legionella* spp.-qPCR) der Proben wieder. Die qPCR-Werte bewegten sich konstant im Bereich von 10^4 GU/500 mL über den gesamten Untersuchungsraum (Abb. 5-26).

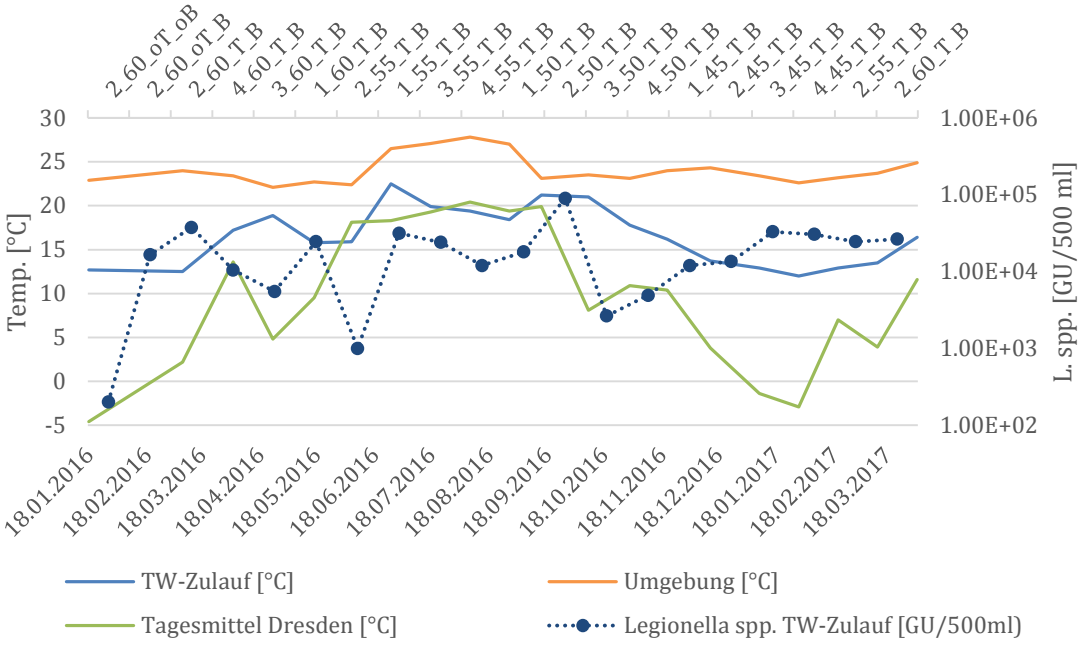


Abb. 5-26 Verlauf der Außen- und Umgebungstemperatur sowie der Temperatur und Legionellenkonzentration (*Legionella* spp. qPCR) im TWK-Zulauf in den TWE über den gesamten Untersuchungszeitraum

Daher konnte kein Zusammenhang zwischen der Außen- und Umgebungstemperatur und somit der TW-Zulauftemperatur und dem DNA-Nachweis im TWK-Zulauf festgestellt werden. Eine Korrelation zwischen der Außen- und Umgebungstemperatur und dem DNA-Nachweis im Speicherausstritt sowie Zirkulationsrücklauf in den TWE konnte ebenfalls nicht gefunden werden (Abb. 5-27).

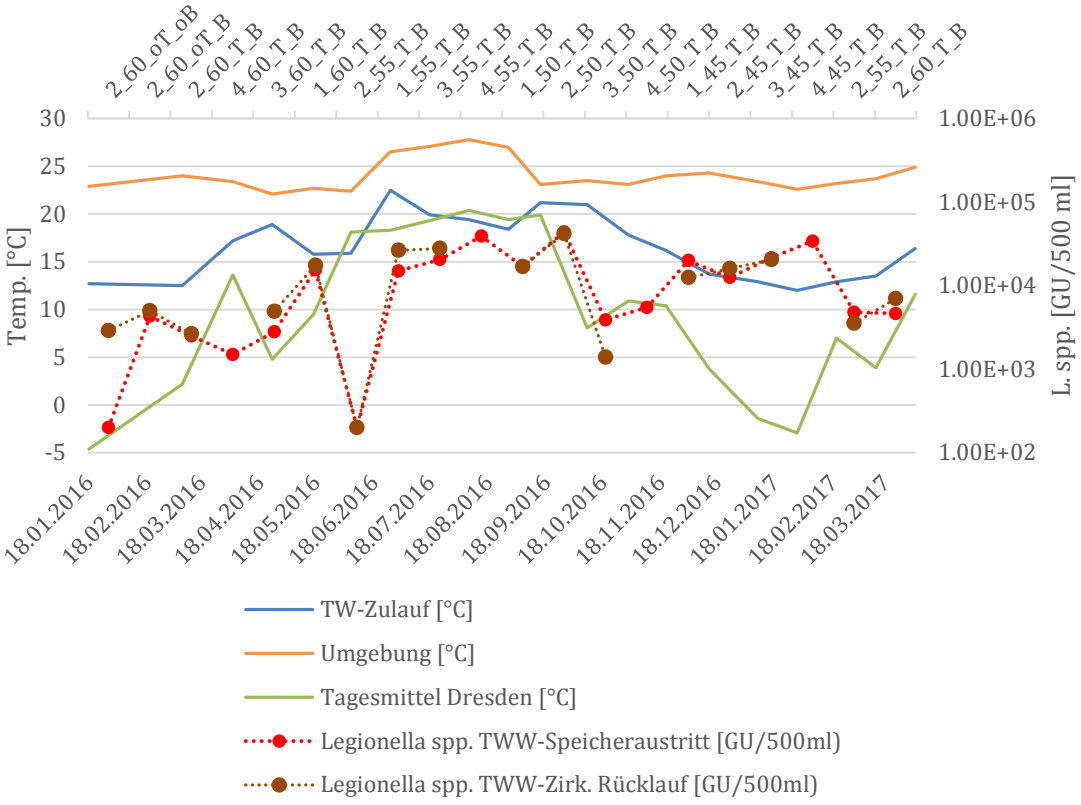


Abb. 5-27 Verlauf der Außen- und Umgebungstemperatur sowie der Legionellenkonzentration (*Legionella* spp. qPCR) im TWW-Speicherausstritt und TWW-Zirkulationsrücklauf in den TWE über den gesamten Untersuchungszeitraum

5.4.3 Einfluss der TWE-Temperatur auf die Legionellenkonzentration in der Zentrale (*Legionella* spp. qPCR)

Es fällt auf, dass die Legionellenkonzentrationen (qPCR-Werte) im TWE-Austritt und TWW-Zirkulationsrücklauf nur geringe Unterschiede aufwiesen und daher einer gemeinsamen Kurve über den gesamten Zeitraum folgten (Abb. 5-27, Abb. 5-28). Die Werte des TWK-Zulaufes in den TWE unterschieden sich von denen des TWW-Systems geringfügig (Abb. 5-28). Man erkennt, dass der DNA Eintrag von *Legionella* spp. durch den TWK-Zulauf in den Speicher im gesamten TWW-System ohne nennenswerte Reduzierung wieder zu finden war. Die Ausnahme stellten allerdings die TWE-Temperaturen von $\vartheta_{TWW,TWE}$ = 55 – 60 °C dar. Hier ist eine Verringerung der durch den TWK-Zulauf eingebrachten Legionellenkonzentration durch den TWE zu erkennen (Abb. 5-28). Die Temperatur von $\vartheta_{TWW,TWE}$ = 60 °C reduzierte dabei den Legionelleneintrag in den Speicher bis zu 1 Log_{10}-Stufe. Dies deutet darauf hin, dass bei hohen Temperaturen ($\vartheta_{TWW,TWE}$ ≥ 55 °C)

der TWE als Barriere zwischen dem TWK-Zulauf und dem TWW-System fungierte. Bei abnehmender TWE-Temperatur glichen sich die Legionellenkonzentrationen des TWK-Zulaufs und des TWE-Austritt an. Bei niedrigen Temperaturen ($\vartheta_{TWW,TWE}$ = 45 °C und 50 °C) waren die Werte im TWE teilweise höher als im Zulauf oder in der Zirkulation, wodurch der TWE die Funktion eines Vermehrungsinkubators zu übernehmen scheint (Abb. 5-28).

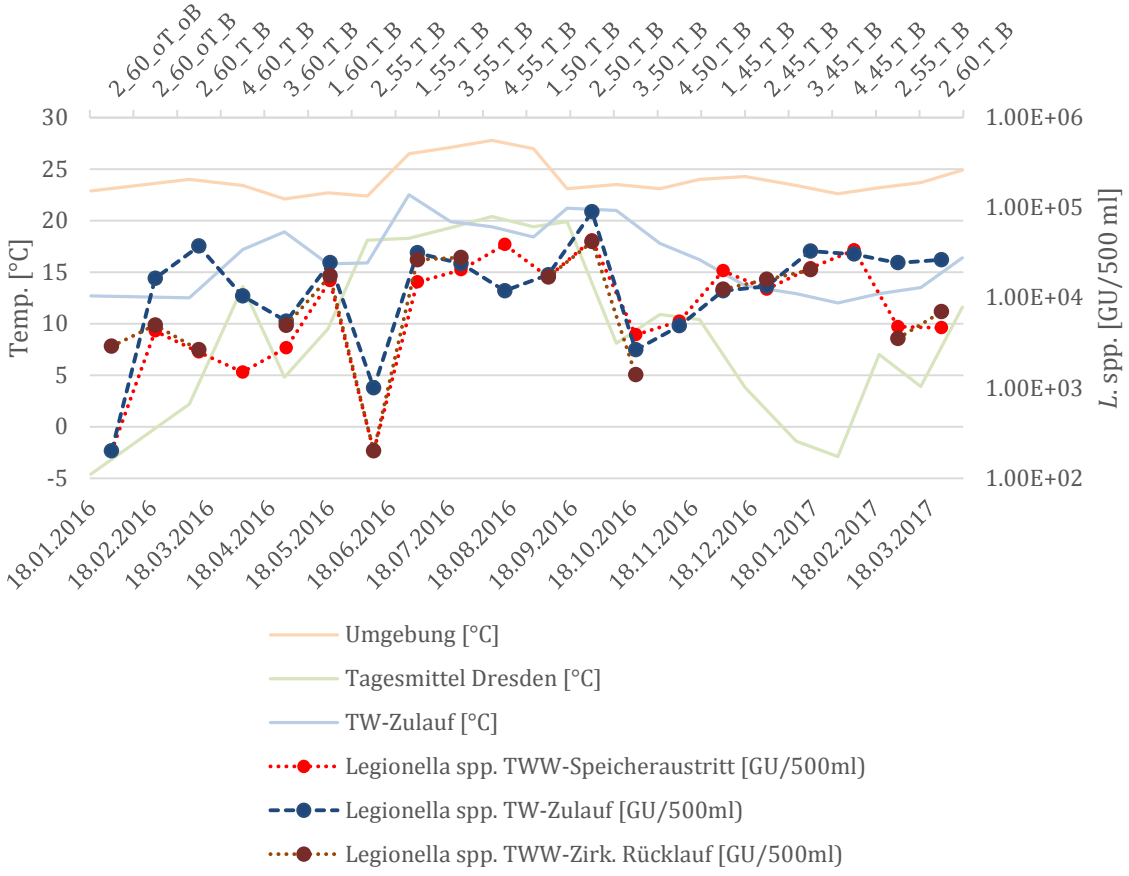


Abb. 5-28 Verlauf der Außen- und Umgebungstemperatur sowie der Legionellenkonzentration (*Legionella* spp. qPCR) im TWK-Zulauf, TWW-Speicherausstritt und TWW-Zirkulationsrücklauf in den TWE über den gesamten Untersuchungszeitraum

5.4.4 Einfluss der TWE-Temperatur, Stranglänge und Spülverhalten auf die Legionellenkonzentration in der Zentrale und Peripherie (*Legionella* spp./*L. pneumophila* qPCR, Kultur)

Legionella spp. (qPCR Daten)

Bei 60 °C Speichertemperatur konnte eine Reduzierung der Legionellenkonzentration in der Zentrale um etwa 1 Log_{10}-Stufe im Verhältnis zum TW-Zulauf beobachtet werden. Ebenfalls konnte eine Abnahme der Legionellen im TWW-System aller Wohneinheiten festgestellt werden. Im TWK-System der Wohneinheiten war keine Veränderung der Legionellenkonzentration wahrzunehmen. Die Werte im TWK-System der Wohneinheiten

entsprachen den Werten im TWK-Zulauf und lagen somit im Bereich von 10^4 GU/500 mL (Abb. 5-29).

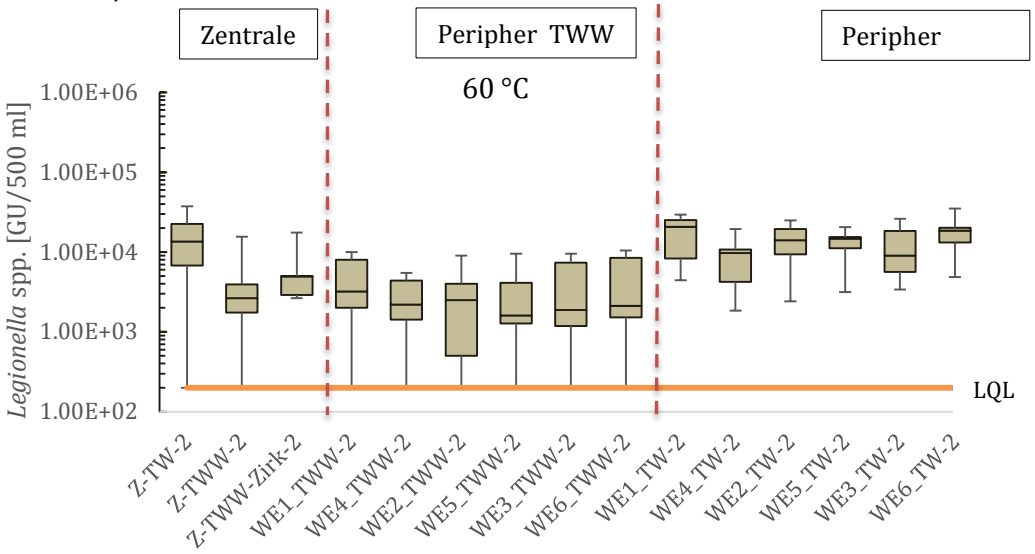


Abb. 5-29 Verlauf der Legionellenkonzentration (*Legionella* spp. qPCR) zentral und peripher während der Temperaturphase mit $\vartheta_{TWE,aus}$ = **60 °C** unabhängig von der Art des Zirkulationsabgleiches. Die Wohneinheiten sind nach Wassersystem und Strang zusammengelegt. LQL= untere Quantifizierungsgrenze der qPCR

Bei Absenkung der TWE-Temperatur um 5 K auf $\vartheta_{TWW,TWE}$ = 55 °C war der reduzierende Effekt der Temperatur sowohl in der Zentrale als auch in der Peripherie nicht mehr gegeben. Deutlich wurde hier allerdings ein Unterschied zwischen den einzelnen Wohneinheiten sichtbar. Die Wohneinheiten mit langen Strängen (WE 5 und WE 6) zeigten tendenziell höhere Werte im Vergleich zu den äquivalenten Wohneinheiten mit gleichem Wasserverbrauch aber kürzerer Leitungslänge. Die Unterschiede im DNA-Gehalt konnten im TWK und im TWW gezeigt werden (Abb. 5-30 a).

Bei TWE-Temperatur von $\vartheta_{TWW,TWE}$ = 50 °C war dieser Effekt noch deutlicher zu erkennen. Die Wohneinheiten mit langen Leitungen unabhängig von Zapfprofil (WE 4-WE 6) bzw. Wohneinheiten mit niedrigen Wasserverbrauch (WE 3 und WE 6) zeigten höhere Legionellenkonzentrationen als im TWE bzw. als in Wohneinheiten, die eine geringere Stranglänge/Strangvolumen zum TWE hatten (Konzentrationsunterschied teilweise > 0,5 Log_{10}-Stufen) (Abb. 5-30 b).

Bei 45 °C Speichertemperatur trat ebenfalls der Einfluss der Stranglänge im TWW und TWK-System der Wohneinheiten stärker hervor. Dabei hatten die Wohneinheiten mit längeren Strängen (WE 4-WE 6) höhere qPCR-Werte. Außerdem wiesen hier wenig gespülte Wohneinheiten (WE 3 und WE 5) vor allem im TWW-System hohe Legionellenkonzentrationen auf (Abb. 5-30 c).

Wie im Versuch mit $\vartheta_{TWW,TWE}$ = 55 °C konnte kein reduzierender Temperatur-Effekt auf das Legionellenvorkommen in TWI bei $\vartheta_{TWW,TWE}$ = 50 °C und 45 °C festgestellt werden (Abb. 5-30 a-c). Interessant dennoch, dass die höchsten Legionellenkonzentrationen in der Peripherie während des Versuchs mit $\vartheta_{TWW,TWE}$ = 50 °C zu erkennen waren (Abb. 5-30 b). Die Temperaturen um 50 °C wurden von der Gruppe um Marc Edwards und Amy Pru-

den als ‚Sweet spot‘ beschrieben, da auch sie bei 51 °C Zirkulationstemperatur deutlich höhere Legionellenkonzentrationen (qPCR) gemessen haben als bei 48 °C und 58 °C [Rhoads15].

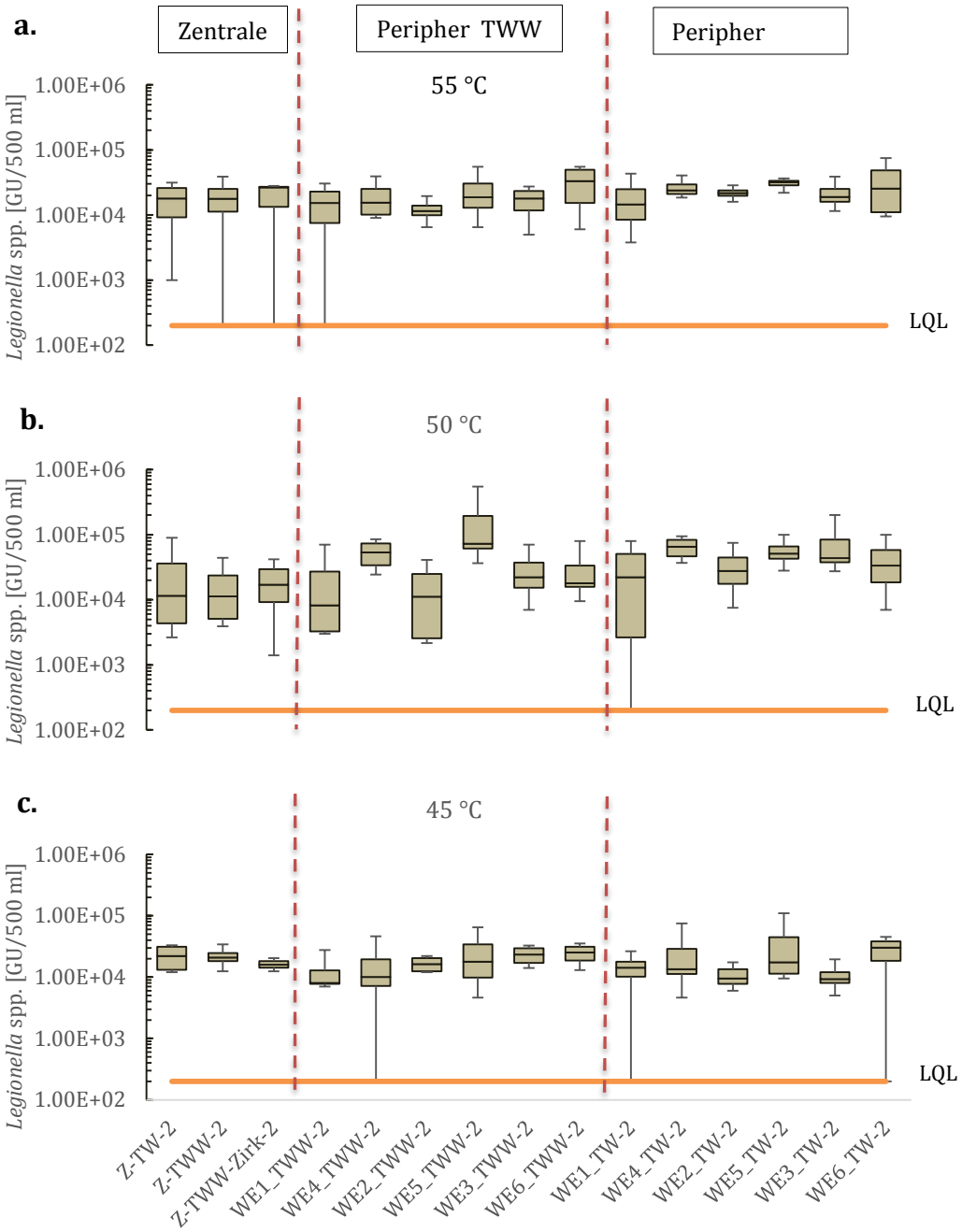


Abb. 5-30 Verlauf der Legionellenkonzentration (*Legionella* spp. qPCR) zentral und peripher während der Temperaturphasen mit $\vartheta_{TWW,TWE}$ = **55 °C** (a), **50 °C** (b) und **45 °C** (c) unabhängig von der Art der Zirkulationsabgleiches. Die Wohneinheiten sind nach Wassersystem und Strang zusammengelegt. LQL = untere Quantifizierungsgrenze der qPCR

Insgesamt betrachtet lässt sich bezüglich der Rolle der Stranglänge bzw. des Spülverhaltens betonen, dass im Verlauf der Versuche ein geringer Wasserverbrauch nicht zwangsläufig zu höheren Legionellenkonzentrationen in der qPCR-Analyse führte. Unterhalb von $\vartheta_{TWW,TWE}$ = 60 °C gab es in TWI deutlich höhere Werte in den entfernten Wohneinheiten, nicht nur bei wenig durchspülten Wohneinheiten (WE 3 und WE 6), sondern auch bei häufiger Zapfung (Abb. 5-30 a-c). Demnach eignen sich die Wohneinheiten bzw. PNS mit langen Zuleitungen (auch bei hoher Wasserentnahme) sowie Wohneinheiten bzw. PNS mit geringer Wasserentnahme als guter Indikator für die Einschätzung eines Trinkwassersystems.

<u>*L. pneumophila* und andere *Legionella*-Spezies (qPCR Daten, Kultur)</u>

Bei Temperaturen von $\vartheta_{TWW,TWE}$ = 60 °C, 55 °C und 50 °C wurden in TWI kulturell nur einzelne Positivbefunde in Konzentrationen weit unter dem technischen Maßnahmewert feststellbar. So wurde während des 60 °C Versuches *Legionella anisa* (*L. anisa*) mit < 10 KbE/100 mL im TWK-System der Wohneinheiten mit langen Leitungen (WE 4 bis WE 6) gefunden. Es war vor dem Versuchsbeginn bekannt, dass diese *Legionella*-Spezies in sehr geringer Konzentration im Wassernetz des Zentrums für Energietechnik vorkommt. Während des 50 °C Versuches wurden weitere zwei *Legionella*-Spezies *Legionella erythra* (*L. erythra*) sowie *Legionella shakespearei* (*L. shakespearei*) in den speziellen Proben aus der am weitesten entfernten und am wenigsten durchspülten Wohneinheit 6 (Biofilm, angereichertes Wasser) in geringen Mengen detektiert.

Nach sechswöchigem Betrieb der TWI bei $\vartheta_{TWW,TWE}$ = 45 °C konnte erstmals eine einzige *L. pneumophila* Kolonie (Serogruppe 1, monoklonaler Subtyp OLDA, Sequenztyp 1) im TWW der Wohneinheit 6 isoliert werden. Ebenfalls konnte erstmals *L. pneumophila* in den Wohneinheit 4 und Wohneinheit 5 per *L. pneumophila* qPCR nachgewiesen werden (Abb. 5-31). Dabei entsprachen die qPCR-Werte für *L. pneumophila* denen der gesamten *Legionella* spp.-Konzentration (10^4 GU/500 mL). Nach weiteren drei Wochen bei $\vartheta_{TWW,TWE}$ = 45 °C wurden die Legionellen kulturell im Bereich von 10^2 KbE/100 mL im TWW der TWI (in WE 1 und WE 6 auch im TWK) ubiquitär nachgewiesen. Nach insgesamt 12 Wochen Betrieb bei $\vartheta_{TWW,TWE}$ = 45 °C wurde *L. pneumophila* in allen Wohneinheiten sowie im Speicher kulturell und per qPCR nachgewiesen. Die peripheren Wohneinheiten mit langen Strängen (WE 5 und WE 6) sowie Wohneinheit 3 mit wenig Wasserverbrauch hatten Werte von >1.000 KbE/100 mL (Abb. 5-31).

Nach drei Wochen Betrieb nach Temperaturerhöhung auf $\vartheta_{TWW,TWE}$ = 55 °C sank der kulturelle Nachweis von *L. pneumophila* auf das Ausgangsniveau zurück. Die Legionellen wurden nur noch in der Wohneinheit 3 (wenig Wasserverbrauch) vereinzelt (1 KbE/100 mL) nachgewiesen (Abb. 5-31). In der qPCR zeigten die Wohneinheiten 3 und 5 tendenziell erhöhte Werte auch bei häufiger Zapfung. Darauffolgende drei Wochen bei 60 °C TWE-Temperatur reduzierten die *L. pneumophila*-Werte unter das jeweilige Detektionslimit der Kultur- und qPCR-Methode (Abb. 5-31).

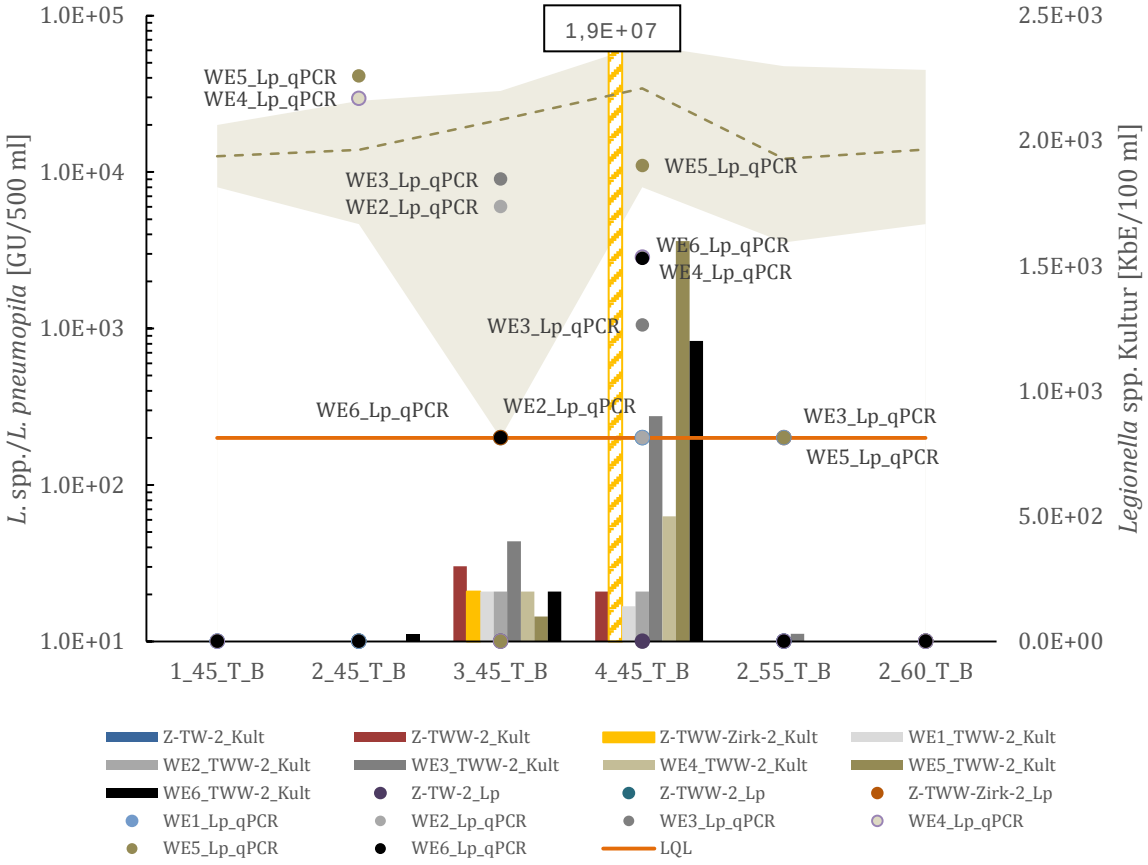


Abb. 5-31 Verlauf der Legionellenkonzentration (*Legionella* spp./*L. pneumophila*-qPCR, *L. pneumophila*-Kultur) zentral und peripher während der Temperaturphase mit $\vartheta_{TWW,TWE}$ = **45 °C** und anschließender Dekontaminationsphase mit $\vartheta_{TWW,TWE}$ = 55 °C/60 °C. Graue Wolke = *Legionella* spp. qPCR (WE 1 bis WE 6). Gestrichelte Linie innerhalb der Wolke = *Legionella* spp. qPCR Mittelwert (WE 1 bis WE 6). Gestrichelter Balken = Kultur (Zirkulationsrücklauf in den TWE; inaktiv). LQL= untere Quantifizierungsgrenze der qPCR

Aufgrund der Daten der *L. pneumophila* qPCR und der Kultur lässt sich zusammenfassend feststellen, dass die TWE-Temperatur das Legionellenvorkommen in TWI beeinflusst.

Das kontrollierte Absenken der TWE-Temperaturen auf $\vartheta_{TWW,TWE}$ = 45 °C führte zu einer Vermehrung von *L. pneumophila* im TWW-System der TWI. Dabei konnte die explosionsartige Vermehrung von *L. pneumophila* trotz des umfangreichen Monitorings der TWI mittels Kulturansatz sowie per qPCR nicht vorhergesagt werden. Als hygienisch risikoreich stellten sich vor allem die Wohneinheiten mit langen Leitungen, auch mit hoher Wasserentnahme, und die Wohneinheiten mit geringer Wasserentnahme dar. Daher scheinen die Wohneinheiten mit solchen Parametern als gute Indikatoren zur Bewertung eines Trinkwassersystems zu sein.

Ein additiver indirekter Einfluss der Nährstoffverfügbarkeit in Form vom assimilierbaren organischen Kohlenstoff (AOC) auf die Aufkeimung der Legionellen während der 45 °C Temperaturphase konnte anhand der aktuellen Literaturdaten weitgehend ausgeschlos-

sen werden. [Proctor2017] zeigten in den Versuchen mit simulierten TWE, dass bei den Temperaturen von ≤ 45 °C der AOC-Gehalt zwar gut mit der Gesamtkoloniezahl korreliert, weist dennoch schlechte Korrelation mit der *L. pneumophila* Koloniezahl auf. Des Weiteren konnte anhand der simulierten TWE gezeigt werden, dass sowohl die Vermehrung/Persistenz von *L. pneumophila* als auch deren Wirtsprotozoen *Acanthamoeba polyphaga* und *Vermamoeba vermiformis* ebenfalls nicht mit der Konzentration des gesamten organisch gebundenen Kohlenstoffes (TOC) korreliert [Williams15].

Die Erhöhung der Temperatur von $\vartheta_{TWW,TWE}$ = 45 °C auf 55 °C und weiter auf 60 °C führte zur deutlichen und dauerhaften Reduzierung des Legionellenvorkommens (Kultur und qPCR) in TWI. Auch vor der 45 °C Temperaturphase wurden bei den Temperaturen von $\vartheta_{TWW,TWE}$ = 60 °C, 55 °C und 50 °C nur vereinzelt positive *Legionella* spp. Kulturbefunde nachgewiesen. Der reduzierende Temperatur-Effekt auf die Vermehrung der Legionellen ist aus hygienisch-mikrobiologischen Gesichtspunkten dementsprechend im Bereich zwischen $\vartheta_{TWW,TWE}$ = 55 °C bis 60 °C anzusiedeln, eine genaue Grenztemperatur kann allerdings aus den Ergebnissen nicht abgeleitet werden.

Pseudomonas aeruginosa

Die Pseudomonaden wurden bei den Temperaturen von $\vartheta_{TWW,TWE}$ = 60 °C, 55 °C und 50 °C in TWI kulturell nicht gefunden. Nach zwölfwöchigem Betrieb der TWI bei $\vartheta_{TWW,TWE}$ = 45 °C konnten erstmals einige positive Kulturproben (1-18 KbE/100 mL) aus dem TWW-System der Zentrale sowie der Peripherie (WE 1 bis WE 6) gewonnen werden. Die Erhöhung der TWE Temperatur auf $\vartheta_{TWW,TWE}$ = 55 °C führte zu einer Elimination der Bakterien aus dem System.

5.4.5 Einfluss der Art des hydraulischen Zirkulationsabgleiches auf die Legionellenkonzentration in der Zentrale und Peripherie (*Legionella* spp. qPCR)

Anhand der *Legionella* spp. qPCR-Werte der Zentrale konnte kein Unterschied zwischen den einzelnen Arten des Zirkulationsabgleiches sowie der elektrischen Begleitheizung festgestellt werden. Die Temperatur von $\vartheta_{TWW,TWE}$ = 60 °C konnte den *Legionella*-Eintrag in TWI bei allen Versuchen unterschiedlich stark reduzieren (Abb. 5-32, Abb. 5-33). Bei den Temperaturen von $\vartheta_{TWW,TWE}$ = 55 °C, 50 °C und 45 °C entsprach der DNA-Gehalt im TWK-Zulauf größtenteils dem im Zirkulationsrücklauf und im TWE selbst. Eine Ausnahme stellte der Versuch mit elektrischer Begleitheizung (Nr. 4) bei $\vartheta_{TWW,TWE}$ = 45 °C dar. Hier gab es eine Zunahme der genomischen Einheiten im Zirkulationsrücklauf um > 1 Log_{10} Stufe im Vergleich zum TWK-Zulauf und dem Eintritt in den TWE (Abb. 5-32, Abb. 5-33). Der Anstieg in der qPCR war auf die während der Temperaturphase 45 °C laufende Aufkeimung von *L. pneumophila* zurückzuführen (siehe Abb. 5-31). Die zeitliche Abfolge der einzelnen Versuche und die Tatsache, dass bei dem Versuch Nr. 4 die Zirkulation in einem inaktiven Zustand war, führte letztendlich zu hohen qPCR-Werten im Zirkulationsstrang innerhalb dieses Versuchs. Des Weiteren ist der zeitliche Faktor, der die Vermehrung von Legionellen bei 45 °C ermöglicht unbekannt. Es ist nicht auszuschließen, dass die bereits vorangegangenen Versuche bei 45 °C die hohen Werte bei dem Versuch Nr. 4 erklären könnten.

Sowohl im TWW- als auch im TWK-System der Peripherie führten unterschiedliche Abgleichsysteme der Zirkulation bei gleichen Randbedingungen zu keiner nennenswerten Erhöhung der qPCR-Werte im Vergleich zu der Zentrale. Die vereinzelten Unterschiede im TWW bei z. B. $\vartheta_{TWW,TWE}$ = 50 °C in Versuchen Nr. 1, Nr. 3 und Nr. 5 (Abb. 5-32) sowie im

TWK bei z. B. $\vartheta_{TWW,TWE}$ = 55 °C im Versuch Nr. 2 (Abb. 5-33) konnten nicht auf das Abgleichsystem übertragen werden. Die Abweichungen zwischen den Legionellenkonzentrationen in der Zentrale und peripheren Wohneinheiten waren bei diesen Versuchskombinationen der TWE-Temperatur und Art des Zirkulationsabgleiches durch die auffällig niedrige Legionellenkonzentration in der Zentrale bedingt.

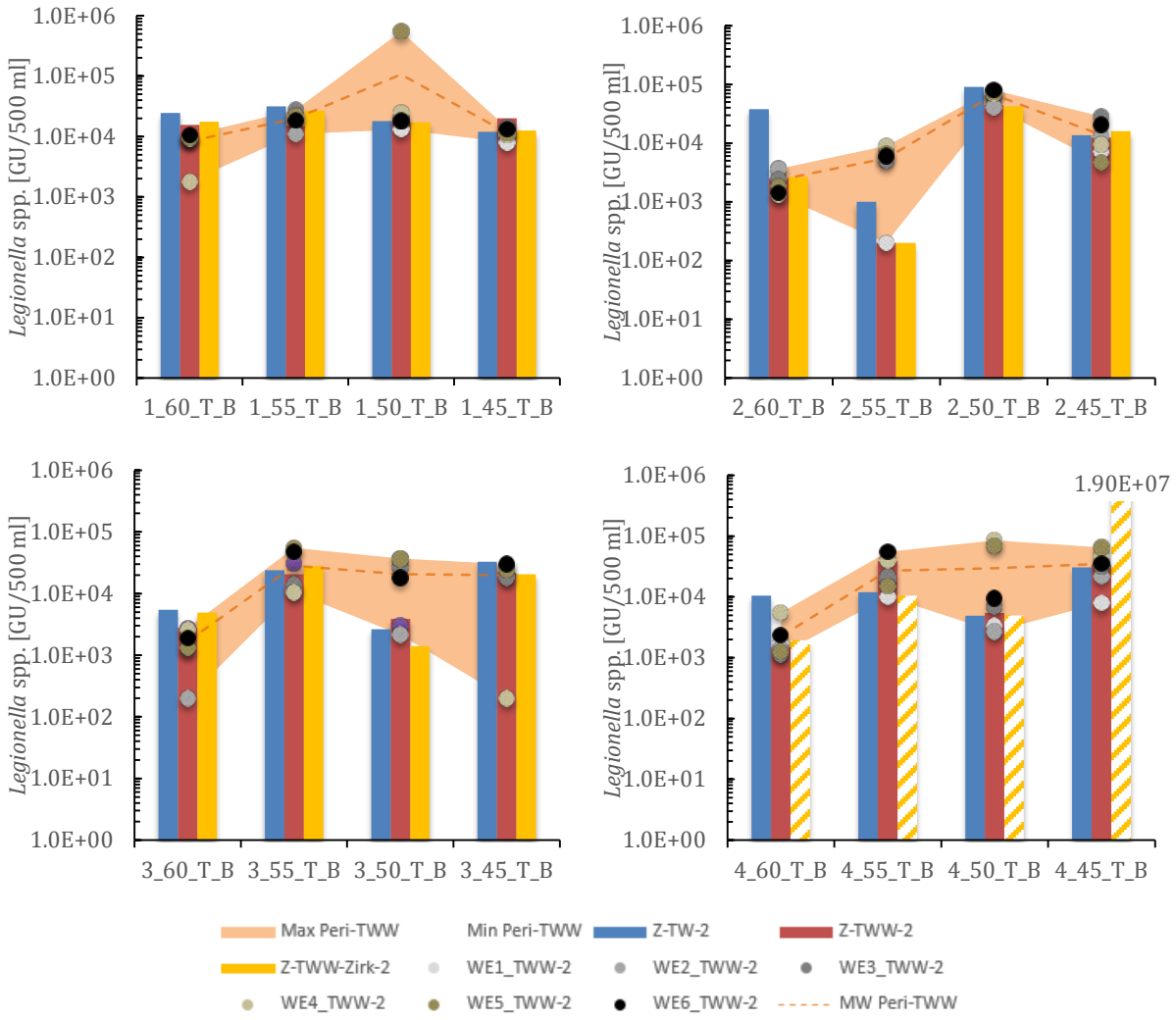


Abb. 5-32 Verlauf der Legionellenkonzentration (*Legionella* spp. qPCR) im TWW-System der Zentrale und Peripherie bei der manuellen (Nr. 1), thermoelektrischen (Nr. 2) und thermomechanischen (Nr. 3) Art des Zirkulationsabgleichs sowie der Anwendung der elektrischen Begleitheizung (Nr. 4) unter verschiedenen TWE-Temperaturen (60 °C, 55 °C, 50 °C. 45 °C). Gestrichelter Balken = Zirkulationsrücklauf in den TWE (inaktiv)

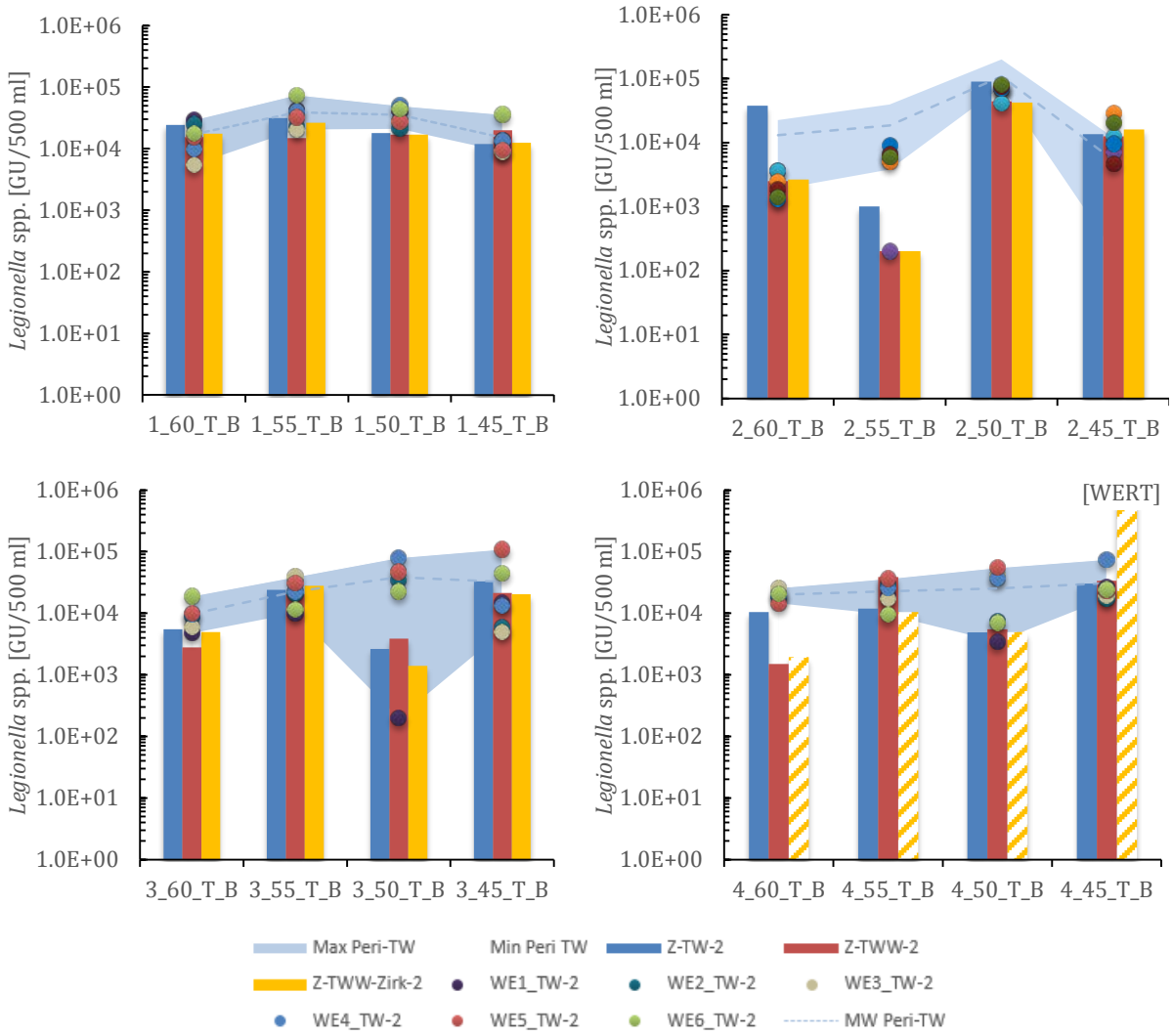


Abb. 5-33 Verlauf der Legionellenkonzentration (*Legionella* spp. qPCR) im TWK-System der Zentrale und Peripherie bei der manuellen (Nr. 1), thermoelektrischen (Nr. 2) und thermomechanischen (Nr. 3) Art des Zirkulationsabgleichs sowie der Anwendung der elektrischen Begleitheizung (Nr. 4) unter verschiedenen TWE-Temperaturen (60 °C, 55 °C, 50 °C. 45 °C). Gestrichelter Balken = Zirkulationsrücklauf in den TWE (inaktiv)

5.5 Überlagerung Erkenntnisse Thermohydraulik und Trinkwasserhygiene

Die initialen Versuche an TWI liefen bei $\vartheta_{TWW,TWE}$ = 60 °C ohne Trennwand zwischen dem TWW- und TWK-System und/oder Beplankung. Unmittelbar nach dem ersten Versuch mit Trennwand und Beplankung bei gleichem Temperaturprofil ($\vartheta_{TWW,TWE}$ = 60 °C) wurden erstmals Legionellen (*L. anisa*, < 10 KbE/100 mL) im TWK der peripheren Wohneinheiten (WE 4-WE 6) detektiert. Die Beeinflussung des Temperaturregimes von TWW-System auf das TWK-System innerhalb eines Schachts ohne Trennwand scheint eine mögliche Ursache für die Aufkeimung von Legionellen im TWK der Wohneinheiten zu sein. Die optimale

Wachstumstemperatur für den im System vorkommenden Stamm *L. anisa* liegt bei 30 °C. Diese wurde für den Stamm in Laborversuchen evaluiert. Zum Zeitpunkt der Probenahme nach dem Versuch ohne Trennwand erreichten die erfassten TWK-Temperaturen in der Peripherie den Maximalwert von 26 °C. Die Installation einer Trennwand reduzierte die Aufwärmung im TWK. Der gemessene Maximalwert betrug 23,2 °C.

Der Einbau einer Trennwand zwischen TWW- und TWK-System bei Verlegung im selben Schacht oder alternativ Verlegung in separaten, räumlich deutlich getrennten Schächten wird daher unter thermo-hydraulischen und hygienisch-mikrobiologischen Gesichtspunkten zwingend erforderlich angesehen.

5.6 Schlussfolgerungen Technikumsversuche und Herausarbeiten von Thesen

Der kompakte Technikums-Versuchstand TWI, der nach den a.a.R.d.T. gebaut und betrieben wurde, erwies sich für die systematischen Untersuchungen des Einflusses der TWW-Temperatur als sehr gut geeignet. Die hygienisch-mikrobiologischen sowie thermohydraulischen Parameter konnten über den gesamten Untersuchungszeitraum problemlos und entsprechend dem Vorhaben erfasst werden.

Bei Temperaturen am Austritt des TWE von $\vartheta_{\mathrm{TWW,TWE}}$ = 55 … 60 °C bei gleichzeitiger Einhaltung von Temperaturen > 50 °C im zirkulierenden System konnte der Legionelleneintrag (gemessen durch qPCR *Legionella* spp.) aus dem TWK-Zulauf (< 25 °C) reduziert werden. Der TWE fungiert demzufolge dabei als Barriere zwischen dem TWK-Zulauf und dem TWW-System.

Bei abnehmender TWE-Temperatur glichen sich die Legionellenkonzentrationen des TWE-Austritts an die des TWK-Zulaufs an. Bei niedrigen TWE-Temperaturen ($\vartheta_{\mathrm{TWW,TWE}}$= 45 und 50 °C) waren 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.

Außerdem wurde innerhalb des gesamten Untersuchungszeitraumes ein stetiger und gleichbleibender Eintrag von Legionellen (*Legionella* spp. qPCR) durch den TWK-Zulauf in den TWE festgestellt. Dieser konnte kulturell nicht bestätigt werden. Daher eignet sich das qPCR-System für *Legionella* spp. nur bedingt als Monitoringsystem für Trinkwassersysteme.

In der Peripherie war der kulturelle Nachweis von Legionellen vorwiegend an PNS mit langen Zirkulationsstranglängen bzw. an PNS mit geringem Verbrauch möglich gewesen. Auch der DNA-Nachweis mittels qPCR (*Legionella* spp.) zeigte, dass trotz gleichen Entnahmeprofils (galt sowohl für hohe als auch für niedrige Wasserentnahme) die Wohnungen mit langen Strängen höhere Legionellenkonzentrationen aufwiesen als WE mit kürzeren Zuleitungen. Dies galt 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 [Völker16] wurden Stagnation und Leitungslänge als wichtige Prädiktoren für Legionellen-Kontaminationen zusätzlich zur Wassertemperatur identifiziert.

Die Untersuchungsergebnisse des Einflusses der Technologien des Zirkulationsabgleichs im TWI-Versuchsstand zeigten, dass drei technisch korrekt ausgeführten Methoden des

Zirkulationsabgleichs bei gleichen Temperatur- und Entnahmebedingungen kein erkennbar unterschiedliches Vermehrungs- oder Abtötungspotential bezüglich Legionellen in der Zirkulation oder in den peripheren Wohneinheiten aufwiesen. Dies galt auch für die Versuche mit elektrischer Begleitheizung, trotz der deutlich verminderten TWW-Temperaturen. Es sollte in weiteren Untersuchungen geprüft werden, ob dies auch für Untersuchungszeiträume von deutlich mehr als drei Wochen bestätigt werden kann.

Anhand der im Rahmen der Technikumsversuche erhobenen Daten zur Trinkwasserhygiene konnten zusammenfassend folgende Thesen formuliert werden:

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

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 Legionellenkontaminationen in der TWI.

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

6 Simulation Trinkwasser-Installation in TRNSYS-TUD

6.1 Allgemeines zu TRNSYS-TUD

Die Gebäude- und Anlagensimulation hat an der Professur für Gebäudeenergietechnik und Wärmeversorgung der TU Dresden eine langjährige Tradition. Schon in den frühen Neunzigerjahren wurden die Weichen zugunsten eines Forschungsschwerpunktes Simulation gestellt. Dabei war es immer Ziel, ein Optimum aus Aufwand und Nutzen zu erreichen und trotzdem die komplizierten Wechselwirkungen im Gebäude und den darin enthaltenen Anlagen effektiv und so effizient wie möglich zu modellieren und gleichzeitig ein besseres Verständnis des Gesamtsystems zu erlangen.

Ergebnis dieser Bestrebungen war und ist die Simulationsumgebung TRNSYS-TUD. Sie beruht auf einem ursprünglich von TRANSSOLAR Software erworbenen Software-Kernel (TRNSYS 14.2), welcher über die Jahre stetig erweitert wurde. TRNSYS-TUD beinhaltet demnach das ursprüngliche TRNSYS Paket und zahlreiche zum Teil sehr komplexe Erweiterungen [Perschk10], welche über die Jahre an der Professur für Gebäudeenergietechnik und Wärmeversorgung entwickelt wurden. In der einschlägigen Literatur wird dieses Programmpaket auch als „Dresdner Modell“ bezeichnet.

Im Wesentlichen beruht die Stärke von TRNSYS-TUD auf dem effizienten Zusammenspiel einzelner, auf die Lösung spezieller Teilaufgabenstellungen zugeschnittener, Module welche im TRNSYS-Kontext Type’s genannt werden. Beispielsweise gibt es neben einer Vielzahl von Standard-Type’s welche etwa für die Datenanalyse und –darstellung verantwortlich sind auch Type’s die die Handhabung und Simulation ganzer Hydraulikkreisläufe ermöglichen. Eben diese, zu Projektbeginn bereits vorhandene Fähigkeit der Modellierung von Hydraulikkreisläufen war Ausgangspunkt für die Erweiterung bzgl. die Möglichkeit zur Simulation von Trinkwasser-Installationen (TWI). Die via TRNSYS-TUD modellierte und zur Simulation genutzte TWI, wird im Folgenden nur als modellierte TWI bezeichnet (Siehe auch Abschnitt 6.3).

6.2 Projektspezifische Weiterentwicklungen von TRNSYS-TUD

Ausgehend von der bereits bestehenden Möglichkeit, geschlossene Hydraulikkreisläufe zu modellieren und deren Verhalten quasidynamisch im laufenden Betrieb zu simulieren, wurde in einem ersten Schritt die Möglichkeit geschaffen, die geschlossenen Hydraulikkreisläufe zu öffnen. Das heißt, es wurde zu Beginn des Projektes der offene Entnahmefall, wie dieser bei jedem Zapfvorgang in beliebigen Trinkwasser-Installationen auftritt, zum Modell hinzugefügt. Die hierfür notwendigen, tiefgreifenden Erweiterungen des Programmcodes wurden dabei von einer Vielzahl an Tests begleitet. Es sei hier erwähnt, dass die Professur GEWV zur Sicherung der Qualität eigens entwickelter Software auf Programme zur kontinuierlichen Integration setzt. Dies hat den Vorteil, dass mit jeder neuen Codezeile, automatisch eine Kaskade von Tests bzgl. Struktur, Funktion und Performance durchgeführt werden. Diese frühe Phase der Qualitätskontrolle stellte sicher, dass im späteren Verlauf des Projektes keine nennenswerten Probleme bzgl. der Qualität und Validität des Simulationstools auftraten. Die dadurch anfänglich gefühlt eingetretene Verzögerung des Projektfortschritts wurde hierbei bewusst in Kauf genommen. Darüber hinaus wäre das Projekt ohne die in dieser Frühphase durchgeführten Performanceoptimierungen an kritische Kapazitätsgrenzen gestoßen.

Beispielsweise führte die permanente Überwachung der Performance einzelner Simulationsdurchläufe schnell zu der Erkenntnis, dass deren Laufzeit mit anwachsender Modellgröße (siehe nächster Abschnitt) im Tagesbereich liegen wird. Aufbauend auf dieser Erkenntnis wurde bereits in der Frühphase des Projektes gegengesteuert, so dass nach Austausch des ineffizienten Maschengleichungslösers eine Laufzeitreduktion um nahezu einen Faktor von Zehn realisiert werden konnte. Hinsichtlich der in der Endphase des Projektes wiederholend durchgeführten Vielzahl von Simulationsvarianten ($O(10^4)$) ist der Nutzen der nun nur noch im Stundenbereich liegenden Simulationszeit unbestreitbar.

Zusätzlich wurde im Rahmen des Projektes ein Post-Processing-Tool (SolidEx) geschaffen welches die Qualität der dreidimensionalen Darstellung der modellierten TWI stark verbessert. Dieses Tool ermöglicht die automatische Konvertierung von TRNSYS-TUD in SolidWorks Modelle. Auch wenn mit dem Pre-Processing-Tool TestNetz [Perschk10] bereits die Möglichkeit bestand, die modellierte TWI in drei Dimensionen darzustellen, so lieferte erst die Darstellung in SolidWorks die visuelle Qualität, die insbesondere für repräsentative Zwecke benötigt wird und Endnutzer heute erwarten dürfen. Abb. 6-1 zeigt einen Vergleich der via TestNetz und via SolidEx generierten 3D-Darstellung der TWI.

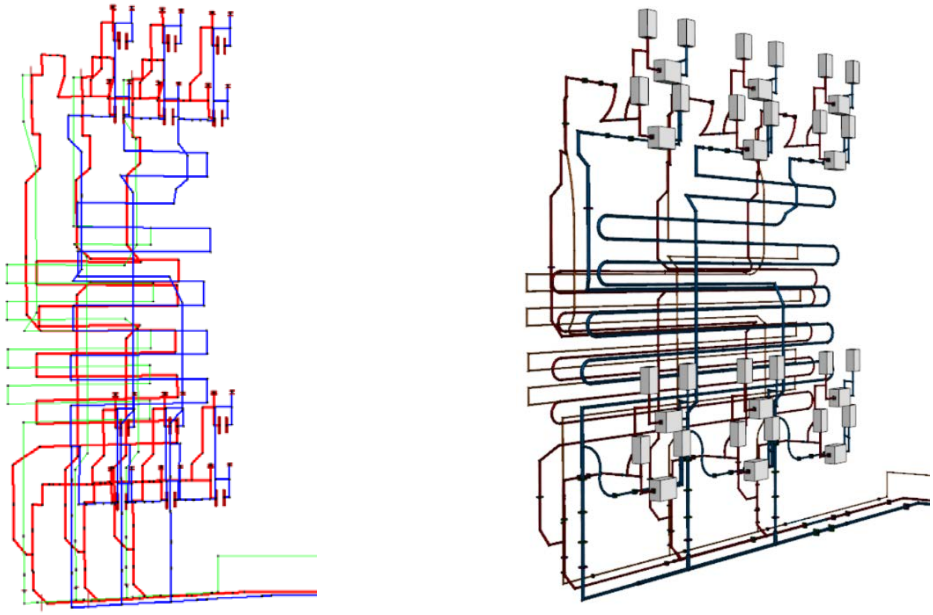


Abb. 6-1 Virtuelles Modell der TWI, ursprüngliche Darstellung in TestNetz (links) und abgeleitete Darstellung SolidWorks (via SolidEx, rechts)

6.3 Modellierung des Versuchsstandes TWI im ZET

Beim Übergang von realen zu virtuellen (durch Simulation erzeugten) Versuchsreihen ergeben sich zwangsläufig diverse Fehlerquellen. Zum einen erfolgt die Abbildung realer physikalischer Prozesse nur durch vereinfachte Modellgleichungen und zum anderen können nicht alle beteiligten Komponenten exakt modelliert werden. Des Weiteren besitzen auch Konvergenz- und Rundungsfehler einen großen Einfluss auf die Korrektheit des Gesamtergebnisses. Das heißt, es ist unvermeidlich, dass die via Simulation erzielten Ergebnisse um einen gewissen Prozentsatz von der Realität abweichen. Die Kunst besteht darin die Abweichung auf ein Minimum zu begrenzen. In diesem Sinne wurde während

der gesamten Modellierung ein besonderer Fokus auf die möglichst präzise und vollständige Erfassung als auch Umsetzung aller Komponenten der realen TWI geachtet.

Hierfür wurde die komplette TWI geometrisch erfasst und es wurden bis auf wenige Ausnahmen alle Komponenten (Leitungsstücke, Winkel, Bögen, Armaturen, Ventile, Sensoren, etc.) im Modell berücksichtigt. Bei den nicht berücksichtigten Komponenten handelt es sich zum einen um den Druckerhöher und Trinkwasserfilter beim Übergang vom Gebäudeversorgungssystem zur TWI, wobei die zum einen dem Trinkwasser Kalt zugehörige Installation erst ab dem ersten Drucksensor (XLC01BP001) erfasst und abgebildet wurde. Diese minimale Verkürzung der Gesamtstranglänge im Trinkwasser Kalt, ist insofern akzeptabel da diese nur zu einem minimalen Verlust an Genauigkeit führt. Die letzte Komponente die nicht exakt abgebildet bzw. erfasst wurde, ist der Trinkwasserspeicher/Trinkwassererwärmer (TWE). Dieser ist im Modell als einfache Blackbox mit, den Anforderungen entsprechenden, Anfangs- und Randwerten realisiert. Das heißt, die Temperatur des Trinkwassers Warm (TWW) am Ausgang des TWE entspricht immer den geforderten Werten (60 °C, 55 °C, 50 °C, 45 °C oder „real gemessen“= Messwerte aus den zur Modellvalidierung genutzten Versuchsreihen). Die Werte für die Temperatur am Rücklauf der Zirkulation und am Zulauf des Trinkwassers (kalt) ergeben sich direkt aus dem Modell. Der Ansatz via Blackbox garantiert somit, dass der TWE immer die jeweils geforderte Temperatur (TWW) bereitstellt. Etwaige auftretende Unterversorgungen waren zu keinem Zeitpunkt Gegenstand der Untersuchungen, könnten aber über das Einlesen von Datenreihen Berücksichtigung finden und somit nahezu exakt abgebildet werden.

Die physikalischen Kennwerte der einzelnen Komponenten wurden den einschlägigen Materialkatalogen entnommen, die tatsächlich verwendeten Werte werden in den nachfolgenden Tabellen detailliert aufgeführt. Die gesamte TWI wurde mit JRG Sanipex MT Metallverbundrohren realisiert (Aufbau siehe Abb. 6-2). Deren physikalische Kenngrößen sind für alle in der TWI verwendeten Rohrdurchmesser in Tab. 6-1 hinterlegt. Die Wärmedämmung der installierten Rohrleitungen wurde zu einem Teil durch die Verwendung von bereits vorgedämmten Sanipex Rohren (hauptsächlich Zirkulationsleitung) und zum anderen durch die zusätzliche Installation von handelsüblicher Rohrdämmung realisiert. Im Modell wurde darüber hinaus noch ein ideales (EnEV 100 %) und ein reduziertes (EnEV 50 %) Dämmungsszenario realisiert. Die tatsächlich in den drei unterschiedlichen Wärmedämm-Szenarien verwendeten Kennwerte sind in Tab. 6-2 aufgeführt. Es ist hierbei zu beachten, dass – sofern mehrere Dämmstärken aufgeführt sind – der erste Wert für Rohrleitungen außerhalb und der zweite Wert für Rohrleitungen innerhalb von Wohnungen gilt.

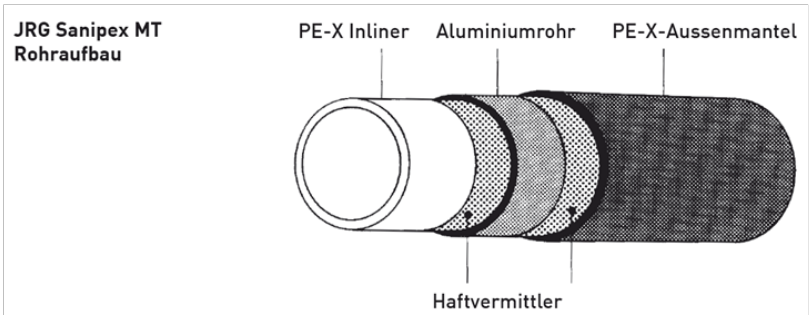


Abb. 6-2 Schematischer Aufbau JRG Sanipex MT Verbundrohr

Um die Interaktion zwischen der TWI und der umgebenden Einhausung korrekt zu simulieren bedurfte es des Weiteren der korrekten Modellierung der Stützkonstruktion und der

darauf montierten Einhausung sowie der normenkonformen Kanaltrennwand. Die diesbezüglich relevanten Kennwerte sind in der Tab. 6-3 aufgeführt. Es sei hier darauf hingewiesen, dass die Zwischendecke im Technikum des Instituts für Energietechnik (IET) eine vergleichbare Charakteristik wie die in typischen Wohnszenarien anzutreffenden Bodenplatten aufweist und somit als Bodenplatte angesehen werden kann. Alle anderen Materialien und Abmessungen entsprechen ebenfalls der gängigen Praxis.

Tab. 6-1 Kurzcharakteristik JRG Sanipex MT Verbundrohr

Bezeichnung	**Einheit**	**Rohrmaterial:** JRG Sanipex MT PE-X / AI /PE-X				
Rohrdimension	DN	12	15	20	25	32
Außendurchmesser	mm	16	20	26	32	40
Wandstärke	mm	2,25	2,5	3	3	3,5
Innendurchmesser	mm	11,5	15	20	26	33
Innenvolumen	L/m	0,104	0,177	0,314	0,531	0,855
Wärmeleitfähigkeit	W/(m K)	0,43				
Rohrrauigkeit Innenrohr	µm	7,0				
Dichte	Kg/m^3	1082,8				
Wärmekapazität	J/(Kg K)	390,0				
Emissionskoeffizient		0,8				

Tab. 6-2 Kurzcharakteristik der im Model verwendeten Wärmedämmung. Die Doppelnennung unter TWW bei 15 mm Innendurchmesser resultiert aus der geringeren Dämmstärke die innerhalb der sechs Wohnungen verbaut wurde.

Szenario	**Bezeichnung**						
	Innendurchmesser [mm]	**11,5**	**15**		**20**	**26**	**33**
Ideal (EnEV 100 %)	Dämmstärke [mm]	20	20		20	30	30
	λ [W/(m K)]	0,035					
Real (reale TWI)	Medium	TWZ	TWW	TWK	TWW/TWK	TWZ/TWK	TWW/TWK
	Dämmstärke [mm]	20	25/20	13	25	25	25
	λ [W/(m K)]	0,035	0,04	0,035	0,04	0,04	0,04
Typisch (EnEV 50 %)	Dämmstärke [mm]	10	10		10	15	15
	λ [W/(m K)]	0,035					

Tab. 6-3 Kurzcharakteristik der für die umgebende Einhausung verwendeten Baustoffe

Bezeichnung	Wandtyp	Dicke [mm]	Wärme-kapazität	λ [W/(m K)]	Dichte [kg/m³]
Gipskartonplatte (GKB HRK)	Decke Seitenwände Rückwand Trennwand	30	1.000	0,21	680
Gipskartonplatte (GKBI HRK)	Front	12,5	1.000	0,21	680
Dämmplatte (EPS 035 DEO/WAB)	Trennwand	9,5	1.500	0,035	15
Zementestrich	Fußboden	1.000	1.000	1,4	2.000
Stützkonstruktion (AL Mg Si 0,5 F25)	-	50	898	200	2.700

Von besonderem Interesse bei der Realisierung eines möglichst präzisen Modells der TWI sind die Druckverluste die in der gesamten Installation auftreten bzw. zu erwarten sind. Neben den typischen Verlusten durch Wandreibung (Abhängig von der Rauigkeit und der Länge des jeweils betrachteten Rohrleitungsstücks), welche leicht analytisch zu bestimmen sind, treten in allen von der einfachen Rohrleitung abweichenden Komponenten (Formstücke, Sensoren, etc.) zusätzlich Druckverluste durch Dissipation auf. Diese Verluste sind hauptsächlich durch die Geometrie des jeweiligen Bauteils bestimmt und können nicht ohne Vermessung am Bauteil selbst bestimmt werden. In der Praxis wird diesbezüglich auf ausführliche Tabellenwerke die den ζ-Wert (Widerstandsbeiwert) der jeweils verbauten Komponenten enthält zurückgegriffen. Die für die Modellierung der TWI verwendeten ζ-Werte, welche nicht vollständig von TRNSYS-TUD bereitgestellt werden können sind in der Tab. 6-4 aufgeführt.

Entsprechend der in der TWI verbauten Lösung zum modernen hydraulischen Abgleich musste die Steuerung der diesbezüglich verwendeten Zirkulationsventile entsprechend abgebildet werden. Es sei hier darauf hingewiesen, dass, stellvertretend für alle modernen Arten des hydraulischen Abgleichs nur der thermoelektrische Abgleich realisiert wurde. Um für diese Lösung ein entsprechendes Modell zu realisieren, bedurfte es der Bestimmung der Durchflusskoeffizienten bei maximalem (Kv_s) und minimalem (Kv_0) Öffnungsgrad der Zirkulationsventile. Hierbei konnte auf die Vorarbeit von Max Pham [Pham14] zurückgegriffen werden. Im Rahmen seines Großen Beleges an der Professur für Gebäudeenergietechnik und Wärmeversorgung hatte Herr Pham die entsprechenden Zirkulationsventile bewertet und den Maximalen Kv-Wert mit Kv_s = 1672 L/h und den minimalen Kv-Wert mit Kv_0 = 20 L/h bestimmt. Diese Werte wurden für die Modellierung der Zirkulationsventile verwendet. Im Fall des manuellen hydraulischen Abgleichs wurden der Durchfluss im Modell anlog zur realen Versuchsdurchführung auf maximal 1,5 L/h im zapfungsfreien Betrieb begrenzt. Diese Begrenzung wurde dabei im Rahmen einer Testsimulation durch gezielte Manipulation des Ventilhubs umgesetzt. Es ist hierbei jedoch festzustellen, dass die obere Grenze von 1,5 L/h innerhalb des Modells zeitinvariant ist.

Tab. 6-4 Übersicht der verwendeten ζ-Werte (Druckverlustbeiwerte) ausgewählter Komponenten

		ζ-Wert				
Rohrdimension [DN]		**12**	**15**	**20**	**25**	**32**
Außendurchmesser [mm]		**16**	**20**	**26**	**32**	**40**
TWI Komponente						
Winkel	45 °	-	0,7	0,6	0,6	0,6
	90 °	2,1	1,9	1,8	1,7	1,6
Bogen	45 °	0,1	0,2	0,2	0,3	0,3
	90 °	0,2	0,3	0,3	0,4	0,4
T-Stück	Durchgang	0,5	0,5	0,3	0,2	0,3
	Abzweig	2,4	2,1	1,9	1,8	1,7
	Zusammenführung	1	1	1	1	1
Sensoren	-	0,5	0,5	0,3	0,2	0,3
Ventile	-	2,1	2,1	1,7	1,5	-
Legionellen Entnahme	-	2,1	2,1	1,7	1,5	-

In der Realität gilt dies jedoch nicht, denn hier weichen die Ventile mit fortschreitender Betriebsdauer von der eingestellten Obergrenze ab. Somit ergibt sich hier in Abhängigkeit des Zeitraumes, welcher seit dem letzten manuellen Abgleich vergangen ist, eine potentielle Abweichung zwischen Modell und Realität. Sofern der besagte Zeitraum jedoch klein genug (wenige Wochen bis einzelne Monate) bleibt, ist der durch diese Abweichung induzierte Fehler vernachlässigbar.

Die vorletzte, im Rahmen der Modellierung der TWI gesondert zu betrachtende Komponente ist die Zirkulationspumpe. Bei der in der TWI installierten Zirkulationspumpe handelt es sich um eine Wilo-Star-Z 25/6-3 [Wilo18] deren Pumpenkennlinie dem entsprechenden Datenblatt entnommen wurde. Die Kennlinie wurde entsprechend analysiert und anhand eines Polynoms zweiten Grades

$$\Delta p_2\,(x) = 1916\ \mathrm{Pa}\left(\frac{h}{m^3}\right)^2 x^2 - 18545\ \mathrm{Pa}\ \frac{h}{m^3}\ x + 45294\ Pa$$

im Modell der TWI berücksichtigt. Hierbei repräsentiert das Argument x, analog zur Abb. 6-3, den aktuellen Massestrom in m^3/h und Δp_2 die diesbezüglich zu erwartende Druckerhöhung, welche im vorliegenden Modell in Pascal angegeben und verwendet wird.

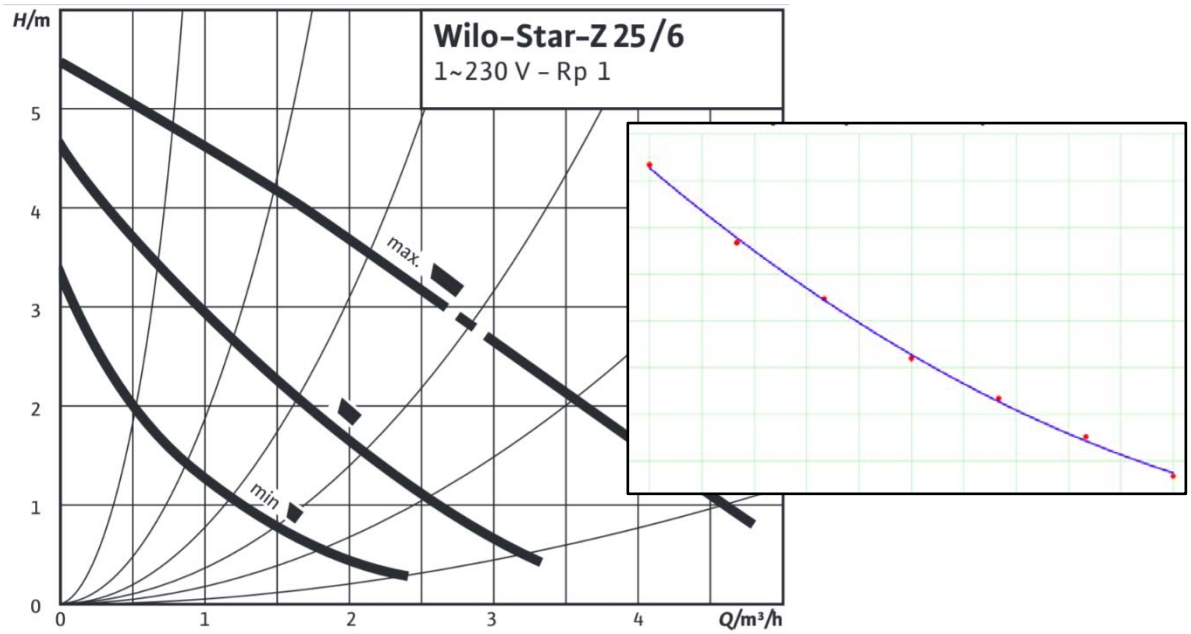


Abb. 6-3 Modellierung der Pumpenkennlinie des Betriebsmodus 2 (mittlere Kennlinie) durch ein Polynom zweiten Grades. Pumpenkennlinie vom Hersteller (links) und Interpolierte Pumpenkennlinie (rechts)

Zum Abschluss bedurfte es der korrekten Implementierung des Zapfverhaltens an den 36 Auslaufarmaturen der TWI. Hierfür wurde zum einen ein Mechanismus ins Modell integriert, welcher sicherstellt, dass zu keinem Zeitpunkt der maximal erlaubte, Entnahmestellen-abhängige Massestrom von 5 bzw. 10 L/h überschritten wird. Zum anderen wurde das zu Grunde liegende Maschengleichungssystem so modifiziert, dass die hydraulischen Widerstände (b) im zapfungsfreien Zeitraum ihren Maximalwert (10^{16}) annehmen. Es gilt hierbei:

$$\Delta p_{Gesamt} = b(\rho \dot{V})^2 \;\Rightarrow\; \dot{V} = \sqrt{\Delta p_{Gesamt}/\rho^2\, b} \;\; mit \;\; \lim_{b\to\infty} \dot{V} = 0\,.$$

Wird demnach der hydraulische Wiederstand am jeweiligen Auslauf nahezu unendlich groß gewählt, geht der dort auftretende Volumenstrom ($\dot{V}$) gegen Null, sodass ein auslaufen, das heißt eine Zapfung, an der jeweils betrachteten Armatur verhindert wird. Es sei hierbei jedoch darauf hingewiesen, dass bei diesem Vorgehen ein minimaler Restvolumenstrom an allen Armaturen bestehen bleibt. Dieser Restvolumenstrom, im Folgenden Sickervolumenstrom genannt, beträgt wenige Milliliter pro Tag. Da über den Tag verteilt insgesamt 2788 Liter gezapft werden, beträgt das Verhältnis zwischen Zapfung und akkumuliertem Sickervolumenstrom zirka 10.000:1 und kann somit vernachlässigt werden.

Die Umsetzung der bis hierher beschriebenen Modellierungsansätze erfolgte an Hand des Pre-Processing-Tools TestNetz [Perschk10], welches die Möglichkeit bietet, beliebige TWI auf grafischem Wege zu erstellen. Während der Erstellung der gewünschten TWI wird dabei jede einzelne Komponente des Trinkwassernetzes bzgl. ihrer geometrischen und physikalischen Eigenschaften spezifiziert und in das Gesamtmodell integriert. Das Resultat dieses Prozesses ist zum einen das dreidimensionale Modell der TWI und zum anderen das vollständige Simulations-Dek, welches zwingend von TRNSYS-TUD zur Durchführung der eigentlichen Simulation benötigt wird. Es sei hierbei darauf hingewiesen, dass

die dreidimensionale Repräsentation der TWI nicht nur von ästhetischem Wert ist. Während der gesamten Phase der Modellerstellung und auch in der Frühphase der Simulation war die 3D Darstellung von sehr hohem Wert bzgl. der Identifikation von Fehlern auf der einen und bzgl. dem Verständnis der thermohydraulischen Zusammenhänge auf der anderen Seite.

6.4 Parametrierung und Validierung mittels Versuchsergebnissen

6.4.1 Ausgangssituation

Nachdem der Versuchsstand, das heißt die gesamte TWI, vollständig in ein virtuelles Modell überführt wurde, galt es dieses an Hand der real erfassten Versuchsreihen zu validieren. In diesem Abschnitt werden sämtliche hierfür relevanten Faktoren und die gemachten Beobachtungen aufgeführt und diskutiert. Darauf aufbauend wird am Ende dieses Abschnitts das gesamte Modell noch einmal bzgl. dessen Genauigkeit bewertet, so dass die im Folgenden Abschnitt aufgeführten Ergebnisse korrekt bewertet und in Relation zum realen Versuchstand gesetzt werden können.

Die modellierte TWI kann nur mit der realen TWI verglichen werden, wenn diese auf den gleichen Eingangsparametern beruht. Die detaillierte Analyse des realen Versuchstandes zeigt, dass hierfür zum einen die vier Parameter: Einspeisedruck ($P_{XLC01BP001}$), Temperatur am Hausanschluss Trinkwasser kalt ($\vartheta_{XLC01BT001}=\vartheta_{TWK,HA}$), die Temperatur der Umgebenden Raumluft ($\vartheta_{XLF01BT003}=\vartheta_{Raum}$) und die Temperatur am Ausgang des Trinkwassererwärmers ($\vartheta_{XLA01BT001}=\vartheta_{TWW,TWE}$) und zum anderen die hinterlegten Zapfzyklen benötigt werden. Alle anderen Größen lassen sich direkt von den vier Eingangsparametern ableiten. Auf Grund der im Rahmen der Modellierung zwingend zu erwartenden Modellierungsfehler (siehe Abschnitt 6.3), weichen die abgeleiteten bzw. simulierten Werte zwingend von den gemessenen Werten ab. Diese Abweichung von der Realität hängt hierbei jedoch nicht nur vom eingangs beschriebenen Modellierungsfehler, sondern auch von der Qualität der verwendeten Messwerte ab. Eben diese Qualität wird im folgenden Abschnitt genauer analysiert. Die hierbei präsentierten Messwerte stammen dabei vollständig aus der DATA[6] Messdatenbank. Um Verwechslungen mit simulierten Werten zu vermeiden werden im Folgenden sämtliche Kenngrößen die einen realen Wert (gemessen) repräsentieren mit dem Index *Data* und alle Kenngrößen die einen simulierten Wert (berechnet) repräsentieren mit dem Index *Sim* versehen. Alle im Folgenden beschriebenen und diskutierten Sensoren/Messwerte sind vollständig im entsprechenden R&I-Schema (Anhang 15.13) aufgeführt und verortet. Es wird allgemein empfohlen dieses Schaltbild auszudrucken um somit rationell die Lage der Sensorik in Messung (Index $_{*,Data}$) und Simulation (Index $_{*,Sim}$) verfolgen zu können.

6.4.2 Vorbetrachtungen

Bei der Bewertung der Qualität der real erfassten Messwerte spielt insbesondere die Verfügbarkeit und die Güte der Messwerte sowie die Lage der einzelnen Messfühler eine besondere Rolle. Es zeigt sich zum Beispiel, dass die Messwerte des am nächsten am Speicher gelegenen Temperatursensors im Trinkwarmwasser (XLA01BT001) im Mittel um ein Grad niedriger ausfallen als dies für alle nachgeschalteten Sensoren (XLA10BT001 bzw. XLA10BT003) der Fall ist (Siehe Abb. 6-4).

[6] DATA – Professur eigene Messdatenbank auf Basis von SQL.

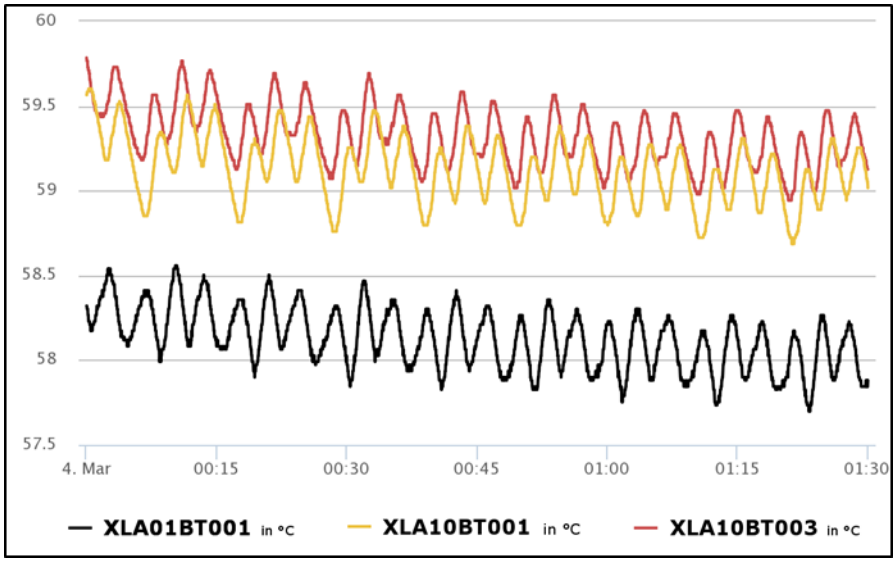


Abb. 6-4 Messwerte (Data) des Sensors XLA01BT001 im Vergleich zu XLA10BT001 bzw. XLA10BT003 in °C am Beispiel des Versuchs 2_60_oT__B. Die Versuchsreihen 1_XX_XX__B und 2__XX_XX__B zeigen einen analogen Offset.

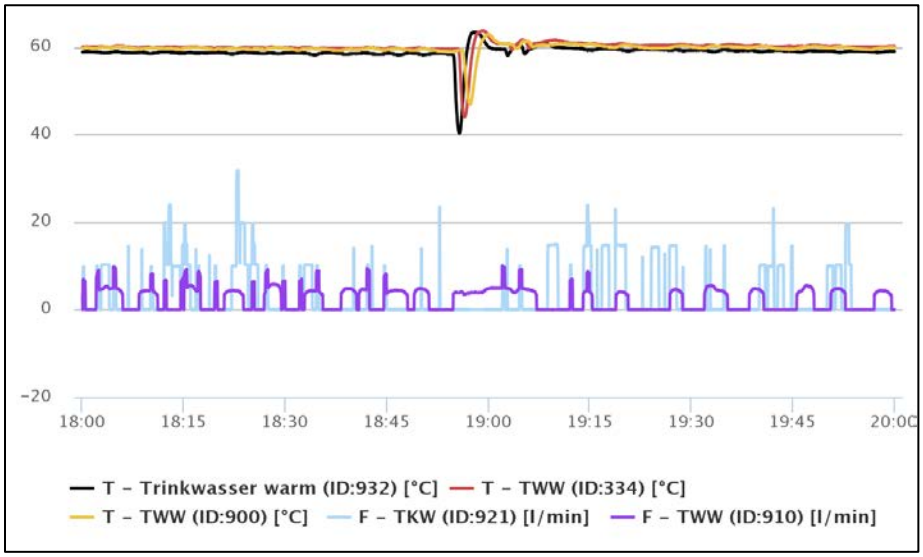


Abb. 6-5 Beispiel für eine starke Schwankung (Ausreißer) in den Messwerten (Data) der Sensoren XLA01BT001 bzw. XLA10BT001 und XLA10BT003. Die Temperaturschwankung entsteht hierbei direkt nach einer Zapfung (XLC01BF001 und XLA10BF001), welche nicht sofort vom Trinkwassererwärmer kompensiert werden kann.

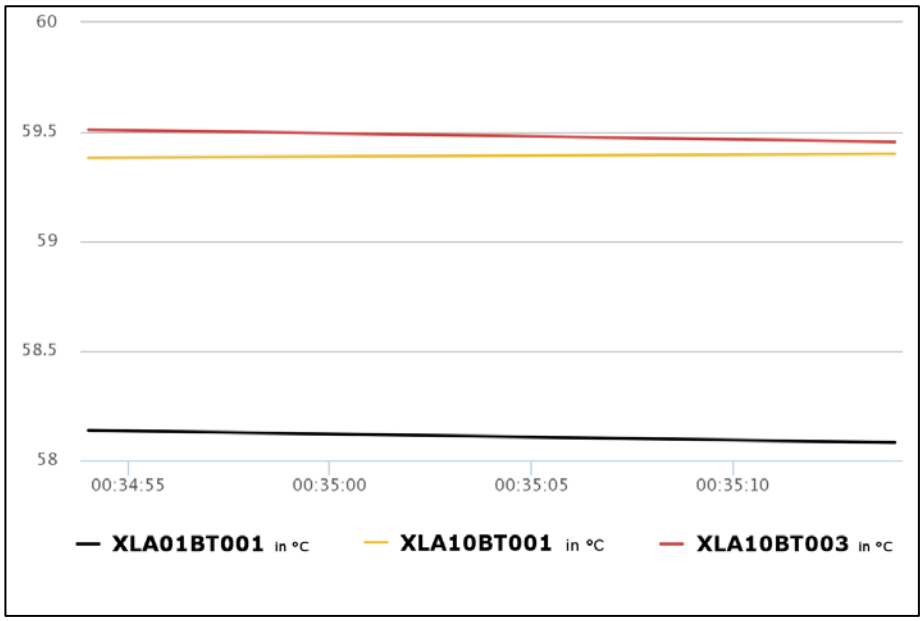


Abb. 6-6 Beispiel für gelegentlich nicht vorhandene Messwerte der Sensoren XLA01BT001 bzw. XLA10BT001 und XLA10BT003. Das systembedingte Zeitfenster für nicht vorhandene Messwerte beträgt im Mittel circa 10 Messwerte alle 6 Stunden. Fehlenden Messwerte wurden linear interpoliert.

Da die weiter vom TWE entfernt gemessene Temperatur jedoch nicht größer als die direkt am Ausgang des TWE gemessene sein kann, wurde deshalb der Messwert des Sensors (XLA10BT001) als reale Speicheraustrittstemperatur ($\vartheta_{TWW,TWE}$) für den Vergleich mit der Simulation ausgewählt. Da der Sensor XLA10BT001 jedoch etwas weiter vom Trinkwassererwärmer entfernt ist (ca. 4 m Lauflänge) gilt somit $\vartheta_{TWW,Sim} < \vartheta_{TWW,Data}$. Anhand der an den Sensoren XLA10BT001-3 erfassten Messwerte lässt sich die hierbei auftretende Ungenauigkeit mit weniger als einem Kelvin abschätzen. Diese Unterbewertung der realen Temperatur am Trinkwassererwärmer muss jedoch bei der Interpretation der folgenden Vergleiche entsprechend berücksichtigt werden.

Des Weiteren zeigt die Analyse der Messwerte, dass gelegentlich vereinzelte Unstetigkeiten in Form von Ausreißern (siehe Abb. 6-5) und in Form von nicht vorhandenen Messwerten (siehe Abb. 6-6) auftreten. Erstere treten hierbei immer in Verbindung mit einer Zapfung auf und zwar genau dann, wenn eine Zapfung dazu führt, dass der Speicher des TWE so weit entladen wird, dass dieser das angestrebte Temperaturniveau am Ausgang (60 °C, 55 °C, 50 °C bzw. 45 °C) nicht halten kann. Hierbei kommt es in Ausnahmefällen zu einem Absinken der Temperatur am Ausgang des TWE von bis zu 30 °C und mehr. Diese in sehr kurzer Zeit auftretenden Temperaturschwankungen erhöhen den numerischen Anspruch an die Simulation zwar deutlich, werden von dieser aber dennoch präzise behandelt. Die Peaks in den, den „Grundvarianten“ (Tab. 6-5) zugeordneten Diagrammen sind demnach nicht numerischer Natur und kein Indiz für Fehler in der Simulation.

Das Problem der zum Teil nicht vorhandenen Messwerte betrifft im Mittel jeweils etwa vierzig Messwerte pro Versuchstag. Diese Anzahl ist hierbei systembedingt und im Vergleich mit den 43.200 Messwerten, die pro Versuchstag maximal erfasst werden können, marginal. Allein im Rahmen der Versuchsdurchführung 1_60__T__B traten deutlich mehr fehlende Messwerte als dies systembedingt zu erwarten war auf. Da die Simulation keine

fehlenden Messwerte in den Eingangsgrößen duldet, wurden alle fehlenden Messwerte linear Interpoliert.

Abb. 6-6 zeigt beispielhaft die interpolierten Werte für die Temperatursensoren XLA01BT001, XLA10BT001 und XLA10BT003 für die Versuchsreihe 2_60__T__B um circa 0:35 Uhr morgens. Dieses Zeitfenster tritt etwa alle 6 Stunden auf. Da in diesem Zeitraum nie eine Zapfung stattfindet sind in diesem Zeitintervall auch keine Unstetigkeiten, wie diese etwa in Abb. 6-5 zu sehen sind, in den realen Messwerten zu erwarten. Demzufolge ist der durch die Interpolation generierte Fehler als nicht relevant anzusehen.

Eine weitere potentielle Fehlerquelle beim Vergleich der realen und simulierten Messwerte ist die Position der Sensoren zur Erfassung der Raumluft innerhalb der Einhausung. Beide Sensoren XLF01BT001 und XLF01BT002 sind nahezu auf der gleichen Höhe der TWI (jeweils auf Höhe der Wohnung 5) angebracht. Dies hat zur Folge, dass bei aktiver Trennwand die reale mittlere Raumtemperatur auf beiden Kanalseiten unterhalb des jeweils gemessenen Wertes liegen dürfte und die Werte der beiden genannten Sensoren eher als Maximalwert zu interpretieren sind. Dementgegen repräsentieren die mit Hilfe der Simulation erzeugten Temperaturwerte der Sensoren XLF01BT001 und -002 wirkliche Mittelwerte für die gesamte Einhausung (Kanal ohne Trennwand) bzw. für die warme und kalte Zone der Einhausung (Kanal mit Trennwand). Demnach gilt im direkten Vergleich

$$\vartheta_{\mathrm{XLF01BT001,Sim}} \leq \vartheta_{\mathrm{XLF01BT001,Data}} \text{ und } \vartheta_{\mathrm{XLF01BT002,Sim}} \leq \vartheta_{\mathrm{XLF01BT002,Data}}.$$

Eine zusätzliche Unsicherheit beim Vergleich der modellierten mit der realen TWI liefert der Sachverhalt, dass die beiden Raumtemperatursensoren auch bei nicht vorhandener Trennwand unterschiedliche Werte liefern. Der direkte Vergleich zeigt hier im Mittel einen Unterschied von circa 0,3 K bzw. maximal 0,5 K. Es gilt dabei immer

$$\vartheta_{\mathrm{XLF01BT002,Data}} \leq \vartheta_{\mathrm{XLF01BT001,Data}}.$$

Da beide Sensoren baugleich sind und deren Werte somit gleich gut geeignet sind, werden für den Vergleich mit der Simulation (ohne Trennwand) die Messwerte von beiden Sensoren gemittelt. Die Simulation hingegen generiert hier nur eine gemittelte Raumtemperatur welcher kein realer Sensor zugeordnet werden kann, diese Raumtemperatur wird im Folgenden mit XLF01BV001 (BV – virtuelles Bauteil) bezeichnet. Es gilt analog zum Kanal mit Trennwand

$$\vartheta_{\mathrm{XLF01BV001,Sim}} \leq {}^{1}/_{2}\,(\vartheta_{\mathrm{XLF01BT001,Data}} + \vartheta_{\mathrm{XLF01BT002,Data}}).$$

Abschließend ist noch festzustellen, dass die in der gesamten TWI installierte Dämmung an mehreren Stellen von Rohrschellen unterbrochen oder auf Grund des raumgreifenden ITEM Gestells in ihrer Normstärke reduziert wurde. Innerhalb der modellierten TWI wurden diese Störungen jedoch nicht abgebildet, so dass hier mit großer Wahrscheinlichkeit Abweichungen zu erwarten sind. Der Sachverhalt, dass in der gesamten TWI eine Vielzahl dieser Störungen existieren, führt zu der Annahme, dass die modellierte TWI merklich weniger Wärmeverluste generiert als dies in der realen TWI der Fall ist. Demnach gilt:

$$\vartheta_{\mathrm{XLA1*BT***,Sim}} > \vartheta_{\mathrm{XLA1*BT**,Data}} \text{ und } \vartheta_{\mathrm{XLC1*BT***,Sim}} < \vartheta_{\mathrm{XLC1*BT**,Data}}.$$

Unabhängig von den bisher beschriebenen Fehlerquellen gilt für alle real erfassten Messwerte, dass diese einer gewissen Fehlertoleranz unterliegen. Die in der realen TWI verwendeten Temperatursensoren (PT-100) besitzen alle die Genauigkeitsklasse B (Definition der Genauigkeitsklassen: DIN EN 60751), das bedeutet, die maximal mögliche Abweichung beträgt

$$dT = \pm (0{,}30\,K + 0{,}005 \cdot T).$$

Im avisierten Bereich von 0 – 70 °C ergibt sich somit eine potentiell mögliche Abweichung von 1,6 bis 2,1 Kelvin, welche bei den im Folgenden Abschnitt präsentierten Vergleichen immer mit bedacht werden sollte.

