

# News aus der Wärmepumpen-Forschung

25 Jahre Wärmepumpenforschung: Gute Aussichten!  
Sonne – Speicher – Wärmepumpe: Alles geklärt?  
Industriewärmepumpen, Kühlen optimiert, CO<sub>2</sub> als Kältemittel

Mittwoch, 26. Juni 2019, BFH Berner Fachhochschule, Burgdorf



25.  
Jubiläum

25. Tagung des Forschungsprogramms  
Wärmepumpen und Kältetechnik  
des Bundesamts für Energie BFE



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Bundesamt für Energie BFE

# News aus der Wärmepumpen-Forschung

25 Jahre Wärmepumpenforschung: Gute Aussichten!  
Sonne – Speicher – Wärmepumpe: Alles geklärt?  
Industriewärmepumpen, Kühlen optimiert,  
CO<sub>2</sub> als Kältemittel

Tagungsband zur  
25. Tagung des Forschungsprogramms  
Wärmepumpen und Kältetechnik

26. Juni 2019  
BFH Berner Fachhochschule  
Burgdorf

Herausgeber  
Bundesamt für Energie (BFE)



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

**Bundesamt für Energie BFE**

## Impressum

Datum: Juni 2019

**Bundesamt für Energie BFE**, Forschungsprogramm Wärmepumpen und Kältetechnik  
Mühlestrasse 4, CH-3063 Ittigen  
Postadresse: CH-3003 Bern

[www.bfe.admin.ch](http://www.bfe.admin.ch)

Bezugsort der Publikation:

<http://www.bfe.admin.ch/forschung-waermepumpen-und-kaeltetechnik>

**Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren der Beiträge verantwortlich.**



Klimaneutral gedruckt  
Nr.: OAK-ER-11826-02167  
[www.oak-schwyz.ch/11826-02167](http://www.oak-schwyz.ch/11826-02167)

## Vorwort

# News aus der Wärmepumpen-Forschung

Seit 25 Jahren führt das Forschungsprogramm Wärmepumpen und Kältetechnik des Bundesamts für Energie BFE die Tagung «News aus der Wärmepumpenforschung» durch. Dafür treffen sich jeweils an einem Mittwoch im Juni rund 200 Wärmepumpenfachleute aus Forschung und Praxis in Burgdorf. Sie wollen Neues erfahren und bringen ihre Meinung und Erfahrung in die Diskussionen ein.

In diesen 25 Jahren wurden die Wärmepumpen zu effizienten und robusten Heizsystemen entwickelt und sind die erste Wahl bei neuen Einfamilienhäusern. Zur Erfüllung der Klimaziele des Bundes sollen sie in Zukunft bei allen Gebäudekategorien bevorzugt eingesetzt werden und auch den technischen und wirtschaftlichen Herausforderungen der Industrie genügen.

In den Überblicksvorträgen zur Jubiläumstagung berichtet Ständerat Beat Vonlanthen als Präsident der Fachvereinigung Wärmepumpen Schweiz über die Erfolgsgeschichte und die Aussichten der Wärmepumpen in der Schweiz. John Dulac von der Internationalen Energie Agentur (IEA) zeigt die grosse Bedeutung effizienter Wärmepumpen und Kälteanlagen zur Erreichung der Klimaziele auf. Zudem umreisst Professor Beat Wellig aktuelle Herausforderungen an die Wärmepumpenforschung. In weiteren Referaten wird über die Kombination der Wärmepumpen mit Sonnenenergie und Speichern, den Einsatz von Wärmepumpen in der Industrie sowie über die Effizienz von Klimakälteanlagen und die innovative Nutzung von CO<sub>2</sub> als Kältemittel berichtet.

Seit 25 Jahren werden die Berichte zu den Referaten in einem Tagungsband publiziert, damit die Details auch später nachgelesen und Dritten vermittelt werden können.

Wir wünschen Ihnen eine anregende Lektüre und freuen uns, Sie bei zukünftigen Tagungen begrüßen zu dürfen.

Carina Alles & Stephan Renz  
für das Forschungsprogramm Wärmepumpen und Kältetechnik  
am Bundesamt für Energie BFE

## Avant-propos

# Nouvelles de la recherche sur les pompes à chaleur

Depuis 25 ans, le programme de recherche Pompes à chaleur et froid de l'Office fédéral de l'énergie OFEN organise le symposium « Nouvelles de la recherche sur les pompes à chaleur », auquel quelques 200 spécialistes de la pompe à chaleur, issus de la recherche et de la pratique, se réunissent, toujours à Berthoud, un mercredi du mois de juin, pour découvrir des nouveautés et faire valoir leur opinion et leurs expériences dans les discussions.

Au cours de ces 25 années, les pompes à chaleur sont devenues des systèmes de chauffage efficaces et solides, le premier choix pour les nouvelles maisons individuelles. Pour atteindre les objectifs climatiques de la Confédération, elles devront à l'avenir être utilisées en priorité dans toutes les catégories de bâtiments et également répondre aux exigences techniques et économiques de l'industrie.

Le conseiller aux États Beat Vonlanthen, président du Groupement professionnel suisse pour les pompes à chaleur, vous parlera du succès et des perspectives pour les pompes à chaleur en Suisse dans le cadre des présentations générales du symposium du jubilé. John Dulac, de l'Agence internationale de l'énergie (AIE), soulignera l'importance des pompes à chaleur et des systèmes de réfrigération efficaces pour atteindre les objectifs climatiques. Le Professeur Beat Wellig présentera ensuite les défis actuels pour la recherche. D'autres exposés vous feront découvrir des nouveautés en matière de combinaison des pompes à chaleur avec l'énergie solaire et les accumulateurs, d'utilisation de pompes à chaleur dans l'industrie, de l'efficacité des climatisations ainsi que de l'utilisation novatrice du CO<sub>2</sub> comme réfrigérant.

Depuis 25 ans, les textes des exposés sont publiés dans les actes du symposium, pour mémoire, mais aussi pour informer les tiers intéressés.

Nous vous souhaitons bonne lecture et nous réjouissons de pouvoir vous accueillir lors d'un prochain symposium.

Carina Alles & Stephan Renz

Pour le programme de recherche Pompes à chaleur  
et froid de l'Office fédéral de l'énergie OFEN

# Inhaltsverzeichnis

<b>Erfolgsgeschichte der Wärmepumpen in der Schweiz:</b> <i>Rückblick und Ausblick</i> SR Beat Vonlanthen, Fachvereinigung Wärmepumpe	<b>7</b>
<b>Clean and Efficient Heat Pumping Technologies:</b> <i>Internationale Perspective</i> John Dulac, Internationale Energie Agentur	<b>17</b>
<b>Wärmepumpen Forschung:</b> <i>Stand und künftige Herausforderungen</i> Beat Wellig, Hochschule Luzern	<b>29</b>
<b>Solarstrahlung als Energiequelle für die Wärmepumpe:</b> <i>Wie nutzen?</i> Ralf Dott, Fachhochschule Nordwest-Schweiz	<b>45</b>
<b>Wärmepumpen und Photovoltaik:</b> <i>Gibt es den idealen Speicher?</i> Evelyn Bamberger, Institut für Solartechnik SPF	<b>61</b>
<b>Integration von Luft-Wasser-Wärmepumpen im städtischen Kontext</b> Gregor Steinke, Fachhochschule Nordwest-Schweiz	<b>75</b>
<b>Wärmepumpen für die Industrie:</b> <i>Eine aktuelle Übersicht</i> Cordin Arpagaus, NTB Interstaatliche Hochschule für Technik Buchs	<b>91</b>
<b>Prozessintegration von Wärmepumpen:</b> <i>Ein modellbasierter Ansatz</i> Sophia Wallerand, Ecole Polytechnique Fédéral de Lausanne EPFL	<b>109</b>
<b>Energieeffizienz von Klimakälteanlagen:</b> <i>Praxis und Theorie</i> Lorenz Brenner, ZHAW School of Engineering Winterthur	<b>119</b>
<b>CO<sub>2</sub>-Wärmepumpe für Warmwasser und Gebäudeheizung:</b> <i>Übersicht und Konzept</i> Jonas Schönenberger, Frigo Consulting AG	<b>135</b>
<b>Transcritical CO<sub>2</sub> heat pump:</b> <i>first experimental test rig results</i> Enrico Da Riva, Haute Ecole d'ingénierie et de Gestion du Canton de Vaud	<b>149</b>
Abkürzungsverzeichnis	<b>163</b>
Adressen Referenten und Organisationsteam	<b>164</b>



Dr. Beat Vonlanthen, Ständerat  
Präsident Fachvereinigung Wärmepumpen Schweiz

# Erfolgsgeschichte der Wärmepumpen in der Schweiz

## Zusammenfassung

*Die erste grössere Wärmepumpe-Anlage wurde bereits 1938 in Zürich realisiert. 1993 wurde die Fachvereinigung Wärmepumpen Schweiz, FWS, gegründet und 1994 die erste Wärmepumpentagung des Bundesamtes für Energie durchgeführt. Die FWS bildet die Brücke zwischen Forschung, Entwicklung, Behörden und Markt. Ihre Aufgaben umfassen Information und Beratung, Aus-/Weiterbildung, Qualitätssicherung und Mitgestaltung politischer Rahmenbedingungen. Die Verkaufszahlen der Wärmepumpen nahmen ab 1993 deutlich zu. Der Erfolg basiert auf zuverlässigen und betriebssicheren Produkten und der entsprechenden Kommunikation. Die Zunahme der Verkaufszahlen wurden durch die Ölpreiskrisen 1973 und 1979 und durch den Golfkrieg 1990 kaum beeinflusst. Auch die Einführung der CO<sub>2</sub>-Abgabe am 1. Januar 2008 mit 12 Franken pro Tonne CO<sub>2</sub> bewegte kaum. Das Bewusstsein in der Bevölkerung zum Klimawandel und die stete Berichterstattung führen zu einem Gesinnungswandel. Die Analyse der Verkaufszahlen zeigt, dass in Zukunft vermehrt auch Wärmepumpen-Anlagen mit grösseren Heizleistungen realisiert werden müssen.*

## Summery

*The first large heat pump facility was already installed in Zurich in 1938. The Swiss Association for the Promotion of Heat Pumps (FWS) was founded in 1993, and the Swiss Federal Office of Energy organised the first Heat Pump Symposium in 1994. Today, the FWS still bridges the gap between research and development, the authorities and the market. Its tasks include providing information and advice, education and training, quality assurance and involvement in shaping the political framework. The number of heat pumps sold has increased sharply since 1993. This success is due to the safe, reliable products and relevant communication. Sales figures barely increased during the Oil Crises in 1973 and 1979 and during the Gulf War of 1990. The introduction of the CO<sub>2</sub> tax on 1 January 2008 at twelve Swiss francs per tonne of CO<sub>2</sub> barely had a noticeable effect. However, the population's increasing awareness of climate change and constant reports are leading to a change of heart. Analysis of sales figures shows that, in the future, heat pump installations with greater heat output will need to be implemented.*

## Résumé

*La première grande installation de pompe à chaleur fut installée à Zurich en 1938 déjà. En 1993, le Groupement professionnel suisse pour les pompes à chaleur (GSP) vit le jour et, en 1994, l'Office fédéral de l'énergie organisa son premier symposium sur les pompes à chaleur. Le GSP sert aujourd'hui encore de pont entre la recherche, le développement, les autorités et le marché. Ses tâches sont l'information et le conseil, la formation et la formation continue, l'assurance-qualité et la conception des conditions cadres politiques. Dès 1993, les ventes de pompes à chaleur ont nettement augmenté. Le succès tient aux produits fiables et sûrs et à la bonne communication. Les ventes n'avaient que très peu augmenté lors des crises pétrolières*

*de 1973 et 1979, de la Guerre du Golfe en 1990 ou même de l'introduction de la taxe sur le CO<sub>2</sub> au 1<sup>er</sup> janvier 2008 à 12 francs par tonne de CO<sub>2</sub>. La sensibilisation de la population au changement climatique et les rapports fréquents conduisent à un changement de mentalité. L'analyse des chiffres de vente montre qu'à l'avenir, il faudra réaliser plus d'installations de pompes à chaleur avec des puissances thermiques plus élevées.*

## **Würdigung der Leistung der „Burgdorf-Tagung“**

Seit 25 Jahren ist die „Burgdorf-Tagung“ das Stelldichein für Wärmepumpenfachleute aus der Forschung und der Praxis. Mit Mitteln der öffentlichen Hand wird in der Anwendung des „Carnot-Prozesses“ geforscht und entwickelt. Zusammen mit der Industrie werden einzelne Forschungsprojekte vorangetrieben und Dank der Zusammenarbeit mit Sponsoren kann diese Tagung organisiert und durchgeführt werden.

Der „Carnot-Prozess“ bildet die Grundlage für die Wärmepumpentechnik. Er wurde gemäss Wikipedia durch den Franzosen Carnot 1824 bei Anwendungen mit Wärmepumpen beschrieben. Wie sich die Wärmepumpentechnik entwickelt hat, hat Professor Doktor Martin Zogg in seinem Buch, das im Jahr 2008 erschienen ist, hervorragend beschrieben. Er dankt darin auch den vielen Persönlichkeiten, die am Buch und an der Entwicklung mitgearbeitet haben. Das Buch trägt den Titel „Geschichte der Wärmepumpe – Schweizer Beiträge und internationale Meilensteine“.

An dieser Stelle sei den Forschenden, die sich für die Entwicklung und Anwendung der Wärmepumpentechnik engagiert haben, gedankt. Sie haben den Nutzen dieser Technik erkannt und unbeirrt geforscht. Dass die Wärmepumpentechnik bezüglich Umwelt und Energieeffizienz schon jetzt grosse Bedeutung erlangt, konnte vor 25 Jahren wahrscheinlich noch niemand vollumfänglich beschreiben. Die Forschenden beteiligen sich am Wandel im Wärmemarkt, weg von den fossil befeuerten hin zu elektrisch angetriebenen Heizungen.

