



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Schlussbericht 4. Januar 2012

Warmwasserbereitstellung mittels Wärmepumpen in Mehrfamilienhäusern

Auftraggeber:

Bundesamt für Energie BFE
Forschungsprogramm Wärmepumpen, WKK, Kälte
CH-3003 Bern
www.bfe.admin.ch

Kofinanzierung:

EKZ Elektrizitätswerke Kanton Zürich

Auftragnehmer:

NTB Interstaatliche Hochschule für Technik Buchs
Werdenbergstrasse 4
CH-9471 Buchs
www.ntb.ch

Autoren:

Bernhard Vetsch, Hochschule für Technik Buchs, bernhard.vetsch@ntb.ch
Andreas Gschwend, Hochschule für Technik Buchs, andreas.gschwend@ntb.ch
Stefan Bertsch, Hochschule für Technik Buchs, stefan.bertsch@ntb.ch

BFE-Bereichsleiter: Andreas Eckmanns

BFE-Programmleiter: Thomas Kopp

BFE-Vertrags- und Projektnummer: SI/500574-01

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.

Danksagung

Die vielfältigen Beiträge und die Unterstützung der nachfolgenden Herren haben entscheidend zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen. Für die wissenschaftliche Begleitung und Beratung geht ein besonderer Dank an die Herren Prof. Dr. T. Kopp (Programmleiter BFE), Prof. Dr. M. Ehrbar (Enertec AG), Peter Hubacher (Hubacher Engineering) und Marco Nani (Hoval Herzog AG).

Des Weiteren danken die Autoren den Mitarbeitern der EKZ für die Bereitstellung der Anlagen zur Feldmessung und der aktiven Unterstützung bei der Datenerhebung. Namentlich sind dies die Herren Beat Hinder, Stefan Schneider, Christoph Wehrli, Beat Scheidegger und Hanspeter Thöni.

Die FEKA – Energiesysteme AG stellte eine ihrer Anlage für die Feldmessung zur Verfügung. Die Autoren danken Herrn Daniel Kalberer herzlich für Hilfe bei der Datenerfassung und die technische Beratung.

Für die detaillierten Informationen zum Messobjekt 1 und für die fachliche Unterstützung bei Sanitärfragen danken die Autoren Herrn Ibrahim Salihi von der Schenk Bruhin AG.

Schliesslich ist für die gewinnbringende Teilnahme an den Workshops den folgenden Herren einen besonderen Dank auszusprechen.

- Andres Weber (Amstein+Walthert)
- Beat Hinder (EKZ)
- Christoph Gmür (AWEL Zürich)
- David Weber (Pamatech Systems AG)
- Felix Kalberer (kapa)
- Jürg Nipkow (ARENA, S.A.F.E)
- Marco Uberto (Suissetec)
- Stephan A. Mathez (Solar Campus GmbH)

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	6
1 Einleitung	8
1.1 Ausgangslage und Auftrag	8
1.2 Vorgangsweise	9
1.3 Projektziel	9
1.4 Aufbau des Berichts	10
2 Die Warmhaltung	10
3 Definition	11
4 Probleme der Zirkulation (mit dem Energieerzeuger Wärmepumpe)	12
5 Normen bezüglich der Installation für Trinkwassererwärmungsanlagen	13
6 Aktueller Stand	15
6.1 BWW-Anlagen	15
7 Systemgrenzen	20
8 Feldmessung	21
8.1 Diskrepanz zwischen Wirkverlust, Blindverlust und Scheinverlust	21
8.2 Messinstallation	25
8.3 Messobjekt 1	25
8.4 Messobjekt 2	28
8.5 Messobjekt 3	29
8.6 Vergleich der Messobjekte	36
9 Modellbildung	38
9.1 Leitungsnetz	38
9.2 Programmablauf	40
10 Verifikation des Simulationsmodells	42
11 Virtuelle Überbauungen	43
11.1 Topologie	43
12 Simulationssysteme und Resultate	46
12.1 Zirkulation	47
12.2 Heizband	53
12.3 Verlustdeckung mit Zirkulationswärmepumpe	57
12.4 Ladung via Nahwärmenetz	62
13 Bewertung und Interpretation	70
13.1 Energieeffizienz	70
13.2 Investitionskosten	74
13.3 Installationskosten	79
13.4 Legionellenprävention	80
13.5 Kalkausscheidung	80
13.6 Wartungskosten	81
13.7 Komfort	81
13.8 Raumbedarf	82
13.9 Zuverlässigkeit	83
13.10 Planbarkeit	83
13.11 Abrechnung	83

13.12	Bewertungsmatrix	84
14	Fehleranfälligkeit der Installation / Optimierungspotentiale	85
14.1	Leitungslänge	85
14.2	Heizungspufferspeicher in kombinierten Anlagen	85
14.3	Speicher- und Wärmepumpengrösse	86
14.4	Zapfung/Zirkulation-Verhältnis	88
14.5	Optimierungen bei der Berechnung des Zirkulationsvolumenstroms	90
14.6	Kontrolle der Dämmqualität	92
14.7	CO ₂ Wärmepumpe	92
15	Dezentrale oder zentrale Versorgung?	93
16	Schlussfolgerungen/Zusammenfassung	94
A	Simulationsmodelle	103
A.1	Stoffwerte	103
A.2	Steigleitungsmodell	103
A.3	Verteilleitungsmodell	107
A.4	Hauptleitungsmodell	109
B	Speichermodell	111
B.1	Validierung und Tests	117
C	Reglerstruktur	119
D	Wärmepumpenmodell	121
E	Zirkulationspumpe	125
F	Heizband	125
G	Modulierende Zirkulationswärmepumpe	126
H	Zirkulationswärmepumpe mit Pufferspeicher	126
I	Dezentrale Speicherladung durch Zentralheizung	127
I.1	Wärmeverteilnetz	127
I.2	Raumheizung	127
I.3	Speicher mit innenliegendem Wärmetauscher	128
I.4	Heizkurven	131
J	Vorgabeparameter	132
J.1	Belastungswert (BW) der virtuellen Wohnung	132
J.2	Zirkulationsvolumenstrom	134
J.3	Dämmung	135
K	Verteilsysteme	137
K.1	Topologie H2W4	137
K.2	Topologie H4W12	138
K.3	Topologie H8W24	139
L	Simulationsergebnisse (detailliert)	141
L.1	Zirkulation (kontinuierlich)	141
L.2	Begleitheizung	144
L.3	modulierende Zirkulationswärmepumpe	146
L.4	Zirkulationswärmepumpe mit Pufferspeicher	149
L.5	Ladung via Nahwärmenetz	152
M	Kalkulationsgrundlagen	156

Zusammenfassung

Dieses Projekt untersucht die Auswirkungen verschiedener Verteil- und Warmhaltesysteme für Brauchwarmwasser (BWW) in Mehrfamilienhaus-Überbauungen auf die Arbeitszahl und Wirtschaftlichkeit von BWW-Wärmepumpen. Dazu werden ausgewählte Systeme mit einem physikalischen Modell nachgebildet. Im Fokus stehen dabei die Zirkulation, die Warmhaltung mit Begleitheizung und die Erwärmung von BWW-Speichern über das Nahwärmenetz. Simultan installierte Feldmessungen liefern eine Datenbasis, welche zur Validation des Simulationsmodells und zum besseren Verständnis der im Feld verbreiteten Anlagen dient. Für die Modellbildung werden drei virtuelle Überbauungen definiert, welche von zentral oder dezentral aufgestellten Anlagen mit BWW versorgt werden. Mit der Simulation konnten die Einflüsse von Dämmqualität, Leitungslängen, Versorgungsstrategien und die Unterschiede zwischen den Bereitstellungsanlagen unter identischen Bedingungen ermittelt werden.

Die Warmhaltung mit einem Zirkulationskreislauf in der Parallelrohranordnung schneidet energetisch ca. 5 % besser ab, als eine Warmhaltung mit direkt-elektrischer Begleitheizung. Grund des geringen Unterschieds ist die ungestörte Speicherschichtung, die im Falle der Begleitheizung eine höhere Leistungszahl der BWW-Wärmepumpe ermöglicht. Zudem ist das Leitungsnetz kleiner, was zu geringeren Energieverlusten an die Umgebung führt. Diese zwei Gründe machen das Heizband trotz dem direkt-elektrischen Energieverbrauch konkurrenzfähig. Der Vorteil der ungestörten Speicherschichtung kann mit dem Betrieb einer Zirkulationswärmepumpe auch auf ein Zirkulationssystem übertragen werden. Der Zirkulationsrücklauf wird hierbei ausserhalb des Speichers aufgewärmt und der Vorlaufleitung direkt zugeführt, was die Arbeitszahl der Anlage um weitere 4 % verbessert. Generell erreicht man günstigere Anlagenarbeitszahlen bei zunehmender Überbauungsgrösse, sofern das gesamte Objekt und dessen Einzelgebäude eine verdichtete Architektur aufweisen. Anlagen, welche dezentrale Speicher via Nahwärmenetz mit der Heizungs-wärmepumpe laden, verbrauchen im Normalfall über das Doppelte an elektrischer Energie im Vergleich zu dezidierten BWW-Systemen. Eine in jeder Hinsicht optimierte Betriebsvariante vermag diesen Mehrverbrauch auf ca. 40% zu reduzieren, jedoch ist dies mit einer massiven Mehrinvestition in die Anlage verbunden. Wärmepumpensysteme mit indirekten Brauchwarmwasserladungen sind in der Praxis bei grösseren Überbauungen im Vergleich zur direkten Warmwasserladung energetisch und wirtschaftlich uninteressant. Aus energetischer Sicht sind Warmwasser-Zirkulationssysteme in Kombination mit dezidierten Zirkulationswärmepumpen am interessantesten. Jedoch hat auch die Begleitheizung im Zusammenhang mit BWW-Wärmepumpen ihre Berechtigung, da der Strombedarf nur um knapp 5-10% höher liegt und die Fehleranfälligkeit der Gesamtinstallation geringer ist.

Abstract

In this project the influence of heat tracing and heat distribution systems on domestic hot water (dhw) supply systems in multiple-family dwellings using heat pumps is investigated. Especially the impact on the overall efficiency and cost-effectiveness of the installations is in the center of the study. Therefore a physics based model for several dhw-supply systems was built and applied to three virtual building complexes sized from 8 to 192 apartments. The analyzed systems feature either a recirculation loop or some kind of heat tracing. In order to validate the model and to get an overview of currently installed systems, field measurements on three different objects were conducted. The simulation leads to the determination of the impact of pipe length, insulation quality, supply strategies and the ideal kind of dhw-supply system based on identical conditions.

It can be shown, that systems with recirculation loop achieve a 5% higher overall efficiency compared to systems with electric trace heating. Since the fluid layers in the dhw-storage tank are not mixed when using a heat tracing system, the dhw-heat pump operates with a higher COP compared to recirculation loop systems. Additionally, the smaller heat distribution network leads to lower heat losses. For these two reasons the electric trace heating is competitive with recirculation loops. The benefit of unmixed water layers can be achieved in recirculation loop systems by adding a dedicated recirculation-heat-pump to the system. This heat pump externally reheats the return flow of the recirculation loop in order to provide it directly to the hot water supply pipe. This measure improves the overall efficiency by up to 4%. In general a better overall efficiency is reached in large building agglomerations with high population density. Installations using a central heat pump to increase the temperature of the overall heating system which in turn is used to load decentral dhw-storage tanks are on average consuming at least twice the amount of electrical energy compared to the other investigated systems. These combined systems exceed the electricity demand by more than 40% compared to separated heating and dhw-systems even when optimized installations and operation modes are used. Additionally investment costs are significantly increased with the suggested optimization. Heat pump systems for combined domestic hot water heating using decentral storage tanks charged by the heating system are neither economic nor energetically interesting. The optimum system for dhw-supply is a hot water storage tank with recirculation loop closely followed by heat tracing systems, which are easier to install correctly.

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage und Auftrag

In dieser Studie sollen die Wärmeverluste, welche bei der Warmhaltung von Brauchwarmwasser auftreten, untersucht werden. Im Fokus der Untersuchung steht die Zirkulation. Diese wird vornehmlich in Mehrfamilien-Überbauungen, Hotels und Spitälern eingesetzt, um die geforderte Mindesttemperatur an der Zapfstelle (meist 50°C) und im Speicher (mindestens 60°C) garantieren zu können. Diese Mindesttemperaturen werden für einen wirkungsvollen Legionellenschutz benötigt.

Besonders bei Brauchwarmwasser-Erwärmungsanlagen auf der Basis von Wärmepumpen (WP) mit geschichteten Speichern entstehen signifikante Effizienzeinbussen, wenn die Speicher durch die Brauchwarmwasser-Zirkulation durchmischt werden. Aber auch andere Heizkonzepte, wie kondensierenden Heizkessel oder solarthermische Anlagen, reagieren empfindlich auf die Durchmischung. Um diese Vermischung des Speichers zu verhindern, werden alternativ auch Begleitheizungen mit elektrischem Heizband eingesetzt, welche jedoch ebenfalls zu einem erhöhten Strombedarf führen.

Ziel dieser Studie ist die Untersuchung der Zirkulationsverluste und die Beurteilung alternativer Konzepte zur Kompensation dieser Wärmeverluste. Mögliche Varianten sind zum Beispiel die Verwendung mehrerer Speicher oder der Einsatz einer kleinen Wärmepumpe zur Deckung der Zirkulationsverluste. In dieser Studie sollen verschiedene Varianten zusammengestellt und mittels Felderfahrung und Simulation auf Machbarkeit und Kosten untersucht werden.

Die Elektrizitätswerke des Kantons Zürich (EKZ) besitzen ca. 300 Wärmepumpenanlagen mit Online-Monitoring. Von diesen Anlagen konnten einige zur Beurteilung verschiedener Konzepte verwendet werden. Des Weiteren konnten quantitative Aussagen über die Verluste im Feld gemacht werden.

Es gibt einige wenige Projekte, die sich bereits mit der Brauchwarmwasser-Zirkulation auseinandergesetzt haben. *Kremer und Waider (2001)* schlagen verschiedene Bauarten von Trinkwassererwärmungsanlagen vor. Der Fokus liegt dabei allerdings nicht auf Wärmepumpen. *Sitzmann (2004)* beschäftigte sich mit der Einbindung von solarthermischen Brauchwarmwasseranlagen in Mehrfamilienhäusern. Auch hier wurde das Thema der Zirkulationsverluste am Rande behandelt. Das Grundproblem der Zirkulation und die hohen Wärmeverluste werden in den Berichten von *Hubacher und Ehrbar (2008)* und *Hubacher et al. (2009)* thematisiert. Es zeigt sich, dass die Verluste in der Wärmeverteilung eklatant hoch sind. Ein dringender Handlungsbedarf wird bescheinigt.

Nipkow und Real (2000) beschäftigen sich mit Energieverlusten von Warmwasserverteilsystemen und zeigen Sparpotentiale in der Wärmeverteilung auf. Das Projekt beschäftigt sich jedoch nicht im speziellen mit Wärmepumpen, die bei durchmischten Speichern stärkere Effizienzeinbussen erfahren als vergleichbare Heizsysteme. Das Projekt weist auch darauf hin, dass weitere Untersuchungen im Feld notwendig sind, um Verbesserungsvorschläge für die Praxis abzuleiten. Für dieses Projekt sind auch Untersuchungen an Speichern interessant, da hier in den Augen der Autoren ein grosses Potential liegt. In Bezug auf verschiedene Speicher finden sich mehrere Publikationen unter anderem von *Feisst und Hüppi (1980)* und *Bär (2009)*.

1.2 Vorgangsweise

Nach der Einarbeitung in themenverwandte Arbeiten und Literatur folgte die Planung der Feldmessungen. Ziel war es mit möglichst einfachen Mitteln einen grossen Umfang an Daten zu gewinnen zwecks Beurteilung der Anlagen im Feld und der späteren Verifikation eines Simulationsmodells. Es war daher naheliegend, vorwiegend Vertragsobjekte der EKZ zu untersuchen, da diese durch das Online-Monitoring bereits viele Datenpunkte liefern. Von drei gemessenen Anlagen stammen zwei aus dem Besitz der EKZ. Meist wurden die Objekte vor Ort begutachtet, bevor individuell das erforderliche Messequipment installiert wurde, das für die Erfassung der Zirkulationsverluste notwendig war. Die Messung der Objekte erfolgte zeitlich aufeinanderfolgend über die gesamte Projektdauer.

Auch die Planung von Workshops geschah in einer frühen Projektphase mit dem Ziel von Wissen und Erfahrungen von Fachleuten zu profitieren und in das Projekt einfließen zu lassen.

Durch die eigenen Recherchen und dem Wissenstransfer aus dem Workshop gelangte man zur Entscheidung, fünf Formen der Warmwasserbereitstellung und Warmhaltung mit physikalischen Modellen nachzubilden. Der Energiehaushalt der Systeme konnte durch die Verknüpfung der Modelle simuliert werden. Zur Verifikation modellierte man die Eigenschaften eines Messobjekts und initiierte die Simulation mit dem gemessenen Zapfprofil des entsprechenden Objekts. Das Ergebnis der Simulation wurde mit den Resultaten der Feldmessung verglichen. Auf diese Weise konnte der Code optimiert werden, bis die gewünschte Übereinstimmung mit der Realität erreicht war. Danach definierte man Mehrfamilienhaus-Überbauungen mit diversen räumlichen Ausdehnungen und verschiedener Ausführungsqualität der Leitungsisolation. Jeder Wohnung (Whg) in der Überbauung wurde ein Zapfprofil zugeordnet, das mit einer Software, welches auf statistischen Daten basiert, erzeugt wurde. Durch die Mischung all dieser Zapfprofile ergab sich ein realistisches Zapfprofil mit realistischen Spitzen der Wasserbezüge.

Die Simulation eines einwöchigen Betriebs der Anlagen lieferte umfassende Daten über die Temperaturverläufe in den Verteilleitungen und im Speicher sowie die Energien, welche dem System zugeführt und entzogen werden. Die Nachbildung der Wärmepumpe liefert den elektrischen Energiebezug. Daraus war die Arbeitszahl der Anlage berechenbar, indem man die thermische Energie des gezapften BWW mit der elektrischen Energieaufnahme der Anlage dividierte. Diese Arbeitszahl stellt die Basis für energetische Vergleiche der Systeme dar. Weitere Faktoren wie Wirtschaftlichkeit, Legionellenprävention, Planbarkeit, Komfort usw. wurden individuell für die Systeme bewertet.

1.3 Projektziel

Das Ziel dieses Projekts ist es, einige Arten der BWW-Bereitstellung unter identischen Bedingungen betreffend Zapfung, Temperaturniveau der Umgebung, eingesetzte Wärmepumpe und Dämmung zu vergleichen. Nur auf diese Weise ist eine objektive energetische Bewertung der Anlage möglich. Neben der Systemeffizienz sollen auch die wirtschaftlichen Aspekte und weitere Kriterien auf einer gemeinsamen Basis bewertet werden. Die relativen Unterschiede zwischen den Systemen sollen dafür genutzt werden, schlechte Bereitstellungsformen zu identifizieren und Verbesserungspotentiale aufzuzeigen.

1.4 Aufbau des Berichts

Der vorliegende Bericht ist in zwei Teile gegliedert. Der Hauptteil beschreibt das Projekt bezüglich Feldmessung, Simulation, Validierung, Analyse der Systeme und die daraus gezogenen Schlussfolgerungen, während der theoretische Hintergrund in Form von Berechnungen und Tabellen in einem ausführlichen Anhang hinterlegt ist. Die Auslagerung der Theorie in den Anhang steigert die Lesbarkeit des Berichts.

2 Die Warmhaltung

Die Zapfstelle für Warmwasser befindet sich immer in einer räumlichen Entfernung zum Warmwasserspeicher. Wenn also längere Zeit keine Zapfung stattfindet, kühlt der stagnierende Leitungsinhalt aus. Bei späterem Bezug muss erst der Ausstoss des kalten Zapfens abgewartet werden bis warmes Wasser aus dem Speicher nachfliessen kann. Nach der heutigen SIA 385/1 (2011) darf diese Wartezeit maximal 15 s betragen. Bei grösseren Überbauungen mit mehreren Wohnungen hatte sich daher der Einbau von direkt-elektrischen Boilern in jeder Wohnung bewährt. Das Warmwasser befindet sich dann bereits in der Wohnung des Bezügers und muss nur über eine kurze Strecke zur Entnahmestelle verteilt werden. Die moderne Architektur sieht jedoch in den Wohnungen keinen Platz mehr für Warmwasserboiler vor. Zudem ist die BWW-Erzeugung mit elektrischer Direktheizung laut MuKE n (2008) verboten. Diese Umstände drängten die Brauchwarmwasserversorgung ins Untergeschoss der Grossobjekte. Im Keller wird nun das Brauchwarmwasser für alle Parteien der Überbauung zur Verfügung gestellt. Da in diesem Fall die Leitungslängen der Warmwasserverteilung gross sind, verlängert sich die Wartezeit, bis das Brauchwarmwasser in der verlangten Temperatur den Hahn erreicht. Es gibt gegenwärtig zwei weit verbreitete Systeme, die dieses Problem lösen (Abbildung 1).

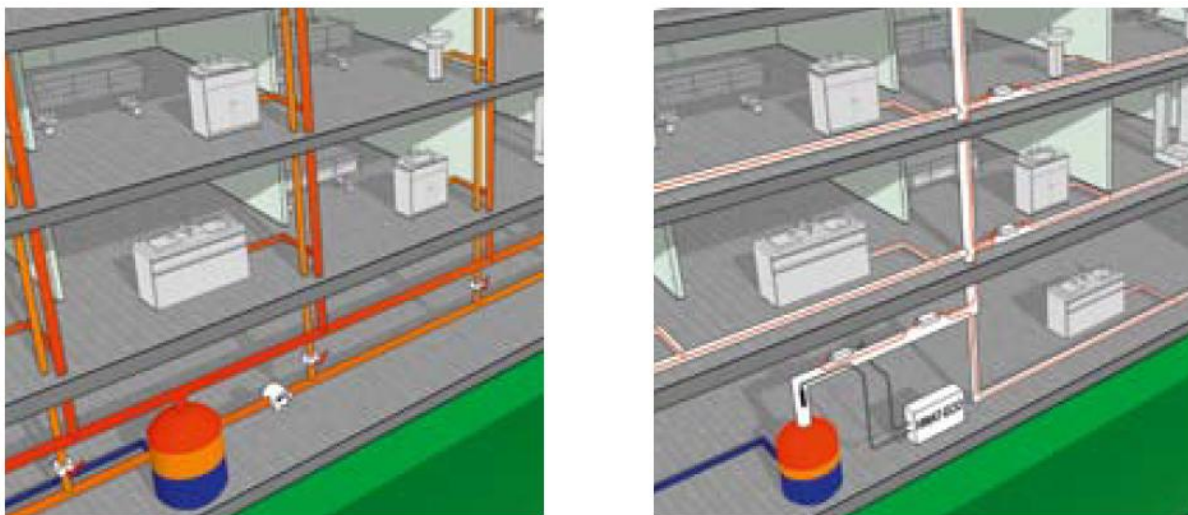


Abbildung 1: Zirkulation (links) und Begleitheizung mit Heizband (rechts) *Tyco Thermal Controls (2008)*

Begleitheizung

Die Verteilungen des Brauchwarmwassers werden mit einer elektrischen Heizung auf einer bestimmten Temperatur gehalten. Das Wasser kann sich somit in den Leitungen nicht abkühlen. Als Begleitheizung wird oft ein selbstregulierendes elektrisches Heizband eingesetzt.

Zirkulation

Das Brauchwarmwasser zirkuliert kontinuierlich in den Verteilungen der Überbauung. In einer Rücklaufleitung wird das abgekühlte Wasser wieder dem Speicher zugeführt. Dem Benutzer steht mit diesem System relativ schnell Warmwasser zur Verfügung. Verschiedene Ausführungen der Zirkulation sind möglich.

- Zirkulation (ohne externe Verlustdeckung)
 - Parallelrohr (PR)
 - Rohr-an-Rohr (RaR)
 - Rohr-in-Rohr (RiR)

Das RiR-System ist in der Schweiz im Gegensatz zu Deutschland eher wenig verbreitet. Es wird bevorzugt in senkrechten Steigleitungen montiert. Aus Gründen der Verschmutzungsgefahr beim Einziehen des innenliegenden Rohrs, dem erhöhten Druckverlust und dem Versatz in den Steigleitungen (oftmals zwischen Ober- und Attikageschoss) besteht in der Schweiz eine geringe Nachfrage nach dem RiR-System. (gemäss Auskunft Geberit)

- Zirkulation mit externer Verlustdeckung
 - Durch elektrisches Heizregister
 - Durch Gasheizgerät
 - Durch Wärmepumpe
 - etc.

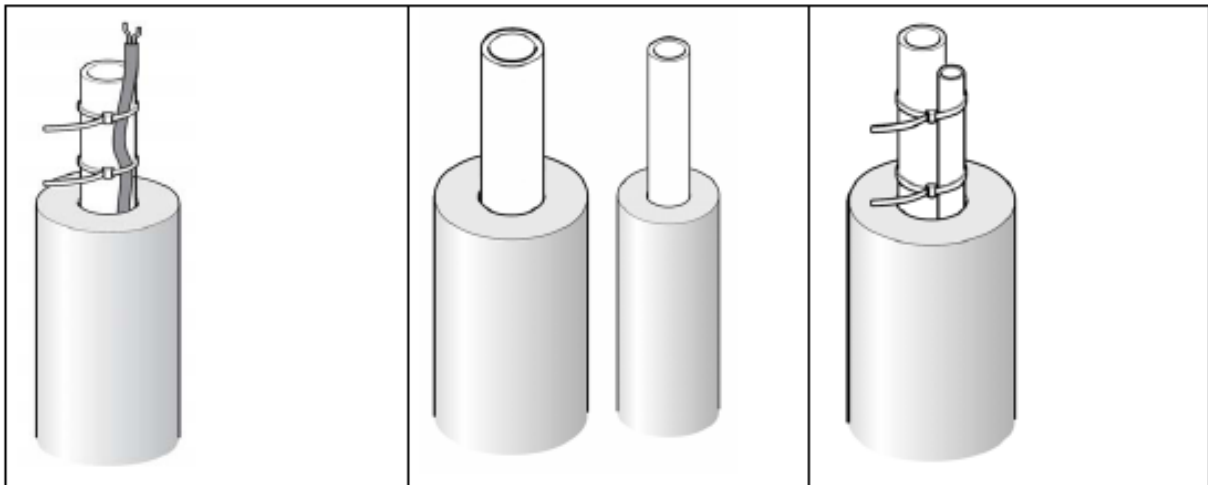


Abbildung 2: Installationsarten: Heizband, Parallelrohr, Rohr-an-Rohr Tschui und Stadelmann (2006)

Obwohl alle Systeme einen nicht unerheblichen Energieverlust zur Folge haben, müssen sie aus Komfortgründen betrieben werden. Mit dem Trend zur Minergie-Zertifizierung kamen die direkt-elektrischen Heizbänder aufgrund des einfach messbaren Energieverbrauchs mehr und mehr in Verruf und es wird nun häufiger das Zirkulationssystem gewählt. Gleichzeitig setzt sich die Wärmepumpe als Energieerzeuger für Brauchwarmwasser durch und es kommt dahingehend zwangsläufig zur Kombination von Wärmepumpe und Zirkulationssystem.

3 Definition

In einer Überbauung kann die Brauchwarmwasserversorgung auf viele Arten ausgeführt werden. Die Platzierung der einzelnen Anlagenkomponente ist daher ebenso unterschied-

lich. Für eine klare Struktur im Bericht, werden die Begriffe „zentral“, „dezentral“ und „lokal“ verwendet. Diese Begriffe bezeichnen die Aufstellung der Komponente, wie dies am Beispiel von Speichern in den folgenden Abbildungen 3 bis 5 dargestellt ist.

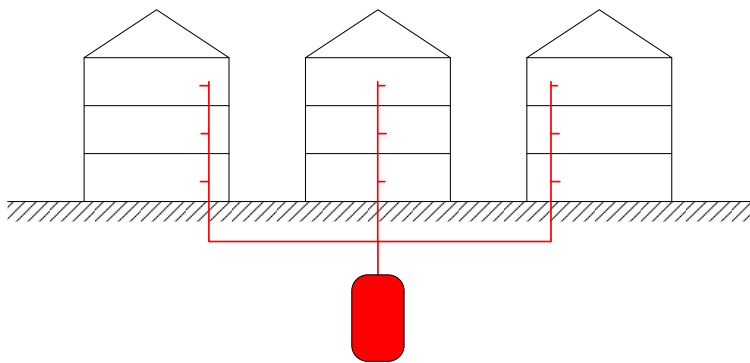


Abbildung 3: zentraler BWW-Speicher

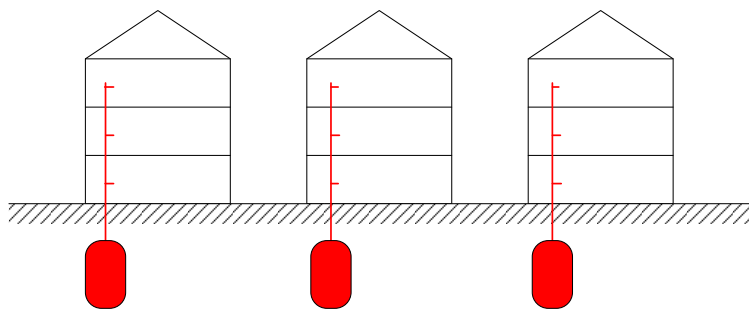


Abbildung 4: dezentrale Speicher

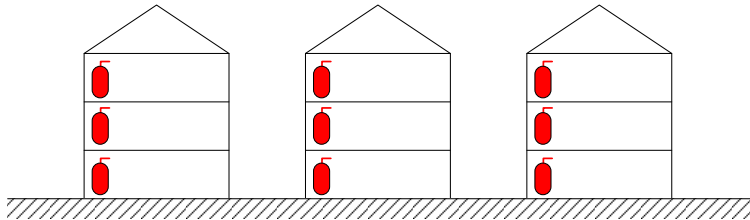


Abbildung 5: lokale Speicher

Selbstverständlich sind auch Anlagen denkbar, in denen die BWW-Wärmepumpe zentral aufgestellt ist und beispielsweise dezentrale Speicher versorgt.

4 Probleme der Zirkulation (mit dem Energieerzeuger Wärmepumpe)

Generell schafft man mit einem Zirkulationssystem zusätzliche Wärmeverluste bedingt durch die Verdoppelung der Leitungslängen (Rücklauf in den Speicher) und die ständige Durchströmung mit Brauchwarmwasser. Zusätzlich wälzt eine Pumpe den Zirkulationskreislauf um, was einen direkten elektrischen Energiebezug bedeutet.

Darüber hinaus reagiert eine Brauchwarmwasseranlage mit einer Wärmepumpe als Energieerzeuger besonders empfindlich auf die Zirkulation. Dies ist mit drei Punkten zu begründen. Zum einen hat der Zirkulationsrücklauf starken Einfluss auf die Schichtung des Brauchwarmwasserspeichers. Ist die Schichtung gestört, so vermindert sich die Leistungszahl der Wärmepumpe durch die erhöhte Rücklauftemperatur in den Kondensator. Ausserdem sinken als Folge der Durchmischung die Temperaturen im Speicher schnell ab – was häufigere Nachladungen verursacht. Zum dritten muss die Brauchwarmwasser-

temperatur dem „ungünstigsten“ Bezüger angepasst werden. Die Faustregel aus *Hubacher et al. (2009)* attestiert eine Verringerung der Jahresarbeitszahl (JAZ) um bis zu 2.5 % pro Kelvin Temperaturerhöhung.

5 Normen bezüglich der Installation für Trinkwassererwärmungsanlagen

Von verschiedenen Institutionen sind Merkblätter, Richtlinien und Normen erhältlich. In erster Linie sind jedoch die SIA-Normen zu beachten, welche sich teilweise auf Merkblätter des *BAG (2009)* und *SVGW (1991)* beziehen. Mit den Sanitärechnungen „kurz und bündig“ stellt *Suissetec (2003)* einen Leitfaden zur Verfügung, nach welchem viele Sanitärplaner ihre Anlagen auslegen.

Bis zum 31.03.2011 war die *SIA-Norm 385/3 (1991)* bei der Planung von Warmwasser- versorgungen von Gebäuden zu berücksichtigen. Darauf stützten sich bislang auch die Sanitärechnungen „kurz und bündig“. Mit der Überarbeitung der SIA 385/3, welche im selben Zug zur SIA-Norm 385/1 umbenannt wurde, findet auch eine Anpassung von „kurz und bündig“ statt. Die Norm SIA 385/1 trat am 01.04.2011 in Kraft.

Die Neuerungen und Änderungen betreffen insbesondere:

- Ausstosszeit
- Zirkulation
- Wärmedämmung (gestützt auf *MuKE n (2008)*)
- Warmhaltung
- Wassererwärmung mit Wärmepumpen
- Solare Wassererwärmungsanlagen

Tabelle 1 zeigt einige Unterschiede zwischen der bisherigen SIA-Norm 385/3 und der neuen SIA-Norm 385/1. In Bezug auf Energieeffizienz ist besonders hervorzuheben, dass für die Zirkulationsspreizung seitens der SIA 385/1 keine Empfehlung mehr vorliegt im Gegensatz zur Vorgabe von maximal 4 K in der alten Norm. Die limitierende Aussage findet sich beim *BAG (2009)*, wo es heisst, dass die Temperatur im Zirkulationsrücklauf nicht unter 50°C sinken sollte (siehe Tabelle 2). Ist jedoch eine tägliche thermische Desinfektion von Speicher und Verteilnetz vorgesehen, relativiert sich auch diese Anforderung; grössere Spreizungen sind möglich sofern der Komfort eingehalten werden kann.

Tabelle 1: Vergleich von SIA 385/3 und SIA 385/1

	SIA-Norm 385/3 (1991)	SIA-Norm 385/1 (2011)
Temperaturen im System	<p>Warmwassertemperatur an der Entnahmestelle:</p> <ul style="list-style-type: none"> - ausschliesslich zur Körperreinigung: 40...50°C - Haushaltszweck mit Geschirrspüler: 50...55°C - Haushaltszweck ohne Geschirrspüler 55...60°C 	<p>Die Warmwasserversorgung ist so ausgelegt, dass sie Temperaturen von</p> <ul style="list-style-type: none"> ≥60°C im Speicher ≥55°C in warmgehaltenen Verteilungen ≥50°C an den Entnahmestellen (gilt nicht für Durchflusserwärmer) <p>erreichen kann.</p> <p>Die maximale Kaltwassertemperatur ist 25°C, das Ziel sind 20°C</p>
Zirkulationsunterbrechung	nur sinnvoll ab einem Unterbruch von $t \geq 5$ h	nicht empfohlen
Strömungsgeschwindigkeit Zirkulationsleitung	0.5...1.5 m/s	Verweis auf SVGW-Merkblatt
Empfehlung bez. Spreizung Zirkulationsleitung	<p>1..2 K bei Anlagen mittlerer Ausdehnung</p> <p>3...4 K bei Anlagen grösserer Ausdehnung</p>	keine
Thermische Desinfektion	<p>Verweis auf BAG:</p> <p>Nutzvolumen des Speichers 1x täglich während 1 h auf 60°C erwärmen.</p>	<p>Wenn Trinkwasser länger als 24 h Stunden bei einer Temperatur von 25°C bis 50°C ungenutzt bleibt, muss es während 1 h auf 60°C erwärmt werden.</p>

Tabelle 2: Vergleich weiterer Normen und Merkblätter

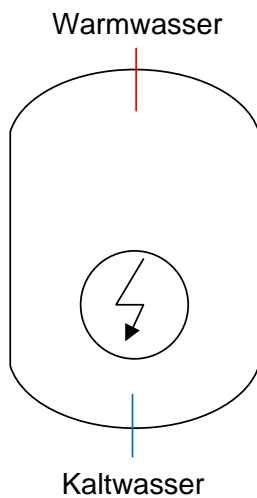
	SVGW (2001)	BAG (2009)	DVGW (2004)
Temperaturen im System	<p>≥60°C im Speicher</p> <p>≥50°C an den Entnahmestellen</p> <p>Kaltwasser ≤20°C</p>	<p>mit zentralem Wassererwärmer (mittleres Risiko):</p> <p>≥55°C in warmgehaltenen Verteilungen (ohne Anschlussleitungen)</p> <p>≥50°C an den Entnahmestellen (nach 2 min)</p> <p>ohne zentralen Wassererwärmer:</p> <p>Verteilungen auf 55°C ausgerichtet</p> <p>≥50°C in warmgehaltenen Verteilungen</p> <p>≥50°C an den Entnahmestellen (nach 2 min)</p> <p>Zirkulationsrücklauf nicht unter 50°C</p> <p>Kaltwasser ≤ 20°C</p>	<p>≥60°C am Austritt des Trinkwassererwärmers</p> <p>min. 55°C an jeder Stelle im Netz</p>
Zirkulationsunterbrechung	keine	-	t ≤ 8 h
Empfehlung bez. Spreizung Zirkulationsleitung	keine	Anfang bis Ende des Zirkulationsrücklaufs: 5 K	max. 5 K
Strömungsgeschwindigkeit Zirkulationsleitung	0.5...1.5 m/s	-	0.2...0.5 m/s
Thermische Desinfektion	Nutzvolumen des Speichers 1x täglich während 1 h auf 60°C erwärmen	Nutzvolumen des Speichers 1x täglich während 1 h auf 60°C erwärmen	Erwärmung des gesamten Systems auf über 70°C (3 min) bei geöffnetem Auslass.

6 Aktueller Stand

6.1 BWW-Anlagen

Die Literaturrecherche fand im Internet, in der Publikationsdatenbank des BFE sowie mit Hilfe von Heizungs- und Sanitärfachzeitschriften statt. Zusätzlich wurden zwei Workshops mit anerkannten Fachleuten und Planern durchgeführt. Unter den Gästen befanden sich unter anderem Mitglieder der SIA 385/1-Normkommission sowie erfahrene Vertreter aus der Industrie und öffentlichen Ämtern. Diesen Workshops wohnten auch die Vertreter der Begleitgruppe bei. Mittels einer Präsentation stellte das Institut für Energiesysteme (IES) das Projekt, dessen Ausgangslage und Ziel vor, worauf Diskussionen zu verschiedenen Themen, wie Normen, installierte Anlagen, Probleme im Feld, Trends für die Zukunft usw. folgten. Die Aussagen und Ideen aus Workshops und Literatur wurden schliesslich verdichtet, so dass im Folgenden ein paar typische, gegenwärtig installierte Anlagen beschrieben werden können. Ein wichtiger Punkt dieser Diskussionen waren auch die Anforderungen an Umsetzbarkeit und Praxistauglichkeit verschiedener Anordnungen.

6.1.1 Lokale Versorgung mittels Elektroboiler



Solche Installationen (Abbildung 6) findet man vor allem in älteren Gebäuden. Jede Wohnung ist mit einem eigenen Elektroboiler ausgerüstet. Die Ausstosszeit ist dementsprechend kurz und die Abrechnung des Warmwasserverbrauchs ebenso einfach. Auch Temperaturen über 60°C können einfach erreicht werden. Laut der Mustervorschrift der Kantone *MuKE*n (2008) ist diese Art der BWW-Erzeugung seit 2009 mit wenigen Ausnahmen nicht mehr erlaubt. Wenn eine Vorheizung des BWW mit dem Heizungssystem erfolgt, kann dieses System aber auch heute noch eingesetzt werden, was vor allem im Sanierungsfall interessant sein könnte.

Abbildung 6: lokaler Elektroboiler

6.1.2 Zentrale Versorgung durch Speicher mit Zirkulation

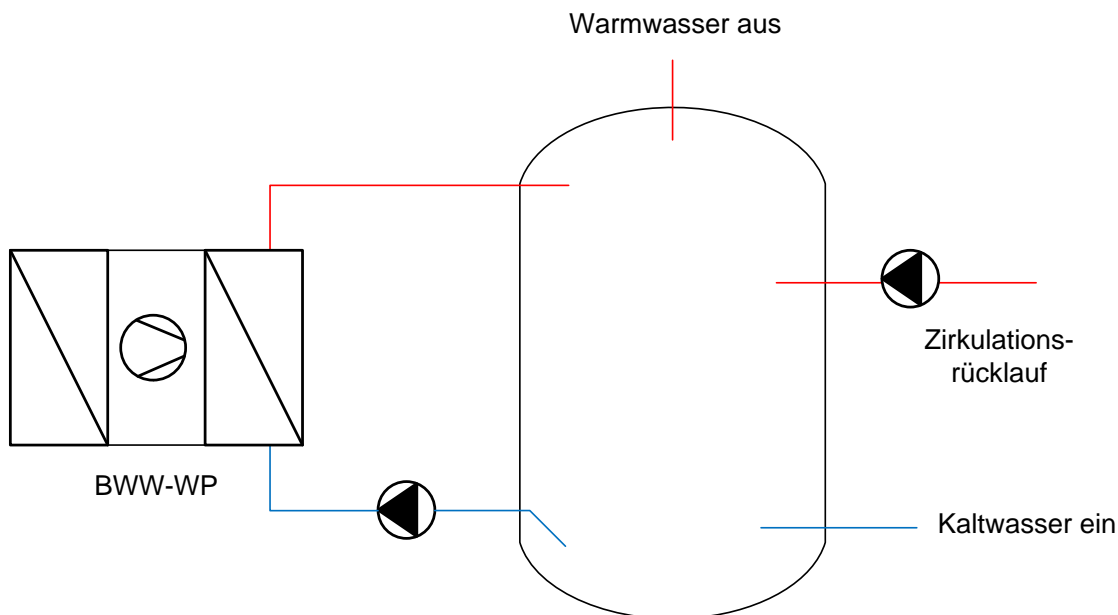


Abbildung 7: Speicher mit Zirkulation

Diese Anlagenart (siehe Abbildung 7) entspricht dem Messobjekt 1 (siehe Kapitel 8.3). An einem Punkt der Überbauung sind eine oder mehrere BWW-Wärmepumpen mit BWW-Speicher untergebracht. Das Brauchwarmwasser zirkuliert von diesem Punkt aus hydraulisch parallel durch alle Gebäude. Die Zirkulationsleitung kann als RaR- oder Parallelrohr-System ausgeführt sein. Der Einsatz von RiR-Systemen ist in der Schweiz eher selten. Die Zirkulationsverluste können auf verschiedene Arten kompensiert werden. Eine häufig eingesetzte Variante ist die Rückführung der Zirkulationsleitung in der oberen Hälfte des Warmwasser-Speichers. Dadurch kommt es zu einer gewissen Störung der Speicherschichtung. Diese Störung der Speicherschichtung kann wiederum dazu führen, dass der Wärmeerzeuger häufiger einschalten muss, um den Speicher zur Einhaltung der geforderten Mindesttemperatur nachzuladen. Bei der Speicherladung mit einer Wärmepumpe kommt erschwerend hinzu, dass die Effizienz der Wärmepumpe beim Nachladen

durch das hohe Temperaturniveau des Rücklaufs stark reduziert ist. Auch bei den Feldmessungen konnte diese Tatsache beobachtet und dargestellt werden (siehe Kapitel 12.1) Zu den Vorteilen gehören die Einfachheit der Installation sowie die Verwendung der Wärmepumpe zur Deckung des gesamten Wärmebedarfs für die BWW-Erzeugung und –Bereitstellung desselben. Weitere Einschränkungen durch die Zirkulation sind ein um ca. 20% grösseres Speichervolumen aufgrund der Durchmischung des Speichers.

6.1.3 Zentrale Versorgung durch Speicher mit Warmhaltung durch Begleitheizung

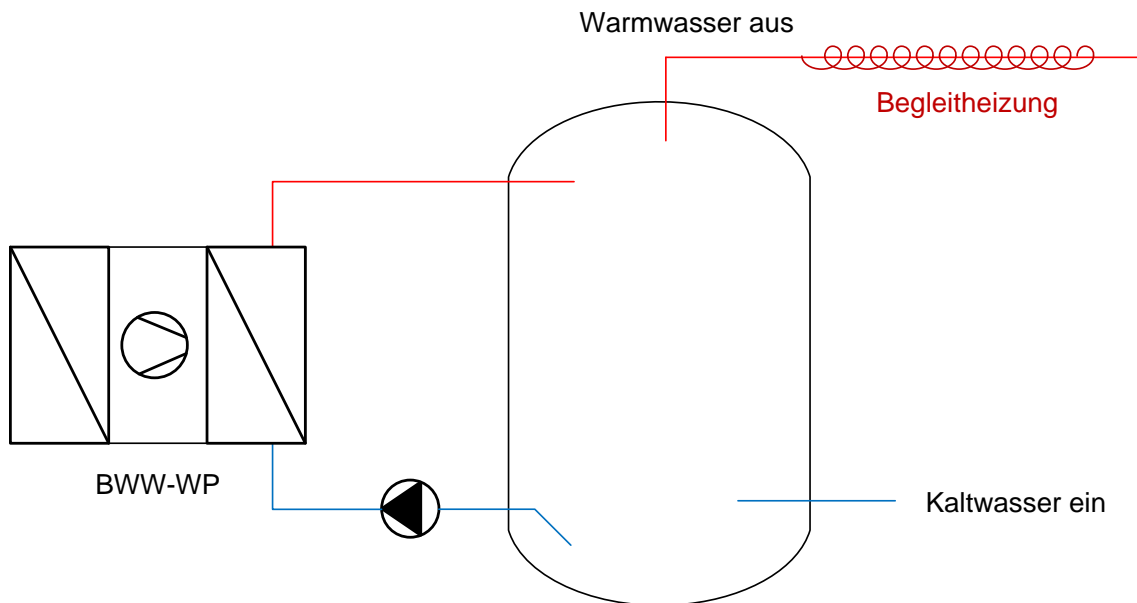


Abbildung 8: Warmhaltung mit Begleitheizung

Auch in dieser Variante findet die Wassererwärmung und –speicherung an einem zentralen Punkt in der Überbauung statt. Die Mindesttemperatur wird jedoch nicht mittels Zirkulation gewährleistet, sondern durch eine elektrische Begleitheizung. Auf diese Weise ist keine Rücklaufleitung in den Speicher nötig. Diese Variante ist sehr einfach zu installieren und betriebssicher. Der elektrische Energieverbrauch der Begleitheizung in grösseren Überbauungen mit schlechter Wärmedämmung ist gemäss dem allgemeinen Tenor beträchtlich. Vor allem in modernen, energieeffizienten Überbauungen kommt die Begleitheizung dadurch immer mehr in Beschuss. Der kürzlich erschienene Bericht *Kubik (2011)* vergleicht im Auftrag eines Herstellers von Begleitheizungen die Unterschiede zwischen Zirkulation und Begleitheizung. Der Bericht folgert, dass die Begleitheizung wirtschaftlich, wie auch energetisch mit der Zirkulation konkurrieren kann.

6.1.4 Ladung via Nahwärmenetz

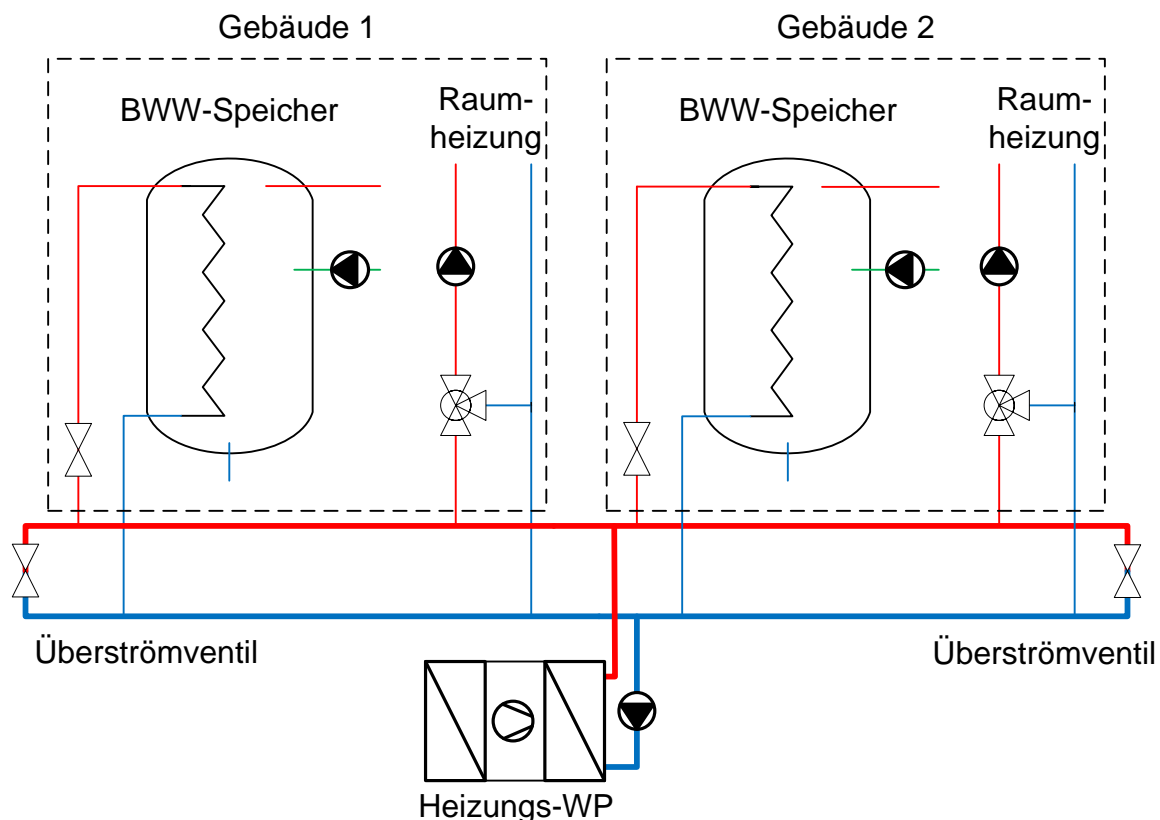


Abbildung 9: Dezentrale Speicherladung durch Zentralheizung

In grossen Überbauungen trifft man oft eine Kombination von Heizungs- und BWW-System an. Dabei wird eine Heizungswärmepumpe zentral aufgestellt. Diese versorgt die Raumheizung und die dezentralen BWW-Speicher mit Wärme. Je nach Anforderungssignal der BWW-Speicher, wird die Temperatur im Heizverteilsystem (Nahwärmenetz) auf über 60°C angehoben, um damit die dezentralen BWW-Speicher zu laden. Sind die BWW-Speicher über das Heizungssystem auf die vorgeschriebene Temperatur angehoben, dann wird die Temperatur im Heizverteilsystem wieder auf die gewünschte, niedrigere Vorlauftemperatur gesenkt. Bei dieser Anlage gibt es mehrere Möglichkeiten den Energieverbrauch drastisch zu erhöhen.

Problematisch ist einerseits, dass sich das Nahwärmenetz nur in der Heizsaison auf Heiztemperatur befindet und dass ausserhalb der Saison jeweils ein beträchtlicher Anteil der Wärme im Verteilnetz auskühlt. Das gesamte Netz, teilweise inklusive Heizungsspeicher, muss somit auf die BWW-Temperatur gebracht werden, um die dezentralen BWW-Speicher zu laden. Nach der Ladung kühlen Heizungsspeicher und Nahwärmenetz wieder aus. Diese Wärme geht ungenutzt verloren. Besonders ungünstig für die Wärmepumpe ist der Fakt, dass auch die Heizung über einen weiten Zeitraum mit hoher Vorlauftemperatur von über 60°C betrieben werden muss. Vor allem in Grossanlagen kommt es verteilt über den Tag zu vielen Wärmeanforderungen der BWW-Speicher. Durch die meist grosse räumliche Ausdehnung des Nahwärmenetzes steigen auch die ungenutzten Wärmeverluste an die Umgebung stark an. Schlussendlich ist in diesen Systemen auch eine höhere Kondensationstemperatur in der Wärmepumpe nötig, da die Vorlauftemperatur durch einen zusätzlichen Wärmeübergang im Speicher um ca. 5°C höher ausfallen muss. Im Projekt Grosswärmepumpen von *Hubacher et al. (2009)* schnitt diese Art der BWW-Erzeugung energetisch oftmals schlecht ab.

6.1.5 Heizung-BWW-Kaskade

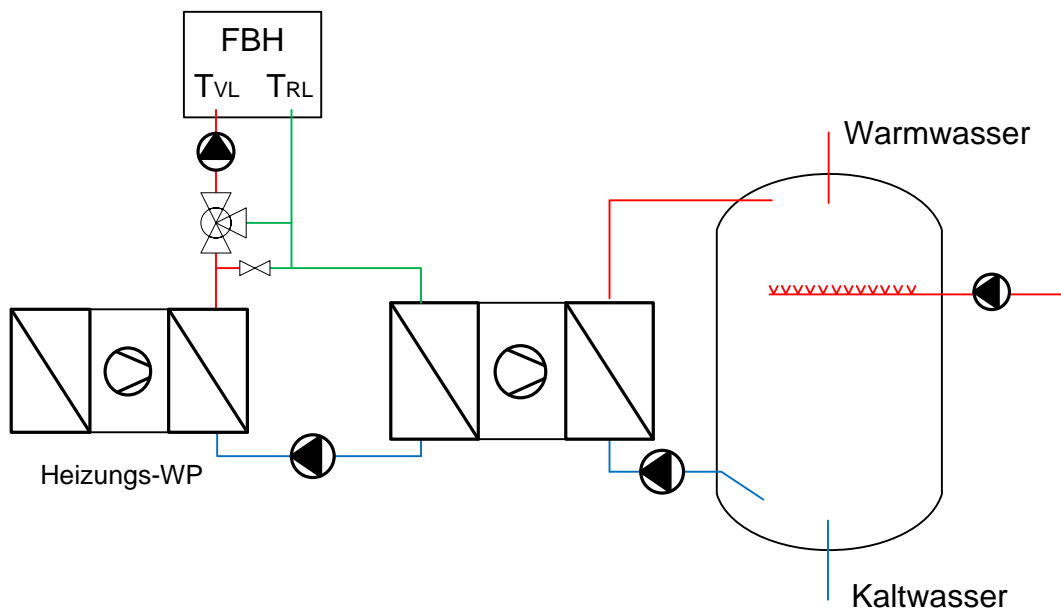


Abbildung 10: Heizung-BWW-Kaskade (mit einer Heizgruppe)

In letzter Zeit wurden einige System gebaut, die eine zentrale Heizungswärmepumpe mit dezentralen BWW-Wärmepumpen verbinden. Die dezentralen BWW-Wärmepumpen verwenden dabei in jedem Gebäude den Rücklauf der Raumheizung als Wärmequelle. Auf diese Weise sinkt der mittlere Temperaturhub der Heizungswärmepumpe und die BWW-WP hat durch eine hohe Quelltemperatur eine gute Effizienz. Im Sommerbetrieb kann die Quellenwärme der dezentralen BWW-Wärmepumpen über das Nahwärmenetz und die Hauptwärmequelle geliefert werden. Auch eine Einbindung solarer Wärme ins Heiznetz oder eine aktive Kühlung des Fussbodens ist denkbar. Durch Temperaturen im Heizungssystem, die, je nach Art der BWW-WP Einbindung, unter der Umgebungstemperatur liegen, besteht im Sommer die Gefahr von Wasserdampfkondensation auf dem Heizungsleitungsnetz. Für den einwandfreien Betrieb muss ein Minimalvolumenstrom auf der Quellenseite der BWW-WP gewährleistet werden.

6.1.6 Dezentrale Versorgung mit Zirkulation

In jedem Gebäude befindet sich eine eigene Wärmepumpenanlage für die BWW-Versorgung. Damit sind die geforderten Ausstosszeiten leichter erreichbar und die Wärmeverluste in den Verteilungen geringer. Aber auch hier ergeben sich die Probleme mit Zirkulation und Speichermischung, allerdings auf geringerem Niveau. Nachteilig wirken sich auch die höheren Erschliessungs-, Investitions- und Unterhaltskosten für die höhere Anzahl an BWW-Anlagen aus.

6.1.7 Zirkulationsverlustdeckung

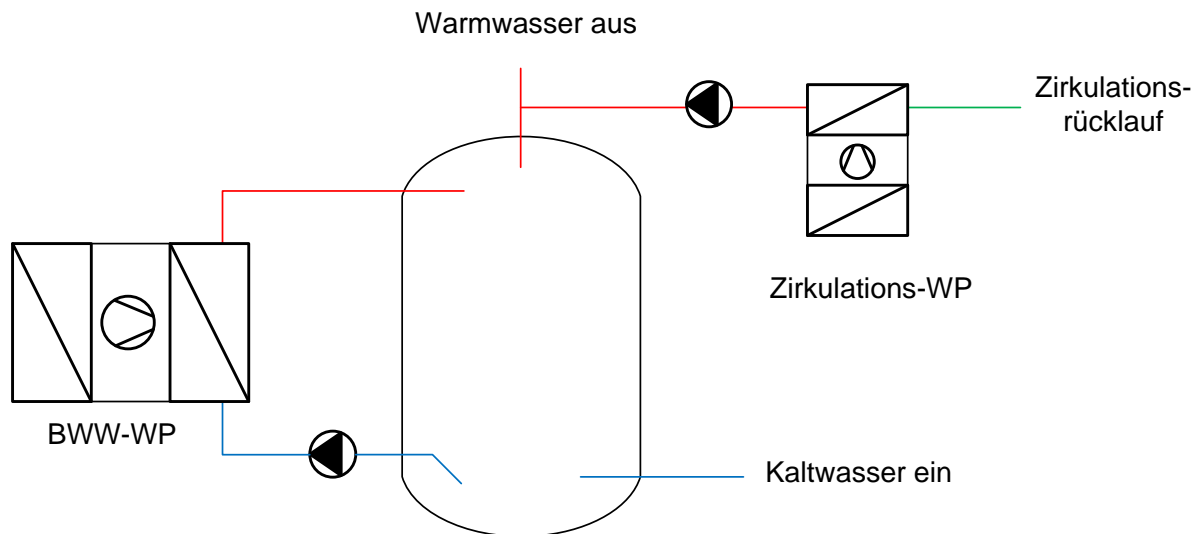


Abbildung 11: Zirkulationsverlustdeckung mit modulierender Wärmepumpe

Im Sanierungsfall von Grossanlagen greifen Anlagenbauer teilweise auf die Möglichkeit der Zirkulationsverlustdeckung zurück. Dabei durchläuft die Rücklaufleitung der Zirkulation beispielsweise ein Gasheizgerät, elektrisches Heizregister oder eine Wärmepumpe, um die Rücklaufemperatur anzuheben. Die Rücklaufleitung kann nun direkt dem Warmwasseraustritt des Speichers zugeführt werden und die Schichtung des Speichers bleibt damit erhalten. Zu berücksichtigen sind die langen Laufzeiten des Systems und die variable Leistungsanforderung je nach Warmwasserbezug.

7 Systemgrenzen

Der vorliegende Bericht konzentriert sich auf die Bereitstellung des Warmwassers ab Verdampfer der Wärmepumpe bis hin zum Warmwasserverteiler jeder Wohnung, welcher mit Wohnungsanschluss bezeichnet wird. Die Quellenseite sowie die Stichleitungen zu den einzelnen Zapfstellen in den Wohnungen werden nicht berücksichtigt. Es wird eine konstante Verdampfungstemperatur der Wärmepumpe angenommen (siehe Anhang D). Mit den gewählten Systemgrenzen soll der Fokus des Berichts auf den Geschehnissen liegen, die zwischen Wärmepumpe und Wohnungsverteiler entstehen. Diskussionen darüber, welche Quelle für die Wärmepumpe besser ist, oder welche Wohnungssituation vorliegen soll, hängen von vielen externen Faktoren ab und sind nicht Inhalt dieser Untersuchung.

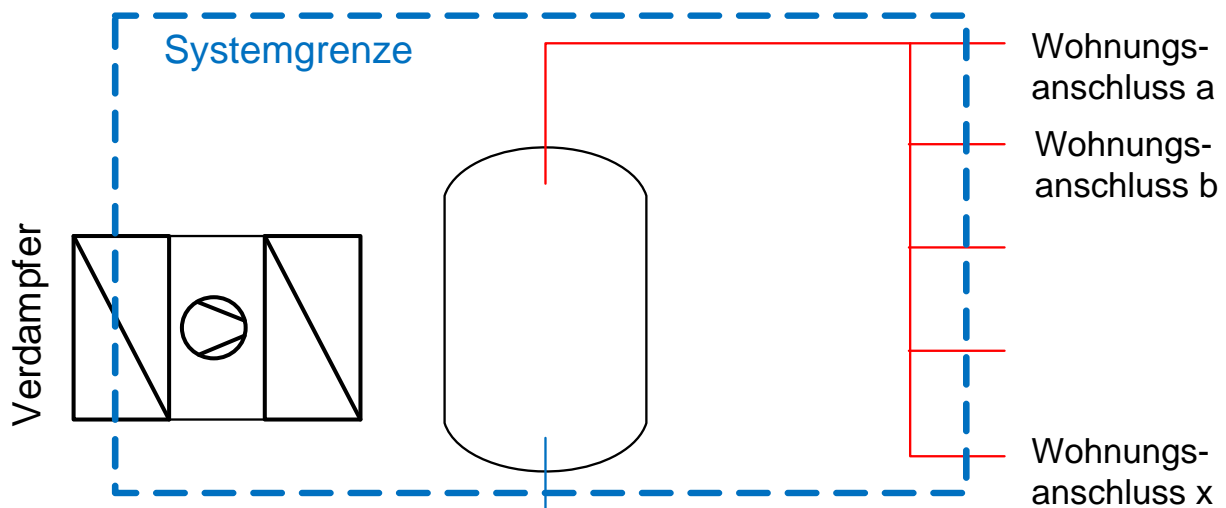


Abbildung 12: Systemgrenzen der Studie

8 Feldmessung

Im Rahmen des Projekts erfolgte der Aufbau eines Simulationsmodells zur Nachbildung sanitärer Systeme mit anschließender Bewertung in Bezug auf den Energieverbrauch und die Effizienz. Mit Feldmessungen wurde eine Datenbasis für die Verifikation der Simulation geschaffen. Das Modell konnte damit mit dem Verhalten reeller Anlagen abgeglichen und geprüft werden. Ausserdem widerspiegeln die Messungen den gegenwärtigen Ausbaustandard und erhöhen das Verständnis für die Probleme im Feld. An drei Objekten mit zentraler Warmwasserbereitung in Kombination mit der Wärmepumpe und einer Zirkulation führte das IES Messungen durch. In einer Vorlaufphase wurden über einen Zeitraum von ca. einer Woche die Daten erfasst. Nach einer ersten Auswertung wurden jeweils die Messbereiche der Durchflusssensoren den vorliegenden Strömungsgeschwindigkeiten angepasst werden, um die Genauigkeit der Messung zu verbessern. Danach begann die eigentliche Messphase mit einer durchschnittlichen Dauer von 4 Wochen.

8.1 Diskrepanz zwischen Wirkverlust, Blindverlust und Scheinverlust

Bei den Feldmessungen und in der Simulation sind drei Arten von Verlusten im Verteilnetz zu beobachten. Die Autoren unterscheiden diese drei Arten in:

- Wirkverlust
- Blindverlust
- Scheinverlust

Um diese Begriffe zu verstehen, müssen sie zunächst isoliert betrachtet werden.

8.1.1 Wirkverlust

Der Wärmeverlust eines isolierten Rohrs ist abhängig von der Isolationsdicke, der Wärmeleitfähigkeit des Dämmmaterials, der Dämmdicke sowie der Temperaturdifferenz zwischen Rohr und Umgebung. Sind im Idealfall in jedem infinitesimal kleinem Rohrabschnitt alle Faktoren bekannt, kann der Wirkverlust der gesamten Leitung berechnet werden. Das Fluid in der Leitung verliert seine Energie durch die Wirkung des Wirkverlustwerts.