6.4.3 Vergleich der gemessenen und simulierten Ergebnisse

Hinsichtlich der in der Realität durchgeführten Versuchsreihen (siehe Tab. 5-7), welche in Kapitel 5 bereits ausführlich erläutert wurden, bezieht sich die hier aufgeführte Erläuterung nur auf die Versuchsvarianten bei denen wenigstens eine äußere Einhausung vorhanden war. Zusätzlich beschränkt sich die folgende Diskussion nur auf die Versuchsreihen die mit der Kodierung (siehe Anhang 15.13) 1_xx_xx_xx bzw. 2_xx_xx_xx versehen sind. Diese Restriktion resultiert daraus, dass nur der händische hydraulische Abgleich (Standard-Ansatz) und der thermoelektrische hydraulische Abgleich (Ansatz – neue Methoden Zirkulationsabgleich) modelliert wurden. Es sei hier explizit darauf hingewiesen, dass sich die beiden nicht berücksichtigten Ansätze (thermohydraulisch und Begleitheizband), welche in Kapitel 5 unter der Kodierung 3_xx_xx_xx und 4_xx_xx_xx aufgeführt sind, analog zu den beiden erstgenannten Ansätzen modellieren lassen. Zur besseren Übersicht sind die für die Validierung verwendeten Versuchsreihen noch einmal explizit in Tab. 6-5 aufgeführt.

Tab. 6-5 Übersicht der für die Validierung der Simulation genutzten Messreihen

Zur Validierung berücksichtigte Versuchsreihen (gemessen, 24h Laufzeit, 2s Zeitschrittweite)		
Kodierung	**Bemerkung**	**Datum**
2_60_oT__B	Einziger Versuch mit Beplankung und ohne Trennwand	04.03.2016
2_60__T__B	Alle Temperatur-Niveaus übergreifende Versuche mit thermoelektrischem, hydraulischem Abgleich	31.03.2016
2_55__T__B		09.06.2016
2_50__T__B		29.09.2016
2_45__T__B		26.01.2017
1_60__T__B	Alle Temperatur-Niveaus übergreifende Versuche mit händischem, hydraulischem Abgleich	26.05.2016
1_55__T__B		12.07.2016
1_50__T__B		13.09.2016
1_45__T__B		13.12.2016

Alle im Folgenden aufgezeigten Vergleiche beruhen auf Datenreihen die in der globalen Datenbank (GDB – siehe auch Abb. 6-7) abgelegt sind. Alle Versuchsreihen die zur Validierung der modellierten TWI durchgeführt wurden sind hierbei unter dem Punkt Simulation und dort unter Grundvarianten abgelegt. Hierbei ist jeder einzelnen Versuchsreihe (siehe Tab. 6-5) ein separater Ordner zugeordnet, welcher jeweils fünfzehn statische (vorberechnete *png* Plots, siehe Anhang 15.13) sowie fünfzehn interaktive Diagramme (*highchart* Plots) enthält, zugeordnet. Die unterschiedlichen Diagramme stellen hierbei die Mess- und Simulationswerte ausgewählter Sensoren gegenüber. Die Beschränkung auf einzelne Sensoren dient dabei allein der besseren Übersicht. Zum Beispiel wird die Entwicklung der Temperaturen TWW und TWK innerhalb einzelner Wohnungen nur an Hand der nächstgelegenen (XL*11BT102) und der entferntesten Wohnung (XL*13BT602) belegt. Für die Ergebnisse der nicht gezeigten, logisch korrelierenden Sensoren gelten, sofern nicht explizit erwähnt, ähnliche Ergebnisse bzw. Tendenzen.

Abb. 6-7 Ort der Datenablage aller Simulationsdaten in der *Globalen Datenbank*

Tab. 6-6 fasst den Inhalt aller in der GDB dargestellten Diagramme zusammen. Sofern in der Legende einzelner Diagramme keine Unterscheidung bzgl. realem ($_{*,Data}$) oder modelliertem ($_{*,Sim}$) Sensor vorgenommen wird, handelt es sich um Sensoren deren Werte in der realen und in der modellierten TWI exakt übereinstimmen. Dies umfasst z. B. exakt die Werte, die zu Beginn dieses Abschnitts (6.4.1) als Eingangsparameter identifiziert wurden.

Die Gegenüberstellung der realen und modellierten TWI erfolgt anhand der in Tab. 6-6 benannten Diagramme und in der vorgegebenen Reihenfolge. Die Diagramme 1 bis 8 dienen hierbei in erster Linie als Plausibilitätstest, ob das in der realen TWI hinterlegte Zapfschema und diesbezüglich auch der sich während einer Zapfung einstellende Volumenstrom korrekt im Model hinterlegt wurde. Der Vergleich mit den bereits in Kapitel 5 angegebenen Volumenströmen zeigt, dass die Volumenströme für die einzelnen Wohnungen und auch am TWE bzw. am Hausanschluss denen der Realität gleichen. Da die modellierte TWI die Möglichkeit bietet, an beliebigen Stellen Simulationswerte auszugeben, zeigen die Diagramme 1-6 zusätzlich die Volumenströme die sich an den einzelnen Armaturen innerhalb einer Wohnung einstellen. Dies erlaubt einen detaillierten Überblick und eine bessere Zuordnung bzgl. der einzelnen Zapfungen.

Tab. 6-6 Überblick aller in der GDB unter dem Punkt „Grundvarianten“ dargestellten Diagramme (siehe Anhang 15.14)

Nummer	Inhalt	Sensoren	Bemerkung
1-6	Alle jeweils in einer Wohnung auftretenden Volumenströme in L/min	XL*1*BF*01	Gemessene und simulierte Werte stimmen exakt überein, da diese direkt an die Simulation übergeben werden.
7	Wohnungsübergreifende Übersicht der während einer Zapfung im TWW auftretenden Volumenströme in L/min	XLA1*BF*01	
8	Wohnungsübergreifende Übersicht der während einer Zapfung im TWW auftretenden Volumenströme in L/min	XLC1*BF*01	

Nummer	Inhalt	Sensoren	Bemerkung
9	Gegenüberstellung der , den jeweiligen Versuch, dominierenden Raum- und Fluidtemperaturen in °C	XLF01BT00* XL*01BT001	Dient der Validierung der einzelnen Raumtemperaturen innerhalb der Einhausung
10 -12	Detailuntersuchung der Zirkulationsventile – Hub, Volumenstrom in L/min und Temperatur in °C	XLB1*BF001 XLB1*BT002	Dient der Funktionsprüfung der Zirkulationsventile
13	Übersicht der Temperaturverteilung in der Zirkulation in °C	XLA01BT001 XLA10BT00* XLB**BT00*	Dient der Validierung der jeweils umgesetzten Art des hydraulischen Abgleichs
14	Gegenüberstellung der Zapfstellentemperatur im TWW in °C	XLA01BT001 XLA11BT102 XLA13BT602 XLF01BT00*	Dient der Validierung der TWW Temperaturen in der Nähe der nächstgelegenen und entferntesten Zapfstelle
15	Gegenüberstellung der Zapfstellentemperatur im TWK in °C	XLC01BT001 XLC11BT102 XLC13BT602 XLF01BT00*	Dient der Validierung der TWK Temperaturen in der Nähe der nächstgelegenen und entferntesten Zapfstelle

Diagramm 9 dient dem Vergleich der sich einstellenden Kanaltemperaturen. Es zeigt sich, dass – wie Eingangs bereits bei den Vorüberlegungen diskutiert – die simulierten Kanaltemperaturen im Mittel (Tab. 6-7) geringer ausfallen als dies bei den gemessenen Kanaltemperaturen der Fall ist. Sofern der Kanal mit einer Trennwand (*_**_T_**) ausgestattet ist, zeigen sich jedoch deutliche Unterschiede bei den Temperaturen in den einzelnen Kanalzonen. Während die simulierte Raumtemperatur im Kanal-TWW im Mittel nur um circa 0,3 Kelvin von der gemessenen Raumtemperatur abweicht, ergibt sich für den Vergleich der Rautemperatur im Kanal-TWK bereits eine mittlere Abweichung von 1,5 Kelvin. Da die mittlere Abweichung der Raumtemperatur im Kanal ohne Trennwand (2_60__T__B) auch nur um 0,3 Kelvin von der gemessenen Raumtemperatur abweicht, liegt der Verdacht nahe, dass die starke Unterbewertung der Temperatur im Kanal-TWK auf die ideal isolierte Trennwand (siehe Abschnitt 6.4.2) zurückführen ist. Weiterführende Untersuchen, bei welchen der Lambda-Wert der EPS-Dämmung schrittweise erhöht wurde (siehe Abb. 6-8) belegen die Korrektheit dieser Annahme. Die zusätzlich angegebene Maximal- und Minimalwerte dienen nur der groben Orientierung. Da diese anhand der Differenz eines jeden Zeitschrittes bestimmt werden und somit sehr anfällig für Ausreißer bzw. Unstetigkeiten sind (siehe Abschnitt 6.4.2).

Tab. 6-7 Gegenüberstellung und Vergleich der gemessenen und simulierten Kanaltemperaturen

Relative Abweichung der Kanaltemperaturen (gemessen vs. simuliert, 24h Laufzeit, 2s Zeitschrittweite)											
Kodierung	**gemessen**			**modelliert**		**gemessen - modelliert**					
	$\bar{\vartheta}_{XLF01VT001}$	$\bar{\vartheta}_{XLF01BT001}$	$\bar{\vartheta}_{XLF01BT002}$	$\bar{\vartheta}_{XLF01BT001}$	$\bar{\vartheta}_{XLF01BT002}$	∅	Max	Min	∅	Max	Min
2_60_oT__B	29,1	-	-	28,9		0,2	1,2	-0,7	0,2	1,2	-0,7
2_60__T__B	-	31,8	24,9	31,6	23,0	0,2	0,9	-0,4	1,9	2,6	1,4
2_55__T__B	-	32,5	27,1	31,8	25,3	0,7	1,8	-0,1	1,8	3,0	1,0
2_50__T__B	-	31,1	26,7	30,8	25,7	0,3	0,9	-0,1	1,0	1,4	0,6
2_45__T__B	-	27,6	23,2	27,6	21,8	0,0	0,4	-0,6	1,4	2,3	0,5
1_60__T__B	-	33,6	27,1	33,4	25,3	0,2	1,5	-0,2	1,8	2,8	1,1
1_55__T__B	-	35,0	30,0	34,7	28,4	0,3	1,2	-0,2	1,6	2,7	0,8
1_50__T__B	-	33,8	29,6	34,0	28,9	-0,2	0,8	-0,7	0,7	1,8	0,0
1_45__T__B	-	28,8	24,8	29,0	23,6	-0,2	0,4	-0,7	1,2	1,9	0,7
∅ (*___T__B)**	**-**	**-**	**-**	**-**	**-**	**0,2**	**1,0**	**-0,4**	**1,4**	**2,3**	**0,8**

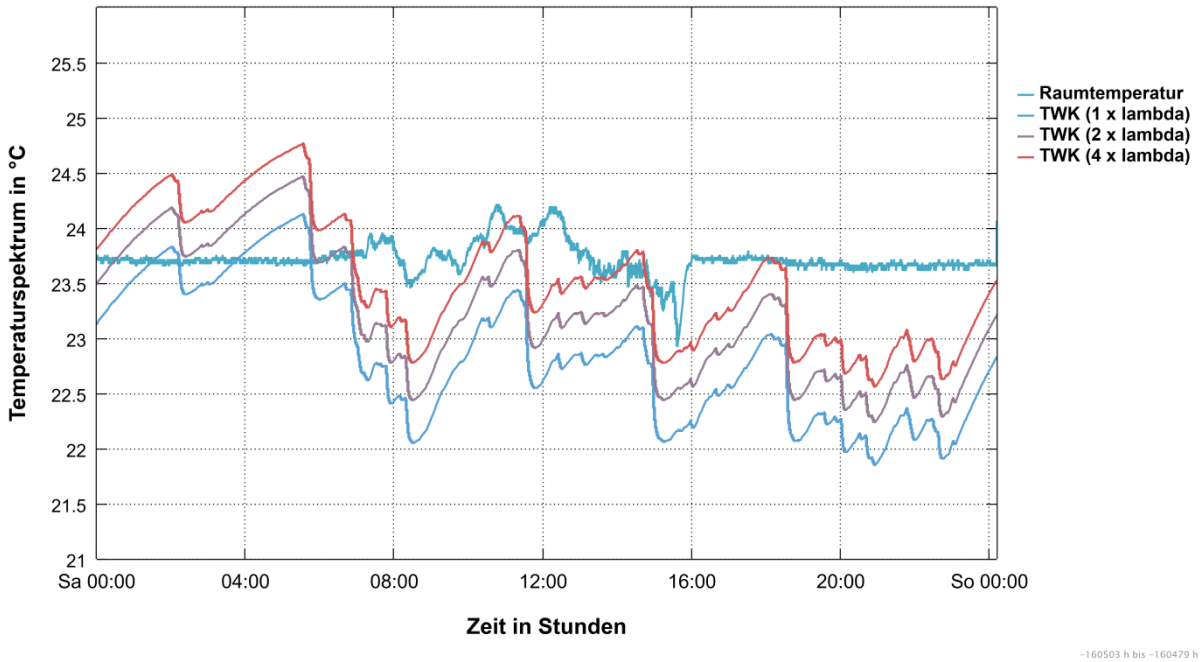


Abb. 6-8 Entwicklung der Kanaltemperatur in der Zone TWK in Abhängigkeit des Lambdawertes der EPS-Trennwand. Größere Lambda-Werte führen zu einer höheren Temperatur in der Kanalzone.

Die Diagramme 10-13 dienen der Bewertung der modellierten Zirkulationsventile. Hierbei ist klar die unterschiedliche Funktionsweise der beiden betrachteten Zirkulationsventile zu erkennen. Während die Zirkulationsventile im Falle des thermoelektrischen hydraulischen Abgleichs (2_**_**_**) permanent geregelt werden, das heißt, dass deren Hub (Diagramm 10) immer wieder Temperatur bedingt angepasst wird, erfolgt im Falle des manuellen hydraulischen Abgleichs (1_**_**_**) nur eine initiale Anpassung. Der initiale Hub ist hierbei so eingestellt das sich ein Volumenstrom von 1,5 L/min in der zapfungsfreien Zeit ergibt. Im thermoelektrischen Anwendungsfall variiert der Volumenstrom jedoch in Abhängigkeit vom Hub (Diagramm 11). Dies führt dazu, dass sich im ersten Fall ein hierarchisches und im zweiten Fall ein dynamisches Temperaturniveau (Diagramm 12) innerhalb der drei Zirkulationsstränge einstellt. Der direkte Vergleich mit den gemessene Temperaturwerten zeigt in beiden Fällen nur geringe Abweichungen. Insbesondere die im thermoelektrischen Anwendungsfall korrekt abgebildete zyklische Variation der einzelnen Strangtemperaturen (XLB1*BT002) belegt die Güte der Simulation.

Diagramm 14 stellt den an ausgewählten Zapfstellen im TWK gemessenen und simulierten Temperaturverlauf gegenüber. Der Fokus liegt hierbei auf dem Temperaturverlauf an der nächstgelegensten (XLC11BT102) und an der am weitesten entfernten (XLC13BT602) Zapfstelle. Zur besseren Orientierung und Einordnung der Ergebnisse wird zusätzlich die jeweils vorliegende Kanaltemperatur (XLF01BT001/2 bzw. XLF01BV001), die Einspeisetemperatur am Hausanschluss (XLC01BT001) und die Umgebungstemperatur (XLF01BT003) angegeben. Bei genauerer Analyse zeigt sich, dass der generelle Verlauf der simulierten Zapfstellentemperatur mit dem der gemessenen übereinstimmt. Das heißt, jede Erwärmung bzw. Abkühlung findet zur gleichen Zeit statt und die Relationen der Amplituden in unterschiedlichen Erwärmungsphasen stimmen überein. Insgesamt liegt die Temperatur an der am weitesten entfernte Zapfstelle auf einem deutlich höheren Niveau als dies für die Temperatur an der nächstgelegenen Zapfstelle der Fall ist. Im Vergleich mit den an den einzelnen Zapfstellen tatsächlich gemessenen Temperaturen zeigt sich, dass die simulierten Werte im Mittel um 2-4 Kelvin unterhalb der gemessenen Werte liegen. Diese Unterbewertung der Temperatur im TWK ist hierbei zu einem Teil direkt abhängig von der bereits in Tab. 6-7 geschilderten, im Mittel um 2 Kelvin reduzierten Raumtemperatur in der Kanalzone des TWK (ideal umgesetzte Trennwand in der Simulation). Die über diesen Effekt hinausgehende Abweichung zum gemessenen Mittelwert lässt sich, wie bereits in Abschnitt 6.4.2 durch die idealisierte Rohrleitungsdämmung innerhalb der modellierten TWI erklären. Beleg hierfür ist auch die Tendenz, das die Abweichung der Zapfstellen die weiter entfernt vom TWE lokalisiert sind, eine sichtlich größere Abweichung vom gemessenen Wert aufzeigen. Entgegen der Darstellung in Tab. 6-7, wurde auf Grund der starken Gradienten (siehe Abb. 6-5) auf die Angabe von maximalen und minimalen Abweichung die innerhalb eines Zeitschritts auftreten können bewusst verzichtet. Die Ergebnisse der Tab. 6-8 belegen deutlich, dass die, im Folgenden Abschnitt präsentierten Ergebnisse (Simulationsstudie) einen Idealzustand darstellen der hinsichtlich der Erwärmung im Trinkwasser (kalt) immer den bestmöglichen Fall wiedergibt. Das bedeutet die Erwärmung in den einzelnen TWK-Strängen wird in der Realität deutlich größer ausfallen.

Diagramm 15 zeigt den gleichen Sachverhalt wie Diagramm 14, jedoch liegt hier der Fokus auf dem Temperaturverlauf an den Zapfstellen im TWW (XLA11BT102 bzw. XLA13BT602). Analog zur Darstellung im TWK werden hier zusätzlich die Kanaltemperaturen und die Umgebungstemperatur angezeigt. Die bzgl. des TWK dargestellte Einspeisetemperatur am Hausanschluss entfällt. Stattdessen wird zusätzlich die Temperatur am Ausgang des TWE (XLA01BT001) dargestellt. Die genauere Analyse zeigt analog zum

TWK, dass der generelle Verlauf der simulierten Zapfstellentemperatur mit dem der gemessenen übereinstimmt.

Tab. 6-8 Gegenüberstellung der relativen Abweichung der gemessenen und simulierten Zapfstellentemperatur (Wohnung 1-6) im Trinkwasser Kalt. Die Mittelwerte (letzte Zeile) beziehen sich nur auf die Versuchsreihen mit Trennwand und dienen dem besseren Vergleich bzgl. des Versuchs ohne Trennwand. Ein positiver Wert belegt hierbei eine geringere Erwärmung in der Simulation.

Relative Abweichung der Zapfstellentemperaturen im TWK in K (gemessen vs. simuliert, 24h Laufzeit, 2s Zeitschrittweite)						
Kodierung	**gemessen – simuliert**					
	$\bar{\vartheta}_{XLC11BT102}$	$\bar{\vartheta}_{XLC12BT202}$	$\bar{\vartheta}_{XLC13BT302}$	$\bar{\vartheta}_{XLC11BT402}$	$\bar{\vartheta}_{XLC12BT502}$	$\bar{\vartheta}_{XLC13BT602}$
2_60_oT__B	1,3	2,2	1,1	3,0	3,3	3,0
2_60__T__B	2,0	2,5	2,5	3,4	3,4	4,3
2_55__T__B	2,1	2,4	2,7	2,9	3,0	3,9
2_50__T__B	1,8	2,0	2,3	2,3	2,6	2,9
2_45__T__B	1,7	2,4	2,6	3,3	3,2	4,2
1_60__T__B	2,1	2,4	2,5	3,2	3,2	3,8
1_55__T__B	2,1	2,4	2,6	2,9	3,0	3,8
1_50__T__B	1,6	2,0	2,0	2,4	2,6	2,9
1_45__T__B	1,4	2,1	2,1	3,0	3,1	3,9
∅ (*_**__T__B)	**1,9**	**2,3**	**2,4**	**2,9**	**3,0**	**3,7**

Tab. 6-9 Gegenüberstellung der relativen Abweichung der gemessenen und simulierten Zapfstellentemperatur (Wohnung 1-6) im Trinkwasser Warm. Die Mittelwerte (letzte Zeile) beziehen sich nur auf die Versuchsreihen mit Trennwand und dienen dem besseren Vergleich bzgl. des Versuchs ohne Trennwand. Ein negativer Wert belegt hierbei eine geringere Abkühlung in der Simulation.

Relative Abweichung der Zapfstellentemperaturen im TWW in K (gemessen vs. simuliert, 24h Laufzeit, 2s Zeitschrittweite)						
Kodierung	**gemessen – simuliert**					
	$\overline{\vartheta}_{XLA11BT102}$	$\overline{\vartheta}_{XLA12BT202}$	$\overline{\vartheta}_{XLA13BT302}$	$\overline{\vartheta}_{XLA11BT402}$	$\overline{\vartheta}_{XLA12BT502}$	$\overline{\vartheta}_{XLA13BT602}$
2_60_oT__B	0,1	-0,4	1,4	-2,8	-0,8	-1,2
2_60__T__B	-0,4	-1,0	0,6	-2,7	-1,0	-1,6
2_55__T__B	-0,1	-0,5	0,8	-2,3	-0,9	-1,4
2_50__T__B	-0,2	-0,6	0,5	-2,4	-0,9	-1,7
2_45__T__B	-0,2	-0,6	0,3	-2,5	-0,9	-1,8
1_60__T__B	-0,4	-0,7	0,5	-2,6	-0,6	-1,6
1_55__T__B	-0,2	-0,6	0,4	-2,5	-1,0	-1,7
1_50__T__B	-0,4	-0,8	-0,1	-2,6	-1,2	-1,9
1_45__T__B	-0,6	-1,0	-0,3	-2,8	-1,3	-2,0
∅(*_**__T__B)	-0,3	-0,7	0,3	-2,5	-1,0	-1,7

Das heißt, jede Erwärmung bzw. Abkühlung findet zur gleichen Zeit statt und die Relationen der Amplituden in unterschiedlichen Erwärmungsphasen stimmen überein. Insgesamt liegt die Temperatur an den höher lokalisierten Zapfstellen (Wohnung 4,5 und 6) auf einem höheren Niveau als dies für die Temperatur an den unteren Zapfstellen (Wohnung 1,2 und 3) der Fall ist. Dieser Niveauunterschied lässt sich hierbei durch zwei Beobachtungen erklären. Zum einen fällt die Kanaltemperatur auf Höhe der oberen Wohnungen in der Realität höher aus und zum anderen ist der Temperatursensor in den unteren Wohnungen/Zapfstellen nahezu doppelt so weit vom zirkulierenden Strang entfernt wie dies bei den unteren Wohnungen der Fall ist. Der Unterschied zwischen den unteren und oberen Zapfstellen ist hierbei in der modellierten TWI stärker ausgeprägt als dies in der Realität der Fall ist. Dies lässt sich wiederum hauptsächlich auf die idealisierte Umsetzung der Wärmedämmung in der modellierten TWI zurückführen. Die in Tab. 6-9 ersichtlichen Abweichungen vom Mittelwert der gemessenen Zapfstellentemperatur resultieren ebenfalls aus der idealisierten Dämmung im Modell.

6.4.4 Simulationsgüte

Der Vergleich der gemessenen und simulierten Ergebnisse zeigt, dass die Simulation die thermohydraulischen Zusammenhänge der realen TWI korrekt abbildet, wobei insbesondere die Abbildung des Zapfverhaltens und des hydraulischen Abgleichs in der Zirkulation besonders präzise erfolgt. Bei der Abbildung der Temperaturen innerhalb der Kanalzone zeigt sich, dass die Simulation die Raumtemperatur in der Zone TWK im Mittel um 1,2 Kelvin unterbewertet, wohingegen die Kanaltemperatur in der Zone TWW und im Anwendungsfall ohne Trennwand nahezu ideal abgebildet wird. An Hand der Faktenlage ist dieser Effekt der ideal umgesetzten Trennwand zuzuschreiben. Die Unterbewertung der Temperatur in der Zone TWK findet sich auch in der Trinkwassertemperatur an der Zapf-

stellen TWK wieder. Die Unterbewertung wird hier zusätzlich durch die idealisiert umgesetzte Wärmedämmung der einzelnen Rohrleitungen verstärkt. Der tatsächliche Wert hängt hierbei von der Entfernung der einzelnen Zapfstelle zum Ausgang des TWE ab. Die mittlere Abweichung beträgt hier 1,3 – 3,0 bzw. 1,9 – 3,7 Kelvin für den Anwendungsfall ohne bzw. mit Trennwand. Da die Unterbewertung der Temperaturen im TWK für beide Trennwandszenarien im Mittel nur um 0,6 Kelvin variiert, ist deren direkter Vergleich im Rahmen der in Abschnitt 6.5 durchgeführten Simulationsstudie gerechtfertigt. Bei der Interpretation der angegebenen Absolutwerte, ist jedoch immer zu beachten, dass diese nur ein theoretisches Minimum darstellen und in der Realität im Mittel um 2-3 Kelvin höher ausfallen.

6.5 Simulationsstudie

6.5.1 Ziele und Grundansatz

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der mit Hilfe der modellierten TWI durchgeführten Simulationsstudie aufgezeigt und diskutiert. Hierfür wird zuerst deren Notwendigkeit und Ziel offengelegt. In Anschluss daran werden Ergebnisse bzgl. des Energiebedarfs der in der Studie betrachteten Varianten offengelegt sowie die unterschiedlichen Faktoren die zu einer Erwärmung im TWK führen betrachtet. Abschließend wird der Einfluss des umgebenden Gebäudes bzw. der Einhausung auf das Trinkwasser untersucht.

Alle im Folgenden betrachteten Auswertungen erfolgen hierbei hauptsächlich auf Basis von Tagesmittelwerten, welche aus Gründen der Übersicht und Vergleichbarkeit in tabellarischer Form dargestellt werden. Parallel hierzu wurde jeder dabei verwendete Datensatz bzw. jede hierbei involvierte Versuchs/Simulationsreihe (im Folgenden auch Variante genannt), analog zum Abschnitt 6.4, in der globalen Datenbank hinterlegt. Generell gilt hierbei, dass alle im Abschnitt 6.5 und 6.6 dargestellten Ergebnisse auf den Varianten des Unterordners *Simulation TWI -> Ergebnisse (Gesamtübersicht) -> 2 Varianten AP7* (siehe Abb. 6-7*)* beruhen. Eine detaillierte Erläuterung der diesbezüglich ausgewählten Varianten erfolgt direkt im nachfolgenden Unterabschnitt (6.5.2 – Untersuchungsmatrix). Die unter *Simulation TWI -> Ergebnisse (Gesamtübersicht) -> 3 Erweiterte Varianten Simulation* aufgeführten Varianten beruhen auf zum Teil kontroversen Parametersettings und dienen dem erweiterten Verständnis als auch der Kontrolle von spezifischen Parameterabhängigkeiten. Es sei diesbezüglich explizit darauf hingewiesen, dass diese Varianten nicht im hier vorliegenden Bericht diskutiert werden und in keiner der folgenden Ergebnisdarstellungen Berücksichtigung finden. Sie sind in diesem Sinne eher als Ergänzung für den interessierten Leser zu verstehen.

Tab. 6-10 Übersicht des jeweils zum Zeitpunkt der einzelnen Versuchsreihen (rechts) vorherrschenden Temperaturniveaus am Ausgang des TWE ($\vartheta_{TWW,TWE}$), im Versuchsraum (ϑ_{Raum}) und am Hausanschluss ($\vartheta_{TWK,HA}$). Alle Temperaturwerte sind Tagesmittelwerte und werden in °C angegeben.

Zur Validierung berücksichtigte Versuchsreihen (gemessen, 24h Laufzeit, 2s Zeitschrittweite)					
Kodierung	**Bemerkung**	**Datum**	$\overline{\vartheta}_{TWW,TWE}$	$\overline{\vartheta}_{Raum}$	$\overline{\vartheta}_{HA}$
2_60_oT__B	Einziger Versuch mit Beplankung und ohne Trennwand	04.03.2016	59,93	23,88	13,52
2_60__T__B	Alle Temperatur-Niveaus übergreifende Versuche mit thermoelektrischem, hydraulischem Abgleich	31.03.2016	59,85	23,72	10,94
2_55__T__B		09.06.2016	55,03	25,40	18,33
2_50__T__B		29.09.2016	50,21	25,50	21,14
2_45__T__B		26.01.2017	45,38	22,93	10,14
1_60__T__B	Alle Temperatur-Niveaus übergreifende Versuche mit händischem, hydraulischem Abgleich	26.05.2016	60,17	25,61	15,04
1_55__T__B		12.07.2016	55,12	28,83	19,84
1_50__T__B		13.09.2016	50,08	29,44	20,89
1_45__T__B		13.12.2016	45,21	24,41	13,45

Die im vorigen Abschnitt betrachteten, real durchgeführten Versuche bieten zwar die Möglichkeit eine potentielle Simulation zu verifizieren, hinsichtlich eines Vergleiches der einzelnen Versuchsreihen untereinander sind diese jedoch, auf Grund der Jahreszeit bedingten Variation der Start- und Randbedingungen, gänzlich ungeeignet.

Tab. 6-10 zeigt für jede der in Abschnitt 6.4 untersuchten Versuchsreihen die mittlere Temperatur am TWE Ausgang ($\vartheta_{TWW,TWE}$), sowie die mittlere Raum- (ϑ_{Raum}) und Hausanschlusstemperatur ($\vartheta_{TWK,HA}$). Hierbei ist deutlich zu erkennen, dass zum einen die Temperatur am Ausgang des TWE leicht vom eigentlich angestrebten Wert abweicht und das zum anderen die Raumtemperatur und insbesondere die Temperatur am Hausanschluss stark variiert. Um verlässliche, versuchsreihenübergreifende Aussagen treffen zu können, bedarf es jedoch konstanter Rahmenbedingungen. Da dies in der Realität nicht zu gewährleisten war bzw. ist, können hier nur mit Hilfe der Simulation verlässliche Aussagen generiert werden. Konkret bedeutet dies, dass die Simulation mit konstanten Werten für die drei genannten Größen auszuführen ist. Die tatsächliche Auswahl konkreter Werte obliegt hierbei jedoch keinen Einschränkungen bzgl. des Wertebereichs, so dass prinzipiell alle vorstellbaren Werte in der Simulation berücksichtigt werden könnten. Hinsichtlich der im Anschluss an jede Simulation durchzuführenden Analyse und Bewertung und dem damit einhergehenden Aufwand, ist es jedoch unabdingbar das Parametersetting auf eine Handvoll von repräsentativen Werten die sogenannte Untersuchungsmatrix zu beschränken.

6.5.2 Untersuchungsmatrix

Im Rahmen des Clustermeetings Simulation, welches am 01.02.2017 in Kassel stattfand, wurde von allen Partnern, die simulationsspezifische Aufgaben bearbeiten, beschlossen, die im Detail zu betrachtende Variantenanzahl auf die in Tab. 6-11 angegebene Parametermenge zu beschränken. Zum einen beruht die konkrete Wahl der Parameter auf der Idee, die innerhalb eines Jahres auftretenden Extremkonstellationen zu berücksichtigen.

Diesbezüglich wurden zwei Szenarien identifiziert und realisiert. Der *Extremfall – Kalt* dient der Bewertung der TWI bei winterlichen Randbedingungen, der *Extremfall – Warm* der Bewertung bei sommerlichen Randbedingungen. Im ersten Szenario wird dementsprechend die niedrigste Temperatur im Raum ($\vartheta_{Raum} = 17\,°C$) und am Hausanschluss ($\vartheta_{TWK,HA} = 10\,°C$) vorgegeben. Dem entgegen wird im zweiten Szenario die höchste Temperatur im Raum ($\vartheta_{Raum} = 24\,°C$) und am Hausanschluss ($\vartheta_{TWK,HA} = 25\,°C$) vorgegeben. Es sei hier explizit darauf hingewiesen, dass die in letzterem Fall mit 24 °C gewählte Raumtemperatur im Hochsommer in der Realität noch deutlich höher ausfallen kann. Zusätzlich zu den Extremfällen wurde noch das Szenario *Durchschnitt* definiert, in welchem moderate Werte für die Temperatur im Raum ($\vartheta_{Raum} = 20\,°C$) und am Hausanschluss ($\vartheta_{TWK,HA} = 15\,°C$) gewählt wurden. Die am Hausanschluss gewählte Durchschnittstemperatur von 15 °C beruht dabei auf den während der Felduntersuchung konkret erhobenen Messwerten und spiegelt demnach die tatsächlich in der Realität auftretenden Durchschnittstemperaturen am Hausanschluss wieder. Alle drei Szenarien sollten Ursprünglich, in Anlehnung an die tatsächlich am Zirkulationsversuchstand durchgeführten Messreihen, in vier verschiedenen Varianten simuliert werden. Das heißt jeweils eine Variante für $\vartheta_{TWW,TWE} = 60; 55; 50; 45\,°C$. Da sich im Laufe des Projektes jedoch herauskristallisierte, dass die häufig in der Realität durchgeführte thermische Desinfektion einen entscheidenden Einfluss auf die Erwärmung des TWK in der TWI besitzt, wurde zusätzlich jeweils eine fünfte Variante mit $\vartheta_{TWW,TWE} = 70\,°C$ simuliert.

Tab. 6-11 Untersuchungsmatrix – Übersicht der für die Simulationsstudie als prägnant erachteten Parametersettings

Temperatur am Austritt Trinkwassererwärmer ϑ_{TWW}		**Szenario**	**Temperatur am Hausanschluss $\vartheta_{TW,HA}$**		**Temperatur Raumluft ϑ_{Raum}**	
Werte in Simulation	**Bemerkung**	**Bemerkung**	**Werte in Simulation**	**Bemerkung**	**Werte in Simulation**	**Bemerkung**
70; 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	

Tab. 6-12 Überblick aller in der GDB unter den Punkten „*Varianten für AP 7*“ und „*Erweiterte Varianten Simulation*“ dargestellten Diagramme.

Nummer	**Inhalt**	**Sensoren**	**Bemerkung**
1-6	Alle jeweils in einer Wohnung auftretenden Volumenströme in L/min	XL*1*B**01	Bietet die Möglichkeit der Orientierung und Kontrolle aller Zapfungen
7	Wohnungsübergreifende Übersicht der während einer Zapfung im TWW auftretenden Volumenströme in L/min	XLA1*BF*01	
8	Wohnungsübergreifende Übersicht der während einer Zapfung im TWW auftretenden Volumenströme in L/min	XLC1*BF*01	
9	Übersicht der, den jeweiligen Versuch, dominierenden Raum- und Fluidtemperaturen in °C	XLF01BT00* XL*01BT001	Dient dem Überblick des sich allgemein einstellenden Temperaturniveaus

Nummer	Inhalt	Sensoren	Bemerkung
10	Übersicht der Temperaturverteilung in der Zirkulation in °C	XLA01BT001 XLA10BT00* XLB**BT00*	
11	Übersicht der Zapfstellentemperatur im TWW in °C	XLA01BT001 XLA1*BT*02 XLF01BT00*	
12	Übersicht der Zapfstellentemperatur im TWK in °C	XLC01BT001 XLC1*BT*02 XLF01BT00*	
13	Variantenübergreifende Gegenüberstellung der Temperaturentwicklung des TWK im Kanal und an der nächstgelegenen bzw. entferntesten Zapfstelle mit (_T) und ohne (oT) Trennwand	XLC11BT102_oT XLC11BT102__T XLC13BT602_oT XLC13BT602__T XLF01BT001__T XLF01BT002__T XLF01VT001_oT XLF01BT003	Dient der Vergleichbarkeit und der Bewertung der Unterschiede zweier Simulationsvarianten, welche sich nur hinsichtlich der Verwendung der Trennwand unterscheiden. Bewertung des Einflusses der Trennwand innerhalb einer Simulationsvariante
14	Variantenübergreifende Gegenüberstellung der Temperaturentwicklung des TWK an der entferntesten Zapfstelle mit (_T) und ohne (oT) Trennwand bei variierendem $\vartheta_{TWW,TWE} = 60; 55; 50; 50\,°C$	XLC13BT602 (für Variante 1_**_**_B bzw. 2_**_**_B)	Dient der Vergleichbarkeit und der Bewertung von acht Simulationsvarianten, welche sich nur hinsichtlich der Verwendung der Trennwand und der am Trinkwassererwärmer festgelegten Temperatur unterscheiden. Bewertung des Einflusses der unterschiedlichen Temperaturen am Trinkwassererwärmer
15	Variantenübergreifende Gegenüberstellung der Temperaturentwicklung des TWK an der nächstgelegenen Zapfstelle mit (_T) und ohne (oT) Trennwand bei variierendem $\vartheta_{TWW,TWE} = 60; 55; 50; 50\,°C$	XLC11BT102 (für Variante 1_**_**_B bzw. 2_**_**_B)	Dient der Vergleichbarkeit und der Bewertung von acht Simulationsvarianten, welche sich nur hinsichtlich der Verwendung der Trennwand und der am Trinkwassererwärmer festgelegten Temperatur unterscheiden. Bewertung des Einflusses unterschiedlichen Temperaturen am Trinkwassererwärmer

Jede der hier beschriebenen Varianten wird im Folgenden anhand der drei Parameter $\vartheta_{TWW,TWE}$, ϑ_{Raum} und $\vartheta_{TWK,HA}$ identifiziert. Sofern nicht explizit angegeben, wird diesbezüglich aus Gründen der Kompaktheit auch die bereits in Abschnitt 6.4 verwendete Kodierung (*_**_**_**, z. B. 2_60_oT__B) verwendet. Da die ursprüngliche Kodierung keine Unterscheidung bzgl. der vorgegebenen Temperatur im Raum und am Hausanschluss zulässt wird diese um zwei Stellen erweitert. Die für die Simulationsstudie verwendete Kodierung hat demnach die Form (*_**_**_**_**_**, siehe Anhang 15.13), wobei der vorletzte Bereich die am Hausanschluss und der letzte Bereich die im Raum vorgegebene Temperatur angibt. Beispielsweise identifiziert die Kodierung (2_60__T__B_10_17) die Simulationsvariante bei welcher der hydraulische Abgleich thermoelektrisch (2) realisiert, $\vartheta_{TWW,TWE}$ mit 60 °C (60) festgelegt, die Kanaltrennwand (_T) aktiv, die Beplankung (_B) vorhanden sowie $\vartheta_{TWK,HA}$ mit 10 °C (10) und $\vartheta_{Raum} = 17\,°C$ (17) festgelegt ist. Die erweiterte Variantenkodierung kommt insbesondere in den bereits erläuterten Unterordnern *Simulation TWI -> Ergebnisse (Gesamtübersicht) -> 2 Varianten AP7* und *Simulation TWI -> Ergebnisse (Gesamtübersicht) -> 3 Erweiterte Varianten Simulation* innerhalb der globalen Datenbank zum Einsatz. Somit kann gezielt nach den Datensätzen einzelner Varianten gesucht werden. Darüber hinaus wird inner-

halb jeder Variante noch einmal zwischen der jeweils verwendeten Dämmung nach EnEV unterschieden. Diesbezüglich existiert in jedem Ordner noch jeweils ein Ordner *EnEV 100*, *EnEV 50* und *EnEV 100-50,* welcher jeweils die Ergebnisse einer Variante bei Verwendung einer Rohrdämmung nach EnEV 100 bzw. EnEV 50 enthält. Im letztgenannten Ordner wird nur die Differenz der jeweils betrachteten Werte bei Dämmung nach EnEV 100 bzw. EnEV 50 angegeben. Ein positiver Temperaturwert repräsentiert hierbei eine Abkühlung und ein negativer Wert eine Erwärmung bei einer Reduktion des Dämmungsstandards.

Die Darstellung der auf eine einzelne Variante bezogenen Simulationsergebnisse innerhalb der GDB orientiert sich sehr stark an der bereits in Abschnitt 6.4.3 aufgeführten Tab. 6-6

Die Gegenüberstellung der realen und modellierten TWI erfolgt anhand der in Tab. 6-6 benannten Diagramme und in der vorgegebenen Reihenfolge. Die Diagramme 1 bis 8 dienen hierbei in erster Linie als Plausibilitätstest, ob das in der realen TWI hinterlegte Zapfschema und diesbezüglich auch der sich während einer Zapfung einstellende Volumenstrom korrekt im Model hinterlegt wurde. Der Vergleich mit den bereits in Kapitel 5 angegebenen Volumenströmen zeigt, dass die Volumenströme für die einzelnen Wohnungen und auch am TWE bzw. am Hausanschluss denen der Realität gleichen. Da die modellierte TWI die Möglichkeit bietet, an beliebigen Stellen Simulationswerte auszugeben, zeigen die Diagramme 1-6 zusätzlich die Volumenströme die sich an den einzelnen Armaturen innerhalb einer Wohnung einstellen. Dies erlaubt einen detaillierten Überblick und eine bessere Zuordnung bzgl. der einzelnen Zapfungen.

Zunächst wird in den ersten sechs Diagrammen der jeweils innerhalb einer Wohnung auftretende Volumenstrom und in den Diagrammen 7 bzw. 8 eine wohnungsübergreifende Übersicht des Volumenstroms im TWK bzw. TWW dargestellt. Diagramm 9 liefert einen generellen Überblick über die sich an der TWI einstellenden Temperaturniveaus. Die Motivation für die Darstellung in Diagramm 10, 11 und 12 ist ähnlicher Natur, hierbei liegt der Fokus in Diagramm 10 auf dem Temperaturniveau in der Zirkulation, in Diagramm 11 auf dem Temperaturniveau der Zapfstellen im TWK und in Diagramm 12 auf dem Niveau der Zapfstellen im TWW. Alle bisher beschriebenen Diagramme repräsentieren nur Simulationsdaten einer einzelnen Simulationsvariante. Um jedoch Aussagen hinsichtlich des Effekts bzw. Einflusses einer aktiven oder inaktiven Trennwand bzw. variierender Temperaturen am Ausgang des Trinkwassererwärmers treffen zu können, bedarf es eines Variantenübergreifenden Vergleichs. Diesbezüglich werden in Diagramm 13 die Kanaltemperaturen sowie die Temperatur im TWK der nächstgelegenen als auch der entferntesten Zapfstelle bei aktiver und inaktiver Trennwand gegenübergestellt. Das heißt, es werden hierbei jeweils zwei Varianten (*_**__T_**_**_** und *_**_oT_**_**_**) miteinander verglichen die sich bis auf den Status der Trennwand gleichen. In Diagramm 14 werden gleich vier Varianten miteinander in Beziehung gesetzt. Hierbei wird jeweils die Temperatur der entferntesten Zapfstelle in Abhängigkeit von der Temperatur am Ausgang des Trinkwassererwärmers ($\vartheta_{TWW,TWE} = 60; 55; 50; 45\,°C$) dargestellt. Die Darstellung erfolgt hierbei jeweils bzgl. aktiver und inaktiver Trennwand. Somit erlaubt Diagramm 14 eine Aussage über die Abhängigkeit des Temperaturniveaus im TWK an der entferntesten Zapfstelle in Abhängigkeit von der am Ausgang des Trinkwassererwärmers festgelegten Temperatur. Zusätzlich kann dieser Einfluss in Relation zum Vorhandensein der Trennwand gesetzt werden. In Diagramm 15 werden die gleichen Varianten wie in Diagramm 14 mit einander verglichen. Hierbei wird jedoch einzig und allein die Tempera-

tur im TWK der nächstgelegenen Zapfstelle dargestellt. Auch wenn die Diagramme für zielgerichtete, wenige Varianten betreffende Analysen bestens geeignet sind, ist deren Eignung für eine generelle, alle Variantenübergreifende Analyse nicht gegeben. Deshalb werden die im Folgenden aufgeführten Ergebnisse allein anhand von Mittelwerten und in tabellarischer Form erbracht und diskutiert.

6.5.3 Ergebnisse Energiebilanzen

Dieser Abschnitt dient der Bewertung des Einflusses variierender Temperaturen am Ausgang des Trinkwassererwärmers auf die Energiebilanz der gesamten TWI. Dessen Beurteilung erfolgt dabei anhand der bereits in Abschnitt 6.5.2 eingeführten Szenarien *Extremfall – Kalt*, *Extremfall – Warm* und *Durchschnitt*. Der Fokus der Bewertung liegt dabei auf der Gegenüberstellung des Energieverbrauchs für die Zapfung und für die Zirkulation. Es sei hierbei explizit darauf hingewiesen, dass der Energieverbrauch für die Zapfung dabei jedoch nur von theoretischem Interesse ist, denn dieser wurde per Definition mit 39,2 kWh pro Tag festgelegt. Dieser Wert resultiert hierbei aus dem der Simulation zugrundeliegenden Zapfschema, welches auf der Verwendung von 10 °C kaltem TWK beruht und bereits in Abschnitt 5.1.3 ausführlich erläutert wurde. Dennoch zeigt sich bei der Auswertung ausgewählter Simulationsvarianten (siehe Tab. 6-13), dass der Energiebedarf für die Zapfung in Abhängigkeit von der jeweils am Ausgang des Trinkwassererwärmers festgelegten Temperatur einer minimalen, variierenden Schwankung um den idealen Wert unterliegt (Tab. 6-13 – linke Seite). Die maximale Abweichung beträgt im Referenzszenario (*Extremfall – Kalt*) höchstens 0,5 %. Eine Erklärung für diese Abweichung sind numerische Effekte die bei Generierung bzw. Konvertierung (Aufbereitung des Zapfschemas für TRNSYS-TUD) des originalen für die reale TWI erstellten Zapfschemas auftreten. Darüber hinaus zeigt sich hier auch der Einfluss der gewählten Simulationsschrittweite (gewählte Simulationsauflösung: 1 Sekunde). Aufgrund der kleinsten auftretenden Zapfungen, welche nur zwischen einer und zwei Sekunden andauern, kommt es auf Grund der festen Diskretisierung in Einzelfällen zu einer Unterauflösung der Simulation. Da die damit einhergehende Abweichung jedoch von marginaler Größe ist, wurde auf eine Erhöhung der Auflösung, insbesondere auf Grund des damit einhergehenden Anstieges der Simulationszeit verzichtet. Wird der Energieverbrauch für die Zapfung variantenübergreifend betrachtet, zeigt sich, dass diese invariant gegenüber der Installation einer Trennwand ist. Dieses zwingend zu erwartende Ergebnis ist hierbei eher von theoretischem Interesse, da dies einmal mehr ein Beleg für die Korrektheit der Simulation ist.

Bei der Betrachtung des Energieverbrauchs hinsichtlich der Aufrechterhaltung der Zirkulation (im Folgenden als Zirkulationsverlust bezeichnet) bietet sich ein gänzlich anderes Bild. Hier zeigt sich eine deutliche Abhängigkeit bzgl. der Variation der Temperatur am Ausgang des Trinkwassererwärmers und der Verwendung einer Trennwand. Wird etwa der Energieverbrauch für die Zirkulation auf die Simulationsvariante mit $\vartheta_{TWW,TWE} = 60\,°C$ normiert, wie dies in Tab. 6-14 geschehen ist, zeigt sich (Tab. 6-14 – rechte Seite) eine Minderung bzw. Erhöhung der Zirkulationsverluste um ca. 12,4 % je 5 K Absenkung bzw. Erhöhung der Temperatur am Ausgang des Trinkwassererwärmers. Im Vergleich hierzu, fällt die Energieersparnis bei den Varianten mit deaktivierter Trennwand (Tab. 6-13 und Tab. 6-14 – jeweils in der unteren Hälfte) um ca. 4 – 6 % Prozent geringer aus. Demnach ist die Verwendung einer Trennwand eindeutig belegt.

Tab. 6-13 Absoluter Tages-Energieverbrauch bei Änderung der TWW-Temperatur; getrennt nach TWW-Entnahme und Zirkulation für verschiedene Szenarien (siehe 6.5.2) und variierende Temperaturen am Austritt des Trinkwassererwärmers ($\vartheta_{TWW,TWE}$) bei aktiver bzw. inaktiver Trennwand unter Verwendung des thermoelektrischen hydraulischen Abgleichs.

Energiebilanz in KWh pro Tag							
		Zapfung			Zirkulation		
Szenario	ϑ_{TWW}	Kalt	Durchschnitt	Warm	Kalt	Durchschnitt	Warm
mit Trennwand	70	39,37	36,13	29,69	19,08	17,96	16,45
	60	39,40	35,51	27,74	15,26	14,07	12,60
	58	39,36	35,28	27,16	14,46	13,34	11,84
	55	39,17	34,85	26,26	13,32	12,18	10,69
	50	39,23	34,36	24,66	11,40	10,24	8,77
	45	39,04	33,48	22,44	9,47	8,35	6,89
ohne Trennwand	70	39,37	36,13	29,69	20,31	19,08	17,35
	60	39,40	35,51	27,74	16,24	15,05	13,30
	58	39,36	35,28	27,16	15,44	14,22	12,49
	55	39,17	34,85	26,26	14,24	13,01	11,32
	50	39,23	34,36	24,66	12,18	10,98	9,26
	45	39,04	33,48	22,44	10,16	8,96	7,26

Tab. 6-14 Relative Änderung des Tages-Energieverbrauchs bei Änderung der TWW-Temperatur; getrennt nach TWW-Entnahme und Zirkulation für verschiedene Szenarien (siehe 6.5.2) bezogen auf die Referenzvariante ($\vartheta_{TWW,TWE} = 60\,°C$) bei aktiver bzw. inaktiver Trennwand unter Verwendung des thermoelektrischen hydraulischen Abgleichs.

Relative Änderung des Tagesenergieverbrauchs in % (Normversuch: ϑ_{TWW} = 60°C, mit aktiver Trennwand, thermoelektrischer Abgleich)							
		Zapfung			Zirkulation		
Szenario	ϑ_{TWW}	Kalt	Durchschnitt	Warm	Kalt	Durchschnitt	Warm
mit Trennwand	70	-0,1	+1,8	+7,0	+25,0	+27,6	+30,5
	60	100	100	100	100	100	100
	58	-0,1	-0,6	-2,1	-5,3	-5,2	-6,0
	55	-0,6	-1,8	-5,3	-12,7	-13,4	-15,2
	50	-0,4	-3,2	-11,1	-25,3	-27,2	-30,4
	45	-0,9	-5,7	-19,1	-37,9	-40,6	-45,4
ohne Trennwand	70	-0,1	+1,8	+7,0	+33,1	+35,6	+37,7
	60	0,0	0,0	0,0	+6,4	+6,9	+5,6
	58	-0,1	-0,6	-2,1	1,2	1,0	-0,9
	55	-0,6	-1,8	-5,3	-6,7	-7,5	-10,2
	50	-0,4	-3,2	-11,1	-20,2	-22,0	-26,5
	45	-0,9	-5,7	-19,1	-33,4	-36,4	-42,4

Tab. 6-15 Vergleich des Tages-Energieverbrauchs zur Aufrechterhaltung der Zirkulation bei Verwendung unterschiedlicher Methoden des hydraulischen Abgleichs. Der Energieverbrauch bei thermoelektrischen Abgleich dient als Referenzwert, die dem händischen Abgleich zugeordneten Werte zeigen die prozentuale Abweichung vom Referenzwert.

Gegenüberstellung Energieverbrauch bei thermoelektrischem und händischem Abgleich (Normversuch: ϑ_{TWW} = 60°C, mit aktiver Trennwand, thermohydraulischer Abgleich)							
		Zirkulation					
Szenario hydr. Abgleich	ϑ_{TWW}	Kalt		Durchschnitt		Warm	
		thermo-elektrisch	händisch	thermo-elektrisch	händisch	thermo-elektrisch	händisch
mit Trenn-wand	70	19,08	+1,7	17,96	+2,1	16,45	+2,6
	60	15,26	+2,9	14,07	+3,9	12,60	+4,5
	58	14,46	+3,4	13,34	+4,0	11,84	+4,9
	55	13,32	+3,9	12,18	+4,8	10,69	+5,8
	50	11,40	+5,2	10,24	+6,6	8,77	+7,9
	45	9,47	+6,8	8,35	+8,2	6,89	+10,2
ohne Trenn-wand	70	20,31	+1,4	19,08	+1,8	17,35	+2,4
	60	16,24	+2,8	15,05	+3,1	13,30	+4,1
	58	15,44	+3,0	14,22	+3,6	12,49	+4,6
	55	14,24	+3,5	13,01	+4,2	11,32	+5,1
	50	12,18	+5,0	10,98	+5,7	9,26	+7,4
	45	10,16	+6,2	8,96	+7,4	7,26	+9,8

Beim Vergleich des Referenzszenarios (Extremfall – Kalt) 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.

Abschließend zeigt Tab. 6-15 welchen Einfluss unterschiedliche Methoden des hydraulischen Abgleichs auf die Höhe der Zirkulationsverluste besitzen. Hierfür dient der moderne Ansatz via thermoelektrischem Abgleich als Referenzwert. Die hier berechneten Zirkulationsverluste sind absolut in kWh/Tag angegeben. Für den händigen hydraulischen Abgleich ist dagegen nur die prozentuale Abweichung vom Referenzwert angegeben. Die Angabe erfolgt in Prozent. Eine positive Abweichung bedeutet hierbei, dass die Zirkulationsverluste beim händigen Abgleich höher als beim thermoelektrischen Abgleich ausfallen. Der Variantenübergreifende Vergleich zeigt, dass der Energieverbrauch zur Aufrechterhaltung der Zirkulation beim modernen, thermoelektrischen Ansatz im Mittel um 4,6 %

geringer ausfällt. Es sei hierbei jedoch explizit darauf hingewiesen, dass für den thermo-elektrischen hydraulischen Abgleich Hilfsenergie zur Steuerung der Zirkulationsventile benötigt wird und diese in der Praxis zu den Zirkulationsverlusten hinzugezählt werden muss. Somit verringert sich der hier angegebene Wert in der Praxis in Abhängigkeit von der Effizienz der Steuerung der Zirkulationsventile.

6.5.4 Ergebnisse energetische Kopplung TWW – TWK

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. Es sei hierbei explizit darauf hingewiesen, dass in der Praxis überdies, häufig deutlich geringere Wandstärken der Wärmedämmung als EnEV100 vorgefunden wurden bzw. allgemein vorzufinden sind.

Die Simulationsstudie belegt, dass mit dieser Diskrepanz zwischen maximal möglicher und tatsächlich realisierter Wärmedämmung eine deutliche Erwärmung des Trinkwassers (kalt) einhergeht. In Abhängigkeit von der jeweils gewählten Parameterkombination (siehe auch Tab. 6-11) kann eine ideal[7] ausgeführte EnEV100-Wärmedämmung gegenüber einer ebenfalls ideal ausgeführten EnEV50-Dämmung eine ungewollte Aufwärmung des Trinkwassers (kalt) bei 60 °C $\vartheta_{TWW,TWE}$ um bis zu 2 K reduzieren, wenn TWW und TWK-Installation in einem Schacht geführt werden (s. a. Tab. 6-16). Demgegenüber kann eine Absenkung der TWW-Temperatur (siehe Tab 6-17) ausgehend von $\vartheta_{TWW,TWE}$ = 60 °C die Temperatur ϑ_{TWK} an den Entnahmestellen 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-Ausführung) bei typischen sommerlichen Verhältnissen (ϑ_{TWK} = 25 °C; ϑ_{Raum} = 24 °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. Die farbliche Markierung der Werte in Tab. 6-16 und Tab. 6-17 dient diesbezüglich der einfachen Bewertung des potentiell zu erwartenden Legionellenwachstums. Es gilt: grün (< 20°C), gelb (< 25 °C), hellrot (< 30 °C) und dunkelrot (≥ 30 °C), wobei ein grün hinterlegter Wert als unbedenklich und ein dunkelrot hinterlegter Wert als sehr kritisch hinsichtlich einer zu erwartenden Kontamination anzusehen ist.

[7] Ideal heißt hierbei ohne Fehlstellen und Wärmebrücken.

Tab. 6-16 Einfluss der Wärmedämmung (EnEV50 und EnEV100) der Rohrleitungen auf die Tagesmitteltemperaturen des Trinkwassers (kalt) an den Entnahmestellen für ausgewählte Parameterkombinationen $\vartheta_{TWW,TWE}$; 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}	$\vartheta_{TW,HA}$	ϑ_{Raum}	$\Delta\bar{\vartheta}_{Kanal,gesamt}$	$\bar{\vartheta}_{TWK,WE1}$	$\bar{\vartheta}_{TWK,WE1}$	$\Delta\bar{\vartheta}$	$\bar{\vartheta}_{TWK,WE6}$	$\bar{\vartheta}_{TWK,WE6}$	$\Delta\bar{\vartheta}$
70	15	20	2,2	20,8	19,1	1,7	25,5	23,0	2,5
60			1,7	20,0	18,6	1,4	24,0	22,0	2,0
55			1,4	19,6	18,4	1,2	23,3	21,5	1,8
50			1,1	19,3	18,2	1,1	22,6	21,0	1,6
45			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
60			1,5	27,4	26,5	0,9	29,5	28,0	1,5
55			1,3	27,0	26,2	0,8	28,8	27,5	1,3
50			1,0	26,6	26,0	0,6	28,0	27,0	1,0
45			0,9	26,3	25,8	0,5	27,4	26,6	0,8

< 20 °C | < 25 °C | < 30 °C | > 30°C

Tab. 6-17 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}	$\bar{\vartheta}_{Kanal,ges.}$	$\bar{\vartheta}_{Kanal,TWW}$	$\bar{\vartheta}_{Kanal,TWK}$	$\bar{\vartheta}_{TWK,WE1}$	$\bar{\vartheta}_{TWK,WE1}$	$\Delta\bar{\vartheta}$	$\bar{\vartheta}_{TWK,WE6}$	$\bar{\vartheta}_{TWK,WE6}$	$\Delta\bar{\vartheta}$
70	15	20	28,0	31,2	20,8	19,1	16,9	2,2	23,0	18,6	4,4
60			26,3	29,0	20,5	18,6	16,8	1,8	22,0	18,5	3,5
55			25,5	27,8	20,4	18,4	16,8	1,6	21,6	18,4	3,2
50			24,6	26,7	20,3	18,2	16,8	1,4	21,1	18,3	2,8
45			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
60			30,0	32,1	25,2	26,5	25,0	1,5	28,1	25,1	3,0
55			29,2	30,9	25,0	26,3	25,0	1,3	27,6	25,0	2,6
50			28,4	29,8	24,9	26,0	24,9	1,1	27,1	24,9	2,2
45			27,5	28,7	24,7	25,9	24,9	1,0	26,7	24,8	1,9

< 20 °C | < 25 °C | < 30 °C | > 30°C

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 in der Praxis jedoch selten realisiert, z. B. konnte im Rahmen der Feldstudie des Projektes (siehe Kapitel 3) nur in 28 der 101 Feldobjekte[8] eine Trennwand lokalisiert werden.

Die Ergebnisse der Simulationsstudie zeigen jedoch, dass trotz der Annahme einer idealen EnEV100-Wärmedämmung ein deutlicher Einfluss der Kanaltrennwand auf die für das Trinkwasser (kalt) relevante Kanaltemperatur besteht. Es ist deutlich zu erkennen (siehe Tab 6-17), dass bei korrekt mit Kanaltrennwand ausgeführter Installationen die Temperatur des Trinkwassers (kalt) selbst im Szenario „Extremfall warm“ maximal bei 25,3 K liegt. Bei $\vartheta_{TWW,TWE}$ = 50 °C bzw. 45 °C dominiert sogar der Wärmeverlust an den Raum (24 °C), sodass theoretisch eine Temperaturabsenkung um 0,2 K gegenüber dem Hauseintritt (25 °C) erreicht werden würde. Demgegenüber steht die Installation ohne Kanaltrennwand, bei welcher sich im Szenario *Extremfall Warm* nahezu 30 °C im TWK einstellen können.

Besonders wichtig ist die Existenz und die Qualität der 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. Dieser Effekt wird durch eine eventuell im Betriebsregime integrierte regelmäßige Temperaturanhebung (z. B. jede Nacht oder wöchentlich für eine Stunde auf 70 °C ohne mikrobiologischen Befund – oft fälschlicher Weise als „Legionellen-Schutzschaltung“ oder „vorbeugende thermische Desinfektion“ bezeichnet) sogar noch deutlich verstärkt. Tab 6-17 zeigt eindeutig das die sich im TWK einstellenden Temperaturen insbesondere bei sommerlichen Bedingungen deutlich über 25 °C liegen, wobei dies überwiegend aus der fehlenden nächtlichen Entnahme durch den Nutzer resultiert. Zu berücksichtigen sind überdies die Tatsachen, dass eine thermische Desinfektion nur bei zeitgleicher Spülung auch der nicht zirkulierenden Stichleitungen 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 (siehe Tab. 6-14). Entnahmen des Nutzers in diesen Zeiten bergen zusätzlich eine Verbrühungsgefahr. Das Entfallen dieser „vorbeugenden“, in keinem trinkwasserhygienischen Regelwerk enthaltenen, Temperaturanhebung auf 70 °C sollte demnach 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. Generell wird nach derartigen Spülprozessen empfohlen, eine Spülung der TWK-Seite vorzunehmen um das unzulässig hoch erwärmte TWK auszustoßen.

[8] 6 Objekte mit Steigleitung getrennt, 1 Objekt mit Leitung im Keller getrennt, 21 Objekte mit beidem getrennt

6.6 Schlussfolgerungen Simulation und Herausarbeiten von Thesen

Anhand der in Kapitel 6 dargelegten Ergebnisse lassen sich folgende Thesen ableiten:

- **Die Veränderung des Temperaturniveaus des Trinkwarmwassers am Austritt des Trinkwassererwärmers verändert den Energiebedarf zur Trinkwassererwärmung bei gleichem Entnahmeverhalten nur wenig. Die Reduzierung des Energiebedarfs resultiert aus der Minderung bzw. Erhöhung der Zirkulationsverluste.**

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

- **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 Vorlauftemperatur des Trinkwarmwassers. Architekten, Planer und Bauherren sind auf die Wichtigkeit der Ausführung einer ausreichend gedämmten Trennwand bzw. die getrennte Führung des TWK hinzuweisen.**

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

Zusammenfassend ist festzustellen, dass es im Rahmen des Verbundvorhabens Energieeffizienz und Hygiene in der Trinkwasser-Installation gelungen ist, eine Simulationsumgebung zu schaffen die alle wesentlichen thermohydraulischen Effekte einer bestehenden Trinkwasser-Installation hinreichend genau und damit realitätsnah nachbildet. Grundlage für diese Entwicklung war hierbei das Simulationstool TRNSYS-TUD der Professur für Gebäudeenergietechnik und Wärmeversorgung. TRNSYS-TUD wurde hierbei bzgl. der Abbildung des offenen Entnahmefalls erweitert. Zusätzlich wurde der zur Auflösung der thermohydraulischen Gleichungen eingesetzte Löser optimiert und dabei dessen Effizienz deutlich verbessert. Besonders erwähnenswert ist zum einen der Sachverhalt, dass die Simulation an Hand einer real umgesetzten Trinkwasser-Installation validiert wurde und die dabei festgestellten Abweichungen im kleinen, einstelligen Prozentbereich liegen. Zum anderen erlaubt die Simulationsumgebung die Kontrolle und gezielte Variation von kritischen Anfangs- und Randbedingungen, wie etwa der Temperatur am Hausanschluss oder der Raumtemperatur, welche in der Realität nicht ohne weiteres realisierbar sind.

7 Emulationsmodule Werkstoffe und endständige Entnahme

7.1 Technisch-wissenschaftliches Konzept

7.1.1 Allgemeines

Für die systematische Untersuchung des nicht zirkulierenden, endständigen Bereiches in TWW-Leitungssystemen wurden zwei baugleiche, kleinere Versuchsstände, sogenannte Emulatoren, konzipiert und gebaut.

Diese wurden bei den Projektpartnern IMMH und IWW in dafür zugelassenen Laboren definiert mit Stämmen beimpft und unter realistischen Installationsbedingungen betrieben. Beim IMMH waren das Stämme von *Legionella* spp. beim IWW Stämme von *Pseudomonas aeruginosa*.

Im Fokus der Versuche standen die Einflüsse von Temperatur, Werkstoff und Inhaltsvolumen einer endständigen TWW-Installation auf den darin etablierten Biofilm.

7.1.2 Grundaufbau

Die Auslegung des Emulators erfolgte auf Basis der sogenannten 3-Liter-Regel, welche Bestandteil des DVGW-Arbeitsblattes W 551 ist. Von sechs TWW-Zapfstellen sind drei so ausgeführt, dass sie ein nicht zirkulierendes Rohrvolumen von eben diesen drei Litern besitzen, die Anschlussleitungen der übrigen drei Zapfstellen fassen jeweils 0,5 L.

Ein kurzes und ein langes Ende bilden jeweils einen Steigstrang, wobei jeder der drei Steigstränge in einem anderen Werkstoff ausgeführt ist. Die Installation erfolgte nach den allgemein anerkannten Regeln der Technik mit großhandelsüblichem Material.

Mit

- Kupfer nach DIN EN 1057,
- Edelstahl, rostfrei, in 1.4401 (AISI 316L) und
- Metall-Verbundrohr (PE-X/ Al/ PE-X) in Bördel-Klemmverbindungs-Technik mit Rotguss- (DIN EN 1982) und Kunststofffittings (wasserberührende Teile PPSU), nach Herstellerangaben weitgehend totraumfrei,

wurden die drei gängigsten Werkstoffe für TW-Installationen ausgewählt. Die zentrale Zuleitung TWK sowie die Ringleitung TWZ wurden beide in o. g. Edelstahl, rostfrei, ausgeführt. Abb. 7-2 zeigt ein vereinfachtes R&I-Schema des Emulators.

Als zentrale Wärmequelle kommt ein elektronisch geregelter Durchlauferhitzer mit einem einstellbaren Temperaturfenster TWW von 20… 60 °C zum Einsatz. Die Schwankung der Temperatur TWW war weniger als 1 K.

Ein **selbstentwickelter Rohr-in-Rohr-Wärmeübertrager** ermöglicht die Rückkühlung des erwärmten Zirkulationswassers um maximal 5 K, was einen kontinuierlichen Betrieb und damit größtmögliche Regelgüte des Durchlauferhitzers gewährleistet. Die Rückkühlleistung betrug bei Gegenstromschaltung max. 10 kW, wenn das Kühlwasser mit 15 … 17 °C in den Apparat eintrat. Die Baulänge war begrenzt auf 1,00 m. Einzelheiten sind dem Anhang 15.11 zu entnehmen.

Bei der Zirkulationspumpe wurde auf ein handelsübliches Modell, Gehäuse aus gegossenem Edelstahl, zurückgegriffen.

Über zwei Drei-Wege-Kugelhähne konnten externe Apparate bei Bedarf auf einfache Art und Weise in den Zirkulationskreis eingekoppelt werden.

Abb. 7-1 zeigt den fertig installierten Emulator ohne und mit Wärmedämmung an den Rohrleitungen. Die **Wärmedämmung** aller Rohrleitungen und Armaturen erfolgte praxisgerecht mit handelsüblicher Dämmung der nennweitenabhängigen Dämmstärke „EnEV 100 %“.

Abb. 7-1 Emulationsmodul, Vorderansicht ohne und mit Wärmedämmung, Seitenansicht mit Wärmedämmung

Zahlreiche **Messstellen** erlauben ein detailliertes Anlagenmonitoring. Neben den

- 6 magnetventilgesteuerten Entnahmestellen wurden
- 15 Temperaturen,
- 4 Drücke und
- 2 Volumenströme

alle 2 s abgefragt, aufgezeichnet und paketweise in der zentralen Messdatenbank DATA abgelegt. Diese Aufgaben konnten durch Nutzung eines MOD-Bus-fähigen TCP-Modulbaukastens langzeitstabil realisiert werden.

Die Spezifikation der Messgeräte des Emulators ist Anhang 15.10 zu entnehmen.

Für die Weiterverarbeitung der Messsignale, also der Analog-digital-Wandlung, wurden die in 15.12 aufgeführten Module des Herstellers ICP DAS verwendet.

Des Weiteren wurden sämtliche Rohrleitungen des Emulators, der beim IMMH zum Einsatz kam, von der Zuleitung bis zu den Entnahmestellen, ähnlich wie im TWI-Versuchsstand, mit **faseroptischer Temperaturmessung (Distributed Temperature Sensing, DTS)** ausgerüstet. Mit dieser Messmethode ist es möglich, die Temperatur entlang eines langen Glasfaserkabels fein orts- und zeitaufgelöst zu erfassen. Die genaue Beschreibung dieser Methode ist [Herwig15] zu entnehmen.

So konnten ausgedehnte Temperaturverteilungen detailliert aufgenommen werden. Hier wurden je Versuch über zwei Tage hinweg alle 5 s für einen Abschnitt von 126 mm die Mitteltemperaturen an der Außenwand der Rohre aufgenommen. Es wurden am Emulator ca. 50 m Messleitung verlegt. Die Messwertaufnahme erfolgte durch das Messgerät SILI-XA.

Die Auswertung der umfangreichen Messdaten erfolgte auch hier grafisch über Rasterdiagramme.

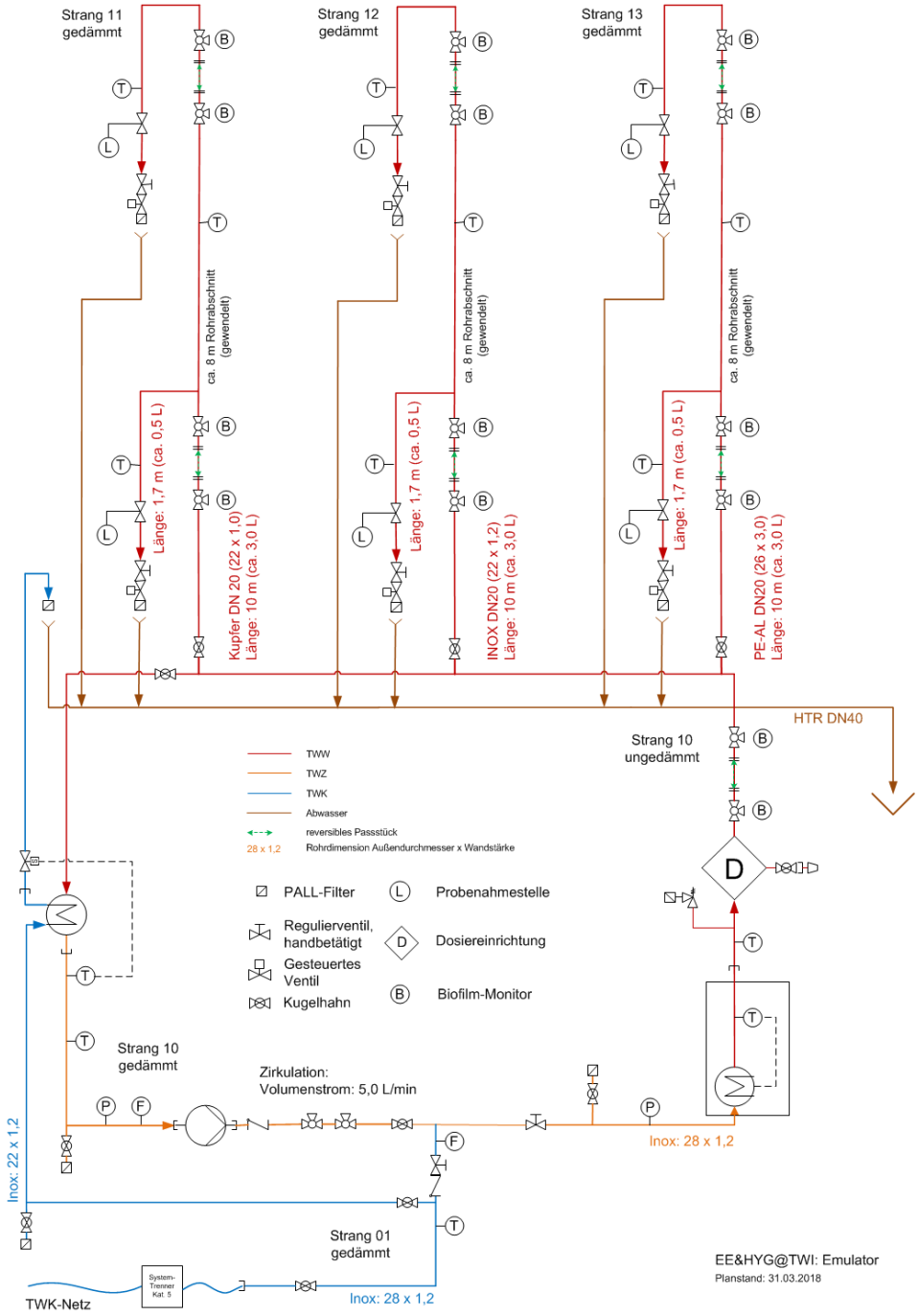


Abb. 7-2 Vereinfachtes R&I-Schema des Emulators

Für die mikrobiologische Untersuchung stehen

- 1 Dosierstelle zum Einschleusen der Kultur,
- 14 Biofilmmonitore mit Probekörpern aus dem entsprechenden Strangwerkstoff,
- 7 Rohrpassstücke und
- 6 zugelassene Probenahmeventile

zur Verfügung.

Abb. 7-3 Dosierstelle

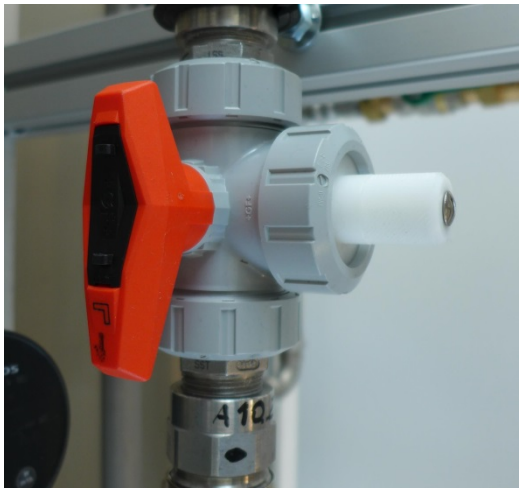


Abb. 7-4 Biofilmmonitor

Abb. 7-5 Rohrpassstücke

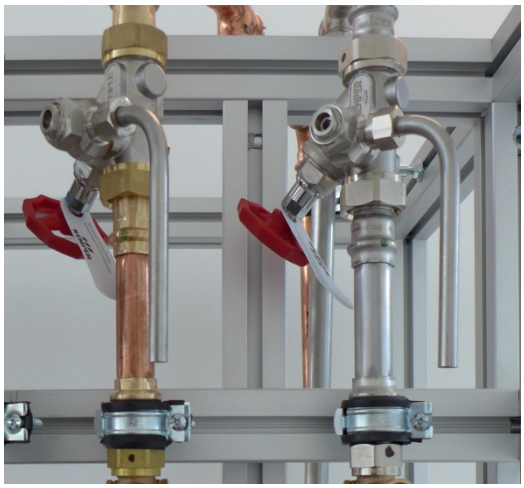


Abb. 7-6 Probenahmeventile

Membranfilterelemente des Herstellers PALL, Typ Qpoint, filtern das kontaminierte Wasser schließlich an den jeweiligen Entnahme- bzw. Austrittsstellen, also Zapfstellen bzw. Sicherheitsventil und die Entleerungen. Sie stellten Verbrauchsmittel dar, die im Versuchsbetrieb regelmäßig gewechselt werden mussten, wenn die voreingestellten Volumenströme an den Entnahmestellen aufgrund zu großen Druckverlustes nicht mehr erreicht wurden.

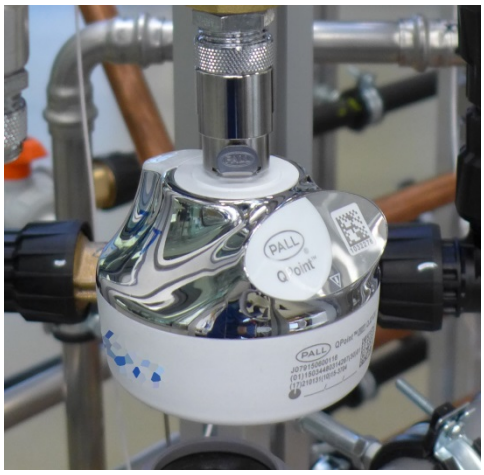


Abb. 7-7 Zapfstelle mit Pall-Filteraufnahme und Pall-Filter

Eine selbstentwickelte Software auf Object-Pascal-Basis realisiert die Steuerung und Messdatenerfassung des Emulators. Die manuelle Bedienung über die Benutzeroberfläche ist möglich. In der Regel erfolgte die Steuerung jedoch automatisiert über einen Zeitplan (hier: European Tapping Cycle Type 1). Die Messdaten wurden visualisiert und zunächst lokal abgespeichert. Mit Hilfe eines cloud-basierten Datenspeichers wurden die Messdaten dann paketweise auch an die Messdatenbank DATA gesendet. Als hilfreich erwies sich überdies die Möglichkeit des Fernzugriffs für Service- und Wartungsaufgaben.

Da ein einheitlicher Versuchsablauf für beide Emulatoren angestrebt wurde, wurde für die Protokollierung der Versuchsdurchführung ein Online-Betriebstagebuch angelegt. Dieses funktionierte nach dem Wiki-Prinzip, so dass sich die beteiligten Projektpartner schnell einen Überblick über den Stand der jeweiligen Versuchsdurchführung verschaffen konnten. Die anschließende Auswertung, an der mehrere Projektpartner beteiligt waren, konnte so erheblich beschleunigt werden.

7.1.3 Entnahmezyklus

Die Emulatoren wurden während des gesamten Testzeitraums an allen Entnahmestellen mit den niedrigsten EU-reference tapping cycle (EU-r.t.c. type 1) betrieben. Die Entnah-

me erfolgte so zeitversetzt, dass keine gleichzeitige Entnahme stattfand. Um eine theoretische Mischtemperatur von 45 °C bei 10 °C TWK-Temperatur zu erzielen, wurden die Volumenströme der jeweiligen TWW-Temperatur angepasst (Tab. 7-1). Die Dauer der einzelnen Entnahmen blieb – anders als beim TWI-Versuchsstand – jedoch konstant.

Tab. 7-1 Übersicht der Volumenströme und Tagessummen der TWW-Entnahme an den Emulatoren für unterschiedliche TWW-Temperaturen

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

Der Fokus der Emulatoren liegt auf den endständigen TWW-Leitungen. Auf eine endständige TWK-Installation wurde verzichtet. Es wurde dementsprechend ausschließlich Trinkwarmwasser bei TWW-Temperatur gezapft. Die Mischtemperatur von 45 °C war lediglich bei der Erstellung des Zapfprofils von Bedeutung.

7.2 Untersuchungen zu *Legionella pneumophila*

7.2.1 Versuchsmatrix

7.2.1.1 Versuchsdurchführung/Beprobungsschema

Der Emulator wurde an das TWK des Wasserversorgungsnetzes eines Gebäudes angeschlossen. Es ist bekannt, dass im Wassernetz dieses Gebäudes zwei *L. pneumophila* Stämme SG1 und SG10, mindestens eine Amöbenart *Vermamoeba vermiformis* (*V. vermiformis*) sowie diverse heterotrophe Bakterien vorkommen. Somit war eine Besiedlung des Emulators mit einer mikrobiellen Gemeinschaft inklusive Legionellen möglich.

Nach Anschluss an das Wassernetz erfolgte ein diskontinuierliches Spülen des Emulators bei RT sowie bei 60 °C nach den speziellen Zapfzyklen innerhalb von 7 Tagen (siehe Anhang 15.13, Tab. 15-1, Tab. 15-2). Es handelte sich um eine Dekontaminationsmaßnahme, da der Emulator initial eine Kontamination mit Wasserkeimen, jedoch nachweislich (Kultur/Maldi-TOF MS) nicht mit Legionellen aufwies. Die Dekontamination führte zu einer Abnahme der Gesamtkeimzahl um zwei Log_{10}-Stufen (siehe Anhang 15.13, Abb. 15-16). Im Anschluss wurde der Emulator mit angereichertem Wasser aus dem gleichen Wassersystem angeimpft, um die freigewordene Nische mit Legionellen zu besetzen. Die Legionellenkonzentration des angereicherten Wassers betrug 400 KbE/100 mL. Dadurch wurde in den Emulator *L. pneumophila* in der Größenordnung von drei Log_{10}-Stufen eingebracht.

Nach dem Animpfen erfolgte beginnend bei 30 °C eine schrittweise Temperaturerhöhung auf 37 °C mit einem vordefinierten Zapfzyklus (EU-reference tapping cycle type 1). Diese Temperatur wurde zuvor als eine optimale Wachstumstemperatur für die SG1 und SG10 Legionellenstämme evaluiert. Insgesamt wurde der Emulator bei dieser Temperatur 28 Tage lang zur Biofilmetablierung betrieben.

Die verschiedenen Temperaturprofile sind anschließend nacheinander ohne Desinfektionsschritte beginnend bei 45 °C für je zwei Wochen gelaufen. Der Emulator wurde wie in Abb. 7-8 dargestellt betrieben und beprobt. Die wichtigsten Eckpunkte der Herangehensweise wurden im Vorfeld mit dem IWW abgesprochen. Am IWW wurde ein zweiter identisch gebauter Emulator für die Versuche mit *P. aeruginosa* aufgestellt.

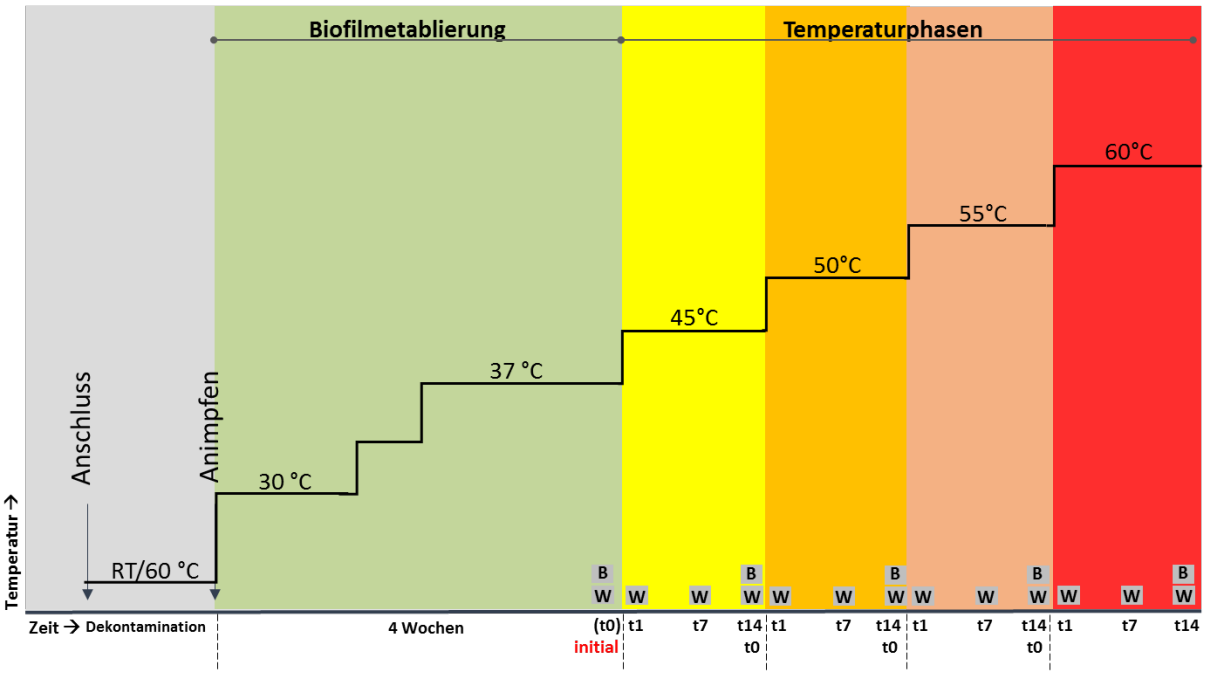


Abb. 7-8 Versuchsdurchführung am Emulator im IMMH (W: Wasserbeprobung, B: Biofilmbeprobung, t0-t14: Zeitpunkte der Beprobung in Tagen nach Versuchsbeginn)

Die Wasser- und Biofilmproben wurden stets während der längsten Stagnationsphase und mindestens 3 Stunden nach der letzten Zapfung (entsprechend dem Zapfzyklus zwischen 21:30 Uhr und 07:00 am Folgetag) entnommen.

Das detaillierte Probenahmeschema der Wassersäule ist in der Abb. 7-9 dargestellt. Nach einer Wischdesinfektion wurden die ersten 100 mL des Wassers aus den Endsträngen entweder verworfen oder wie am t14 jedes Versuches für die Bestimmung chemischer Parameter verwendet. Da die kurzen Endstränge je ca. 0,5 Liter Gesamtwasservolumen aufwiesen, wurden die restlichen je 400 mL als Probe entnommen. Diese sollte den 1. Liter des kurzen Endstranges darstellen. Die langen Endstränge mit je ca. 3,0 Liter Wasservolumen wurden im 1. Und 2. Liter beprobt. Das gezapfte Probevolumen betrug dabei 500 mL. Eine Temperaturerfassung erfolgte im 1. Liter der kurzen und langen Endstränge bzw. im 2. Liter der langen Endstränge.

Zusätzlich erfolgte eine Beprobung des TWK-Zulaufs in den Emulator nach „Zweck b“ der TrinkwV am t14/t0 jedes Versuchs.

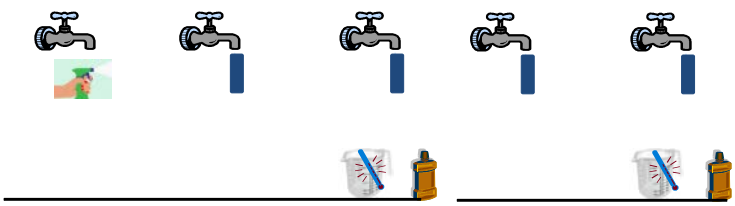


Abb. 7-9 Probenahmeschema der Endstränge des Emulators im IMMH

Im Rahmen der Beprobung des Biofilmes von der Innenoberfläche der Endstränge und zusätzlich des Zirkulationskreises erfolgte ein Austausch der bewachsenen Biofilmaufwuchsträger gegen neue sowie dessen Aufbereitung zur mikrobiellen Analyse.

Eine Zuordnung der durchgeführten Analysen der Wasser- und Biofilmproben zu den jeweiligen Probenahmezeitpunkten ist der Tab. 7-2 zu entnehmen.

Tab. 7-2 Übersicht der einzelnen Analysen der Wasser- und Biofilmproben innerhalb eines Versuches am Emulator im IMMH

Legionellen			**Mikroorganismen gesamt**	
Kultur (ISO 11731/-2)	quantitative PCR (lebend/tod) *Legionella* spp.	*L. pneumophila*	Kultur (DIN 8199)	Gesamtzellzahl (FCM)
W	-	-	W	-
W	-	-	W	-
W/B	W	W	W/B	W/B

7.2.1.2 Aufbereitung und Analyse der Wasserproben

Kulturverfahren

Die Analyse der Proben erfolgte anhand des kulturellen Nachweises der Legionellen nach DIN EN ISO 11731/-2 und [UBA2012] (s. a. Abschnitt 2.4.1) sowie der kultivierbaren Mikroorganismen nach DIN EN ISO 8199.

Gesamtzellzahl

Die Bestimmung der Gesamtzellzahl erfolgte mittels Durchflusszytometrie. Die Durchführung war analog zur Durchführung der Ermittlung der Gesamtzellzahl in den Wasserproben von Objekten der Felduntersuchung (siehe Abschnitt 2.4.3).

qPCR

Die Proben wurden der Lebend-/Tot-Differenzierung mittels des qPCR Kits „**micro**proof® *Legionella* Quantification LyoKit“ (Fa. Biotecon Diagnostics) unterzogen. Bevor die Proben nach den Angaben des Herstellers analysiert wurden, wurden diese aufkonzentriert. Zu Aufkonzentrierung wurden 100 mL der Probe durch einen Cellulosenitrat-Membranfilter (Porenweite 0,45 µm) unter Vakuum filtriert. Das Ablösen der Bakterien vom Filter erfolgte mittels Glaskügelchen (Ø ca. 3 mm) in einem Spülpuffer (Fa. Biotecon Diagnostics) für 3 min unter Schütteln. Für die Extraktion der in der Probe vorhandenen DNA wurde das Kit „**food**proof® StarPrep Two Kit“ (Fa. Biotecon Diagnostics) nach Herstellerangaben verwendet.

Bestimmung chemischer Parameter

Am t14 jedes Versuches wurde im TWK-Zulauf in den Emulator (im 5. Liter) sowie in kurzen und langen Endsträngen (jeweils im 1. Liter) der Gehalt an Calcium, Magnesium, Eisen und Kupfer nach DIN EN ISO 11885 im Auftrag von einem externen Labor (Grundwasser-Zentrum Dresden) bestimmt.

7.2.1.3 Aufbereitung und Analyse der Biofilmproben

Die Biofilmgewinnung von Biofilmaufwuchsträgern (Fa. JRG) erfolgte mit geringfügiger Modifizierung nach Angaben des Herstellers. Die Aufwuchsträger wurden im steril filtrierten EVIAN-Wasser bei RT für 5 min bei 35 kHz mittels Ultraschall (Ultraschallbad, Fa. Bandelin) behandelt.

Kulturverfahren

Die Erfassung der Legionellen und kultivierbaren Mikroorganismen erfolgte in KbE/cm^2 mittels Kulturverfahren nach DIN EN ISO 8199.

Gesamtzellzahl

Die Ermittlung der Gesamtzellzahl in den Biofilmproben erfolgte analog zu der Bestimmung der Gesamtzellzahl in den Wasserproben des Emulators sowie der Objekte der Felduntersuchung (siehe Abschnitt 2.4.3).

7.2.2 Ergebnisse thermohydraulische Auswertung

Zur Einführung in die Auswertung, die hinsichtlich der thermohydraulischen Messdaten erfolgt ist, soll das Rasterdiagramm für das TWW-Temperaturniveau 50 °C exemplarisch dargestellt werden (Abb. 7-10).

Die Abszisse zeigt die Messposition, die Ordinate die Uhrzeit, die Temperatur ist farblich codiert.

Das DTS-Messkabel ist an der Außenwand der Rohrleitungen, straff anliegend, verlegt, weshalb die dargestellten Temperaturen nicht die Medien-, sondern die Wandtemperatur an der jeweiligen Messposition zeigen. Dies wird in den beiden Abschnitten für die zirkulierende Ringleitung (Strang 10), welche eine Medientemperatur zwischen 48… 51 °C besitzt, deutlich und muss bei der Interpretation dieser Abbildung berücksichtigt werden.

- Dennoch können einige Effekte veranschaulicht werden (am deutlichsten in den drei langen Strangenden zu erkennen):
- Bei einer Zapfung wandert die warme Temperaturfront vom Abzweig aus der Ringleitung in Richtung Entnahmestelle.
- Die Stränge aus Kupfer (Cu) und Edelstahl, rostfrei, (INOX) besitzen dabei aufgrund ihrer beinahe identischen Wärmekapazität je Rohrmeter ein ähnliches Temperaturverhalten.
- Die größere Wärmekapazität (deutlich größere Wandstärke) des Verbundrohrstranges (PE) bewirkt eine langsamere Erwärmung des Rohres während einer Zapfung – die TWW-Temperatur dringt nicht bis zur Rohraußenwand vor – und eine langsamere Abkühlung in Zeiten zwischen zwei Zapfungen.
- Temperaturen zwischen 25… 40 °C treten dementsprechend häufiger auf als im Kupfer- und im Edelstahlstrang.

