

Kompakte, dezentrale Warmwasserbereitstellung aus Fortluft und Solarstrom (KoDeWa)

Compact domestic hot water preparation from exhaust air and solar power (KoDeWa)

Elias Büchel, Stefan Bertsch

elias.buechel@ntb.ch

Interstaatliche Hochschule für Technik Buchs (NTB)

<http://www.ntb.ch/ies.html>

Patrick Persdorf, Florian Rüschi

patrick.persdorf@spf.ch

Hochschule für Technik Rapperswil (HSR)

<http://www.spf.ch/>

Joel Bärtschi, Douglas Urena, Urs Muntwyler,
Roger Weber

joel.baertschi@bfh.ch

Berner Fachhochschule (BFH)

<http://www.bfh.ch>

Zusammenfassung

Résumé

Abstract

Das Unternehmen Swissframe AG produziert modulare, fertig bestückte Vorwandeinheiten für Badezimmer, welche die Renovation von Altbauten wesentlich vereinfacht und merklich beschleunigt. Diese Vorwandeinheit besitzt ein Komfortlüftungsgerät, welches die ganze Wohneinheit belüftet. Diese Vorwandeinheit wurde in Zusammenarbeit mit den Partnerhochschulen um einen dezentralen Warmwasserspeicher mit einer Hochleistungsvakuumisolation, um eine Kleinleistungswärmepumpe, sowie um eine intelligente Steuerung erweitert. Mit diesen Erweiterungen wurde das Ziel verfolgt den Eigenstromverbrauch der Wohneinheit sowie die Gesamteffizienz zu optimieren, indem der produzierte Solarstrom über die Wärmepumpe dem Warmwasserspeicher zugeführt wird. Dabei wird die restliche Energie der Fortluft, welche nicht bereits durch die Lüftung zurückgewonnen wurde, durch die Wärmepumpe zurückgewonnen, aufgewertet und an den Warmwasserspeicher abgegeben. Durch diese Erweiterungen kann der passive Energieverlust (Fortluft und Warmwasserverteilnetz) der Wohneinheit stark verringert werden. Die Nebenkosten der Wohneinheiten können einfach nach dem Verursacherprinzip abgerechnet werden. Die Vorwandeinheit wurde erfolgreich zum Patent angemeldet.

Swissframe AG produces modular, fully equipped front-wall installations for bathrooms. These facilitate and accelerate the renovation process of accommodations. The front-wall installation consists of a waste heat recovery system for ventilation of the complete housing unit. During the project the front-wall installation was extended with a decentralized boiler with a high tech isolation, a small heat pump and an intelligent control. With these modifications, the aim is to increase the energy efficiency and own consumption of the accommodation by using solar electricity to heat the boiler with the heat pump. The remaining energy in the exhaust air, which has not been recovered by the ventilation system, is recovered by the heat pump and upgraded to be delivered to the hot water boiler. Based on these new components the front-wall installation is able to severely reduce the passive energy loss (exhaust air and hot-water reticulation) of the accommodation. A patent application for the front-wall installation has been successfully filed.

1. Ausgangslage – Contexte – Scope

Bei einer konventionellen Badezimmer Renovierung baut der Sanitärmeister zunächst eine Vorwand aus Aluminiumprofilen auf. In dieser Vorwand werden alle Sanitäranlagen sowie Strom und gegebenenfalls die Lüftung für das Badezimmer untergebracht. Um diese Vorwand aufzubauen, werden verschiedene Techniker wie, Lüftungs-, Elektro- und Sanitärmeister, benötigt. Im weiteren Verlauf der Renovation muss diese Vorwand mit Gipsplatten verkleidet werden und im Anschluss entweder verputzt sowie bemalt oder mit Fliesen bewohnbar gemacht werden. Erst im Anschluss an diese Arbeiten können Badutensilien wie Toilette, Spiegelschrank, etc. fertig montiert werden. Eine solche Renovation ist sehr zeitaufwändig, da die Arbeiten der Techniker aufeinander abgestimmt sein müssen und meist erst mit dem nächsten Arbeitsschritt begonnen werden kann, wenn gewisse Arbeiten zuvor abgeschlossen worden sind.

Das Unternehmen Swissframe AG bietet für genau diese Renovation eine Komplettlösung an, die als modulares System aufgebaut ist. Dieses System kann der Sanitärmeister alleine installieren, da dieses bereits komplett vorkonfektioniert ist. Für den Wohnungsinhaber bedeutet dies eine enorme Zeit- und Kostenersparnis.

Dieser Vorwandaufbau soll in dem aktuell laufenden KTI-Projekt energetisch auf den neuesten Stand der Technik gebracht und der dafür zur Verfügung stehende Raum optimal genutzt werden.

1.1 Verbesserungspotentiale in der energetischen Sanierung von Badezimmern.

Energiebedarf und Energieverluste:

Aus der Energiestatistik des Bundesamts für Energie aus dem Jahr 2014 [1] geht hervor, dass 14.9% des Endenergieverbrauchs der Haushalte für die Bereitstellung von Warmwasser benötigt wird. Dieses Warmwasser wurde überwiegend mit zentralen Heizsystemen generiert. Das so produzierte Warmwasser muss mittels Wärmenetzen im Gebäude zu den Wohnungen verteilt werden. Durch schlecht isolierte und lange Wärmenetze im Gebäude geht eine grosse Menge der produzierten Energie des Warmwassers ungebraucht an die Umgebung verloren. Gemäss Vetsch et al. [4] werden zwischen 20 und 65% der Energie im Warmwasser für die Bereitstellung bei korrekt dimensionierten und gut ausgeführten Anlagen benötigt.

Auch die Be- und Entlüftung der Wohnung konsumiert einen Grossteil der Heizenergie. Ohne Wärmerückgewinnung seitens der Lüftung wird dabei kontinuierlich Wärme aus dem Gebäude geleitet.

Eigenverbrauch:

Besonders bei der Photovoltaik besteht das Problem mit der Zeitdiskrepanz zwischen der Energieproduktion und dem Energieverbrauch. Sofern der produzierte Solarstrom nicht gleichzeitig verbraucht und / oder gespeichert wird, muss diese Energie ins lokale Stromnetz eingespeist werden, nur um dieselbe Energie am Abend wieder vom Stromnetz zu beziehen.

Das Potential besteht hier in der Optimierung des Eigenstromverbrauchs unter Nutzung des thermischen Speichers als Energiespeicher.

Verursacherprinzip:

In Mehrfamilienhäusern besteht zudem das Problem der Abrechnung der bezogenen Energiemengen für Warmwasser und Heizung. Sofern nicht jede Wohneinheit über einen separaten Energiezähler verfügt, können die Nebenkosten nicht exakt nach dem Verursacherprinzip abgerechnet werden. Diese Zähler verursachen jedoch hohe Investitionskosten und Unterhaltsaufwand. Ziel sollte daher sein den Strom als einzige externe Energiequelle zu verwenden.

Mit der Vorwandeinheit-THERMOS und den neuen Komponenten, welche die Vorwandeinheit erweitern, sollen diese Verbesserungspotentiale aktiv genutzt, die Energieverluste deutlich reduziert, der Eigenverbrauch merklich erhöht sowie die Nebenkostenabrechnung erleichtert und einfacher gemacht werden.

2. Vorgehen – Méthode – Methods

Die drei Partnerhochschulen, NTB, HSR und BFH sowie der Industriepartner Swissframe, entwickelten je nach ihren jeweiligen Disziplinen die Einzelkomponenten der neuen Vorwandeinheit. Dabei entwickelte die NTB die Kleinleistungswärmepumpe, die HSR den Speicher und dessen Hochleistungsisolation, die BFH die Steuerung und die Swissframe AG den Gesamtaufbau und den Rahmen der neuen Vorwandeinheit-THERMOS.

2.1 Aufgabe und Funktion der Einzelkomponenten

Lüftung:

Das Komfortlüftungsgerät saugt die verbrauchte, feuchte Luft aus dem Badezimmer über die Toilette ab. Bei grösseren Renovationen in der Wohnung können zusätzliche Absaugstellen in der Wohnung eingerichtet werden, sodass beispielsweise auch die verbrauchte Luft aus der Küche abgezogen werden kann. Das Komfortlüftungsgerät besitzt einen internen Enthalpietauscher (Kreuzstromwärmetauscher). Durch diesen Enthalpietauscher strömen sowohl die frische Aussenluft als auch die verbrauchte Abluft aus der Wohnung. Dabei wird die Energie aus der Abluft zurückgewonnen, um mit dieser Energie die Frischluft aufzuwärmen. Gleichzeitig wird die überschüssige Feuchte aus der Abluft abgezogen und an die Zuluft abgegeben, um ein möglichst optimales Raumklima zu erzielen.