8.1.2 Blindverlust

Betrachten wir einen Strang der Verteilung einer Anlage mit Zirkulation, welchen wir in seine Vorlauf- und Rücklaufseite separieren können (Abbildung 13). Auf der Vorlaufseite strömt immer ein Wassermassenstrom, welcher sich aus Zirkulations- und Zapfmassenstrom zusammensetzt. Das Wasser kühlt auf dem Weg zum Wohnungsanschluss bedingt durch den Wärmeverlust der Vorlaufleitung ab. Am Wohnungsanschluss entweicht das Wasser mit dem Zapfmassenstrom und einer im vorliegenden Projekt unbekanntem Temperatur $T_{\text{Wohnungsanschluss}}$. Die Energie, welche das gezapfte Wasser auf dem Weg zum Wohnungsanschluss verlor, ist für den Speicher nicht sichtbar. Die Autoren nennen diese für den Speicher nicht spürbare Energieeinbusse den Blindverlust.

8.1.3 Scheinverlust

Nachdem der Zapfmassenstrom die Vorlaufleitung verlässt, fließt der Zirkulationsmassenstrom auf der Rücklaufseite in den Speicher zurück und verliert auf diesem Weg weiter an Energie. Für den Speicher scheint es, als ob nur der Verlustanteil, unter welchem der Zirkulationsmassenstrom an Energie verloren hat, aus dem Gesamtsystem entwichen ist. Die Autoren des Berichts nennen dies den Scheinverlust. Die Blindverluste werden bei Messungen am Speicher nicht erkannt, was bedeutet, dass bei hohen Zapfleistungen geringe gemessene Scheinleistungen entstehen.

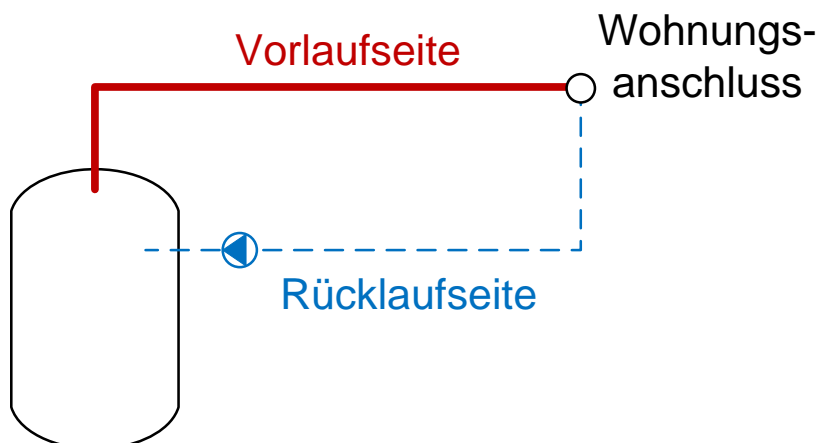


Abbildung 13: Separation von Vor- und Rücklaufseite im Zirkulationssystem

Abbildung 14 fasst zusammen, dass der Blindverlust nur am Wohnungsanschluss spürbar wird – Die Warmwassertemperatur liegt hier tiefer als am Speicheraustritt. Der Scheinverlust wirkt auf den Speicher und sorgt unter anderem für dessen Abkühlung. Die Summe von Blindverlust und Scheinverlust ergibt den Wirkverlust des Leitungsnetzes. Dies bedeutet, dass bei Anlagen mit hohem BWW-Bezug die gemessenen Verluste wesentlich niedriger sind, als bei Anlagen mit geringer Nutzung.

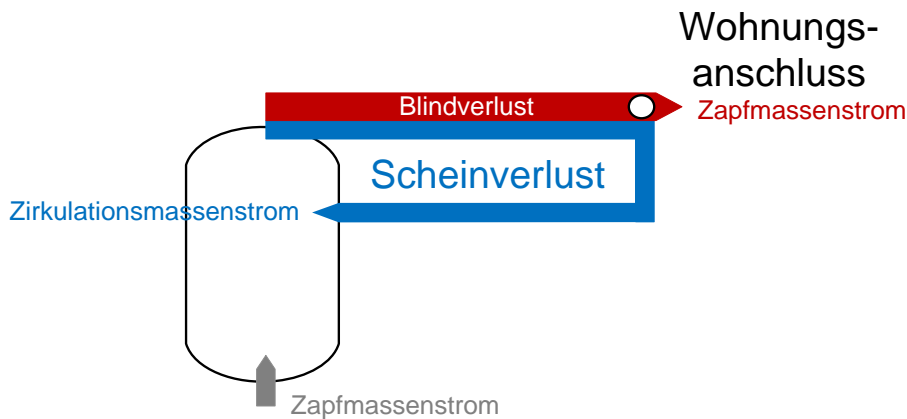


Abbildung 14: Verteilung von Blind- und Scheinverlust: Wirkverlust = Scheinverlust + Blindverlust

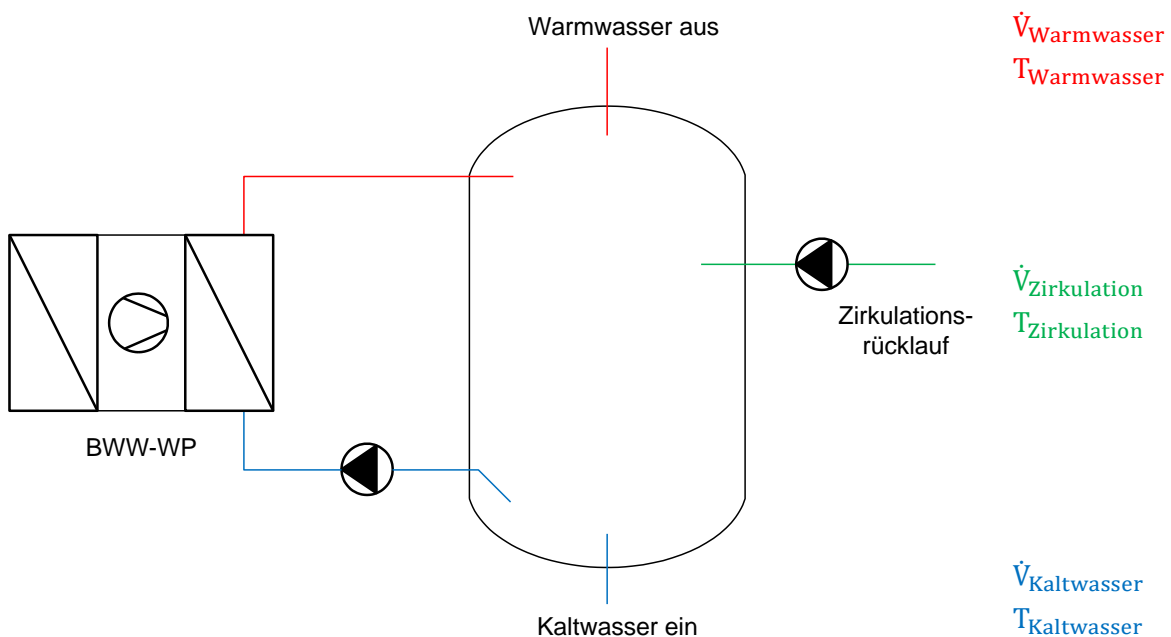


Abbildung 15: Anschlussstutzen am Speicher

Der Scheinverlust, welcher über das Verteil- und Zirkulationssystem entsteht, kann am Speicher erfasst werden (Abbildung 15). Dafür reicht das Anbringen eines Durchflusssensors an der Stelle des Zirkulationsrücklaufs sowie Temperatursensoren an den Anschlüssen „Warmwasser aus“ und „Zirkulationsrücklauf“. In den Feldmessungen wurden zusätzliche Durchflusssensoren an den Stellen „Warmwasser aus“ und „Kaltwasser ein“ eingesetzt, die der Erfassung des Verbraucherzaprofils und der Redundanz dienen. Durch die redundante Anordnung der Durchflusssensoren kann der Scheinverlust auf zwei Arten gemäss (1) und (2) beschrieben werden.

$$\dot{Q}_{\text{Schein}} = \dot{H}_{\text{Zirk,Warmwasser}} - \dot{H}_{\text{Zirkulation}} = \dot{V}_{\text{Zirkulation}} \cdot \rho \cdot c_p \cdot (T_{\text{Warmwasser}} - T_{\text{Zirkulation}}) \quad (1)$$

$$\dot{Q}_{\text{Schein}} = (\dot{V}_{\text{Warmwasser}} - \dot{V}_{\text{Kaltwasser}}) \cdot \rho \cdot c_p \cdot (T_{\text{Warmwasser}} - T_{\text{Zirkulation}}) \quad (2)$$

Problematisch ist die Erfassung des Wirkverlustes. Dafür wären an jedem Wohnungsanschluss der Durchfluss und die Zapftemperatur zu erfassen, um den Blindverlust zu ermitteln. Die Addition von Schein- und Blindverlust ergäbe den Wirkverlust, welcher als

Mass für die Ausführungsqualität der Dämmung verstanden werden kann. Im MFH ist jedoch die Erfassung des Blindverlusts aufgrund des gewaltigen Aufwands ausgeschlossen.

Dennoch waren die Autoren interessiert an der Grösse des Wirkverlusts. Unter der Annahme der Wohnungsanschlussstemperatur $T_{\text{Wohnungsanschluss}}$ gemäss Gleichung (3), welche mit Hilfe der Simulationen ermittelt wurde, ist der Wirkverlust berechenbar. $T_{\text{Wohnungsanschluss}}$ steht in diesem Fall für die durchschnittliche Temperatur an den Wohnungsverteiltern, also dort wo das Warmwasser das Gesamtsystem verlässt.

$$T_{\text{Wohnungsanschluss}} = T_{\text{Warmwasser}} - (T_{\text{Warmwasser}} - T_{\text{Zirkulation}}) \cdot \left(0.3 - \frac{\dot{m}_{\text{Zapf}}}{\dot{m}_{\text{Zirkulation}}} \cdot 0.09 \right) \quad (3)$$

Abbildung 16 zeigt die bekannten Grössen, woraus eine Energiebilanz aufgestellt werden kann. Aufgelöst nach dem Wirkverlust resultiert Gleichung (4).

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{\text{Wirk}} &= \dot{Q}_{\text{Schein}} + \dot{Q}_{\text{Blind}} & (4) \\ &= \dot{H}_{\text{Zirk,Warmwasser}} - \dot{H}_{\text{Zirkulation}} + \dot{H}_{\text{Zapf,Warmwasser}} - \dot{H}_{\text{Wohnungsanschluss}} \\ &= (\dot{m}_{\text{Zapf}} + \dot{m}_{\text{Zirkulation}}) \cdot c_p \cdot T_{\text{Warmwasser}} - \dot{m}_{\text{Zapf}} \cdot c_p \cdot T_{\text{Wohnungsanschluss}} \\ &\quad - \dot{m}_{\text{Zirkulation}} \cdot c_p \cdot T_{\text{Zirkulation}} \end{aligned}$$

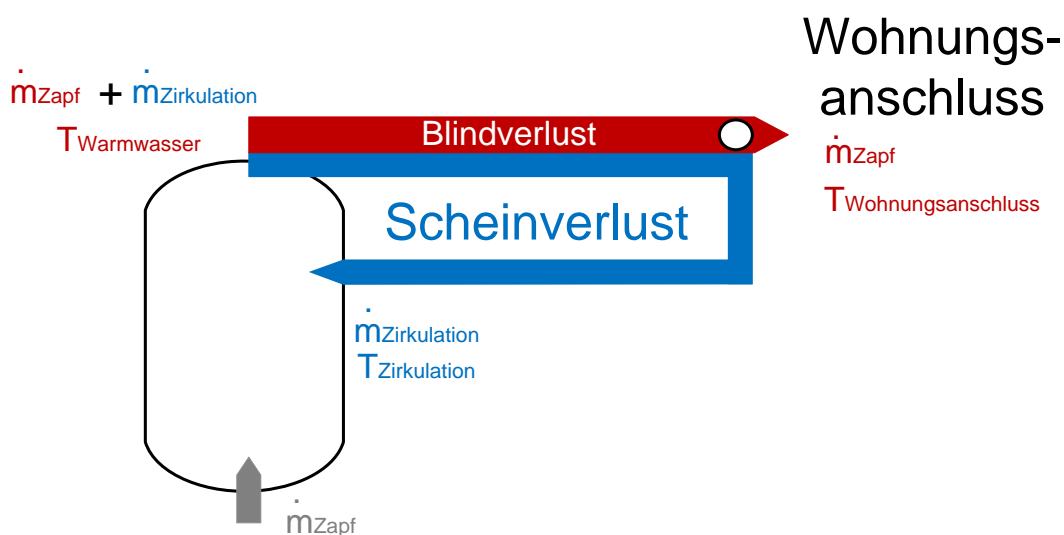


Abbildung 16: Energiebilanz im Zirkulationssystem

8.2 Messinstallation

Bei den installierten Durchflusssensoren „Krohne Optisonic 6000 small“ handelt es sich um sogenannte Clamp-On-Sensoren, welche auf das fluiddurchströmte Leitungsrohr aufgesetzt werden. Diese ermöglichen nicht-invasive Messungen. Als Temperaturfühler dienen Thermoelemente des Typs K, die an das Rohr angelegt und gut isoliert werden.

Tabelle 3: Messmittel der Feldmessungen

Beschreibung	Messmittel	Messbereich	Unsicherheit	Signal
Volumenstrommessung	Krohne Optisonic 6000 small	Frei skalierbar von 0...540 m ³ /h	± 1 % vom Messwert bei DN ≥ 50 mm / v > 0.5 m/s ± 3 % vom Messwert bei DN < 50 mm / v > 0.5 m/s	4 – 20 mA
Temperaturmessung	Thermoelement	-40...70°C	± 0.5 K	Typ K

Die Spreizung wird aus der Temperaturdifferenz zwischen Warmwasseraustritt und Zirkulationsrücklauf gebildet. Eine Sensitivitätsanalyse hat ergeben, dass die Messunsicherheit der Thermoelemente besonders bei geringen Spreizungen grossen Einfluss auf die berechneten Anlagenparameter haben kann. Eine signifikante Reduktion der Messfehler wäre nur durch den Einsatz von Tauchhülsen möglich gewesen. Um die Warmwasserversorgung nicht zu unterbrechen, konnten jedoch nur Anlegesensoren verwendet werden. Eine genaue Auswertung der Blind-, Schein- und Wirkverluste ist somit nur mittels Simulation möglich.

Einige berechnete Parameter (jeweils in den Tabellen hellrot hinterlegt) sind von dieser Unsicherheit besonders betroffen und vor allem bei kleinen Spreizungen ($\Delta T < 5^\circ\text{C}$) mit Vorsicht zu geniessen:

- mittlerer Scheinverlust
- mittlerer Scheinverlust pro Meter Doppelrohr
- Scheinverlustenergie im Leitungsnetz
- mittlerer Wirkverlust pro Meter Doppelrohr
- Blindverlustenergie im Leitungsnetz
- Vergleichende Verlustenergie in der Zentrale

Wesentlich robuster gegenüber dem Einfluss dieser Messunsicherheit sind folgende Parameter

- Wohnungsanschlusstemperatur
- gezapfte Energie
- Arbeitszahl der Anlage

8.3 Messobjekt 1

- 2 MFH mit je 24 Wohnungen und total 97 Mietern
- Grundriss pro Gebäude 48.5 m x 13.9 m
- Bauweise Minergie-P
- Zentrale BWW-Bereitung mit Zirkulation (RaR)
- BWW-Speichervolumen: 6000 l
- Länge der Zirkulationsleitung: 264 m (Doppelrohr)
- Ausführung der Sanitärarbeiten: Schenk Bruhin AG
- Fertigstellung Frühjahr 2010

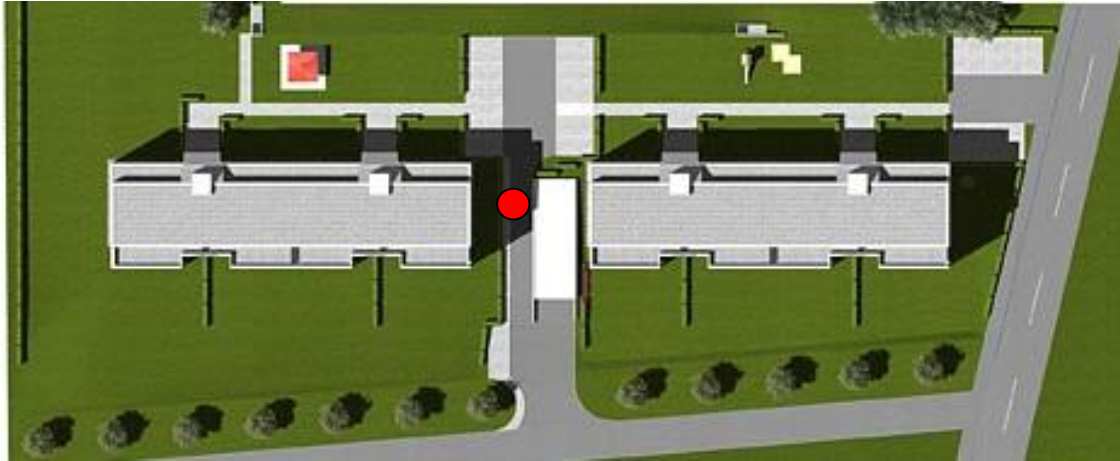


Abbildung 17: Messobjekt I aus der Vogelperspektive mit markierter BWW-Zentrale Oscar Neher (2011)

Die EKZ statten ihre Anlagen umfassend mit Sensoren aus, deren Werte über Online-Monitoring abrufbar sind. Mit den Sensoren, welche seitens IES installiert wurden, war eine umfassende Analyse der Brauchwarmwassererzeugung möglich. Während zwei Monaten lief die Messung. Die Datenaufzeichnung seitens der EKZ weist in diesem Zeitraum zwei längere Unterbrüche auf. Die Auswertung erfolgte über den längsten zusammenhängenden Zeitraum der EKZ-Aufzeichnungen. Die Qualität dieses Objekts wird als sehr hoch eingeschätzt, da die Ausführung unter ständiger Kontrolle der Minergie-Zertifizierungsstelle stattfand. Eine saubere Ausführung der Isolation im gesamten System kann vorausgesetzt werden.

Tabelle 4: Ergebnisse Messobjekt 1– Messzeitraum 17.04.2011 bis 12.05.2011

	Auswertung der Messung
Wasserbedarf	
Tagesdurchschnitt	4285 l
Warmwasserverbrauch/Whg pro Tag	89.3 l
Warmwasserverbrauch/Person pro Tag	44.2 l
24h-Spitze	5718 l
Spitzenbedarf in 1 h	814 l
Zirkulation	
Mittlere Vorlauftemperatur	59.6°C
Mittlere Zirkulationsrücklauftemperatur	48.9°C
Mittlere Kaltwassertemperatur	12.0°C
Mittlerer Zirkulationsvolumenstrom	0.12 m ³ /h
Mittlerer Scheinverlust (exkl. Zirkulationspumpe) \dot{Q}_{Schein}	1469 W
Mittlerer Scheinverlust pro Meter Doppelrohr $\dot{q}_{\text{rel,Schein}}$	5.6 W/m
Mittlerer Wirkverlust pro Meter Doppelrohr $\dot{q}_{\text{rel,Wirk}}$	7.05 W/m
Energie	
Thermische Wärmeenergie pro m ³ genutztes Brauchwarmwasser	65.9 kWh/m ³
Thermische Wärmeenergie pro Tag	282.38 kWh/d
Elektrischer Energieverbrauch pro Tag (inkl. Zirkulationspumpe)	84.54 kWh/d
Elektrischer Energieverbrauch pro m ³ genutztes Brauchwarmwasser (inkl. Zirkulationspumpe)	19.36 kWh/m ³

Der relative Wirkverlust von 7.05 W/m pro Meter RaR-Leitung beweist die gute Ausführungsqualität des installierten Leitungsnetzes. Nach *Suissetec (2003)* ist bei RaR mit einem Verlust von 10 W/m zu planen. Dieser theoretische Planungswert wird beim Messobjekt 1 unterschritten. Aus Sicht des Speichers erscheint im Leitungsnetz ein relativer Scheinverlust von nur 5.6 W/m. Die Spreizung zwischen Vor- und Rücklauf beträgt in diesem Fall 10.7 K und ist relativ gross im Vergleich zur Messunsicherheit der Temperaturfühler. Die Genauigkeit der Scheinverlustwerte liegt im Bereich $\pm 10\%$.

8.4 Messobjekt 2

- 1 MFH mit 66 Wohnungen und 128 Mietern sowie 4 Geschäftsflächen
- Bauweise Minergie-P-Eco
- Dezentrale BWW-Bereitung mit Zirkulation (RaR)
- 2 BWW-Speicher à 4000 l in Serie
- Länge der Zirkulationsleitung: 450 m (Doppelrohr)
- Fertigstellung 2008



Abbildung 18: Messobjekt II aus der Vogelperspektive mit markierter BWW-Zentrale
Bühlmann (2008)

Dieses Objekt wird nicht von den EKZ betreut. Es handelt sich in diesem Fall um eine Überbauung mit zwei Gebäuden, welche dezentral versorgt werden. Die Abwasserwärme mit einem FEKA-Modul rückgewonnen und als Wärmequelle für die BWW-WP genutzt. Die Messung fand im Gebäude 1 statt. Diese Überbauung entspricht wie das Messobjekt 1 dem Minergie-P-Standard. So war die Möglichkeit gegeben, diesen Standard anhand von 2 Messobjekten zu vergleichen. Die vom IES installierten Sensoren und die Aufzeichnungen aus dem Online-Monitoring des FEKA-Systems liefern folgende Ergebnisse:

Tabelle 5: Ergebnisse Messobjekt II – Messzeitraum 22.06.2011 bis 28.07.2011

	Auswertung der Messung
Wasserbedarf	
Tagesdurchschnitt	4578 l
Warmwasserverbrauch/Whg pro Tag	69.4 l
Warmwasserverbrauch/Person pro Tag	35.8 l
24h-Spitze	6237 l
Spitzenbedarf in 1 h	868 l
Zirkulation	
Mittlere Vorlauftemperatur	55.6°C
Mittlere Zirkulationsrücklauftemperatur	49.1°C
Mittlere Kaltwassertemperatur	18.0°C
Mittlerer Zirkulationsvolumenstrom (getaktet)	0.424 m ³ /h
Mittlerer Scheinverlust (exkl. Zirkulationspumpe) \dot{Q}_{Schein}	3204 W
Mittlerer Scheinverlust pro Meter Doppelrohr $\dot{q}_{\text{rel,Schein}}$	7.1 W/m
Mittlerer Wirkverlust pro Meter Doppelrohr $\dot{q}_{\text{rel,Wirk}}$	7.95 W/m
Energie	
Thermische Wärmeenergie pro m ³ genutztes Brauchwarmwasser (durch Wärmezählerlesung ermittelt)	65.65 kWh/m ³
Thermische Wärmeenergie pro Tag	300.55 kWh/d

Aus den verfügbaren Messdaten liess sich der elektrische Energieverbrauch nicht ermitteln. Der berechnete Wirkverlust liegt etwas höher als im Messobjekt 1, doch innerhalb der Messunsicherheit der Temperaturfühler (die Spreizung liegt in diesem Fall bei 6.5 K).

8.5 Messobjekt 3

- 3 MFH mit insgesamt 73 Wohnungen
- Grundriss Gebäude 1: 115 m x 16 m
- Grundriss Gebäude 2: 185 m x 25 m
- Grundriss Gebäude 3: 40 m x 25 m
- Zentrale BWW-Bereitung mit Zirkulation: RaR und Parallelrohr
- BWW-Speichervolumen: 10'000 l
- Länge der Zirkulationsleitung: 1250 m (Doppelrohr)

Die EKZ liefern die Energie für diese Anlage. Sie ist dementsprechend gut mit Sensoren bestückt, so dass der Energiecontractor über das Online-Monitoring darauf aufmerksam wurde, dass die Brauchwarmwasser-Erwärmung nicht optimal verläuft. Um die Fehlerursache tiefer zu ergründen und im Zuge dessen eine Sanierung einleiten zu können,

wurde die Anlage zur Untersuchung der Zirkulationsverluste vorgeschlagen. Die EKZ lieferten dazu im ersten Schritt einige Daten aus dem Online-Monitoring.

Problematisch scheint der Einfluss der Zirkulation auf die Speicherschichtung zu sein, wie Abbildung 19 beweist. Das Bild zeigt die alltägliche Situation im Speicher. Nach einer Ladung ist der Speicher geschichtet mit der tiefsten Temperatur unten und der höchsten Temperatur oben im Behälter. Das Ziel ist es, diese Schichtung über einen möglichst langen Zeitraum zu erhalten. Doch am vorliegenden Objekt findet schon nach wenigen Minuten eine Durchmischung statt. Nach gut einer Stunde befindet sich der gesamte Speicherinhalt auf demselben Temperaturniveau. Bei der nächsten Ladung ist die Rücklauftemperatur in den Kondensator der Wärmepumpe von Beginn an sehr hoch. Die negativen Auswirkungen auf den COP wurden im Kapitel 6.1.2 bereits dargestellt. Zudem befindet sich die Wärmepumpe fast ganzzzeitig in der Betriebsstufe 1 anstelle von Betriebsstufe 2, was den Ladungsprozess erheblich verlangsamt.

Der Effekt tritt sowohl am Tag als auch nachts auf. Der Auslöser dafür kann nur die Zirkulation sein. Es wurde daher entschieden an diesem Objekt zwei Messperioden durchzuführen. Die Messperiode 1 erfasste das gegenwärtige Anlagenverhalten. Nach einer Analyse dieser Daten wurde durch Verändern des Zirkulationsvolumenstroms aktiv gegen diese Durchmischung vorgegangen und die Messperiode 2 gestartet.

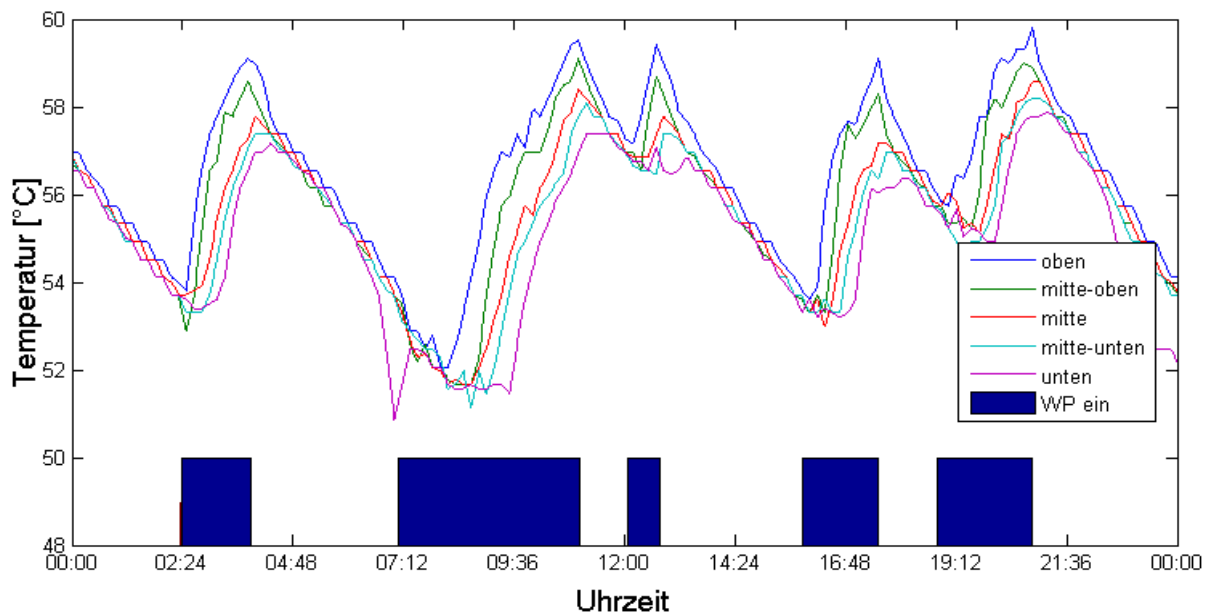


Abbildung 19: Speichermischung am Messobjekt 3

Im Durchschnitt finden täglich 5 Warmwasserladungen (auch über die Mittagszeit) statt. Neben der geringen Effizienz sind auch die wirtschaftlichen Auswirkungen durch den hohen Strompreis tagsüber suboptimal.

8.5.1 Messperiode 1

Tabelle 6: Ergebnisse Messobjekt 3 – Messperiode 1 - Messzeitraum 12.08.2011 bis 19.09.2011

	Auswertung der Messung
Wasserbedarf	
Tagesdurchschnitt	5179 l
Warmwasserverbrauch/Whg pro Tag	70.9 l
24h-Spitze	8764 l
Spitzenbedarf in 1 h	1085 l
Zirkulation	
Mittlere Vorlauftemperatur	56.1°C
Mittlere Zirkulationsrücklauf­temperatur	53.6°C
Mittlere Kaltwassertemperatur	16.0°C
Mittlerer Zirkulationsvolumenstrom	3.61 m ³ /h
Mittlerer Scheinverlust (exkl. Zirkulationspumpe) \dot{Q}_{Schein}	10480 W
Mittlerer Scheinverlust pro Meter Doppelrohr $\dot{q}_{\text{rel,Schein}}$	8.38 W/m
Mittlerer Wirkverlust pro Meter Doppelrohr $\dot{q}_{\text{rel,Wirk}}$	8.53 W/m
Energie	
Thermische Wärmeenergie pro m ³ genutztes Brauchwarmwasser	121.9 kWh/m ³
Thermische Wärmeenergie pro Tag	631.32 kWh/d
Elektrischer Energieverbrauch pro Tag	167.6 kWh/d
Elektrischer Energieverbrauch pro m ³ genutztes Brauchwarmwasser	32.36 kWh/m ³
durchschnittliche Laufzeit der Wärmepumpe	
Betriebsdauer	10.94 h/Tag
davon auf Stufe 2	0.36 h/Tag
durchschnittliche Laufzeit am Stück	2 h 35 min

Angesichts des installierten Speichervolumens liegt der Verbrauch von Warmwasser mit 5179 l relativ niedrig. Die Spreizung zwischen Warmwasseraustritt und Zirkulationsrücklauf liegt bei 2.5 K und damit sogar unter den 3-4 K, welche nach der alten *SIA-Norm 385/3 (1991)* für Anlagen grösserer Ausdehnung empfohlen werden. Die Zirkulationspumpe wälzt dementsprechend viel Wasservolumen im Zirkulationskreis um, nämlich über 3.6 m³/h. Man entschied sich für die Messperiode 2 diesen Volumenstrom auf ca. 1.2 m³/h zu reduzieren und die Spreizung damit um den Faktor 3 zu erhöhen. Diese Massnahme verfolgt das Ziel, den Drall des Zirkulationsrücklaufs in den Speicher zu reduzieren und somit die Speicher­durchmischung abzuschwächen. Dadurch werden längere Laufzeiten der Wärmepumpe und geringere Pumpenverluste erwartet. Der Zirkulationsverlust von 10'480 W ist hoch, doch

entsteht dieser hauptsächlich durch die gegebene Leitungslänge. Der Wirkverlust pro Meter liegt mit 8.51 W noch immer unter dem Planungsvorschlag von *Suissetec (2003)* für RaR. Wohlgederkt sind die Leitungen in diesem Objekt teilweise auch parallel verlegt. Für die Parallelanordnung wird nach *Suissetec (2003)* ein Verlust von 14 W/m angenommen. Die Leitungslänge von 1250 m Doppelrohr ergibt sich unter anderem dadurch, dass einige Wohnungen über jeweils zwei Steigleitungen parallel versorgt werden. Durch geschicktere Anordnung der Steigzonen hätten auf eine grosse Anzahl Steigleitungen verzichtet werden können.

Die elektrische Aufnahmeleistung der BWW-Anlage war für das Messobjekt 3 schwierig zu ermitteln und ist nach wie vor mit Unsicherheiten belastet. Leider läuft die ganze Anlage über einen Zähler. Das bedeutet, dass alle Pumpen auf der Quellenseite, die Wärmeenergie für die Gebäudeheizung und sonstige Zusatzaggregate über diesen Zähler erfasst werden. Aus den Aufzeichnungen der EKZ waren die Betriebszeiten der Heizungs-Wärmepumpen und der Umwälzpumpen auf der Quellenseite bekannt und der elektrische Energiebezug konnte mit Hilfe der Pumpendaten ermittelt und subtrahiert werden.

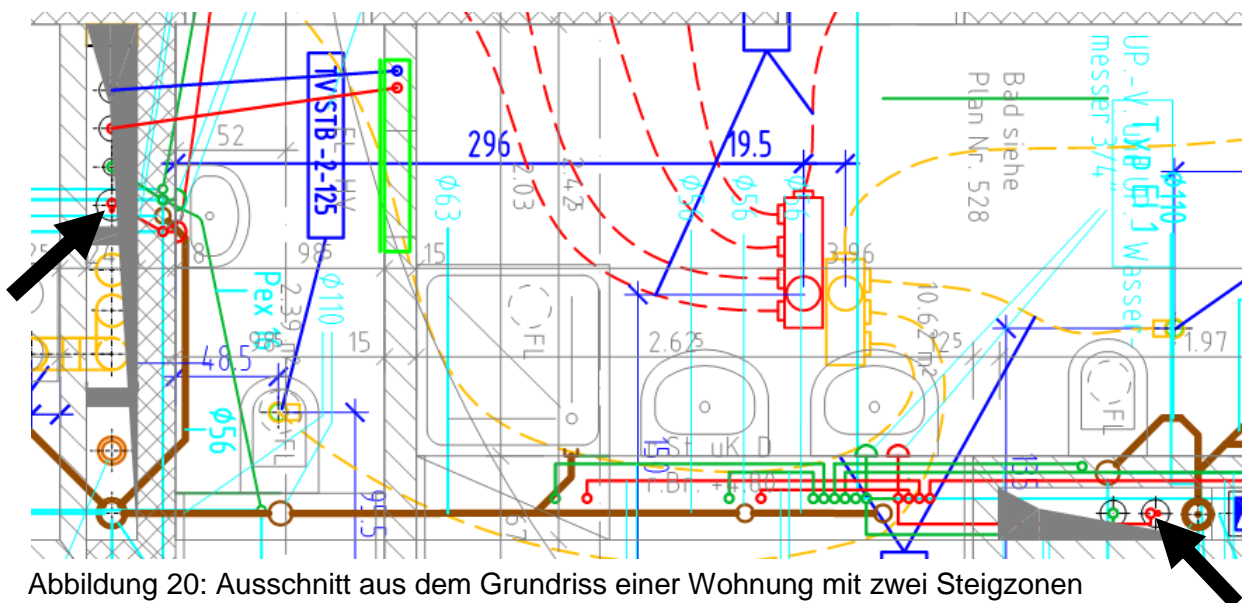


Abbildung 20: Ausschnitt aus dem Grundriss einer Wohnung mit zwei Steigzonen

8.5.2 Messperiode 2

Abbildung 21 zeigt die neuen Temperaturverläufe im Speicher nach der Reduktion des Zirkulationsvolumenstroms. Die Intervention hat eine leichte Verbesserung der Speicherschichtung bewirkt. Zumindest die unterste Schicht löst sich bei Warmwasserzapfung eher von den anderen Schichten ab. Auch in der obersten Schicht findet nun etwas weniger Durchmischung statt. Insgesamt führt dies zu weniger BWW-Ladungen pro Tag. Dadurch, dass die Stufe 2 nun etwas länger laufen kann, hat sich die durchschnittliche Laufzeit pro Einschaltung ein wenig reduziert.

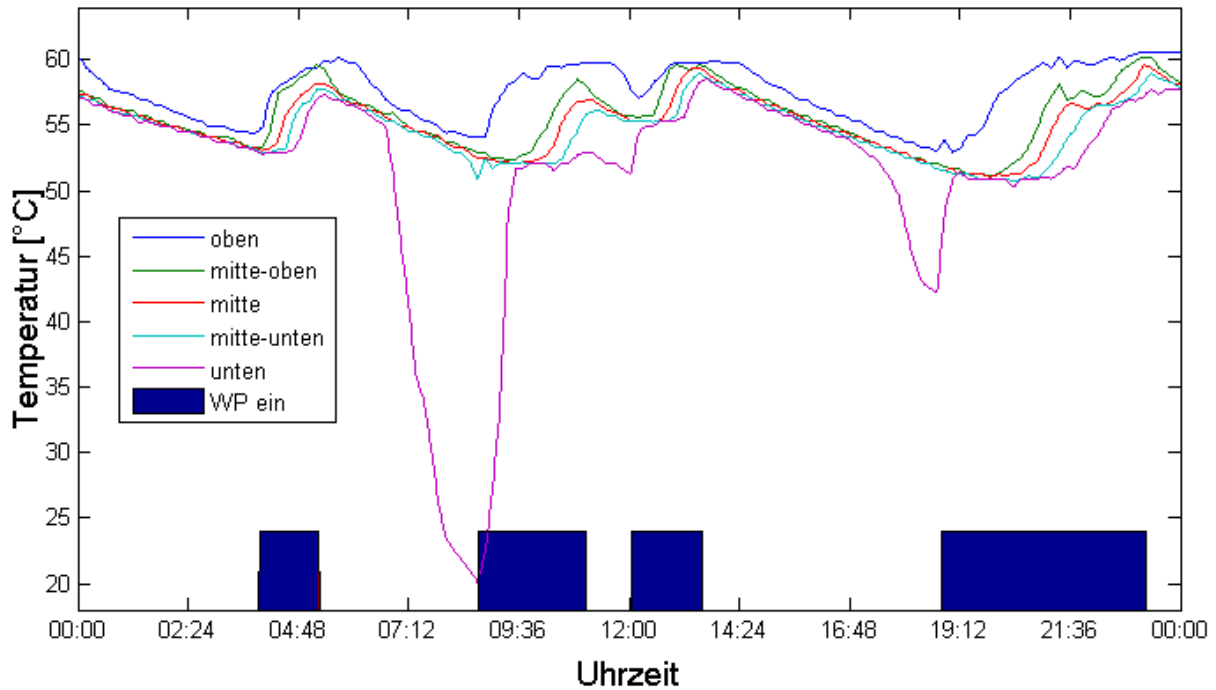


Abbildung 21: Speichermischung am Messobjekt 3 nach Reduktion des Zirkulationsvolumenstroms

Der in der zweiten Messperiode eingestellte Zirkulationsvolumenstrom entspricht einem zu bevorzugendem Wert, da sich der Energieverbrauch gesenkt hat und die Rücklauftemperatur immer noch genügend hoch ist. Zu einer kompletten Entschärfung der Durchmischung des Speichers ist es jedoch durch diesen Eingriff nicht gekommen. Die Leistungszahl der Wärmepumpe leidet unter diesem Umstand. Der Grund für die Durchmischung ist vielleicht in der Konstruktion des Speichers zu suchen. Möglicherweise ist – entgegen den Sanitätschemen - die Rücklaufleitung ohne Einsprührohr ausgeführt oder die Funktion desselben ungenügend. Gemäss den EKZ sollen demnächst drallhemmende Lochbleche im Speicher installiert werden. Es wird versucht, ein geeignetes Zeitfenster für die Speichersanierung im Sommer 2012 zu finden.

Tabelle 7: Ergebnisse Messobjekt 3 – Messperiode 2 - Messzeitraum 21.09.2011 bis 05.10.2011

	Auswertung der Messung
Wasserbedarf	
Tagesdurchschnitt	6149 l
Warmwasserverbrauch/Whg pro Tag	84.2 l
24h-Spitze	9257 l
Spitzenbedarf in 1 h	1249 l
Zirkulation	
Mittlere Vorlauftemperatur	57.3°C
Mittlere Zirkulationsrücklauftemperatur	50.8°C
Mittlere Kaltwassertemperatur	15.5°C
Mittlerer Zirkulationsvolumenstrom	1.17 m ³ /h
Mittlerer Scheinverlust (exkl. Zirkulationspumpe) \dot{Q}_{Schein}	8732 W
Mittlerer Scheinverlust pro Meter Doppelrohr $\dot{q}_{\text{rel,Schein}}$	7.0 W/m
Mittlerer Wirkverlust pro Meter Doppelrohr $\dot{q}_{\text{rel,Wirk}}$	7.5 W/m
Energie	
Thermische Wärmeenergie pro m ³ genutztes Brauchwarmwasser	101.4 kWh/m ³
Thermische Wärmeenergie pro Tag	623.51 kWh/d
Elektrischer Energieverbrauch pro Tag	167.9 kWh/d
Elektrischer Energieverbrauch pro m ³ genutztes Brauchwarmwasser	27.3 kWh/m ³
durchschnittliche Laufzeit der Wärmepumpe	
Betriebsdauer	9.65 h/Tag
davon auf Stufe 2	1.35 h/Tag
durchschnittliche Laufzeit am Stück	2 h 30 min

Die Tabelle 7 zeigt, sind die beiden Messperioden nicht 1:1 vergleichbar, da der Tagesdurchschnitt des Warmwasserbedarfs während der Messperiode 2 um rund 1000 l höher lag als während Messperiode 1. Ob diese Differenz durch Änderungen in der Belegung oder durch saisonale Schwankungen zustande kam, ist schwierig zu beurteilen. Die Reduktion des Volumenstroms ist grundsätzlich als Grund auszuschliessen, da die gemittelte Temperatur aus Vor- und Rücklauf sich nur geringfügig verändert hat. Ausserdem liefen beide Messperioden mit unterschiedlichen Spreizungen (2.5 K / 6.5 K) – auch hier kann die Messunsicherheit der Temperaturfühler verschiedenen Einfluss auf die Berechnungen ausüben.

Dennoch kann man festhalten, dass sich die Laufzeit der Wärmepumpe verringert hat, obwohl sogar mehr Wasser gezapft wurde. Dies ist auf die nun längere Laufzeit in der Betriebsstufe 2, welche mehr Leistung liefert, zurückzuführen.

Basierend auf den Ausführungen zum Wirkverlust in Kapitel 8.1 wäre zu erwarten gewesen, dass der relative Wirkverlust $\dot{Q}_{rel,Wirk}$ unverändert bleibt, da an der Isolation der Leitungen nichts verändert wurde. Die Ursache für die Reduktion des Wirkverlusts ist vielmehr in einer Änderung der Temperaturdifferenz ΔT zwischen Leitung und Umgebung zu suchen. Da der Wärmeverlust linear von ΔT abhängig ist, kann man schliessen, dass sich die Temperaturdifferenz um rund 10 % verringert hat, was ca. 3.5 K entspricht. Der Eingriff in das System hat die Temperaturen in den Leitungen nur geringfügig verändert. So wurden aus der Datenbank der EKZ Datenpunkte der Heizungswärmepumpen ausgewertet. Die Auswertung ergab, dass zwischen den Messperioden 1 und 2 die Heizungswärmepumpen in Betrieb genommen wurden (Abbildung 22). Als Folge haben sich Vor- und Rücklaufleitungen des Nahwärmenetzes sowie der Gebäudekern erwärmt. Dies führte zu einer Temperaturerhöhung in den Steigschächten worin Brauchwarmwasser- und Heizungsleitungen gemeinsam geführt sind. Die Veränderung des Wirkverlusts wird auf diesen Effekt zurückgeführt.

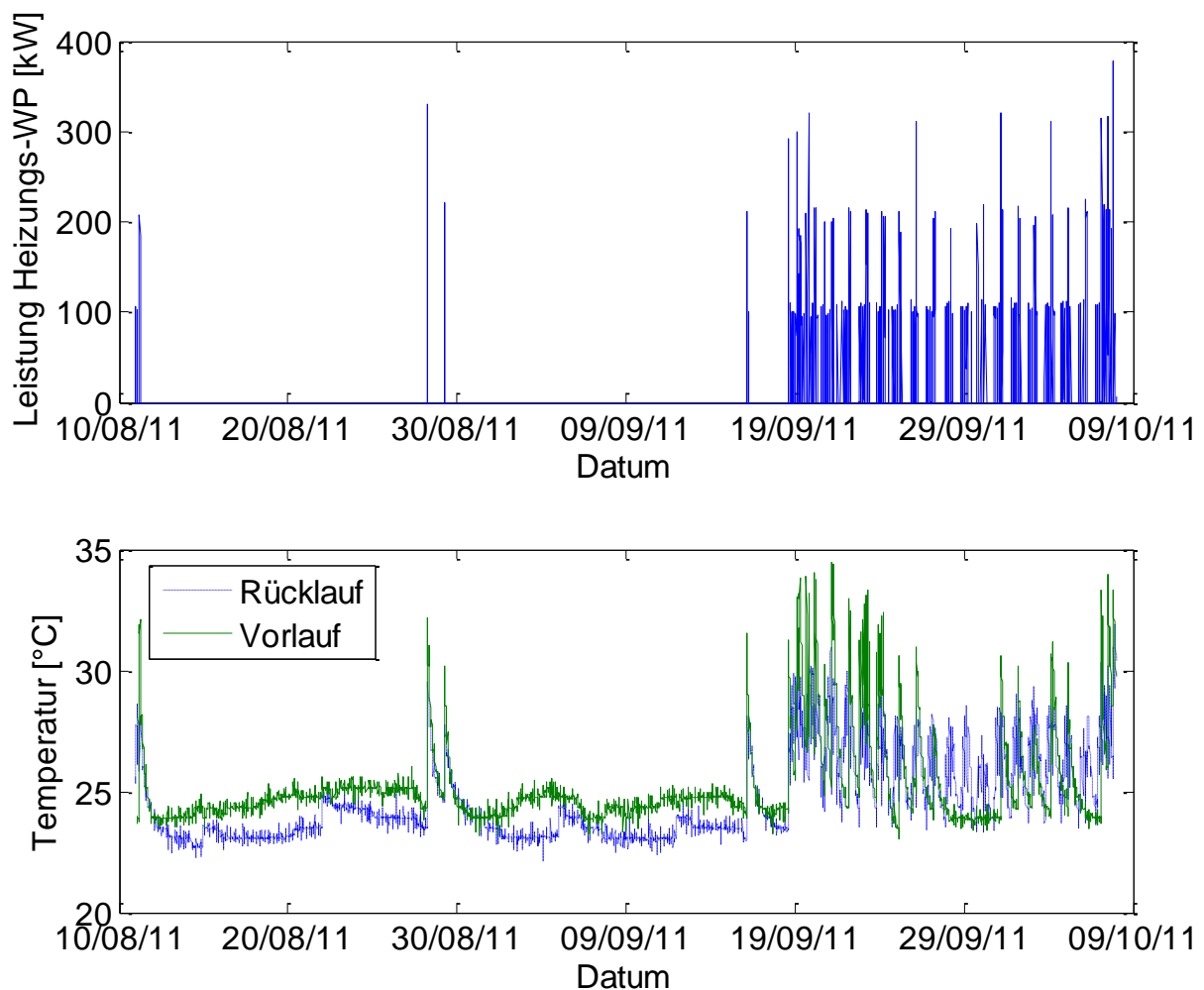


Abbildung 22: Beginn der Heizsaison in Messobjekt 3

8.6 Vergleich der Messobjekte

Tabelle 8 zeigt die energetischen Unterschiede, welche im Feld anzutreffen sind. So gibt es zum einen Minergie-P-Bauten, die hochwertig ausgeführt und auch nach der Inbetriebnahme sorgfältig optimiert und einreguliert wurden. So spiegeln die Messobjekte 1 und 2 in etwa das wieder, was gegenwärtig im Optimalfall erreicht werden kann. Das Messobjekt 3 zeigt nach der Volumenstromreduktion einen zufriedenstellenden Wert für den Scheinverlust im Leitungsnetz.

Zirkulationsverluste entstehen sowohl im Leitungsnetz, als auch im Speicher und an der Wärmepumpe in Folge von Durchmischungseinflüssen und der Temperaturabsenkung des gespeicherten Wasservolumens. Als weitere Grösse können die Wärmeverluste in der Zentrale aus den ermittelten Parameter bestimmt werden.

Bezüglich der Energieeffizienz während dem Betrieb ist die ausschlaggebende Grösse die Arbeitszahl der Anlage AZ_{Anlage} . Sie bildet den Quotient aus gezapfter Energie E_{Referenz} und der total investierten elektrischen Energie $E_{\text{el,total}}$ jeweils pro Kubikmeter gezapftes Brauchwarmwasser.

$$E_{\text{Verlust,Zentrale}} = E_{\text{WP,thermisch}} - E_{\text{Schein}} - E_{\text{Blind}} - E_{\text{Zapfung}} \quad (5)$$

$$\text{mit } E_{\text{Zapfung}} = \rho \cdot c_p \cdot (T_{\text{Wohnungsanschluss}} - T_{\text{Kaltwasser}}) \cdot \frac{1\text{h}}{3600\text{s}} \quad (6)$$

$$AZ_{\text{Anlage}} = \frac{E_{\text{Zapfung}}}{E_{\text{el,total}}} \quad (7)$$

Tabelle 8: Vergleich der Messobjekte 1, 2 und 3

	Messobjekt 1	Messobjekt 2	Messobjekt 3	
			Periode 1	Periode 2
Zirkulationsleitung (Doppelrohr) [m]	264	450	1250	
Installiertes Speichervolumen [l]	6000	8000	10000	
Warmwasserverbrauch V_{Tag} [l/Tag]	4285	4578	5179	6149
gemittelte Warmwassertemperatur [°C]	59.6	55.6	56.1	57.3
Wohnungsanschlusstemperatur [°C]	57.8	53.9	55.4	55.5
gemittelter Scheinverlust [W]	1469	3204	10480	8732
gemittelter Zirkulationsvolumenstrom [m ³ /h]	0.12	0.425	3.61	1.17
gemittelte Spreizung [K]	10.7	6.5	2.5	6.5
Gemessene Wärmeenergie $E_{\text{WP,thermisch}}$ [kWh/m ³]	65.9	65.65	121.9	101.4
Mittlerer Wirkverlust pro Meter Doppelrohr $\dot{q}_{\text{rel,Wirk}}$ [W/m]	7.05	7.95	8.53	7.5
Mittlerer Scheinverlust pro Meter Doppelrohr $\dot{q}_{\text{rel,Schein}}$ [W/m]	5.6	7.1	8.4	7.0
Scheinverlustenergie im Leitungsnetz E_{Schein} [kWh/m ³]	8.24	16.80	48.56	34.09
Blindverlustenergie im Leitungsnetz E_{Blind} [kWh/m ³]	2.09	1.97	0.81	2.09
E_{Zapfung} [kWh/m ³]	52.94	41.49	45.47	46.19
Vergleichende Verlustenergie in der Zentrale $E_{\text{Verlust,Zentrale}}$ [kWh/m ³]	2.63	5.39	27.06	19.03
Elektrischer Energieverbrauch $E_{\text{el,total}}$ [kWh/m ³]	19.36		32.36	27.3
Arbeitszahl der Anlage AZ_{Anlage} [-]	2.73		1.41	1.69

Die Zentralverluste setzen sich aus verschiedenen Verlustanteilen zusammen, die mit den vorhandenen Messdaten nicht einzeln aufgeschlüsselt werden können:

- Wärmeverluste über die Speicherhülle
- Wärmeverluste über die Anschlussstutzen
- Wärmeverluste durch Gegenstromzirkulation
- Wärmeverluste über die Rohrleitungen zwischen Wärmepumpe und Speicher

Eine Sensitivitätsanalyse hat gezeigt, dass gerade die Scheinverlustwerte stark auf Messunsicherheit der Thermolemente reagieren. Besonders wenn auf der Anlage eine kleine Spreizung gemessen wurde, sind die berechneten Werte mit Vorsicht zu geniessen. Es ist daher nicht einfach, die Messobjekte direkt untereinander zu vergleichen. Die Verluste sind zwar vorhanden aber höchstwahrscheinlich an einer anderen Stelle im System, nämlich im Leitungsnetz.

Auch die Arbeitszahl, $T_{\text{Wohnungsanschluss}}$ und E_{Zapfung} stehen unter dem Einfluss der Messunsicherheit der Temperatursensoren, doch diese Parameter sind wesentlich robuster, so dass die Arbeitszahlen untereinander verglichen werden dürfen. Es ist ersichtlich, dass das Messobjekt 3 nach dem Eingriff in das Systeme eine um 20 % verbesserte Arbeitszahl aufweist. Trotzdem liegt sie tiefer als im Messobjekt 1, was vor allem durch das lange Leitungsnetz und den entsprechend hohen Zirkulationsvolumenstrom, sowie die gestörte Speicherschichtung zu begründen ist.

Die Simulation ist frei von Messunsicherheiten und dahingehend für die Bewertung und Vergleiche von Systemen von grösserer Bedeutung.

9 Modellbildung

Im Feld finden sich einige Varianten der Brauchwarmwasserversorgung. Faktoren, wie zum Beispiel die Architektur und Topologie der Gebäude und die geplanten Investitionskosten in eine BWW-Anlage beeinflussen die Systemwahl massiv und machen einen direkten Vergleich nicht möglich.

Mit Hilfe einer Simulation sollen einige der in Kapitel 6.1 aufgeführten Varianten auf ihre Effizienz hin untersucht, beurteilt und miteinander verglichen werden. Dazu wurden im Zuge dieser Arbeit verschiedene MFH-Überbauungen definiert, um die modellierten BWW-Erwärmungssystem darauf anwenden zu können.

Der Simulationscode für eine Brauchwarmwasseranlage besteht aus der Verknüpfung der entsprechenden Wärmepumpen-, Speicher-, Verteilungs- und Steigleitungsmodelle, die im Folgenden grob beschrieben sind. Im Anhang A sind die Teilmodelle detailliert ausgeführt.

9.1 Leitungsnetz

Die nachfolgenden Leitungsdefinitionen beziehen sich auf Abbildung 23. In der Simulation sind Modelle für die Haupt-, Verteil- und Steigleitung definiert. Diese Teilmodelle lassen sich zu beliebig komplexen Leitungsnetzen verbauen. Am Wohnungsanschluss findet die Zapfung jeder Wohnung über die Stichleitungen statt. Der Warmwasserbezug ist durch ein kumuliertes Zapfprofil für jede Wohnung vorgegeben.

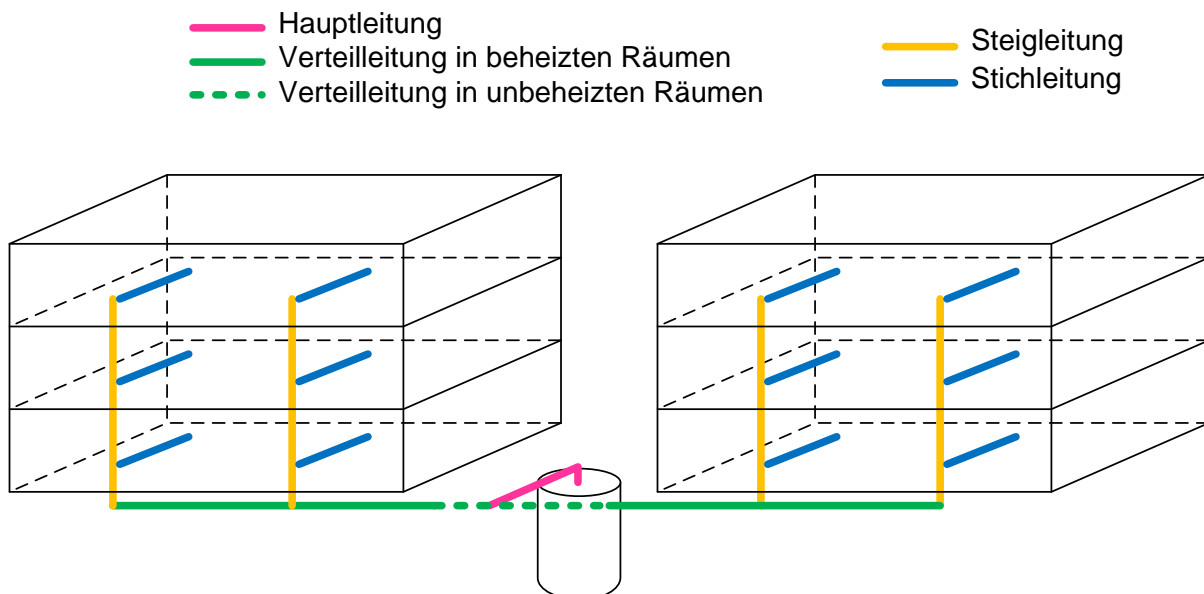


Abbildung 23: Leitungsnetz bei zentraler Brauchwarmwassererwärmung

Die Auslegung der Rohrleitung erfolgte nach den gängigen Methoden der Sanitärbranche (siehe Anhang J). Die Dämmqualität wurde in 3 Fällen (gut, mittel, schlecht) variiert. Im

Modell wird der Wärmeverlust von Rohrleitungen nur über den thermischen Widerstand der Isolation berechnet. Der Wärmeübergang der Isolationsoberfläche zur Umgebung wurde vernachlässigt. Eine Berücksichtigung des konvektiven Wärmeübergangs von Isolationsoberfläche zu Umgebung als seriellen thermischen Widerstand würde den Wärmeverlust etwas mindern. Rohrbefestigungen, Armaturen, Unvollkommenheit der Isolation usw. führen andererseits zu einem erhöhten Wärmeverlust. Es wurde angenommen, dass beide Faktoren in etwa denselben Einfluss auf den Wärmeverlust haben und damit für eine reelle Abbildung vernachlässigt werden können.

9.1.1 Zapfprofil

Die Simulationen haben Zapfprofile zur Basis, welche mit Hilfe des Programms DHWcalc von *Jordan und Vajen (2003)* erzeugt wurden. Jeder Wohnung wird für jeden Tag ein Zapfprofil aus einem Set von 40 Werktag-Zapfprofilen und 16 Wochenend-Zapfprofilen zugeordnet. Bei einer ungenügenden Anzahl Zapfprofile ergeben sich statistisch gesehen zu grosse Spitzenbezüge, die mit der Realität nicht übereinstimmen. Der Umfang des Sets ergab sich aus dem Gedanken ein Mehrfamilienhaus mit 8 Wohnungen über den Zeitraum von einer Woche mit täglich unterschiedlichen Zapfprofilen abzubilden. Durch die grosse Anzahl der Zapfprofile und ihre Zuteilung auf die Wohnungen wird ein realistisches Verbraucherverhalten erreicht. Zwei solche Profile zeigt die Abbildung 24. Bei grossen Objekten mit vielen Wohnungen kann jedoch vorkommen, dass dasselbe Zapfprofil mehrmals verwendet wird. Damit es dabei zu keinen unrealistischen Spitzenbezügen kommt, erhalten die Zapfprofile bei jeder weiteren Zuordnung einen Zeitversatz im Bereich von -12...12 min. Auf den Brauchwarmwasserspeicher wirkt das aufsummierte Zapfprofil aller Wohnungen. Abbildung 25 vergleicht das theoretische, kumulierte Zapfprofil von 48 Wohnungen mit einem Zapfprofil des Messobjekts 1. Im Trend sind beide Profile sehr ähnlich mit vermehrtem Warmwasserbezug morgens und abends. Die Abbildung vermittelt den Eindruck, dass der gesamte Warmwasserverbrauch beim theoretischen Profil weit grösser ist als beim gemessenen. Dies kommt daher, dass das theoretische Profil aus eher kürzeren Zapfungen mit hohem Volumenstrom besteht. Das gemessene Profil hingegen weist kleinere Volumenströme auf, doch dafür ist die Zapfdauer meist etwas länger. So liegt der Gesamtwasserbezug beim gemessenen Profil in diesem Fall um ca. 5 % höher als im Modell. Insgesamt stimmt die Konfiguration der erzeugten Einzelzapfungen sehr gut mit der Messung am Messobjekt 1 überein.

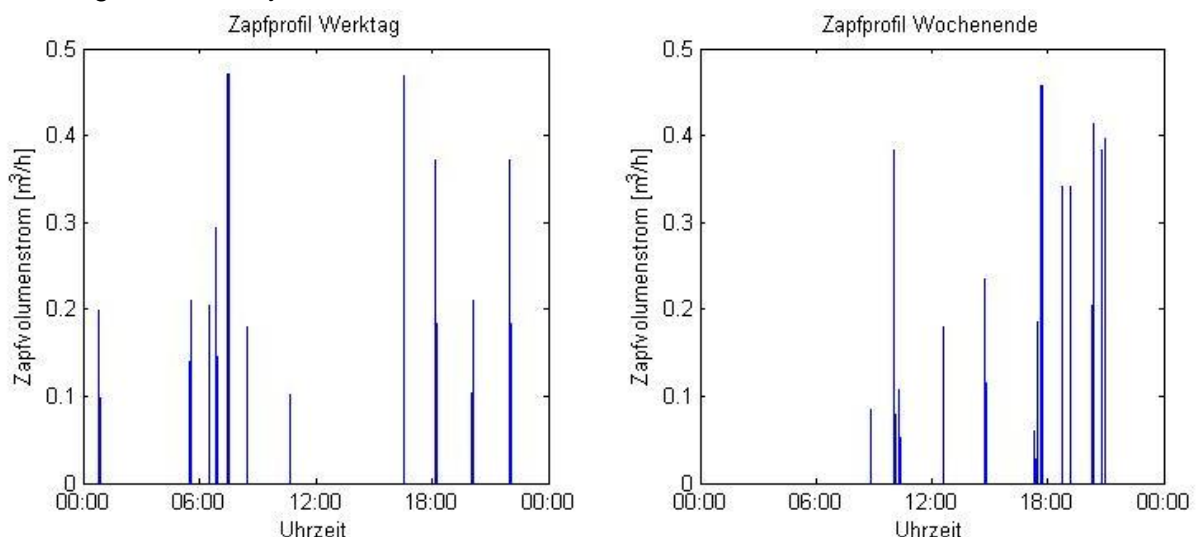


Abbildung 24: Zapfprofile für eine Wohnung mit ca. 90 Liter Warmwasserbedarf (entspricht ca. 2.3 Personen, Kapitel 11)

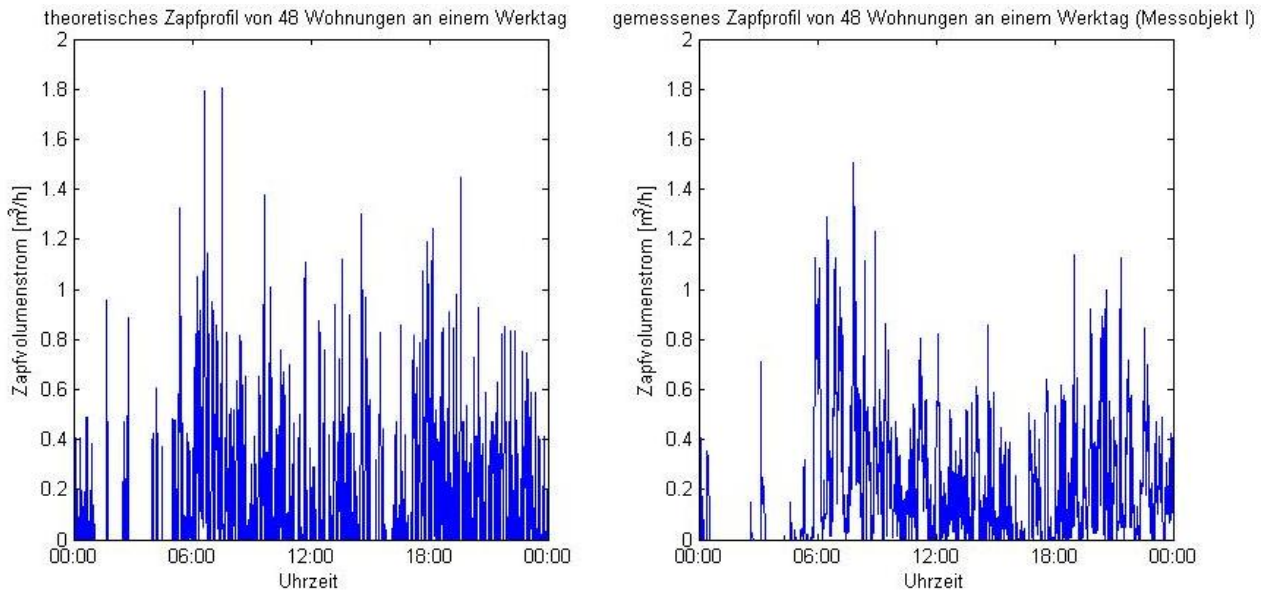


Abbildung 25: Theoretisches und gemessenes Zapfprofil von 48 Wohnungen (Messobjekt 1)

9.2 Programmablauf

Nach der Initialisierung sind für alle Modelle die Startwerte zum Berechnen des ersten Zeitschrittes gegeben. Danach werden Ursprungswerte, worauf sich gewisse Formeln beziehen rückgeführt und durch das Ergebnis der neuen Zeitschrittkalkulation ersetzt. Für die Simulation wurde ein quasistatisches Modell mit fixer Zeitschrittweite erstellt. Als Lösungsalgorithmus wurde eine Forward Time Step Methode implementiert. Um den Berechnungsaufwand klein zu halten wurde auf die Implementierung einer Central Time Step Methode verzichtet. Dies ist möglich, da es sich um ein stabiles System handelt, wie eine Sensitivitätsanalyse zeigte (Tabelle 9)

Tabelle 9: Auswertung der Sensitivitätsanalyse bezüglich Zeitschrittweite (k. K. = keine Konvergenz)

Zeitschrittweite Δt [s]	10	5	2	1	0.5	0.2	0.1
E_{zirk} [kWh]	k.K.	k.K.	406.765	406.844	406.867	406.882	406.887
rel. Änderung zum vorherigen Δt	-	-	-	0.019 %	0.00565 %	0.00369 %	0.00123 %

Aufgrund der Sensitivitätsanalyse wurde für alle Simulationen ein Zeitschritt von 1 s eingesetzt.