Das Biofilmwachstum, welches in diesem Temperaturbereich am besten vonstattengeht, kann also begünstigt werden. Die Temperatur stellt jedoch nur eine Voraussetzung für die Vermehrung von Legionellen im Biofilm dar. Eine geringe Rohrrauigkeit als eine weitere Voraussetzung erschwert dagegen die Etablierung eines Biofilms. Hier erweist sich das Verbundrohr als beste Wahl.

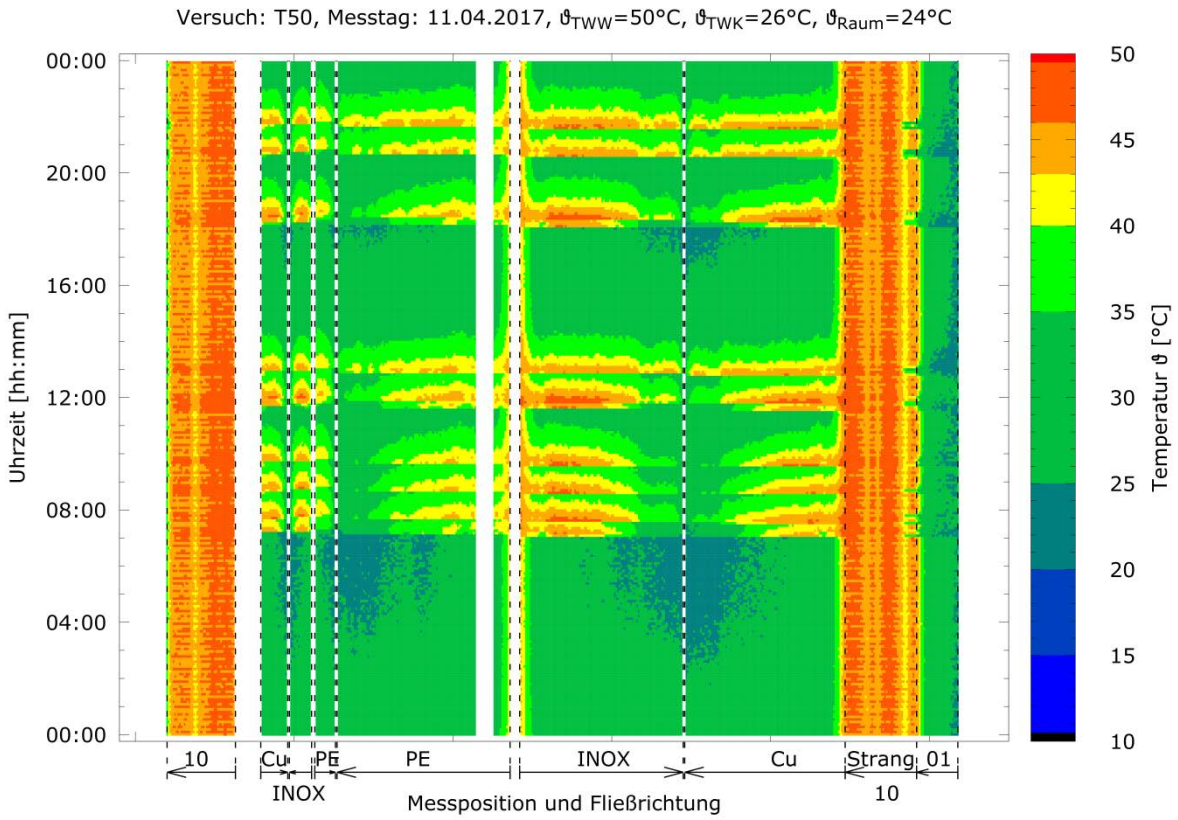


Abb. 7-10 Rasterdiagramm zur Darstellung des Temperaturverlaufes bei TWW-Temperatur 50 °C, 11.04.2017

7.2.3 Ergebnisse Trinkwasserhygiene

Da im Emulator der TWE-Austritt sowie der Zirkulationsrücklauf einen gemeinsamen Strang darstellen, entsprach die Temperatur des TWE-Austrittes ($\vartheta_{TWE,aus}$) der Temperatur der Zirkulation ($\vartheta_{TWZ,ein}$). Daher findet im Weiteren für $\vartheta_{TWE,aus}$ und $\vartheta_{TWZ,ein}$ vereinfachend der Begriff „Zirkulationstemperatur“ Verwendung.

7.2.3.1 Legionellen – Einfluss der Temperatur des Zirkulationskreises auf die Konzentration in der Wassersäule und im Biofilm der Endstränge

Wasseranalyse (Kultur, qPCR)

Die im Emulator getesteten Temperaturvarianten des Zirkulationskreises (45…60 °C) zeigten eine negative Korrelation zu der Vermehrungs- bzw. Persistenzrate der Legionellen in den Endsträngen aus allen drei getesteten Werkstoffen (Abb. 7-11). Der Legionelleneintrag aus dem TWK-Zulauf in den Emulator spiegelte sich dabei nicht direkt in den Endsträngen wieder. Eine nennenswerte Abnahme der Koloniezahl (zwischen 0,5 und 1

Log_{10}-Stufe) wurde unter der Wirkung der Zirkulationstemperatur von 55 °C im endständigen 1. Liter der kurzen (ca. 0,5 Liter Wasservolumen) und der langen (ca. 3,0 Liter Wasservolumen) Stränge des Emulators festgestellt. Die ermittelten Werte blieben dennoch über 100 KbE/100 mL. Ein Rückgang der Legionellenkonzentration auf einen Wert ≤ 100 KbE/100 mL konnte durch eine Zirkulationstemperatur von 60 °C werkstoffunabhängig in den kurzen sowie in den langen (1. und 2. Liter) Endsträngen gezeigt werden (Abb. 7-11).

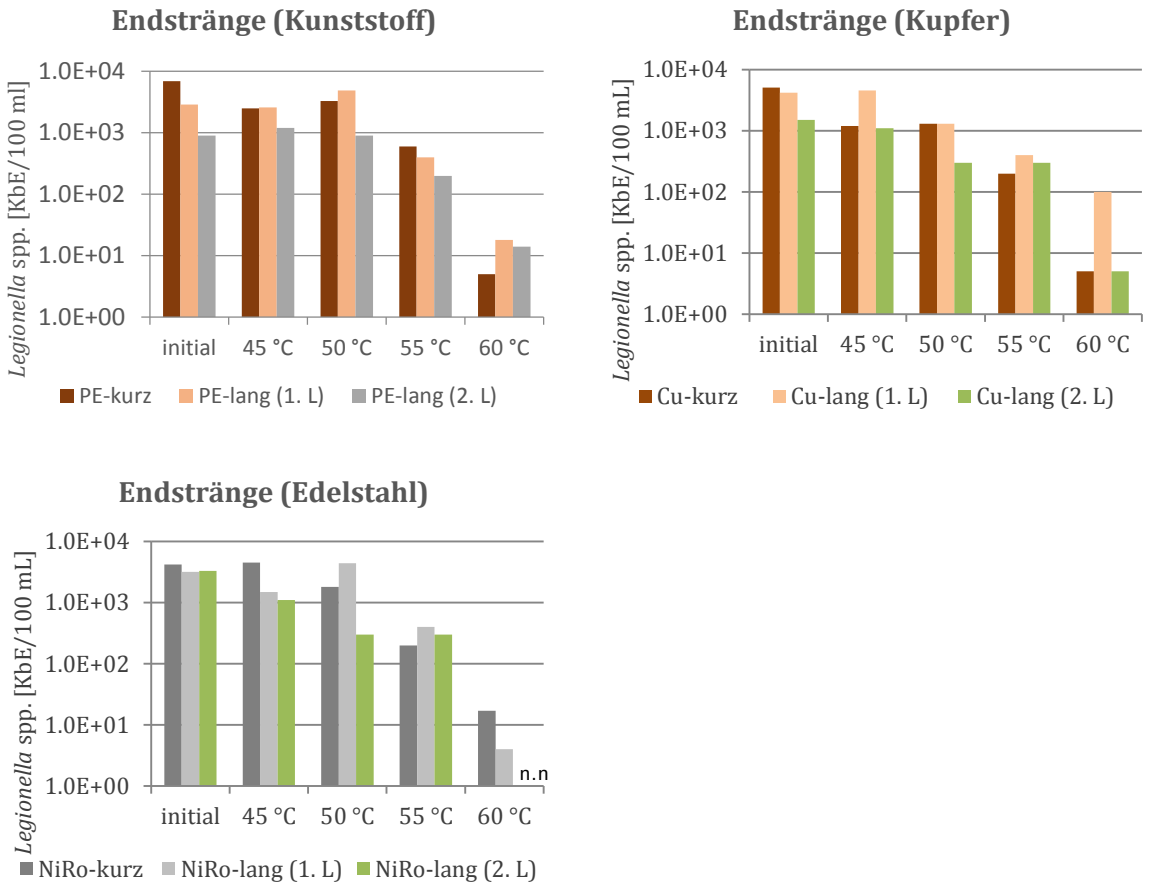


Abb. 7-11 Kulturell nachgewiesene Legionellen in der Wassersäule der Endstränge unter steigender Temperatur im Zirkulationskreis (Zeitpunkt der Probenahme t14). PE= Kunststoff, NiRO= Edelstahl, Cu= Kupfer, 1.L= Probenahme des 1 Liters, 2.L= Probenahme des 2 Liters

Die Ergebnisse der *Legionella* spp./*L. pneumophila* lebend/tot qPCR, welche zwischen Zellen mit intakter Zellmembran (lebend) und Zellen ohne intakte Membran (tot) unterscheidet zeigten, dass die steigende Zirkulationstemperatur wenig Effekt auf die membran-intakten *Legionella* spp.-Zellen bei allen Werkstoffen in den Endsträngen aufwies. Hingegen war ein tendenzieller Rückgang von Genomeinheiten (GU) der *L. pneumophila*-Zellen mit Erhöhung der Zirkulationstemperatur assoziiert (Abb. 7-12).

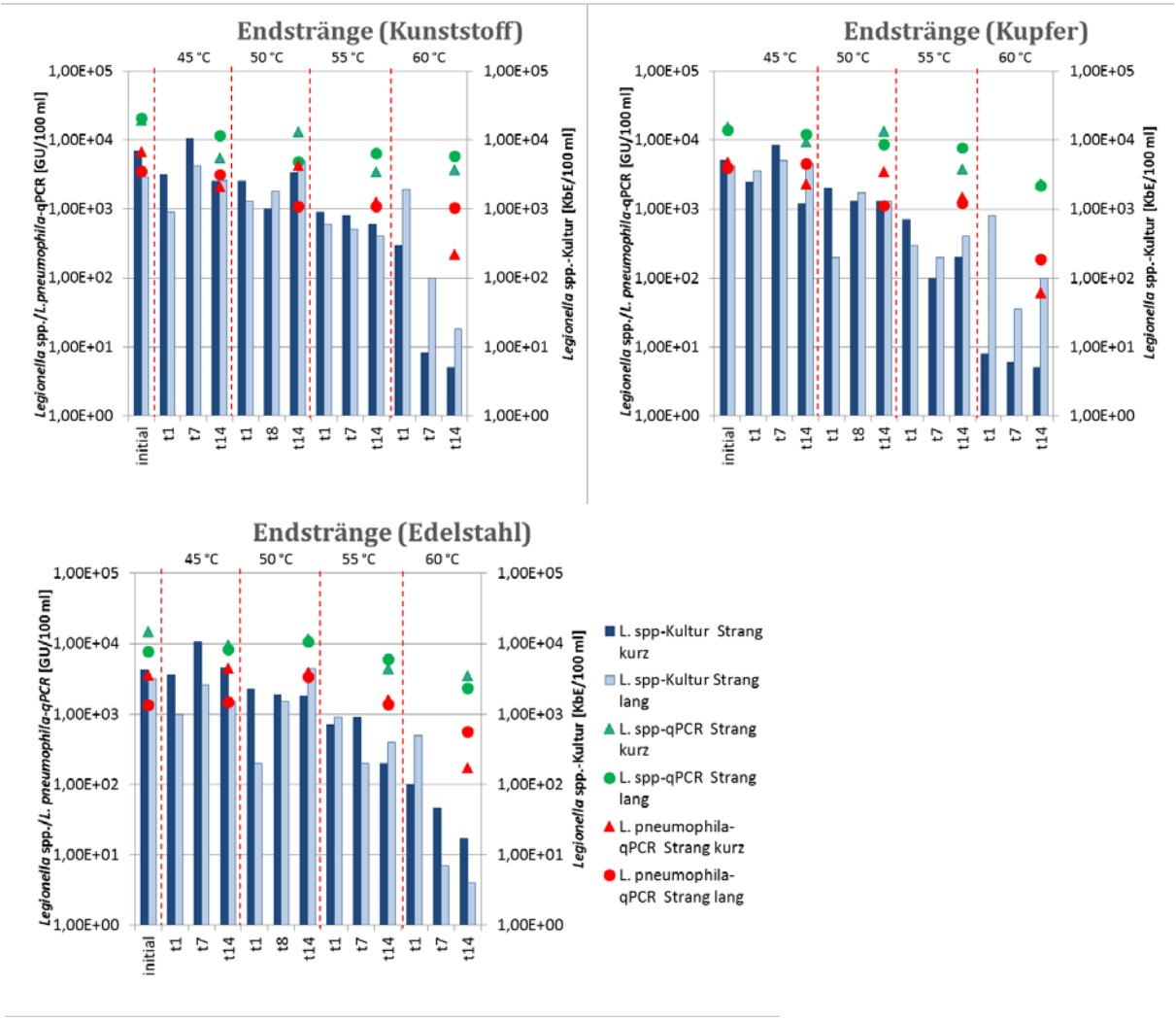


Abb. 7-12 Ergebnisse des kulturellen Nachweises von *Legionella* spp. (Zeitpunkt der Probenahme t1, t7/t8, t14) und der *Legionella* spp./*L. pneumophila* qPCR membran-intakter Zellen (t14) unter Einfluss verschiedener Temperaturen des Zirkulationskreises (45…60 °C)

Außerdem konnte anhand des Vergleiches der *L. pneumophila* qPCR-Ergebnisse mit den Ergebnissen der Kultur erkannt werden, dass bis 55 °C Zirkulationstemperatur die Koloniezahl mit den qPCR-Ergebnissen in gleicher Größenordnung bei allen Werkstoffen der kurzen und langen Endstränge liegen. Ab 55 °C Zirkulationstemperatur konnte hingegen ein Unterschied zwischen der Zahl der koloniebildenden Einheiten und der Anzahl der membran-intakten *L. pneumophila* Zellen (GU, lebend/tot qPCR) unabhängig vom Werkstoff und Strangvolumen festgestellt werden. Bei 60 °C Zirkulationstemperatur umfasste die Diskrepanz zwischen den beiden Parametern mit einer Ausnahme mindestens eine Log_{10}-Stufe (Abb. 7-12). Dies deutet darauf hin, dass ein Teil von planktonischen *L. pneumophila* Zellen infolge des Temperaturstresses in das VBNC-Stadium gegangen ist. Dies steht im Einklang mit den Daten aus der Literatur. [Allegra08] sowie [Epalle15] berichteten bereits über die Induzierung des VBNC-Zustandes bei *L. pneumophila* unter einem Hitzestress.

Biofilmanalyse (Kultur)

Es konnte ein schrittweiser Rückgang des *Legionella*-Anteils im Biofilm auf der Kupferoberfläche des kurzen und langen Stanges bei der Temperaturerhöhung beobachtet werden. Auf der Edelstahloberfläche des kurzen Stranges ging die Besiedlungsrate des Biofilmes durch Legionellen ebenfalls zurück (Abb. 7-13). Bei 55 °C Zirkulationstemperatur konnte die Biofilmbildung inklusive Legionellen auf allen drei eingesetzten Rohrmaterialien der Endstränge, aber auch auf der Oberfläche des Zirkulationsstranges erfolgen. Bei der Temperatur in der Zirkulation von 60 °C waren auf den Biofilmträgern im Zirkulationsstrang sowie im kurzen Edelstahlstrang keine Legionellen kulturell nachweisbar (Abb. 7-13).

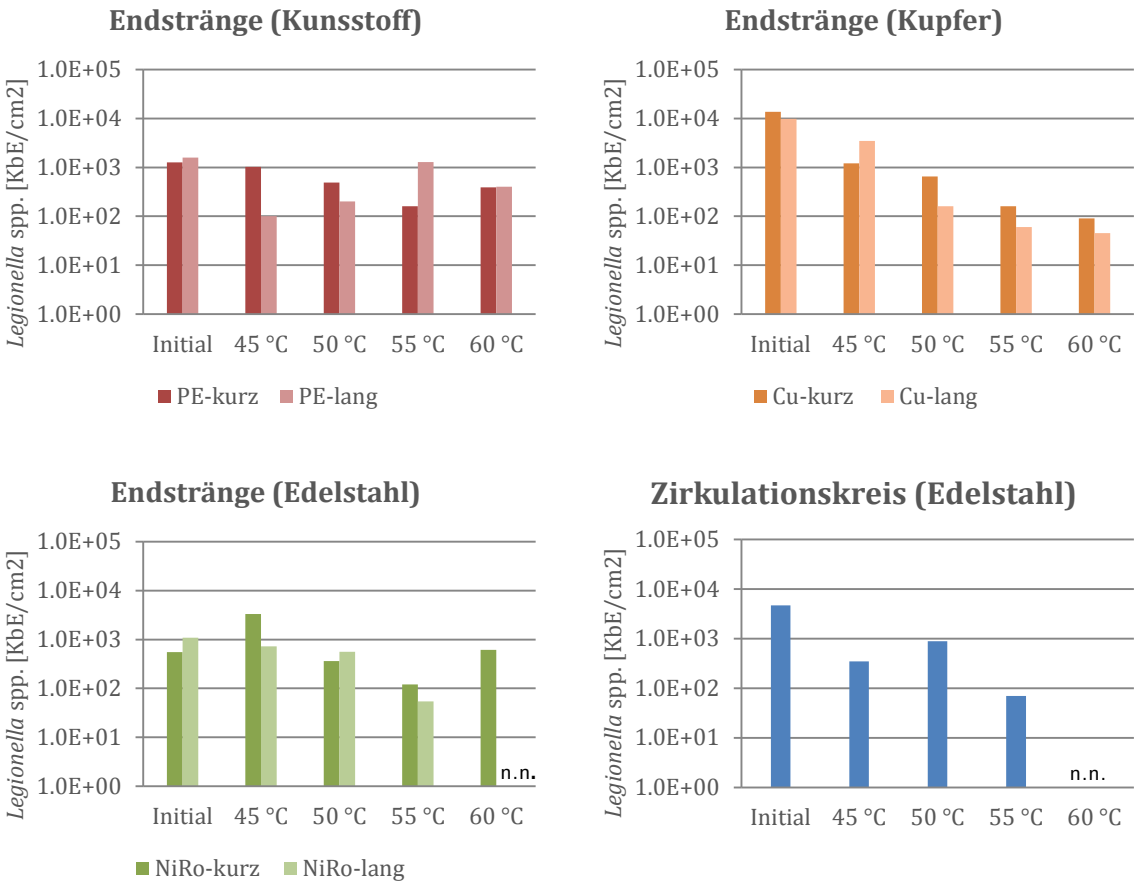


Abb. 7-13 Kulturell nachgewiesene Legionellen im Biofilm der Endstränge und des Zirkulationskreises unter steigender Zirkulationstemperatur (Zeitpunkt der Probenahme t14). PE= Kunststoff, NiRO= Edelstahl, Cu= Kupfer

7.2.3.2 Legionellen – Werkstoffeinfluss auf die die Konzentration in der Wassersäule und im Biofilm der Endstränge

Wasseranalyse (Kultur, qPCR)

Die ermittelten Werte des kulturellen Nachweises von *Legionella* spp. sowie der qPCR waren für die Stränge aus Kupfer, Edelstahl und Kunststoff annähernd identisch (Abb. 7-11, Abb. 7-12). Dabei sollte berücksichtigt werden, dass während der einzelnen Versu-

che durch die Korrosion der Kupferstränge und anderer kupferhaltigen Teilen des Emulators (Rotguss-Fittings etc.) Kupfer in messbaren Größen in Wassersäule des Emulators gelangte. Kupferionen können eine toxische Wirkung auf die Gram-negativen und Gram-positiven Mikroorganismen besitzen [Warnes12]. Es konnte der negative Einfluss von Kupfer auf die Kultivierbarkeit von *L. pneumophila* im Wasser (pH-Wert 7) ebenfalls nachgewiesen werden [Lin02]. Die über den gesamten Testzeitraum gemessenen Konzentrationen an Kupfer im Emulator waren im Wasser der Kupferstränge erwartungsgemäß am höchsten ($\bar{x}$=0,89 mg/L), gefolgt von Kunststoffsträngen mit $\bar{x}$=0,54 mg/L, Edelstahlsträngen mit $\bar{x}$=0,14 mg/L und dem TWK-Zulauf mit $\bar{x}$=0,07 mg/L Kupfer. Der unterschiedliche Kupfergehalt zeigte dennoch keinen nennenswerten Effekt auf die Legionellen bei den untersuchten Temperaturen. Es ist allerdings zu bemerken, dass alle ermittelten Kupferwerte unter dem Grenzwert von 2 mg/L für das Trinkwasser nach TrinkwV 2001 lagen. Kupfer konnte durch das TWK in den Emulator nicht eingetragen werden, da die Konzentrationen an Kupfer für den TWK-Zulauf unter der gemessen Konzentrationen für Werkstoffstränge lag (Abb. 7-14, Anhang 15.16, Tab. 15-3).

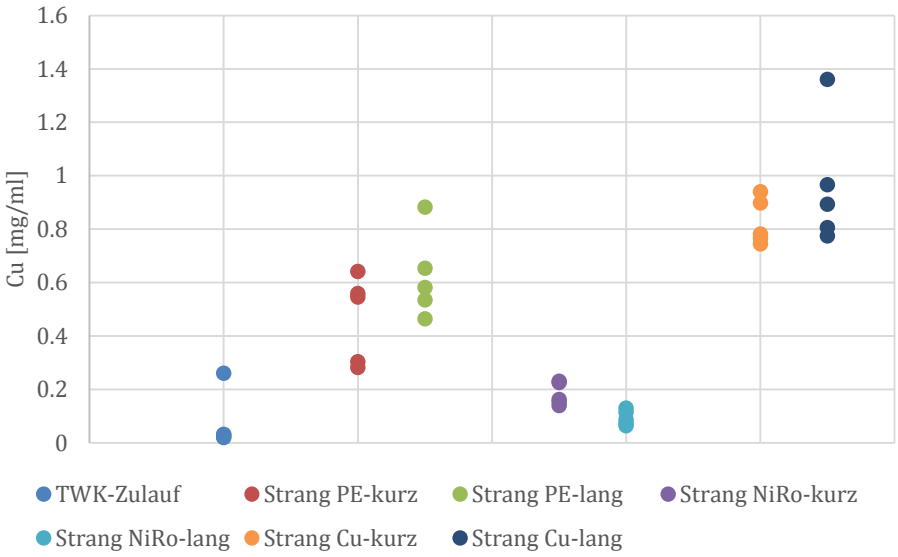


Abb. 7-14 Streuung der ermittelten Kupferkonzentration in den Endsträngen und im TWK-Zulauf in den Emulator über den gesamten Untersuchungszeitraum (Zeitpunkt der Probenahme t14). PE= Kunststoff, NiRO= Edelstahl, Cu= Kupfer

Neben dem Kupfergehalt wurden unter anderem die Konzentrationen an Calcium und Magnesium ermittelt. Es wird vermutet, dass diese Wasserinhaltsstoffe und dabei vor allem die Calciumionen den negativen Effekt von Kupfer auf die Legionellen im Trinkwasser minimieren können (persönliche Mitteilung Dr. J. Wingender, Universität Duisburg-Essen). Die im TWK-Zulauf in den Emulator und in den Endsträngen des Emulators gemessenen Konzentrationen lagen über den gesamten Untersuchungsraum im Durchschnitt bei 64,96 mg/L für Calcium und bei 10,73 mg/L für Magnesium. Die Konzentrationen wiesen Schwankungen zwischen den einzelnen Temperaturversuchen auf, waren aber annähernd identisch sowohl im TWK-Zulauf als auch in den Endsträngen des Emulators innerhalb eines Versuchs (Abb. 7-15, Abb. 7-16, Anhang Tab. 15-4, Tab. 15-5). Außerdem unterschieden sich die ermittelten Werte generell relativ wenig von den angege-

ben Werten für das Reinwasser der Dresdner Wasserwerke Coschütz, Hosterwitz und Tolkewitz. Die Konzentrationen dieser Wasserparameter betragen im Jahresmittel $\bar{x}$=50,8 mg/L für Calcium und $\bar{x}$=9,0 mg/L für Magnesium (bezogen auf das Jahr 2017).

Der Schwellenwert für Kupfer, bei dem die trinkwasserrelevanten Konzentrationen an Calcium und Magnesium (wie im diesen Fall) möglicherweise die Wirkung auf Legionellen nicht mehr hemmen, ist zurzeit nicht bekannt. Ob der ausgebliebene negative Kupfereffekt auf die planktonischen Legionellen im Emulator auf die geringe Kupferkonzentration in den Endsträngen und/oder auf den vermuteten Einfluss von Calcium und Magnesium aus dem Trinkwasser zurückzuführen war, ist nach der Datenlage nicht zu beantworten. Dazu sind weitere Untersuchungen notwendig.

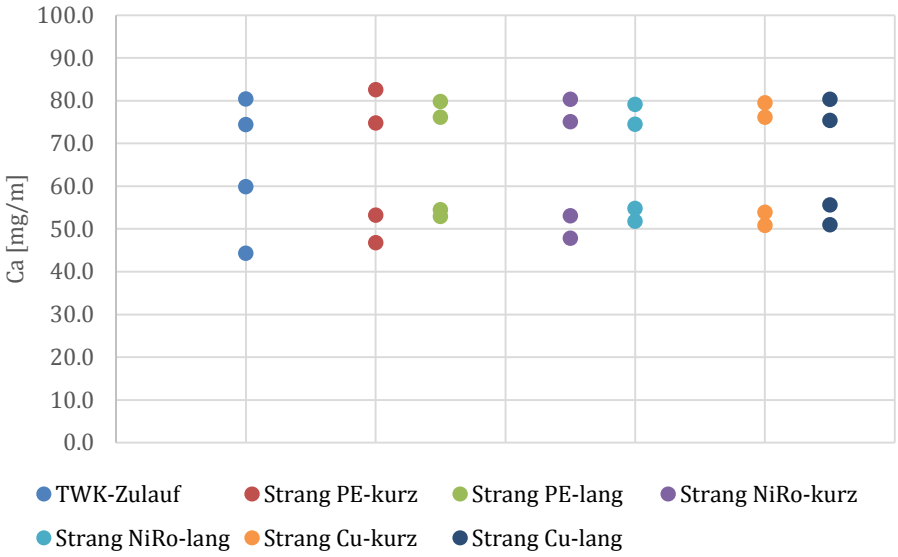


Abb. 7-15 Streuung der ermittelten Calciumkonzentration in den Endsträngen und im TWK-Zulauf in den Emulator über den gesamten Untersuchungszeitraum (Zeitpunkt der Probenahme t14). PE= Kunststoff, NiRo= Edelstahl, Cu= Kupfer

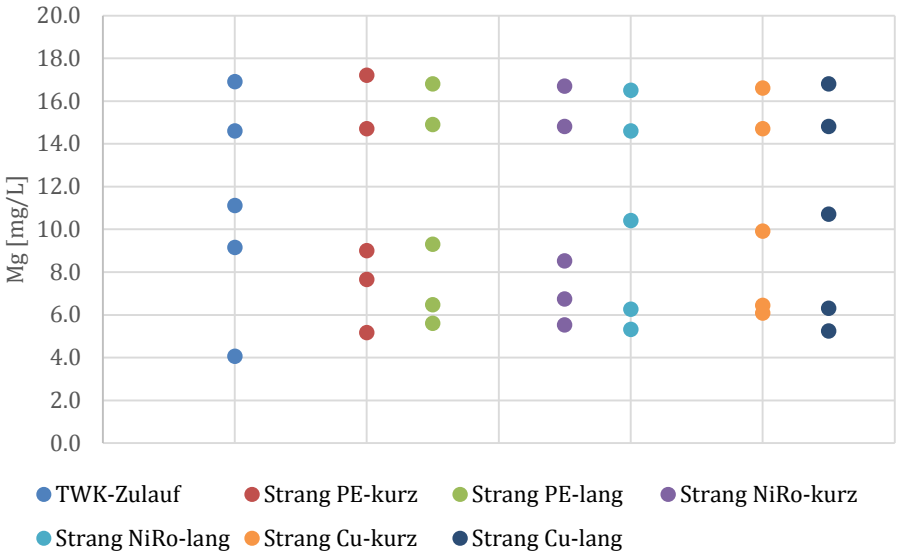


Abb. 7-16 Streuung der ermittelten Magnesiumkonzentration in den Endsträngen und im TWK-Zulauf in den Emulator über den gesamten Untersuchungszeitraum (Zeitpunkt der Probenahme t14). PE= Kunststoff, NiRo= Edelstahl, Cu= Kupfer

Biofilmanalyse (Kultur)

Die Wirkung steigender Zirkulationstemperatur auf den Anteil kultivierbarer Legionellen in den Biofilmen hing im Gegensatz zu der Legionellenkonzentration im Wasser mit dem Werkstoff der Endstränge zusammen. Wie im Abschnitt 7.2.3.1 bereits gezeigt, konnte eine temperaturdeterminierende Abnahme der kulturell nachgewiesenen Legionellen im Biofilm auf den Kupferoberflächen des kurzen bzw. langen Endstranges festgestellt werden. Im langen Edelstahlendstrang bzw. im Zirkulationsstrang (ebenfalls aus Edelstahl) konnte partiell einen Rückgang in der Einnistung der Legionellen in den Biofilm mit steigender Temperatur beobachtet werden. Auf den Kunststoffoberflächen der Endstränge wurden hingegen keine nennenswerten Veränderungen in der Zellzahl der Legionellen in den Biofilmen mit dem Anstieg der Zirkulationstemperatur festgestellt (Abb. 7-13). Es ist vorstellbar, dass die Reduktion des Anteiles von Legionellen in Biofilm auf Kupfer auf eine multifaktorielle Ursache zurückzuführen war. Neben dem negativen Einfluss der Zirkulationstemperatur, stellte möglicherweise der direkte Kontakt der Mikroorganismen mit der Kupferoberfläche einen zusätzlichen Stressfaktor dar.

Zusätzlich ist noch zu bemerken, dass die Biofilme auf den Kupferoberflächen vor allem initial stärker durch Legionellen als die Kunststoff- und Edelstahloberflächen besiedelt wurden (Abb. 7-13). Ein Nachweis höherer Konzentrationen der Legionellen in den komplexen Biofilmen auf den Kupferoberflächen im Vergleich zu den Kunststoffoberflächen wurde bereits berichtet. Allerdings erfolgte die Detektion der Legionellen mittels einer kultivierungsunabhängiger Methode (PNA-FISH) [Giao15]. Legionellen haben eine fakultativ-parasitäre Lebensweise und sind auf ihre natürlichen Wirte wie z. B. Amöben angewiesen. Um den Einfluss verschiedener Wirkstoffe oder Temperaturen auf Legionellen zu betrachten, ist der Einfluss dieser Faktoren auf den Wirt ebenfalls von Interesse. Im Wassernetz welches den Emulator versorgte, wurde zuvor ein *V. vermiformis* Stamm nachgewiesen. So beschrieben Proctor *et al.*, dass die Amöbe *V. vermiformis* bei den

niedrigen Wassertemperaturen (< 41 °C) höhere Konzentrationen in einem simulierten TWE mit Kupfer als in einem mit Kunststoff aufwies [Procter17]. Die dichte Besiedlung der Kupferoberflächen durch Legionellen vor allem während der Initialphase (≤ 37 °C), könnte daher durch eine hohe Anzahl von *V. vermiformis* unterstützt wurde. Dies gilt noch im Detail zu analysieren.

7.2.3.3 Legionellen – Strangvolumeneinfluss auf die Konzentration in der Wassersäule und im Biofilm der Endstränge

Wasseranalyse (Kultur, qPCR)

Da kein Werkstoffeinfluss auf die Legionellenkonzentration in der Wassersäule festgestellt wurde (siehe Abschnitt 7.2.3.2), erfolgte die Bewertung des Faktors „Strangvolumen“ anhand der Mittelwerte der kulturell nachgewiesenen Legionellen der drei Werkstoffe für den kurzen und langen Strang. Für einen direkten Vergleich der unterschiedlichen Volumina/Länge der Endstränge wurden die Kulturergebnisse des 1. Liters der Endstränge analysiert. Diese zeigten minimale Unterschiede zwischen der Koloniezahl der kurzen und langen Endstränge (Abb. 7-17). Die hohe Standardabweichung bei 60 °C im langen Endstrang ergab sich aufgrund einer einzelnen Kolonie im Direktansatz (2 x 0,5 mL) des Cu-Stanges. Die Hochrechnung dieses Ansatzes auf KbE/100 mL verschob den Mittelwert nach oben und erhöhte dementsprechend die Standardabweichung.

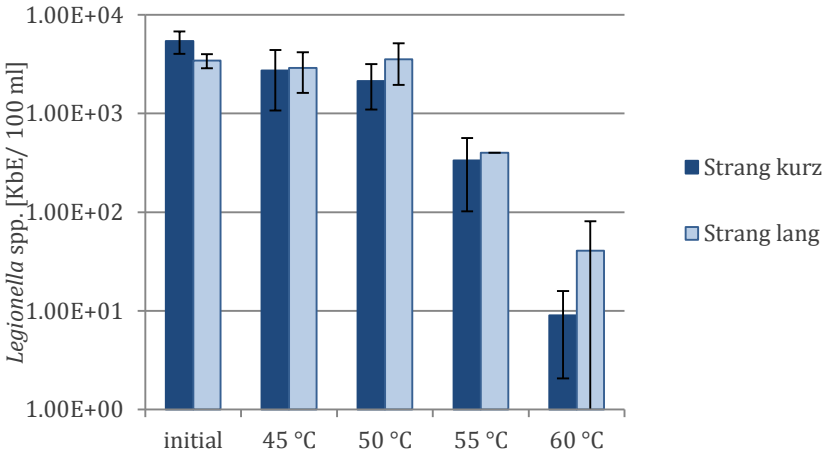


Abb. 7-17 Mittelwerte (MW) der kulturell nachgewiesenen Legionellen im 1. Liter aus den Endsträngen des Emulators (n=3, t14 Werte von allen Werkstoffleitungen)

In der qPCR konnten ebenfalls keine Unterschiede in der Konzentration der membranintakten Legionellen (*Legionella* spp. lebend/tot qPCR) zwischen den kurzen und langen Strängen aus allen Werkstoffen festgestellt werden (Abb. 7-12). Es ist allerdings zu bemerken, dass bei 60 °C Zirkulationstemperatur eine Senkung der membranintakten *L. pneumophila*-Zellen (*L. pneumophila* lebend/tot qPCR) um ca. 0,5 Log_{10}-Stufe in allen kurzen Strängen im Vergleich zu den langen Strängen verzeichnet wurde (Abb. 7-12).

Biofilmanalyse (Kultur)

Anhand der in Abb. 7-18 dargestellten Daten des kulturellen Nachweises von *Legionella* spp. konnte erkannt werden, dass das Endstranginhaltsvolumen auf die Biofilmbesiedlung durch Legionellen bei allen Werkstoffen einen geringen bzw. keinen Einfluss zeigte. Dabei ist zu berücksichtigen, dass der nachgewiesene Legionellenanteil im Biofilm sowohl in kurzen als auch in langen Endsträngen erhebliche Schwankungen vor allem bei Kunststoff und Edelstahl aufwies (Abb. 7-18). Die Biofilme besitzen generell keine homogene Verteilung der Mikroorganismen. Dies betrifft auch die Biofilme mit Legionellen. Es wurde vermutet, dass in den Biofilmproben der Kunststoff- bzw. Edelstahlstränge die Heterogenität in der Mikroorganismenverteilung besonders ausgeprägt war.

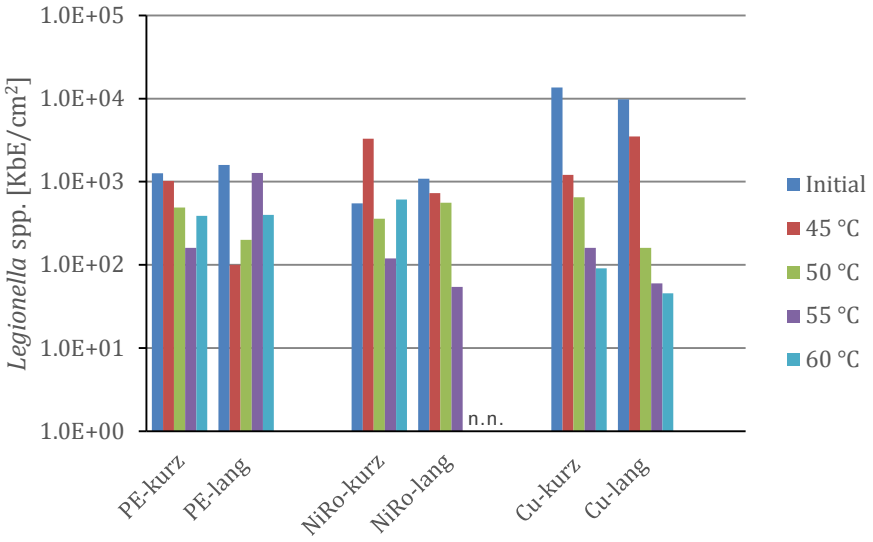


Abb. 7-18 Kultivierbare Legionellen im Biofilm der Endstränge unter steigender Zirkulationstemperatur (Zeitpunkt der Probenahme t14). PE= Kunststoff, NiRo= Edelstahl, Cu= Kupfer

7.2.3.4 Heterotrophe Bakterien – Einfluss der Temperatur des Zirkulationskreises, des Werkstoffes sowie der Stranginhaltsvolumina auf die Konzentration in der Wassersäule und im Biofilm der Endstränge

Wasseranalyse (Kultur, Durchflusszytometrie)

Es wurde der Einfluss von unterschiedlichen Strangmaterialien auf die Vermehrung von heterotropher Flora im Emulator vorwiegend als sehr minimal angesehen (siehe Anhang Abb. 15-17, Abb. 15-18). Daher wurde der Einfluss der Zirkulationstemperatur sowie der Stranginhaltvolumina auf die Konzentration heterotropher Flora werkstoffunabhängig analysiert (Abb. 7-19).

Die kulturell nachgewiesene Anzahl der heterotrophen Bakterien schwankte generell in einem Bereich zwischen 10^2 und 10^3 KbE/mL über den gesamten Untersuchungszeitraum und wies somit keinen negativen Effekt von steigender Zirkulationstemperatur auf. Mit der Erhöhung der Zirkulationstemperatur (ab 55 °C) konnte allerdings eine Veränderung in der bakteriellen Population phänotypisch festgestellt werden (Daten nicht gezeigt). Somit ist ein Populationswechsel in der heterotrophen Mikrobiota zugunsten Bakterien-

spezies denkbar, die eine bessere Anpassung an hohe Temperaturen und/oder Veränderung in der Konzentration chemischer Wasserparameter (z. B. Kupfer) besitzen. Eine Rolle der Temperatur sowie der Rohrmaterialien bei der Variation in der Zusammensetzung der heterotrophen Flora konnte in den simulierten Warmwasserleitungen bereits gezeigt werden [Procter17]. In kurzen Strängen wurden bei den Temperaturen < 55 °C mehr Bakterien als in den langen Strängen detektiert. Wohingegen wurde ab 55 °C eine Dominanz der Bakterien in den langen Strängen beobachtet (im 1. Liter). Eine mögliche Erklärung konnte die oben beschriebene Veränderung in der bakteriellen Zusammensetzung sein.

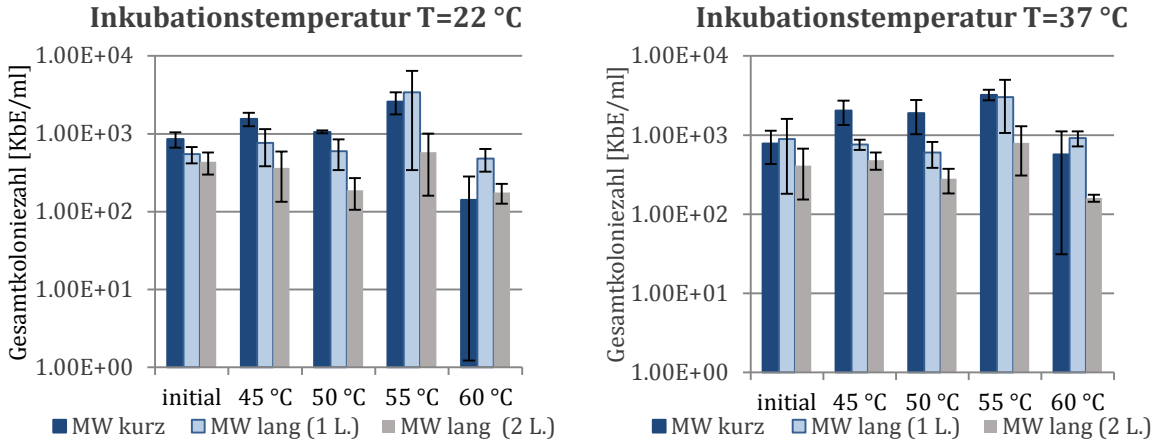


Abb. 7-19 Mittelwerte (MW) der kulturell nachgewiesenen heterotrophen Bakterien in der Wassersäule der Endstränge des Emulators (n=3, t14 Werte von allen Werkstoffleitungen). 1.L= Probennahme des 1 Liters, 2.L= Probenahme des 2 Liters

Die Ergebnisse der Durchflusszytometrie bestätigten die Ergebnisse des kulturellen Nachweises. Es konnte eine Reduzierung der Gesamtzellzahl in den Endsträngen mit zunehmender Zirkulationstemperatur nicht festgestellt werden. Die heterotrophen Bakterien zeigten zwar eine Tendenz zu allmählicher Abnahme mit zunehmender Temperatur, die Unterschiede zwischen den einzelnen Temperaturversuchen waren aber sehr gering. Außerdem konnte anhand der durchflusszytometrischen Daten der Einfluss von Werkstoff und Stranglänge ebenfalls nicht bestätigt werden (Abb. 7-20).

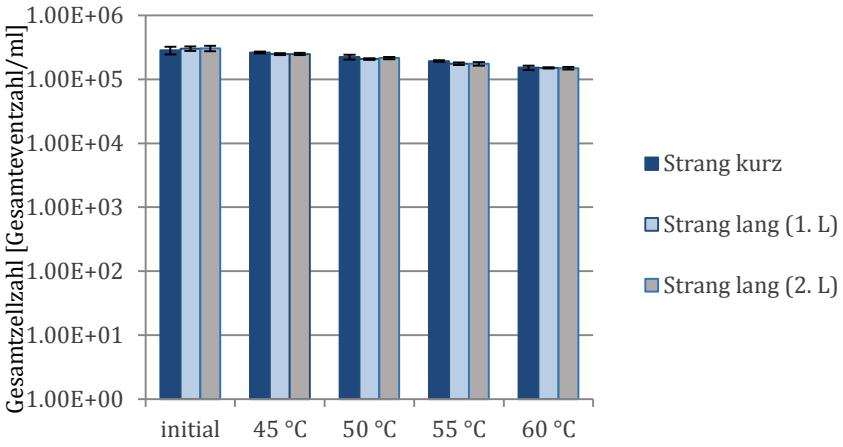


Abb. 7-20 Mittelwerte der ermittelten Gesamteventzahl (Durchflusszytometrie) in der Wassersäule der Endstränge des Emulators (n=3, t14 Werte von allen Werkstoffleitungen)

Biofilmanalyse (Kultur, Durchflusszytometrie)

Unter der Erhöhung der Zirkulationstemperatur konnte eine tendenzielle Abnahme der kultivierbaren heterotrophen Mikroorganismen im Biofilm in Abhängigkeit von Werkstoff nachgewiesen werden. Die Reduzierung der Gesamtzellzahl war auf den Kupferoberflächen der Endstränge am stärksten ausgeprägt (insbesondere bei Inkubationstemperatur T=22 °C). Der Einfluss der Zirkulationstemperatur auf die Biofilmbildung in den Kunststoffsträngen blieb hingegen ganz aus (Abb. 7-22). Es ist hier noch zu erwähnen, dass die Anzahl der kultivierbaren heterotrophen Bakterien nicht mit der Anzahl der kulturell nachgewiesenen Legionellen im Biofilm korrelierte (Daten nicht gezeigt).

Es war auffällig, dass die Wirkung steigender Temperatur auf die Biofilmbildung vor allem in den kurzen Endsträngen sichtbar war (Abb. 7-22, Abb. 7-23). Dies sprach für eine Rolle der Stranglänge als einem additiven Einflussfaktor bei der Etablierung der Biofilme mit heterotropher Flora in den Endsträngen des Emulators.

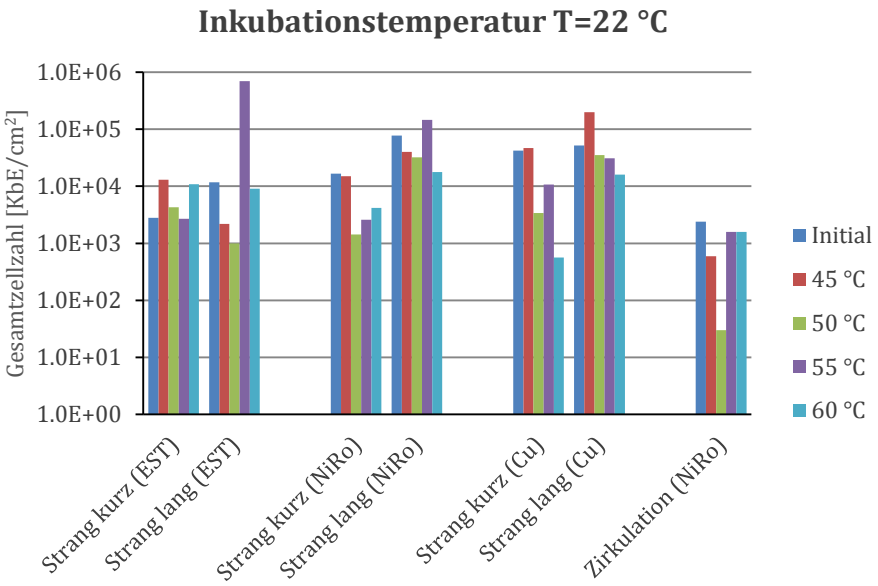


Abb. 7-21 Kulturell nachgewiesene heterotrophe Bakterien im Biofilm der Endstränge und des Zirkulationskreises unter steigender Temperatur im Zirkulationskreis (Zeitpunkt der Probenahme t14, Inkubationstemperatur 22 °C). PE= Kunststoff, NiRo= Edelstahl, Cu= Kupfer

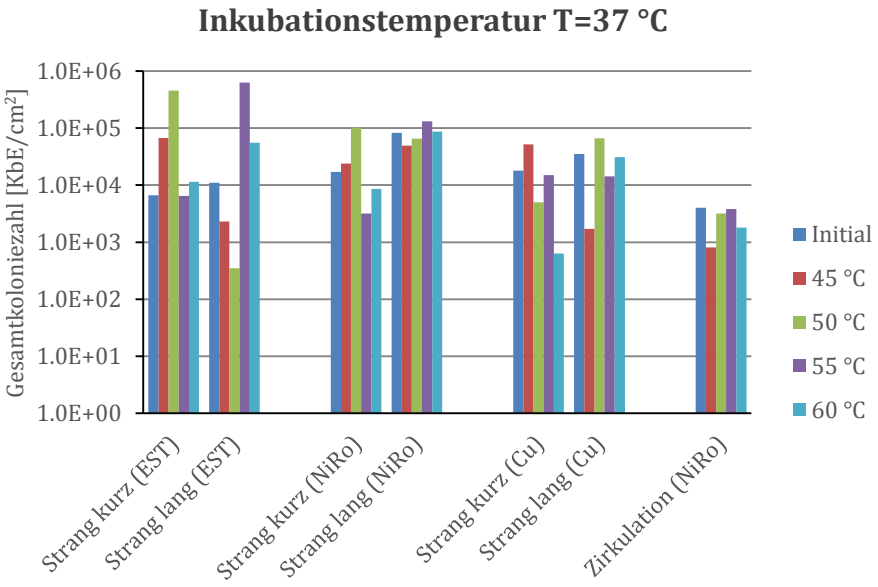


Abb. 7-22 Kulturell nachgewiesene heterotrophe Bakterien im Biofilm der Endstränge und des Zirkulationskreises unter steigender Temperatur im Zirkulationskreis (Zeitpunkt der Probenahme t14, Inkubationstemperatur 37 °C). PE= Kunststoff, NiRo= Edelstahl, Cu= Kupfer

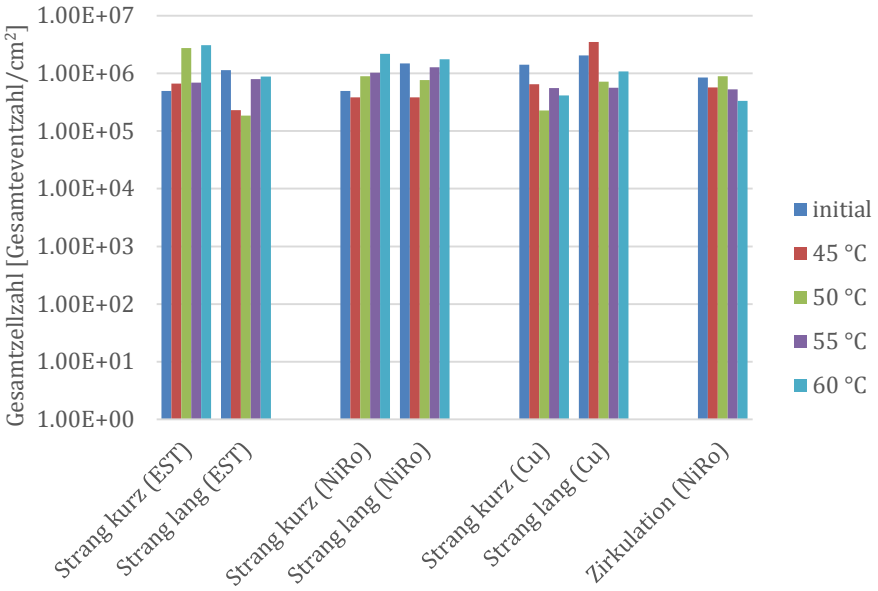


Abb. 7-23 Ermittelte Gesamteventzahl (Durchflusszytometrie) im Biofilm der Endstränge des Zirkulationskreises des Emulators (Zeitpunkt der Probenahme t14). PE= Kunststoff, NiRo= Edelstahl, Cu= Kupfer

Es konnte ein minimaler Rückgang der mittels Durchflusszytometrie bestimmter Gesamtzellzahl (< 0,5 Log_{10}-Stufe je Temperatuschritt) im Zirkulationskreis unter steigender Temperatur beobachtet werden. Im endständigen Bereich konnte hingegen weder Einfluss von Zirkulationstemperatur noch von Werkstoff und Stranglänge auf die heterotrophe Organismen festgestellt werden (Abb. 7-23).

7.2.4 Überlagerung Erkenntnisse Thermohydraulik und Trinkwasserhygiene

Die in den Endsträngen erreichten Temperaturmittelwerte während jeder getesteten Temperaturphase wichen stark von den erzeugten Temperaturen in der Zirkulation ab (Tab. 7-3, Tab. 7-4). Diese lagen im Bereich zwischen 27,9 °C und 38,3 °C für den gesamten Testzeitraum. Somit ergaben sich Temperaturdifferenzen zwischen den Temperaturen in den nicht zirkulierenden Strängen und der zentral in der Zirkulation gemessenen in Höhe von 13,3 K (45 °C-Versuch) bis 27,5 K (60 °C-Versuch). Der Zeitanteil der Zirkulationstemperatur in den Endsträngen war dementsprechend sehr gering und wurde nur beim Wasserzapfen erreicht. Zum Bsp. konnten in der Zirkulation bei eingestellter Temperatur am Durchlauferhitzer von 60 °C die Werte von ≥ 55 °C für 100 % der Zeit gemessen werden (Messstelle: Zirkulation, vor Pumpe). Im Gegensatz dazu erreichte die Temperatur in den kurzen Endsträngen im Durchschnitt für nur 5 % und in den langen Endsträngen für nur < 1 % der Zeit den Wert von ≥ 55 °C (bezogen auf 24 h-Zeitintervall) (Tab. 7-3). Der desinfizierende Effekt der relativ kurzen Einwirkzeiten der Zirkulationstemperatur von 55/60 °C pro Tag in dem endständigen Bereich ist möglicherweise durch den Zeitfaktor zu erklären. Eine Verminderung der kultivierbaren Legionellen blieb in meisten Strängen nach 24 h nach der Temperaturerhöhung (t1) aus. Nach 7 Tagen (t7) und meistens noch stärker nach 14 Tagen (t14) nach der Temperaturerhöhung kam es zu der Reduzierung der Legionellen in allen Endsträngen (Abb. 7-12). Somit lässt sich vermuten, dass der Effekt der kurzen Expositionsdauer von Temperatur pro

Tag durch die summierte Wirkung der Temperatur über 14 Tage intensiviert wurde. Außerdem kann nicht ausgeschlossen werden, dass die effektive Wirkung von 60 °C Zirkulationstemperatur durch die Temperatur im Bereich von ≥ 50 < 55 in den Endsträngen unterstützt wurde. Der prozentuale Anteil dieses Temperaturbereiches während der 60 °C Testphase erhöhte sich um das 2- bis 3-Fache im endständigen Bereich im Vergleich zur 55 °C Testphase (Tab. 7-4).

Das eingestellte Zapfprofil repräsentiert außerdem aufgrund der schnellen Abkühlung des Wassers im endständigen Bereich möglicherweise kein reales Endnutzerverhalten. Wie unter oben schon erwähnt, kühlt sich das Wasser in den Endsträngen rasch bis teilweise auf die Raumtemperatur ab. Das primäre Ziel des Endnutzers liegt aber in dem Zapfen vom warmen Wasser. Dies wird mit dem eingestellten Zapfprofil am Emulator nur sehr selten erreicht. Daher würde im Realfall der Endnutzer größere Volumina ablaufen lassen, bis die gewünschte Warmwasser-Temperatur erreicht ist.

Tab. 7-3 Temperaturverteilungen in der Zirkulation und in den nicht zirkulierenden Endsträngen des Emulators (Zeitanteile in %, bezogen auf einen repräsentativen Tag während der jeweiligen Temperaturtestphase, Messung mit PT-100-Sensoren). Der Temperaturbereich, in dem das Wachstumsoptimum für *L. 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. 7-4 Mittelwert der Temperaturen in der Zirkulation und in den nicht zirkulierenden Endsträngen des Emulators (in °C, gemessen mit PT-100-Sensoren, 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

7.3 Untersuchungen zu *Pseudomonas aeruginosa*

7.3.1 Allgemeines zu *Pseudomonas aeruginosa* (*P. aeruginosa)*

P. aeruginosa ist ein fakultativ pathogenes Umweltbakterium, dessen Anwesenheit in Trinkwasser-Installationen als hygienisch-mikrobielle Auffälligkeit bewertet wird [DVGW W 556 (A)]. Besonders immungeschwächte und durch andere Grundleiden beeinträchtigte Personen sind anfällig gegenüber *P. aeruginosa*-Infektionen. Bezüglich der Übertragung durch kontaminiertes Wasser gilt allgemein, dass der Haupteintragspfad von *P. aeruginosa* der Kontakt mit verletzter Haut und Schleimhäuten ist. In selteneren Fällen ist die Übertragung durch Aerosole möglich. Eine besondere Situation liegt in medizinischen Einrichtungen vor, da hier aufgrund der Infektionsgefährdung von Patienten das Auftreten von *P. aeruginosa* in der Trinkwasser-Installation als besonders kritisch anzusehen ist. Nosokomiale sporadische Erkrankungen und Krankheitsausbrüche sind auf kontaminierte Wassersysteme zurückgeführt worden. Die medizinisch-hygienische Bedeutung von *P. aeruginosa* im Zusammenhang mit dem Vorkommen im Trinkwasser wurde umfassend in der Literatur beschrieben (z. B. [Exner16]).

P. aeruginosa tritt in Trinkwasserverteilungssystemen sporadisch auf, eine erhöhte Häufigkeit ist jedoch in Trinkwasser-Installationen von Gebäuden zu finden [Wingender09]. Die Bakterien können hier lokal oder systemisch im Kalt- und Warmwasserbereich vorkommen; sie finden sich in dezentralen Wasseraufbereitungsanlagen wie Enthärtungsanlagen, in Anlagen zur Herstellung von Dialysewasser, in Leitungsabschnitten mit stagnierendem Wasser, aber auch im Bereich von Entnahmearmaturen (z. B. in Perlatoren und Duschköpfen). Aufgrund seiner Fähigkeit zur Primärbesiedlung und Biofilmbildung, zur Einnistung in bereits bestehende Biofilme und zur Vermehrung in Biofilmen besitzt *P. aeruginosa* das Potenzial, alle mit Wasser in Kontakt stehenden Komponenten von Trinkwasser-Installationen zu besiedeln, dort für längere Zeiträume zu überleben und sich ggf. zu vermehren. Im Vergleich zu planktonischen Zellen weist *P. aeruginosa* im Biofilm eine deutlich erhöhte Toleranz gegenüber Desinfektionsmitteln wie Chlor auf. Biofilme stellen somit ein geschütztes Habitat und ein potenzielles Reservoir für *P. aeruginosa* dar.

Einmal etabliert ist *P. aeruginosa* oft nur mit langwierigen und aufwändigen Maßnahmen zu eliminieren. Erfolgreiche Prävention und Kontrolle zur Minimierung des Risikos einer Kontamination mit *P. aeruginosa* erfolgt unter Beachtung der allgemein anerkannten Regeln der Technik durch die Vermeidung von Fehlern bei Planung, Installation, Inbetriebnahme und Betrieb von Trinkwasser-Installationen (z. B. [VDI/DVGW 6023, DVGW W 556 (A)]. Zudem befasst sich eine aktuelle Empfehlung des Umweltbundesamtes mit den erforderlichen Untersuchungen auf *P. aeruginosa* zur Risikoeinschätzung und zu Maßnahmen beim Nachweis im Trinkwasser [UBA2017].

Es ist bekannt, dass durch ungünstige Umweltbedingungen wie die Anwesenheit von Metallionen (Kupferionen) oder von Chlor [Dwidjosiswojo11; Bédard14] sowie die Nährstofflimitierung VBNC-Stadien von *P. aeruginosa* ausgebildet werden. Dadurch wird *P. aeruginosa* bei Routineuntersuchungen, basierend auf kulturellen Methoden, nicht mehr nachweisbar.

7.3.2 Einfluss der Temperatur auf *P. aeruginosa* unter trinkwasserrelevanten Bedingungen

Einige Untersuchungen beschäftigen sich mit der Rolle der Wassertemperaturen in Trinkwasserverteilungssystemen und Trinkwasser-Installationen auf das Vorkommen und Überleben von *P. aeruginosa* in kaltem und erwärmtem Trinkwasser. Es gibt Hinweise, dass der Anstieg der Temperaturen des Trinkwassers in Trinkwasserverteilungssystemen mit einer erhöhten Nachweishäufigkeit von *P. aeruginosa* einhergehen kann. Soweit untersucht sind in Verteilungssystemen von Ländern mit gemäßigtem Klima positive Befunde von *P. aeruginosa* relativ niedrig, z. B. 0,1 % (von 19.853 Proben) in Kanada [Clark82] oder 0,9 % (von 5.069 Proben) in Deutschland [Wingender09], während die positiven Befunde in Leitungssystemen tropischer Gebiete deutlich höher liegen können. So wurde berichtet, dass in ca. 32 % von 43 Leitungswasserproben in Togo *P. aeruginosa* nachweisbar war mit Wassertemperaturen zwischen 26 °C und 32 °C [Schubert75]. Da die Rohwässer (Grund- und Oberflächenwasser) meist niedrigere Temperaturen und immer deutlich seltener positive *P. aeruginosa*-Befunde aufwiesen als das Trinkwasser, wurde eine Begünstigung der Vermehrung dieser Bakterien im Leitungssystem vermutet. Allerdings wurden andere potenzielle Einflussfaktoren wie die Nährstoffsituation nicht berücksichtigt.

In Feldstudien an Trinkwasser-Installation wurde die Wassertemperatur als einer von mehreren signifikanten Variablen für das Auftreten von *P. aeruginosa* gefunden. In der Untersuchung von Wasserproben aus unterschiedlichen Typen von Entnahmearmaturen in vier Krankenhäusern (Quebec, Kanada) wurde eine erhöhte Befundhäufigkeit von *P. aeruginosa* bei Wassertemperaturen < 42 °C festgestellt als bei ≥ 42 °C (12 % bzw. 23 %) bei kulturellem Nachweis mit dem enzymbasierten Pseudalert-System [Charron15].

Zusätzlich wurden in Laborversuchen fabrikneue flexible Schläuche aus Elastomeren und Kupferleitungen mit phosphatgepuffertem Wasser (pH 7,3) befüllt, mit *P. aeruginosa* PA14 beimpft (10^5 Zellen/mL) und bei 20 °C, 40 °C und 55 °C für 24 h, 48 h und 6 Tage inkubiert. Danach wurde *P. aeruginosa* sowohl in der Wasserphase als auch in Biofilmen (Abstriche) kulturell quantifiziert. Bei 20 °C wurde in den flexiblen Schläuchen keine Abnahme der Bakterienkonzentration im Wasser und in Biofilmen über 6 d festgestellt, während in den Kupferleitungsstücken bereits nach 24 h eine Abnahme in der Wasserphase um mehrere Zehnerpotenzen auftrat. Bei 40 °C wurde über 24 h in den flexiblen Schläu-

chen eine Zunahme der Konzentration im Wasser und an der Oberfläche festgestellt, was auf ein Wachstum der Bakterien hinwies. In den Kupferrohrstücken wurde wie bei 20 °C eine deutliche Abnahme der Bakterienkonzentration gemessen. Bei 55 °C war *P. aeruginosa* nach 24 h sowohl in den flexiblen Schläuchen als auch in den Kupferleitungen im Wasser und an den Oberflächen nur noch in sehr geringer Anzahl vorhanden. Dies zeigte die Bedeutung der erhöhten Temperatur von 55 °C für die Kontrolle des Vorkommens von *P. aeruginosa* im Wasser und in Biofilmen an den Innenoberflächen von Schläuchen bzw. Kupferleitungen. In der Praxis hat sich gezeigt, dass die thermische Desinfektion einer mit *P. aeruginosa* kontaminierten Trinkwasser-Installation in Form des Spülens von berührungsfreien Entnahmestellen bei 70 °C für 30 min zu einer Elimination von *P. aeruginosa* führte [Mee-Marquet05]. Auch sechs Monate nach der Maßnahme waren die Bakterien nicht nachweisbar, sodass von einer effektiven Dekontamination ausgegangen wurde.

In einem Chemostat-Modellsystem wurden Biofilme aus natürlich vorkommenden Trinkwasserpopulationen auf Materialien der Trinkwasser-Installation bei verschiedenen Temperaturen angezüchtet. *P. aeruginosa* wurde in Biofilmen auf Polybutylen nachgewiesen, die bei 20 °C, 40 °C und 50 °C gewachsen waren, nicht aber in Biofilmen bei Wassertemperaturen von 60 °C [Rogers94a]. Bei 30 °C wurde *P. aeruginosa* in Biofilmen auf Polypropylen, Polyethylen und Baustahl („mild steel“) gefunden [Rogers94b]. Die Persistenz von *P. aeruginosa* über mehrere Wochen in Trinkwasserbiofilmen auf EPDM, PE-Xb und PE-Xc unter Kaltwasserbedingungen (mittlere Temperatur ca. 19 °C) wurde von [Bressler09] und [Moritz10] beschrieben. Dabei wurden deutlich höhere Konzentrationen der mit der kultivierungsunabhängigen Methode der Fluoreszenz-in-situ Hybridisierung (FISH) nachgewiesenen Zellen als Koloniezahlen nachgewiesen. Dies war ein Hinweis darauf, dass ein Teil der Biofilmpopulation von *P. aeruginosa* in einem vitalen, aber nicht kultivierbaren (viable but non-culturable, VBNC) Zustand vorlag. [Meier14; Meier16] beschrieben ebenfalls die Einnistung und Persistenz von *P. aeruginosa* in Trinkwasserbiofilmen bei 11 °C und 37 °C nach einem einmaligen Kontaminationsereignis. *P. aeruginosa* war bei 37 °C länger im Biofilm kulturell nachweisbar als bei 11 °C.

Die Literaturrecherche zeigt, dass *P. aeruginosa* sowohl unter nährstoffreichen (Labornährmedien) als auch nährstoffarmen (Trinkwasser) Bedingungen im Temperaturbereich von 9 °C bis 45 °C mit einem Temperaturoptimum bei etwa 37 °C wachsen kann. Bei höheren Temperaturen findet kein Wachstum mehr statt und ab 50 °C bis 55 °C kommt es zur Inaktivierung (Schädigung bzw. Absterben) der Bakterien. Dies trifft sowohl für planktonische Zellen als auch Bakterien in Biofilmen zu. Aufgrund der Erkenntnisse aus dieser Literaturrecherche kann angenommen werden, dass in der Trinkwasser-Installation im Bereich der zentralen Trinkwassererwärmung und des Zirkulationssystems bei Einhaltung von Temperaturen > 55 °C und ausreichenden Aufenthaltszeiten das Überleben von *P. aeruginosa* im Warmwasser verhindert wird. Im Vergleich zu anderen hygienisch relevanten Mikroorganismen wie Legionellen, nichttuberkulöse Mykobakterien und Amöben weist *P. aeruginosa* unter Bedingungen der Trinkwasser-Installation einen engeren Bereich günstiger Wachstumstemperaturen mit einem niedrigeren Wachstumsoptimum sowie insgesamt einen niedrigeren Temperaturbereich des Überlebens auf (siehe Abb. 7-24). Dies weist darauf hin, dass in der Praxis angewendete temperaturbasierte Maßnahmen zur Prävention und Kontrolle des Legionellen-Wachstums ebenfalls wirksam sein sollten für die Vermeidung von systemischen Kontaminationen mit *P. aeruginosa*.

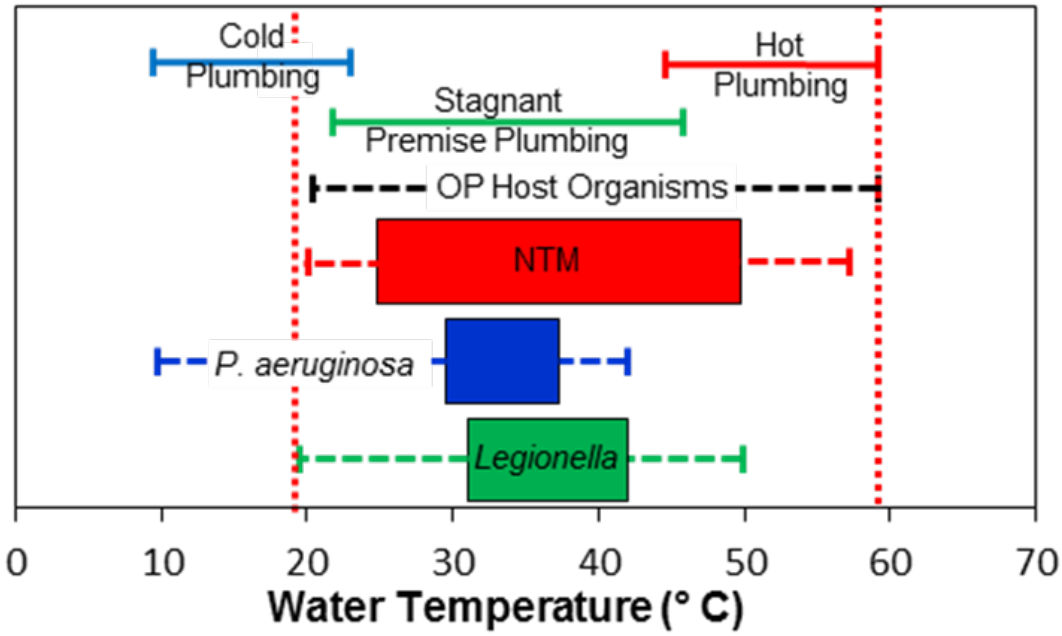


Abb. 7-24 Wachstum und Überleben von fakultativ pathogenen Mikroorganismen unter Temperaturbedingungen der Trinkwasser-Installation (Abbildung aus [Rhoads15]). Dargestellt sind die idealen Wachstumstemperaturen (farblich ausgefüllte Rechtecke) für nichttuberkulöse Mykobakterien (NTM), *P. aeruginosa* und *Legionella* sowie die jeweiligen Temperaturbereiche für Wachstum oder Überleben (gestrichelte Linien) dieser Bakterien und für Amöben (z. B. Vermamoeba und Acanthamoeba) als Wirtsorganismen (OT Host Organisms) für die Bakterien. Die durchgezogenen Linien zeigen die Bereiche der Wassertemperaturen an, die üblicherweise in kaltem Trinkwasser (cold plumbing), erwärmtem Trinkwasser (hot plumbing) sowie in stagnierendem Wasser (stagnant premise plumbing) in der Trinkwasser-Installation angetroffen werden.

7.3.3 Experimente im Emulationsmodul am IWW mit *P. aeruginosa*

Im Januar 2017 erfolgte die Planung der Aufstellung des Emulationsmoduls, deren Ausführung inkl. Transport sowie die Inbetriebnahme am IWW dann stattfanden (Aufstellung am IWW siehe Abb. 7-25). Es ging am 02.02.2017 mit einer Desinfektion in Betrieb d. h. das 1. Experiment wurde tags darauf mit einer Spülung begonnen.

Ziel der Experimente am IWW war die Überprüfung des Effektes der Temperatur auf das Überleben, die Aktivitäten, die Kultivierbarkeit von *Pseudomonas aeruginosa (P. aeruginosa)*. Eine unabdingbare Voraussetzung, um den Effekt der Temperatur auf *Pseudomonas aeruginosa* aufzeigen zu können, ist dessen Anwesenheit im System, hier in der Emulationsanlage eingenistet im Biofilm der Trinkwasserpopulation zu denen *P. aeruginosa* zu zählen ist. Zudem muss eine entsprechend hohe Konzentration von kultivierbaren *P. aeruginosa* gegeben sein, die es erlaubt Veränderungen in geringeren Konzentrationen, bedingt durch Temperatureinfluss, erfassen zu können.

Abb. 7-25 Emulationsanlage aufgestellt am IWW im S2 Bereich im UG. Im Hintergrund an der Decke ist die Edelstahlleitung zu erkennen, welches Trinkwasser direkt vom Hauseingang zur Anlage liefert. In der Mitte der Schaltkasten, unten rechts der Abwasserbehälter. Unten in der Mitte sind die Zirkulationsstränge zu erkennen.

Im ersten Experiment, erfolgte entsprechend der abgestimmten Versuchsplanung der Partner IMMH und IWW, die Animpfung mit einer *P. aeruginosa* Suspension bzw. *Legionella* spp. Suspension bei IMMH, von 20 L d. h. die Anlage wurde vollständig mit einer *P. aeruginosa* Suspension gefüllt. Die Bakteriensuspension verblieb danach für 48 Stunden ohne Spülung in der Anlage stehen. Danach wurde in den tapping cycle geschaltet. Die nachfolgenden Beprobungen der Wasserphase wie auch von Biofilmcoupons zeigten auf, dass *P. aeruginosa* kulturell nicht nachweisbar war.

Auch in zwei weiteren Experimenten wurden nach Animpfungen keine Ansiedlung und auch keine Vermehrung nachgewiesen so dass die nachfolgenden Temperaturversuche nicht durchgeführt werden konnten.

Es wurden des Weiteren, um die Chancen der Ansiedlung zu vermehren, eine Mischung aus *P. aeruginosa* Stämmen als Suspensionen eingesetzt, welche aus acht unter-

schiedlichen Stämmen bestand. Diese hatten nachweislich in Laborversuchen Adhäsion aufgezeigt. Auch hier fand keine ausreichende Adhäsion im Emulator statt.

Zur Aufklärung der Ursache/n des als untypisch einzustufenden Verhaltens d. h. der nicht stattgefundenen Adhäsion von *P. aeruginosa*, wurde die Arbeitsthese erstellt, dass Kupferionen einen Stress verursachen, welcher Adhäsion verhindert. Diese These wurde auf Basis der langjährigen Arbeiten und Erkenntnisse der Arbeitsgruppe um Prof. Hans-Curt Flemmming und Dr. Jost Wingender, erstellt. Dies hatte den Verlust der Kultivierbarkeit und der Infektiosität ausgelöst durch Kupferkonzentrationen aufgezeigt. Schon geringe Konzentrationen von 20 – 50 µg/L lösen diesen Stress aus.

In Experimenten im Rahmen des vom BMBF geförderten Verbundvorhabens „Biofilmmanagement“ wurde für *P. aeruginosa* der Eintritt in das sogenannte „VBNC-Stadium“ sowie ein möglicher Rückgang bzw. die Bedingungen dafür untersucht. Unter VBNC ist der Zustand eines Bakteriums lebend zu sein, aber nicht mehr kultivierbar definiert, wobei auch Rückgang in den kultivierbaren Zustand möglich sein muss. Verweilzeiten von Tagen in sehr nährstoffarmer Umgebung (oligotroph) führten bei *P. aeruginosa* bedingt durch die Substratlimitierung zu einem Übergang ins VBNC-Stadien, wobei dies nur für einen Teil der Gesamtpopulation der Fall war. In Mischkulturbiofilmen mit *Aquabacterium* spezies traten gleich viele VBNC-Zellen bei *P. aeruginosa* auf, wie in Reinkulturbiofilmen von *P. aeruginosa* (BMBF „Biofilmmanagement, IWW Schriftenreihe in Vorbereitung).

Bestärkt wurde die Vermutung des Effektes von Kupfer auf *P. aeruginosa* in dem Emulationsmodul durch den Nachweis von Kupfer im Wasser des Emulators währende der Ansiedlungsphase. Mittels ICP-OES Elementanalyse wurden bis zu 0,9 mg/L an Kupfer in der Zirkulation nachgewiesen.

7.3.4 Versuchsmatrix – Laborversuche

7.3.4.1 Laborversuche zum Effekt von Kupfer auf P. aeruginosa

In Laborversuchen wurde aufgezeigt, dass das Wasser aus der Emulationsanlage immer Kupfer – in den Strängen wie auch der Zirkulation – aufwies. Der Nachweis wurde mittels ICP_OES geführt. Es wurden Konzentrationen bis zu 0,9 mg/L an Kupfer gemessen. Dies ist unseren Erkenntnissen und Informationen nach nicht nur auf den peripheren Strang, welcher aus Kupfer besteht, zurückzuführen, sondern auch auf den Wärmeübertrager (Heizung), welcher eine große Kupferfläche besitzt.

In mehreren Experimenten *sowohl im Emulator wie auch in Laborexperimente* konnte gezeigt werden,

- Kupferionen im Wasser vermindern die Kultivierbarkeit von *P. aeruginosa* drastisch und
- zudem die Adhäsion vieler der planktonischen Bakterien an die Oberfläche von Werkstoffen verhindert; im Test waren die Materialien PE, Edelstahl und 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. Bei Anwesenheit von Kupferionen ab einer Konzentration von ca. 0,64 mg/L Cu-Ionen(10 µmolar Kupfersulfat) wurden in Laborversuchen (Abb. 7-26) wie auch im Emulator eine drastische Abnahme des Anteils kultivierbarer *P. aeruginosa* innerhalb von Minuten gemessen.

- Auch die Adhäsionsfähigkeit von *P. aeruginosa* war in den Experimenten messbar verringert.
- Weitere Erkenntnisse waren, dass reproduzierbar die Anwesenheit von Kupferionen in den Emulatorversuchen zum Verlust der Kultivierbarkeit führte, jedoch bei Anwesenheit eines effektiven Chelators (Natriumdiethyldithiocarbamat) der Effekt aufgehoben wurde. Im Emulationsmodul wurden Versuchs-Ansätze mit Kupfer-Chelator gefahren, welcher in Laborversuchen aufgezeigt hatte, dass er den „Stressor“ Effekt des Kupfers aufheben kann. Bedingt durch den tapping cycle war jedoch ein Austrag des Chelators gegeben (Abb. 7-26).

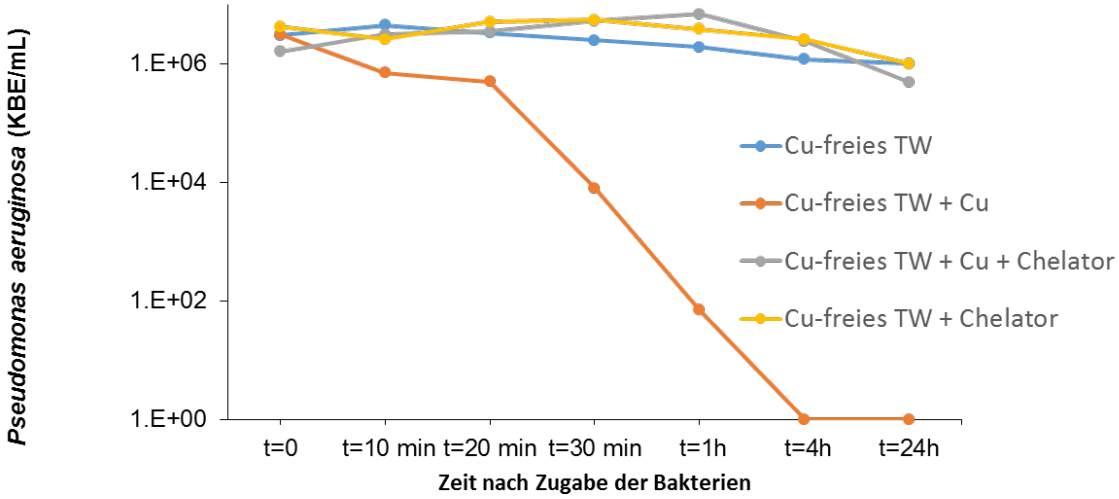


Abb. 7-26 Effekt von Kupfersulfat (10 µmolar Cu) auf die Kultivierbarkeit planktonischer *P. aeruginosa* Zellen bei 20 °C und unterschiedlichen Einwirkzeiten

Eine Einnistung in die sich während der vierwöchigen Einfahrphase auf den Oberflächen im Emulator gebildeten Trinkwasserbiofilme und die Vermehrung im Emulator konnte somit kulturell nicht festgestellt werden. Die Befunde bestätigen und ergänzen Ergebnisse vorheriger Untersuchungen, in denen festgestellt wurde, dass *P. aeruginosa* in kupferhaltigem Trinkwasser 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 [Dwidjosiswojo11; Bédard14; Hippelein14]. 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 kupfergestressten, nicht kultivierbaren Zellen von *P. aeruginosa* intakt blieben [Dwidjosiswojo11]. Dieser Effekt wurde an Kupfer-exponierten planktonischen Zellen und Biofilmen gezeigt. Der durch Kupferionen hervorgerufene, nicht kultivierbare Zustand war reversibel, da durch Zugabe eines Kupferchelators die Kultivierbarkeit von *P. aeruginosa* wiederhergestellt wurde. Kupfer-gestresste Bakterien zeigten keine zytotoxische und gentoxische Wirkung

gegenüber humanen Bronchialepithelzellen, während unbehandelte und auch wieder kultivierbare *P. aeruginosa* eine Schädigung der Bronchialepithelzellen aufwiesen. 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 Kupferstresses ihre Kultivierbarkeit und Infektiosität wiedererlangen können.

7.3.4.2 P. aeruginosa – Trinkwassertemperatur (TWW) Temperatur und Wachstum

Allgemeines

Ein Vorkommen von *P. aeruginosa* ist im Bestand bei Trinkwasser-Installationen in Gebäuden gering, denn bei den 100 untersuchten Trinkwasser-Installationssystemen (Objekte des AP II) waren positive Befunde nur in 4 Objekten nachweisbar. *P. aeruginosa* wurde in den 4 der 100 Objekte mit positivem kulturellen Befund an sechs Stellen nachgewiesen. All diese Stellen lagen in der Peripherie der Trinkwasser-Installation. Statistische Auswertungen zeigen, dass es ist keinen Zusammenhang zwischen den Jahreszeiten und den positiven Befunden gibt. Dies deckt sich mit anderen Untersuchungen, welche im nächsten Abschnitt aufgeführt sind.

In einer Untersuchung von niederländischen Trinkwasser-Verteilungsystemen wurden das Vorkommen von *P. aeruginosa* beschrieben und auch der Einfluss der Wassertemperatur berücksichtigt [Wielen13]. Es handelte sich um ungechlortes Trinkwasser aus acht Wasserwerken (fünf Oberflächenwasser- und drei Grundwasserwerke). *P. aeruginosa* im Trinkwasser, je nach Wassersystem 20 bis 27 untersuchte Wasserproben, wurde mittels qPCR (Zielgen: *regA*) quantifiziert. Die Konzentrationen schwankten zwischen $< 2 \times 10^2$ und $4{,}4 \times 10^3$ Genkopien pro Liter. Die Häufigkeit positiver Befunde variierte zwischen 0 und 30 %. Die Wassertemperaturen waren im Sommer durchschnittlich 8,7 °C bis 14,8 °C höher als im Winter. Die Befundhäufigkeit war in zwei Verteilungssystemen im Sommer höher als im Winter und in drei Systemen im Winter höher als im Sommer; nur in einem Fall war der Unterschied zwischen Winter und Sommer statistisch signifikant. Insgesamt wurden somit in dieser Untersuchung keine klaren saisonalen Effekte auf das Vorkommen von *P. aeruginosa* beobachtet.

Laborexperimente am IWW

Laborexperimente im Rahmen des Projektes EE-HYG zeigen, dass ein Wachstum von *P. aeruginosa* bei Temperaturen > 44 °C nicht zu erwarten ist. Mit Reinkulturen von *P. aeruginosa* (DSM 50071) wurden auf verschiedenen Festmedien wie R2A-Nähragarplatten, TSA-Nähragarplatten mit und ohne Supplement Wachstumsversuche bei folgenden Temperaturen durchgeführt: 20 °C, 28 °C, 37 °C, 44 °C, 47 °C und 50 °C.

- Dabei zeigte sich, die günstigste Wachstumstemperatur auf den genannten Nähragarplatten lag bei 28 °C und 37 °C, wobei das beste Wachstum auf TSA-Nährmedium war. Bei 47 °C war keine Koloniebildung, d. h. kein Wachstum mehr zu verzeichnen. Bei 44 °C war auch noch, wenn auch geringeres Wachstum zu verzeichnen. Die Temperatur um 44 °C kann als Grenztemperatur für Wachstum angesehen werden. In den Versuchen war 44°C die höchste auf Festmedium mögliche Wachstumstemperatur.

Diese Erkenntnis galt auch für Wachstum von *P. aeruginosa* in Flüssigkultur (Abb. 7-27). 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 [Rajkowski01]). Die minimale Wachstumstemperatur liegt bei 8,9 °C (bestimmt auf CASO-Agar; [Elliot63]). Die optimale Wachstumstemperatur liegt bei etwa 37 °C, aber auch bei 45 °C erfolgt noch eine Vermehrung [Kropinski87]. In Wachstumsexperimenten in einem Vollmedium (CASO-Bouillon) betrugen die Generationszeiten von *P. aeruginosa* (Stamm PAO1) bei 10 °C, 15 °C, 25 °C, 35 °C und 45 °C 2,1 Tage, 225 min, 96 min, 54 min bzw. 98 min [Kropinski87]. Es wurde keine Vermehrung bei 4 °C oder 50 °C festgestellt.

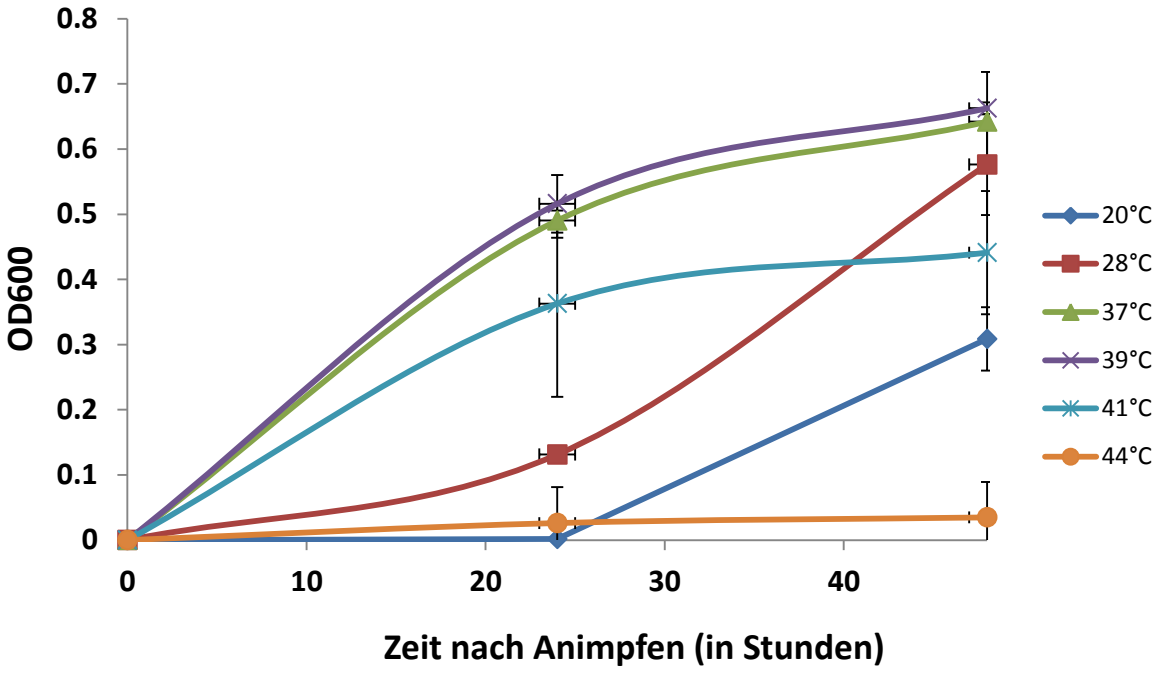


Abb. 7-27 Ein Wachstum von *P. aeruginosa* ist in einer TWW-Zirkulation, welche mit 55 °C im Vorlauf und 50 °C im Rücklauf betrieben wird, daher nicht zu erwarten. Ein Überleben in die TWI eingebrachter Zellen (Persistenz) ist jedoch nicht vollständig auszuschließen.

7.3.4.3 P. aeruginosa – TWW-Temperatur und Überleben

In einer am IWW durchgeführten Literaturrecherche zum Einfluss der Temperatur auf Wachstum und Überleben von *P. aeruginosa* unter Laborbedingungen wurde für planktonische Zellen herausgefunden, dass in Laborversuchen *P. aeruginosa* über einen weiten Bereich von Umgebungstemperaturen vermehrungsfähig ist, wie sie auch in wasserführenden Systemen anzutreffen sind. Die minimale Wachstumstemperatur liegt bei 8,9 °C (bestimmt auf CASO-Agar; [Elliott63]. Die optimale Wachstumstemperatur liegt bei etwa 37 °C, aber auch bei 45 °C erfolgt noch eine Vermehrung [Kropinski87]. In Wachstumsexperimenten in einem Vollmedium (CASO-Bouillon) betrugen die Generationszeiten von *P. aeruginosa* (Stamm PAO1) bei 10°C, 15 °C, 25 °C, 35 °C und 45 °C jeweils 2,1 Tage, 225 min, 96 min, 54 min bzw. 98 min [Kropinski87]. Es wurde keine Vermehrung bei 4 °C oder 50 °C festgestellt. Im informativen Anhang der DIN EN ISO 16266 (2008) als

Referenzverfahren gemäß der Trinkwasserverordnung zum Nachweis von *P. aeruginosa* wird darauf hingewiesen, dass die meisten Stämme von *P. aeruginosa* bei 42 °C wachsen können, aber nicht bei 4 °C, wodurch methodisch *P. aeruginosa* von bei Wasseruntersuchungen störenden Umweltbakterien wie *Pseudomonas fluorescens* unterschieden werden kann.

P. aeruginosa in Suspension

In einer Reihe von Untersuchungen wurde das Wachstum bzw. Überleben von *P. aeruginosa*-Bakterien untersucht, die in Wässern unterschiedlicher Herkunft suspendiert wurden. Die Exposition von *P. aeruginosa* in gereinigtem Abwasser („reconditioned wastewater“) wies ein geringes Wachstum im Bereich von 12 °C bis 32 °C auf; die Bakterien überlebten über 21 Tage ohne sich zu vermehren bei niedrigen Temperaturen von 4,1 °C bis 9 °C und bei Temperaturen über 45 °C [Rajkowski01]. Erst ab einer Temperatur von 55 °C trat in dieser Untersuchung eine Inaktivierung (Abnahme der Koloniezahlen) von *P. aeruginosa* auf. Das Wachstum von *P. aeruginosa* (ein Laborstamm und ein Trinkwasserisolat) in Trinkwasser und in Reinstwasser wurde bei Temperaturen von 10 °C, 15 °C, 20 °C und 22 °C von [Hambsch16] untersucht. Das Trinkwasser wurde pasteurisiert und das Reinstwasser autoklaviert und mit einer anorganischen Salzlösung versetzt. Das Wasser wurde mit *P. aeruginosa* und parallel in einigen Ansätzen zusätzlich mit einer Mischbiozönose aus Trinkwasser beimpft, die Ansätze wurden mehrere Wochen unter Schütteln bebrütet und zu verschiedenen Zeiten wurde die Koloniezahl von *P. aeruginosa* bestimmt. In allen Ansätzen vermehrte sich *P. aeruginosa* bis zu maximalen Konzentrationen von 10^8 KbE/100 mL. Bei niedrigen Temperaturen von 10 °C und 15 °C wurde das Plateau der stationären Wuchsphase erst nach 14 bis 20 Tagen erreicht gegenüber 2 bis 3 Tagen bei 22 °C. Die Anwesenheit der Mischbiozönose hatte einen deutlichen Konkurrenzeffekt zur Folge, der temperaturabhängig war. Bei 20 °C war *P. aeruginosa* konkurrenzfähig und vermehrte sich bis zu einer Konzentration von ca. 10^6 KbE/100 mL, bei 20 °C nur um ca. eine Log-Stufe und bei 10 °C trat keine Vermehrung auf. In destilliertem Wasser wurde das Überleben von *P. aeruginosa* in Suspension bei 10 °C, 25 °C und 37 °C für mindestens fünf Monate beobachtet, ohne dass eine deutliche Abnahme der Kultivierbarkeit auftrat [Boyle91]. In einer anderen Studie wurde sogar das Wachstum von *P. aeruginosa* bei 25 °C in im Krankenhaus verwendeten destilliertem Wasser beschrieben, vermutlich ermöglicht durch die Anwesenheit geringfügiger Mengen von organischen Verbindungen [Favero71]. In diesem Zusammenhang stellten van der Kooij et al. fest [Kooij82], dass *P. aeruginosa* in Trinkwässern bei relativ niedrigen Konzentrationen des assimilierbaren organischen Kohlenstoffs (AOC) von einigen Mikrogramm pro Liter bei 15 °C Wachstum aufwiesen. Zusammenfassend weisen diese Befunde darauf hin, dass *P. aeruginosa* in Trinkwasser und anderen nährstoffarmen Wässern im Temperaturbereich von etwa 9 °C bis 45 °C über längere Zeiträume überlebt und sich je nach Nährstoffsituation auch vermehren kann.

