

Steigerung der Energieeffizienz in Gebäuden durch Absenkung der Warmwassertemperatur unter Berücksichtigung der Trinkwasserqualität

Abschlussbericht zum Promotionsstipendium der Gesellschaft für Energie und Klimaschutz Schleswig-Holstein GmbH (EKSH)



Flensburg, 12. März 2024

Autor: Marco Daniele Genuardi

Betreuer/in: Prof. Dr. Oliver Opel (Fachhochschule Westküste)
Prof. Dr. Elisabeth Endres (Technische Universität Braunschweig)

Titel der Dissertation

Constructional and bioprocedural risk assessment of critical control points in domestic buildings regarding *Legionella* occurrence in low temperature water systems

Zusammenfassung

Die Warmwassererzeugung stellt eine Herausforderung für die Energieeffizienz und Emissionsminderung in Gebäuden dar. Hohe Temperaturen sind notwendig, um eine hohe Trinkwasserqualität zu gewährleisten. Das Ziel besteht darin, die Vermehrung von Mikroorganismen durch thermische Behandlung zu hemmen und Pathogene wie beispielsweise Legionellen zu verhindern. Diese Temperaturvorgaben verringern jedoch erheblich die Effizienz elektrischer Wärmepumpen, was ihre Installation behindert und die Elektrifizierung des Gebäudesektors erschwert. Das Promotionsvorhaben zielt darauf ab, die Effizienz durch Absenkung der Warmwassertemperatur zu steigern, was nicht-thermische Ansätze zum Schutz der Trinkwasserhygiene notwendig macht.

Im Rahmen der Promotion wurde zunächst mittels einer Literaturrecherche sowie thermodynamischer Kalkulationen abgeschätzt, wie Bakterien Nährstoffe aufnehmen und wie diese Nährstoffe in häusliche Installationen gelangen können. Anschließend wurde in einem realen Mehrfamilienhaus in Wedel, Schleswig-Holstein, die Warmwassertemperatur um 5°C auf 50°C abgesenkt und eine Ultrafiltrationsanlage in der Warmwasserzirkulation eingebaut, um Mikroorganismen physikalisch aus dem System zu entfernen. Die Wärmeverluste des Rohrverteilungsnetzes machten 55,25% der gesamten für die Warmwassererzeugung erforderlichen Wärmemenge aus, während der eigentliche Aufheizvorgang des Kaltwassers und die Speicherverluste 42,74% bzw. 2,01% ausmachten. Die Absenkung der Warmwassertemperatur um 5°C führte in diesem Mehrfamilienhaus zu einer jährlichen Einsparung von 8.550 kWh (2,05 t CO₂e) bzw. 14,9%. Die Extrapolation dieses Ergebnisses deutete auf ein jährliches Einsparpotenzial von 9.04-16,85 TWh (2,17-4,04 Mt CO₂e) allein in Deutschland hin, wenn um 5°C abgesenkt wird und Erdgas als Energieträger verwendet wird. In einer Ferienwohnanlage in Timmendorfer Strand, Schleswig-Holstein, kam es trotz der Einhaltung der Temperaturangaben von 55°C sowie des Einbaus zweier Ultrafiltrationsanlagen immer noch zu Verunreinigungen im Trinkwasser. Dies deutete darauf hin, dass andere Faktoren stärkere Auswirkungen auf die Trinkwasserqualität haben könnten. Anhand eines empirischen Datensatzes von 1361 Proben aus 204 Gebäuden in der Metropolregion Hamburg wurde festgestellt, dass Wasser vor allem in den Entnahmemarmaturen und in den Rohrendleitungen stagniert, wenn das Wasser für längere Zeit nicht entnommen wird. Stagnation begünstigt das mikrobiologische Wachstum und Verunreinigungen treten vor allen an peripheren Stellen der Hausinstallationen auf. Automatische oder manuelle Spülmaßnahmen könnten einen angemessenen Wasserverbrauch sicherstellen und den Anteil kontaminierter Installationen um 22,3% verringern. Durch die Anwendung populationsdynamischer Modelle, einschließlich des exponentiellen, logistischen und Lotka-Volterra-Wachstumsmodells, wurden die Risikostufen der Stagnation bei 40-45°C definiert.

Abschließend wurde ein Konzept für das Risikomanagement entwickelt, mit dem Ziel, qualitativ hochwertiges Trinkwasser in Hausinstallationen zu gewährleisten, die mit reduzierten Warmwassertemperaturen betrieben werden. Es wird vorgeschlagen, dass die Berücksichtigung von zehn kritischen Kontrollpunkten sowie 13 Kontrollpunkten die Trinkwasserqualität maßgeblich verbessern könnte.

Schlüsselwörter

Energieeffiziente Gebäude, Trinkwasser, Gesundheitsgefahren, kritische Kontrollpunkte, Ultrafiltration

1 Einleitung

Im Zuge der Energiewende müssen Brennstoffheizkessel durch elektrische Wärmepumpen ersetzt werden. In Deutschland müssen bis 2030 mindestens vier Millionen Wärmepumpen installiert werden, um die nationalen Klimaziele zu erreichen [1]. Der Schwerpunkt von Energieeffizienzmaßnahmen im Gebäudesektor lag bisher auf der Raumheizung, da diese rund 70% der benötigten Energie im europäischen Gebäudebestand ausmacht [2]. Die Warmwassererzeugung wurde vernachlässigt, sodass es nur wenig Literatur gibt, die Energieeinsparpotenziale bei der Warmwassererzeugung schätzt [3]. Allerdings nimmt der relative Anteil der Warmwassererzeugung am Energiebedarf weiter zu, während der Anteil anderer Bereiche sinkt [4]. In modernen energieeffizienten Gebäuden ist der relative Anteil der Warmwassererzeugung auf 40-50% angestiegen [4–7].

Elektrische Wärmepumpen können bei korrekter Planung, Installation und Betrieb hohe Wirkungsgrade erreichen [8]. Die Effizienz hängt weitgehend von der Temperaturdifferenz zwischen der Wärmequelle und dem benötigten Wärmeniveau ab. Mit steigendem Temperaturbedarf sinkt die Effizienz von Wärmepumpen [4]. Für die Raumheizung kann bei der Verwendung von Flächenheizungen eine Vorlauftemperatur von 35-36°C ausreichen [8]. Im Gegensatz dazu sind für die Warmwassererzeugung gemäß gängigen Normen Temperaturen von 60°C bzw. 55°C erforderlich, um eine thermische Behandlung gegen Legionellen und andere pathogene Mikroorganismen zu ermöglichen [9, 10]. Obwohl Wärmepumpen mit üblichen Kältemitteln solche Temperaturen erreichen können, müssen Wärmeverluste berücksichtigt werden. Zirkulationsverluste können in bestehenden Mehrfamilienhäusern etwa 50-70% der benötigten Wärmemenge ausmachen [11, 12]. In vielen Fällen verringern diese Verluste die Energieeffizienz von Wärmepumpen erheblich oder erschweren deren Einbau in Neubauten.