Ein integrierter Luftvorwärmer in der Frischluft sichert den Komfort in den kalten Tagen des Jahres.

Schema:

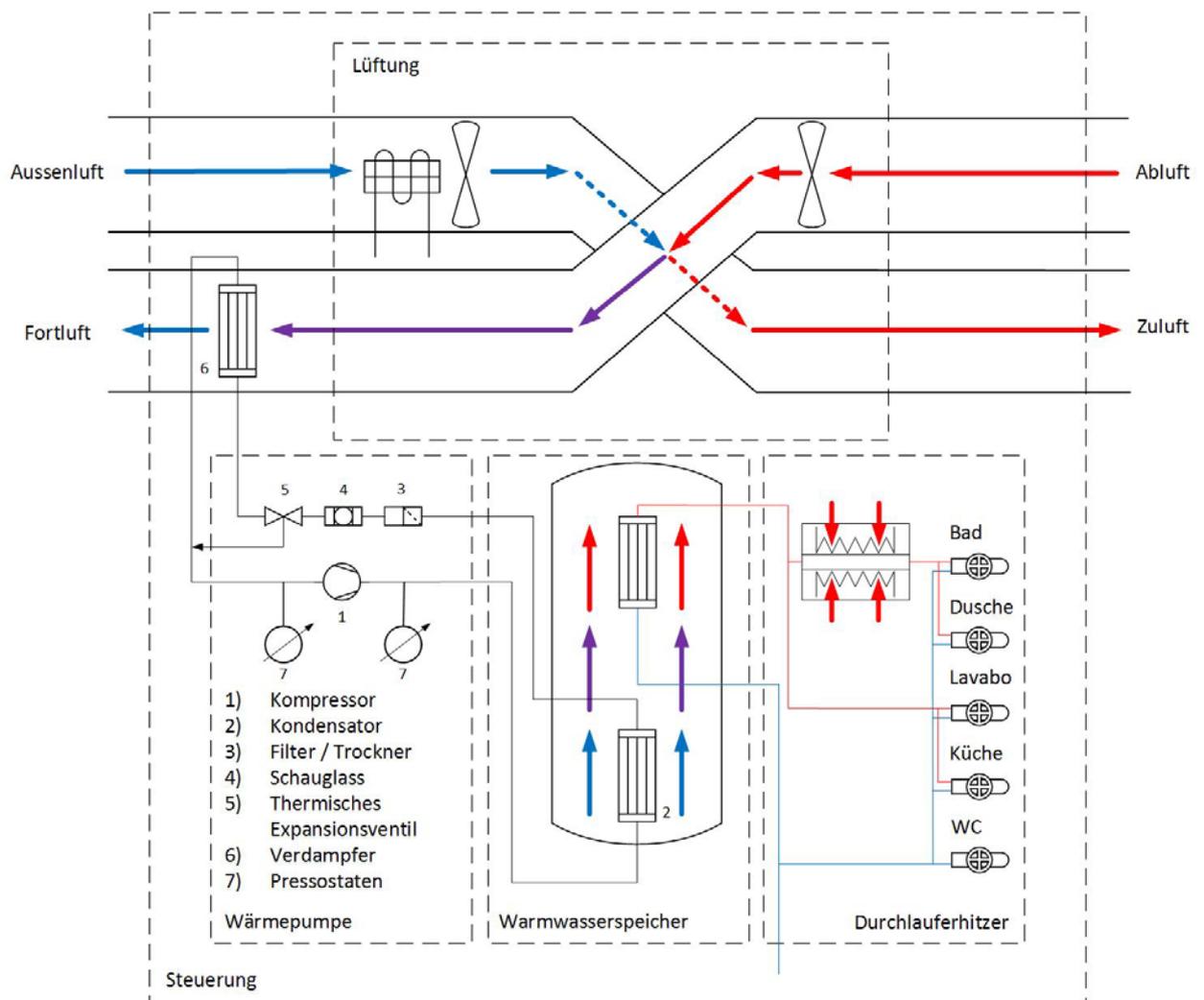


Abbildung 1 Übersichtsschema Vorwandeinheit-THERMOS (KTI-Projekt KoDeWa)

Wärmepumpe:

Der Verdampfer der Wärmepumpe wird im Fortluftkanal des Komfortlüftungsgeräts platziert. Dieser befindet sich somit nach dem Enthalpietauscher des Komfortlüftungsgeräts im Fortluftstrom. Das Kältemittel wird in diesem verdampft und entzieht der Fortluft dabei die restliche noch verbleibende Energie. Nach dem Verdampfer liegt die Lufttemperatur der Fortluft, welche die Wohnung verlässt, geringfügig über oder unter der Umgebungstemperatur der Aussenluft. Für die Wärmerückgewinnung ist die feuchte Abluft aus dem Badezimmer für den Verdampfer besonders hilfreich. Die Wärmepumpe führt die produzierte Wärme über einen innenliegenden Kondensator im Speicher an das Speichermedium ab, welches ohne Elektroeinsatz auf 40°C – 60°C gehalten werden kann.

Speicher:

Im drucklosen Warmwasserspeicher sind zwei Wärmetauscher untergebracht. Zum einen der Kondensator der Wärmepumpe, welcher den Speicher mit Energie versorgt und zum anderen der Frischwasserwärmetauscher, in dem das frische, kalte Wasser aus der Zuleitung im drucklosen Speicher auf 60°C aufgewärmt wird. Aufgrund der geringen Platzverhältnisse ist der Speicher rechteckig und wird mit Vakuumpanelen (VIP) gegen die Umgebung isoliert.

Durchlauferhitzer:

Das Warmwasser für die Dusche und die Badewanne wird vor der Entnahme an der Armatur zusätzlich durch einen Durchlauferhitzer geführt (Abbildung 1). Der Durchlauferhitzer wird nur bei grosser Wasserentnahme aktiv und stellt sicher, dass das Wasser der Dusche oder der Badewanne immer warm ist. Dies ist erst bei mehreren, kurz aufeinander folgenden Duschvorgängen der Fall. Mit dieser Massnahme wird sichergestellt, dass der Komfort selbst bei einem Ausfall der Lüftung oder der Wärmepumpe erhalten bleibt.

Die restlichen Armaturen werden nicht über den Durchlauferhitzer warmgehalten. Sie dienen als Indikator für einen allfälligen Defekt im System.

Steuerung:

Die Steuerung überwacht sämtliche Komponenten der Vorwandeinheit mit verschiedenen Sensoren. Sie steuert die Warmwasserproduktion und greift je nach Bedarf in die Protokolle der Lüftung ein. Die Steuerung stellt zudem sicher, dass im Winter der Verdampfer möglichst lange eisfrei bleibt, damit die Wärmepumpe möglichst lange in Betrieb bleiben kann, was deren Lebensdauer und die Effizienz erhöht. Im Falle der Eisbildung leitet die Steuerung automatisch den Abtauvorgang ein. Wird über längere Zeit kein warmes Wasser bezogen, so stellt die Steuerung sicher, dass die Wärmepumpe das Speichermedium kontinuierlich auf 60°C erwärmt, um die Bildung von Legionellen zu unterbinden. Durch diese Massnahme wird der geringe Energieverlust des Speichers über die Isolation ebenfalls ausgeglichen.

Montage und Aufbau:

Die Installation der Vorwandeinheit soll mit maximal zwei Installateuren möglich sein. Damit dies möglich ist, dürfen die zumutbaren Lastgrenzen der SUVA von 25kg pro Person nicht überschritten werden. Aus diesem Grund wird die Vorwandeinheit in zwei Module aufgeteilt.

Die Wärmepumpe verbindet über den Kältekreislauf die Lüftung mit dem Warmwasserspeicher. Da die Vorwandeinheit modular aufgebaut ist, müssen die Lüftung, die Wärmepumpe und der Warmwasserspeicher im selben Modul unterbracht sein, da der Kältekreislauf nach der Montage der Wärmepumpe nicht mehr geöffnet werden kann. Da alle neuen Komponenten zwangsläufig in einem Modul untergebracht sein müssen, stellte die Lastgrenze für dieses Modul eine besondere Herausforderung dar.