Dass der Staat Forschungs- und Entwicklungsarbeit unterstützt, ist in der eidgenössischen Bundesverfassung festgehalten. Die Forschung muss zielgerichtet sein. So beschreibt der Artikel 89 die Grundsätze der Energiepolitik, der Artikel 74 den Umweltschutz, der Artikel 73 die Nachhaltigkeit und der Artikel 64 das Thema Forschung. Im Artikel 64 wird auch auf die Bedeutung der Qualitätssicherung hingewiesen.

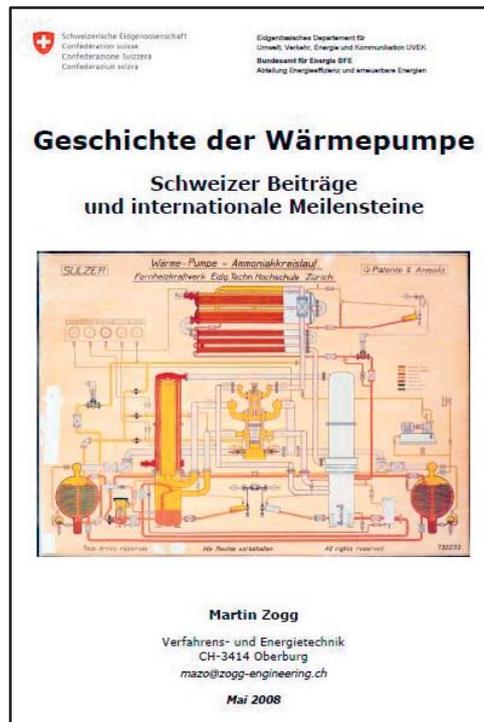


Bild 1: Titelbild des Buches von Prof. Dr. Martin Zogg

## Rückblick aus der Sicht der FWS

Die FWS, die Fachvereinigung Wärmepumpen Schweiz, wurde auch vor 25 Jahren gegründet. Wahrscheinlich haben die Mitarbeitenden des Bundesamtes für Energie, BFE, schon damals erkannt, dass Forschung und Entwicklung allein nicht ausreichen. Damit die Forschungsergebnisse im Markt Einzug halten, braucht es immer entsprechende Unternehmen und Verbände, die die Umsetzung realisieren. So hatte das BFE zusammen mit den Nordostschweizerischen Kraftwerken und Industrievertretern die Gründung der FWS vorangetrieben.

Die erste grössere Wärmepumpen-Anlage in der Schweiz wurde 1938 zur Beheizung des Rathauses in Zürich gebaut. Sie nutzte die Energie aus dem Fluss Limmat. Die Technik überzeugte und fand insbesondere bei Kälte- und in geringem Masse bei Wärmeanwendungen ihre Bedeutung. Während den nächsten 50 Jahren sollten die Verkaufszahlen nicht steigen.

Die jährlichen Verkaufszahlen von Wärmepumpen dokumentiert die FWS seit dem Jahr 1980. In den achtziger Jahren verharrten die Verkaufszahlen bei rund 2'500 Stück pro Jahr. Ab dem Jahr 1993 setzte eine erfreuliche Entwicklung ein. Einen wichtigen Beitrag zur Marktentwicklung leistete sicher auch die FWS. Anfänglich lagen die Hauptarbeiten der FWS beim Aufbau eines Qualitätssicherungssystems, zur Gewährleistung der Zuverlässigkeit und der Effizienz von Wärmepumpenanlagen. Nachdem die Zuverlässigkeit und Effizienz von Wärmepumpen aufgebaut war, konnte mit entsprechenden Marketingmassnahmen der Marktausbau beginnen.

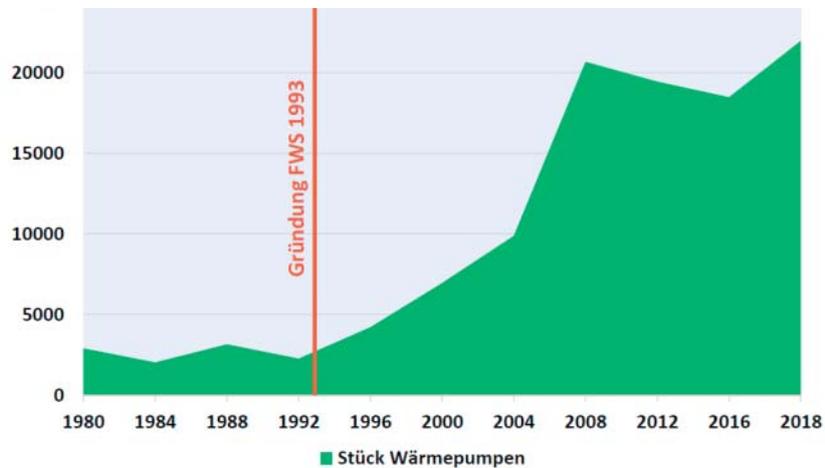


Bild 2: Verkaufszahlen Wärmepumpen pro Jahr im Markt Schweiz (Quelle: FWS und GKS)

Die Haus- und Anlagenbesitzer mussten informiert werden, dass es zuverlässige und effiziente Systeme gibt, die mit Hilfe von unerschöpflicher Umweltenergie zur Beheizung von Gebäuden und Erwärmung von Brauchwarmwasser eingesetzt werden können. Werden Wärmepumpen mit Strom aus erneuerbaren Energien eingesetzt, sind Wärmepumpen-Anlagen zu 100% erneuerbar.

Von 1993 bis zum Jahr 2010 setzte das BFE die FWS für die Marketingmassnahmen wie Information und Beratung, Aus-/Weiterbildung und Qualitätssicherung ein. Anfänglich beteiligte sich das BFE mit 1,6 Millionen Franken pro Jahr. Die Mittel des BFE nahmen jährlich ab und endeten im Jahr 2009. Ab 2010 beteiligt sich das BFE bei konkreten Projekten der FWS als Teilfinanzierende.

Bemerkenswert, die erste Ölpreiskrise 1973, die zweite Ölpreiskrise 1979 und der Golfkrieg 1990 bewogen die Haus- und Anlagenbesitzer nicht von Öl- und Gasheizungen abzuweichen und Wärmepumpenheizungen einzubauen. Auch die am 1. Januar 2008 eingeführte CO<sub>2</sub>-Abgabe auf Brennstoffe führte nicht zu einem Umdenken. Der damalige Preis von 12 Franken pro Tonne CO<sub>2</sub> belastete die Haushaltsausgaben der Haushalte nicht. Heute beträgt die CO<sub>2</sub>-Abgabe 96 Franken pro Tonne und verteuert den Brennstoff um rund 25%. Dennoch ist der Heizölpreis relativ tief. Die laufende Beratung zur Revision des CO<sub>2</sub>-Gesetzes sprechen von Abgaben bis 210 Franken pro Tonne CO<sub>2</sub>, sollte die gemäss Pariser Klimaabkommen vereinbarte Reduktion CO<sub>2</sub>-Emissionen nicht eintreten.

Die Qualitätssicherung wurde schon beschrieben. Die Aus- und Weiterbildung von Fachkräften basierte auf ergänzenden, spezifischen Modulen zu den bestehenden Ausbildungen in den Berufs-, Meister-, Techniker- und Hochschulen. Dank dem umfassenden Mitgliederkreis der FWS, dazu gehören Lieferanten / Hersteller von Wärmepumpen, Bohrfirmen, Planer, Installateure und Elektrizitätswerke, vereint die FWS das umfassendste Wissen zur Wärmepumpenanwendung und ist daher legitimiert, die Aus- und Weiterbildung anzubieten.

Als eine Kommunikationsmassnahme wurde eine Wärmepumpen Messe in Bern aufgebaut. Eine weitere Massnahme war das Konzept der «Tage der offenen Tür für Wärmepumpen-Anlagen». In einem Restaurant, Mehrzweckhalle oder Dienstgebäude einer Gemeinde wurde die



Bild 3: „Tage der offenen Tür für Wärmepumpen-Anlagen“

Technik erläutert. Anschliessend besichtigten die Interessierten, die ausgeführten Heizungsanlagen.

## Der Schweizer Wärmepumpen-Markt

In der FWS sind ausschliesslich Wärmepumpen-Hersteller und Lieferanten anzutreffen. In der Vereinigung Gebäude Klima Schweiz vereinen sich die Öl-, Gas-, Holzkessel Lieferanten sowie die Multienergieanbieter, die auch Wärmepumpen im Sortiment haben. Diese beiden Organisationen erheben jährlich die verkauften Stückzahlen im Schweizer Wärmemarkt. Das gibt ein klares Bild über die wirklichen Absätze und Präferenzen der Haus- und Anlagenbesitzer. Im Geschäftsjahr 2018 wurden insgesamt 47'741 Wärmeerzeugungseinheiten verkauft und eingebaut. In diesen Zahlen nicht enthalten sind die Wärmeübergabestationen der Nah- und Fernheizungen. Diese Einheiten wurden in Neubauten und in bestehende Bauten als Ersatz von ausgedienten Wärmeerzeugern eingebaut. 50,4% der Wärmeerzeugungseinheiten

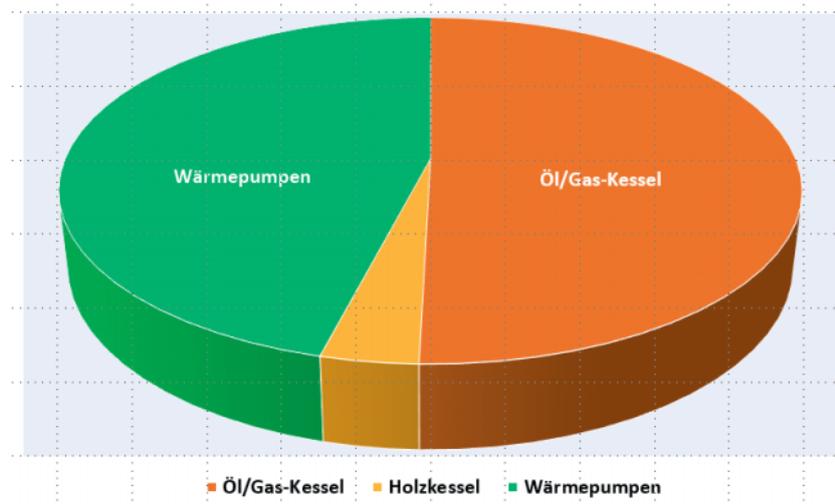


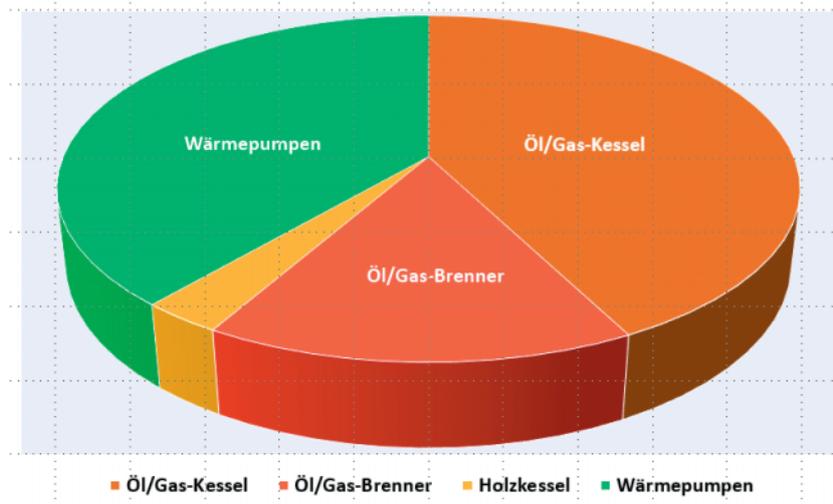
Bild 4: Verkaufszahlen der Wärmeerzeugungseinheiten im Markt Schweiz für das Jahr 2018  
(Quelle: FWS und GKS)

werden mit fossilen Brennstoffen betrieben. Wärmepumpen sind es 46,0% oder 21'964 Stück. Geht man davon aus, dass pro Jahr rund 12'000 Neubauten erstellt und 90% davon mit Wärmepumpen ausgerüstet werden, verbleiben noch rund 10'000 Wärmepumpen, die als Ersatz von fossilen Heizungen verwendet werden. Von den 1,7 Millionen Gebäuden mit Wohnnutzung haben noch mindestens 1 Million Gebäude fossil betriebene Heizsysteme. Das heisst, wenn 1 Million fossile Heizungen mit einer jährlichen Rate von 10'000 Wärmepumpen saniert werden, beträgt die Zeit für den Umbau 100 Jahre. So viel Zeit haben wir in der Schweiz nicht, daher muss sich die Verkaufszahl der Wärmepumpen in den nächsten Jahrzehnten deutlich steigern.

Das ganze Bild trübt sich zusätzlich durch die Tatsache, dass pro Jahr zusätzlich 8'912 Öl- oder Gasbrenner an bestehende Heizkessel angebaut wurden. Das heisst, dass diese fossilen Heizungen während mindestens den nächsten zehn bis fünfzehn Jahren weiter fossil betrieben werden.

Im Bild 5 sind auch die Verkaufszahlen für Öl- und Gasbrenner eingezeichnet. Dieses Bild zeigt, dass beinahe 10'000 Anlagenbesitzer die kleinste Investition realisieren, ohne die Betriebskosten einzurechnen. Schon heute lassen sich bei Sanierungen mit Wärmepumpen, die Mehrkosten innerhalb von ca. 10 Jahren amortisieren.

Die Marktentwicklung zeigt, dass fossile betriebene Heizkessel von 2017 auf 2018 4,6% verloren haben, derweil die Wärmepumpen-Verkäufe um 9,8% zugenommen haben.