Neben der thermischen Desinfektion können auch chemische Methoden wie die Chlorierung durchgeführt werden, da eine hohe Wirksamkeit erzielt werden kann [13]. Die bei der Chlorierung entstehenden Nebenprodukte geben allerdings Anlass zu Bedenken hinsichtlich der menschlichen Gesundheit [14] und der Umwelt [15]. Die Ergebnisse aus einem klinischen Gebäude in Deutschland deuten darauf hin, dass chemische Desinfektionsmittel wie Chlordioxid regelmäßig zugesetzt werden müssen, um eine langfristige Wirksamkeit zu sichern [16]. Die Wirksamkeit der Silber-Kupfer-Ionisierung ist inkonsistent. In einer Gesundheitseinrichtung im Vereinigten Königreich wurden Legionellen bei reduzierten Warmwassertemperaturen vollständig bekämpft [17]. In einem deutschen Universitätskrankenhaus wurde die Zahl der Legionellen zwar zunächst gesenkt, eine langfristige Wirksamkeit war jedoch nicht gegeben. Es wurde vermutet, dass Legionellen eine Resistenz gegen Silber-Ionen entwickeln könnten [18]. Die Ultrafiltration ist eine physikalische Desinfektionsmethode, die als Barriere gegen Partikel wie Mikroorganismen dient. Während sie bereits für die Abwasseraufbereitung und –wiederverwendung eingesetzt wird, ist ihre Anwendung in Gebäuden noch nicht verbreitet [19]. Zusätzlich könnten präventive Managementmethoden eingesetzt werden. Ausgehend von Erfahrungen in der Lebensmittelindustrie könnten HACCP-Konzepte (Hazard Analysis and Critical Control Points) verwendet werden, um eine hohe Trinkwasserqualität bei abgesenkten Temperaturen zu gewährleisten. In der Europäischen Union sind Lebensmittelunternehmer verpflichtet, ein ständiges Verfahren auf Grundlage des HACCP-Prinzips zu unterhalten (Art. 5 EG Nr.852/2004 [20]). Es besteht jedoch keine gesetzliche Verpflichtung zur Erstellung von Risikokonzepten für Leitungswasser, obwohl es das am stärksten frequentierte Lebensmittel ist [21].

Ziel dieses Promotionsvorhaben ist es, die Energieeffizienz der Warmwassererzeugung in Gebäuden zu steigern, indem die Warmwassertemperatur abgesenkt wird. Es soll ermittelt werden, ob nicht-thermische Maßnahmen wirksam genug sind, um sicheres Trinkwasser zu

gewährleisten. Zunächst wird die Ökologie der Krankheitserreger im häuslichen Trinkwasser charakterisiert. Anschließend werden reale Mustergebäude untersucht, in denen die Warmwassertemperatur gesenkt und/oder Ultrafiltrationsanlagen installiert wurden. Mittels einer Energiebedarfsberechnung wird das Potenzial für Energie- und Kohlenstoffemissionseinsparungen bewertet. Abschließend werden kritische Parameter für die Trinkwasserhygiene durch eine Analyse eines empirischen Datensatzes ermittelt. Der Parameter Zeit wird anhand populationsdynamischer Modelle evaluiert. Die Ergebnisse bilden die Grundlage eines Risikomanagementkonzeptes, das sich auf Gebäude konzentriert, die mit abgesenkten Warmwassertemperaturen betrieben werden.

2 Ergebnisse

2.1 Nährstoffangebot und Diversität der Mikroorganismen

Die Ökologie von Krankheitserregern im häuslichen Trinkwasser wurde untersucht, um Nährstoffquellen aufzudecken. Durch eine Literaturrecherche wurden 261 Gattungen identifiziert, die im Trinkwasser vorkommen könnten. Diese Gattungen wurden in Gruppen eingeteilt, basierend auf ihren Stoffwechselmerkmalen und ihrer Fähigkeit zur Bildung von Biofilmen oder Sporen. Die Stoffwechselwege wurden gemäß den Hess'schen Gesetz der konstanten Wärmesummierung bewertet, wobei angenommen wird, dass Prozesse häufiger auftreten, wenn höhere Energiemengen gewonnen werden. Die Entropie und Startkonzentration können ebenfalls einen Einfluss haben. Eine detaillierte Beschreibung der Methoden ist in der Dissertation verfügbar.

43,3% der Gattungen bilden oder werden verdächtig, Biofilme zu bilden, wobei über 95% der Biomasse in Biofilmen lokalisiert ist [22]. Um die Bildung von Biofilmen zu verhindern, ist es wichtig, konstante Wasserströmungen aufrechtzuerhalten und Wasserstagnationen in Installationen zu verhindern. Der Stickstoffkreislauf ist in Trinkwasserumgebungen weit verbreitet, da viele Gattungen an Denitrifikation (29,1%; $-650,96 \text{ kJ mol}^{-1}$), Stickstofffixierung (19,9%; $-91,8 \text{ kJ mol}^{-1}$) und Nitrifikation (11,9%; $-446,50 \text{ kJ mol}^{-1}$) beteiligt sind. Stickstofffixierung ist entscheidend für die Verfügbarkeit von Stickstoff in Ökosystemen [23]. Der Schwefelkreislauf ist weniger verbreitet, mit nur einem kleinen Prozentsatz von Gattungen, die zur Sulfurifikation (8,0%) und Desulfurifikation (4,2%; $-442,16 \text{ kJ mol}^{-1}$) fähig ist. Während der Desulfurifikation werden Schwefelverbindungen freigesetzt, die indirekt zu Eisenkorrosion führen können. Es wurde vorgeschlagen [24], dass diese Schwefelverbindungen in Gegenwart von O_2 oder Fe^{3+} , das von eisenoxidierenden Bakterien (rd. 10,7%; $-102,72 \text{ kJ mol}^{-1}$) bereitgestellt wird, zu elementarem Schwefel oxidiert werden. Der elementare Schwefel reagiert dann zu Polysulfiden, die als Katalysator für die kathodische Teilreaktion der Korrosion dienen [25]. Wasserstoffoxidierende Bakterien (5,7%; $-239,98 \text{ kJ mol}^{-1}$) könnten von der hohen Verfügbarkeit von H_2 profitierenden, das während der Korrosion von Eisen [26], Aluminium oder Magnesium [27] abiotisch erzeugt wird. Einige Gattungen sind mit Methanoxidation (4,2%; $-508,92 \text{ kJ mol}^{-1}$) und phototropher Kohlenstofffixierung (7,3%; $2802,86 \text{ kJ mol}^{-1}$) verbunden. Phototrophe Gattungen sind hauptsächlich mit Boden- oder Meeresumgebungen assoziiert und haben daher möglicherweise wenig Bedeutung in der Trinkwasserökologie. Die Gruppe „Begleitflora“, besteht aus Mikroorganismen, die durch ungewöhnliche Wege wie Bakterien aus Belebtschlamm, dem menschlichen Darm, Grundwasser oder Meerwasser in häusliche Installationen gelangen könnten. Sie umfasst Pilze, oligotrophe Bakterien und thermophile Sporen. Mikroorganismen können als Nährstoffquellen dienen, wenn Zellen sterben oder Moleküle in die extrazelluläre Matrix freisetzen und so natürliche Bausteine für Ökosysteme liefern. Zum Beispiel kann *Legionella pneumophila* Nährstoffe aus Trümmern hitzeabgetöteter Zellen gewinnen [28]. Größere Wassermengen, die in Installationen eingespeist werden, können möglicherweise mehr Nährstoffe bieten, da Wasser nicht steril ist.