2.2 Kleinleistungswärmepumpe (NTB)

Das Kernstück der neuen Vorwandeinheit ist die Kleinleistungswärmepumpe. Die Herausforderungen bei der Entwicklung und Auslegung der Wärmepumpe bestanden darin einen geeigneten Kompressor für diese Anwendung zu finden und mit dem geringen, zur Verfügung stehenden Platz auszukommen, was nicht nur die Wahl der Wärmetauscher stark beeinflusste. Die Auslegung der Wärmepumpe erfolgte mit EES (Engineering Equation Solver 2015). Dabei wurde die Lüftung zusammen mit der Wärmepumpe in verschiedenen Arbeitspunkten simuliert. Bei der Auslegung und Optimierung der Wärmepumpe wurde besonders auf die Effizienz, die Lebensdauer und die vom Industriepartner geforderten maximalen Abmessungen, geachtet.

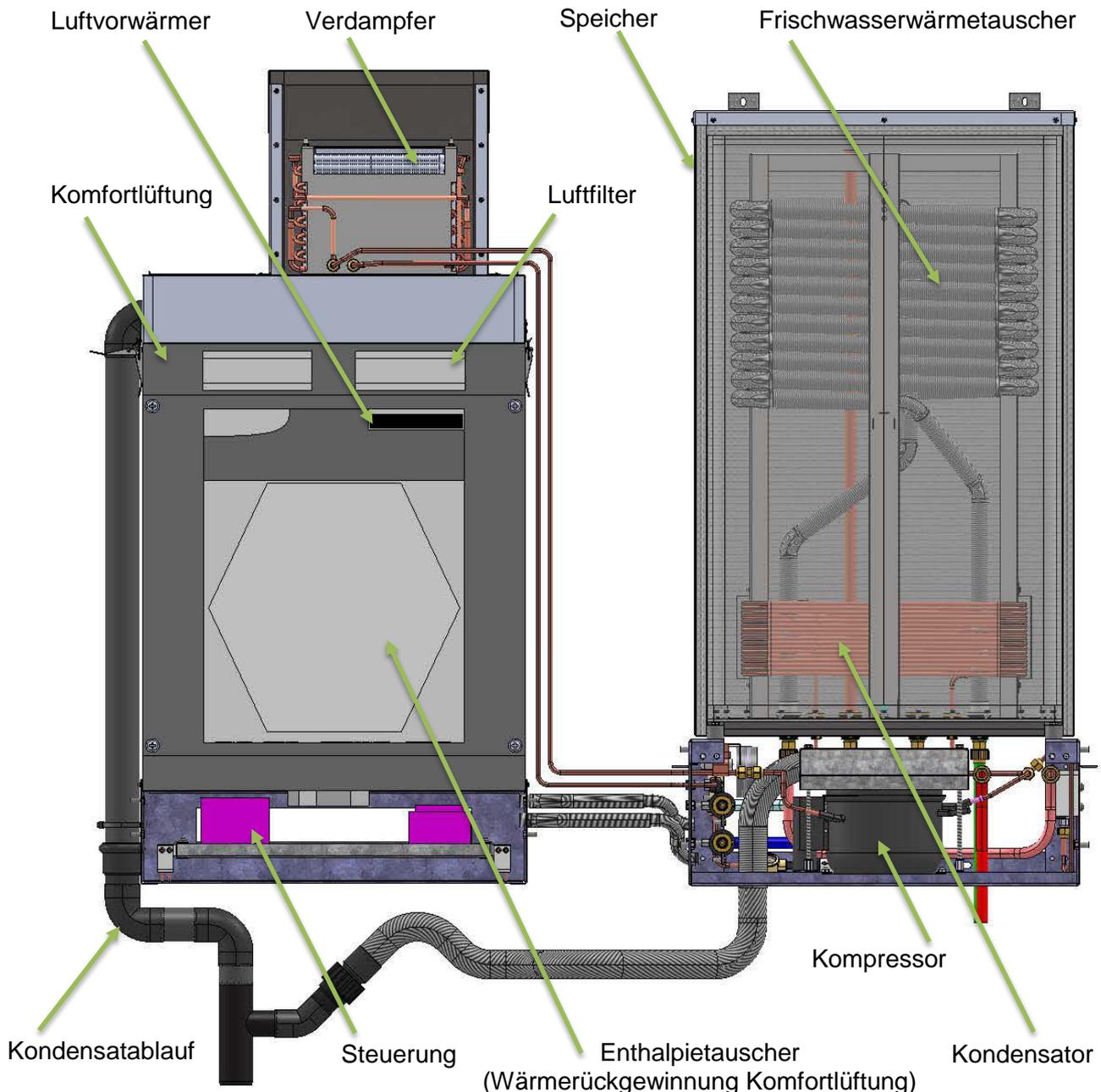


Abbildung 2 Neue Komponenten in der Vorwandeinheit-THERMOS (Oberes Modul Swissframe AG)

Verdampfer:

Im Gegensatz zum Kondensator, der im Speicher mit nahezu beliebiger Grösse platziert werden kann, benötigt der Verdampfer zusätzlichen Raum in der Vorwandeinheit. Zur effizienten Rückgewinnung der Energie aus der Fortluft ist eine grosse Verdampferoberfläche entscheidend. Dies erhöht jedoch den Druckverlust im Fortluftkanal und ist platzmässig nur schwer machbar.

Durch den Entzug der Energie aus der Fortluft kühlt diese stark und führt zur Kondensation von Wasser. Ein genügend grosser Lamellenabstand vergrössert die Zeitspanne zwischen den Abtauintervallen und fördert das Abtropfverhalten. Aufgrund der Simulationsergebnisse wurden zwei Lamellen-Wärmetauscher mit einer Gesamtoberfläche von 1.5m^2 und einem Lamellenabstand von 4mm im Fortluftkanal verbaut.

Kompressor:

Die maximal mögliche Wärmeleistung der Kleinleistungswärmepumpe wird massgeblich durch die verbleibende Restenergie in der Fortluft im Winter bestimmt. Die erzielbare Leistung fällt genau in einen Bereich, in dem es nur wenig geeignete Kompressoren gibt. Kühltischkompressoren haben zu geringe Leistungen, um den Wärmebedarf einer Wohnung eines Tages zu decken. Die nächst grösseren Kompressoren sind meist erst ab einem Leistungsbereich von 1kW erhältlich. Mit einem solchen Kompressor würde der Fortluft so viel Energie entzogen werden, dass der Verdampfer selbst im Sommer dauernd einfrieren würde, was die Effizienz der Wärmeaufbereitung drastisch reduziert. Erschwert wird die Auswahl des Kompressors durch den grossen Temperaturhub von 65-70K, welchen die Wärmepumpe am Ende der Ladezeit des Warmwasserspeichers erreichen muss, um den Schutz vor Legionellen zu gewährleisten. Nach einer Evaluation verschiedener Kompressoren wurde der Kompressor TL4GH von Secop als der geeignetste Kandidat identifiziert. Dieser besitzt nicht nur eine gute Effizienz bei geringen Abmassen und einer einfachen Ansteuerung sondern ist zudem auch noch besonders geräuscharm, sodass dieser für den Einbau in bewohnten Bereichen besonders prädestiniert ist.

Abtauen:

Ziel des Projektes ist es, möglichst wenig Energie zu verschwenden. Der Einsatz einer elektrischen Heizung, um das Vereisen des Verdampfers hinauszuzögern und um das Abtauen zu erleichtern, ist deshalb nicht zielführend. Aus diesem Grund wird für die Wärmepumpe eine passive Abtaustrategie verfolgt. Sollte durch die Sensoren der Steuerung eine Eisbildung detektiert werden, so wird die Wärmepumpe nach einer fest eingestellten Laufzeit ausgeschaltet. Damit wird der Wärmeentzug aus der Fortluft durch die Wärmepumpe unterbunden. Die warme Fortluft strömt weiterhin über den Verdampfer und taut diesen dadurch ab. Die Zeit für den Unterbruch der Wärmepumpe wurde so ausgewählt, dass der Verdampfer sicher abgetaut wird und sämtliches Kondensat abperlen kann. Damit wird sichergestellt, dass das Kondensat nicht sofort wieder festfriert, wenn die Wärmepumpe von neuem ihren Betrieb aufnimmt.

2.3 Dezentraler Warmwasserspeicher mit Hochleistungsisolation (SPF)

Bei der Integration eines Warmwasserspeichers in die Vorwandeinheit galt es verschiedene Herausforderungen zu meistern. Besonders die Konstruktion des Speichers stellte dabei eine grosse Herausforderung dar.