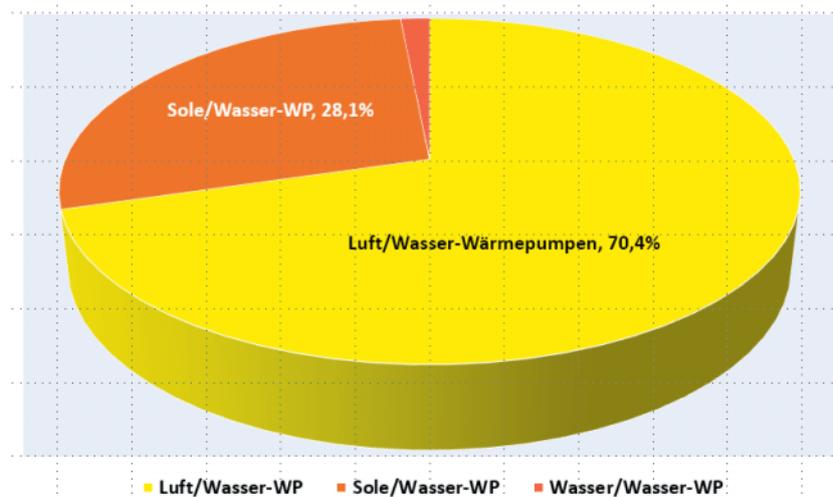


*Bild 5: Verkaufszahlen der Wärmeerzeugungseinheiten und Öl-/Gasbrenner im Markt Schweiz für das Jahr 2018 (Quelle: FWS und GKS)*

Befassen wir uns mit den Verkaufszahlen der Wärmepumpen. Das Bild 6 dokumentiert, dass 70,4% der verkauften Wärmepumpen ihre erneuerbare Umweltenergie der Umgebungsluft entziehen, 28,1% über Erdwärmesonden aus dem Erdreich und lediglich 1,5% aus dem Grundwasser oder umliegenden Gewässern.

Wärmepumpen, die die erneuerbare Energie dem Erdreich entziehen, sind ca. 20% effizienter, als solche die die Umweltenergie aus der Umgebungsluft entziehen. Der Grund liegt in der Schwankung der Quelltemperatur. Das Erdreich und das Wasser haben eine durchschnittliche Jahrestemperatur von 4 bis 8 Grad Celsius, derweil die Aussentemperatur während der Heizperiode zwischen ca. minus 15 bis plus 15 Grad Celsius variieren kann.

Trotzdem sind Wärmepumpenheizungen den fossilen Heizungen vorzuziehen, weil selbst die ungünstigste Wärmepumpenanlage rund drei Mal effizienter ist als eine fossil betriebene Heizungsanlage.



*Bild 6: Prozentuale Aufteilung der Wärmepumpen-Verkäufe nach Energiequelle im Markt Schweiz für das Jahr 2018*

Im Bild 7 sind die Verkaufszahlen nach Bauart der Wärmepumpen-Anlage skizziert. Im Innenbereich aufgestellte Wärmepumpen ziehen über ein Kanalsystem Aussenluft in die Wärmepumpen-Anlage, Dabei wird die angesaugte Luft abgekühlt und mit reduzierter Temperatur wieder an die Umgebung zurückgegeben.

Im Aussenbereich aufgestellte Wärmepumpen sind sogenannte Monobloc-Geräte, die die Heizenergie über Leitungen dem Haus zuführen. Für diese sowie für die Split-Systeme braucht es eine Baubewilligung. Diese Lösung ist bezüglich dem Bewilligungsverfahren äusserst aufwendig, weil das Verfahren Zeit in Anspruch nimmt und jeder Nachbar Einsprache erheben kann. Trotzdem haben die im Aussenbereich aufgestellten Wärmepumpen von 2017 auf 2018 um 30,8% zu genommen.

Zu den Split-Systemen zählen Wärmepumpen-Anlagen, welche den Verdampferteil im Aussenbereich und den Kompressor Teil mit dem Kondensator mit der Steuerung und der Regulierung im Innenbereich installiert haben. Diese Lösung ist sehr preiswert und mit wenig Aufwand zu installieren.

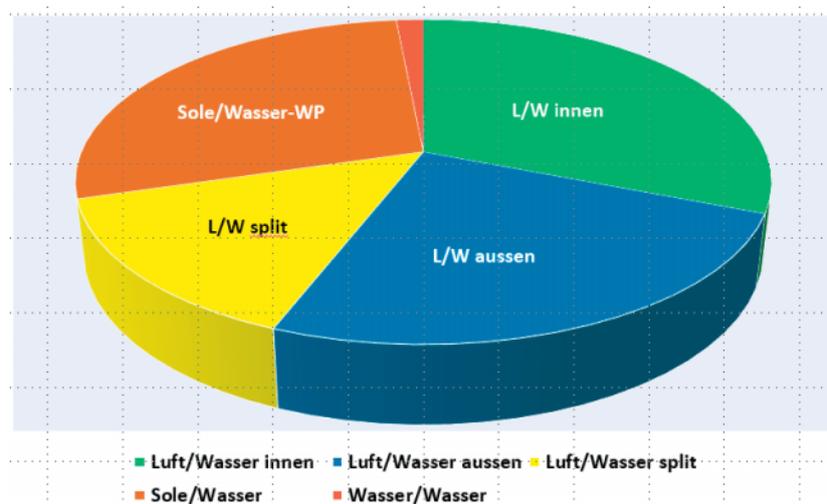


Bild 7: Aufteilung der Wärmepumpen-Verkäufe nach Energiequelle und Bauart im Markt Schweiz für das Jahr 2018

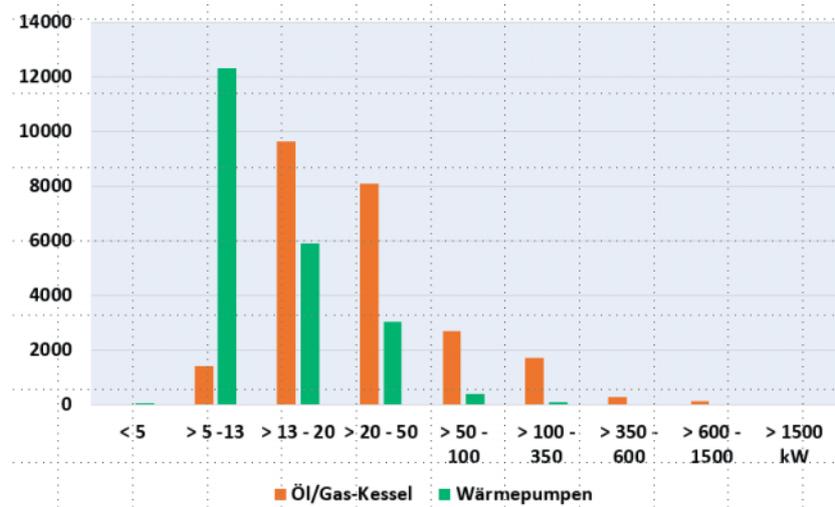


Bild 8: Aufteilung der Verkaufszahlen in Stück pro die Leistungsbereiche im Jahr 2018

Was nicht überrascht, ist die Tatsache, dass Wärmepumpen insbesondere im kleinen Leistungsbereich grosse Stückzahlen präsentieren. Öl- und Gasheizkessel sind aus technischen Gründen nicht bis in die kleinsten Leistungsbereiche konstruierbar. Gerade bei der Ölverbrennung sind der unteren Leistung Grenzen gesetzt, weil die Ölmoleküle eine bestimmte Grösse haben und trotz der Ölvorwärmung nicht beliebig verkleinert werden können. Das heisst, Ölheizkessel eignen sich nicht für Bauten mit kleinen Heizleistungen. Es würde ein permanenter Ein/Aus-Betrieb stattfinden, welcher den Ölbrenner in kürzester Zeit auf Störung gehen lässt.

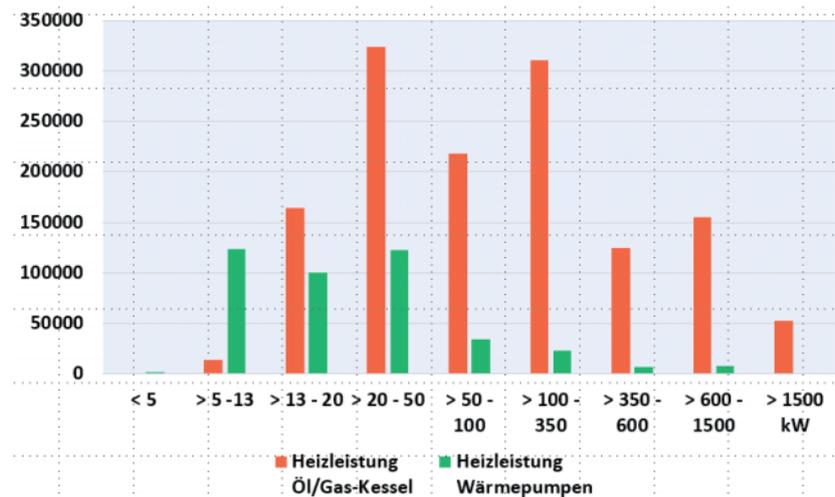


Bild 9: Aufteilung der Verkaufszahlen auf die Leistungsbereiche und Stück mit Leistung multipliziert in kW im Jahr 2018

Im Bild 9 tritt zu Tage, dass die grössten Mengen an Heizleistung im Leistungsbereich von 20 bis 350 Kilowatt erzeugt werden. Diese Erkenntnis ist wichtig, wenn es darum geht, den CO<sub>2</sub>-Ausstoss durch den Ersatz von Öl- und Gasheizungen mit Wärmepumpen zu reduzieren. Die Stückzahlenbetrachtung ist erfreulich. Die Umsatz- und Gewinnmöglichkeiten mit kleineren Wärmepumpen sind in Takt. Aber für die Erhaltung eines ausgewogenen Klimas fallen die Objekte, welche grössere Heizleistungen verlangen, stärker ins Gewicht.

Noch deutlicher tritt die Bedeutung von Anlagen mit grösseren Heizleistung in Erscheinung, wenn die Heizleistungen pro Bereich mit den Stückzahlen multipliziert und die einzelnen Bereiche kumuliert werden (Bild 10). Die grosse Menge an Heizleistung, die heute fossil erzeugt wird und durch Wärmepumpen ersetzt werden muss, befindet sich im Leistungsbereich über 20 Kilowatt.

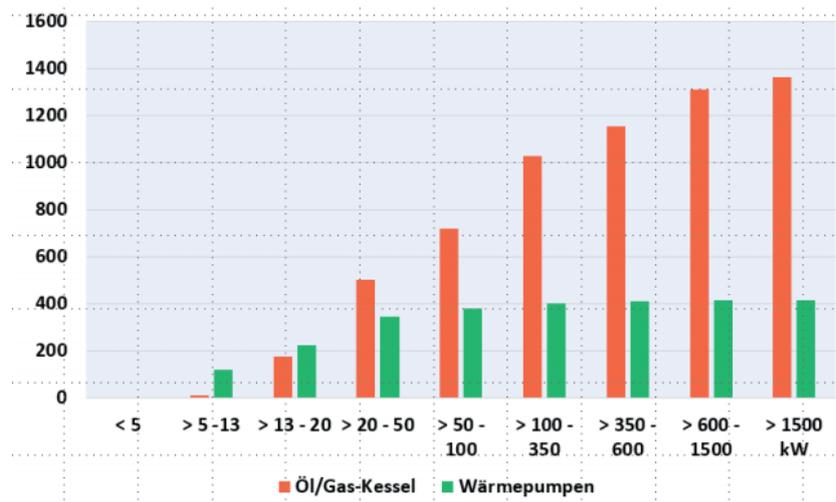


Bild 10: Aufteilung der Verkaufszahlen auf die Leistungsbereiche, Stück mit Leistung multipliziert in 1000 kW und die Bereiche kumuliert im Jahr 2018

## Ausblick

Damit die Ziele nach dem Kyoto-Protokoll und dem Pariser Klimaabkommen bezüglich CO<sub>2</sub>-Reduktion erreicht werden können, muss sich der Verkauf von Wärmepumpen bis 2030 verdoppeln. Es reicht aber nicht, wenn sich nur die Stückzahlen verdoppeln, auch die abgesetzten Heizleistungen müssen sich deutlich vergrössern.

Die FWS hat die Notwendigkeit und Herausforderung erkannt und führt als eine Massnahme, um dem dargestellten Ziel näher zu kommen, zusammen mit dem Deutschen und österreichischen Wärmepumpen-Verband jährlich einen Gross-Wärmepumpen Kongress durch, letztmals am 8. Mai 2019 in Zürich.

Folgende Wünsche richten sich an die Forschung und Entwicklung:

- Geräuschlosere Luft/Wasser-Wärmepumpen für den städtischen Bereich
- Verbesserte Wärmepumpen für den Leistungsbereich grösser 20 Kilowatt
- Systemvorschläge für die effiziente Planung und Realisation von grösseren Wärmepumpen-Anlagen
- Wärmepumpen mit Kältemitteln, die ohne Zusatzheizung 65 Grad Celsius Vorlauftemperatur für die Erwärmung von Brauchwarmwasser erzeugen lassen
- Steuerungs- und Regelsysteme, die sich in das Kommunikationsnetz mit Photovoltaik-Anlagen, Speichern, Batterien, Autoladestationen und dem Stromversorgungsnetz integrieren lassen.
- Verbesserung der Effizienz
- Verkleinerung der erforderlichen Kältemittelmengen

John Dulac  
International Energy Agency

## Clean and Efficient Heat Pumping Technologies: Internationale Perspektive

The global energy sector is not on track for a low-carbon transition. The world's energy supply is almost as carbon intensive as it was two decades ago, and energy-related carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) emissions rose by 1.7% in 2018, following an increase of 1.6% in 2017. This comes after three years of emissions staying flat and is due to a variety of factors, including economic growth, extreme weather and a slowdown in energy efficiency improvements. This has to change – quickly. In order to be in line with sustainable development ambitions, energy-related emissions need to peak around 2020 and enter a steep decline thereafter.

Buildings will play a central role in the global clean energy transition. The buildings sector represented 28% of global energy-related CO<sub>2</sub> emissions in 2018, two-thirds of which was from rapidly growing electricity use. In fact, since 2000, the rate of electricity demand in buildings increased five-times faster than improvements in the carbon intensity of the power sector. This reflects a 65% increase in floor area since then, growing demand for energy services and rising use of electricity-consuming equipment such as air conditioners (ACs), which are putting pressure on electricity systems.