Einige Gattungen (12,6%) wurden als „Flora-Förderer“, eingestuft, da sie Moleküle produzieren, die als Nährstoffe dienen können. Weiterhin fungieren 5,4% als Wirt für Legionellen und andere Bakterien, in denen *L. pneumophila* sich vermehren kann, aber auch abgebaut werden kann [29]. 7,7% der Gattungen wurden als „Inhibitoren“ definiert, da sie antagonistische, antibiotische, anti-biofilm, anti-quorum-sensing oder biofilmbauende Effekte aufweisen. Die Analogon-Gruppe (6,9%) weist ähnliche Eigenschaften wie Legionellen auf, da sie Legionellenähnliche Pathogene sind oder in Wirten überleben können. Etwa 13,0% der Gattungen sind zumindest opportunistische Pathogene, bei denen das Infektionsrisiko im Allgemeinen von der Erregerkonzentration abhängt. Obwohl keine Literaturquellen den direkten Abbau von Rohrbestandteilen beschreiben, konnten einige Gattungen (5,4%) spezifische Moleküle wie Fluorbenzol, Naphthalin, Pyren, Polyethylenterephthalat, Dibenzofuran und Polystyrol abbauen. Diese Bakterien könnten synthetische Rohrbestandteile oder Dichtungen zersetzen. Zudem wurden 1,5% der Gattungen als Räuber eingestuft, da sie lytische Aktivitäten auf Bakterien aufweisen. Ein Zehntel der Gattungen (10,0%) konnten keiner Gruppe zugeordnet werden. Künftige Studien könnten weitere Informationen dazu liefern.

2.2 Mustergebäude

Ultrafiltrationsanlagen wurden in zwei Mustergebäuden installiert: Einem Mehrfamilienhaus in Wedel und einer Ferienwohnanlage in Timmendorfer Strand. Beide Gebäude verfügen über eine zentralisierte Trinkwasserinstallation mit Warmwasserzirkulation. Die Ultrafiltrationsanlagen sind an verschiedenen Stellen in die Trinkwasserinstallationen integriert. Sie können entweder in der Warmwasserzirkulationsleitung im Bypass-Betrieb (UF-C) installiert werden oder direkt nach der Gebäudeeinspeisung (UF-B) platziert werden (**Abbildung 1**).

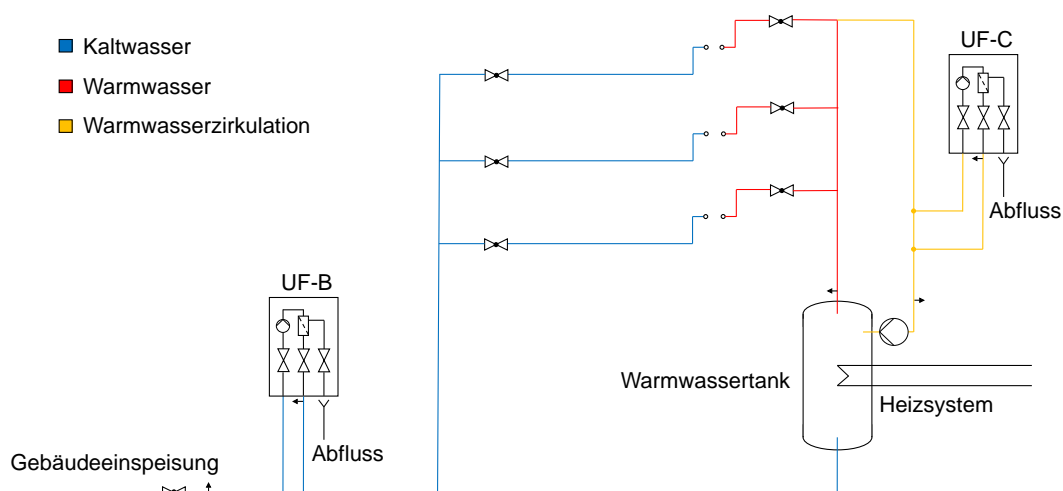


Abbildung 1. Installationsmöglichkeiten von Ultrafiltrationsanlagen. Ultrafiltrationsanlagen können im Bypass-Betrieb in die Warmwasserzirkulation (UF-C) und/oder nach der Gebäudeeinspeisung (UF-B) integriert werden.

Das Mehrfamilienhaus ist mit einer UF-C ausgestattet, während die Ferienwohnanlage sowohl eine UF-C als auch eine UF-B besitzt. Die Konstruktionen der UF-C und der UF-B ähneln sich stark. Die UF-B filtert 100% des Volumenstroms, während die UF-C etwa 70% des Volumenstroms filtert, da sie über einen Bypass eingebaut ist, um die hydraulischen Eigenschaften des Warmwassersystems aufrechtzuerhalten. Im Mehrfamilienhaus wurde die Warmwassertemperatur um 5°C auf 50°C abgesenkt. Eine Energiebedarfsberechnung wur-

de durchgeführt, um die Energie- und Kohlenstoffemissionseinsparungen zu ermitteln, die sich aus der reduzierten Warmwassertemperatur ergaben. In der Ferienwohnanlage wurde die Temperatur nicht abgesenkt und auf 55°C gemäß der Norm eingestellt. Die Trinkwasserhygiene wurde durch Labormethoden wie die Kultivierung von Legionellenarten und die Gesamtzellzählung mittels Durchflusszytometrie überwacht. Eine detaillierte Beschreibung der Gebäude, Trinkwasserinstallationen und Methoden ist in der Dissertation verfügbar.

Im Mehrfamilienhaus blieb das gefilterte Warmwasser durchweg frei von Legionellen, wobei der Ultrafiltrationsprozess eine Reinigungswirkung von 91,15% erzielte. Das Kaltwasser wurde nicht gefiltert und wies Verunreinigungen durch Legionellen auf. Basierend auf Temperaturmessungen wurde vermutet, dass die räumliche Nähe von Kalt- und Warmwasserleitungen in denselben Steigschächten zu einer Temperaturübertragung führte, die das Bakterienwachstum im Kaltwasser begünstigte. Die Energiebedarfsberechnung ergab, dass die Wärmeverluste des Rohrverteilungsnetzes 55,25% der gesamten für die Warmwassererzeugung erforderlichen Wärmemenge ausmachten, während der eigentliche Aufheizprozess des Kaltwassers und die Speicherverluste 42,74% bzw. 2,01% ausmachten. Durch die Absenkung der Warmwassertemperatur um 5°C konnte in diesem Mehrfamilienhaus eine jährliche Einsparung von 8.550 kWh (2,05 t CO_{2e}) erzielt werden, was einer Reduktion des Energiebedarfs für die Warmwassererzeugung um 14,9% entspricht. Die Extrapolation dieser Ergebnisse deutet auf ein jährliches Einsparpotenzial von 9,04-16,85 TWh (2,17-4,04 Mt CO_{2e}) allein in Deutschland hin, wenn um 5°C abgesenkt wird und Erdgas als Energieträger verwendet wird.