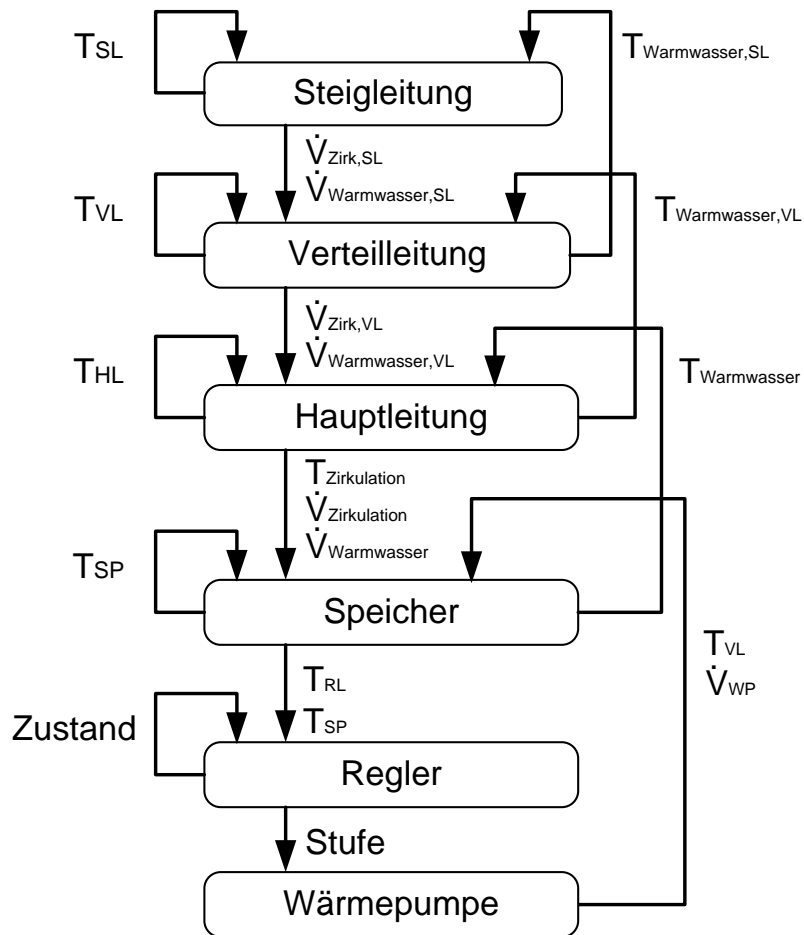


Abbildung 26: Ablauf des Simulationscodes

10 Verifikation des Simulationsmodells

Zur Verifikation des Codes diente das Messobjekt 1, für welches mittels Feldmessung und Online-Monitoring umfassende Daten gewonnen wurden. Die gemessenen Zapfprofile des Messobjekts 1 werden als Eingangsparameter auf die Simulation angewendet. Eine Nachbildung des Regelalgorithmus schaltet virtuell die Wärmepumpe in der entsprechenden Stufe.

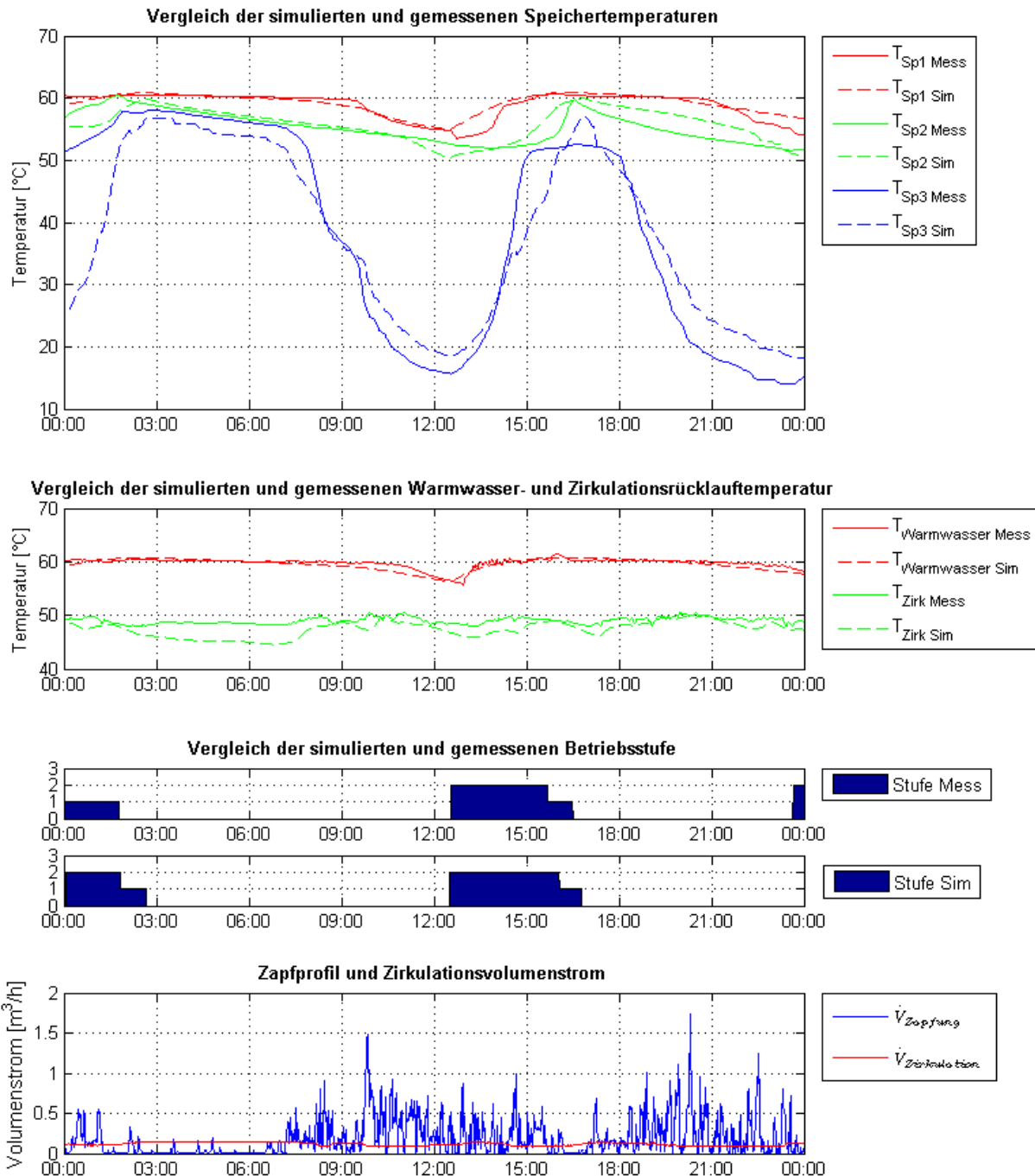


Abbildung 27: Vergleich der Simulation mit der Messung anhand des Simulationstages 08.05.2011

Die Abbildung 27 verdeutlicht, dass die erarbeiteten Modelle sehr gut mit der Realität übereinstimmen. Die Abweichungen bezüglich simulierten Temperaturen und Energien zu den gemessenen Werten liegen unter 10 %, wie in Tabelle 10 dargestellt.

Tabelle 10: Vergleich der Simulations- und Messwerte anhand des Simulationstages
08.05.2011

	Messung	Simulation	Abweichung
Temperaturen			
Warmwasser aus [°C]	59.6	59.5	-0.1°C
Zirkulationsrücklauf [°C]	48.92	47.13	- 1.79°C
Speicher oben [°C]	58.63	59.08	0.45°C
Speicher mitte [°C]	54.41	55.51	1.1°C
Speicher unten [°C]	34.52	36.72	2.2°C
Energiekennzahlen			
rel. thermische Energie [kWh/m ³]	67.39	67.98	+ 0.9 %
rel. elektrische Energie [kWh/m ³]	19.85	21.2	+ 6.8 %
Scheinverlust			
gemittelte Scheinverlustleistung [kW]	1.466	1.602	+ 9.3 %
rel. Scheinverlust [W/m (Doppelrohr)]	5.78	6.32	+ 9.3 %
Betriebszeiten			
Betrieb Stufe 1 [h]	3.06	2.82	- 7.9 %
Betrieb Stufe 2 [h]	5.03	5.37	+ 6.7 %

Die Temperaturverteilung im Speicher ist sehr sensibel und entsprechend schwierig zu modellieren. Schon kleine Abweichungen der Schichttemperatur führen zu einer zur Realität zeitversetzten Auslösung der Ladung. Auch die Dauer der Nachladung hängt von den Speichertemperaturen ab. Die Abweichung der gemittelten Verlustleistung entstammt höchstwahrscheinlich einer unterschiedlichen Umgebungstemperatur zwischen Modell und Realität und einer Abweichung zwischen modellierter und tatsächlicher Isolation der Leitungen. Da sich Umgebungstemperatur und Isolationsstärke auf alle untersuchten Varianten ähnlich auswirken, ist das Simulationsmodell für eine parametrische Studie geeignet.

11 Virtuelle Überbauungen

11.1 Topologie

Weder das Bundesamt für Statistik (BFS), noch der Immobilienbeobachter Wüest&Partner führen Statistiken, welche Mehrfamilienüberbauungen hinreichend genau beschreiben. Aus der Gebäude- und Wohnungsstatistik 2009 *BFS (2011)* des BFS geht jedoch hervor, dass das durchschnittliche Mehrfamilienhaus 5.4 Wohnungen à 98 m² (abgeleitet aus *Vogelsanger (2008)*). Das *statistische Amt des Kantons Zürich (2011)* ermittelte 6.45 Wohnungen pro MFH. Dennoch fehlen Angaben zu Mehrfamilienüberbauungen. Daher wurden die Verträge aus dem Energiecontracting der EKZ durchgearbeitet, um selbst eine kleine Statistik zu erstellen. Aus der Datenerhebung lassen sich folgende Werte bestimmen.

Tabelle 11: Auswertung der Contractingverträge

	Durchschnitt	Am Häufigsten	Am Grössten
MFH pro Überbauung	3.8	2	15
Wohnungen pro MFH	7.2	6	9.53
Wohnungen pro Überbauung	27.5	12	143

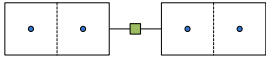
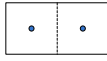
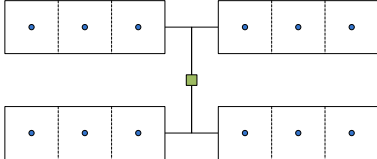
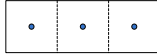
Die Auswertung stützt sich auf die Verträge, welche mit den entsprechenden Informationen über Anzahl Gebäude und Wohnungen versehen waren. So ergibt sich aus einem Set von 91 Verträgen eine durchschnittliche Überbauung mit 3.8 Gebäuden und je 7.2 Wohnungen pro Gebäude. Mit dem Trend zum verdichteten Bauen wird bei den Neubauten die Anzahl Wohnungen pro Gebäude etwas höher liegen. Diesen Umstand versuchte man in der Festlegung der Simulationsgebäude zu berücksichtigen. Die zusätzliche Beschreibung der Gebäudeanordnung ermöglichte das Festlegen der Leitungslängen. Folgende Annahmen gelten für die Überbauungen:

- Wohnungsgrösse: 100 m²/Whg (10 m x 10 m)
- Abstand zwischen den Gebäuden (West-Ost-Achse): 10 m
- Abstand zwischen den Gebäuden (Nord-Süd-Achse): 20 m
- Stockwerkhöhe: 3 m
- Leitungslänge in der Zentrale: 5 m
- Belegungsdichte: 2.3 Personen/Whg
- Verbrauch für Boilerauslegung: ca. 40 l/Person

Die virtuellen Überbauungen sind in Bezug auf Anordnung und Architektur geometrisch günstig ausgeführt. Zwei Faktoren beeinflussten diesen Entscheid:

- Vermehrt werden Gebäude nach Minergie oder Minergie-P-Standards gebaut. Die Anforderungen an die spezifische Heizenergie von 10 W/m² gemäss *BFE und Verein Minergie (2010)* sind nicht mehr einfach zu erfüllen. Das Verhältnis von Aussenhüllfläche zur Energiebezugsfläche (Summe aller Geschossflächen die beheizt/klimatisiert sind) eines Gebäudes wird eine immer entscheidendere Kennzahl. Die Bemühungen gehen dahin, diese Kennzahl klein zu halten – ein Gebäude möglichst würfel- oder quaderförmig zu bauen, ist die beste Lösung.
- Wer eine energieeffiziente Versorgung von Gebäuden plant, sei dies in Bezug auf Sanitär oder Heizung, muss sich im Klaren darüber sein, dass eine verdichtete Anordnung und Ausrichtung der Gebäude die Grundlage dafür darstellt. Diese Grundlage setzt die Studie voraus.

Tabelle 12: Topologiematrix

	Zentral	Dezentral	
	4 Whg/MFH (2 Stockwerke)		
2 MFH	 <p>Hauptleitung: 15 m Verteilung: 30 m Steigleitung: 18 m Wohnfläche: 800 m² Zentral-WP: 6 kW Warmwasserbedarf pro Tag: 705 l</p>	 <p>Verteilung: 15m Steigleitung: 9 m Wohnfläche: 400 m² Dezentral-WP: 4 kW Warmwasserbedarf pro Tag: 345 l</p>	
	<p>Zirkulation: Zirk-Leitung: 63 m Speicher: 800 l Netzvolumen: 38.7 l Netzoberfläche: 8.3 m²</p>	<p>Begleitheizung/ Zirkulations-WP: Speicher: 640 l Netzvolumen: 31.3 l Netzoberfläche: 5.4 m²</p>	<p>Zirkulation: Zirk-Leitung: 24 m Speicher: 500 l Netzvolumen: 13.8 l Netzoberfläche: 3.1 m²</p>
	12 Whg/MFH (4 Stockwerke)		
4 MFH	 <p>Hauptleitung: 55 m Verteilung: 100 m Steigleitung: 126 m Wohnfläche: 4800 m² Zentral-WP: 40 kW Warmwasserbedarf pro Tag: 4233 l</p>	 <p>Verteilung: 25 m Steigleitung: 31.5 m Wohnfläche: 1200 m² Dezentral-WP: 10 kW Warmwasserbedarf pro Tag: 1037 l</p>	
	<p>Zirkulation: Zirk-Leitung: 281 m Speicher: 5000 l Netzvolumen: 221.9 l Netzoberfläche: 40.4 m²</p>	<p>Begleitheizung/ Zirkulations-WP: Speicher: 4000 l Netzvolumen: 186.2 l Netzoberfläche: 27.1 m²</p>	<p>Zirkulation: Zirk-Leitung: 56.5 m Speicher: 1200 l Netzvolumen: 37.5 l Netzoberfläche: 7.6 m²</p>

24 Whg/MFH (6 Stockwerke)				
8 MFH				
	Hauptleitung: 135 m Verteilleitung: 280 m Steigleitung: 528 m Wohnfläche: 19200 m ² Zentral-WP: 160 kW Warmwasserbedarf pro Tag: 16931 l		Verteilleitung: 45 m Steigleitung: 66 m Wohnfläche: 2400 m ² Dezentral-WP: 18 kW Warmwasserbedarf pro Tag: 2071 l	
	Zirkulation: Zirk-Leitung: 943 m Speicher: 20000 l Netzvolumen: 1030.4 l Netzoberfläche: 151m ²	Begleitheizung/ Zirkulations-WP: Speicher: 16000 l Netzvolumen: 891.6 l Netzoberfläche: 106 m ²	Zirkulation: Zirk-Leitung: 101 m Speicher: 2500 l Netzvolumen: 82.4 l Netzoberfläche: 14.6m ²	Begleitheizung/ Zirkulations-WP: Speicher: 2000 l Netzvolumen: 70.7 l Netzoberfläche: 10.2m ²

Die weitere Bezeichnung der Topologien erfolgt beispielsweise nach dem Code H4W12, also 4 Häuser mit je 12 Wohnungen.

12 Simulationssysteme und Resultate

Aus den zusammengetragenen Systemvarianten und –ideen wurden die interessantesten und vielversprechendsten Anlagen für die Simulation ausgewählt. Die Auswahl erfolgte aufgrund von Handrechnungen und im Gespräch mit Fachleuten. Der Zirkulationskreis sämtlicher Systeme wurde als Parallelrohranordnung modelliert und simuliert. Die Autoren verzichteten bewusst darauf, die beste Zirkulationsanordnung (RaR) für Vergleiche heranzuziehen, sondern verwenden die am häufigsten eingesetzte Variante.

Die Systeme werden für einen Betriebszeitraum von 7 Tagen simuliert. Die Simulation startet mit einem vollständig geladenen Speicher mit einer linearen Temperaturverteilung von 60°C oben bis 56°C unten. Am Ende des siebten Tages wird der Speicher wieder auf seinen Initialzustand gebracht und die dafür benötigte Wärmeenergie in der Auswertung berücksichtigt. Auf diese Weise ist die Vergleichbarkeit über alle Systeme gegeben. Dieses Kapitel berücksichtigt hauptsächlich die energetischen Kennzahlen der Anlagen, eine Gesamtbewertung wird in Kapitel 13 durchgeführt. Als Ladestrategie wurde mit Ausnahme des Systems „Ladung via Nahwärmenetz“ die Schichtladung vorausgesetzt, da diese über die gesamte Betriebsdauer hohe Temperaturen im Speicherkopf gewährleistet.

Detaillierte Simulationsergebnisse für die hier im Überblick behandelten Anlagen befinden sich im Anhang L.

Tabelle 13: Variablenmatrix der Resultate

Kürzel	Beschreibung
$E_{\text{Zapfung}} [\text{kWh/m}^3]$	gezapfte Wärmeenergie pro m^3 BWW
$E_{\text{Schein}} [\text{kWh/m}^3]$	Scheinverlust pro m^3 BWW
$E_{\text{Heizband}}/E_{\text{ZirkWP,thermisch}} [\text{kWh/m}^3]$	Wärmeenergie pro m^3 BWW
$E_{\text{Verlust,Zentrale}} [\text{kWh/m}^3]$	Wärmeverlust in der Zentrale pro m^3 BWW
$\text{COP}_{\text{ZirkWP}}$	Leistungszahl der Zirkulationswärmepumpe
$\text{COP}_{\text{BwwWP}}$	Leistungszahl der BWW-Wärmepumpe
$\text{COP}_{\text{Heizung+BWW}}$	bei kombinierten Systemen: COP wenn BWW und Heizung betrieben werden
$E_{\text{WP,Heizung+BWW}} [\text{kWh/m}^3]$	bei kombinierten Systemen: Wärmeenergie der Wärmepumpe wenn BWW und Heizung betrieben werden
$\text{COP}_{\text{Heizung}}$	bei kombinierten Systemen: COP wenn nur Heizung betrieben wird
$E_{\text{WP,Heizung}} [\text{kWh/m}^3]$	bei kombinierten Systemen: Wärmeenergie der Wärmepumpe wenn nur Heizung betrieben wird
$E_{\text{el,BWW}} [\text{kWh/m}^3]$	bei kombinierten Systemen: elektrische Energie, welche zwecks BWW-Bereitung verbraucht wird.
$E_{\text{el,total}} [\text{kWh/m}^3]$	elektrischer Energieverbrauch der Anlage pro m^3 BWW
$\text{AZ}_{\text{Anlage}} [-]$	Arbeitszahl der BWW-Anlage

12.1 Zirkulation

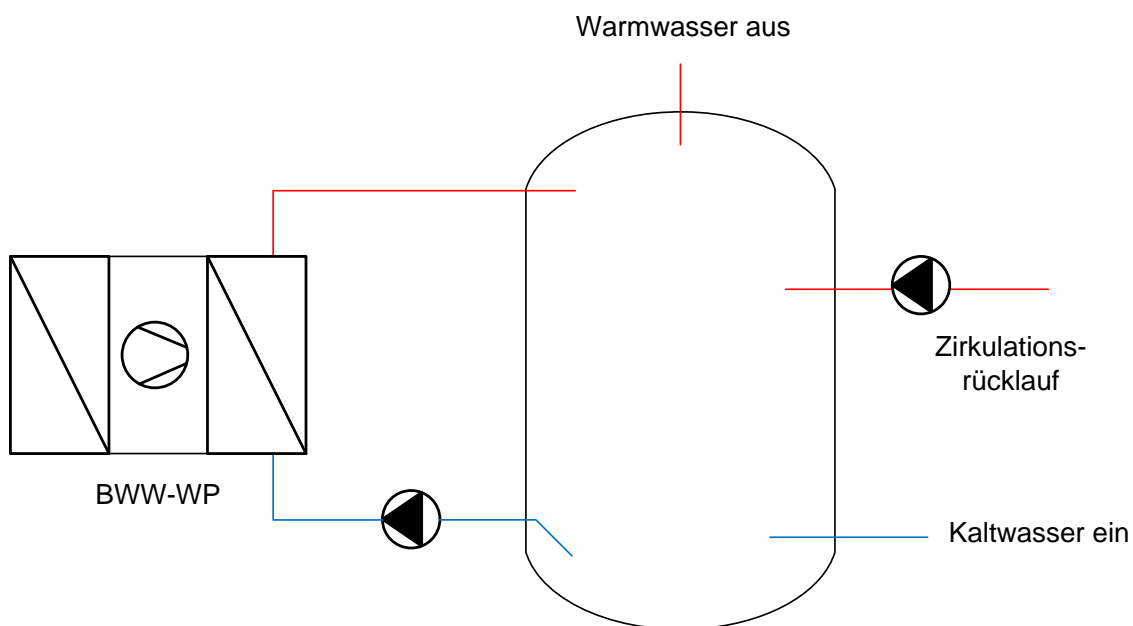


Abbildung 28: Schema des Zirkulationsmodells

Wie Abbildung 28 zeigt, erfolgt die Warmhaltung durch Energiebezug aus dem Speicher. Häufig werden die Anlagen mit kontinuierlichem Zirkulationsvolumenstrom betrieben. Vereinzelt bevorzugen Betreiber einen diskontinuierlichen Betrieb der Zirkulationspumpe (Takten), um die Verluste und den elektrischen Energieeinsatz zu reduzieren. Intelligente Pumpen erkennen die Verbrauchergewohnheiten und lassen nach einer gewissen Lernphase vorausahnend nur dann Warmwasser zirkulieren, wenn ein Bezug - basierend auf den gelernten Daten – von der Steuerung für möglich gehalten wird. Diese Variante wird jedoch nicht mit einer Simulation untersucht, da in Mehrfamilienhaus-Überbauungen jederzeit und unregelmässig ein Warmwasserbezug möglich sein kann und die Lernalgorithmen der Pumpe nicht bekannt sind. Die Spreizung zwischen Warmwasservorlauf und Zirkulationsrücklauf wurde nach den Grundlagen aus *Suissetec (2003)* für 10 K berechnet. Dass die dafür vorgeschlagenen Planungswerte etwas hoch angesetzt sind, fiel bereits bei der Auswertung der Feldmessungen auf – für die gewählte Parallelrohr-Anordnung betrüge der Planungswert für den Wärmeverlust 14 W/m Doppelrohr. Dadurch, dass in der Simulation alle Dämmstärken, Wärmeleitwerte, Leitungslängen und Umgebungstemperaturen festgelegt sind, ist der Wirkverlust des Leitungsnetzes bekannt. Man entschied sich deshalb dazu, die Spreizung von $\Delta T = 10$ K für den theoretischen Wirkverlust zu berechnen. Es ist an dieser Stelle anzumerken, dass gemäss Aussagen von verschiedenen Workshopteilnehmern üblicherweise mit sehr kleinen Spreizungen geplant wird. Auch die in der Praxis eingesetzten thermischen Regulierventile sind auf kleine Spreizungen voreingestellt.

12.1.1 Kontinuierliche Zirkulation

Tabelle 14: Simulationsergebnisse für die Topologie H2W4

H2W4		Dämmung				Dämmung		
		gut	mittel	schlecht		gut	mittel	schlecht
E_{Zapfung}	Zentral	53.67	53.62	53.28	Dezentral	54.00	53.73	53.65
E_{Schein}		14.68	18.06	22.91		11.1	13.58	17.13
$E_{\text{Verlust,Zentrale}}$		3.16	3.26	3.24		5.03	5.06	5.02
$\text{COP}_{\text{BwwWP}}$		3.32	3.29	3.25		3.36	3.34	3.3
$E_{\text{el,total}}$		22.18	23.40	25.13		21.42	22.29	23.62
$\text{AZ}_{\text{Anlage}}$		2.42	2.29	2.12		2.52	2.41	2.27

Tabelle 15: Simulationsergebnisse für die Topologie H4W12

H4W12		Dämmung				Dämmung		
		gut	mittel	schlecht		gut	mittel	schlecht
E_{Zapfung}	Zentral	54.27	54.05	53.45	Dezentral	54.18	54.10	53.67
E_{Schein}		11.03	13.00	16.24		8.64	10.22	12.78
$E_{\text{Verlust,Zentrale}}$		1.02	1.02	1.00		2.40	2.39	2.34
$\text{COP}_{\text{BwwWP}}$		3.40	3.38	3.35		3.44	3.42	3.4
$E_{\text{el,total}}$		19.74	20.39	21.47		19.39	19.92	20.69
$\text{AZ}_{\text{Anlage}}$		2.75	2.65	2.49		2.78	2.72	2.59

Tabelle 16: Simulationsergebnisse für die Topologie H8W24

H8W24		Dämmung				Dämmung		
		gut	mittel	schlecht		gut	mittel	schlecht
$E_{Zapfung}$	Zentral	54.46	54.35	53.93	Dezentral	54.38	54.42	54.31
E_{Schein}		9.39	10.99	13.79		7.78	9.06	11.4
$E_{Verlust,Zentrale}$		0.61	0.60	0.634		1.54	1.58	1.64
COP_{BwwWP}		3.41	3.4	3.39		3.47	3.44	3.4
$E_{el,total}$		19.168	19.70	20.62		18.60	19.14	20.07
AZ_{Anlage}		2.84	2.76	2.62		2.92	2.84	2.71

Speicherhaushalt

Abbildung 29 zeigt den Temperaturverlauf von 20 Speicherschichten über den simulierten Zeitraum. Der Eintritt des Zirkulationsrücklaufs und dessen Einfluss auf die Speicherschichtung sind gut sichtbar. Es ist die Ansammlung der Temperaturkurven von mehreren Schichten in der Grafik. Ober- und unterhalb des durchmischten Speicherbereichs ist eine deutliche Schichtung des Speichers zu sehen.

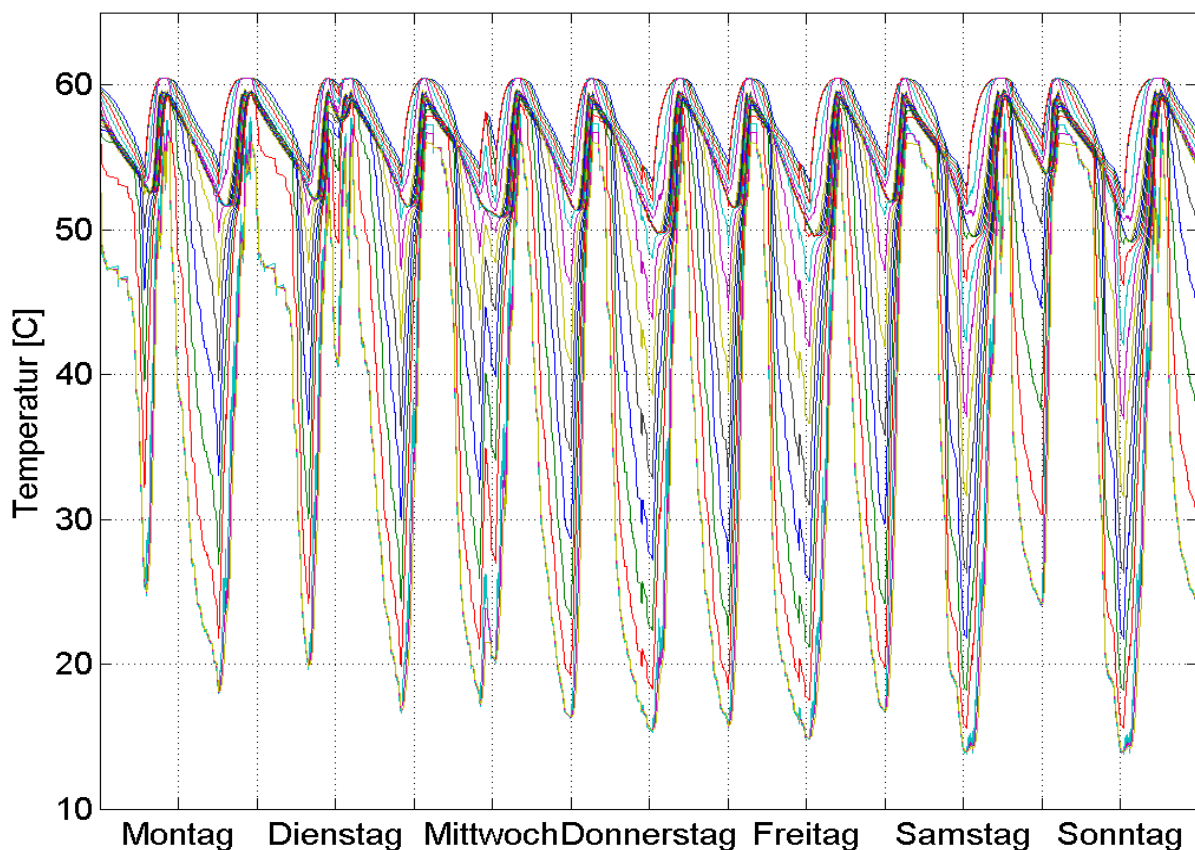


Abbildung 29: Speicherhaushalt beeinflusst durch Zirkulation (H4W12 zentral, gut gedämmt)

Im Normalfall ist die Rücklauftemperatur zum Kondensator der Wärmepumpe aus dem gemischten Speicher in der Größenordnung von 50°C anstelle der Frischwassertemperatur von ca. 10°C in einem sauber geschichteten Speicher. Bei 60°C Vorlauf steigt somit die Kondensationstemperatur im Falle des durchmischten Speichers signifikant an, wobei das erhöhte Druckverhältnis und die sinkende Unterkühlung die Leistungszahl (COP) reduzieren. Dieser Effekt wurde anhand der Daten aus den Feldmessungen am Objekt 1 untersucht. Abbildung 30 zeigt den COP der BWW-Wärmepumpe im Messobjekt in Abhängigkeit der

gemessenen Rücklauf­temperatur in den Kondensator. Die Punktwolke zeigt im Trend eine Senkung der Leistungszahl von 3.7 bei 10°C Rücklauf­temperatur auf 3.0 bei 50°C Rücklauf­temperatur am Kondensator. Der Effekt ist auch in einem Messergebnis aus dem WPZ-Bulletin (Tabelle 17) und in eigenen Messungen an der Laborwärmepumpe des IES (Tabelle 18) sichtbar. Die Daten beweisen den Stellenwert eines geschichteten Speichers, da sich der COP bei hohen Rücklauf­temperaturen am Kondensator massiv verschlechtert.

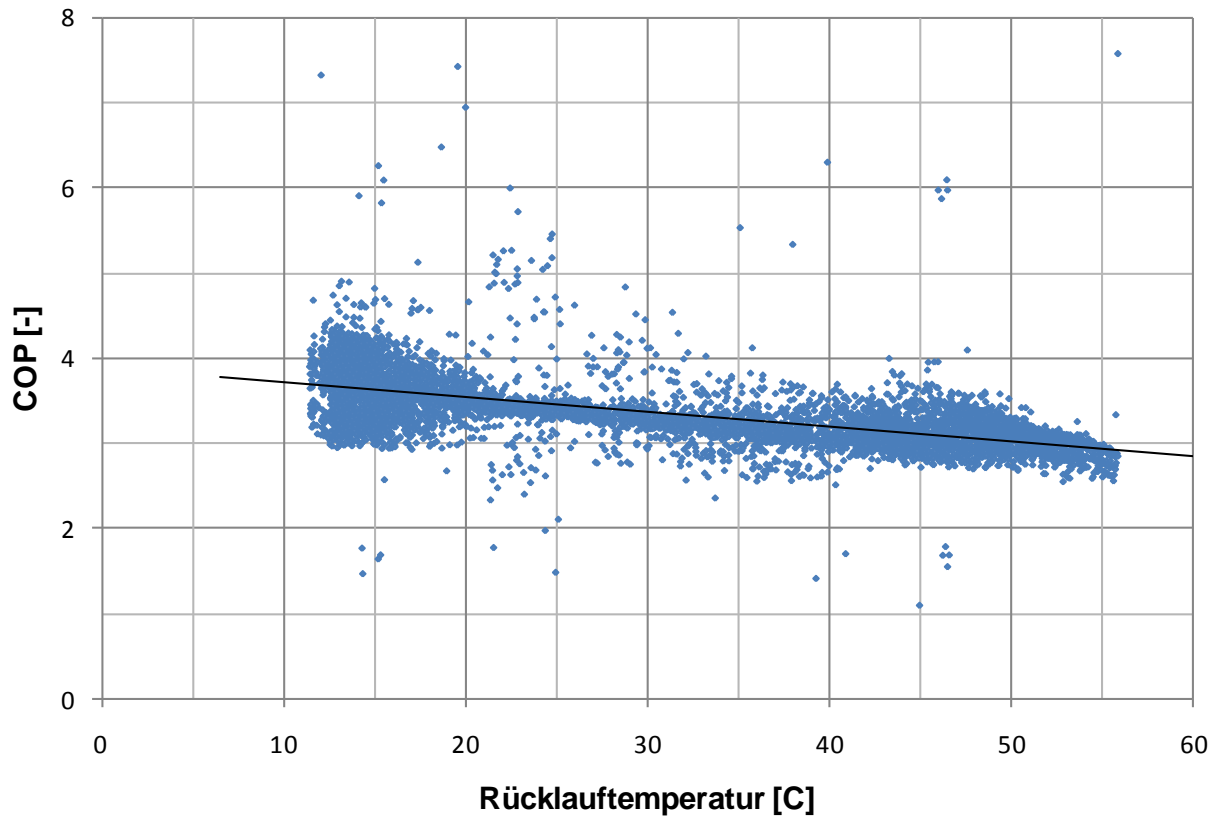


Abbildung 30: COP der WP in Abhängigkeit der Rücklauf­temperatur

Tabelle 17: Auswertung aus den Daten des WPZ Bulletin

	T_{VL} [°C]	T_{RL} [°C]	ΔT [K]	COP [-]
A2/W35-25	35	25	10	3.5
A2/W35-30	35	30	5	3.3
			-50.0%	-5.71%
B0/W35-25	35	25	10	4.6
B0/W35-30	35	30	5	4.3
			-50.0%	-6.52%

Tabelle 18: Ausmessung der Laborwärmepumpe im IES

	T_{VL} [°C]	T_{RL} [°C]	ΔT [K]	COP [-]
A20/W25-10	24.42	10.61	13.81	8.87
A20/W25-14	24.62	13.84	10.78	8.43
			-21.9%	-4.97%

Einfluss der Dämmqualität auf die Arbeitszahl der Anlage

Aus den Resultaten ist ersichtlich, dass die Arbeitszahl der Anlage bei schlechterer Dämmqualität abnimmt. Abbildung 31 veranschaulicht die Auswirkungen und zeigt, dass kleinere Objekte stärker auf den Einfluss der Dämmqualität reagieren. Überbauungen mit dezentraler Versorgung sind wiederum etwas robuster gegenüber schlechter Dämmung als die entsprechende, zentral versorgte Überbauung.

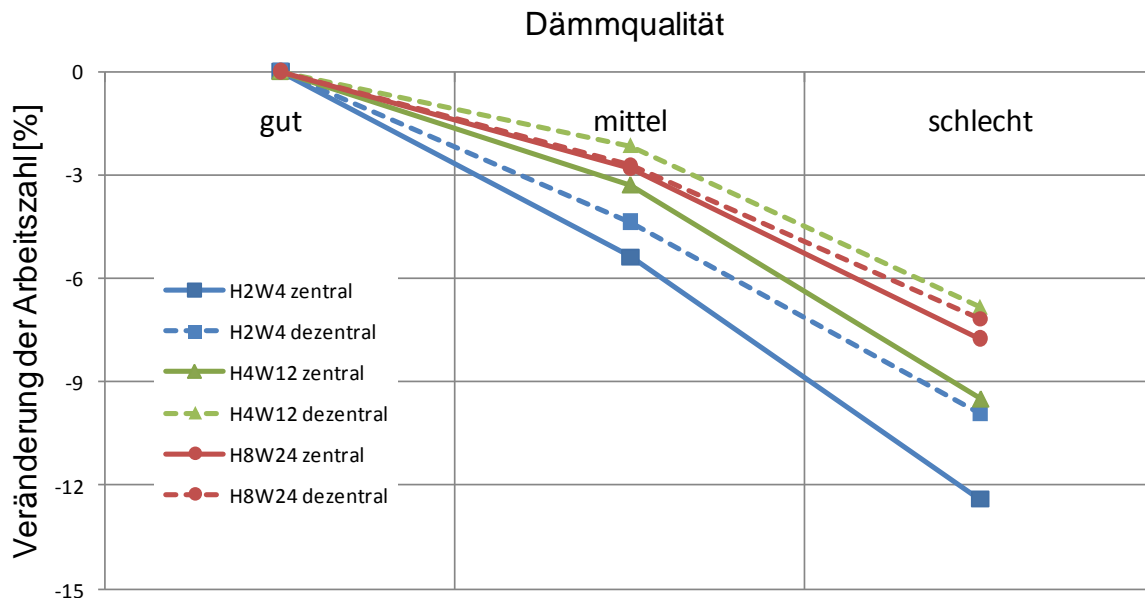


Abbildung 31: Auswirkungen der Dämmqualität auf die Arbeitszahl bei Anlagen mit Zirkulation

12.1.2 Diskontinuierliche Zirkulation

Der Taktbetrieb der Zirkulationspumpe ist in manchen Warmhaltesystemen im Feld zu beobachten. Am Messobjekt 2 wurde ein fixierter Ein/Aus-Takt von jeweils 10 min erfasst. Der Zirkulationsvolumenstrom im Umwälzbetrieb ist das Doppelte der üblichen Berechnung nach Suissetec, so dass sich erst im Mittel der gewünschte Volumenstrom für die geforderte Spreizung ergibt.

An den Resultaten von Topologie H4W12 wird ersichtlich, dass gemäss Simulation nur sehr geringfügige Veränderungen der Arbeitszahl entstehen (vgl. Tabelle 15). Die Unterschiede liegen im Bereich der Unsicherheiten des Simulationsmodells. Das Takten der Zirkulation bringt damit keine wirklichen Vorteile. Vielmehr erzeugt man thermische Schwingungen im Verteilnetz und der Speicherhaushalt wird eher durch den höheren Volumenstrom gestört.

Tabelle 19: Simulationsergebnisse für die Topologie H4W12

H4W12		Dämmung				Dämmung		
		gut	mittel	schlecht		gut	mittel	schlecht
E _{Zapfung}	Zentral	54.25	53.98	53.41	Dezentral	54.18	54.10	53.67
E _{Schein}		10.83	12.70	15.76		8.64	10.22	12.78
E _{Verlust,Zentrale}		1.16	1.26	1.38		2.39	2.34	2.40
COP _{BwwWP}		3.40	3.39	3.35		3.44	3.42	3.40
E _{el,total}		19.80	20.44	21.65		19.39	19.92	20.69
AZ _{Anlage}		2.74	2.64	2.47		2.79	2.72	2.59

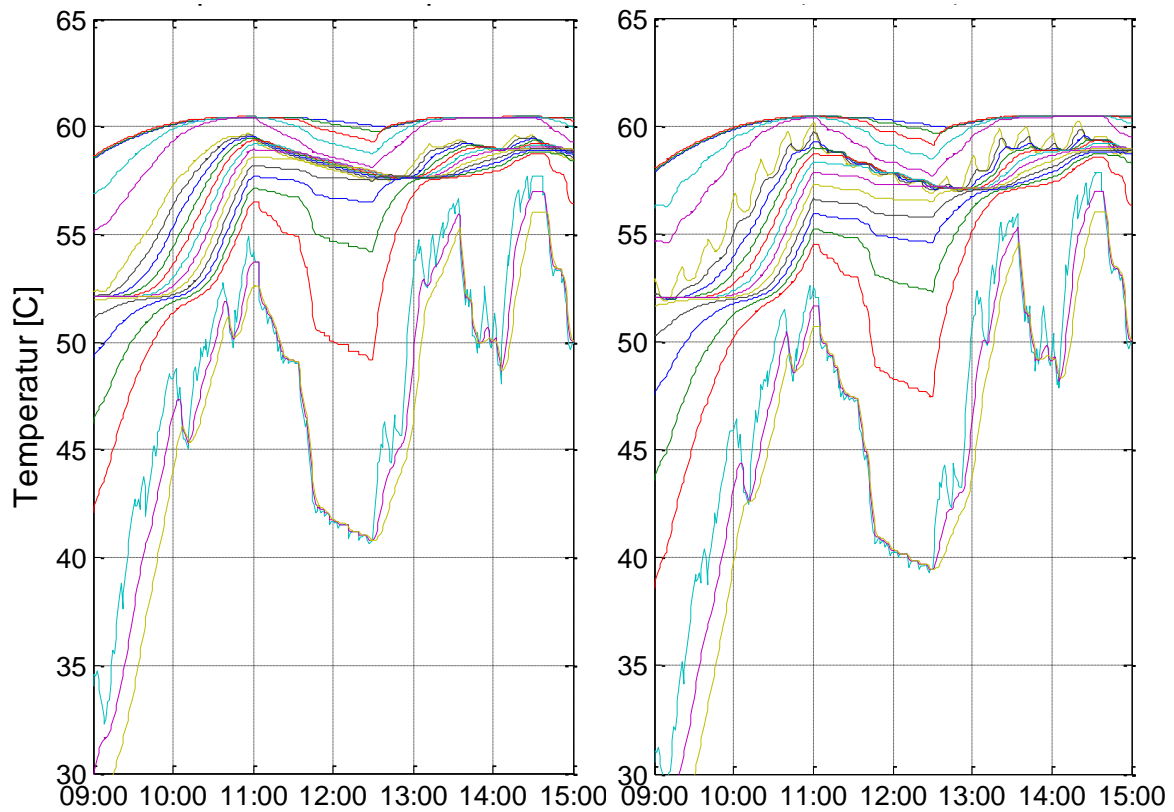


Abbildung 32: Vergleich des Speicherhaushalts bei kontinuierlicher Zirkulation (links) und bei Taktbetrieb (rechts) an H4W12 zentral.

Abbildung 32 zeigt eher geringe Auswirkungen der getakteten Zirkulation auf die Speicherschichtung. Der Einfluss ist in erster Linie nur in der Schicht, in welche der Zirkulationsrücklauf zugeführt wird, erkennbar.

12.2 Heizband

Die neben der Zirkulation am häufigsten eingesetzte Variante zur Warmhaltung von BWW ist die Begleitheizung mit elektrischem Heizband (Abbildung 33). Da es seine Heizleistung durch direkt-elektrischen Strombezug bereitstellt, wird es oftmals von vornherein als energetisch ungünstige Lösung präsentiert. Doch die Feldmessungen am Messobjekt 3 belegen einen nicht unerheblichen negativen Einfluss des Zirkulationsrücklaufs in den Speicher und die dadurch verursachte Durchmischung. Die Simulation soll ein unbefangenes Resultat der Energieeffizienz einer Anlage mit Begleitheizung erbringen.

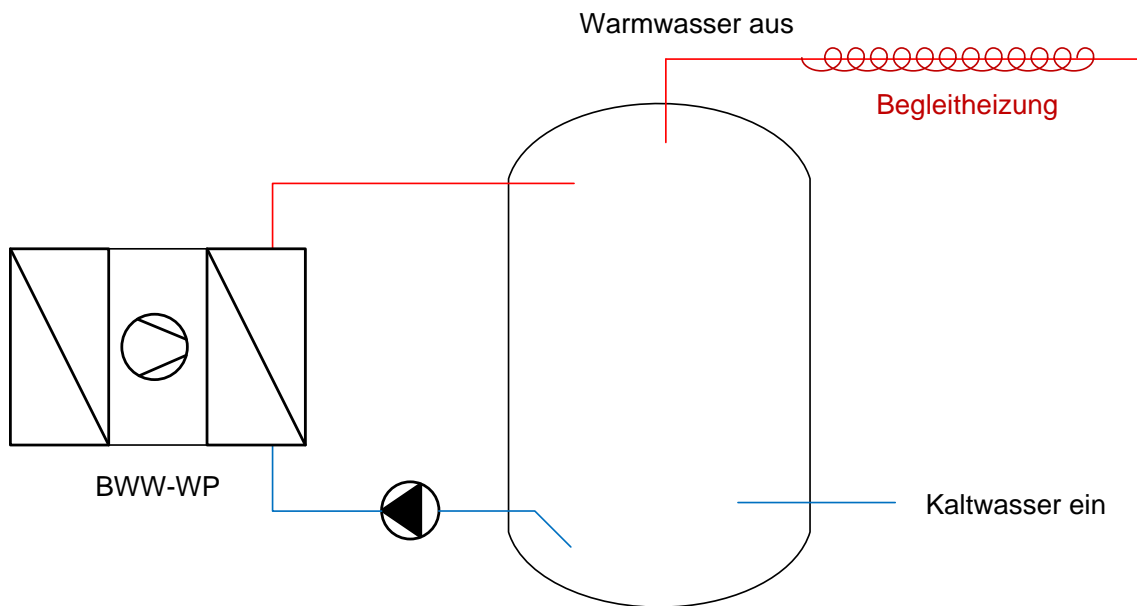


Abbildung 33: Schema der Begleitheizung mit Heizband

Tabelle 20 Simulationsergebnisse für die Topologie H2W4

H2W4		Dämmung				Dämmung		
		gut	mittel	schlecht		gut	mittel	schlecht
E_{Zapfung}	Zentral	55.52	54.49	55.38	Dezentral	55.48	54.67	55.37
E_{Heizband}		8.88	10.01	14.64		6.87	7.77	11.31
$E_{\text{Verlust,Zentrale}}$		2.43	2.43	2.43		3.93	3.93	3.93
$\text{COP}_{\text{BwwWP}}$		3.55	3.55	3.55		3.54	3.54	3.54
$E_{\text{el,total}}$		25.49	26.62	31.24		23.71	24.62	28.16
$\text{AZ}_{\text{Anlage}}$		2.18	2.05	1.77		2.34	2.22	1.97

Tabelle 21 Simulationsergebnisse für die Topologie H4W12

H4W12		Dämmung				Dämmung		
		gut	mittel	schlecht		gut	mittel	schlecht
E_{Zapfung}	Zentral	56.07	55.42	54.79	Dezentral	55.92	55.37	54.53
E_{Heizband}		6.34	6.86	8.18		5.2	5.65	6.29
$E_{\text{Verlust,Zentrale}}$		0.82	0.82	0.82		1.99	1.99	1.99
$\text{COP}_{\text{BwwWP}}$		3.58	3.58	3.58		3.55	3.55	3.55
$E_{\text{el,total}}$		22.33	22.84	24.16		21.74	22.19	22.82
$\text{AZ}_{\text{Anlage}}$		2.51	2.43	2.27		2.57	2.50	2.39

Tabelle 22 Simulationsergebnisse für die Topologie H8W24

H8W24		Dämmung				Dämmung		
		gut	mittel	schlecht		gut	mittel	schlecht
E_{Zapfung}	Zentral	56.20	55.65	54.99	Dezentral	56.02	55.58	54.79
E_{Heizband}		5.32	5.67	6.67		4.62	4.9	5.41
$E_{\text{Verlust,Zentrale}}$		0.47	0.47	0.47		1.31	1.31	1.31
$\text{COP}_{\text{BwwWP}}$		3.59	3.59	3.59		3.59	3.59	3.59
$E_{\text{el,total}}$		21.23	21.58	22.58		20.69	20.97	21.48
$\text{AZ}_{\text{Anlage}}$		2.65	2.58	2.44		2.71	2.65	2.55

Speicherhaushalt

Der grosse Vorteil der Begleitheizung liegt darin, dass die Speicherschichtung keine Störung durch die Warmhaltung erfährt. Abbildung 34 zeigt den ungestörten Verlauf der Schichttemperaturen, was insgesamt dazu führt, dass ein kleinerer Speicher verwendet werden kann. Dies reduziert die Verluste in der Zentrale, wie die Simulationsergebnisse in den Tabellen 20 bis 22 zeigen.

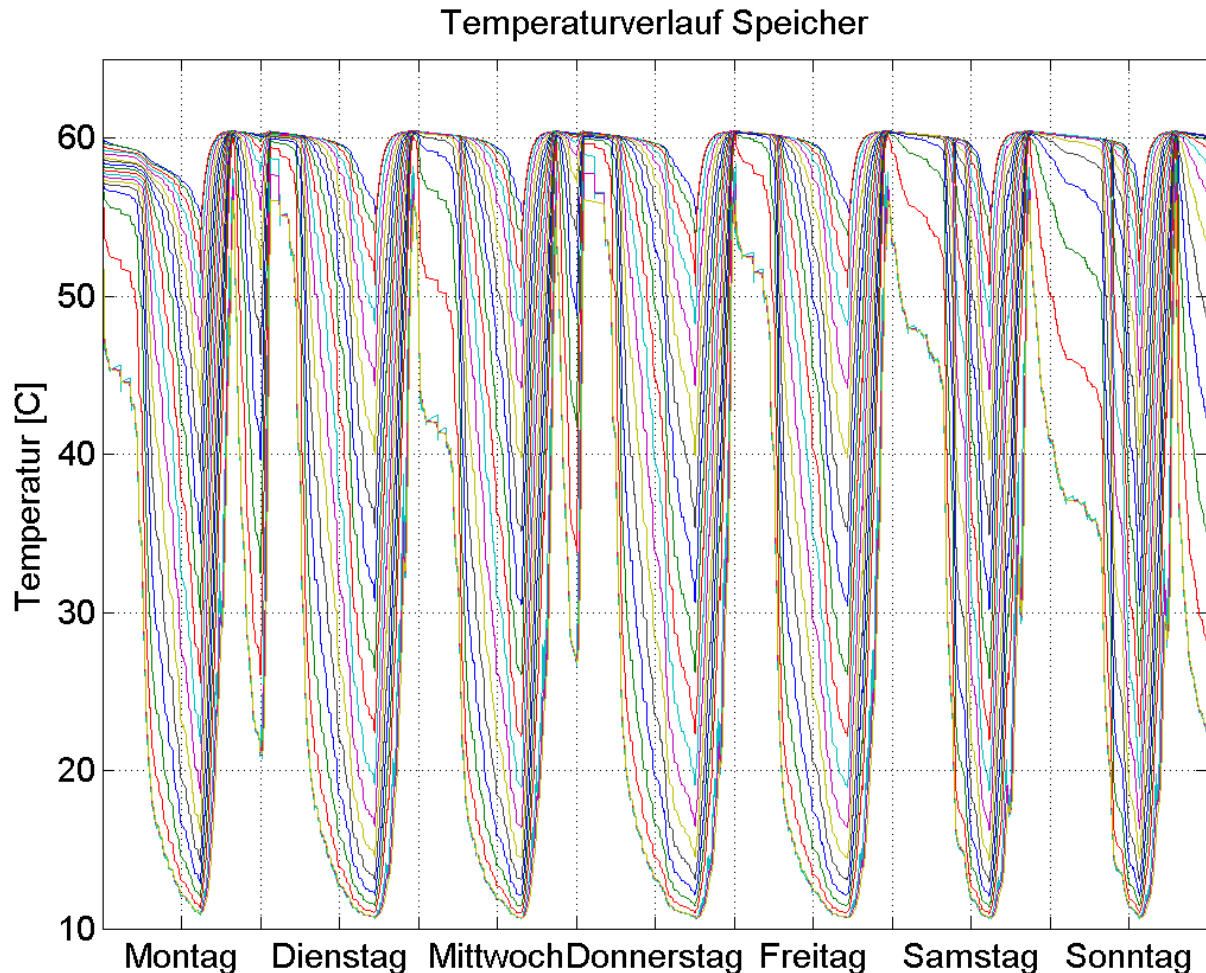


Abbildung 34: Speicherhaushalt bei Warmhaltung mit Begleitheizung (H4W12 zentral, gut gedämmt)

Ein Vergleich der Tabellen 15 bis 17 mit den Tabellen 20 bis 22 zeigt, dass die Arbeitszahl mit Begleitheizung tendenziell tiefer liegt, als bei der Zirkulation, obwohl der COP der Wärmepumpe bei der Verwendung einer Begleitheizung grösser ist. Weiters liefert das Begleitheizungssystem mehr Energie an der Zapfstelle, was beim Vergleich der Anlagen zu berücksichtigen ist. Im Kapitel 13.1 sind derartige Vergleiche aufgeführt.

Einfluss der Dämmqualität auf die Arbeitszahl der Anlage

Tendenziell ist die Beeinflussung der Anlageneffizienz ähnlich, wie beim Zirkulationssystem. Nur bei kleinen Überbauungen fällt die schlechtere Dämmung bei der Begleitheizung mehr ins Gewicht. Die Arbeitszahl reagiert mit einer Verminderung um ca. 19% bezogen auf die gut gedämmte Ausführung von H2W4.

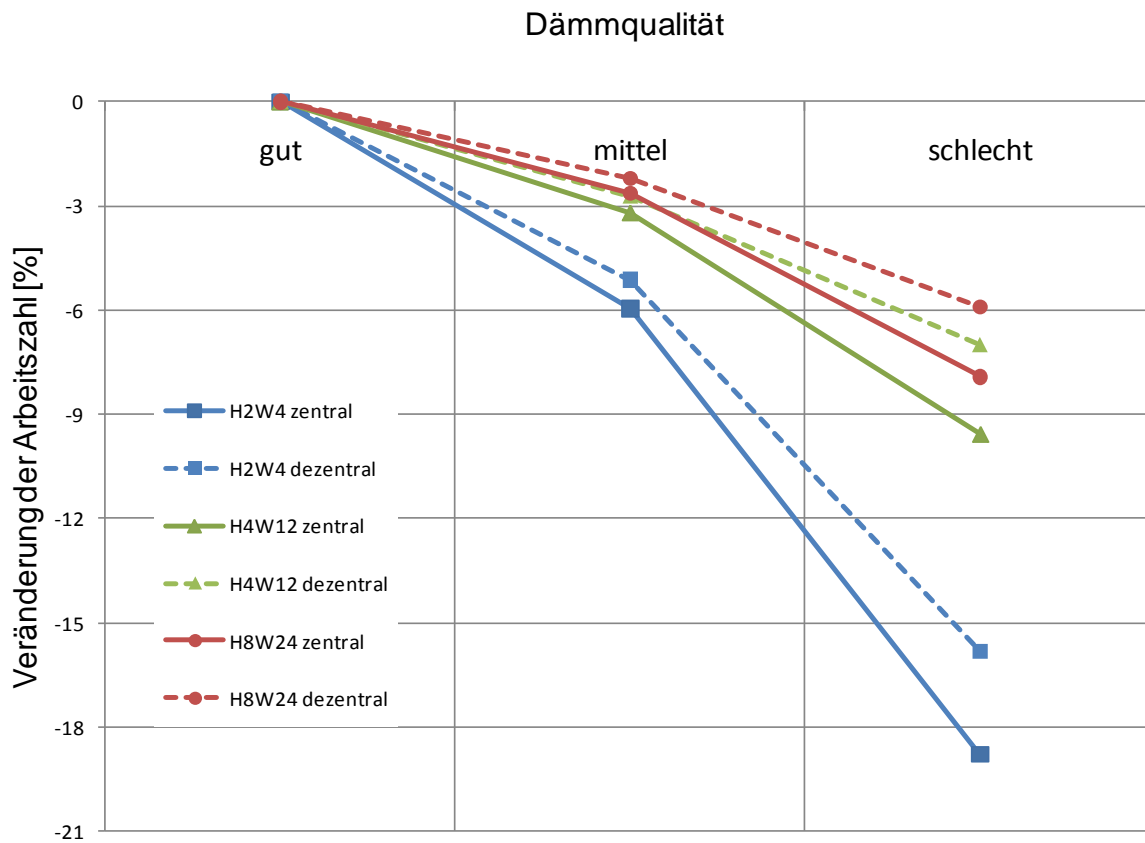


Abbildung 35: Auswirkungen der Dämmqualität auf die Arbeitszahl bei Anlagen mit Begleitheizung

12.3 Verlustdeckung mit Zirkulationswärmepumpe

Der bessere COP der WP bei Anlagen mit Begleitheizung in der Simulation beweist den hohen Stellenwert eines ungestörten Speicherhaushalts. Die Autoren versuchten zusammen mit den Fachleuten Systeme zu finden, welche den Speicherhaushalt ungestört lassen, aber die anfallenden Wärmeverluste nicht direkt-elektrisch decken. Die Feldmessungen bestätigen, dass die Wärmeverluste im Verteilnetz variieren (Abbildung 36). Dies war zu berücksichtigen und führte zu zwei Systemideen, welche die Vorzüge von Begleitheizung und Zirkulation kombinieren.

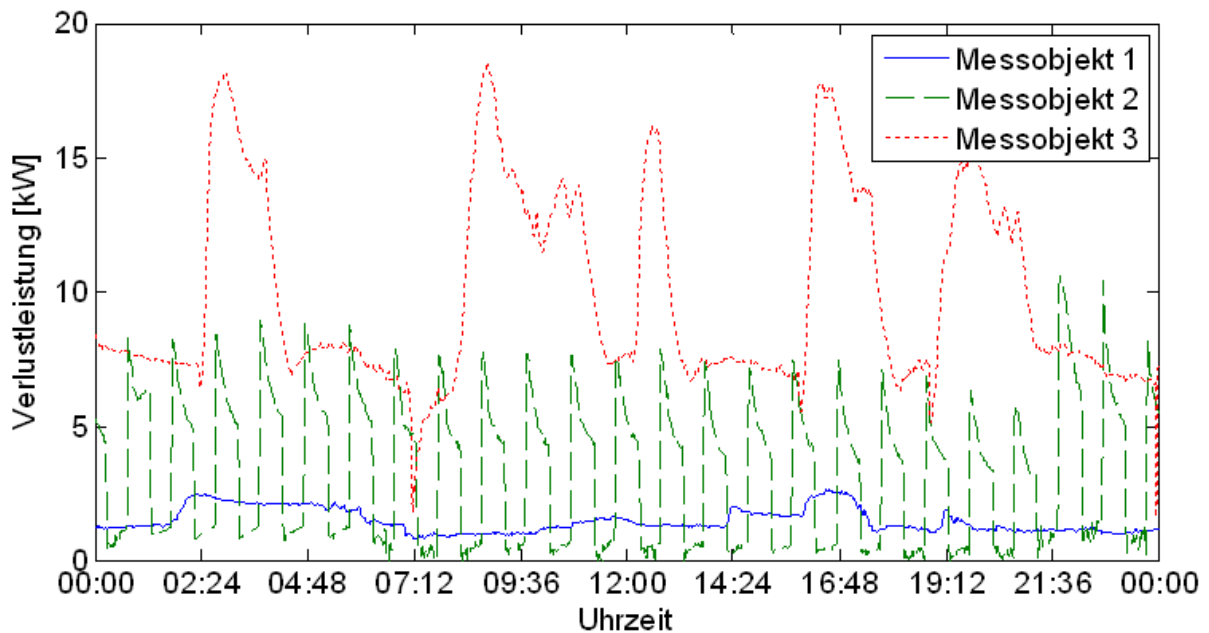


Abbildung 36: Variation des Zirkulationsverlusts

12.3.1 Modulierende Zirkulationswärmepumpe

Das Warmwasser zirkuliert im Verteilnetz. Der Rücklauf wird zurück zur Heizzentrale geführt und dort von einer modulierenden Wärmepumpe wieder auf die Vorlauftemperatur erwärmt und direkt dem Warmwasservorlauf zugeführt. Auf diese Weise wird eine Durchmischung des Speichers verhindert.