Bei höheren Temperaturen wurde festgestellt, dass eine Abnahme der Konzentration von in Nährmedium (gepufferte Hefeextrakt-Bouillon) suspendierten Bakterien von *P. aeruginosa* ATCC 27853) um eine Zehnerpotenz bei 60 °C, 70 °C und 80 °C innerhalb von 2,6 Minuten, 1,3 Minuten bzw. 0,7 Minuten erfolgte [Stout86]. In entionisiertem Wasser suspendierte Bakterien wiesen eine Abnahme um 4 Zehnerpotenzen bei 55 °C innerhalb von etwa 20 min, bei 60 °C innerhalb von 3 min und bei 65 °C innerhalb von 20 Sekunden auf [Spinks06]. Die Vitalität von *P. aeruginosa* DSM 50071 in Suspension (Evian-Wasser) in Abhängigkeit von einer thermischen Behandlung zwischen 30 °C und 80 °C für 30 Mi-

nuten wurde anhand der Membranintegrität durch Färbung mit den Fluoreszenzfarbstoffen SYBR Green und Propidiumiodid in Kombination mit der Durchflusszytometrie untersucht [Schaule16]. Die Ergebnisse weisen darauf hin, dass Wassertemperaturen von 50 °C bis 60 °C bei einem Großteil der Zellen eine Schädigung der Zellmembranintegrität bewirkten. Diese Zellen sind somit irreversibel geschädigt oder es ist der Zelltod eingetreten.

Bei Biofilmen wird in einer Reihe von Untersuchungen mit dem Einfluss der Temperatur auf Biofilme von *P. aeruginosa*. In Reinkulturexperimenten wurde festgestellt, dass die Wachstumstemperatur (20 °C, 30 °C und 37 °C) einen Einfluss auf die Biofilmbildung und die Struktur von Biofilmen und ihre Toleranz gegenüber Desinfektionsmitteln hat [Abdallah15]. Auf Stahl- und Polycarbonatoberflächen wurden bei allen Temperaturen über 24 h konfluente Biofilme gebildet; bei 20 °C in Form von pilzähnlichen Strukturen, die durch dünne (Stahl) oder dicke (Polycarbonat) Zellschichten verbunden waren, während bei 30 °C und 37 °C flache und kompakte Biofilme ausgebildet wurden. Mit zunehmender Temperatur von 20 °C bis 37 °C kam es zu einer Zunahme der flächenbezogenen Konzentration extrazellulärer Proteine und Kohlenhydrate (1,5fach bzw. 1,9fach). Der Anteil vitaler Zellen (ca. 86,7 %; bestimmt mit dem Live/Dead-Assay) änderte sich nicht. Die Empfindlichkeit von *P. aeruginosa*-Biofilmen (bestimmt über die Abnahme der Kultivierbarkeit in KbE/cm^2) gegenüber dem Desinfektionsmittel Didecyldimethylammoniumchlorid nahm mit zunehmender Temperatur von 20 °C bis 37 °C deutlich ab, während für ein Desinfektionsmittel aus zwei Komponenten (Didecyldimethylammoniumchlorid und Alkyldimethylbenzylammoniumchlorid) eine Zunahme der Empfindlichkeit beobachtet wurde. Ein weiteres Desinfektionsmittel (Didecyldimethylammoniumchlorid und Bis(3-aminopropyl)dodecylamin) bewirkte eine fast vollständige Abnahme der Kultivierbarkeit unabhängig von der Anzuchttemperatur der Biofilme. Dies ist ein Hinweis darauf, dass die Wachstumstemperatur sowohl eine erhöhte als auch verminderte Toleranz von *P. aeruginosa*-Biofilmen in Abhängigkeit von der chemischen Zusammensetzung des Desinfektionsmittels bewirken kann oder aber auch keinen Einfluss aufweisen kann.

In einer weiteren Studie wurde die Biofilmbildung von *P. aeruginosa* bei Temperaturen von 28 °C, 33 °C, 37 °C und 42 °C beschrieben und anhand verschiedener Parameter charakterisiert [Kannan15]. Bei 37 °C wurden die höchste Biomasse, die größte Menge an extrazellulären Polysacchariden, die stärkste Akkumulation von Calcium- und Magnesiumionen im Biofilm sowie die stärkste Adhäsionskraft der Biofilme beobachtet im Vergleich zu den anderen Temperaturen. Dies weist darauf hin, dass wie bereits für planktonische Zellen bekannt auch für Biofilme von *P. aeruginosa* die optimale Wachstumstemperatur bei etwa 37 °C liegt und bei dieser Temperatur die mechanische Stabilität der Biofilme erhöht ist.

Die Wirkung der Temperatur im Bereich von 50 °C bis 70 °C wurde an etablierten Biofilmen (Anzucht: 48 h, 25 °C; Dicke: ca. 40 µm) von *P. aeruginosa* PAO1 auf Polycarbonat-Coupons untersucht [Park11]. Innerhalb von zwei Minuten kam es bei 65 °C und 70 °C zu einer Abnahme der Koloniezahlen von mehr als 5 log-Stufen, während bei 60 °C eine Abnahme um etwa 3 log-Stufen beobachtet wurde und bei 50 °C und 55 °C keine wesentliche Änderung der Koloniezahlen auftrat. Das weist darauf hin, dass bei einer relativ kurzen Expositionszeit erst ab 60 °C eine relativ schnelle Inaktivierung der Biofilmzellen erfolgte. In einer ähnlichen Studie wurden Biofilme von *P. aeruginosa* PAO1 auf Glasobjektträgern angezüchtet und danach im Temperaturbereich von 37 °C bis 80 °C für maximal 30 Minuten inkubiert [O'Toole15]. Die anfängliche Konzentration betrug 1,7 x 10^9

KbE/cm^2. Während bei 37 °C über 30 min keine Veränderung der Koloniezahlen im Biofilm auftrat, wurde mit zunehmender Temperatur von 50 °C bis 80 °C eine Abnahme der Koloniezahlen beobachtet: bei 50 °C um 2,4 log-Stufen, bei 60 °C um 4,5 log-Stufen, bei 70 °C um 5,5 log-Stufen und bei 80 °C um 6,7 log-Stufen. Die Analyse der Abnahme der Koloniezahlen (log cfu/cm^2) zeigte eine modifizierte Arrhenius-Abhängigkeit von der Temperatur.

Im Bereich der Temperaturen, unter denen Wachstum möglich ist, wurde zudem ein Einfluss der Temperatur auf die Bildung von Pathogenitätsfaktoren festgestellt. Bei suboptimaler Temperatur von 25 °C im Vergleich zur optimalen Wachstumstemperatur von 37 °C erfolgt eine Stimulierung der Produktion von extrazellulären Produkten über verschiedene Sekretionssysteme [Termine09]. Es handelt sich um die Proteasen AprA (T1SS) und PrpL (T2SS) sowie ein Hämolysin-koreguliertes Protein (T4SS). Solche Substanzen können an der Verwertung von Nährstoffen beteiligt sein sowie als Pathogenitätsfaktoren wirken. Die Stimulierung von sekretierten Produkten von *P. aeruginosa* unter Bedingungen erniedrigter Temperaturen könnte den Bakterien einen Überlebensvorteil gegenüber anderen Umweltbakterien ermöglichen und die Infektion von Wirtsorganismen begünstigen.

Eine der zentralen Fragen ist, inwieweit sich die Temperatur in einer Trinkwasser-Installation auf die Kultivierbarkeit oder die Vitalität oder sogar das Überleben von *P. aeruginosa* auswirkt? Es sind in den Installationen Temperaturen von 10 °C bis 60 °C gegeben, bei einer thermischen Sanierung sogar bis zu 70 °C. Was bedeutet das für die Kultivierbarkeit, die Vitalität, das Überleben? Der Effekt verschiedener Temperaturen in Abhängigkeit von der Zeit in diesem Temperatur-Range wurde mit unterschiedlichen Einwirkzeiten in Laborexperimenten geprüft.

7.3.5 Eigene Laborexperimente am IWW

Der Einfluss der Temperatur auf das Überleben und die Kultivierbarkeit wurde mit der sogenannten Spot Plating Methode überprüft. Dabei wurde die Probe (1 µl mit 10^5 mL^{-1} Bakterien) Hitze behandelt. Die Suspension wird dann auf CN Agar aufgetragen wie in Abb. 7-28 aufgezeigt ist. Nach der Inkubationszeit, bedeutet kein Wachstum in der Versuchsreihe mindestens 2 Zehnerpotenzen Verlust an Kultivierbarkeit.

7.3.5.1 Effekt von Hitze auf die Kultivierbarkeit von P. aeruginosa

Um die Auswirkung von Hitze in Relation zu Einwirkzeiten auf die Kultivierbarkeit von *P. aeruginosa* zu untersuchen, wurde jeweils 1 mL einer wässrigen *P. aeruginosa*-Suspension in einem Standardheizblock bei Temperaturen zwischen 40 °C und 60 °C inkubiert. Die Inkubationszeit betrug 3 Minuten und 5 Stunden. Die Bakterien befanden sich in Zentrifugationsgefäßen mit je 10^5 Bakterien pro mL, suspendiert in filtriertem Mineralwasser (0,2 µm Porenweite). Solch kleine Volumina wurden gewählt, um einen guten Temperatur-Übergang zu gewährleisten. Aliquote von 1 µl wurden anschließend als ‚Spot‘ auf Nähragarplatten übertragen (Spot Plating Methode). Theoretisch sind in jedem Tropfen 100 Bakterien enthalten, die zur Koloniebildung beitragen können. Ein Verlust der Koloniebildung bedeutet einen Verlust an Kultivierbarkeit von mind. 2 Zehnerpotenzen.

Wie auf dem nachfolgenden Foto (Abb. 7-28) zu erkennen, wachsen „große“ Kolonien, wenn die Kultivierbarkeit nicht durch die Temperatur beeinträchtigt wird. Die Temperatur ist auf der vertikalen Achse dargestellt. Kleine Kolonien zeigen einen Effekt, der nicht alle

Bakterien betroffen hatte. Keine Koloniebildung ist dann gegeben, wenn alle der ca. 100 Bakterien, welche in 1 µl als Spot aufgebracht worden waren, betroffen waren.

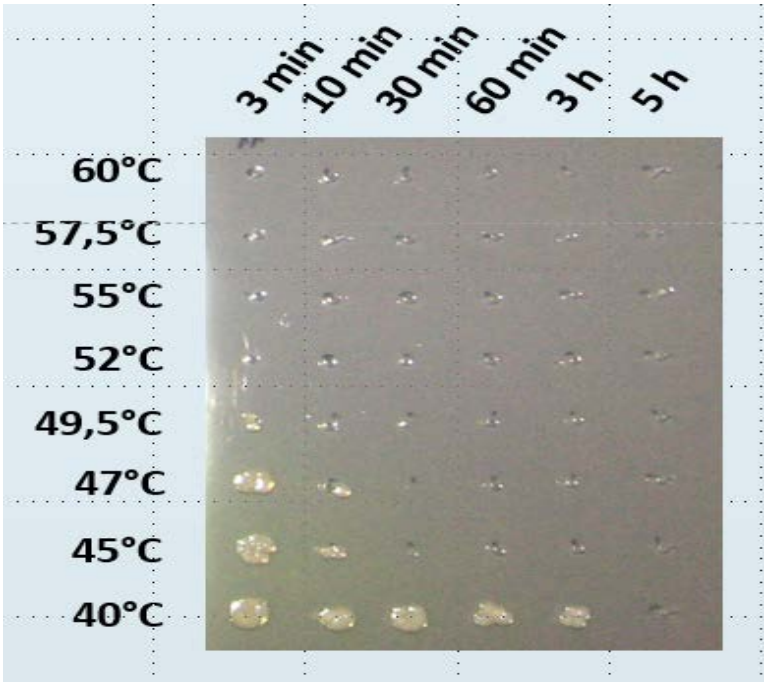


Abb. 7-28 Effekt von Hitze auf die Kultivierbarkeit von *P. aeruginosa*. Aliquote von 1 mL einer 1E+05 *P. aeruginosa* Suspension wurden für unterschiedliche Zeiten (3, 10, 30, 60 min und 3 h, 5 h) bei den Temperaturen 40 °C bis 60 °C (siehe vertikale Achse) inkubiert. Anschließend wurden 1 µL Tröpfchen auf Nähragarplatten übertragen, um die Koloniebildung von kultivierbaren Bakterien zu ermöglichen.

Ein Verlust der Kultivierbarkeit ist für alle der Bakterien bei 52 °C gegeben. Selbst kurze Zeiten wie hier mit 3 Minuten Einwirkzeit, sind effektiv. Bei 40 °C ist nach 5 Stunden auch ein Verlust der Kultivierbarkeit zu verzeichnen.

7.3.5.2 Temperatur-Zeit -Konzept (T t-Konzept)

Je höher die Temperaturen, desto kürzer die Inkubationszeiten, die nötig sind zum Eliminieren der Kultivierbarkeit.

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 resultierte in den Versuchen bereits ab 40 °C ein Absterben. Dies ist im Zusammenhang mit den Wachstumsversuchen so zu verstehen, dass es ein enges Temperaturfenster zu geben scheint in welchem Wachstum zu Absterben driftet.

Es konnte gezeigt werden, dass für eine Verminderung von 3,9 x 10^4 auf 1,2 x 10^2 intakte nicht-membrangeschädigte Bakterien, unterschiedliche Einwirkzeiten benötigt werden. Es kann ein Tt Konzept propagiert werden, vergleichbar dem Ct Konzept. Das Konzept der chemischen und photochemischen Desinfektion ist übertragbar auf die Hitzeinaktivie-

rung von *P. aeruginosa.* Dies gilt sowohl für die Kultivierbarkeit als auch deren Membranintegrität. Letzteres ist sicherer zur Beurteilung, ob die Bakterien wirklich ‚tot‘ sind.

Mittels der Durchflusszytometrie (DFZ) wurde im Temperaturbereich von 40 °C bis 60 °C (mit 10 Grad-Stufen) ein weitgehender Verlust der Membranintegrität bei einer Expositionszeit von 30 Minuten gefunden. Der Temperatureffekt bei 30 min Einwirkzeit ist in nachfolgender Abbildung dargestellt (Abb. 7-29). Die nachfolgenden Diagramme der Durchflusszytometrie zeigen auf, dass die Gesamtpopulation (Punktewolke) bei 30 °C im rechten Gate liegt, was bedeutet die Population ist nicht membrangeschädigt und lebt. Auch bei 40 °C ist die Population nach 30 Minuten Einwirkzeit noch zu einem sehr hohen Anteil im rechten Gate gelegen. Dahingegen schiftet die Population bei 50 °C zu einem sehr hohen Anteil in das linke Gate (Feld links der rot gestrichelten Linie).

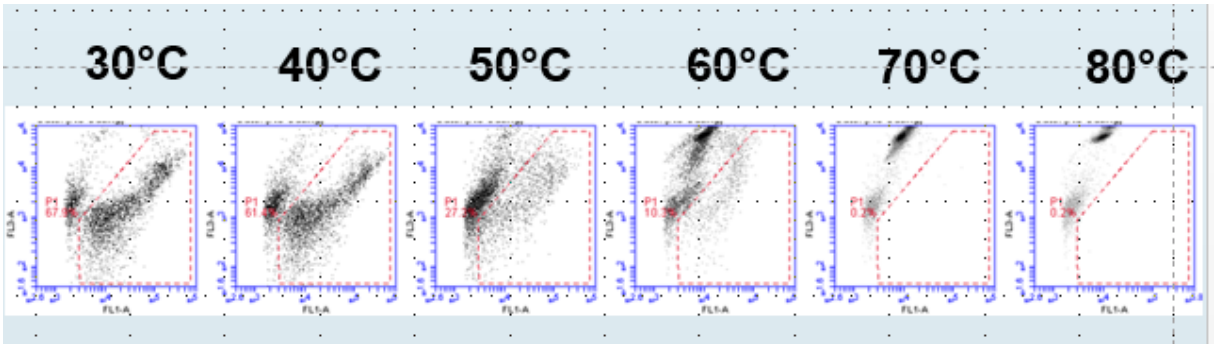


Abb. 7-29 Ergebnisse der Durchflusszytometrie nach Einwirken unterschiedlicher Temperaturen

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 x 10^4 auf 1,2 x 10^2 Membran-intakten *P. aeruginosa*-Bakterien/mL (ca. 2 log-Stufen oder 99 %) konnte mittels Laborexperimenten ein Temperatur-Zeit-Konzept erstellt werden (Abb. 7-30). Bis zu 55 °C folgt dieses einem lineare Zusammenhang.

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.

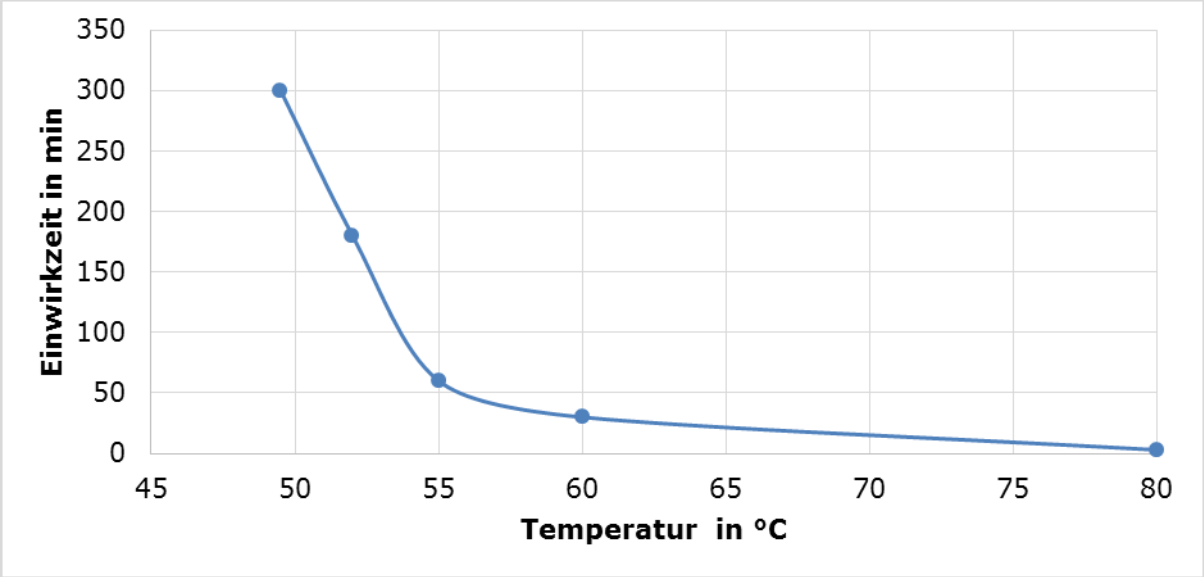


Abb. 7-30 Bezug zwischen Einwirkzeit und Temperatur, um eine Verminderung von ca. 99 % der intakten Bakterienzellen von *P. aeruginosa* in membrangeschädigte und daher nicht kultivierbare *P. aeruginosa* zu erzielen

In Laborexperimenten am IWW 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.

7.3.5.3 Temperaturvorgeschichte

Ein weiterer Untersuchungspunkt beinhaltete die Frage, ob die „Temperaturvorgeschichte“ von *P. aeruginosa* die Anfälligkeit der Bakterien gegenüber Hitzestress beeinflusst. In anderen Worten, besteht die Möglichkeit, dass die Temperatur, der die Bakterien in der Vergangenheit ausgesetzt waren, sich auf deren Hitzeempfindlichkeit auswirkt. Dazu wurden identische Flüssigmediumansätze mit *P. aeruginosa* angeimpft und entweder bei 20 °C oder bei 39 °C angezogen d. h. die Vergangenheit war unterschiedlich warm. Es wurden zudem zwei unterschiedlich lange Kultivationszeiten gewählt, um Bakterien in logarithmischer als auch in der stationären Wachstumsphase zu erhalten. Die optische Dichte (600 nm) der sich ergebenden Kulturen wurden auf einen Wert von 1,0 angeglichen und die Bakterien in filtriertem (0,2 µm) Mineralwasser (Evian, Frankreich) gewaschen und anschließend suspendiert. Die Bakterienkonzentration wurde anschließend durch Verdünnung in filtriertem Mineralwasser auf 10^5 Bakterien pro mL eingestellt und in identische Volumenteile unterteilt. Diese Aliquote wurde entweder nicht hitzebehandelt oder für unterschiedlich lange Zeiten (3 min, 10 min, 30 min, 1 h, 3 h und 5h) bei 50 °C inkubiert. Die Ansätze wurde auf Nähragar aufgetragen (‚Spot Plating‘ Methode) bzw. mittels Durchflusszytometrie in Kombination mit Lebend-tot-Färbung auf ihre Membranintegrität überprüft.

Bei der Spot Plating-Methode wurden für *P. aeruginosa*, die bei 28 °C angezüchtet wurden, nach 3 min bei 50 °C noch Kolonien erhalten, jedoch nicht mehr nach 10 min Inku-

bation bei 50 °C. Bei den Bakterien, die bei 39 °C gezüchtet wurden, waren anderseits noch Kolonien sichtbar nach 10 min Hitzeinkubation bei 50 °C (Abb. 7-31).

Während die Temperaturvorgeschichte (28 °C bzw. 39 °C) damit klar die Fähigkeit, Hitzeschock zu überleben, beeinflusst, war kein Effekt der Wachstumsphase erkennbar.

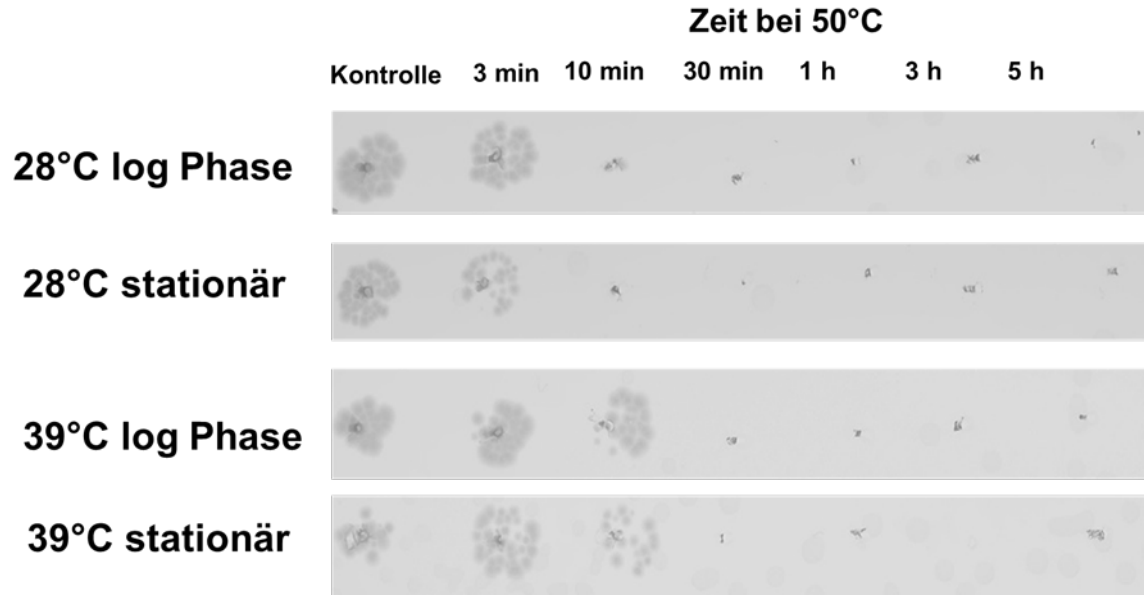


Abb. 7-31 Bezug zwischen Wachstumsbedingungen von *P. aeruginosa* (angezogen bei 28 oder 39 °C bis zur logarithmischen bzw. stationären Wachstumsphase) und der Überlebensfähigkeit nach unterschiedlich langer Hitzeexposition bei 50 °C. Jeweils 1 µl der Bakteriensuspensionen (105 Bakterien pro mL) wurden auf Nährmedium ausgebracht. Das Fehlen von Kolonien bedeutet eine Verlust an Kultivierbarkeit von ≥ 2 log Einheiten.

Diese kulturellen Befunde, wie sie in vorhergehender Abbildung (Abb. 7-31) dargestellt sind, wurden unterstützt durch die Messung der Membranintegrität der Bakterien mittels Durchflusszytometrie. Die Messungen erfolgten nach Anfärben der Proben mit SYBR Green I und Propidium Iodid (Abb. 7-32). *P. aeruginosa*, die bei 28 °C herangezüchtet wurden, verloren ihre Membranintegrität deutlich schneller als die, die bei 39 °C kultiviert wurden.

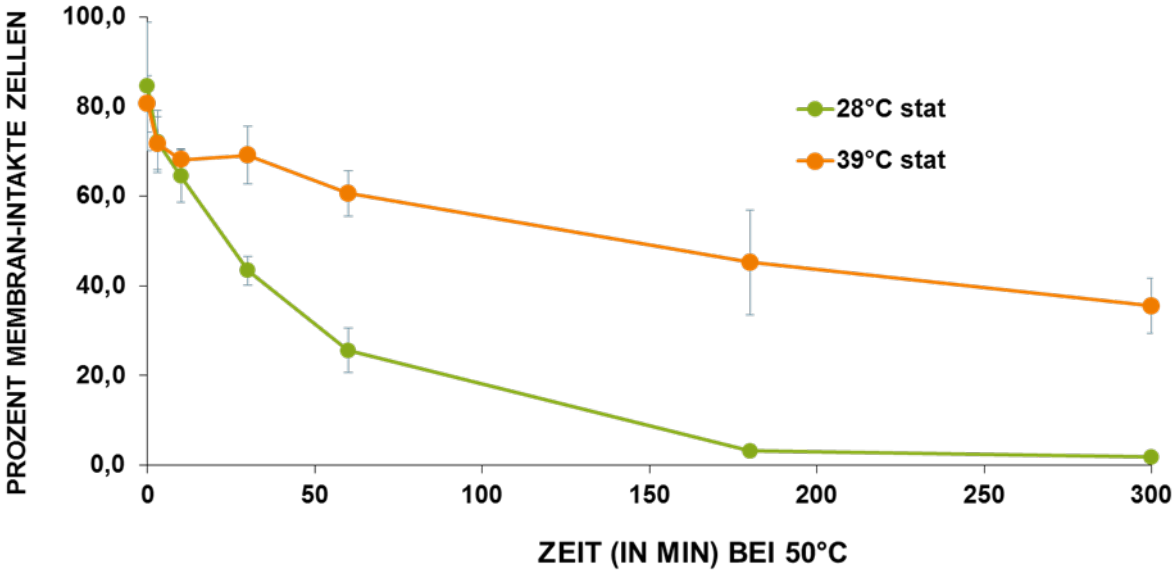


Abb. 7-32 Bezug zwischen der Wachstumstemperatur von *P. aeruginosa* (angezogen bei 28 oder 39 °C bis zur stationären Wachstumsphase; abgekürzt: stat) und der Membranintegrität der Bakterien nach unterschiedlich langer Hitzeexposition bei 50 °C. Die Proben wurden vor der durchflusszytometrischen Analyse angefärbt mit SYBR Green I und Propidium Iodid

Nachweismethoden für *P. aeruginosa*

Bei den im Rahmen des AP II untersuchten Objekten mit positivem kulturellem Befund wurden zusätzlich zu dem kulturellen Nachweis mittels spezifischer qPCR auf Vorkommen von *P. aeruginosa* analysiert. Es zeigte sich, der kulturelle Nachweis weist nicht in jedem Fall die Gesamtheit des Vorkommens von *P. aeruginosa* auf. Es wurden Objektspezifisch mittels der spezifischen, sensitiven qPCR Methode weitaus mehr Stellen in diesen Objekten als kontaminiert eingestuft. Zudem war dort auch die Konzentration als höher einzustufen, auch wenn kein direkter Vergleich der Ergebnisse zwischen Kultivierungsmethode und Nachweis an Geneinheiten (Genetic units) möglich ist.

Tab. 7-5 Analysenergebnisse von 3 Objekten auf *P. aeruginosa* mittels kultureller Methode und qPCR. Proben-ID zeigt Entnahmestelle und wievielter Liter beprobt wurde.

Labor-ID	Proben-ID	PN-Datum	*P. aeruginosa* kulturell (KbE/100 mL)	qPCR *P. aeruginosa* (Genetic units/500 mL)
023_150414_1	023.3300.W.1	14.04.2015	0	
023_150414_2	023.3300.W.2	14.04.2015	0	956
023_150414_3	023.3300.W.5	14.04.2015	0	
023_150414_4	023.3300.K.5	14.04.2015	0	55
023_150414_5	023.3301.W.2	14.04.2015	0	
023_150414_6	023.0002.K.2	14.04.2015	0	
023_150414_7	023.0003.W.2	14.04.2015	0	

Labor-ID	Proben-ID	PN-Datum	*P. aeruginosa* kulturell (KbE/100 mL)	qPCR *P. aeruginosa* (Genetic units/500 mL)
023_150414_8	023.0005.W.3	14.04.2015	0	
023_150414_9	023.0006.K.2	14.04.2015	0	
023_150414_10	023.9300.W.1	14.04.2015	0	
023_150414_11	023.9300.W.2	14.04.2015	0	2780
023_150414_12	023.9300.W.5	14.04.2015	0	
023_150414_13	023.9300.K.5	14.04.2015	0	172
023_150414_14	023.9301.W.2	14.04.2015	0	
023_150414_15	023.5300.W.1	14.04.2015	0	
023_150414_16	023.5300.W.2	14.04.2015	0	2830
023_150414_17	023.5300.W.5	14.04.2015	0	
023_150414_18	023.5300.K.5	14.04.2015	0	694
023_150414_19	023.5301.W.2	14.04.2015	0	
023_150414_20	023.6300.W.1	14.04.2015	0	
023_150414_21	023.6300.W.2	14.04.2015	0	2770
023_150414_22	023.6300.W.5	14.04.2015	0	
023_150414_24	023.6300.K.5	14.04.2015	0	5760
110_160524_1	110.0003.K.2	24.05.2016	0	1670
110_160524_2	110.0005.W.2	24.05.2016	0	2160
110_160524_3	111.0006.W.2	24.05.2016	0	13600
110_160524_4	110.1300.W.2	24.05.2016	0	2190
110_160524_5	110.1300.W.5	24.05.2016	0	6620
110_160524_6	110.1300.K.5	24.05.2016	0	16800
110_160524_8	110.2300.W.2	24.05.2016	0	9470
110_160524_9	110.2300.W.5	24.05.2016	0	140000
110_160524_10	110.2300.K.5	24.05.2016	0	15900
115.0003.K.2	115.0003.K.2	26.06.2017	n. a.	103000
115.0005.W.2	115.0005.W.2	26.06.2017	0	26600
115.0006.W.2	115.0006.W.2	26.06.2017	0	53500
115.2300.W.2	115.2300.W.2	26.06.2017	0	80700
115.2300.W.5	115.2300.W.5	26.06.2017	0	112000
115.2300.K.5	115.2300.K.5	26.06.2017	0	35400
115.1300.W.2	115.1300.W.2	26.06.2017	>300	7220000
115.1300.W.5	115.1300.W.5	26.06.2017	>300	53500
115.1300.K.5	115.1300.K.5	26.06.2017	0	85000

Eine Hinzunahme der spezifischen qPCR liefert auf der Basis dieser Ergebnisse, 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 UBA [UBA2017] aufgeführt werden, erleich-

tern kann. Es ist zu empfehlen, diese Erkenntnis bei der Entscheidung von Maßnahmen mit in die Planung aufzunehmen.

Abb. 7-33 Endständige Entnahmestellen eines der beprobten Objekte mit positivem Befund an *P. aeruginosa* sowohl mit kulturellen wie auch mit qPCR Analysen

7.3.6 Ergebnisse thermohydraulische Auswertung

Versuche konnten im Emulationsmodul nicht durchgeführt werden, da der Kupfergehalt im Wasser der Anlage zu hoch war, um eine Kultivierbarkeit von *P. aeruginosa* zu gewährleisten. Der Verlust der Kultivierbarkeit ist ein Ausschlusskriterium für Versuche zum Effekt der Temperatur auf die Kultivierbarkeit und das Überleben.

7.4 Schlussfolgerungen Betrieb Emulationsmodule und Herausarbeiten von Thesen

Die Kontamination des Trinkwassers und damit einer Trinkwasser-Installation mit fakultativ pathogenen Bakterien wie *L. pneumophila* und *P. aeruginosa* ist aufgrund des potentiellen gesundheitlichen Risikos für den Verbraucher unerwünscht und daher zu vermeiden. Hier sollte der Einfluss der Werkstoffe des Rohrleitungsmaterials sowie der Stranginhaltsvolumina in den Leitungen ≤ 3 Liter zwischen dem TWE und Entnahmestelle bei Variation der Temperatur im Zirkulationskreis analysiert werden.

<u>Legionellen - Emulatorversuche im IMMH</u>

Die Untersuchungen zum Einfluss der Temperatur des Zirkulationskreises auf Legionellen im endständigen Bereich zeigten, dass mit steigender Zirkulationstemperatur die Konzentration kultivierbarer Legionellen im Wasser allmählich abnahm. Eine deutliche Reduktion der Legionellen auf ≤100 KbE/100 mL war erst bei 60 °C TWW-Temperatur möglich. Es ist zu dabei 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. Völker16]. Außerdem erfolgte bei jeder Zapfung ein stetiger Legionelleneintrag in den Emulator durch das Zulaufwasser. Mittels kultivierungsunabhängiger Methode (lebend/tot qPCR) konnte zusätzlich beobachtet werden, dass bei steigenden TWW-Temperaturen ≥ 55 °C ein Teil von *L. pneumophila* nicht mehr kultivierbar war, dennoch eine intakte Membran aufwies. Dies spricht für eine Indizierung des VBNC-Zustandes infolge des Temperaturstresses. Der VBNC-Zustand bei Legionellen ist bezüglich der Infektiosität wenig erforscht. Von einem potentiellen gesundheitlichen Risiko ist auszugeben. *L. pneumophila* im VBNC-Status

kann in eine kultivierbare Form durch die Passage mit Amöben (z. B. *Acanthamoeba polyphaga*) zurückgeführt werden und anschließend humane Makrophagen sowie Epithelzellen infizieren [Epalle15].

Die Konzentrationen der kultivierbaren Legionellen in der Wassersäule des Emulators waren annähernd identisch für die Endstränge aus Kupfer, Edelstahl und Kunststoff. Aufgrund des im endständigen Bereich gemessenen Kupfergehaltes (0,14 – 0,89 mg/L) kann davon ausgegangen werden, dass Kupfer in diesen Konzentrationen keinen wachstumshemmenden Einfluss auf Legionellen hat. In den Biofilmen konnte eine Abnahme des kulturellen Nachweises von Legionellen werkstoffabhängig unter steigender Zirkulationstemperatur beobachtet werden. Die Biofilmetablierung mit Legionellen war aber auf allen Werkstoffen mit einer Ausnahme innerhalb jedes Versuchs über den gesamten Untersuchungsraum erfolgreich. Daher lässt sich schlussfolgern, dass die im Emulator eingesetzten Werkstoffe Kupfer, Edelstahl und Kunststoff eine Kontamination mit planktonischen und sessilen Legionellen nicht verhindern können.

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. Die Konzentrationen der membranintakten Legionellen (*Legionella* spp. lebend/tot qPCR) unterschieden sich in den kurzen und langen Strängen ebenfalls kaum. Es konnten außerdem keine Differenzen in der Einnistung der Legionellen in den Biofilmen zwischen den kurzen und langen Strängen nachgewiesen werden (Kulturverfahren). Insofern geben die Emulatorversuche keinen Anlass, die sogenannte 3-Liter-Regel nach bspw. DVGW W 551 zu ändern. Sollte künftig der Fokus der Bewertung des hygienischen Risikos für den Nutzer allerdings nur auf die Spezies *L. pneumophila* liegen, soll berücksichtigt werden, dass die Membranintegrität von *L. pneumophila* bei 60 °C Zirkulationstemperatur in der Wassersäule der kurzen Stränge aus allen Materialien tendenziell schneller als in der der langen Stränge verloren ging (*L. pneumophila* lebend/tot qPCR).

Aufgrund der Ergebnisse scheint die Temperatur die wesentliche Einflussgröße auf die Vermehrung/Persistenz der Legionellen im Emulator zu fungieren. Im Gegensatz dazu konnte keine Wirkung von Temperatur aber auch von Werkstoff auf die kultivierbaren heterotrophen Bakterien im Wasser der Endstränge festgestellt werden. Ein Einfluss von Stranginhaltsvolumen war tendenziell erkennbar. In den Biofilmen konnte tendenziell den Einfluss der Temperatur und Stranglänge werkstoffabhängig erkannt werden.

Anhand der im Rahmen der Emulatorversuche im IMMH erhobenen Daten zur Trinkwasserhygiene konnten zusammenfassend folgende Thesen formuliert werden:

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 notwendig

Ein Werkstoffeinfluss auf die kultivierbaren Legionellen in der Wassersäule des endständigen Bereiches konnte nicht nachgewiesen werden.

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.

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

8 Erkenntnisse zur Trinkwasser-Installation und zum Nutzerverhalten

8.1 Randbedingungen für die Analyse im internationalen Kontext

In diesem Kapitel erfolgt eine Analyse der TWI nach dem aktuellen und internationalen Stand der Technik. Zunächst werden die gängigsten europäischen Normen und Regularien recherchiert und dokumentiert. Auf dieser Recherche aufbauend, erfolgt eine Analyse und Dokumentation von Verordnungen und Richtlinien der Mitgliedsländer, welche im Programm „District Heating and Cooling“(DHC) der internationalen Energieagentur (IEA) vertreten sind. Im Zuge weiterer Arbeiten sind die gängigsten Trinkwassersysteme recherchiert. Die Technologien sind ihrem jeweiligen, typischen Einsatzbereich (Wohngebäude oder gewerbliche Nutzung) sowie Ihrem Auftreten auf dem internationalen Markt (z. B. nordische Länder oder Zentraleuropa) zugeordnet. Vor dem Hintergrund der Niedertemperaturanwendung („Low Temperature“ Systeme oder „LowEx“ Systeme) werden zudem Systeme und Technologien diskutiert, welche eine hygienisch einwandfreie Trinkwarmwasser-Versorgung ermöglichen.

Die Studien in diesem Kapitel sind in enger Zusammenarbeit mit den Partnern des „Subtask B: District Heating and Cooling Technologies“ [Li16] des internationalen Vorhabens „IEA DHC Annex TS1 – Low Temperature District Heating for Future Energy Systems“ [Schmidt17] entstanden.

8.1.1 Übersicht der derzeitigen nationalen und internationalen Normen und Regelwerke

Wie bereits in Kapitel 1 erläutert, sind insbesondere Temperaturniveaus unter 60 °C und Systemgrößen über 3 L [Brand13; Yang16a; WHO07] bei der TWW-Bereitung aus hygienischen Gesichtspunkten eine der zentralen Fragen und Herausforderung der TWI. Die erforderlichen Temperaturen des TWW an der Austrittsseite des zentralen Trinkwassererwärmers unterscheiden sich von Land zu Land. Vor diesem Hintergrund erfolgt zunächst eine Analyse gängiger europäischen Normen und Regularien.

Die wichtigsten Aspekte sind in den Normen EN 806 und EN 1717 sowie dem technischen Bericht [CEN 2012] dargelegt und als Stand der Technik anzusehen. Diese Normen bzw. Richtlinien formulieren einen Mindeststandard und stellen den kleinsten gemeinsamen Nenner der europäischen Länder dar. Nach diesen Richtlinien wird empfohlen, dass das Temperaturniveau für Trinkwasser (kalt) nicht mehr als 25 °C und für Trinkwarmwasser nicht weniger als 60 °C, 30 Sekunden nach vollständiger Öffnung einer Entnahmestelle, beträgt. Zusätzlich zu den Temperaturniveaus werden weitere Anforderungen an die Wasserinstallationen festgelegt. Es ist festgehalten, dass die Systeme des erwärmten Wassers so konzipiert werden müssen, dass das Risiko einer Verbrühung gering ist. Bezugnehmend auf das Risiko einer Verbrühung gelten für Kindergärten, Schulen und Seniorenwohnheime jeweils geringere Temperaturvorgaben. In der Norm EN 806 finden sich weiterführende Anforderungen für die Verteilung von Trinkwarmwasser und –kaltwasser. Die Verteilung von kaltem Trinkwasser für eine geringe Anzahl an Zapfvorgängen darf nicht am Ende einer langen Wasserleitung installiert werden. Darüber hinaus dürfen Rohre, die Kaltwasser führen, und Rohre, die Warmwasser führen, nicht zusammen in einem Schacht oder Kanal installiert sein. Die Regularien schreiben des Weiteren vor, dass be-

züglich der Trinkwarmwasser-Verteilung (TWW-Verteilung) nationale Vorschriften zur Verhinderung des Wachstums von Legionellen zu beachten sind. Außerdem sollten Heißwassersysteme die Möglichkeit haben, die Temperatur des Systems an einem beliebigen Punkt auf 70 °C für Desinfektionszwecke zu erhöhen.

Die Weltgesundheitsorganisation (WHO) empfiehlt, dass TWW bei 60 °C bereitgehalten wird oder mindestens einmal täglich eine Temperatur von mindestens 60 °C in einem vorhandenen TWW-Speicher erreicht wird. Außerdem sollte Wasser an einer Zapfstelle eine Temperatur von mindestens 50 °C erreichen. Zapfstellen im häuslichen Sanitärbereich (d. h. Badewanne oder Dusche) sollten vor dem Hintergrund der Gefahr von Verbrühungen mit Thermostaten bzw. Mischbatterien ausgerüstet sein, um die Wassertemperatur auf 49 °C oder niedriger zu senken [WHO07]. Die WHO empfiehlt weiterhin Kaltwasser unter einem Temperaturniveau von 20 °C zu speichern oder zu verteilen, da sich Legionellen auch bei diesen tiefen Temperaturen unter bestimmten Umständen vermehren können [WHO07].

Im Zuge einer weiterführenden Analyse werden Verordnungen und Richtlinien der Mitgliedsländer, welche am Projekt „IEA DHC Annex TS1“ im Programm „District Heating and Cooling“(DHC) der internationalen Energieagentur (IEA) teilnehmen[9], recherchiert und dokumentiert. Bezugnehmend auf den Aspekt der Niedertemperaturversorgung steht bei dieser Analyse insbesondere das minimal erforderliche TWW-Temperaturniveau im Vordergrund. Eine Übersicht findet sich in Tab. 8-1.

Tab. 8-1 Vorschriften zu Trinkwarmwassersystemen in den teilnehmenden Ländern [BFS 2011; DVGW W 551; DS439 2009; NBC07; SHCC; Pettersen15; HSE14]

Teilnehmerland	**Beschreibung**	**Normung**
Deutschland	Der Geltungsbereich betrifft alle Neuanlagen mit einem Speicherinhalt > 400 Liter und/ oder einem Leitungsnetz > 3 Liter, sofern sie außerhalb eines Ein- oder Zweifamilienhauses betrieben werden. Es müssen mindestens 60 °C am Warmwasseraustritt des Trinkwassererwärmers erreicht werden. Die Temperaturdifferenz im Leitungsnetz darf max. 5 °C, einschließlich Zirkulation betragen. Stockwerksleitungen mit einem Wasservolumen > 3 Liter sind mit zusätzlichen Zirkulationsleitungen oder selbstregelnden Begleitheizungen auszustatten. Die Zirkulation bzw. elektrische Begleitheizung darf nicht länger als 8 Stunden pro Tag unterbrochen werden.	DVGW-Arbeitsblatt W 551 – Technische Maßnahmen zur Minderung des Legionellenwachstums in Neuanlagen

[9] Offizielle Mitgliedsländer des IEA DHC Annex TS1: Deutschland, Dänemark, Finnland, Korea, Norwegen, und Großbritannien. Weiteres Mitgliedsland Schweden.

Teilnehmerland	Beschreibung	Normung
Dänemark	In der dänischen Norm DS439 ist geregelt, dass TWW Systeme ausgelegt sein sollen um 60 °C warmes Wasser zu bereiten und dass in allen Versorgungsleitungen mindestens 50 °C herrschen muss. Zu Spitzenzeiten dürfen diese Temperaturen nicht unter 45 °C sinken. Es gibt keine Differenzierung in Klein- und Großsysteme wie in EN 806 vorgeschrieben. In älteren TWI muss eine Zirkulation installiert sein, die sicherstellt, dass die Systemtemperatur von 50 °C nicht unterschritten wird, um Hygienerisiken durch große TWW-Speicher, T-Stücke, lange Steigleitungen und großdimensionierte Rohre zu minimieren.	DS439:2009 Code of practice for domestic hot water supply installation
Finnland	Die Mindesttemperatur für TWW im gesamten System beträgt 55 °C. Im Falle von hohen Lasten, darf diese Temperatur maximal für 10 Sekunden unterschritten werden. Die maximale Systemtemperatur liegt bei 65 °C. In diesem Temperaturband sollte die Solltemperatur jedoch möglichst niedrig, also 55 °C gewählt werden.	National Building Code of Finland D1: Water supply and drains installations for buildings
Korea	Die vorgeschriebenen Temperaturen variieren in Abhängigkeit der Anwendung: Vorlauftemperatur (Wärmeerzeuger) Zentrale Heizung 120-80 °C (ΔT: 40 K) Fern-/Nahwärmeversorgung Seoul Housing & Communities Corporation: 115-60 °C (ΔT: 55 K)/ Korea District heating Corporation: SH 115-50 °C (ΔT: 65 K) Wassertemperatur im Speicher Zentrale Heizung 60-50 °C (ΔT: 10 K) Dezentrale Heizung 60-50 °C (ΔT: 10 K) Fern-/Nahwärmeversorgung Seoul Housing & Communities Corporation: 60-45 °C (ΔT: 15 K) Korea District heating Corporation: SH 60-45 °C (ΔT: 15 K)	Technical Guidelines (Seoul Housing & Communities Corporation)

Teilnehmerland	Beschreibung	Normung
Norwegen	Die Zapftemperatur muss nach einer Minute 60 °C betragen. Die System- und Speichertemperatur darf 60 °C nicht unterschreiten. In regelmäßigen Abständen soll eine thermische Desinfektion bei 70 °C vollzogen werden.	Prevention of *Legionella* – guidelines, 3. Edition, chapter 7. National Institute of Public Health
Großbritannien	In Großbritannien wird für das Trinkkaltwasser eine maximale Temperatur von 20 °C vorgeschrieben. Die Temperatur im Trinkwarmwassersystem soll 60 °C nicht unterschreiten, das gilt auch für die Speichertemperatur. Das Trinkwarmwasser soll binnen einer Minute an der Zapfstelle auf eine Temperatur von 50 °C erwärmt werden, in Gebäuden mit hohen hygienischen Anforderungen auf 55 °C. Die Gefahr der Verbrühung muss hierbei mitbedacht werden, weswegen deutlich höhere Temperaturen vermieden werden sollen. Bei Warmwasserbereitung im Durchlaufprinzip müssen die vorgeschrieben Temperaturen und Zeitangaben nicht eingehalten werden. Dies gilt allerdings nur wenn diese Installation direkt an die Trinkwasserversorgung angeschlossen ist, das Volumen zwischen Trinkwasserleitung und Wärmeübertrager nicht mehr als 1 L beträgt und das Volumen zwischen Wärmeübertrager und Zapfstelle nicht mehr als 1,5 L beträgt.	HSG274 Legionnaires’ disease: Technical guidance Part 2
Schweden	Die Zapftemperatur soll zwischen 50 °C und 60 °C liegen. In der Zirkulation darf eine Temperatur von 50 °C nicht unterschritten werden. Die System- und Speichertemperatur darf 60 °C nicht unterschreiten. Das Aufheizen des Kalttrinkwassersystems muss vermieden werden.	6: BFS 2015:3 BBR 22 – Section 621

In Kanada werden die ausgelieferten elektrischen Wärmeerzeuger mit der Thermostat-Voreinstellung von 60 °C fabrikvoreingestellt. Die allgemeine Empfehlung nach „ASHRAE Richtlinie 12-2000“ ist eine Systemtemperatur von 55 °C. In den USA ist der Warmwasserbedarf mit etwa 5000 kWh pro Wohnung pro Jahr fast zweimal so groß wie in Deutschland. Dies ist darauf zurückzuführen, dass Spülmaschinen und andere Bereiche mit Warmwasser versorgt werden. Betriebstemperaturen von Brennwertkesseln liegen bei 48 °C und werden von der Regierung empfohlen [Rosa14]. In den Niederlanden wird mit der „Modelbeheers plan *Legionella* preventie in Leiding water Distribution“ geregelt, dass Trinkwarmwassersysteme eine Mindesttemperatur von 60 °C nicht unterschreiten dürfen [VROM2000]. In Frankreich ist in „Arrêté du 30 novembre 2005 modifiant l’arrêté du 23 juin 1978 – Installations 260ort he distribution of domestic hot Water“ [JORF05] geregelt, dass die Zapftemperatur an Zapfstellen für die Körperhygiene 50 °C nicht übersteigen darf. An anderen Zapfstellen sind bis zu 60 °C erlaubt. Weiter wird in Klein- und

Großanlagen unterschieden, analog zur Regelung in Deutschland. Für Großanlagen gelten weiterhin folgende Vorgaben: die Temperatur am Erzeugeraustritt darf 55 °C nicht unterschreiten und es sind regelmäßige thermische Spülungen vorgeschrieben. In der Schweiz ist durch die nationale Norm SIA 385 geregelt, dass die Temperatur am TWE-Austritt 60 °C betragen soll, das Temperaturniveau für warmgehaltene Leitungen (Warmhalteband und Zirkulation bis Eintritt in den Wassererwärmer) beträgt 55 °C und an der Entnahmestelle sollen mindestens 50 °C erreicht werden. Systeme mit tieferen Temperaturen als 60 °C, z. B. mit Frischwasserstationen, sind möglich, sie sind jedoch täglich während einer Stunde auf 60 °C zu erwärmen (Desinfektion) [SIA11].

In den betrachteten Regularien der verschiedenen Länder sind gängige TWI mit hohen Trinkwasservolumen berücksichtigt. Insbesondere hygienische Aspekte werden bei diesen technischen Methoden zur Trinkwasserversorgung berücksichtigt um gesundheitliche Risiken so auf ein minimales Risiko herabzusetzen. Aspekte der Energieeffizienz finden keine oder nur sekundäre Berücksichtigung.

8.1.2 Übersicht gängiger Trinkwarmwasser-Installationen

In größeren Gebäuden bzw. Anlagen mit hohem Warmwasserbedarf (z. B. Industriebetriebe, Pflegeheime, Krankenhäuser) kommen in der Regel zentrale Trinkwassererwärmer zum Einsatz. Diese werden mit wenigen Ausnahmen ausschließlich als geschlossene Anlagen in unmittelbarer Verbindung mit der Trinkwasserverteilung ausgeführt [Fünfgeld02]. Je nach Art der Wassererwärmung werden sie grundsätzlich in drei große Gruppen eingeteilt:

- Warmwasseranlagen nach dem Speichersystem
- Kombinierte Warmwasseranlagen mit Speicher- und Durchflussbetrieb
- Warmwasseranlagen nach dem Durchfluss-Prinzip

Diese Prinzipien bzw. Kombinationen hieraus finden sich in Ein- und Mehrfamilienhäuser sowie in gewerblichen Gebäuden. Als Energieträger zur Trinkwarmwasserbereitung werden in der Regel Brennstoffe (Holz, Gas und Öl), Solarthermie, Fernwärme aber auch Strom verwendet. Häufig finden sich Installationen, bei denen das Absenken der Systemtemperaturen zu hygienischen Problemen führen kann. Einzig das Durchlaufprinzip zeigt hier Stärken, da das TWW-Volumen durch den fehlenden Speicher klein bemessen ist. Die beiden speicherbasierten Prinzipien eigenen sich zwar grundsätzlich auch, jedoch sind hierfür in der Regel größere Umbaumaßnahmen notwendig.

<u>Speicherprinzip</u>

Beim Speicherprinzip wird ein verbraucherseitiger Trinkwasserspeicher durch einen Wärmeübertrager geladen (siehe Tab. 8-1). Die Ladeleistung ist zumeist geringer als die Entnahmeleistung. Nach einer größeren Entnahme muss der Speicher über einen größeren Zeitraum wieder geladen werden.

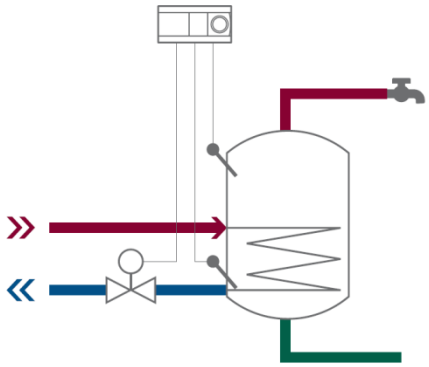


Abb. 8-1 Prinzipschaltbild Speicherprinzip [Thorsen12b]

Vor allem in Mehrfamilienhäusern findet sich häufig ein zentraler Trinkwarmwasserspeicher, über den die einzelnen Wohneinheiten versorgt werden (siehe Abb. 8-2) [Thorsen12b].

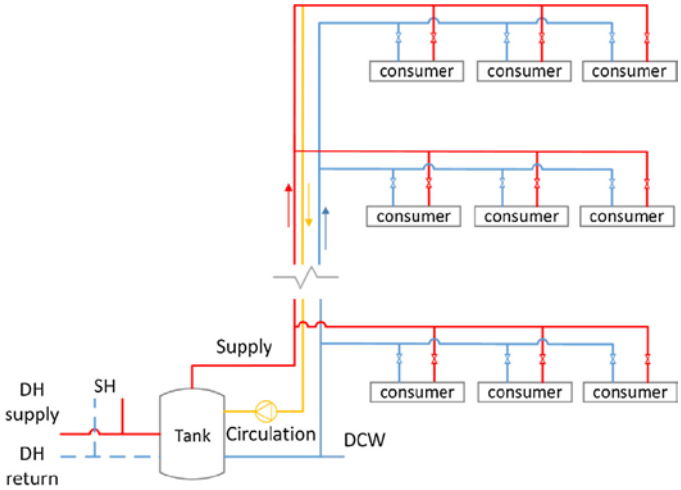


Abb. 8-2 Zentrales Trinkwarmwassersystem im Mehrfamilienhaus [Yang16a]

Ein Vorteil des Speicherprinzips ist, dass auch bei einem Ausfall des Erzeugers Warmwasser zur Verfügung steht. Außerdem lässt der Speicher sich mit nahezu jeder Art von Wärmeerzeuger und auch Wärmenetzen kombinieren. Die Investitionskosten sind vergleichsweise gering, der Platzbedarf ist hingegen relativ hoch. Das große Volumen des Speichers führt zu Bereitstellungsverlusten und hat einen Einfluss auf die Trinkwasserhygiene.

Das Speicherprinzip findet sich in Ein- und Mehrfamilienhäusern, typische Märkte sind Deutschland, Italien, Österreich und Großbritannien [Thorsen12b, Schmidt17].

Speicherladeprinzip

Das Speicherladeprinzip ist eine Kombination aus dem Speicher- und Durchflussprinzip. Ein Wärmeübertrager gibt die Wärme eines Erzeugers oder Netzes an das Trinkwassersystem ab (siehe Abb. 8-3). Ein zusätzlicher Pufferspeicher verringert die benötigte Leistung.

Bei einem Ausfall des Erzeugers steht durch den Speicher eine begrenzte Menge Warmwasser zur Verfügung. Die Auslegung von Speicherladesystemen gestaltet sich in der Regel komplex und im Falle einer vorhandenen Zirkulation muss die korrekte thermische Schichtung beibehalten werden. Die hygienisch und energetisch nachteilige Speicherung von Trinkwarmwasser kann vermieden werden, indem der Speicher nicht verbraucher- sondern netzseitig installiert wird und mit Heizungswasser betrieben wird.

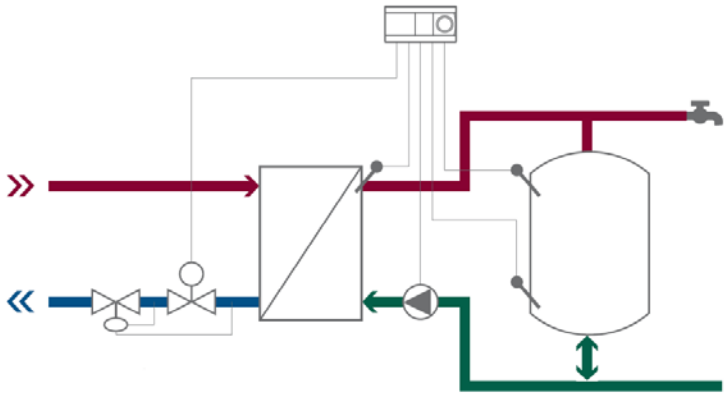


Abb. 8-3 Prinzipschaltbild Speicherladeprinzip [Thorsen12b]

Diese Technologie eignet sich insbesondere für spezielle Applikationen mit hohen Spitzen wie Sporthallen oder Gewerbegebäuden. Es findet sich aber auch in Ein- und Mehrfamilienhäusern. Mittel-, Süd- und Osteuropa sind typische Märkte für das Speicherladeprinzip [Thorsen12b, Schmidt17].

Durchflussprinzip

Beim Durchflussprinzip, auch zu finden in so genannten Frischwasserstationen, wird das Trinkwasser direkt durch einen Wärmeübertrager erwärmt (siehe Abb. 8-4). Dies setzt eine hohe Erzeugerleistung voraus, da Lasten nicht gepuffert werden können.

Der Vorteil dieser Technologie liegt in dem geringen Systemvolumen, den geringen Investitionskosten, dem geringen Platzbedarf und der hohen Energieeffizienz. Ein hygienisches Risiko kann gesenkt aber nicht vermieden werden. Im Vergleich zu den Speicheranwendungen ist der Wärmebereistellungsverlust bei der Anwendung des Durchlaufprinzips bzw. der Verwendung einer Frischwasserstation in einem Einfamilienhaus auf die Hälfte reduziert. Wird zum Beispiel eine Reduktion um 75 W in einer Übergabestation in einem Einfamilienhaus erzielt, kann der Wärmeverlust auf 36 €/a beziffert werden. Im Fall einer Anwendung im Mehrfamilienhaus können die Einsparungen sogar noch größer ausfallen [Thorsen12a; Thorsen06].

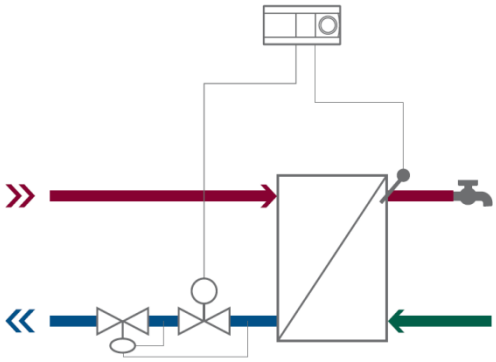


Abb. 8-4 Prinzipschaltbild Durchflussprinzip [Thorsen12b]

Das Durchflussprinzip kann in allen Gebäudearten genutzt werden und eignet sich für nahezu alle internationalen Märkte [Thorsen12b, Schmidt17]. Da Frischwasserstationen bzw. das Durchflussprinzip im Zuge der Niedertemperaturanwendung von besonderem Interesse sind, erfolgt eine umfangreiche Diskussion der wesentlichsten Parameter in Kapitel 8.1.3.

8.1.3 Trinkwarmwasserinstallationen für die Anwendung im Niedertemperaturbereich

Die Niedertemperaturversorgung (< 60 °C) besitzt großes Potenzial für die effiziente und ressourcenschonende TWW-Versorgung, stellt herkömmliche Trinkwarmwassersysteme allerdings auch vor sehr große hygienische Herausforderungen. Wie die Analyse des aktuellen Stands der Technik (vgl. 8.1.2) zeigt, bedingen im Bereich der Niedertemperaturanwendung herkömmliche Trinkwarmwasserinstallationen einen zusätzlichen Mehraufwand zur Gewährleistung hygienisch einwandfreien Trinkwassers. Um diesen zu minimieren oder gar auf ihn verzichten zu können, sollten die Trinkwarmwasserinstallation selbst an die neuen Anforderungen angepasst werden und stets die a.a.R.d.T einhalten. Im Zuge dieses Kapitels werden vor dem Hintergrund der Niedertemperaturversorgung potenziell geeignete Systemlösungen vor- und gegenübergestellt.

8.1.3.1 Trinkwasserversorgung in Niedertemperatur-Netzen

Insbesondere die netzgebundene Niedertemperatur-Wärmeversorgung eröffnet großes Potential für die Einbindung sogenannter Niedertemperaturquellen (z. B. Abwärme, Erdwärme oder solare Wärme) und damit einer deutlichen Absenkung der Vorlauftemperatur. Vor diesem Hintergrund erfolgt im Rahmen dieses Kapitels zunächst die Diskussion von Trinkwasserversorgungseinheiten, welche für die Anwendung in Wärmenetzen besonders geeignet erscheinen. Ausgehend von der Analyse in 8.1.2 zeigt sich, dass insbesondere Systemlösungen anbieten, die sich des Durchlaufprinzips bedienen, was bei Systemen gemäß des Durchflussprinzips sowie des Speicherladeprinzips der Fall ist. Tab. 8-2 und Tab. 8-3 enthalten eine Gegenüberstellung der wesentlichsten Eigenschaften der diskutierten Systeme.

Tab. 8-2 Gegenüberstellung der Eigenschaften einer Frischwasserstation [Thorsen11; Li16]

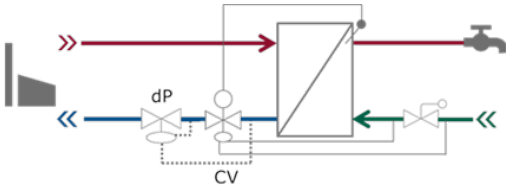
<table>
<tr><td>Funktionsweise</td><td colspan="2">Frischwasserstationen stellen die Wärme unmittelbar bereit, wenn TWW gezapft wird. Die Primärseite gibt seine Wärme an das Trinkkaltwasser auf der Sekundärseite ab und erwärmt somit das Wasser auf die Solltemperatur. Auf diese Weise kann in kleinen Systemen wie Einfamilienhäusern Warmwasser ohne Zirkulationsleitung schnell bereitgestellt werden. Das geringe Volumen verringert das hygeinische Risiko und führt dazu, dass das Wasser direkt zu der Komfortemperatur von 45 °C oder 50 °C bereitgestellt werden kann. In Abb. 8-6 ist eine Frischwasserstation mit entsprechender Regelung (dp-Regler sowie Thermostat- und Proportionalregeleinheiten) schematisch dargestellt.
 

Abb. 8-5 Schematische Darstellung einer Frischwasserstation [Thorsen12b]</td></tr>
<tr><td rowspan="4">Anwendbarkeit in der Niedertemperatur-versorgung</td><td colspan="2">Temperatur (minimale Versorgungstemperaturen)</td></tr>
<tr><td>Primärseitig:
• Vorlauftemperatur: 50 °C
• Rücklauftemperatur: 20 °C</td><td>Sekundärseitig:
• TWW-Temperatur: 47 °C
• TKW-Temperatur: 10 °C</td></tr>
<tr><td colspan="2">Vor-/ Nachteil</td></tr>
<tr><td>Vorteil
• Kompakt
• Vernachlässigbare Wärmeverluste im Vergleich zu Speichern
• Niedrige Rücklauftemperatur</td><td>Nachteil
• Der Erzeuger muss genügend Leistung bereitstellen können, da höhere Leistungsaufnahme als Speicher
• Im Falle der Fernwärmeversorgung wird ein Bypass für die Sommermonate benötigt
• Hoher Regelaufwand für Teillastbereich</td></tr>
</table>

Tab. 8-3 Gegenüberstellung der wesentlichsten Eigenschaften der Speichertankeinheiten [Li16]

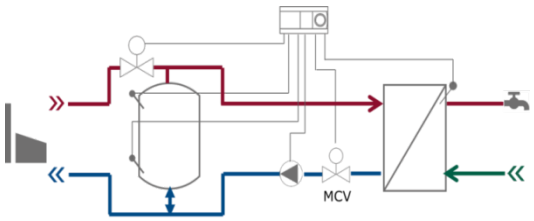
<table>
<tr><td>Funktionsweise</td><td colspan="2">Bei der konventionellen Systemlösung des Speicherladeprinzip ist der Warmwassertank auf der Sekundärseite installiert. Das erwärmte Trinkwasser wird direkt aus dem Speichertank entnommen. Wie bereits erläutert birgt dieses Prinzip vor dem Hintergrund der Niedertemperaturversorgung ein erhöhtes hygienisches Risiko. Daher wird für die Niedertemperaturanwendung der Trinkwarmwassertank auf die Sekundärseite und der Wärmeübertrager auf die Primärseite verschoben (vgl. Abb. 8-6).
 

Abb. 8-6 Schematische Darstellung Speichertankeinheiten [Thorsen12b]</td></tr>
<tr><td rowspan="3">Anwendbarkeit in der Niedertemperaturversorgung</td><td colspan="2">Temperatur (minimale Versorgungstemperaturen)</td></tr>
<tr><td colspan="2">• Ca. 50 °C Speichertemperatur</td></tr>
<tr><td colspan="2">Vor-/ Nachteil</td></tr>
<tr><td>Vorteil
• Der Speichertank kann auch auf niedrigem Temperaturniveau betrieben werden. Die Gefahr der Legionellen-Kontamination ist aufgrund der geringen Systemgröße herabgesetzt.</td><td>Nachteil
• Aufgrund des Gleichzeitigkeitsfaktors (d. h. der zu erwartenden Zapfmengen zu bestimmten Zeitpunkten am Tag) wird die Versorgungleitung für Speichertanksysteme sowie für Systeme nach dem reinen Durchflussprinzip gleich ausgelegt. Der Rohrleitungsquerschnitt kann also nicht kleiner dimensioniert werden. Aus diesem Zusammenhang ergibt sich, dass die Speicherverluste überwiegen und dies zu einer Verringerung der Effizienz des Gesamtsystems führt.</td></tr>
</table>

8.1.3.2 Trinkwarmwasserversorgungskonzepte im Niedertemperaturbereich

Bei niedrigen bis sehr niedrigen Versorgungstemperaturen kann es je nach Systemkonfiguration dazu kommen, dass pathogene Keime nicht ausreichend abgetötet werden und eine mögliche Kontamination einer Trinkwasseranlage eine Gefahr für die menschliche Gesundheit darstellt. Die nachfolgende Analyse zeigt, dass durchaus Lösungen für Systemkonfigurationen existieren, die trotz niedrigerer Temperaturen Potentiale für eine hygienische und gleichzeitig energieeffiziente Trinkwasserversorgung aufweisen. In [Brand13], [Yang16a] und [Li16] werden hierzu verschiedene Konzepte vorgestellt und diskutiert. Sie basieren im Wesentlichen auf der Reduktion des TWW-Systemvolumens und der Vermeidung einer Zirkulationsleitung.

Bestandsgebäude (Wohn- und Nichtwohngebäude): Zentrale Wärmepumpe

Eine Variante, die sich vor allem für Bestandsgebäude (Wohnnutzung und GHD) mit Speicher- oder Speicherladeprinzip anbietet, ist das Ersetzen des Speichers (vgl. Abb. 8-2) durch einen größeren Wärmetauscher mit zentraler Wärmepumpe (siehe Abb. 8-7).

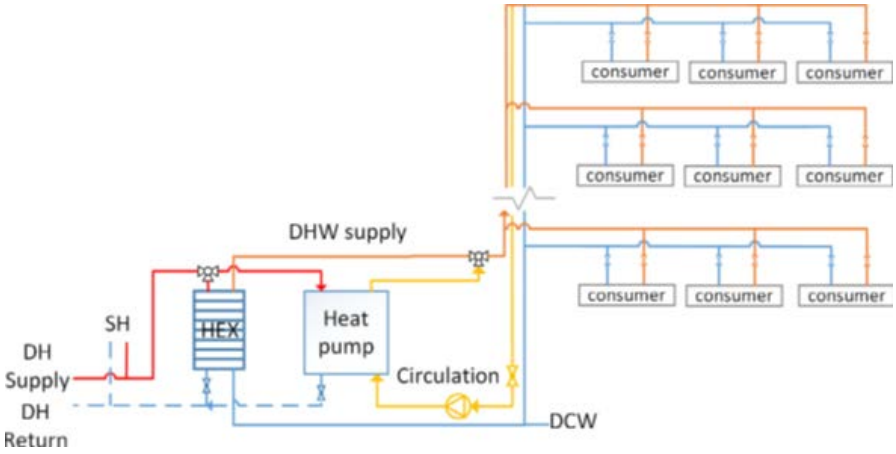


Abb. 8-7 Zentraler Wärmetauscher und Wärmepumpe zur Trinkwarmwasserbereitung [Yang16a]

Der bauliche Aufwand für diese Maßnahme ist vergleichsweise gering. Die Wärmepumpe hält die Temperatur in der Zirkulationsleitung konstant auf 50 ... 60 °C. Auf diese Weise werden hohe Wärmeverluste des Speichers vermieden und das hygienische Risiko durch das große Volumen und lange Verweilzeiten herabgesetzt. Da die Temperatur in der Zirkulationsleitung konstant auf >50 °C gehalten wird, wird das System als „hygienisch unbedenklich“ eingestuft (gilt nicht für alle Länder, nicht für Deutschland)

Diese Systemkonfiguration eignet sich insbesondere für den Fall, dass das Gebäude an ein Wärmenetz angeschlossen ist, da durch die Wärmepumpe die Rücklauftemperatur reduziert wird, was bei Wärmenetzen von großer Bedeutung ist [Yang16a].

Bestandsgebäude (Wohn- und Nichtwohngebäude): Dezentrale Frischwasserstationen

Eine andere Variante, die allerdings im Vergleich zur zuvor vorgestellten Variante einen höheren Sanierungsaufwand erfordert, ist der Wechsel von einer zentralen Versorgung zu einer dezentralen Versorgung.

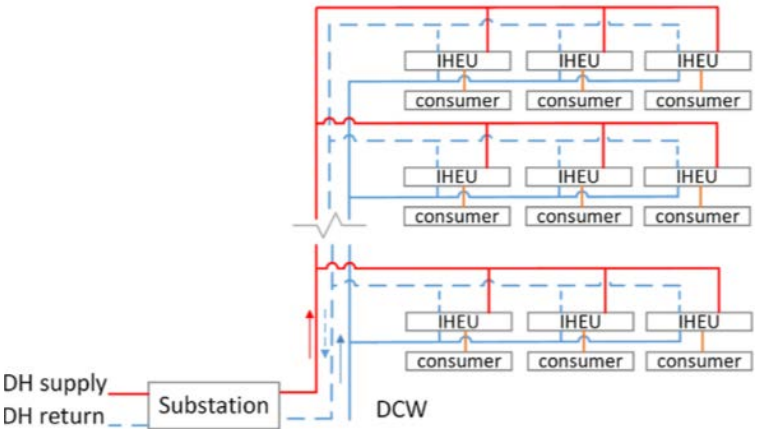


Abb. 8-8 Dezentrale Frischwasserstationen mit Zirkulation in einem Trinkwarmwassersystem [Yang16a]

Diese erfolgt durch den Einbau mehrerer Frischwasserstationen (IHEU)[10] (vgl. Abb. 8-8), die aufgrund des kleineren Systemvolumens den Eigenschaften einer Kleinanlage genügen. Kleinanlagen sind potenziell weniger anfällig für Legionellen-Kontaminationen, wenn die a.a.R.d.T eingehalten werden. So sind beispielsweise nach DVGW W 551 keine weiteren hygienischen Maßnahmen zu treffen, wenn das Leitungsvolumen vom Trinkwassererwärmer bis zur Zapfstelle 3 Liter nicht übersteigt. Die hygienische Unbedenklichkeit kann jedoch nicht für alle Systeme mit diesen Eigenschaften belegt werden, da der Nachweis fehlt.

Durch diese Maßnahme erhöht sich insbesondere die Energieeffizienz des Systems, da Zirkulationsverluste vermieden werden. Um Komfortansprüchen immer noch zu genügen, bedürfte es in diesem Falle einem Bypass, um schnellstmöglich die gewünschte Trinkwarmwassertemperatur im Falle einer Entnahme zu erreichen.

Bestandsgebäude (Wohn- und Nichtwohngebäude): Elektrische Begleitheizung

Eine Alternative zu einer herkömmlichen Zirkulation ist der Einsatz einer elektrischen Begleitheizung (siehe Abb. 8-9). Unter der Verwendung dieser Maßnahme wird die TWI durch eine externe Beheizung auf dem gewünschten Temperaturniveau gehalten.

[10] Von engl. Instantaneous Heat Exchanger Unit (IHEU)

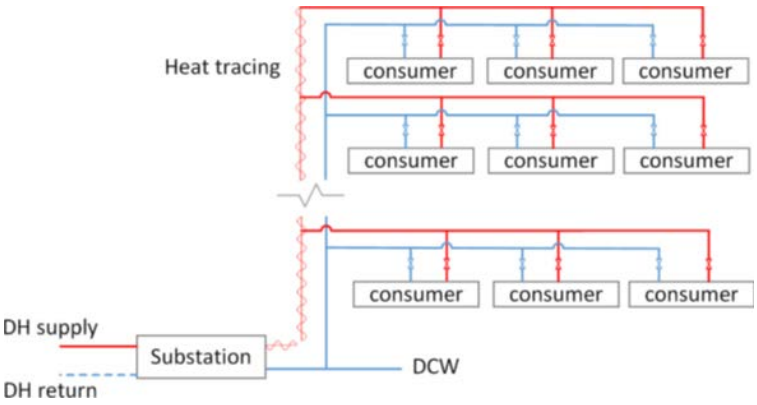


Abb. 8-9 Elektrische Begleitheizung in einem Trinkwarmwassersystem [Yang16a]

Zur Anwendung kommen hierbei zumeist elektrische Heizbänder, die unter der Rohrleitungsdämmung direkt auf dem Rohr angebracht werden. Die Wärmeverluste können um bis zu 50 % reduziert werden [Yang16b]. Da es sich bei dieser Maßnahme weniger um technische Lösung, sondern eher um eine Möglichkeit der thermischen Desinfektion handelt, können die Heizbänder auch für eine thermische Spülung eingesetzt werden. Für die Desinfektion erfolgt die Aufheizung des Leistungssystems für einen gewissen Zeitraum auf 60 °C oder höher. Begleitheizungen eignen sich für jeden Gebäudetyp und sind praxiserprobt.

<u>Nacherwärmung des Trinkwassers: Dezentraler, elektrisch beheizter Mikro-TWW-Speicher</u>

Für den Fall, dass die TWW-Komforttemperatur nicht erreicht wird, muss dieses nacherwärmt werden. Diese Art der Systemlösung bietet sich insbesondere für Nahwärmeversorgungslösungen mit sehr niedrigen Vorlauftemperaturen (bspw. Ultra Low Temperature District Heating [11]) an. Die Nacherwärmung kann auf unterschiedliche Weise erfolgen.

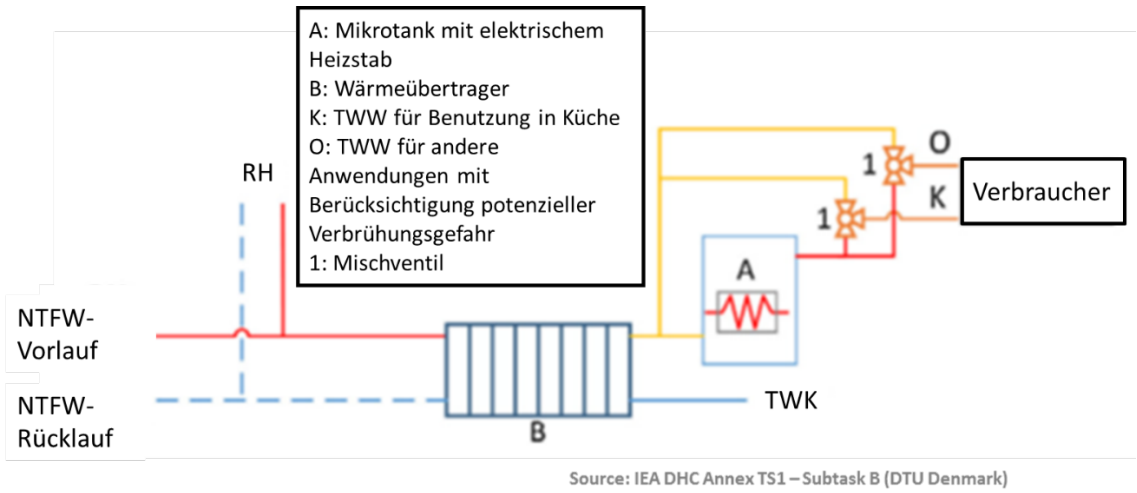


Abb. 8-10 Elektrisch beheizter Mikro-Trinkwarmwasserspeicher (übersetzt aus [Yang16a], [Schmidt17])

[11] Die Vorlauftemperatur bei dieser netzgebundenen Versorgungslösung ist in der Regel kleiner als 50 °C und wird in der internationalen Fachliteratur als “Ultra Low Temperature District Heating“ bezeichnet.

Eine Möglichkeit ist die Verwendung eines Mikro-Speichers auf Abnehmerseite. Im Falle der Untersuchung von [Yang16a] beträgt das Speichervolumen 60 L bei einer elektrischen Heizleistung von 2 kW. Dieser Speicher wird aus hygienischen Gründen auf 60 °C gehalten. Durch verschiedene Mischventile wird die Temperatur auf einen Komfortbereich von 40…45 °C abgesenkt und die Gefahr einer Verbrühung (siehe Abb. 8-10) unterbunden. Diese Variante hat den Vorteil gegenüber einfachen Durchlauferhitzern, dass im Falle des Vorhandenseins einer größeren Anzahl an Verbrauchern Stromspitzen geglättet werden, da die elektrische Anschlussleistung zum Laden der Speicher (z. B. 2 kW) deutlich kleiner ist als die eines elektrischen Durchlauferhitzers (z. B. 21 kW). Auf diese Weise sind keine aufwendigen zusätzlichen Arbeiten am Stromsystem notwendig. Elektrische-Mikrospeicher können in jedem Gebäudetyp eingesetzt werden.

Nacherwärmung des Trinkwassers: Dezentrale „Mikro-Wärmepumpe“

Alternativ zu einem elektrisch beheizten Mikro-TWW-Speicher können kleine Wärmepumpen (auch als Mikro-Wärmepumpe oder „Micro-Booster“ bezeichnet) zur Nacherwärmung eingesetzt werden (siehe Abb. 8-11). Diese Art der Nacherwärmung bietet sich insbesondere für Einfamilienhäuser an.

Unter der Verwendung einer „Mikro-Wärmepumpe“ wird das Wasser auf eine Temperatur von 50 °C erhitzt. Um häufiges Takten zu vermeiden wird für den optimalen Betrieb der Wärmepumpe ein kleiner Speicher eingesetzt. Im Vergleich zu einem elektrisch beheizten Mikro-TWW-Speicher, benötigen Wärmepumpen weniger elektrische Energie zur Bereitstellung der gleichen Wärmemenge.

Der Speicher wird aus hygienischen Gründen durch einen Wärmeübertrager (WÜ) von der Verbraucherseite getrennt. Da die Wärmeerzeugung zusätzlich durch einen Wärmeübertrager (HEX) vom Verbraucher getrennt ist, wird das System als „hygienisch unbedenklich“ eingestuft.

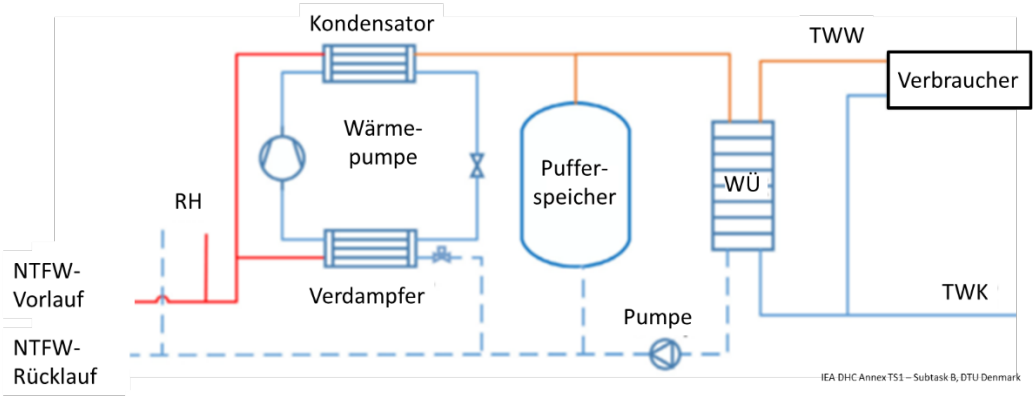


Abb. 8-11 Mikro-Wärmepumpe (Micro booster) zur Nacherwärmung von Trinkwarmwasser (übersetzt aus [Yang16a], [Schmidt17])

Wie eingangs erwähnt bieten sich Mikro-Wärmepumpen besonders für den Einsatz in Niedertemperatur- oder LowEx-Netzen an. Das Wasser des Vorlaufs wird dabei in zwei Ströme aufgeteilt. Der eine Teil des Stroms wird durch den Kondensator und der andere Teil des Stroms durch den Verdampfer geleitet. Aufgrund der geringen Temperaturdifferenzen, kann die Wärmepumpe einen hohen COP-Wert von 4…5 erreichen [Li16; Yang16b].

8.1.3.3 Trinkwasserdesinfektion

Wenn die Systemkonfiguration keine hygienisch einwandfreie Versorgung zulässt, können weitere Maßnahmen getroffen werden. Diese können in drei Kategorien unterteilt werden: thermische, physikalische und chemische Desinfektion.

Bei der thermischen Desinfektion werden Legionellen und weitere Keime durch hohe Temperaturen abgetötet. Die Effektivität der Maßnahme ist abhängig von der Dauer ihrer Anwendung und der Temperatur. Dabei gilt, dass höhere Temperaturen bei gleichbleibendem Desinfektionseffekt zu kürzeren Anwendungsdauern führen. So sind bei einem Temperaturniveau von 70 °C 10 Minuten ausreichend zur thermischen Desinfektion, wohingegen bei einem niedrigerem Temperaturniveau von 60 °C ca. 25 Minuten notwendig sind [Stout86]. Außerdem kann entweder nur der Tank erhitzt werden oder, im Falle einer vorhandenen Zirkulation, das gesamte System. Die World Health Organisation (WHO) empfiehlt hierzu das System für 30 Minuten auf 70 °C zu erwärmen. Dieser Vorgang soll in 72 Stunden mindestens zweimal durchgeführt werden.

Die chemische Desinfektion kann auf unterschiedlicher Weise geschehen, z. B. durch für Bakterien toxische Substanzen, Photokatalyse und elektrolytische Desinfektion. Dem Wasser beigefügte Stoffe wie z. B. Chlor oder Chlordioxid dringen in die Zellwände der Bakterien ein und töten den Organismus. Die kontinuierliche Chlorung des Trinkwassers ist ein seit langem bewährtes Verfahren, das vor allem in südlichen Ländern angewandt wird [Risse90]. Dies führt allerdings zu einem unangenehmen Geruch für Nutzer. Neben der kontinuierlichen Chlorierung kann eine intermittierende Hochchlorung vorgenommen werden. Im Zuge dieses Sterilisierungsverfahrens wird das System für eine kurze Dauer mit einer hohen Chlordosis versehen. Während dieser Zeit ist das System für den Gebrauch zu sperren, da die Konzentrationen für den normalen Gebrauch gesundheitsschädlich sind. Im Falle der Photokatalyse werden über einen Katalysator wie TiO_2 unter Einwirkung von Licht Oxidantien freigesetzt, die vorhandene Bakterien töten können. Im Wesentlichen sind hier OH, $\cdot O_2^-$ und H_2O_2 zu nennen. Einen ähnlichen Effekt macht sich die elektrolytische Desinfektion zunutze. Hier werden durch Elektrolyse natürliche Wasserinhaltsstoffe gespalten, deren Spaltprodukte desinfizierend wirken können. Die Kupfer-Silber-Ionisierung, auch „Tarne-Pure-Verfahren“ genannt, wird seit 1983 angewendet. Bei diesem Verfahren werden mittels elektronischer Steuerung Silber- und Kupfer-Ionen ins Wasser freigesetzt. Es kann nicht in allen Ländern angewendet werden. In Dänemark beispielsweise überschreitet die zur Desinfektion notwendigen Konzentrationen von Kupfer- und Silber-Ionen die gesetzlichen Höchstwerte [Yang16a]. In Deutschland werden diese Grenzwerte zwar eingehalten, jedoch dürfen keine Kupfer-Ionen ins Trinkwasser eingebracht werden [Fünfgeld02].

Die physikalische Desinfektion kann unterschieden werden in Filtersysteme und UV-Bestrahlung. Filter werden meist direkt an der Zapfstelle angebracht. In Abhängigkeit der korrekten Installation und Anwendung wird meist eine völlige Keimfreiheit erreicht. Es ist jedoch ein hoher Wartungsaufwand notwendig, da die Anlagen regelmäßig sterilisiert werden müssen. Die UV-Bestrahlung ist bereits seit 1959 ein zugelassenes Verfahren zur Trinkwasserdesinfektion [Kryschi88]. Die Strahler werden in die Zirkulationsleitung eingebaut, wodurch das zirkulierende Wasser mehrfach bestrahlt wird. Die Bestrahlung erfolgt bei einer Wellenlänge von 253,7 nm. Bestrahlte Organismen werden binnen weniger Sekunden abgetötet [Fünfgeld02].

Tab. 8-4 Verschiedene Maßnahmen zur Trinkwasserdesinfektion [Yang16a; WHO07; Fünfgeld02]

	Prinzip	**Wirksamkeit**	**Zusätze**	**Investitionskosten**	**Gesetzliche Einschränkungen**	**Vorteile**	**Nachteile**
Thermische Desinfektion (> 60 °C … 70 °C)	Desinfektion des Speichers	Kurzfristig	Keine	Gering	Keine Einschränkungen	+ Sichere Abtötung von Legionellen auch im Biofilm + Einfache Anwendung + Keine Zusatzstoffe, daher keine negative Beeinflussung der Wasserqualität zu erwarten	- Desinfiziert nicht das Gesamtsystem - Gefahr einer erneuten Kontamination nach kurzer Zeit - Bei Niedertemperaturversorgung eingeschränkt nutzbar
	Desinfektion des Gesamtsystems	Kurzfristig	Keine	Gering	Keine Einschränkungen		- Notwendiger Verbrühungsschutz - Keine Zerstörung des Biofilms - Gefahr einer erneuten Kontamination nach kurzer Zeit - Bei Niedertemperaturversorgung eingeschränkt nutzbar
Chemische Desinfektion	Chlorung	Längerfristig	Ja	Moderat	Konzentration muss mit den länderspezifischen Regularien vereinbar sein	+ Bewährtes Verfahren + Je nach Art der Chlorverbindung Zerstörung des Biofilms + Einfache Anwendung	- Geschmacks- und Geruchsbeeinträchtigung - Bei falscher Dosierung gesundheits- und umweltschädlich
	Photokatalyse	Längerfristig	Keine	Gering bis moderat	Keine Einschränkungen	+ Keine Zusatzstoffe, daher keine negative Beeinflussung der Wasserqualität zu erwarten	- Wenig bekanntes Verfahren - Nur kleiner Teils des Sonnenspektrums kann verwendet werden

	Elektrolytische Desinfektion	Kurzfristig	Keine	Hoch	Keine Einschränkungen	+ Keine Zusatzstoffe, daher keine negative Beeinflussung der Wasserqualität zu erwarten	- Stark abhängig von pH und Wasserhärte - Auswirkung auf Legionellen in Biofilm unbekannt
	Ionisation (Silber-Kupfer)	Längerfristig	Ja	Moderat	In manchen Ländern nicht anwendbar. Konzentration muss mit den länderspezifischen Regularien vereinbar sein[12]	+ Effektiv	- Hoher Monitoring Aufwand - kann Wasserverfärbungen verursachen - Stark abhängig von pH und Wasserhärte - Bei falscher Dosierung gesundheits- und umweltschädlich
Physikalische Desinfektion	Endständige Filtersysteme	Kurzfristig	Keine	Hoch	Keine Einschränkungen	+ Je nach Art der Chlorverbindung Zerstörung des Biofilms + Hohe Verlässlichkeit bei ordnungsgemäßem Betrieb	- Deckt nicht ganzes System ab - Gefahr erneuter Kontamination gegeben - Regelmäßige Wartung / Filterwechsel jeden Monat - Reduzierter Volumenstrom
	UV-Strahlung	Kurzfristig	Keine	Moderat	Keine Einschränkungen	+ Bewährtes Verfahren + Einfache Anwendung + Keine Zusatzstoffe, daher keine negative Beeinflussung der Wasserqualität zu erwarten	- Deckt nicht ganzes System ab - Keine Zerstörung des Biofilms

[12] In Abhängigkeit der Nutzungsart eines Gebäudes gilt in Deutschland und Frankreich beispielsweise eine Obergrenze von 1.000 KbE/L und in den Niederlanden und in Großbritannien gilt eine beispielsweise eine Obergrenze von 100 KbE/L.[4]

8.1.4 Zusammenfassung

Vor dem Hintergrund der gleichzeitigen Bewertung von Effizienz- und Hygieneaspekten erfolgte die Analyse des internationalen Standes der Technik sowie der Normung der Trinkwassererwärmung. Darüber hinaus wurden Systeme analysiert, welche für den Einsatz in Niedertemperatur-Versorgungsstrukturen geeignet erscheinen. Die Ergebnisse sind in enger Zusammenarbeit mit Partnern des Kooperationsprojektes „IEA DHC Annex TS1“ entstanden. Die hier ermittelten Ergebnisse und Daten dienen als Grundlage für die Arbeiten in Arbeitspaket VII.

Die Vorschriften zur Legionellenprävention in den untersuchten Ländern unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Anforderungen. Allen gemein ist jedoch die geforderte Systemtemperatur von 60 °C. In vielen weiteren Punkten wie Zapftemperatur, Zirkulationsleitungen, Speichertemperaturen gibt es Ähnlichkeiten, aber kein einheitliches Bild.

Traditionelle und häufig zu findende Trinkwarmwasserinstallationen sind das Speicherprinzip, das Speicherladeprinzip und das Durchflussprinzip. Jedes System weißt eigene Vor- und Nachteile auf. Die Untersuchungen im Rahmen des Annex TS1 verdeutlichen, dass eine Trinkwarmwasserbereitung auch mit effizienten Niedertemperaturversorgungstechnologien möglich ist. Folgende Technologien kommen für die Trinkwarmwasserbereitung auch bei niedrigen Systemvorlauftemperaturen in Frage:

- Dezentrale Frischwasserstationen
- Zentrale Wärmepumpe
- Dezentrale „Mikro-Wärmepumpe“ für TWW
- Dezentrale, elektrisch beheizte Mikro-TWW-Speicher

Eine Untersuchung bzgl. der hygienischen Unbedenklichkeit steht aus.