Die Ferienwohnanlage war mit einer Ultrafiltrationsanlage an der Gebäudeeinspeisung ausgestattet, die eine Reinigungswirkung von 97,5% erzielte. Trotz der Einhaltung der Temperaturvorgaben (55°C) und einer zweiten Ultrafiltrationsanlage in der Warmwasserzirkulation kam es an den Entnahmestellen immer noch zu Verunreinigungen durch Legionellen. Dieses Ergebnis deutete darauf hin, dass andere Faktoren möglicherweise stärkere Auswirkungen auf die Trinkwasserhygiene haben könnten als die Temperatureinhaltung und die Ultrafiltration, wie zum Beispiel der hydraulische Abgleich und Wasserstagnation. Eine detaillierte Herleitung dieser Ergebnisse und ihre Bewertung sind in der Dissertation verfügbar.

2.3 Statistische Analyse relevanter Einflussfaktoren

Anhand eines empirischen Datensatzes wurden mehrere Schlüsselfaktoren untersucht, die sich auf das mikrobiologische Wachstum in Trinkwasserinstallationen auswirken können. Dazu gehören Temperatur, Wasserstagnation, hydraulische Bedingungen und Ultrafiltration. Das Ziel der Untersuchung war es, anhand der Analyse von 1361 Proben aus 204 Installationen in der Metropolregion Hamburg herauszufinden, welche dieser Faktoren den größten Einfluss auf das mikrobiologische Wachstum hat. Von den untersuchten Trinkwasserinstallationen verfügen zehn über eine UF-B, während zwei eine UF-C haben. In zwei weiteren Installationen sind sowohl eine UF-B als auch eine UF-C integriert. Insgesamt verfügen 190 Installationen nicht über eine Ultrafiltrationsanlage.

Der Kolmogorov-Smirnov-Test zeigte, dass die Daten (Legionellenkonzentration, Gesamtzellzahl) nicht normalverteilt waren, daher wurden nicht-parametrische Tests verwendet. Der Rangkorrelationskoeffizient nach Spearman (ρ_s) wurde genutzt, um prädiktive Beziehungen zwischen metrischen Variablen zu modellieren. Der Kruskal-Wallis- und Dunn-Bonferroni-Test wurden angewendet, um Beziehungen zwischen kategorialen und metrischen Variablen in mehreren unabhängigen Gruppen zu bewerten (keine wiederholten Messungen). Der Chi-Quadrat-Test (χ^2) wurde zur Untersuchung von Assoziationen zwischen kategorialen Variablen durchgeführt. Ein Signifikanzniveau (α) von 0,05 wurde festgelegt. Cramer's V wurde zur Standardisierung des Chi-Quadrat-Tests berechnet. Die Temperaturwerte wurden in Interval-

le von 2-6°C eingeteilt, um die metrische Variable in eine kategoriale Variable umzuwandeln. Die Anzahl der Proben wird durch die Variable „n“ dargestellt, welche auch die Anzahl der Trinkwasserinstallationen oder Entnahmestellen darstellen kann.

Jede Trinkwasserinstallation wurde auf ihren hydraulischen Abgleich anhand von Temperaturmessungen überprüft. Die Hydraulik galt als „abgeglichen“, wenn der Auslass des Warmwassertanks $\geq 60^{\circ}\text{C}$ erreichte und die Temperaturdifferenz zwischen Auslass und Zirkulationsrücklauf $\leq 5^{\circ}\text{C}$ betrug. Installationen, die nur die Temperaturdifferenz einhielten, wurden als „teilweise abgeglichen“ eingestuft. Alle anderen Installationen wurden als „nicht abgeglichen“ bezeichnet. Zusätzlich wurde jede Trinkwasserinstallation auf ihre mikrobiologische Stabilität hin untersucht, gemessen anhand der Gesamtzellzahl an verschiedenen Stellen der Installation. Die Mikrobiologie wurde als „stabil“ bewertet, wenn die Gesamtzellzahl an den Warmwasserentnahmestellen im Vergleich zu der am Auslass des Warmwassertanks um weniger als 25% anstieg. Installationen wurden als kontaminiert eingestuft, wenn die Legionellenkonzentration an mindestens einer Probenahmestelle $\geq 100 \text{ KBE } 100 \text{ mL}^{-1}$ war.

Es bestand eine schwach positive Korrelation zwischen der Gesamtzellzahl und der Legionellenkonzentration ($\rho_s = 0,17$; $n = 1309$), die statistisch signifikant war ($p = <0,001$). Der Anteil der Legionellen an der Gesamtzellzahl zeigte eine erhebliche Variabilität. In 83,0% der Proben waren keine Legionellen nachweisbar, was darauf hindeutet, dass die Legionellenkonzentration möglicherweise nicht für jede Analyse geeignet ist. Eine Kontamination mit Legionellen wurde in 23,1% der Proben an den Entnahmestellen festgestellt ($n = 706$). Im Installationssystem, einschließlich Proben aus dem Auslass des Warmwassertanks, dem Zirkulationsrücklauf und Zirkulationsrücklaufventilen, waren nur 0,7% der Proben kontaminiert ($n = 571$). Kontaminationen wurden in 8,3% der Proben an der Gebäudeeinspeisung gefunden ($n = 36$). Aufgrund von relativen Häufigkeiten unter fünf wurde an dieser Stelle kein χ^2 -Wert berechnet.

Die Temperatur ist ein wichtiger Faktor in Trinkwasserinstallationen. Der Kruskal-Wallis-Test ergab einen signifikanten Zusammenhang zwischen der direkten Probenahmetemperatur und der Gesamtzellzahl ($\chi^2 = 73,9$; $p = <0,001$; $n = 1303$). Der Dunn-Bonferroni-Test zeigte paarweise Unterschiede zwischen den Gruppen. Neben dem Einfluss der Temperatur wurde auch der Effekt von Temperaturänderungen untersucht. Zur Erfassung von Temperaturänderungen wurde die Differenz zwischen der direkten Probenahmetemperatur und der konstanten Temperatur an den Entnahmestellen gemessen, die sich nach dem Abfließen des Wassers einstellte. Diese Temperaturänderung diente als Indikator für den Grad der Rohrisolierung und gab Aufschluss über die Dauer der Wasserstagnation vor der Probenahme. Zur Bewertung des Einflusses von Temperaturänderungen auf das mikrobiologische Wachstum wurde die Gesamtzellzahl an den Warmwasserentnahmestellen mit jener am Auslass des Warmwassertanks verrechnet. Es zeigte sich kein signifikanter Zusammenhang zwischen der Temperaturänderung und dem mikrobiologischen Wachstum ($\chi^2 = 15,9$; $p = 0,528$; $n = 523$), was darauf hindeutet, dass eine Senkung der Warmwassertemperatur in den Rohrleitungen das mikrobiologische Wachstum nicht signifikant erhöht hatte. Es ist jedoch möglich, dass die Stagnationszeit eine größere Rolle spielte. Leider lieferte der Datensatz keine direkten Informationen darüber, wie lange das Wasser vor der Probenahme in den Rohren gestanden hatte.