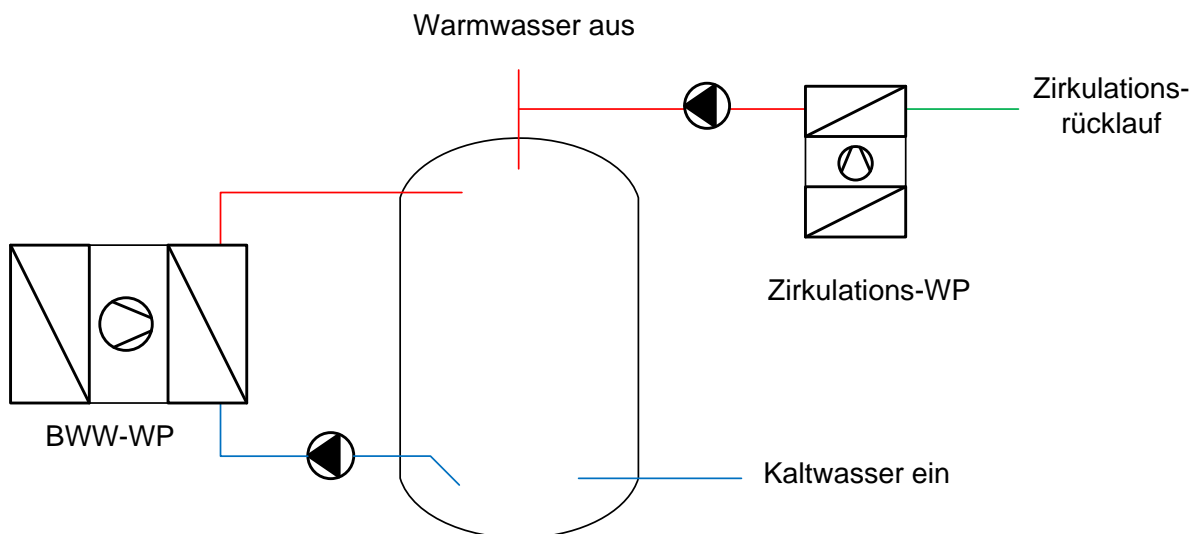


Abbildung 37: Schema – Zirkulationsdeckung mit modulierender Wärmepumpe

Tabelle 23 Simulationsergebnisse für die Topologie H2W4

H2W4		Dämmung				Dämmung		
		gut	mittel	schlecht		gut	mittel	schlecht
E _{Zapfung}	Zentral	54.38	54.22	54.06	Dezentral	54.62	54.48	54.37
E _{ZirkWP,thermisch}		14.03	17.21	21.89		10.65	13.11	16.66
E _{Verlust,Zentrale}		2.43	2.43	2.43		3.93	3.93	3.93
COP _{ZirkWP}		2.99	2.99	2.99		2.98	2.98	2.99
COP _{BwwWP}		3.55	3.55	3.55		3.54	3.54	3.54
E_{el,total}		21.47	22.54	24.10		20.76	21.59	22.77
AZ_{Anlage}		2.53	2.41	2.24		2.63	2.52	2.39

Tabelle 24 Simulationsergebnisse für die Topologie H4W12

H4W12		Dämmung				Dämmung		
		gut	mittel	schlecht		gut	mittel	schlecht
E _{Zapfung}	Zentral	54.82	54.71	54.5	Dezentral	54.92	54.83	54.69
E _{ZirkWP,thermisch}		9.90	11.79	14.97		7.95	9.48	12.02
E _{Verlust,Zentrale}		0.82	0.82	0.82		1.99	1.99	1.99
COP _{ZirkWP}		2.97	2.98	2.98		2.97	2.97	2.98
COP _{BwwWP}		3.58	3.58	3.58		3.55	3.55	3.55
E_{el,total}		19.40	20.05	21.17		19.33	19.85	20.69
AZ_{Anlage}		2.83	2.73	2.57		2.84	2.76	2.64

Tabelle 25 Simulationsergebnisse für die Topologie H4W12

H8W24		Dämmung				Dämmung		
		gut	mittel	schlecht		gut	mittel	schlecht
E _{Zapfung}	Zentral	55.07	54.94	54.72	Dezentral	55.05	54.99	54.88
E _{ZirkWP,thermisch}		8.27	9.76	12.45		7.03	8.24	10.47
E _{Verlust,Zentrale}		0.47	0.47	0.47		1.31	1.31	1.31
COP _{ZirkWP}		2.97	2.97	2.97		2.96	2.97	2.97
COP _{BwwWP}		3.59	3.59	3.59		3.59	3.59	3.59
E_{el,total}		18.83	19.38	20.39		18.50	18.91	19.69
AZ_{Anlage}		2.92	2.84	2.68		2.98	2.91	2.79

Speicherhaushalt

Analog zur Begleitheizung lässt auch die Warmhaltung mit modulierender Zirkulationswärmepumpe die Speicherschichtung ungestört.

Einfluss der Dämmqualität auf die Arbeitszahl der Anlage

Erfreulich ist die Reaktion der Anlage auf unterschiedliche Dämmqualitäten nach Abbildung 38. Im Vergleich zum traditionellen Zirkulationssysteme und der Begleitheizung ist die Anlage mit Zirkulationswärmepumpe etwas robuster gegenüber einem schlecht gedämmten Leitungsnetz in kleineren Überbauungen.

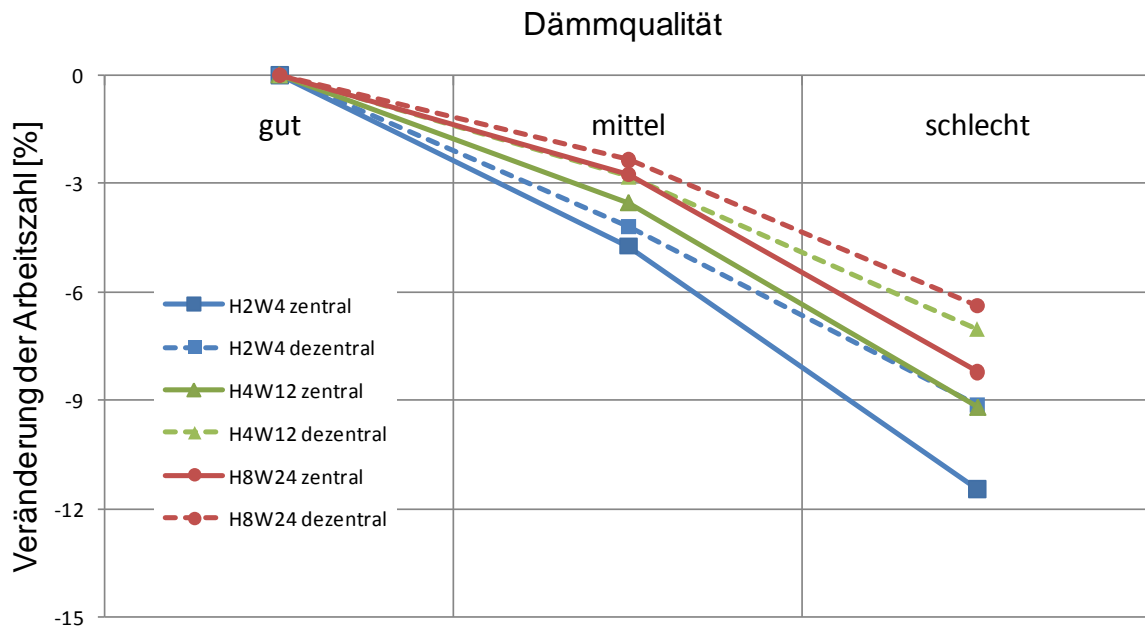


Abbildung 38: Auswirkungen der Dämmqualität auf die Arbeitszahl bei Anlagen Zirkulationswärmepumpe

12.3.2 Zirkulationswärmepumpe mit Zirkulationsspeicher

Das Problem der Anlage des vorhergehenden Absatzes 12.3.1 ist, dass die modulierende Zirkulations-WP im Dauerbetrieb arbeiten würde, was sich negativ auf die Haltbarkeit auswirkt und in einer eher kurzen Lebensdauer endet. Aus diesem Grund wurde dieses System mit einem kleiner Speicher ergänzt, welcher die Zirkulationsverlustschwankungen ausgleicht. Über diesen Speicher arbeitet eine Zirkulationswärmepumpe mit konstanter Leistung und lädt den Zirkulationspuffer regelmässig auf.

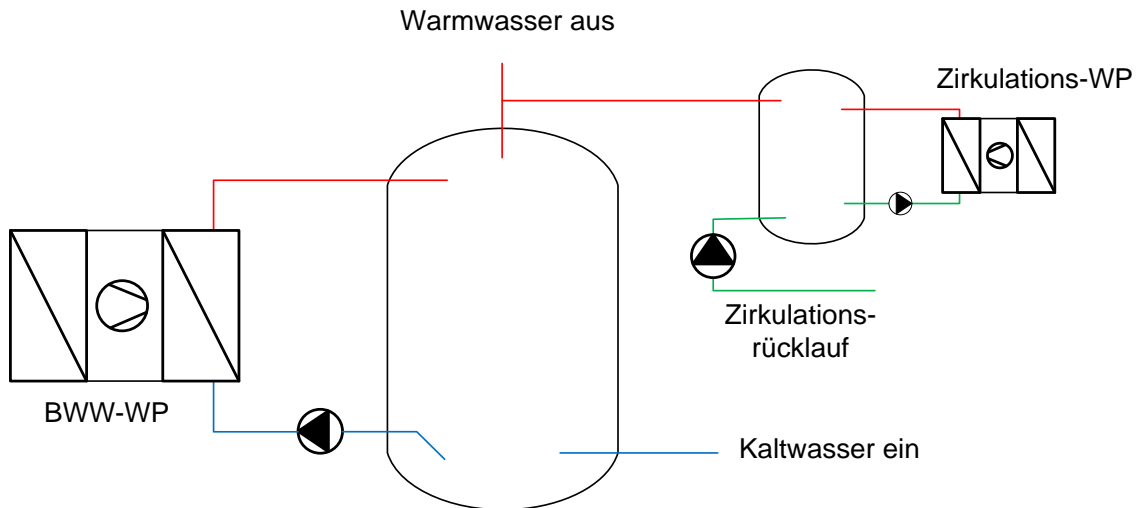


Abbildung 39: Schema – Zirkulationsverlustdeckung mit Wärmepumpe und Speicher

Tabelle 26 Simulationsergebnisse für die Topologie H2W4

H2W4		Dämmung				Dämmung		
		gut	mittel	schlecht		gut	mittel	schlecht
E_{Zapfung}	Zentral	54.74	54.61	54.48	Dezentral	54.88	54.76	54.68
$E_{\text{ZirkWP,thermisch}}$		15.38	18.75	23.67		11.94	14.6	18.33
$E_{\text{Verlust,Zentrale}}$		3.20	3.29	3.41		4.79	4.90	5.04
$\text{COP}_{\text{ZirkWP}}$		2.94	2.94	2.94		2.93	2.93	2.94
$\text{COP}_{\text{BwwWP}}$		3.55	3.55	3.55		3.54	3.54	3.54
$E_{\text{el,total}}$		22.01	23.16	24.82		21.26	22.17	23.43
AZ_{Anlage}		2.49	2.36	2.20		2.58	2.47	2.33

Tabelle 27 Simulationsergebnisse für die Topologie H4W12

H4W12		Dämmung				Dämmung		
		gut	mittel	schlecht		gut	mittel	schlecht
E_{Zapfung}	Zentral	55.21	55.13	54.97	Dezentral	55.2	55.14	55.03
$E_{\text{ZirkWP,thermisch}}$		10.72	12.71	16.08		8.81	10.49	13.2
$E_{\text{Verlust,Zentrale}}$		1.12	1.12	1.13		2.47	2.52	2.59
$\text{COP}_{\text{ZirkWP}}$		2.93	2.93	2.93		2.92	2.93	2.93
$\text{COP}_{\text{BwwWP}}$		3.58	3.58	3.58		3.55	3.55	3.55
$E_{\text{el,total}}$		19.73	20.43	21.63		19.67	20.24	21.16
$\text{AZ}_{\text{Anlage}}$		2.80	2.70	2.54		2.81	2.73	2.60

Tabelle 28 Simulationsergebnisse für die Topologie H4W12

H8W24		Dämmung				Dämmung		
		gut	mittel	schlecht		gut	mittel	schlecht
E_{Zapfung}	Zentral	55.45	55.35	55.17	Dezentral	55.34	55.3	55.22
$E_{\text{ZirkWP,thermisch}}$		8.92	10.42	13.27		7.77	9.06	11.44
$E_{\text{Verlust,Zentrale}}$		0.56	0.56	0.56		1.65	1.68	1.73
$\text{COP}_{\text{ZirkWP}}$		2.92	2.92	2.93		2.92	2.92	2.92
$\text{COP}_{\text{BwwWP}}$		3.59	3.59	3.59		3.59	3.59	3.59
$E_{\text{el,total}}$		19.10	19.66	20.73		18.79	19.23	20.08
$\text{AZ}_{\text{Anlage}}$		2.90	2.82	2.66		2.95	2.88	2.75

Speicherhaushalt

Analog zur Begleitheizung lässt auch die Warmhaltung mit Zirkulationswärmepumpe und Pufferspeicher die Schichtung im BWW-Speicher ungestört.

Einfluss der Dämmqualität auf die Arbeitszahl der Anlage

Auch dieses System zeigt sich besonders bei kleineren Überbauungen robuster gegenüber der Dämmqualität des Verteilnetzes verglichen mit der traditionellen Zirkulation und Begleitheizung. Bei grösseren Überbauungen schneidet es jedoch leicht schlechter ab.

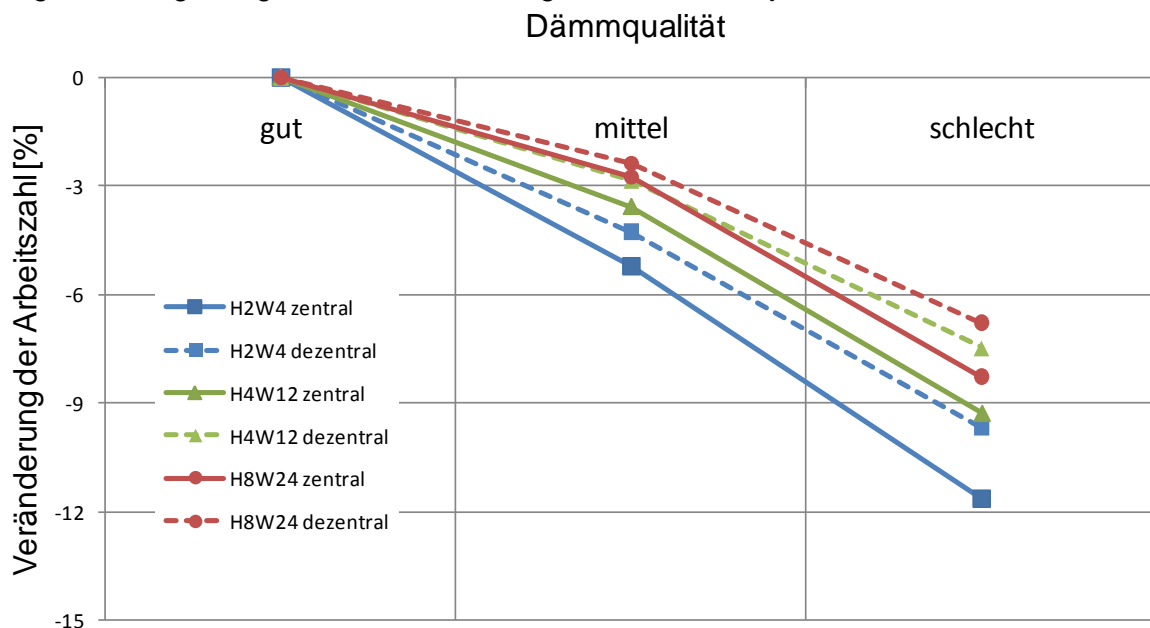


Abbildung 40: Auswirkungen der Dämmqualität auf die Arbeitszahl bei Anlagen Zirkulationswärmepumpe und Pufferspeicher

12.4 Ladung via Nahwärmenetz

Die zentrale Heizungs-wärmepumpe versorgt die umliegenden Gebäude mit Wärme zur Raumheizung. Als zusätzliche Funktion ist die Anlage fähig das Wärmeverteilnetz hochzufahren, um damit die dezentralen BWW-Speicher des Gebäudes zu erwärmen. Innerhalb der Gebäude kann eine Warmhaltung des Brauchwarmwassers mit allen bislang vorgestellten Systemen erfolgen. Für die Simulation wurde die herkömmliche Zirkulation gemäss Kapitel 12.1 zur Warmhaltung gewählt.

Ein BWW-Speicher löst eine Ladeanforderung aus und die Regelung lässt das Wärmeverteilnetz hochfahren. Befindet sich das Netz auf der notwendigen Temperatur werden alle Speicher im System auf ihre Solltemperatur gebracht (Entladeschutz). Die Anlage wird im Sommerbetrieb ohne Wärmeanforderung für die Raumheizung und im Winterbetrieb mit Wärmeanforderung für die Raumheizung simuliert. Beide Betriebsvarianten wurden mit dem minimal-möglichen heizungsseitigen Netzvolumen, d. h. mit kurzen Verbindungsleitungen und ohne Pufferspeicher, modelliert, was den optimalen Fall für diese Variante darstellt.

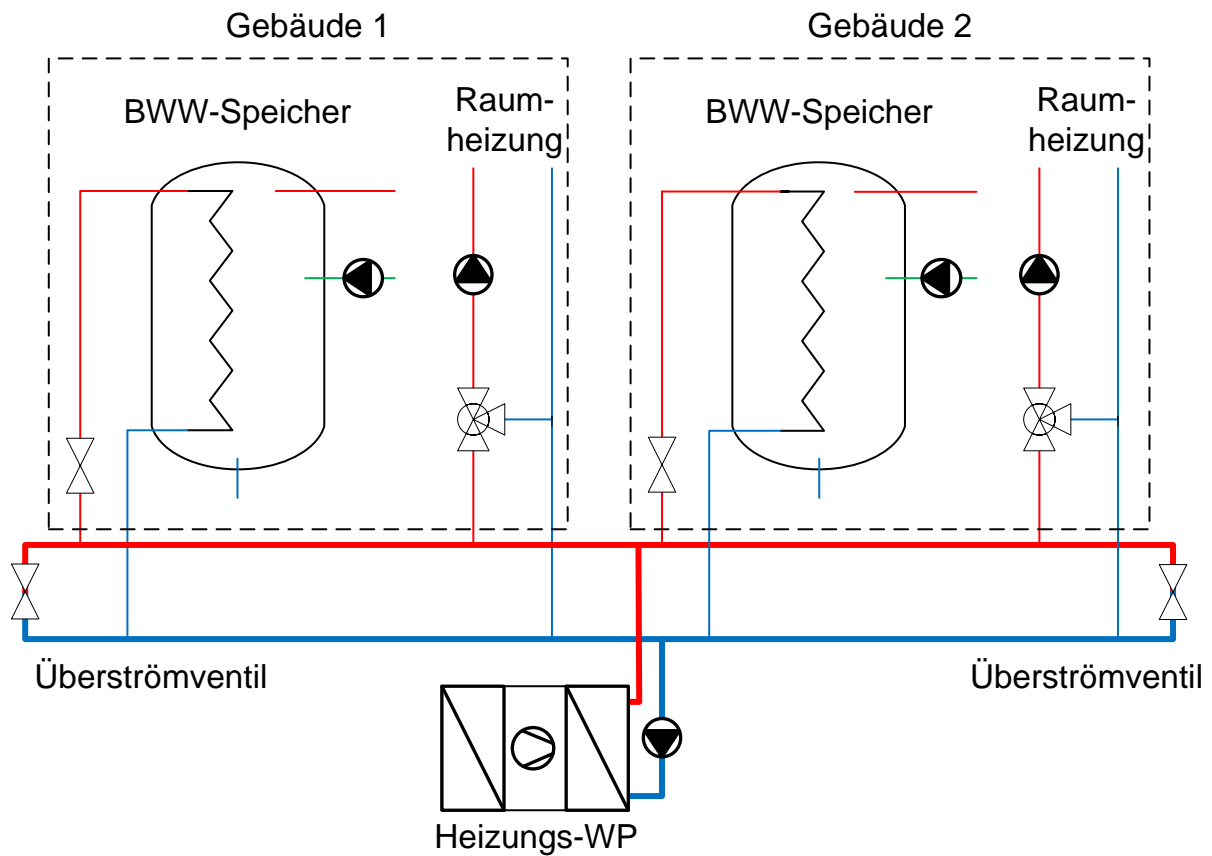


Abbildung 41: Schema – Speicherladung über Wärmeverteilnetz

Die Variation an Gebäuden im Feld ist sehr vielfältig und entsprechend verschieden sind die Bedürfnisse an die Raumheizungen. Diese Anlage kombiniert die Wärmeerzeugung zur Raumheizung mit der Brauchwarmwasser-Erzeugung. Das bedingt die Bestimmung des spezifischen Heizbedarfs der Überbauung. Die Berechnung der Norm-Heizlast erfolgt im Normalfall anhand der Norm SIA 384/201. Da in diesem Bericht mit virtuellen Überbauungen gearbeitet wird, verzichtete man darauf und entschied sich für drei Fallunterscheidungen. In Anlehnung an die Kontrollwerte nach Abbildung 42 bestimmte man den Heizbedarf der Überbauung. Die Dämmstärke wurde gemäss der Definition „gut“ ausgeführt (Anhang J.3).

Gebäudetyp	Kontrollwert
Bestehende, schlecht wärme- gedämmte Wohnhäuser	50 W/m ² bis 70 W/m ²
Bestehende, gut wärmege- dämmte Wohnhäuser	40 W/m ² bis 50 W/m ²
Neubauten gemäss heuti- gen Vorschriften	25 W/m ² bis 40 W/m ²
Bestehende, schlecht wärme- gedämmte Dienstleistungsbauten	60 W/m ² bis 80 W/m ²
Minergie-Gebäude	20 W/m ² bis 30 W/m ²
Minergie-P-Gebäude	8 W/m ² bis 15 W/m ²

Abbildung 42: Kontrollwerte des spezifischen Heizbedarfs pro m² Bruttogeschossfläche (*BFE und Verein Minergie (2010)*)

Sperrzeiten bei der Wärmeerzeugung für die Raumheizung und BWW müssen mit einem Korrekturfaktor in der Wärmepumpenleistung berücksichtigt werden (Tabelle 29).

$$\dot{Q}_{\text{Heizung}} = Z \cdot \text{Heizbedarf} \quad (8)$$

Tabelle 29: Korrekturfaktor zur Berücksichtigung der Wärmepumpenleistung *Alpha-Innotec (2010)*

Sperrzeit	Korrekturfaktor Z	
	Sanierung	Neubau mit FBH
1 x 2 Stunden	1.10	1.05
2 x 2 Stunden	1.20	1.10
3 x 2 Stunden	1.33	1.15

Zur Heizleistung addierte man die BWW-Wärmepumpenleistungen der entsprechenden dezentralen Anlagen hinzu, um die Mehrleistung für die Brauchwarmwassererzeugung zu berücksichtigen.

$$\dot{Q}_{\text{WP}} = \dot{Q}_{\text{Heizung}} + n \cdot \dot{Q}_{\text{BWW-WP}} \quad (9)$$

Tabelle 30: Auslegung Heizung und Wärmeerzeugung für 3 Fälle im Auslegepunkt -10°C mit Korrekturfaktor Z = 1.1

Fall	spez. Wärmebedarf	Topologie	Heizbedarf	T _{VL} /T _{RL}	Q̇ _{WP}
bestehend schlecht gedämmt	70 W/m ²	H2W4	56 kW	55°C/40°C	69.6 kW
		H4W12	336 kW	55°C/40°C	409.6 kW
		H8W24	1344 kW	55°C/40°C	1622.4 kW
Neubau	35 W/m ²	H2W4	28 kW	35°C/25°C	38.8 kW
		H4W12	168 kW	35°C/25°C	224.8 kW
		H8W24	672 kW	35°C/25°C	883.2 kW
Minergie-P	10 W/m ²	H2W4	8 kW	30°C/25°C	16.8 kW
		H4W12	48 kW	30°C/25°C	92.8 kW
		H8W24	192 kW	30°C/25°C	355.2 kW

Abhängig vom Wärmebedarf ändern sich die Arbeitsbedingungen über den Jahresverlauf ständig. Bei tiefen Aussentemperaturen sind Wärmebedarf sowie Vor- und Rücklauftemperaturen höher als bei wärmeren Umgebungsbedingungen. Obwohl die Auslegung für einen Umgebungstemperatur von -10°C erfolgt, arbeitet die Anlage während der Heizsaison meist in anderen Temperaturbereichen. Die entsprechenden Werte für Vor- und Rücklauftemperaturen und Wärmebedarf erhält man aus der Heizkurve. So wurden für die drei Gebäudefälle vereinfachte Heizkurven erstellt, welche im Anhang I.4 hinterlegt sind.

Die Auswertung der Anlagenarbeitszahl erfolgt unter Berücksichtigung von vier Aussentemperaturen. Aus einem Summenhäufigkeitsdiagramm von Ehrbar (2011) lässt sich die Häufigkeit von Aussentemperaturen während einem Jahr ablesen.

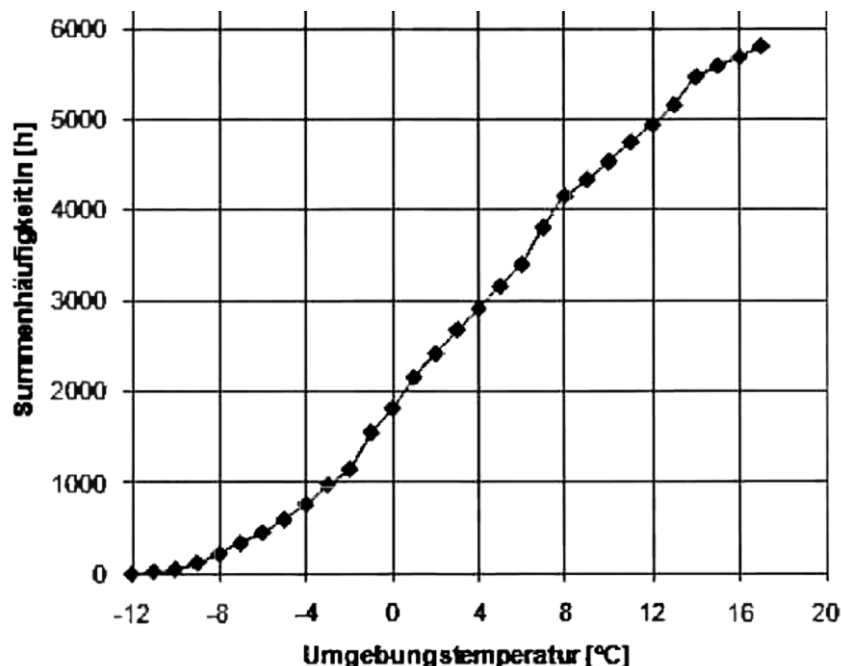


Abbildung 43: Summenhäufigkeit der Umgebungstemperatur in Sargans (1. 9.80 – 30. 4.81)

In Tabelle 31 sind die verschiedene Temperatur- bzw. Arbeitsbereiche mit ihrer Gewichtung in der Arbeitszahl gelistet.

Tabelle 31: Vier Arbeitsbereiche mit Gewichtung zur Bildung der Arbeitszahl der Anlage (Neubau)

Aussentemperaturbereich	-10 ± 5°C	0 ± 5°C	10 ± 5°C	>15°C, kein Heizbetrieb
Anzahl Stunden pro Jahr	650 h	2550 h	2560 h	3000 h
Prozentualer Anteil	7.4 %	29.1 %	29.2 %	34.3 %

Für die Arbeitsbereiche erfolgte die Simulation einer Woche im reinen Heizungsbetrieb ohne die Bereitstellung von Brauchwarmwasser. Auf diese Weise war der elektrische Energieverbrauch der Heizung bekannt. Im nächsten Schritt simulierte man die einwöchige, kombinierte Versorgung von Heizung und BWW-Speicher. Vom elektrischen Energieverbrauch des kombinierten Betriebs wurde der Verbrauch des reinen Heizbetriebs subtrahiert. Die Differenz steht für den elektrischen Mehrverbrauch, welcher die BWW-Bereitstellung benötigt. Dieses Vorgehen berücksichtigt damit auch die Aufheiz- und Auskühlverluste, welche entstehen, wenn das Nahwärmenetz zur Boilerladung auf minimal 63°C Vorlauftemperatur gebracht und danach wieder auf das Heizungstemperaturniveau gesenkt wird. Mit den gewichteten Energieanteilen wurde die Arbeitszahl des Jahresbetriebs gebildet.

Es gibt diverse Möglichkeiten eine solche Anlage zu betreiben. Ohne jede erdenkliche Variante aufzugreifen, steht man oft vor der Grundsatzfrage, ob während der BWW-Speicherladung die Raumheizung weiter versorgt werden soll oder nicht.

12.4.1 Zwangsladung mit parallelem Betrieb der Raumheizung (Variante 1)

Problematisch bei dieser Betriebsvariante ist, dass die Wärmepumpe unter hoher Last und Vorlauftemperatur arbeitet, solange die Brauchwarmwasserladung stattfindet. Die parallele Versorgung der Raumheizung kann die BWW-Ladedauer verlängern. Es ist somit möglich, dass die Wärmepumpe einen Hauptteil der Laufzeit hohe Vorlauftemperaturen liefern muss, was sich negativ auf die Arbeitszahl der gesamten Anlage auswirkt. So gibt es Arbeitsbereiche, in denen die BWW-Bereitstellung nicht einmal die Effizienz eines Elektroboilers erreicht (Abbildung 44).

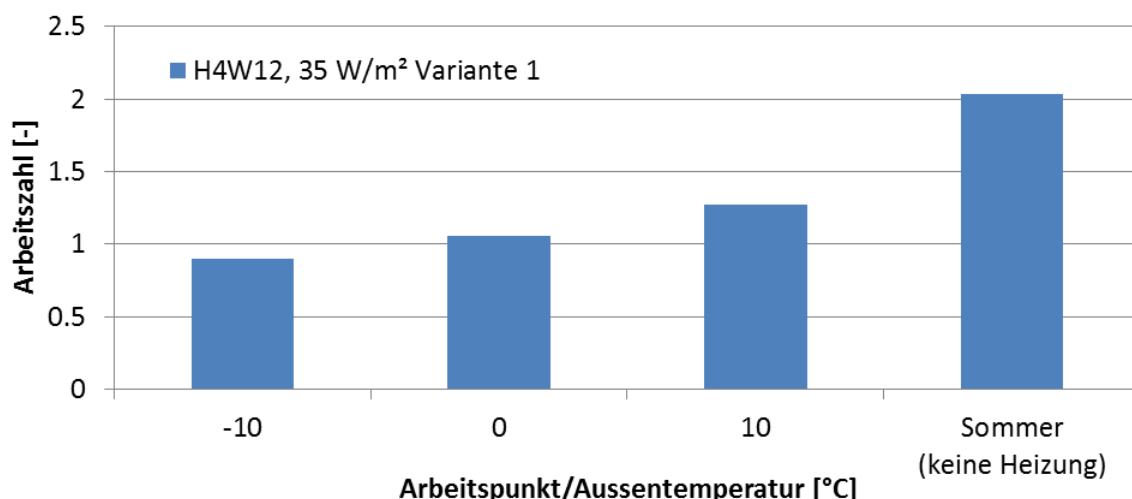


Abbildung 44: Arbeitszahlen pro Arbeitspunkt gemäss Tabelle 31

Im Folgenden sind die gemischten Arbeitszahlen gemäss der Gewichtung aus Tabelle 31 aufgeführt.

Tabelle 32: Simulationsergebnisse für die Topologie H2W4

H2W4	spez. Wärmebedarf		
	10 W/m ²	35 W/m ²	70 W/m ²
E _{Zapfung}	53.75	53.84	54.02
E _{el,BWW}	32.15	42.21	48.05
AZ _{Anlage}	1.67	1.28	1.12

Tabelle 33: Simulationsergebnisse für die Topologie H4W12

H4W12	spez. Wärmebedarf		
	10 W/m ²	35 W/m ²	70 W/m ²
E _{Zapfung}	54.12	54.27	54.24
E _{el,BWW}	30.48	40.90	46.14
AZ _{Anlage}	1.78	1.33	1.18

Tabelle 34: Simulationsergebnisse für die Topologie H8W24

H8W24	spez. Wärmebedarf		
	10 W/m ²	35 W/m ²	70 W/m ²
E _{Zapfung}	54.08	54.18	54.20
E _{el,BWW}	31.20	46.27	55.46
AZ _{Anlage}	1.73	1.17	0.98

Während der Speichererwärmung bleibt der Energiebedarf der Raumheizung bestehen. Die Versorgung erfolgt jedoch auf einem Temperaturniveau von über 60°C und damit mit einem weit ungünstigeren COP, als wenn die Raumheizung mit dem Temperaturniveau des Heizungsvorlaufs versorgt wird. Der durch die BWW-Ladung verursachte Unterschied im COP ergibt einen Mehrverbrauch von elektrischer Energie für die Bewirtschaftung der Raumheizung. Dieser Mehraufwand wird schlussendlich zum Energiebezug der BWW-Bereitstellung addiert, was die Arbeitszahl massiv verschlechtert. Bauten mit gut gedämmter Aussenhülle schneiden im Vergleich etwas besser ab.

12.4.2 Zwangsladung ohne parallele Raumheizungsversorgung (Variante 2)

Die negativen Aspekte der Variante 1, Kapitel 12.4.1 kann man reduzieren, indem man die Raumheizung während der BWW-Ladung nicht versorgt. Unter diesem Umstand verkürzt sich die Ladedauer der BWW-Speicher und die Wärmepumpe läuft nur möglichst kurzzeitig bei hohen Vorlauftemperaturen. Andererseits haben Modelltests gezeigt, dass das Aussetzen der Raumheizung zu einer Abkühlung des Baukörpers führt, welche mit der WP-Leistung aus Tabelle 30 nicht zu kompensieren ist. Die Wärmepumpenleistung muss diesen Umständen angepasst werden, entsprechend der höheren Leistung vergrößern sich auch die Rohrquerschnitte im Leitungsnetz. So sind die Gestehungskosten für eine solche Anlage entsprechend höher als bei der parallelen Ladung. Dafür sind die Arbeitszahlen über das Jahr höher und zeigen geringe saisonale Unterschiede.

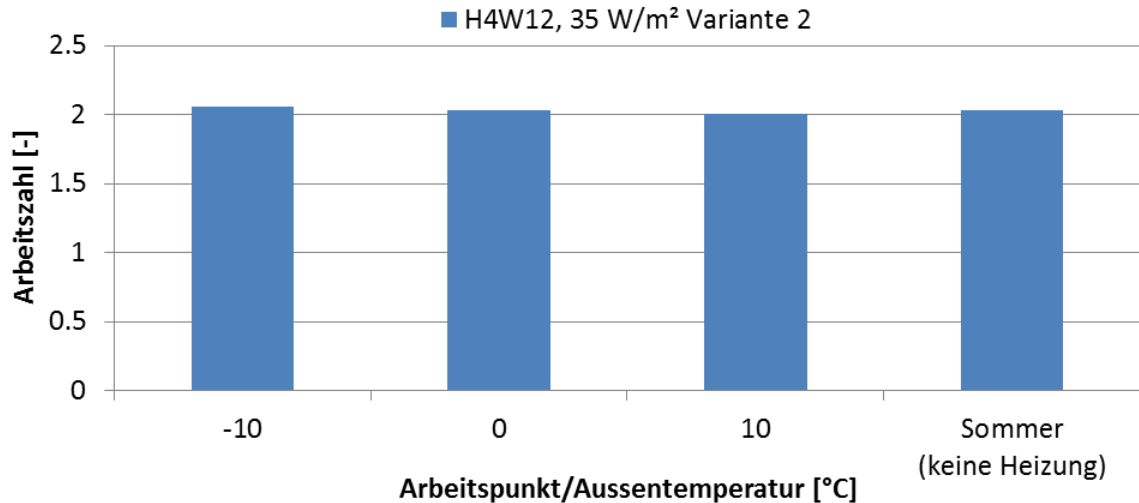


Abbildung 45: Arbeitszahlen pro Arbeitspunkt gemäss Tabelle 31

Im Folgenden sind die gemischten Arbeitszahlen gemäss der Gewichtung aus Tabelle 31 aufgeführt.

Tabelle 35: angepasste WP-Leistung für die Zwangsladung ohne Raumheizungsversorgung

		Variante 1	Variante 2
Fall	Topologie	\dot{Q}_{WP}	\dot{Q}_{WP}
bestehend schlecht gedämmt	H2W4	69.6 kW	100.4 kW
	H4W12	409.6 kW	594.4 kW
	H8W24	1622.4 kW	2361.6 kW
Neubau	H2W4	38.8 kW	54.2 kW
	H4W12	224.8 kW	317.2 kW
	H8W24	883.2 kW	1252.8 kW
Minergie-P	H2W4	16.8 kW	21.2 kW
	H4W12	92.8 kW	119.2 kW
	H8W24	355.2 kW	460.8 kW

Die nachfolgenden Tabellen zeigen, dass die Arbeitszahl bei dieser Betriebsart generell etwas höher liegt, als wenn die Raumheizung kontinuierlich betrieben wird. Dennoch fällt die Raumheizung mit diesem System täglich teilweise für ca. 7 Stunden aus. Das bedeutet, die Temperatur des gesamten Baukörpers oszilliert relativ stark. Es gäbe sicherlich noch mehrere Steuerungs-Varianten für die BWW-Ladung, die beiden untersuchten Varianten entsprechen jedoch den Extremwerten in Bezug auf Aufwand und Effizienz.

Tabelle 36: Simulationsergebnisse für die Topologie H2W4

H2W4	spez. Wärmebedarf		
	10 W/m ²	35 W/m ²	70 W/m ²
E _{Zapfung}	53.79	54.09	54.23
E _{el,BWW}	27.02	29.51	28.82
AZ _{Anlage}	1.99	1.83	1.86

Tabelle 37: Simulationsergebnisse für die Topologie H4W12

H4W12	spez. Wärmebedarf		
	10 W/m ²	35 W/m ²	70 W/m ²
E _{Zapfung}	54.34	54.48	54.74
E _{el,BWW}	26.36	26.87	27.96
AZ _{Anlage}	2.06	2.03	1.96

Tabelle 38: Simulationsergebnisse für die Topologie H8W24

H8W24	spez. Wärmebedarf		
	10 W/m ²	35 W/m ²	70 W/m ²
E _{Zapfung}	54.20	54.32	54.44
E _{el,BWW}	25.51	26.93	26.32
AZ _{Anlage}	2.12	2.02	2.07

Es zeigt sich, dass bei dieser Betriebsart die Arbeitszahl nur geringfügig von der Überbauungsgrösse und vom spezifischen Wärmebedarf abhängt. Die Arbeitszahlen liegen höher als bei Variante 1, dennoch hätte die Umsetzung dieses Systems eine angepasste Dimensionierung des gesamten Leitungsnetzes auf der Heizungsseite und der Wärmepumpe zur Folge. Die Investitionskosten steigen aufgrund der massiv grösseren Dimensionierung stark an, ohne die Arbeitszahl der übrigen Systeme zu übertreffen. Ausserdem entstehen durch den diskontinuierlichen Heizbetrieb starke Temperaturschwankungen im Baukörper, was den Komfort und die Materialbeanspruchung negativ prägt.

13 Bewertung und Interpretation

Viele Aspekte beeinflussen die Entscheidung für oder gegen ein System. In den Workshops trugen die Autoren gemeinsam mit den Teilnehmern die folgenden Kriterien zusammen.

- Energieeffizienz
- Investitionskosten
- Legionellenprävention
- Kalkausscheidung
- Wartungskosten
- Installationsaufwand
- Komfort
- Raumbedarf
- Zuverlässigkeit
- Planbarkeit
- Abrechnung

Die Bewertung der Energieeffizienz und Legionellenprävention basiert auf den Ergebnissen der Simulation. Investitionskosten können aus Herstellerinformationen gewonnen werden. Einige Kriterien sind eher subjektiv zu bewerten, da man sich nicht auf Zahlen stützen kann. Die Bewertung erfolgt jeweils auf der Basis des gut gedämmten Verteilnetzes mit einer Punktevergabe von 1 bis 10, wobei 10 den besten Wert darstellt.

13.1 Energieeffizienz

Der Bericht fokussiert vor allem den energetischen Gesichtspunkt der Systeme während dem Betrieb. Auf den Anteil der grauen Energie wird nicht explizit eingegangen sondern auf *Kubik (2011)* verwiesen, welcher dieses Thema tangiert und Vorteile für die Begleitheizung feststellt. Für die nachfolgenden Vergleiche wurde die Arbeitszahl jeweils auf eine gezapfte Energie von 58 kWh/m³ (elektrische Erwärmung des Wassers von 10°C auf 60°C) umgerechnet, damit alle Systeme die identische Energiemenge liefern.

$$E_{\text{Zapfung}} = \rho_{\text{Wasser}} \cdot c_{p\text{Wasser}} \cdot \Delta T \cdot \frac{1\text{h}}{3600\text{s}} = 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 4.18 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot 50\text{K} \cdot \frac{1\text{h}}{3600\text{s}} = \frac{58 \text{ kWh}}{\text{m}^3} \quad (10)$$

Auf den folgenden beiden Grafiken sind die Arbeitszahlen der untersuchten Systeme bei verschiedenen Objekt-Topologien dargestellt. Entsprechend der Aufstellung des Energieerzeugers Wärmepumpe werden die kombinierten Systeme mit Ladung via Nahwärmenetz zu den zentral-versorgten Objekten gezählt.

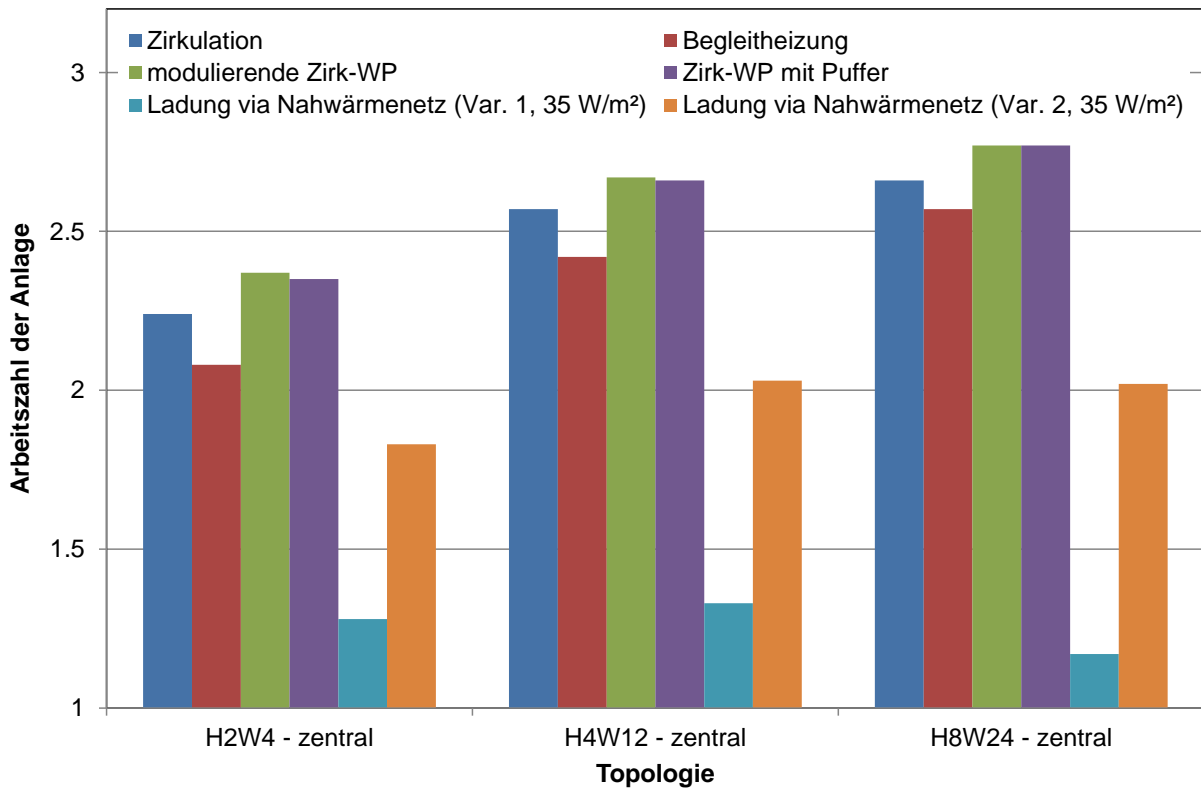


Abbildung 46: Vergleich der Arbeitszahlen auf Basis des gut gedämmten Leitungsnetzes bei zentraler Versorgung

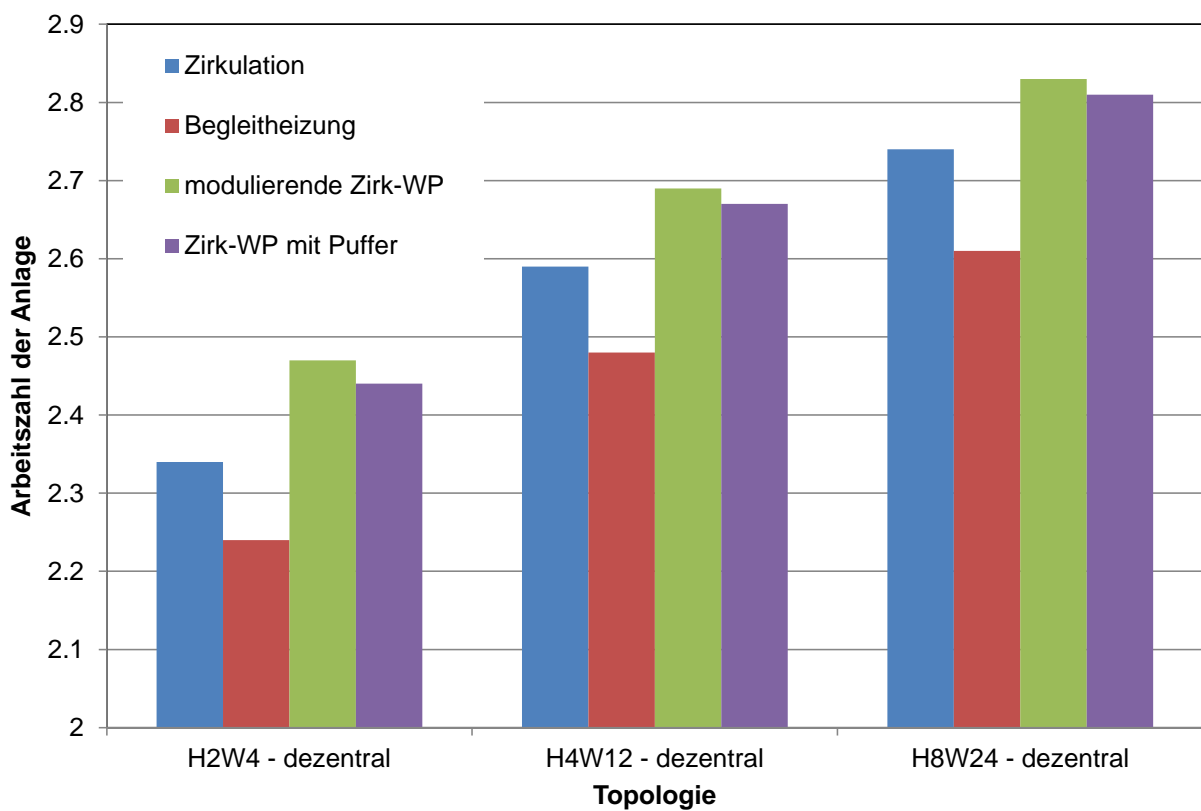


Abbildung 47: Vergleich der Arbeitszahlen auf Basis des gut gedämmten Leitungsnetzes bei dezentraler Versorgung

Es ist festzustellen, dass die Zirkulationssysteme energetisch etwas besser abschneiden als die Warmhaltung mit Begleitheizung. Dennoch beträgt der energetische Unterschied

zwischen herkömmlicher Zirkulation und dem Heizband nur etwa 5 %. Eine schlechte Dämmung hat einen wesentlich grösseren Effekt auf die Arbeitszahl als die Wahl des Warmhaltesystems.

Durch das Erweitern der Zirkulationssysteme mit einer Zirkulationswärmepumpe kann die Anlageneffizienz nochmals um ca. 4 % gesteigert werden, auch eine Rohr-an-Rohr-Installation würde weitere Energieeinsparungen liefern.

Die kombinierten Systeme mit Ladung via Nahwärmenetz erreichen deutlich schlechtere Arbeitszahlen als die übrigen Anlagearten.

Im Allgemeinen arbeitet jede Anlagenart bei dezentraler Aufstellung mit einer besseren Arbeitszahl als bei zentraler Aufstellung. Unter den gegebenen Topologie-Bedingungen arbeiten die meisten Anlagenarten am effizientesten bei den grösseren Überbauungen. Dies resultiert aus dem besseren Verhältnis von Rohr- und Speicher Oberfläche zur BWB-Bezugsleistung.

Die hier untersuchten Topologien sehen relativ kurze Verbindungsleitungen zwischen den Gebäuden vor. Je länger diese Leitungen sind, desto deutlicher treten die Vorteile der dezentralen BWB-Versorgung hervor.

Tabelle 39: Bewertung der Energieeffizienz: 1 Punkt für $AZ_{Anlage} = 1.0$ und 10 Punkte für $AZ_{Anlage} = 3.0$ (linear interpoliert)

H4W12	Zirkulation	Begleit- heizung	var. Zirk-WP	Zirk-WP mit Puffer- speicher	Ladung via Nahwärme- netz (Var.1/2)
zentral	8.4	7.9	9.1	9.0	2.2/5.1
dezentral	8.6	8.2	9.2	9.1	

Eine detaillierte Auswertung des elektrischen Energiebezugs ist in Abbildung 48 gegeben. Die Blöcke veranschaulichen, wie viel elektrische Energie für verschiedene Zwecke bezogen wird. Bei allen Systemen ist der Aufwand für die Pumpe verschwindend klein, gefolgt von den Verlusten in der Zentrale, welche bei allen Systemen über die Wärmepumpe kompensiert werden. Ebenso decken die Zirkulationssysteme die Scheinverluste im Verteilnetz mit einer Wärmepumpe, daher fällt dieser Block im Vergleich zur Begleitheizung etwas kleiner aus. Am elektrischen Energieaufwand für die Erwärmung des Brauchwarmwassers kristallisiert sich wiederum der Vorteil von sauber geschichteten Speichern heraus. Die höhere Leistungszahl der Wärmepumpe hält diesen Energieanteil bei den Heizband- und Zirk-WP-Systemen geringer im Vergleich zur herkömmlichen Zirkulation mit durchmischem Speicher. Erfolgt die Ladung der Speicher über das Nahwärmenetz, resultiert ein Mehrenergieverbrauch der Raumheizung, welcher zur BWB-Erwärmung gezählt wird. Dieser Anteil macht rund 60% des elektrischen Energieverbrauchs der BWB-Bereitstellung aus, respektive 47% wenn die Raumheizung während der Speicherladung unterbrochen wird.

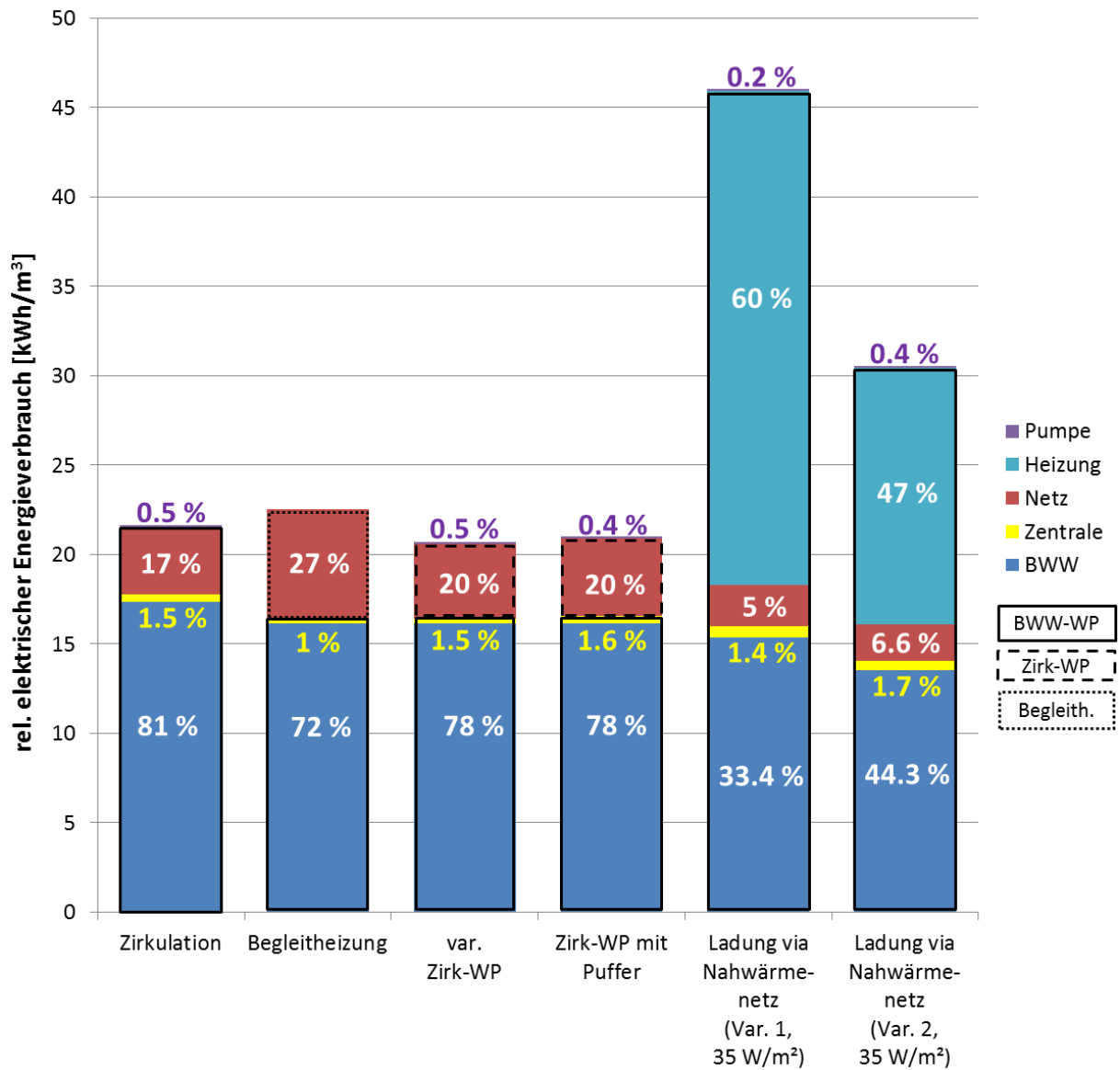


Abbildung 48: Zusammensetzung des elektrischen Energiebezugs (H4W12 zentral – gut gedämmt)

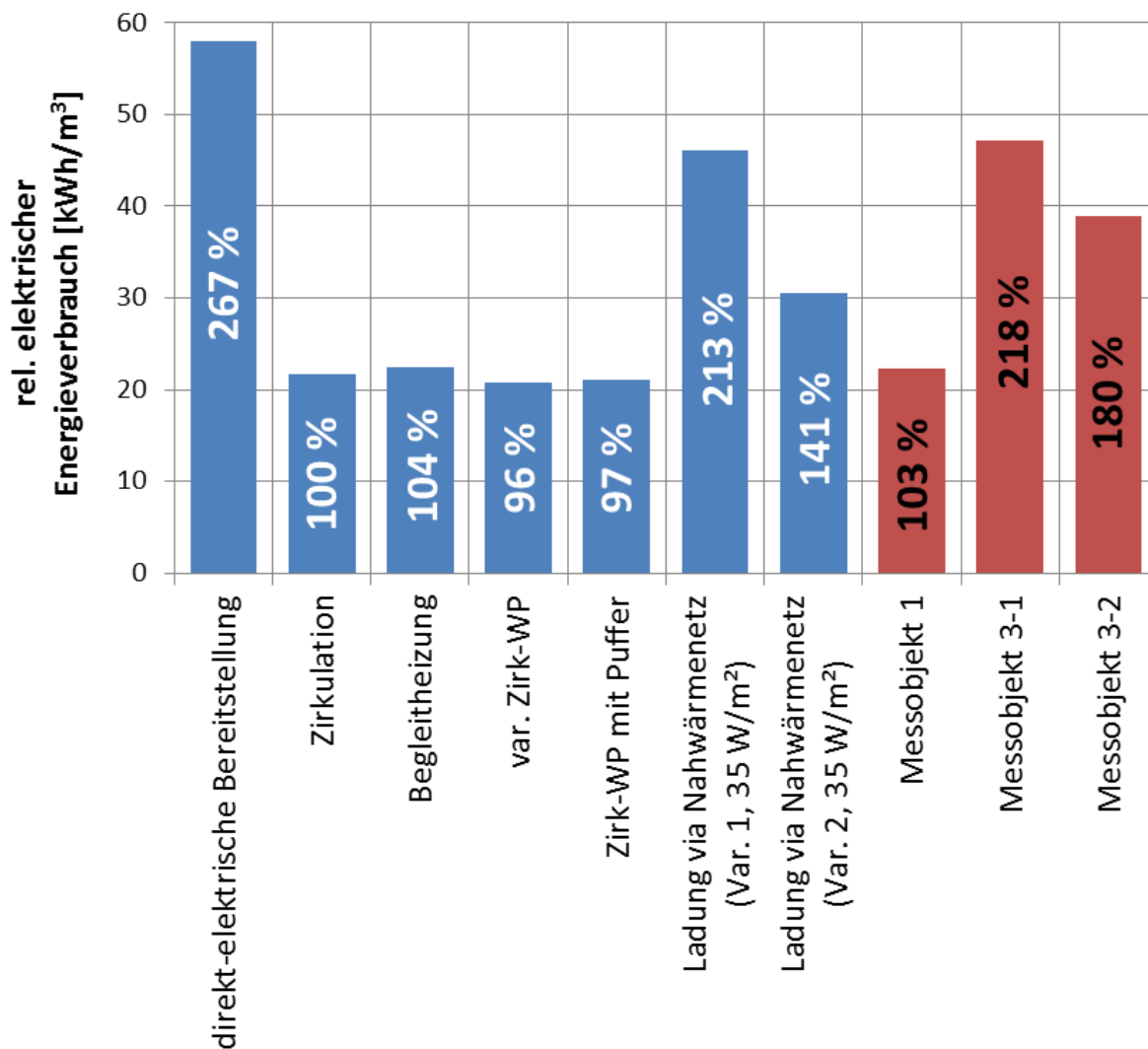


Abbildung 49: Systemvergleich inkl. Messobjekte

Ein abschliessender Vergleich zwischen Messungen und Simulation ist in Abbildung 49 dargestellt. Bei beiden Messobjekten ist die Warmhaltung mit Zirkulation ausgeführt und es wird ein weiteres Mal deutlich, wie unterschiedlich solche Anlagen im Feld funktionieren. Das Messobjekt 1 benötigt für die Bereitstellung von 58 kWh/m^3 beinahe dieselbe elektrische Energie wie das simulierte Resultat. Dagegen würde das Messobjekt 3 als ausgesuchtes Negativbeispiel für die Bereitstellung von 58 kWh/m^3 schon fast den elektrischen Energiebezug eines direkt-elektrischen Erhitzers erreichen.

13.2 Investitionskosten

Für den Vergleich bezüglich Wirtschaftlichkeit wurden die Kostenfaktoren BWW-Wärmepumpe, BWW-Speicher, Zirkulationswärmepumpe, Pufferspeicher, Zirkulationsleitung mit Pumpen und Ventilen sowie die Begleitheizung mit Steuerung berücksichtigt. Jedes System nutzt dieselbe Warmwasser-Vorlaufleitung zur Verteilung, weshalb diese Investition nicht in die Kalkulation einfließt. Als Basis für die Kalkulation dienten Werte, welche von Projektpartnern bezogen wurden. Diese Daten sind im Anhang zu finden. Für Vergleich und Bewertung wurde die relative Investition pro Kubikmeter gezapftes BWW bei einer Laufzeit von 20 Jahren, berechnet. Die Kostengrundlagen befinden sich im Anhang M. Die Investitionskosten in das System „Ladung via Nahwärmenetz“ wurden für den spezifischen Wärmebedarf eines Neubau-Objekts berechnet.

Tabelle 40: Investitionskosten H2W4 – zentral, auf Basis des gut gedämmten Leitungsnetzes

zentral	Zirkulation	Begleit- heizung	var. Zirk-WP	Zirk-WP mit Puffer	Ladung via Nahwärmenetz (Var. 1/2)	
BWW-Wärmepumpe	8300	8300	8300	8300	2531	7336
BWW-Speicher	2800	2400	2400	2400	5260	5260
Zirk-WP			6800	5440		
Zirk-Puffer				750		
Zirk-Leitungen (isoliert)	2216		2216	2216	1616	1616
Vorlaufleitungen (isoliert)	4499	4499	4499	4499	3219	3219
Ventile&Pumpen	2750		2750	2750	4500	4500
Begleitheizung		2890				
Total Überbauung [CHF]	20565	18089	26965	26355	17126	21931
rel. Investition [CHF/m³]	4	3.5	5.2	5.1	3.3	4.3

Tabelle 41: Investitionskosten H2W4 – dezentral, auf Basis des gut gedämmten Leitungsnetzes

dezentral	Zirkulation	Begleit- heizung	var. Zirk-WP	Zirk-WP mit Puffer
BWW-Wärmepumpe	7700	7700	7700	7700
BWW-Speicher	2100	1300	1300	1300
Zirk-WP			6700	5360
Zirk-Puffer				350
Zirk-Leitungen (isoliert)	808		808	808
Vorlaufleitungen (isoliert)	1609.5	1609.5	1609.5	1609.5
Ventile&Pumpen	2250		2250	2250
Begleitheizung		1720		
Total für ein Gebäude [CHF]	14467.5	12329.5	20367.5	19377.5
Total Überbauung [CHF]	28935	24659	40735	38755
rel. Investition [CHF/m³]	5.6	4.8	7.9	7.5

Tabelle 42: Investitionskosten H4W12 – zentral, auf Basis des gut gedämmten Leitungsnetzes

zentral	Zirkulation	Begleit- heizung	var. Zirk-WP	Zirk-WP mit Puffer	Ladung via Nahwärmenetz (Var. 1/2)	
BWW-Wärmepumpe	18400	18400	18400	18400	19322	61686
BWW-Speicher	16000	14000	14000	14000	37020	37020
Zirk-WP			7500	6000		
Zirk-Puffer				2900		
Zirk-Leitungen (isoliert)	9922		9922	9922	7392	7392
Vorlaufleitungen (isoliert)	23570.5	23570.5	23570.5	23570.5	17198	17198
Ventile&Pumpen	5250		5250	5250	10000	10000
Begleitheizung		9580				
Total Überbauung [CHF]	73142.5	65550.5	78642.5	80042.5	90932	133296
rel. Investition [CHF/m³]	2.4	2.1	2.5	2.6	2.9	4.3

Tabelle 43: Investitionskosten H4W12 – dezentral, auf Basis des gut gedämmten Leitungsnetzes

dezentral	Zirkulation	Begleit- heizung	var. Zirk-WP	Zirk-WP mit Puffer
BWW-Wärmepumpe	9400	9400	9400	9400
BWW-Speicher	8500	8000	8000	8000
Zirk-WP			6800	5440
Zirk-Puffer				750
Zirk-Leitungen (isoliert)	1848		1848	1848
Vorlaufleitungen (isoliert)	4299.5	4299.5	4299.5	4299.5
Ventile&Pumpen	2500		2500	2500
Begleitheizung		2695		
Total für ein Gebäude [CHF]	26547.5	24394.5	32847.5	32237.5
Total Überbauung [CHF]	106190	97578	131390	128950
rel. Investition [CHF/m³]	3.4	3.2	4.3	4.2

Tabelle 44: Investitionskosten H8W24 – zentral, auf Basis des gut gedämmten Leitungsnetzes

zentral	Zirkulation	Begleit- heizung	var. Zirk-WP	Zirk-WP mit Puffer	Ladung via Nahwärmenetz (Var. 1/2)	
BWW-Wärmepumpe	63300	63300	63300	63300	157334	226734
BWW-Speicher	55000	46000	46000	46000	109240	109240
Zirk-WP			9800	7840		
Zirk-Puffer				13000		
Zirk-Leitungen (isoliert)	35411		35411	35411	27456	27456
Vorlaufleitungen (isoliert)	107272	107272	107272	107272	77344	77344
Ventile&Pumpen	10750		10750	10750	22000	22000
Begleitheizung		29290				
Total Überbauung [CHF]	271733	245862	272533	283573	393374	462774
rel. Investition [CHF/m³]	2.2	2	2.2	2.3	3.2	3.7

Tabelle 45: Investitionskosten H8W24 – dezentral, auf Basis des gut gedämmten Leitungsnetzes

dezentral	Zirkulation	Begleit- heizung	var. Zirk-WP	Zirk-WP mit Puffer
BWW-Wärmepumpe	11700	11700	11700	11700
BWW-Speicher	12600	10750	10750	10750
Zirk-WP			6900	5520
Zirk-Puffer				1000
Zirk-Leitungen (isoliert)	3432		3432	3432
Vorlaufleitungen (isoliert)	9668	9668	9668	9668
Ventile&Pumpen	2750		2750	2750
Begleitheizung		4030		
Total für ein Gebäude [CHF]	40150	36148	45200	44820
Total Überbauung [CHF]	321200	289184	361600	358560
rel. Investition [CHF/m³]	2.6	2.3	2.9	2.9

Bei den dezentralen Anlagen würden sich die Kostenfaktoren für Gebäudeleitsystem und Abrechnung erhöhen. Bei der Nahwärmenetz-Variante 2 wären ausserdem die heizungsseitigen Rohrquerschnitte etwas grösser zu dimensionieren. Da für eine realistische Einschätzung der Faktoren das Know-how fehlt, wurde auf die Berücksichtigung dieser Punkte verzichtet.