Speichergeometrie und Material:

Zum einen muss auf Grund der geringen Wandtiefe von nur 30 cm auf eine kubische anstelle einer zylindrischen Speicherform gesetzt werden, um möglichst viel Speichervolumen zu erhalten. Zum anderen muss zur Gewichtsoptimierung ein leichtes Konstruktionsmaterial eingesetzt werden. Die Wahl fiel dabei auf den Werkstoff Polypropylen. Form und Material reduzieren die Druckstabilität stark und lassen daher nur einen drucklosen Speicher zu. Selbst der statische Druck, durch das Wasser mit einer Füllhöhe von 80 cm, führt zu grossen Spannungen in der Speicherhülle. Durch FEM Berechnungen in ANSYS wurde eine Geometrie ermittelt, die mit Hilfe von Verstärkungen (Sicken) die Steifigkeit verbessert und die Deformation der Speicherwand stark reduziert.

Hochleistungsvakuumisolation:

Da in der Vorwand nur wenig Platz für Speicher und Isolation zur Verfügung steht, muss die Isolation möglichst dünn ausgeführt sein. Die Wärmeverlustgrenzwerte nach SIA 385/1 müssen dabei trotz allem eingehalten werden. Um dies realisieren zu können, wird eine Hochleistungs-Vakuumisolation eingesetzt. Vakuumisolationspaneele (VIP) sind mit einem Lambda-Wert von $0.005\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ bis zu zehn Mal leistungsfähiger als herkömmliche Wärmedämmungen. Die Aussenhülle der VIP besteht aus einer Alu-Polypropylen Folie, welche gegenüber dem unter Vakuum stehenden Kernmaterial eine deutlich höhere Wärmeleitfähigkeit aufweist. Durch das

Zusammenbringen von zwei VIP's entstehen Wärmebrücken an den Stößen, welche die Wärme besonders gut aus dem Speicher ziehen können. Wie stark diese Wärmebrücken ins Gewicht fallen und bis zu welcher Wandstärke die Isolation reduziert werden kann wurde zunächst mit der Simulationssoftware QuickField berechnet. Verschiedene Isolationskombinationen von VIP und konventioneller Wärmedämmung wurden bei gleichen Randbedingungen simuliert. Zur Validierung der Simulationsergebnisse wurden Auskühlmessungen an einem Speicherprototypen mit einer Auswahl der Isolationskombinationen durchgeführt. Mit den Messergebnissen wurde die Speicherisolation festgelegt, wodurch auch das genaue Speichervolumen definiert ist.

2.4 Intelligente Steuerung (BFH)

Die Steuerung überwacht die Einzelkomponenten der Vorwandeinheit. Sie regelt die Speichertemperatur und schützt das System vor Eigenstörungen. Das Hauptelement ist eine speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) der Firma Siemens der Familie S7-1200. Die Herausforderungen bei der Auslegung dieser Systemkomponente lagen beim Anforderungsmanagement und bei der Steuerungsstrategie der Wärmepumpe.

Evaluation:

Als Gehirn der Anlage muss die Steuerung eine Vielzahl von Anforderungen erfüllen. Sowohl hardwaremässig als auch von Seiten der Software muss die Steuerung erweiterbar, langlebig, platzsparend und nicht zuletzt preisgünstig sein. Um den sich laufend ändernden Bedürfnissen der Projektpartner und deren Subsysteme gerecht zu werden, wurde ein gewichteter Kriterienkatalog erarbeitet.

Die so gewählte Siemens Steuerung wird im industriellen Automatisierungsbereich eingesetzt und bietet ausreichend Robustheit und Langlebigkeit. Mit einer mittleren Ausfallrate (MTBF) von 25 Jahren reiht sie sich gut in das Sanitärssystem ein, dessen Wartung auf ein Minimum zu beschränken ist. Mit einem Echtzeit Linux Betriebssystem ist die SPS flexibler programmierbar als parametrisierbare Steuerungen, was sich in der Testphase beim Prototyp auszahlte.

Regelstrategie:

Für eine Reihe von sich widersprechenden Anforderungen wurde durch verschiedene Tests und Optimierungen am Prototyp die geeignetste Regelstrategie entwickelt.

Um Energie zu sparen und um unnötige Energieverluste zu verringern, lässt die Steuerung den Speicher nur dann aufheizen, wenn dies tatsächlich nötig ist. Um den Komfort des Kunden nicht unnötig einzuschränken und um die Entstehung von Legionellen zu unterbinden wird der Speicher regelmässig trotz allem auf 60°C erwärmt.

Bei lang anhaltenden Kälteperioden beugt die Steuerung ein Vereisen des Verdampfers durch einen kurzzeitigen Eingriff in die Lüftung vor. Bei etwaigen Schäden an der Anlage, beispielsweise durch Alterung gegen Ende der geplanten Laufzeit, schützt die Steuerung heikle Komponenten vor Totalschaden. Die Herausforderung bestand weiter darin, die Überwachung mit nur wenigen Zusatzkomponenten zu ermöglichen, da sich diese nicht nur in den Produktionskosten niederschlagen sondern ihrerseits weitere potentielle Fehlerquellen darstellen.

Mit der Siemens Entwicklungsumgebung „TIA-Portal“ wurden solche Spezialfälle simuliert und die Reaktion der Software geprüft.

3. Resultate – Résultats – Results

3.1 Warmwassererzeugung

Seit Januar 2016 werden am THERMOS-Prototyp Messungen durchgeführt. Seit diesem Zeitpunkt produziert das System zwischen 100 – 200 Liter Warmwasser pro Tag. Diese Tests sollen das Verhalten und die Funktionen der einzelnen Komponenten und deren Zusammenspiel im Gesamtsystem in der Praxis verifizieren. Diese Zeit wird genutzt, um die Steuerung genau auf das System abzustimmen und weiter zu optimieren. Insgesamt werden 26 verschiedene Parameter, wie Temperaturen, Wasserströme, Drücke oder elektrische Energieverbräuche, im Minutentakt, bei Wasserbezug sogar im Sekundentakt, festgehalten und laufend ausgewertet.

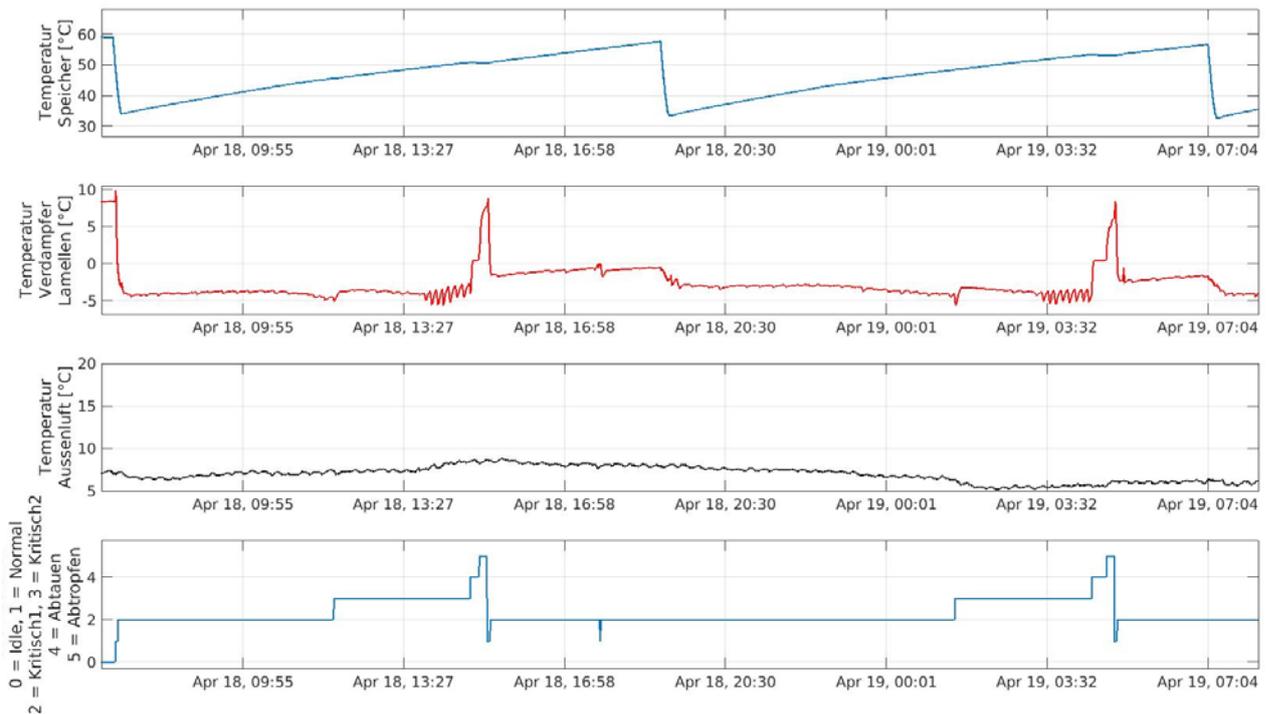


Abbildung 3 Darstellung der wichtigsten Einflussfaktoren für die THERMOS-Vorwandeinheit. (Messung vom 18. und 19. April 2016 → 24h)

In Abbildung 3 sind die wichtigsten Einflussfaktoren, Aussenlufttemperatur und die Temperatur der Verdampferlamellen, die Speichertemperatur, und der jeweilige Status der Steuerung abgebildet.

