

Kurzfassung für Installateure und Planer

Warmwasserbereitstellung mittels Wärmepumpen in Mehrfamilienhäusern

Das Institut für Energiesysteme der Hochschule für Technik Buchs, NTB bearbeitete im Jahr 2011 das BFE-Projekt Warmwasserbereitstellung mittels Wärmepumpen in Mehrfamilienhäusern. Es wurden dabei computergestützte Simulationen und Feldmessungen durchgeführt, um verschiedene Systeme zu beurteilen.

Feldmessungen

In Feldmessungen wurden drei Anlagen mit Zirkulation messtechnisch untersucht. Die Objektgrösse reicht von 48 bis 73 Wohnungen. Die gemessenen Arbeitszahlen berücksichtigen alle Speicher- und Verteilverluste. Die Werte variieren sehr stark und erstrecken sich von 2.7 bei einem Minergie-P-Bau bis 1.4 bei einem sanierten, umgenutzten ehemaligen Industrieobjekt. Gemessen wurde während mindestens 4 Wochen pro Objekt. In der Tabelle 1 sind einige Ergebnisse zusammengefasst.

$$\text{Arbeitszahl} = \frac{\text{bezogene Wärmeenergie}}{\text{elektr. Energieaufnahme}}$$

Tabelle 1: Zusammenfassung der Messergebnisse (Wärmeverteilung mittels Zirkulation)

	Objekt 1	Objekt 2	Objekt 3
Anzahl Wohnungen	48	66	73
Anzahl Bewohner	97	128	k.A.
Anzahl Geschäfte	0	4	2
gemittelter Warmwasserbezug pro Tag	4285 l	4578 l	5179 l
gemittelter Warmwasserbezug pro Person	44.2 l/d	35.8 l/d	-
Spitzenbezug in 1 h	814 l	1085 l	1249 l
Spitzenbezug in 24 h	5718 l	8764 l	9257 l
Arbeitszahl der Anlage (ohne Hilfsenergie)	2.7	-	1.4

Objekt 3 weist eine sehr schlechte Arbeitszahl auf. Mehrere Faktoren tragen zu dieser niedrigen Anlageneffizienz bei:

- Grosses Verteilnetz, unter anderem weil einige Wohnungen teilweise mit zwei Steigzonen erschlossen sind.
- Kleine Spreizung (ca. 2.5 K) im Zirkulationskreis – sehr hoher Zirkulationsvolumenstrom.
- Speicherkonstruktion: Der 10 m³ Speicher ist kurze Zeit nach einer abgeschlossenen Ladung völlig durchmischt. Eine Temperaturschichtung kann sich nicht einstellen.

Simulationen

Unter Anwendung von Energiegleichungen und Erhaltungssätzen der Physik simulierte man die Effizienz von verschiedenen Systemen (Tabelle 2) in definierten Wohnbauten mit 8, 48 und 196 Wohnungen gemäss Abbildung 1. Mit der Simulation können identische Randbedingungen für jedes System garantiert werden.

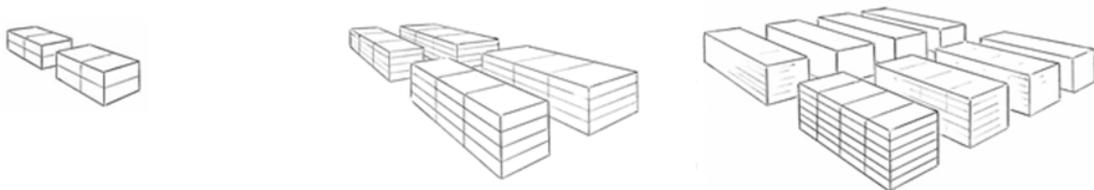
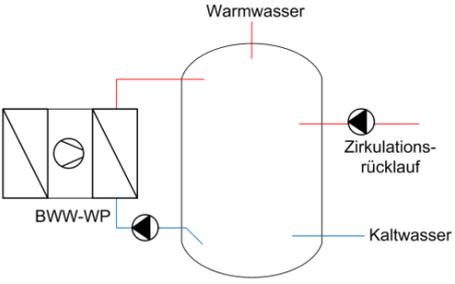
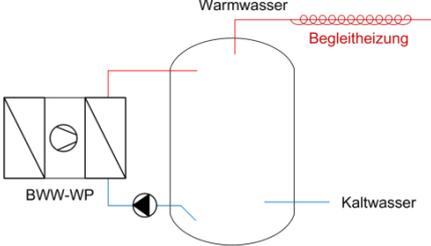


Abbildung 1: Virtuelle Wohnbauten für die Anwendung der Systemsimulation.