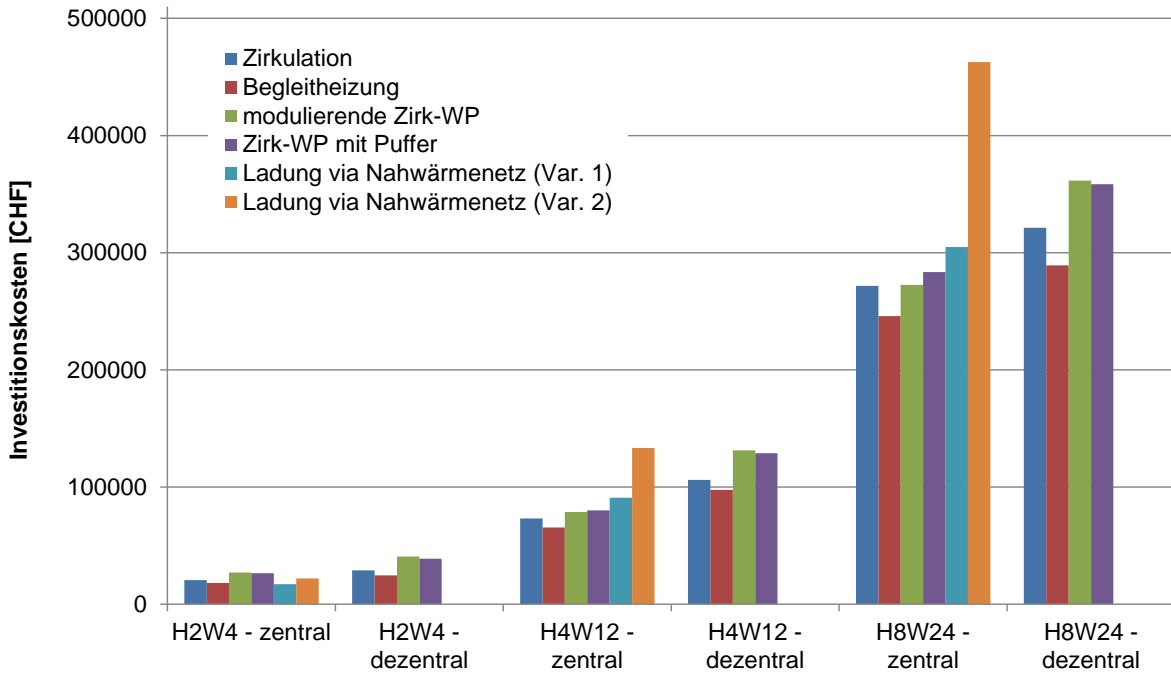


Abbildung 50: Kostenentwicklung bei zunehmender Überbauungsgrösse

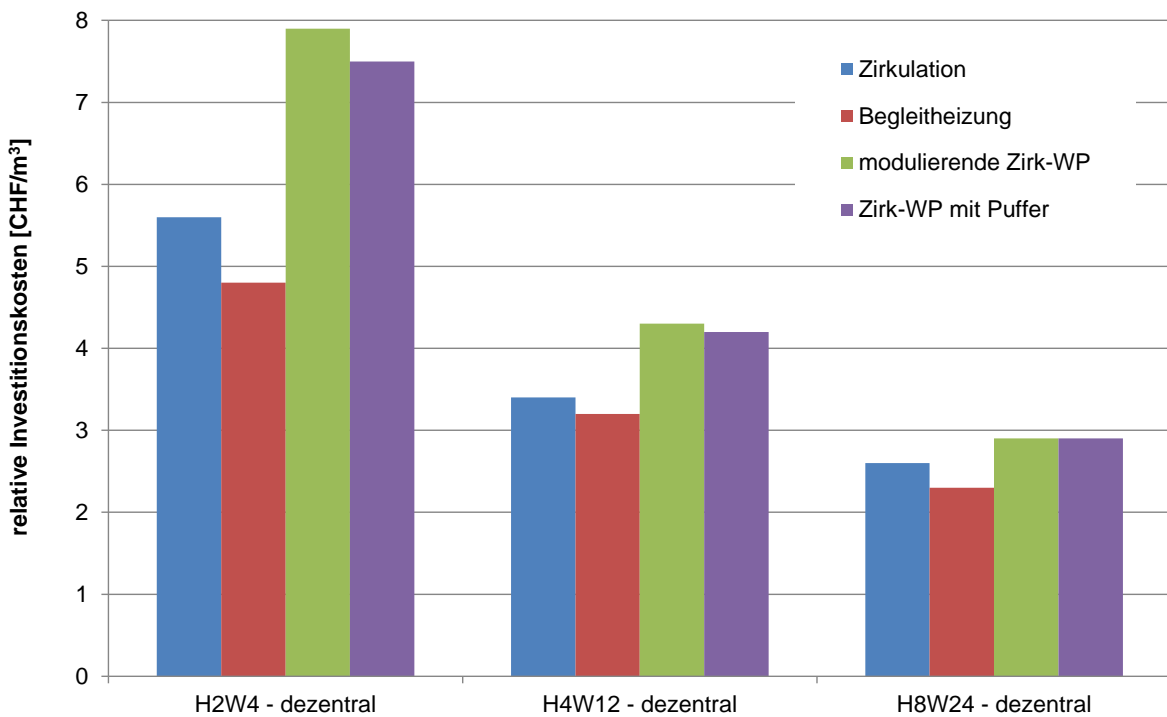


Abbildung 51: Investitionskosten pro m³ gezapftes Brauchwarmwasser (bei einer Laufzeit von 20 Jahren) bei dezentraler Versorgung

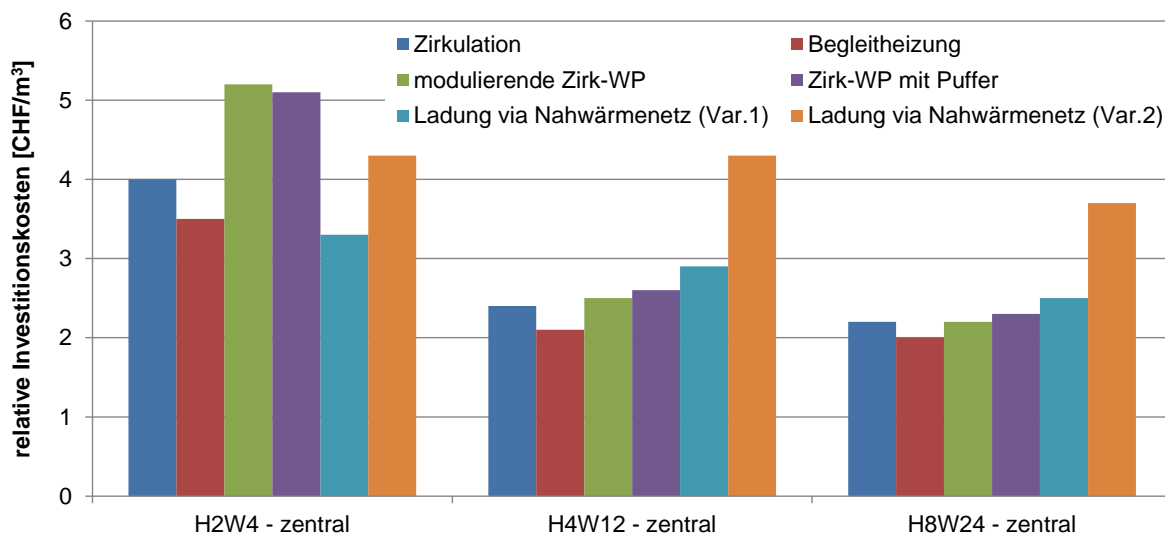


Abbildung 52: Investitionskosten pro m³ gezapftes Brauchwarmwasser (bei einer Laufzeit von 20 Jahren) bei zentraler Versorgung

Die Tabellen 40 bis 45 sowie Abbildungen 50 bis 52 veranschaulichen die Kostenentwicklung für die simulierten Systeme. Auch wenn es sich bei den Einzelpreisen nur um Richt- und Erfahrungswerte handelt, sind gewisse Trends deutlich ersichtlich.

- dezentrale Anlagen sind immer kostenintensiver als die zentrale Versorgung
- die Begleitheizung hat die niedrigsten Gestehungskosten
- Anlagen mit Zirkulationswärmepumpen sind in grossen zentralen Überbauungen auch wirtschaftlich interessant. Die Investition in eine zusätzliche Wärmepumpe kann durch den kleineren BWW-Speicher beinahe eingespart werden.

Im Vergleich zwischen Zirkulation (Parallelrohr) und Begleitheizung ergibt sich mit den verwendeten Daten eine Differenz von rund 15 % zu Gunsten der Begleitheizung.

Gemäss *Kubik (2011)* erfordert besonders eine Zirkulation in RaR-Anordnung wesentlich höhere Ausführungsqualität am Bau. Die Investitionsdifferenz zwischen Begleitheizungs- und Zirkulationssystemen vergrössert sich entsprechend auf bis zu 30 %.

Tabelle 46: Bewertung der Investitionskosten: 1 Punkt für 10 CHF/m³ und 10 Punkte für 0.1 CHF/m³ (linear interpoliert)

H4W12	Zirkulation	Begleitheizung	var. Zirk-WP	Zirk-WP mit Pufferspeicher	Ladung via Nahwärmenetz (Var.1/2)
zentral	7.9	8.2	7.8	7.7	7.5/6.2
dezentral	7.0	7.2	6.2	6.3	

13.3 Installationskosten

Die Unterschiede im Installationsaufwand zwischen Heizband- und Zirkulationssystem sind relativ gering. Logischerweise erhöht sich jedoch mit jedem zusätzlichen Speicher oder Wärmeerzeuger der Installationsaufwand. Bei Systemen mit Zirkulation ist die sorgfältige Einregulierung aller Stränge bei der Inbetriebnahme zu berücksichtigen. Die Einregulierung entfällt bei Systemen mit Begleitheizung.

Tabelle 47: subjektive Bewertung

	Zirkulation	Begleit- heizung	var. Zirk-WP	Zirk-WP mit Puffer- speicher	Ladung via Nahwärme- netz (Var.1/2)
zentral	7	8	6	5	3.5/3.5
dezentral	3.5	4	3	2.5	

13.4 Legionellenprävention

Bei keinem der Systeme stagniert das Wasser länger als 24 h im Temperaturbereich zwischen 25°C und 50°C. Gemäss *SIA-Norm 385/1 (2011)* ist damit keine thermische Desinfektion erforderlich.

13.5 Kalkausscheidung

Alle Systeme in diesem Bericht nutzen eine Brauchwarmwasser-Wärmepumpe mit aussenliegendem Wärmetauscher zur Wassererwärmung. Der in der Wärmepumpe verbaute Plattenkondensator hat relativ enge Zwischenräume, die vom Wasser durchflossen werden. Infolge von Kalkabscheidung können diese Zwischenräume verstopfen. Je höher die Brauchwarmwassertemperatur, desto grösser ist die Rate der Kalkabscheidung (Abbildung 53). Ein verkalkter Kondensator macht die Wärmepumpe ineffizient, da die Kalkschicht den Wärmeübergang zwischen Wasser und Kältemittel verschlechtert. Als Folge wird eine höhere Kondensationstemperatur von der Wärmepumpe gefordert. Massive Kalkablagerungen machen schliesslich die Wärmepumpe funktionsuntüchtig. In vielen Fällen wird daher das Brauchwarmwasser vor dem Eintritt in den Speicher zum Beispiel mittels eines Ionentausch-Verfahrens enthärtet. Es zeigen sich weder Vor- noch Nachteile in den untersuchten Anlagen.

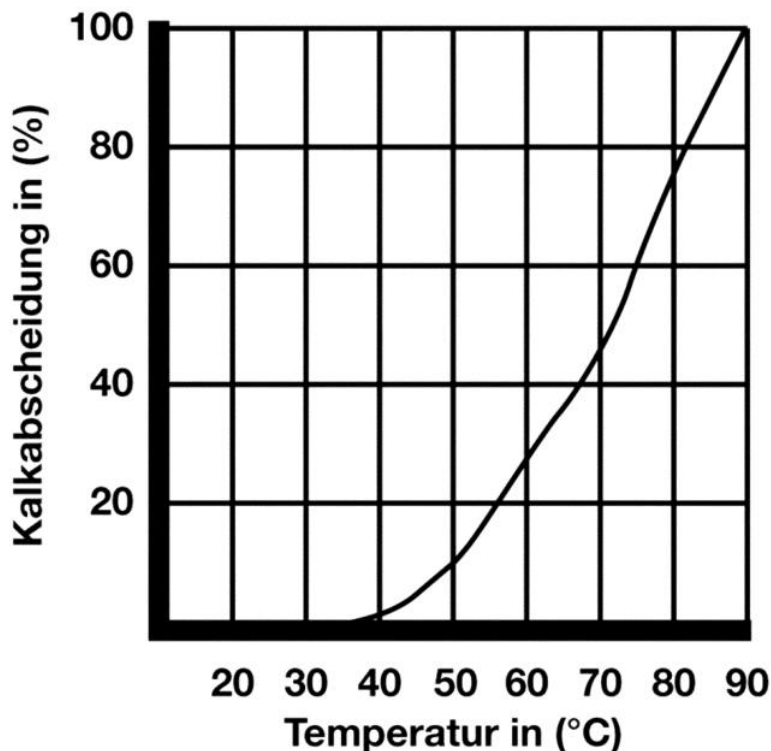


Abbildung 53: Kalkabscheidung in Abhängigkeit der Wassertemperatur (*Bauverlag BV (2011)*)

13.6 Wartungskosten

Die Enthärtungsanlagen benötigen Salz zur Regeneration des Kationenaustauscherharzes. Der Salzvorrat des Wasserenthärter muss in regelmässigen Abständen kontrolliert und aufgefüllt werden.

13.7 Komfort

Gemäss den Resultaten aus der Simulation ist bei jedem System eine Temperatur am Wohnungsverteiler von mehr als 55°C möglich. Die Ausstosszeit hängt unter anderem von der Länge der Sticleitung ab. Mit einer zweckmässigen Raumaufteilung, bei welcher die Steigzone in der Nähe von Küche und Bäder liegt, kann die Ausstosszeit auf jeden Fall gewährleistet werden. Die Zirkulationssysteme weisen jedoch eine Senkung des Temperaturniveaus auf, wenn bereits viel BWW aus dem Speicher gezogen wurde. Die Temperaturverläufe an den Anschlüssen jeder Wohnung von Zirkulations- und Begleitheizungssystemen sind dadurch sehr unterschiedlich, wie Abbildung 54 und Abbildung 55 zeigen. Wo bei der Zirkulation die Temperatur am Wohnungsanschluss infolge der Speicheraus Kühlung abfällt, hält das Heizband die Temperatur innerhalb eines kleineren Temperaturbereichs. Als Mass für die Bewertung des Komforts wird daher die Schwankung der Temperatur an den Wohnungsanschlüssen hinzugezogen.

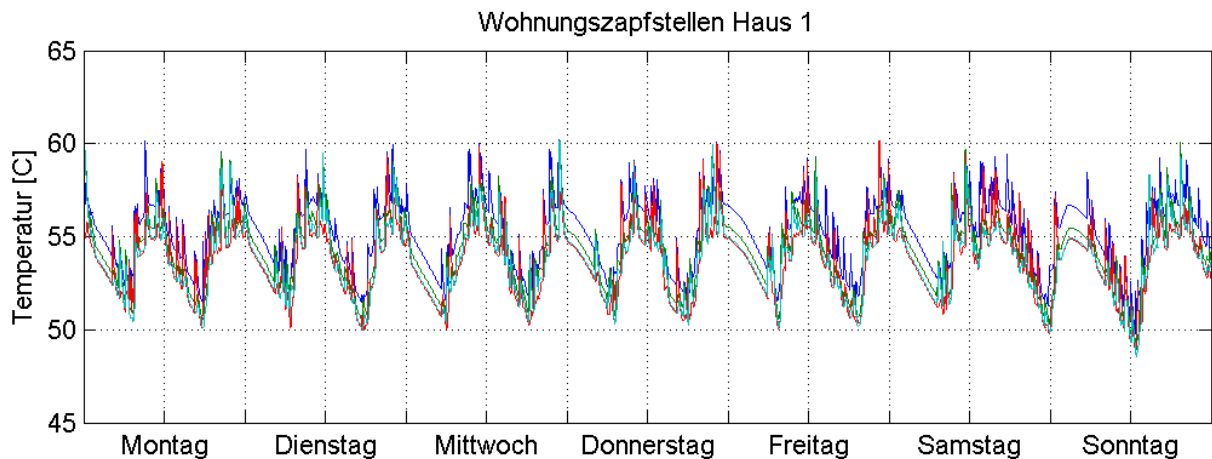


Abbildung 54: Temperaturverhalten an den Wohnungsanschlüssen beim Zirkulationssystem

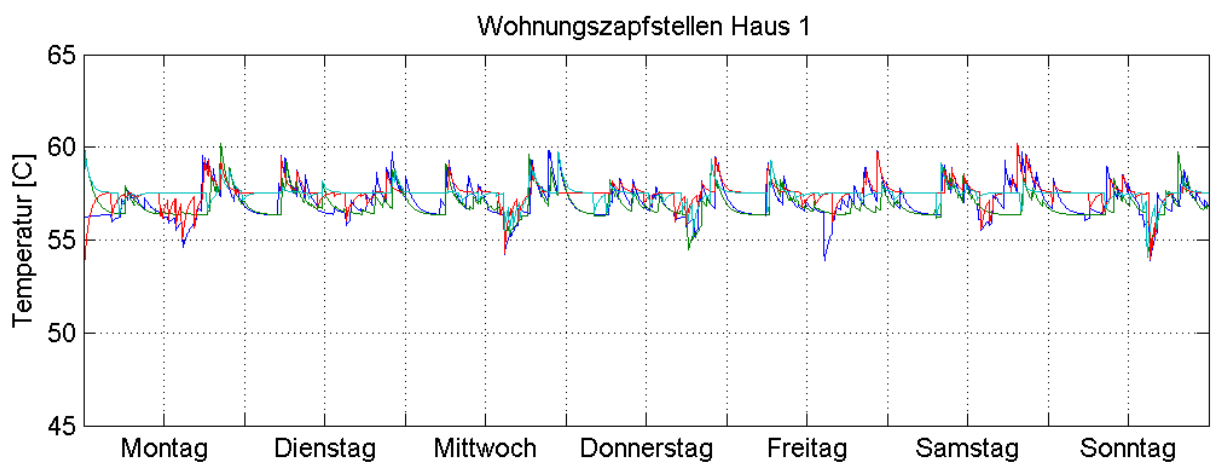


Abbildung 55: Temperaturverhalten an den Wohnungsanschlüssen bei Begleitheizung

Tabelle 48: Bewertung des Komforts: 10 Punkte für $\Delta T \approx 2.5$ K, 7.5 Punkte für $\Delta T \approx 5$ K, 5 Punkte für $\Delta T \approx 10$ K, 2.5 Punkte für $\Delta T \approx 15$ K

H4W12	Zirkulation	Begleit- heizung	var. Zirk-WP	Zirk-WP mit Puffer- speicher	Ladung via Nahwärme- netz (Var.1/2)
zentral	5	7.5	7.5	7.5	5/3*
dezentral	5	7.5	5	5	

*Abwertung der Variante 2 von 5 auf 3 zur Berücksichtigung der zusätzlichen Temperaturschwankungen des Baukörpers.

13.8 Raumbedarf

Ein grosser Vorteil der zentralen BWV-Versorgung von mehreren Gebäuden ist der geringere Raumanspruch. Es genügt ein Raum pro Überbauung, anstelle von einem Raum pro Gebäude. Die Zirkulations-Wärmepumpe und ein etwaiger Zirkulationspufferspeicher benötigen zusätzlichen Platz im Technikraum. Im Vergleich zur Begleitheizung sind die Zirkulationssysteme benachteiligt, weil sie tendenziell grössere Speicher und mehr Platz in den Leitungsschächten für die Doppelrohrverlegung benötigen. Je nach Zirkulationssystem (Parallelrohr, RaR, RiR) ist der Raumbedarf mehr oder weniger ausgeprägt.

Tabelle 49: subjektive Bewertung

	Zirkulation	Begleit- heizung	var. Zirk-WP	Zirk-WP mit Puffer- speicher	Ladung via Nahwärme- netz (Var.1/2)
zentral	8	9	7	6	4/5
dezentral	4	4.5	3.5	3	

13.9 Zuverlässigkeit

Sowohl Zirkulationssysteme als auch Begleitheizungen gelten in der Branche als zuverlässig. Zu hohe Wassertemperaturen (>70°C) können das Warmhalteband zerstören. Ein defektes Heizband kann meist nicht mit vertretbarem Aufwand ersetzt werden, da es sich grösstenteils in den Leitungsschächten befindet. Mit der Wärmepumpe als Energieerzeuger sind solch hohe Wassertemperaturen systematisch schwer zu erreichen, insofern ist die Gefahr einer Zerstörung des Heizbands infolge Überhitzung gering einzuschätzen. Bei Wärmeerzeugern, welche hohe Vorlauftemperaturen liefern können, ist eine Begrenzung vorzusehen.

Mit Ausnahme der modulierenden Zirkulationswärmepumpe sollten die Komponenten aller Systeme eine vertretbare Lebensdauer im Rahmen von ca. 20 Jahren aufweisen. Die modulierende Zirkulationswärmepumpe würde mehr oder weniger im Dauerbetrieb arbeiten. Der Verdichter wäre in diesem Fall die kritische Komponente hinsichtlich seiner Lebensdauer von rund 60'000 h, was ca. 7 Jahre im Dauerbetrieb entspricht (*Gross et al. (2010)*).

Tabelle 50: subjektive Bewertung

	Zirkulation	Begleit- heizung	var. Zirk-WP	Zirk-WP mit Puffer- speicher	Ladung via Nahwärme- netz (Var.1/2)
zentral	8	7	5	7	8/8
dezentral	8	7	5	7	

13.10 Planbarkeit

Die Planung eines energieeffizienten Gebäudes beginnt beim Architekten. Steigzonen ohne vertikalen Versatz zwischen den Geschossen sind unerlässlich, um kurze Leitungswege zu gewährleisten. Besonders die Zirkulationssysteme sind auf solche Steigzonen angewiesen. Viele vertikale Verschiebungen, Durchquerungen von Räumen usw. erschweren das Verlegen eines Doppelrohrsystems erheblich. So wird in komplexen Fällen (z.B. Terrassenbauten) oft gezwungenermassen das Heizband verlegt. Daran wird ersichtlich, dass die Warmhaltung mit Begleitheizung unkritisch gegenüber der Architektur eines Gebäudes ist.

13.11 Abrechnung

Die gewählten Systeme unterscheiden sich punkto Abrechnung nicht. Jedes System ist auf einen Wärmezähler für das Warmwasser an jeder Wohnung angewiesen. Die Kosten für die Warmhaltung werden dem BWW-Bezugspreis zugeschlagen.

13.12 Bewertungsmatrix

Tabelle 51: Bewertungsmatrix mit Gewichtungsfaktoren (G)

Kriterium	G	Zirkulation		Begleit- heizung		var. Zirk- WP		Zirk-WP mit Puffer- speicher		Ladung via Nahwärme- netz (Var.1/2)
		dez	zen	dez	zen	dez	zen	dez	zen	
Energieeffizienz	3	26.4	25.2	24.6	23.7	27.6	27.3	27.3	27	6.6 / 15.3
Investitionskosten	2	14	15.8	14.2	16.4	12.4	15.6	12.6	15.4	15.0 / 12.4
Installationsaufwand	2	7	14	8	16	6	12	5	10	7 / 7
Legionellen- prävention	3	Es sind zwischen den Systemen keine wesentlichen Unterschiede zu identifizieren.								
Kalkausscheidung	3									
Wartungskosten	2									
Komfort	2	10	10	15	15	10	15	10	15	10 / 6
Raumbedarf	1	4	8	4.5	9	3.5	7	3	6	4 / 5
Zuverlässigkeit	3	24	24	21	21	15	15	21	21	24 / 24
Planbarkeit	3	Es sind zwischen den Systemen keine wesentlichen Unterschiede zu identifizieren.								
Abrechnung	2									
Bewertung		6.1	6.9	6.2	7.2	5.3	6.6	5.6	6.7	4.8 / 5.0

Tabelle 51 zeigt, dass in einer Gesamtbetrachtung eine Warmhaltung mit Begleitheizung am besten abschneiden kann. Die Gewichtungsfaktoren können je nach Anspruchsgruppe unterschiedlich gewählt werden, was die Gesamtbewertung natürlich wiederum verändert.

14 Fehleranfälligkeit der Installation / Optimierungspotentiale

14.1 Leitungslänge

Am Messobjekt 3 wurde bereits sichtbar, dass die installierte Leitungslänge für das Verteilnetz einen grossen Einfluss auf die Arbeitszahl der Anlage hat. Mittels der Simulation ist die Möglichkeit gegeben, diesen Einfluss zu quantifizieren. Dabei wurde der Brauchwarmwasserverbrauch der Topologie H4W12 fixiert und die Leitungsabschnitte mit einem Skalierungsfaktor multipliziert. Der Zirkulationsvolumenstrom wurde auf die neuen Gegebenheiten angepasst. Dies führte weiter zu einer Vergrösserung des Speichervolumens und der Wärmepumpenleistung beim Zirkulationssystem mit Rücklauf in den Speicher (Kapitel 12.1).

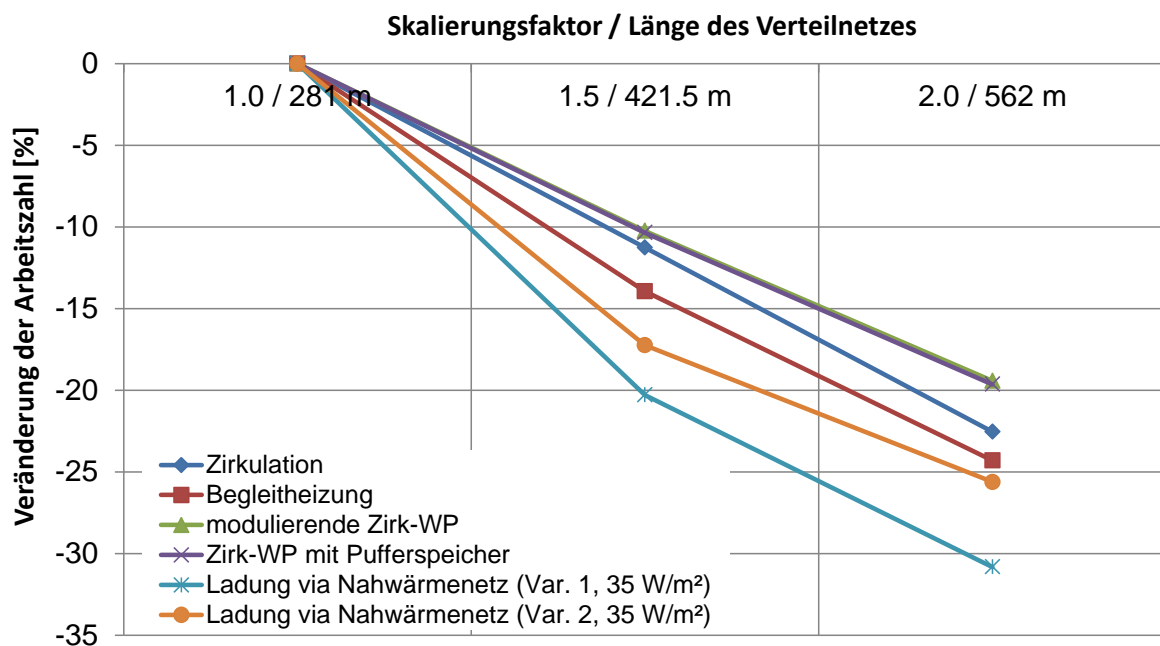


Abbildung 56: Einfluss der Leitungslänge auf die Arbeitszahl der Anlage (H4W12 – gut gedämmt)

Abbildung 56 zeigt, dass alle Systeme relativ stark unter einem grossen Leitungsnetz leiden. Die Warmhaltung mittels Begleitheizung erfährt eine etwas grössere Einbusse in der Arbeitszahl, als das herkömmliche Zirkulationssystem, da die zusätzlichen Verluste direkt elektrisch kompensiert werden müssen. Die Systeme mit Zirkulationswärmepumpe erfahren den geringsten Einfluss. Die kombinierten Installationen, besonders die Betriebsvariante 1, leiden stark unter dem verlängerten Leitungsnetz.

14.2 Heizungspufferspeicher in kombinierten Anlagen

Bislang wurden die kombinierten Systeme ohne Pufferspeicher betrachtet, um den „best case“ dieser Anlage aufzuzeigen. Die Resultate haben gezeigt, dass auch mit diesem Optimalfall die Arbeitszahlen der übrigen untersuchten Systeme nicht erreicht werden. In der Praxis sind die kombinierten Installationen oft mit einem heizungsseitigen Pufferspeicher bestückt.

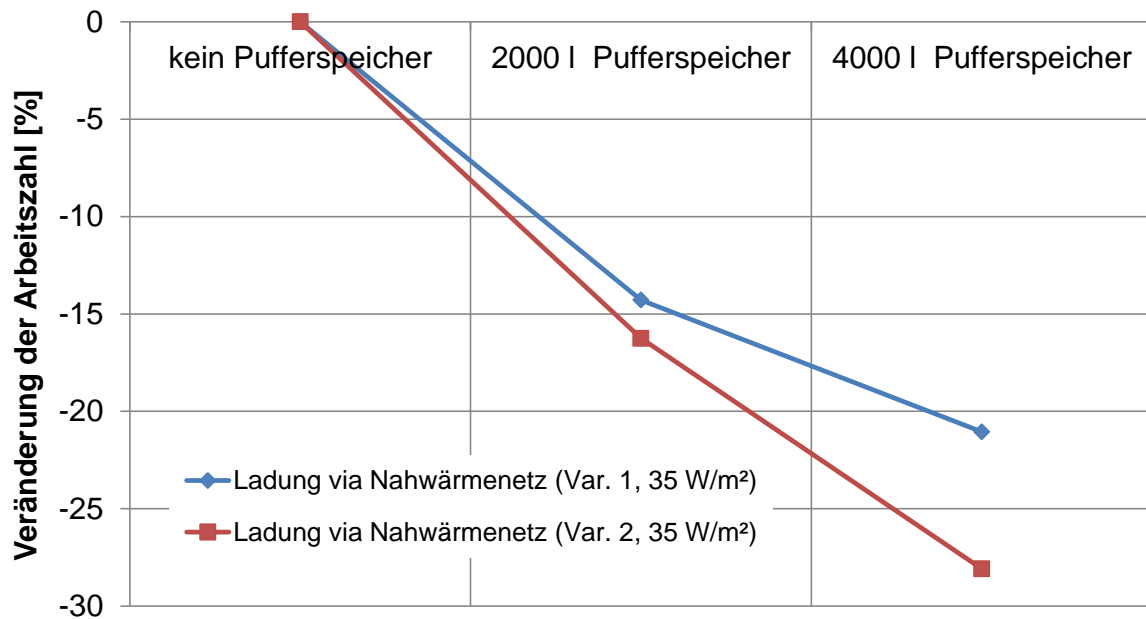


Abbildung 57: Einfluss eines heizungsseitigen Pufferspeichers auf die Arbeitszahl der kombinierten Anlage (H4W12 – gut gedämmt)

Abbildung 57 bestätigt die Erkenntnisse aus *Hubacher et al. (2009)*, dass ein Pufferspeicher im Heizkreis bei kombinierten Anlagen eine grosse Effizienzeinbusse bewirkt. Durch den Speicher befindet sich ein zusätzliches Wasservolumen im Nahwärmenetz. Dies bedeutet ein Mehraufwand an Energie, wenn für die BWW-Erwärmung das Nahwärmenetz auf ein höheres Temperaturniveau gebracht werden muss. Im Unterschied zu einem längeren Leitungsnetz, wo sich die Umgebungsverluste signifikant erhöhen, bleibt die Mehrenergie eines gut gedämmten Pufferspeichers für den Heizbetrieb oder die nächste BWW-Ladung nutzbar. Ein überdimensionierter Pufferspeicher verringert die Arbeitszahl einer kombinierten Anlage dennoch erheblich.

14.3 Speicher- und Wärmepumpengrösse

Der BWW-Speicher ist ein zentrales Element in einer Brauchwarmwasser-Anlage. Mit Hilfe der Simulation wurde der Einfluss der Speichergösse untersucht. Die Variation erfolgte unter drei verschiedenen Annahmen. Im ersten Fall wurde bei konstanter Wärmepumpenleistung das Speichervolumen variiert. Im zweiten Fall wurde die Wärmepumpenleistung dem jeweiligen Speichervolumen angeglichen, so dass es innerhalb von ca. 8 h durchgeladen werden kann. In einem weiteren dritten Fall erfolgte eine Variation der Wärmepumpenleistung bei einer fixierten Speichergösse.

Tabelle 52 und Tabelle 53 zeigten die Simulationsergebnisse der ersten beiden Fälle. Es ist ersichtlich, dass grosse Speicher mehr Wärmeverluste in das System einbringen. Dennoch könnte es bei zu kleinem Speicher zu einem Engpass in der Warmwasserversorgung kommen. Bei einer dem Speichervolumen angepassten Wärmepumpe häufen sich die Starts und es verlängert sich die Laufzeit bei der Verwendung von kleineren Speichern. Umgekehrt verhält sich das System mit einem grossen Speichervolumen. Die Laufzeit der Wärmepumpe ist kurz und es wird nur ein Start pro Tag benötigt.

Tabelle 52: Speichervolumenvariation bei konstanter WP-Leistung

Speichervolumen [l]	3000	5000	8000
WP-Leistung [kW]	40	40	40
Laufzeit pro Tag [h/d]	7.34	7.49	7.68
Anzahl Starts pro Tag [1/d]	3	2.14	1
Arbeitszahl [-]	2.76	2.75	2.73

Tabelle 53: Speichervolumenvariation mit angepasster WP-Leistung

Speichervolumen [l]	3000	5000	8000
WP-Leistung [kW]	25	40	60
Laufzeit pro Tag [h/d]	12.48	7.49	5.0
Anzahl Starts pro Tag [1/d]	4.86	2.14	1.29
Arbeitszahl [-]	2.71	2.75	2.72

Die Variation der Wärmepumpenleistung bei einer fixierten Speichergrösse von 5000 l zeigt einen geringen Einfluss auf die Arbeitszahl. Die Simulationsergebnisse lassen den Trend erkennen, dass die Arbeitszahl bei kleiner und grosser Wärmepumpenleistung zunimmt.

Tabelle 54: Variation der Wärmepumpenleistung bei konstantem Speichervolumen und BWW-Verbrauch

Speichervolumen [l]	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000
WP-Leistung [kW]	20	25	30	35	40	45	50
Laufzeit pro Tag [h/d]	14.2	11.9	10.9	8.7	7.5	6.5	5.5
Anzahl Starts pro Tag [1/d]	1.14	1.86	2.71	2.14	2.14	2.14	2
COP [-]	3.52	3.41	3.33	3.37	3.4	3.41	3.42
Arbeitszahl [-]	2.85	2.75	2.69	2.72	2.75	2.76	2.76

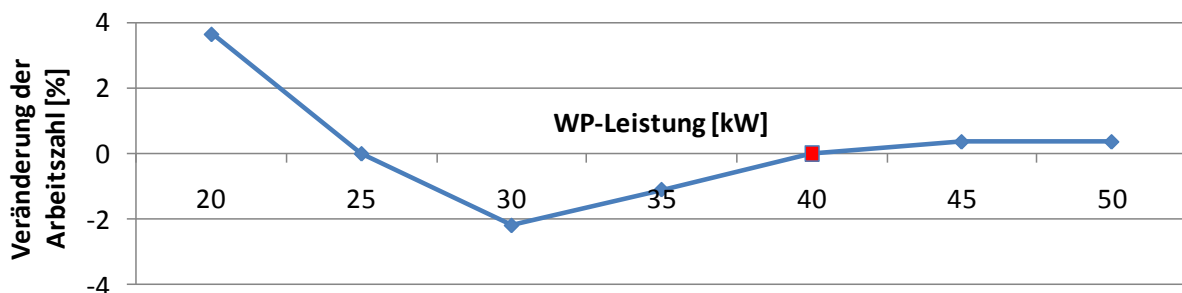


Abbildung 58: Einfluss der Wärmepumpenleistung auf die Arbeitszahl bezogen auf 40 kW Heizleistung.

Bei kleinen WP-Leistungen wird oftmals zu Zeitpunkten gezapft, in denen einen Ladung des Speichers stattfindet. Folglich saugt die Wärmepumpe kaltes Wasser an, was den COP der Wärmepumpe positiv beeinflusst, aber auch zu regelungstechnischen Schwierigkeiten führt. Zudem läuft man Gefahr, dass die Ladung des Speichers bei starker BWW-Nutzung nie beendet werden kann, weil die Rücklaufftemperatur immer tief bleibt. Die Rücklaufftemperatur wird oft als Ausschaltbedingung für den Regler verwendet. Bei unterdimensionierten Wärmepumpen können dann unter Umständen sehr lange Laufzeiten entstehen.

Überdimensionierte Wärmepumpen führen zu etwas besseren Anlagenarbeitszahlen, weil sie aufgrund ihrer hohen Leistung nur kurze Zeit bei hohen Rücklauftemperaturen arbeiten. Durch diesen kurzen Laufzeitanteil wird der COP nur wenig geschwächt.

So kann man abschliessend feststellen, dass Speichervolumen und Wärmepumpengrösse relativ geringen Einfluss auf die Anlageneffizienz haben. Es lohnt sich jedoch den BWW-Verbrauch des Objektes gut abzuschätzen, um die Wärmepumpen nicht zu gering auszulegen. Aufgrund der Messresultate sind ca. 100 l pro Wohnung gepaart mit einer Wärmepumpe, welche den BWW-Verbrauch bei einer Laufzeit von ca. 8 h decken kann, realistisch.

14.4 Zapfung/Zirkulation-Verhältnis

Generell zeigen die Simulationsergebnisse, dass die Arbeitszahl umso besser wird, je kleiner der Zirkulationsvolumenstrom eingestellt ist. Es stellt sich die Frage, wie weit der Volumenstrom reduziert werden darf. Die Auslegung erfolgt aufgrund der geforderten Spreizung im System. Wird eine grosse Spreizung zugelassen, so verringert sich die mittlere Wohnungsanschlusstemperatur und der Zirkulationsrücklauf kann tiefe Temperaturen annehmen. Abbildung 59 macht dies deutlich.

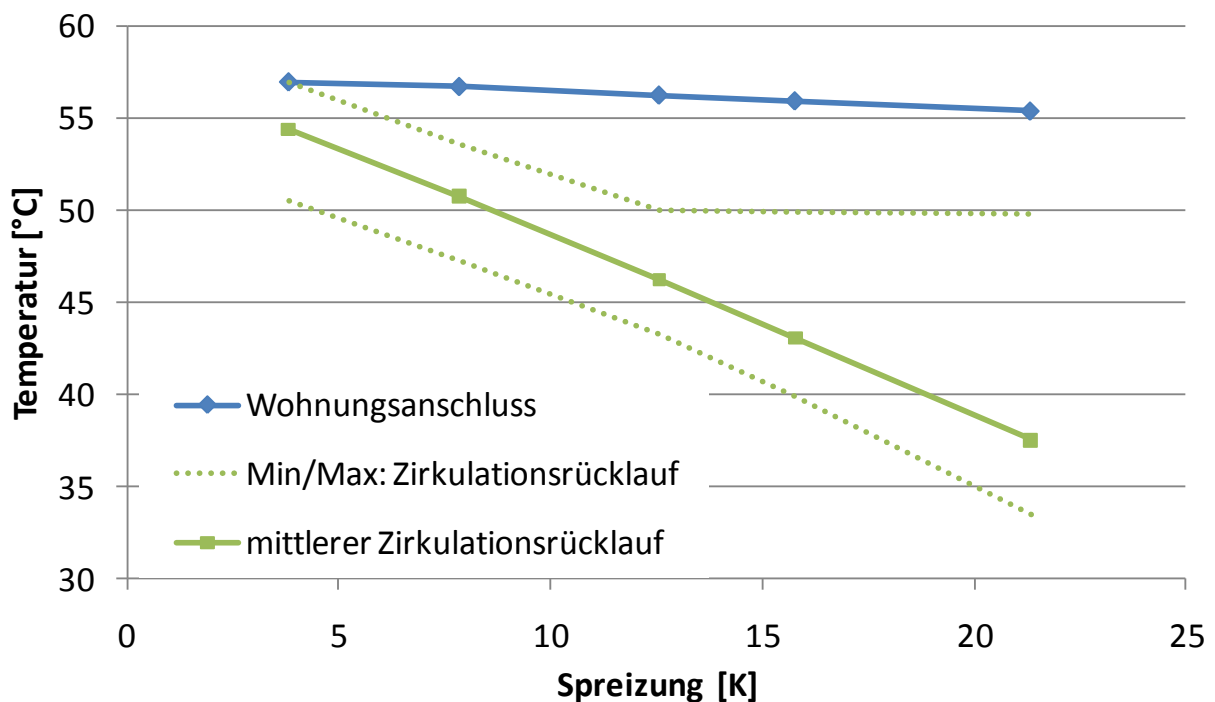


Abbildung 59: Temperaturen im System in Abhängigkeit der gemittelten Spreizung zwischen Warmwasseraustritt und Zirkulationsrücklauf

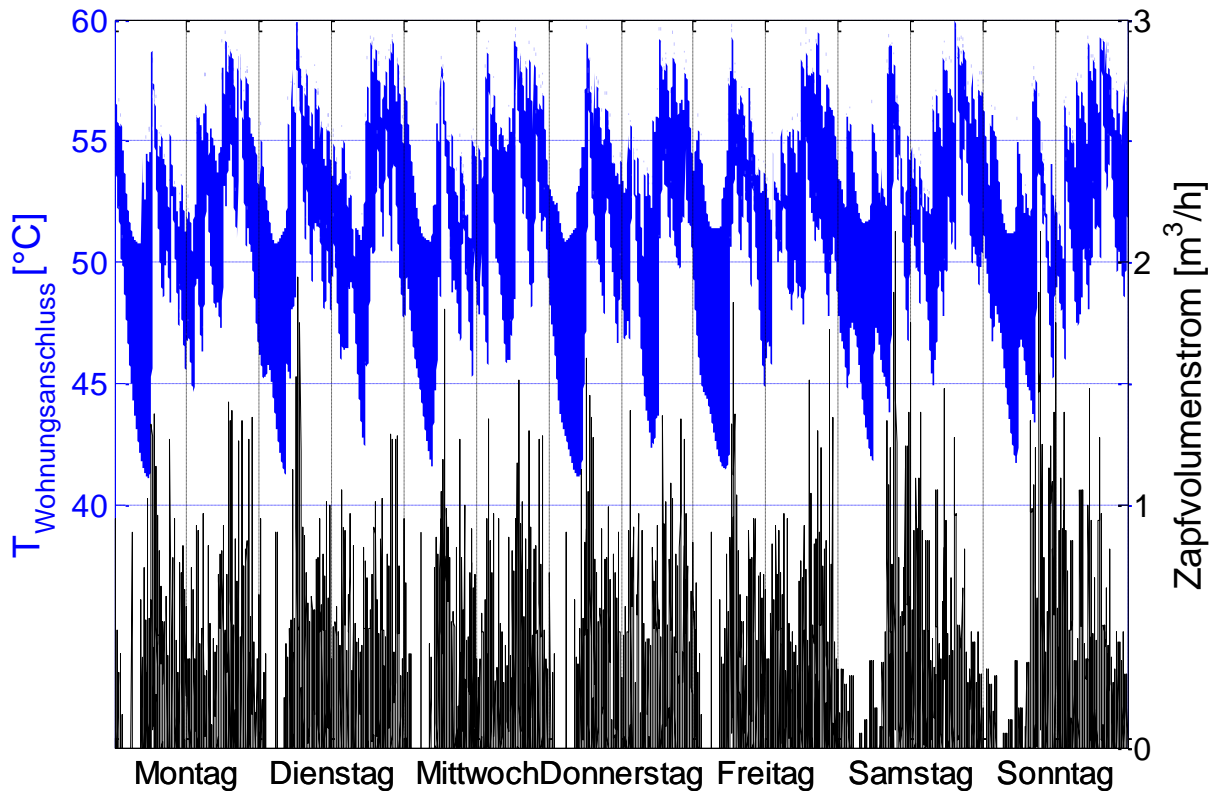


Abbildung 60: Wohnungsanschluss-Temperaturen der Topologie H4W12 bei einem Zirkulationsvolumenstrom von 50 l/h und 22 K Spreizung

Abbildung 60 zeigt in der oberen Hälfte den Temperaturbereich in dem die Wohnungsanschluss-Temperaturen in der Topologie H4W12 schwanken. Die Obergrenze des Bereichs bildet der Wohnungsanschluss, welcher dem Speicher am nächsten liegt. Die Untergrenze wird vom am weitesten entfernten Wohnungsanschluss vorgegeben. Im unteren Diagrammbereich ist das Zapfprofil aufgetragen. Es ist ersichtlich, dass in Zeiten ohne Zapfung die Temperaturen im System stark absinken. Unter diesem Umstand kann nicht nur der Mieterkomfort leiden, sondern auch der BWW-Bezug kann sich aufgrund des niederen Temperaturniveaus erhöhen. Weiters ist davon auszugehen, dass die Ausstossverluste zunehmen, da sich die Zeitdauer bis zum Erreichen der gewünschten Wassertemperatur an der Zapfstelle verlängert.

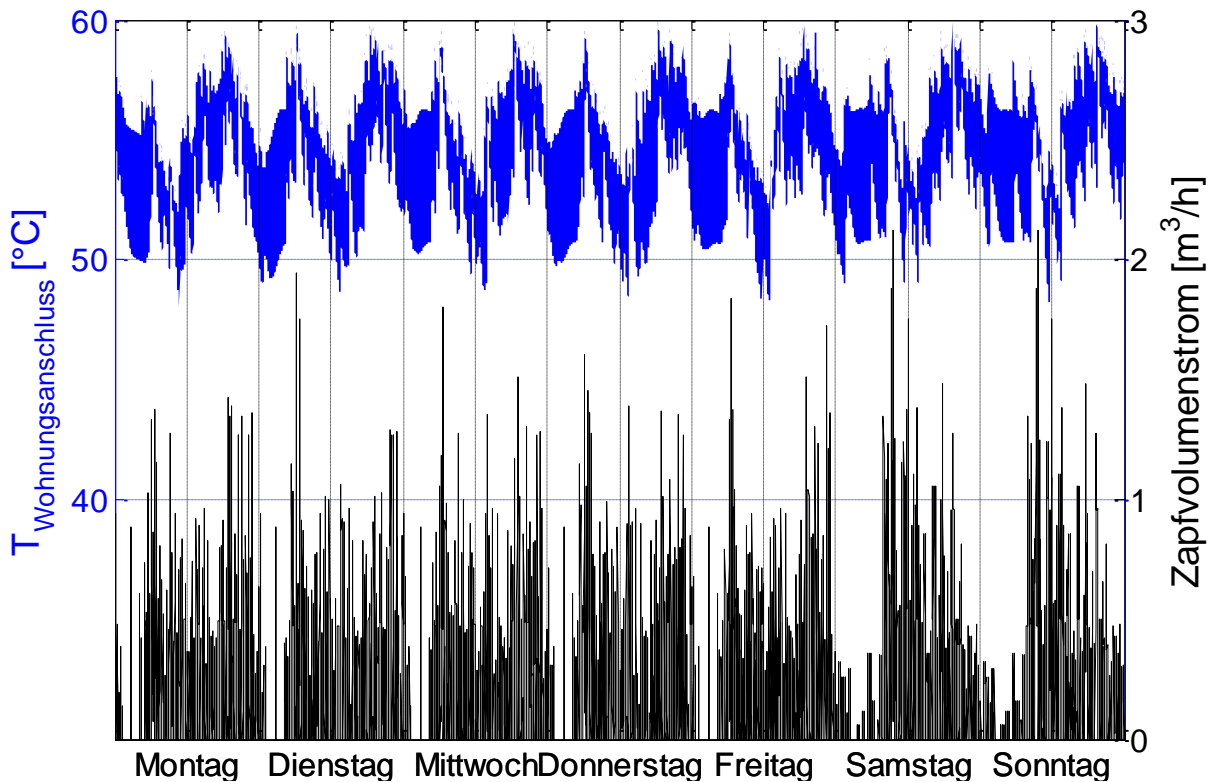


Abbildung 61: Wohnungsanschluss-Temperaturen der Topologie H4W12 bei einem Zirkulationsvolumenstrom von 115 l/h und 12 K Spreizung

Deutlich besser ist das Temperaturverhalten bei einem etwas höheren Zirkulationsvolumenstrom (mittlere Spreizung 12 K). Abbildung 61 zeigt, dass auch die entfernteste Wohnung das Warmwasser meist bei einer Temperatur grösser 50°C geliefert bekommt. Die Wohnungsanschlussstemperatur kann aber unter 50°C fallen, wenn längere Zeit keine Zapfung stattfindet.

14.5 Optimierungen bei der Berechnung des Zirkulationsvolumenstroms

Bei genauerer Betrachtung der Simulationsergebnisse im Anhang L fällt auf, dass die berechnete Spreizung von $\Delta T = 10$ K bei keinem der Simulationsergebnisse erreicht wird. Die effektiven gemittelten Spreizungen in den Resultaten betragen ca. 6.0...6.5 K.

Der Grund für diese Abweichung von der Planung liegt darin, dass nicht zwischen Scheinverlust und Wirkverlust unterschieden wurde. Es stellt sich nun heraus, dass es falsch ist, für die Berechnung der gemittelten Spreizung den Wirkverlust des Leitungsnetzes zu verwenden, da in der Wirklichkeit nur der Scheinverlust für diesen Bereich relevant ist.

Fall 1

Was der Planer bei berechnetem Wirkverlust von 10.45 W/m Doppelrohr plant, um eine gemittelte Spreizung $\Delta T = 10$ K für 281 m Doppelrohr in Parallelanordnung zu erhalten:

$$\dot{V}_{\text{Zirk}} = \frac{\dot{q}_{\text{rel,Wirk}} \cdot l}{\rho \cdot c_p \cdot \Delta T_{\text{Planung}}} = \frac{10.45 \frac{\text{W}}{\text{m}} \cdot 281\text{m}}{1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 4180 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot 10\text{K}} = 0.00007 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} = 0.253 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

Auf der Anlage stellt sich jedoch eine vom Scheinverlust abhängige Spreizung ein (Annahme 8.16 W/m Doppelrohr - aus Simulationsergebnis Zirkulation H4W12 – zentral, mittel isoliert)

$$\Delta T_{\text{effektiv}} = \frac{\dot{q}_{\text{rel,Schein}} \cdot l}{\rho \cdot c_p \cdot \dot{V}_{\text{Zirk}}} = \frac{8.16 \frac{\text{W}}{\text{m}} \cdot 281\text{m}}{1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 4180 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot 0.00007 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}} = 7.8 \text{ K}$$

Dadurch, dass der Scheinverlust bei Anlagen in denen Zapfungen stattfinden immer kleiner als der Wirkverlust ist, wird der Zirkulationsvolumenstrom nach den bisherigen Berechnungsmethoden immer überschätzt. Die Abweichung wird umso grösser je häufiger Warmwasser gezapft wird. Der Planer hat bei seiner Berechnung also den Volumenstrom ermittelt, der im Minimum nötig ist, um eine Spreizung von maximal 10 K zu erhalten. Diese Spreizung stellt sich dann ein, wenn über längere Zeit keine Zapfung stattfindet (Abbildung 62).

Fall 2

Was der Planer nach Suissetec plant, um eine gemittelte Spreizung $\Delta T = 10$ K für 281 m Doppelrohr in Parallelanordnung zu erhalten:

$$\dot{V}_{\text{Zirk}} = \frac{\dot{q}_{\text{rel,Suissetec}} \cdot l}{\rho \cdot c_p \cdot \Delta T_{\text{Planung}}} = \frac{14 \frac{\text{W}}{\text{m}} \cdot 281\text{m}}{1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 4180 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot 10\text{K}} = 0.000094 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} = 0.339 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

Auf der Anlage stellt sich jedoch eine vom Scheinverlust abhängige Spreizung ein (Annahme 8.16 W/m Doppelrohr - aus Simulationsergebnis Zirkulation H4W12 – zentral, mittel isoliert)

$$\Delta T_{\text{effektiv}} = \frac{\dot{q}_{\text{rel,Schein}} \cdot l}{\rho \cdot c_p \cdot \dot{V}_{\text{Zirk}}} = \frac{8.24 \frac{\text{W}}{\text{m}} \cdot 281\text{m}}{1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 4180 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot 0.000094 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}} = 5.9 \text{ K}$$

Besonders gross ist die Abweichung, wenn mit dem Planungsvorschlag von *Suissetec* (2003) gearbeitet wird. Denn hier wurde dem grob berechneten Wirkverlust pro Meter Doppelrohr ein Zuschlag von ca. 10 % hinzuaddiert.

Es ist klar, dass dem Planer der effektive Wirkverlust nicht bekannt sein kann, da dieser von der Ausführungsqualität bauseits abhängig ist. Dennoch ist es ratsam, den theoretischen Wirkverlust des Leitungsnetzes überschlagsmässig zu berechnen, um damit den Zirkulationsvolumenstrom für die gewünschte mittlere Spreizung zu ermitteln. Auch bei der Investition in die Zirkulationsleitung bringt dies Vorteile, denn die Querschnitte können möglicherweise kleiner gewählt werden.

Das Messobjekt 1 zeigt sogar auf, dass ca. 70 % des Wirkverlusts zur Berechnung des Zirkulationsvolumenstroms für eine gemittelte Spreizung ausreichen würden. Natürlich gelten diese Annahmen nur, sofern in den Gebäuden regelmässige Zapfungen stattfinden. In den

Zeiten, wo wenig Warmwasser gezapft wird, vergrößert sich die Spreizung im Zirkulationskreis.

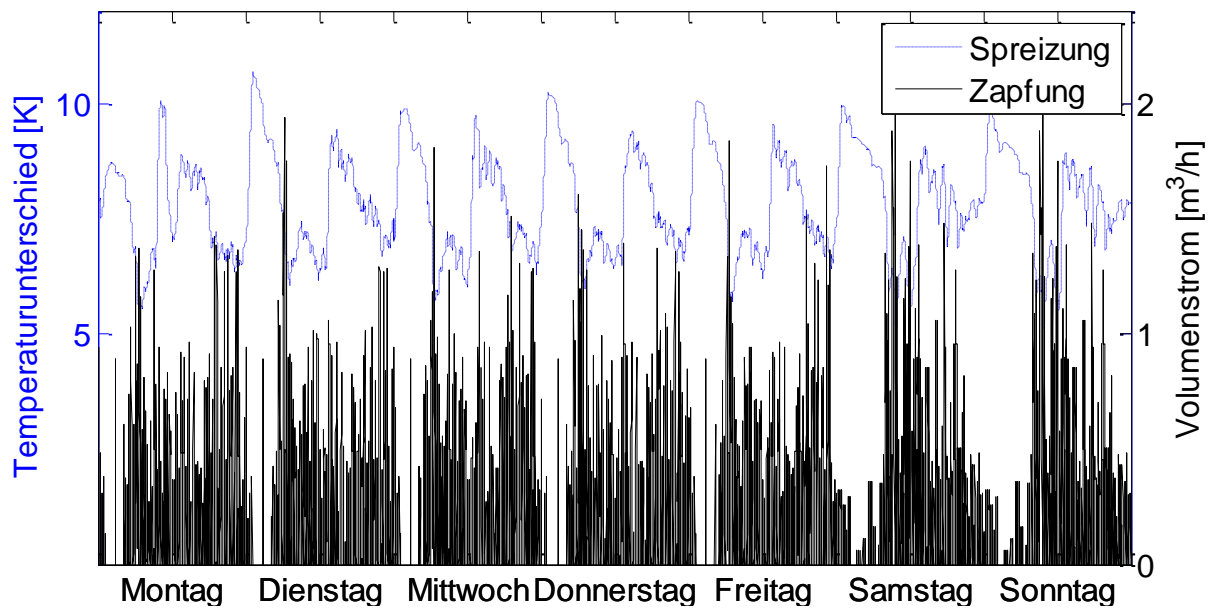


Abbildung 62: Einfluss des Zapfvolumenstroms auf die Spreizung (anhand H4W12)

Am Messobjekt 1 wurden sorgfältig Optimierungen hinsichtlich Spreizung und Mieterkomfort durchgeführt. Die Anlage läuft nun seit über einem Jahr ohne Reklamationen bezüglich Verfügbarkeit des Warmwassers seitens der Mieterschaft.

Die Autoren wurden erst im Verlauf dieses Projekts auf den Effekt von Schein-, Wirk- und Blindverlust aufmerksam. Es wird dringend empfohlen, die Auswirkungen dieser Erkenntnisse zukünftig in die Planung von Zirkulationssystemen einfließen zu lassen. Beispielsweise könnte eine regelbare Pumpe durch Variation des Volumenstroms die gewünschte Zirkulationsrücklauftemperatur konstant halten.

14.6 Kontrolle der Dämmqualität

Aus dem Workshop kam die Idee, die Dämmqualität eines Gebäudes mittels eines Tests zu überprüfen (analog zum Blow-door-Test). Damals ging man noch davon aus, dass diese Prüfung auch durchgeführt werden könne, während dem die Anlage genutzt wird. Durch die Erkenntnisse hinsichtlich Schein-, Blind- und Wirkverlust ist mittlerweile klar, dass die Dämmqualität nur dann gemessen werden kann, wenn innerhalb der Messdauer keine Zapfungen im Objekt stattfinden. Vorzugsweise sollte daher eine solche Messung kurz nach der Inbetriebnahme der Überbauung stattfinden. Der Messwert für den Wirkverlust würde weiters helfen den Zirkulationsvolumenstrom den vorliegenden Verhältnissen anzupassen.

14.7 CO₂ Wärmepumpe

Die CO₂ Wärmepumpe würde sich im Allgemeinen gut zur Brauchwarmwasser-Bereitstellung eignen, da sie durch den überkritischen Kreisprozess einfach die hohen Temperaturen erreichen kann. Jedoch reagiert auch die Leistungszahl der CO₂ Wärmepumpe empfindlich auf höhere Rücklauftemperaturen in den Gaskühler. Bei den Systemen mit Begleitheizung oder Zirkulationswärmepumpe ist der Speicher sauber geschichtet, was den Einsatz eines CO₂ Kreislaufs begünstigt. Die R134a Wärmepumpe erreichte in dieser Situation einen COP von 3.58. Die CO₂ Wärmepumpe kann unter gewissen Umständen höhere Leistungszahlen erreichen, wie Abbildung 63 zeigt.

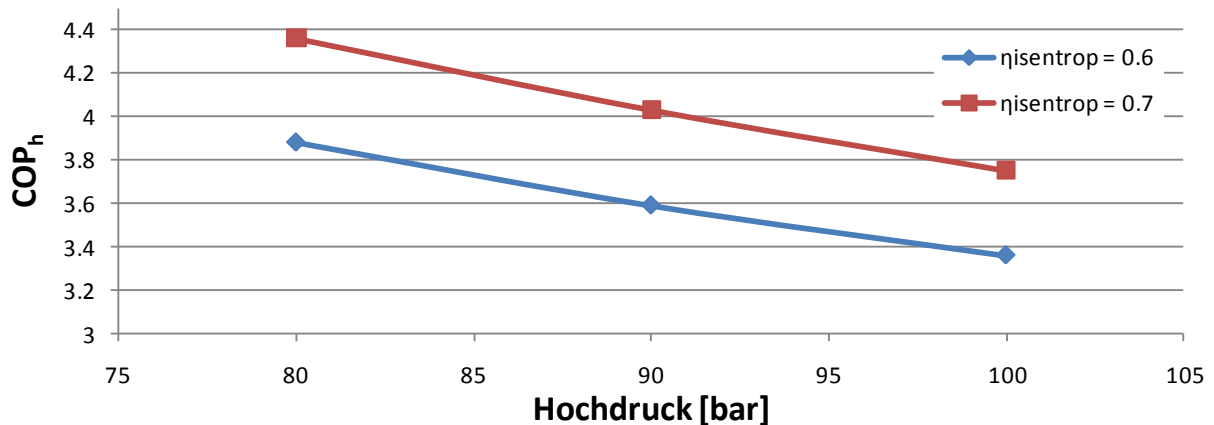


Abbildung 63: mögliche Arbeitszahlen eines CO₂ Kreisprozesses bei der Ladung eines geschichteten Speichers

15 Dezentrale oder zentrale Versorgung?

Durch die Erkenntnisse dieser Studie, stellt sich nun die Frage, ab wann eine dezentrale Versorgung der zentralen vorzuziehen ist. Zentrale Anlagen sind günstiger in ihren Gesteuerungskosten, weisen jedoch im Vergleich zur dezentralen Ausführung eine niedrigere Arbeitszahl auf. Über die Laufzeit der Anlage kann sich die Mehrinvestition in eine dezentrale Anlage amortisieren. Die Amortisationsdauer ist abhängig vom Stromtarif, dem Warmwasserverbrauch und dem Unterschied der Leistungszahl im Vergleich zu einer zentralen Versorgung. Je grösser der Abstand zwischen den einzelnen Gebäuden, desto geringer wird die Arbeitszahl einer zentralen Versorgungsanlage.

An der Topologie H4W12 wurden 3 Fälle anhand des Zirkulationssystems kalkuliert, indem die Hauptleitungslänge (Doppelrohr) von ursprünglich 55 m auf 105 m respektive 155 m vergrössert wurde.

Der tägliche Warmwasserbezug wurde mit 4000 l fixiert und ein Stromtarif von 0.08 CHF/kWh berücksichtigt.