Die oberste Grafik in Abbildung 3 zeigt den Temperaturverlauf im Warmwasserspeicher. Der Warmwasserspeicher fasst bei den gegebenen Dimensionen ein Gesamtvolumen von 100 Litern. Aus dem Kurvenverlauf kann man entnehmen, dass während der Messperiode von einem Tag drei mal 40 Liter Warmwasser innert kürzester Zeit bezogen wurde und die Wärmepumpe trotzdem in der Lage ist dieses Volumen wieder von 35°C auf 60°C aufzuwärmen. Während dieser Messung produzierte die Wärmepumpe demnach 20.91 MJ also knapp 5.8 kWh thermische Energie aus der restlichen noch verbleibenden Energie der Fortluft.

In der zweiten Grafik kann man erkennen wie die Eisbildung am Verdampfer vonstattengeht und wie die Steuerung auf diese reagiert. Sinkt die Verdampfungstemperatur unter 0°C kann sich bei anfallendem Kondensat Eis auf den Lamellenflächen bilden. Die Steuerung versucht dem entgegen zu wirken indem sie den Volumenstrom der Lüftung erhöht (Eingriff in die Lüftungsprotokolle) und wechselt dabei vom normalen in den ersten kritischen Zustand. Durch den erhöhten Volumenstrom steht der Wärmepumpe mehr Energie zur Verfügung. Damit lässt sich die Verdampfungstemperatur des Kältemittels wieder etwas anheben.

Bildet sich trotz dieser Massnahme Eis auf den Lamellen des Verdampfers beginnt die Verdampfungstemperatur allmählich abzusinken. Sinkt die Verdampfungstemperatur unter -5°C so wechselt die Steuerung in den zweiten kritischen Zustand und erhöht den Volumenstrom der Lüftung ein weiteres Mal, auf die höchste Stufe. Es ist zu erkennen, dass trotz dieser Massnahme die Eisbildung nicht verhindert werden kann, was zum Abschalten der Wärmepumpe führt. Die Verdampfungstemperatur steigt sprunghaft an und verhartet so lange bei 0°C, bis alles Eis wieder geschmolzen ist. Während das geschmolzene Wasser vom Verdampfer abtropft, ist ein erneuter Temperatursprung zu erkennen. Wenn alles Wasser sicher abgetropft ist und die Temperatur des Warmwassers noch nicht 60°C erreicht hat, startet die Steuerung die Wärmepumpe von neuem.

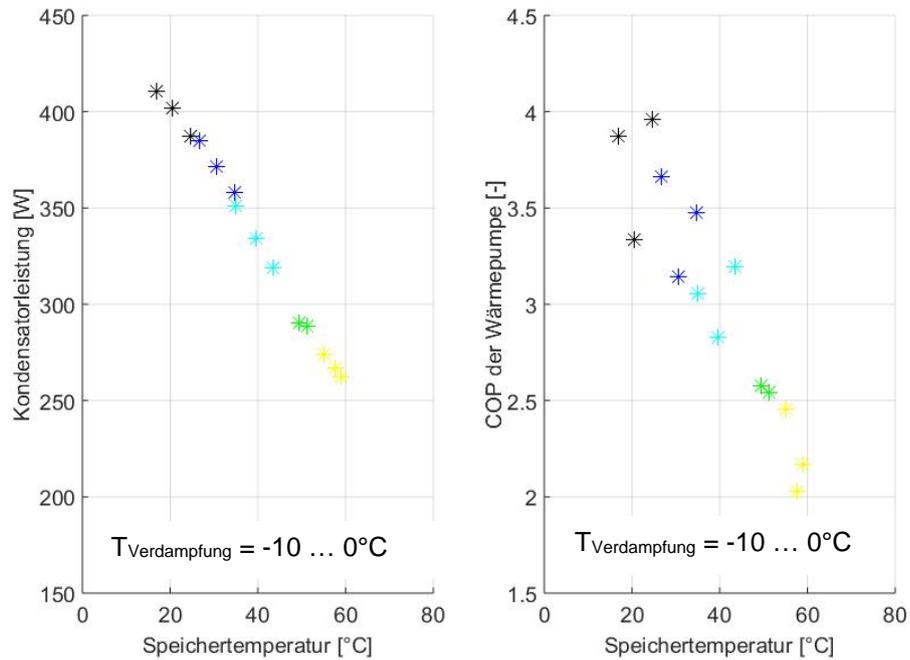


Abbildung 4 Verlauf der Kondensationsleistung und des COP's der Wärmepumpe bei zunehmender Speichertemperatur bei Verdampfungstemperaturen zwischen -10°C und 0°C (Winter).

Abbildung 4 zeigt den Verlauf der Kondensationsleistung der Wärmepumpe im Winter bei kalten Aussenlufttemperaturen. Wenn der Speicher zu Beginn kalt ist, ist die Leistung der Wärmepumpe grösser, da wesentlich mehr Energie vom Kältekreislauf an das Speichermedium abgegeben werden kann als bei warmen Speicher. Die Leistung der Wärmepumpe bewegt sich im Winter zwischen 200W und 450W. Der COP der Wärmepumpe nimmt ebenfalls mit zunehmender Speichertemperatur von ca. 4 auf 2 ab, weil der Temperaturabstand zwischen Verdampfung und Kondensation des Kältemittels ansteigt. Der elektrische Aufwand (Anschlussleistung) des Kompressors bleibt über den gesamten Temperaturbereich des Speichers in etwa konstant. Die Effizienz der Warmwasserproduktion nimmt somit mit zunehmender Speichertemperatur ab.

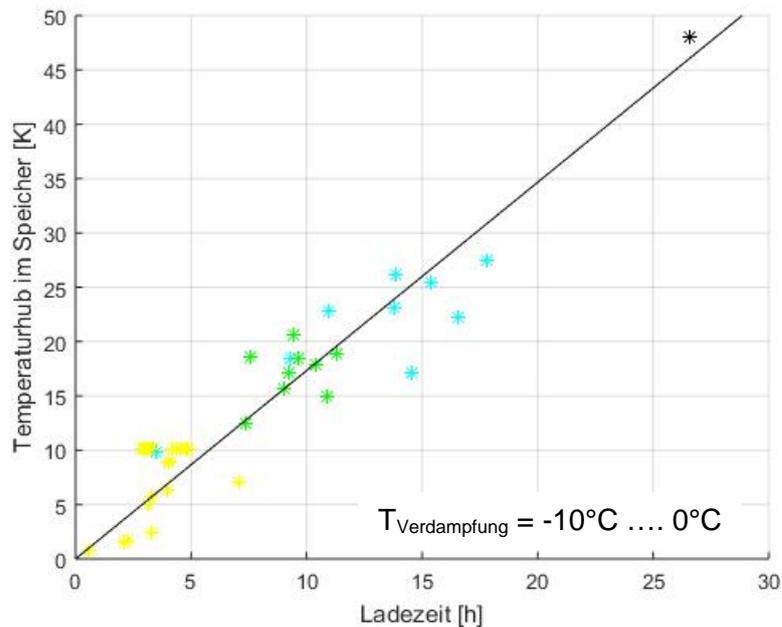


Abbildung 5 Temperaturhub des Speichermediums in Abhängigkeit der Ladezeit (Laufzeit der Wärmepumpe) bei Verdampfungstemperaturen zwischen -10°C und 0°C (Winter).

Abbildung 5 zeigt die benötigten Laufzeiten der Wärmepumpe, um die Temperatur im Speicher um ein gewisses ΔT anzuheben. Durchschnittlich kann die Wärmepumpe das Speichermedium während einer Laufzeit von 6 Stunden von 10K erwärmen. Anders gesagt, schafft es die Wärmepumpe auch im Winter, einen komplett kalten Speicher innerhalb eines Tages (gleiche Temperatur im Speicher wie Umgebungstemperatur = 20°C) auf die von der SIA geforderten 60°C aufzuwärmen.