Energy policy progress is also not keeping pace with buildings sector growth. Mandatory policies covered less than 40% of energy use and less than half of CO<sub>2</sub> emissions from buildings in 2017. Progress on building energy codes in particular is not keeping up with floor area growth, and more than two-thirds of additions to 2050 are expected in countries without policies in place today.

Fortunately, technology can help reduce buildings-related emissions while equally improving comfort and overall quality of energy services. Measures to achieve near-zero energy construction and deep energy renovations of existing buildings can reduce the sector's energy use by nearly 30% to 2050, even with doubling of global floor area. Energy use can be cut even further by doubling the efficiency of air conditioning equipment using technologies already in markets today, even as an additional 1.5 billion households globally gain access to cooling comfort. Heat pumping technology can slash typical energy used for heating in buildings by as much as four or more, while solar thermal solutions can help deliver carbon-free heat to nearly 3 billion people by 2050.

To do this, effective policies are needed to ensure the clean energy transition and address current market barriers. The recent report on [Perspectives for the Clean Energy Transition](#) by the International Energy Agency (IEA) highlights that multiple cost-effective technologies, from high-efficiency lighting to low-cost building envelope measures, can unleash an average savings of 500 million tonnes of oil equivalent (Mtoe) per year worldwide over the 2020-50 period, compared to current projections of energy demand. This requires clear and ambitious policy signals to address market failures, encourage economies of scale and enable further innovation in building products and services.

Those energy savings come with additional benefits. Efficient and flexible buildings will reduce the impact of electrification on power. For example, energy-efficient air conditioning can reduce power capacity needs by 1 330 gigawatts (GW) by 2050 – equivalent to today’s installed capacity in the United States and Canada. Coupled with building envelope improvements and demand-side measures, high-performance buildings can support power system flexibility and higher penetration of variable renewables in the electricity mix. Realising this would save as much as USD 1.1 trillion over the next 30 years.

## **Building energy services and occupant comfort can improve without growing energy use and emissions**

Buildings consumed more than 3 000 Mtoe in 2017, accounting for 30% of global final energy use. Space heating is the largest end use in the buildings sector, consuming more than 1 000 Mtoe on a global basis. Water heating consumed another 580 Mtoe. Excluding the traditional use of solid biomass in developing countries, hot water production and space heating in buildings are dominated by fossil fuel use and low-efficiency electrical technologies. Sales of solar thermal and heat pumping technologies have progressively increased since 2010. However, these represented less than 10% of overall heating equipment sales globally in 2017 and have not been enough to offset rapidly rising energy service demand.

Space cooling, which today only accounts for 6% of energy use in the buildings sector, is by far the fastest growing end use worldwide as more and more ACs are acquired and used. Ownership in China proliferated from around 15% of households having an AC in 2000 to more than 60% in 2017. In many hot places such as India, Southeast Asia and Africa, AC ownership remains limited, but that is changing quickly. For example, in India, where the average daily temperature for 1.3 billion people is typically above 25 degrees Celsius (°C), AC ownership in 2010 was only around 3% but increased to an estimated 6% in 2017.

Overall, the result of growing energy demand in buildings is that global energy-related emissions from the buildings sector increased by 25% between 2000 and 2017. Indirect emissions from electricity and district heat consumption rose more than 35% during that period, as electricity demand in buildings soared. The buildings sector now represents more than 55% of global final electricity consumption, and surging demand for equipment like ACs and connected devices in buildings is placing increasing onus on the need to decarbonise the power sector.

Luckily, major energy demand improvements can be realised in buildings using solutions that are already available in most markets. Total building energy demand in the IEA’s Faster Transition Scenario decreases gradually from more than 3 000 Mtoe in the early 2020s to around 2 900 Mtoe in 2050 (Figure 1). This is despite a 30% increase in global population, a 175% increase in projected global gross domestic product and a near doubling in buildings sector floor area. Energy efficiency measures are central to this energy demand reduction, and they equally provide substantially better energy services to consumers and businesses, leading to an average energy savings compared to expected trends that is equivalent to the total energy consumed in France, Germany and the United Kingdom in 2017.

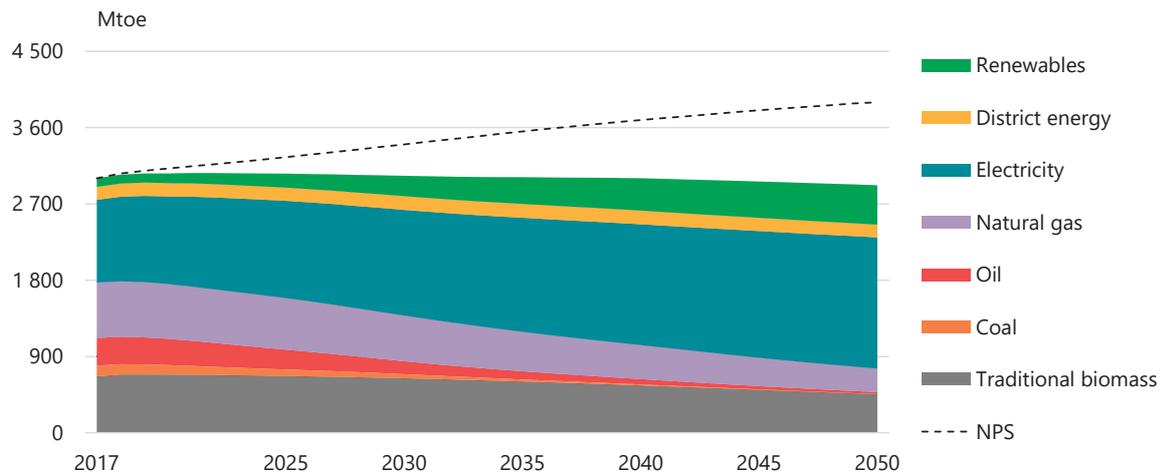


Figure 1: Energy use by subsector in the Faster Transition Scenario, 2017-50

Notes: NPS = New Policies Scenario. “Renewables” include modern use of solid biomass and solar thermal energy use.

Source: IEA (2019). All rights reserved.

**The Faster Transition Scenario leads to dramatic shifts away from fossil fuel use and saves an average of 500 Mtoe of energy each year to 2050, thanks to wide adoption of high-efficiency technologies.**

The Faster Transition Scenario also leads to significant changes in energy carriers to supply building energy needs. In particular, electricity demand in buildings accelerates considerably, jumping from 33% of energy use in 2017 to 53% in 2050. Growing energy service demand in emerging economies for end uses that are already electrified (e.g. lighting, appliances and cooling) plays a strong role in that increasing share, but energy efficiency measures help to dampen the effect. Indeed, the electricity consumption of those three end uses is 30% lower in 2050 than under the expected New Policies Scenario, thanks to major energy efficiency gains. Those improvements also allow for electrification of other end uses such as space and water heating, whose share of electric equipment sales jumps from less than 30% today to 45% by 2050. Because those shifts are equally energy-efficient, overall electricity use in buildings in the Faster Transition Scenario in 2050 is still 3 400 TWh less than in the New Policies Scenario.

The use of renewable energy in the buildings sector also sees substantial growth in the Faster Transition Scenario. Renewables represent 16% of energy demand in buildings in 2050, up from 3% in 2017. By contrast, coal and oil are almost completely phased out by 2030, while natural gas consumption is cut by nearly 60% by 2050, thanks to efforts to switch to high-performance electrical and solar thermal equipment and a strong push to improve natural gas technologies beyond current performance levels.

While total energy consumption in the buildings sector decreases to 2050 in the Faster Transition Scenario, energy services supplied to households and non-residential buildings continue to grow. This is feasible first and foremost because of avoided need for energy use. For example, heating and cooling needs are met using less energy because of improved building envelope performance.

Technology choice is equally critical in the Faster Transition Scenario. This includes a rapid shift away from technologies that use coal, oil and natural gas, such that their share in heating

equipment worldwide drops to nearly 10% by 2050. Electric heat pump sales, by contrast, triple by 2030 and continuing strongly thereafter. This allows heating demand to see the largest energy savings to 2050, as heat pumps are already typically around two to three times more efficient than condensing boiler technology commonly used today.

The various building efficiency measures in the Faster Transition Scenario, paired with low-carbon power generation, lead to very significant drops in buildings-related CO<sub>2</sub> emissions. Those emissions peak around 2020, decreasing notably soon after at an average annual rate of 6% to reach 1.2 GtCO<sub>2</sub> by 2050 – one-eighth current levels. Globally, energy efficiency measures contribute to around one-third of emissions reduction from buildings to 2050, or 50 GtCO<sub>2</sub> in cumulative emissions.

### **Heating in buildings could look very different by 2050, with heat pumps playing a lead role**

Shifting away from fossil fuel use in buildings will not be easy. Perhaps the most difficult energy service to decarbonise is heating (including water heating), nearly two-thirds of which was met using fossil fuels in 2017. This is due to a number of factors, including: energy prices (natural gas is considerably less expensive than electricity in many markets, often due to subsidies and imbalanced fuel taxation); technical barriers (transitioning from boilers can require important infrastructure changes); and consumer preferences, including, but not limited to, lack of awareness or familiarity with alternative heating technologies.

Achieving shifts away from fossil fuel use in buildings will require co-ordinated, long-term strategies. In the Faster Transition Scenario, growth of existing networks and installation of fossil fuel equipment in new buildings is avoided, particularly given the long life of gas infrastructure and known challenges of getting buildings off natural gas. Installation of low-carbon, high-efficiency technologies is a priority for new construction, especially as they can be easily integrated at the building design phase. In existing buildings, fossil fuel equipment is progressively shifted to low-carbon and high-performance alternatives such as heat pumps when technically feasible and cost effective.

The result is a portfolio of heating technologies in 2050 that is starkly different than today. By 2050, the share of renewables in energy use for heating and hot water purposes in buildings reaches 44% in the Faster Transition Scenario (compared to only 7% in 2017). Around 36% of installed heating equipment globally by 2050 uses renewable energy, including notably solar thermal units (Figure 2). Highly efficient electric technologies represent another important change, as they can be easily connected to smart devices and paired with on-site renewables-based electricity generation. Electric heat pumps see an impressive growth from 3% of installed equipment in 2017 to around 30% by 2050 in the Faster Transition Scenario. Performance improvements over time (from an average seasonal efficiency of 3.0 today to 3.5-5.0 in the next decade) also mean that shifts to heat pumps do not result in a major jump in electricity demand.

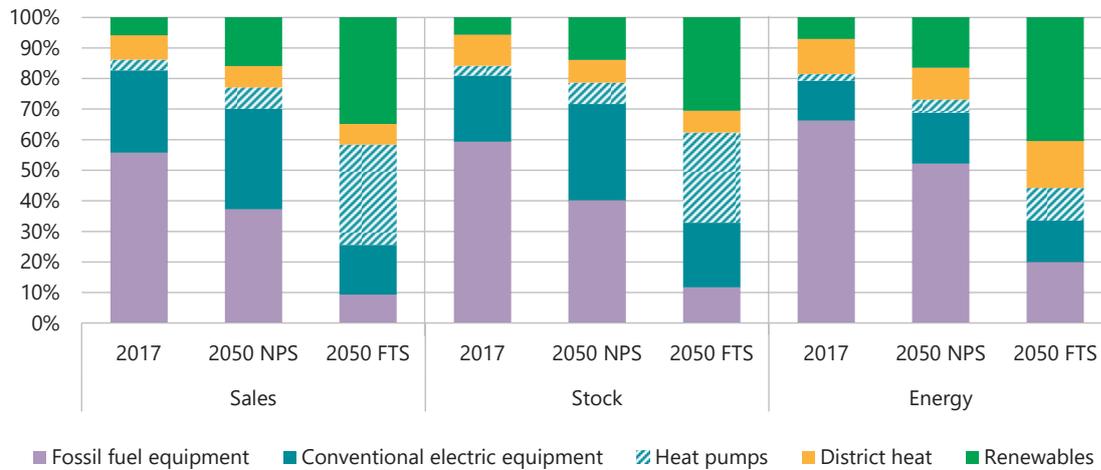


Figure 2: Share of sales, stock and energy use for heating equipment, 2017-50

Notes: NPS = New Policies Scenario; FTS = Faster Transition Scenario. Traditional use of solid biomass is not included. District heat sales and stock are in the number of household or non-residential building connections rather than installed capacity.

Source: IEA (2019). All rights reserved.

### Rapid deployment of heat pumps, renewables and clean district energy is a central pillar of a decarbonised buildings sector in the Faster Transition Scenario.

Considerable reduction in fossil fuel use can also be accomplished through strategic shifts to alternatives such as modern district heating systems and through effective measures to ensure that gas-based equipment is as efficient as possible. Residual natural gas demand in the Faster Transition Scenario is significantly improved through high-performance technologies, including mandating best-available condensing gas boilers (which are common in many countries today) and policy support for deployment of gas thermal heat pumps (including continued R&D to reduce capital costs and improve adaptability to existing building applications). By 2050, around three-quarters of gas-based equipment sales globally and around 60% of installed gas-using heating stock use heat pumping technologies, and the remainder is exclusively condensing gas boilers.

### Heat pumps already have enormous potential but need additional policy support

Heat pumps are the dominant heating technology worldwide by 2050 in the Faster Transition Scenario. Around one billion households rely on them for space heating by 2050. That shift drastically improves the carbon intensity of heat production in buildings, especially as the power sector decarbonises. In fact, heat pumps are already less CO<sub>2</sub> intensive than gas boilers in most major heat markets, including North America, Eurasia and China (Figure 3). Globally, heat pumps could already supply about 90% of global space and water heating with lower CO<sub>2</sub> emissions than condensing gas boilers – even when the upstream carbon intensity of electricity is taken into account.