8.2 Analyse gängiger Normen und Verordnungen zum Nutzerverhalten in Wohn- und Nichtwohngebäuden (IEE)

Der Trinkwasserverbrauch lag im Jahr 2015 in Deutschland bei ca. 122 L/Pers [BDEW 2016a] (vgl. Abb. 8-12) dargestellt. Hiervon werden in Wohngebäuden durchschnittlich 35 L/Pers als Warmwasser abgerufen [DIN 12831; VDI 6002; Viessmann08]. Für Büro- und Verwaltungsbauten liegt der durchschnittliche Verbrauch anteilig bei ca. 20 bis 30 Litern pro Arbeitstag und Mitarbeiter [Destatis 2016]

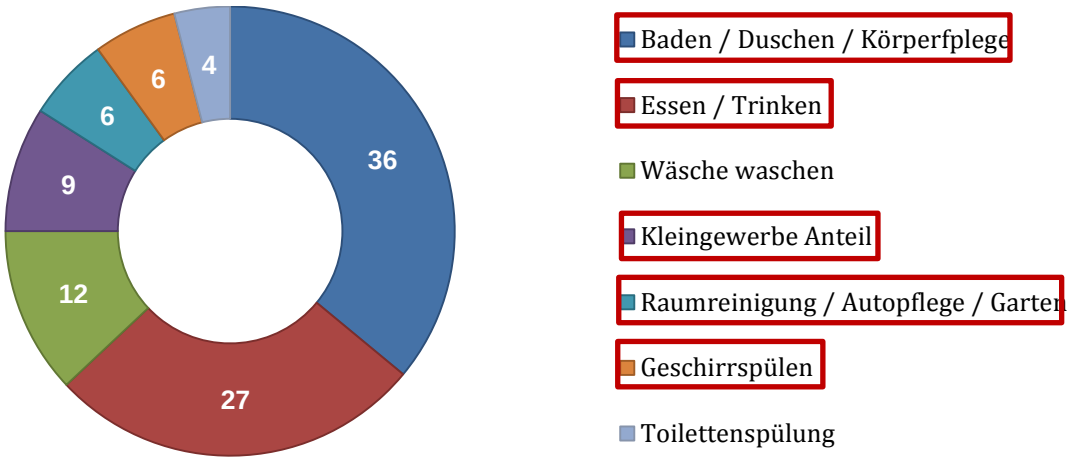


Abb. 8-12 Trinkwasserverwendung im Haushalt 2015 [BDEW 2016a] – die rot umrahmten Kategorien beinhalten Warmwasserbedarfe.

Für die Analyse von Methoden und Richtlinien zur Abbildung des Nutzerverhaltens erfolgt zunächst eine Analyse nationaler und internationaler Richtlinien, in den denen das Thema Nutzerverhalten vor dem Hintergrund der TWI thematisiert wird. Es zeigt sich, dass dieses Nutzerverhalten grob den 3 folgenden Kategorien zugeordnet werden kann:

- **Wohnnutzung** (Ein- und Mehrfamilienhäuser)
- **Wohnähnliche Nutzung** (Bspw. Hotels, Wohnheime oder Altenheime)[13]
- **Nichtwohn- und Gewerbegebäude:** (Bspw. Bürogebäude, Bibliotheken, Schulen ohne Duschen, etc.)

Die benötigten Warmwasser-Temperaturen dieser Kategorien unterscheiden sich. Während im häuslichen Wohnbereich, Schulen, Bürogebäuden usw. Temperaturen von 45 °C benötigt werden, liegen sie bei Anwendungen mit höheren hygienischen Ansprüchen wie in Krankenhäusern, Heimen und Gastronomiebetrieben bei 60 °C [ITG07]. Für den Trinkwasserbedarf in Gebäuden ist zum einen von Interesse, wie viel Trinkkaltwasser (TW) und Trinkwarmwasser (TWW) am Tag benötigt wird. Entsprechende Normen und Richtlinien finden sich in Tab. 8-5. Zum anderen interessiert die Verteilung des Bedarfs über einen Zeitraum. Normen und Richtlinien hierzu sind in Tab. 8-6 zusammengetragen.

Tab. 8-5 Normen und Richtlinien zum Wasserbedarf und –verbrauch in Gebäuden

Name	Beschreibung	TW	TWW	Einheit	Anwendung
DIN 4708	Hier wird der Warmwasserbedarf durch die „Leistungskennzahl“ N ausgedrückt. Im Wesentlichen dient sie der Berechnung von Wärmeerzeugern und Speichern größerer Wohngebäude (Mehrfamilienhäuser, Krankenhäuser, Altenheime, …)		X	kWh/Zapfstelle	Wohnnutzung wohnähnliche Nutzung
EnEV	In der EnEV wird lediglich ein flächenspezifischer Energiebedarfskennwert von 12,5 kWh/m² angegeben.		X	kWh/m²	Wohnnutzung wohnähnliche Nutzung Nichtwohngebäude
DIN V 18599-10	In diesem Blatt der DIN V 18599 werden für verschiedene größere Wohn- und Nichtwohngebäude Energiekennwerte für die Trinkwarmwasserbereitung gegeben.		X	kWh/(Pers*d) Wh/(m²*d)	Wohnnutzung, wohnähnliche Nutzung Nichtwohngebäude

[13] Die Gebäude zeichnen sich durch ähnliche Bedarfsprofile, wie Wohngebäude aus, es muss jedoch aufgrund einer höheren Personenbelegungsdichte auch mit einer höheren Gleichzeitigkeit gerechnet werden.

Name	Beschreibung	TW	TWW	Einheit	Anwendung
VDI 3807 Blatt 3	In dieser VDI Richtlinien sind viele verschiedene Wasserverbräuche für Wohn und Nichtwohngebäude erfasst.	X	X	Diverse	Wohnnutzung wohnähnliche Nutzung Nichtwohn-gebäude
DVGW W 410	Enthält Kennwerte und Einflussgrößen zur Ermittlung des Trinkwasserbedarfs für Wohn- und Nichtwohngebäude.	X		Diverse	Wohnnutzung wohnähnliche Nutzung Nichtwohnge-bäude
VDI 2067-12	Für verschiedene Zapfstellen und Zapfstellenvariationen werden Entnahmedauer, Zapfmenge und Häufigkeiten angegeben.		X	L/min min/Zapfstelle 1/d	Wohnnutzung wohnähnliche Nutzung
SIA 385/2:2015	Diese schweizerische Norm beschreibt das Vorgehen und die Berechnungsmethoden für die Planung von Warmwasseranlagen. Die Norm enthält sogenannte Ausstoßzeiten.				

Tab. 8-6 Normen und Richtlinien zu Wasserbedarfsprofilen in Gebäuden

Name	Beschreibung	TW	TWW	Einheit	Anwendung
VDI 4655	Diese VDI Richtlinie stellt verschiedene Profile für Ein- und Mehrfamilienhäuser bereit. Sie dient dem Vergleich von KWK-Anlagen, die Daten sind aber universell einsetzbar. Es wird in zehn Typenkategorien von Tagen unterschieden in Abhängigkeit von Übergangszeit / Sommer / Winter, Heiter / Bewölkt sowie Werktag / Sonntag. Die Daten basieren auf Messdaten von fünf Einfamilienhäusern und drei Mehrfamilienhäusern und liegen normiert als Minutenwerte vor.		X	kWh	Wohnnutzung

Name	Beschreibung	TW	TWW	Einheit	Anwendung
DIN EN 13203	Diese europäische Norm dient der einheitlichen Bewertung des Energieverbrauchs von Wärmeerzeugern im Haushalt. Für verschieden große Haushalte bzw. Anwendungsfälle werden Zapfprofile von XXS bis 4XL gegeben, anhand derer Geräte verglichen werden können. Daten aus DIN EN 15316-3-1 übernommen.		X	kWh/ (Zapfung ΔT)	Wohnnutzung wohnähnliche Nutzung
EU reference tapping cycles	Diese Zapfprofile basieren auf der DIN EN 13203 und sind weitestgehend mit ihnen identisch. Ein wesentlicher Unterschied ist die Anzahl von zehn Profilen anstatt der in den Normen sonst üblichen 3-5. Die „tapping cycles“ dienen der Vergabe von Energieklassen im Energy labeling System.		X	kWh/ (Zapfung ΔT)	Wohnnutzung, wohnähnliche Nutzung
DIN EN 16147	In dieser Norm werden Verfahren zur Prüfung und Angabe der Leistung von Wärmepumpen zur Trinkwarmwassererwärmung bereitgestellt. Die Zapfprofile sind weitestgehend identisch mit DIN EN 13203.		X	kWh/ (Zapfung ΔT)	Wohnnutzung wohnähnliche Nutzung
DIN EN 12831	Dient zur Bestimmung der Normheizlast. Enthält die Zapfprogramme 1 bis 3		X	kWh/ (Zapfung ΔT)	Wohnnutzung wohnähnliche Nutzung

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 TWW 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) im Sinne einer Erhaltung der 5-K-Regel, so liegen nur 21 % der Objekte in diesem Bereich. Es liegen 30 % der Objekte oberhalb von 6 K und 49 % unterhalb von 4 K.

8.3 Ergebnisse Felduntersuchungen zu Betriebsparameter und Nutzerverhalten, bauseitige Maßnahmen

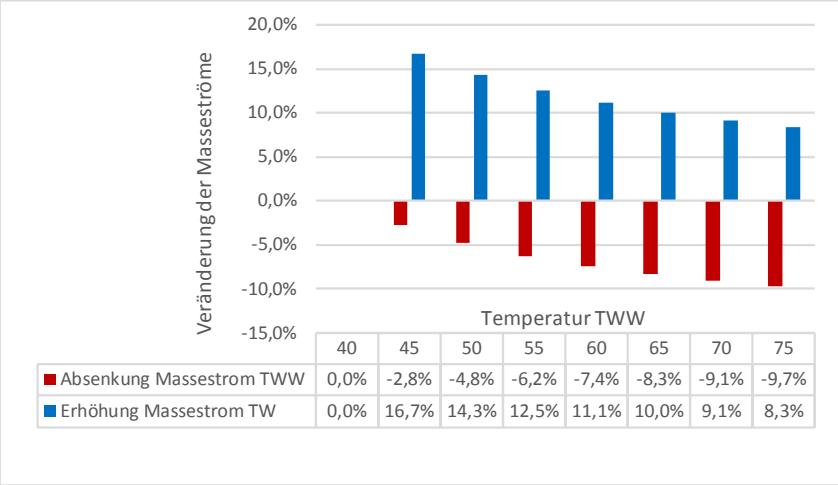
8.3.1 Datenbasis

Als Basis für die nachfolgend gezogenen Schlussfolgerungen dienen die Ergebnisse der thermohydraulischen Messungen in 80 Objekten mit Großanalagen nach DVGW W 551 im unmittelbaren Umfeld der Trinkwassererwärmungsanlagen. Nicht in allen Objekten konnte aufgrund der oft engen Platzverhältnisse bzw. des Rohrmaterials eine Volumenstrommessung vorgenommen werden (74 TWW-, 67 TWZ-Volumenstrom). Teilweise wird mit den Ergebnissen der Simulationsstudie in Abschnitt 6 überlagert.

8.3.2 Temperaturen

TWW: Die Temperaturen des TWW am Austritt Trinkwassererwärmer bewegen sich schon heute nur bedingt im Zielbereich der DVGW W 551 von ≥ 60 °C. Dabei werden in den thermohydraulisch untersuchten Feldobjekten sowohl deutlich niedrigere als auch deutlich höhere Temperaturen gemessen (Basis: Auswertung Medianwerte von 14-tägigen Messungen der 10 s-Mittelwerte). Wie Tab 4-3 verdeutlicht, ist vielmehr der breite Bereich von 50 °C bis teilweise über 65 °C in gewisser Gleichverteilung anzutreffen. Nachteile sind hierbei weniger den niedrigen Temperaturen zuzurechnen, vielmehr fällt die relative Dominanz der positiven Befunde oberhalb des technischen Maßnahmewertes bei Objekten mit $\vartheta_{TWW,TWE,aus}$ > 61 °C auf.

TWK: Das am Hauseingang (HEL – meist direkt hinter dem Wasserzähler) ankommende Trinkwasser (kalt) ist im Jahresdurchschnitt bedeutend wärmer als die nach Regelwerk festgelegten 10 °C. Der Median der in den Feldobjekten gemessenen Temperaturen der HEL 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 Technikums-Versuchsstand sind es im Mittel 16,8 °C. Die Wirkungen sind hier sicher nur bedingt auf die Auslegung des Trinkwassererwärmers zu beziehen, wohl aber auf die Dimensionierung der Trinkwasserverteilung, da sich die Anteile des dem kalten Trinkwasser beizumischender Volumenströme TWW bei sonst gleichem Entnahmeverhalten und gleicher TWW-Temperatur verringern.



	40	45	50	55	60	65	70	75
Absenkung Massestrom TWW	0,0%	-2,8%	-4,8%	-6,2%	-7,4%	-8,3%	-9,1%	-9,7%
Erhöhung Massestrom TW	0,0%	16,7%	14,3%	12,5%	11,1%	10,0%	9,1%	8,3%

Abb. 8-13 Veränderung der Masseströme bei Anhebung der TWK-Temperaturen von 10 °C auf 15 °C für verschiedene Temperaturen TWW (40 °C Entnahmetemperatur)

Auffällig ist die teilweise extrem hohe TWK-Temperatur am Eintritt in den TWE (Abb. 8-14). Da sich die Temperaturen gerade in den Entnahmepausen in den Nachtzeiten deutlich über die Temperatur in den Aufstellräumen der Trinkwassererwärmung einstellen, kommen hier nur konvektive Effekte für die thermische Rückkopplung vom Trinkwarmwasser-Erwärmer in die TWK-Seite der TWI in Frage. Teilweise pflanzt sich dies bis zum Hausanschluss fort, sodass bereits vor Eintritt in die Schacht-Installation eine messbare Aufwärmung stattfindet. Dieser, im Sinne der Trinkwasserhygiene negative Effekt muss bereits in der Planungsphase mehr als bisher Beachtung finden; heißt: Der konsequente Einbau von sogenannten Konvektions“bremsen“ – vorzugsweise schon durch eine geeignete Leitungsführung, aber auch durch entsprechende Stutzenausbildung etc. – ist zwingend vorzusehen sowie bei Bau, Inbetriebnahme und Wartung zu kontrollieren. Hierzu können einfache Messungen der Temperaturen mit mobilen PT-100-Messgeräten mit Messspitze Aufschluss geben.

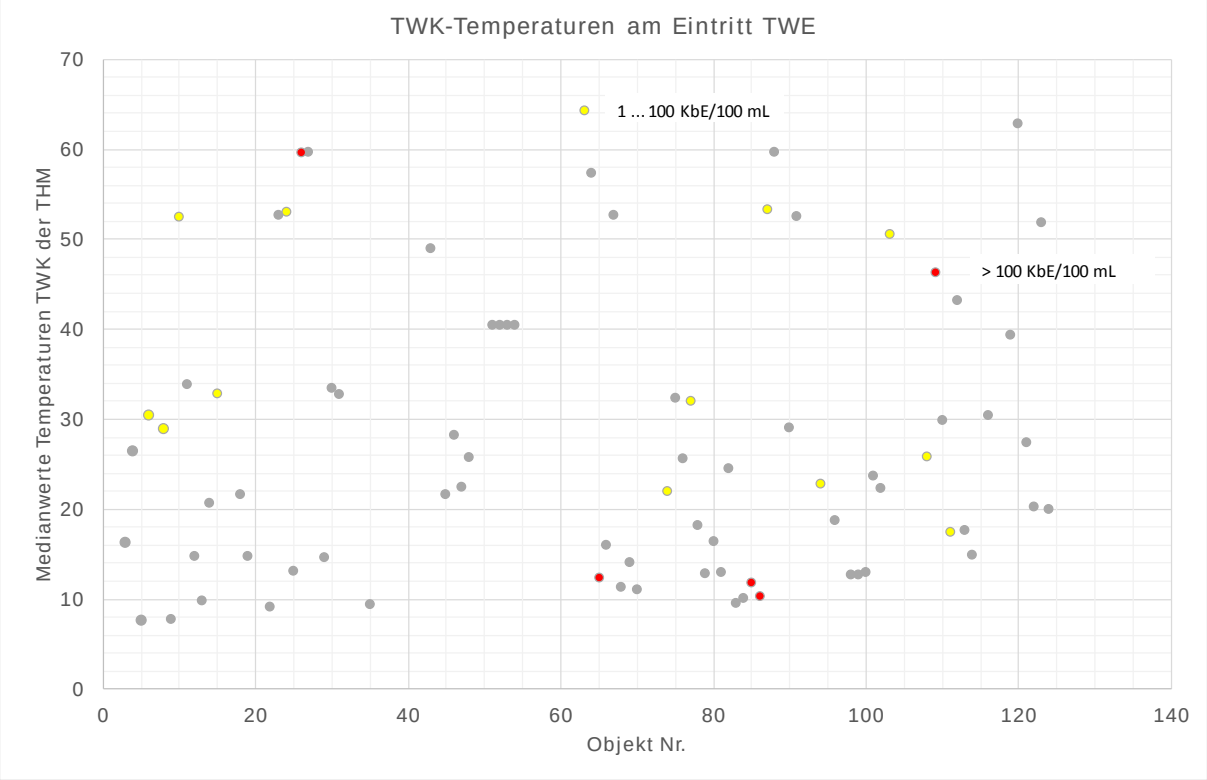


Abb. 8-14 Medianwerte der Temperatur am Eintritt TWK in den TWE sowie Überlagerung mit Befunden

TWZ: Die Zirkulationstemperatur am Eintritt der Zirkulation in den TWE stellt sich je nach Auslegung und Betriebsweise der objektkonkreten TWI ein. Wie Abb. 8-15 verdeutlicht, ist hier eine große Bandbereite anzutreffen, wobei die Überlagerung mit den Ergebnissen der Legionellenuntersuchungen (kulturell) zeigt, kein bevorzugtes Temperaturniveau herausgearbeitet werden kann, ab dem es keine Kontaminationen im Objekt gibt. Dies ist insofern auch nicht verwunderlich, da diese Temperaturen nur eine objektweise Mittelwertbildung darstellen und die lokalen Wirkungen in den verschiedenen Strängen nicht abbilden kann.

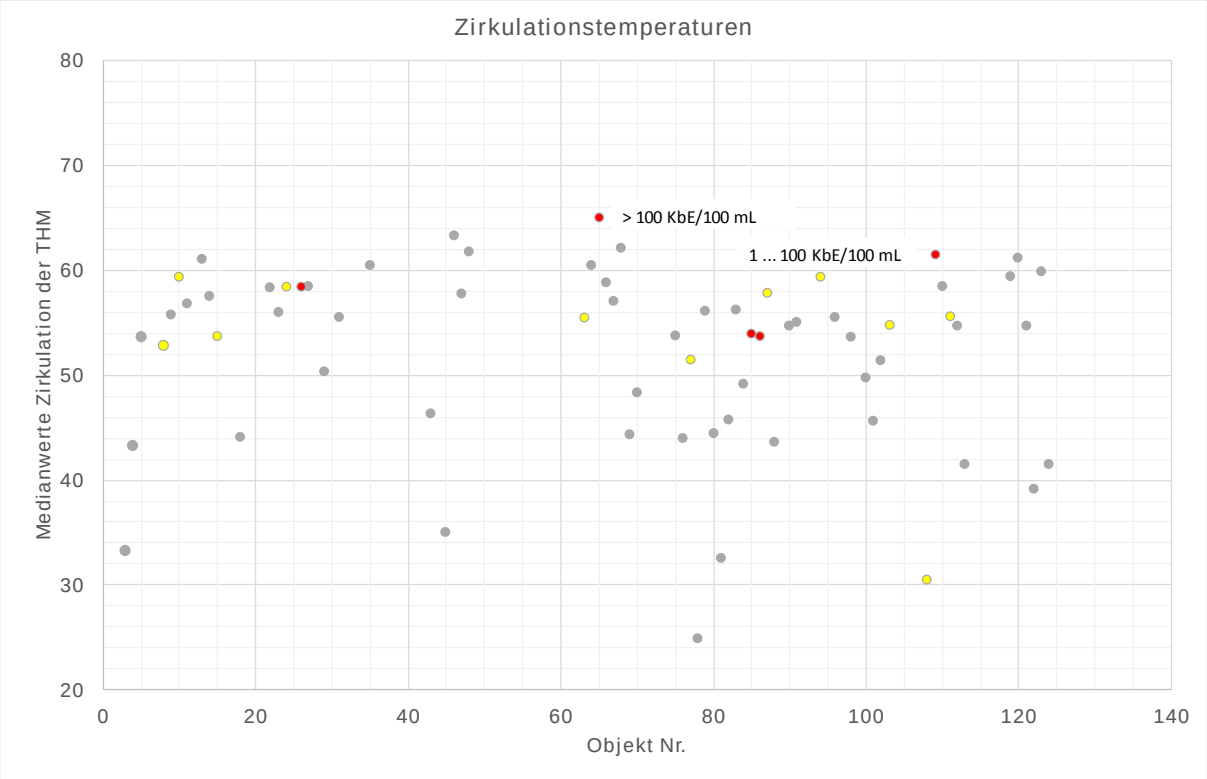


Abb. 8-15 Medianwerte der Temperatur am Eintritt der Zirkulation in den TWE sowie Überlagerung mit Befunden

5-K-Regel

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 TWW 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) im Sinne einer Erhaltung der 5-K-Regel, so liegen nur 21 % der Objekte in diesem Bereich. Es liegen 30 % der Objekte oberhalb von 6 K und 49 % unterhalb von 4 K.

8.3.3 Volumen- und Wärmeströme

TWW-Volumenströme/tägliche Entnahme

Eine vergleichende Darstellung der Trinkwarmwasser-Volumenströme am Austritt der TWE bei Betrachtung der Zeiten der Entnahme ergibt ein aussagekräftiges Bild, wenn man Tageswerte des Verbrauchs aufsummiert und auf die Anzahl der Wohneinheiten im Objekt bezogene Werte darstellt. Es wird deutlich, dass die Entnahmen sich eher im Bereich unter 100 L/(WE·d) bewegen und damit tendenziell leicht oberhalb des EU r.t.c. Typ 1 ansiedeln. Eine Abhängigkeit der kulturellen Befunde *Legionalla* spp. von diesem Parameter kann nicht abgeleitet werden. (Abb. 8-16)

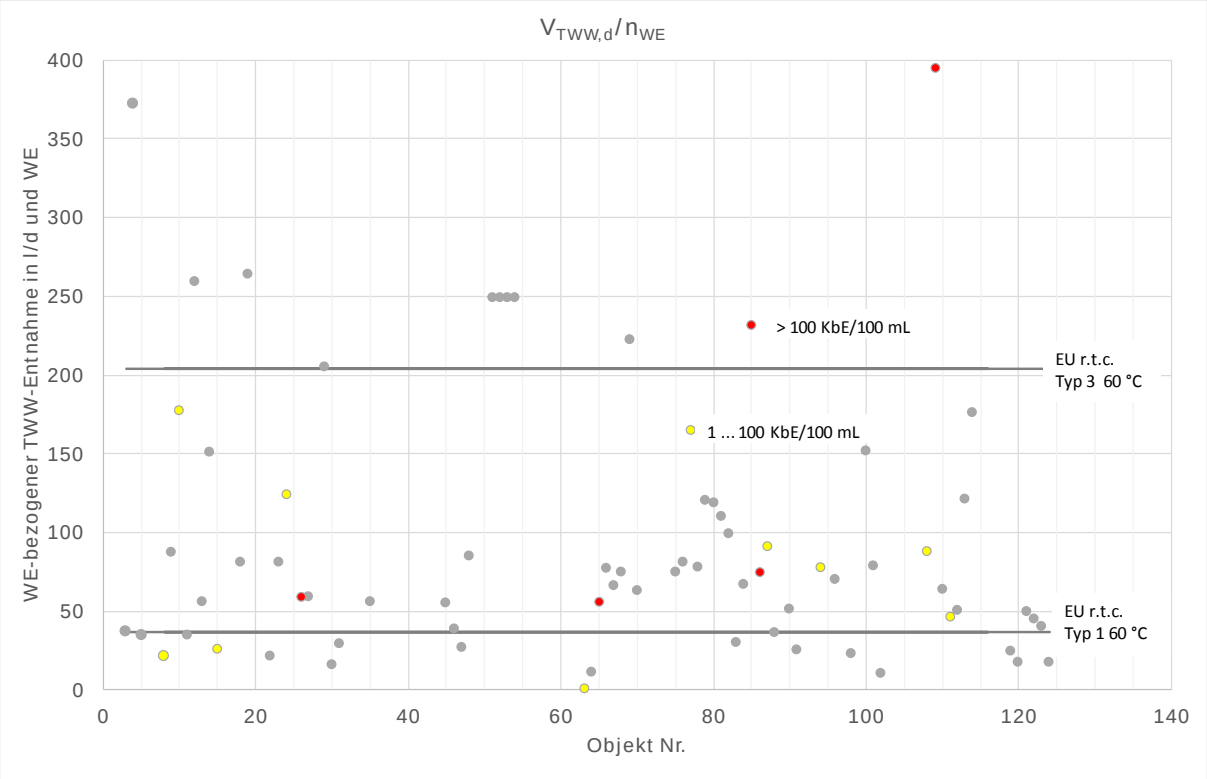


Abb. 8-16 Wohneinheitenbezogene, tägliche TWW-Entnahmen sowie Überlagerung mit Befunden und den Werten der EU r.t.c (Typ 1 – Minimale, Typ 3 maximale Entnahme)

Zirkulationsvolumen-/wärmeströme

In 67 Objekten konnte der Zirkulationsvolumenstrom gemessen werden. Über die Zeiten der Nichtentnahme von TWW sind Medianwerte der „reinen“ Zirkulation für die 14-Tage-Auswerteperiode berechnet worden. Stellt man diese Werte als wohneinheitenspezifischen Zirkulationsvolumenstrom (Quotient aus Medianwert und Anzahl Wohneinheiten des Objektes) dar, so ergibt sich das in Abb. 8-16 dargestellte Bild. In 19 Objekten wird mit Werten von < 0,1 L/(min·WE) gearbeitet, 34 Objekte sind dem Bereich 0,1 … 1 L/(min·WE) zugeordnet. Ein Zusammenhang zu den kulturellen Legionellen-Befunden konnte auch hier nicht hergestellt werden.

Auf der Basis der mittleren WE-bezogenen Volumenstrom-Zirkulation lässt sich mit den Temperaturdifferenzen von Medianwert des TWW-Austritts und des TWZ-Eintritts – wiederum alle Werte in den Zeiten der Nichtentnahme von Trinkwarmwasser – ein wohneinheitenbezogener Zirkulationswärmestrom berechnen. Die Darstellung in Abb. 8-18 zeigt, dass sich die Objekte vorwiegend im Wertebereich bis 220 W/WE befinden. Ein signifikanter Bezug zwischen diesem Parameter und den kulturellen Befunden *Legionella* spp. ist auch hier nicht zu erkennen.

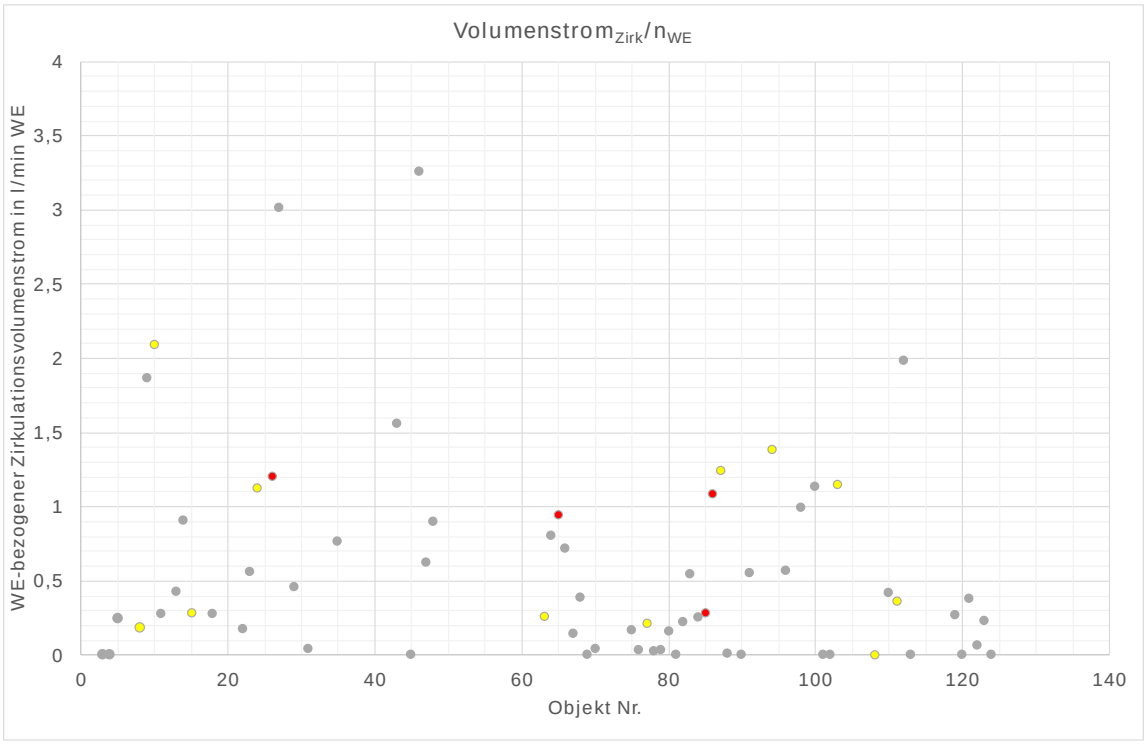


Abb. 8-17 Wohneinheitenbezogener Zirkulationsvolumenstrom sowie Überlagerung mit kulturellen Befunden *Legionella* spp. (67 Feldobjekte, Basis Medianwerte in Zeiten der Nichtentnahme von TWW)

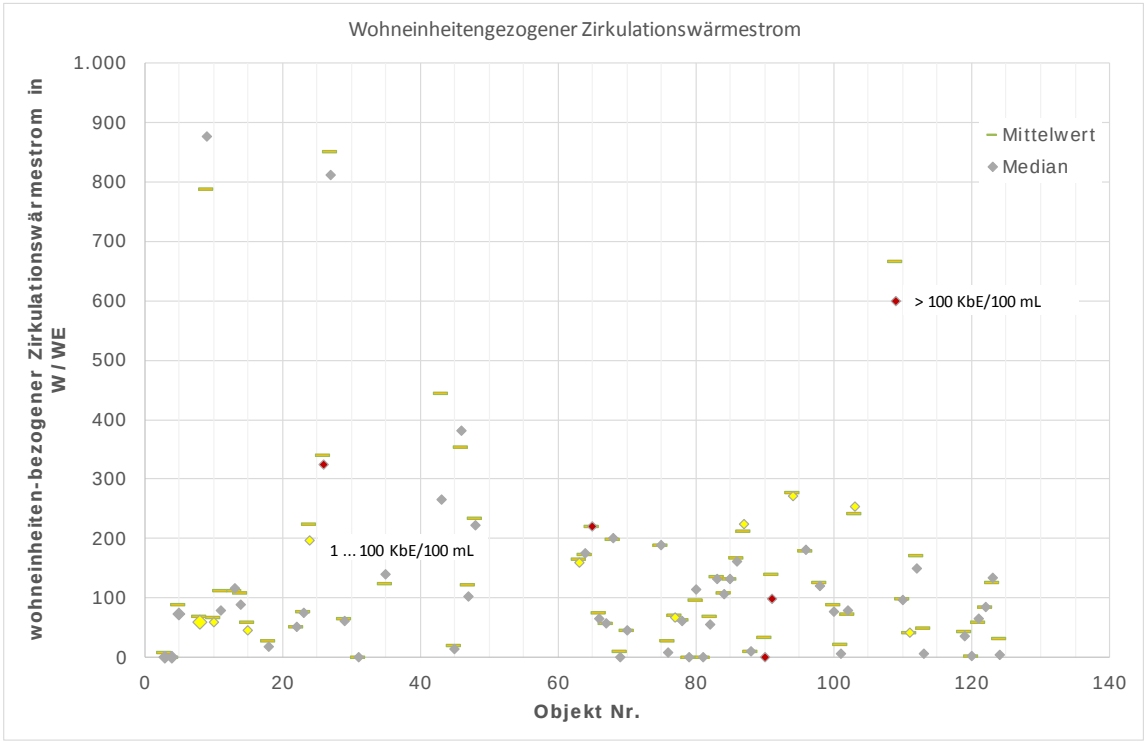


Abb. 8-18 Wohneinheitenbezogener Zirkulationswärmestrom sowie Überlagerung mit kulturellen Befunden *Legionella* spp. (67 Feldobjekte, Basis Medianwerte in Zeiten der Nichtentnahme von TWW); exemplarische Darstellung der Berechnung auf Basis von Mittelwerten ohne Überlagerung mit Befunden

8.3.4 Gleichzeitigkeit der TWW-Entnahme

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.

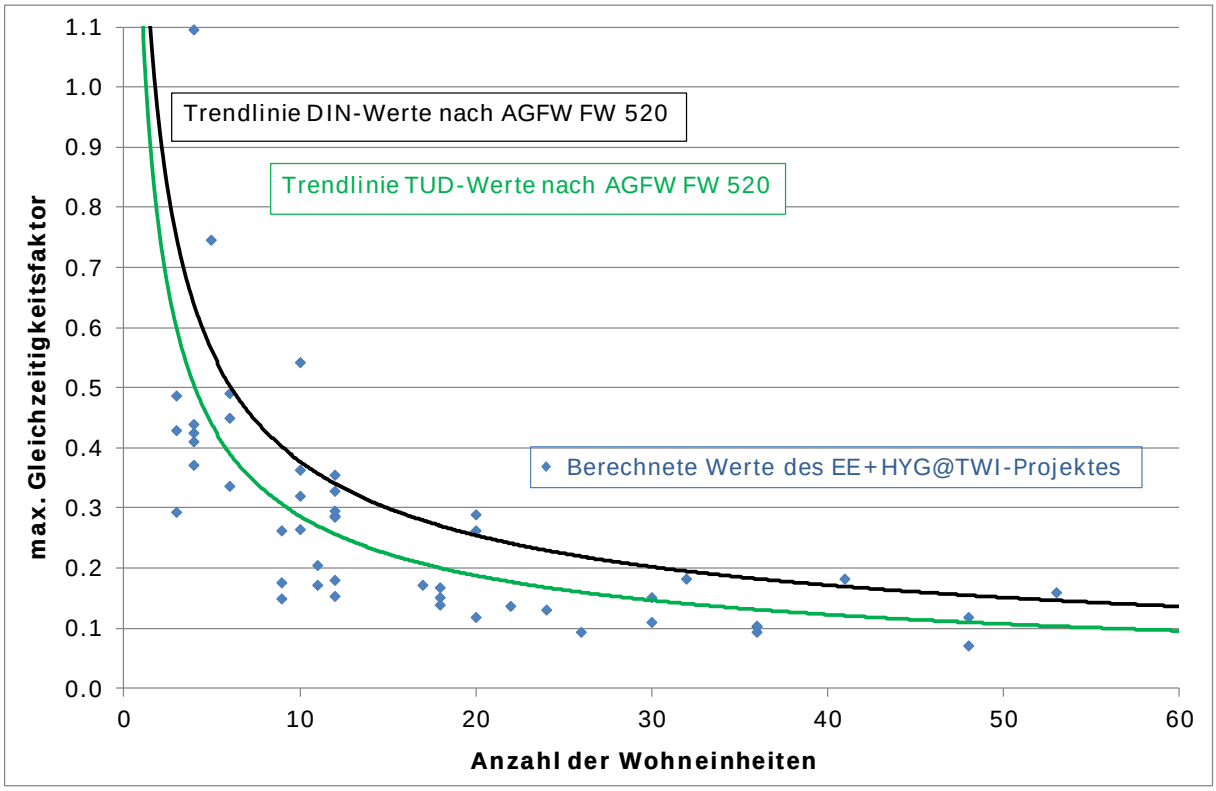


Abb. 8-19 Spitzenentnahmen Trinkwarmwasser der Mehrfamilienhäuser bei zentraler TWE (Auswertung 14-tägige Messungen von 10-Sekunden-Mittelwerten) im Vergleich zu den Daten nach AGFW FW 520

Abb. 8-19 zeigt, dass bei Auswertung der thermohydraulischen Messungen in 74 Mehrfamilienhäusern und größeren Objekten mit wohnähnlicher Nutzung (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. Insofern müssen sich die Ausschüsse, der sich derzeit in Überarbeitung befindlichen Richtlinien (z. B. DIN EN 806 bzw. DIN 1988) dazu einen Standpunkt bilden und Vorgaben für eine zielgerichtete weitere Sichtung der Messdaten ausarbeiten.

8.3.5 Bauseitige Ausführung und Betriebsregime 70 °C

Temperatur TWK - Einfluss getrennter Führung TWW/TWK

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 Feldobjekte[14].

Die Ergebnisse der Simulationsstudie in Tab. 6-17 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 °C bzw. 45 °C dominiert sogar der Wärmeverlust an den Raum (24 °C), sodass theoretisch eine Temperaturabsenkung um 0,3 K gegenüber dem Hauseintritt (25 °C) erreicht werden würde.

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.

TWK-Temperaturen und TWW-Temperaturregime 70 °C

Eine eventuell im Betriebsregime integrierte regelmäßige Temperaturanhebung (z. B. jede Nacht oder wöchentlich für eine Stunde auf 70 °C ohne mikrobiologischen Befund - oft fälschlicher Weise als „Legionellen-Schutzschaltung“ oder „vorbeugende thermische Desinfektion“ bezeichnet) wirkt gleichsinnig zu den zuvor 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 Stichleitungen 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 (siehe 6.6). Entnahmen des Nutzers in diesen Zeiten bergen überdies eine Verbrühungsgefahr. Das Entfallen dieser „vorbeugenden“, in keinem trinkwasserhygienischen Regelwerk enthaltenen, Temperaturanhebung 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. Abschnitt 7.4). Generell wird nach derartigen Spülprozessen empfohlen, eine Spülung der TWK-Seite vorzunehmen um das unzulässig hoch erwärmte TWK auszustoßen.

[14] 6 Objekte mit Steigleitung getrennt, 1 Objekt mit Leitung im Keller getrennt, 21 Objekte mit beidem getrennt

8.4 Schlussfolgerungen Nutzerverhalten und Herausarbeitung von Thesen

An dieser Stelle seien die wesentlichen Erkenntnisse zusammengefasst, die im Rahmen des Gesamtvorhabens zum Nutzerverhalten gezogen werden konnten und bei künftigen Überarbeitungen von Normenwerken zur Auslegung der TWI und deren Komponenten Berücksichtigung finden sollten. Hierbei ist jedoch klar zu differenzieren zwischen der reinen Auslegung der Komponenten und den – gerade für trinkwasserhygienische Belange entscheidenden – Einfluss auf die Volumenströme im durchschnittlichen Entnahmefall auf die Systemauslegung. Generell wird es notwendig sein, einige Auswertungen dafür zielgerichtet unter den dann im Prozess der Überarbeitung konsensfähigen Randbedingungen zu schärfen bzw. zu vertiefen.

Weitere Erkenntnisse zu den Objekten 089 bis 091, die auch einen Zusammenhang zwischen zentralen und wohneinheitenkonkreten Werten erlauben, sind erst mit Abschluss des Projektes IMoSUB „Altes Zöllnerviertel Weimar“ Integriertes Monitoring: Versorgung – Nutzer – Bauteil“ (BMWI-FKZ: 03ET1287A) ab Mitte 2018 verfügbar.

Folgende Thesen konnten abgeleitet werden.

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)*

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)

Temperatur des Trinkwassers (kalt) am Eintritt Trinkwassererwärmer

In vielen Feldobjekten ist eine signifikante thermische Rückwirkung des Trinkwassererwärmers selbst auf die Installation des kalten Trinkwassers zu beobachten und muss perspektivisch durch geeignete Maßnahmen auf ein Minimum begrenzt werden. *(Felduntersuchungen)*

5-K-Regel Zirkulation

In den Feldobjekten wird die 5-K-Regel schon heute nicht eingehalten. Ein direkter Einfluss auf den kulturellen Befund *Legionella* spp. ist nicht ableitbar. *(Felduntersuchungen)*

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 Vorlauftemperatur des Trinkwarmwassers. Architekten, Planer und Bauherren müssen die Ausführung einer ausreichend gedämmten Trennwand der TWK-Installation zur TWW-Installation und anderen warmge-

henden Leitungen (Heizung, Solarthermie etc.) realisieren bzw. die räumlich getrennte Führung des TWK umsetzen.

(Simulation, Technikumsversuche, Felduntersuchungen)

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)

9 Wirkungen der Betriebsweise der TWI auf das 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 simulationsunterstützen 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.

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.

9.1 Auslegung und Modellierung des Gesamtsystems

Die Modellierung des EFH und des MFH sowie der zugehörigen Anlagentechnik wurde mit der Simulationssoftware TRNSYS 18 [TRNSYS17] (Transient Systems Simulation) realisiert. Dieses Programm bietet die Möglichkeit Energieversorgungssysteme zu modellieren und zu simulieren. Komponenten und Bauteile, wie zum Beispiel Rohrleitungen, Speicher oder Erzeugereinheiten, werden durch sogenannte „Types“ abgebildet, die über eine grafische Benutzeroberfläche parametrisiert und miteinander verknüpft werden können. Die Erstellung und Aufteilung von thermischen Zonen in einem Gebäudemodell erfolgt in dem untergeordneten Programm TRNBuild [TRNBUILD17], welches durch einen eigenen Type (Type 56) in dem Gesamtmodell implementiert ist. Während der Simulation werden alle variablen Größen im Modell zu jedem Zeitschritt neu berechnet und relevante Größen werden dabei ausgegeben.

Die Simulation des EFH und des MFH erfolgt getrennt durch zwei unterschiedliche Modelle, da sich die Versorgungstechnik dieser Gebäudetypen, insbesondere die Verteilung signifikant voneinander unterscheidet. Alle weiteren Parameter der Untersuchungsmatrix (vgl. Kapitel 9.1.3) sind in die Modelle integriert und können variantenabhängig aktiviert oder deaktiviert werden. Im Folgenden wird das Modell anhand der einzelnen Komponenten hinsichtlich ihrer Auslegungskriterien beschrieben.

9.1.1 Randbedingungen der Gebäudesimulation

Als Einflussfaktoren des Gebäudes werden hier die Parameter beschrieben, die direkt mit dem Gebäude, welches aus Gebäudehülle und thermischen Zonen besteht, interagieren. Konkret umfasst dies die Wetterdaten, das Nutzerverhalten sowie die geometrischen und bauphysikalischen Eigenschaften des Gebäudes. Diese Faktoren haben gemein, dass sie einen signifikanten Einfluss auf den Nutzenergiebedarf eines Gebäudes haben.

9.1.1.1 Wetterdaten

Für diese Simulation wurden die Wetterdaten der Software Meteonorm [Meteotest] für den Standort Potsdam genutzt. Die Daten werden in TRNSYS durch den Type 15-6 eingelesen und an Komponenten, die durch die Witterung beeinflusst werden, wie beispiels-

weise das Gebäudemodell, Solarkollektor oder Wärmepumpe, weiteregegeben. Den folgenden Abbildungen ist der Verlauf der Strahlungs- und Temperaturwerte zu entnehmen.

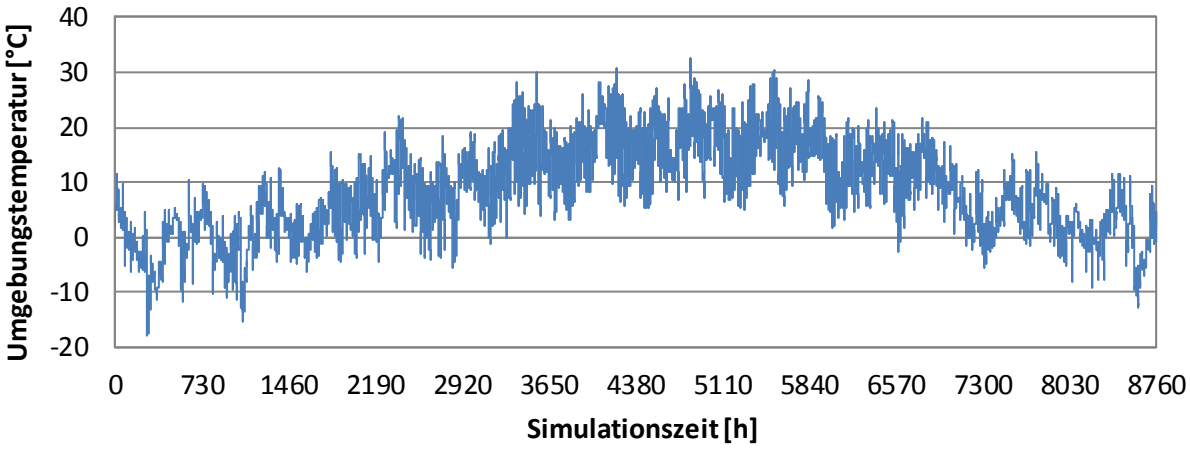


Abb. 9-1 Verlauf der Außenlufttemperatur über ein Jahr

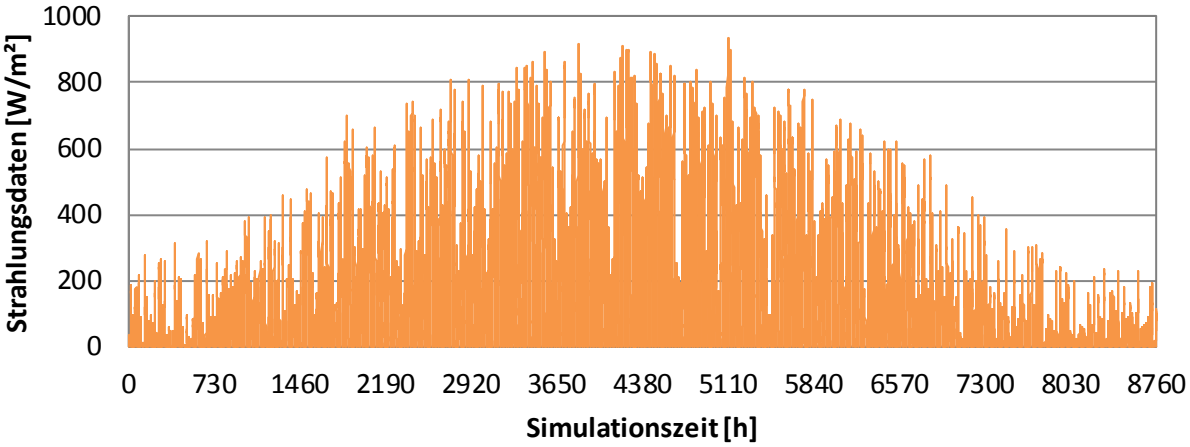


Abb. 9-2 Verlauf der solaren Einstrahlung über ein Jahr

9.1.1.2 Nutzerverhalten

Das Nutzerverhalten beschreibt den nutzerspezifischen Energiebedarf in Abhängigkeit von Nutzerprofilen. Eine Variation des Nutzerverhaltens wird in diesem Modell durch die Abbildung verschiedener Nutzertypen realisiert, die sich wiederum in der Luftwechselrate, den internen Gewinnen und dem Zapfprofil für TWW und TWK unterscheiden. Zur Auslegung dieser Parameter werden in Anlehnung an die Verbrauchertypen der „EU reference tapping cycles“ drei unterschiedliche Nutzertypen angenommen. Im MFH entsprechen diese Typen der Belegung einer Wohneinheit (WE) durch 2 Personen (niedriger Verbrauch), 4 Personen (mittlerer Verbrauch) oder 6 Personen (hoher Verbrauch) [EU Comission 2002]. Die Aufteilung dieser Nutzertypen auf die WE erfolgt zufällig, sodass in WE 2 und WE 6 ein niedriger, in WE 1 und WE 4 ein mittlerer und in WE 3 und WE 5 ein hoher Verbrauch vorliegt. Die Positionierung der WE im MFH ist Abb. 9-3 zu entnehmen. Das EFH, welches in Abb. 9-4 dargestellt wird, wird mit einer Belegung von 4 Personen (mittlerer Verbrauch) abgebildet. Es ist hierbei anzumerken, dass der bundesdeutsche Durchschnitt für Einfamilienhäuser bei einer Haushaltsgröße von 2 Personen liegt, eine Belegung mit 4 Personen jedoch gewählt wurde, da es sich um einen gängigen Literaturwert handelt (VDI 3807).

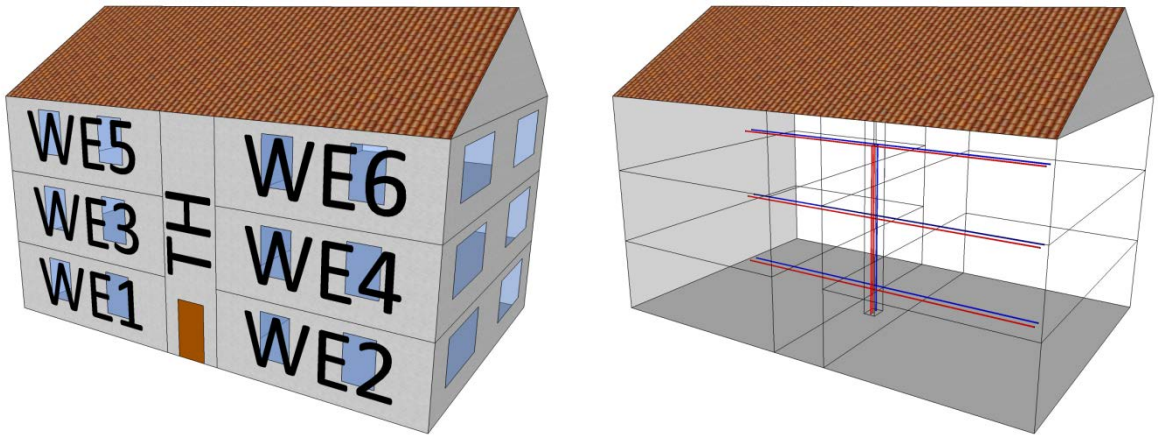


Abb. 9-3 Darstellung des abgebildeten MFH-Modells mit der Positionierung der Zonen (links) und der Aufteilung der TWV-Abschnitte (rechts)

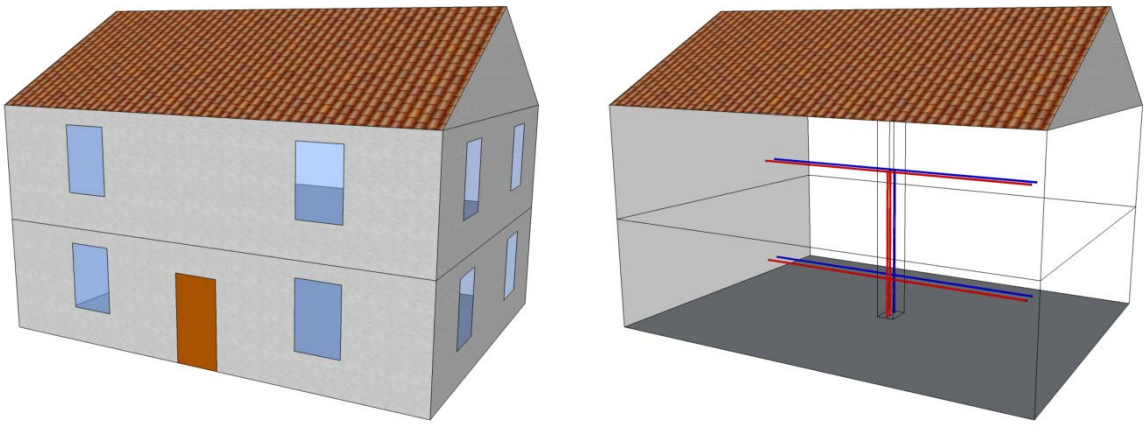


Abb. 9-4 Darstellung des abgebildeten EFH-Modells mit der Darstellung der Wohngeschosse (links) und der Aufteilung der TWV-Abschnitte (rechts)

In Abhängigkeit dieser Nutzertypen und der Baualtersklasse der Gebäude hat die Luftwechselrate einen wesentlichen Einfluss auf den Energiebedarf des Systems. Sie beschreibt die Austauschrate des gesamten Luftvolumens eines Raums durch Umgebungsluft pro Stunde. Die Luftwechselrate n_{ges} ergibt sich dabei aus der Summe von nutzerbedingter Fensterlüftung n_{FL} und Infiltration n_{Inf}, welche durch die Undichtigkeit der Gebäudehülle entsteht und somit vom Baualter und dem Sanierungsgrad abhängig ist.

$$n_{ges} = n_{Inf} + n_{FL} \tag{9.1}$$

Der Infiltrationsluftwechsel wird über das in DIN V 18599-2 beschriebene Tabellenverfahren bestimmt . Die Luftwechselraten infolge von Fensterlüftung basieren auf Berechnung und Angaben aus [Loga03]. Eine Übersicht dazu ist in Tab. 9-1 dargestellt.

Tab. 9-1 Luftwechselraten in Abhängigkeit der Baualtersklasse und des Nutzertyps [Kallert18; DIN V 18599-2; Loga03]

Baualter	Luftwechsel-rate	Einheit	Nutzertyp		
			2 Personen	4 Personen	6 Personen
<1978	n_{Inf}	1/h	0,56	0,56	0,56
	n_{FL}	1/h	0,3	0,45	0,6
	n_{ges}	1/h	0,86	1,01	1,16
1978-1994	n_{Inf}	1/h	0,42	0,42	0,42
	n_{FL}	1/h	0,3	0,45	0,6
	n_{ges}	1/h	0,72	0,87	1,02
KfW70	n_{Inf}	1/h	0,14	0,14	0,14
	n_{FL}	1/h	0,3	0,45	0,6
	n_{ges}	1/h	0,44	0,59	0,74

Weiterhin wird durch die beschriebenen Nutzertypen die Entnahme von Trinkwarmwasser und Trinkwasser kalt bestimmt. Für die Darstellung der Entnahme von TWW und TWK ist es dabei notwendig, Zapfprofile vorzugeben, die das Entnahmevolumen des Trinkwassers pro Zeitschritt und Wohneinheit angeben. Zur Abbildung der TWW-Entnahmen werden die „EU reference tapping cycles“ verwendet, die von der Europäischen Kommission zur Vereinheitlichung von Messstandards für TWI erzeugt und veröffentlicht wurden [EU Comission 2002]. Die tapping cycles unterscheiden sich in ihrer Ausprägung hinsichtlich der Entnahmemenge sowie –häufigkeit und werden in einen niedrigen (2 Personen), mittleren (4 Personen) und hohen Verbrauch (6 Personen) unterteilt, welcher dem jeweiligen Nutzertyp entspricht. Für die Abbildung der TWK-Entnahmevorgänge werden Zapfprofile aus dem Arbeitsblatt W 510 des DVGW-Regelwerks verwendet. Diese Profile werden ebenfalls in verschiedenen Intensitäten bereitgestellt und können somit den drei Nutzertypen zugeordnet werden. Die Zapfprofile geben dabei in einer minutengenauen zeitlichen Auflösung die Entnahmen eines Beispieltages an, der sich stets wiederholt. Die zeitliche Auflösung der Entnahmevorgänge bestimmt darüber hinaus den Zeitschritt, indem die Simulation abläuft. Ein Simulationszeitschritt von fünf Minuten erweist sich dabei als geeignet, um sowohl die Entnahmevorgänge und alle zugehörigen Effekte detailliert abzubilden als auch eine vertretbare Rechenzeit beizubehalten. In Abb. 9-5 werden die TWW- und TWK-Zapfprofile aller Nutzertypen dargestellt, indem das Zapfvolumen eines Entnahmevorgangs über die Simulationszeit aufgetragen wird.

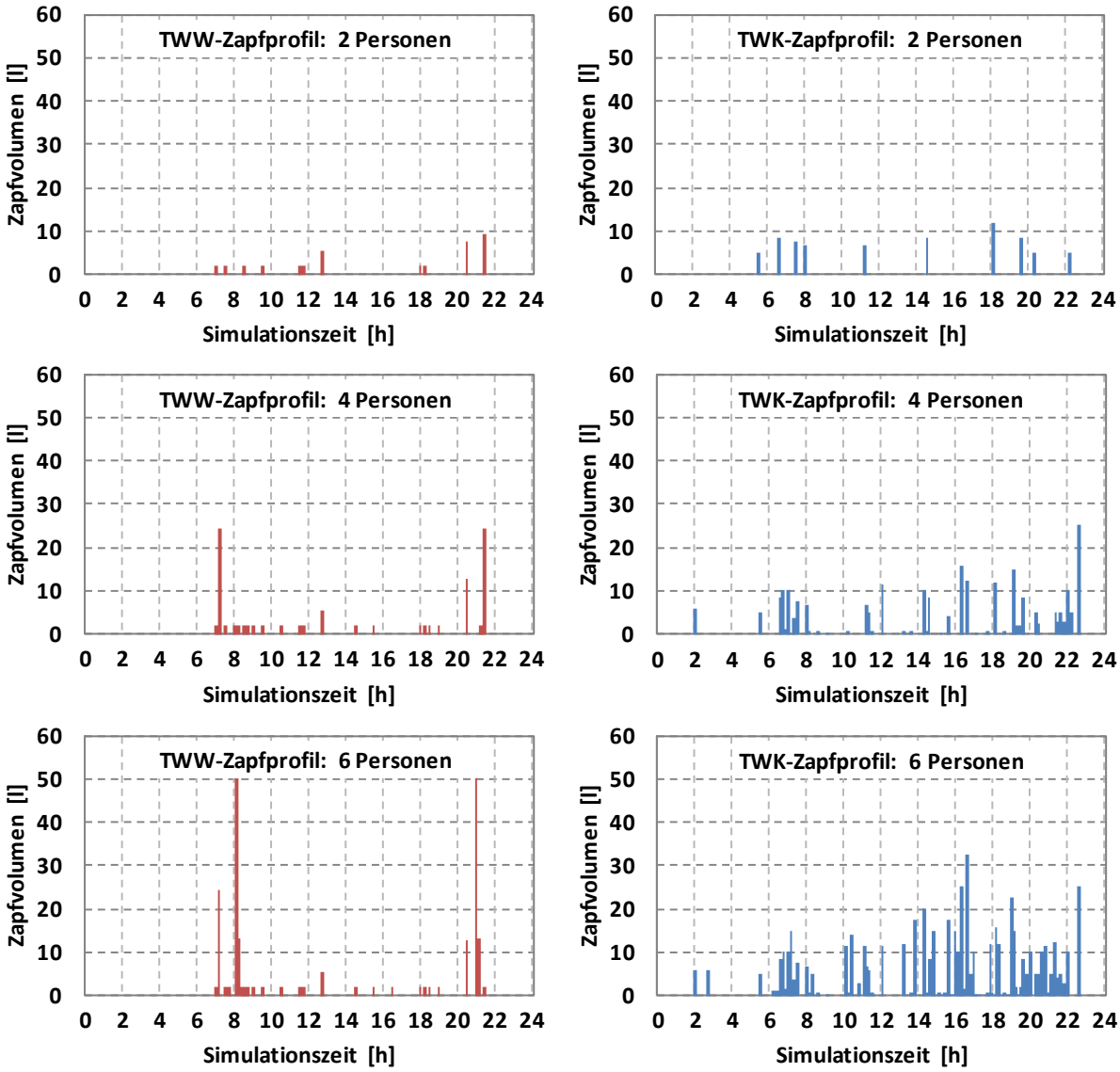


Abb. 9-5 Zapfprofile der TWW- und TWK-Entnahme für alle Nutzertypen [EU Comission 2002; DVGW W 510]

Die Zapfprofile werden in dem Simulationsmodell in Form von Volumenströmen (Zapfvolumen pro Simulationszeitschritt) eingelesen, die hinsichtlich der späteren Berechnung des Energie- und Exergiebedarfs in Massenströme umgerechnet werden müssen. Die hier verwendete Dichte des Wassers $\rho_W = 983{,}2 \frac{kg}{m^3}$ gilt bei 60 °C [VDI13] und wird vereinfachend für alle Berechnungen dieser Arbeit verwendet.

$$\dot{m}_{TWW} = \rho_W \, \dot{V}_{TWW} \tag{9.2}$$

9.1.1.3 Geometrie und Dämmung des Gebäudes

Die Erstellung des Gebäudemodells erfolgt in der Software TRNBuild [TRNBUILD17]. Unter Verwendung des Modells werden insgesamt jeweils sieben verschiedene EFH und MFH abgebildet, die die verschiedenen Baualtersklassen und Sanierungsgrade repräsentieren und sich in der Auslegung hinsichtlich Dämmung und Geometrie unterscheiden. Auf diese Gebäudevarianten greift TRNSYS [TRNSYS17] bei der Simulation in Abhängigkeit der Simulationsvariante zu. Das Modell des MFH unterteilt sich weiterhin in verschiedene Zo-

nen, in TRNBuild Airnodes genannt, die den WE entsprechen. Neben den WE werden zudem ein Treppenhaus (TH) und ein Installationsschacht (IS) im MFH abgebildet. Diese Zonen sind so angeordnet, dass sechs gleichgroße WE symmetrisch über drei Geschosse verteilt werden und dabei in der Mitte von dem nicht beheizten TH separiert werden, in dem der IS als geschlossene Zone abgebildet ist (vgl. Abb. 9-3 in Kapitel 9.1.1.2 und Abb. 9-8 in Kapitel 9.1.2.2). Das EFH-Modell wird hingegen lediglich in Erdgeschoss und Obergeschoss geteilt. Zudem wird auch im EFH in beiden Geschossen ein IS abgebildet, dessen Außenwände Wärme an die Raumluft abgeben (vgl. Abb. 9-4).

Alle relevanten Parameter der Gebäudeauslegung sind in Tab. 9-2 und Tab. 9-3 aufgeführt. Bei dieser Auslegung nimmt die Größe der beheizten Wohnfläche, eine zentrale Rolle ein, da sie für die Bestimmung nachfolgender Parameter relevant ist. Als Datengrundlage wird die Gebäudetypologie der IWU benutzt, die die Wohnflächen eines durchschnittlichen EFH oder MFH in Deutschland für verschiedene Baualtersklassen angibt [IWU15]. Da das durchschnittliche MFH nicht aus genau sechs WE besteht, werden zum Zweck der Vergleichbarkeit die Wohnflächen auf Grundlage der IWU-Daten zu einem MFH mit sechs WE skaliert. Diese Wohnfläche wird über drei Geschosse (EG, 1.OG, 2.OG) im MFH und zwei Geschosse im EFH (EG, 1.OG) mit einem rechteckigen Grundriss und einem Längen-Breiten-Verhältnis von vier zu drei abgebildet. Im MFH wird zudem das TH mit einer Breite von 2 m und einer Länge, die der Gebäudebreite entspricht, parametrisiert, sodass eine vollständige Trennung der WE eines Geschosses realisiert wird. Die Fläche des TH wird dabei nicht als Teil der Wohnfläche angerechnet. Um eine thermische Interaktion des TH mit der Umgebung zu ermöglichen, werden im TH eine Haustür und zwei Fenster mit einer Gesamtfläche von jeweils 2 m² abgebildet. Es wird hierbei unabhängig vom Gebäudetyp eine Infiltrationsrate des Treppenhauses von $n_{TH} = 0{,}5\ \frac{1}{h}$ angenommen [Großklos11].

Die Geschosshöhe aller Gebäudetypen beträgt 2,65 m und setzt sich aus einer Raumhöhe von 2,5 m und einer Deckenstärke von 0,15 m zusammen Die Dachfläche ergibt sich, im Sinne eines Spitzdaches, aus der Geschossfläche und einem Dach-Neigungswinkel von 30 °. Die Fensterflächen und ihre Orientierung entstammen einem Datensatz aus dem Projekt „Netzreaktive Gebäude“ [IBP12].

Die unterschiedlichen Bauteile werden hinsichtlich einer Variation des Gebäudeenergiestandards in Abhängigkeit des Gebäudetyps mit unterschiedlichen Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Werte) parametriert. Hierzu werden erneut die Werte aus [IWU15] verwendet, die Tab. 9-2 und Tab. 9-3 zu entnehmen sind. Die dabei angegebene Innenwand bezieht sich auf die innenliegende Trennwand zwischen WE und TH. Der U-Wert dieser Innenwand wird in Anlehnung an den in der Energieeinsparverordnung erhobenen Mindestwert für Wände zwischen beheizten und unbeheizten Räumen bestimmt [EnEV 2014].

Tab. 9-2 Parameter der bauphysikalischen Eigenschaften des MFH in Abhängigkeit der Baualtersklasse und des Sanierungsgrads [IWU15; IBP12]

Baualtersklasse			<1978			1978-1994			KfW70
Sanierungsgrad			Ist	Gut	Sehr Gut	Ist	Gut	Sehr Gut	-
Geometrie	Wohnfläche	m²	413,63	413,63	413,63	428,39	428,39	428,39	430,24
	Geschossfläche	m²	137,88	137,88	137,88	142,80	142,80	142,80	143,41
	Geäbudelänge	m	13,56	13,56	13,56	13,80	13,80	13,80	13,83
	Gebäudebreite	m	10,17	10,17	10,17	10,35	10,35	10,35	10,37
	Außenwandfläche	m²	377,27	377,27	377,27	383,94	383,94	383,94	384,77
	Dachfläche	m²	159,21	159,21	159,21	164,89	164,89	164,89	165,60
	unterer Gebäudeabschluss	m²	156,82	156,82	156,82	137,67	137,67	137,67	153,38
	Fensterfläche, gesamt	m²	71,33	71,33	71,33	73,41	73,41	73,41	63,82
	Fensterfläche, Nord	m²	10,07	10,07	10,07	17,01	17,01	17,01	11,18
	Fensterfläche, Süd	m²	16,95	16,95	16,95	23,55	23,55	23,55	25,19
	Fensterfläche, West	m²	22,16	22,16	22,16	16,43	16,43	16,43	13,62
	Fensterfläche, Ost	m²	22,16	22,16	22,16	16,43	16,43	16,43	13,83
Dämmung	Außenwand	W/(m²K)	1,09	0,24	0,15	0,45	0,24	0,15	0,14
	Dach	W/(m²K)	0,80	0,24	0,15	0,39	0,24	0,15	0,10
	Fenster	W/(m²K)	2,22	1,30	0,85	2,51	1,30	0,85	0,70
	unterer Gebäudeabschluss	W/(m²K)	1,24	0,30	0,11	0,57	0,30	0,11	0,18
	Tür	W/(m²K)	3,16	3,16	3,16	4,00	4,00	4,00	2,00
	Innenwand	W/(m²K)	2,34	0,51	0,32	0,96	0,51	0,32	0,30

Tab. 9-3 Parameter der bauphysikalischen Eigenschaften des EFH in Abhängigkeit der Baualtersklasse und des Sanierungsgrads [IWU15; IBP12]

Baualtersklasse			<1978			1978-1994			KfW70
Sanierungsgrad			Ist	Gut	Sehr Gut	Ist	Gut	Sehr Gut	-
Geometrie	Wohnfläche	m²	149,48	149,48	149,48	153,82	153,82	153,82	160,4
	Geschossfläche	m²	74,74	74,74	74,74	76,91	76,91	76,91	80,2
	Geäbudelänge	m	9,98	9,98	9,98	10,13	10,13	10,13	10,34
	Gebäudebreite	m	7,49	7,49	7,49	7,59	7,59	7,59	7,76
	Außenwandfläche	m²	183,18	183,18	183,18	186,29	186,29	186,29	189,72
	Dachfläche	m²	86,30	86,30	86,30	88,81	88,81	88,81	92,61
	unterer Gebäudeabschluss	m²	194,25	194,25	194,25	161,60	161,60	161,60	195,31
	Fensterfläche, gesamt	m²	23,06	23,06	23,06	28,60	28,60	28,60	42,27
	Fensterfläche, Nord	m²	4,19	4,19	4,19	4,19	4,19	4,19	5,49
	Fensterfläche, Süd	m²	9,17	9,17	9,17	9,17	9,17	9,17	26,78
	Fensterfläche, West	m²	4,85	4,85	4,85	7,62	7,62	7,62	5,00
	Fensterfläche, Ost	m²	4,85	4,85	4,85	7,62	7,62	7,62	5,00
Dämmung	Außenwand	W/(m²K)	1,08	0,24	0,15	0,46	0,24	0,15	0,2
	Dach	W/(m²K)	0,73	0,24	0,15	0,41	0,24	0,15	0,16
	Fenster	W/(m²K)	2,33	1,30	0,85	2,6	1,30	0,85	1,27
	unterer Gebäudeabschluss	W/(m²K)	1,18	0,30	0,11	0,58	0,30	0,11	0,24
	Tür	W/(m²K)	2,70	3,16	3,16	2,70	4,00	4,00	2,00

9.1.2 Modellierung der Versorgungskette

Die hausinterne Versorgungskette umfasst alle Komponenten der Wärmeversorgung eines Gebäudes von der Bereitstellung der Wärme durch den Wärmeerzeuger bis zur Übergabe der Wärme an den Heizflächen bzw. an der Entnahmestelle des TWW (vgl. Abb. 9-6). Explizit wird die Versorgungskette in diesem Modell durch die Übergabesysteme der Heizung, die Rohrleitungen von TWW, TWK und Heizsystem, einen TWW- oder Pufferspeicher sowie eine Erzeugereinheit abgebildet. Diese Komponenten werden sowohl im EFH als auch im MFH abgebildet, jedoch in Abhängigkeit der Gebäudegröße sowie der Baualtersklasse unterschiedlich dimensioniert.

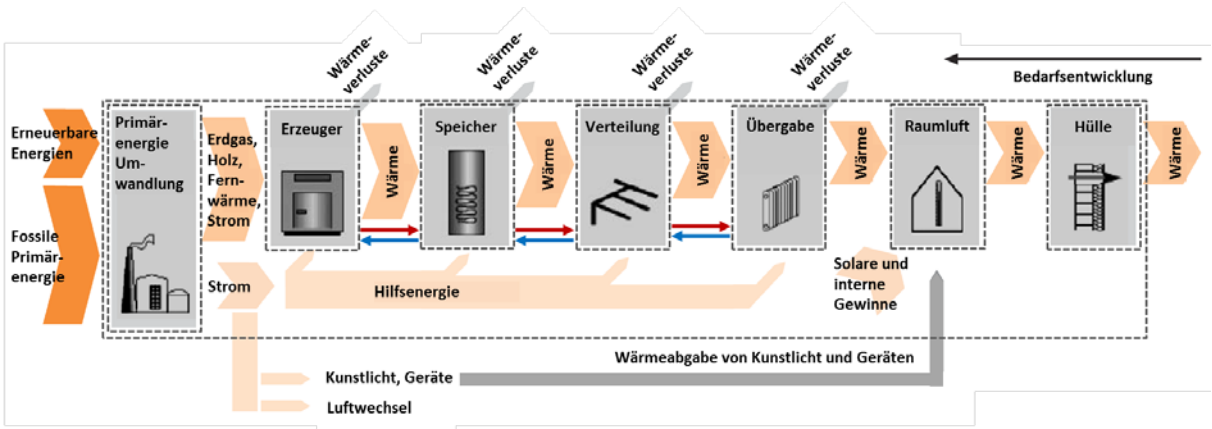


Abb. 9-6 Darstellung und Interaktion der Bilanzräume in der energetischen Gebäudeversorgung [Schmidt04]

In den unterschiedlichen Teilsystemen der Versorgungskette werden an verschiedenen Stellen Pumpen abgebildet, die durch den Type 742 [TESS12] abgebildet werden. Zur internen Berechnung erhalten diese Types den zu fördernden Volumenstrom, die Druckdifferenz sowie den Wirkungsgrad als Eingangsgrößen. Die Druckdifferenz ergibt sich dabei aus der Summe der Druckverlustwerte aller Rohre und Anlagenkomponenten, die dem jeweiligen Pumpenkreislauf angehörig sind. Diese Werte werden aus Druckverlusttabellen und Datenblättern der Hersteller entnommen [Geberit14]. Weiterhin werden die Pumpen als Nassläuferpumpen mit einem Gesamtwirkungsgrad von $\eta_{Pump} = 0{,}4$ angenommen [WILO09]. Im Modell werden Pumpen in der Zirkulationsleitung in der Heizungsverteilung, im Erzeuger-Rücklauf, in der Solarthermie-Anlage sowie zwischen Pufferspeicher und Frischwasserstation abgebildet.

Im Folgenden wird die Versorgungskette hinsichtlich der Modellierung ihrer einzelnen Abschnitte beschrieben.

9.1.2.1 Übergabesysteme

Die Übergabe der Wärme an die Raumluft erfolgt im Modell durch die Übergabesysteme der Raumheizung. Diese Übergabesysteme werden in Abhängigkeit der Baualtersklasse als Radiatoren (Type 362) oder als Fußbodenheizung (Type 653) abgebildet, die jeweils Wärme in die beheizten Zonen abgeben (vgl. Tab. 9-8 und Tab. 9-9 in Kapitel 9.1.3). Ein Übergabesystem des Trinkwassers im Sinne einer Entnahmestelle wird nicht explizit abgebildet, sondern durch den Austritt des Trinkwassers aus dem Bilanzraum der TWV repräsentiert.

Da die Wärmeverluste durch Transmission und Lüftung in starker Abhängigkeit der Witterungsbedingungen stehen, ist es notwendig, dass zur Aufrechterhaltung einer gewünschten Raumlufttemperatur die Wärmeabgabe der Heizflächen geregelt wird. Diese Regelung wird zum einen durch eine außentemperaturgeführte Heizkurve und zum anderen durch die Veränderung des Heizmassenstroms $\dot{m}_{Heiz}$ in Abhängigkeit der Raumlufttemperatur jeder einzelnen Wohneinheit realisiert. Für die unterschiedlichen Übergabesysteme kommen verschiedene Heizkurven zum Einsatz, deren Verlauf in Abb. 9-7 dargestellt ist. Die Formel der Heizkurve für die Radiatoren (Formel (9.3)) entstammt [Ellerbrok13] und wird mit einer Neigung von 1,7 parametriert, welche für Bestandsgebäude mit Radiatoren gängig ist. Weiterhin wird im Rahmen der Variantenbestimmung eine Raumsolltemperatur $\vartheta_{Raum,soll} = 20\,°C$ [DIN V 18599-5] mit einer Nachtabsenkung zwischen 21 Uhr und 4 Uhr um 3 K definiert [Kallert18]. Für die Heizkurve der Fußbodenheizung (Formel (9.4)) ist aufgrund der geringen Temperaturspreizung ein vereinfachter, linearer Ansatz ausreichend. Der Vergleich der Vorlauftemperaturen macht deutlich, dass insbesondere bei winterlichen Außentemperaturen ($\vartheta_{amb} < 0\,°C$) Radiatoren ein wesentlich höheres Temperaturniveau erfordern, welches nicht durch alle Erzeugertechnologien bereitgestellt werden kann.

$$\vartheta_{Rad,in} = \vartheta_{RL,soll} + 1{,}7\,\frac{11}{10}\,\vartheta_{RL,soll}^{\frac{\vartheta_{amb}}{320-4\,\vartheta_{amb}}}\,(20\,°C - \vartheta_{amb}) \tag{9.3}$$

$$\vartheta_{FBH,in} = 32\,°C - 0{,}4\,\vartheta_{amb} \tag{9.4}$$

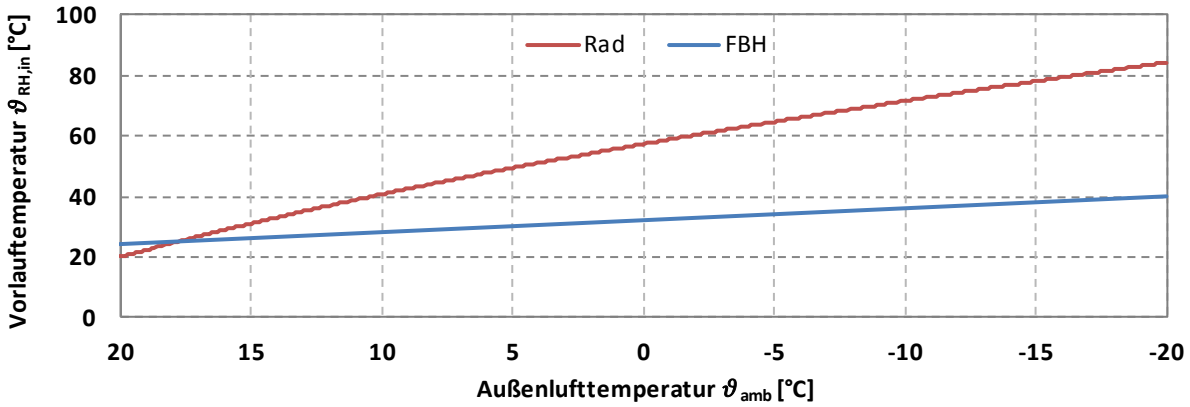


Abb. 9-7 Vergleich der Heizkurven unterschiedlicher Übergabesysteme

Der zweite Regelkreis besteht aus der Einstellung des Heizmassenstroms durch einen PID-Regler, dem die Raumlufttemperatur ϑ_{Raum} als Regelgröße und die Raumluftsolltemperatur $\vartheta_{Raum,soll}$ als Führungsgröße dient. Jede Wohneinheit im MFH und jedes Wohngeschoss im EFH wird dabei mit einem eigenen Übergabesystem und eigenem Regelkreis abgebildet.

9.1.2.2 Verteilung

Die Verteilung ist das Bindeglied zwischen der Erzeugung und der Nutzung von Wärme, indem erwärmtes Wasser über Rohrleitungen zu dem Ort des Wärmebedarfs gefördert wird. Diese Rohrleitungen sind sowohl bei der Heizungsverteilung (HV) als auch bei der Trinkwasser-Verteilung (TWV) in verschiedene Abschnitte eines Rohrnetzes gegliedert. Jeder dieser Abschnitte wird in dem Simulationsmodell durch einen einzelnen Rohr-Type (Type 31) abgebildet, der hinsichtlich des Durchmessers, der Länge und der Dämmung nach Norm- und Literaturwerten ausgelegt wird. Da die thermische Interaktion der TWV mit dem Gebäude ein wesentlicher Gegenstand dieser Untersuchung ist, ist zudem die Abbildung der Rohrleitungen in der jeweiligen Zone des Gebäudes von besonderer Relevanz. Hierzu lässt sich eine allgemeine Aufteilung dieser Abschnitte in eine Verteilleitung im Keller, eine Steigleitung im Installationsschacht und eine Stichleitung in der WE bzw. im Wohngeschoss vornehmen. Die Wärmeverluste der Abschnitte gehen dabei in die entsprechende Zone ein und die Umgebung der Rohrleitungen wird wiederum durch die Lufttemperatur der Zone repräsentiert. Es ist hierbei zu beachten, dass die im Neubau des MFH abgebildeten kaltwasser- und warmwasserführenden Rohrleitungen im Installationsschacht gemäß VDI DVGW 6023 durch eine Trennwand thermisch entkoppelt sind, um den Effekt der Erwärmung bzw. Abkühlung des Trinkwassers zu verringern. Die hier erwähnte Keller-Zone ist kein Bestandteil des Gebäudemodells, sondern wird als unbeheizte Zone lediglich durch eine konstante Kellertemperatur von 13 °C beschrieben [DIN 4701-10]. Die Wärmeverluste aller Komponenten im Keller werden bei der späteren Bilanzierung somit nicht als Wärmeeinträge berücksichtigt.

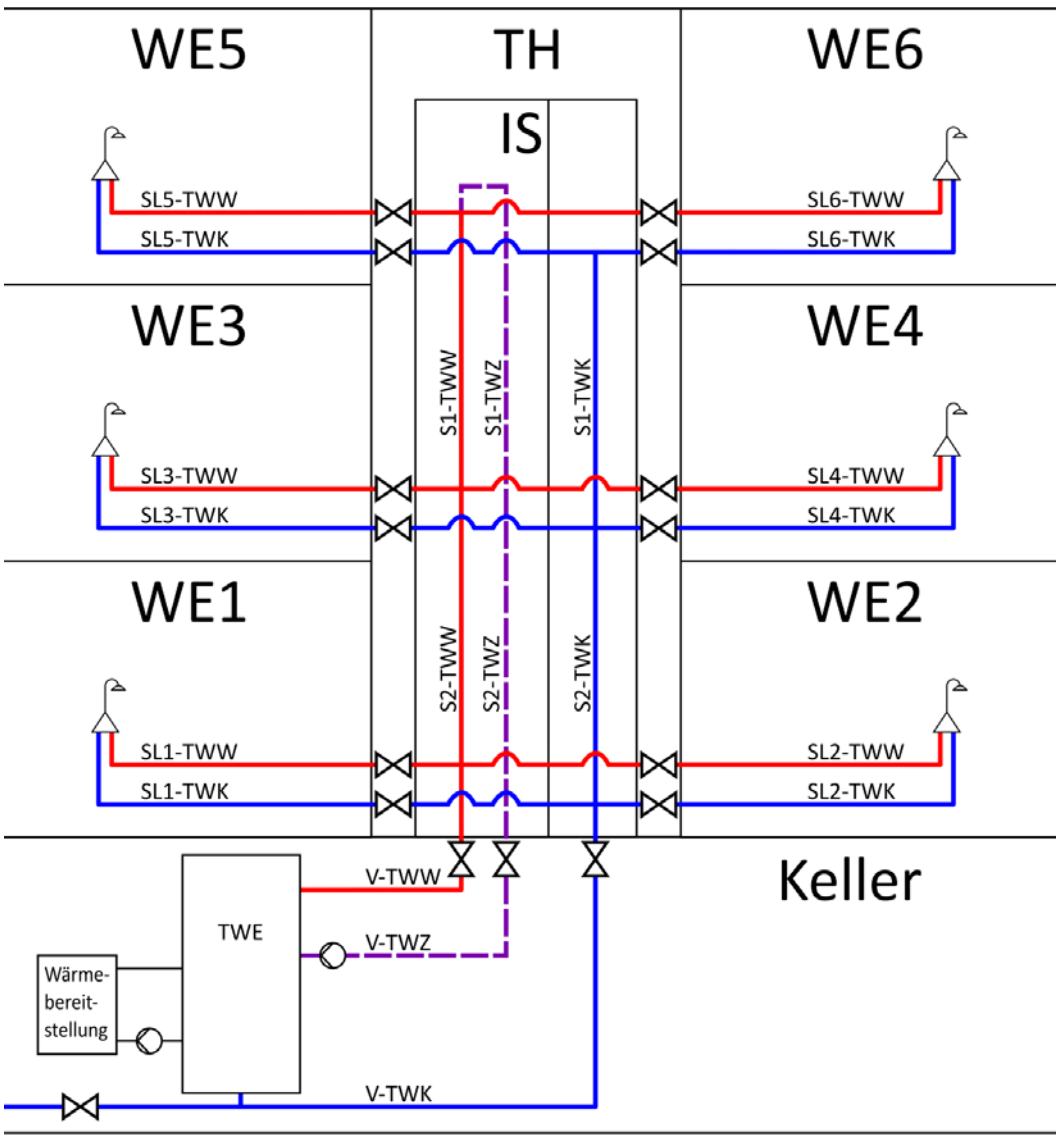


Abb. 9-8 Aufbau und Positionierung der Rohrleitungsabschnitte der TWV im MFH

Die TWV unterteilt sich grundsätzlich in die TWW- und die TWK-Verteilung. Der TWW-Verteilung sind zudem Zirkulationsleitungen (TWZ) nachgeschaltet, die das TWW in einem Zirkulationsprozess zum TWE zurückführen. Die TWI im Neubau des EFH wird als einzige Variante ohne Zirkulationsleitung abgebildet (vgl. Kapitel 9.1.3). Abb. 9-8 bietet eine Übersicht zur Unterteilung, Bezeichnung und Zonierung der TWV im MFH. Die TWV das EFH benötigt keine detaillierte graphische Darstellung, da lediglich jeweils eine Stichleitung im Erd- und im Obergeschoss abgebildet wird. Die Stichleitung im Erdgeschoss ist dabei an die Verteilleitung, und die Stichleitung im Obergeschoss an eine Steigleitung angeschlossen. Nachfolgend wird die Auslegung der Rohrleitungsparameter beschrieben, deren Werte in Tab. 9-4 und Tab. 9-5 aufgeführt sind.

Tab. 9-4 Parameter aller Rohrleitungsabschnitte der TWV im MFH [DIN 1988-200; DIN V 18599-8; Diefenbach02; DVGW W 553; Geberit14; DIN EN 806-3]

Rohrparameter			D_i	D_a	L	Vol	U	Zone
Einheit			m	m	m	l	W/(m²*K)	-
TWW	V	<78	0,025	0,028	28,33	13,906	3,334	Keller
		78-94			29,86	14,657	3,334	
		KfW70			30,06	14,756	2,009	
	S2	<78	0,025	0,028	2,96	1,453	3,334	IS
		78-94			3,02	1,482	3,334	
		KfW70			3,03	1,487	2,009	
	S1	<78	0,020	0,022	2,96	0,930	3,672	IS
		78-94			3,02	0,949	3,672	
		KfW70			3,03	0,952	2,703	
	SL	<78	0,016	0,018	6,20	1,247	4,010	WE
		78-94			6,43	1,293	4,010	
		KfW70			6,45	1,297	2,944	
TWZ	V	<78	0,016	0,018	28,33	5,696	4,010	Keller
		78-94			29,86	6,004	4,010	
		KfW70			30,06	6,044	2,944	
	S2	<78	0,013	0,015	2,96	0,393	4,367	IS
		78-94			3,02	0,401	4,367	
		KfW70			3,03	0,402	3,200	
	S1	<78	0,013	0,015	2,96	0,393	4,367	IS
		78-94			3,02	0,401	4,367	
		KfW70			3,03	0,402	3,200	
TWK	V	<78	0,032	0,035	28,33	22,784	3,787	Keller
		78-94			29,86	24,015	3,787	
		KfW70			30,06	24,176	3,787	
	S2	<78	0,025	0,028	2,96	1,453	3,393	IS
		78-94			3,02	1,482	3,393	
		KfW70			3,03	1,487	3,393	
	S1	<78	0,025	0,028	2,96	1,453	3,393	IS
		78-94			3,02	1,482	3,393	
		KfW70			3,03	1,487	3,393	
	SL	<78	0,020	0,022	6,20	1,948	3,679	WE
		78-94			6,43	2,020	3,679	
		KfW70			6,45	2,026	3,679	

Tab. 9-5 Parameter aller Rohrleitungsabschnitte der TWV im EFH [DIN 1988-200; DIN V 18599-8; Diefenbach02; DVGW W 553; Geberit14; DIN EN 806-3]

Rohrparameter			D_i	D_a	L	Vol	U	Zone
Einheit			m	m	m	l	W/(m²*K)	-
TWW	V	<78	0,016	0,018	11,31	2,274	4,009	Keller
		78-94	0,016	0,018	11,80	2,373	4,009	
		KfW70	0,013	0,015	12,57	1,668	2,615	
	S	<78	0,013	0,015	3,29	0,436	4,367	IS
		78-94	0,013	0,015	3,34	0,443	4,367	
		KfW70	0,010	0,012	3,42	0,269	2,918	
	SL	<78	0,013	0,015	6,73	0,893	4,367	Geschoss
		78-94	0,013	0,015	6,92	0,919	4,367	
		KfW70	0,010	0,012	7,22	0,567	2,918	
TWZ	V	<78	0,013	0,015	11,31	1,501	4,367	Keller
		78-94	0,013	0,015	11,80	1,566	4,367	
		KfW70	-	-	-	-	-	
	S	<78	0,013	0,015	3,29	0,436	4,367	IS
		78-94	0,013	0,015	3,34	0,443	4,367	
		KfW70	-	-	-	-	-	
TWK	V	<78	0,02	0,022	11,31	3,553	4,289	Keller
		78-94			11,80	3,707	4,289	
		KfW70			12,57	3,949	3,306	
	S	<78	0,02	0,022	3,29	1,032	3,678	IS
		78-94			3,34	1,049	3,678	
		KfW70			3,42	1,075	3,306	
	SL	<78	0,016	0,018	6,73	1,353	3,964	Geschoss
		78-94			6,92	1,392	3,964	
		KfW70			7,22	1,451	3,558	

Zur Ermittlung der Rohrleitungslängen verschiedener Abschnitte bietet die DIN V 18599-8 ein einfaches Verfahren, welches die Längen in Abhängigkeit der Wohnfläche, der Geschossanzahl, des Netztyps und der Zonenaufteilung des Gebäudes stellt. Es werden dabei die Wohnflächen gemäß Tab. 9-2 und Tab. 9-3 über drei (MFH) bzw. zwei (EFH) Wohngeschosse angenommen. Weiterhin wird die TWV als Ebenentyp mit nur einer Steigleitung und vergleichsweise langen Stichleitungen abgebildet. Darüber hinaus werden die Gebäude für die Auslegung der Rohrleitungslängen als ein Einzonengebäude angenommen. Dies ist im Sinne der in DIN V 18599-8 beschriebenen Zonierung erlaubt, da die einzelnen Zonen, wie beispielsweise die Wohneinheiten im MFH, einen ähnlichen Nutzenergiebedarf aufweisen.

Für die Berechnung der Rohrleitungsdurchmesser der TWW- und TWK-Verteilung ist in Deutschland das in DIN 1988-300 beschriebene Verfahren vorgesehen, welches auf der Kenntnis der Durchflüsse und Druckverluste im Rohrleitungsnetz basiert. Da diese Größen im Rahmen der Modellierung nicht ausreichend genau abgeschätzt werden können, wird für diese Auslegung das vereinfachte Verfahren der europäischen Norm DIN EN 806-3 verwendet, das die Innendurchmesser D_i und Außendurchmesser D_a der Rohrleitungen in Abhängigkeit von Belastungswerten als genormte Nennweiten von Kupferrohren angibt. Diese Belastungswerte sind Tabellenwerte, die den durchschnittlich generierten

Massenstrom von verschiedenen Entnahmestellen wie zum Beispiel Badewannenausläufen oder Küchenspülen repräsentiert. Im MFH werden hierbei für jede WE ein Belastungswert von 7 für die TWW-Entnahme und ein Wert von 12 für die TWK-Entnahme angenommen, die der Abbildung eines Badewannenauslaufs, eines Handwaschbeckens, einer Küchenspüle, einer Geschirrspülmaschine, eines Spülkastens und einer Waschmaschine entsprechen. Im EFH werden demgegenüber jedem Geschoss ein Belastungswert von 5 für die TWW-Entnahme und ein Wert von 7,5 für die TWK-Entnahme zugeordnet, wodurch ein Badewannenauslauf, zwei Handwaschbecken, eine Duschbrause, eine Küchenspüle, eine Geschirrspülmaschine, ein Spülkasten sowie eine Waschmaschine über das gesamte EFH abgebildet werden. Die Werte für die Steig- und Verteilungsleitungen ergeben sich aus der Summe der Belastungswerte aller in Fließrichtung nachfolgenden Entnahmestellen.

Die Wärmedämmung der Rohrleitungen wird durch den flächenspezifischen Wärmedurchgangskoeffizienten U angegeben. Dieser berechnet sich nach Formel (9.5) in Abhängigkeit der Dämmstärke s_{Iso} und der Wärmeleitfähigkeit λ_{Iso} des Isolationsmaterials sowie des Außendurchmessers D_a. Der Wärmeübergangskoeffizient zwischen Rohr und Raumluft wird konstant mit $\alpha_a = 8\frac{W}{m^2K}$ angenommen [Diefenbach02].

$$U = \frac{1}{D_a \left[\frac{1}{2\lambda_{Iso}} \ln\left(\frac{D_a + 2s_{Iso}}{D_a}\right) + \frac{1}{\alpha_a\,(D_a + 2s_{Iso})}\right]} \tag{9.5}$$

Aufgrund neuer gesetzlicher Anforderungen und verbesserter Dämmmaterialen unterscheiden sich die Dämmstärke und die Wärmeleitfähigkeit in den verschiedenen Baualtersklassen. Im Neubau entsprechen diese Parameter den in DIN 1988-200 formulierten Anforderungen der Energieeinsparverordnung. Die Wärmedämmung der TWV-Rohrleitungen im Bestand wird hingegen durch historische Werte ausgelegt, die in [Diefenbach02] und DIN V 18599-8 angegeben sind.