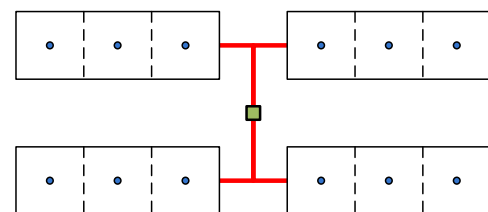


Abbildung 64: Topologie H4W12 mit Hauptleitung (rot markiert)

Tabelle 55: Veränderung der Investitionskosten und Arbeitszahl bei verschiedenen Hauptleitungslängen (herkömmliche Zirkulation)

Leitungslänge (Doppelrohr)	Hauptleitung 55 m	Hauptleitung 105 m	Hauptleitung 155 m
	gesamt 281 m	gesamt 331 m	gesamt: 381 m
Investition Dezentral [CHF]	106'190	106'190	106'190
Investition Zentral [CHF]	73'143	82'178	99'605
Investitionsdifferenz [CHF]	33'047	24'012	6'585
AZ _{Anlage} Zentral [-]	2.57	2.41	2.26
AZ _{Anlage} Dezentral [-]	2.59	2.59	2.59

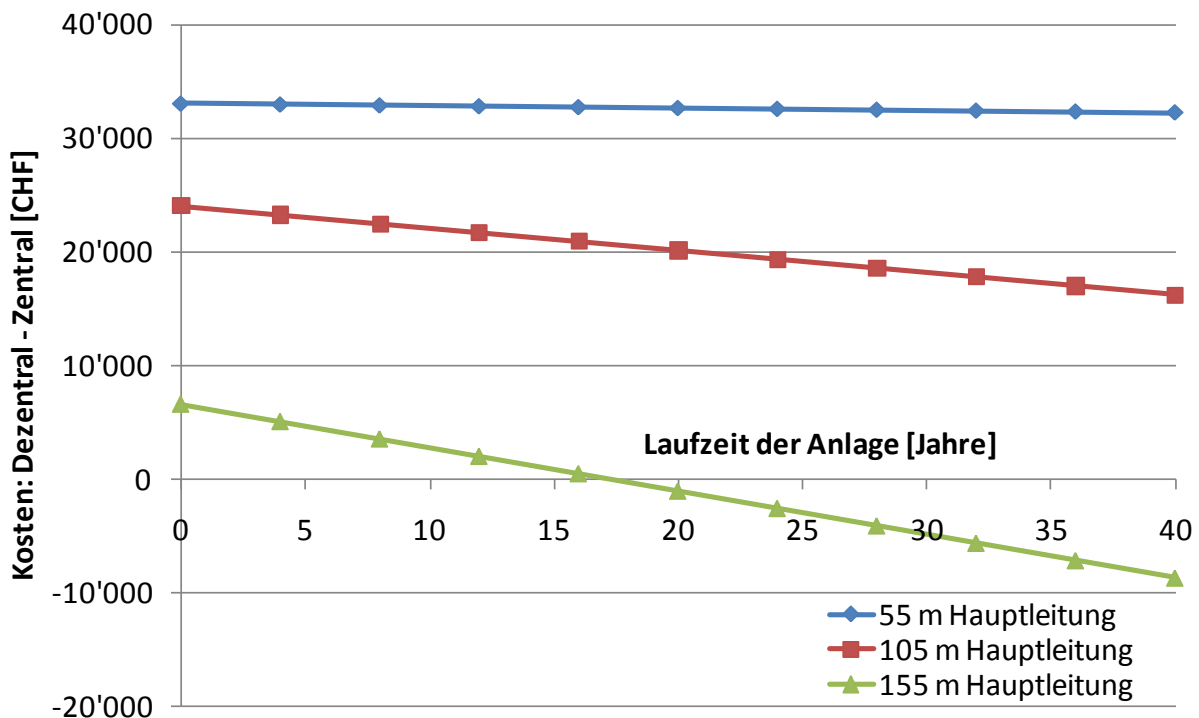


Abbildung 65: Entwicklung der Kosteneinsparung beim Betreiben eines dezentralen Systems anstelle einer zentralen Anlage

Die Kostendifferenzanalyse in Abbildung 65 startet im Jahr 0 im positiven Bereich, da wesentlich mehr in eine dezentrale Anlage investiert werden müsste, als in das zentrale Pendant. Über die Laufzeit fallen für den Betrieb der zentralen Anlage jedoch aufgrund der geringeren Arbeitszahl mehr Stromkosten an. Beim Nulldurchgang in Abbildung 65 existiert zwischen den beiden Anlagenarten keine Kostendifferenz mehr. Ab diesem Zeitpunkt ist das Betreiben einer dezentralen Anlage sinnvoller. Es ist ersichtlich, dass dieser Nulldurchgang bei verdichtet gebauten Objekten in einer absehbaren Zeit nicht erreicht wird. Liegen die Objekte etwas weiter voneinander entfernt, ist eine dezentrale Lösung ab einer Laufzeit von ca. 20 Jahren die wirtschaftlich bessere Lösung.

16 Schlussfolgerungen/Zusammenfassung

Die Bereitstellung von Brauchwarmwasser in Mehrfamilien Überbauungen ist ein komplexes Thema. Mittels drei Feldmessungen und Simulationen an Objekten verschiedener Grösse konnten die Einflüsse verschiedenster Aufbauten im Detail untersucht werden. Es hat sich gezeigt, dass BWW-Anlagen mit Zirkulation am effizientesten sind, jedoch auch ein gewisses Risiko hinsichtlich Installation mit sich bringen. Systeme mit Begleitheizung haben eine geringfügig schlechtere Effizienz, sind jedoch einfacher in der Handhabung. Anlagen, bei denen über das Heizungsnetz dezentrale BWW-Speicher gelanden werden, sind bei einem Grossteil der Topologien energetisch nicht sinnvoll. Die Resultate der Studie sind im Folgenden im detailliert aufgelistet.

- Die Zirkulationssysteme haben die höchste Effizienz bezüglich der BWW-Bereitstellung, verlangen aber insgesamt eine sorgfältigere Planung, Installation und Inbetriebnahme. Dagegen sind Systeme mit Begleitheizung einfacher zu beherrschen und ihre Effizienz liegt 5-10% tiefer als bei den Zirkulationssystemen. Die übliche Betriebsart (Var. 1) des kombinierten Systems schneidet energetisch ungenügend ab. Eine energetisch optimierte Anlagenausführung (Var. 2) zeigt immer noch 40% höhere Energieverbräuche und ist in der Installation teuer. Bei der typischen

Einbindung ist der Energieverbrauch von kombinierten Systemen mehr als doppelt so hoch wie bei separaten BWW-Systemen mit Zirkulation.

- Die energetischen Unterschiede zwischen einem gängigen Zirkulationssystem und der Warmhaltung mit Begleitheizung sind geringer, als zunächst erwartet wurde. Die Arbeitszahlen unterscheiden sich im Bereich von 5-10%. Unter der Voraussetzung einer qualitativ hochwertigen Installation ist der Einsatz einer direkt-elektrischen Begleitheizung in Minergie-Bauten somit nicht abwegig. Denn dadurch, dass der Speicher sauber geschichtet ist, arbeitet die Brauchwarmwasser-Wärmepumpe mit besserem COP, so dass in der Gesamtbetrachtung nur ein geringer Mehraufwand an elektrischer Energie entsteht.
- Bei Zirkulationssystemen wird ca. 17 % des gesamten elektrischen Energieaufwands für die Warmhaltung verwendet.
- Systeme mit Begleitheizung benötigen 27 % des gesamten elektrischen Energieaufwands zur Warmhaltung des Brauchwarmwassers im Verteilnetz.
- Der Einfluss der Dämmqualität ist sehr entscheidend für die Arbeitszahl aller Systeme. Sauber und lückenlos zu dämmen macht also oft energetisch mehr Sinn, als systematische Optimierungen an der Anlage vorzunehmen.
- Die Durchmischung des Brauchwarmwasserspeichers führt zu einer signifikanten Beeinflussung der Wärmepumpeneffizienz. Der Zirkulationsvolumenstrom sollte daher möglichst klein gehalten werden. Ausserdem sollten im Speicher drallhemmende Massnahmen vorgesehen sein.
- Der Legionellenschutz ist infolge der täglichen Zwangsladung bei allen untersuchten Anlagen gewährleistet.
- Jedes untersuchte System kann Temperaturen über 50°C am Wohnungsanschluss erreichen. Bei der Begleitheizung schwankt die Temperatur am Wohnungsanschluss typischerweise um $57^{\circ}\text{C} \pm 2.5^{\circ}\text{C}$. Die Wohnungsanschlussstemperatur der Zirkulationssysteme (mit einer Spreizung von 8°C) oszilliert im Bereich von ca. $55^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$, wobei hier der gewählte Zirkulationsvolumenstrom einen starken Einfluss ausübt. Findet bei der vorliegenden Auslegung längere Zeit keine Zapfung statt, so kühlt die Wohnungsanschluss-Temperatur auf 50°C ab (wiederum bei einer eingestellten Spreizung von 8°C).
- Ein grosses Verteilnetz bewirkt relativ grosse Effizienzeinbussen in der Anlage. Ein verdoppeltes Leitungsnetz führt unter gleichen Randbedingungen zu einer Verminderung der Arbeitszahl um circa 20 %. Oftmals ist die Anordnung der Gebäude durch die Geländetopologie vorgegeben. Was beeinflusst werden kann, ist die Architektur der Wohnungen, welche mit möglichst wenigen Steigschächten auskommen soll.
- Die Zirkulationsvolumenströme sind in der Praxis meist zu hoch eingestellt. Die Ursache liegt zum einen in der Berechnungsmethode, zum andern implizieren alte Normen und voreingestellte Regulierventile die Forderung nach einer kleinen Spreizung. Die Studie hat gezeigt, dass eine mittlere Spreizung zwischen Warmwasseraustritt und Zirkulationsrücklauf des Speichers von 10 K durchaus zulässig ist und energetische Vorteile nach sich zieht. Die typische Einstellung liegt heute bei 2-3 K. Ohne weiteren Eingriff auf eine Anlage im Feld konnte durch die Reduktion des Zirkulationsvolumenstroms (Spreizung erhöhte sich damit von 2.5 K auf 6.5 K) die Arbeitszahl um ca. 20% erhöht werden.
- Das Takten der Zirkulation mit fixiertem On/Off-Intervall hat wenig Einfluss auf die Effizienz.
- Kombinierte Systeme, welche die dezentralen BWW-Speicher mit der zentralen Heizungswärmepumpe mit Energie versorgen, bedingen ein hohes Temperaturniveau von mehr als 63°C. Die Wärmepumpe befindet sich damit nahe an ihrer Einsatzgrenze.

- Grosse Gebäudeabstände haben beträchtliche Auswirkungen auf die Arbeitszahl von kombinierten Systemen.
- Ein Pufferspeicher im Nahwärmenetz oder grosse Volumina der Verteilungen verringert die Systemeffizienz einer kombinierten Installation signifikant.
- Selbst mit Optimierungsmassnahmen, wie Entladeschutz und Raumheizungsstopp, sind kombinierte Systeme in den meisten Fällen sehr ineffizient. Die Arbeitszahl liegt unter allen Umständen tiefer als bei den separaten BWW-Systemen. Die zwei Temperaturniveaus von BWW und Heizung sollten somit mit getrennten Installationen versorgt werden.
- Über- oder unterdimensionierte Speicher sind nicht besonders schädlich für die Effizienz des Systems, solange die Dimensionierung der Wärmepumpe dem BWW-Verbrauch angepasst ist. Auch eine leichte Fehldimensionierung der Wärmepumpe hat nur geringen Einfluss auf die Systemeffizienz.
- Eine Kontrollmessung zur Ermittlung der Dämmqualität der Verteilungen wäre sinnvoll um deren Qualität zu beurteilen, ist aber nur dann möglich, wenn keine Zapfung im System stattfindet.
- Geschichtete Speicher ohne Durchmischung (z.B bei elektrischen Begleitheizungen) würden den Einsatz von CO₂ Wärmepumpen begünstigen, welche durch höhere Leistungszahlen auch die Arbeitszahl einer Anlage weiter verbessern könnten.
- Mit den Feldmessungen wurde ein typischer Warmwasserverbrauch pro Person und Tag von 36 bis 44 Liter ermittelt. Pro Wohnung und Tag liegt der gemittelte Warmwasserbezug zwischen 70 und 90 Liter.
- Dezentrale Anlagen sind energetisch vorteilhaft und können auch wirtschaftlich interessant sein, sofern die einzelnen Gebäude einer Überbauung räumlich etwas weiter auseinander liegen.

Symbolverzeichnis

Symbole

A	Fläche [m ²]
a	Faktor zur Berücksichtigung eines Anschlussstutzens [-]
AZ _{Anlage}	Arbeitszahl der Brauchwarmwasser-Bereitstellungsanlage [-]
COP	Leistungszahl [-]
cp	Spezifische Wärmekapazität [kJ/(kg·K)]
d	Durchmesser
Δp	Druckdifferenz [Pa]
ΔT	Temperaturdifferenz/Spreizung/Temperaturabstand [K]
Δt	Zeitschritt [s]
E	Energie pro m ³ gezapftes Brauchwarmwasser [kWh/m ³]
f	Korrekturfaktor
g	Erdbeschleunigung [m/s ²]
Gr	Grashofzahl [-]
H	Höhe [m]
h	spezifische Enthalpie [kJ/kg]
Ĥ	Enthalpiestrom [kW]
l	Länge/Abstand [m]
n	Anzahl [-]
Nu	Nusseltzahl [-]
P	elektrische Aufnahmeleistung [kW]
Pr	Prandtlzahl [-]
Q̇	Wärmestrom [W]
q̇	relativer Wärmestrom [W/m]
Ra	Rayleigh-Zahl [-]
Re	Reynoldszahl [-]
s	Dicke [m]
T	Temperatur [°C]
V	Volumen [m ³]
v	Strömungsgeschwindigkeit [m/s]
Ṡ	Volumenstrom [m ³ /s]
Z	Faktor zur Berücksichtigung von Sperrzeiten [-]

α	Wärmeübertragungskoeffizient [$W/(m^2 \cdot K)$]
β	volumetrischer thermischer Ausdehnungskoeffizient [$1/K$]
ε	Effizienz [-]
η	dynamische Viskosität [$kg/(m \cdot s)$]
λ	Wärmeleitfähigkeit [$W/(m \cdot K)$]
ν	kinematische Viskosität [m^2/s]
ξ	Rohrreibungszahl [-]
ρ	Dichte [kg/m^3]

Indices

Anschluss	Anschlussstutzen am Speicher oder an Rohrleitungen
Blind	Bezeichnung des Blindverlusts
Bww	Brauchwarmwasser
BwwWP	Brauchwarmwasser-Wärmepumpe
CNS	Chromstahl
el,total	totale elektrische Energieaufnahme im Bilanzgebiet
Element	Rohrabschnitt oder Speicherschicht
erzw	erzwungene Konvektion
Fluss	Fliessbewegung im Speicher oder in Rohrleitung
frei	freie Konvektion
Heiz	Raumheizung
Heizband	Begleitheizung
Heiznetz	Heizungsverteilnetz (Nahwärmenetz)
HL	Hauptleitung
i	Laufvariable
iso	isoliert
j	Laufvariable
Kaltwasser	Bezug auf den Kaltwasseranschluss am Speicher
Kond	Konduktion
kond	Kondensation
Konv	Konvektion
lam	laminare Strömung
Netz	Brauchwarmwasser-Verteilnetz
normiert	normierter Wert
Planung	geplanter Wert
Pumpe	bezogen auf die Zirkulationspumpe
Ra	Rohraussenwand

Register	Heizregister im Speicher
rel	relative Grösse
Ri	Rohrinnenwand
RL	Rücklauf
Rohr	Rohrleitung
Schein	Bezeichnung des Scheinverlusts
SL	Steigleitung
Soll	Sollwert
SP	Brauchwarmwasser-Speicher
Suissetec	gemäss Suissetec
thermisch	thermischer Wert
turb	turbulente Strömung
u	Unterkühlung
ue	Überhitzung
Umg	Umgebung des entsprechenden Teilstücks
verd	Verdampfung
Verlust,Zentrale	Verlust, welcher im Technikraum entsteht
VL	Vorlauf
Warmwasser	Bezug auf den Warmwasseranschluss am Speicher
Wasser	Fluid Wasser
Wirk	Bezeichnung des Wirkverlusts
Wohnungsanschluss	Bezug auf den Wohnungsanschluss im Verteilnetz
WP	Wärmepumpe
Zapf	Abkürzung für Zapfung
Zapfung	aus dem System entnommenes Brauchwarmwasser
Zirk	Abkürzung für Zirkulation
Zirkulation	Zirkulierendes Wasser/Rücklaufstutzen der Zirkulation am Speicher
ZirkWP	Zirkulations-Wärmepumpe
Zwischenspeicher	Pufferspeicher im Zirkulationskreislauf
Zyl	Zylindermantel

Referenzen

Alpha•InnoTec GmbH, 2010, Wärmepumpen-Guide 2010, Marketing + Wirtschaft Verlagsgesellschaft GmbH, München.

Autorenteam des SSSL, 2003, Sanitärberechnungen – kurz und bündig, 5. Auflage, Schweizerisch-Liechtensteinischer Gebäudetechnikverband (Suissetec), Zürich.

BAG, 2009, Legionellen und Legionellose, Bern.

Bär S., 2009, Strömungsanalyse bei Lade- und Entladevorgängen in Warmwasserboilern, Bachelorarbeit HSR, Rapperswil.

Bauverlag BV GmbH,
http://www.shk-profi.com/artikel/shk_Solaranlagen_effizient_nutzen_857346.html,
20.07.2011.

Böswirth L., 2007, Technische Strömungslehre, 7. Auflage, Friedr. Vieweg&Sohn Verlag, Wiesbaden.

Bühlmann R., Etter H., Eggspühler C. H., Riggenbach M., 2008. «Eulachhof» Winterthur, Analysen, Beobachtungen und Einschätzung zu einer energetisch und architektonisch beispielhaften Siedlung, CAS MINERGIE Zertifikatsarbeit, Fachhochschule Nordwestschweiz.

Bundesamt für Energie und Verein Minergie, 2010, Leistungsgarantie Haustechnik, Geschäftsstelle Minergie, Bern.

Bundesamt für Statistik (BFS), 2011, Gebäude- und Wohnungsstatistik 2009, Strukturdaten zu den Gebäuden und Wohnungen, Neuenburg.

DVGW Deutsche Vereinigung des Gas- und Wasserfaches e.V., 2004, DVGW-Arbeitsblatt W 551, Trinkwassererwärmungs- und –leitungsanlagen; Technische Massnahmen zur Verminderung des Legionellenwachstums; Planung, Errichtung, Betrieb und Sanierung von Trinkwasser-Installationen, Bonn.

Ehrbar M., 2011, Systemeinbindung und Topologien von Wärmepumpenanlagen, Buchs.

Feisst, U. und Hüppi A., 1980, Untersuchung über die Temperaturschichtung in thermischen Speichern, Diplomarbeit NTB.

Geberit Vertriebs GmbH & Co. KG, 2011, Allgemeine Planungsgrundlagen – Bedarfszahlen im Sanitärbereich.

Gross D., Ancel C., Guglielmi L., 2010, Fatigue Design for Scroll Compressor Wraps, International Compressor Engineering Conference, Purdue.

Grote K.-H., Feldhusen J., 2007, Dubbel, Taschenbuch für den Maschinenbau, 22. Auflage, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York.

Hubacher P., Bernal C., Ehrbar M., 2009, Feldmonitoring und Analysen an Grosswärmepumpen, Phase 2, BFE-Projekt Nr. 100'917, Schlussbericht.

Hubacher P., Ehrbar M., 2008, Feldmonitoring und Analysen an Grosswärmepumpen, Phase 2, BFE-Projekt Nr. 100'917, Jahresbericht.

Incropera F. P., DeWitt D. P., 2002, Fundamentals of Heat and Mass Transfer, Fifth Edition, John Wiley&Sons, New York.

Jordan U., Vajen K., 2003, DHWcalc, Werkzeug zur Generierung von Trinkwasser-Zapfprofilen auf statistischer Basis, Version 1.10, <http://solar.uni-kassel.de/>.

Klein S. A., 2011, F-Chart Software, EES - Engineering Equations Solver, Version 8.874, www.fchart.com.

Konferenz Kantonalen Energiedirektoren, 2008, Mustervorschriften der Kantone im Energiebereich (MuKE), Ausgabe 2008, Chur.

Kremer R., Waider D., 2001, Trinkwassererwärmungsanlagen, Teil 2: Konstruktion und Bauart von zentralen Anlagen sowie technische Lösungsvorschläge, SBZ 19/2001, Gentner Verlag, Stuttgart.

Kubik W., 2011, Warmhaltung von Warmwasserverteilsystemen, Beurteilung der Vor- und Nachteile verschiedener Systeme, Bern.

Nipkow J., Real M., 2000, Energieverluste von Warmwasserverteilsystemen und Sparpotentiale, Zürich.

Oscar Neher & Co. AG, www.onc-ag.ch/omag/projekt.html, 07.04.2011.

Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein, 1991, SIA 385/3 Warmwasserversorgungen für Trinkwasser in Gebäuden, Norm Ausgabe 1991, Zürich.

Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein, 2011, SIA 385/1 Warmwasserversorgung für Trinkwasser in Gebäuden – Grundlagen und Anforderungen, Norm Ausgabe 2011, Zürich.

Schweizerischer Verein des Gas- und Wasserfaches, 2000, W3 Regelwerk, Leitsätze für die Erstellung von Trinkwasserinstallationen, Ausgabe 2000, Zürich.

Schweizerischer Verein des Gas- und Wasserfaches SVGW, 2001, Legionellen in Trinkwasserinstallationen - Was muss beachtet werden?, Merkblatt, Zürich.

Sitzmann B., 2004, Zirkulationseinbindung von solaren Warmwasseranlagen in MFH, DIS-Projekt Nr: 46034, Schlussbericht.

Statistisches Amt des Kantons Zürich, 2011, Statistisches Jahrbuch des Kantons Zürich, Zürich.

Suter J.-M., Nipkow J., Mathez S. A., 2010, Die neue SIA-Norm 385/1, Warmwasserversorgung für Trinkwasser in Gebäuden – Grundlagen und Anforderungen, Zürich.

Tschui A., Stadelmann B., 2006, Studie Warmwasserverteilung, Kurzstudie über die Energieverluste der verschiedenen Verteilsituationen von Warmwasser im Mehrfamilienhaus, Version 1.4, HTA Luzern.

Tyco Thermal Controls, 2008, Warmwasser-Temperaturhaltesystem, Informationsbroschüre, Belgien.

Vogelsanger P., 2008, Personenbelegung und Wohnflächenbedarf von Wohnungen in der Schweiz – Empfehlungen und Erläuterungen, Zürich.

Walser P., Hofer R., 2002, Warmwasser-Zirkulation, Auflage 2002, Schweizerisch-Liechtensteinischer Gebäudetechnikverband (Suissetec), Zürich.

Yih, C-S., 1965, Dynamics of Nonhomogeneous Fluids, the MacMillan Company, New York.

ANHANG

A Simulationsmodelle

A.1 Stoffwerte

Den Teilmodellen liegen die Ansätze zur Stoffwertberechnung aus Tabelle 56 zugrunde, welche mit dem Programm EES von *Klein (2011)* definiert wurden.

Tabelle 56: Ansätze zu Stoffwertberechnung

Parameter	Beschreibung	Herkunft	Max. rel. Fehler
ρ_{Wasser} [kg/m ³]	Dichte des Wassers approximiert mit der Formel: $\rho_{\text{Wasser}}(T) = 1000 + 0.01589 \cdot T - 0.005868 \cdot T^2 + 0.00001557 \cdot T^3$	EES	0.017 %
$c_{p_{\text{Wasser}}}$ [kJ/(kg·K)]	Wärmekapazität des Wassers: $c_{p_{\text{Wasser}}} = 4.18$ kJ/(kg·K)	Konstante	1.14 %
λ_{Wasser} [W/(m·K)]	Wärmeleitfähigkeit des Wassers approximiert mit der Formel: $\lambda_{\text{Wasser}} = 0.5628 + 0.001172 \cdot T$	EES	2.8 %

A.2 Steigleitungsmodell

Die Steigleitungen erstrecken sich über alle Etagen vom Keller bis ins Dachgeschoss. An diesen Leitungen sind die Warmwasserverteiler der Wohnungen angeschlossen. Im Falle einer installierten Zirkulation besitzt jede Steigleitung an ihrem Ende eine Rückführung in die Verteilleitung analog Abbildung 66. Der Bezug jeder Wohnung wird aus der Steigleitung gezapft. Das Modell enthält für jede Wohnung ein Zapfprofil, womit die Bezüge an der Steigleitung jederzeit bekannt sind.

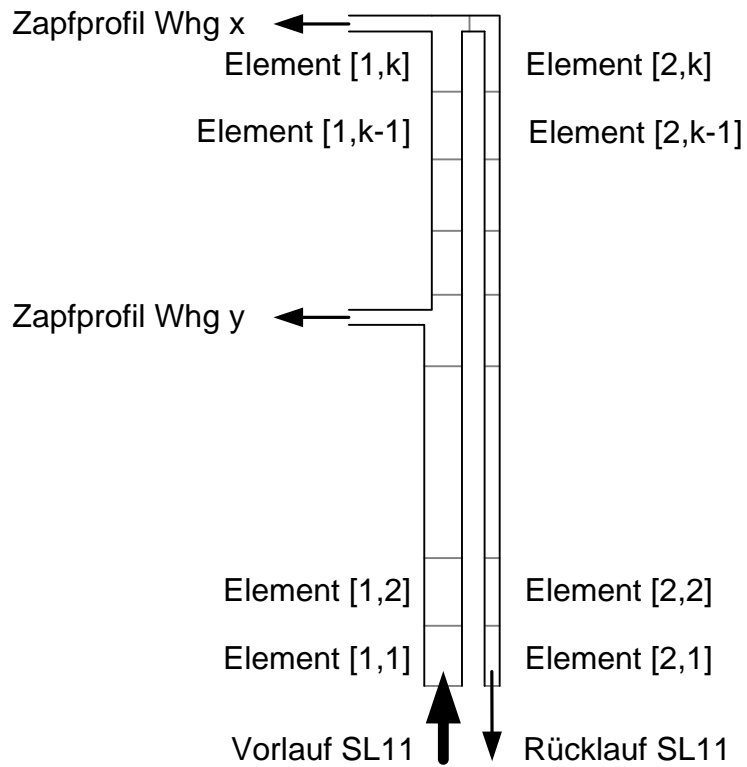


Abbildung 66: Steigleitung mit Wohnungsanschlüssen in $2 \cdot k$ Elemente unterteilt

Jedes Element erhält bei der Initialisierung einen Startwert für seine Temperatur, damit der erste Simulationsschritt durchführbar wird. Ausserdem sind der Zirkulationsvolumenstrom und die Rohrdimensionen für jede Steigleitung individuell für das Leitungsnetz berechnet.

Tabelle 57: Ein- und Ausgänge des Steigleitungsmodells

Parameter	Beschreibung	Herkunft
$T_{SL,1:2,1:k}$ [°C]	2xk-Matrize mit den Temperaturwerten pro Element	Steigleitung(t-Δt)
$T_{Warmwasser,SL}$ [°C]	Temperatur des Steigleitungsanschlusses	Verteilleitung(t-Δt)
$\dot{V}_{Zirk,SL}$ [m ³ /s]	Zirkulationsvolumenstrom in der Steigleitung	Vorgabe
$\dot{V}_{Wohnung}$ [m ³ /s]	Zapfvolumenströme aus Zapfprofil für jede Wohnung	Vorgabe
$l_{Wohnung}$ [m]	Vektor mit Wohnungspositionen vertikal von Verteilleitung entfernt	Vorgabe
d_{Rohr} [m]	2xk-Matrix mit den Innendurchmessern der Vorlauf- und Zirkulationsleitung	Vorgabe
T_{Umg} [°C]	Umgebungstemperatur im Steigleitungsbereich	Vorgabe
λ_{iso} [W/(m·K)]	Wärmeleitfähigkeit der Rohrisolation	Vorgabe
s_{iso} [m]	Dicke der Rohrisolation	Vorgabe
$l_{Element}$ [m]	Länge eines Leitungselements	kalkuliert
$V_{Element,VL,j}$ [m ³]	Elementinhalt im Vorlauf der Steigleitung	kalkuliert
$V_{Element,RL,j}$ [m ³]	Elementinhalt im Rücklauf (Zirkulation) der Steigleitung	kalkuliert
$\dot{V}_{Warmwasser,SL}$ [m ³ /s]	Volumenstrom am Vorlauf der Steigleitung	kalkuliert

Wärmeverlust an die Umgebung

Der Wärmeverlust für isolierte Rohre berechnet sich nach *Incropera und DeWitt (2002)* mit dem Ausdruck (11) und kann dementsprechend auf jedes Element der Steigleitung angewendet werden.

$$\dot{Q}_{Umg,i,j} = \frac{2 \cdot \pi \cdot l_{Element} \cdot \lambda_{iso} \cdot (T_{SL,i,j} - T_{Umg})}{\ln\left(\frac{\frac{d_{Rohr,i,j}}{2} + s_{iso}}{\frac{d_{Rohr,i,j}}{2}}\right)} \quad \text{für } i = 1,2 \text{ und } j = 1 \dots k \quad (11)$$

Interne Wasserbewegung

Der Warmwasserfluss im Vorlauf der Steigleitung ergibt sich aus der Vorgabe des Zirkulationsvolumenstroms und der Zapfprofile aller angeschlossenen Wohnungen.

$$\dot{V}_{Warmwasser,SL} = \dot{V}_{Fluss,1,0} = \dot{V}_{Zirk,SL} + \sum_{j=1}^k \dot{V}_{Wohnung,j} \quad (12)$$

$$\dot{H}_{Warmwasser,SL} = \dot{V}_{Warmwasser,SL} \cdot \rho_{Wasser,warm} \cdot T_{Warmwasser,SL} \cdot c_{p,Wasser} \quad (13)$$

$$\dot{H}_{Wohnung,j} = \dot{V}_{Wohnung,j} \cdot \rho_{Wasser,1,j} \cdot SL \cdot T_{1,j} \cdot c_{p,Wasser} \quad \text{für } j = 1 \dots k \quad (14)$$

Der Fluss vom Leitungsabschnitt j in den Abschnitt j+1 ergibt sich für die Vorlaufstrecke im Weiteren mit der Formel (15) und für den Rücklauf mit (16).

$$\dot{V}_{\text{Fluss},1,j} = \dot{V}_{\text{Fluss},1,j-1} - \dot{V}_{\text{Wohnung},j} \text{ für } j = 1 \dots k \quad (15)$$

$$\dot{V}_{\text{Fluss},2,j} = -\dot{V}_{\text{Zirk},\text{SL}} \text{ für } j = 1 \dots k \quad (16)$$

Der Energiefluss zwischen den Leitungsstücken beschreiben die Formeln (17) bis (20) anhand Abbildung 67.

$$\dot{H}_{\text{Fluss},1,j} = \dot{V}_{\text{Fluss},1,j-1} \cdot \rho_{\text{Wasser},1,j-1} \cdot T_{\text{SL},1,j-1} \cdot c_{\text{pWasser}} \text{ für } j = 1 \dots k-1 \quad (17)$$

$$\dot{H}_{\text{Fluss},2,j} = \dot{V}_{\text{Fluss},2,j-1} \cdot \rho_{\text{Wasser},2,j} \cdot T_{\text{SL},2,j} \cdot c_{\text{pWasser}} \text{ für } j = 1 \dots k-1 \quad (18)$$

$$\dot{H}_{\text{Fluss},1,k} = \dot{V}_{\text{Fluss},1,k} \cdot \rho_{\text{Wasser},1,k} \cdot T_{\text{SL},1,k} \cdot c_{\text{pWasser}} \quad (19)$$

$$\dot{H}_{\text{Fluss},2,k} = -\dot{V}_{\text{Fluss},1,k} \cdot \rho_{\text{Wasser},1,k} \cdot T_{\text{SL},1,k} \cdot c_{\text{pWasser}} \quad (20)$$

Schliesslich verlässt die Energiemenge (21) die Steigleitung.

$$\dot{H}_{\text{Zirk},\text{SL}} = -\dot{V}_{\text{Zirk},\text{SL}} \cdot \rho_{\text{Wasser},2,1} \cdot T_{\text{SL},2,1} \cdot c_{\text{pWasser}} \quad (21)$$

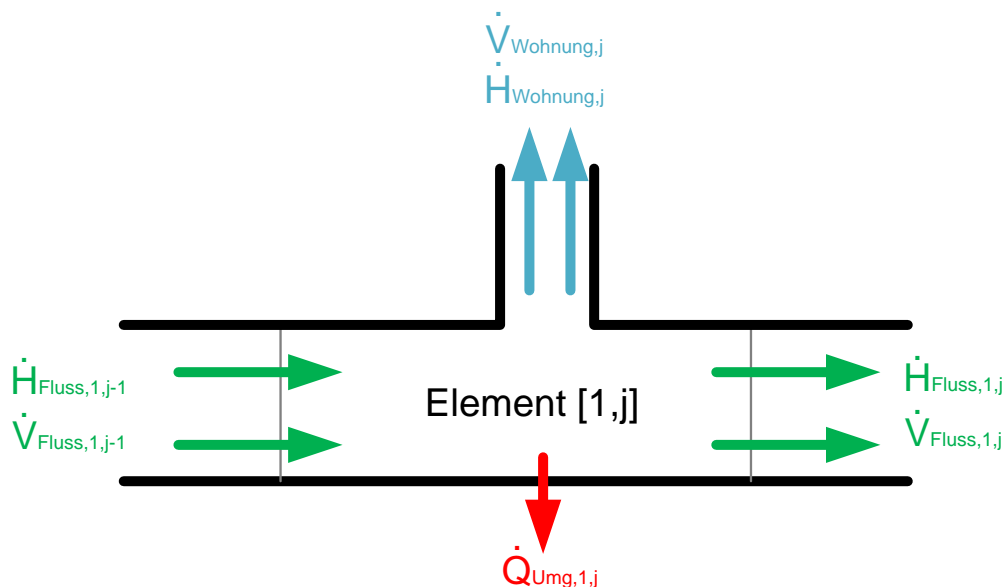


Abbildung 67: Volumen- und Energieflüsse in einem Leitungselement

Die Energiebilanz aus Abbildung 67 führt mit den Formeln (22) bis (27) zu der neuen Temperatur im jeweiligen Leitungsabschnitt.

$$\dot{Q}_{\text{Element},1,1} = \dot{H}_{\text{Warmwasser},\text{SL}} - \dot{H}_{\text{Fluss},1,1} - \dot{H}_{\text{Wohnung},1} - \dot{Q}_{\text{Umg},1,1} \quad (22)$$

$$\dot{Q}_{\text{Element},2,1} = \dot{H}_{\text{Zirk},\text{SL}} - \dot{H}_{\text{Fluss},2,1} - \dot{Q}_{\text{Umg},2,1} \quad (23)$$

$$\dot{Q}_{\text{Element},1,j} = \dot{H}_{\text{Fluss},1,j} - \dot{H}_{\text{Fluss},1,j-1} - \dot{H}_{\text{Wohnung},j} - \dot{Q}_{\text{Umg},1,j} \text{ für } j = 2 \dots k \quad (24)$$

$$\dot{Q}_{\text{Element},2,j} = \dot{H}_{\text{Fluss},2,j} - \dot{H}_{\text{Fluss},2,j-1} - \dot{Q}_{\text{Umg},2,j} \text{ für } j = 2 \dots k \quad (25)$$

$$T_{SL,1,j} = T_{SL,1,j} + \frac{\dot{Q}_{Element,1,j} \cdot \Delta t}{V_{Element,VL,j} \cdot c_{PWasser} \cdot \rho_{Wasser,1,j}} \quad (26)$$

$$T_{SL,2,j} = T_{SL,2,j} + \frac{\dot{Q}_{Element,2,j} \cdot \Delta t}{V_{Element,RL,j} \cdot c_{PWasser} \cdot \rho_{Wasser,2,j}} \quad (27)$$

A.3 Verteilungsmodell

Das Verteilungsmodell beschreibt die Leitungsstrecke in den Untergeschossen der Gebäude. Der Aufbau des Modells ist vergleichbar mit dem Steigleitungsmodell. Im Vorlauf gehen von dieser Leitung Verzweigungen in Steigleitung ab. Der Rücklauf der Steigleitung mündet schliesslich in den Rücklauf der Verteilung. Bei der gesamten Rücklaufstrecke handelt es sich um die Zirkulationsleitung. Abbildung 68 veranschaulicht die Unterteilung der Verteilung VL1 in m Elemente. Die Vorlaufe Ebene wird in der Matrizenzeile 1 und die Rücklaufe Ebene in der Matrizenzeile 2 referenziert. An beliebigen Positionen können Verzweigungen definiert werden. Die jeweilige Position wird einem Element der Leitung zugeordnet, sowohl auf der Vorlauf- wie auf der Rücklaufe Ebene.

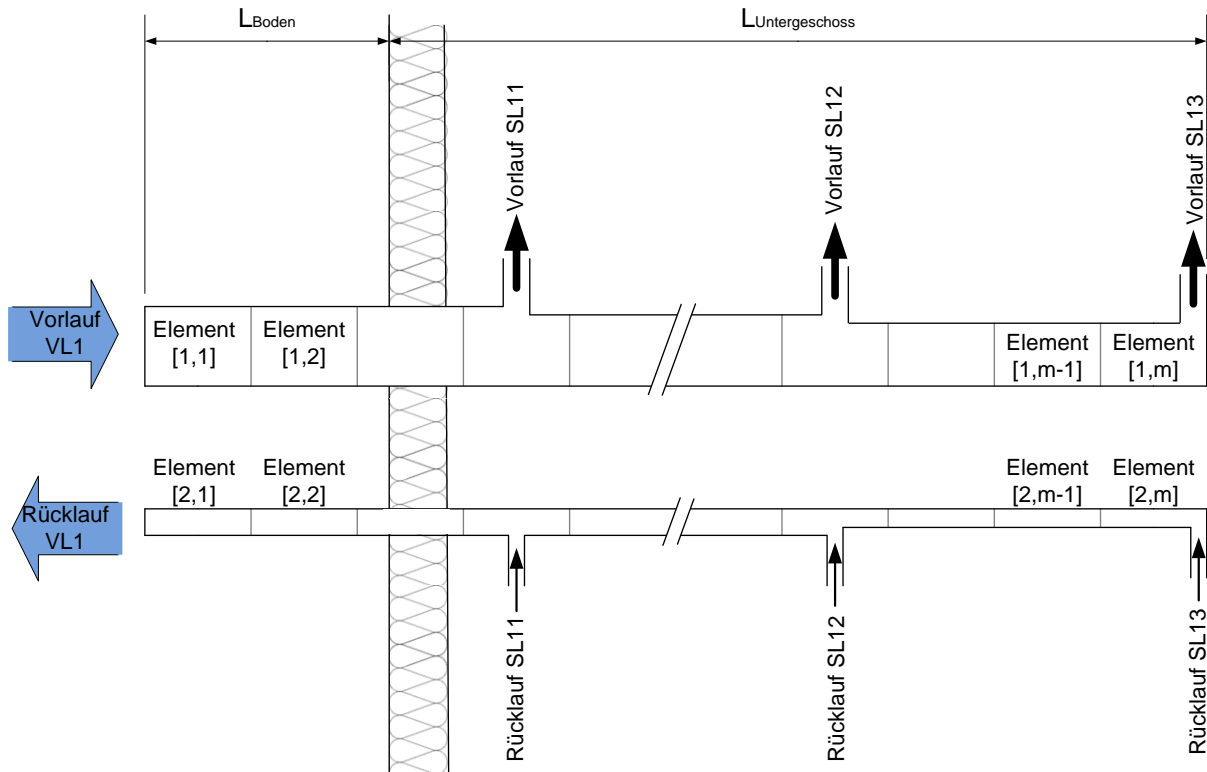


Abbildung 68: Verteilung mit Steigleitungsanschlüssen in 2xm Elemente unterteilt

Die Initialisierung weist jedem Element eine Starttemperatur zu, welche in Flussrichtung auf der Vor- und Rücklaufe Ebene linear abfällt. Zudem erfolgt eine Zuordnung der Leitungsverzweigungen auf den Elementen. Der dafür bezeichnende Vektor enthält als Daten den Abstand der Verzweigung ab Hauswand in Metern. Der letzte Vektoreintrag definiert somit die Länge der Verteilung im Untergeschoss. Zu dieser Untergeschosslänge kann ein erdverlegtes Leitungstück hinzuaddiert werden. Ausserdem werden etwaige Verjüngungen des Rohrdurchmessers berücksichtigt. Die Berechnung der Energiebilanz der Verteilung wird hier nicht mehr detailliert ausgeführt, da sie jener des Steigleitungsvorlaufs entspricht.

Tabelle 58: Ein- und Ausgänge des Verteilungsmodells

Parameter	Beschreibung	Herkunft
$T_{VL,1:2,1:m}$ [°C]	2xm-Matrize mit den Temperaturwerten pro Element	Verteilleitung(t-Δt)
$T_{Warmwasser,VL}$ [°C]	Temperatur des Verteilungsanschlusses	Hauptleitung(t-Δt)
$\dot{V}_{Warmwasser,SL,1:m}$ [m ³ /s]	Vektor mit Vorlaufvolumenstrom jeder Steigleitung	Steigleitung(t)
$\dot{V}_{Zirk,SL,1:m}$ [m ³ /s]	Vektor mit Zirkulationsvolumenstrom jeder Steigleitung	Steigleitung(t)
$T_{Umg,1:m}$ [°C]	Vektor mit der Umgebungstemperatur pro Element. Das erdverlegte Leitungsstück ist im Schnitt tieferen Umgebungstemperaturen ausgesetzt.	Vorgabe
d_{Rohr} [m]	2xk-Matrix mit den Innendurchmessern der Vorlauf- und Zirkulationsleitung	Vorgabe
λ_{iso} [W/(m·K)]	Wärmeleitfähigkeit der Rohrisolation	Vorgabe
s_{iso} [m]	Dicke der Rohrisolation	Vorgabe
Pos_{SL} [m]	Vektor mit Steigleitungsabgängen horizontal von der Hauswand entfernt	Vorgabe
$V_{Element,i,j}$ [m ³]	Elementinhalt im Vor- und Rücklauf der Steigleitung	kalkuliert
$\dot{V}_{Warmwasser,VL}$ [m ³ /s]	Volumenstrom am Vorlauf der Verteilleitung	kalkuliert
$\dot{V}_{Zirk,VL}$ [m ³ /s]	Zirkulationsvolumenstrom am Rücklauf der Verteilleitung	kalkuliert

Die Energieströme aus Abbildung 69 werden mittels der Formeln (28) bis (31) beschrieben. Gleichung (32) liefert schliesslich die neue Temperatur in jedem Element für die Berechnungen des nächsten Zeitschritts.

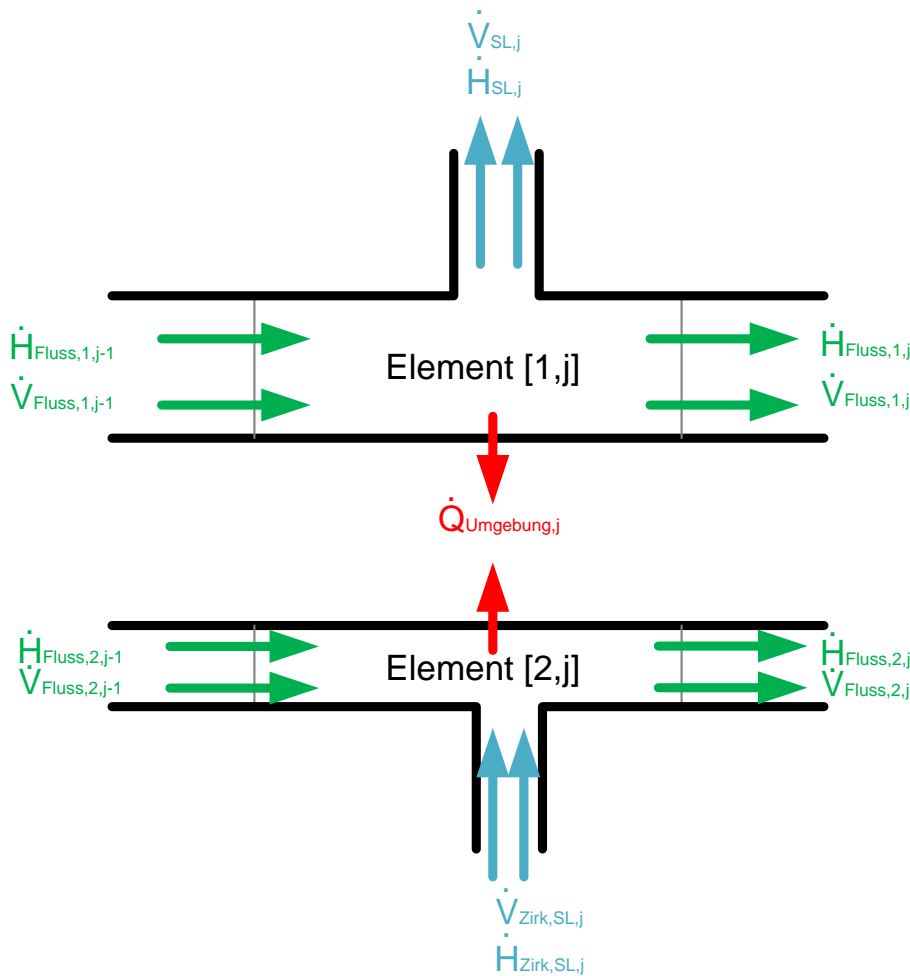


Abbildung 69: Volumens- und Energieflüsse im Verteilungsmodell

$$\dot{Q}_{Element,1,1} = \dot{H}_{Warmwasser,VL} - \dot{H}_{Fluss,1,1} - \dot{H}_{Warmwasser,SL,1} - \dot{Q}_{Umg,1,1} \quad (28)$$

$$\dot{Q}_{Element,2,1} = \dot{H}_{Zirk,VL} - \dot{H}_{Fluss,2,1} - \dot{Q}_{Umg,2,1} + \dot{H}_{Zirk,SL,1} \quad (29)$$

$$\dot{Q}_{Element,1,j} = \dot{H}_{Fluss,1,j} - \dot{H}_{Fluss,1,j-1} - \dot{H}_{Warmwasser,SL,j} - \dot{Q}_{Umg,1,j} \text{ für } j = 2 \dots m \quad (30)$$

$$\dot{Q}_{Element,2,j} = \dot{H}_{Fluss,2,j} - \dot{H}_{Fluss,2,j-1} - \dot{H}_{Zirk,SL,j} - \dot{Q}_{Umg,2,j} \text{ für } j = 2 \dots m \quad (31)$$

$$T_{VL,i,j} = T_{SL,i,j} + \frac{\dot{Q}_{Element,i,j} \cdot \Delta t}{V_{Element,i,j} \cdot c_{PWasser} \cdot \rho_{Wasser,i,j}} \text{ für } i=1,2 \text{ und } j=1 \dots m \quad (32)$$

A.4 Hauptleitungsmodell

Die letzte Komponente des Leitungsnetzes ist die Hauptleitung. Von ihr gehen alle Verteilungen ab und in den Rücklauf der Hauptleitung fließen alle Zirkulationsrückläufe der Verteilungen. Die Funktion ist damit identisch mit der Verteilung. Daher ist auch

das Modell exakt dasselbe. Einzig die Initialisierung und Bezeichnungen differieren. In Bezug auf Abbildung 69 ändern die Indizes SL zu VL.

Tabelle 59: Ein- und Ausgänge des Hauptleitungsmodells

Parameter	Beschreibung	Herkunft
$T_{HL,1:2,1:p}$ [°C]	2xp-Matrize mit den Temperaturwerten pro Element	Hauptleitung(t-Δt)
$T_{Warmwasser}$ [°C]	Temperatur des Speicheranschlusses	Speicher(t-Δt)
$\dot{V}_{Warmwasser,VL,1:p}$ [m ³ /s]	Vektor mit Vorlaufvolumenstrom jeder Verteilleitung	Verteilleitung(t)
$\dot{V}_{Zirk,VL,1:p}$ [m ³ /s]	Vektor mit Zirkulationsvolumenstrom jeder Verteilleitung	Verteilleitung(t)
$T_{Umg,1:p}$ [°C]	Die Hauptleitung verläuft in unbeheizten oder beheizten Gebäudeteilen	Vorgabe
d_{Rohr} [m]	2xk-Matrix mit den Innendurchmessern der Vorlauf- und Zirkulationsleitung	Vorgabe
λ_{iso} [W/(m·K)]	Wärmeleitfähigkeit der Rohrisolation	Vorgabe
s_{iso} [m]	Dicke der Rohrisolation	Vorgabe
Pos_{VL} [m]	Vektor mit Verteilleitungsabgängen vom Speicher entfernt	Vorgabe
$V_{Element,i,j}$ [m ³]	Elementinhalt im Vor- und Rücklauf der Steigleitung	kalkuliert
$\dot{V}_{Warmwasser,HL}$ [m ³ /s]	Volumenstrom am Vorlauf der Hauptleitung	kalkuliert
$\dot{V}_{Zirkulation}$ [m ³ /s]	Zirkulationsvolumenstrom am Rücklauf der Hauptleitung	kalkuliert

Die Energiebilanz wird analog der Verteilleitung gebildet und berechnet.

B Speichermodell

Abbildung 70 zeigt einen Brauchwarmwasser-Speicher, wie er in vielen Anlagen zu finden ist. Er besitzt fünf Anschlussstutzen, wobei das Wasser an drei Stellen in den Speicher fließt und an zwei Stellen den Speicher verlässt. Das Modell teilt das Speichervolumen entlang seiner Höhe in n Schichten mit identischen Volumina. Jede Schicht wird als isotherm angesehen. Die Anordnung der Anschlussstutzen wird durch die Bedingung von maximal einem Anschluss pro Speicherschicht limitiert.

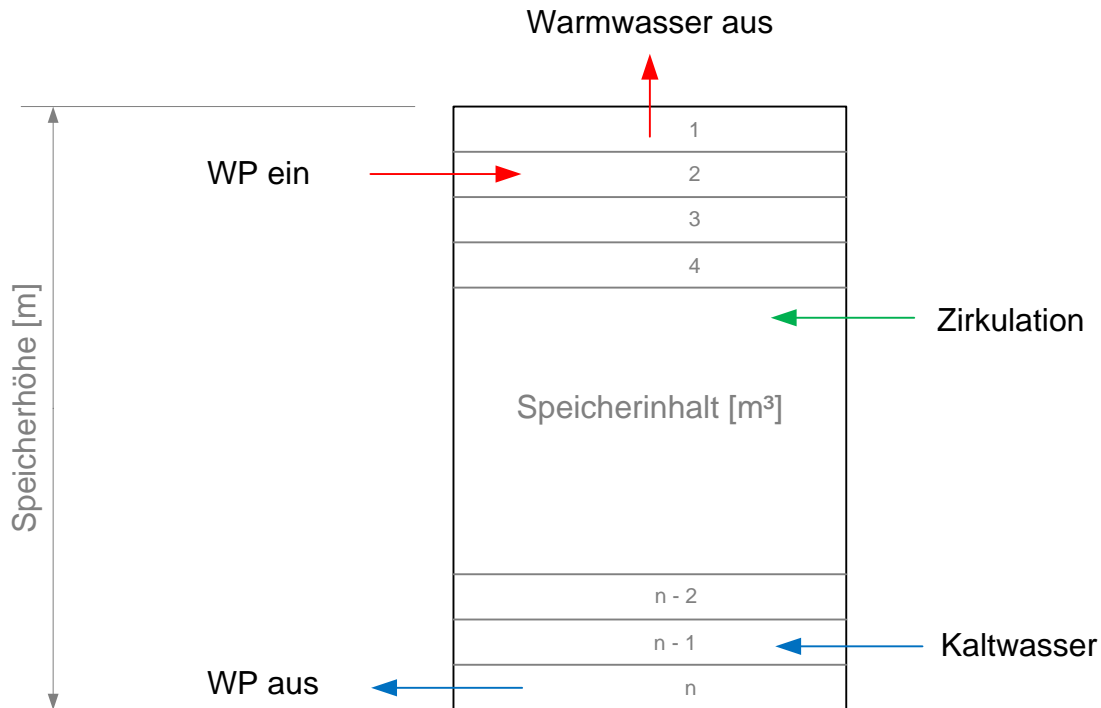


Abbildung 70: Speicher mit Anschlüssen in n Schichten unterteilt

Mit den Parametern aus Tabelle 60 erfolgt die Initialisierung des Speichers. Je nach Gebäude und Anlage unterscheiden sich diese Größen und führen zu einer Individualisierung des Simulationsobjekts. Als Startbedingungen des Speichers für die Simulation ist ein linearer Temperaturverlauf von 56°C in der n -ten Schicht bis 60°C in der ersten Schicht definiert.

Tabelle 60: Initialisierung und Kalkulationen des Speichermodells

Parameter	Beschreibung	Herkunft
T_{Umg} [°C]	Umgebungstemperatur an Aufstellungsort des Speichers	Vorgabe
H_{SP} [m]	Speicherhöhe	Vorgabe
V_{SP} [m ³]	Speichervolumen	Vorgabe
$T_{Kaltwasser}$ [°C]	Einströmtemperatur am Kaltwasser-Anschluss	Vorgabe
$H_{Kaltwasser}$ [m]	Abstand des Kaltwasserstutzens vom Boden	Vorgabe
$H_{Zirkulation}$ [m]	Abstand des Zirkulationsstutzens vom Boden	Vorgabe
$H_{Warmwasser}$ [m]	Abstand des Warmwasserstutzens vom Boden	Vorgabe
H_{WP_ein} [m]	Abstand des Stutzens für den Heizungsrücklauf vom Boden	Vorgabe
H_{WP_aus} [m]	Abstand des Stutzens für den Heizungsvorlauf vom Boden	Vorgabe
d_{iso} [m]	Isolationsdicke der Speicherhülle	Vorgabe
λ_{iso} [W/(m·K)]	Wärmeleitfähigkeit des Isolationsmaterials	Vorgabe
$\dot{V}_{Zirkulation}$ [m ³ /s]	Zirkulationsvolumenstrom	Vorgabe
a (1:n) [-]	Faktor zur Berücksichtigung eines Anschlussstutzens Schicht ohne Stutzen: $a=1$, Schicht mit Stutzen: $a>1$	Vorgabe/ kalkuliert
A_{Kreis} [m ²]	Deckel- bzw. Bodenfläche des Speichers	kalkuliert
A_{Zyl} [m ²]	Mantelfläche einer Schicht	kalkuliert
$H_{Element}$ [m]	Höhe einer Schicht	kalkuliert
$V_{Element}$ [m ³]	Volumen einer Schicht	kalkuliert
$T_{SP,1:n}$ [°C]	Vektor mit der Speichertemperatur für jede Schicht	kalkuliert
$T_{Anschluss(1:n)}$ [°C]	Vektor mit Temperatur für jeden Anschluss pro Schicht	kalkuliert
$\dot{V}_{Anschluss(1:n)}$ [m ³ /s]	Vektor mit Volumenstrom für jeden Anschluss pro Schicht	kalkuliert
$T_{Zirkulation}$ [°C]	Einströmtemperatur am Zirkulationsrücklauf-Anschluss	Verteilung(t)
T_{VL} [°C]	Einströmtemperatur am Heizungsvorlauf-Anschluss	Wärmepumpe(t- Δt)
\dot{V}_{WP} [m ³ /s]	Ladevolumenstrom	Wärmepumpe(t- Δt)
$\dot{V}_{Warmwasser}$ [m ³ /s]	Zapfung von warmen Wasser aus dem Speicher	Hauptleitung(t)
$\dot{V}_{Zirkulation}$ [m ³ /s]	Zirkulationsvolumenstrom	Hauptleitung(t)
$T_{SP,1:n}$ [°C]	Vektor mit der Speichertemperatur für jede Schicht	Speicher(t- Δt)

Pro simulierten Zeitschritt berechnet das Speichermodell für jede Schicht den neuen energetischen Zustand. Vier Faktoren beeinflussen den energetischen Zustand:

Wärmeverlust an die Umgebung

Abbildung 71 zeigt drei Schichten des Speichermodells. Die Wärmeverluste an den Schichten 1 und n erfolgen sowohl über deren Mantelfläche als auch über die Deckel- bzw. Bodenfläche der jeweiligen Schicht. Dazwischen liegen die Schichten i, welche nur Verluste über die Mantelfläche erfahren. Die Schwächung der Isolation an einer Anschlussstelle sowie die Wärmeübertragung am Stutzen werden mit dem Faktor α im Modell berücksichtigt, indem er die Mantelfläche der entsprechenden Schicht virtuell vergrößert.

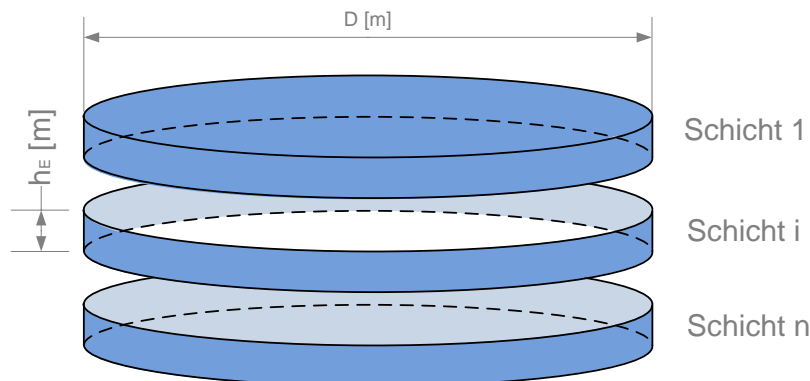


Abbildung 71: Wärmeverlust über die Speicherhülle

Die Formeln (33), (34) und (35) beschreiben die Wärmeverluste zur Umgebung. Es ist anzumerken, dass der Verlust über die Speicherwand nicht mit der Formel für isolierte Rohre (11) sondern als ebene Wand berechnet wurde. So wird der reale Wärmeverlust eher etwas unterschätzt. Der Verlust über die konvexe Kuppelfläche in der ersten und letzten Schicht wird mit den Formeln (33) und (35) dafür etwas überschätzt. In der Summe sollten sich die Unsicherheiten beider Annahmen näherungsweise auslöschen.

$$\dot{Q}_{\text{Umg},1} = \frac{\lambda_{\text{iso}}}{s_{\text{iso}}} \cdot (A_{\text{Kreis}} + a_1 \cdot A_{\text{Zyl}}) \cdot (T_{\text{SP},1} - T_{\text{Umg}}) \quad (33)$$

$$\dot{Q}_{\text{Umg},i} = \frac{\lambda_{\text{iso}}}{s_{\text{iso}}} \cdot a_i \cdot A_{\text{Zyl}} \cdot (T_{\text{SP},i} - T_{\text{Umg}}) \quad (34)$$

$$\dot{Q}_{\text{Umg},n} = \frac{\lambda_{\text{iso}}}{s_{\text{iso}}} \cdot (A_{\text{Kreis}} + a_n \cdot A_{\text{Zyl}}) \cdot (T_{\text{SP},n} - T_{\text{Umg}}) \quad (35)$$

Interne Wärmeleitung des Fluids

Die Temperaturunterschiede des gespeicherten Wassers bilden das treibende Potential für den Energieausgleich, welcher durch die Wärmeleitung des Wassers erfolgt. Abbildung 72 hebt die Trennflächen der Schichten hervor, über welche die Wärmeleitung mit Formel (36) modelliert wurden.

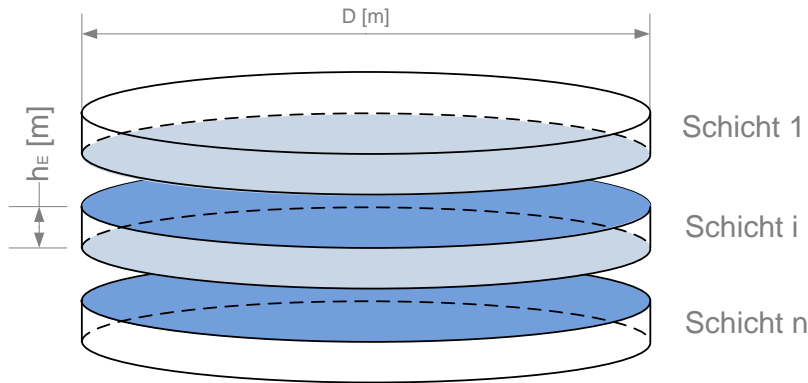


Abbildung 72: Trennflächen zwischen den Speicherschichten

$$\dot{Q}_{\text{Kond},i} = \lambda_{\text{Wasser},i} \cdot \frac{A_{\text{Kreis}}}{h_{\text{Element}}} \cdot (T_{\text{SP},i+1} - T_{\text{SP},i}) \quad \text{mit } i = 1 \dots n-1 \quad (36)$$

$$\dot{Q}_{\text{Kond},n} = 0 \quad (37)$$

Interne Wasserbewegung

Generell entsteht durch das Ein- und Ausströmen des Speicherinhaltes über die Anschlüsse eine Strömung innerhalb des Speichers. Das Wasservolumen verschiebt sich oftmals während den Zapfungen von unten nach oben, wie Abbildung 73 zeigt. Nur während der Ladephase ist auch eine Verschiebung von oben nach unten möglich. Die Zapf-, Zirkulations- und Ladevolumenströme sind während der Simulation jederzeit bekannt und so lässt sich der Fließvolumenstrom \dot{V}_{Fluss} aus diesen Größen für jede Schicht mit den Formeln (38), (39) und (40) ermitteln.

$$\dot{V}_{\text{Fluss},1} = \dot{V}_{\text{Anschluss},1} \quad (38)$$

$$\dot{V}_{\text{Fluss},i} = \dot{V}_{\text{Fluss},i-1} - \dot{V}_{\text{Anschluss},i} \quad \text{für } i=2 \dots n-1 \quad (39)$$

$$\dot{V}_{\text{Fluss},n} = 0 \quad (40)$$

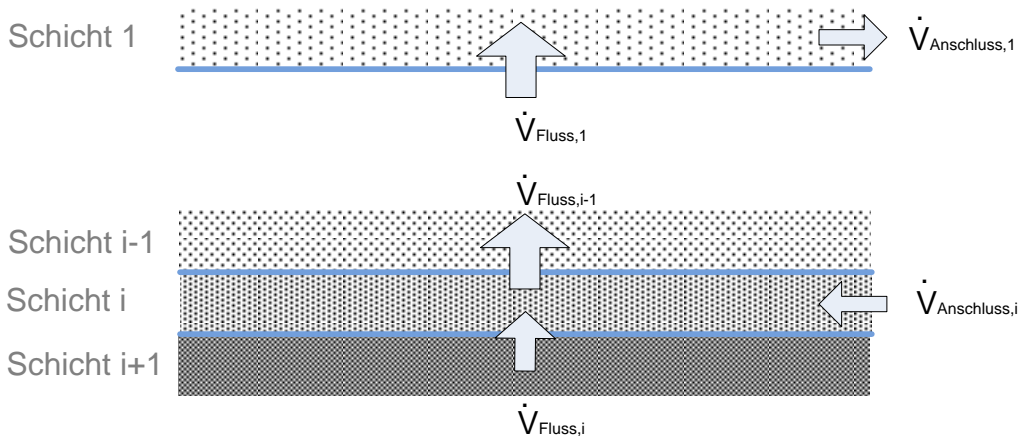


Abbildung 73: Darstellung der internen Wasserverschiebung

Die bewegte Energiemenge lässt sich mit (41) oder (42) ausdrücken.

$$\dot{H}_{\text{Fluss},i} = \dot{V}_{\text{Fluss},i} \cdot \rho_{\text{Wasser},\text{Sp},i+1} \cdot c_{p\text{Wasser}} \cdot T_{\text{SP},i+1} \quad \text{für } \dot{V}_{\text{Fluss},i} > 0 \quad (41)$$

$$\dot{H}_{\text{Fluss},i} = \dot{V}_{\text{Fluss},i} \cdot \rho_{\text{Wasser},\text{Sp},i} \cdot c_{p\text{Wasser}} \cdot T_{\text{SP},i} \quad \text{für } \dot{V}_{\text{Fluss},i} \leq 0 \quad (42)$$

Im Zuge dieser Verschiebung ergeben sich geringfügige Turbulenzen zwischen den Wasserschichten, die vom Fließvolumenstrom \dot{V}_{Fluss} abhängig sind. Diese Verwirbelungen führen zu einer geringen Schichtungsstörung im Speicher. Der Volumenstrom dieser Umwälzung wird mit (43) geschätzt.

$$\dot{V}_{\text{Konv1},i} = |\dot{V}_{\text{Fluss},i}| \cdot 0.005 \quad (43)$$

Zusätzlich verursachen die Strömungen an den Anschlussstutzen gewisse Störungen im Speicher, welche zu einer Umschichtung führen können. Diese Reaktion wird im Modell unter Annahme der Formeln (44) und (45) etwas stärker gewichtet als der Effekt der internen Wasserverschiebung. Die Einströmungen in die Schicht beeinflussen die Turbulenz mit einem quadratischen Ansatz, die Ausströmungen hingegen üben einen linearen Einfluss auf die Verwirbelung aus. Die Idee ist an *Böswirth (2007)* angelehnt, eine genaue mathematische Herleitung konnte jedoch nicht gefunden werden, weshalb man sich mit dem folgenden Ausdruck behelf.

$$\dot{V}_{\text{normiert},i} = \frac{\dot{V}_{\text{Anschluss},i}}{0.005} \quad (44)$$

$$\dot{V}_{\text{Konv2},i} = 0.005 \cdot (0.005 \cdot \max([0 \dot{V}_{\text{normiert},i} \dot{V}_{\text{normiert},i+1}])^2 - 0.001 \cdot \max([0 \dot{V}_{\text{normiert},i} \dot{V}_{\text{normiert},i+1}]))) \quad \text{für } i = 1 \dots n-1 \quad (45)$$

Eine Variation der Gewichtungsfaktoren ergab, dass die Einflüsse von Konv1 und Konv2 auf das Gesamtergebnis sehr gering sind.