In 15,4% der hydraulisch abgeglichenen Installationen ($n = 39$) wurde eine Kontamination mit Legionellen festgestellt. Im Gegensatz betrug die Kontaminationsrate bei teilweise abgeglichenen Installationen bei 31,5% ($n = 149$) und bei nicht abgeglichenen Systemen bei 27,4% ($n = 44$), was einem Anstieg von etwa 14,0% entspricht. Der Chi-Quadrat-Test ergab jedoch, dass der Zusammenhang zwischen Kontaminationen und dem hydraulischen Abgleich statistisch nicht signifikant war ($\chi^2 = 4,02$; $p = 0,134$; $n = 232$ einschließlich 28 Doppelmessungen).

Diese fehlende Signifikanz könnte darauf zurückzuführen sein, dass die Kategorie „nicht abgeglichen“ Installationen mit sehr hohen Temperaturen am Auslass des Warmwassertanks umfasst, was zu einer großen Temperaturspreizung zwischen Auslass und dem Zirkulationsrücklauf führt, die 5°C weit übersteigt. Dies kann zwar die Legionellen kontrollieren, führt jedoch zu einer erheblichen Energieverschwendung.

Unter den mikrobiologisch stabilen Installationen (n = 131) wiesen 16,8% mindestens eine Kontamination auf. Im Gegensatz dazu waren bei den mikrobiologisch instabilen Installationen 39,1% (n = 110) kontaminiert, was einer um 22,3% höheren Kontaminationsrate entspricht. Der Chi-Quadrat-Test zeigte, dass der Zusammenhang zwischen Kontaminationen und mikrobiologischer Stabilität statistisch signifikant war ($\chi^2 = 15,09$; $p = <0,001$; $n = 241$ einschließlich 37 Doppelmessungen). Cramer's V wurde mit 0,25 berechnet, was auf eine mittlere Effektgröße hinweist. Dies weist darauf hin, dass Kontaminationen häufig auf mikrobiologische Unregelmäßigkeiten zurückzuführen sind, die auftreten, wenn die Gesamtzellzahl an den Warmwasserentnahmestellen die Zahl am Auslass des Warmwassertanks deutlich übersteigt (>25%). Es wird vermutet, dass Verbraucher eine wichtige Rolle für die Trinkwasserhygiene spielen, da sie Stagnationszeiten durch ihre Verbrauchsraten regulieren. Stagnation des Trinkwassers kann vor allem in Entnahmearmaturen und Rohrendleitungen auftreten und das mikrobiologische Wachstum fördern. Die Einführung automatischer oder manueller Spülmaßnahmen könnte dazu beitragen, einen angemessenen Wasserverbrauch aufrechtzuerhalten und die mikrobiologische Stabilität des Systems zu bewahren.

Um den Zusammenhang zwischen dem Ablaufvolumen bei der Probenahme und der Legionellenkonzentration zu untersuchen, wurden Tests an Kaltwasserentnahmestellen durchgeführt. Die Legionellenkonzentration wurde an derselben Entnahmestelle und zum gleichen Zeitpunkt bei einem Ablaufvolumen von 1 L und 3-5 L bestimmt. Insgesamt wurden 63 Kaltwasserentnahmestellen analysiert. An 26 Entnahmestellen wurden keine Legionellen nachgewiesen. Daher wurden diese aufgrund mangelnder Differenzierbarkeit aus der Analyse ausgeschlossen. Bei 83,8% der Kaltwasserentnahmestellen (n = 37) nahm die Legionellenkonzentration ab, wenn mehr Wasser abgelaufen wurde, während sie in 8,1% unverändert blieb und in 8,1% stieg. Dies deutet darauf hin, dass sich Legionellen häufig in peripheren Zonen ansammeln, möglicherweise aufgrund von längerfristiger Stagnation des Wassers in den Endleitungen. Lokale Kontaminationen könnten auftreten, die nicht repräsentativ für die gesamte Installation sind. Eine mögliche Lösung könnte sein, das Ablaufvolumen von 1 L auf 3-5 L zu erhöhen.

Das Vorhandensein einer Ultrafiltrationsanlage zeigte einen statistisch signifikanten Zusammenhang mit der Gesamtzellzahl an den Kaltwasserentnahmestellen ($\chi^2 = 70,91$; $p = <0,001$; $n = 155$), jedoch nicht an den Warmwasserentnahmestellen ($\chi^2 = 2,7$; $p = 0,44$; $n = 581$). Dies deutet darauf hin, dass andere Parameter möglicherweise einen stärkeren Einfluss auf das Warmwasser haben. Erstens wird angenommen, dass nach dem Bypass-Prinzip nur 70% des Volumenstroms durch die UF-C gefiltert wird (im Gegensatz zu 100% bei der UF-B). Zweitens sind die mikrobiologischen Wachstumsraten im Warmwasser aufgrund höherer Temperaturen im Vergleich zum Kaltwasser erhöht, was zu einer beschleunigten Vermehrung der Mikroorganismen führen könnte und die Bedeutung von Stagnationszeiten unterstreicht. Drittens ist es wichtig, die statistische Genauigkeit zu berücksichtigen, da bestimmte Gruppen möglicherweise stärkere Präsenzen aufweisen.

In dem bereits beschriebenen Mehrfamilienhaus wurde die erfolgreiche Einführung der UF-C dokumentiert, was zu einer Diskrepanz führt. Daher wird die Hypothese aufgestellt, dass die Ultrafiltration zwar eine Absenkung der Warmwassertemperatur ermöglichen kann, aber auch zusätzliche Faktoren berücksichtigt werden müssen. Eine detaillierte Herleitung dieser Ergebnisse und ihre Bewertung sind in der Dissertation verfügbar.

2.4 Bewertung von Stagnation und Spülfrequenzen

Wasserstagnation ist eng mit dem mikrobiologischen Wachstum verbunden. Gemäß der Norm ist es in zentralen Trinkwasserinstallationen erlaubt, die Warmwassertemperatur auf $\geq 50^{\circ}\text{C}$ zu senken, vorausgesetzt, dass alle drei Tage ein Wasseraustausch stattfindet [9]. Für Risikobewertungskonzepte ist jedoch entscheidend, wie lange Wasser stagnieren kann, bevor eine schädliche Konzentration von Krankheitserregern erreicht wird. Die Spezifikationen variieren je nach Vorschrift. Einige Regelwerke besagen, dass der bestimmungsgemäße Betrieb von Trinkwasserinstallationen gefährdet ist, wenn das Wasser sieben Tage lang nicht abgezapft wird [9, 30]. Andere Regelungen weisen darauf hin, dass eine Nichtnutzung von 72 Stunden als Betriebsunterbrechung betrachtet werden sollte [31].