Die TWZ besteht aus Rohrleitungen, in denen nicht-gezapftes TWW durch eine Zirkulationspumpe von den Steigleitungen der TWW-Verteilung zurück zum TWE geführt wird (vgl. Abb. 9-8). Um dabei den Anforderungen an Komfort und Hygiene gerecht zu werden, schreibt das DVGW-Arbeitsblatt W 553 vor, dass das TWW vom Austritt aus dem TWE bis zum Eintritt in die Zirkulationsleitung einen maximalen Temperaturabfall von 2 K erfahren darf. Der durch die Zirkulationspumpe geförderte Massenstrom ist so einzustellen, dass diese Anforderung eingehalten wird. Zur Auslegung dieses Massenstroms gibt das Arbeitsblatt einen rechnerischen, längenspezifischen Wärmeverlust von $\dot{q}^*_{l,TWV,IS} = 7\frac{W}{m}$ im Installationsschacht und $\dot{q}^*_{l,TWV,K} = 11\frac{W}{m}$ im Keller vor. Mit den Längen der in den jeweiligen Zonen abgebildeten TWW-Rohrleitungen multipliziert, ergibt sich ein Gesamtwärmeverlust der zirkulierenden Rohrleitungen $\dot{Q}^*_{l,TWV,K+IS}$, aus dem sich durch die Berechnung nach Formel (9.6) die Massenströme $\dot{m}_{TWZ,MFH} \approx 150\frac{kg}{h}$ im MFH und $\dot{m}_{TWZ,EFH} \approx 60\frac{kg}{h}$ im EFH ergeben. Zusätzlich wird in DIN 1988-200 festgehalten, dass die Temperaturdifferenz des zirkulierenden TWW zwischen Austritt und Eintritt am TWE nicht größer als 5 K sein darf. Durch Testsimulationen wird sichergestellt, dass die Anforderungen des technischen Regelwerks eingehalten werden.

$$\dot{m}_{TWZ} = \frac{\dot{Q}^*_{l,TWV,K+IS}}{c_p\ 2K} \tag{9.6}$$

Bei der Auslegung der Durchmesser der Zirkulationsleitungen ist zu beachten, dass die Fließgeschwindigkeiten aus betriebstechnischen Gründen unter einem Grenzwert von

$0{,}5\frac{m}{s}$ bleiben sollten [DVGW W 553]. Anhand dieses Grenzwerts werden die Durchmesser in einem tabellierten Verfahren ermittelt. Die entsprechende Tabelle gibt dabei den Durchmesser der Rohrleitung in Abhängigkeit des Massenstroms und der Fließgeschwindigkeit an [Geberit14]

Die Parameter der Heizungsverteilung (HV) werden ebenfalls im Rahmen von Normen und Literatur ermittelt [Geberit14; DIN V 18599-5]. Da die Berechnungsschritte zur Auslegung von HV und TWV ähnlich sind und der Fokus auf der Beschreibung der TWV liegt, wird die HV hier nicht detaillierter beschrieben.

9.1.2.3 Speicher

Die Speicherung von Energie wird in diesem Simulationsmodell in Form von Wärmespeichern realisiert. In Abhängigkeit der Simulationsvariante erfolgt die Wärmespeicherung mittels Pufferspeicher oder TWW-Speicher (vgl. Kapitel 9.1.3). Der Pufferspeicher ist dabei ein Heizungswasser führender Speicher, dem das Heizungssystem und die Frischwasserstation nachgeschaltet sind. Im Gegensatz dazu ist der TWW-Speicher mit Trinkwasser gefüllt und ist somit Teil der TWI. Zudem wird in einer Variante mit Fernwärme-Versorgung exemplarisch auf die Wärmespeicherung verzichtet, indem die Frischwasserstation und das Heizungssystem direkt an das Fernwärmenetz angeschlossen sind.

Die verschiedenen Speichertypen werden im Modell durch denselben Type (Type 340 [Drück06]) abgebildet, da die grundlegenden Funktionen identisch sind. Wesentliche Auslegungsparameter der Speicher sind das Speichervolumen und die Wärmedämmung. Das Speichervolumen ist durch die Simulationsvarianten (vgl. Tab. 9-8 und Tab. 9-9 in Kapitel 9.1.3) definiert, sodass eine Auslegung dieser Größe im Rahmen der Modellierung entfällt.

Die Wärmedämmung des Speichers wird durch die Angabe des Wärmedurchgangskoeffizienten der Speicherwand abgebildet. Hierfür wird eine Dämmung mit einer Stärke von $s_{Iso,Sp} = 0{,}15m$ und einer Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{Iso,Sp} = 0{,}042\frac{W}{m*K}$ angenommen, die sowohl für die Seitenwände als auch für den oberen und unteren Abschluss des zylinderförmigen Speichers gilt [Viessmann17]. Es resultiert daraus ein Wärmedurchgangskoeffizient $U_{Sp} = 0{,}27\frac{W}{m*K}$. Die zur Validierung der Dämmwerte berechneten täglichen Bereitschaftswärmeverlust des Speichers weisen eine gute Übereinstimmung zu Norm- und Literaturwerten auf, die sich aus den in [Diefenbach02] und DIN V 18599-8 angegebenen Berechnungsverfahren ergeben.

Die Beladung des Speichers erfolgt durch den Wärmeerzeuger, welcher in manchen Varianten durch eine Solarthermieanlage unterstützt wird. Der Wärmeerzeuger und die Solarthermieanlage sind über einen speicherinternen Wärmeübertrager angeschlossen. Die Regelung der Wärmezufuhr wird bedarfsseitig abgebildet, sodass bei der Unterschreitung einer Speichersolltemperatur der Erzeuger den Speicher belädt. Der Beladevorgang hält an, bis die Solltemperatur um 2 K überschritten wird. Aufgrund der thermischen Schichtung im Speicher ist es hierbei relevant, dass die Bezugstemperatur am obersten Punkt des Speichers gemessen wird, da dort auch die Austrittsstelle des TWW abgebildet ist. Im Speicherprinzip erfolgt die Regelung im Kontext einer Vorrangschaltung, die bei einem gleichzeitigen Bedarf von Heizung und Speicher die Beladung des Speichers priorisiert [Recknagel11].

Die Solltemperatur gleicht im Speicherprinzip dem definierten TWW-Temperaturniveau der entsprechenden Simulationsvariante. Es wird somit sichergestellt, dass die tatsächliche Temperatur des austretenden TWW das TWW-Temperaturniveau zu keinem Zeit-

punkt unterschreitet. Im Durchflussprinzip liegt die Solltemperatur des Pufferspeichers bei 7 K über dem TWW-Temperaturniveau. Diese Temperaturdifferenz im Durchflussprinzip ist notwendig, um eine vollständige Erwärmung des Trinkwassers in der nachgeschalteten Frischwasserstation zu gewährleisten. Die Frischwasserstation wird dabei durch einen Plattenwärmeübertrager abgebildet, der primärseitig an den Pufferspeicher und sekundärseitig an die TWV angeschlossen ist. Um die Deckung der Spitzenlasten, die durch die TWW-Entnahmen generiert werden, zu gewährleisten, wird der Wärmeübertrager mit einer temperaturspezifischen Übertragungsleistung $UA_{FWS,MFH} = 10{,}6\frac{kW}{K}$ im MFH und $UA_{FWS,EFH} = 5\frac{kW}{K}$ im EFH parametrisiert [Vitotrans15].

9.1.2.4 Wärmeerzeuger

Im Folgenden wird die Auslegung der einzelnen Wärmeerzeuger beschrieben. Die Dimensionierung der Erzeugereinheiten erfolgt nach der Spitzenheizlast des Gebäudes, da dieser Wert die maximal erforderliche Heizleistung vorgibt. Die Heizlast, die im Rahmen von Testsimulationen ermittelt wurde, steht dabei in starker Abhängigkeit der Baualtersklasse, der Gebäudegröße (MFH, EFH) sowie der Verwendung eines Pufferspeichers, der die Heizlast signifikant verringert. Des Weiteren erfolgt die Integration der Wärmeerzeuger in die nachfolgende Versorgungskette durch vorgegebene Volumenströme und Vorlauftemperaturen, die sich aus der Regelung des Heizsystems (Heizkurve) und der TWI (Speicher-Regelung) ergeben. Somit kann im Modell eine einfache und bedarfsangepasste Implementierung verschiedener Erzeugertechnologien realisiert werden.

<u>Kessel</u>

Der Heizkessel wird im Kontext der Versorgungsszenarien nach der Verbrennungstechnologie und dem eingesetzten Brennstoff in verschiedene Kesseltypen unterteilt. Es werden somit sowohl Erdgas-basierende Niedertemperatur- und Brennwert-Kessel als auch ein Pellet-Kessel als regenerativer Erzeuger abgebildet. Aufgrund der Vereinfachungen, die im Rahmen der Modellierung vorgenommen werden, werden diese verschiedenen Arten von Heizkesseln durch denselben Type (Type 700 [TESS12]) abgebildet, der lediglich durch unterschiedliche Nutzungsgrade parametriert wird.

<u>Fernwärme</u>

Die Abbildung der Fernwärmeversorgung erfolgt in diesem Modell mittels einer Hausanschlussstation (HAST), die als Wärmeübertrager das Fernwärmenetz mit dem Heizkreis des MFH verbindet. Zur Dimensionierung des Wärmeübertragers ist die Angabe einer temperaturspezifischen Übertragungsleistung $UA_{HAST,MFH} = 5{,}5\frac{kW}{K}$ im MFH und $UA_{HAST,EFH} = 3{,}1\frac{kW}{K}$ im EFH in Abhängigkeit der zu deckenden Spitzenlast erforderlich [Danfoss16]. Zur Auslegung dieses Parameters und für die exergetische Auswertung ist das Temperaturniveau der Fernwärmeversorgung $T_{FW,in}$ von hoher Relevanz, welches hier mit $\vartheta_{FW,in} = 90\,°C$ im Niedertemperatur-Betrieb angenommen wird. Eine weitere Verringerung dieses Temperaturniveaus bietet hinsichtlich der exergetischen Bewertung ein hohes Einsparpotenzial [Bargel10], kann hier jedoch aufgrund der hohen Vorlauftemperaturen des Heizsystems der Bestandsgebäude nicht realisiert werden.

<u>Wärmepumpe</u>

Die Wärmepumpen in diesem Modell werden als Luft-Wasser-Wärmepumpen abgebildet, da diese im Vergleich zu erdwärme- oder abwassernutzenden Wärmepumpen am häufigsten im deutschen Gebäudebestand vertreten sind [Appelhans14]. Die Abbildung der Wärmepumpen erfolgt dabei über den Type 941 [TESS12], der diese Temperaturdifferenz

sowie die erforderliche Wärmeleistung als Eingangsgrößen übergeben bekommt und daraus die Verdichterleistung errechnet. Hierzu wird dem Type eine Kennlinie vorgegeben, die den Zusammenhang zwischen Umgebungstemperatur der Außenluft, Vorlauftemperatur des sekundären Heizkreises und COP (Coefficient of Performance) definiert. Die verwendeten Kennlinien entstammen den Datenblättern der Wärmepumpen-Hersteller Dimplex [Dimplex09] und Viessmann [Viessmann13]. Da sich die Charakteristik von Kennlinien realer Wärmepumpen mit der Nennleistung und der maximal erreichbaren Versorgungstemperatur verändert, werden für jedes TWW-Temperaturniveau unterschiedliche Kennlinien eingelesen, sodass ein möglichst effizienter Betrieb realisiert werden kann. In Verbindung mit einem TWW-Temperaturniveau von 60 °C kommt dabei eine zweistufige Hochtemperatur-Wärmepumpe zum Einsatz, da diese Vorlauftemperaturen von bis zu 75 °C ermöglicht, reguläre Luft-Wasser-Wärmepumpen hingegen nur Vorlauftemperaturen von maximal 60 °C erreichen [Dimplex09].

Solarthermie

Die Nutzung von Solarthermie findet im Rahmen der Simulationsvarianten ausschließlich in Kombination mit anderen Wärmeerzeugern statt, indem ein zentraler Pufferspeicher gemeinsam versorgt wird. In diesem Modell wird als Kollektortyp ein Flachkollektor mit einem Wirkungsgrad von 80 % bei 0 K Temperaturdifferenz zwischen Außenluft und Kollektor angenommen. Im Gegensatz zu anderen Erzeugereinheiten erfolgt die Integration der Solaranlage in das Modell nicht über die Vorgabe bedarfsseitiger Wärmeströme. Die Solaranlage, deren Kollektor in TRNSYS durch den Type 832 [Haller12] abgebildet wird, generiert stattdessen Wärme in Abhängigkeit der solaren Einstrahlung (vgl. Abb. 9-2 in Kapitel 9.2.1.1) und der Temperaturbedingungen im Speicher. Die so erzeugte Wärme senkt damit den Bedarf, der an die eigentliche Erzeugereinheit abfällt. Die Größe der Solaranlage wird über die Kollektorfläche parametrisiert, welche nach dem Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz (EEWärmeG) mindestens 3 % der Wohnfläche in MFH betragen muss, um eine solare Deckungsrate von 15 % zu gewährleisten [Wiemken08]. Alternative Auslegungsformeln geben die Kollektorfläche in Abhängigkeit der Bewohneranzahl an (beispielsweise 1 m² pro Person) [Dimplex10]. In Anlehnung an diese Auslegungskriterien wurde die abgebildete Kollektorfläche des MFH mit 20 m² und die des EFH mit 4 m² festgelegt. Das Kältemittel in dem Solarthermie-Speicher-Kreis wird als dreißigprozentiges Glykolwassergemisch mit einer spezifischen Wärmekapazität $c_{p,G} = 3{,}7 \frac{kJ}{kg*K}$ angenommen [KÜHLSOLE12].

9.1.3 Simulationsmatrix

Zur vergleichenden Gegenüberstellung und Bewertung verschiedener energetischer Aspekte bei der Wärmeversorgung von Gebäuden ist die Variation systemrelevanter Parameter notwendig. Hierzu werden Simulationsvarianten definiert, die durch die Berücksichtigung von verschiedenen Arten der TWW-Bereitung, Wärmeerzeugung, Raumbeheizung und Gebäudedämmung eine ganzheitliche Analyse des Gesamtsystems ermöglichen. Die Varianten wurden im Zuge eines Projekttreffens unter der Mitwirkung aller Projektpartner festgelegt. [Kallert17]. Das Ziel der Variantenerhebung ist dabei die Abbildung realistischer Versorgungsszenarien im Rahmen eines Technologievergleichs. Auf eine vollständige Kombination aller Parameterwerte wird daher bewusst verzichtet. Die Modelle des Ein- und Zweifamilienhaus werden bei der Variierung der Parameter getrennt betrachtet, ähneln sich jedoch hinsichtlich ihrer Simulationsvarianten. Die Parametervariationen werden bei der Modellierung in das Simulationsmodell integriert. Eine tabellarische Übersicht aller Simulationsvarianten mit den zugehörigen veränderlichen Parametern wird am Ende des Kapitels in Tab. 9-8 und Tab. 9-9 dargestellt. Im Folgenden wer-

den die Parameter und ihre Variationen erläutert sowie eine Referenzvariante als Grundlage der Bewertung verschiedener Varianten definiert.

9.1.3.1 Detaillierte Beschreibung der Untersuchungsparameter

Gebäudeenergiestandard (Baualtersklassen und Sanierungsgrad)

Die Baualtersklasse und der Sanierungsgrad sind jeweils Parameter, die insbesondere den Gebäudeenergiestandard der thermischen Hülle beeinflussen (vgl. Kapitel 9.1.1.3). Die Variation der Baualtersklasse ist darüber hinaus auch für die Gebäudegeometrie und die Auslegung der TWV von Relevanz (vgl. Tab. 9-4 und Tab. 9-5 in Kapitel 9.1.2.2). Die Aufteilung der Baualtersklassen erfolgt nach den Zeiträumen der Gültigkeit bestimmter Wärmeschutzverordnungen. So bezieht sich die Baualtersklasse „<1978“ auf Gebäude mit einem Baujahr vor der ersten deutschen Wärmeschutzverordnung. An diese Gebäude wurden keine verbindlichen Anforderungen an die Außendämmung erhoben und sie stellen zudem die Mehrheit des deutschen Gebäudebestands dar. Die Baualtersklasse „1978-1994“ entspricht dem Zeitraum zwischen dem Inkrafttreten der ersten Wärmeschutzverordnung und ihrer zweiten Novellierung. Die modernste Baualtersklasse repräsentiert einen Neubau nach KfW70-Standard, der durch die Energieeinsparverordnung von 2009 definiert ist. Die Sanierungsgrade stellen eine simple Variation des Wärmedurchgangskoeffizienten der thermischen Hülle der Bestandsgebäude dar. Sie unterscheiden sich dabei nach dem bestehenden Zustand ohne Sanierung (IST), einer guten (GUT) und einer sehr guten (SEHR GUT) Sanierung (vgl. Kapitel 9.1.1.3). Die hier beschriebene Einteilung der Gebäude und die zugehörigen Gebäudeenergiestandards entstammen der umfassenden Gebäudetypologie des Instituts Wohnen und Umwelt (IWU) [IWU15].

Übergabesystem

Das Übergabesystem der Raumheizung wird bei Bestandsgebäuden mit Radiatoren und beim Neubau als Fußbodenheizung abgebildet. Diese Systeme unterscheiden sich insbesondere in der Höhe der Vorlauftemperatur und ihrer thermischen Trägheit (vgl. Kapitel 9.1.2.1). Beide Faktoren haben dabei einen wesentlichen Einfluss auf die notwendige Leistung und Taktzeit der Erzeugereinheit und sind somit relevant für diese Untersuchung.

Wärmeerzeugung

Die Wärmeerzeugung wird durch die Abbildung verschiedener, auf fossilen oder regenerativen Energiequellen basierender Erzeugertechnologien variiert (vgl. Kapitel 9.1.2.4). Die Auswahl der Erzeuger und ihre Zuordnung zu den Gebäudetypen hat zum Ziel den realen Versorgungstand in Deutschland im Rahmen gewisser Vereinfachungen zu repräsentieren. So werden Erdgas-Kessel mit Brennwert- (BW) und Niedertemperatur-Technologie (NT) als einzige fossile und verbrennungsbasierte Erzeuger abgebildet, da Heizöl in der energetischen Auswertung ein ähnliches Verhalten aufweist. Zudem wird der Brennwert-Kessel im Bestand mit Baujahr vor 1978 nicht abgebildet, da diese Technologie erst in den 1980er Jahren entwickelt wurde [Vetter81]. Ebenso wird der Niedertemperatur-Kessel im Neubau nicht berücksichtigt, da hier die Brennwert-Technologie bei einer Erdgas-Versorgung dem Standard entspricht [ITG16]. Die Fernwärmeversorgung wird bei allen Baualtersklassen berücksichtigt, da diese sowohl im Bestand als auch im Neubau mit einem relevanten Anteil vertreten ist. Bei dem Einsatz von Wärmepumpen ist eine wirtschaftliche Nutzung hingegen nur im Zusammenhang mit einem hohen Gebäudeenergiestandard und niedrigen Vorlauftemperaturen des Heizsystems möglich, sodass Wärmepumpen lediglich im Neubau abgebildet werden [StMWi16]. Die Verwendung von Holzpellets stellt mit 5,3 % einen eher geringen Anteil der Wärmeerzeugung im Wohnungsneubau dar, wird jedoch bei dieser Untersuchung als einziger Vertreter der Biomas-

se berücksichtigt [BDEW 2016b; BDEW 2017]. Solarthermiekollektoren werden nur als unterstützende Erzeugertechnologie in Verbindung mit größeren Speichern abgebildet, da die solaren Wärmeeinträge während der Heizperiode nicht ausreichen um eine alleinige Deckung des Nutzenergiebedarfs zu ermöglichen [Loga12]. Eine Übersicht zu der Verteilung der im Wohnungsbestand und Wohnungsneubau eingesetzten Wärmeerzeuger ist in Abb. 9-9 dargestellt.

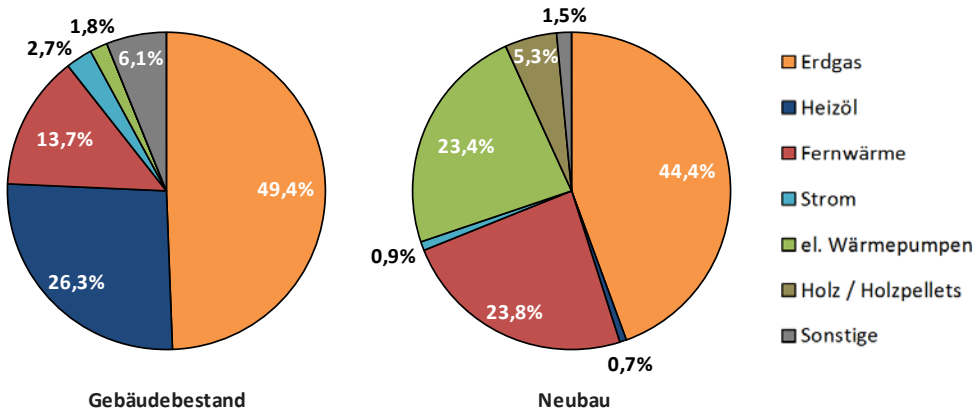


Abb. 9-9 Verteilung der Erzeugertechnologien im Gebäudebestand und Neubau im Jahr 2016 [BDEW 2016b; BDEW 2017]

Trinkwassererwärmung und Speichervolumen

Die Trinkwassererwärmung erfolgt bei dieser Variantenauswahl zentral und variiert zwischen Speicher- und Durchflussprinzip. Es werden dabei alle Varianten des Bestands im Speicherprinzip abgebildet, da dies dem Standardfall im deutschen Gebäudebestand entspricht [IWU15]. Das Durchflussprinzip mit Pufferspeicher wird ausschließlich im Neubau in Verbindung mit regenerativen Erzeugern berücksichtigt. Im Neubau des MFH wird zusätzlich eine Fernwärme-Variante im Durchflussprinzip und ohne Pufferspeicher abgebildet, da die Wärmeversorgung mittels Fernwärme nicht zwingend eine verbraucherseitige Speicherung benötigt und somit keine Wärmeverluste durch einen Speicher entstehen. Die Speichergröße wird unter Berücksichtigung des Baualters, des TWE-Prinzips, der Art der Wärmeerzeugung und der Personenbelegung bestimmt (vgl. Kapitel 9.1.2.3). So wird der TWW-Speicher im Speicherprinzip aufgrund der geringeren Entnahmeleistung wesentlich kleiner dimensioniert als der Pufferspeicher im Durchflussprinzip, der zusätzlich auch das Heizsystem versorgt. Der Speicher im EFH ist grundsätzlich kleiner als im MFH. Zudem fördern höhere Speichervolumen die Effizienz regenerativer Erzeuger, wie der Wärmepumpe oder Solaranlage, da sie so bei günstigen Umgebungsbedingungen mehr Wärme speichern können. Zur exakten Bestimmung des Speichervolumens dienen Planungsunterlagen der Hersteller und weitere Literaturwerte [Diefenbach02; Recknagel11; Viessman17].

Zirkulation

Ein Trinkwarmwasser-Zirkulationssystem ist gemäß DVGW W 551 in Großanlagen, wie sie im hier abgebildeten MFH vorliegt, vorgeschrieben. Einfamilienhäuser sind grundsätzlich von dieser Regel ausgenommen, jedoch sind auch hier Zirkulationssysteme insbesondere in älteren Bestandsbauten anzufinden. Der Neubau des EFH wird ohne Zirkulation abgebildet, da hier oft zur Vermeidung der Wärmeverluste des Zirkulationssystems auf ein solches verzichtet wird [IWU15].

TWW-Temperaturniveau

Das TWW-Temperaturniveau bezieht sich auf die Temperatur des TWW am Auslass des TWE. Da die TWI in dem hier abgebildeten MFH gemäß dem technischen Regelwerk einer Großanlage entspricht, ist hier eine TWW-Temperatur von 60 °C einzuhalten. Für Einfamilienhäuser schreibt das Regelwerk kein Temperaturniveau vor, empfiehlt jedoch ebenso eine TWW-Temperatur von 60 °C am Auslass des TWE. Im Rahmen dieser Arbeit wird der Einfluss einer Absenkung dieses Temperaturniveaus auf den Energie- und Exergiebedarf des Gesamtsystems analysiert. Hierzu wird eine Variation des Temperaturniveaus in den Simulationsvarianten vorgenommen, indem zu jeder Kombination von Gebäudetyp und Wärmeerzeuger drei Varianten mit den TWW-Temperaturen 60 °C, 55 °C oder 50 °C definiert werden (vgl. Tab. 9-8 und Tab. 9-9). Ein TWW-Temperaturniveau von 50 °C stellt dabei die in dem DVGW-Arbeitsblatt W 551 geforderte Mindesttemperatur für die TWI in Ein- und Zweifamilienhäusern dar. Die TWW-Temperatur von 55 °C am Erzeugeraustritt wird in den Normungen anderer Länder, wie beispielsweise in Frankreich [JORF05] oder Finnland [NBC07], als Mindestwert festgehalten. Zudem wird bei einem TWW-Temperaturniveau von 55 °C ein hohes energetisches Einsparpotenzial bei gleichzeitiger hygienischer Unbedenklichkeit erwartet. Grundsätzlich gilt, dass bei einer Absenkung der Systemtemperatur Niedertemperatur-Quellen, beispielsweise durch Wärmepumpen, effizienter ausgenutzt werden können.

9.1.3.2 Referenzvariante

Die Definition eines Referenzsystems erfolgte in enger Abstimmung mit den Projektpartnern. Zur Gewinnung einer notwendigen Datengrundlage wurde eine umfassende Literaturrecherche durchgeführt. Die für die Erstellung des Referenzsystems verwendeten Daten basieren daher auf diversen Studien und Statistiken (z. B. der Gebäudetypologie „Tabula“ des Instituts für Wohnen und Umwelt in Darmstadt [IWU15]). Des Weiteren wurden Parameter, welche bei der Auswertung der akquirierten Objekte (vgl. Kapitel 2 und Kapitel 3) erhoben worden, berücksichtigt. Dadurch ist gewährleistet, dass das Referenzsystem den Querschnitt des deutschen Gebäudebestands abbildet, aber auch mit den Parametern der akquirierten Gebäude vereinbar ist. Da die Mehrheit der akquirierten Gebäude der Wohnnutzung unterliegen, wurden Referenzsysteme für Ein- als auch Mehrfamilienhäuser definiert.

Bezugnehmend auf die Baualtersklasse wurde den Gebäuden ein Baujahr bis 1978 zugeordnet, da diese den überwiegenden Gebäudebestand in Deutschland ausmachen [IWU15]. Der Definition dieser Altersklasse liegt eine Vereinfachung der Gebäudetypen gemäß [Kallert18] zugrunde. Weiterhin spiegeln die Gebäude dieser Altersklasse den Status-Quo der Installationen und den aktuell vorherrschenden Sanierungsgrad der betrachteten Gebäude wider (vgl. Kapitel 9.1.1.3). Als Wärmeerzeuger ist ein Erdgas-Niedertemperaturkessel mit einem in DIN V 18599-5 beschriebenen exergetischen Wirkungsgrad η_{Nutz}=0,88 vorgesehen, da Erdgas mit ca. 50 % Verbreitungsgrad der am häufigsten eingesetzte Brennstoff ist (vgl. Abb. 9-9) und Gas-Niedertemperaturkessel den Standardfall im betrachteten Gebäudebestand darstellen [Diefenbach02]. Solarkollektoren sind in dem Referenzsystem nicht installiert. Die Übergabe der Heizwärme erfolgt über außentemperaturgeführte Niedertemperatur-Heizkörper (Radiatoren), welche nach [Diefenbach02] der Standardannahme für Übergabesysteme entsprechen. Zur Trinkwassererwärmung wird im Referenzsystem das Speicherprinzip angewandt. Der dafür eingesetzte TWW-Speicher wird in der Einfamilienhaus-Variante mit einer Speichergröße von 250 L und in der Mehrfamilienhaus-Variante mit einer Speichergröße von 500 L parametriert. In Abstimmung mit den in Arbeitspaket V getroffenen Annahmen wird die TWW-Temperatur auf 60 °C und die TWK-Temperatur auf 10 °C festgelegt. Des Weiteren ist

für die Trinkwasserversorgung im Referenzsystem eine Zirkulationsleitung vorgesehen, da auch dies dem Standard des deutschen Gebäudebestands entspricht [IWU15].

In Tab. 9-6 (EFH) und Tab. 9-7 (MFH) findet sich eine Übersicht der Daten für das gewählte Referenzsystem.

Tab. 9-6 Parameter des Referenzsystems für Einfamilienhäuser

Baualtersklasse	Baujahr bis 1978 / vor WSchV 1977
Nutzungsprofil (Raumwärme):	• 4 Personenhaushalt • Raumsoll-Temperatur: 20 °C • Lüftung: Unkontrolliert • Luftwechselrate: 1,0 1/h • Nachtabsenkung: auf 17 °C für 7h
TWW	• Temperaturniveau: 60 °C • Zirkulation: ja
Zapfprofil TWW EFH	Gemäß Tapping-Cycles [EU Comission 2002]: „Mittlerer Verbrauch“ (4 Personenhaushalt)
Zapfprofil TWK EFH	Gemäß DVGW W 510 mit konstanter TWK-Eintrittstemperatur von 10 °C nach DIN V 18599-8
Erzeuger	Gas-Niedertemperatur (η_{Nutz}=0,88)
Heizung	Außentemperaturgeführte Niedertemperatur-Heizkörper
Speicher	Zentrales Speichersystem (TWW-Speicher) mit 250 L Speichergröße

Tab. 9-7 Parameter des Referenzsystems für Mehrfamilienhäuser

Gebäudestandard	Baujahr bis 1978 / vor WSchV 1977
Nutzungsprofil (Raumwärme):	• 6 Wohneinheiten. Verteilung auf WE: 2*2 Pers, 2*4 Pers, 2*6 Pers (insg. 24 Personen) • Raumsoll-Temperatur: 20 °C • Lüftung: Unkontrolliert • Luftwechselrate in Abhängigkeit des Nutzertypen: 0,86…1,16 1/h • Nachtabsenkung: auf 17 °C
TWW	• TWW-Temperaturniveau: 60 °C • Zirkulation: ja
Zapfprofil TWW MFH	Gemäß Tapping-Cycles [EU Comission 2002]: niedrig (2 Pers), mittel (4 Pers), hoch (6 Pers)
Zapfprofil TWK MFH	Gemäß DVGW W 510 mit konstanter TWK-Eintrittstemperatur von 10 °C nach DIN V 18599-8
Erzeuger	Gas-Niedertemperatur (η_{Nutz}=0,88)
Heizung	Außentemperaturgeführte Niedertemperatur-Heizkörper
Speicher	Zentrales Speichersystem (TWW-Speicher) mit 500 L Speichergröße

Die Parameterkonfiguration der Referenzvariante ist zudem in Tab. 9-8 und Tab. 9-9 farblich markiert.

Tab. 9-8 Untersuchungsmatrix des MFH (Technologievergleich)

Baualters-klasse	Personen-belegung	Heizfläche	Wärmeerzeuger	Solar-thermie	Speicher-medium	Speicher-größe	Trinkwasser-erwärmung	TWW-Zirkulation	TWW-Temperaturniveau
< 1978 (WSchVo77)	2x2 Personen, 2x4 Personen, 2x6Personen	Heizkörper	Niedertemperatur Erdgas	-	TWW	500 Liter	Speicherprinzip	Zirkulation	60°C, 55°C, 50°C
			Fernwärme						
1978-1994	2x2 Personen, 2x4 Personen, 2x6Personen	Heizkörper	Niedertemperatur Erdgas	-	TWW	500 Liter	Speicherprinzip	Zirkulation	60°C, 55°C, 50°C
			Brennwert Erdgas						
			Fernwärme						
KfW70 (EnEV 2009)	2x2 Personen, 2x4 Personen, 2x6Personen	Fußboden-heizung	Brennwert Erdgas	-	TWW	400 Liter	Speicherprinzip	Zirkulation	60°C, 55°C, 50°C
			Wärmepumpe	-	Heizungs-wasser	2000 Liter	Zentrales Durchflussprinzip		
				20 m²					
			Fernwärme	-	TWW	400 Liter	Speicherprinzip		
					-	-	Zentrales Durchflussprinzip		
			Holzpellets	-	Heizungs-wasser	2000 Liter	Zentrales Durchflussprinzip		
				20 m²					

Tab. 9-9 Untersuchungsmatrix des EFH (Technologievergleich)

Baualters-klasse	Personen-belegung	Übergabe-system	Wärmeerzeuger	Solar-thermie	Speicher-medium	Speicher-größe	Trinkwasser-erwärmung	TWW-Zirkulation	TWW-Temperaturniveau
< 1978 (WSchVo77)	4 Personen	Heizkörper	Niedertemperatur Erdgas	-	TWW	250 Liter	Speicherprinzip	Zirkulation	60°C, 55°C, 50°C
			Fernwärme						
1978-1994	4 Personen	Heizkörper	Niedertemperatur Erdgas	-	TWW	200 Liter	Speicherprinzip	Zirkulation	60°C, 55°C, 50°C
			Brennwert Erdgas						
			Fernwärme						
KfW70 (EnEV 2009)	4 Personen	Fußboden-heizung	Brennwert Erdgas	-	TWW	200 Liter	Speicherprinzip	-	60°C, 55°C, 50°C
				4 m²		400 Liter			
			Wärmepumpe	-	Heizungs-wasser	600 Liter	Zentrales Durchflussprinzip		
				4 m²					
			Fernwärme	-	TWW	200 Liter	Speicherprinzip		
			Holzpellets	-	Heizungs-wasser	600 Liter	Zentrales Durchflussprinzip		
				4 m²					

9.2 Beschreibung der Bilanzierungsmethodik

Dieses Kapitel beinhaltet die Erläuterung der herangezogenen Bilanzierungsmethodik für die energetische und exergetische Analyse des Gesamtsystems „Gebäude“. Die Simulationsergebnisse aus MFH und EFH werden nach dieser Methodik vollständig äquivalent ausgewertet und in Kapitel 5 dargestellt. Das im Folgenden beschriebene Bilanzierungsverfahren der Energie, erfolgt dabei in Anlehnung an die DIN V 18599, die als Norm eine Grundlage für die ganzheitliche energetische Bewertung von Gebäuden darstellt. Das Verfahren zur Berechnung der Exergie basiert auf der Bilanzierungsmethodik wissenschaftlicher Arbeiten [Bargel10; Schmidt11; Bläse16]. Da sich diese Arbeiten zumeist auf eine wärmenetzbasierte Versorgung mehrerer Gebäude beziehen, werden die Bilanzräume hier für die Untersuchung eines einzelnen Gebäudes und seiner Anlagentechnik angepasst. Grundsätzlich gilt, dass sich beide Formen der Bilanzierung gegenseitig ergänzen, indem die energetische Analyse Wärmeströme und –verluste quantitativ aufzeigt, die exergetische Analyse hingegen die Qualität von Wärmeströmen und eingesetzten Energieträgern berücksichtigt. Da die Bilanzierungsmethodik der exergetischen Analyse nicht geläufig ist, soll diese hier kurz erläutert werden.

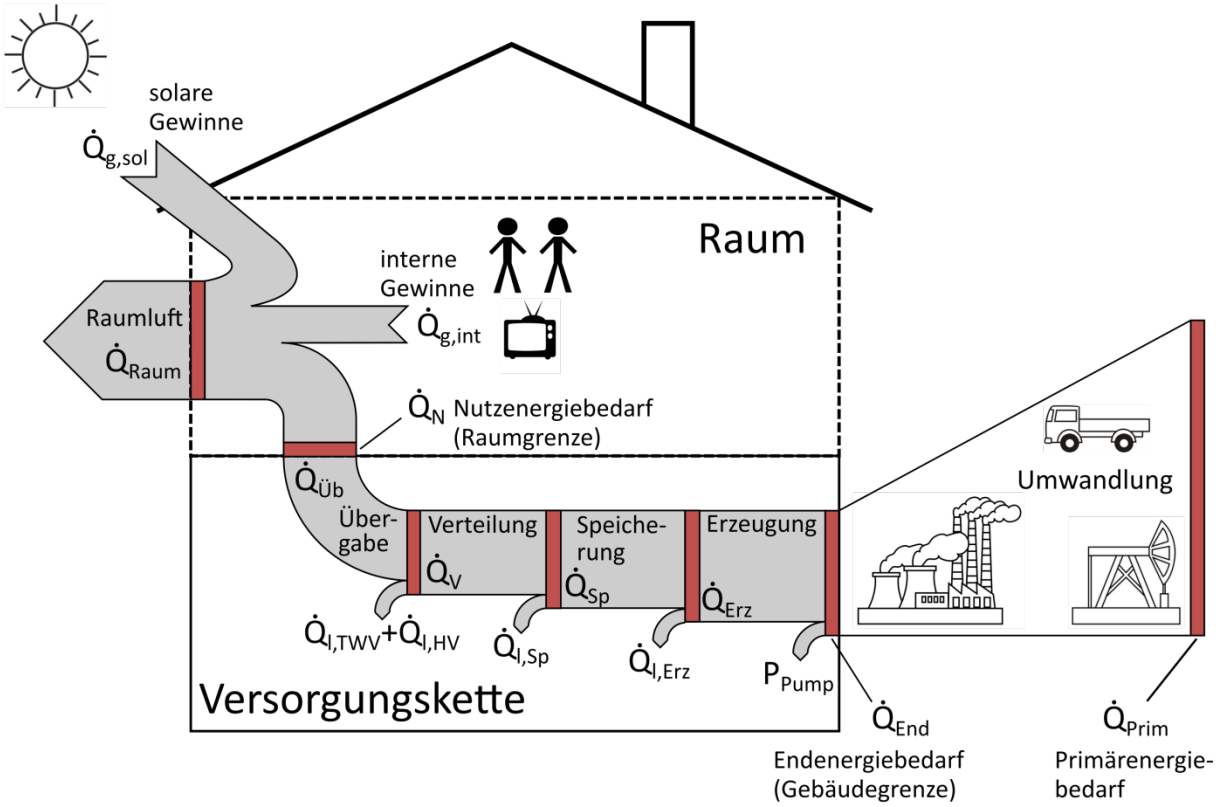


Abb. 9-10 Bilanzräume und Energieströme bei der Wärmeversorgung von Gebäuden in Anlehnung an DIN 4701-10

Die thermodynamische Größe „Exergie“ ist als die maximal nutzbare Arbeit eines Systems definiert, wenn dieses in ein thermodynamisches Gleichgewicht mit seiner Umgebung gebracht wird. Die Exergie beschreibt somit den zur mechanischen oder elektrischen Energie umwandelbaren Anteil der Gesamtenergie eines Systems und ist maßgeblich abhängig von den Umgebungsbedingungen eines Systems. Bei der hier relevanten Berechnung von Wärmeströmen lässt sich deren exergetischer Anteil ermitteln, indem ein Wärmestrom mit seinem Temperaturverhältnis zur Umgebung bilanziert wird. Als

Umgebung wird dabei die Außenluft mit der Außenlufttemperatur T_{amb} angenommen. Die konkrete, im Folgenden angewandte Berechnung der thermischen Exergie lässt sich in die Bilanzierung von Wärmeströmen (Formel (9.7) und (9.8)) und die Bilanzierung von Massenströmen (Formel (9.9)) unterteilen. Zur Berechnung der Exergie eines Wärmestroms $\dot{E}x_Q$ wird der Wärmestrom $\dot{Q}$ mit seiner Temperatur T_Q in das Verhältnis zur Umgebungstemperatur gesetzt. Der Term $\left(1-\frac{T_{amb}}{T_Q}\right)$ entspricht dabei dem Carnot-Faktor und gibt somit die durch den Wärmestrom $\dot{Q}$ maximal nutzbare Arbeit an.

$$\dot{E}x_Q = \left(1-\frac{T_{amb}}{T_Q}\right)\dot{Q} \tag{9.7}$$

Wird der bei einem Fließprozess abgegebene Exergiestrom $\dot{E}x_Q^m$ (Formel (9.8)) betrachtet, so kann die Temperatur des Wärmestroms T_Q auch durch die mittlere logarithmische Temperatur eines Fluidstroms angegeben werden.

$$\dot{E}x_Q^m = \left[1-\frac{T_{amb}}{T_{in}-T_{out}}\ln\left(\frac{T_{in}}{T_{out}}\right)\right]\dot{Q} \tag{9.8}$$

Bei der Bilanzierung eines Massenstroms (Formel (9.9)) wird die Exergie eines vom System an die Umgebung übergehenden Massenstroms mit der Temperatur T_m berechnet. Diese Berechnungsform findet dann Anwendung, wenn Masse nicht in einem geschlossen Heizkreis gefördert wird, sondern das System einseitig verlässt, wie es beispielsweise bei der TWW-Versorgung der Fall ist.

$$\dot{E}x(\dot{m}) = \dot{m}\,c_p\left[(T_m-T_{amb})-T_{amb}\ln\left(\frac{T_m}{T_{amb}}\right)\right] \tag{9.9}$$

Es ist weiterführend zu beachten, dass sich der Exergiebedarf von nicht speicherbaren Energieträgern im Bilanzraum der Primärenergie durch Multiplikation mit einer primärexergetischen Aufwandszahl $f_{Prim,Ex,i}$ berechnet. Ebenso ergibt sich der exergetische Anteil der Endenergie beim Einsatz von Brennstoffen und von Strom aus dem Produkt des Energiebedarfs und eines exergetischen Qualitätsfaktors $f_{End,ex,i}$.

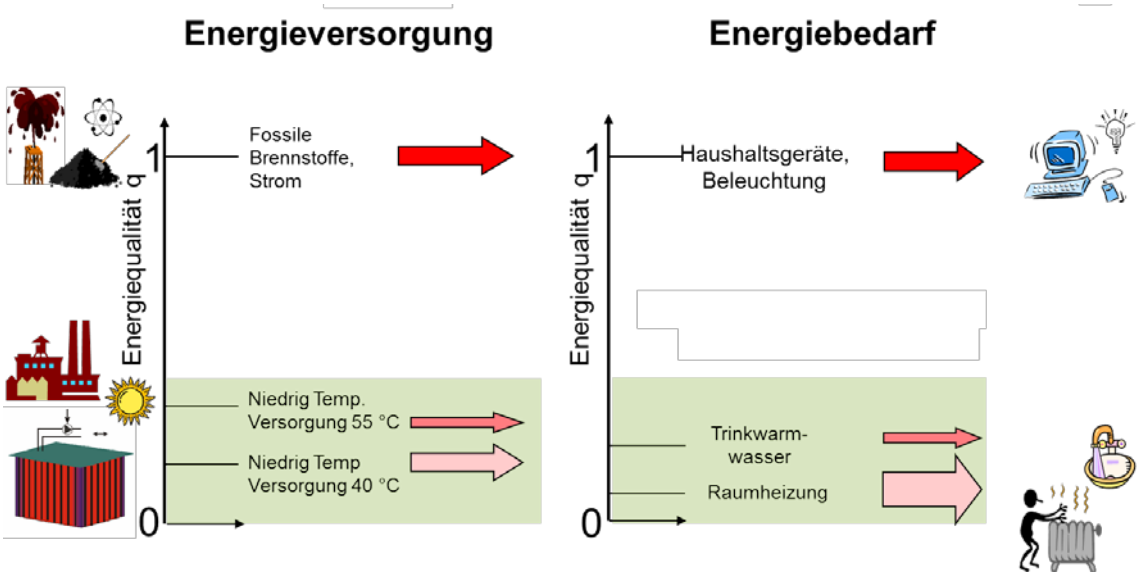


Abb. 9-11 Zugehörigkeit von Energieversorgung und Energiebedarf unter Berücksichtigung der Energiequalität bei einer bedarfsangepassten Versorgung [Schmidt11]

Grundsätzlich wird im Rahmen der exergetische Bilanzierung die Qualität der bei der Versorgung eingesetzten Energieträger mit der bedarfsseitig notwendigen Energiequalität verglichen. Wie in Abb. 9-11 dargestellt, steht die Qualität der Energieversorgung in starker Abhängigkeit zur zugrundeliegenden Energieform. Dies liegt darin begründet, dass gemäß dem zweiten Hauptsatz die verschiedenen Energieformen im unterschiedlichen Maße in eine andere Energie umgewandelt werden können. So können zum Beispiel mechanische und elektrische Energie nahezu vollständig und bei vollem Erhalt des Exergieanteils in andere Energieformen umgewandelt werden. Wärme und innere Energie lassen sich hingegen nur indirekt und nicht vollständig in mechanische oder elektrische Energie umwandeln. In diesem Sinne lässt sich einer Energieform eine hohe oder niedrige Qualität zuordnen.

Die berechneten Energie- und Exergieströme werden hinsichtlich der Auswertung über ein Simulationsjahr integriert, wobei der Simulation ein Zeitschritt von fünf Minuten zugrunde liegt.

Für die sukzessive Bilanzierung des Wärmeflusses in Gebäuden und die Identifizierung von Einsparpotenzialen in der Wärmeversorgung ist die Wahl der Bilanzgrenzen von entscheidender Bedeutung. Die hier gewählten Bilanzgrenzen sind in Abb. 9-10 und Abb. 9-6 dargestellt. Die Bilanzräume sind dabei vergleichbar mit der Kategorisierung der Modellkomponenten in Kapitel 9.1.2. Allgemein gilt für die Bilanzierung eine Betrachtung, die an der Bedarfsseite beginnt, sodass auch die Strukturierung in diesem Kapitel den Bilanzräumen vom Nutz- bis hin zum Primärenergiebedarf entspricht. Nachfolgend wird die Berechnung aller relevanten Energie- und Exergieströme, die im Modell auftreten, detailliert beschrieben.

9.2.1 Nutzenergiebedarf

Der Nutzenergiebedarf $\dot{Q}_N$ ergibt sich allgemein aus dem Wärmebedarf der Raumheizung $\dot{Q}_{N,Heiz}$ und dem Bedarf des Trinkwarmwassers $\dot{Q}_{N,TWW}$.

$$\dot{Q}_N = \dot{Q}_{N,Heiz} + \dot{Q}_{N,TWW} \tag{9.10}$$

Diese Definition bezieht sich auf den Bedarf, der durch die Anlagentechnik und den Wärmeerzeuger gedeckt werden muss. Wird dieser Bilanzraum jedoch um die solaren und internen Gewinne $\dot{Q}_{g,sol}$ und $\dot{Q}_{g,int}$ erweitert, so werden alle Wärmeeinträge der Raumluft $\dot{Q}_{Raum}$ berücksichtigt (vgl. Abb. 9-10).

$$\dot{Q}_{Raum} = \dot{Q}_N + \dot{Q}_{g,int} + \dot{Q}_{g,sol} \tag{9.11}$$

Bei der Bilanzierung des nutzexergetischen Anteils $\dot{Ex}_N$ und des exergetischen Anteils in der Raumluft $\dot{Ex}_{Raum}$ wird dieselbe Aufteilung vorgenommen.

$$\dot{Ex}_N = \dot{Ex}_{N,Heiz} + \dot{Ex}_{N,TWW} \tag{9.12}$$

$$\dot{Ex}_{RL} = \dot{Ex}_N + \dot{Ex}_{g,int} + \dot{Ex}_{g,sol} \tag{9.13}$$

Weiterhin wird der Raumwärmebedarf $\dot{Q}_{N,Heiz}$ aus der Summe der Wärmeeinträge berechnet, die von dem Übergabesystem der Raumheizung (Radiator oder Fußbodenheizung) $\dot{Q}_{RH}$ und von den Verteilungsleitungen des Heizsystems $\dot{Q}_{g,HV}$ und der TWI $\dot{Q}_{g,TWV}$ an die Raumluft abgegeben werden. Durch die Einstellung des Massenstroms des Heizsystems wird dabei die Raumluft-Temperatur T_{Raum} auf einen vorgegebenen Wert geregelt. Der exergetische Raumwärmebedarf $\dot{Ex}_{N,Heiz}$ errechnet sich aus den exergetischen Anteilen der genannten Wärmeströme.

$$\dot{Q}_{N,Heiz} = \dot{Q}_{RH} + \dot{Q}_{g,TWV} + \dot{Q}_{g,HV} \tag{9.14}$$

$$\dot{Ex}_{N,Heiz} = \dot{Ex}_{RH} + \dot{Ex}_{g,TWV} + \dot{Ex}_{g,HV} \tag{9.15}$$

9.2.1.1 Wetterdaten

Die Wetterdaten haben durch die Bestimmung der Umgebungstemperatur T_{amb} (vgl.Abb. 9-1) und der solaren Einstrahlung (vgl. Abb. 9-2) einen maßgeblichen Einfluss auf den Energiebedarf eines Gebäudes. Die solaren Wärmegewinne $\dot{Q}_{g,sol}$ des MFH stehen in starker Abhängigkeit des Flächenanteils und der Orientierung transparenter Bauteile, die in Kapitel 9.1.1.3 beschrieben werden. Die solaren Gewinne beschreiben dabei die Wärmemenge, die durch solare Wärmestrahlung über Fensterflächen in das Haus eingeht und durch innenliegende Bauteile aufgenommen wird. Die Simulationssoftware [TRNBUILD17] berechnet diese Einträge und gibt direkt einen Wert für die solaren Gewinne aus. Der exergetische Anteil dieser Gewinne wird gemäß Formel (9.7) innerhalb der Raumluft bilanziert.

$$\dot{Ex}_{g,sol} = \left(1 - \frac{T_{amb}}{T_{Raum}}\right) \dot{Q}_{g,sol} \tag{9.16}$$

9.2.1.2 Nutzerverhalten

Das Nutzerverhalten beschreibt verschiedene Faktoren mit signifikantem Einfluss auf den Nutzenergiebedarf. Eine Variation des Nutzerverhaltens wird in diesem Modell durch die Abbildung verschiedener Nutzertypen realisiert, die sich wiederum in der Luftwechselrate, den internen Gewinnen und dem Zapfprofil für TWW und TWK unterscheiden.

Die internen Gewinne sind die Wärmeeinträge, die durch die Körperwärme des Menschen oder durch die Abwärme von elektrischen Geräten und Beleuchtung an die Raumluft einer beheizten Zone abgegeben werden. Zur Auslegung dieser Wärmegewinne werden nach DIN EN ISO 7730 personenspezifische Werte für die Wärmeabgabe von Personen $\dot{Q}_{g,int,Pers} = 60W$ und elektrischen Geräten $\dot{Q}_{g,int,El} = 80W$ bestimmt und mit Anwesenheitsprofilen, die das Wohnverhalten der verschiedenen Nutzertypen repräsentieren, multipliziert.

$$\dot{Q}_{g,int} = \dot{Q}_{g,int,Pers}\, f_{Pers} + \dot{Q}_{g,int,El}\, f_{El} \tag{9.17}$$

Die Anwesenheitsprofile sind Zeitfunktionen, die die durchschnittliche Anwesenheit von Personen f_{Pers} und die Anzahl elektrischer Geräte im Betrieb f_{El} über einen Tag abbilden, der über den gesamten Simulationszeitraum wiederholt wird.

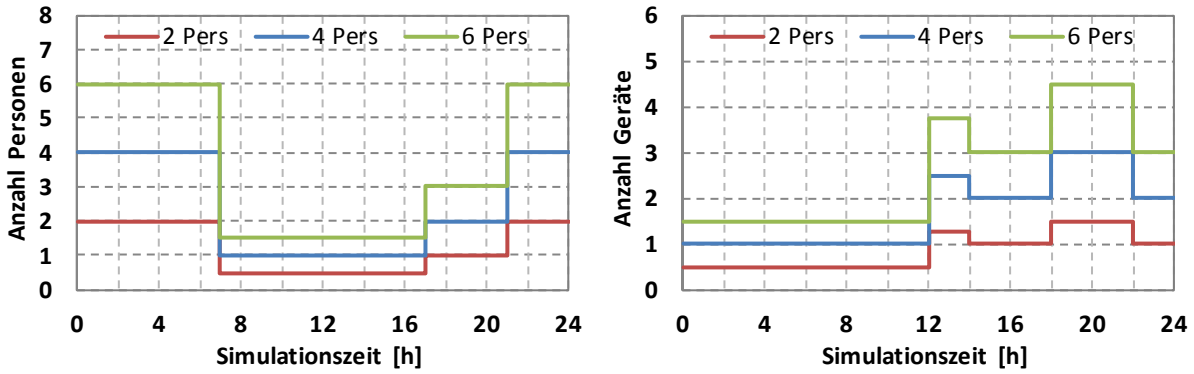


Abb. 9-12 Zeitfunktionen der internen Gewinne: Anwesenheitsprofil (links), Gerätelaufzeit (rechts)

Der exergetische Anteil der internen Gewinne geht, äquivalent zu den solaren Gewinnen, mit dem Temperaturniveau der Raumluft in die Bilanzierung ein.

$$\dot{E}x_{g,int} = \left(1 - \frac{T_{amb}}{T_{Raum}}\right) \dot{Q}_{g,int} \tag{9.18}$$

Weiterhin variiert der Energiebedarf zur Bereitstellung von Trinkwarmwasser in Abhängigkeit des Nutzerverhaltens. Dabei ist es für die Darstellung der Entnahme von TWW und TWK notwendig, Zapfprofile vorzugeben, die das Entnahmevolumen des Trinkwassers pro Zeitschritt und Wohneinheit angeben.

Das entnommene TWW-Volumen wird durch den TWE bei einem durch die Simulationsvariante vorgegebenen TWW-Temperaturniveau bereitgestellt und erfährt in den nachfolgenden Verteilungsleitungen Wärmeverluste und eine einhergehende Abnahme der Temperatur. Der Nutzenergiebedarf des TWW wird dementsprechend als die Wärmemenge definiert, die zur Erwärmung des Trinkwassers bis auf die Entnahmetemperatur $T_{TWV,out}$ benötigt wird, sodass nur die Wärme des austretenden Wassers und nicht die Wärmeverluste in der TWV berücksichtigt werden. Errechnet wird dieser Bedarf nach dem ersten Hauptsatz der Thermodynamik für Fließprozesse (Formel (9.19)) mit dem Massenstrom $\dot{m}_{TWW}$, der durch die Zapfprofile generiert wird, und der spezifischen Wärmekapazität des Wassers $c_{p,W} = 4{,}183 \frac{kJ}{kg*K}$, welche bei 60 °C gilt und vereinfachend für alle Berechnungen dieser Arbeit verwendet wird [VDI13].

$$\dot{Q}_{N,TWW} = \dot{m}_{TWW}\, c_{p,W} \left(T_{TWV,out} - T_{TWK}\right) \tag{9.19}$$

Das TWK wird mit einer konstanten Temperatur $T_{TWK} = 10\,°C$ [DIN V 18599-8] in die TWI eingebracht und wird sowohl dem TWE zur Erwärmung des Wassers als auch der TWK-Verteilung zur direkten Entnahme zugeführt. Ein Nutzenergiebedarf des TWK entsteht dabei nicht. Bei der Bilanzierung des exergetischen Nutzbedarfs des TWW $\dot{E}x_{N,TWW}$ wird berücksichtigt, dass die nutzbare Wärme des entnommenen Wassers in massengebundener Form den Bilanzraum verlässt und jegliche Exergie somit vernichtet wird (vgl. Formel (9.9)).

$$\dot{E}x_{N,TWW} = \dot{m}_{TWW}\, c_{p,W} \left[\left(T_{TWV,out} - T_{amb}\right) - T_{amb}\, \ln\left(\frac{T_{TWV,out}}{T_{amb}}\right)\right] \tag{9.20}$$

9.2.1.3 Raumwärme

Durch den Transmissionswärmeverlust in Abhängigkeit der Gebäudedämmung und die Lüftungswärmeverluste in Abhängigkeit der Luftwechselrate entsteht in den beheizten

Zonen ein Bedarf an Raumwärme $\dot{Q}_{N,Heiz}$. Dieser Bedarf wird vor allem durch die vom Übergabesystem der Raumheizung abgegebene Wärme $\dot{Q}_{RH}$ gedeckt, die innerhalb des Modells berechnet und ausgelesen wird.

Da die Wärme direkt an die Raumluft abgegeben wird, berechnet sich der exergetische Anteil des Nutzenergiebedarfs des Raumheizsystems $\dot{E}x_{RH}$ gemäß Formel (9.7).

$$\dot{E}x_{RH} = \left(1 - \frac{T_{amb}}{T_{Raum}}\right) \dot{Q}_{RH} \tag{9.21}$$

9.2.2 Endenergiebedarf

Der Endenergiebedarf repräsentiert den Gesamtbedarf der Versorgungskette. Das hier angewandte Bilanzierungsverfahren sieht zudem eine separate Berechnung des Energie- und Exergiebedarfs in den einzelnen Bilanzräumen der Versorgungskette (Übergabe, Verteilung, Speicherung und Erzeugung) vor. Aufgrund von energetischen und exergetischen Verlusten steigt der Bedarf über die genannten Bilanzräume bis hin zur Erzeugung stetig an. Der Endenergiebedarf $\dot{Q}_{End}$ und sein exergetischer Anteil $\dot{E}x_{End}$ ergeben sich somit aus dem Bedarf der Wärmeerzeugung $\dot{Q}_{Erz}$ bzw. $\dot{E}x_{Erz}$ und dem Bedarf an Hilfsenergie, der hier in Form des Strombedarfs der Pumpen P_{Pump} auftritt (vgl. Abb. 9-10).

$$\dot{Q}_{End} = \dot{Q}_{Erz} + P_{Pump} \tag{9.22}$$

$$\dot{E}x_{End} = \dot{E}x_{Erz} + \dot{E}x_{Pump} \tag{9.23}$$

Der Energiebedarf der Pumpen wird dabei als direkter Output des Pumpen-Types (Type 742 [TESS12]) im Modell ausgegeben. Der exergetische Anteil des Energiebedarfs der Pumpe $\dot{E}x_{Pump}$ ergibt sich aus dem Produkt des elektrischen Energiebedarfs der Pumpe P_{Pump} und dem exergetischen Qualitätsfaktor für elektrische Energie $f_{End,ex,el} = 1{,}05$ [Barge10; Kallert18].

$$\dot{E}x_{Pump} = P_{Pump}\, f_{End,Ex,el} \tag{9.24}$$

Im Folgenden wird die energetische und exergetische Bilanzierung der Wärmeströme in der Versorgungskette beschrieben.

9.2.2.1 Übergabe

Der Bilanzraum der Übergabe umfasst die Menge an Energie und Exergie, die in die Übergabesysteme eingeht. Grundsätzlich wird der energetische Bedarf der Übergabe $\dot{Q}_{Üb}$ vereinfachend dem Nutzenergiebedarf gleichgesetzt (Formel (9.25)), da an den Heizflächen der Raumheizung keine ungenutzten Wärmeverluste entstehen. Es ist bei genauer Betrachtung jedoch zu beachten, dass dies unter Berücksichtigung der zeitlichen Auflösung nicht mehr korrekt ist, da der eingehende und ausgehende Wärmestrom durch die thermische Pufferwirkung der Raumheizung nicht stationär verläuft. Dieser zeitliche Aspekt kann jedoch vernachlässigt werden, da in der energetischen Bewertung nur der Jahresbedarf an Wärme betrachtet wird und der Puffereffekt des Heizsystems über diesen Zeitraum nicht mehr zum Tragen kommt.

$$\dot{Q}_{Üb} = \dot{Q}_{N} \tag{9.25}$$

Die Exergie in den Bilanzräumen Übergabe und Nutzenergiebedarf ist hingegen unterschiedlich, da die zugrunde liegenden Temperaturniveaus verschieden sind. Der exergetische Anteil des Wärmebedarfs in der Übergabe $\dot{E}x_{Üb}$ ergibt sich dabei aus der Summe des exergetischen Anteils des Nutzenergiebedarfs des TWW $\dot{E}x_{N,TWW}$ sowie dem exergetischen

Anteil der Wärme, die in dem Heizsystem $\dot{E}x_{\ddot{U}b,RH}$ und allen Verteilleitungen $\dot{E}x_{\ddot{U}b,TWV}$, $\dot{E}x_{\ddot{U}b,HV}$ an die Raumluft übergeben wird.

$$\dot{E}x_{\ddot{U}b} = \dot{E}x_{\ddot{U}b,RH} + \dot{E}x_{\ddot{U}b,TWV} + \dot{E}x_{\ddot{U}b,HV} + \dot{E}x_{N,TWW} \tag{9.26}$$

Im Gegensatz zur Berechnung des nutzexergetischen Anteils $\dot{E}x_N$, werden im Bilanzraum der Übergabe zur Quantifizierung der an die Raumluft übergehenden Exergie die Temperaturen des ein- und ausgehenden Wärmestroms der durchströmten Bauteile gemäß Formel (9.8) berücksichtigt. Es ist dabei zu beachten, dass alle Rohrleitungen und Heizflächen einzeln bilanziert werden, da die einzelnen Abschnitte der Verteilung zu unterschiedlichen Zeitpunkten in Abhängigkeit der Heizungsregelung und der Zapfprofile verschieden stark durchströmt werden. Zur Differenzierung der entsprechenden Komponenten werden die Zählindizes *j*, *k*, *l* eingeführt, die den hier angegebenen Formeln entsprechend jede Heizfläche und jede Rohrleitung einbeziehen, die Wärme an die Raumluft abgeben.

$$\dot{E}x_{\ddot{U}b,RH} = \sum_j \dot{m}_{Heiz,j}\, c_{p,W} \left[\left(T_{RH,in,j} - T_{RH,out,j}\right) - T_{amb}\, \ln\left(\frac{T_{RH,in,j}}{T_{RH,out,j}}\right) \right] \tag{9.27}$$

$$\dot{E}x_{\ddot{U}b,HV} = \sum_k \dot{m}_{Heiz,k}\, c_{p,W} \left[\left(T_{HV,in,k} - T_{HV,out,k}\right) - T_{amb}\, \ln\left(\frac{T_{HV,in,k}}{T_{HV,out,k}}\right) \right] \tag{9.28}$$

$$\dot{E}x_{\ddot{U}b,TWV} = \sum_l \dot{m}_{TWW,l}\, c_{p,W} \left[\left(T_{TWW,in,l} - T_{TWW,out,l}\right) - T_{amb}\, \ln\left(\frac{T_{TWW,in,l}}{T_{TWW,out,l}}\right) \right] \tag{9.29}$$

9.2.2.2 Verteilung

Der Bilanzraum der Verteilung umfasst alle Wärmeströme $\dot{Q}_V$, die in die HV und die TWW-Verteilung eingehen. In der energetischen Bilanzierung entspricht dies dem Nutzenergiebedarf $\dot{Q}_N$ zuzüglich der Wärmeverluste der Verteilung $\dot{Q}_{l,TWV}$ und $\dot{Q}_{l,HV}$.

$$\dot{Q}_V = \dot{Q}_N + \dot{Q}_{l,TWV} + \dot{Q}_{l,HV} \tag{9.30}$$

Zur korrekten Berechnung der Wärmeverluste in der Verteilung müssen diese nach den Gebäudezonen Keller (K), Installationsschacht (IS) und Wohneinheit (WE) unterschieden werden, in denen jeweils ein Teil der Verteilung abgebildet ist. Diese Differenzierung ist notwendig, da die Wärmeverluste im Installationsschacht und in den Wohneinheiten als Wärmegewinne $\dot{Q}_{g,TWV}$ und $\dot{Q}_{g,HV}$ zur Deckung des Raumwärmebedarfs gewertet werden können. Diese Gewinne sind nach Formel (9.14) ein Teil des Nutzenergiebedarfs.

$$\dot{Q}_{g,TWV} = \dot{Q}_{l,TWV,IS} + \dot{Q}_{l,TWV,WE} \tag{9.31}$$

$$\dot{Q}_{g,HV} = \dot{Q}_{l,HV,IS} + \dot{Q}_{l,HV,WE} \tag{9.32}$$

Der tatsächliche Wärmeverlust der Verteilung ergibt sich also ausschließlich aus den Verlusten der Rohrleitungen im Keller, welcher als unbeheizte und nicht bewohnte Zone angenommen wird.

$$\dot{Q}_{l,TWV} = \dot{Q}_{l,TWV,K} \tag{9.33}$$

$$\dot{Q}_{l,HV} = \dot{Q}_{l,HV,K} \tag{9.34}$$

Die Berechnung des Exergiebedarfs der Verteilung $\dot{Ex}_V$ erfolgt über die Summierung der in die Heizungsverteilung und in die Trinkwasserverteilung eingehenden Exergie $\dot{Ex}_{HV}$ und $\dot{Ex}_{TWV}$.

$$\dot{Ex}_V = \dot{Ex}_{HV} + \dot{Ex}_{TWV} \tag{9.35}$$

Es wird hierbei sowohl die von dem vorgelagerten Wärmespeicher oder –erzeuger an die Verteilungen abgegebene Wärmemenge als auch das Temperaturniveau des ein- und ausgehenden Massenstroms berücksichtigt (Formel (9.36), (9.37)). Gegenüber den Bedarfswerten der Übergabe werden somit nicht nur die Wärmeverluste der Verteilung sondern auch die Exergieverluste berücksichtigt, die aufgrund des Temperaturabfalls in der Verteilung auftreten.

$$\dot{Ex}_{HV} = \dot{m}_{Heiz}\, c_{p,W} \left[\left(T_{HV,in} - T_{HV,out}\right) - T_{amb}\, \ln\left(\frac{T_{HV,in}}{T_{HV,out}}\right) \right] \tag{9.36}$$

$$\dot{Ex}_{TWV} = \dot{m}_{TWW}\, c_{p,W} \left[\left(T_{TWV,in} - T_{TWV,out}\right) - T_{amb}\, \ln\left(\frac{T_{TWV,in}}{T_{TWV,out}}\right) \right] \tag{9.37}$$

9.2.2.3 Speicherung

Äquivalent zur Bilanzierung des Energiebedarfs der Verteilung, wird der energetische Bedarf der Speicherung $\dot{Q}_{Sp}$ erneut durch die Summe der hier auftretenden Wärmeverluste $\dot{Q}_{l,Sp}$ und des Wärmebedarfs des vorherigen Bilanzraums $\dot{Q}_V$ berechnet.

$$\dot{Q}_{Sp} = \dot{Q}_V + \dot{Q}_{l,Sp} \tag{9.38}$$

Da nicht in jeder Variante die vollständige Wärme des Gesamtsystems gespeichert wird, ist es hinsichtlich einer ganzheitlichen Bilanzierung des Exergiebedarfs nicht ausreichend, die in den Speicher eingehende Wärme zu betrachten. Stattdessen wird in diesem Bilanzraum die von dem vorgeschalteten Erzeuger abgegebene Exergie quantifiziert. Der Massenstrom $\dot{m}_{Erz}$ beschreibt dabei die Menge an Wasser, die durch eine bedarfsseitige Regelung auf eine Erzeuger-Vorlauftemperatur $T_{Erz,out}$ erwärmt wird und an Speicherung oder Verteilung abgegeben wird. Nach der Wärmeabgabe im Heizsystem oder im TWE wird das Wasser im Erzeuger-Rücklauf mit der Temperatur $T_{Erz,in}$ zurückgeführt.

$$\dot{Ex}_{Sp} = \dot{m}_{Erz}\, c_{p,W} \left[\left(T_{Erz,out} - T_{Erz,in}\right) - T_{amb}\, \ln\left(\frac{T_{Erz,out}}{T_{Erz,in}}\right) \right] \tag{9.39}$$

9.2.2.4 Erzeugung

Im Rahmen der hier vorgenommenen, sukzessiven Bilanzierung eines Wohngebäudes, werden in dem Bilanzraum der Erzeugung die bei der Wärmeerzeugung auftretenden Verluste $\dot{Q}_{l,Erz}$ berücksichtigt. Die Wärmeerzeugung erfolgt variantenabhängig durch unterschiedliche Erzeugereinheiten, die mit dem Index i differenziert werden. Rechnerisch ergibt sich der Bedarf der Erzeugung somit aus der Summe der durch die Erzeugereinheit i bereitgestellten Wärme $\dot{Q}_{Sp,i}$ sowie der Wärmeverluste der Erzeugereinheit $\dot{Q}_{l,Erz,i}$. In Szenarien mit mehreren verschiedenen Erzeugertechnologien, beispielsweise bei solarthermischer Unterstützung, wird der Bedarf der jeweiligen Erzeuger addiert.

$$\dot{Q}_{Erz} = \sum_{i}^{n} \left(\dot{Q}_{Sp,i} + \dot{Q}_{l,Erz,i} \right) \tag{9.40}$$

Der exergetische Anteil der Erzeugung $\dot{E}x_{Erz}$ wird gemäß Formel (9.41) ausgewertet. Der Exergiebedarf der jeweiligen Erzeuger $\dot{E}x_{Erz,i}$ ergibt sich dabei durch verschiedene Berechnungsvorschriften, die den qualitativen Aspekt der eingesetzten Energiequelle berücksichtigen.

$$\dot{E}x_{Erz} = \sum_{i}^{n} \left(\dot{E}x_{Erz,i} \right) \tag{9.41}$$

Im Folgenden wird die Berechnung der Wärmeverluste und des Exergiebedarfs der einzelnen Wärmeerzeuger beschrieben.

Kessel

Die in diesem Modell verwendeten Heizkessel werden sowohl nach ihrer Verbrennungstechnologie (Brennwert, Niedertemperatur) als auch nach dem eingesetzten Energieträger (Erdgas, Pellets) unterschieden. Diese Differenzierung äußert sich in verschiedenen Jahresnutzungsgraden der Kesseltypen η_i, die das Verhältnis von abgegebener zu eingesetzter Energie im Laufe eines Jahres angeben. Die Differenz zwischen den ein- und abgehenden Energieströmen wird als Wärmeverlust des Erzeugers $\dot{Q}_{l,Erz,i}$ an die Umgebung abgegeben. Aus diesen Zusammenhängen lässt sich der Wärmeverlust in Abhängigkeit des Nutzungsgrades und der abgegebenen Energie $\dot{Q}_{Sp,K}$ eines Heizkessels berechnen.

$$\dot{Q}_{l,Erz,K} = \left(\frac{1}{\eta_K} - 1 \right) \dot{Q}_{Sp,K} \tag{9.42}$$

Hinsichtlich der exergetischen Bewertung werden die Energieträger mit einem exergetischen Qualitätsfaktor beaufschlagt. Diese Qualitätsfaktoren sowie die Nutzungsgrade werden in Tab. 9-10 in Abhängigkeit des Kesseltypen angegeben. Die hier angegebenen Nutzungsgrade basieren auf Untersuchungen von Kesseln im Bestand [Wolff04] sowie auf Datenblättern der Firma Viessmann, welche alle besprochenen Kesseltypen vertreibt [Vitoplex16; Vitocrossal17; Vitoligno17]. Es ist hierbei zu beachten, dass sich die angegebenen Nutzungsgrade auf den Heizwert beziehen, der gegenüber dem Brennwert die Verdampfungsenthalpie des Wasserdampfes im Abgas des Brennstoffes in der Bilanzierung nicht mit berücksichtigt. Exergetische Qualitätsfaktoren für verschiedene Brennstoffe werden in [Barge10] und [Hepbasli08] angegeben.

Tab. 9-10 Nutzungsgrade der Kesseltypen und exergetische Qualitätsfaktoren der Brennstoffe [Bargel10; Hepbasli08; Wolff04; Vitoplex16; Vitocrossal17; Vitoligno17]

Verbrennungstechnik		Niedertemperatur	Brennwert	Brennwert
Brennstoff		Erdgas	Erdgas	Holz-Pellets
Nutzungsgrad	η_K	0,88	0,98	0,95
ex. Qualitätsfaktor	$f_{End,Ex,K}$	1,04	1,04	1,15

Der exergetische Anteil des Bedarfs der Wärmeerzeugung ergibt sich bei dem Einsatz von Heizkesseln aus dem Produkt von der in Form von Brennstoff eingebrachten Energie und dem exergetischen Qualitätsfaktor des entsprechenden Kesseltypen $f_{End,Ex,K}$.

$$\dot{E}x_{Erz,K} = \left(\dot{Q}_{Sp,K} + \dot{Q}_{l,Erz,K} \right) f_{End,Ex,K} \tag{9.43}$$

Fernwärme

Bei der Bilanzierung der Fernwärmeversorgung wird ein thermischer Wirkungsgrad der Hausübergabestation (HAST) $\eta_{HAST} \approx 1$ angenommen, da die Wärmeverluste hier im Vergleich zu anderen Erzeugereinheiten aufgrund einer geringen Hüllfläche und niedriger Versorgungstemperaturen zu vernachlässigen sind.

$$\dot{Q}_{l,Erz,FW} = 0 \tag{9.44}$$

Darüber hinaus wird in einer speziellen Versorgungsvariante auf die Abbildung einer HAST in Form eines Wärmeübertragers verzichtet, indem die Fernwärme direkt an die Frischwasserstation und die Heizungsverteilung angeschlossen ist, sodass hier weder bei der Erzeugung- noch bei der Speicherung Wärmeverluste entstehen.

Die exergetische Auswertung der Fernwärmeversorgung quantifiziert den an der HAST ein- und ausgehenden Fernwärmestrom gemäß Formel (9.8).

$$\dot{E}x_{Erz,FW} = \left[1 - \frac{T_{amb}}{T_{FW,in} - T_{FW,out}} \ln\left(\frac{T_{FW,in}}{T_{FW,out}}\right)\right] \dot{Q}_{Sp,FW} \tag{9.45}$$

Wärmepumpe

Die Wärmeverluste der Wärmepumpe an die Umgebung $\dot{Q}_{l,Erz,WP}$ werden durch das Modell direkt ausgegeben und erweisen sich zudem, äquivalent zur HAST, als vernachlässigbar. Des Weiteren ist es notwendig, den Anteil an Umgebungswärme $\dot{Q}_{Erz,WP,amb}$ und den Anteil an zugeführter elektrischer Energie $P_{Erz,WP,el}$, die zusammen den Gesamtverbrauch der Wärmepumpenversorgung bilden, voneinander zu differenzieren, da sie in der exergetischen und primärenergetischen Bilanzierung verschieden gewichtet werden. Der exergetische Anteil des Gesamtbedarfs einer Wärmepumpe $\dot{E}x_{Erz,WP}$ ergibt sich somit aus der Summe der elektrischen Exergie $\dot{E}x_{Erz,WP,el}$ und der Exergie der Umgebung $\dot{E}x_{Erz,WP,amb}$.

$$\dot{E}x_{Erz,WP} = \dot{E}x_{Erz,WP,amb} + \dot{E}x_{Erz,WP,el} \tag{9.46}$$

Die elektrische Exergie wird dabei aus dem Energieverbrauch des Verdichters $P_{Erz,WP,el}$ und dem exergetischen Qualitätsfaktor für elektrische Energie $f_{End,Ex,el} = 1{,}05$ [Bargel10; Kallert18] berechnet.

$$\dot{E}x_{Erz,WP,el} = P_{Erz,WP,el}\, f_{End,Ex,el} \tag{9.47}$$

Die Berechnung des Exergieanteils, der durch die Umgebungswärme eingebracht wird, erfolgt über die Temperaturdifferenz, die die Außenluft bei der Wärmeabgabe in der Wärmepumpe erfährt. Die Luft tritt dabei mit der Außenlufttemperatur T_{amb} in die Wärmepumpe ein und verlässt diese auf einem niedrigeren Temperaturniveau $T_{amb,out}$ (Formel (9.48). Da diese Wärmeübergabe somit unterhalb der exergetischen Referenztemperatur T_{amb} stattfindet, ergeben sich für $\dot{E}x_{Erz,WP,amb}$ negative Werte, sodass der Einsatz von Umgebungswärme den Exergiebedarf einer Wärmepumpe aktiv senkt. Der Anteil der Exergie der Umgebungswärme fällt gegenüber dem elektrischen Exergieverbrauch der Wärmepumpe jedoch sehr gering aus.

$$\dot{E}x_{Erz,WP,amb} = \left[1 - \frac{T_{amb}}{T_{amb} - T_{amb,out}} \ln\left(\frac{T_{amb}}{T_{amb,out}}\right)\right] \dot{Q}_{Erz,WP,amb} \tag{9.48}$$

Solarthermie

Die energetische Berechnung der Solarthermieanlage erfolgt nicht über die Addition von abgegebener Wärme und Wärmeverlusten der Erzeugereinheit, sondern durch die Bilanzierung der ein- und ausgehenden Wärmeströme an der Kollektorfläche. Hierbei wird im

Sinne des ersten Hauptsatzes der Thermodynamik die Erwärmung des Massenstroms des Kältemittels $\dot{m}_{ST}$ in der Solaranlage.

$$\dot{Q}_{Erz,ST} = \dot{m}_{ST}\, c_{p,G}\, \left(T_{ST,out} - T_{ST,in}\right) \tag{9.49}$$

Die Berechnung des exergetischen Anteils der solar bereitgestellten Wärme $\dot{E}x_{Erz,ST}$ erfolgt ähnlich der energetischen Auswertung, indem der Wärmestrom des Kältemittels in der Solaranlage in Abhängigkeit zur Außenlufttemperatur bilanziert wird (vgl. Formel (9.8)).

$$\dot{E}x_{Erz,ST} = \dot{m}_{ST}\, c_{p,G} \left[\left(T_{ST,out} - T_{ST,in}\right) - T_{amb}\, \ln\left(\frac{T_{ST,out}}{T_{ST,in}}\right)\right] \tag{9.50}$$

9.2.3 Primärenergiebedarf

Der Primärenergiebedarf berechnet sich aus dem Produkt von Endenergiebedarf und Primärenergiefaktor. Die Primärenergiefaktoren $f_{Prim,i}$ gelten dabei jeweils für den von einer Erzeugereinheit i eingesetzten Energieträger.

$$\dot{Q}_{Prim} = \sum_{i}^{n} \left(\dot{Q}_{Erz,i}\, f_{Prim,i}\right) + P_{Pump}\, f_{Prim,el} \tag{9.51}$$

In Tab. 9-11 werden die momentan gültigen Primärenergiefaktoren aufgeführt sowie die hier verwendeten Primärenergiefaktoren hervorgehoben. In dieser Arbeit wird, äquivalent zur konventionellen, primärenergetischen Bewertung von Wohngebäuden, der Primärenergiefaktor B verwendet, der sich ausschließlich auf die nicht-regenerativen Anteile der Primärenergie bezieht.

Tab. 9-11 Gültige Primärenergiefaktoren in Deutschland nach [WD16]

Energieträger		Primärenergiefaktoren f_{Prim}	
		insgesamt	nicht-regenerativer Anteil
		A	B
fossile Brennstoffe	Heizöl	1,1	1,1
	Erdgas	1,1	1,1
	Flüssiggas	1,1	1,1
	Steinkohle	1,1	1,1
	Braunkohle	1,2	1,2
biogene Brennstoffe	Biogas	1,5	0,5
	Bioöl	1,5	0,5
	Holz	1,2	0,2
Nah-/Fernwärme aus Kraft-Wärme-Kopplung	fossiler Brennstoff	1,3	0,7
	ernerubarer Brennstoff	1,3	0
Nah-/Fernwärme aus Heizwerken	fossiler Brennstoff	1,3	1,3
	ernerubarer Brennstoff	1,3	0,1
Strom	allgemeiner Strommix	2,8	1,8
	Verdrängungsstrommix	2,8	2,8
Umweltenergie	Solarenergie	1	0
	Erdwärme, Geothermie	1	0
	Umgebungswärme	1	0
	Umgebungskälte	1	0

Der exergetische Anteil der Primärenergie ergibt sich nach Formel (9.53) aus dem Produkt des exergetischen Anteils der Endenergie und der primärexergetischen Aufwandszahl $f_{Prim,Ex}$. Für elektrische Exergie gilt dabei eine Aufwandszahl $f_{Prim,Ex,el}$=1,83, die sich aus den Anteilen der einzelnen Energieträger am Strommix und deren exergetischen Wirkungsgraden errechnet [Kallert18; Rösel15]. Die Aufwandszahl der Fernwärme $f_{Prim,Ex,FW} = 0{,}7$ wird vereinfachend dem Primärenergiefaktor für Fernwärme gleichgesetzt. Eine genaue Berechnung der exergetischen Aufwandszahl der Fernwärme bedarf der Bilanzierung der Kraft-Wärme-Kopplung im deutschen Heizkraftwerkpark durch das in [Bargel10; Jentsch10] beschriebene Attributionsprinzip.

$$\dot{E}x_{Prim} = \sum_{i}^{n} \left(\dot{E}x_{Erz,i}\, f_{Prim,Ex,i} \right) + \dot{E}x_{Pump}\, f_{Prim,Ex,el} \tag{9.52}$$

Im Gegensatz zur primärenergetischen Auswertung wird beim primärexergetischen Anteil der Einfluss regenerativer Energien berücksichtigt. Es wird somit deutlich, dass ein direkter quantitativer Vergleich des Energie- und Exergiebedarfs nicht sinnvoll ist.

$$\dot{E}x_{Prim} = \sum_{i}^{n} \left(\dot{E}x_{Erz,i}\, f_{Prim,Ex,i} \right) + \dot{E}x_{Pump}\, f_{Prim,Ex,el} \tag{9.53}$$

Im Gegensatz zur primärenergetischen Auswertung wird beim primärexergetischen Anteil der Einfluss regenerativer Energien berücksichtigt. Es wird somit deutlich, dass ein direkter quantitativer Vergleich des Energie- und Exergiebedarfs nicht sinnvoll ist.

9.3 Primärenergetische und exergetische Wirkungen

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse, die aus dem in Kapitel 9.2 beschriebenen Bilanzierungsverfahren resultieren, dargestellt und vor dem Hintergrund verschiedener Bewertungskriterien diskutiert, die durch die Simulationsvarianten vorgegeben werden (vgl. Kapitel 9.1.3). Die Bewertung erfolgt somit im Rahmen einer vergleichenden Gegenüberstellung ausgewählter Versorgungsszenarien, die sich jeweils in einem relevanten Parameter unterscheiden. Diese Parameter sind der Gebäudeenergiestandard, die Art der Wärmeerzeugung und das TWW-Temperaturniveau. Die in den nachfolgenden Unterkapiteln beschriebenen Energie- und Exergiewerte beziehen sich auf den wohnflächenspezifischen Jahresbedarf eines Bilanzraums in Kilowattstunden, da diese Art der Darstellung zum einen gängig ist und zum anderen den Vergleich der Gebäudetypen mit unterschiedlichen Wohnflächen ermöglicht. In den Kapiteln 9.3.2 bis 9.3.4 erfolgt die energetische und exergetische Bewertung von verschiedenen Gebäudetypen, Wärmeerzeugungstechnologien und TWW-Temperaturniveaus. Zunächst wird in Kapitel 9.3.1 die thermische Wechselwirkung zwischen TWV und Gebäude dargestellt.

9.3.1 Quantifizierung der Wechselwirkung zwischen Gebäude und TWV

Die thermischen Wechselwirkungen zwischen Trinkwasser und Raumluft im Gesamtsystem „Gebäude“ sind ein relevanter Teilaspekt des Forschungsprojekts. Es sollen hierbei sowohl das Verhalten der TWK- und TWW-Temperatur in der TWV als auch die Wärmeeinträge durch die Rohrleitungen quantifiziert werden. Das Trinkwasser in den Rohrleitungen kann dabei sowohl Wärme aufnehmen (TWK) als auch Wärme abgeben (TWW) und wird dementsprechend aufgewärmt oder abgekühlt. Es ist zu beachten, dass eine genaue Untersuchung der gegenseitigen Wechselwirkung von warm- und kaltwasserführenden Leitungen hier nur bedingt durchgeführt werden kann, da dies ein detaillierteres Modell mit höherer zeitlicher Auflösung erfordert (vgl. Kapitel 5 und 6).

Bei einer Bilanzierung des Nutzenergiebedarfs eines Wohngebäudes können TWW-Leitungen als Wärmequelle im Sinne interner Gewinne beschrieben werden [DIN V 18599-8]. Die Wärmeabgabe der TWW-Verteilung an die Raumluft $Q_{g,TWV}$ reduziert gemäß Formel (9.14) den vom Heizsystem zu deckenden Anteil des Raumwärmebedarfs Q_{RH} eines Gebäudes. Der Anteil der nutzbaren Wärmeeinträge durch die TWV berechnet sich somit nach $\frac{Q_{g,TWV}}{Q_N}$ und wird in Abb. 9-13 (MFH) und Abb. 9-14 (EFH) in Abhängigkeit des Gebäudeenergiestandards und des TWW-Temperaturniveaus dargestellt. Es wird deutlich, dass die Wärmegewinne durch die TWW-Verteilung im Vergleich zu anderen internen und solaren Gewinnen, die einen Anteil am Primärenergiebedarf zwischen 10 % und 30 % aufweisen, eher gering ausfallen. Grundsätzlich sinken bei einer Reduzierung des TWW-Temperaturniveaus von 60 °C auf 55 °C und 50 °C die Wärmeeinträge auf Grund der geringeren Temperaturdifferenz zwischen TWW und Umgebungsluft. Des Weiteren wird bei Betrachtung des MFH (Abb. 9-13) deutlich, dass bei einer guten Dämmung der Gebäudehülle (KfW70) der eingehende Wärmeanteil größer ist als bei Bestandsgebäuden, da der Nutzwärmebedarf Q_N als Bezugsgröße entsprechend kleiner ist. Demgegenüber weisen die in Abb. 9-14 dargestellten Wärmeanteile ein gegenteiliges Verhalten auf, da der Neubau im EFH ohne Zirkulation abgebildet wird und die Wärmeeinträge somit deutlich geringer sind. Bei einem EFH-Neubau mit Zirkulation wäre ein Wert von bis zu 3 % zu erwarten. Es lässt sich somit feststellen, dass die Anteile der Wärmeeinträge im EFH im Vergleich zum MFH ungefähr doppelt so groß sind. Dies lässt sich insbesondere darauf zurückführen, dass die Steigleitungen und das Zirkulationssystem im MFH in einem Treppenhaus abgebildet werden und somit nur indirekt Wärme an die beheizten Zonen abgeben.

Wesentliche Einflussgrößen für den hier beschriebenen Wärmeübergang sind neben der TWW-Temperatur die Raumlufttemperatur, die Rohrdämmung und das Leitungsvolumen sowie die Anzahl und Dauer von Zapfvorgängen. Da die Wärmeeinträge ungeregelt auftreten, sind sie einer Raumheizung nicht äquivalent und grundsätzlich kritisch zu bewerten, da sie gleichzeitig die Wärmeverluste des TWW repräsentieren und somit dessen Hygiene und Komfort abträglich sind. Es ist zudem zu beachten, da für die hier angegebenen Werte nur Wärmeeinträge innerhalb der Heizperiode berücksichtigt werden. Außerhalb der Heizperiode führen die Wärmeeinträge $Q_{g,TWV}$ zu einer ungewollten Erwärmung der Raumluft und damit zu einem Kühlbedarf, der bei der Verwendung eines Kühlsystems berücksichtigt werden muss.

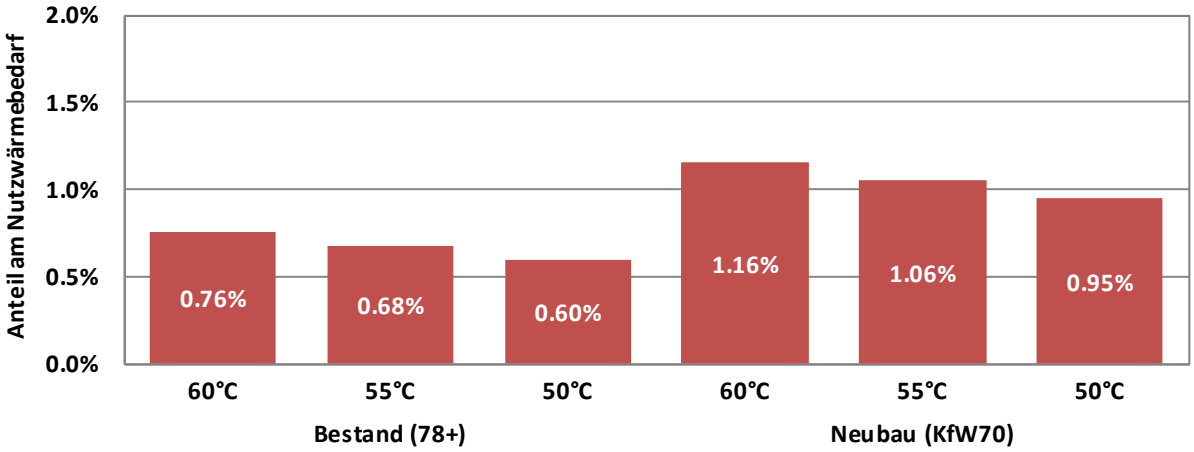


Abb. 9-13 Anteil der Wärmeeinträge durch die TWW-Verteilung am Nutzwärmebedarf eines MFH bei Variation des Gebäudeenergiestandards und des TWW-Temperaturniveaus

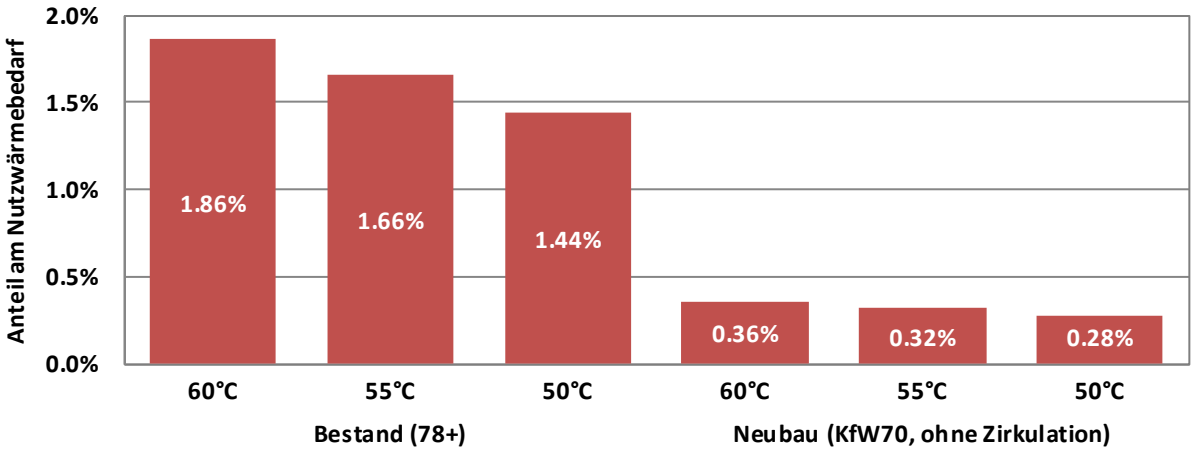


Abb. 9-14 Anteil der Wärmeeinträge durch die TWW-Verteilung am Nutzwärmebedarf eines EFH bei Variation des Gebäudeenergiestandards und des TWW-Temperaturniveaus

Die Wechselwirkungen zwischen Gebäude und TWV resultieren weiterhin in der Angleichung der Trinkwasser-Temperaturen an die Raumlufttemperatur. Diese Angleichung ist ein permanenter Prozess, der durch die Dämmung der Rohrleitungen verlangsamt, aber nicht gänzlich verhindert werden kann. Vor dem Hintergrund hygienischer Anforderungen an das Trinkwasser sind hierbei längere Verweilzeiten des Trinkwassers bei einem Temperaturbereich zwischen 30 °C und 45 °C besonders kritisch zu bewerten, da das Legionellen-Wachstum in diesem Bereich besonders ausgeprägt ist [Kistemann12b].

Das Temperaturverhalten des Trinkwassers wird in Form von Carpet-Plots dargestellt, indem die Temperaturen des Trinkwassers aus jedem Simulationszeitschritt in einem zeitlichen Raster angeordnet und entsprechend ihres Werts eingefärbt werden. Auf der horizontalen Achse wird dabei ein Tag und auf der vertikalen Achse ein Jahr abgebildet, sodass sowohl der Einfluss des Zapfprofils als auch jahreszeitliche Effekte sichtbar werden. Die Carpet-Plots in Abb. 9-15 bis Abb. 9-22 zeigen den Temperaturverlauf in Steig- und Stichleitungen für TWW und TWK. Da die Zapfprofile nach 24 Stunden Simulationszeit stets wiederholt werden, entstehen horizontale Linien, die die Entnahmevorgänge

repräsentieren, wobei die farbliche Intensität einen Rückschluss auf das Entnahmevolumen zulässt.