3.2 Warmwasserspeicher, Frischwasserwärmetauscher und Durchlauferhitzer

Um den passiven Energieverlust des Warmwassers möglichst gering zu halten schreibt die SIA 385/1 für Warmwasserspeicher Grenzwerte vor. Diese Beschreiben wie viel Energie ein Speicher über einen Tag maximal verlieren darf. Aufgrund des relativ grossen Temperaturunterschieds zwischen Speicherwasser und Umgebungsluft kann der Verlustwärmestrom ohne Isolation grössere Dimensionen annehmen. Dieser Grenzwert ist in Abbildung 6 dargestellt, zusammen mit einigen verschiedenen möglichen Wärmeisolationen.

Um möglichst wenig Energie beim THERMOS-Speicher zu verlieren wurde bei der Auswahl der Isolation der vorgegebene, strengere Zielwert der SIA angestrebt. Bei den Messungen wurde der Boden des Warmwasserspeichers mit einer 40mm dicken, konventionellen Isolation versehen, da ansonsten wegen der vielen Anschlüsse und ständigen Umbauten, bzw. Anpassungen die Funktionalität der Hochleistungsvakuumisolation (VIP) nicht gegeben gewesen wäre. Abbildung 6 zeigt, dass bei allen Isolationsvarianten für den Speicher der Grenzwert der SIA eingehalten werden kann. Beim aktuellen Prototyp wird eine 15mm dicke VIP-Isolation eingesetzt. Die Dicke der Isolation wird im weiteren Verlauf des Projekts dem definitiven Speicher angepasst. Im Anschluss sollen Messungen durchgeführt werden, um den definitiven Energieverlust des Speichers in der Praxis ermitteln zu können. Die Angaben in Abbildung 6 beruhen auf Messungen, welche unter Laborbedingungen durchgeführt wurden.

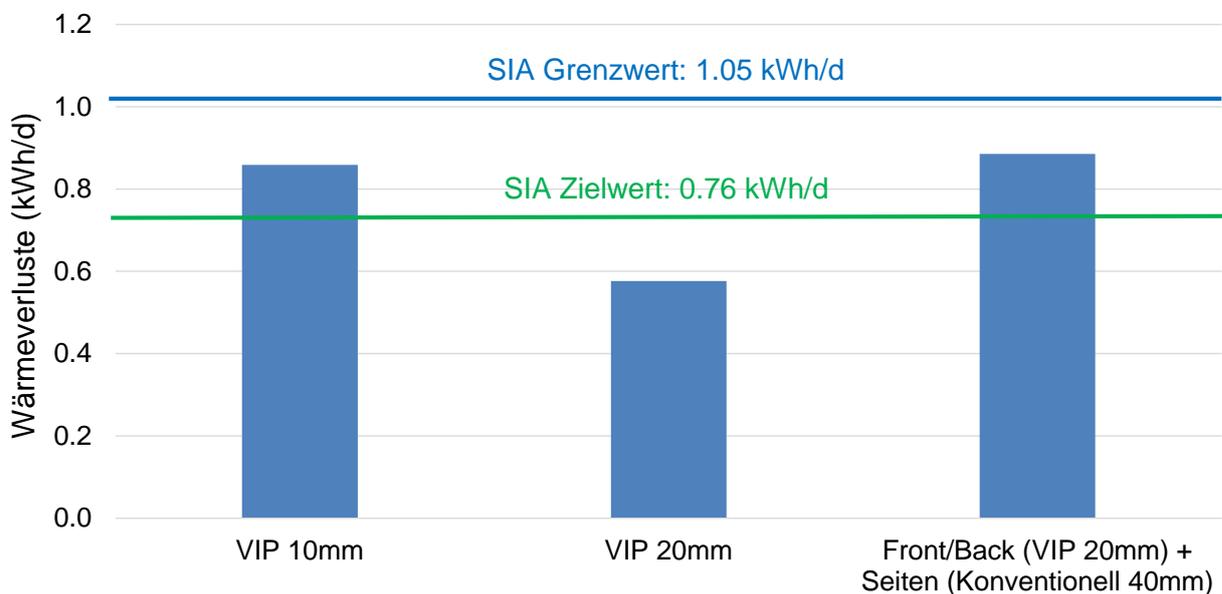


Abbildung 6 Täglicher Wärmeverlust bei einer Temperaturdifferenz von 45 K zwischen Speicherfluid und Umgebungsluft bei verschiedenen Isolationen.

Besonders im Badezimmer ist der Komfort für den Kunden von besonderer Bedeutung. Genauso stark wie sich die Menschen voneinander unterscheiden so unterschiedlich sind auch deren Bade-, bzw. Duschgewohnheiten. Um möglichst vielen Bedürfnissen gerecht werden zu können, muss die Evaluation des Frischwasserwärmetauschers sorgfältig durchgeführt werden.

Abbildung 7 zeigt verschiedene Variationen von Frischwasserwärmetauschern und deren Auswirkungen auf die benötigten Energien bei unterschiedlichen Duschzeiten. Thermische Energie bezeichnet dabei die Entzugswärme bei den Zapfungen. Als elektrische Energie wird hingegen jener Energieanteil bezeichnet, welcher durch den Durchlauferhitzer dem Frischwasser zugeführt werden muss, um die Wassertemperatur an der Armatur auf konstant 40°C halten zu können. Als Wärmetauscher kommt ein Edelstahlwellrohr zum Einsatz. Bei den Messungen im Labor wurde nicht nur dessen Querschnitt sondern auch dessen Länge variiert, um die optimale Dimension für diesen Wärmetauscher ermitteln zu können.

Die Übertragungsleistung des Frischwasserwärmetauschers im Speicher hat einen direkten Einfluss auf die Austrittstemperatur des Warmwassers aus dem Speicher und somit auf die Einsatzzeiten des nachgeschalteten Durchlauferhitzers.

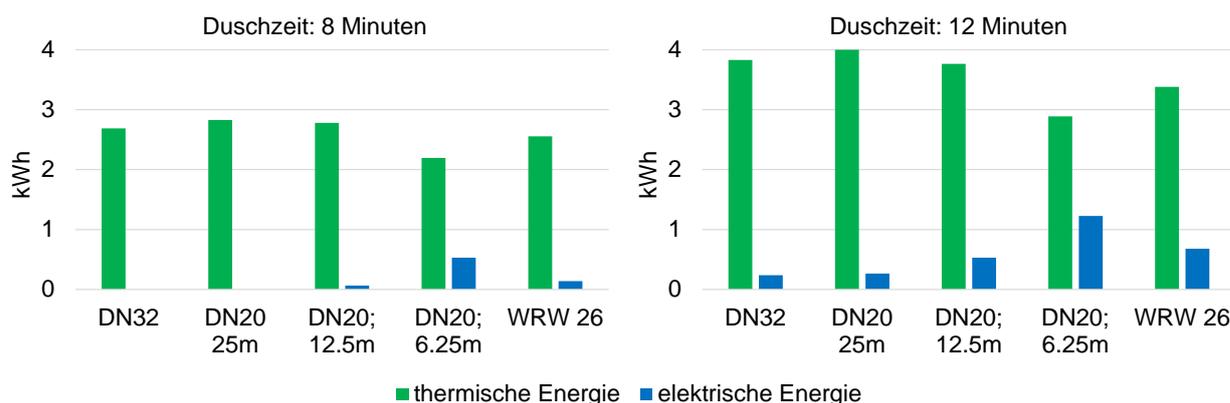


Abbildung 7 Thermischer und elektrischer Energiebezug für eine Duschzeit von 8 bzw. 12 min.

Tabelle 1 Wassertemperaturen und Volumenstrom im Vergleich passend zu Abbildung 7

	Ausgangstemperatur	Nach 8min Duschzeit (WRW26 ... DN32)	Nach 12min Duschzeit (WRW26 ... DN32)
Frischwasser:	10°C	10°C	10°C
Heisswasser:	60°C	27°C – 43°C	23°C – 29°C
Duschwasser:	40°C	40°C	40°C

Volumenstrom:	Bei den Messungen werden durchgehend entweder 10 Liter oder 20 Liter / Minute Duschwasser ab der Armatur bezogen. (600 – 1200 l/h)
---------------	--

Aus Abbildung 7 wird ersichtlich, dass bei der Verwendung eines Edelstahlwellrohrs mit einer grossen Oberfläche, wie dies beim DN32 mit 15m oder beim DN20 mit 25m der Fall ist, die Duschtemperaturen erst nach 8 Minuten unter die gewünschte Solltemperatur von 40°C fallen. Während dieser Zeit kann das Duschwasser rein durch das Mischen von heissem Wasser aus dem Speicher und kaltem Frischwasser generiert werden.