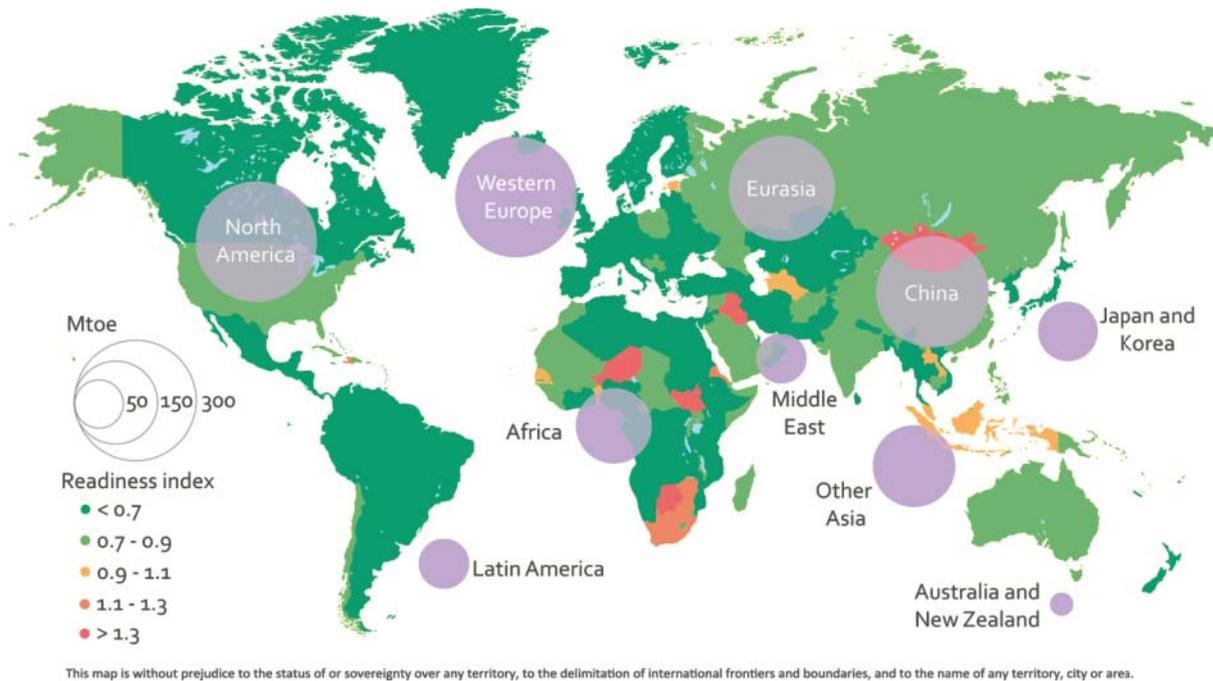


Figure 3: Heat pump readiness index relative to regional demand, 2018

Note: If the index equals 0.8, a typical heat pump would be 20% less carbon-intensive than a condensing boiler using natural gas.

Source: IEA (2019). All rights reserved.

### Heat pumps could already supply 90% of heating needs globally with a lower CO<sub>2</sub> footprint than condensing gas boilers.

To enable the transition to heat pumping solutions, policies need to address known issues such as upfront costs and energy price dynamics. For example, the spread between natural gas and electricity prices is often a factor of 2 to 3 (i.e. natural gas prices are 2-3 times lower than electricity prices), with some markets having a spread of 4 or more, depending on taxes or other market costs. When the range of energy performance (e.g. the seasonal efficiency factor) of gas boilers and heat pumps is taken into account, operational cost is often only marginally different (Figure 4). However, gas boilers tend to be less expensive in many countries, due to a combination of issues including the market scale of heat pump demand. When capital expenditure is included, this means higher-performance heat pumps may only break even in life-cycle return on investment.

This suggests government policy has a critical role in shaping market demand: first and foremost through minimum energy performance standards, which have a strong track record of paying for themselves when done in consultation with industry and when using appropriate market incentives. Further innovation – for example, working with manufacturers to improve heat pump performance in cold climates conditions – will also help narrow the spread of operational costs, making those products more attractive. Improvements also include optimisation of storage capacities with hot water production using heat pump technologies.

Policy can play a similar role in guiding market decisions, even in conditions that from an economic perspective are already favourable. This includes use of market incentives such as rebates or utility reward programmes to drive technology demand and establish appropriate

economies of scale. Use of labelling, certification programmes and other information tools can help steer demand towards clean energy technologies. However, standards and labels should evolve to reflect heat pump performance in the wider market (rather than comparing heat pumps with themselves). For instance, the Energy Label Regulation in the European Union sets the ‘A’ label for energy performance at the minimum primary-to-final energy ratio of 0.92, which applies to condensing boiler technology. More ambitious and comparable standards across equipment types would encourage greater uptake of heat pumps, including gas-driven ones (with a typical energy performance factor of above 1). Other policy signals, such as carbon intensity expectations for heating equipment, would also encourage greater heat pump adoption.

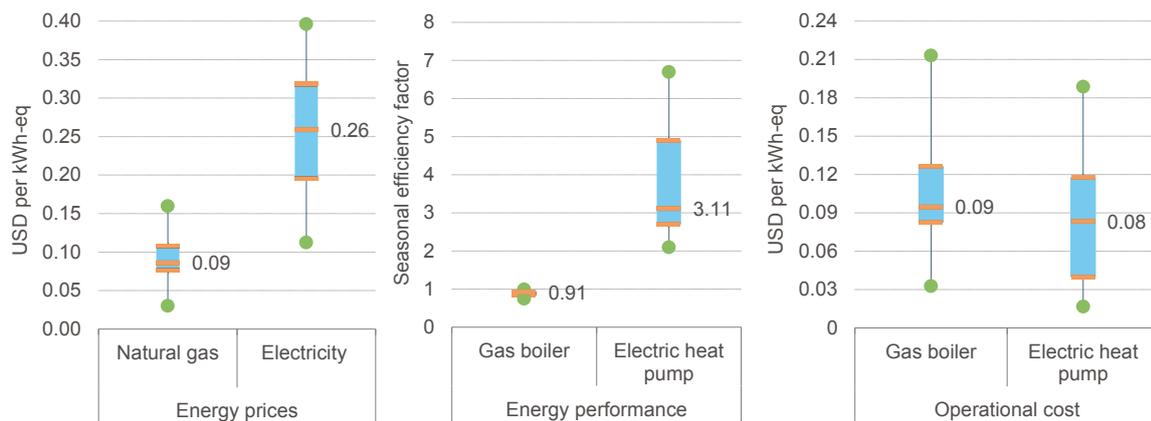


Figure 4: Spread of energy prices, performance and operational costs for gas and electric heating equipment in IEA countries, 2017

Notes: kWh = kilowatt-hour. Natural gas and electricity prices are final residential prices, including taxes, in 2017 USD.

Source: IEA (2019). All rights reserved.

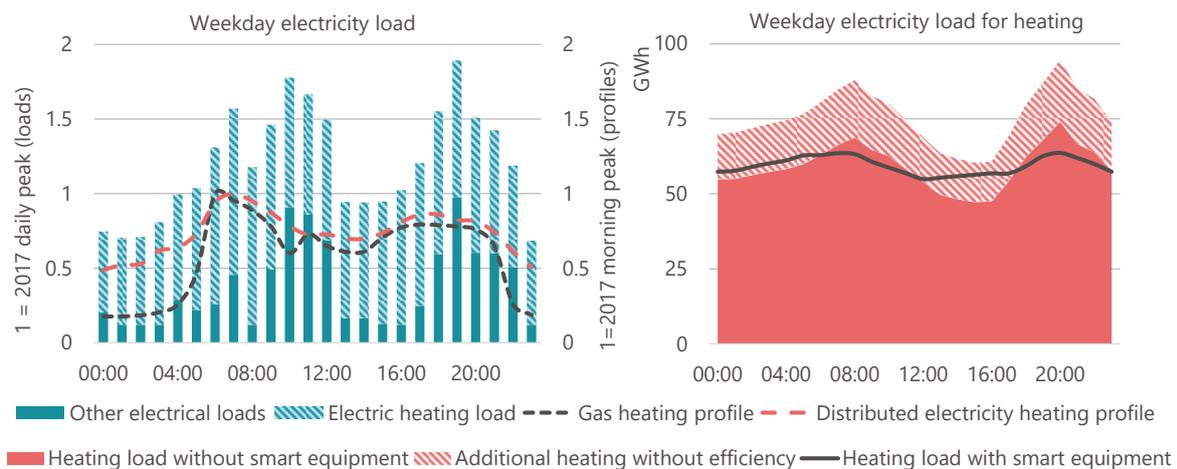
**Gas to electricity price ratios often mean that electric heat pumps are marginally less expensive to operate when energy performance is considered.  
Electrifying building energy services needs to be considered within the broader energy picture**

Increasing demand for electricity in the buildings sector, even with energy efficiency measures, will place pressure on the power system and requires smarter management of energy demand. By 2050, electricity accounts for about 19% the global share of space heating energy consumption in the Faster Transition Scenario (compared to 13% in 2017). That growth, even with building envelope improvements and high-efficiency heat pumps, could increase the magnitude of peak electricity demand if unmanaged. For example, the shift from a gas boiler to an electric heat pump (assuming a seasonal efficiency factor of around 3.2) in a traditional multi-family apartment building in Europe could triple morning electricity use and nearly double the demand in the early evening, even if the peak of the overall heat load profile is improved compared to the former gas boiler (Figure 5).

Applied across millions of households, such a peak load is even more problematic. In the Faster Transition Scenario, more than 45% of space and water heating equipment in the European Union is electric by 2050, compared to 25% in 2017. Unmanaged, even if the majority is high-efficiency heat pump technologies, peak load on a typical January weekday could require as

much as 68 gigawatts (GW) for heating (or 12% of the daily peak) during the evening peak and around 18% of the morning peak load (69 GW).

To effectively manage electrification of heating (and cooling) services in buildings and avoid major peak loads for electricity systems, building controls such as sensors and smart thermostats are needed to better manage, distribute and improve responsiveness of heating and cooling loads, both temporally and within the building space. This can be paired with solutions that take advantage of thermal inertia (i.e. how quickly a building losses or gains heat) and other storage options to both reduce and shift electricity loads to off-peak hours.



*Figure 5: Example weekday electricity load profile for an apartment in continental Europe and overall heating profile for Europe in the Faster Transition Scenario, 2050*

Notes: This example of a residential electricity profile represents a family living in a multi-family apartment building in a European continental climate (Delmastro et al., 2016). The gas profile and electricity profiles refer to space and water heating demand only. The shape of the electricity profiles by end-use for Europe was derived using typical building demand load profiles with an illustrative example of the load curve using smart heat pump technologies.

Source: IEA (2019). All rights reserved.

### **Efficient equipment will dampen the impact of electrification of space heating, but better demand-side measures are required to shift demand from peak load hours.**

One key step to enabling demand-side flexibility is through the use of smart and responsive controls for heat pumps, which is still uncommon today. This includes use of connected devices and artificial intelligence to manage and mitigate peak electricity load profiles, for instance ramping up power before building occupants wake in the morning and ramping down during peak demand.

Synergies with other energy technologies such as solar photovoltaics or in district energy networks could also be exploited to enhance system flexibility and efficiency. For instance, the IEA Technology Collaboration Programme on Heat Pumping Technologies (IEA HPT TCP) [Annex 47](#) is studying synergies between heat pumps and 4th or 5th generation of district heating systems to enable heat recovery and use of low-grade heat sources. The HPT TCP [Annex 42](#) is looking at how heat pumps can address energy supply challenges such as increasing renewable energy uptake, maintaining grid stability during extreme cold and providing flexibility to grid operators.

## Support for product refinement and technology innovation can enable greater market uptake

The Faster Transition Scenario considers existing energy technology solutions that can achieve sustainable heating and cooling demand in buildings, including some technology performance improvements and eventual cost reductions that are achieved through market economies of scale. Those improvements require effective policy signals as well as support for product innovation that delivers affordable, efficient and low-carbon heating and cooling solutions for buildings.

One such example is continued support for heat pumping technologies in cold climate conditions. Heat pump performance today (for air-source heat units) typically drops at outdoor temperatures below 0-5°C, and even cold-climate heat pumps can struggle in temperatures below -10°C. To address these types of technical issues, heat pumps are often oversized to ensure proper heat delivery on extremely cold days, or they can be paired with other equipment, such as electric resistance heaters or backup gas boilers. Yet, data of actual temperature profiles in a cold country such as Canada suggest that the number of very cold and extremely cold days may only represent as much as 10% of total winter heat demand (Figure 6).

This indicates there is opportunity to continue research and development programmes that identify appropriate technology solutions to ensure high-performance equipment that is responsive to heating needs in all conditions. Potential solutions already being considered in Canada through research being led by Natural Resources Canada include hybrid (e.g. natural gas and electric) heat pump solutions that would ensure heat production at very cold temperatures while equally achieving very high energy performance levels at typical winter temperatures.

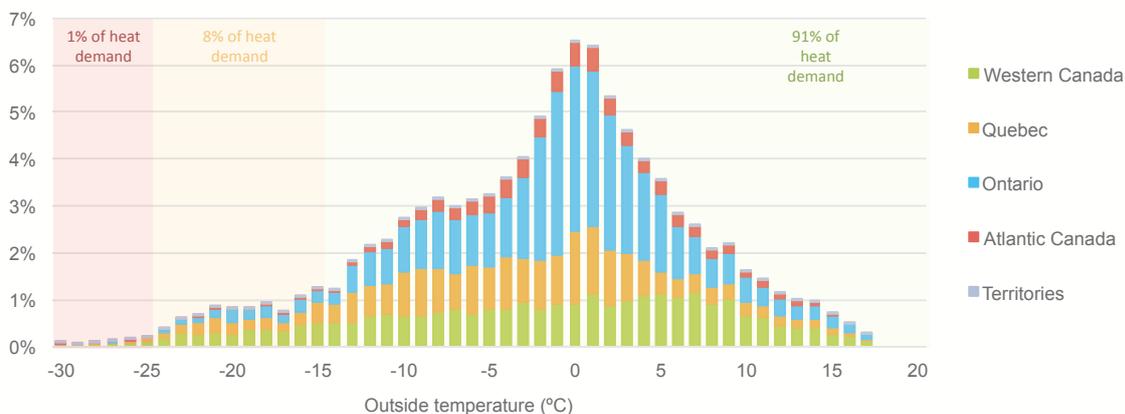


Figure 6: Heat demand distribution by province relative to outside temperature, 2018

Source: Natural Resources Canada (2019).