Im Folgenden werden die 4 untersuchten Systeme vorgestellt, sowie deren Vor- und Nachteile beschrieben.

Tabelle 2: Simulierte Systeme zur Warmwasserbereitstellung.

	1) BWW-Wärmepumpe und Zirkulation	2) BWW-Wärmepumpe und Warmhaltung mit direkt-elektrischer Begleitheizung
		
<u>Systembeschreibung</u>	<p>Warmes Wasser aus dem Speicherkopf zirkuliert kontinuierlich durch das gesamte Verteilnetz und erreicht jeden Wohnungsanschluss, bevor es in einer separaten Zirkulationsleitung in den Speicher rückgeführt wird. Es gibt somit kein stagnierendes Wasser im Verteilnetz. Die hygienische Anforderung von einer täglichen thermischen Desinfektion des BWW (Brauchwarmwasser) bei 60°C kann problemlos erfüllt werden.</p>	<p>Im Verteilnetz ist keine rückführende Zirkulationsleitung vorhanden. Stattdessen sind selbstregulierende, elektrische Heizbänder an allen Warmwasserleitungen angebracht, welche das stagnierende Wasser warm halten.</p>
<u>Vorteile/Nachteile</u>	<ul style="list-style-type: none"> + Der Warmhalteverlust wird durch die Wärmepumpe dem System effizient wieder zugeführt. + Kein stagnierendes Wasser im System. - Störung der Speicherschichtung mindert die Effizienz der Wärmepumpe: <ul style="list-style-type: none"> ▫ Vermischung von Kalt- und Warmwasser führt zu häufigeren Nachladungen. ▫ Temperatur des Kaltwassers im Speicher generell erhöht: Rücklauftemperatur zum Kondensator der Wärmepumpe somit erhöht – Minderung der Leistungszahl. - Speicher mit strömungsdämpfenden Einbauten unbedingt notwendig. - Festlegung des Zirkulationsvolumenstroms relativ sensibel. Beobachten der Anlage während der ersten Betriebsmonate empfehlenswert. - Doppelte Leitungsnetzgrösse durch die Rücklaufleitung. 	<ul style="list-style-type: none"> + Keine Störung der Wasserschichtung im Speicher. + Einfache und schlanke Bereitstellung von Warmwasser. + Relativ geringe Gesteigungs- und Installationskosten. + Geringe Fehleranfälligkeit bei der Auslegung. + Halbe Verteilnetzgrösse und somit geringere Wärmeverluste als mit Zirkulation. - Direkt-elektrischer Energieeinsatz - Erhöhte Empfindlichkeit gegenüber Dämmqualität: <ul style="list-style-type: none"> ▫ Lückenlos dämmen. ▫ Heizband immer unter der Isolation verlegen. - Erhöhte Empfindlichkeit gegenüber grossen Verteilungsnetzen. - Ersetzen des Heizbands bei Defekt schwierig (meist ist die Zugänglichkeit nicht mehr gegeben).
<u>Feststellungen/Tipps</u>	<p>Die Berechnung des Zirkulationsvolumenstroms nach Suissetec lässt den regelmässigen Warmwasserbezug in einem MFH unberücksichtigt. Der Bezug trägt jedoch auch zur Warmhaltung bei. Es wird empfohlen nach folgender Formel auszulegen.</p> $\dot{V}_{\text{Zirkulation}} \approx \frac{\dot{q}_{\text{Verlust}} \cdot l_{\text{Verteilnetz}}}{\rho_{\text{Wasser}} \cdot c_{p\text{Wasser}} \cdot \Delta T} \cdot 0.6$	<p>Das Warmhaltesystem mit Heizband hat in den Simulationen besser als erwartet abgeschnitten. Es ist rund 4 % weniger effizient als die herkömmliche Zirkulation und wesentlich einfacher in der Handhabung. In kleineren Gebäuden kann man das Heizband problemlos einsetzen, sofern man die Leitungen gut dämmt.</p>