In Abb. 9-15 (MFH) und Abb. 9-16 (EFH) wird jeweils der Temperaturverlauf des TWW in den Stichleitungen der unterschiedlichen Baualtersklassen verglichen. Es wird dabei insbesondere der Einfluss der thermischen Trägheit des Gebäudes auf das Temperaturverhalten des Trinkwassers sichtbar. Aufgrund der besseren Gebäudedämmung und der höheren thermischen Speicherfähigkeit im Neubau (Fußbodenheizung) können hier die hohen, sommerlichen Raumluft-Temperaturen bis in den September/Oktober gehalten werden, sodass auch das TWW in diesen Monaten weniger stark abkühlt. Im Gegensatz dazu stehen die Raumluft-Temperaturen im Bestandsgebäude in stärkerer Abhängigkeit zur Umgebung, wodurch auch kurzzeitige, witterungsbedingte Schwankungen im Temperaturverlauf des TWW deutlicher sichtbar werden. Ferner wird in Abb. 9-15 der Einfluss der Rohrleitungsdämmung (vgl. Tab. 9-4 und Tab. 9-5) verdeutlicht. Die bessere Dämmung im Neubau sorgt dabei für eine langsamere Abkühlung des TWW zwischen den Zapfvorgängen, stellt aber dennoch nur bedingt eine Maßnahme zur Vermeidung des hygienisch kritischen Temperaturbereichs dar. Im EFH (Abb. 9-16) ist das Temperaturverhalten des TWW im Neubau aufgrund eines fehlenden Zirkulationssystems weniger konstant. Ohne das Zirkulationssystem ist das in die Stichleitung eintretende Wasser bei einer entsprechenden Stagnationszeit abgekühlt und muss abgezapft werden damit das TWW die Komforttemperatur $T > 45\,°C$ erreichen kann. Bei Entnahmevorgängen mit einem niedrigen Entnahmevolumen (beispielsweise zwischen 14 Uhr und 18 Uhr (vgl. Abb. 9-5)) werden ohne Zirkulationssystem somit keine ausreichend hohen TWW-Temperaturen in der Stichleitung erreicht. Der Vergleich der Abbildungen untereinander ist aufgrund unterschiedlicher Zapfprofile nur bedingt möglich, da das MFH exemplarisch mit einem niedrigen Verbraucher und das EFH mit einem mittleren Verbraucher abgebildet wird.

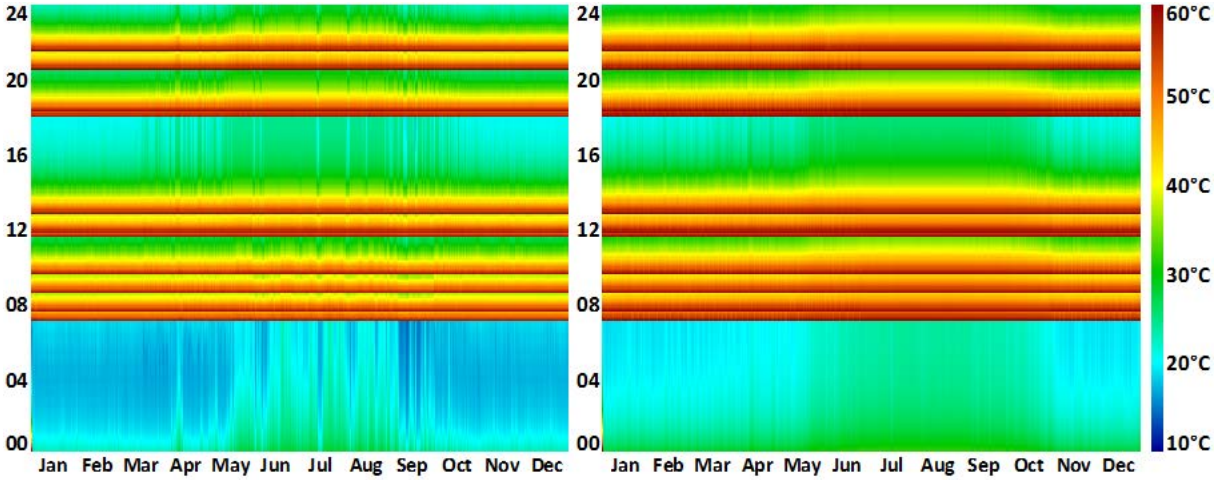


Abb. 9-15 Temperaturverlauf des TWW in einer Stichleitung des MFH bei Variierung der Baualtersklasse (links: Bestand, rechts: Neubau)

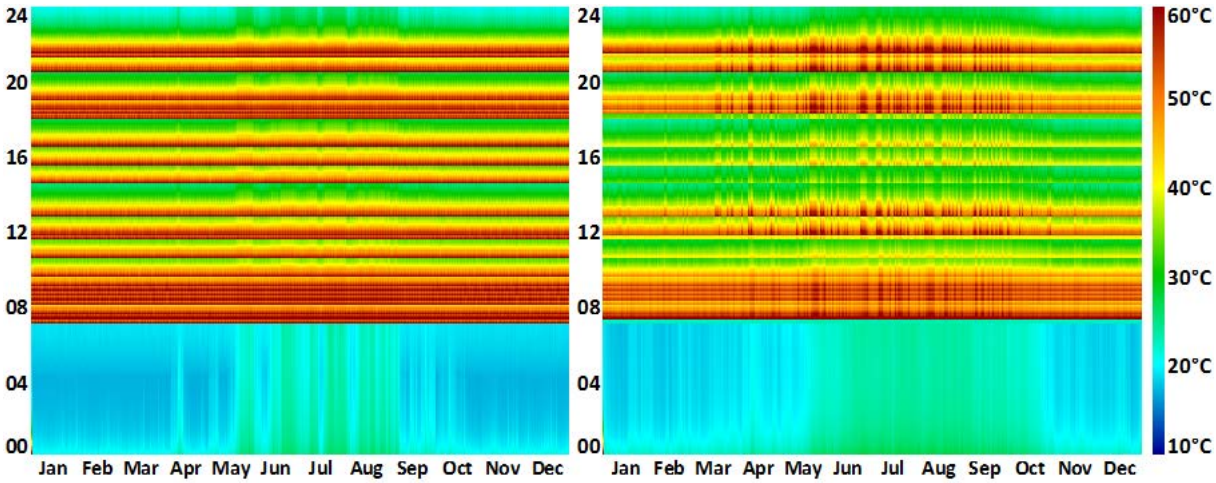


Abb. 9-16 Temperaturverlauf des TWW in einer Stichleitung des EFH bei Variierung der Baualtersklasse (links: Bestand, rechts: Neubau – ohne Zirkulation)

Für einen direkten Vergleich der unterschiedlichen Zapfprofile wird in Abb. 9-17 das Temperaturverhalten eines niedrigen und eines hohen Verbrauchers gegenübergestellt. Diese Gegenüberstellung lässt sich nur für das MFH realisieren, da eine Variation der Nutzertypen im EFH nicht erfolgt. Es wird in Abb. 9-17 ersichtlich, dass das TWW bei einer hohen Entnahmefrequenz zwischen den Zapfvorgängen nicht vollständig abkühlt. Neben hygienischen Vorteilen, führt dies zu einem Anstieg des Komforts, da zu Beginn der Entnahme das TWW bereits der gewünschten Temperatur entspricht, sodass die Wartezeit wesentlich verkürzt wird. Im Vergleich der Zapfprofile ist darüber hinaus zu bemerken, dass durch einen Anstieg der Entnahmefrequenz das TWW-Volumen, das der TWE pro Entnahme bereitstellen muss, abnimmt, da das TWW in der Stichleitung bei vielen Zapfvorgängen eine nutzbare Temperatur beibehält und nicht vor jeder Entnahme vollständig ausgestoßen werden muss. Dieser Effekt führt zu einer Verbesserung der Energieeffizienz der TWI durch eine Erhöhung des Bedarfs pro Entnahmestelle. Eine starke Auslastung einer Entnahmestelle ist somit unter Berücksichtigung aller Aspekte als positiv zu bewerten.

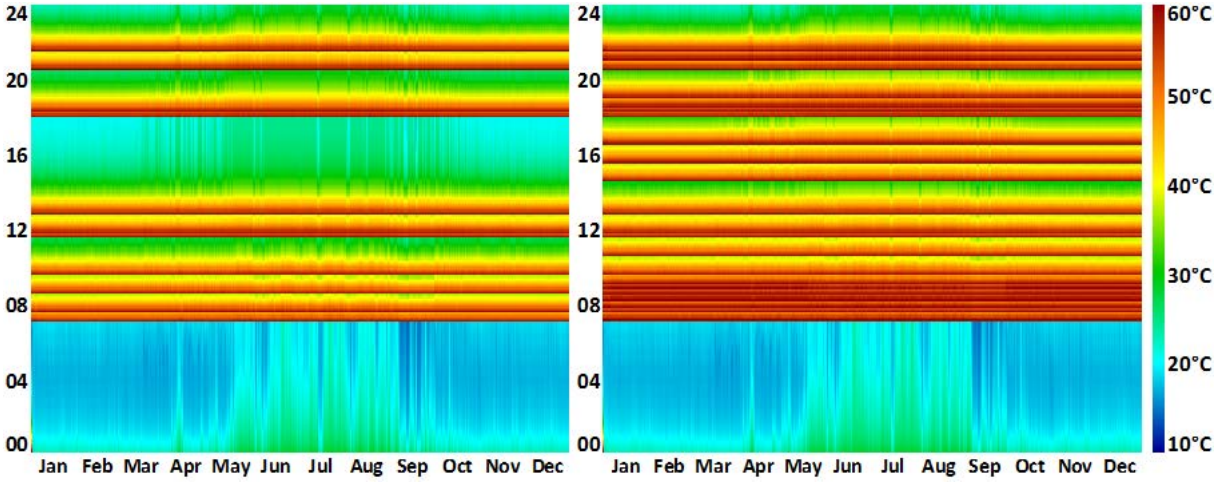


Abb. 9-17 Temperaturverlauf des TWW in einer Stichleitung im Bestand des MFH bei Variierung des Nutzerverhaltens (links: niedriger Verbrauch, rechts: hoher Verbrauch)

Abb. 9-18 und Abb. 9-19 zeigen die Veränderung der Temperaturen in den TWW-Stichleitungen bei unterschiedlichen TWW-Temperaturniveaus. Hierbei sind vor allem Aspekte hinsichtlich Hygiene und Komfort kritisch zu hinterfragen.

Der Vergleich zeigt, dass das gewählte TWW-Temperaturniveau die Temperatur in der Stichleitung bei Zapfvorgängen beeinflusst. Bei längeren Stillstandzeiten hingegen nimmt der Einfluss des Temperaturniveaus auf den Temperaturverlauf in den Stichleitungen ab. So besteht zu dem Zeitpunkt eines Entnahmevorgangs ein Temperaturunterschied in der Stichleitung von ungefähr 10 K, nach einer ungefähr zweistündigen Stillstandzeit, wie beispielsweise um 00:00 Uhr, haben sich die TWW-Temperaturen jedoch vollständig angeglichen. Grundsätzlich führt eine Absenkung des TWW-Temperaturniveaus in allen Leitungen, insbesondere im Zirkulationssystem, zu geringeren Wärmeverlusten aufgrund einer niedrigeren Temperaturdifferenz zur Umgebung.

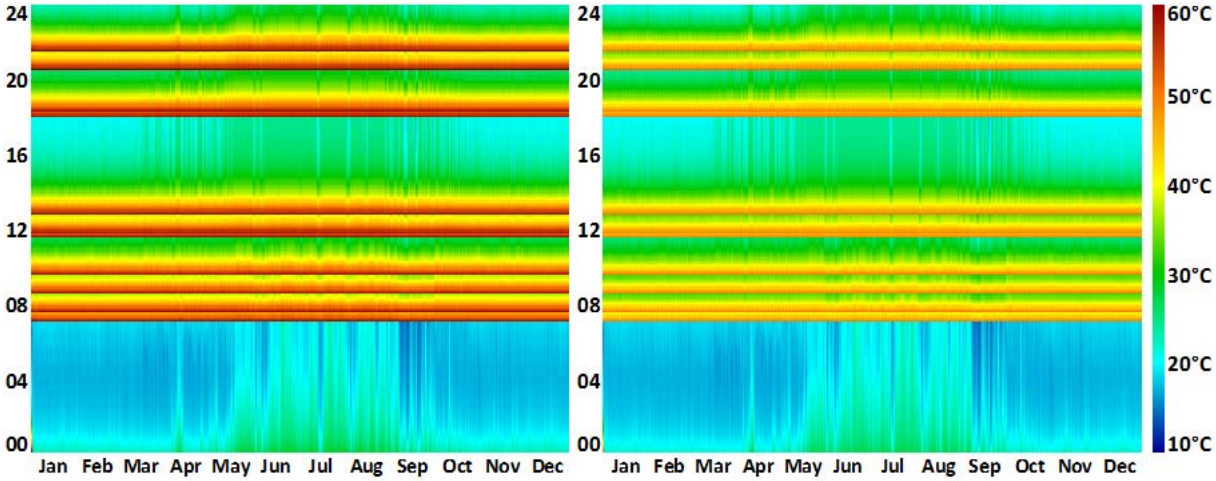


Abb. 9-18 Temperaturverlauf des TWW in einer Stichleitung des MFH bei Variierung des TWW-Temperaturniveaus (links: 60 °C, rechts: 50 °C)

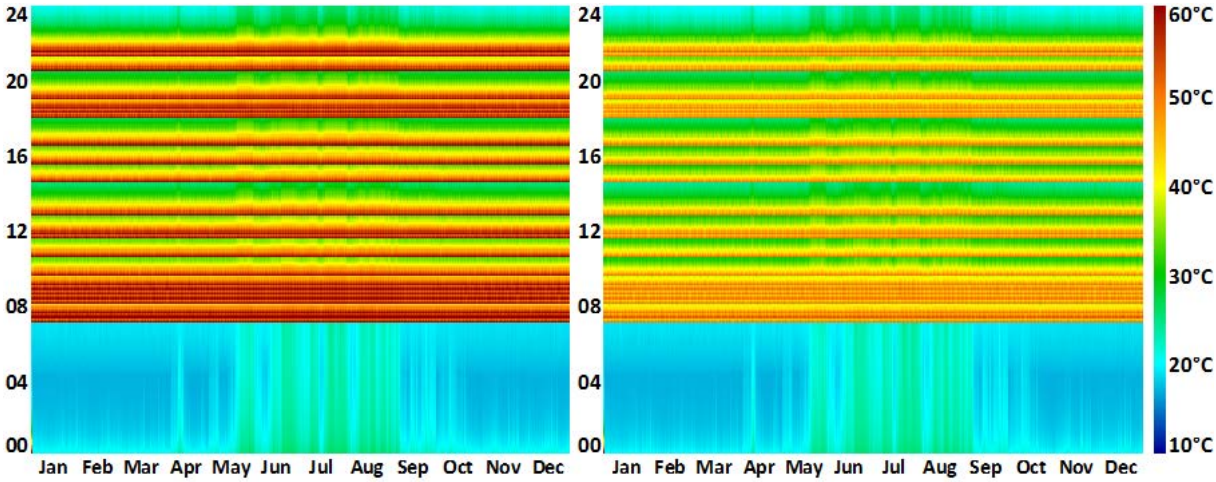


Abb. 9-19 Temperaturverlauf des TWW in einer Stichleitung des EFH bei Variierung des TWW-Temperaturniveaus (links: 60 °C, rechts: 50 °C)

Die in Abb. 9-20, Abb. 9-21 (Steigleitung) und Abb. 9-22 (Stichleitung) dargestellten TWK-Temperaturen verdeutlichen die Aufwärmung des TWK in der TWV. Hinsichtlich Komfort- und Hygiene-Anforderungen werden dabei TWK-Temperaturen unter 20 °C

empfohlen [VDI DVGW 6023]. Dieser Wert wird in allen Rohrleitungsabschnitten bei längerer Stagnation des Wassers, beispielsweise über Nacht, überschritten. Für eine genauere Untersuchung der TWK-Temperaturen wird in Abb. 9-20 (MFH) und Abb. 9-21 (EFH) der Einfluss der Raumlufttemperatur dargestellt, deren Verlauf in starker Abhängigkeit zur Gebäudedämmung und der thermischen Trägheit der verschiedenen Gebäudetypen steht. Der Vergleich von Bestand und Neubau weist dabei auf, dass die TWK-Temperaturen, ähnlich Abb. 9-15, den Temperaturverlauf der Raumluft wiederspiegeln. Da die TWK-Steigleitungen im Bestand des MFH und im EFH direkt neben den Warmwasserleitungen abgebildet und nicht durch eine Trennwand abgeschirmt sind, erwärmt sich das TWK in diesen Fällen auf nahezu 25 °C im Sommer. Die Temperaturen in der TWK-Steigleitung im Neubau des MFH bleiben hingegen zu jedem Zeitpunkt unter 25 °C. Es wird somit deutlich, dass eine räumliche Trennung der TWK-Leitungen von Wärmequellen von hoher Relevanz für niedrige TWK-Temperaturen ist.

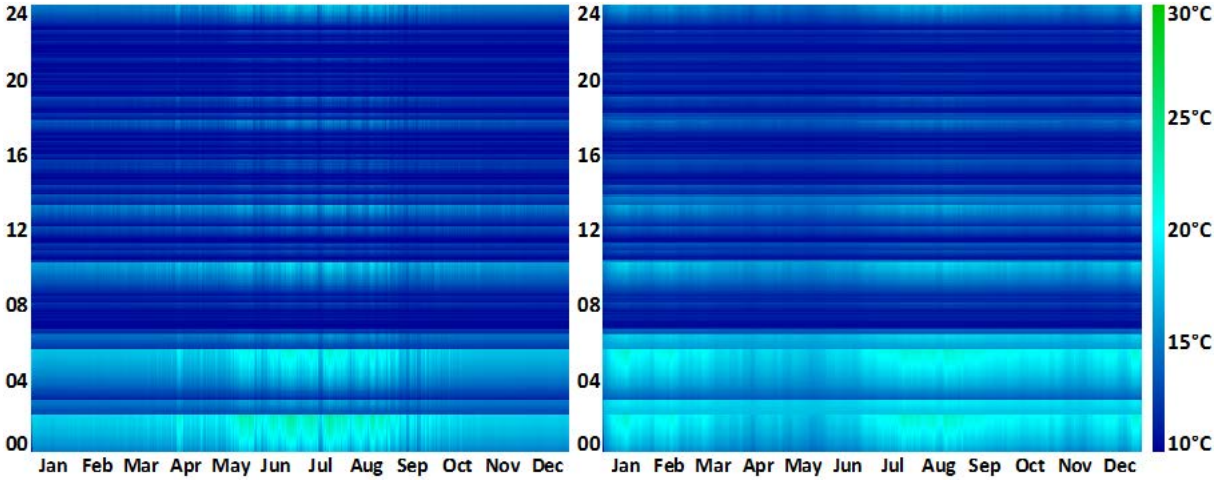


Abb. 9-20 Temperaturverlauf des TWK in der Steigleitung des MFH bei Variierung der Baualtersklasse im MFH (links: Bestand, rechts: Neubau)

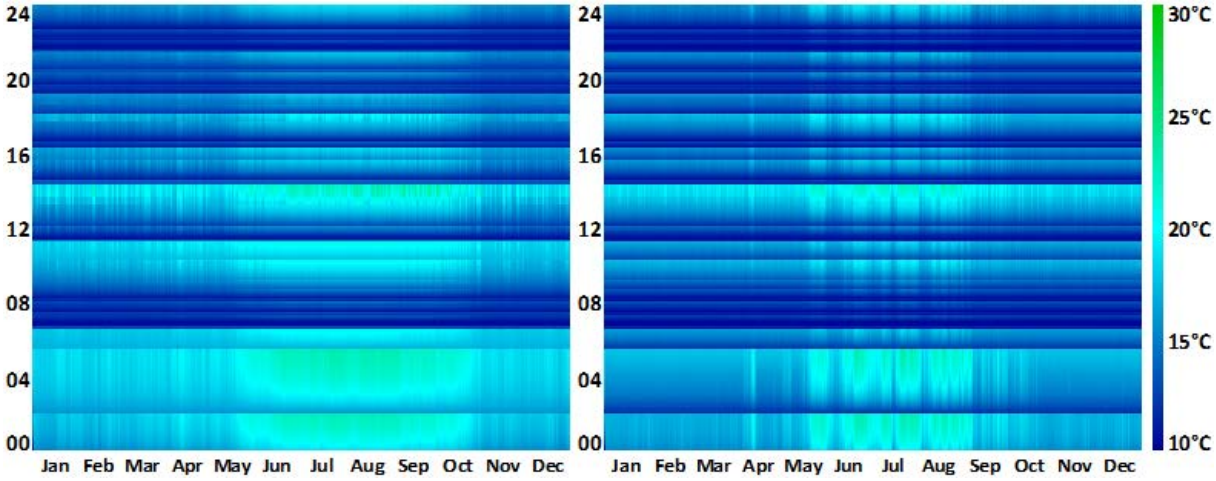


Abb. 9-21 Temperaturverlauf des TWK in der Steigleitung des EFH bei Variierung der Baualtersklasse im EFH (links: Bestand, rechts: Neubau)

Weiterhin haben die verschiedenen Zapfprofile einen signifikanten Einfluss auf den Verlauf der TWK-Temperaturen (Abb. 9-22). Aufgrund der kürzeren Stagnationszeit an stark frequentierten Entnahmestellen können hygienisch relevante Spitzentemperaturen in der

TWK-Stichleitung auch im Sommer vermieden werden. Im Gegensatz dazu wird in der Darstellung des Temperaturverlaufs bei niedrigem Verbrauch deutlich, dass das TWK die Raumlufttemperatur bei der gegebenen Rohrleitungsdämmung nach ungefähr vier Stunden annimmt. Der Vergleich unterschiedlicher Zapfprofile ist nur für das MFH möglich.

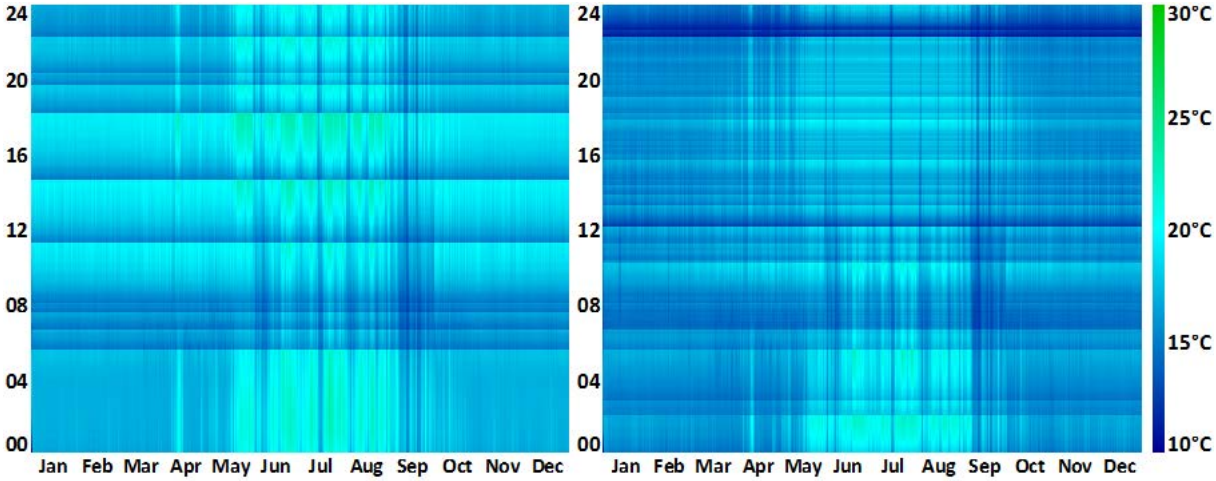


Abb. 9-22 Temperaturverlauf des TWK in der Stichleitung des MFH im Bestand bei Variierung des Nutzerverhaltens (links: niedriger Verbrauch, rechts: hoher Verbrauch)

Es ist zusammenfassend zu bemerken, dass die Trinkwasser-Temperaturen in der TWV starken Schwankungen unterliegen. Die Untersuchungen zeigen, dass die Temperatur der umgebenden Raumluft und die Ausprägung des Zapfprofils maßgeblichen Einfluss auf den Temperaturverlauf haben. Wie in allen Abbildungen zu erkennen ist, gleichen sich die Temperaturen vollständig an die Raumlufttemperatur an, wenn das Trinkwasser zwischen den Zapfvorgängen, beispielsweise über Nacht, für eine längere Zeit in der TWV stagniert. Diese längeren Stagnationszeiten können zu einem Temperaturbereich führen, der das Legionellenwachstum fördert und somit eine Gefährdung der Trinkwasserhygiene bedeutet. In der Verteilung des TWW kann dieses Problem durch ein Zirkulationssystem zum Teil gelöst werden, jedoch besteht auch hier ein inkonstantes Temperaturverhalten in der TWW-Stichleitung, die von der Zirkulation ausgeschlossen ist. Für die TWK-Leitungen besteht ebenfalls ein hygienisches Risiko, da die kritische Temperatur von 20 °C in Folge von Stagnation regelmäßig überschritten wird. Es muss hierbei zusätzlich berücksichtigt werden, dass für diese Simulationsergebnisse eine maximale Raumluft-Temperatur von 24 °C gilt und in realen Gebäuden im Sommer durchaus höhere Raumluft-Temperaturen erreicht werden können, die auch zu Spitzentemperaturen des TWK oberhalb der vorgeschriebenen 25 °C [DIN 1988-200] führen würden.

Abschließend lässt sich feststellen, dass die Aufrechterhaltung hygienisch und komforttechnisch günstiger Trinkwasser-Temperaturen von vielen Faktoren beeinflusst wird. Hygienisch riskante Trinkwasser-Temperaturen können dabei insbesondere durch geringe Systemvolumen, eine erhöhte Entnahmefrequenz sowie durch eine thermische Entkopplung der Rohrleitungen vermieden werden. Hinsichtlich der Wärmeverluste führt eine Erhöhung des Dämmstandards von Rohrleitungen, vor allem in Kombination mit einem Zirkulationssystem, zu einer verbesserten Energieeffizienz der gesamten TWI.

Es muss beachtet werden, dass diese Untersuchung lediglich vor dem Hintergrund der Interaktion zwischen der TWI und dem Gesamtsystem „Gebäude“ erfolgte. Der Detaillierungsgrad der Analyse ist entsprechend nicht so hoch, dass hygienische Fragenstellungen

hinreichend gut beantwortet werden können. Daher sei für weitere Ergebnisse auf das Kapitel 6 verwiesen.

9.3.2 Primärenergetische Bewertung der Varianten

Der Primärenergiebedarf Q_{Prim} eines Gebäudes beschreibt die Menge an Energie, die unter Miteinbeziehung aller vorgelagerten Prozesse zur Bereitstellung eines Energieträgers benötigt wird, um den Bedarf eines Gebäudes an Wärme und elektrischer Energie zu decken (vgl. Kapitel 9.2.3). Bei dieser Auswertung werden der Wärmebedarf, der für die Raumheizung und das TWW anfällt, sowie der elektrische Energiebedarf von Pumpen und Reglern berücksichtigt.

Die Untersuchungen beschränken sich dabei auf den Vergleich ausgewählter Parameter. Diese Parameter sind der Gebäudeenergiestandard in Abhängigkeit der Baualtersklasse und des Sanierungsgrads, die Erzeugertechnologie sowie das TWW-Temperaturniveau. Als Bezugsgröße dient in jedem Vergleich die in Kapitel 9.1.3 beschriebene Referenzvariante, die die Versorgung eines unsanierten Bestandsgebäudes (Baujahr vor 1978) durch einen Niedertemperatur-Erdgas-Kessel bei einem TWW-Temperaturniveau von 60 °C abbildet. Der Fokus dieser primärenergetischen Bewertung liegt jedoch auf dem Zusammenhang zwischen dem Anteil der Primärenergie, der für die Erwärmung des TWW benötigt wird (TWW-Bedarf), und dem gesamten Wärmebedarf eines Gebäudes.

9.3.2.1 Primärenergetischer Vergleich des Gebäudeenergiestandards

Der Gebäudeenergiestandard bezieht sich auf die Gesamtheit der Dämmwerte aller Bauteile der thermischen Hüllfläche eines Gebäudes. Durch die Erhebung gesetzlicher Anforderungen an diese Gebäudedämmung (z. B. WSchV, EnEV) und durch die Entwicklung neuer Materialien zur Wärmedämmung verbessert sich der Gebäudeenergiestandard mit fortschreitender Baualtersklasse. Damit einhergehend sinkt der Wärmeverlust eines Gebäudes an die Umgebung und der Energiebedarf für das Raumheizsystem wird reduziert. Abb. 9-23 (MFH) und Abb. 9-24 (EFH) stellen diese Senkung des Gesamtbedarfs an Primärenergie als Resultat eines besseren Gebäudeenergiestandards dar. Die absoluten Werte beziehen sich in dieser Darstellung auf die Simulationsvarianten mit Erdgas-Kessel und einem TWW-Temperaturniveau von 60 °C, doch gelten die im Folgenden diskutierten Trends exemplarisch auch für den Vergleich anderer Erzeugertechnologien.

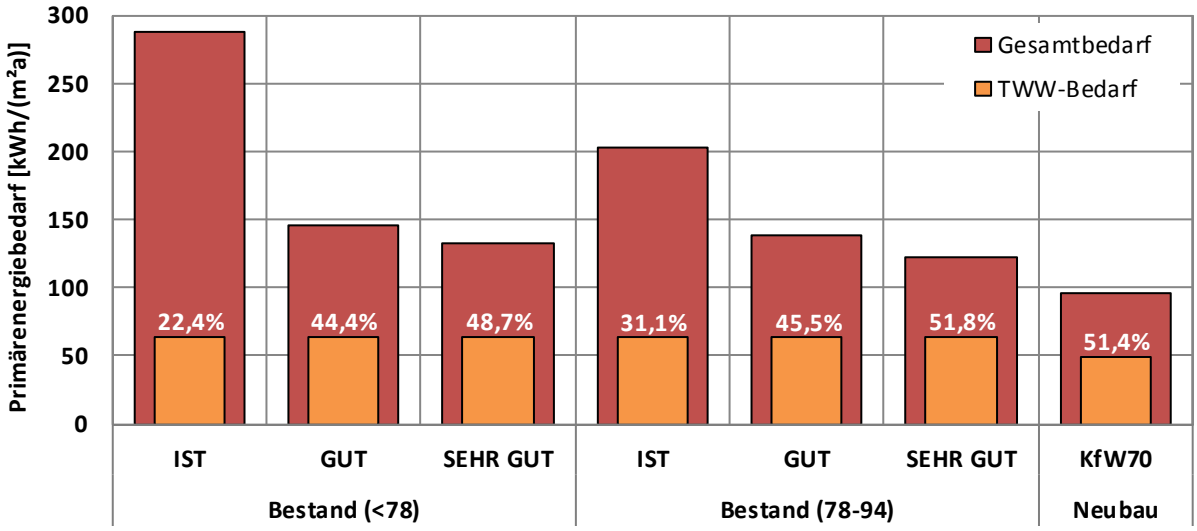


Abb. 9-23 Einfluss des Gebäudeenergiestandards verschiedener Baualtersklassen und Sanierungsgrade auf den Primärenergiebedarf eines MFH bei Erdgas-Versorgung und einem TWW-Temperaturniveau von 60 °C

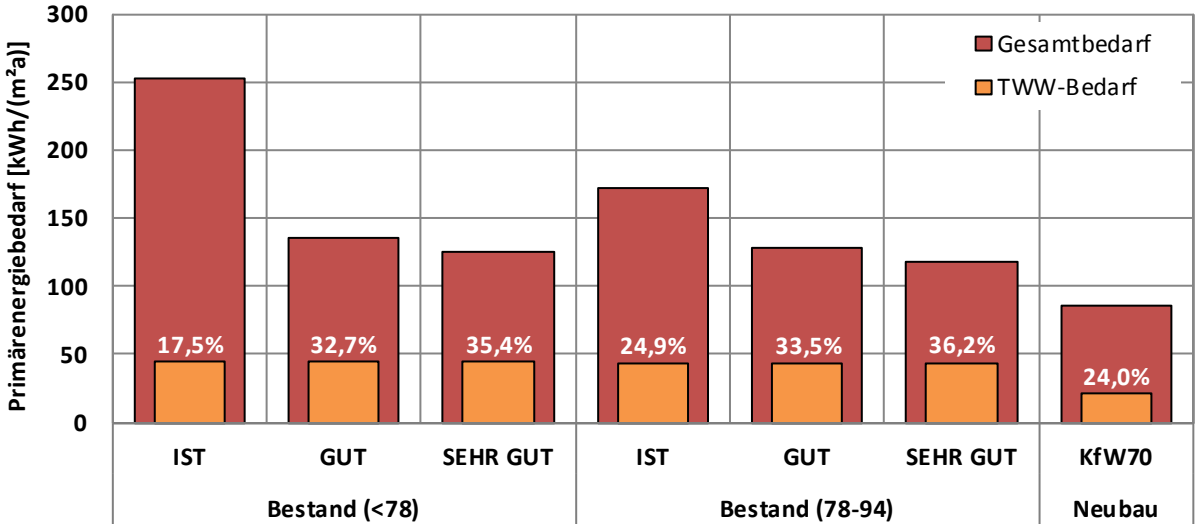


Abb. 9-24 Einfluss des Gebäudeenergiestandards verschiedener Baualtersklassen und Sanierungsgrade auf den Primärenergiebedarf eines EFH bei Erdgas-Versorgung und einem TWW-Temperaturniveau von 60 °C

Es wird im Vergleich deutlich, dass eine thermische Sanierung der Gebäudehülle von Bestandsgebäuden, hier mit den Sanierungsgraden GUT und SEHR GUT gekennzeichnet, den Primärenergiebedarf für die Raumwärmebereitstellung um bis zu 50 % reduzieren kann. Der flächenspezifische Primärenergiebedarf ist dabei im EFH grundsätzlich geringfügig niedriger als im MFH. Die Differenz zwischen EFH und MFH ist sowohl auf unterschiedliche Volumen-Oberflächen-Verhältnisse als auch auf verschiedene Dämmeigenschaften sowie Belegungsdichten zurückzuführen.

Der absolute Primärenergiebedarf für die TWW-Bereitstellung bleibt über alle Gebäudeenergiestandards für EFH und MFH jeweils konstant. Eine Ausnahme bildet dabei der niedrigere TWW-Bedarf im KfW70-Neubau, da die TWV hier mit besserer Rohrleitungsdämmung sowie im EFH ohne ein Zirkulationssystem abgebildet ist und somit geringere

Wärmeverluste bei der TWW-Bereitstellung entstehen. Der prozentuale Anteil des TWW-Bedarfs am Gesamtbedarf steht hingegen in starker Abhängigkeit zum Gebäudeenergiestandard. Es entsteht somit eine signifikante Differenz zwischen dem TWW-Anteil der Referenzvarianten (22,4 % im MFH bzw. 17,5 % im EFH) und dem TWW-Anteil von sehr gut sanierten Gebäuden (> 50 % im MFH bzw. > 35 % im EFH). Da der Gesamtbedarf der Primärenergie durch eine sukzessive Sanierung des deutschen Gebäudebestands stetig gesenkt wird, belegt dieser Vergleich die zunehmende Relevanz energetischer Optimierungsmaßnahmen in der TWI. Weiterhin wird beim Vergleich des Neubaus mit den Bestandsgebäuden in Abb. 9-24 der energetische Einfluss eines Zirkulationssystems erkennbar. Der reduzierte TWW-Anteil von 24,0% im Neubau führt hierbei zu der Aussage, dass die thermischen Verluste des Zirkulationssystems ungefähr 10 % des Gesamtwärmebedarfs eines Gebäudes mit hohem Energiestandard repräsentieren.

9.3.2.2 Primärenergetischer Vergleich der Erzeugertechnologie

Die unterschiedlichen Erzeugertechnologien haben einen starken Einfluss auf den Primärenergiebedarf. Dies resultiert aus der Gewichtung der verwendeten Energiequellen durch die Primärenergiefaktoren, die mit dem Endenergiebedarf eines Gebäudes verrechnet werden (vgl. Formel (9.51) in Kapitel 9.2.3). Abb. 9-25 (MFH) und Abb. 9-26 (EFH) zeigen alle Erzeugertechnologien, die gemäß den Simulationsvarianten in den jeweiligen Baualtersklassen zum Einsatz kommen, wobei in dieser Form der Darstellung die Sanierungsgrade und die Variation des TWW-Temperaturniveaus nicht berücksichtigt werden.

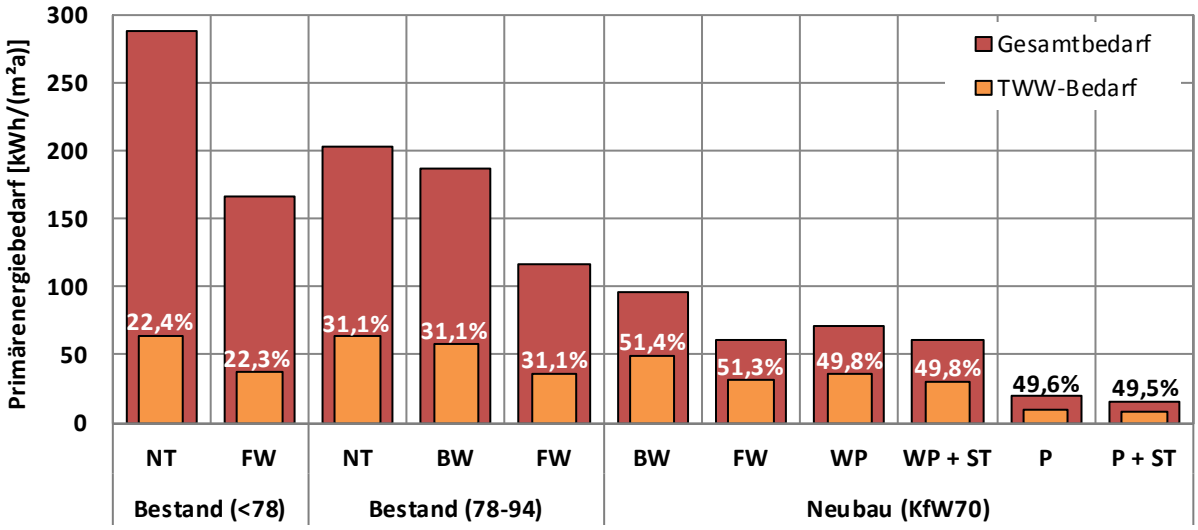


Abb. 9-25 Einfluss der Erzeugertechnologie auf den Primärenergiebedarf eines unsanierten MFH bei einem TWW-Temperaturniveau von 60 °C (NT = Niedertemperatur-Kessel, FW = Fernwärme, BW = Brennwert-Kessel, WP = Wärmepumpe, ST = Solarthermie, P = Pellet-Kessel)

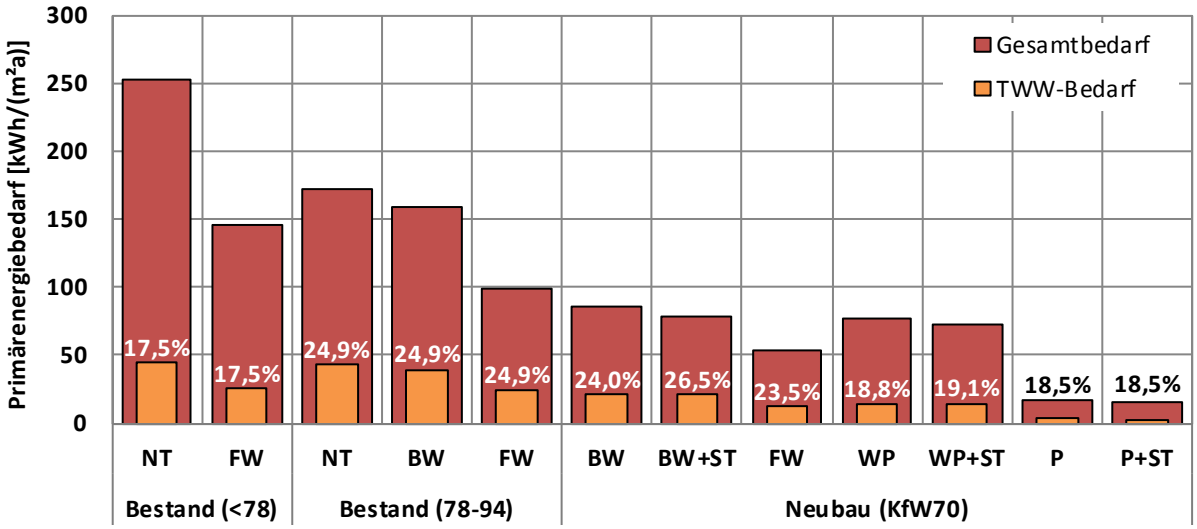


Abb. 9-26 Einfluss der Erzeugertechnologie auf den Primärenergiebedarf eines unsanierten EFH bei einem TWW-Temperaturniveau von 60 °C (NT = Niedertemperatur-Kessel, FW = Fernwärme, BW = Brennwert-Kessel, WP = Wärmepumpe, ST = Solarthermie, P = Pellet-Kessel)

In den Abbildungen wird erkenntlich, dass, neben dem Einfluss des Gebäudeenergiestandards, der Primärenergiebedarf eines Gebäudes signifikant von der Art der Wärmeerzeugung abhängig ist. Dabei stellt sich im Rahmen der Simulationsvarianten eine Versorgung des Bestands durch Fernwärme als primärenergetisch günstigste Alternative heraus. Insbesondere die Flexibilität von Wärmenetzten hinsichtlich der Integration diverser Wärmequellen ist hierbei hervorzuheben, da dadurch ein hohes Potenzial für eine zukunftsorientierte Wärmeversorgung durch regenerative Energieträger auch im Bestand gegeben ist. So erreichen beispielsweise die Fernwärmenetze in Kassel, Hannover oder Bamberg durch einen erhöhten Einsatz von Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen, die mit nachhaltigen Brennstoffen wie Müll oder Biogas betrieben werden, einen lokalen Primärenergiefaktor von $f_{Prim,FW} < 0{,}25$ [KVV16; enercity18; TUD13]. Ferner wird im Bestand (78-94) durch den direkten Vergleich von Niedertemperatur- und Brennwert-Kessel verdeutlicht, dass der Einsatz von Brennwert-Technologie zwar den Bedarf senkt, im Gesamtvergleich aber eher von geringerer Relevanz ist. Im Neubau wird hingegen durch den Einsatz von Pellets ein sehr hohes Einsparpotenzial im Vergleich zur Brennwert-Kesseln erzielt. Grundsätzlich erweist sich der Einsatz regenerativer Energiequellen im Sinne der Primärenergie als vorteilhaft. Dieses Verhalten resultiert aus der Bewertung regenerativer Energien mit einem sehr niedrigen Primärenergiefaktor. Der Primärenergiebedarf beim Einsatz von Wärmepumpen hängt daher stark von der Menge der genutzten Umweltwärme und dementsprechend vom COP ab. Ebenso verringert sich der Primärenergieverbrauch der Wärmeversorgung durch den Einsatz von Solarthermie in Abhängigkeit der solarthermisch installierten Leistung (Kollektorfläche) und der Nutzbarkeit der so gewonnenen Wärme (Speicherung).

Der Primärenergiebedarf des TWW variiert ebenfalls mit der Erzeugertechnologie. Da der Gesamtbedarf und der TWW-Bedarf jedoch im selben Maß von der Wärmeerzeugung abhängen, verändert sich der prozentuale TWW-Anteil bei gleichbleibendem Gebäudeenergiestandard nur sehr geringfügig und kann somit näherungsweise als erzeugerunabhängig beschrieben werden. Bei der Erzeugervariation im Neubau sind größere Unterschiede im TWW-Anteil festzustellen. So beträgt Diese Schwankungen sind auf die Verwendung verschiedener Prinzipien der TWE zurückzuführen, die im Rahmen der Simulationsvarian-

ten festgelegt wurden. Die Varianten mit Brennwert-Kessel und Fernwärme funktionieren dabei nach dem Speicherprinzip, den regenerativen Erzeugern liegt hingegen das Durchflussprinzip zugrunde (vgl. Tab. 9-8 und Tab. 9-9in Kapitel 9.1.3). Da im Durchflussprinzip ein Pufferspeicher verwendet wird, der auch für die Versorgung des Heizsystems aufkommt, ist hier der Anteil des TWW in der Bilanzierung der Speicherverluste kleiner. Dies führt dazu, dass der TWW-Anteil am Primärenergiebedarf bei der Verwendung des zentralen Durchflussprinzips durchschnittlich um ca. 1,5 % im MFH und um ca. 3,5 % geringer ist als beim Speicherprinzip.

9.3.2.3 Primärenergetischer Vergleich des TWW-Temperaturniveaus

Das TWW-Temperaturniveau wird als Austrittstemperatur des TWW am TWE bei Großanlagen mit 60 °C vorgeschrieben (vgl. Kapitel 8.1). Im Rahmen dieses Projektes werden die Auswirkungen einer Absenkung dieser Temperatur auf 55 °C und 50 °C unter Berücksichtigung verschiedener Aspekte untersucht und diskutiert. In Abb. 9-27 (MFH) und Abb. 9-28 (EFH) wird dabei das Verhalten des Primärenergiebedarfs bei Variierung dieses Temperaturniveaus für verschiedene Baualtersklassen beschrieben. Zum Zweck der Vergleichbarkeit und Übersichtlichkeit werden hier nur Simulationsvarianten ohne Sanierung und mit Erdgas-Kessel dargestellt, es können jedoch trotzdem allgemein gültige Aussagen getroffen werden.

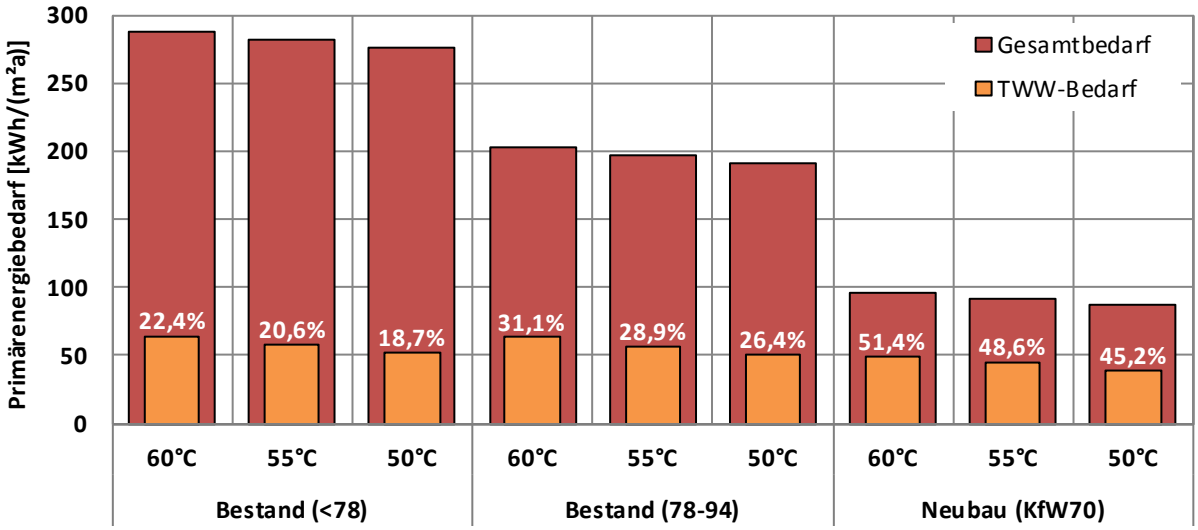


Abb. 9-27 Einfluss des TWW-Temperaturniveaus auf den Primärenergiebedarf eines unsanierten MFH bei Erdgas-Versorgung

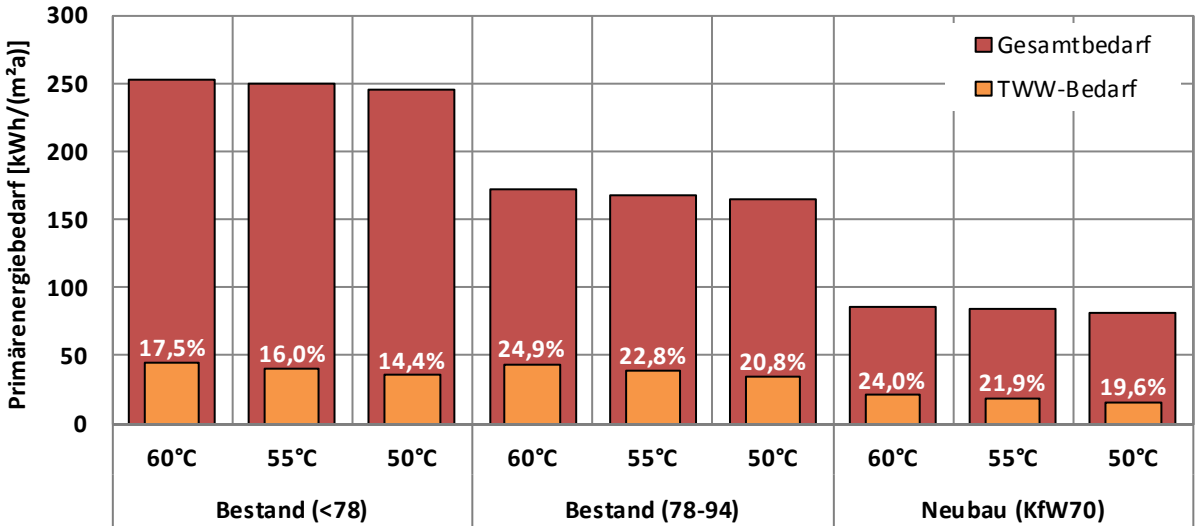


Abb. 9-28 Einfluss des TWW-Temperaturniveaus auf den Primärenergiebedarf eines unsanierten EFH bei Erdgas-Versorgung

Es wird ersichtlich, dass die Absenkung des TWW-Temperaturniveaus im Vergleich zu anderen energetischen Optimierungsmaßnahmen, wie zum Beispiel der Sanierung der Gebäudehülle, einen eher geringen Einfluss auf den Gesamtbedarf der Primärenergie hat. Der Effekt verstärkt sich jedoch mit der Verbesserung des Gebäudeenergiestandards. So verringert die Absenkung des Temperaturniveaus von 60 °C auf 55 °C bei dem Bestandsgebäude (<78) des MFH den Primärenergiebedarf insgesamt um nur 2,1 %. Im Neubau des MFH wird der Primärenergiebedarf bei derselben Absenkung hingegen um 4,7 % reduziert. Eine Absenkung von 60 °C auf 50 °C verringert den Primärenergiebedarf im MFH um 4,3 % im Bestand (<78) und um 10,0 % im Neubau. Dieselbe Tendenz gilt auch für die Ergebnisse des EFH. Darüber hinaus sinkt der prozentuale Anteil des TWW am Gesamtenergiebedarf bei einer Verringerung des Temperaturniveaus (vgl. Abb. 9-28).

Es lässt sich somit abschließend festhalten, dass sich Optimierungsmaßnahmen in der TWI grundsätzlich stärker auf den Primärenergiebedarf von neuen und sanierten Gebäuden mit hohem Gebäudeenergiestandard auswirken, da die TWW-Bereitstellung hier einen größeren Anteil am Gesamtbedarf darstellt. Dies führt dazu, dass Optimierungsmaßnahmen, insbesondere die Absenkung des TWW-Temperaturniveaus, ein bedeutender Faktor für eine zukunftsorientierte, auf regenerativen Energien basierende Wärmeversorgung sind.

9.3.3 Exergetische und energetische Bewertung der Varianten

Die exergetische und energetische Analyse sind sich gegenseitig ergänzende Methoden zur Auswertung von Simulationsergebnissen. Die exergetische Bewertung besitzt ihren Vorteil in der Identifikation des bedarfsangepassten Einsatzes von Erzeugern unter besonderer Berücksichtigung des Temperaturniveaus der Wärmebereitstellung und der Referenztemperatur. Die energetische Bewertung kann hingegen die auftretenden Wärmeströme und –verluste quantifizieren und vergleichen. Um eine ganzheitliche Bewertung der Simulationsergebnisse zu ermöglichen, wird in den folgenden Darstellungen sowohl das Verhalten der Energie als auch das der Exergie über die vollständige Versorgungskette für den Gesamt- und TWW-Bedarf beschrieben. Es werden hierfür erneut die Parame-

ter Gebäudeenergiestandard, Erzeugertechnologie und TWW-Temperaturniveau zur vergleichenden Gegenüberstellung ausgewählter Simulationsvarianten verwendet.

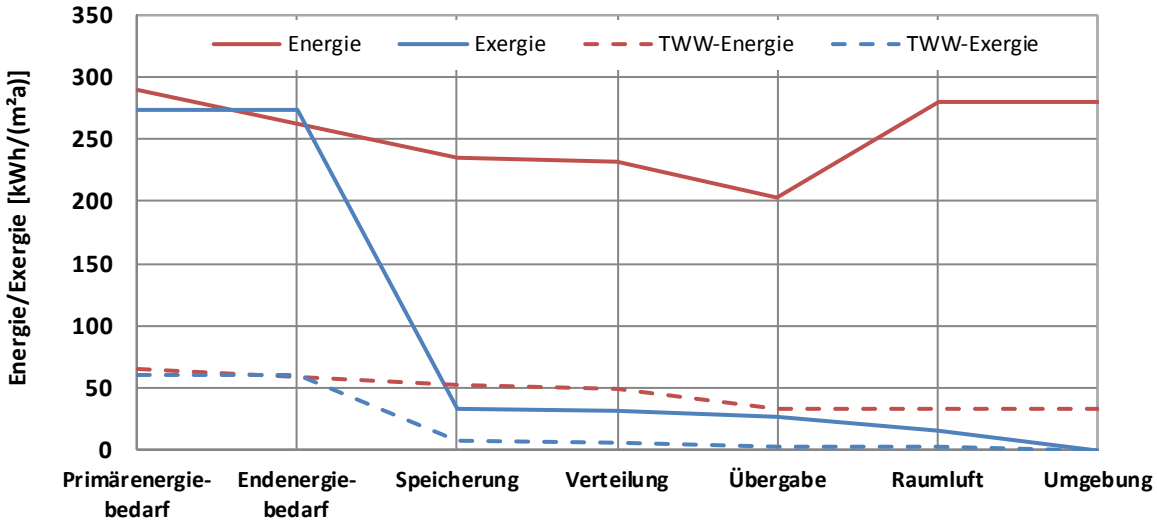


Abb. 9-29 Energie und Exergiebedarf der Referenzvariante des MFH über alle Bilanzräume

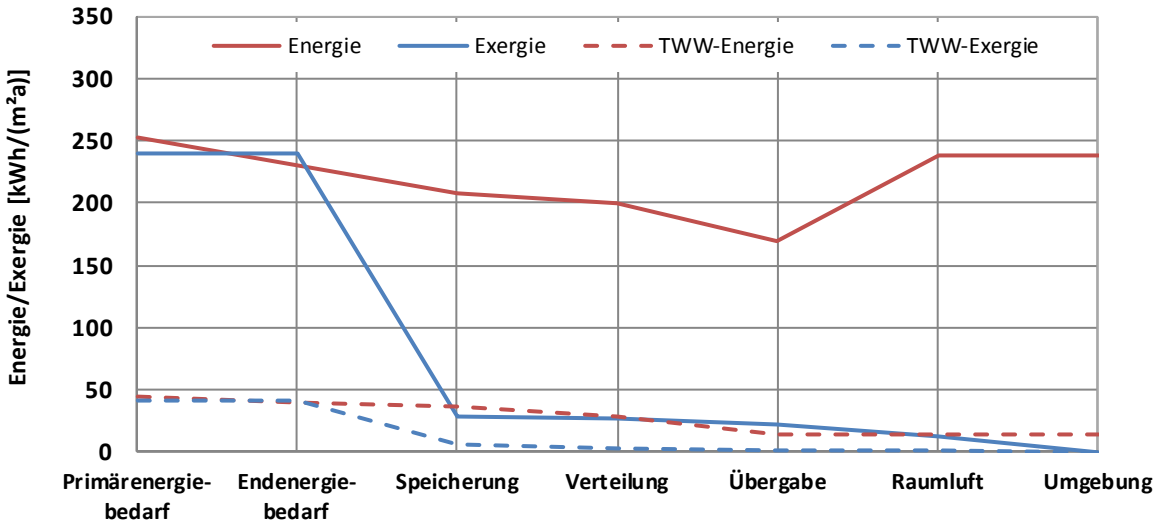


Abb. 9-30 Energie und Exergiebedarf der Referenzvariante des EFH über alle Bilanzräume

Der Energie- und Exergiebedarf in den unterschiedlichen Bilanzräumen der Referenzvariante wird durch die Verläufe in Abb. 9-29 und Abb. 9-30 wiedergegeben. Für die Exergie ist es hierbei charakteristisch, dass sie im Gegensatz zur Energie zwischen Speicherung und Endenergiebedarf einen großen Sprung macht. Dies liegt darin begründet, dass für die thermische Versorgung von Wohngebäuden ein Wärmestrom mit vergleichsweise geringer Temperaturdifferenz zur Umgebung benötigt wird, die Verbrennung von Erdgas in einem Heizkessel jedoch bei hohen Temperaturen stattfindet und somit eine sehr viel höheres Arbeitspotenzial bereitstellt. Folglich können Energieträger mit hohen Verbrennungstemperaturen im Sinne einer bedarfsangepassten Versorgung als ungeeignet eingestuft werden. Mit der Abnahme der Temperatur der Wärmeströme sinkt die Exergie

über die weiteren Bilanzräume ab bis zum Übergang der Wärme an die Umgebung und der damit einhergehenden vollständigen Exergievernichtung.

Der Verlauf der Energie stellt die Wärmeverluste im Laufe des fortschreitenden Energietransports in der Versorgungskette dar. Der erhöhte Energiebedarf der Raumluft wird durch die solaren und internen Gewinne verursacht, die einen starken Einfluss auf den Nutzenergiebedarf haben und somit in der Bilanzierung berücksichtigt werden müssen. Der Endenergiebedarf steigt gegenüber der Speicherung in Höhe des Nutzungsgrads der Erzeugereinheit. Ebenso werden die Wärmeverluste in der Versorgungskette bei dieser Form der Darstellung sichtbar. Der Energie- und Exergiebedarf des TWW ist aufgrund des hohen Gesamtbedarfs der Referenzvariante im relativen Vergleich gering. Der Verlauf des TWW-Bedarf weist grundsätzlich ähnliche Tendenzen wie der des Gesamtbedarfs auf. Die energetischen Verluste des TWW in der Verteilung sind jedoch prozentual größer als die Verluste des Gesamtbedarfs in der Verteilung, da durch das Zirkulationssystem und das regelmäßige Auskühlen der Stichleitungen die Wärmeverluste der TWW-Verteilung im Vergleich zu der genutzten Wärme relativ hoch sind.

9.3.3.1 Exergetischer und energetischer Vergleich des Gebäudeenergiestandards

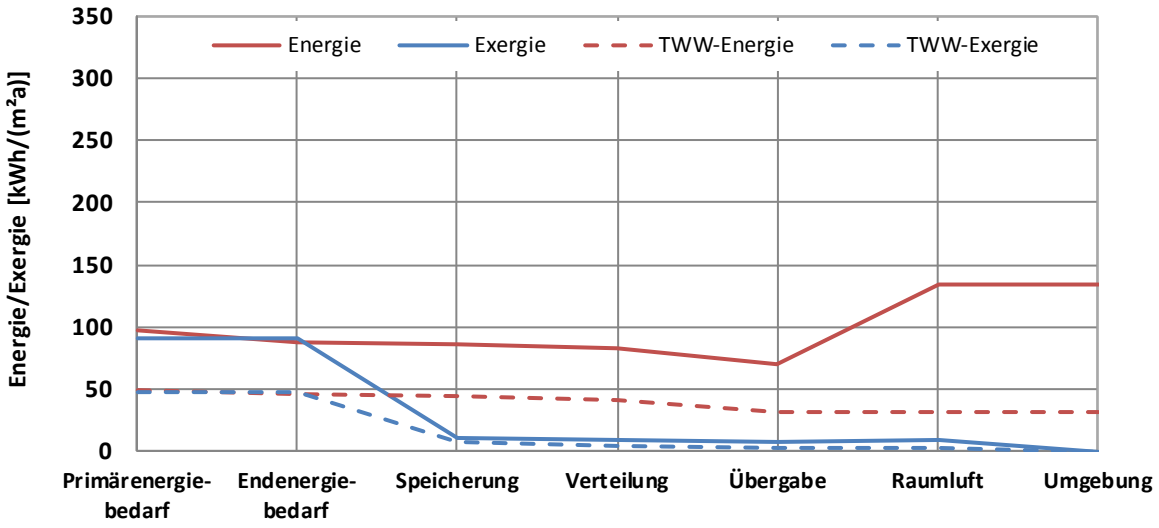


Abb. 9-31 Energie- und Exergiebedarf einer Neubau-Variante des MFH über alle Bilanzräume (hier exemplarisch mit Brennwert-Kessel und TWW-Temperaturniveau von 60 °C)

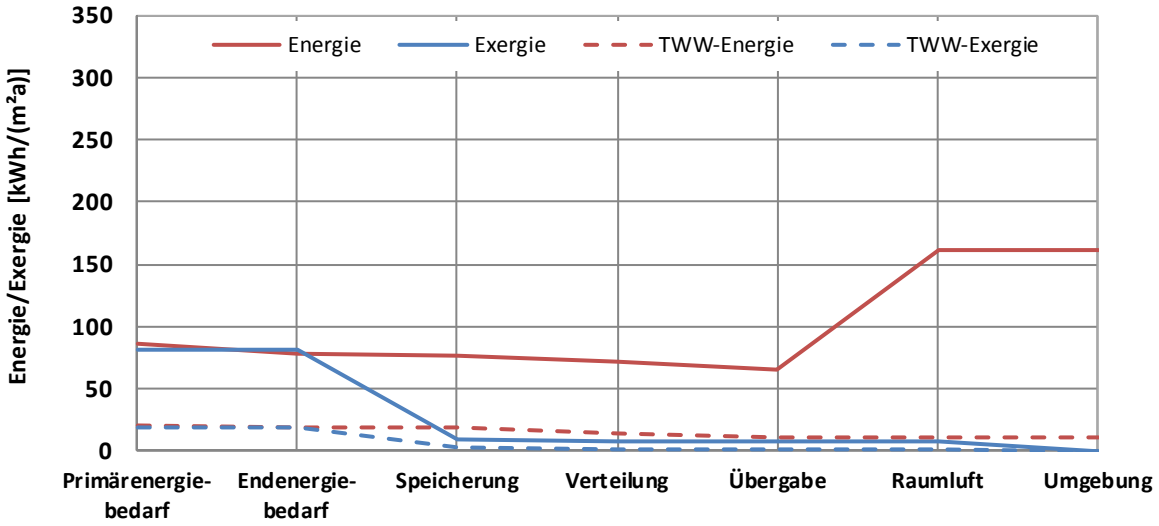


Abb. 9-32 Energie- und Exergiebedarf einer Neubau-Variante des EFH über alle Bilanzräume (hier exemplarisch mit Brennwert-Kessel und TWW-Temperaturniveau von 60 °C)

Abb. 9-31 und Abb. 9-32 zeigen die Simulationsergebnisse der Neubau-Variante mit Brennwert-Kessel und einem TWW-Temperaturniveau von 60 °C. Der Vergleich mit den Referenzvarianten in Abb. 9-29 und Abb. 9-30 weist eine Senkung des Energie- und Exergiebedarfs in allen Bilanzräumen bei steigendem Gebäudeenergiestandard auf. Durch die Abbildung einer Fußbodenheizung und die einhergehenden niedrigen Vorlauftemperaturen weisen die Simulationsvarianten mit Neubau insbesondere bei der Exergie einen sehr niedrigen Bedarf auf. Darüber hinaus werden durch bessere Rohrleitungsdämmung und geringere Vorlauftemperaturen die Wärmeverluste in der Verteilung reduziert. Wie die primärenergetische Auswertung in Kapitel 9.3.2.1 schon aufzeigt, bleibt der TWW-Bedarf bei Variation des Gebäudeenergiestandards im MFH nahezu konstant, steigt jedoch anteilig im Vergleich zum Gesamtbedarf. Der Vergleich der EFH-Varianten in Abb. 9-30 und Abb. 9-32 macht zudem deutlich, dass das Zirkulationssystem den TWW-Bedarf über alle Bilanzräume signifikant steigert. Ferner wird deutlich, dass der Anteil solarer und interner Gewinne am Gesamtbedarf durch die Verbesserung des Gebäudeenergiestandards zunimmt und die Bedeutung dieser Gewinne somit zunimmt.

9.3.3.2 Exergetischer und energetischer Vergleich der Erzeugertechnologie

Für den Vergleich und die Bewertung von Wärmeerzeugern ist die exergetische Analyse besonders geeignet. Diese Form der Analyse beurteilt die Erzeugereinheiten nicht nur nach ihrem energetischen Nutzungsgrad, sondern auch nach dem Arbeitspotenzial, welches der verwendete Energieträger bereitstellt. Für die Gegenüberstellung der Wärmeerzeuger werden im Folgenden verschiedene Simulationsvarianten des Neubaus dargestellt, da ausschließlich bei dieser Baualtersklasse alle Erzeugertechnologien abgebildet werden, sodass ein direkter Vergleich möglich ist. Der Vergleich der Erzeugertechnologien in Abb. 9-33 bis Abb. 9-38 verdeutlicht, dass sich die Art der Wärmeerzeugung nahezu ausschließlich auf End- und Primärenergiebedarf auswirkt und die Wärmeströme auf der Sekundärseite somit erzeugerunabhängig sind.

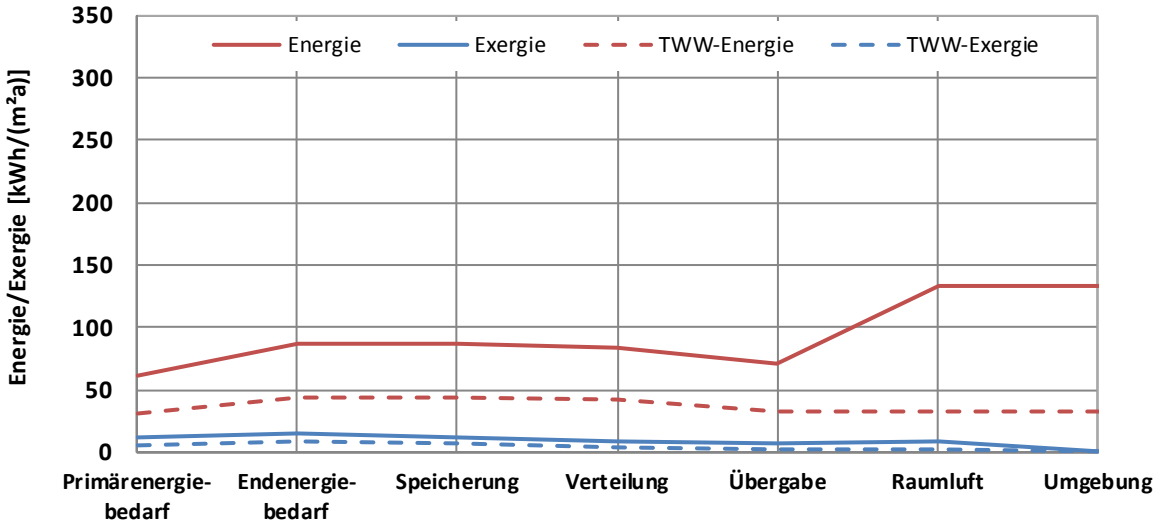


Abb. 9-33 Energie- und Exergiebedarf über alle Bilanzräume bei Fernwärme-Versorgung im MFH (hier exemplarisch mit hohem Gebäudeenergiestandard und TWW-Temperaturniveau von 60 °C)

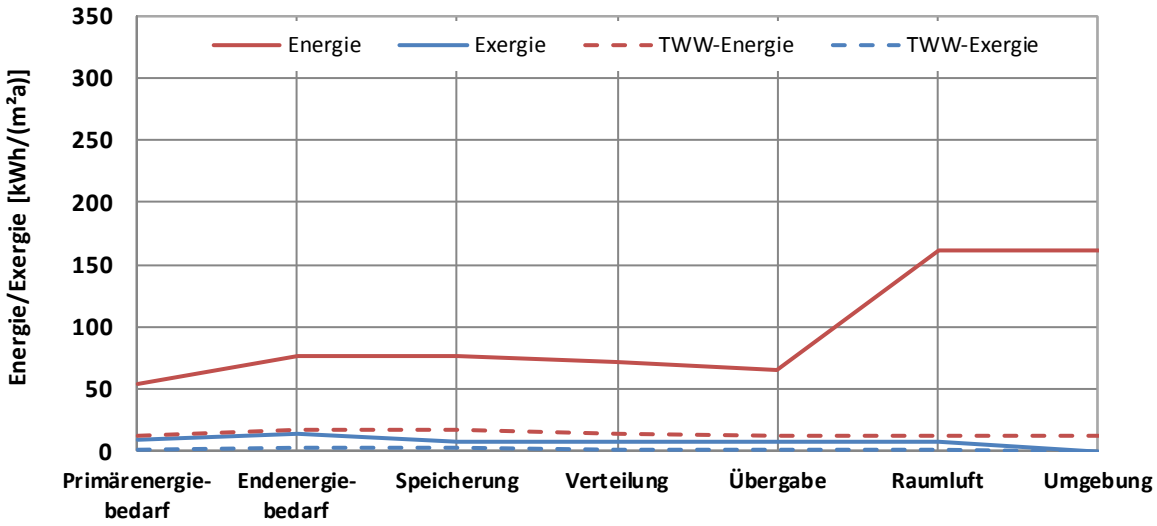


Abb. 9-34 Energie- und Exergiebedarf über alle Bilanzräume bei Fernwärme-Versorgung im EFH (hier exemplarisch mit hohem Gebäudeenergiestandard und TWW-Temperaturniveau von 60 °C)

Die Fernwärme erweist sich durch einen primärexergetischen Anteil, der sowohl im MFH als auch im EFH signifikant niedriger als bei anderen Erzeugertechnologien ist, als exergetisch günstigste Versorgungsmöglichkeit. Es ist jedoch zu beachten, dass bei der Auswertung des primärexergetischen Anteils der Fernwärme die Verluste in Verteilung und Erzeugung des vorgeschalteten Wärmenetzes nur vereinfacht dargestellt werden, indem die primärexergetische Aufwandszahl der Fernwärme mit dem Primärenergiefaktor gleichgesetzt wird (vgl. Formel (9.52)).

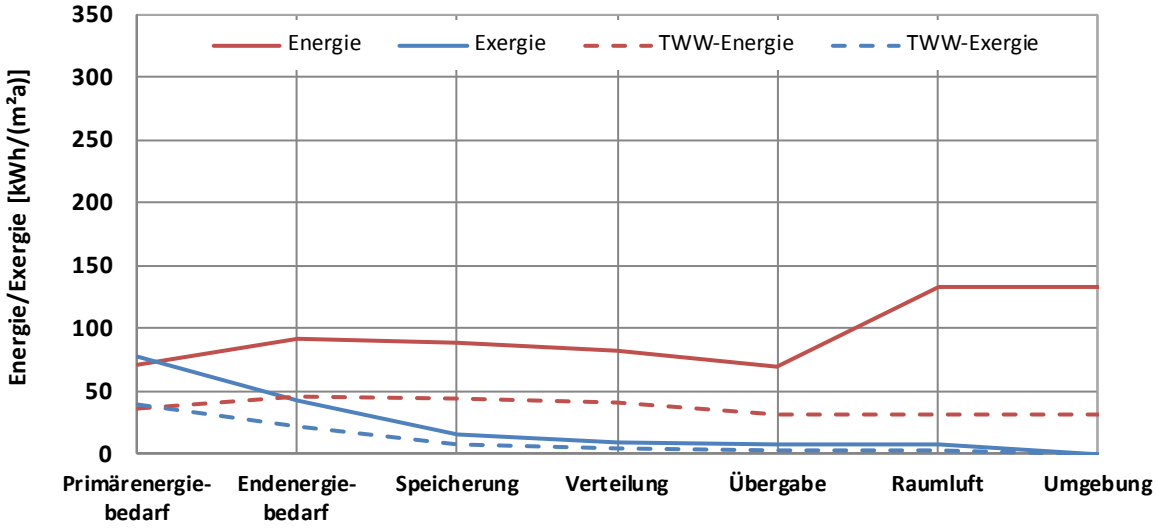


Abb. 9-35 Energie- und Exergiebedarf über alle Bilanzräume bei Versorgung durch Wärmepumpe im MFH (hier exemplarisch mit hohem Gebäudeenergiestandard und TWW-Temperaturniveau von 60 °C)

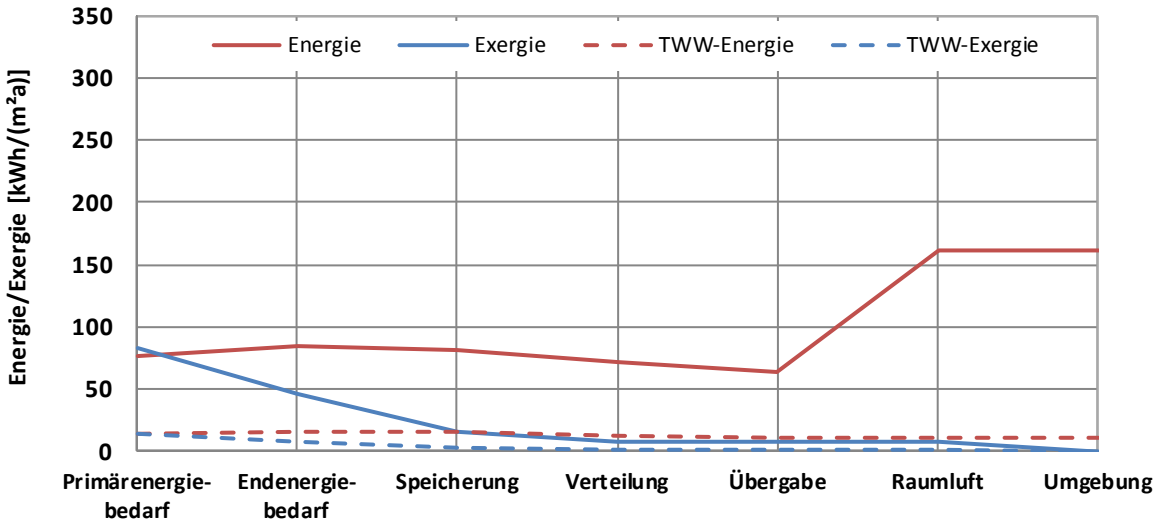


Abb. 9-36 Energie- und Exergiebedarf über alle Bilanzräume bei Versorgung durch Wärmepumpe im EFH (hier exemplarisch mit hohem Gebäudeenergiestandard und TWW-Temperaturniveau von 60 °C)

Im weiteren Vergleich der Erzeugertechnologien sind Wärmepumpen aus exergetischen Gesichtspunkten schlechter als Fernwärme, jedoch besser als Brennwert-Kessel einzustufen. Die energetische und exergetische Qualität einer Wärmepumpe steht dabei in starker Abhängigkeit zu den Betriebsbedingungen. Ein hoher Stromverbrauch des Verdichters ist aus exergetischer Sicht besonders kritisch, da elektrische Energie als hochexergetische Energieform für die Wärmeversorgung eher ungeeignet ist. Durch günstige Betriebsbedingungen, wie hohe Quelltemperaturen und niedrige Versorgungstemperaturen, sowie eine Unterstützung der Wärmepumpe, beispielsweise durch Solarthermie, kann die Jahresarbeitszahl verbessert und der primäre Bedarf an Energie und Exergie somit verringert werden. Die Simulationsvarianten mit einer kombinierten Versorgungslösung aus Wärmepumpe und Solarthermie, die in Abb. 9-37 (MFH) und Abb. 9-38 (EFH) dargestellt werden, verdeutlichen diesen Effekt. Die Solarthermie-Anlage stellt dabei Wärme auf

einem niedrigen Temperaturniveau bereit und erweist sich somit als bedarfsangepasste Versorgungsmethode, sodass der Primärenergiebedarf und sein exergetischer Anteil im MFH im Gegensatz zur monovalenten Betriebsweise der Wärmepumpe um 11 % bis 16 % gesenkt wird. Im EFH beträgt die Senkung des primären Energie- und Exergiebedarfs durch die solarthermische Unterstützung nur ungefähr 5 %, da die Kollektorfläche und somit der Wärmeeintrag durch die Solaranlage im Verhältnis zur Wohnfläche geringer ist als im MFH.

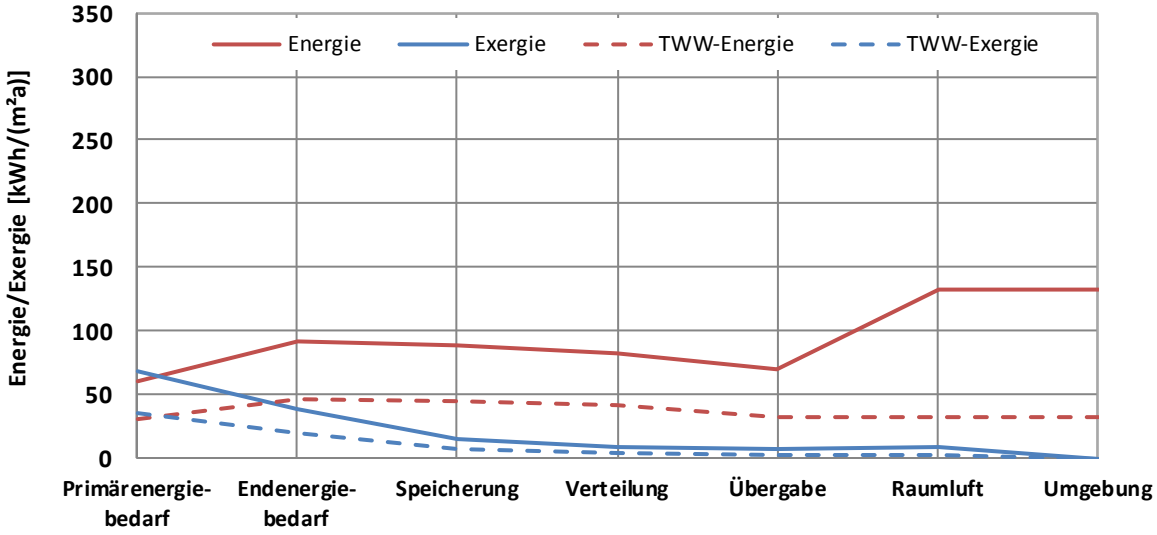


Abb. 9-37 Energie- und Exergiebedarf über alle Bilanzräume bei Versorgung durch Wärmepumpe mit solarthermischer Unterstützung im MFH (hier exemplarisch mit hohem Gebäudeenergiestandard und TWW-Temperaturniveau von 60 °C)

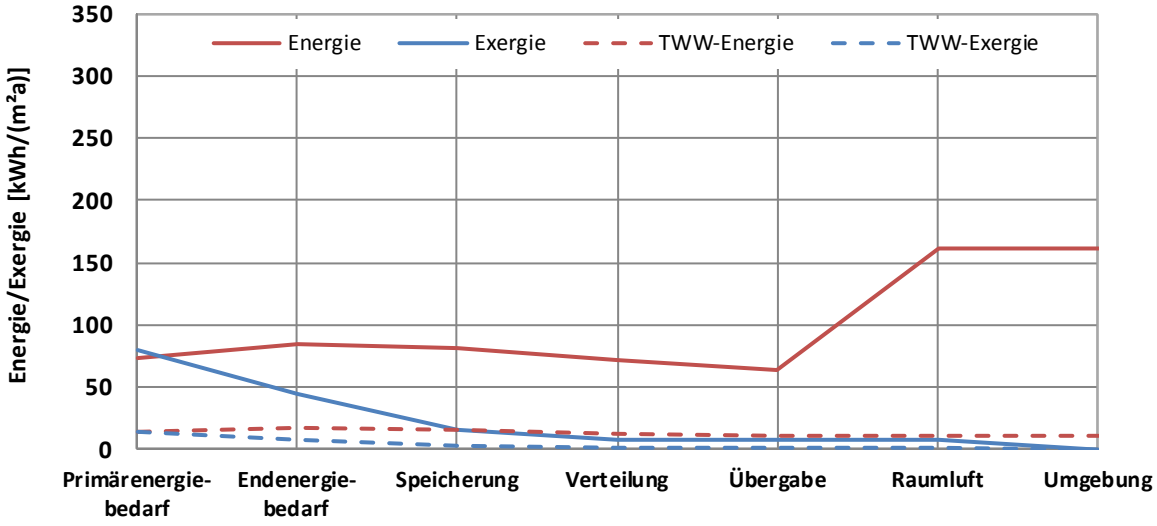


Abb. 9-38 Energie- und Exergiebedarf über alle Bilanzräume bei Versorgung durch Wärmepumpe mit solarthermischer Unterstützung im EFH (hier exemplarisch mit hohem Gebäudeenergiestandard und TWW-Temperaturniveau von 60 °C)

Zusammenfassend wird im Erzeugervergleich deutlich, dass bei der thermischen Versorgung von Wohngebäuden, welche lediglich niedrige Temperaturniveaus erfordert, nied-

rigexergetische Energiequellen eine besondere Eignung aufweisen. Bei dieser Bewertungsmethode erweisen sich die regenerative Wärmeerzeugung und die Nutzung von Fernwärme als beste Versorgungsmethoden. Der exergetische Einfluss der TWW-Bereitung auf die Wärmeerzeugung wird erst dann deutlich, wenn sich die Versorgungstemperatur der Raumheizung unter dem TWW-Temperaturniveau befindet, wie es beispielsweise beim Einsatz von Fußbodenheizungen der Fall ist. In einem solchen Szenario werden die Spitzenlasten der Wärmeerzeugung und somit auch die Dimensionierung der Erzeugereinheit durch die TWW-Bereitung bestimmt. Untersuchungen über den Einfluss des TWW-Temperaturniveaus auf die Wärmeerzeugung sind in diesem Kontext also von besonders hoher Relevanz.

9.3.3.3 Exergetischer und energetischer Vergleich des TWW-Temperaturniveaus

Für die Einflussanalyse des TWW-Temperaturniveaus werden die entsprechenden Simulationsvarianten in einer Darstellung direkt miteinander verglichen. Der Verlauf des TWW-Anteils der Energie und Exergie wird weiterhin nicht mehr abgebildet, da alle relevanten Effekte im Gesamtbedarf zu erkennen sind.

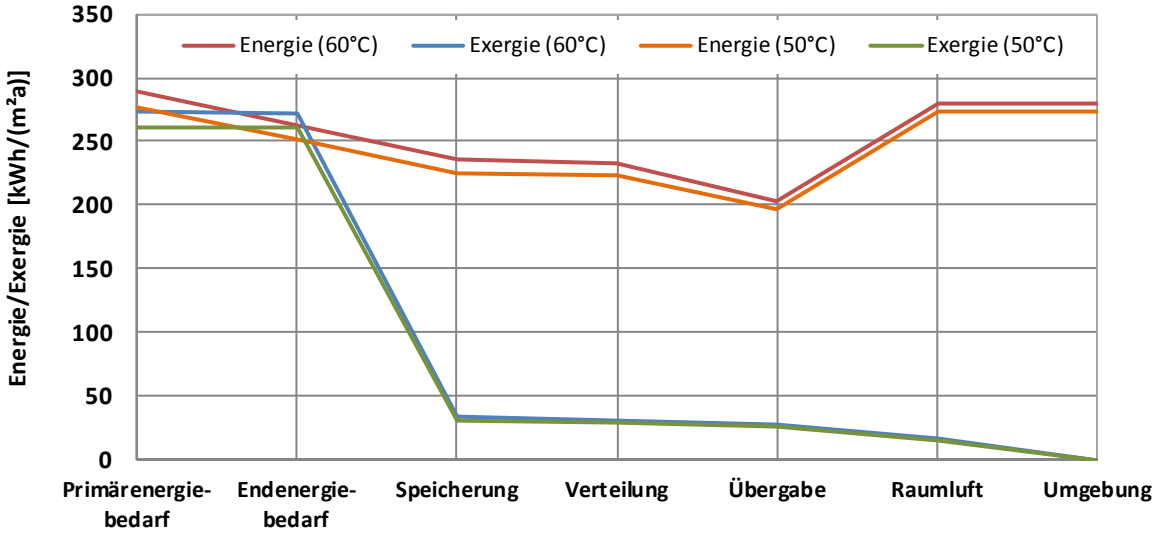


Abb. 9-39 Einfluss der Absenkung des TWW-Temperaturniveaus auf den Energie- und Exergiebedarf der Referenzvariante des MFH

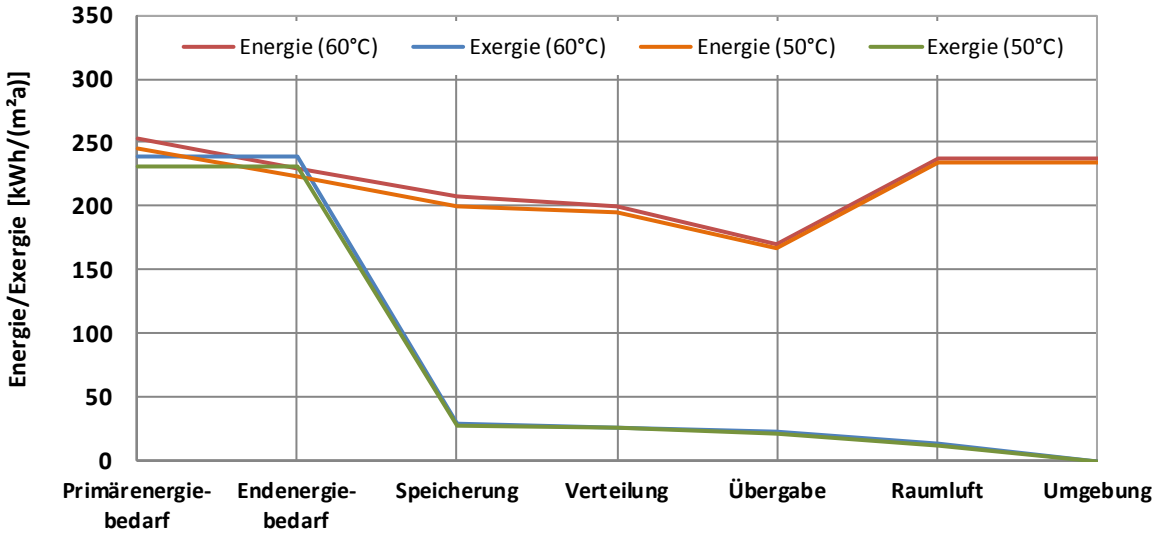


Abb. 9-40 Einfluss der Absenkung des TWW-Temperaturniveaus auf den Energie- und Exergiebedarf der Referenzvariante des EFH

Die Absenkung des TWW-Temperaturniveaus erzeugt eine Verringerung des Energie- und Exergiebedarfs in allen Bilanzräumen. Die Gegenüberstellung von MFH (Abb. 9-39) und EFH (Abb. 9-40) verdeutlicht dabei, dass die Verringerung des Energie- und Exergiebedarfs im MFH stärker ausfällt. Dieser Umstand ist in erster Linie der höheren Personenbelegungsrate und dem einhergehend höheren Nutzbedarf des TWW im MFH geschuldet. Wie bereits in Kapitel 9.3.2.3 diskutiert, ist der prozentuale Einfluss der Temperaturabsenkung auf die Primärenergie im Neubau höher als im Bestand. Der Vergleich des Exergieverhaltens von Bestand (Abb. 9-39 und Abb. 9-40) und Neubau (Abb. 9-41 und Abb. 9-42) ergibt, dass dies gleichermaßen für den primärexergetischen Anteil gilt. Darüber hinaus verdeutlicht der Verlauf der Energie, dass die Wärmeverluste in Speicherung und Verteilung bei Absenkung des Temperaturniveaus geringer werden und somit insbesondere den Bedarf in diesem Bilanzraum senken.

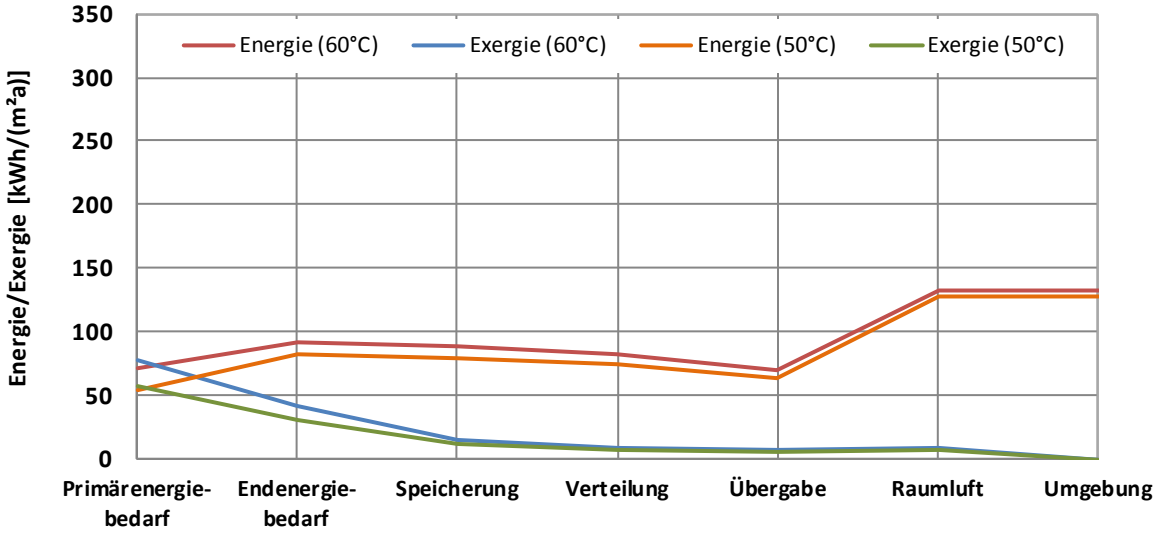


Abb. 9-41 Einfluss der Absenkung des TWW-Temperaturniveaus auf den Energie- und Exergiebedarf im Neubau bei Versorgung mit Wärmepumpe im MFH

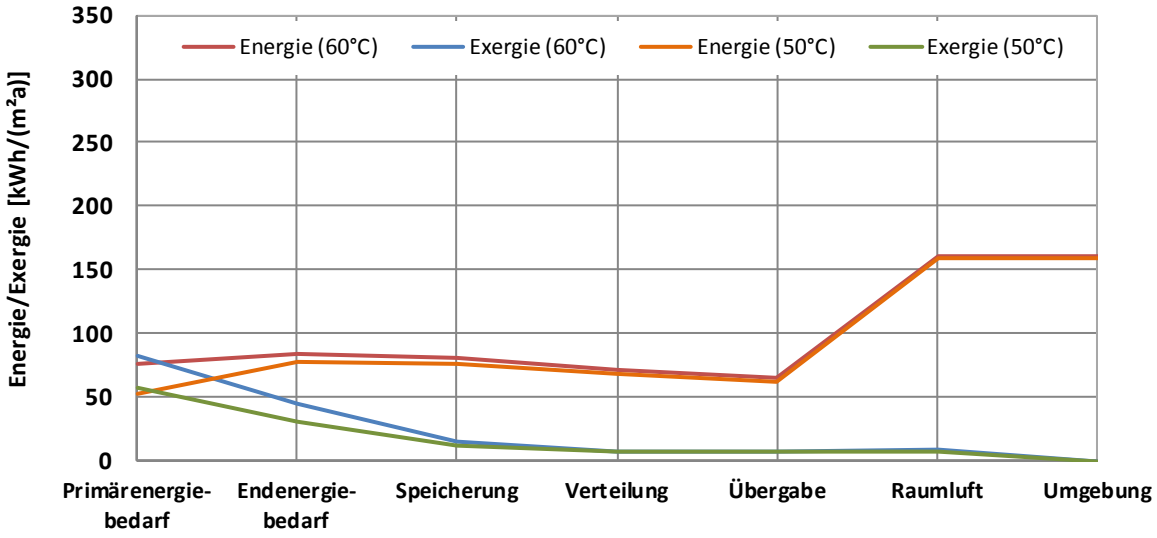


Abb. 9-42 Einfluss der Absenkung des TWW-Temperaturniveaus auf den Energie- und Exergiebedarf im Neubau bei Versorgung mit Wärmepumpe im EFH

Weiterhin zeigt die Absenkung des Temperaturniveaus für den Einsatz von Wärmepumpen ein erhöhtes Einsparpotenzial. Hierbei wird berücksichtigt, dass mit dem Temperaturniveau die von der Wärmepumpe zu erbringende Versorgungstemperatur gesenkt wird und somit höhere Leistungszahlen erzielt werden. Dieser Effekt resultiert in einer überdurchschnittlichen Ersparnis der Primärenergie von 25 % bei einer Absenkung des TWW-Temperaturniveaus von 60 °C auf 50 °C. Andere Erzeugertechnologien im Neubau weisen hier ein primärenergetisches Einsparpotenzial von 10 % auf (vgl. Kapitel 9.3.2.3).