## Efficient equipment will dampen the impact of electrification of space heating, but better demand-side measures are required to shift demand from peak load hours.

These technology considerations equally apply to air conditioning technologies for summertime cooling (and reversible heat pumps). For example, a recent study of real-time operational status of over 200 000 multi-split ACs in China found that only one indoor air-handling unit was used 60% of the time, while only 1-2 indoor units were used nearly 90% of the time. This means

those multi-split ACs were operating at low partial loads a substantial portion of the total operational hours. In fact, the tested units operated below 30% load more than 60% of the time, meaning the operational efficiency could be as much as half the rated energy performance.

Part of this gap between rated and operational efficiency of cooling equipment may simply be due to oversizing of equipment, but it also suggests that effort is needed to address equipment performance relative to actual operating conditions. This could be supported through further monitoring and inspection of real-time performance, for instance through the Internet of things using smart ACs. Technical solutions that ensure equipment performance better reflects actual heating and cooling needs and load profiles will also help. For instance, the Chinese manufacturer GREE has developed a new compressor design that uses both a large and a small cylinder operating in parallel. At high loads, both cylinders work simultaneously to meet the cooling service demand. However, at low loads, the large cylinder stops, allowing the smaller piston to operate independently with respect to the necessary cooling output. As a result, the energy performance is much higher and can be improved by as much as 130% compared with an ordinary multi-split AC when operating at very low (e.g. 10%) partial loads.

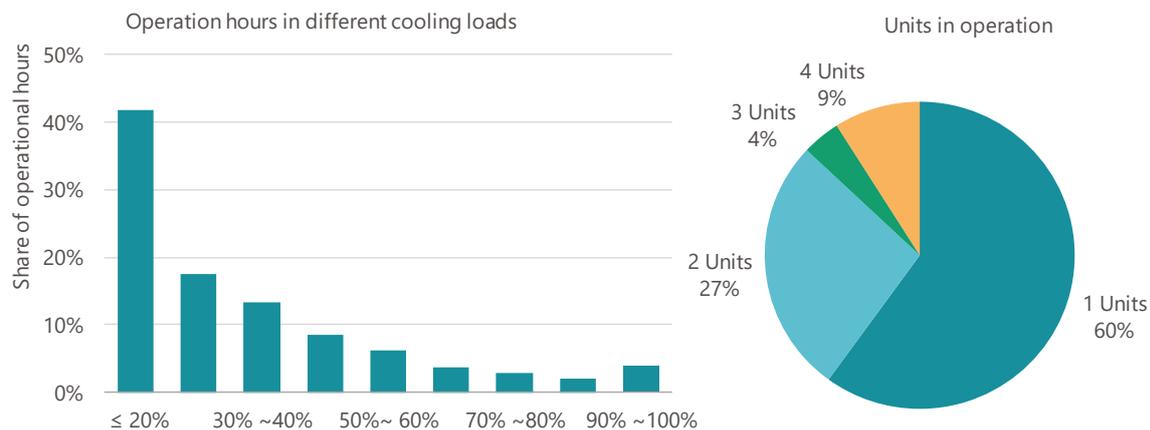


Figure 7: Operational conditions of multi-split ACs studied in China in 2016-17

Note: Sample size=200 000 units.

Source: Cheng (2018).

**Operational conditions for multi-split ACs being used in China impact the equipment's energy performance, which can be as much as half the rated energy efficiency of those products.**

## Enabling the Clean Energy Transition and widespread uptake of heat pumping technologies

Current and expected levels of low-carbon and high-efficiency technology deployment will not be enough to deliver the clean energy transition. The good news is that the toolkit needed to realise the potential highlighted in the Faster Transition Scenario includes a suite of policies, technologies and financing tools with proven track records.

Firstly, governments everywhere should set clear ambitions for sustainable heating and cooling in buildings, committing to specific targets that send long-term signals to market actors. That includes using traditional, yet effective policy tools such minimum energy performance standards that reflect best available technologies, rather than a simple benchmark against the most common technologies.

Countries can also work together to harmonise definitions relating to heat pump performance and to make global benchmarking less challenging, given the current diversity of testing procedures and definitions. Definitions currently change from region to region, whereas for conventional heating technologies such as natural gas boilers they are more consistent globally.

Innovation efforts can equally make sure heat pumping technologies are fit-for-purpose in all markets and conditions, addressing issues such as higher upfront prices and a lack of adaptability to certain building contexts (e.g. multi-family residential buildings with limited outdoor space for exterior heat pump units). Initiatives such as the ‘Climate and Comfort Box’ – a joint research programme between the IEA HPT TCP and IEA Technology Collaboration Programme for Energy Storage (ECES TCP) – will help address such barriers and make heat pumping technologies more affordable, more flexible and easier to install.

Lastly, governments and industry can work together to enable greater flexibility of heat pumping technologies and ensure high-efficiency performance across all operating conditions. This includes demand-side strategies that can be introduced to address the impact of peak electricity demand from heating and cooling loads in buildings and ensure that equipment operates at the “right time” and “right place”, as opposed to many current installations that operate when heating and cooling services are not necessarily needed.



Prof. Dr. Beat Wellig  
Hochschule Luzern – Technik & Architektur

# Wärmepumpen-Forschung: Stand und künftige Herausforderungen

## *Zusammenfassung*

*Nachhaltig und effizient geheizt wird heute mit Wärmepumpen. Ohne den breiten Einsatz von Wärmepumpen ist das Ziel eines emissionsfreien Betriebs des Gebäudeparks nicht erreichbar. In diesem Übersichtsbeitrag werden der Stand der Technik und Forschung sowie Entwicklungstendenzen und Forschungsbedarf diskutiert. Der Schwerpunkt liegt auf dem Wärmepumpen-Kreisprozess, den eingesetzten Technologien, der Systemintegration und Regelung. Wärmepumpen haben einen hohen Stand der Technik erreicht und arbeiten zuverlässig, effizient und wirtschaftlich. Das grösste Verbesserungspotenzial liegt heute nicht mehr im Wärmepumpen-Kreisprozess oder in Einzelkomponenten, sondern in der Integration der Wärmepumpe in das Gesamtsystem und in der «Intelligenz» der Systeme. Vier ausgewählte Themengebiete mit Forschungsbedarf werden in diesem Beitrag behandelt: die Weiterentwicklung der Wärmepumpentechnologie, die zukünftige Verwendung von Low-GWP Kältemitteln, die Entwicklung von intelligenten Regelungen sowie die sich bietenden Möglichkeiten durch die Digitalisierung. Diese und weitere Themen sollten von der Forschung und Wärmepumpen-Branche in enger Zusammenarbeit angegangen werden.*

## *Abstract*

*Today, heat pumps are used for sustainable and efficient heating. Without their widespread use, the goal of zero-emission operation of the building park cannot be achieved. This overview article discusses the state of the art of heat pump technology and research, alongside development trends and research needs. The focus lies on the heat pump cycle, the technologies implemented, and system integration and control. Heat pumps have reached a high maturity and work reliably, efficiently and economically. These days, the greatest potential for their improvement is no longer situated in the heat pump cycle or individual components, but in the integration of a heat pump into the overall system and in the "intelligence" of the subsystems. This article addresses four selected topics that require research: the further development of heat pump technology, the future use of low-GWP refrigerants, the development of intelligent system control, and the opportunities offered by digitalization. These and other topics should be investigated by research and heat pump industry in close cooperation.*

## Einleitung

### Hintergrund

Im Mai 2017 haben die Stimmbürgerinnen und Stimmbürger die Energiestrategie 2050 angenommen. Wichtige Ziele der Energiestrategie 2050 sind die Energieeffizienz zu steigern, den Anteil der einheimischen erneuerbaren Energien markant zu erhöhen und die energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen zu senken. Sie ist damit ein wichtiger Baustein zur Erreichung der Klimaziele. Ausserdem schafft sie Arbeitsplätze und generiert Investitionen in der Schweiz.

Um die Ziele der Energiestrategie zu erreichen, muss das Schweizer Energiesystem bis ins Jahr 2050 sukzessive umgebaut werden. In allen Bereichen muss gehandelt werden. Der koordinierten Energieforschung des Bundes kommt eine besondere Bedeutung zu. Sie ist auf die Ziele der Energiestrategie 2050 ausgerichtet und leistet einen substantiellen Beitrag zum effizienten und emissionsarmen Umgang mit Energie. Technische, ökonomische, ökologische und gesellschaftliche Aspekte werden in der Energieforschung gleichermassen berücksichtigt.

Die Steigerung der Energieeffizienz ist eine der wichtigsten Massnahmen. Sowohl die elektrische Energie als auch die Wärmeenergie spielen im Energiesystem der Zukunft eine zentrale Rolle. Das Heizen von Gebäuden hat einen beträchtlichen Anteil an den gesamten CO<sub>2</sub>-Emissionen. Es ist unbestritten, dass die Wärmepumpe eine Kerntechnologie für die ökologische Wärmebereitstellung in Gebäuden darstellt. Ohne den Einsatz von Wärmepumpen ist das Ziel eines emissionsfreien Betriebs des Gebäudeparks nicht erreichbar.

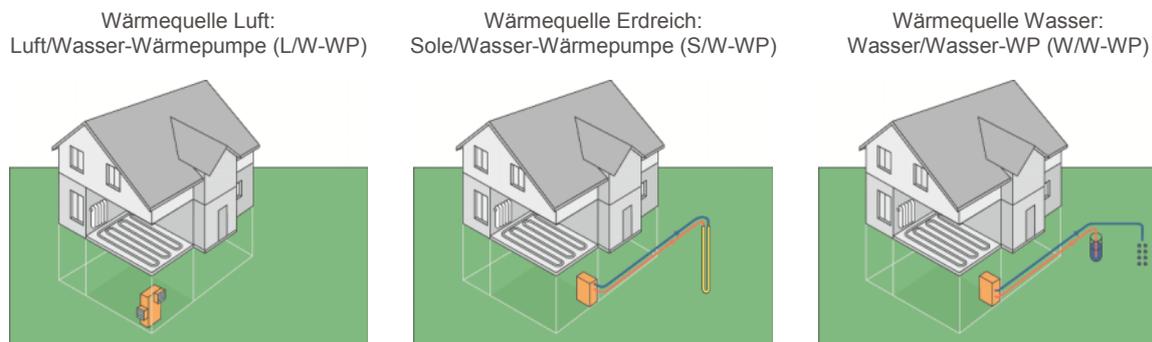


Bild 1: Wärmequellen für Wärmepumpen und zugehörige Wärmepumpentypen (Quelle: Fachvereinigung Wärmepumpen Schweiz, FWS).

### Die Wärmepumpe

Nachhaltig und effizient geheizt wird heute mit Wärmepumpen. Die Wärmepumpe ist eine faszinierende Technologie: Sie macht durch den Einsatz von hochwertiger elektrischer Energie (reine Exergie) eine sonst nicht verwendbare Umweltwärme (reine oder grösstenteils Anergie) für die Bereitstellung von Raumwärme und Warmwasser nutzbar. Im Vergleich zum Heizen durch Verbrennungsprozesse mit Heizkesseln ist die Wärmepumpe hocheffizient.

Die Wärmepumpe entzieht einer Wärmequelle auf tiefem Temperaturniveau Wärmeenergie, hebt diese durch den Einsatz von elektrischer Energie auf ein höheres Temperaturniveau und gibt sie an eine Wärmesenke ab. Im vorliegenden Beitrag werden nur Systeme mit den am häufigsten verwendeten Wärmequellen Umgebungsluft, Erdreich und Wasser (Grund-, Fluss-, Seewasser) sowie mit Heizwasser als Wärmesenke betrachtet (Bild 1).

## Ziele des Beitrags

In diesem Übersichtsbeitrag werden der Stand der Technik und Forschung sowie Entwicklungstendenzen und Forschungsbedarf im Bereich Wärmepumpen diskutiert. Der Beitrag bezieht sich auf Wärmepumpen für die Gebäudeheizung und Warmwasserbereitstellung (kleinere Anlagen bis rund 20 kW Heizleistung). Der Schwerpunkt liegt auf dem Wärmepumpen-Kreisprozess, den eingesetzten Technologien sowie der Systemintegration und Regelung. Ein kurzer Überblick zur thermodynamisch einwandfreien Bewertung von Wärmepumpen zeigt auf, wie lohnendes Verbesserungspotenzial identifiziert und quantifiziert wird. Es werden ausschliesslich monovalente Kaltdampfkompansions-Wärmepumpen mit den erwähnten Wärmequellen beleuchtet. Alternative Technologien wie z.B. Adsorptions- und Absorptions-Wärmepumpen oder magnetokalorische Wärmepumpen werden nicht betrachtet. Der Beitrag spiegelt die Sicht des Autors wider und hat keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

## Aktuelle Situation der Wärmepumpe

### Einsatz von Wärmepumpen in der Schweiz

Der Stellenwert der Wärmepumpe auf dem Schweizer Markt ist hoch und er dürfte in Zukunft weiter zunehmen. In den vergangenen 10 Jahren (2009 bis und mit 2018) wurden schweizweit 195'600 Wärmepumpen verkauft, was einem Durchschnitt von gerundet 19'600 Stück pro Jahr entspricht. Das Jahr 2018 bildet mit beinahe 22'000 verkauften Wärmepumpen ein Rekordjahr. Bis im Jahr 2020 werden in der Schweiz etwa 400'000 Wärmepumpen in Betrieb sein. Die jährlichen Verkaufszahlen in Bild 2 zeigen die seit 2008 relativ konstante Nachfrage nach Wärmepumpen. Der Anteil der L/W-WP ist in den vergangenen Jahren stetig gestiegen, 2018 liegt er bei 70%. Die S/W-WP haben einen Anteil von 28%, die W/W-WP nur 2%.