$\dot{V}_{\text{Zirkulation}}$ Zirkulationsvolumenstrom $\left[\frac{\text{m}^3}{\text{s}}\right]$

ΔT Spreizung im Zirkulationskreis [K]

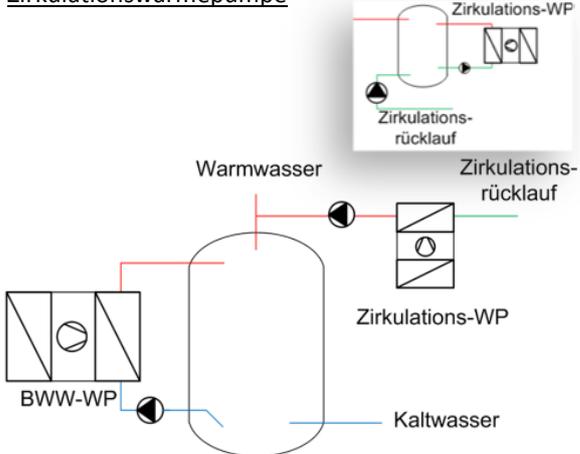
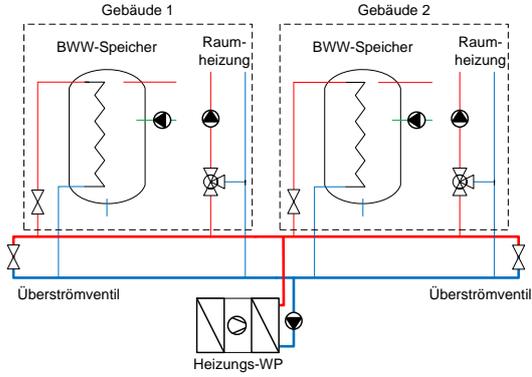
$l_{\text{Verteilnetz}}$ Rohrlänge vom Speicher bis zum äussersten Umkehrpunkt [m]

ρ_{Wasser} Dichte von Wasser $\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right]$

$c_{p\text{Wasser}}$ spez. Wärmekapazität von Wasser $\left[\frac{\text{J}}{\text{kg}\cdot\text{K}}\right]$

\dot{q}_{Verlust} mittlerer Wärmeverlust von Vor- und Rücklaufleitung nach Suisstec $\left[\frac{\text{W}}{\text{m}}\right]$

Tabelle 2: Simulierte Systeme zur Warmwasserbereitstellung (fortgesetzt).