Zwischen den Schichten findet ausserdem eine Massenbewegung über die Trennflächen aus Abbildung 72 statt. Die temperaturabhängigen Dichteunterschiede des Wassers treiben diese Bewegung an. Kühles Wasser sammelt sich im unteren Bereich des Speichers während warmes Wasser nach oben steigt. Eine solche Umschichtung kann somit dann erfolgen, wenn $\rho(i) > \rho(i+1)$ ist. Die Modellierung dieser Bewegung erfolgte mit Hilfe von *Yih (1965)* und dessen Formel (46) für die Strömungsgeschwindigkeit v .

$$v_i = \sqrt{\frac{g \cdot \frac{d_{\text{SP}}}{2} \cdot (\rho_i - \rho_{i+1})}{\rho_i + \rho_{i+1}}} \quad \text{mit } g = 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \quad (46)$$

Die nachfolgende Abbildung 74 zeigt eine Schnittbetrachtung von zwei Speicherschichten mit unterschiedlichen Wasserdichten und die Interpretation der Strömungsgeschwindigkeit v aus Formel (46). Dabei setzte man voraus, dass sich die Umschichtung im Uhr- oder Gegenuhrzeigersinn erfolgen würde und in der Mitte keine Bewegung stattfindet.

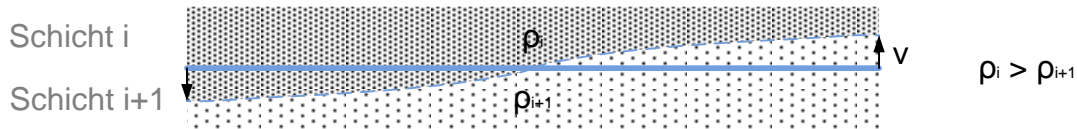


Abbildung 74: Umschichtung in der Schnittbetrachtung

Die Formel (47) zur Berechnung des Volumenstroms der Umschichtung lautet damit näherungsweise:

$$\dot{V}_{\text{Konv},i} = \frac{v_i}{2} \cdot \frac{A_{\text{Kreis}}}{2} \quad (47)$$

Damit sind die drei Komponenten, welche zu Turbulenzen innerhalb des Speichers führen bekannt. Die Volumenströme aus (43), (45) und (47) ergeben zusammen (48).

$$\dot{V}_{\text{Konv},i} = \dot{V}_{\text{Konv},1,i} + \dot{V}_{\text{Konv},2,i} + \dot{V}_{\text{Konv},3,i} \quad \text{für } i = 1 \dots n-1 \quad (48)$$

Die durch Turbulenzen verursachte Energieänderung beträgt damit:

$$\dot{H}_{\text{Konv},i} = \dot{V}_{\text{Konv},i} \cdot (\rho_{\text{Wasser},\text{SP},i+1} \cdot c_{p\text{Wasser}} \cdot T_{\text{SP},i+1} - \rho_{\text{Wasser},\text{SP},i} \cdot c_{p\text{Wasser}} \cdot T_{\text{SP},i}) \quad (49)$$

für $i = 1 \dots n-1$

$$\dot{H}_{\text{Konv},n} = 0 \quad (50)$$

Externe Energieänderung

Die Berechnung der Energieänderung im Speicher durch Verschieben von Wasser über die Anschlüsse hinweg, erfolgt unter Anwendung der Formel (56) oder (57), welche abhängig von der Strömungsrichtung gewählt wird.

$$\dot{H}_{\text{Anschluss},i} = \dot{V}_{\text{Anschluss},i} \cdot \rho_{\text{Wasser},\text{Anschluss},i} \cdot T_{\text{Anschluss},i} \cdot c_{p\text{Wasser}} \quad \text{für } \dot{V}_{\text{Anschluss},i} > 0 \quad (51)$$

$$\dot{H}_{\text{Anschluss},i} = \dot{V}_{\text{Anschluss},i} \cdot \rho_{\text{Wasser},i} \cdot T_{\text{SP},i} \cdot c_{p\text{Wasser}} \quad \text{für } \dot{V}_{\text{Anschluss},i} \leq 0 \quad (52)$$

Nun sind für jede Schicht die Energie- und Volumenflüsse bekannt und zusammenfassend in Abbildung 75 dargestellt. Der Energieerhaltungssatz führt zu einer Veränderung der in der Schicht vorhandenen Energie.

$$\dot{Q}_{\text{Sp},1} = (\dot{Q}_{\text{Kond},1} + \dot{H}_{\text{Fluss},1} + \dot{H}_{\text{Konv},1} + \dot{H}_{\text{Anschluss},1}) - \dot{Q}_{\text{Umg},1} \quad (53)$$

$$\dot{Q}_{\text{Sp},i} = (\dot{Q}_{\text{Kond},i} + \dot{H}_{\text{Fluss},i} + \dot{H}_{\text{Konv},i} + \dot{H}_{\text{Anschluss},i}) - (\dot{Q}_{\text{Umg},i-1} + \dot{Q}_{\text{Kond},i-1} + \dot{H}_{\text{Fluss},i-1} + \dot{H}_{\text{Konv},i-1}) \quad \text{für } i = 2 \dots n \quad (54)$$

Abschliessend können aus \dot{Q}_{Sp} und dem simulierten Zeitschritt Δt und den vorhergehenden Speicherschichttemperaturen die neuen Speicherschichttemperaturen berechnet werden.

$$T_{\text{SP},i} = T_{\text{SP},i} + \frac{\dot{Q}_{\text{Sp},i} \cdot \Delta t}{V_{\text{Element}} \cdot c_{p\text{Wasser}} \cdot \rho_{\text{Wasser},\text{SP},i}} \quad (55)$$

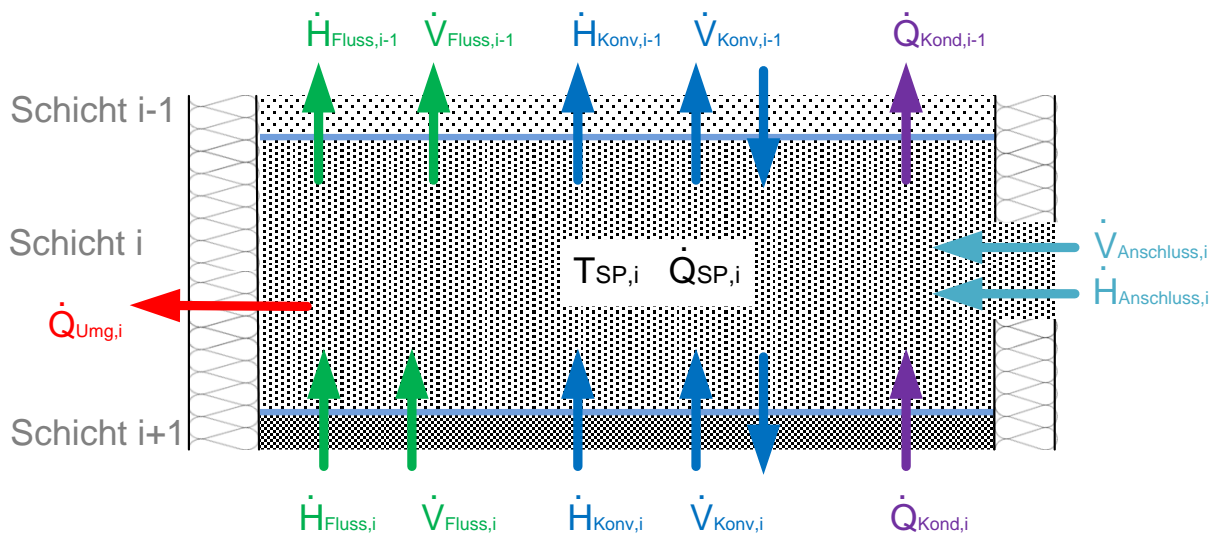


Abbildung 75: Zusammenfassung der Energie- und Volumenströme

B.1 Validierung und Tests

Die nachfolgende Abbildung 76 zeigt eine Speichrerwärmung ohne den Einfluss der Umschichtung durch den Dichteunterschied des Wassers zu berücksichtigen. Wie aus der Temperaturkurvenschar ersichtlich wird, arbeitet die Wärmepumpe zwischen der zweituntersten und zweitobersten Schicht. Die Kurven der untersten und obersten Schicht stagnieren beinahe, da sie nur über die Wärmeleitung zwischen den Schichten eine Wärmeübertragung erfahren. Die Kopftemperatur im Speicher würde damit immer kühler bleiben als die angrenzende Schicht.

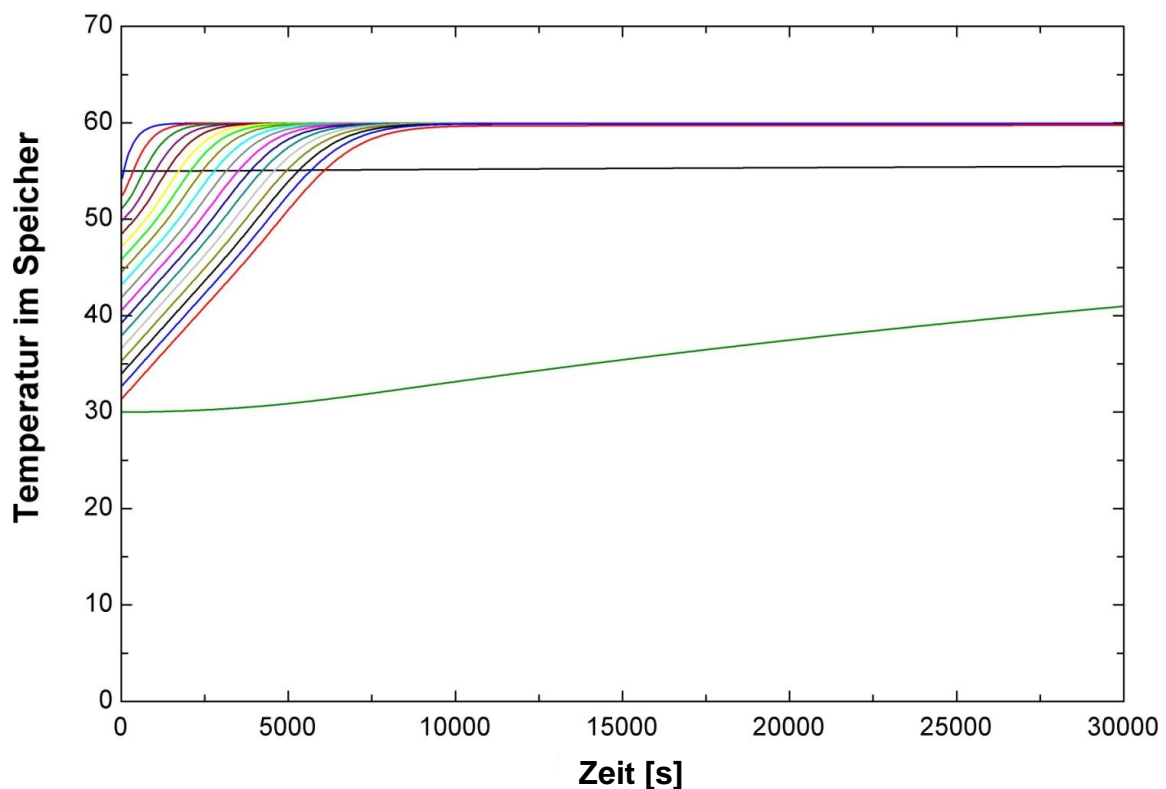


Abbildung 76: Speichermodell ohne Berücksichtigung der Umschichtung durch den Dichteunterschied des Wassers

Für eine reale Abbildung war die Integration der Formel (46) bis (50) entsprechend wichtig. Abbildung 77 zeigt nun, dass auch der Speicherkopf infolge der Umschichtung das hohe Temperaturniveau erreicht. Für die Simulationen wurde der Rücklaufstutzen der Wärmepumpe in die unterste Schicht verlegt, um der Ausbildung einer Kaltzone möglichst vorzubeugen.

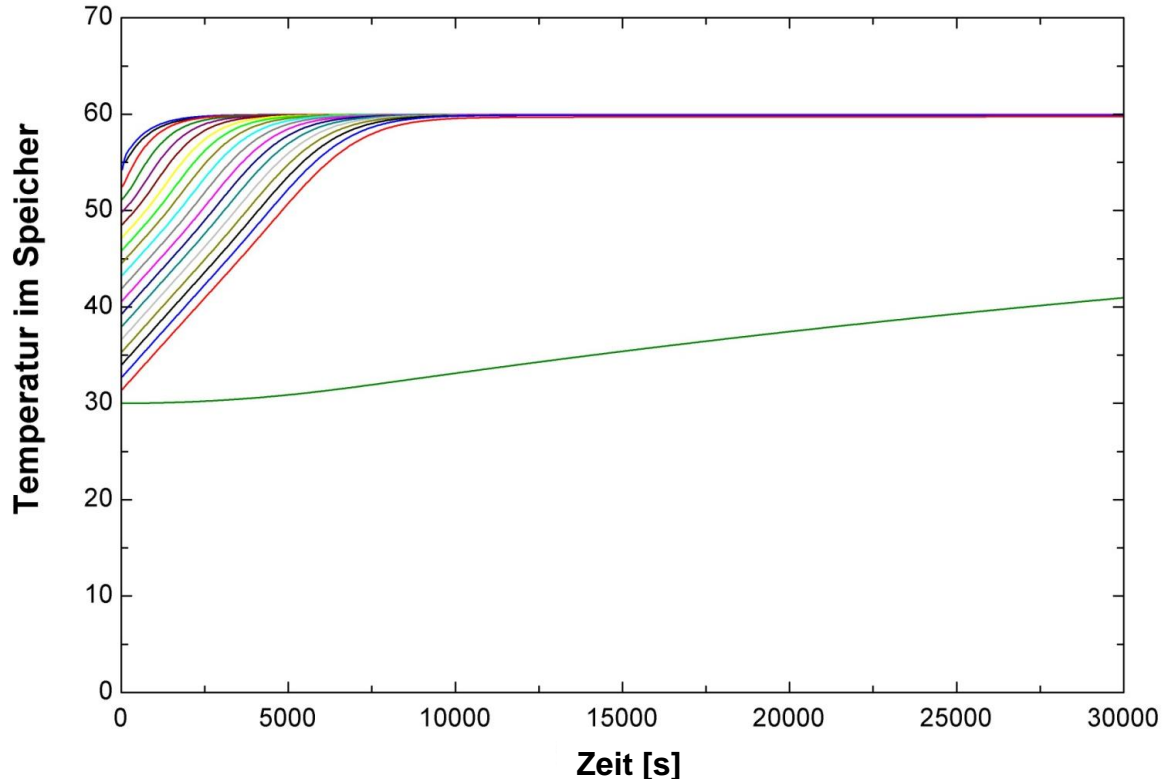


Abbildung 77: Speichermodell mit Berücksichtigung des Dichteunterschieds von Wasser bei unterschiedlichen Temperaturen

Der Einfluss eines hohen Zirkulationsvolumenstroms bei geringem BWW-Bezug wird in Abbildung 78 dargestellt. Der Zirkulationsrücklauf reisst die über dem Einlaufstutzen liegenden Schichten auf das Temperaturniveau des Zirkulationsrücklaufs, welche in diesem Fall bei 45°C liegt.

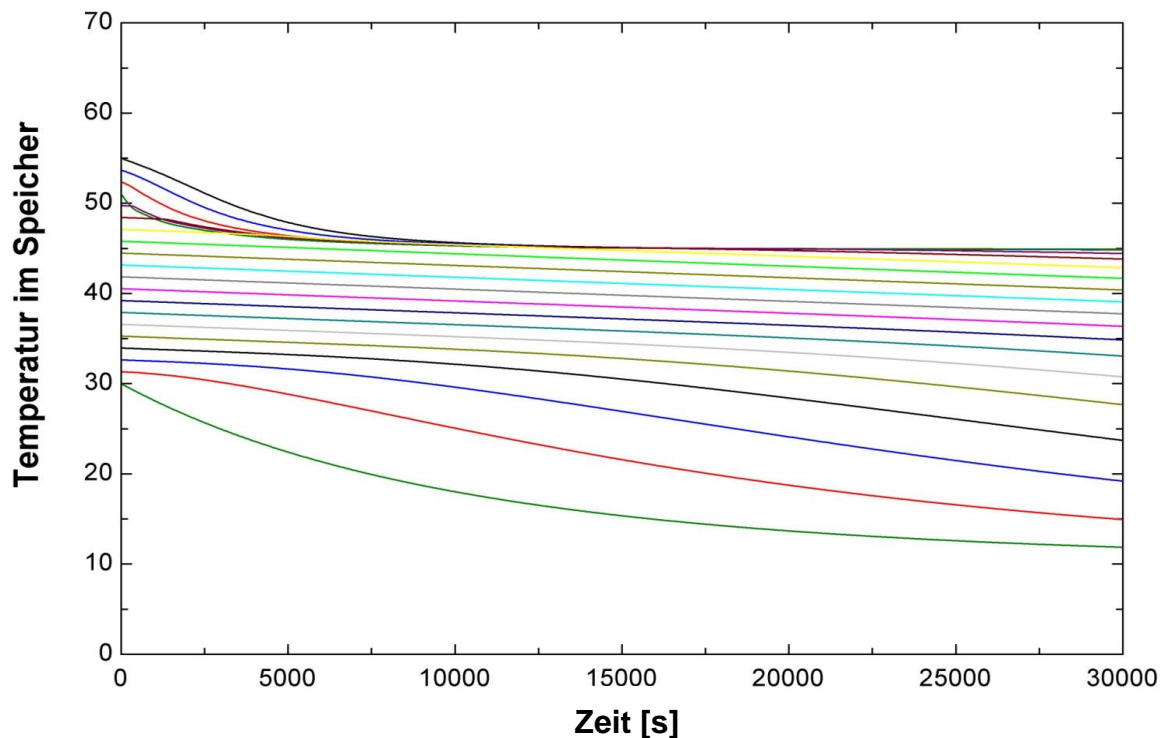


Abbildung 78: Einfluss eines hohen Zirkulationsvolumenstroms auf die Schichtung und Auskühlung des Speichers.

C Reglerstruktur

Das Laden des Brauchwarmwasserspeichers durch die Wärmepumpe wird mit dem Regler initiiert. Aufgrund von Temperatur- und Zeitangaben startet und stoppt er die Erwärmung des Brauchwarmwassers. Es werden zwei Reglerstrukturen unterschieden. Kleinere Objekte sind eher mit einer 1-stufigen Wärmepumpe ausgerüstet und benötigen eine entsprechende Regelung, während grössere Objekte meist mit 2-stufigen Maschinen ausgestattet sind. Eine grosse Anlage verfügt daher auch über eine etwas komplexere Reglerstruktur. Abbildung 79 zeigt eine solche Struktur. Die Eingangsparameter sind verschiedene Speichertemperaturen und die Rücklauftemperatur am Kondensator. Dazu können zwei Sperrzeiten sowie eine Nachladung definiert werden.

Tabelle 61: Ein- und Ausgänge des Reglers

Parameter	Beschreibung	Herkunft
$T_{SP,1}$ [°C]	Temperatur im oberen Drittel des Speichers	Speicher($t-\Delta t$)
$T_{SP,2}$ [°C]	Temperatur im der Mitte des Speichers	Speicher($t-\Delta t$)
$T_{SP,3}$ [°C]	Temperatur im unteren Drittel des Speichers	Speicher($t-\Delta t$)
T_{RL} [°C]	Rücklauftemperatur am Kondensator	Speicher($t-\Delta t$)
Sperrzeit 1	Zeitraum ohne Speicherladung	Vorgabe
Sperrzeit 2	Zeitraum ohne Speicherladung	Vorgabe
Stufe	Leistungsbereich der Wärmepumpe	kalkuliert

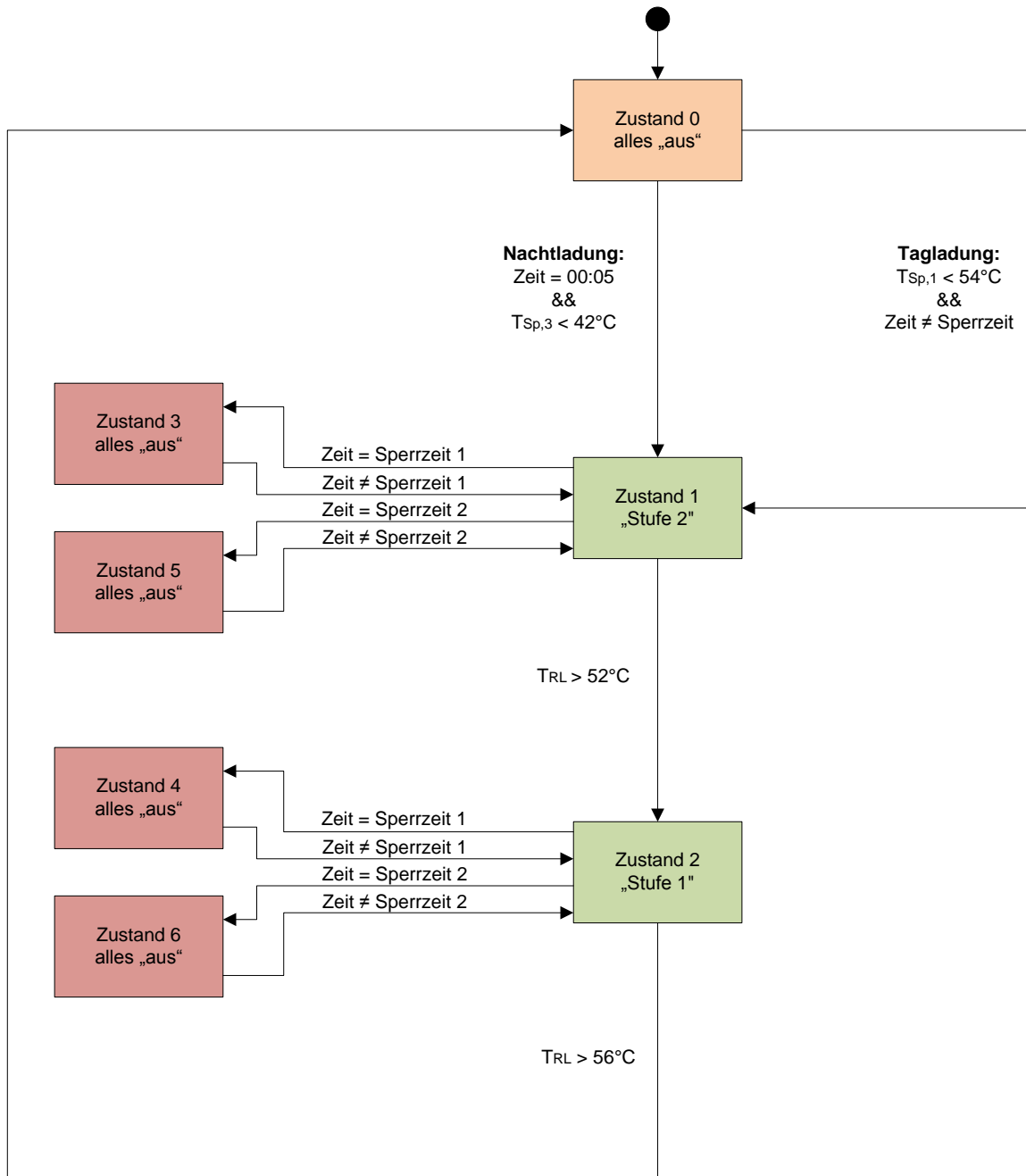


Abbildung 79: Reglerstruktur für 2-stufige Wärmepumpen

D Wärmepumpenmodell

Die Brauchwarmwasserwärmepumpe ist als Blackbox-Modell abgebildet. Die Eingangsparameter bilden die vom Regler geforderte Stufe und Vorlauftemperatur sowie die Rücklauftemperatur in den Kondensator und die thermische Erwärmerleistung. Die Ausgangsgrößen der Blackbox sind der entsprechende Ladevolumenstrom und die elektrische Leistung. Letztere ist der Quotient aus der thermischen Erwärmerleistung und der Leistungszahl der Wärmepumpe COP.

Tabelle 62: Ein- und Ausgänge des Wärmepumpenmodells

Parameter	Beschreibung	Herkunft
Stufe [-]	Leistungsstufe bei einer Wärmepumpe mit mehreren Verdichtern	Regler(t)
T_{RL} [°C]	Rücklauftemperatur am Kondensator	Speicher(t)
T_{VL} [°C]	Vorlauftemperatur am Kondensator zum Aufladen des Speichers	Vorgabe
\dot{Q}_{WP} [kW]	thermische Heizleistung (stufenabhängig)	Vorgabe
P [kW]	elektrische Aufnahmeleistung	kalkuliert
COP [-]	Leistungszahl der Wärmepumpe	kalkuliert
\dot{V}_{WP} [m ³ /s]	Ladevolumenstrom	kalkuliert



Abbildung 80: Ein- und Ausgänge am Blackbox-Modell der Wärmepumpe

Verschiedene Faktoren beeinflussen den COP einer Wärmepumpe:

- verwendetes Kältemittel
- Verdampfungstemperatur
- Überhitzung des Kältemittels im Verdampfer
- Rücklauftemperatur am Kondensator
- Vorlauftemperatur am Kondensator
- Dimensionierung des Kondensators
- isentropische Effizienz des Verdichters
- Ladestrategie
- der Ladevolumenstrom ist variabel

Innerhalb der Blackbox sollen folgende Annahmen gelten:

- Kältemittel R134a
- Wärmequelle der Wärmepumpe Grundwasser oder Erdwärme: Verdampfungstemperatur $T_{verd} = 2^\circ\text{C}$.
- Überhitzung des Kältemittels im Verdampfer $T_{ue} = 5\text{ K}$
- Grädigkeit des Kondensators $\Delta T = 3\text{ K}$
- isentropische Effizienz des Verdichters $\eta_{isentrop} = 0.60$ (ermittelt aus den Messdaten des Messobjekts 1)

- Ladestrategie: Schichtladung d.h. die Vorlauftemperatur am Kondensator $T_{VL}=60.5^{\circ}\text{C}$ ist während dem ganzen Ladezyklus konstant.
Die Ladestrategie hat des Weiteren Auswirkung auf die Unterkühlung des Kältemittels im Kondensator, welche sich aus der Rücklauf- und Vorlauftemperatur am Kondensator bestimmen lässt. Es wird dabei vorausgesetzt, dass die Temperatur im Kondensator nach der Unterkühlung T_3 einen der Grädigkeit ΔT entsprechenden Temperaturabstand zur Rücklauftemperatur T_{RL} hat. Derselbe Temperaturabstand stellt sich zwischen der Vorlauftemperatur T_{VL} und Kondensationstemperatur T_{kond} ein. Damit gilt für die Unterkühlung nach (56)

$$T_u = T_{VL} - T_{RL} \quad (56)$$

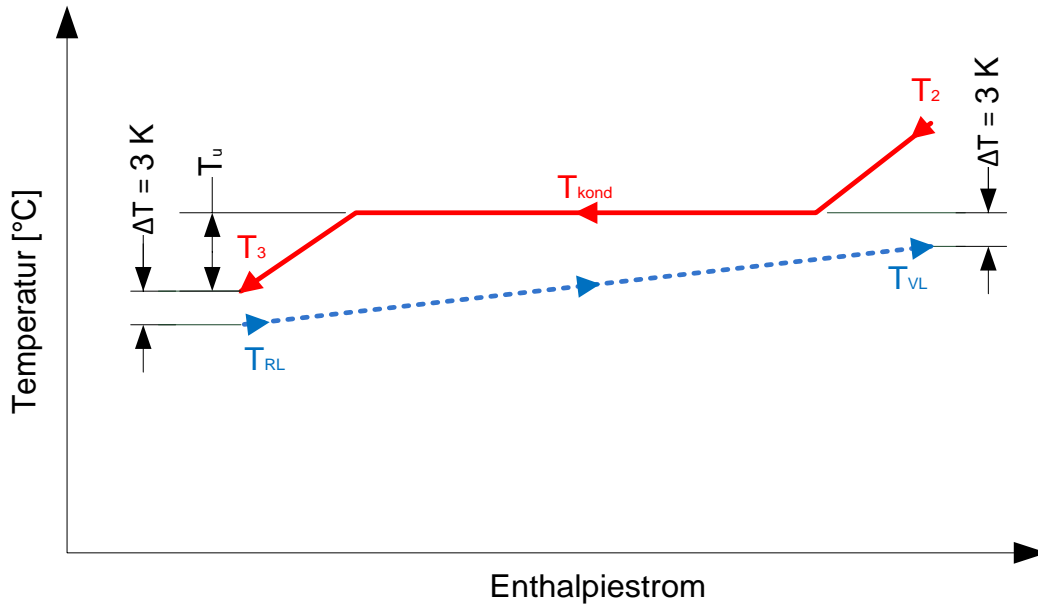


Abbildung 81: Zusammenhang zwischen Unterkühlung und der Vor- und Rücklauftemperatur

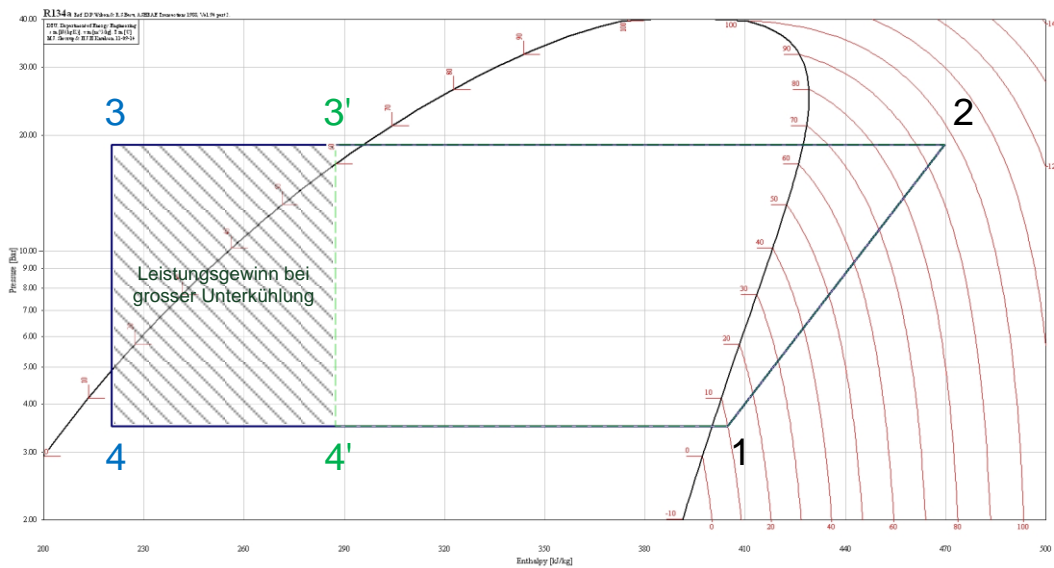


Abbildung 82: p-h-Diagramm von zwei Wärmepumpenkreisläufen: 1-2-3-4 mit grosser Unterkühlung und 1-2-3'-4' mit kleiner Unterkühlung (Der schraffierte Bereich kennzeichnet den Leistungsgewinn bei grosser Unterkühlung)

Es sind nun genügend Informationen vorhanden, um mit Hilfe von EES den COP in Abhängigkeit der Vor- und Rücklaufemperatur am Kondensator zu berechnen. Ein Wärmepumpenkreislauf lässt sich im stationären Betrieb anhand von vier Zustandspunkten gemäss Abbildung 82 beschreiben.

Die Sauggastemperatur bestimmt man aus der Verdampfungstemperatur und der Überhitzung.

$$T_1 = T_{\text{verd}} + T_{\text{ue}} \quad (57)$$

Anhand der Stoffwertbibliothek in EES erhält man für den Punkt 1 mit der Temperatur T_1 den zugehörigen Verdampfungsdruck p_1 , die Enthalpie h_1 und Entropie s_1 .

Die Kondensationstemperatur wird durch die verlangte Vorlaufemperatur T_{VL} und der Grädigkeit des Kondensators ΔT ermittelt.

$$T_{\text{kond}} = T_{\text{VL}} + \Delta T \quad (58)$$

Den Kondensationsdruck p_2 erhält man wiederum mittels der Stoffwertbibliothek.

Bei einer idealen Verdichtung mit einer isentropischen Effizienz von 1.0 würde im Punkt 2i die Entropie $s_{2i} = s_1$ sein mit der zugehörigen Enthalpie h_{2i} . Die reale Verdichtung ist immer mit einer isentropischen Effizienz $\eta_{\text{isentrop}} < 1$ behaftet. Mit der Kenntnis von s_{2i} , h_{2i} und h_1 kann die reale Enthalpie nach der Verdichtung in Punkt 2 berechnet werden.

$$h_2 = \frac{(h_{2i} - h_1)}{\eta_{\text{isentrop}}} + h_1 \quad (59)$$

Die Stoffwertbibliothek liefert uns nun die Temperatur T_2 . Der Punkt 3 befindet sich auf demselben Druckniveau wie Punkt 2. Die entsprechende Temperatur T_3 wird durch Gleichung (60) gefunden.

$$T_3 = T_{\text{kond}} - T_{\text{u}} \quad (60)$$

Durch Einsetzen von (56) in (60) erhält man

$$T_3 = T_{\text{kond}} - T_{\text{VL}} + T_{\text{RL}} \quad (61)$$

Die Enthalpie h_3 erhält man für die gegebenen Parameter aus der Stoffwertbibliothek. Die Entspannung des Kältemittels zum Punkt 4 kann als isentrope Zustandsänderung angenommen werden. Dadurch gilt:

$$h_4 = h_3 \quad (62)$$

Somit ist der Kreislauf hinreichend beschrieben und es kann die Leistungszahl COP aus der Kondensationsleistung \dot{Q}_{kond} und der Aufnahmeleistung des Verdichters P_{el} gebildet werden.

$$\text{COP} = \frac{\dot{Q}_{\text{WP}}}{P} = \frac{(h_2 - h_3)}{(h_2 - h_1)} \quad (63)$$

In Abbildung 82 sind zwei Kreisläufe eingetragen. Kreislauf 1-2-3-4 kennzeichnet den stationären Zustand der Wärmepumpe bei Beginn einer Schichtladung, wenn die Rücklauftemperatur aus dem Speicher in den Kondensator in etwa der Kaltwassertemperatur entspricht. Die Unterkühlung ist damit relativ gross und der COP entsprechend gut. In Relation dazu verschlechtert sich der COP bei steigender Rücklauftemperatur. Kreislauf 1-2-3'-4' beschreibt die Wärmepumpe kurz vor Ende der Schichtladung. Durch die hohe Rücklauftemperatur verkleinert sich die Unterkühlung des Kältemittels und es wird pro Zyklus weniger Energie an das Brauchwarmwasser abgegeben.

Gleichermassen reduzieren höhere Vorlauftemperaturen die Leistungszahl, da sich das Druckverhältnis p_2/p_1 vergrössert, was einer Zunahme der aufgenommenen elektrischen Leistung des Verdichters gleich kommt.

In einem weiteren Schritt wurden die Rück- und Vorlauftemperaturen über einen weiten Bereich variiert und jeweils die Leistungszahl mit Hilfe von EES ermittelt. Aufgrund der erzeugten Datenpunkte konnte der COP als von T_{RL} und T_{VL} abhängige Variable durch eine Fläche approximiert werden. Der Fläche in Abbildung 83 liegt die Formel (64) zugrunde, welche in den Simulationscode übertragen wurde.

$$\text{COP} = 12.9477 - 0.2654 \cdot T_{VL} + 0.002 \cdot T_{VL}^2 - 0.0462 \cdot T_{RL} + 0.000375 \cdot T_{VL} \cdot T_{RL} \quad (64)$$

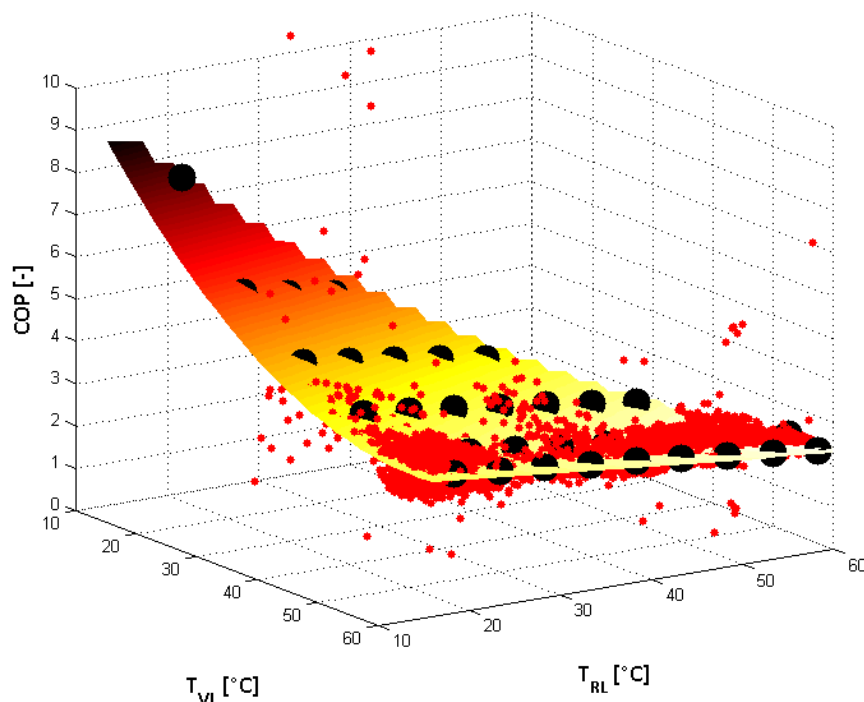


Abbildung 83: Approximation der Leistungszahl COP in Abhängigkeit von Vor- und Rücklauftemperatur aus berechneten Einzelwerten (mit EES - schwarze Punkte) inkl. Überlagerung der Feldmessung des Messobjekts 1 (rote Punkte)

Über die thermische Erwärmerleistung und die Temperaturen am Kondensator wird mit (65) der Ladevolumenstrom definiert.

$$\dot{V}_{WP} = \frac{\dot{Q}_{WP}}{c_{pWasser} \cdot (T_{VL} \cdot \rho_{Wasser,VL} - T_{RL} \cdot \rho_{Wasser,RL})} \quad (65)$$

E Zirkulationspumpe

Die elektrische Energieaufnahme der Umwälzpumpe wird allgemein mit Formel (66) und (67) berechnet.

$$P = \frac{\dot{V}_{\text{Zirk}} \cdot \Delta p_{\text{Netz}}}{\varepsilon} \quad (66)$$

$$\Delta p_{\text{Netz}} = \xi \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot \bar{v}^2 \cdot f \quad (67)$$

Die Rohrreibungszahl ξ hängt von der Reynoldszahl ab und kann für laminare oder turbulente Rohrströmung mit den Ansätzen nach Hagen und Poiseuille bzw. nach Blasius ermittelt werden gemäss *Grote und Feldhusen (2007)*.

Die Simulation setzt das gesamte Leitungsnetz aus geraden Rohrelementen zusammen. Somit sind Krümmungen, Verzweigungen, Armaturen usw. nicht im Druckverlust Δp_{Netz} enthalten. Dieser Einfluss wird sehr hoch eingeschätzt und mit $f = 5$ berücksichtigt. Die Effizienz der Pumpe ist weitläufig ziemlich gering und wurde mit Hilfe von Datenblättern mit $\varepsilon = 0.1$ festgelegt. Diese Parameter lieferten die besten Ergebnisse bei der Validierung des Codes anhand des Messobjekts 1. Weiters ist die minimale Aufnahmeleistung mit 5 Watt limitiert.

F Heizband

Die heutzutage eingesetzten Begleitheizungen sind selbstregulierend. Das bedeutet, dass ihre Abgabeleistung temperaturabhängig ist. Bei hohen Rohrtemperaturen wird weniger Leistung an die Leitung abgegeben als bei tiefen Rohrtemperaturen. Ein namhafter Hersteller von Begleitheizungen bietet 3 Leistungsstufen von Heizbändern an. Abhängig von der Dämmung bzw. Wärmeverlusten des warmzuhaltenden Rohrs wird der entsprechende Typ ausgewählt. Abbildung 84 zeigt die Heizbandcharakteristiken der verschiedenen Leistungstypen und ein paar ausgewählte Dämmungen. Je nach vorliegendem Fall ist das passende Heizband in den Simulationen implementiert.

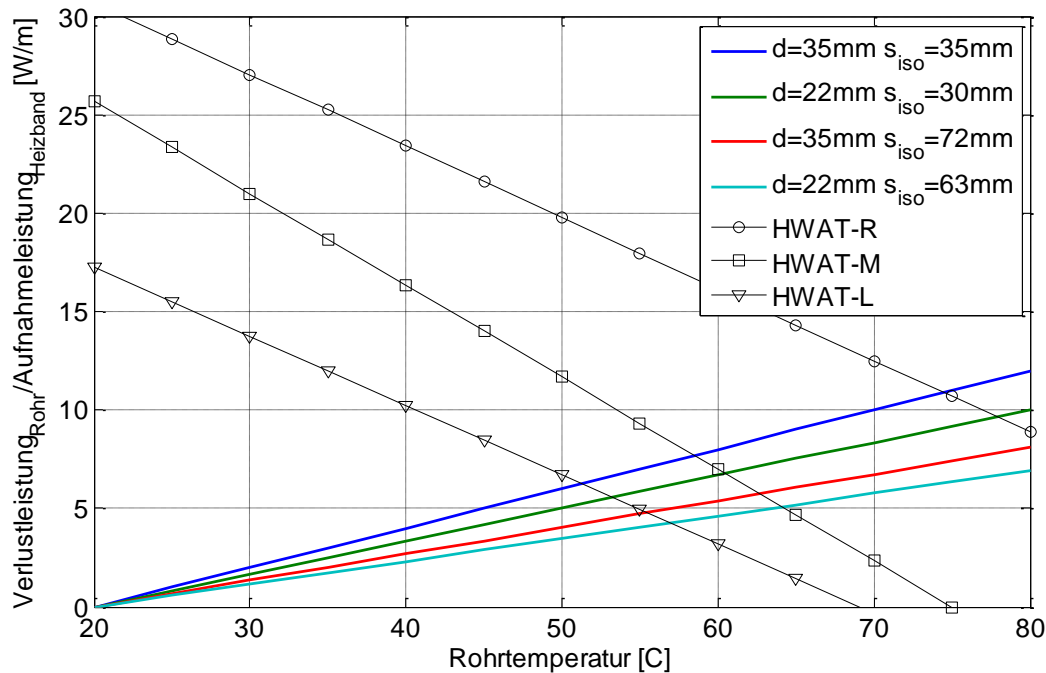


Abbildung 84: Wärmeverlust der Leitung und Aufnahmeleistung der Heizbänder

In der Simulation sind die Temperaturen aller Rohrelemente jederzeit bekannt, so dass die Verluste gegenüber der Umgebung und die elektrische Leistungsaufnahme der Begleitheizung für jedes Rohrelement berechnet werden kann. Die Implementierung geschah in Absprache mit einem Hersteller von Begleitheizungen. Das Heizband ist im Modell ideal verlegt, das heisst, es befindet sich ständig unter einer Dämmung. Die Begleitheizung läuft im Modell im Dauerbetrieb. Da keine Störungen in der Speicherschichtung anfallen, wurden die Speichervolumen jeweils um 20 % verkleinert.

G Modulierende Zirkulationswärmepumpe

Das Zirkulationssystem wurde insofern angepasst, dass der Zirkulationsrücklauf durch die zusätzliche Wärmepumpe im Temperaturniveau angehoben und dem Warmwasservorlauf direkt zugeführt wird. Abhängig vom Zapfprofil hat die Zirkulationswärmepumpe ihre Leistung an die Rücklauftemperatur anzupassen, so dass am Warmwasservorlauf eine Temperatur $T_{Zirk,Soll} = 58^{\circ}\text{C}$ zugeführt werden kann. Die Heizleistung kann mit (68) berechnet werden. Die elektrische Leistungsaufnahme ergibt sich auf Basis der COP-Approximation (64), was voraussetzt, dass sowohl die BWW-Wärmepumpe als auch die Zirkulationswärmepumpe dieselbe Quelle nutzen.

$$\dot{Q}_{ZirkWP} = \dot{V}_{Zirkulation} \cdot \rho \cdot c_p \cdot (T_{Zirk,Soll} - T_{Zirkulation}) \quad (68)$$

H Zirkulationswärmepumpe mit Pufferspeicher

Damit die Zirkulationswärmepumpe nicht im Dauerbetrieb arbeiten muss, kann dem System ein Zwischenspeicher zugefügt werden. Die Wärmepumpe braucht dann nicht mehr leistungsvariabel zu sein. Ein System dieser Art ist bislang im Feld nicht zu finden, daher waren die Autoren dieses Berichts relativ frei in der Auslegung der Komponenten. Als

Heizleistung \dot{Q}_{ZirkWP} der Zirkulationswärmepumpe wurde das 1.5-fache des Wirkverlusts gewählt und eine minimale Laufzeit von $t_{\text{min}} = 3 \text{ h} = 10800 \text{ s}$ festgelegt. Die Grösse des Zwischenspeichers für eine Temperaturerhöhung mit der Wärmepumpe von $\Delta T = 10 \text{ K}$ ergibt sich mit Formel (69):

$$V_{\text{Zwischenspeicher}} = \frac{(\dot{Q}_{\text{ZirkWP}} - \dot{Q}_{\text{Wirk}}) \cdot t_{\text{min}}}{\rho \cdot c_p \cdot \Delta T} \quad (69)$$

I Dezentrale Speicherladung durch Zentralheizung

Für die Simulation dieses Systems wird die herkömmliche Zirkulation der dezentralen Gebäude um die Bausteine Wärmeverteilnetz, Raumheizung und Speicher mit innenliegendem Wärmetauscher ergänzt.

I.1 Wärmeverteilnetz

Das Modell des Wärmeverteilnetzes entspricht beinahe den bisherigen Leitungsmodellen. Die Heizungswärmepumpe speist die Vorlaufleitung mit einer gewissen Temperatur und einem leistungsabhängigen Volumenstrom. An verschiedenen Stellen im Netz (Raumheizung und BWW-Ladeanschluss) werden gewisse Volumenströme aus der Vorlaufleitung entnommen und der Rücklaufleitung mit tieferem Temperaturniveau zugeführt. Der übrige Volumenstrom fliesst im Umkehrpunkt von Vorlauf zu Rücklauf durch das Überströmventil.

I.2 Raumheizung

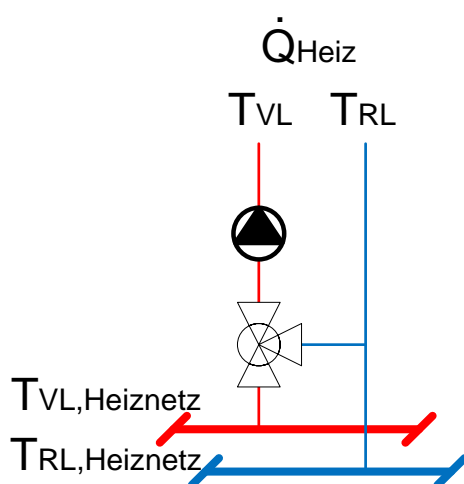


Abbildung 85: Raumheizung

Für jedes Gebäude ist eine Raumheisanforderung \dot{Q}_{Heiz} sowie Vor- und Rücklauftemperaturen T_{VL} bzw. T_{RL} definiert. Daraus wird auf einfache Weise der Volumenstrom am Heizungsvorlauf mit Formel (70) ermittelt. Das Mischventil mischt Wasser aus dem Heizungsrücklauf mit T_{RL} und Wasser aus dem Netzvorlauf mit $T_{\text{VL, Heiznetz}}$ so dass sich durch die Mischung T_{VL} und \dot{V}_{Heiz} ergeben. Dieser Vorgang bildet die Simulation mit zwei Formeln ab. Formel (71) gibt den Volumenstrom $\dot{V}_{\text{Heiznetz}}$ an, welcher von der Raumheizung aus dem Netzvorlauf entnommen wird. Derselbe Volumenstrom wird auf der Rücklaufebene dem Netzurücklauf zugeführt.

Formel (72) beschreibt den Volumenstrom \dot{V}_{RL} , welcher für den Anteil Wasser steht, der mit T_{RL} dem Mischventil rückgeführt wird.

$$\dot{V}_{\text{Heiz}} = \frac{\dot{Q}_{\text{Heiz}}}{\rho_{\text{Wasser}} \cdot c_p \cdot (T_{\text{VL}} - T_{\text{RL}})} \quad (70)$$

$$\dot{V}_{\text{Heiznetz}} = \frac{\dot{V}_{\text{Heiz}} \cdot (T_{\text{VL}} - T_{\text{RL}})}{T_{\text{VL, Heiznetz}} - T_{\text{RL}}} \quad (71)$$

$$\dot{V}_{RL} = \dot{V}_{Heiz} - \dot{V}_{Heiznetz} \quad (72)$$

I.3 Speicher mit innenliegendem Wärmetauscher

Die Modellierung eines Speichers mit innenliegendem Wärmetauscher in Form eines glatten Rohrs gestaltete sich als herausfordernd, da der genaue Aufbau und die sich daraus ergebenden Strömungen unbekannt sind.

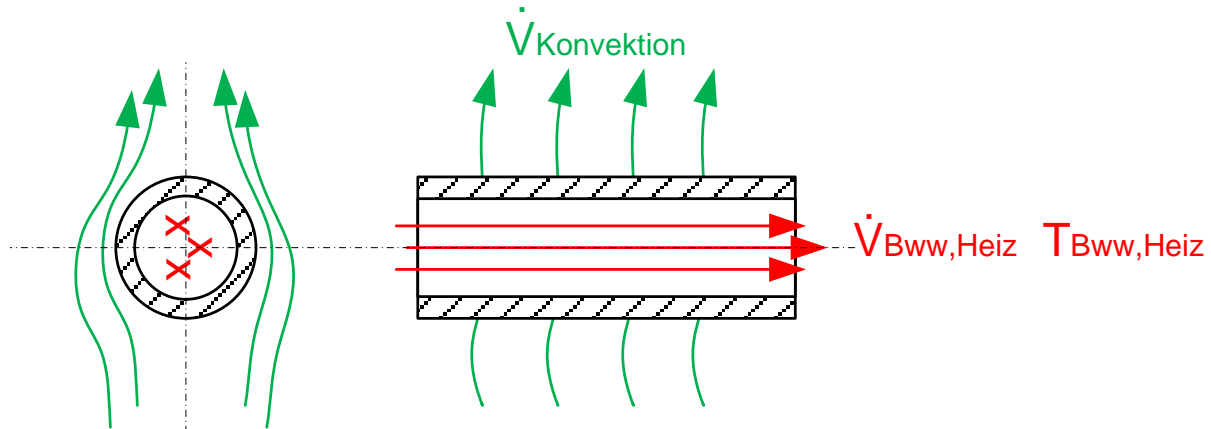


Abbildung 86: erzwungene Konvektion im Rohrinnern und freie/erzwungene Konvektion an der Rohraussenfläche

Die kritische Situation ist in Abbildung 86 dargestellt. Sie zeigt einen Ausschnitt des Heizregisters im Speicher, welches innen mit dem Wasser aus dem Netzvorlauf durchflossen wird. Am Aussenmantel des Rohrs ändert sich aufgrund der Erwärmung die Dichte des Brauchwarmwassers, welches als Folge davon aufsteigt. Es stellt sich damit eine natürliche Konvektion im Speicher ein. Bei Zapfungen entsteht durch abfließendes Wasser eine erzwungene Konvektion. In dieser Situation sind drei thermische Widerstände an der Wärmeübertragung beteiligt.

- thermischer Widerstand von Heizung zu Rohrinne wand $R_{\text{thermisch,Heiznetz,Ri}}$
- thermischer Widerstand von Rohrinne wand zu Rohraussen wand $R_{\text{thermisch,Ri,Ra}}$
- thermischer Widerstand von Rohraussen wand zu Brauchwarmwasser $R_{\text{thermisch Ra,Bww}}$

Die Berechnungen der thermischen Widerstände stützen sich auf *Incropera, DeWitt (2002)*.

Thermischer Widerstand von Heizung zu Rohrinne wand $R_{\text{thermisch,Heiznetz,Ri}}$

Dieser Anteil der Wärmeübertragung wird vor allem durch die Strömungsgeschwindigkeit im Heizregister beeinflusst.

Aus dem Volumenstrom der Brauchwarmwasserladung wird die Strömungsgeschwindigkeit v ermittelt, um damit die Reynoldszahl zu bilden:

$$Re_{Ri} = \frac{\rho_{\text{Wasser}} \cdot v \cdot d_{Ri}}{\eta_{\text{Wasser}}} \quad (73)$$

Für erzwungene, laminare Strömungen mit $Re_{Ri} < 3000$ wurde eine konstante Nusseltzahl $Nu_{Ri} = 4$ vorausgesetzt. Bei turbulenten Strömungen wird Nu_{Ri} gemäss dem Ansatz nach Dittus-Boelter mit (74) für ein Rohr, welches von aussen gekühlt wird.

$$\text{Nu}_{\text{Ri}} = 0.023 \cdot \text{Re}_{\text{Ri}}^{\frac{4}{5}} \cdot \text{Pr}_{\text{Ri}}^{\frac{3}{10}} \quad (74)$$

Die Definition der Nusseltzahl kann weiters umgeordnet und nach dem Wärmeübergangskoeffizienten aufgelöst werden, woraus in einem nächsten Schritt der thermische Widerstand bestimmt wird.

$$\alpha_{\text{Ri}} = \frac{\text{Nu}_{\text{Ri}} \cdot \lambda_{\text{Wasser}}}{d_{\text{Ri}}} \quad (75)$$

$$R_{\text{thermisch,Heiznetz,Ri}} = \frac{1}{\alpha_{\text{Ri}} \cdot A_{\text{Ri}}} \quad (76)$$

Thermischer Widerstand von Rohraussenwand zu Rohrrinnenwand $R_{\text{thermisch,Ri,Ra}}$

Ein geringer Anteil des gesamten thermischen Widerstands entfällt auf die Wärmeübertragung durch den Rohrquerschnitt. Als Material des Heizregisters wurde Chromstahl definiert. Der thermische Widerstand des Heizregisters wird mit Formel (77) berechnet.

$$R_{\text{thermisch,Ri,Ra}} = \frac{\ln\left(\frac{d_{\text{Ra}}}{d_{\text{Ri}}}\right)}{2 \cdot \pi \cdot l_{\text{Register}} \cdot \lambda_{\text{CNS}}} \quad (77)$$

Thermischer Widerstand von Rohraussenwand zu Brauchwarmwasser $R_{\text{thermisch,Ra,Bww}}$

Etwas komplexer ist dieser Anteil des totalen thermischen Widerstands zu bestimmen. Findet während der Ladung keine Zapfung statt, herrscht freie Konvektion im Speicher. Zu Zeiten in denen BWW gezapft wird, wird das Heizregister durch erzwungene Konvektion an seiner Aussenfläche überströmt.

Nach Churchill&Chu ist die Nusseltzahl bei freier Konvektion nach (78) zu berechnen.

$$\text{Nu}_{\text{Ra,frei}} = \left(0.60 + \frac{0.387 \cdot \text{Ra}_{\text{Ra}}^{\frac{1}{6}}}{\left(1 + \left(\frac{0.559}{\text{Pr}_{\text{Ra}}}\right)^{\frac{9}{16}}\right)^{\frac{8}{27}}}\right)^2 \quad (78)$$

Die darin enthaltene Rayleighzahl wird aus den Grashof- und Prandtlzahlen gebildet.

$$\text{Gr}_{\text{Ra}} = g \cdot \beta \cdot \frac{(T_{\text{Ra}} - T_{\text{Sp}}) \cdot d_{\text{Ra}}^3}{\nu^2} \cdot \text{Pr}_{\text{Ra}} \quad (79)$$

Aus dem Speichermodell ist aus der Massenbilanz der Schichten die mittlere Strömungsgeschwindigkeit im Speicher bekannt, woraus analog zu (73) die Reynoldszahl berechnet wird. Die erzwungene Konvektion kann eine laminare oder turbulente Strömung hervorrufen. Beide Fälle werden mit den Formeln (80) bis (82) berücksichtigt.

$$\text{Nu}_{\text{Ra,lam}} = 0.530 \cdot \text{Re}_{\text{Ra}}^{0.5} \cdot \text{Pr}_{\text{Ra}}^{0.33} \quad (80)$$

$$\text{Nu}_{\text{Ra,turb}} = \frac{0.0338 \cdot \text{Re}_{\text{Ra}}^{0.8} \cdot \text{Pr}_{\text{Ra}}^{0.48}}{1 + 2.335 \cdot \text{Re}_{\text{Ra}}^{-0.1} \cdot (\text{Pr}_{\text{Ra}}^{\frac{2}{3}} - 1)} \quad (81)$$

$$\text{Nu}_{\text{Ra,erzw}} = 0.191 + \sqrt{\text{Nu}_{\text{Ra,lam}}^2 + \text{Nu}_{\text{Ra,turb}}^2} \quad (82)$$

Die Verknüpfung der Nusseltzahlen für freie und erzwungene Konvektion geschieht über den folgenden Ansatz:

$$\text{Nu}_{\text{Ra}} = \sqrt{\text{Nu}_{\text{Ra,frei}}^2 + \text{Nu}_{\text{Ra,erzw}}^2} \quad (83)$$

$$\alpha_{\text{Ra}} = \frac{\text{Nu}_{\text{Ra}} \cdot \lambda_{\text{Wasser}}}{d_{\text{Ra}}} \quad (84)$$

$$R_{\text{thermisch,Ra,Bww}} = \frac{1}{\alpha_{\text{Ra}} \cdot A_{\text{Ra}}} \quad (85)$$

Die drei thermischen Widerstände können nun zum gesamten thermischen Widerstand dieser Beheizungssituation aufsummiert werden.

$$R_{\text{thermisch}} = R_{\text{thermisch,Heiznetz,Ri}} + R_{\text{thermisch,Ri,Ra}} + R_{\text{thermisch,Ra,Bww}} \quad (86)$$

Dimensionierung des Heizregisters

Die Auslegung des Heizregisters erfolgt mit Hilfe der EKZ. Die Austauschfläche beträgt demnach 0.25 m^2 pro Kilowatt Übertragungsleistung. Die Spreizung zwischen Registereintritt und -austritt beträgt ca. 8 K. Für die Bestimmung des Querschnitts wurde darauf geachtet, dass der Druckabfall über dem Register 20 kPa nicht übersteigt.