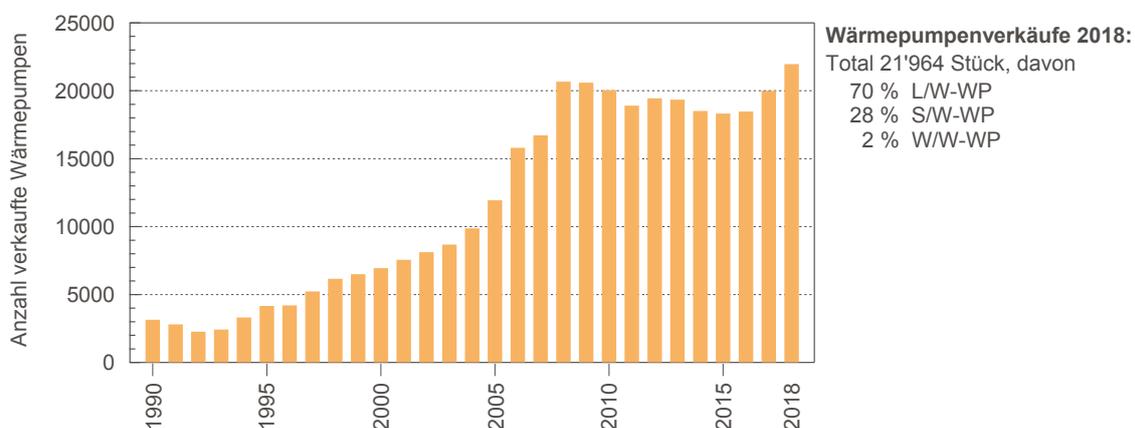


Bild 2: Anzahl in der Schweiz verkaufte Wärmepumpen von 1980 bis 2018 (Quelle: FWS).

Für den Neubau im Ein- und Mehrfamilienhaussegment ist eine Vielzahl erprobter Lösungen verfügbar, so dass hier mehrheitlich Wärmepumpen verwendet werden. Der überwiegende Teil der neu erstellten Ein- und Mehrfamilienhäuser hat heute eine Wärmepumpe. Aber auch auf dem Sanierungsmarkt ist die Wärmepumpe auf dem Vormarsch. Der Bund, die Kantone und verschiedene Organisationen unternehmen grosse Anstrengungen für die Förderung und Verbreitung von Wärmepumpen. Allen voran die FWS unterstützt mit ihren Aktivitäten, das grosse Potenzial der Wärmepumpe in der Schweiz auszuschöpfen.

### Anforderungen an Wärmepumpen

Ursprünglich galt die Wärmepumpe schlicht als «Wärmeerzeuger», welcher Heizwärme und Warmwasser bereitstellt. Doch die Rolle der Wärmepumpe hat sich gewandelt und die Anforderungen sind heute vielfältig: Eine Wärmepumpe soll über einen weiten Bereich von Heizleistungen und Temperaturhuben und unter allen erdenklichen Bedingungen sicher, zuverlässig, effizient und wirtschaftlich arbeiten. Auch bei tiefsten Aussentemperaturen muss sie Warmwasser bereitstellen können; sie soll aber auch bei kleineren Temperaturhuben effizient arbeiten. Bild 3 veranschaulicht beispielhaft die breiten Anforderungen bezüglich Temperaturhub. Weiter soll eine Wärmepumpe bei maximaler Effizienz betrieben werden, trotzdem soll sie von aussen als «Ein/Aus-Device» zur Verfügung stehen und sich anbieten, eine bestimmte Energiemenge zu einer bestimmten Zeit zu erzeugen und damit einen Beitrag zur Stabilisierung des Stromnetzes zu leisten. Weiter wird die Wärmepumpe heute mit immer mehr Systemen «kombiniert», z.B. mit Photovoltaik, Solarthermie oder Eisspeichern.

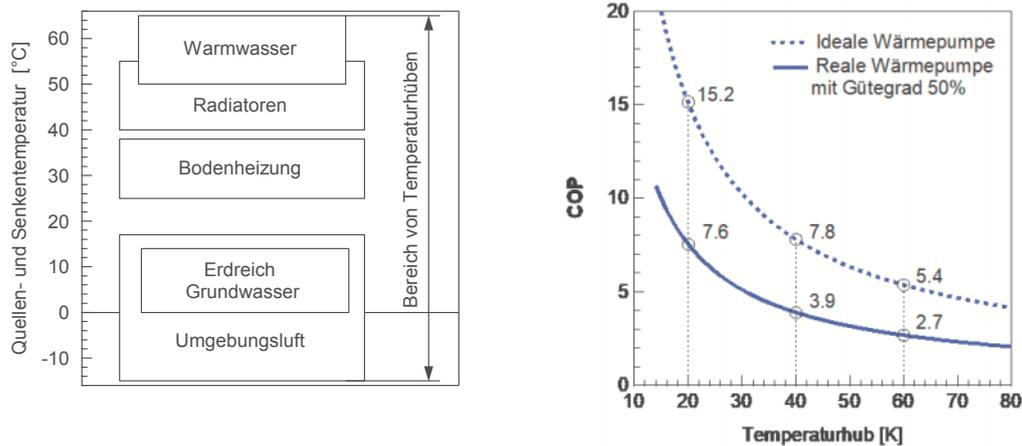


Bild 3: Links: Beispielhafte Temperaturbereiche von Wärmequellen und Wärmesenken. Rechts: Leistungszahl COP einer idealen Wärmepumpe (Carnot-Prozess) sowie einer realen Wärmepumpe mit einem Gütegrad von 50% in Funktion des Temperaturhubes ( $\Delta T_{\text{Hub}} = T_K - T_V$ ).

Wärmepumpen haben aber ihre Grenzen für den vollkommen flexiblen und trotzdem effizienten Einsatz in verschiedensten Systemen. Diese Tatsache soll der Beitrag in Erinnerung rufen: Man darf die Thermodynamik und Betriebscharakteristik von Wärmepumpen nicht vergessen.

### Stand der Technik

Die Wärmepumpentechnologie zur Bereitstellung von Heizwärme und Warmwasser hat einen hohen Stand der Technik erreicht. Die Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit sind heute mindestens so hoch wie diejenigen von Öl- und Gaskesseln. In den vergangenen Jahrzehnten wurden die Komponenten laufend weiterentwickelt und kostengünstiger gestaltet. In Wärmepumpen für kleine Heizleistungen haben sich Scroll-Kompressoren klar durchgesetzt, einige wenige Produkte verwenden Rollkolben-Kompressoren. Häufig werden heute drehzahlvariable Kompressoren eingesetzt, welche eine Leistungsregelung ermöglichen. Als Kondensatoren werden fast ausnahmslos gelötete Plattenwärmeübertrager verwendet; diese werden auch für Verdampfer von S/W-WP und W/W-WP eingesetzt. Bei L/W-WP kommen grossmehrheitlich Lamellen-Wärmeübertrager als Verdampfer zum Einsatz. Als Expansionsorgan haben sich elektronische Expansionsventile durchgesetzt, welche einen Betrieb mit kleinen und stabilen Sauggasüberhitzungen ermöglichen.

## Kältemittel

Kältemittel werden in Sicherheitsgruppen eingeteilt, welche die Toxizität und Brennbarkeit beschreiben. A steht für eine geringe Toxizität, B für eine grosse. Die angehängten Nummern 1 bis 3 kennzeichnen die Brennbarkeit, wobei 1 für «keine Flammenausbreitung», 2 für «geringe Flammenausbreitung» und 3 für «höhere Brennbarkeit» steht. Unterschieden wird zwischen natürlichen (z.B. Ammoniak, Kohlenwasserstoffe, Kohlendioxid) und synthetischen (z.B. FCKW, HFCKW, HFKW, FKW) Kältemitteln.

### Umweltauswirkungen

Bei Freisetzung haben die meisten Kältemittel eine negative Auswirkung auf die Atmosphäre, sei es durch ihre ozonabbauende Wirkung und/oder dass sie als Treibhausgas wirken. Zur Quantifizierung des Treibhauseffekts wird der GWP-Wert (Global Warming Potential) verwendet, welcher die Treibhauswirkung im Vergleich zu CO<sub>2</sub> beschreibt. Das Ozonabbau-potenzial wird mit dem ODP-Wert (Ozone Depletion Potential) beschrieben. Die Umsetzung des Montreal-Protokolls bewirkte die Einführung der HFKW-Kältemittel als Ersatz für die ozonabbauenden, chlorhaltigen FCKW-Kältemittel. Die HFKW-Kältemittel lösen zwar das Problem des Ozonabbaus, sie sind jedoch Treibhausgase. Bei gängigen HFKW-Kältemitteln reicht der GWP-Wert von 1'300 bis fast 4'000. Sie werden als starke Treibhausgase eingestuft und unterliegen deshalb gesetzlichen Regulierungen.

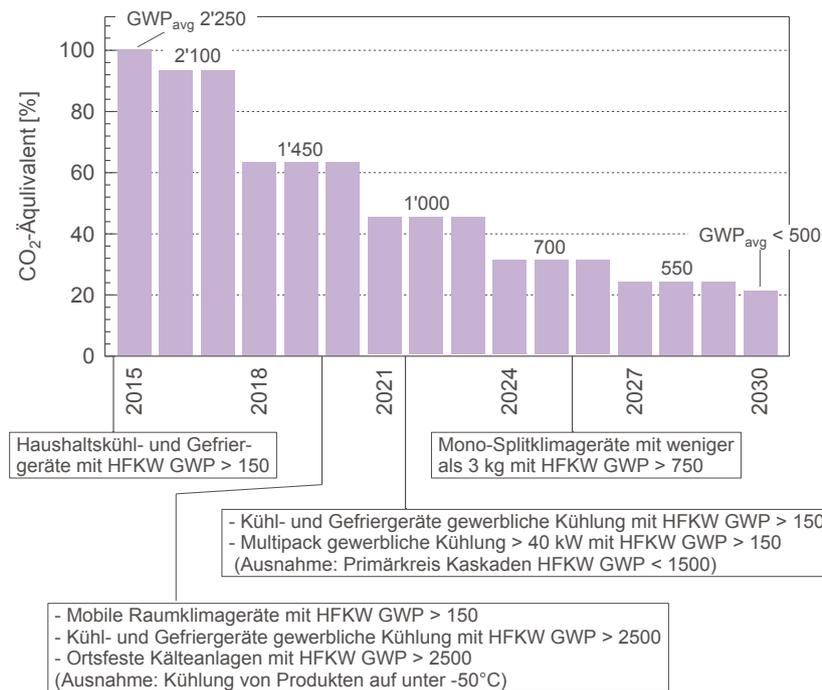


Bild 4: Illustration des HFKW «Phase-Down» mit Angabe der durchschnittlichen GWP-Werte.

### Regulierung durch die F-Gase-Verordnung

Auf EU-Ebene regelt die «F-Gase-Verordnung» den Einsatz von Kältemittel. Um die Klimaziele zu erreichen sieht die Verordnung für den EU-Markt eine stufenweise Reduzierung von Kältemitteln mit hohem GWP vor. Bis 2030 sollen im Rahmen des sogenannten «Phase-Down»-Prozesses die Treibhausgasemissionen durch Kältemittel um 79% gesenkt werden (Bild 4). Neben den Verwendungs- und Inverkehrbringungsverboten wird durch die F-Gase-Verordnung ein Quotensystem eingeführt, um den «Phase-Down» umzusetzen. Die Reduktion von Kältemitteln mit hohen GWP-Werten erfolgt mit folgenden Massnahmen: (i) Schrittweise

Beschränkung von HFKW bis 2030 auf 20% des Standes von 2015, (ii) Erlass von Verwendungs- und Inverkehrbringungsverboten und (iii) Erweiterung der bestehenden Regelungen zu Dichtheitsprüfungen, Zertifizierungen, Entsorgung und Kennzeichnung.

### *Regulierung in der Schweiz*

Das Inverkehrbringen von Kältemitteln ist in der Schweiz durch den Anhang 2.10 der Chemikalien-Risikoreduktions-Verordnung (ChemRRV, neuste Änderungen 17.4.2019) reguliert. Die ChemRRV unterscheidet zwischen in der Luft stabilen (FKWs) und nicht stabilen Kältemitteln (natürliche Kältemittel und HFO). Während die natürlichen Kältemittel und die HFOs in ihrer Anwendung vor allem durch die Sicherheitsanforderungen gemäss SN EN 378 beschränkt sind, existieren für die in der Luft stabilen Kältemittel Regulierungen, welche abhängig von der Anwendung, der Leistung und der Kältemittelfüllmenge sind.

### *Einsatz von Kältemitteln in Wärmepumpen in der Schweiz*

Die Auswertung der Prüflisten des Wärmepumpen-Testzentrums in Buchs zeigt ein klares Bild zu den verwendeten Kältemitteln (Tabelle 1). Es werden nahezu ausschliesslich Sicherheitskältemittel der Sicherheitsgruppe A1 eingesetzt (FKW/HFKW mit GWP > 1'400). Diese sind einfach in der Handhabung und erlauben eine einfache Konstruktion der Wärmepumpe.

System	Kältemittel	Kategorie	GWP	Gruppe	Anzahl	Anteil	Anzahl total
Luft/Wasser-Wärmepumpen	R410A	FKW/HFKW Gemisch	2'090	A1	72	62%	116
	R134a	HFKW	1'430	A1	3	3%	
	R407C	FKW/HFKW Gemisch	1'770	A1	37	32%	
	R404A	FKW/HFKW Gemisch	3'920	A1	4	3%	
Sole/Wasser- und Wasser/Wasser-Wärmepumpen	R410A	FKW/HFKW Gemisch	2'090	A1	54	36%	151
	R134a	HFKW	1'430	A1	19	13%	
	R407C	FKW/HFKW Gemisch	1'770	A1	76	50%	
	R290	KW	3	A3	2	1%	
Wärmepumpenboiler	R410A	FKW/HFKW Gemisch	2'090	A1	1	2%	66
	R134a	HFKW	1'430	A1	64	64%	
	R290	KW	3	A3	1	2%	

Tabelle 1: Verwendete Kältemittel in den am Wärmepumpen-Testzentrum geprüften Wärmepumpen (Quelle: Wärmepumpen-Testzentrum WPZ, Buchs; Prüflisten Stand 30.4.2019).