Es lässt sich abschließend festhalten, dass die Temperaturabsenkung des TWW besondere Einsparpotenziale aufweist, wenn damit auch das Temperaturniveau der gesamten thermischen Versorgung gesenkt wird. Hierbei ergeben sich vor allem für Wärmepumpen und Wärmenetze im Niedertemperaturbetrieb neue Einsatzmöglichkeiten und Effizienzsteigerungen.

9.3.4 Quantifizierung des Einsparpotenzials bei regenerativen Erzeugern

Im Zuge der energetischen und exergetischen Analyse (Kapitel 9.3.2 und 9.3.3) wird ein besonderes Einsparpotenzial regenerativer Erzeugertechnologien bei einer TWW-Temperaturabsenkung aufgrund einer Effizienzsteigerung identifiziert. Diese Effizienzsteigerung erfolgt bei Wärmepumpen und Solarthermie-Anlagen, da diese Erzeuger bei einer Reduzierung der notwendigen Vorlauftemperatur häufiger, länger und in günstigeren Betriebspunkten Wärme bereitstellen können. Eine Quantifizierung des genannten Einsparpotenzials wird in Abb. 9-43 (MFH) und Abb. 9-44 (EFH) dargestellt. Hierzu werden Versorgungsszenarien mit Wärmepumpe, solarthermischer Unterstützung sowie mit BW-Kessel gegenübergestellt, um die Anteile der eingesetzten Energieträger am Endenergiebedarf in Abhängigkeit des TWW-Temperaturniveaus zu betrachten.

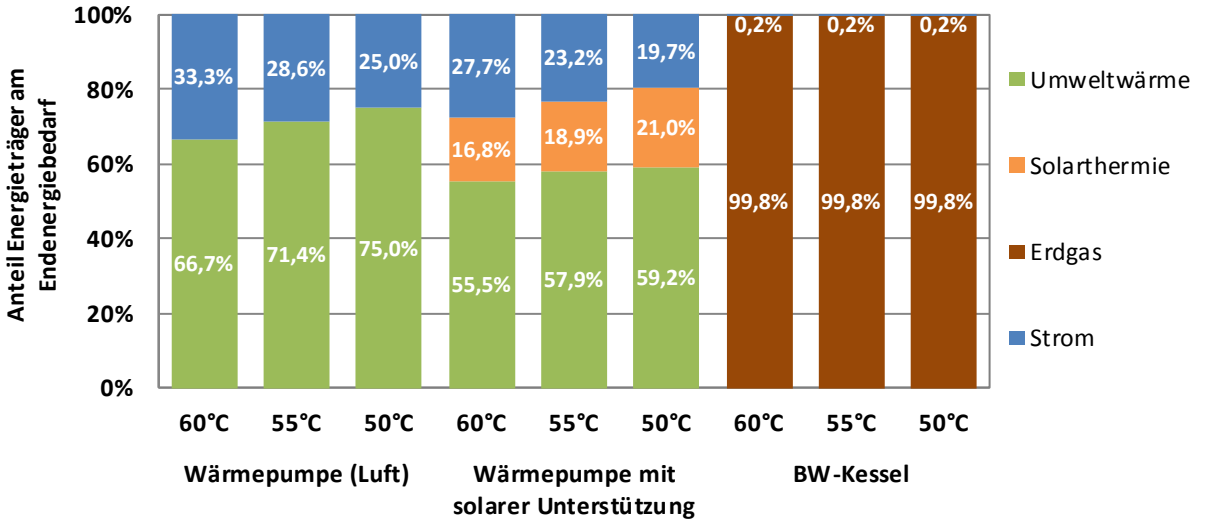


Abb. 9-43 Vergleich des Anteils eingesetzter Energieträger unterschiedlicher Erzeugertechnologien bei variierenden TWW-Temperaturniveaus im MFH

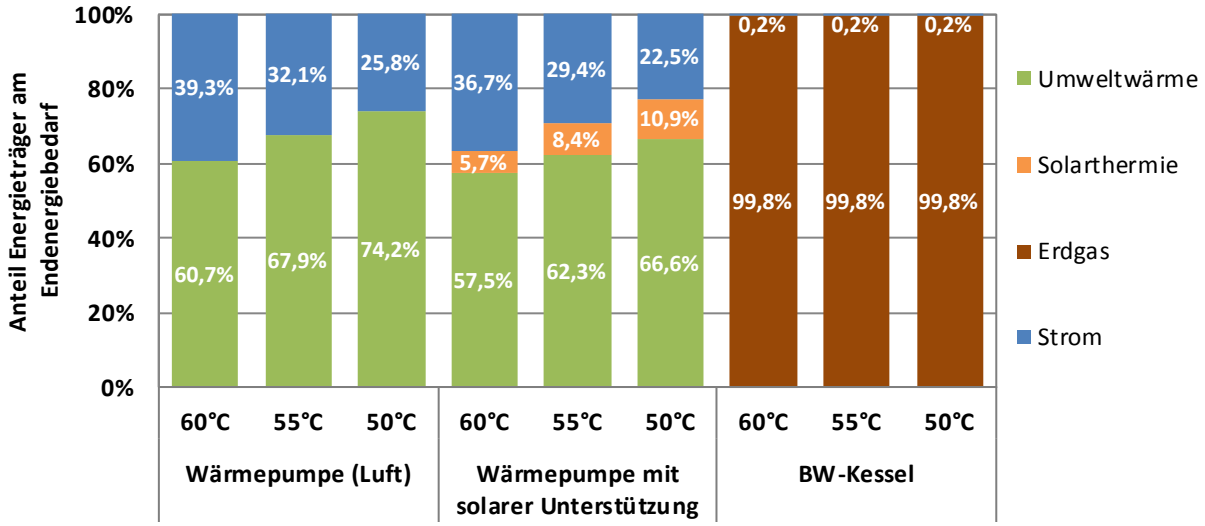


Abb. 9-44 Vergleich des Anteils eingesetzter Energieträger unterschiedlicher Erzeugertechnologien bei variierenden TWW-Temperaturniveaus im EFH

Bei diesem Vergleich wird deutlich, dass die durch Umweltwärme und solare Einstrahlung eingebrachte Energie sowohl absolut als auch relativ bei einer Reduzierung der Vorlauftemperatur steigt. Eine Wärmeversorgung durch einen BW-Kessel basiert hingegen nahezu ausschließlich auf Erdgas mit einer Ausnahme von 0,2 % an elektrischer Energie für den Strombedarf der Pumpen. Im Kontext der hier verwendeten Modellparameter kann bei einer Temperaturabsenkung um 5 K durch die Effizienzsteigerung von Wärmepumpen und Solarthermie-Anlagen eine Erhöhung des Anteils regenerativer Energieträger am Endenergiebedarf um ungefähr 4,5 % im MFH und 8 % im EFH erzielt werden. Wird das TWW-Temperaturniveau hingegen von 60 °C auf 50 °C abgesenkt, können bis zu 8 % im MFH und 14 % im EFH zusätzlich aus regenerativen Quellen gedeckt werden. Die Diskrepanz zwischen den Werten des MFH und EFH hat vielfältige Gründe. So wurden im MFH und EFH verwendeten Wärmepumpen und Solaranlagen jeweils unterschiedlich dimensioniert und mit verschiedenen Kennlinien parametrisiert. Ebenso führen die variierenden

Größen der Pufferspeicher zu unterschiedlichen Auslastungspotenzialen der regenerativen Erzeuger.

9.4 Abschätzung des Endenergiebedarfs und der Treibhausgasemissionen im Bilanzraum „Deutschland“

Der jährliche Endenergiebedarf für die Bereitstellung von Wärme im Gebäudesektor beträgt 779,2 TWh/a (Stand 2015) [BDEW 2016b], wovon ca. 665,6 TWh/a auf die Bereitstellung von Raumwärme und 113,7 TWh/a auf die Trinkwassererwärmung entfallen. Damit nimmt der Energiebedarf dieses Sektors einen Anteil von etwa 30 % am gesamten deutschen Endenergiebedarf ein. Im Zuge weiterer Untersuchungen soll das Einsparpotential des Endenergiebedarfs und der Treibhausgasemission im Bilanzraum „Deutschland“ abgeschätzt werden. Bei dieser Analyse wurde der derzeitige deutsche Energiemix[15] zugrunde gelegt (Energieträger: 53,6 % Gas; 28,6 % Öl; 14,9 % FW; 2,9 % Strom) [BDEW 2016b]. Darüber hinaus sind sowohl Wohngebäude als auch Gebäude des Gewerbes, des Handels und der Dienstleistung (GHD) bei der Untersuchung miteinbezogen.

Bei der Absenkung der TWW-Temperatur von 60 °C auf 55 °C wird potentiell eine Reduktion des Energiebedarfes um 22,2 TWh/a erreicht. Dies entspricht einer Reduktion des Energiebedarfes um 19,5 % (3,9 % des Sektorbedarfs).Bei einer Absenkung von 10 K kann eine Verringerung um bis zu 43,5 TWh/a (6 %) erreicht werden[16]. Dies entspricht einer Reduktion des Energiebedarfes um 38,3 % (6,8 % des Sektorbedarfs). Das Einsparpotenzial ergibt sich vor allem durch geringere Wärmeverluste in der TWV. Darüber hinaus ist zu berücksichtigen, dass mit sinkender Vorlauftemperatur die Effizienz der eingesetzten regenerativen Energieerzeuger steigt.

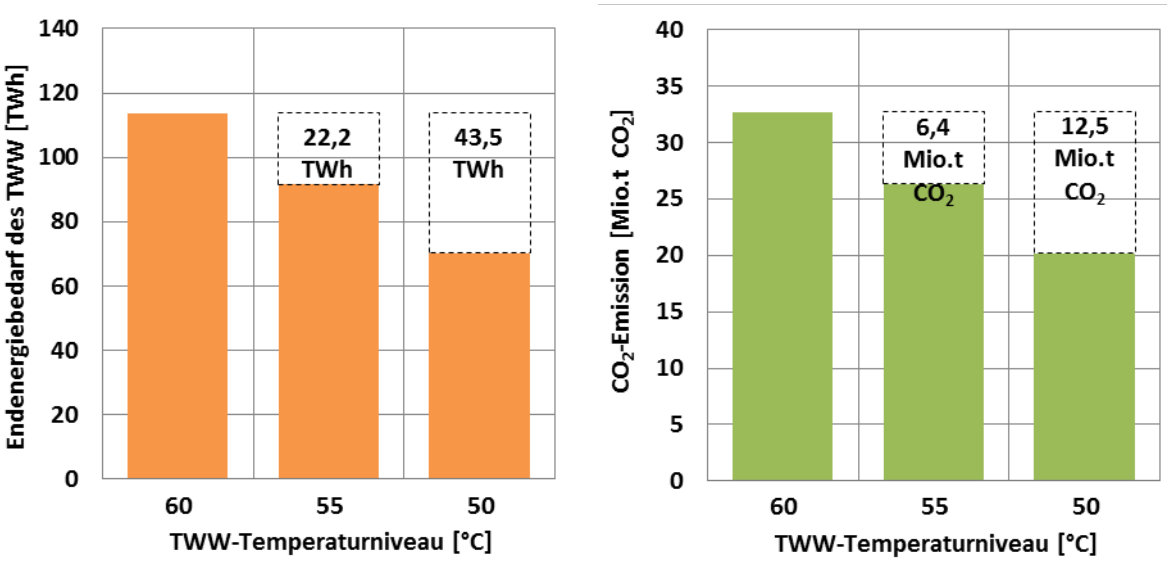


Abb. 9-45 Hochrechnung des Einsparpotenzials des Endenergiebedarfs (links) und der Treibhausgasemissionen (rechts) für Wohngebäude und Gebäude des GHD im Bilanzraum „Deutschland“

[15] Bezugsjahr 2015

[16] Als Datengrundlagen wurden hierzu insbesondere die Gebäudestatistik aus [IWU15], die Verteilung der Erzeugertechnologien im Bestand aus [BDEW 2016b] verwendet. Weiterhin wird davon ausgegangen, dass jede Wohneinheit im Schnitt von vier Personen bewohnt wird.

Bei der reinen Betrachtung der Wohngebäude (Abb. 9-46) verringert sich das Einsparpotenzial entsprechend.

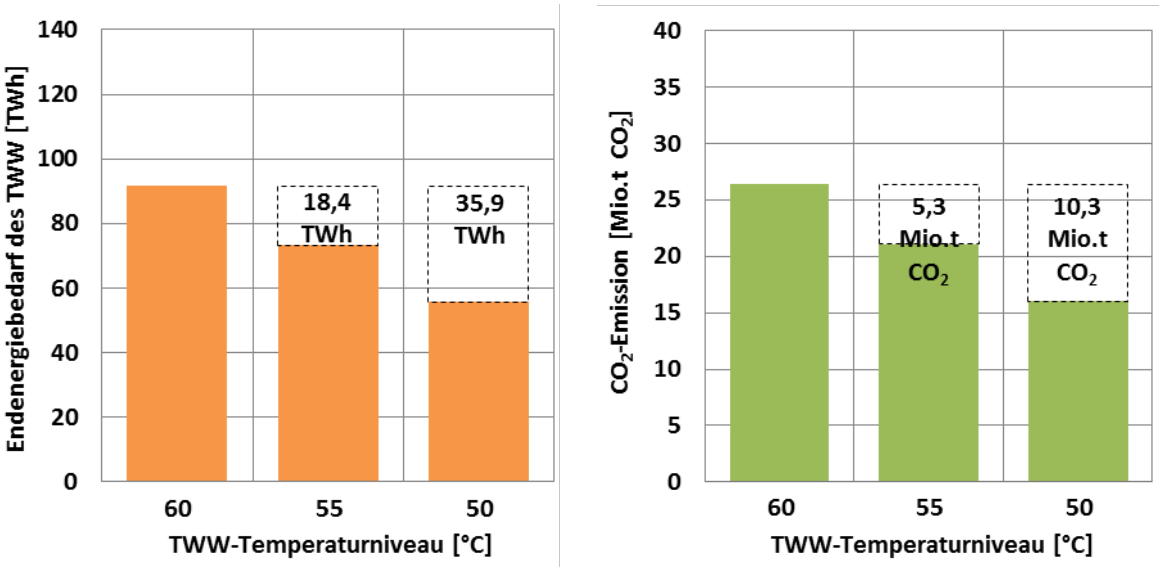


Abb. 9-46 Hochrechnung des Einsparpotenzials des Endenergiebedarfs (links) und der Treibhausgasemissionen (rechts) für Wohngebäude im Bilanzraum „Deutschland“

Wird dieses Einsparpotential auf das Minderungspotenzial von Treibhausgasemissionen[17] umgerechnet, können bei einer Absenkung um 5 K etwa 4,5 Millionen Tonnen pro Jahr (Mio. t/a) CO_2 und bei einer Absenkung um 10 K ca. 9,0 Mio. t/a CO_2 vermieden werden. Dies entspricht einer Reduktion der CO_2-Emissionen um bis zu 20 %. Darüber hinaus bietet die Absenkung des TWW-Temperaturniveaus ein erhöhtes Einsatzpotenzial für regenerative Erzeuger Wird allein die Effizienzsteigerung bereits installierter regenerativer Wärmeerzeuger berücksichtigt, könnten bei einer Temperaturabsenkung um 5 K zusätzlich bis zu 2 Mio. t/a CO_2 eingespart werden. Durch den Einsatz regenerativer Energien erhöht sich das prozentuale Einsparpotenzial entsprechend

Die Abschätzung verdeutlicht, dass die Temperaturabsenkung des TWW ein relevantes Einsparpotenzial bietet und somit einen weiteren Schritt zur Erreichung der Klimaziele darstellt.

9.5 Zusammenfassung

Durch die stetige Verbesserung des Energiestandards von Gebäuden nimmt die Rolle der Trinkwassererwärmung im Zusammenhang der energetischen Gesamtversorgung eines Gebäudes immer mehr an Bedeutung zu. Es gilt daher, insbesondere in Hinblick auf die durch die Bundesregierung gesetzten Ziele der Energiewende, mögliche Optimierungsmaßnahmen und Einsparpotenziale bei der Bereitstellung von TWW zu identifizieren und zu quantifizieren. Vor diesem Hintergrund wurde eine energetische und exergetische Analyse der Wärmeversorgung von Wohngebäuden unter besonderer Berücksichtigung der Trinkwasser-Installation vorgenommen.

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

Durch die energetische Analyse wurde zunächst der Anstieg des Anteils der TWW-Bereitung am Gesamtenergiebedarf infolge einer Sanierung der Gebäudehülle quantifiziert. Hierbei stellte sich heraus, dass dieser Anteil in neuen und sanierten Gebäuden gegenüber Bestandsgebäuden von ungefähr 20 % auf bis zu 50 % des Gesamtenergiebedarfs ansteigt. Wird weiterhin das Temperaturniveau des TWW von 60 °C auf 50 °C in den unterschiedlichen Gebäudetypen gesenkt, so werden in Bestandsgebäuden bis zu 4,3 % und in Gebäuden mit hohem Energiestandard bis zu 10 % des Primärenergiebedarfs eingespart. 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 Vorlauf-Temperaturen eine signifikante Effizienzsteigerung erfahren. So können beim Einsatz von Wärmepumpen oder Solarthermie-Anlagen durch eine Absenkung des TWW-Temperaturniveaus zusätzlich zwischen 5 % und 7,5 % des Endenergiebedarfs aus regenerativen Quellen gedeckt werden. Ebenso eröffnen sich neue Einsatzmöglichkeiten für die Wärmeversorgung durch Niedertemperatur-Wärmenetze, welche vor dem Hintergrund der Energiewende immer mehr an Bedeutung gewinnen [BMWi17]. 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. Die Hochrechnung auf den Bilanzraum Deutschland verdeutlicht einmal mehr, dass eine Absenkung des Temperaturniveaus eine signifikante Reduzierung des Endenergiebedarfs und der Treibhausgasemissionen ermöglicht. Es ist allerdings immer zu beachten, dass die Erkenntnisse der Trinkwasserhygiene derzeit nur eine Absenkung um 5 K erlauben, wenn die a.a.R.d.T. eingehalten werden.

Folgende Thesen wurden aus der Simulationsstudie Gesamtsystembetrachtungen herausgearbeitet:

Anteil des Trinkwarmwassers am Gesamtwärmebedarf Wohngebäude

Durch die Verbesserung des Gebäudeenergiestandards erhöht sich der Anteil der Trinkwassererwärmung am Gesamtendenergiebedarf auf 50 % und mehr.

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-Wärmeversorgungsysteme einzusetzen. *(Simulation)*

Temperaturniveau TWW – Endenergiebedarf und Treibhaugas-emissionen 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.

10 Internationaler Wissenstransfer IEA DHC TS1

Einen weiteren Bestandteil des Verbundprojektes bilden die Kommunikation und der Wissensaustausch mit internationalen Experten. Daher ist die Zusammenarbeit im Rahmen der Internationalen Energieagentur (IEA) über das internationale Projekt „Annex TS 1 ‚Low Temperature District Heating for Future Energy Systems‘“ eng mit der Projektbearbeitung verknüpft.

10.1 Zusammenfassung der Projektergebnisse

Das Kooperationsprojekt „IEA DHC Annex TS1 – Low Temperature District Heating for Future Energy Systems“ war ein dreijähriges, internationales Forschungsvorhaben der IEA. Das Projekt wurde im Rahmen des IEA-Technologieprogramms Fernwärme und –kälte inklusive Kraft-Wärme-Kopplung (IEA DHC/CHP) durchgeführt und im Dezember 2017 abgeschlossen. Bei der Umsetzung des Projektes waren zwölf Forschungsinstitutionen aus sieben Ländern beteiligt. Neben der Erarbeitung von Projektinhalten diente das Forschungsvorhaben als Plattform für den internationalen Erfahrungs- und Wissensaustausch sowie der Vernetzung.

Gegenstand des IEA DHC Annex TS1 war die Identifikation zukunftsweisender und innovativer Ansätze zur Fernwärmeversorgung auf Basis regenerativer Energiequellen oder Abwärme aus Industrieprozessen (Niedertemperaturquellen). Vor diesem Hintergrund hat eine internationale Expertengruppe die vielschichtigen, technologischen Aspekte der netzgebundenen Wärmeversorgung beleuchtet und diskutiert. Im Fokus der Arbeiten standen sowohl Neubau- als auch Bestandswärmenetze. Längerfristig sollen die erarbeiteten Ergebnisse maßgeblich zum Ausbau der Niedertemperatur-Fernwärmeversorgung beitragen und den vermehrten Einsatz regenerativer Energiequellen fördern.

Vor dem Hintergrund der definierten Ziele erfolgte die Erarbeitung der Ergebnisse in fünf Arbeitspaketen. Die Gesamtkoordination des Projektes und die Leitung des Arbeitspakets „Arbeitspaket E – Wissenstransfer (Berichte, Workshops)“ wurde durch den Operating Agent, Dr. Dietrich Schmidt (Fraunhofer IEE), übernommen.

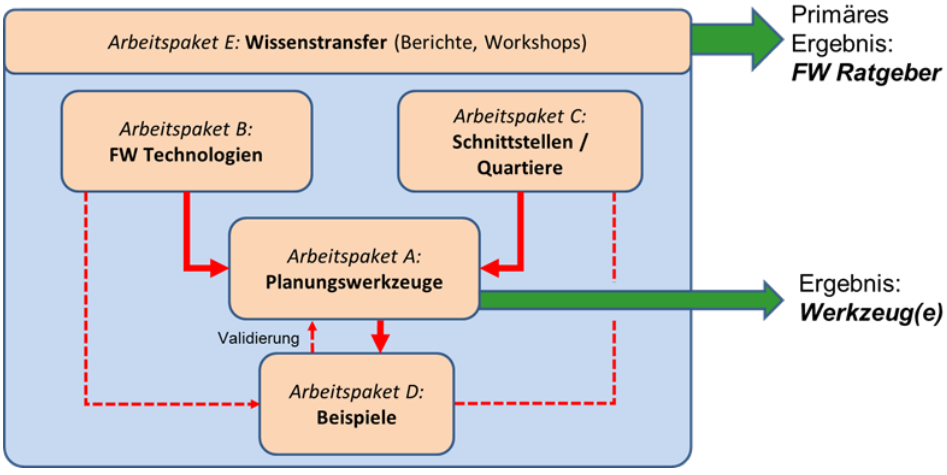


Abb. 10-1 Struktur und Arbeitspakete des IEA DHC Annex TS1

Ziel des „Arbeitspaket A – Planungswerkzeuge“ war die Sammlung und Analyse von Methoden und Planungswerkzeugen, welche der Bewertung lokaler Energiesysteme dienen. Die Auswertung der gesammelten Werkzeuge hat einige vielversprechende Ansätze für

die Niedertemperatur-Fernwärme aufgezeigt. Basierend auf den gewonnenen Erkenntnissen erfolgte die Entwicklung eines vereinfachten Fernwärmeplanungstools „Easy District Analysis (EDA)“. Das Tool richtet sich insbesondere an Stadtplaner und Planer in Versorgungsunternehmen und soll in der Vorplanungsphase eines Fernwärmesystems eingesetzt werden. Der Schwerpunkt des Tools liegt auf der Bewertung der Auswirkungen unterschiedlicher Netztemperaturen und verschiedener Betriebsmodi von Fernwärmeanlagen. Die Bewertung basiert auf den Parametern Primärenergieverbrauch, CO_2-Emissionen und Wärmeproduktionskosten. Die Leitung des Arbeitspaketes wurde von Dr. Markus Besl von der Universität Stuttgart (Deutschland) übernommen.

„Arbeitspaket B – FW Technologien“ umfasste die Gegenüberstellung von innovativen Fernwärme-Technologien und Systemkonzepten für die Wärmeerzeugung, -verteilung und –nutzung. Die Leitung des Arbeitspaketes oblag Prof. Svend Svendsen von der DTU (Dänemarks Technische Universität) in Kopenhagen (Dänemark). Im Rahmen des Arbeitspaketes wurden der aktuelle Stand der Technik sowie neuste wissenschaftliche Erkenntnisse für die Fernwärmeversorgung für Planer und Entscheidungsträger im Gebäude- und Fernwärmesektor zusammengetragen und aufbereitet. Die erarbeiteten Inhalte umfassen zukunftweisende Erkenntnisse zu Rohrleitungssystemen, Netztopologien, hygienischer Warmwasserbereitung in Niedertemperatursystemen, Raumheizungssteuerungen und die effiziente Integration dezentraler Wärmequellen (bspw. Abwärme oder Solarthermie).

Das „Arbeitspaket C – Schnittstellen/Quartiere“ befasst sich mit der Schnittstelle zwischen Erzeuger- und Verbraucherseite sowie der künftigen Entwicklung der Fernwärmeversorgung. Die Leitung wurde von Prof. Natasa Nord von der Technisch-Naturwissenschaftlichen Universität Norwegens (NTNU), Trondheim (Norwegen) übernommen. Die im Zuge des Arbeitspaketes vorgenommene Analyse des zukünftigen Wärmebedarfs verdeutlicht, dass die Fernwärme auch im Jahr 2050 noch eine wesentliche Versorgungslösung darstellen wird. Es konnte gezeigt werden, dass insbesondere die Niedertemperatur-Fernwärme eine vielversprechende Wärmeversorgung ist. Unter der Voraussetzung, dass Wärme zunehmend aus erneuerbaren Quellen und Abwärmequellen bei niedrigen Temperaturen zur Verfügung steht, wird die Fernwärme mit niedrigen Vorlauftemperaturen künftig von hoher Relevanz sein. Für die zukünftige Entwicklung der Fernwärme und einer hohen Zuverlässigkeit der Niedertemperatur-Fernwärmeversorgung sind statistische Daten und Kenntnisse über die Wärmeverluste und darüber, wie Betriebs- oder Temperaturniveaus zu den Verteilungsverlusten beitragen können, von grundlegender Bedeutung.

In Arbeitspaket „D“ werden innovative und erfolgreich umgesetzte Versorgungskonzepte, sogenannte Fallstudien, vorgestellt. Die Beschreibung der Fallstudien richtet sich insbesondere an kommunale Entscheidungsträger und Versorger, die an der Umsetzung innovativer, fernwärmebasierter Konzepte interessiert sind. Die dokumentierten Fallstudien zeichnen sich insbesondere durch den Einsatz zukunftsweisender Technologien oder der optimalen Einbindung verschiedener Komponenten in das Gesamtsystem aus. Aus den gewonnenen Erkenntnissen und Erfahrungen können grundlegende Prinzipien abgeleitet werden, die bei der Konzeptionierung von Versorgungssystemen von hoher Relevanz sind. Darüber hinaus wurden einige Messdaten der Fallstudien für die Validierung der entwickelten Modelle und Werkzeuge eingesetzt. Insgesamt erfolgte die Dokumentation von acht Fallstudien aus Deutschland, Dänemark, Finnland, Norwegen und Großbritannien. Die Größe der Fernwärmesysteme reichte dabei von kleineren Gebäudegruppen bis hin zu großen, kommunalen Versorgungsnetzen. Unter Berücksichtigung der Größe des Versorgungsgebietes variieren die Netzlängen zwischen 165 m und 140.000 m. Die an

die Netze angebundenen Gebäude waren Wohngebäude von unterschiedlicher Größe und unterschiedlichem Energiestandard. Die Mehrheit bildeten allerdings Niedrigenergie- oder Passivhäuser. Als Wärmequellen dienten Solarthermiekollektoren, Wärmepumpen oder Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen. Darüber hinaus erfolgte die Einbindung industrieller Abwärme oder die Kopplung an ein großes Fernwärmesystem durch die Verwendung von Wärmeüberträgern. Die erfassten Temperaturniveaus waren typisch für Niedertemperatursysteme, die von 40 bis 60 °C im Vorlauf und von 25 bis 40 °C im Rücklauf variierten. In allen dokumentierten Fallstudien konnten Energieeinsparungen und eine erhöhte Effizienz bei der Versorgung beobachtet werden. Das Arbeitspaket wurde von Kari Sipilä und Mika Rama, VTT Technical Research Centre of Finland, geleitet.

Aus den Ergebnissen des Projektes kann geschlussfolgert werden, dass die Niedertemperatur-Fernwärme eine Schlüsseltechnologie darstellt, die die Integration von erneuerbaren Energien und Abwärme für die Heizung und Kühlung fördert. Es konnte auch gezeigt, dass weitere Forschungs- und Entwicklungsarbeiten erforderlich sind, um die praktische und breite Umsetzung von Niedertemperatur-Fernwärmenetzen für verschiedene Fälle und Standorte bewerten zu können. Es wurde weiterhin deutlich, dass Wege zum Abbau von Hemmnissen für die praktische Umsetzung von Niedertemperatur-Fernwärmesystemen gefunden werden müssen. Nur auf diese Weise werden weitere Diskussionen unterstützt, die dazu beitragen Niedertemperatur-Heizsysteme zu bauen und in Betrieb zu nehmen.

Zusammenfassend konnte festgestellt werden, dass die Niedertemperatur-Fernwärme eine energie- und kosteneffiziente Lösung darstellt, um künftig eine nahezu emissionsfreie und auf bis 100 % auf erneuerbaren Energien basierende Versorgung von Städten und Gemeinden zu erreichen.

In enger Zusammenarbeit mit allen Projektpartnern wurde ein Endbericht (Guidebook) mit dem Titel „FUTURE LOW TEMPERATURE DISTRICT HEATING – DESIGN GUIDEBOOK“ erarbeitet und enthält alle der zuvor dargestellten Ergebnisse. Der Bericht gibt somit einen Überblick über unterschiedliche Aspekte der Niedertemperatur-Fernwärme (Eigenschaften und Vorteile, Technologien sowie Schnittstellen zu Städten) und stellt relevante Berechnungstools vor. Des Weiteren werden verschiedene Case-Studies von Niedertemperatur-Fernwärmenetzen in den Teilnehmerstaaten dargestellt. Neben dem Endbericht wurde eine Broschüre erstellt, in der alle Fallstudien dokumentiert wurden.

Der Bericht, die Broschüre und weiterführende Informationen zum Projekt stehen zum kostenfreien Download auf der Seite der Internationalen Energieagentur unter der URL http://www.iea-dhc.org/the-research.html zur Verfügung. Eine persönliche Registrierung auf der Internetseite des IEA DHC TCP ist erforderlich um die Dokumente herunterladen zu können.

10.2 Zeitplanung und internationaler Wissenstransfer

Weiterer wesentlicher Bestandteil des internationalen Projekts bestand in der Planung, Organisation und Durchführung von Industrieworkshops für Planer und Versorger im Rahmen von nationalen und internationalen Konferenzen in Zusammenarbeit mit der AGFW und den Verbundprojektpartnern. Durch diese Workshops wurde das Thema in der Fachwelt immer wieder aufgegriffen und diskutiert. Auf diese Weise konnten weitere Entwicklungen und neue nationale Vorhaben initiiert werden.

Nachfolgende Abbildung zeigt den vereinfachten Projektplan des Vorhabens „IEA DHC Annex TS1: Low Temperature District Heating for Future Energy Systems“ inklusive aller Arbeitspakete und Projektphasen.

Fortschritt Subtask	Prep. Phase 2012	Working Phase 2013	2014	2015	2016	2017
A: Planungswerkzeuge						
B: FW Technologien						
C: Schnittstellen / Quartiere						
D: Beispiele						
E: Wissenstransfer						
Annex Treffen						
Workshops						
Initiierung	**Prep. Phase**	**Working phase**				**Closing**

Abb. 10-2: Vereinfachter Projektplan des Vorhabens „IEA DHC Annex TS1: Low Temperature District Heating for Future Energy Systems“ inklusive aller Arbeitspakete, geplanten Meetings und Projektphasen.

In der Vorbereitungs- und Arbeitsphase des IEA DHC Annex TS1 haben insgesamt zehn Projekttreffen stattgefunden. Die wesentlichsten Inhalte der Treffen sind nachfolgend zusammengestellt:

- September 2016: Achtes und letztes Projekttreffen in Seoul (Korea).
- April 2016: Siebtes Projekttreffen in Frankfurt am Main.
- September 2015: Sechstes Projektreffen in Nordborg (Dänemark).
- Mai 2015: Fünftes Projekttreffen in Trondheim (Norwegen)
- September 2014: Viertes Projekttreffen in Stockholm (Schweden).
- Mai 2014: Drittes Projekttreffen in Watford (Vereinigtes Königreich Großbritannien)
- September 2013: Zweites Projekttreffen in Espoo, Finnland.
- März 2013: Erstes Projekttreffen in Stockholm, Schweden
- August 2012: Zweites Vorbereitungstreffen in Reykjavik, Island
- April 2012: Erstes Vorbereitungstreffen in Kopenhagen, Dänemark

Im Zuge der Aktivitäten des IEA DHC Annex TS1 haben folgende Industrie- und FuE-Workshops stattgefunden:

- April 2016: Industrie und FuE-Workshop zum Thema “Realization of Innovative Low Temperature District Heating Systems in Communities” in Frankfurt am Main
- September 2015: Industrie und FuE-Workshop zum Thema “Transition from existing District Heating grids to low temperature grids” bei Danfoss A/S in Nordborg (Dänemark).
- Mai 2015: Industrie und FuE-Workshop zum Thema „Energieeffizienz und Hygiene in der Trinkwasser-Installation“ an der Technisch-Naturwissenschaftliche Universität Norwegens (NTNU) in Trondheim (Norwegen). Aus dem nationalen Vorhaben konnten Frau Dr. Rühling und Herr Dr. Lück der TU Dresden sowie Frau Dr. Schreiber vom IHPH der Universität Bonn als Referenten gewonnen werden. Bei diesem Meeting waren 25 Teilnehmer aus 4 Ländern (Dänemark, Deutschland, Norwegen und Schweden) aus der Industrie und Forschung zugegen.
- Mai 2014: Industrie Workshop: “Workshop for Industry and Politics on Advanced District Heating” in in BRE, Building Research Establishment Ltd., Watford, Vereinigtes Königreich Großbritannien.

Zum Zweck des Wissenstransfers und der Verbreitung der Ergebnisse erfolgt die Nutzung der Webpräsenz der Internationalen Energie Agentur (Programm Fernwärme und Kraft-wärmekopplung). Unter der Adresse http://www.iea-dhc.org/the-research/annexes.html können Protokolle, Präsentationen sowie Arbeitsinhalte vergangener Meetings abgerufen werden.

10.3 Veröffentlichungen und Durchführung von Konferenzsessions

Im Zuge des IEA DHC Annex TS1 wurden mehrere Konferenzsessions durchgeführt, bei denen das jeweilige Paper zum Teil in Fachzeitschriften veröffentlicht wurde.

Paper, welche im Zuge der Session zu „IEA DHC Annex TS1“ im Rahmen der Konferenz “15th international Symposium on DHC2016“ vorgestellt wurden, wurden als Journal – Paper in Elsevier Energy Procedia (EP) veröffentlicht. Die Veröffentlichungen sind frei verfügbar (open Access) und können unter folgendem Link heruntergeladen werden: http://www.sciencedirect.com/science/journal/18766102/116/supp/C?sdc=1

- The feasibility analysis for the concept of low temperature district heating network with cascade utilization of heat between networks; Muhammad Imran, Muhammad Usman, Yong Hoon Im, Byung Sik Park; Elsevier Energy Procedia (EP)Volume 116, June 2017, Pages 04-12; https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.05.050
- Exergy-based analysis of renewable multi-generation units for small scale low temperature district heating supply; Anna Kallert, Dietrich Schmidt, Thies Bläse; Elsevier Energy Procedia (EP)Volume 116, June 2017, Pages 13-25; https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.05.051
- Low Temperature District Heating for Future Energy Systems; Dietrich Schmidt, Anna Kallert, Markus Blesl, Svend Svendsen, Hongwei Li, Natasa Nord, Kari Sipilä; Elsevier Energy Procedia (EP)Volume 116, June 2017, Pages 26-38; https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.05.052
- Development of an Innovative Low Temperature Heat Supply Concept for a New Housing Area; Dietrich Schmidt, Anna Kallert, Janybek Orozaliev, Isabelle Best, Klaus Vajen, Oliver Reul, Jochen Bennewitz, Petra Gerhold; Elsevier Energy Procedia (EP)Volume 116, June 2017, Pages 39-47; https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.05.053
- Necessary Measures to Include more Distributed Renewable Energy Sources into District Heating System; Natasa Nord, Dietrich Schmidt, Anna Marie Dagmar Kallert; Elsevier Energy Procedia (EP)Volume 116, June 2017, Pages 48-57; https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.05.054
- Transition to low temperature distribution in existing systems; Miika Rämä, Kari Sipilä; Elsevier Energy Procedia (EP)Volume 116, June 2017, Pages 58-68; https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.05.055

Im Rahmen der Konferenz „12th REHVA World Congress – CLIMA 2016“ (22.-25. Mai 2016, Aalborg (Dänemark)) hat im Kontext der IEA DHC Annex TS1 eine Technical Session zum Thema “How a fossil free building stock could be realized based on low temperature district heating?” stattgefunden. Der Vorsitz und die Leitung wurden von Dr. Dietrich Schmidt (Fraunhofer IEE) übernommen. Folgende Paper wurden im Zuge der Konferenz veröffentlicht und im Rahmen einer Präsentation vorgestellt:

- Successful Implementation of Low Temperature Heating Systems in Communities Dr. Dietrich Schmidt, Fraunhofer IEE, Deutschland

- Technologies for supply of heating and hot water to buildings based on low temperature district heating
  Prof. Svend Svendsen, Dänemarks Technische Universität (DTU), Dänemark
- Building solutions for low temperature heat supply
  Dr. Oddgeir Gudmundsson, DANFOSS, Dänemark
- Technical, ecological and environmental Evaluation of different district heat supply and space heating concepts
  Dr. Markus Blesl, Universität Stuttgart, Deutschland
- Improved interfaces for enabling integration of low temperature and distributed heat sources – requirements and examples
  Prof. Natasa Nord, Technisch-Naturwissenschaftliche Universität Norwegens (NTNU), Norwegen

Im Rahmen der Konferenz DHC14 – The 14th International Symposium on District Heating and Cooling (6.-10. September, Stockholm/Schweden) erfolgte die Ausrichtung einer Annex TS1 – Session mit dem Titel „Low temperature district heating for future energy systems, Annex TS1 session”. Der Vorsitz und die Leitung wurden von Dr. Dietrich Schmidt (Fraunhofer IEE) übernommen.

- Heat Exchanger Measurements in a Consumer Substation with Mass Flow Control and DH Ring Network
  Maunu Kuosa, Aalto University (Finnland)
- Analysis for application of flat station as a promising method for low temperature district heating without risk of *legionella*
  Xiaochen Yang, Dänemarks Technische Universität (DTU), Dänemark
- Optimization of district heating generation by considering the distribution issues and load uncertainty
  Prof. Natasa Nord, Technisch-Naturwissenschaftliche Universität Norwegens (NTNU), Norwegen
- Feasibility study on the low temperature district heating system with bi-lateral heat trades model
  Yong Hoon, Korea Institute of Energy Research (KIER), Korea
- Low Temperature District Heating for Future Energy Systems
  Dr. Dietrich Schmidt, Fraunhofer IEE, Deutschland
- Comparison and dynamic simulation of motorized-valve control and distributed-pump control in the primary side of district heating system
  Hongwei Li, Dänemarks Technische Universität (DTU), Dänemark
- A new district heating system in the city of Bolzano: Developing smart solutions within “Sinfonia” project
  Hongwei Li, Dänemarks Technische Universität (DTU), Dänemark
- Network simulation of low heat demand residential area
  Miika Rämä, Technisches Forschungszentrum Finnland VTT

11 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 Energie¬einsparpotentiale sowie zur Integration von erneuerbaren Energien bei Beachtung des Primats der menschlichen Ge-sundheit. Im Fokus standen Wohngebäude, insbesondere Mehrfamilienhäuser bei Be-triebsweisen 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.

Abb. 11-1 soll den Zusammenhang zwischen den vier Hauptgruppen der Untersuchungen im Verbundvorhaben sowie den daraus abgeleiteten Erkenntnissen verdeutlichen. Durch den interdisziplinären und breit angelegten Projektansatz war es möglich, die Erkenntnisse – wie dargestellt – überwiegend auf Basis der Ergebnisse von mehreren, im Charakter unterschiedlichen und über einen längeren Zeitraum andauernde Untersuchungen zu formulieren und in den Kapiteln 2 sowie 4 bis 9 zusammenzustellen. Basis für viele dieser Auswertungen bilden die im Kapitel 3 vorgestellten Datenbanken. Um zu bestimmten, nicht allen Lesern gleichermaßen geläufigen Begriffen und Definitionen einen schnellen Zugang zu haben, wurde in Kapitel 12 ein Glossar erstellt.

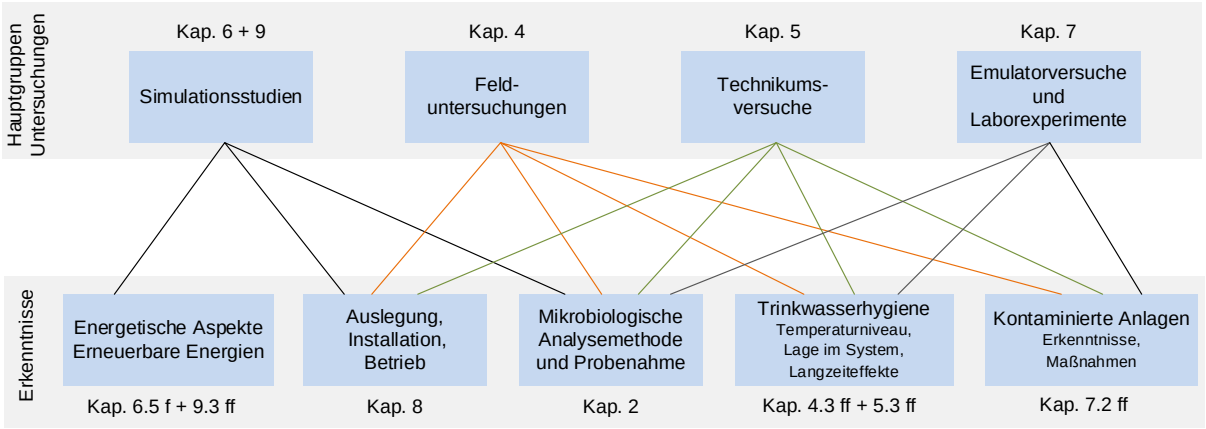


Abb. 11-1 Übersicht zu Verknüpfungen zwischen den Hauptgruppen von Untersuchungen und den abgeleiteten Erkenntnissen

Einige der Erkenntnisse sind zwar den einschlägigen Fachexperten schon bekannt und z. T. auch in Regelwerke umgesetzt, finden jedoch in der praktischen Umsetzung bei Rekonstruktion und Neubau bislang viel zu wenig Beachtung. Insofern war es 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.

Der vorangestellte umfangreiche Bericht 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 verbunden Zeitaufwands - mög-

lich sein wird, den gesamten Bericht zu studieren, ist eine Zusammenfassung unerlässlich. Von den Projektpartnern ist deshalb im Nachgang zum Projekt auf Eigeninitiative eine Beta-Version des Papiers „Kurzüberblick und Thesen“ erstellt worden [Rühling et. al. 2018] und zum Kongress „Energieeffizienz und Trinkwasserhygiene in der TWI“ am 19. und 20. März 2018 in Berlin dem Teilnehmerkreis als Vorabdruck ausgehändigt worden. Der Diskussionsprozess mit den Teilnehmern läuft und die Endversion ist für den Sommer 2018 geplant.

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 Wichtung darstellt und kein Anspruch auf vollständige Wiedergabe aller Erkenntnisse erhoben werden kann:

a) Welche Wirkungen auf Energiebedarf, Primärenergieeinsatz und CO_2-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 CO_2-Emissionsminderungspotential von durchschnittlich 5,2 Mio. t CO_2/a.
- Der Anteil von Wärmepumpen und Solarthermieanlagen 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 Entkopp-

lung im Anschlussbereich des Trinkwassers (kalt) vorgesehen werden, um Rückwirkungen auf die TWK-Installation zu minimieren.

c) Stellt eine Temperatur am Austritt des Trinkwassererwärmers $\vartheta_{TWW,TWE} \geq 60$ °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 ≥ 55 °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 CO_2-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, Fittinge, 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 Ablaufen 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? Weisen 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 $\vartheta_{TWW,TWE}$ = 45 °C und sonst korrekten Bedingungen reproduzieren und vertieft Ursachen finden?

Abschließend sei darauf hingewiesen, dass die einzelnen Projektpartner im Sinne der Ergebnisverwertung noch in diesem Jahr auf einer Reihe von Veranstaltungen vortragen und gezielt in der nationalen Fachpresse und internationalen Journalen veröffentlichen werden.

12 Ausgewählte Begriffsdefinitionen – 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), Ethylendiamintetraacetat (EDTA).

Chelatoren haben die Fähigkeit, in Lösung vorkommende freie Ionen (z. B. Cu2+) zu binden und damit

	chemisch zu inaktivieren. Diese Eigenschaft benutzt man häufig, um Ionen aus der Lösung auszukomplexieren und ihre toxische Wirkung auf den Organismus damit zu unterbinden.
Desinfektion	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, dass 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.
Dezentrale Kontamination (periphere ~)	Positiver kultureller Befund für *Legionella* spp. im Bereich des endständigen, nicht zirkulierenden Leitungsabschnitts (Trinkwasserentnahme durch den Nutzer) der Trinkwarmwasserinstallation (≤ 3 Liter Wasserinhalt)
Einnistung	Als Einnistung wird in diesem Projekt der Vorgang bezeichnet, bei dem sich hygienisch relevante Organismen (hier *P. aeruginosa*, *L. pneumophila*) in einen bestehenden Biofilm integrieren, so dass sie darin zeitweise oder dauerhaft vorhanden sind (Persistenz).
EnEV100, EnEV50	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.
Fakultativ-pathogene Erreger	Erreger, die zur Auslösung von Infektionskrankheiten spezifische Voraussetzungen benötigen, aber auch bei fehlender Immunsuppression Infektionskrankheiten auslösen können (z. B. *P. aeruginosa*, *L. pneumophila*, *Klebsiella* spp., *Enterobacter* 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 Antibio-

tika, Wunden oder eine Veränderung der physiologischen Abwehr.

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 Biofilmproben 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 Gram-negativen, schlank oder kokkoid stäbchenförmigen, aeroben Bakterien mit komplexen Nährstoffanforderungen sind monopolar begeißelt und damit beweglich. Man unterscheidet über 50 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, Klimaanlagen, Trinkwasser-Installationen etc. stellen durch Aerosolbildung eine Infektionsgefahr für den Menschen dar.

L. pneumophila ist ein fakultativ humanpathogenes Bakterium innerhalb der Gattung *Legionella,* das 80 – 85 % aller Legionellosen (meist in Form einer Pneumonie) verursacht. Auch wenn in Dokumentation und Sprachgebrauch einiger Gesundheitsämter der Sammelbegriff „Legionellen“ weit verbreitet ist, werden Trinkwasserproben oft 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 Gram-negativen, stäbchenförmigen Bakterien mit geringen Nährstoff-Anforderungen, 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 Fluoreszein-Bildung 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 einiger Gesundheitsämter 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
Relatives Risiko (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(Kontamination mit Merkmal)/ P(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 Verbraucher befindet. (s. TrinkwV)
TWE-Anlagen	TWE-Anlagen sind jeweils einem Trinkwasser-Erwärmer zugeordnete Trinkwasser-Installationen von denen mindestens zu zwei Probenahmestellen Analysen-Datensätze 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 *Legionella* spp. am Trinkwassererwärmer (Eintritt Trinkwasser (kalt), Austritt Trinkwarmwasser, Eintritt Zirkulation)

13 Formelzeichen, Indizes und Abkürzungen

Formelzeichen

c	Spezifische Wärmekapazität
D	Durchmesser
e	Exergie
$\dot{Ex}$	Exergiestrom
f	Aufwandszahl/Qualitätsfaktor
G	Gesamtzahl der Datensätze bzw. TWE-Anlagen
$\dot{H}$	Enthalpiestrom
h	Enthalpie
Kv	Durchflusskoeffizient
M	Masse
$\dot{m}$	Massestrom
p	Druck
Q	auszuschleusende Energiemenge lt. EU-r.t.c.
$\dot{Q}$	Wärmestrom
ρ	Dichte
s	Schichtdicke
ϱ	mittlere Dichte
T, t	Temperatur in K bzw. °C
τ	Zapfzeit
ϑ	Temperatur
U	U-Wert
U	Wärmedurchgangskoeffizient
$\dot{V}$	Volumenstrom
Vp	Volumenstrom
α	Wärmeübergangs-Koeffizient
ζ	Widerstandsbeiwert
η	Wirkungsgrad
λ	Wärmeleitfähigkeit

Indizes

a	außen
amb	Außenluft
Aus, aus	Austritt
Data	Messdaten in DATA
Ein, ein	Einritt
El	elektrisch
EPS	Dämmplatte
Erz	Erzeugung
FW	Fernwärme
FWS	Frischwasserstation
Gesamt	Gesamt
GK	Gipskarton
H_2O	Wasser
HA/HEL	Hausanschluss bzw. Hauseingangsleitung des TWK
HAST	Hausanschlussstation
Heiz	Heizung
HV	Heizungsverteilung
i	innen
in	Eintritt
int	intern
IS	Installationsschacht
Iso	Isolation
K	Keller
max	Maximal
min	Minimal
Mix	Mischung aus TWW und TWK
N	Nutz-
out	Austritt
Pers	Person
Prim	Primär
Pump	Pumpe
Raum	Bezogen auf den Raum
RH	Raumheizsystem

Sim	Simulation
sol	solar
Soll	Sollwert
Sp	Speicher
ST	Solaranlage
TW	Trinkwasser (kalt)
TWE	Trinkwasser-Erwärmer allgemein
TWK	Trinkwasser (kalt)
TWW	erwärmtes Trinkwasser /Trinkwarmwasser
TWZ	Trinkwarmwasser-Zirkulation
u	Umgebung
Üb	Übergabe
V	Verteilung
W	Wasser
WE	Wohneinheit
Zirk	Zirkulation
Zu, zu	zugeführt

Abkürzungen

a.a.R.d.T.	allgemein anerkannten Regel der Technik
AP	Arbeitspaket
AUC	Area-Under-Curve
BHKW	Blockheizkraftwerk
BW	Brennwert
DB	Datenbank
DF	Durchfluss-Prinzip
DTS	Distributed Temperature Sensing
EEWärmeG	Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz
EFH	Einfamilienhaus
EG	Erdgeschoss
EU-r.t.c.	EU-reference tapping cycles
FCM	Durchflusszytometer
FW	Fernwärme
FWS	Frischwasser-Station
GDB	Globale Datenbank

Gem.Unt.	Gemeinschaftsunterkunft
GEWV	Professur für Gebäudeenergietechnik und Wärmeversorgung der TU Dresden
GHD	Gebäude-Handel-Dienstleistung
GLT	Gebäudeleittechnik
GU	Genomic units (genomische Einheiten)
GZZ	Gesamtzellzahl
HA/HEL	Hausanschluss bzw. Hauseingangsleitung des TWK
HACCP	Hazard Analysis Critical Control Point; Risiko-Analyse Kritischer Kontroll-Punkte
HAST	Hausanschlussstation
HeiWaKo	Arbeitsgemeinschaft Heiz- und Wasserkostenverteilung e.V.
HV	Heizungsverteilung
HWB	Handwaschbecken
ID	Identifikationsnummer
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
IS	Installationsschacht
IWU	Institut Wohnen und Umwelt
IWW	Rheinisch-Westfälisches Institut für Wasserforschung gGmbH Mülheim
JAZ	Jahresarbeitszahl
KbE	Kolonie bildende Einheit
L.	*Legionella*
L. *pneum.*	*Legionella pneumophila*
L. spp.	*Legionella* species
LDL	Lower detection limit; untere Nachweisgrenze
LQL	Lower quantification limit; untere Quantifizierungsgrenze
MFH	Mehrfamilienhaus
NE	Nichtentnahme
NLGA	Niedersächsisches Landesgesundheitsamt
NT	Niedertemperatur

nV	Neue Variablen
NWG	untere Nachweisgrenze
oB	Ohne Beplankung
OG	Obergeschoss
oT	Ohne Trennwand
Pers	Personen
PK1	Potable Water cold 1. Liter
PN	Probenahme
PNS	Probenahmestelle
PPV	Positiver Prädikativer Wert
PW1	Potable Water warm 1. Liter
RKI	Robert Koch-Institut
ROC	Receiver Operating Characteristic
RR	Relatives Risiko
SG	(*Legionella*) Serogruppe
SLP	Speicherlade-Prinzip
Sonst.	Sonstige Objektart
ST	(*Legionella*) Sequenztyp
stat	stationär
t0	Startzeitpunkt
t14	Zeitpunkt nach 14 Tagen
t7	Zeitpunkt nach 7 Tagen
TH	Treppenhaus
THM	Thermohydraulische Messungen
TrinkwV	Trinkwasserverordnung
TUD	TU Dresden
TW	Trinkwasser (kalt)
TWE	Trinkwasser-Erwärmer allgemein
TWI	Trinkwasser-Installation
TWK	Trinkwasser (kalt)
TWK(Mix)	Trinkwasser (kalt) zur Erreichung der Mischtemperatur von 45 °C
TWW	erwärmtes Trinkwasser /Trinkwarmwasser
TWWz	Trinkwarmwasser zentral, Vorlauf Zirkulation (= Abgang TWE)
TWz	Trinkwasser (kalt), Zulauf zum TWE
TWZ	Trinkwarmwasser-Zirkulation

UBA	Umweltbundesamt
UsI	Unternehmer und sonstiger Inhaber einer TWI
VBNC	viable but non-culturable
WE	Wohneinheit
WHO	Weltgesundheitsorganisation
WP	Wärmepumpe
WSchVo	Wärmeschutzverordnung
WÜ	Wärmeübertrager
WÜK	Wärmeübergangs-Koeffizient
ZET	Zentrum für Energietechnik
Zirk.	Zirkulation

14 Schrifttum

14.1 Verordnungen, Normen, Regelwerke

BFS 2011 — BFS 2011:6, Bauvorschriften (boverkets byggregler) – Vorschriften und allgemeine Empfehlungen (in Schwedisch). Stockholm, Schweden, 2011.

CEN 2012 — CEN/TR 16355:2012, Recommendations for prevention of Legionella growth in installations inside buildings conveying water for human consumption, 2012.

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 16266 (2008) — DIN EN ISO 16266 (2008) Wasserbeschaffenheit – Nachweis und Zählung von *Pseudomonas aeruginosa* – Membranfiltrationsverfahren (ISO 16266:2006); Deutsche Fassung EN ISO 16266:2008. Beuth Verlag GmbH, Berlin.

DIN EN ISO 19458 — Wasserbeschaffenheit – Probenahme für mikrobiologische Untersuchungen (ISO 19458:2006); Deutsche Fassung EN ISO 19458:2006

[DS439] — DS439, Norm for vandinstallationer (Code of Practice for domestic hot water supply installations), 2009.

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 551 — DVGW-Arbeitsblatt W 551: Trinkwassererwärmungs- und Trinkwasserleitungsanlagen. Technische Maßnahmen zur Verminderung des Legionellenwachstums; Planung, Errichtung, Betrieb und Sanierung von Trinkwasser-Installationen. Ausgabe 2004

DVGW W 556 (A) — DVGW (2015) Technische Regel – Arbeitsblatt W 556 (A). Hygienisch-mikrobielle Auffälligkeiten in Trinkwasser-Installationen; Methodik und Maßnahmen zu deren Behebung. DVGW, Bonn.

ISO 11731 (1998) — Water Quality – Detection and 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/DVGW 6023 — Richtlinie VDI/DVGW 6023: Hygiene in Trinkwasser-Installationen. Anforderungen an Planung, Ausführung, Betrieb und Instandhaltung. AAusgabe April 2013, Beuth-Verlag GmbH, Berlin.

14.2 Literatur

[Abdallah15] — Abdallah, M., Khelissa, O., Ibrahim, A., Benoliel, C., Heliot, L., Dhulster, P., Chihib, N.-E. (2015) Impact of growth temperature and surface type on the resistance of *Pseudomonas aeruginosa* and *Staphylococcus aureus* biofilms to disinfectants. Int. J. Food Microbiol. 214, 38-47.

[Allegra08] — Allegra et al. Use of flow cytometry to monitor Legionella viability. Appl Environ Microbiol (2008) 74:7813.

[Appelhans14] K. Appelhans, S. Exner, R. Bracke, Analyse des deutschen Wärmepumpenmarktes – Bestandsaufnahme und Trends, Internationales Geothermiezentrum, Bochum, Feb 2014.

[Bargel10] S. Bargel, Entwicklung eines exergiebasierten Analysemodells zum umfassenden Technologievergleich von Wärmeversorgungssystemen unter Berücksichtigung des Einflusses einer veränderlichen Außentemperatur, Dissertation, Ruhr-Universität Bochum, Bochum, 2010.

[Bargellini11] Bargellini A, Marchesi I, Righi E, Ferrari A, Cencetti S, Borella P, Rovesti S. Parameters predictive of Legionella contamination in hot water systems: association with trace elements and heterotrophic plate counts. Water Res. 2011;45:2315–2321.

[Baume13] Baume, M., L. Garrelly, J. P. Facon, et al. (2013): The Characterization and Certification of a Quantitative Reference Material for Legionella Detection and Quantification by QPCR. Journal of Applied Microbiology 114(6): 1725–1733.

[BDEW 2016a] Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft (BDEW), Trinkwasserverwendung im Haushalt 2015. [Online] Available: https://www.bdew.de/service/daten-und-grafiken/trinkwasserverwendung-im-haushalt/. Accessed on Apr. 03 2018

[BDEW 2016b] Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft (BDEW), Entwicklung des Wärmeverbrauchs in Deutschland. Basisdaten und Einflussfaktoren, Berlin. Dezember 2016.

[BDEW 2017] Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft, Beheizungsstruktur im Wohnungsneubau in Deutschland 2016, available at https://www.bdew.de/media/documents/20170302_Beheizungsstruktur-Wohnungsneubau-2016.pdf (accessed on January 19, 2018).

[Bédard14] 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

[Bläse16] T. Bläse, Modellierung, Simulation und exergie-basierte Analyse eines kommunalen, nahwärmenetzbasierten Energiesystems für den Gebäudebestand, Masterthesis, Universität Kassel, Kassel, 2016.

[BMWI17] 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.

[Brand13] M. Brand, “Heating and Domestic Hot Water Systems in Buildings Supplied by Low-Temperature District Heating,” Dissertation, Technical University of Denmark, Lyngby, Denmark, 2013.

[Boyle91] Boyle, M., Ford, T., Maki, J. S., Mitchell, R. (1991) Biofilms and the survival of opportunistic pathogens in recycled water. Waste Manag. Res. 9, 465-470.

[Bressler09] Bressler, D., Balzer, M., Dannehl, A., Flemming, H.-C., Wingender, J. (2009) Persistence of *Pseudomonas aeruginosa* in drinking-water biofilms on elastomeric material. Water Sci. Technol.: Water Suppl. 9, 81-87.

[Charron15] 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.

[Clark82] Clark, J. A., Burger, C. A., Sabatinos, L. E. (1982) Characterization of indicator bacteria in municipal raw water, drinking water, and new main water samples. Can. J. Microbiol. 28, 1002-1013.

[Danfoss16] Danfoss GmbH – Fernwärme- und Regelungstechnik, Datenblatt Termix VX Compact 28 HW OP: Indirekte Übergabestation für Mehrfamilienhäuser mit bis zu 25 Wohnungen, 2016, available at http://waerme.danfoss.com/PCMPDF/VLIED203_Termix-VX-C28-HW-OP_160310_lores.pdf (accessed on January 19, 2018).

[Diefenbach02] N. Diefenbach, T. Loga, R. Born, M. Großklos, C. Herbert, Energetische Kenngrößen für Heizungsanlagen im Bestand, Institut Wohnen und Umwelt (IWU), Darmstadt, Nov 2002.

[Dilger17] 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

[Dimplex09] Glen Dimplex Deutschland GmbH, Projektierungs- und Installationshandbuch: Wärmepumpen für Heizung und Warmwasserbereitung, 2009, available at http://www.dimplex.de/fileadmin/dimplex/downloads/projektierungshandbuecher/de/453-phb-wp.pdf (accessed on January 19, 2018).

[Dimplex10] Glen Dimplex Deutschland GmbH, Projektierungshandbuch Solarthermie, 2010, available at http://www.dimplex.de/fileadmin/dimplex/downloads/planungshandbuecher/projektierungshandbuch-solar/DIM_PHB_Solarthermie_2010_Web.pdf (accessed on January 19, 2018).

[Drück06] H. Drück, MULTIPORT Store-Model for TRNSYS: Type 340, Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik (ITW), Universität Stuttgart, Stuttgart, 2006.

[Dwidjosis-wojo11] 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.

[EFP11] 6. Energieforschungsprogramm der Bundesregierung. Stand Juli 2011, Herausgeber Bundesministeri-um für Wirtschaft und Technologie (BMWi), Berlin

[Egli10] Egli, T., & Hammes, F. (2010). Neue Methoden für die Wasseranalytik. GWA Gas, Wasser, Abwasser, 90(4), 315-324.

[Egli13] Egli, T., & Kötzsch, S. (2013). Schnelle Beurteilung der Trinkwasserqualität. Wasserwirtschaft Wassertechnik wwt, 6, 8-12.

[Egli 14] Egli, T., & Bucheli, M. (2014). Wie viele Zellen sind im Trinkwasser? Durchflusszytometrie in der mikrobiologischen Trinkwasseranalyse: wie weiter? Aqua & Gas, 94(11), 90-98.

[Ellerbrok13] C. Ellerbrok, Lastmanagement mit Wärmepumpen im deutschen Wohngebäudebestand: Speicherung von thermischer Energie in der Gebäudemasse, Masterthesis, Universität Kassel, Kassel, 2013.

[Elliott63] Elliott, R. P.: Temperature-gradient incubator for determining the temperature range of growth of microorganisms. J. Bacteriol. 85: 889-894, 1963.

[enercity18] enercity / Stadtwerke Hannover, Bescheinigung der Stadtwerke Hannover AG über die energetsiche Bewertung der Fernwärme, available at https://www.enercity.de/infothek/downloads/broschueren/fernwaerme/primaerenergiefaktor-bescheinigung.pdf (accessed on January 19, 2018).

[Epalle15] Epalle et al. Viable but not culturable forms of Legionella pneumophila generated after heat shock treatment are infectious for macrophage-like and alveolar epithelial cells after resuscitation on Acanthamoeba polyphaga. Microb Ecol (2015) 69:215).

[EU Comission 2002] European Comission: Directorate D – New Energies and Demand Management, Mandate to CEN and CENELEC for the Elaboration and Adoption of Measurement Standards for Household Aplliances: Water-Heaters, Hot Water Storae Appliances and Water Heating Systems, Brüssel, 2002.

[EU-r.t.c.] Mandate to CEN and CENELEC for the elaboration and adoption of meas-urement standards for household appliances, Water-heaters, hot water storage appliances and water heating systems, Brüssel 2002

[Exner09] Exner, M.: Hygiene in Trinkwasser-Installationen – Erfahrungen aus Deutschland. Legionellen-Fachgespräch UBA/BfR am 20.10.2009 in Berlin

[Exner11] Exner, M.: Wasser und Gesundheit. Vortrag, Wasser Berlin 2011; 02 bis 05. Mai 2011

[Exner16] 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-assoziierter *Pseudomonas aeruginosa*-Infektionen. Hyg. Med. 41, Suppl. 2, 1-32.

[Favero71] Favero, M. S., Carson, L. A., Bond, W. W., Petersen, N. J. (1971) *Pseudomonas aeruginosa*: growth in distilled water from hospitals. Science 173, 836-838.

[Flemming10] 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

[Frösler11] Frösler, J.: Detection of Legionella spp,. Legionella pneumophila and Pseudomonas aeruginosa in water and plankton from a freshwater lake using quantitative real-time polymerase chain reaction, Master Thesis, 2011

[Fünfgeld02] L. Fünfgeld, “Legionellenprävention in Trinkwassererwärmungsanlagen – Literaturanalyse und Entwicklung eines technisch-wirtschaftlichen Konzepts für das Carl-Thiem-Klinikum in Cottbus,” Dissertation, Humboldt-Universität zu Berlin, Berlin, Germany, 2002.

[Geberit14] Geberit AG, Druckverlusttabelle Geberit Mapress Kupfer, 2014.

[Giao15] Giao et al. Influence of copper surfaces on biofilm formation by Legionella pneumophila in potable water. Biometals (2015) 28:329

[Großklos11] M. Großklos, J. Knissel, Bilanzierung und Belüftung von Treppenhäusern in Geschosswohnbauten bei der Bestandsanierung, Institut Wohnen und Umwelt (IWU), Darmstadt, Juli 2011.

[Hambsch16] Hambsch, B., Hügler, M., Korth, A., Petzoldt, H. (2016) *Pseudomonas aeruginosa* in Trinkwassersystemen – Wachstumsansprüche und nachhaltige Gegenmaßnahmen. Abschlussbericht zum DVGW-Forschungsvorhaben W6/02/09, Veröffentlichungen aus dem DVGW-Technologiezentrum Wasser, Band 73: *Pseudomonas aeruginosa* in Trinkwassersystemen, 1-100.

[Harmuth06] Harmuth, M.: Untersuchungen über das Vorkommen von Legionellen in Warmwassersystemen von Ein- und Zweifamilienhäusern. Dissertation Westfälische Wilhelms-Universität Münster, 2006

[Harrison09] Harrison TG, Afshar B, Doshi N, Fry NK, Lee JV (2009): Distribution of Legionella pneumophila serogroups, monoclonal antibody subgroups and DNA sequence types in recent clinical and environmental isolates from England and Wales (2000–2008). Eur J Clin Microbiol Infect Dis 2009; 28: 781–91.

[Hartung09] Hartung, J., Elpelt, B., Klösener, K.-H. (2009): Statistik, Lehr- und Handbuch der angewandten Statistik, 15. Auflage, Oldenbourg Verlag, München

[Hentschel11] 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

[Hepbasli08] A. Hepbasli, A study on estimating the energetic and exergetic prices of various residential energy sources, Energy and Buildings (40) (2008) 308–315.

[Herwig15] Herwig, A., Rühling, K., Kriterien zur Bewertung der Energieeffizienz von Wärmespeichern, Teil 2 – Chancen einer neuen Messmethodik. EuroHeat&Power. 2015, Bd. 44, Heft 4, S. 28 – 35.

[Hippelein14] Hippelein, M., Matthiessen, A., Christiansen, B.: Methodische Untererfassung von *Pseudomonas aeruginosa* in der Trinkwasser-Installation mit Kupferleitungen. Vom Wasser 112: 99-100, 2014.

[Hollemann95] Signifikante Rang-Korrelationen nach Kendall-Tau zwischen der Konzentration an Legionella spp. (Kultur) und Wassertemperatur verschiedener Temperaturtypen. Die Regressionsgerade (rote Linie) indiziert die Richtung des Zusammenhangs.

[HSE04] Health and Safety Executive (HSE), HSG274 Part 2: Legionnaires’ desease: Technical guidance. The control of legionella bacteria in hot and cold water systems, 2014.

[IBP12] Fraunhofer IBP, Projekt-Datenblatt “Netzreaktive Gebäude”, available at https://www.ibp.fraunhofer.de/content/dam/ibp/de/documents/Kompetenzen/ Energiesysteme/Projekte/Niedrigexergiesysteme/13092012_Netzreaktive_Gebaeude.pdf (accessed on January 19, 2018).

[ITG07] Institut für Technische Gebäudeausrüstung Dresden (iTG), Warmwasserbedarfswerte in DIN V 18599: Überarbeitung der Kennwerte für den Nutzenergiebedarf Trinkwarmwasser von Nichtwohngebäuden. (nicht veröffentlicht), 2007.

[ITG16] B. Mailach, J. Rosenkranz, B. Oschatz, Heizung im Gewerbe: Handbuch zur Anlagentechnik, Institut für Technische Gebäudeausrüstung Dresden (ITG), Oktober 2016.

[IWU15] T. Loga, B. Stein, N. Diefenbach, R. Born, Deutsche Wohngebäudetypologie. Beispielhafte Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz von typischen Wohngebäuden, 2nd ed., Institut Wohnen und Umwelt (IWU), Darmstadt, Feb 2015.

[Jentsch10] A. Jentsch, A novel exergy-based concept of thermodynamic quality and its application to energy system evaluation and process analysis, Dissertation, Technische Universität Berlin, Berlin, 2010.

[JORF05] Journal 373fficial de la République Française, Arrêté du 30 novembre 2005 modifiant l'arrêté du 23 juin 1978, 2005.

[Kallert17] A. Kallert, T. Bläse, Protokoll 01.02.2017 – EE+HYG@TWI: Clustermeeting: Simulation, Kassel, 2017.

[Kallert18] A. Kallert, Modelling and simulation of low-temperature district heating systems for the development of an exergy-based assessment method, Dissertation, Technische Universität München, München, wird veröffentlicht in 2018.

[Kannan15] Kannan, A., Gautam, P. (2015) A quantitative study on the formation of *Pseudomonas aeruginosa* biofilm. SpringerPlus 4, 379.

[Kistemann10] 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

[Kistemann12b] 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

[Kooij82] Van der Kooij, D., Oranje, J. P., Hijnen, W. A. M. (1982) Growth of *Pseudomonas aeruginosa* in tap water in relation to utilization of substrates at concentrations of a few micrograms per liter. Appl. Environ. Microbiol. 44, 1086-1095.

[Kropinski87] 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.

[Kryschi88] R. Kryschi, “Chemikalienfreie Trinkwasserdesinfektion durch UV-Bestrahlung,” gi, no. 109/4, pp. 190–195, 1988.

[KVV16] Kasseler Verkehrs- und Versorgungs-GmbH, Pressemeldung kvv: Fernwärme: Sauberer Wärmeträger deckt ein Viertel des Kasseler Bedarfs, available at http://www.kvvks.de/presse/news/fernwaerme-sauberer-waermetraeger-deckt-ein-viertel-des-kasseler-bedarfs/ (accessed on January 19, 2018).

[KÜHLSOLE12] pro KÜHLSOLE GmbH, Datenblatt GLYKOSOL N: Kälte- und Wärmeträgerflüssigkeit auf Basis Monoethylenglykol für technische Anwendungen, 2012, available at http://www.glykolundsole.de/Downloaddateien/Glykosol_N_Datenblatt_D.pdf (accessed on January 19, 2018).

[Lee11] 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.

[Lesnik16] Lesnik, R., Brettnar, I., Höfle, M. (2016): Legionella species diversity and dynamics from surface reservoir to tap water: from cold adaptation to thermophily. The ISME Journal volume 10, pages 1064–1080

[Li16] Hongwei Li et al., IEA Annex TS1: Low Temperature District Heating for Future Energy Systems: Subtask B DHC Technologies, 2016.

[Lin02] Lin *et al*. Negative effect of high pH on biocidal efficacy of copper and silver ions in controlling *Legionella pneumophila*. Appl Environ Microbiol (2002) 68:2711

[Loga03] T. Loga, M. Großklos, J. Knissel, Der Einfluss des Gebäudestandards und des Nutzerverhaltens auf die Heizkosten – Konsequenzen für die verbrauchsabhängige Abrechnung, Institut Wohnen und Umwelt (IWU), Darmstadt, Juli 2003.

[Loga12] T. Loga, R. Born, Brauchwasserbereitung mit Sonnenenergie: Wissenswertes über thermische Solaranlagen für die Warmwasserbereitung und Heizungsunterstützung, Energiespar-Informationen (14) (2012).

[Lück10] 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.

[Lück11] Lück, C.: Legionella pneumophila: genetic diversity of patients and environmental isolates. Bundesgesundheitsblatt, Gesundheitsforschung, Gesundheitsschutz 2011; 54 (6):693-698

[Lück12] 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

[Mee-Marquet05] Van der Mee-Marquet, N., Bloc, D., Briand, L., Besnier, J.-M., Quentin, R. (2005) Non-touch fittings in hospitals: a procedure to eradicate *Pseudomonas aeruginosa* contamination. J. Hosp. Infect. 60, 235–239.

[Meier14] Meier, T., Bendinger, B. (2014) Abschlussbericht BMBF-Verbundprojekt: Erkennung und Bekämpfung von vorübergehend unkultivierbaren Pathogenen in der Trinkwasser-Installation. Teilprojekt 2: Auswirkungen von Reinigungs- und Desinfektionsverfahren auf das Überleben von Pathogenen in Biofilmen und deren Austrag ins Trinkwasser unter praxisnahen Bedingungen. DVGW Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e. V., Bonn (Hrsg.).

[Meier16] Meier, T., Bendinger, B. (2016) Survival of pathogens in drinking water plumbing systems: impact factors and sanitation options. Wat. Sci. Technol.: Water Suppl. 16, 931- 941.

[Meteotest] Meteotest AG, Meteonorm Software, Bern.

[Moritz10] Moritz, M. M., Flemming, H.-C., Wingender, J. (2010) Integration of *Pseudomonas aeruginosa* and *Legionella pneumophila* in drinking water biofilms grown on domestic plumbing materials. Int. J. Hyg. Environ. Health 213, 190-197.

[Miyamoto97] Miyamoto, H., Yamamoto, H., Arima, K., Fujii, J., Maruta ,K., Izu, K., Shiomori, 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.

[NBC07] Ministry of the Environment, National Building Code of Finland D1: Water supply and drains installations for buildings, 2007.

[Nocker17] Nocker, A., Cheswick, R., Dutheil de la Rochere, PM., Denis, M., Léziart, T., Jarvis, P. (2017) When are bacteria dead? A step towards interpreting flow cytometry profiles after chlorine disinfection and membrane integrity staining. Environ Technol.38(7), 891-900

[Ohno03] Ohno A, Kato N, Yamada K, Yamaguchi K. (2003). Factors influencing survival of Legionella pneumophila serotype 1 in hot spring water and tap water. Appl Environ Microbiol 69: 2540–2547.

[Oliver05] Oliver JD. The viable but nonculturable state in bacteria. J Microbiol. 2005;43:93–100.

[O'Toole15] O'Toole, A., Ricker, E. B., Nuxoll, E. (2015) Thermal mitigation of *Pseudomonas aeruginosa* biofilms. Biofouling 31, 665-675.

[Park11] 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.

[Perschk10] Perschk, Alf: Gebäude- und Anlagensimulation - Ein "Dresdner Modell" - Gesundheits-Ingenieur - Haustechnik - Bauphysik - Umwelttechnik 131 (2010), Nr. 4, S. 178–183

[Pettersen15] J. E. Pettersen, Vannrapport 123: Forebygging av legionellasmitte. en veiledning. Folkehelseeinstituttet, 2015.

[Pham14] Pham, Max: Hydraulische und energetische Untersuchungen an einem Trinkwasser- Zirkulationsversuchsstand. Professur für Gebäudeenergietechnik und Wärmeversorgung, Großer Beleg, 2014

[Phin14] Phin, Nick, Frances Parry-Ford, Timothy Harrison, et al. (2014):Epidemiology and Clinical Management of Legionnaires' Disease. The Lancet Infectious Diseases 14(10): 1011–1021.

[Pleischl04] 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

[Procter2017] Procter *et al.* Interactive effects of temperature, organic carbon, and pipe material on microbiota composition and *Legionella pneumophila* in hot water plumbing systems. *Microbiome* (2017) 5:130

[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

[Rajkowski01] Rajkowski, K. T., Rice, E. W.: Growth and recovery of selected gram-negative bacteria in reconditioned wastewater. J. Food Prot. 64: 1761-1767, 2001.

[Recknagel11] H. Recknagel, E. Sprenger, E.-R. Schramek, Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik, 75th ed., DIV, Dt. Industrieverl., München, 2011.

[Rhoads15] Rhoads W. J.; Ji, P,; Pruden, A.; Edwards, M. A. (2015) Water heater temperature set point and water use patters influence *Legionella pneumophila* and associated microorganisms at the tap. *Microbiome* 3:67

[Risse90] Risse, CH et al., “Maßnahmen zur Vermeidung eines Legionella-Infektionsrisikos im Krankenhaus,” Sonderdruck aus Gesundheitsingenieur, vol. 6, no. 111/6, pp. 257–263, 1990.

[RKI2000] Bundesgesundheitsblatt 43 Referenz: Robert Koch-Institut (RKI). Empfehlung des Umweltbundesamtes: Nachweis von Legionellen in Trinkwasser und Badebeckenwasser nach Anhörung der Trinkwasserkommission. Bundesgesundheitsblatt 2000; 43: 911–915

[Rogers94a] Rogers, J., Dowsett, A. B., Dennis, P. J., Lee, J. V., Keevil, C. W. (1994a) Influence of temperature and plumbing material selection on biofilm formation and growth of *Legionella pneumophila* in a model potable water system containing complex microbial flora. Appl. Environ. Microbiol. 60, 1585-1592.

[Rogers94b] Rogers, J., Dowsett, A. B., Dennis, P. J., Lee, J. V., Keevil, C. W. (1994b) Influence of plumbing materials on biofilm formation and growth of *Legionella pneumophila* in potable water systems. Appl. Environ. Microbiol. 60, 1842-1851.

[Rösel15] F. Rösel, Simulation und exergetische Analyse kombinierter, regenerativer Versorgungstechnologien für eine Gebäudegruppe, Masterthesis, Technische Univserität Darmstadt, Darmstadt, 2015.

[Rosa14] A. Dalla Rosa et al., Annex X Final report: Toward 4th Generation District Heating: Experience and Potential of Low-Temperature District Heating, IEA Implement Agreement on DHC, 2014.

[R-Paket lmerTest] R-Paket lmerTest

Alexandra Kuznetsova, Per Bruun Brockhoff und Rune Haubo Bojesen Christensen (2016): lmerTest: Tests in Linear Mixed Effects Models, R package version 2.0-33, URL https://CRAN.Rproject.org/package=lmerTest.

[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.R-project.org/package=openxlsx.

[Rühling09] Rühling, K.; Nissing, W.: Wirkungen von Hygieneanforderungen auf Energieeinsparung und Energieeffizienz. WAT Wasserfachliche Aussprachetagung 2009, Berlin 31.03. – 01.04.2009

[Rühling12] 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 Gebäudeenergietechnik und Wärmeversorgung, Dezember 2012

[Rühling et. al. 2018] 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.: 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“. Dresden, Bonn, Mülheim, Kassel, Beta-Version Stand 01. März 2018.

[Schaule16] Schaule, G., Nocker, A., Dudziak, F., Wingender, J. (2016) Einfluss des Nahrungsangebotes und der Wassertemperatur auf die Vitalität von *Pseudomonas aeruginosa*. Vom Wasser 114, 114-117.

[Schmidt04] D. Schmidt, Design of Low Exergy Buildings - Method and a Pre-Design Tool, International Journal of Low Energy and Sustainable Buildings (3) (2004) 1–47.

[Schmidt11] D. Schmidt, H. Torio, Low Exergy Systems for High-Performance Buildings and Communities: ECBCS Annex 49 - Final Report, Fraunhofer IBP, 2011.

[Schmidt] D. Schmidt and A. Kallert, Low Temperature District Heating for Future Energy Systems - Final Report 2017.

[SHCC] Seoul Housing & Communities Corporation, Technical Guidelines (Seoul Housing & Communities Corporation). [Online] Available: https://i-sh.co.kr/eng/index.do.

[Schreiber12] 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

[Schubert75] Schubert, R., Scheiber, P. (1975) Das Vorkommen von *Pseudomonas aeruginosa* im Grundwasser, Oberflächenwasser und in Wasserversorgungsanlagen in tropischen Gebieten. Gwf Wasser/Abwasser 116, 413-415.

[Schumacher07] Schumacher, M., Schulgen, G. (2007): Methodik klinischer Studien, 2. Auflage, Springer Verlag, Heidelberg.

[SIA11] SIA 385/1, Anlagen für Trinkwarmwasser in Gebäuden – Grundlagen und Anforderungen, 2011.

[Spinks06] Spinks, A. T., Dunstan, R. H., Harrison, T., Coombes, P., Kuczera, G. (2006) Thermal inactivation of water-borne pathogenic and indicator bacteria at sub-boiling temperatures. Water Res. 40,1326-1332.

[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/.

[StMWi16] Gas- und Hybridwärmepumpen für den Gebäudebestand, Bayerisches Staatsminesterium für Wirtschaft und Medien, Energie und Technologie, München, Mar 2016.

[Stout86] Stout, J. E., Best, M. G., Yu, V. L. (1986) Susceptibility of members of the family *Legionellaceae* to thermal stress : implications for heat eradication methods in water distribution systems. Appl. Environ. Microbiol. 52, 396-399.

[Suchenwirth12] Suchenwirth, R.: Kurzbeschreibung der Probenbearbeitung im Labor – Legionella spec. Niedersächsisches Landesgesundheitsamt; Stand 09/2008 in der überarbeiteten Fassung vom 30.04.2011

[Svarrer12] Svarrer CW, Lück C, Elverdal PL, Uldum SA (2012) . Immunochromatic kits Xpect Legionella and BinaxNOW Legionella for detection of Legionella pneumophila urinary antigen have low sensitivities for the diagnosis of Legionnaires’ disease. J Med Microbiol 2012; 61: 213–17.

[techem2011] Energiekennwerte 2011, Hilfen für den Wohnungswirt, Eine Studie von techem, Bestellkennziffer: 9982074

[Termine09] Termine, E., Michel, G. P. F. (2009) Transcriptome and secretome analyses of the adaptive response of *Pseudomonas aeruginosa* to suboptimal growth temperature. Int. Microbiol. 12, 7-12.

[TESS12] Thermal Energy System Specialists, LLC, TESSLibs 17: Component Libraries for the TRNSYS Simulation Environment, TRNSYS Coordinator, Madison, Wisconsin, 2012.

[Thorsen06] J.E. Thorsen and H. Kristjansson, Eds., Cost Considerations on Storage Tank versus Heat Exchanger for Hot Water Preparation, 2006.

[Thorsen11] .E. Thorsen, C.H. Christiansen, M. Brand, P.K. Olesen, and C.T. Larsen, Eds., Experiences on Low-Temperature District Heating in Lystrup-Denmark, 2011.

[Thorsen12a] J.E. Thorsen and J. Iversen, Eds., Grontmij A/S DHC13, 2012.

[Thorsen12b] J.E. Thorsen and O. Gudmundsson, Eds Danfoss, Handbuch über Fernwärmeanwendungen. Nordborg, Denmark: Danfoss A/S – District Energy, 2012.

[TRNSYS17] Solar Energy Laboratory, TRNSYS 18: a TRaNsient SYstem Simulation program, University of Wisconsin-Madison, 2017.

[TRNBUILD17] Solar Energy Laboratory, TRNSYS 18 - Volume 5: Multizone Building modeling with Type56 and TRNBuild, 2017.

[TUD06] Wünsche, N.; Davids, A.; Lück, C.: Neuartige thermische Desinfektion im Durchflussprinzip für zentrale Trinkwassererwärmungsanlagen. AiF-Projekt der industriellen Gemeinschaftsforschung. TU Dresden, Professur für Energiesystemtechnik und Wärmewirtschaft, 2006

[TUD13] Professur für Gebäudeenergietechnik und Wärmeversorgung - Technische Universität Dresden, Zertifikat - Fernwärmeversorgungssystem der Fernwärme Bamberg GmbH, available at https://www.stadtwerke-bamberg.de/de/Kopfnavigation/Service/Downloadportal/Downloadportal/STWB-Energie-Fernwaerme-Messdatenzertifikat.pdf (accessed on January 19, 2018).

[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

[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

[UBA2012] Umweltbundesamt: Empfehlung zur systemischen Untersuchung von Trinkwasser-Installationen auf Legionellen nach Trinkwasserverordnung - Empfehlung des Umweltbundesamtes nach Anhörung der Trinkwasserkommission. Bad Elster, 23. August 2012

[UBA2017] 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

[UBA2017_1] Memmler, M.; Lauf, T.; Wolf, K.; Schneider, S.: Emissionsbilanz erneuerbarer Energieträger. Bestimmung der vermiedenen Emissionen im Jahr 2016. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau. Oktober 2017.

[VDI13] VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieruwesen, VDI-Wärmeatlas: bearbeitete und erweiterte Auflage, 11th ed., Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 2013.

[Vetter81] R. Vetter, Patentschrift: Vorrichtung zum Erwärmen von Wasser, insbesondere Warmwasserheizkessel – P 31 12 748.7, 1981.

[Viessmann08] Viessmann (Hrsg.), Planungshandbuch Solarthermie. Allendorf (Eder), Germany: Viessmann Deutschland GmbH, 2008.

[Viessmann13] Viessmann Werke GmbH & Co KG, Planungsanleitung: Vitocal: Luft/Wasser-Wärmepumpen, Allendorf (Eder), 2013.

[Viessmann17] Viessmann Deutschland GmbH, Produktkatalog Speicher-Wassererwärmer Vitocell, Allendorf (Eder), 2017.

[Viticrossal17] Viessmann Werke GmbH & Co KG, Datenblatt: Vitocrossal 300: Gas-Brennwertkessel, Allendorf (Eder), 2017, available at https://www.viessmann.de/de/wohngebaeude/gasheizung/gas-brennwertkessel/vitocrossal-300-cu3a.html (accessed on January 19, 2018).

[Vitoligno17] Viessmann Werke GmbH & Co KG, Datenblatt: Vitoligno 300-C: Heizkessel für Holzpellets, Allendorf (Eder), 2017, available at https://www.viessmann.de/de/wohngebaeude/Festbrennstoffkessel/pelletkessel/vitoligno-300-c.html (accessed on January 19, 2018).

[Vitoplex16] Viessmann Werke GmbH & Co KG, Datenblatt: Vitoplex 300: Niedertemperatur-Öl-/Gas-Heizkessel, Allendorf (Eder), 2016, available at https://www.viessmann.de/de/wohngebaeude/gasheizung/niedertemperatur-gas-heizkessel/vitoplex-300.html (accessed on January 19, 2018).

[Vitotrans15] Viessmann Werke GmbH & Co KG, Datenblatt: Vitotrans 353: Frischwasser-Modul zur Trinkwassererwärmung im Durchlauferhitzer-Prinzip zur Wandmontage, Allendorf (Eder), 2015, available at https://www.viessmann.de/de/wohngebaeude/warmwasserbereiter/frischwasser-module/vitotrans-353.html (accessed on January 19, 2018).

[Völker10] Völker, S., Schreiber, C., Kistemann, T.: Drinking Water quality in house-hold supply infrastructure - A survey of the current situation in Germany. International Journal of Hygiene and Environmental Health 213(3): 204-9, 2010

[Völker16] 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

[Völker17] 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.

[VROM2000] Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer: Modelbeheersplan legionellapreventie in Leidingwater. Den Haag, Netherlands: Ministerie van Volkshuisvesting, 2000.

[Warnes12] Warnes *et al*. Mechanism of copper surface toxicity in Escherichia coli O157:H7 and Salmonella involves immediate membrane depolarization followed by slower rate of DNA destruction which differs from that observed for Gram-positive bacteria. *Environ Microbiol* (2012) 14:1730

[WD16] Wissenschaftliche Dienste des Deutschen Bundestages, Sachstand - Primärenergiefaktoren: Aktenzeichen: WD5 - 3000 - 103/16, 2016.

[WHO07] J. Bartram, Y. Chartier, J. V. Lee, K. Pond, and S. Surman-Lee, Legionalla and the prevention of legionellosis: World Health Organization (WHO), 2007.

[Wielen13] Van der Wielen, P. W. J. J., van der Kooij, D. (2013) Nontuberculous mycobacteria, fungi, and opportunistic pathogens in unchlorinated drinking water in the Netherlands. Appl. Environ. Microbiol. 79, 825-834.

[Wiemken08] E. Wiemken, H.-M. Henning, S. Herkel, F. Kagerer, D. Kalz, A. Morgenstern, Bestimmung der Kollektorfläche von Solarthermieanlagen nach dem Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz, Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (ISE), Mai 2008.

[wiki] http://de.wikipedia.org/wiki/Paretoprinzip (Download 22.02.2012)

[Williams15] Williams *et al.* Relationship between Organic Carbon and Opportunistic Pathogens in Simulated Glass Water Heaters. *Pathogens* (2015)

[WILO09] A. Babusch, T. Ebert, K.-H. König, T. Makoschey, A. Millies, M. Oraschewski, B. Rudolph, Grundlagen der Pumpentechnik: WILO-Pumpenfibel, 5th ed., Dortmund, 2009.

[WILO118] Wilo: Wilo Star-Z 25/6-3. 2018, http://productfinder.wilo.com/de/de/c000000090003cafe00040023/_0000000000001f4b0002003a/product.html

[Wingender09] Wingender, J., Hambsch, B., Schneider, S. (2009) Mikrobiologisch-hygienische Aspekte des Vorkommens von *Pseudomonas aeruginosa* im Trinkwasser. Energie Wasser-Praxis 60 (3), 60-66.

[Wolff04] D. Wolff, P. Teuber, Budde, Jörg, Jagnow, K, Felduntersuchung: Betriebsverhalten von Heizungsanlagen mit Gas-Brennwertkesseln, Institut für Heizungs- und Klimatechnik, Wolfenbüttel, April 2004.

[Wricke07] Wricke, B., Petzoldt, H., Hambsch, B.: Mikrobiologische Situation n Hausin-stallationen – Ergebnisse einer Bestandsaufnahme. gwf Wasser, Abwasser 148, Nr. 13, S. 50-55, 2007

http://www.tzw.de/demibi_pr_mikrobiologische_situa-145/

[Yang16a] X. Yang, “Supply of domestic hot Water at comfortable temperatures by low-temperature district heating without risk of Legionella,” Dissertation, Technical University of Denmark, Lyngby, Denmark, 2016.

[Yang16b] X. Yang, H. Li, and S. Svendsen, “Modelling and multi-scenario analysis for electric heat tracing system combined with low temperaturedistrict heating for domestic hot water supply,” Building Simulation, no. 9-2, pp. 141–151, 2016.

[Zacharias15] Zacharias N, Kistemann T, Schreiber C (2015): Application of flow cytometry and PMA-qPCR to distinguish between membrane intact and membrane compromised bacteria cells in an aquatic milieu, International Journal of Hygiene and Environmental Health 218(8): 714-722