In der Dissertation wurden populationsdynamische Modelle verwendet, um kritische Stagnationszeiten von Trinkwasser zu bestimmen. Die Modelle wurden eingesetzt, um die Zeit zu ermitteln, die eine einzelne Legionelle benötigt, um 99 Nachkommen zu produzieren. Die Modellierungen basieren auf verschiedenen Annahmen und Ungenauigkeiten, deren genaue Methodik in der Dissertation beschrieben ist. Durch Anwendung des exponentiellen, des logistischen und des Lotka-Volterra-Wachstumsmodells wurden die Risikostufen der Stagnation bei Temperaturen von $40\text{-}45^{\circ}\text{C}$ wie folgt definiert: (i) <10 Stunden: Geringes Risiko (ii) $10\text{-}24$ Stunden: Mäßiges Risiko (iii) $24\text{-}30$ Stunden: Erhöhtes Risiko (iv) $30\text{-}72$ Stunden: Hohes Risiko (v) >72 Stunden: Sehr hohes Risiko (vi) $>3\text{-}7$ Tage: Nicht trinkbar.

2.5 Risikomanagement

Es wurde ein Risikomanagementkonzept entwickelt, um eine hohe Trinkwasserqualität in Hausinstallationen mit reduzierten Warmwassertemperaturen zu gewährleisten. Das Konzept basiert auf den Ergebnissen der Dissertation und wird durch 16 Normen, 14 technischen Regeln und vier Richtlinienpapiere ergänzt. Es orientiert sich am HACCP-Prinzip und soll ermöglichen, die Warmwassertemperatur in Trinkwasserinstallationen aus Gründen der Energieeinsparung zu senken, ohne die Trinkwasserqualität zu beeinträchtigen. Obwohl normalerweise ein individuelles Konzept für jede Installation erforderlich ist, dient dieses Konzept als praktische Vorlage. Es umfasst Installationsmerkmale, Organisationsstrukturen, eine Gefährdungsanalyse sowie zehn kritische Kontrollpunkte (CCP) und 13 Kontrollpunkte (CP). CCP können zu inakzeptablen Gesundheitsgefahren führen, wenn sie nicht angemessen überwacht werden, während CP nicht zwangsläufig zu erhöhten Gesundheitsrisiken führen müssen. Ihre Überwachung kann unnötig oder unangemessen sein. Eine detaillierte Beschreibung der Kontrollpunkte sowie des gesamten Konzepts ist in der Dissertation verfügbar. In diesem Text werden die CCP (**Tabelle 1**) bzw. CP (**Tabelle 2**) kurz benannt.

Tabelle 1. CCP. Eine detaillierte Beschreibung der Kontrollpunkte ist in der Dissertation verfügbar.

Kritischer Kontrollpunkt	Grenzwert	Zusatzinformation
CCP 1: Verdeckte Biofilme		Biofilme an Armaturen, Dichtungen, Wasserzählern etc.
CCP 2: Sporadisch gespülte Bereiche		Gebogene Rohre und Totstellen in der Installation
CCP 3: Hydraulischer Abgleich (warm)	$\leq 5^{\circ}\text{C}$	Temperaturdifferenz zwischen Warmwassertankauslass und Zirkulationsrücklauf
CCP 4: Warmwasserverbrauch	<10 h	Siehe Bestimmungen in Kapitel 2.4
CCP 5: Biofilme in Zapfventile (warm)		Verdeckte Biofilme möglich
CCP 6: Kaltwasserverbrauch	<10 h	Bei unbedenklicher Erwärmung von Kaltwasserrohren sind längere Stagnationszeiten zulässig
CCP 7: Biofilme in Zapfventile (kalt)		Verdeckte Biofilme möglich
CCP 8: Probenahmeverfahren	3-5 L	Erhöhung des Ablaufvolumen von 1 L auf 3-5 L für repräsentative Ergebnisse
CCP 9: Probenahmehäufigkeit	6-12 Monate	Verkürzung der Probenahmezeit bei Absenkung der Warmwassertemperatur
CCP 10: Reinigung von Ventilen		Entfernung von Biofilmen bei Wartungs- und Renovierungsarbeiten

Tabelle 2. CP. Eine detaillierte Beschreibung der Kontrollpunkte ist in der Dissertation verfügbar.

Kontrollpunkt	Zusatzinformation
CP 1: Rohrdimensionierung	Rohre für minimale Wasserstagnation bemessen
CP 2: Wärmetransfer	Nach Möglichkeit Kaltwasserleitungen in separate Steigschächte legen; externe Wärmequellen vermeiden
CP 3: Thermische Konvektion	Vermeidung von Kaltwasserleitungen in oberen Zonen zur Verhinderung von Erwärmung durch aufsteigende Luft
CP 4: Rohrmaterialien	Auswahl von Rohrmaterialien gemäß Normen
CP 5: Dichtheitsprüfung	Einhaltung von Druck- und Messvorschriften
CP 6: Aufsichtsorganisation	Installation vor Dauerbetrieb nicht stillstehen lassen
CP 7: Eingespeiste Wasserqualität	Vermeidung von Kontamination durch eingespeistes Wasser; kein Einfluss auf öffentliches Trinkwassernetz durch Hausinstallation
CP 8: Erwärmung im Tank	Funktionstüchtigkeit, Dichtheit und Reinigung des Tanks bei Wartungskontrollen prüfen
CP 9: Eisenkorrosion	Eisenkorrosion fördert mikrobiologisches Wachstum durch Bereitstellung von H ₂ als Nährstoff
CP 10: Kupferablagerungen	Ablagerung von Kupfer auf weniger edlen Metallen kann zu H ₂ -Produktion führen
CP 11: Hydraulischer Abgleich (kalt)	Dimensionierung der Rohre entsprechend dem Kaltwasserbedarf zur Vermeidung von Stagnation
CP 12: Methode der Probenahme	Durchflusszytometrie für umfassendere Analyse im Vergleich zu Kultivierungsmethoden nutzen
CP 13: Schmutzschutz	Schutzkappen etc. bei Montage, Wartung oder Renovierung verwenden

3. Schluss

3.1 Fazit

Die Warmwassererzeugung in Gebäuden erfordert eine Lösung für den Hygiene-Energie-Konflikt. Das Ziel der Dissertation war es, die Energieeffizienz der Warmwassererzeugung zu steigern, indem die Warmwassertemperaturen reduziert werden. Die Senkung der Temperatur birgt jedoch das Risiko einer erhöhten Kontamination aufgrund des verstärkten mikrobiologischen Wachstums bei moderaten Temperaturen.