	<p>3) BWW-Wärmepumpe mit Zirkulation und einer Zirkulationswärmepumpe</p> 	<p>4) Kombiniertes System: BWW-Speicherladung über das Nahwärmenetz</p> 
<p><u>Systembeschreibung</u></p>	<p>Der Zirkulationsrücklauf wird bei diesem System nicht in den Speicher geleitet, sondern durchströmt eine leistungsvariable Zirkulationswärmepumpe. Diese erwärmt das abgekühlte Brauchwarmwasser aus dem Verteilnetz, um es danach erneut der Vorlaufleitung zuzuführen. Eine Durchmischung des Speichers wird damit verhindert. Alternativ kann eine Zirkulationswärmepumpe mit konstanter Leistung verwendet werden. Um Takten zu vermindern, wird dann ein kleiner Zirkulationspufferspeicher benötigt (z.B. Wärmepumpenboiler).</p>	<p>Eine zentrale Wärmepumpe liefert die Energie für die Raumheizung der Gebäude über ein Nahwärmenetz. Bei Anforderung erfolgt eine Ladung der in den Gebäuden befindlichen BWW-Speichern. Diese Ladung erfolgt durch ein Hochfahren der Temperatur im gesamten Nahwärmenetz, um so das Brauchwarmwasser über die innenliegenden Wärmetauscher der BWW-Speicher zu erwärmen. Es wurden zwei Betriebsvarianten berechnet. Bei Variante 1 wird die Raumheizung parallel zur Speicherladung betrieben, während die Variante 2 die Raumheizung über die Ladedauer nicht mit Energie versorgt (bessere Effizienz).</p>
<p><u>Vorteile/Nachteile</u></p>	<ul style="list-style-type: none"> + Höchste Gesamteffizienz unter den untersuchten Systemen. + Speicherdurchmischung und die entsprechenden Effizienzeinbußen werden umgangen. + Die Warmhalteverluste werden durch die Zirkulationswärmepumpe effizient gedeckt. + Geringe Fehleranfälligkeit. - Quelle für die Zirkulationswärmepumpe muss erschlossen/erweitert werden. - Höchste Investitionskosten unter den betrachteten Systemen. - Dezidierte Zirkulationswärmepumpe nicht am Markt erhältlich. 	<ul style="list-style-type: none"> - Variante 1 verbraucht 2-mal so viel Energie wie eine separate Wärmepumpe mit Zirkulation. - Variante 2 stellt den Optimalfall eines solchen Systems dar, verbraucht aber dennoch 40 % mehr Energie als die separate Wärmepumpe mit Zirkulation. - In der Praxis werden sogar deutlich schlechtere Wirkungsgrade erwartet (Verteilnetzgröße, Wärmetauschergröße, etc.). - Pufferspeicher erhöhen den Energieverbrauch massiv. - Die Variante 2 verlangt eine signifikante Überdimensionierung der Wärmepumpe.
<p><u>Feststellungen/Tipps</u></p>	<p>Bei grossen Anlagen mit ausgedehntem Verteilnetz ist der Einsatz einer Zirkulationswärmepumpe zu empfehlen. Dies führt zu einer energetisch optimalen Lösung, bei der im Feld wenige Probleme in der Installation zu erwarten sind (das System ist tolerant gegenüber Reglereinstellungen).</p> <p>Die Effizienz der Wärmepumpe reagiert empfindlich auf hohe Temperaturniveaus. Es gilt daher, nur so viel Wärme auf hohem Temperaturniveau zu erzeugen, wie nötig. Daher sollten Systeme mit unterschiedlichen Temperaturniveaus (Heizung und Warmwasser) unbedingt getrennt bedient werden. Das kombinierte System ist für Wärmepumpen ungeeignet!</p>	

Zusammenfassung/Schlussfolgerungen

Abbildung 2 zeigt, dass die Zirkulation 17 % des elektrischen Energieaufwands für die Warmhaltung verbraucht. Die direkt-elektrische Begleitheizung beansprucht 27 % des gesamten elektrischen Energieverbrauchs. Die Zirkulationswärmepumpe benötigt zur Warmhaltung 20 % des Gesamtenergieverbrauchs. Das kombinierte System weist BWW-seitig geringe Verluste des Leitungsnetzes (5-7 %) auf, unter anderem weil ein wesentlicher Anteil dem Heizungsbetrieb zugewiesen werden darf. Der elektrische Mehrverbrauch zum Betrieb der Raumheizung bei höheren Vorlauftemperaturen bildet bei beiden Varianten den Löwenanteil unter den Verlusten.