Wird der Wärmetauscher aus einem DN20 Rohr aufgebaut, erreicht dieser selbst mit der halben Länge von 12.5m immer noch eine Duschzeit von 6 Minuten ohne dass der Durchlauferhitzer zusätzliche Wärme zuführen muss. Wird das DN20 Wellenrohr noch einmal auf 6.25 m halbiert, so muss der Durchlauferhitzer bereits nach 1:16 min zusätzliche Wärme bereitstellen.

Dass dem Frischwasser bereits nach 8, bzw. 12 Minuten durch den Durchlauferhitzer weitere Energie zugeführt werden muss, bedeutet nicht, dass der Warmwasserspeicher nach dieser Duschzeit bereits auf 40°C ausgekühlt ist. Der Frischwasseranteil im Wärmetauscher ist wesentlich geringer als die Wassermenge im Wärmespeicher und reicht wie bereits erwähnt für einen Duschvorgang. Dieses Frischwasser ist zu Beginn auf 60°C. Während des Duschens, wird das warme Wasser im Frischwasserwärmetauscher langsam durch kaltes nachfliessendes Wasser ersetzt. Sobald die Temperatur im Frischwasserwärmetauscher geringer ist als die Temperatur des

umgebenden Speichermediums beginnt die Wärme vom Speicher an den Wärmetauscher abzufließen. Dieser Wärmestrom reicht jedoch nicht aus, um das Wasser auf 40°C zu halten. Aus diesem Grund und aus Komfortgründen muss der Durchlauferhitzer dem Frischwasser Energie zuführen.

Im aktuellen Prototyp wird aufgrund der Evaluation ein Wärmetauscher DN20 12.5m eingesetzt. Damit kann eine Duschzeit von 8 Minuten realisiert werden, ohne dass der Durchlauferhitzer zu viel Wärme zusteuern muss.

3.3 Vergleich unterschiedlicher Speichersysteme

Abbildung 8 zeigt eine vereinfachte Jahresrechnung verschiedener Speichersysteme. Um diese Abbildung zu erstellen wurde der COP der Wärmepumpe mit den Speicherverluste gemäss den Erfahrungswerten von Primas und Vetsch et al. [2, 3, 4] verrechnet. Bei einem konventionellen Wärmespeicher bedeutet dies ein Energieverlust von 2W/K. Beim THERMOS-Speicher wurde ein Verlust von 0.2W/K, auf Grundlage der Simulationsergebnisse und der geringeren Aussenmasse des Speichers, angenommen.

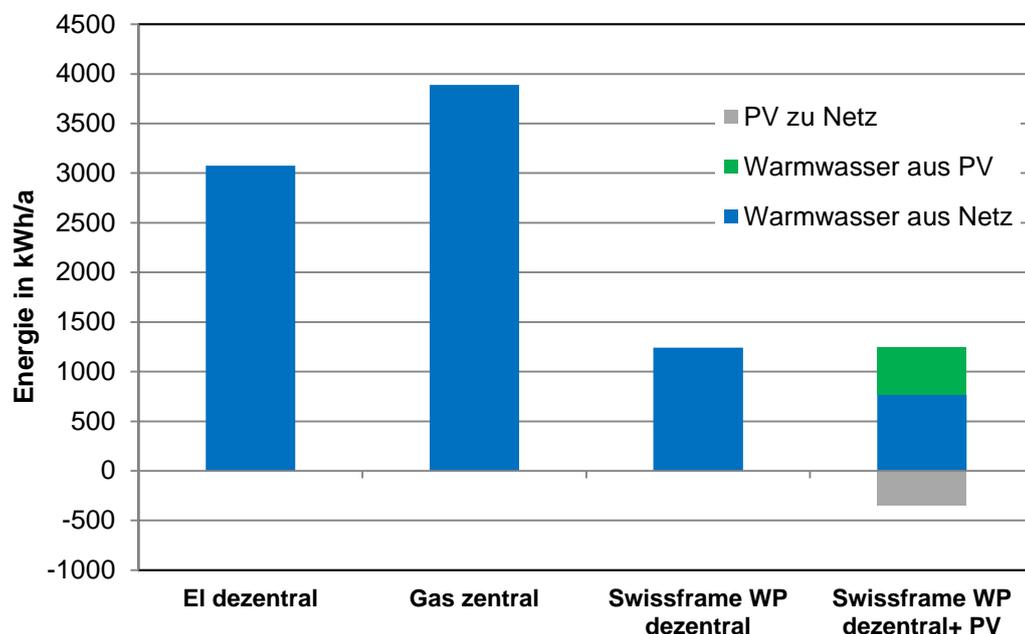


Abbildung 8 Vergleich verschiedener Wärmeherzeugung- und Speichersysteme im Vergleich zur Vorwandeinheit THERMOS von Swissframe AG auf Basis eines Dreipersonenhaushalts.

Der Vergleich zwischen den beiden dezentralen Speicherlösungen (Elektrisch und Wärmepumpe) zeigt anschaulich welchen Einfluss die Wärmepumpe auf die Warmwasserproduktion hat. Mit dem angestrebten COP von 3.0 der Wärmepumpe lässt sich der benötigte elektrische Energieaufwand um zwei Drittel verringern, um dieselbe Menge Warmwasser zu erzeugen. Der Vergleich der dezentralen mit dem zentralen Speichersystem (Elektrisch und Gas) verdeutlicht weiter wie viel Energie aufgrund des Wärmenetzes über das Jahr ungenutzt verloren geht.

Die Vorwandeinheit-THERMOS kann auch ohne Photovoltaikanlage angewandt werden. Abbildung 8 zeigt dass mit Verwendung des Photovoltaikstroms zur Erzeugung von Warmwasser der Bedarf an elektrischer Energie (bezogen vom Netz) nochmals um 500 kWh pro Jahr gesenkt werden kann. Zudem kann der überschüssige produzierte Strom (ca. 350 kWh pro Jahr) eingespeist werden. Die effektiven Stromkosten für die Warmwasserproduktion werden damit auf ein Minimum reduziert. Die PV-Anlage besitzt bei dieser Annahme eine Nennleistung von 750 W pro Wohnung.

Abbildung 9 zeigt die Warmwasserproduktion einer Vorwandeinheit aus unterschiedlichen Energiequellen während eines Monats.

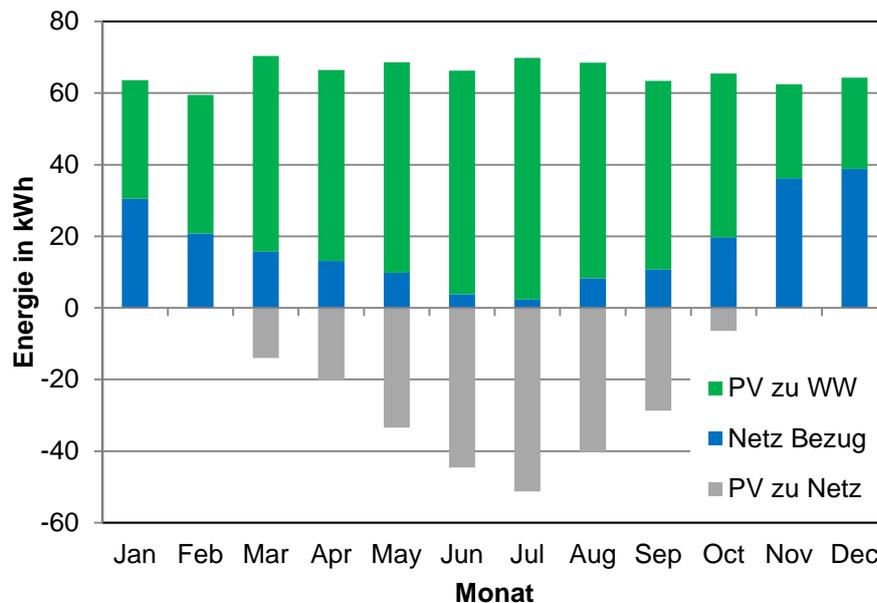


Abbildung 9 Prognostizierter Energiebezug der THERMOS-Vorwandeinheit mit Photovoltaikanlage

Bei dieser Abschätzung werden 100 Liter Speichermedium von 45 auf 60°C erwärmt. Die verwendeten Daten für den Energieanteil der Photovoltaik stammen aus einer Wetterstation im Raum Zürich. Der Kompressor der Wärmepumpe benötigt eine Anschlussleistung von 200–250W.

4. Diskussion – Discussion – Discussion

Bei Warmwassersystemen steht der Komfort für den Kunden an oberster Stelle. Grosse Gebäude wie Mehrfamilienhäuser haben in der Regel zentrale Warmwasserspeicher mit langen Warmwasserverteilnetzen und entsprechenden Warmhaltungsmethoden.