Eine mögliche Lösung könnte der Einsatz einer Ultrafiltrationsanlage sein, um Mikroorganismen aus den Installationen zu entfernen. Die mikrobiologischen Eigenschaften von Trinkwasserinstallationen sind komplex, und es scheint, dass insbesondere Wasserstagnation maßgeblich zur Gesundheitsgefährdung beiträgt. Die Verhinderung von Wasserstagnation ist entscheidend, unabhängig von der Senkung der Warmwassertemperatur. Längere Zeiträume ohne Wassernutzung begünstigen das mikrobiologische Wachstum, da sich Warmwasserleitungen abkühlen, Kaltwasserleitungen erwärmen und somit Bedingungen geschaffen werden, die das Wachstum von Bakterien fördern.

Je niedriger die Warmwassertemperatur ist, desto häufiger muss das Wasser ausgetauscht werden, um ein schnelles mikrobiologisches Wachstum zu verhindern. Es ist jedoch wichtig, den Warmwasserverbrauch zu berücksichtigen, insbesondere wenn er durch automatische Spülsysteme erhöht wird. Der Energiebedarf für diese Spülsysteme sollte nicht die Energieeinsparungen übersteigen, die durch die Absenkung der Temperatur erreicht werden. Eine grobe Berechnung ergab, dass pro Wohnung etwa 96,36 kWh pro Jahr vom Erzeuger produziert werden müssen, um eine tägliche automatische Spülung mit 4 L Warmwasser zu ermöglichen. Eine Reduzierung der Warmwassertemperatur um 15°C spart hingegen rund 1.221,6 kWh pro Jahr pro Wohnung, was einer Gesamtersparnis von etwa 1.125,24 kWh pro Jahr pro Wohnung entspricht. Weitere Details sind in der Dissertation zu finden.

Um Stagnationen und die Bildung von Biofilmen zu minimieren, sollten Rohrendleitungen möglichst klein gehalten und Rohrstrukturen einfach gestaltet werden. Es wird außerdem empfohlen, zehn kritische Kontrollpunkte sowie 13 Kontrollpunkte zu berücksichtigen, um eine Absenkung der Warmwassertemperatur zu ermöglichen.

3.2 Ausblick

Obwohl eine Absenkung der Warmwassertemperaturen bereits zu Energieeinsparungen führt, steht im Zuge der Energiewende der verstärkte Einsatz von elektrischen Wärmepumpen im Vordergrund. Der Markthochlauf von Wärmepumpen in Bestandsgebäuden erfolgt aktuell noch nicht schnell genug, um die politisch gesetzten Klimaziele zu erreichen. Es wird erwartet, dass mit dem verstärkten Einsatz von Wärmepumpen in Mehrfamilienhäusern der Bedarf an Energieeinsparungen steigen wird, da Mehrfamilienhäuser in der Regel höhere Wärmemengen als Einfamilienhäuser benötigen, die von der Wärmepumpe erzeugt werden müssen. Dabei muss berücksichtigt werden, dass hohe Temperaturen nicht nur erreicht, sondern auch gehalten werden müssen. Es ist wichtig zu beachten, dass die Wärmeverluste in den Warmwasserrohrleitungen die tatsächliche Wärmemenge für das Aufheizen des Kaltwassers zur Erzeugung von Warmwasser übersteigen können. Zusätzlich könnte eine Absenkung der Warmwassertemperatur dazu beitragen, lokale Stromnetze zu entlasten, die aufgrund des erwarteten Anstiegs von Wärmepumpen und Elektrofahrzeugen zunehmend belastet werden.

Wenn eine Absenkung der Warmwassertemperatur erforderlich ist, sollten zunächst zehn kritische Kontrollpunkte sowie 13 Kontrollpunkte berücksichtigt werden. Dabei sollte vor allem die Wasserstagnation vermieden und ein hydraulischer Abgleich hergestellt werden. Erst wenn ausreichend hohe Wasserverbrauchsrate erreicht werden, kann die Warmwassertemperatur schrittweise gesenkt werden. Nicht-thermische Desinfektionsmethoden wie beispielsweise Ultrafiltration können dazu beitragen, die Trinkwasserqualität zu gewährleisten.

3.3 Evaluation

Die Gesellschaft für Energie und Klimaschutz Schleswig-Holstein GmbH (EKSH) unterstützt seit einigen Jahren die Erforschung der Energieeffizienz bei der Warmwassererzeugung. Ein früheres Forschungsprojekt mit dem Kurztitel „DFZ-Analytik zur Überwachung der Energieeffizienz“ untersuchte, ob Ultrafiltrationsanlagen in der Lage sind, Mikroorganismen aus den Installationen zu entfernen, um eine hygienisch unbedenkliche Absenkung der Warmwassertemperaturen zu ermöglichen. Das Projekt wurde im Rahmen des „HWT Energie und Klimaschutz“-Programms (<https://www.eksh.org/projekte/hwt-energie-klimaschutz>) gefördert und im Jahr 2018 abgeschlossen. Aufbauend auf diesen Ergebnissen wurde das Forschungsprojekt „Warmwasserbereitung als Hemmschuh der Energiewende im Gebäudebereich“ gefördert, das potenzielle Hindernisse für den Einbau von Wärmepumpen identifizierte. Auch dieses Projekt wurde über das „HWT Energie und Klimaschutz“-Programm finanziert und endete im Jahr 2022. Im Rahmen dieses Projektes wurde eine Dissertation begonnen. Nach Abschluss des Projekts wurde die Dissertation durch ein Promotionsstipendium weiter unterstützt, das bis Ende 2023 lief.

Durch das Promotionsstipendium konnte die Teilnahme an der Arbeitsgruppe „TriWaExpert“ (<https://triwaexpert.de/>) ermöglicht werden. Zudem wurden zwei Artikel in Fachzeitschriften eingereicht und zwei Konferenzbeiträge veröffentlicht. Besonders die Ergebnisse aus den Kapiteln 2.3, 2.4 und 2.5 wurden während dieser Zeit erzielt. Die Dissertation steht kurz vor der Einreichung, nachdem die Laufzeit des Stipendiums abgelaufen ist.

An dieser Stelle möchte ich mich herzlich bei der EKSH bedanken, die es durch das „HWT Energie und Klimaschutz“-Programm sowie das Promotionsstipendium ermöglicht hat, Forschung zu betreiben und meine persönliche akademische Entwicklung voranzutreiben. Ein besonderer Dank gilt Dr. Thies Rasmus Popp, der von der Erstberatung bis zur Laufzeit des Stipendiums stets für Rückfragen zur Verfügung stand.