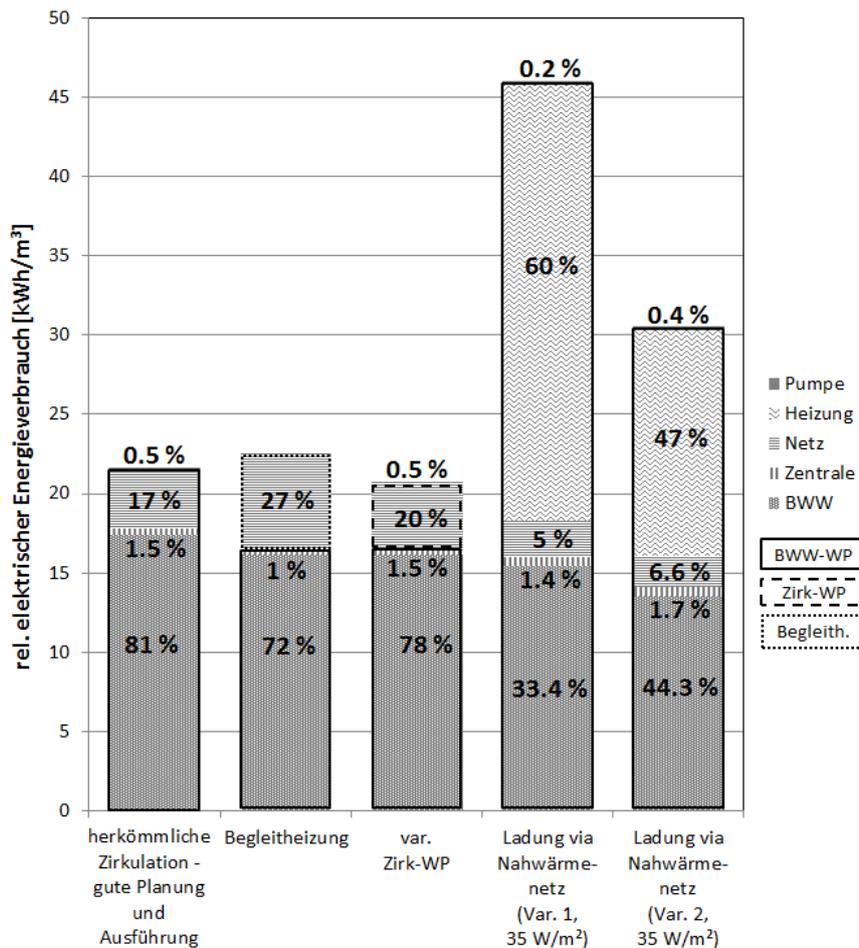


Abbildung 2: Zusammensetzung des elektrischen Energieverbrauchs für die untersuchten Systeme.

Grundsätzliches:

- Eine **kompakte Gebäudeanordnung** innerhalb einer Überbauung mit zentraler BWW-Versorgung ist aus energetischer Sicht von Vorteil.
- Die **Anzahl der Steigleitungen** sollte **möglichst klein gehalten** werden. Die Raumaufteilung der Wohneinheiten sollte entsprechend optimiert werden. Eine Steigzone kann mehrere nebeneinander liegende Wohnungen versorgen.
- In jedem Gebäude ein eigenständiges BWW-System zu betreiben ist energetisch effizienter als ein ganze Überbauung mit einem BWW-System zu versorgen. Der Effizienzunterschied liegt im Bereich von 2 % bei kompakten Überbauungen bis 15 % bei grossen Abständen zwischen den einzelnen Gebäuden.
- Ein verdoppeltes Leitungsnetz führt unter ansonsten gleichen Randbedingungen zu einer Reduktion der Arbeitszahl um 20 % bei Zirkulationssystemen, 25 % bei der Begleitheizung und 30 % bei kombinierten Systemen.
- Eine Reduktion der Dämmstärke von Leitungen (gemäss Definition im Bericht) schlägt sich in einer Minderung der Arbeitszahl von bis zu 15 % nieder.

Zirkulation:

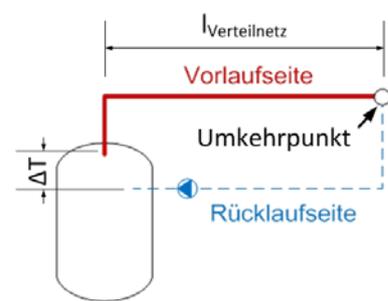
- Systeme mit Warmhaltung durch Zirkulation haben im Vergleich die grösste Effizienz. Sie verlangen jedoch eine **sehr sorgfältige Planung, Installation und Inbetriebnahme** – ansonsten liegt der Energiebedarf im Bereich von kombinierten Systemen.
- Eine **saubere Temperaturschichtung im Speicher** ist entscheidend für die gute Effizienz.
- Der Zirkulationsvolumenstrom ist in der Praxis meist sehr hoch eingestellt. Die Studie hat gezeigt, dass **eine Spreizung ΔT von 10 K im Zirkulationskreis durchaus zulässig und energetisch vorteilhaft** ist. Aus alten Normen und Merkblättern sind noch immer Spreizungen von 2-3 K in den Köpfen der Planer präsent. Diese wirken sich negativ auf das System aus.
- Die Berechnung des Zirkulationsvolumenstroms nach Suissetec berücksichtigt die Warmhaltung durch regelmässigen Warmwasserbezug nicht. Es wird empfohlen den erhaltenen **Volumenstromwert der Suissetec-Formel mit einem Faktor von 0.6 zu multiplizieren**.
- Regulierventile sind meist auf kleine Spreizungen voreingestellt (58/60°C). Werden die exemplarischen 58°C systematisch nicht erreicht, steht das Ventil ganz offen, was Speicher und Netz erfahrungsgemäss in kurzer Zeit auskühlt. **Um einen überhöhten Zirkulationsvolumenstrom zu verhindern, sind die Regulierventile auf den geplanten Wert einzustellen.**
- Mit einer Zirkulationswärmepumpe kann die Anlageneffizienz weiter optimiert werden.

Beispielrechnung

Wärmeverlust der Parallelrohranordnung nach Suissetec: $2.7 \text{ W/m} = 14 \text{ W/m}$
 Rohrlänge vom Speicher bis zum äussersten Umkehrpunkt: 200 m
 Gewünschte Temperaturspreizung: 10 K

$$\dot{V}_{\text{Zirk}} = \frac{\dot{q}_{\text{Verlust}} \cdot l_{\text{Verteilnetz}}}{\rho_{\text{Wasser}} \cdot c_{p\text{Wasser}} \cdot \Delta T} \cdot 0.6 = \frac{14 \frac{\text{W}}{\text{m}} \cdot 200 \text{ m}}{1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 4180 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot 10 \text{ K}} \cdot 0.6$$

$$= 0.00004 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} = 0.145 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$



Begleitheizung

- Anlagen mit elektrischem Heizband sind etwas weniger effizient als die Zirkulationssysteme. Jedoch ist **die Installation und Auslegung wesentlich einfacher**.
- In der Praxis zeichnet sich die elektrische Begleitheizung durch **geringe Fehleranfälligkeit bei der Installation** aus.
- Die **Warmwasseraustrittstemperatur muss über der Warmhaltetemperatur des Heizbands** liegen, um eine elektrische Nachheizung durch das Heizband im Verteilnetz zu verhindern.
- Das **Heizband muss unter sehr guter Isolation verlegt und lückenlos gedämmt werden**. Die Effizienz reagiert empfindlich auf schlechte Dämmung.

Kombinierte Systeme

- Die Anlagen schneiden in Simulation und Praxis sehr schlecht ab. Die Heizwärme wird während der BWW-Ladung auf hohem Temperaturniveau und mit einem entsprechend schlechteren COP bereitgestellt. Der daraus resultierende elektrische Mehraufwand muss dem BWW-System zugeschrieben werden.
- **Wärmeversorgungen mit unterschiedlichen Temperaturniveaus sollten jeweils mit separaten Systemen beliefert werden.**

Detaillierte Informationen zum Projekt sind in

Vetsch B., Gschwend A., Bertsch S., 2011, Warmwasserbereitstellung mittels Wärmepumpen in Mehrfamilienhäusern, BFE-Projekt Nr. SI/500574-01, Schlussbericht.

unter

<http://www.bfe.admin.ch/dokumentation/energieforschung/>

mit dem Stichwort „Warmwasserbereitstellung“ zu finden.

Projektpartner

Bundesamt für Energie BFE

Elektrizitätswerke des Kantons Zürich EKZ

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

Herzlichen Dank an alle Mitwirkenden und Mitglieder der Begleitgruppe bestehend aus Planern, Installateuren und Berater der Energiebranche.