I.4 Heizkurven

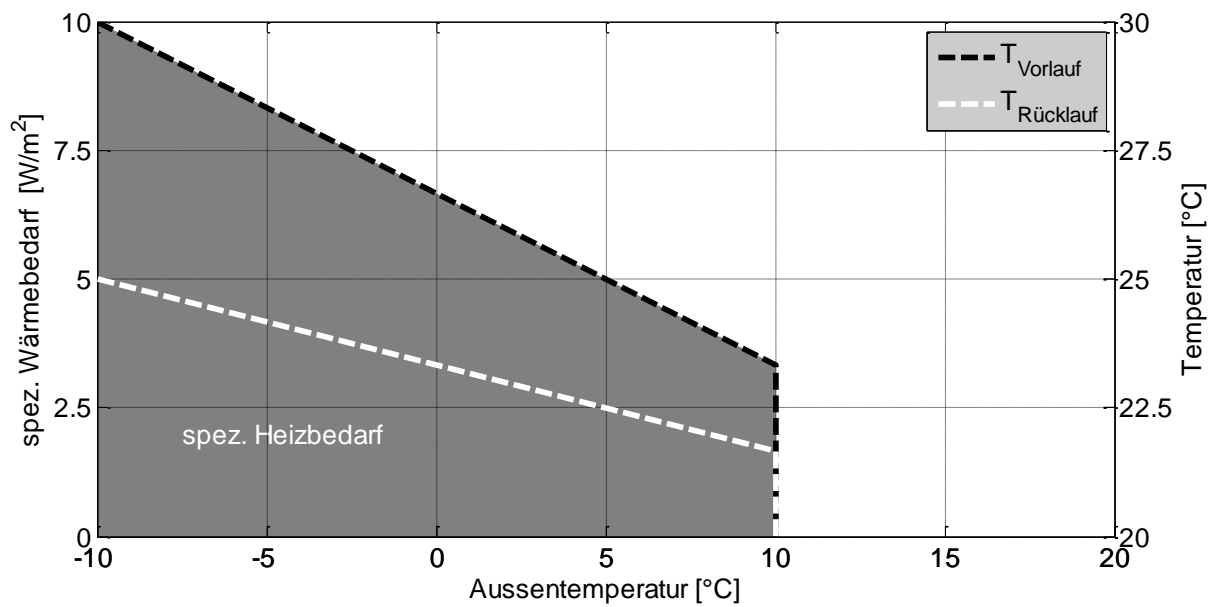


Abbildung 87: vereinfachte Heizkurve für bestehende, schlecht gedämmte Wohnbauten

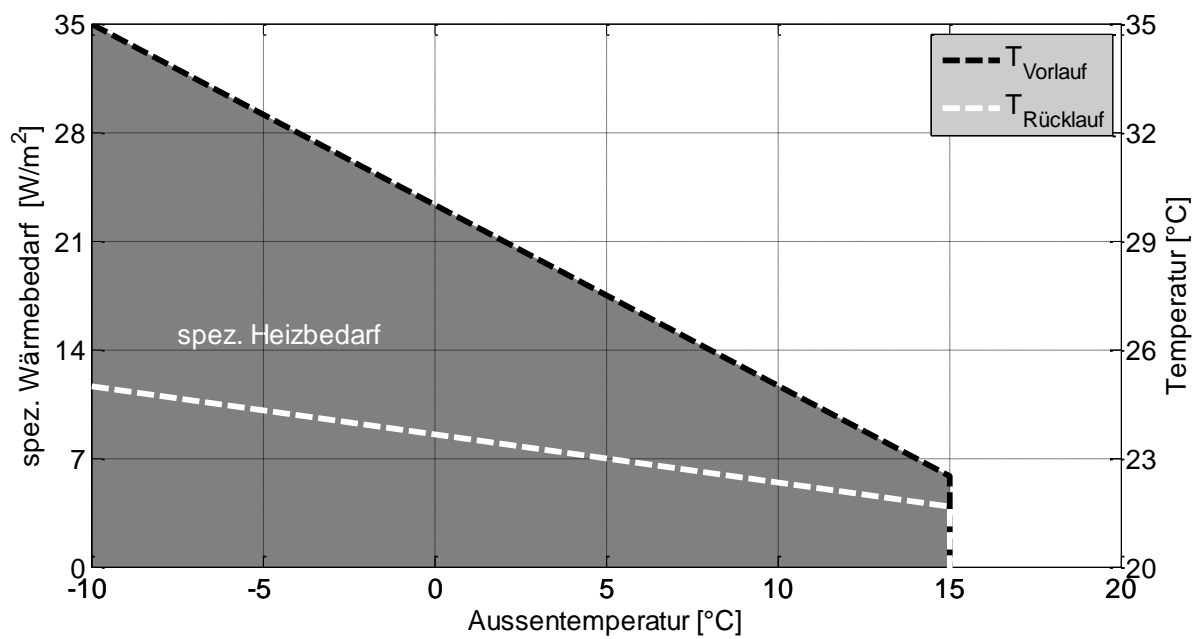


Abbildung 88: vereinfachte Heizkurve für Neubauten

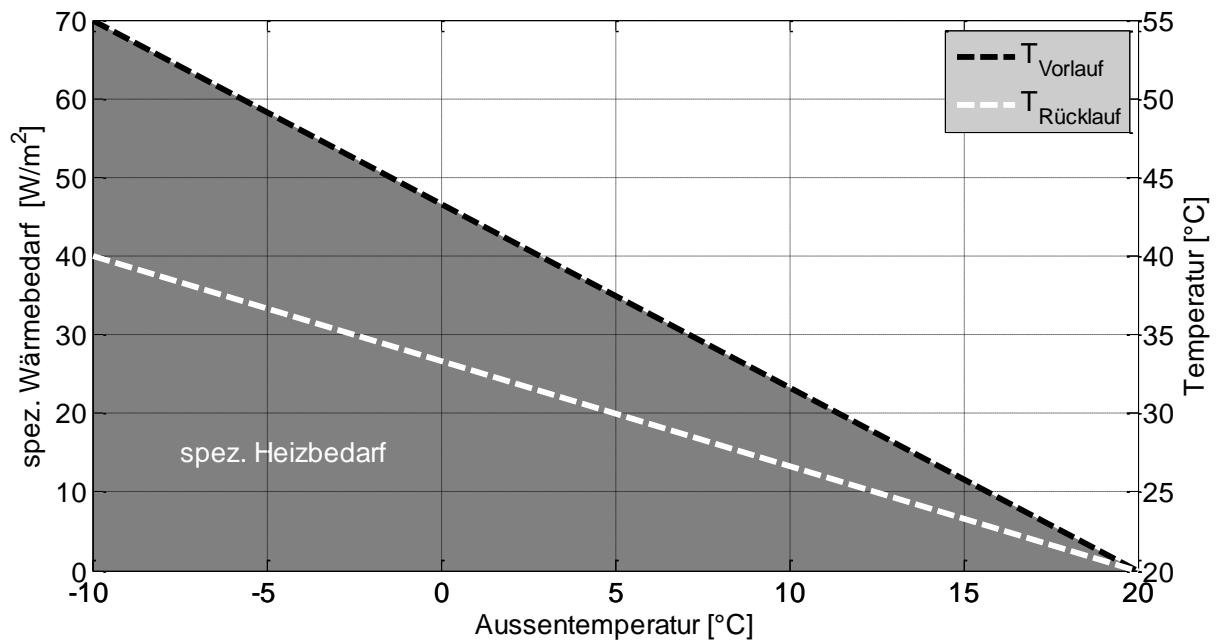


Abbildung 89: vereinfachte Heizkurve für Minergie-P-Bauten

J Vorgabeparameter

J.1 Belastungswert (BW) der virtuellen Wohnung

Die Dimensionierung der Rohrdurchmesser des Warmwasserverteilnetzes erfolgt unter Berücksichtigung des Belastungswerts, welcher auf das jeweilige Rohrteilstück wirkt. In den Wasserleitsätzen des SVGW (2000) sind die Belastungswerte verschiedener Armaturen und Apparaturen zu finden (siehe Tabelle 63). Dies bedeutet, dass die Ausstattung der virtuellen Wohnung (100 m², 2.3 Personen/Wohnung) festgelegt werden musste. Diese Festlegung erfolgte gemäss den Empfehlungen von Geberit (2011) für den durchschnittlichen Ausbaustandard.



















	WC	Waschtisch	Badewanne	Dusche	Urinal	Spültisch	Geschirrspüler	Waschmaschine pro Wohnung	Wäschetrockner pro Wohnung
	WC	WT	BW	DU	UR	SP	GWA	WM	TU
									
Wohnungsbau, minimaler Ausbaustandard									
 1-2	1	1	1			1			
 3-4	2	1	1	1		1			
 5-7	2	2	1	1		1	1		
Wohnungsbau, durchschnittlicher Ausbaustandard									
 1-2	1	1	1	1		1	1		
 3-4	2	2	1	1		1	1		
 5-7	3	3	1	1		1	1	1	1
Eigentumswohnungen, Eigenheim, erhöhter Ausbaustandard									
 1-2	1	1	1	1	1	1	1	1	1
 3-4	2	2	1	1	1	1	1	1	1
 5-7	3	3	1	2	1	2	1	1	1

Abbildung 90: Bedarfswahlen im Saniterbereich (Empfehlung Geberit (2011))

Tabelle 63: Belastungswerte pro Anschluss (SVGW (2000))

Verwendungszweck: Anschlüsse ½"	Volumenstrom pro Anschluss		Anzahl Belastungswerte pro Anschluss BW
	l/s	l/min	
Handwaschbecken, Waschrinne, Waschtisch, Bidet, Spülkasten, Getränkeautomat	0,1	6	1
Spülbecken, Ausgussbecken, Entnahmearmatur für Balkon und Terrasse, Coiffeurbrause, Haushaltgeschirrspülmaschine, Waschtrog	0,2	12	2
Dusche	0,3	18	3
Spülbecken für Gewerbe, Stand- und Wandausguss, Badewanne, Waschautomat bis 6 kg, Urinoir-Spülung automatisch, Geschirrbrause	0,4	24	4
Entnahmearmatur für Garten und Garage	0,5	30	5
Verwendungszweck: Anschlüsse ¾"			
Spülbecken für Gewerbe, Badewanne, Dusche, Entnahmearmatur für Garten und Garage	0,8	48	8

Zusammenfassend ergibt dies einen Belastungswert der Warmwasserleitung von 11 für jede Wohnung. Der Rohrdurchmesser ist abhängig von der Höhe des Belastungswerts, welcher sich aus der Summe aller angeschlossenen Wohnungen am betreffenden Leitungsabschnitt ergibt. In den Wasserleitsätzen sind Tabellen unterschiedliche Materialien zu finden, die jedem Rohrquerschnitt einen maximalen Belastungswert zuordnen.

Tabelle 64: Belastungswerte für rostbeständige Stahlrohre (SVGW (2000))

Total Belastungswerte BW	3	4	6	10	20	50	165	430	1050	2100
Grösster Einzelwert BW			4	5	8					
$d_a \times s$ (mm)	15×1,0			18×1,0	22×1,2	28×1,2	35×1,5	42×1,5	54×1,5	76,1×2
d_i (mm)	13,0			16,0	19,6	25,6	32	39	51	72,1
Empfohlene Rohrlänge (m)	15	9	7							
Armatur	½"			½"	¾"	1"	1¼"	1½"	2"	2½"

J.2 Zirkulationsvolumenstrom

Der erforderliche Volumenstrom im Zirkulationssystem hängt von der geforderten Spreizung ΔT zwischen Vor- und Rücklaufemperatur am Speicher und dem Wärmeverlust der Leitungen gegenüber der Umgebung ab.

Das Skript Warmwasser-Zirkulation von *Walser und Hofer (2002)* dient als Grundlage für die Berechnung. Nachdem die Verluste für alle Teilstrecken bestimmt sind, kann mit (87) der Pumpenvolumenstrom ermittelt werden. Die Teilvolumenströme ergeben sich durch die proportionale Aufteilung des Volumenstroms entsprechend den nachfolgenden Wärmeverlusten gemäss (88). Für die Berechnungen im Parallelrohrsystem nach *Walser*

und Hofer (2002) werden ein Verlustwert von 14 W/m Doppelrohr und eine Spreizung von 10 K verwendet.

$$\dot{V}_{\text{Zirk}} = \frac{\dot{Q}_{\text{Zirk}}}{c_p \cdot \rho \cdot \Delta T} \quad (87)$$

$$\dot{V}_{\text{Zirk,a}} = \frac{\dot{V}_{\text{Zirk}} \cdot \dot{Q}_{\text{Zirk,a}}}{\dot{Q}_{\text{Zirk}}} \quad (88)$$

Die Teilvolumenströme dienen zur Bestimmung des Querschnitts der Zirkulationsleitung. Dabei wird darauf geachtet, dass die maximale Strömungsgeschwindigkeit möglichst zwischen ca. 0.3...0.7 m/s liegt. Im Gespräch mit dem Abteilungsleiter Sanitär einer Planungs- und Installationsfirma bekamen die Autoren den Hinweis, dass die Zirkulation im Untergeschoss meist in Chromstahl (CNS) und in den Steigzonen als Polyethylenrohr (PE-X) ausgeführt ist. Dabei wird die Verwendung von PE-X mit einem Querschnitt kleiner 16 mm x 2.2 mm meist vermieden.

J.3 Dämmung

Leitungen

Die unterschiedliche Ausführungsqualität der Leitungsisolation im Feld wird in drei Stufen variiert. Das Ziel dabei ist, den Einfluss von gut gedämmten Leitungen mit der Simulation zu beziffern.

Tabelle 65: Dämmdicke in Abhängigkeit des Aussendurchmessers für eine Isolation mit $\lambda = 0.03 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$

Aussendurchmesser der Leitung [mm]	15.0	18.0	22.0	28.0	35.0	54.0	64.0	76.1	88.9	108.0
Dämmdicke gut/nach SIA-Norm 385/1 [mm]	40	42	45	49	53	63	68	74	80	88
Dämmdicke mittel [mm]	30 für $D_{\text{Rohr}} \leq 28 \text{ mm}$, 50 für $D_{\text{Rohr}} > 28 \text{ mm}$									
Dämmdicke schlecht [mm]	20 für $D_{\text{Rohr}} \leq 28 \text{ mm}$, 35 für $D_{\text{Rohr}} > 28 \text{ mm}$									

Speicher

Die Festlegung der Dämmdicke des Brauchwarmwasser-Speichers erfolgt auf Basis der SIA-Norm 385/1. Die schreibt für Speicher bis zu einem Volumen von 2000 l die zulässigen Wärmeverluste vor. Aus den Unterlagen verschiedener Speicherhersteller wurde eine Approximation der Speicherform erstellt, um daraus die Mantelfläche des Speichers zu ermitteln (Abbildung 91). Für eine Isolation mit $\lambda = 0.045 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ konnten dann Stützwerte für die Dämmdicken dieses Volumenbereichs generiert werden. Darüber hinaus steigt die Dämmdicke linear an bis zu einem Maximum von 200 mm (Abbildung 92).

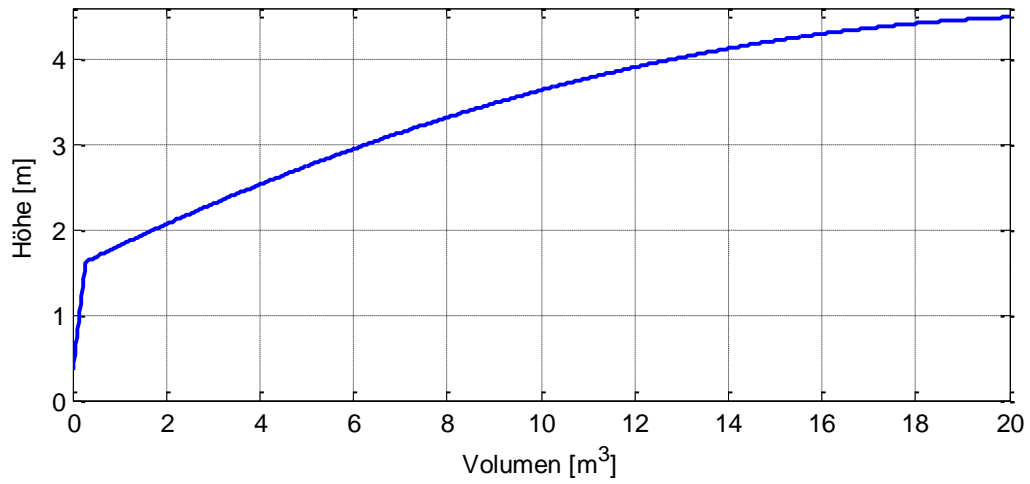


Abbildung 91: Speicherhöhe in Abhängigkeit des Volumens

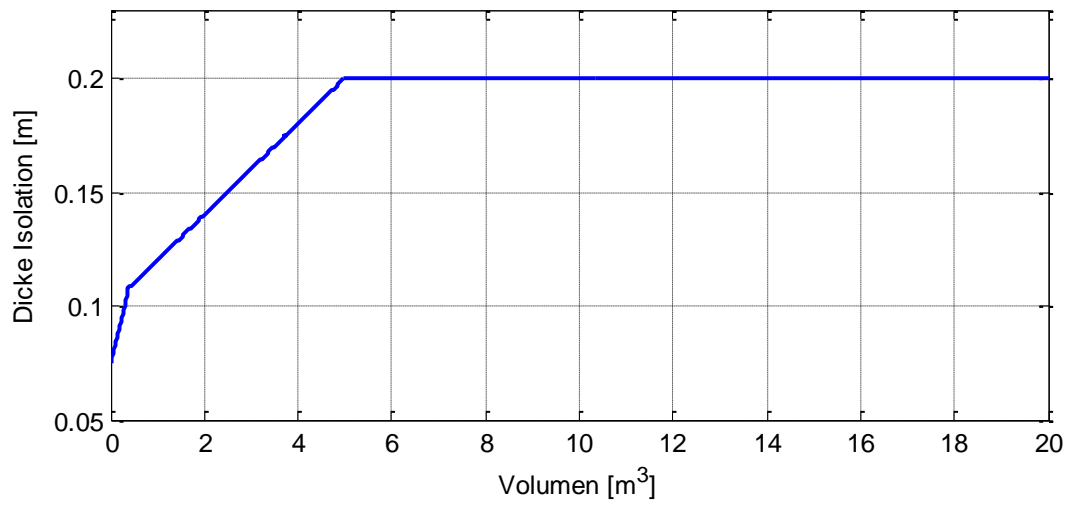


Abbildung 92: Isolationsdicke in Abhängigkeit des Speichervolumens

K Verteilsysteme

Die hier dargestellten Zirkulationsvolumenströme gelten für den nach *Suissetec (2003)* vorgeschlagenen Wärmeverlust 14 W/m Doppelrohr und wurden lediglich zur Bestimmung der Rohrquerschnitte verwendet. Die effektiven Zirkulationsvolumenströme für die Simulation wurden auf einen Schätzwert für den Wirkverlust pro Meter Doppelrohr skaliert.

K.1 Topologie H2W4

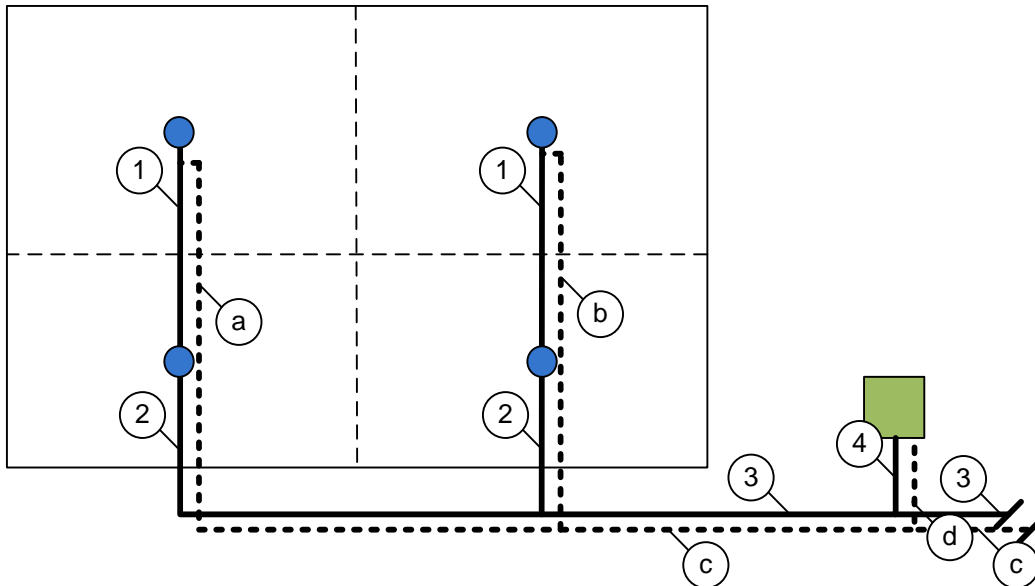


Abbildung 93: Darstellung der Leitungen eines Gebäudes der Topologie H2W4

Tabelle 66: Dimensionierung von Vor- und Rücklaufleitung der Topologie H2W4 mit zentraler Versorgung

Warmwasserseite	Leitungsabschnitt	BW	Material Dimension	Zirkulationseite	Leitungsabschnitt	\dot{V}_{Zirk} [l/h]	Material Dimension
	1				2		
	1	11	CNS $\varnothing 22 \times 1.2$		a	29	PE-X $\varnothing 16 \times 2.2$
	2	22	CNS $\varnothing 28 \times 1.2$		b	9	PE-X $\varnothing 16 \times 2.2$
	3	44	CNS $\varnothing 28 \times 1.2$		c	38	CNS $\varnothing 15 \times 1.0$
	4	88	CNS $\varnothing 35 \times 1.5$		d	76	CNS $\varnothing 15 \times 1.0$

Tabelle 67: Dimensionierung der Rücklaufleitung der Topologie H2W4 mit dezentraler Versorgung

Zirkulationseite	Leitungsabschnitt	\dot{V}_{Zirk} [l/h]	Material Dimension
	a		
	a	22.1	PE-X $\varnothing 16 \times 2.2$
	b	6.9	PE-X $\varnothing 16 \times 2.2$
	c	29	CNS $\varnothing 15 \times 1.0$

K.2 Topologie H4W12

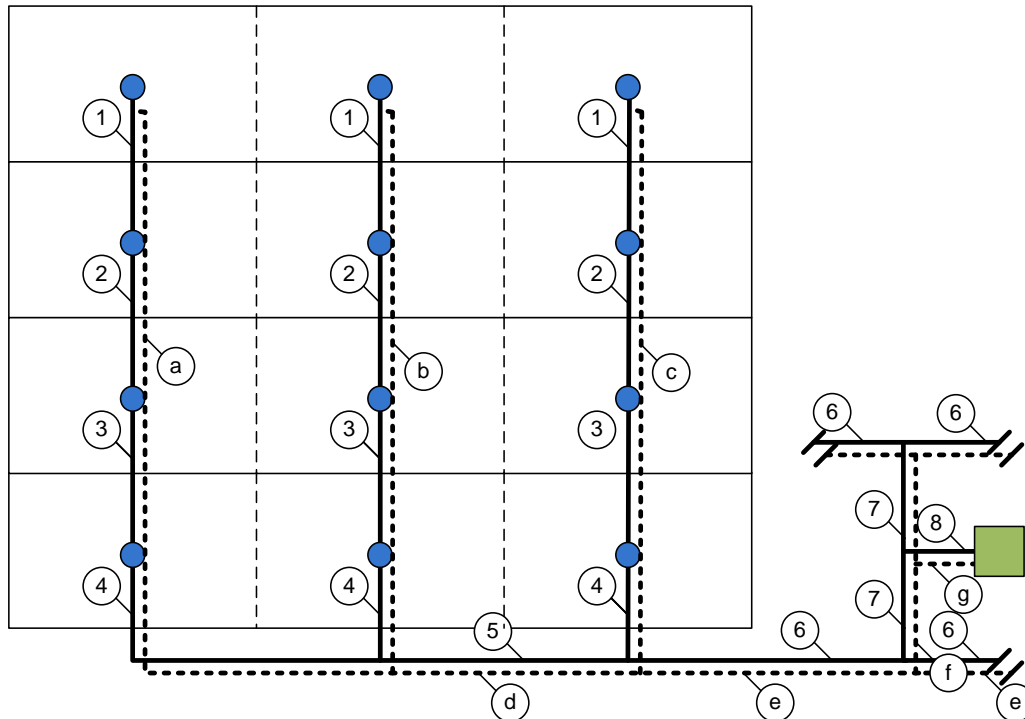


Abbildung 94: Darstellung der Leitungen eines Gebäudes der Topologie H4W12

Tabelle 68: Dimensionierung von Vor- und Rücklaufleitung der Topologie H4W12

Warmwasserseite	Leitungsabschnitt	BW	Material Dimension	Zirkulationsseite	Leitungsabschnitt	\dot{V}_{Zirk} [l/h]	Material Dimension
	1	11	CNS $\varnothing 22 \times 1.2$		a	43.8	PE-X $\varnothing 16 \times 2.2$
2	22	CNS $\varnothing 28 \times 1.2$	b	22.4	PE-X $\varnothing 16 \times 2.2$		
3	33	CNS $\varnothing 28 \times 1.2$	c	17	PE-X $\varnothing 16 \times 2.2$		
4	44	CNS $\varnothing 28 \times 1.2$	d	66.2	CNS $\varnothing 15 \times 1.0$		
5	88	CNS $\varnothing 35 \times 1.5$	e	83.2	CNS $\varnothing 15 \times 1.0$		
6	132	CNS $\varnothing 35 \times 1.5$	f	176.4	CNS $\varnothing 18 \times 1.0$		
7	264	CNS $\varnothing 42 \times 1.5$	g	332.8	CNS $\varnothing 22 \times 1.0$		
8	528	CNS $\varnothing 54 \times 1.5$					

Tabelle 69: Dimensionierung der Rücklaufleitung der Topologie H4W12 mit dezentraler Versorgung

Zirkulationsseite	Leitungsabschnitt	\dot{V}_{Zirk} [l/h]	Material Dimension
a		35.8	PE-X $\varnothing 16 \times 2.2$
b		18.4	PE-X $\varnothing 16 \times 2.2$
c		13.9	PE-X $\varnothing 16 \times 2.2$
d		54.2	CNS $\varnothing 15 \times 1.0$
e		68.1	CNS $\varnothing 15 \times 1.0$

K.3 Topologie H8W24

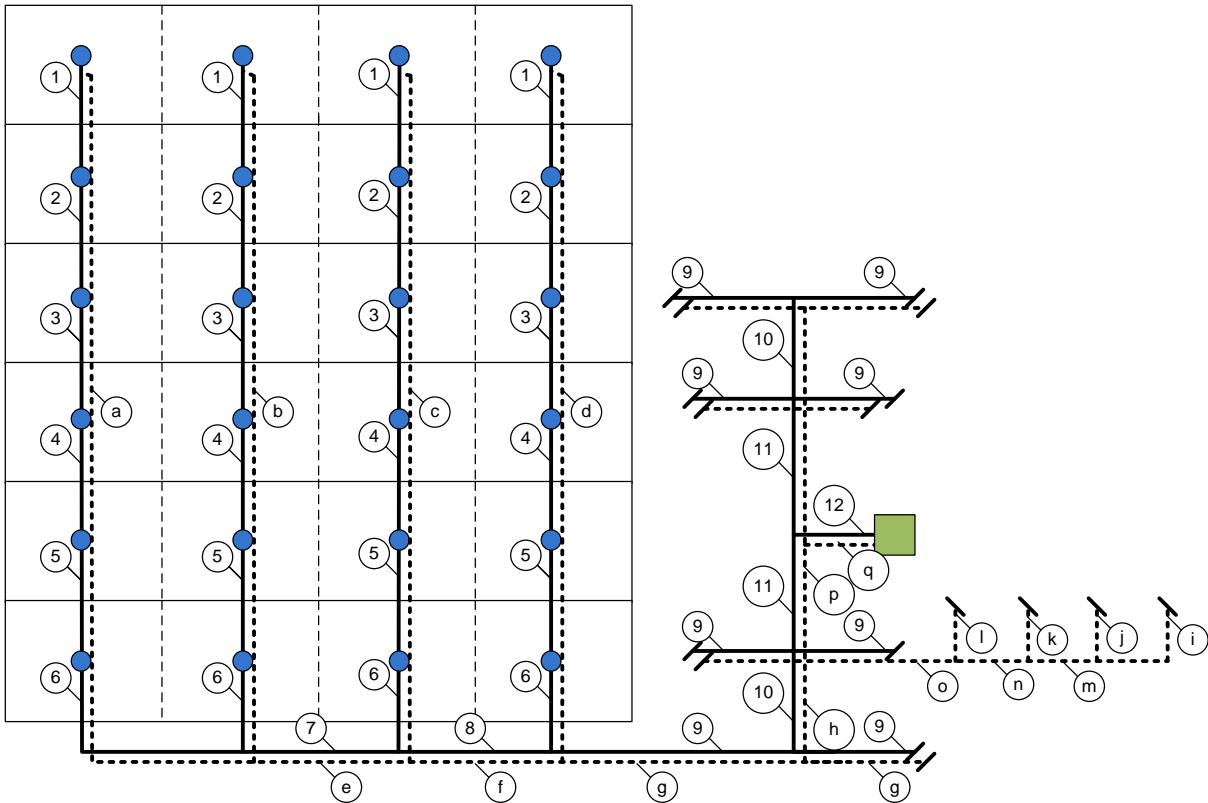


Abbildung 95: Darstellung der Leitungen eines Gebäudes der Topologie H8W24

Tabelle 70: Dimensionierung von Vor- und Rücklaufleitung der Topologie H8W24

Warmwasserseite	Leitungsabschnitt	BW	Material Dimension	Zirkulationsseite	Leitungsabschnitt	\dot{V}_{Zirk} [l/h]	Material Dimension
	1	11	CNS $\varnothing 22 \times 1.2$		a	63.7	PE-X $\varnothing 16 \times 2.2$
	2	22	CNS $\varnothing 28 \times 1.2$		b	39.6	PE-X $\varnothing 16 \times 2.2$
	3	33	CNS $\varnothing 28 \times 1.2$		c	32.2	PE-X $\varnothing 16 \times 2.2$
	4	44	CNS $\varnothing 28 \times 1.2$		d	15.5	PE-X $\varnothing 16 \times 2.2$
	5	55	CNS $\varnothing 35 \times 1.5$		e	103.3	CNS $\varnothing 15 \times 1.0$
	6	66	CNS $\varnothing 35 \times 1.5$		f	135.5	CNS $\varnothing 15 \times 1.0$
	7	132	CNS $\varnothing 35 \times 1.5$		g	151	CNS $\varnothing 18 \times 1.0$
	8	198	CNS $\varnothing 42 \times 1.5$		h	302	CNS $\varnothing 22 \times 1.0$
	9	264	CNS $\varnothing 42 \times 1.5$		i	64.3	PE-X $\varnothing 16 \times 2.2$
	10	528	CNS $\varnothing 54 \times 1.5$		j	40	PE-X $\varnothing 16 \times 2.2$
	11	1056	CNS $\varnothing 76.1 \times 2.0$		k	17.9	PE-X $\varnothing 16 \times 2.2$
	12	2112	CNS $\varnothing 88.9 \times 2.0$		l	10.5	PE-X $\varnothing 16 \times 2.2$
			m	104.3	CNS $\varnothing 15 \times 1.0$		
			n	122.2	CNS $\varnothing 15 \times 1.0$		
			o	132.7	CNS $\varnothing 15 \times 1.0$		
			p	567.4	CNS $\varnothing 28 \times 1.2$		
			q	1135	CNS $\varnothing 28 \times 1.2$		

Tabelle 71: Dimensionierung der Rücklaufleitung der Topologie H8W24 mit dezentraler Versorgung

Zirkulationsseite	Leitungsabschnitt	\dot{V}_{Zirk} [l/h]	Material Dimension
	a	47.4	PE-X $\varnothing 16 \times 2.2$
	b	29.5	PE-X $\varnothing 16 \times 2.2$
	c	23.9	PE-X $\varnothing 16 \times 2.2$
	d	20.9	PE-X $\varnothing 16 \times 2.2$
	e	76.9	CNS $\varnothing 15 \times 1.0$
	f	100.8	CNS $\varnothing 15 \times 1.0$
	g	121.7	CNS $\varnothing 18 \times 1.0$

L Simulationsergebnisse (detailliert)

L.1 Zirkulation (kontinuierlich)

Tabelle 72: Variablenmatrix der Resultate: Zirkulation

Kürzel	Beschreibung
T_{VL} [°C]	mittlere Vorlauftemperatur
$T_{Wohnungsanschluss}$ [°C]	mittlere Temperatur des Warmwassers am Wohnungsverteiler
T_{RL} [°C]	mittlere Zirkulationsrücklauftemperatur
$T_{Kaltwasser}$ [°C]	10
\dot{V}_{Zirk} [l/h]	mittlerer Zirkulationsvolumenstrom
\dot{Q}_{Schein} [kW]	mittlerer Scheinverlust im Verteilnetz
$\dot{q}_{rel,Schein}$ [W/m]	mittlerer relativer Scheinverlust pro Meter Doppelrohr
$\dot{q}_{rel,Wirk}$ [W/m]	mittlerer relativer Wirkverlust pro Meter Doppelrohr
$E_{WP,thermisch}$ [kWh/m ³]	relative thermische Heizenergie der WP pro m ³ gezapftes BWW
E_{Schein} [kWh/m ³]	relativer Scheinverlust im Verteilnetz pro m ³ gezapftes BWW
$E_{Zapfung}$ [kWh/m ³]	$= 1000 \frac{kg}{m^3} \cdot 4.18 \frac{kJ}{kg \cdot K} \cdot (T_{Wohnungsanschluss} - T_{Kaltwasser}) \cdot \frac{1h}{3600s}$, gezapfte Energie
$E_{Verlust,Zentrale}$ [kWh/m ³]	relativer Wärmeverlust in der Zentrale
$E_{el,Pumpe}$ [kWh/m ³]	relative elektrische Aufnahmeenergie der Zirkulationspumpe
COP_{WP} [-]	Leistungszahl der BWW-Wärmepumpe
$E_{el,total}$ [kWh/m ³]	relative elektrische Aufnahmeenergie der Anlage
AZ_{Anlage} [-]	Arbeitszahl der BWW-Anlage: $AZ_{Anlage} = E_{Zapfung} / E_{el,total}$

Tabelle 73: Simulationsergebnisse für die Topologie H2W4

H2W4		Dämmung				Dämmung		
		gut	mittel	schlecht		gut	mittel	schlecht
T_{VL}	Zentral	58.03	58.05	58.09	Dezentral	58.04	57.90	57.70
$T_{Wohnungsanschluss}$		56.24	56.20	55.91		56.52	56.29	56.23
T_{RL}		50.17	50.14	50.04		50.44	50.28	50.00
\dot{V}_{Zirk}		47.88	58.52	72.96		18.27	22.33	27.84
\dot{Q}_{Schein}		0.43	0.53	0.67		0.16	0.20	0.25
$\dot{Q}_{rel,Schein}$		6.86	8.42	10.68		6.64	8.12	10.25
$\dot{Q}_{rel,Wirk}$		7.74	9.40	11.80		7.4	9.08	11.40
$E_{WP,thermisch}$		73.00	76.43	81.06		70.86	73.23	76.79
E_{Schein}		14.68	18.06	22.91		11.10	13.58	17.13
$E_{Zapfung}$		53.67	53.62	53.28		54.00	53.73	53.65
$E_{Verlust,Zentrale}$		3.16	3.26	3.24		5.03	5.06	5.02
$E_{el,Pumpe}$		0.17	0.17	0.17		0.35	0.35	0.35
COP_{WP}		3.32	3.29	3.25		3.36	3.34	3.30
$E_{el,total}$		22.18	23.40	25.13		21.42	22.29	23.62
AZ_{Anlage}	2.42	2.29	2.12	2.52	2.41	2.27		

Tabelle 74: Simulationsergebnisse für die Topologie H4W12

H4W12		Dämmung				Dämmung		
		gut	mittel	schlecht		gut	mittel	schlecht
T_{VL}	Zentral	58.61	58.46	58.19	Dezentral	58.35	58.23	57.97
$T_{Wohnungsanschluss}$		56.75	56.57	56.05		56.68	56.62	56.24
T_{RL}		50.77	50.56	50.21		51.01	50.80	50.45
\dot{V}_{Zirk}		216.32	252.93	312.83		44.33	51.83	64.11
\dot{Q}_{Schein}		3.46	4.08	5.10		0.37	0.44	0.55
$\dot{Q}_{rel,Schein}$		6.92	8.16	10.19		6.61	7.82	9.78
$\dot{Q}_{rel,Wirk}$		7.90	9.20	11.44		7.50	8.78	10.92
$E_{WP,thermisch}$		66.82	68.58	71.31		66.23	67.76	69.95
E_{Schein}		11.03	13.00	16.24		8.64	10.22	12.78
$E_{Zapfung}$		54.27	54.05	53.45		54.18	54.10	53.67
$E_{Verlust,Zentrale}$		1.02	1.02	1.00		2.40	2.39	2.34
$E_{el,Pumpe}$		0.09	0.11	0.17		0.116	0.116	0.116
COP_{WP}		3.40	3.38	3.35		3.44	3.42	3.40
$E_{el,total}$		19.74	20.39	21.47		19.39	19.92	20.69
AZ_{Anlage}	2.75	2.65	2.49	2.78	2.72	2.59		

Tabelle 75: Simulationsergebnisse für die Topologie H8W24

H8W24		Dämmung				Dämmung		
		gut	mittel	schlecht		gut	mittel	schlecht
T_{VL}	Zentral	58.73	58.68	58.43	Dezentral	58.52	58.52	58.45
$T_{Wohnungsanschluss}$		56.93	56.83	56.46		56.85	56.89	56.80
T_{RL}		51.13	50.94	50.65		51.34	51.25	51.11
\dot{V}_{Zirk}		760.32	873.80	1089.41		81.54	93.71	116.83
\dot{Q}_{Schein}		6.63	7.75	9.73		0.67	0.78	0.98
$\dot{q}_{rel,Schein}$		7.03	8.22	10.32		6.65	7.74	9.74
$\dot{q}_{rel,Wirk}$		8.12	9.38	11.66		7.62	8.74	10.80
$E_{WP,thermisch}$		64.89	66.40	68.83		64.25	65.60	67.91
E_{Schein}		9.39	10.99	13.79		7.78	9.06	11.40
$E_{Zapfung}$		54.46	54.35	53.93		54.38	54.42	54.31
$E_{Verlust,Zentrale}$		0.61	0.60	0.634		1.54	1.58	1.64
$E_{el,Pumpe}$		0.14	0.18	0.29		0.058	0.064	0.095
COP_{WP}		3.41	3.40	3.39		3.47	3.44	3.40
$E_{el,total}$		19.168	19.70	20.62		18.60	19.14	20.07
AZ_{Anlage}	2.84	2.76	2.62	2.92	2.84	2.71		

L.2 Begleitheizung

Tabelle 76: Variablenmatrix der Resultate: Begleitheizung

Kürzel	Beschreibung
T_{VL} [°C]	mittlere Vorlauftemperatur
$T_{Wohnungsanschluss}$ [°C]	mittlere Temperatur des Warmwassers am Wohnungsverteiler
$T_{Kaltwasser}$ [°C]	10
$\dot{Q}_{Heizband}$ [kW]	mittlere Heizleistung der Begleitheizung
$\dot{q}_{rel,Wirk}$ [W/m]	mittlerer relativer Wirkverlust pro Meter Rohr
$E_{WP,thermisch}$ [kWh/m ³]	relative thermische Heizenergie der WP pro m ³ gezapftes BWW
$E_{Zapfung}$ [kWh/m ³]	$= 1000 \frac{kg}{m^3} \cdot 4.18 \frac{kJ}{kg \cdot K} \cdot (T_{Wohnungsanschluss} - T_{Kaltwasser}) \cdot \frac{1h}{3600s}$, gezapfte Energie
$E_{Verlust,Zentrale}$ [kWh/m ³]	relativer Wärmeverlust in der Zentrale
$E_{Heizband}$ [kWh/m ³]	relativer elektrische Aufnahmeenergie der Begleitheizung
COP_{WP} [-]	Leistungszahl der BWW-Wärmepumpe
$E_{el,total}$ [kWh/m ³]	relative elektrische Aufnahmeenergie der Anlage
AZ_{Anlage} [-]	Arbeitszahl der BWW-Anlage: $AZ_{Anlage} = E_{Zapfung} / E_{el,total}$

Tabelle 77 Simulationsergebnisse für die Topologie H2W4

H2W4		Dämmung				Dämmung		
		gut	mittel	schlecht		gut	mittel	schlecht
T_{VL}	Zentral	58.81	58.81	58.81	Dezentral	58.37	58.37	58.37
$T_{Wohnungsanschluss}$		57.84	56.95	57.71		57.80	57.10	57.70
$\dot{Q}_{Heizband}$		0.26	0.29	0.43		0.10	0.11	0.16
$\dot{q}_{rel,Wirk}$		4.58	5.80	7.39		4.37	5.62	7.19
$E_{WP,thermisch}$		58.88	58.88	58.88		59.55	59.55	59.55
$E_{Heizband}$		8.88	10.01	14.64		6.87	7.77	11.31
$E_{Zapfung}$		55.52	54.49	55.38		55.48	54.67	55.37
$E_{Verlust,Zentrale}$		2.43	2.43	2.43		3.93	3.93	3.93
COP_{WP}		3.55	3.55	3.55		3.54	3.54	3.54
$E_{el,total}$		25.49	26.62	31.24		23.71	24.62	28.16
AZ_{Anlage}		2.18	2.05	1.77		2.34	2.22	1.97

Tabelle 78 Simulationsergebnisse für die Topologie H4W12

H4W12		Dämmung				Dämmung		
		gut	mittel	schlecht		gut	mittel	schlecht
T_{VL}	Zentral	59.49	59.49	59.49	Dezentral	59.21	59.21	59.21
$T_{Wohnungsanschluss}$		58.31	57.75	57.21		58.18	57.71	56.99
$\dot{Q}_{Heizband}$		1.12	1.21	1.44		0.23	0.24	0.27
$\dot{q}_{rel,Wirk}$		4.67	5.50	6.89		4.40	5.25	6.60
$E_{WP,thermisch}$		57.27	57.27	57.27		58.64	58.64	58.64
$E_{Heizband}$		6.34	6.86	8.18		5.20	5.65	6.29
$E_{Zapfung}$		56.07	55.42	54.79		55.92	55.37	54.53
$E_{Verlust,Zentrale}$		0.82	0.82	0.82		1.99	1.99	1.99
COP_{WP}		3.58	3.58	3.58		3.55	3.55	3.55
$E_{el,total}$		22.33	22.84	24.16		21.74	22.19	22.82
AZ_{Anlage}		2.51	2.43	2.27		2.57	2.50	2.39

Tabelle 79 Simulationsergebnisse für die Topologie H8W24

H8W24		Dämmung				Dämmung		
		gut	mittel	schlecht		gut	mittel	schlecht
T_{VL}	Zentral	59.65	59.65	59.65	Dezentral	59.37	59.37	59.37
$T_{Wohnungsanschluss}$		58.42	57.95	57.38		58.27	57.89	57.20
$\dot{Q}_{Heizband}$		3.75	4.00	4.71		0.40	0.42	0.47
$\dot{q}_{rel,Wirk}$		4.82	5.57	6.96		4.49	5.16	6.44
$E_{WP,thermisch}$		57.04	57.04	57.04		57.63	57.63	57.63
$E_{Heizband}$		5.32	5.67	6.67		4.62	4.90	5.41
$E_{Zapfung}$		56.20	55.65	54.99		56.02	55.58	54.79
$E_{Verlust,Zentrale}$		0.47	0.47	0.47		1.31	1.31	1.31
COP_{WP}		3.59	3.59	3.59		3.59	3.59	3.59
$E_{el,total}$		21.23	21.58	22.58		20.69	20.97	21.48
AZ_{Anlage}		2.65	2.58	2.44		2.71	2.65	2.55

L.3 modulierende Zirkulationswärmepumpe

Tabelle 80: Variablenmatrix der Resultate: Modulierende Zirkulationswärmepumpe

Kürzel	Beschreibung
T_{VL} [°C]	mittlere Vorlauftemperatur
$T_{Wohnungsanschluss}$ [°C]	mittlere Temperatur des Warmwassers am Wohnungsverteiler
T_{RL} [°C]	mittlere Zirkulationsrücklauftemperatur
$T_{Kaltwasser}$ [°C]	10
\dot{V}_{Zirk} [l/h]	mittlerer Zirkulationsvolumenstrom
\dot{Q}_{ZirkWP} [kW]	Leistungsbereich der modulierenden Zirkulationswärmepumpe
$\dot{q}_{rel,Wirk}$ [W/m]	mittlerer relativer Wirkverlust pro Meter Doppelrohr
$E_{BwwWP,thermisch}$ [kWh/m ³]	relative thermische Heizenergie der BWW-WP pro m ³ gezapftes BWW
$E_{ZirkWP,thermisch}$ [kWh/m ³]	relative thermische Heizenergie der Zirk-WP pro m ³ gezapftes BWW
$E_{Zapfung}$ [kWh/m ³]	$= 1000 \frac{kg}{m^3} \cdot 4.18 \frac{kJ}{kg \cdot K} \cdot (T_{Wohnungsanschluss} - T_{Kaltwasser}) \cdot \frac{1h}{3600s}$, gezapfte Energie
$E_{Verlust,Zentrale}$ [kWh/m ³]	relativer Wärmeverlust in der Zentrale
$E_{el,Pumpe}$ [kWh/m ³]	relative elektrische Aufnahmeenergie der Zirkulationspumpe
COP_{ZirkWP} [-]	Leistungszahl der BWW-Wärmepumpe
COP_{BwwWP} [-]	Leistungszahl der Zirkulationswärmepumpe
$E_{el,total}$ [kWh/m ³]	relative elektrische Aufnahmeenergie der Anlage
AZ_{Anlage} [-]	Arbeitszahl der BWW-Anlage: $AZ_{Anlage} = E_{Referenz} / E_{el,total}$

Tabelle 81 Simulationsergebnisse für die Topologie H2W4

H2W4		Dämmung				Dämmung		
		gut	mittel	schlecht		gut	mittel	schlecht
T_{VL}	Zentral	58.05	58.05	58.04	Dezentral	58.01	58.01	58.01
$T_{Wohnungsanschluss}$		56.86	56.72	56.58		57.06	56.94	56.84
T_{RL}		50.27	50.24	50.09		50.49	50.44	50.29
\dot{V}_{Zirk}		47.88	58.52	72.96		18.27	22.33	27.84
\dot{Q}_{ZirkWP}		0.3-0.5	0.3-0.6	0.4-0.8		0.1-0.2	0.1-0.2	0.1-0.3
$\dot{q}_{rel,Wirk}$		7.74	9.40	11.80		7.40	9.08	11.40
$E_{BwwWP,thermisch}$		58.88	58.88	58.88		59.55	59.55	59.55
$E_{ZirkWP,thermisch}$		14.03	17.21	21.89		10.65	13.11	16.66
$E_{Zapfung}$		54.38	54.22	54.06		54.62	54.48	54.37
$E_{Verlust,Zentrale}$		2.43	2.43	2.43		3.93	3.93	3.93
$E_{el,Pumpe}$		0.17	0.17	0.17		0.35	0.35	0.35
COP_{ZirkWP}		2.99	2.99	2.99		2.98	2.98	2.99
COP_{BwwWP}		3.55	3.55	3.55		3.54	3.54	3.54
$E_{el,total}$		21.47	22.54	24.10		20.76	21.59	22.77
AZ_{Anlage}		2.53	2.41	2.24		2.63	2.52	2.39

Tabelle 82 Simulationsergebnisse für die Topologie H4W12

H4W12		Dämmung				Dämmung		
		gut	mittel	schlecht		gut	mittel	schlecht
T_{VL}	Zentral	58.34	58.33	58.3	Dezentral	58.10	58.10	58.09
$T_{Wohnungsanschluss}$		57.24	57.14	56.96		57.32	57.25	57.12
T_{RL}		50.76	50.63	50.43		51.05	50.91	50.73
\dot{V}_{Zirk}		216.32	252.93	312.83		44.33	51.83	64.11
\dot{Q}_{ZirkWP}		1.1-2.2	1.3-2.6	1.7-3.2		0.2-0.5	0.2-0.6	0.3-0.7
$\dot{q}_{rel,Wirk}$		7.9	9.2	11.44		7.50	8.78	10.92
$E_{BwwWP,thermisch}$		57.27	57.27	57.27		58.64	58.64	58.64
$E_{ZirkWP,thermisch}$		9.9	11.79	14.97		7.95	9.48	12.02
$E_{Zapfung}$		54.82	54.71	54.5		54.92	54.83	54.69
$E_{Verlust,Zentrale}$		0.82	0.82	0.82		1.99	1.99	1.99
$E_{el,Pumpe}$		0.09	0.11	0.17		0.12	0.12	0.12
COP_{ZirkWP}		2.97	2.98	2.98		2.97	2.97	2.98
COP_{BwwWP}		3.58	3.58	3.58		3.55	3.55	3.55
$E_{el,total}$		19.4	20.05	21.17		19.33	19.85	20.69
AZ_{Anlage}		2.83	2.73	2.57		2.84	2.76	2.64

Tabelle 83 Simulationsergebnisse für die Topologie H8W24

H8W24		Dämmung				Dämmung		
		gut	mittel	schlecht		gut	mittel	schlecht
T_{VL}	Zentral	58.57	58.54	58.48	Dezentral	58.18	58.17	58.16
$T_{Wohnungsanschluss}$		57.45	57.33	57.15		57.43	57.38	57.28
T_{RL}		51.11	50.93	50.76		51.33	51.19	51.06
\dot{V}_{Zirk}		760.32	873.80	1089.41		81.54	93.71	116.83
\dot{Q}_{ZirkWP}		4.1-7.3	5.0-8.5	6.5-11		0.3-0.85	0.4-1.0	0.5- 1.2
$\dot{q}_{rel,Wirk}$		8.12	9.38	11.66		7.62	8.74	10.82
$E_{BwwWP,thermisch}$		57.04	57.04	57.04		57.63	57.63	57.63
$E_{ZirkWP,thermisch}$		8.27	9.76	12.45		7.03	8.24	10.47
$E_{Zapfung}$		55.07	54.94	54.72		55.05	54.99	54.88
$E_{Verlust,Zentrale}$		0.47	0.47	0.47		1.31	1.31	1.31
$E_{el,Pumpe}$		0.14	0.18	0.29		0.06	0.06	0.1
COP_{ZirkWP}		2.97	2.97	2.97		2.96	2.97	2.97
COP_{BwwWP}		3.59	3.59	3.59		3.59	3.59	3.59
$E_{el,total}$		18.83	19.38	20.39		18.50	18.91	19.69
AZ_{Anlage}		2.92	2.84	2.68		2.98	2.91	2.79

L.4 Zirkulationswärmepumpe mit Pufferspeicher

Tabelle 84: Variablenmatrix der Resultate: Modulierende Zirkulationswärmepumpe

Kürzel	Beschreibung
T_{VL} [°C]	mittlere Vorlauftemperatur
$T_{\text{Wohnungsanschluss}}$ [°C]	mittlere Temperatur des Warmwassers am Wohnungsverteiler
T_{RL} [°C]	mittlere Zirkulationsrücklauftemperatur
$T_{\text{Kaltwasser}}$ [°C]	10
\dot{V}_{Zirk} [l/h]	mittlerer Zirkulationsvolumenstrom
\dot{Q}_{ZirkWP} [kW]	Heizleistung der Zirkulationswärmepumpe
$\dot{q}_{\text{rel,Wirk}}$ [W/m]	mittlerer relativer Wirkverlust pro Meter Doppelrohr
$E_{\text{BwwWP,thermisch}}$ [kWh/m ³]	relative thermische Heizenergie der BWW-WP pro m ³ gezapftes BWW
$E_{\text{ZirkWP,thermisch}}$ [kWh/m ³]	relative thermische Heizenergie der Zirk-WP pro m ³ gezapftes BWW
E_{Zapfung} [kWh/m ³]	$= 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 4.18 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}} \cdot (T_{\text{Wohnungsanschluss}} - T_{\text{Kaltwasser}}) \cdot \frac{1\text{h}}{3600\text{s}}$, gezapfte Energie
$E_{\text{Verlust,Zentrale}}$ [kWh/m ³]	relativer Wärmeverlust in der Zentrale
$E_{\text{el,Pumpe}}$ [kWh/m ³]	relative elektrische Aufnahmeenergie der Zirkulationspumpe
$\text{COP}_{\text{ZirkWP}}$ [-]	Leistungszahl der BWW-Wärmepumpe
$\text{COP}_{\text{BwwWP}}$ [-]	Leistungszahl der Zirkulationswärmepumpe
$E_{\text{el,total}}$ [kWh/m ³]	relative elektrische Aufnahmeenergie der Anlage
$\text{AZ}_{\text{Anlage}}$ [-]	Arbeitszahl der BWW-Anlage: $\text{AZ}_{\text{Anlage}} = E_{\text{Referenz}}/E_{\text{el,total}}$

Tabelle 85 Simulationsergebnisse für die Topologie H2W4

H2W4		Dämmung				Dämmung		
		gut	mittel	schlecht		gut	mittel	schlecht
T_{VL}	Zentral	58.67	58.68	58.70	Dezentral	58.60	58.61	58.63
$T_{Wohnungsanschluss}$		57.17	57.05	56.94		57.29	57.18	57.11
T_{RL}		50.64	50.64	50.52		50.83	50.80	50.69
\dot{V}_{Zirk}		47.88	58.52	72.96		18.27	22.33	27.84
\dot{Q}_{ZirkWP}		0.73	0.89	1.12		0.27	0.33	0.41
$\dot{q}_{rel,Wirk}$		7.74	9.40	11.80		7.40	9.08	11.40
$E_{BwwWP,thermisch}$		58.88	58.88	58.88		59.55	59.55	59.55
$E_{ZirkWP,thermisch}$		15.38	18.75	23.67		11.94	14.60	18.33
$E_{Zapfung}$		54.74	54.61	54.48		54.88	54.76	54.68
$E_{Verlust,Zentrale}$		3.20	3.29	3.41		4.79	4.9	5.04
$E_{el,Pumpe}$		0.17	0.17	0.17		0.35	0.35	0.35
COP_{ZirkWP}		2.94	2.94	2.94		2.93	2.93	2.94
COP_{BwwWP}		3.55	3.55	3.55		3.54	3.54	3.54
$E_{el,total}$		22.01	23.16	24.82		21.26	22.17	23.43
AZ_{Anlage}		2.49	2.36	2.20		2.58	2.47	2.33

Tabelle 86 Simulationsergebnisse für die Topologie H4W12

H4W12		Dämmung				Dämmung		
		gut	mittel	schlecht		gut	mittel	schlecht
T_{VL}	Zentral	58.89	58.89	58.89	Dezentral	58.69	58.70	58.71
$T_{Wohnungsanschluss}$		57.57	57.5	57.36		57.56	57.51	57.42
T_{RL}		51.1	51	50.83		51.38	51.26	51.11
\dot{V}_{Zirk}		216.32	252.93	312.83		44.33	51.83	64.11
\dot{Q}_{ZirkWP}		3.33	3.88	4.82		0.64	0.75	0.93
$\dot{q}_{rel,Wirk}$		7.9	9.2	11.44		7.50	8.78	10.92
$E_{BwwWP,thermisch}$		57.27	57.27	57.27		58.64	58.64	58.64
$E_{ZirkWP,thermisch}$		10.72	12.71	16.08		8.81	10.49	13.20
$E_{Zapfung}$		55.21	55.13	54.97		55.20	55.14	55.03
$E_{Verlust,Zentrale}$		0.82	0.82	0.82		2.47	2.52	2.59
$E_{el,Pumpe}$		0.08	0.11	0.17		0.12	0.12	0.12
COP_{ZirkWP}		2.93	2.93	2.93		2.92	2.93	2.93
COP_{BwwWP}		3.58	3.58	3.58		3.55	3.55	3.55
$E_{el,total}$		19.73	20.43	21.63		19.67	20.24	21.16
AZ_{Anlage}		2.8	2.7	2.54		2.81	2.73	2.60

Tabelle 87 Simulationsergebnisse für die Topologie H8W24

H8W24		Dämmung				Dämmung		
		gut	mittel	schlecht		gut	mittel	schlecht
T_{VL}	Zentral	59.06	59.04	59.03	Dezentral	58.75	58.75	58.77
$T_{Wohnungsanschluss}$		57.78	57.69	57.54		57.68	57.65	57.57
T_{RL}		51.46	51.30	51.17		51.65	51.54	51.45
\dot{V}_{Zirk}		760.32	873.80	1089.41		81.54	93.71	116.83
\dot{Q}_{ZirkWP}		11.48	13.27	16.49		1.16	1.33	1.64
$\dot{Q}_{rel,Wirk}$		8.12	9.38	11.66		7.62	8.74	10.82
$E_{BwwWP,thermisch}$		57.04	57.04	57.04		57.63	57.63	57.63
$E_{ZirkWP,thermisch}$		8.92	10.42	13.27		7.77	9.06	11.44
$E_{Zapfung}$		55.45	55.35	55.17		55.34	55.30	55.22
$E_{Verlust,Zentrale}$		0.56	0.56	0.56		1.65	1.68	1.73
$E_{el,Pumpe}$		0.14	0.18	0.29		0.06	0.06	0.1
COP_{ZirkWP}		2.92	2.92	2.93		2.92	2.92	2.92
COP_{BwwWP}		3.59	3.59	3.59		3.59	3.59	3.59
$E_{el,total}$		19.10	19.66	20.73		18.79	19.23	20.08
AZ_{Anlage}		2.90	2.82	2.66		2.95	2.88	2.75

L.5 Ladung via Nahwärmenetz

Kürzel	Beschreibung
T_{VL} [°C]	mittlere Vorlauftemperatur
$T_{\text{Wohnungsanschluss}}$ [°C]	mittlere Temperatur des Warmwassers am Wohnungsverteiler
T_{RL} [°C]	mittlere Zirkulationsrücklauftemperatur
E_{Zapfung} [kWh/m ³]	$= 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 4.18 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}} \cdot (T_{\text{Wohnungsanschluss}} - T_{\text{Kaltwasser}}) \cdot \frac{1\text{h}}{3600\text{s}}$, gezapfte Energie
E_{Schein} [kWh/m ³]	relativer Scheinverlust im Verteilnetz pro m ³ gezapftes BWW
E_{Speicher} [kWh/m ³]	relativer Wärmeverlust über die Speicherhülle
$E_{\text{el,Pumpe}}$ [kWh/m ³]	relative elektrische Aufnahmeenergie der Zirkulationspumpe
$\text{COP}_{\text{Heizung+BWW}}$ [-]	Leistungszahl der Wärmepumpe im kombinierten Betrieb
$E_{\text{WP,Heizung+BWW}}$ [kWh/m ³]	relative thermische Energieabgabe bei kombiniertem Betrieb (gewichtet)
$\text{COP}_{\text{Heizung}}$ [-]	Leistungszahl der Wärmepumpe bei reinem Heizbetrieb
$E_{\text{WP,Heizung}}$ [kWh/m ³]	relative thermische Energieabgabe bei reinem Heizbetrieb (gewichtet)
$E_{\text{el,total}}$ [kWh/m ³]	relative elektrische Aufnahmeenergie der Anlage
$\text{AZ}_{\text{Anlage}}$ [-]	Arbeitszahl der BWW-Anlage: $\text{AZ}_{\text{Anlage}} = E_{\text{Referenz}}/E_{\text{el,total}}$

L.5.1 Zwangsladung mit parallelem Betrieb der Raumheizung

Tabelle 88: Simulationsergebnisse für die Topologie H2W4

H2W4	spez. Wärmebedarf		
	10 W/m ²	35 W/m ²	70 W/m ²
T_{VL}	57.62	57.74	57.88
$T_{\text{Wohnungsanschluss}}$	56.28	56.44	56.56
T_{RL}	50.13	50.21	50.34
E_{Schein}	10.39	10.41	10.46
E_{Speicher}	4.53	4.47	4.52
E_{Zapfung}	53.75	53.84	54.02
$\text{COP}_{\text{Heizung+BWW}}$	3.26	3.66	3.50
$E_{\text{WP,Heizung+BWW}}$	162.02	421.14	885.92
$\text{COP}_{\text{Heizung}}$	6.08	5.75	4.53
$E_{\text{WP,Heizung}}$	89.14	349.15	814.30
$E_{\text{el,Pumpe}}$	0.34	0.34	0.34
$E_{\text{el,BWW}}$	32.15	42.21	48.05
$\text{AZ}_{\text{Anlage}}$	1.67	1.28	1.12

Tabelle 89: Simulationsergebnisse für die Topologie H4W12

H4W12	spez. Wärmebedarf		
	10 W/m ²	35 W/m ²	70 W/m ²
T _{VL}	57.83	57.96	57.94
T _{Wohnungsanschluss}	56.61	56.74	56.60
T _{RL}	50.62	50.74	50.68
E _{Schein}	8.10	8.13	8.12
E _{Speicher}	2.23	2.22	2.23
E _{Zapfung}	54.12	54.27	54.24
COP _{Heizung+BWW}	3.28	3.69	3.53
E _{WP,Heizung+BWW}	157.38	416.68	880.30
COP _{Heizung}	6.29	5.92	4.65
E _{WP,Heizung}	88.83	348.88	813.13
E _{el,Pumpe}	0.11	0.11	0.11
E_{el,BWW}	30.48	40.90	46.14
AZ_{Anlage}	1.78	1.33	1.18

Tabelle 90: Simulationsergebnisse für die Topologie H8W24

H8W24	spez. Wärmebedarf		
	10 W/m ²	35 W/m ²	70 W/m ²
T _{VL}	57.86	57.95	57.93
T _{Wohnungsanschluss}	56.60	56.68	56.33
T _{RL}	50.80	50.85	50.87
E _{Schein}	7.29	7.31	7.31
E _{Speicher}	1.50	1.49	1.49
E _{Zapfung}	54.08	54.18	54.20
COP _{Heizung+BWW}	3.18	3.54	3.41
E _{WP,Heizung+BWW}	154.22	413.66	877.37
COP _{Heizung}	6.34	6.03	4.7
E _{WP,Heizung}	88.64	348.50	812.56
E _{el,Pumpe}	0.06	0.06	0.06
E_{el,BWW}	31.20	46.27	55.46
AZ_{Anlage}	1.73	1.17	0.98

L.5.2 Zwangsladung ohne parallele Raumheizungsversorgung

Tabelle 91: Simulationsergebnisse für die Topologie H2W4

H2W4	spez. Wärmebedarf		
	10 W/m ²	35 W/m ²	70 W/m ²
T _{VL}	57.71	57.96	58.01
T _{Wohnungsanschluss}	56.31	56.60	56.72
T _{RL}	50.21	50.39	50.44
E _{Schein}	8.73	10.47	10.49
E _{Speicher}	3.74	4.44	4.42
E _{Zapfung}	53.79	54.09	54.23
COP _{Heizung+BWW}	3.59	4.09	3.81
E _{WP,Heizung+BWW}	161.83	422.17	886.86
COP _{Heizung}	6.08	5.75	4.53
E _{WP,Heizung}	89.14	349.15	814.30
E _{el,Pumpe}	0.34	0.34	0.34
E_{el,BWW}	27.02	29.51	28.82
AZ_{Anlage}	1.99	1.83	1.86

Tabelle 92: Simulationsergebnisse für die Topologie H4W12

H4W12	spez. Wärmebedarf		
	10 W/m ²	35 W/m ²	70 W/m ²
T _{VL}	58.03	58.14	58.36
T _{Wohnungsanschluss}	56.79	56.91	57.16
T _{RL}	50.79	50.84	51.02
E _{Schein}	8.14	8.15	8.21
E _{Speicher}	2.26	2.17	2.18
E _{Zapfung}	54.34	54.48	54.74
COP _{Heizung+BWW}	3.57	4.21	3.82
E _{WP,Heizung+BWW}	157.66	417.27	881.69
COP _{Heizung}	6.29	5.92	4.65
E _{WP,Heizung}	88.83	348.88	813.13
E _{el,Pumpe}	0.11	0.11	0.11
E_{el,BWW}	26.36	26.87	27.96
AZ_{Anlage}	2.06	2.03	1.96

Tabelle 93: Simulationsergebnisse für die Topologie H8W24

H8W24	spez. Wärmebedarf		
	10 W/m ²	35 W/m ²	70 W/m ²
T _{VL}	57.94	58.03	58.15
T _{Wohnungsanschluss}	56.72	56.81	56.91
T _{RL}	50.87	50.93	51.05
E _{Schein}	7.31	7.33	7.36
E _{Speicher}	1.51	1.49	1.48
E _{Zapfung}	54.20	54.32	54.44
COP _{Heizung+BWW}	3.56	4.21	3.88
E _{WP,Heizung+BWW}	154.42	414.53	878.84
COP _{Heizung}	6.34	6.03	4.7
E _{WP,Heizung}	88.64	348.50	812.56
E _{el,Pumpe}	0.06	0.06	0.06
E_{el,BWW}	25.51	26.93	26.32
AZ_{Anlage}	2.12	2.02	2.07

M Kalkulationsgrundlagen

Tabelle 94: Grundpreise für die Anlagenkalkulation

BWW-Speicher	Volumen [l]	Preis [CHF]
	400	1300
	500	2100
	640	2400
	800	2800
	960	8000
	1200	8500
	2000	10750
	2500	12600
	4000	14000
	5000	16000
	16000	46000
	20000	55000
BWW-WP	Heizleistung [kW]	
	1	6900
	2.5	7300
	4	7700
	6	8300
	10	9400
	18	11700
	40	18400
	160	63300
Zirk-WP modulierend		
	0.3	6700
	0.6	6800
	0.75	6800
	1	6900
	3.3	7500
	11.5	9800
Zirk-WP		
	0.3	5360
	0.6	5440
	0.75	5440
	1	5520
	3.3	6000
	11.5	7840
Zirk-Puffer	Volumen [l]	
	70	350
	150	600
	200	750
	300	1000
	850	2900
	3000	13000

Leitungen (inkl. Isolation)	Durchmesser	Preis [CHF/m]
	PEX 16	32
	CNS 15	40
	CNS 18	48
	CNS 22	58
	CNS 28	73
	CNS 35	110
	CNS 42	135
	CNS 54	171
	CNS 76.1	240
	CNS 88.9	280
Heizregister	Fläche [m ²]	Preis [CHF]
	1	530
	2.5	755
	4.5	1055
Strangreguliertventil	DN 15	250
Begleitheizung		30
Steuerung Begleitheizung		1000
Pumpe/Steuerung Zirkulation		1500