Literaturverzeichnis

1. Fraunhofer IBP/IWES (2017) Wärmewende 2030: Schlüsseltechnologien zur Erreichung der mittel- und langfristigen Klimaschutzziele im Gebäudesektor: Studie im Auftrag von Agora Energiewende. https://static.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2016/Sektoruebergreifende_EW/Waermewende-2030_WEB.pdf. Zugriff am 20. Januar 2023
2. D'Agostino D, Mazarella L (2019) What is a nearly zero energy building? Overview, implementation and comparison of definitions. *J Build Eng* 21:200–212. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2018.10.019>
3. Hadengue B, Morgenroth E, Larsen TA (2022) How to get your feet wet: Integrating urban water and building engineering for low-energy domestic hot water systems. *Energy Build* 271:112318. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112318>
4. Pomianowski MZ, Johra H, Marszal-Pomianowska A, Zhang C (2020) Sustainable and energy-efficient domestic hot water systems: A review. *Renew Sustain Energy Rev* 128:109900. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109900>
5. Bøhm B, Schrøder F, Bergsøe NC (2009) Varmt Brugsvand: Måling af forbrug og varmetab fra cirkulationsledninger. In: Varmt brugsvand Måling af forbrug og varmetab fra cirkulationsledninger. https://vbn.aau.dk/ws/portalfiles/portal/17689984/SBi_2009-10.pdf. Zugriff am 12. Juni 2023
6. Bøhm B (2013) Production and distribution of domestic hot water in selected Danish apartment buildings and institutions. Analysis of consumption, energy efficiency and the significance for energy design requirements of buildings. *Energy Convers Manag* 67:152–159. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2012.11.002>
7. Erhorn H, Erhorn-Kluttig H (2014) Selected examples of nearly zero-energy buildings: Detailed report. http://www.rehva.eu/fileadmin/news/CT5_Report_Selected_examples_of_NZEBs-final.pdf. Zugriff am 12. Juni 2023
8. Miara M, Günther D, Langner R, et al (2017) 10 years of heat pumps monitoring in Germany. Outcomes of several monitoring campaigns. From low-energy houses to unretrofitted single-family dwellings. In: Miara M, Günther D, Langner R, et al (eds) 12th IEA Heat Pump Conference 2017. p K.1.5.1. <https://heatpumpingtechnologies.org/publications/>. Zugriff am 12. November 2023
9. DIN 1988-200 (2012) Codes of practice for drinking water installations - Part 200: Installation Type A (closed system) - Planning, components, apparatus, materials; DVGW code of practice
10. DVGW W 551 (2004) Drinking water heating and drinking water piping systems - Technical measures to reduce *Legionella* growth - Design, construction, operation and rehabilitation of drinking water installations
11. Bøhm B, Danig PO (2004) Monitoring the energy consumption in a district heated apartment building in Copenhagen, with specific interest in the thermodynamic performance. *Energy Build* 36:229–236. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2003.11.006>
12. Cholewa T, Siuta-Olcha A, Anasiewicz R (2019) On the possibilities to increase energy efficiency of domestic hot water preparation systems in existing buildings - Long term field research. *J Clean Prod* 217:194–203. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.138>
13. Kim BR, Anderson JE, Mueller SA, et al (2002) Literature review - Efficacy of various disinfectants against *Legionella* in water systems. *Water Res* 36:4433–4444. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(02\)00188-4](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(02)00188-4)
14. Villanueva CM, Cordier S, Font-Ribera L, et al (2015) Overview of disinfection by-products and associated health effects. *Curr Environ Heal Reports* 2:107–115. <https://doi.org/10.1007/s40572-014-0032-x>
15. Abarnou A, Miossec L (1992) Chlorinated waters discharged to the marine environment chemistry and environmental impact. An overview. *Sci Total Environ* 126:173–197. [https://doi.org/10.1016/0048-9697\(92\)90490-J](https://doi.org/10.1016/0048-9697(92)90490-J)
16. Völker S, Kistemann T (2015) Field testing hot water temperature reduction as an energy-saving measure - Does the *Legionella* presence change in a clinic's plumbing

- system? Environ Technol 36:2138–2147.
<https://doi.org/10.1080/09593330.2015.1022231>
17. Cloutman-Green E, Barbosa VL, Jimenez D, et al (2019) Controlling *Legionella pneumophila* in water systems at reduced hot water temperatures with copper and silver ionization. Am J Infect Control 47:761–766.
<https://doi.org/10.1016/j.ajic.2018.12.005>
 18. Rohr U, Senger M, Selenka F, et al (1999) Four years of experience with silver-copper ionization for control of *Legionella* in a German university hospital hot water plumbing system. Clin Infect Dis 29:1507–1511. <https://doi.org/10.1086/313512>
 19. Davey J, Schäfer AI (2009) Ultrafiltration to supply drinking water in international development: A review of opportunities. In: Yanful EK (ed) Appropriate Technologies for Environmental Protection in the Developing World. Springer Netherlands, Dordrecht, pp 151–168
 20. EU Regulation No 852/2004 (2004) Regulation (EC) No 852/2004 of the European Parliament and of the Council of 29 April 2004 on the hygiene of foodstuffs.
<https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CONSLEG:2004R0852:20090420:EN:PDF>. Zugriff am 20. Januar 2023
 21. Weber U (2005) Trinkwasser-Pathogene in öffentlichen Einrichtungen - Untersuchungen zur Wasserdeseinfektion und zur Begründung eines Water Safety Plans. Medizinische Fakultät
 22. Flemming H-C, Percival SL, Walker JT (2002) Contamination potential of biofilms in water distribution systems. Water Supply 2:271–280.
<https://doi.org/10.2166/ws.2002.0032>
 23. Bernhard A (2010) The nitrogen cycle: Processes, players, and human impacts. Nat Educ Knowl 2:12
 24. Opel O, Wiegand M, Neumann K, et al (2018) Corrosion in heating and cooling water circuits - A field study. Energy Procedia 155:359–366.
<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.11.042>
 25. Opel O, Eggerichs T, Otte T, Ruck WKL (2012) Corrosion, scaling and biofouling processes in thermal systems and monitoring using redox potential measurements. In: EUROCORR.
https://www.researchgate.net/publication/233793503_Corrosion_scaling_and_biofouling_processes_in_thermal_systems_and_monitoring_using_redox_potential_measurements. Zugriff am 19. Januar 2024
 26. Rushing JC, McNeill LS, Edwards M (2003) Some effects of aqueous silica on the corrosion of iron. Water Res 37:1080–1090. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(02\)00136-7](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(02)00136-7)
 27. Cullom AC, Martin RL, Song Y, et al (2020) Critical review: Propensity of premise plumbing pipe materials to enhance or diminish growth of *Legionella* and other opportunistic pathogens. Pathogens 9:. <https://doi.org/10.3390/pathogens9110957>
 28. Temmerman R, Vervaeren H, Nosedá B, et al (2006) Necrotrophic growth of *Legionella pneumophila*. Appl Environ Microbiol 72:4323–4328.
<https://doi.org/10.1128/AEM.00070-06>
 29. Boamah DK, Zhou G, Ensminger AW, O'Connor TJ (2017) From many hosts, one accidental pathogen: The diverse protozoan hosts of *Legionella*. Front Cell Infect Microbiol 7:477. <https://doi.org/10.3389/fcimb.2017.00477>
 30. DIN EN 806-5 (2012) Specifications for installations inside buildings conveying water for human consumption - Part 5: Operation and maintenance; German version EN 806-5:2012
 31. VDI 6023 Part 1 (2022) Hygiene in drinking-water supply systems: Requirements for planning, execution, operation and maintenance