Primas und Vetsch et al. [2, 3, 4] beschreiben in ihren Publikationen anschaulich, dass die Wärmeverluste aufgrund zentraler Wärmespeichersysteme sowie deren Verteilungsnetze in der Praxis 50 – 60%, in extremen Fällen bis zu 100%, des gesamten Brauchwarmwasser-Wärmebedarfs ausmachen können. Dies sind schweizweit nach Energiestatistik [1] immerhin 3.2 PJ oder 888 Millionen kWh. Durch das zirkulierende Wasser kann sich im Speicher auch keine Schichtung einstellen, was die Energieeffizienz weiter vermindert. Bei dezentralen Warmwasserspeichern ist der Warmwasserverbrauch zudem pro Person im Schnitt zwischen 10 – 15 Liter geringer (Energiestatistik [1]).

Durch die Vorwandeinheit-THERMOS und den darin enthaltenen dezentralen Speicher entfallen diese Verteilverluste. Selbst die geringe Energie, welche über die VIP-Isolation des Speichers an die Umgebung abfließt, geht im Winter nicht ungenutzt verloren. Durch den Frischwasserwärmetauscher im Speicher entsteht im Speichermedium selbst nur eine geringe Strömung aufgrund des vom Kondensator aufsteigenden Warmwassers, wodurch sich im Speicher eine gute Schichtung einstellen kann. Heute ist es bereits Standard, dass jede Wohnung einen eigenen Strom- und Kaltwasserzähler besitzt. Da das Warmwasser bei der Vorwandeinheit-THERMOS dezentral, nach diesen Zählern produziert wird, kann die Nebenkostenabrechnung einfacher und nach dem Verursacherprinzip abgerechnet werden. Sprich jeder Mieter zahlt effektiv nur noch für jenes Warmwasser, welches er auch effektiv verbraucht.

Bei der Entwicklung der THERMOS-Vorwandeinheit wird die erfolgreiche und zielgerichtete Zusammenarbeit der Partnerhochschulen, NTB, HSR und BFH mit dem Industriepartner Swissframe ersichtlich. Trotz des Zusammentreffens vieler unterschiedlicher Disziplinen konnte die Idee des Industriepartners innert eines Jahres zum ersten Prototyp und bis hin zum Serienprodukt weiterentwickelt werden. Durch das systematische Analysieren der Verbesserungspotentiale und deren gezielte Nutzung hat die Vorwandeinheit-THERMOS das Potential zu einem langlebigen und erfolgreichen Produkt.

5. Ausblick – Perspectives – Perspectives

Aktuell wird im Rahmen einer Bachelorarbeit die Form des definitiven Speichers für die Vorwandeinheit-THERMOS entwickelt. Dabei werden zurzeit letzte FEM-Simulationen zur Steifigkeit der Speicherform durchgeführt. Durch diese Simulationen soll der Druck, welcher durch das Wasser auf die Behälterwand ausgeübt wird, so verteilt werden, dass sich der Speicher so wenig wie möglich ausbeult. Die Minderung der Steifigkeit des Polypropylens wurde für einen Zeithorizont von 30 Jahre in den Berechnungen über das Kriechmodul bei 60°C abgeschätzt. Neben verschiedenen Geometrien wurden auch die benötigte Wandstärke und der Einsatz von Metallverstärkungen in den Sicken untersucht. Durch diese Massnahme kann nicht zuletzt die Hochleistungsvakuumisolation besser am Speicher angebracht werden, was die Wärmeverluste, im Vergleich zum aktuellen Prototyp, weiter reduziert. Parallel zu dieser Weiterentwicklung wird die Steuerung mit Hilfe des ersten Prototypen weiter optimiert.

Um die tatsächliche Effizienz und das wahre Verhalten der Vorwandeinheit-THERMOS zu ermitteln, wird zurzeit ein grösserer Feldtest im Rahmen eines P&D-Projekts vorbereitet. Dabei sollen in Bern in einem Mehrfamilienhaus 25 Wohnungen mit dieser Vorwandeinheit ausgerüstet werden. Geplant ist, dass diese Einheiten über mehrere Jahre ausgemessen werden. Diese Vorwandeinheiten werden durch den Industriepartner selbst erstellt, um den Produktionsprozess zu verbessern. Dabei wird der Industriepartner von den Partnerhochschulen weiterhin begleitet, um allfällige Fehler in der Produktion sofort zu erkennen und zu beheben, sodass die Vorwandeinheit auch in der folgenden Serie eine hohe Effizienz und Zuverlässigkeit erreicht.

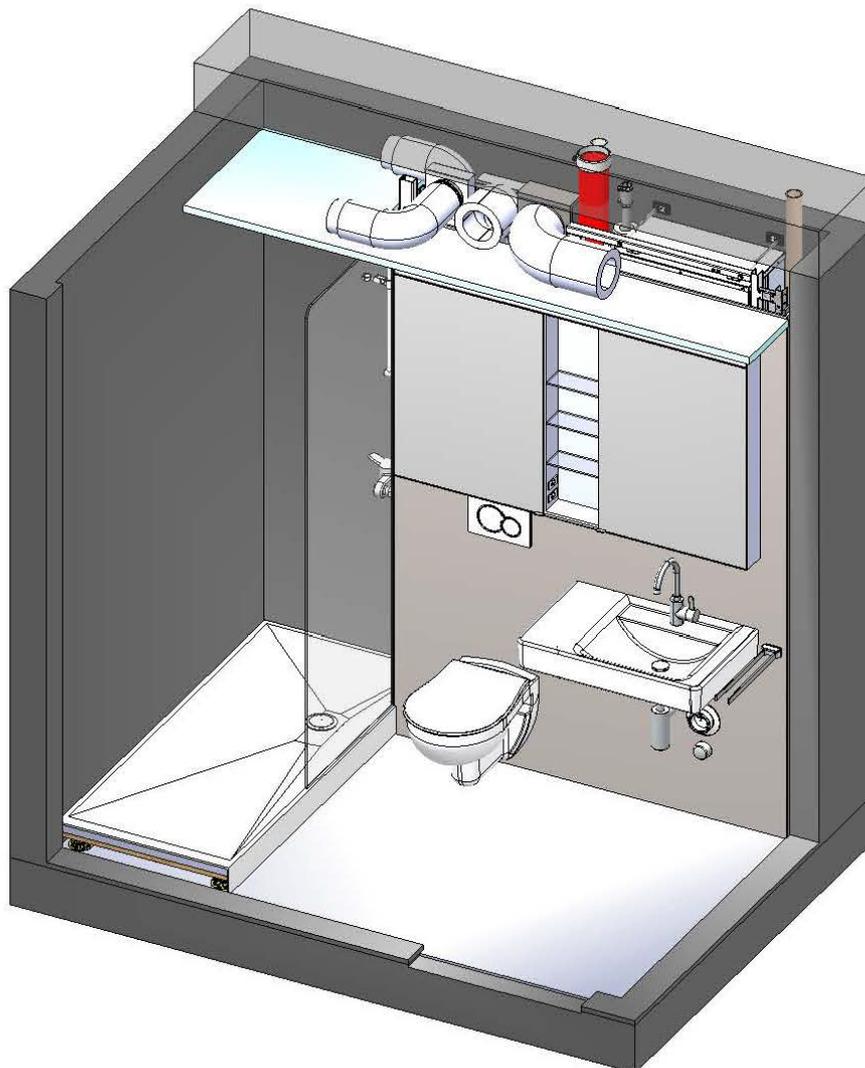


Abbildung 10 Renoviertes Badezimmer mit Vorwandeinheit THERMOS (Swissframe AG)

Literatur/Referenzen – Littérature/références – Literature/references

- [1] A. Kemmler, A. Piégsa, P. Wüthrich, M. Keller, M. Jakob, G. Catenazzi, 2015, Analyse des schweizerischen Energieverbrauchs 2000 - 2014 nach Verwendungszwecken, Im Auftrag des Bundesamt für Energie (BFE), Bern.
- [2] A. Primas, P. Fotsch, N. Ruf, 2005, Solare Wassererwärmung in Mehrfamilienhäusern, Im Auftrag des Bundesamt für Energie (BFE), Bern.
- [3] A. Primas, P. Karlström, 2007, Warmwasserversorgung GBZ 7 Sanierung mit Umstellung auf ein dezentrales solares System, Im Auftrag des Bundesamt für Energie (BFE), Bern.
- [4] Vetsch B., Gschwend A., und Bertsch S., 2011, Warmwasserbereitstellung mittels Wärmepumpen in Mehrfamilienhäusern, Im Auftrag des Bundesamt für Energie (BFE), Bern.