## Effizienz von Wärmepumpen

### Entwicklung der Energieeffizienz

Das Heizen mit Wärmepumpen ist schon lange bekannt, eine weite Verbreitung hat jedoch erst in den letzten rund 30 Jahren stattgefunden. In diesem Zeitraum wurden grosse technische Fortschritte erzielt und die Effizienz gesteigert. Seit 1993 werden Wärmepumpen im akkreditierten Wärmepumpen-Testzentrum nach geltenden Normen geprüft. Bild 5 zeigt die Entwicklung der durchschnittlichen Leistungszahlen von L/W-WP und S/W-WP seit 1993. Die Leistungszahlen stagnieren in den letzten Jahren. Im Markt herrscht ein hoher Preisdruck; es ist wenig Spielraum für effizientere Produkte mit höheren Produktionskosten vorhanden. Entwicklungsanstrengungen zielen eher auf die Reduktion der Produktionskosten bei mindestens gleichbleibender Effizienz ab. Der hohe Preisdruck führt auch dazu, dass Schweizer Unternehmen teilweise vermehrt auf Handelsprodukte anstelle von Eigenentwicklungen setzen.

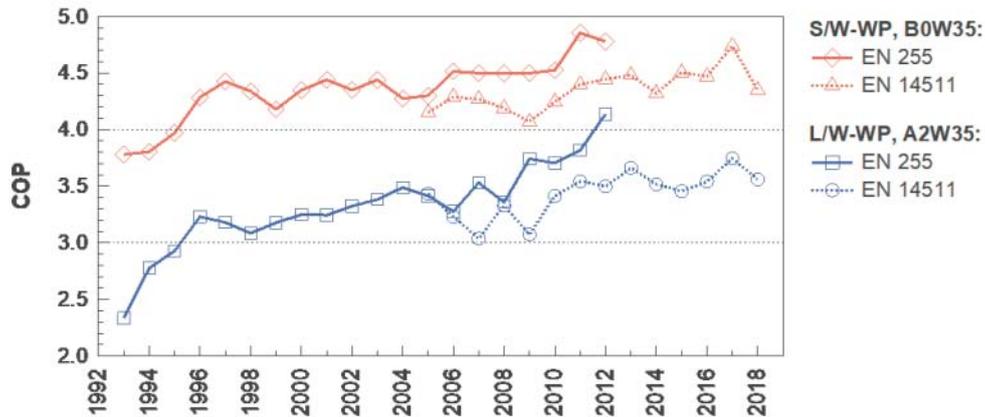


Bild 5: Entwicklung der im WPZ ermittelten COP-Werte (jährliche Durchschnittswerte) von L/W- und S/W-WP zwischen 1993 und 2018 (Quelle: Wärmepumpen-Testzentrums, Buchs).

### Bewertung der Effizienz

Die thermodynamisch einwandfreie Bewertung von Heizsystemen mit Wärmepumpen ist eine wichtige Voraussetzung, um Potenziale für Effizienzsteigerungen zu identifizieren. Energetische Betrachtungen sind dazu notwendig, aber nicht hinreichend. Eine anschauliche Bewertung gelingt mit Exergie-Analysen: Die Ergebnisse sind einfach interpretierbar und der Nutzen von Optimierungsmassnahmen kann unmittelbar erfasst und quantifiziert werden.

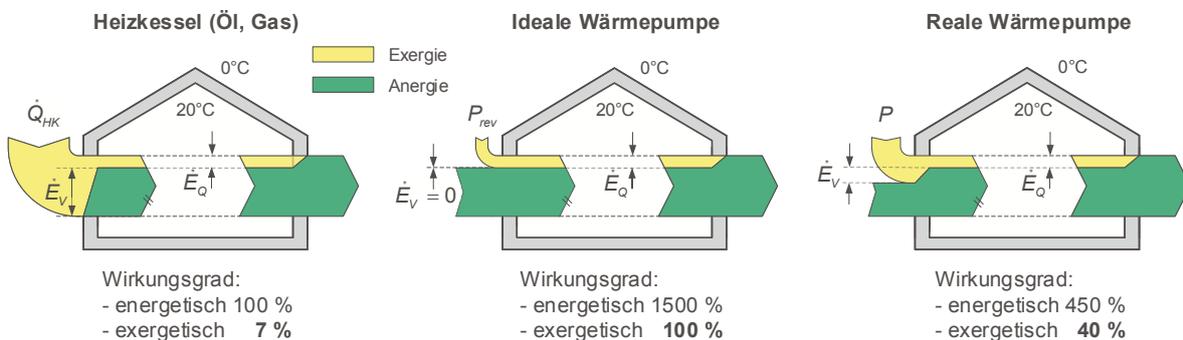


Bild 6: Energetischer und exergetischer Vergleich zwischen Heizkessel, idealer und realer Wärmepumpe (Wärmestrom nicht massstäblich dargestellt).

Das Heizen ist eine thermodynamische Grundaufgabe. Durch die Wände fliesst ein Wärmestrom vom Raum zur Umgebung, dabei wird die Energie entwertet: Exergie wird unwiderruflich in Anergie umgewandelt. Beim Heizen ersetzt der zugeführte Exergiestrom den Exergieverluststrom des irreversiblen Wärmedurchgangs. Dieser Exergiestrom beträgt:

$$\dot{E}_Q = \left(1 - \frac{T_U}{T_R}\right) \cdot \dot{Q}$$

Öl- und Gasheizungen sind nicht geeignet zum effizienten Heizen. Der grösste Teil der Exergie wird vernichtet (Bild 6). Der exergetische Wirkungsgrad ist mit 7% bedenklich tief, 93% der zugeführten Exergie geht bei der Verbrennung und im Heizsystem verloren. Ganz anders bei der Wärmepumpe: Der exergetische Wirkungsgrad der idealen, reversiblen Wärmepumpe beträgt 100%: Sie benötigt gerade so viel Exergie wie durch den Wärmedurchgang durch die Wände verloren geht, die Differenz wird einer Wärmequelle entnommen (reine oder grössten-

teils Energie). Perfekt arbeiten reale Wärmepumpen natürlich nicht. Die elektrische Antriebsleistung ist exakt um die Summe aller auftretenden Exergieverluste grösser als die Antriebsleistung der idealen Wärmepumpe. Für Optimierungen sollte man also dort ansetzen, wo die grössten Exergieverluste auftreten. Der links-laufende Carnot-Kreisprozess zwischen der Umgebungstemperatur  $T_U$  und der Raumtemperatur  $T_R$  stellt den reversiblen Vergleichsprozess für die Heizaufgabe dar. Die Leistungszahl ist

$$\varepsilon_{H,rev} = \frac{q_H}{w_{rev}} = \frac{T_R}{T_U - T_R} = \frac{T_R}{\Delta T_{Hub, ideal}},$$

wobei  $q_H$  die dem Raum zuzuführende Heizwärme und  $w_{rev}$  die aufzuwendende reversible Arbeit ist. Der Carnot-Prozess (Index C) zwischen der Verdampfungstemperatur  $T_V$  und Kondensationstemperatur  $T_K$  ist ein irreversibler Vergleichsprozess mit der Leistungszahl

$$\varepsilon_{WP,C} = \frac{q_H}{w_C} = \frac{T_K}{T_K - T_V} = \frac{T_K}{\Delta T_{Hub}}.$$

Exakt müsste mit der thermodynamischen Mitteltemperatur der Wärmaufnahme und -abgabe gerechnet werden. Der Fehler durch Verwendung von  $T_V$  und  $T_K$  ist für die Praxis jedoch vernachlässigbar. Bei der realen Wärmepumpe entspricht der Nutzen dem abgegebenen Wärmestrom  $\dot{Q}_K$  und der Aufwand der Kompressorleistung  $P$ . Die innere Leistungszahl, d.h. auf den Kreisprozess des Kältemittels bezogen, ist definiert durch ( $h$  = spezifische Enthalpie):

$$\varepsilon_{WP} = \frac{\dot{Q}_K}{P_i} = \frac{q_K}{w_i} = \frac{h_2 - h_3}{h_2 - h_1}$$

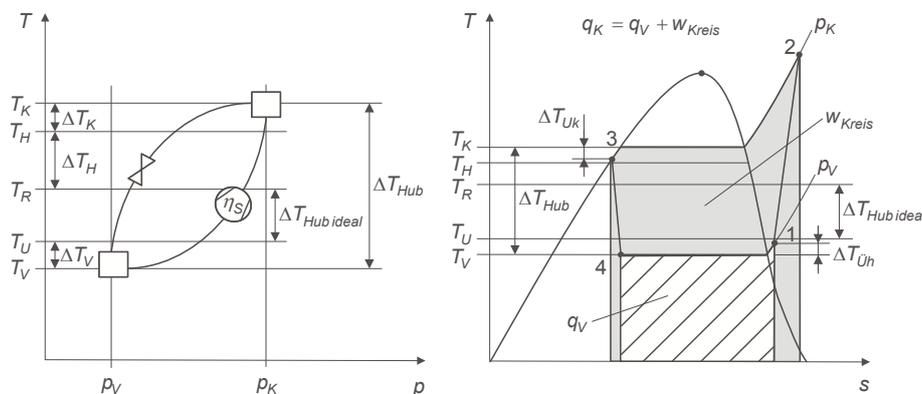


Bild 7: Links: Temperaturen und Temperaturgradienten und Drücke des WP-Prozesses. Rechts: T,s-Diagramm mit Bezeichnung der Zustandspunkte. Indizes: U = Umgebung, V = Verdampfung, K = Kondensation, H = Heizsystem, Uh = Überhitzung, Uk = Unterkühlung, Kreis = Kreisprozess.

In der Praxis werden Wärmepumpen mit der äusseren Leistungszahl, dem momentanen Coefficient of Performance (COP) bewertet:

$$COP_{WP} = \frac{\dot{Q}_K}{P_{el}}$$

Zu einem COP-Wert gehört die Angabe des Quellen- und Senkenzustands, ansonsten ist die Aussagekraft gering. Weitere praktische Bewertungsgrössen sind die Jahresarbeitszahl (JAZ) sowie der Seasonal Coefficient of Performance (SCOP). Bei der JAZ werden die über den Zeitraum eines Jahres erzeugte Wärmeenergie und die aufgewendete elektrische Energie miteinander verglichen (z.B. ermittelt aus einer Feldmessung):

$$JAZ_{WP} = \frac{\int_0^{1 \text{ Jahr}} \dot{Q}_K dt}{\int_0^{1 \text{ Jahr}} P_{el} dt} = \frac{Q_{K, 1 \text{ Jahr}}}{W_{el, 1 \text{ Jahr}}}$$

Der SCOP hingegen basiert auf im Labor ermittelten COP-Werten und Heizleistungen bei mehreren Prüfpunkten mit unterschiedlichen Quellen- und Senktemperaturen. Der SCOP wird auf Basis dieser Werte für verschiedenen Klimazonen berechnet (EN 14825).

Immer ist die betrachtete Systemgrenze klar anzugeben (nur Wärmepumpe, mit Ventilator/Pumpe Quellenseite, Pumpe(n) Senkenseite usw.). COP, JAZ und SCOP vergleichen Energien mit unterschiedlicher Qualität, sie geben keine Auskunft zur Prozessgüte oder zu Verlusten. Anders der exergetische Wirkungsgrad: Er ermöglicht die thermodynamisch einwandfreie Bewertung. Folgende exergetische Wirkungsgrade sind besonders wichtig:

Mit dem *inneren exergetischen Wirkungsgrad*, oft als *Gütegrad* bezeichnet, wird der Wärmepumpen-Kreisprozess zwischen den Temperaturniveaus  $T_V$  und  $T_K$  bewertet:

$$\eta_{ex,WP} = \frac{\dot{Q}_H \cdot \frac{T_K - T_V}{T_K}}{P_{el}} = \frac{COP_{WP}}{\varepsilon_{WP,C}} = \text{Gütegrad der Wärmepumpe} = \zeta_{WP}$$

Der Gütegrad umfasst den totalen Temperaturhub, schliesst also die Temperaturgefälle in Verdampfer und Kondensator sowie im Heizwärmeverteilersystem mit ein, aber nicht deren Exergieverluste. Der totale von der Wärmepumpe zu leistende Temperaturhub ist:

$$\Delta T_{Hub} = T_K - T_V = \Delta T_{Hub \text{ ideal}} + \Delta T_V + \Delta T_K + \Delta T_H$$

Mit dem *äusseren exergetischen Wirkungsgrad* wird das gesamte Heizsystem (HS) bewertet. Die Exergie der Heizwärme wird mit der Umgebungs- und Raumtemperatur gebildet. Er berücksichtigt *alle* in der Wärmepumpe und im Heizsystem auftretenden Exergieverluste  $\dot{E}_V$ :

$$\eta_{ex,HS} = \frac{\dot{Q}_H \cdot \frac{T_R - T_U}{T_R}}{P_{el}} = \frac{COP_{WP}}{\varepsilon_{H,rev}} = 1 - \frac{\sum \dot{E}_V}{P_{el}}$$

Die letzte Gleichung zeigt die «schädliche Wirkung» der Exergieverluste: Jeder Exergieverlust im System reduziert den exergetischen Wirkungsgrad und es muss entsprechend mehr Exergie (elektrische Leistung) aufgewendet werden. Die Exergieverluste in den Wärmepumpen-Teilprozessen und im Heizsystem werden mittels Exergie-Analyse ermittelt. Durch Approximationen gelangen übersichtlich diskutierbare Gleichungen, ohne dass die Genauigkeit leidet. In Tabelle 2 sind beispielhaft die Gleichungen für die L/W-WP zusammengestellt.

Die Exergieanalyse ist ein hervorragendes Werkzeug zur Analyse von Heizsystemen mit Wärmepumpen, mit dem (im Gegensatz zur rein energetischen Betrachtungsweise) Verlustherde identifiziert und quantifiziert werden können. Sie zeigen unmissverständlich auf, wo der Hebel für Effizienzsteigerungen angesetzt werden muss. Der Wärmepumpenprozess sollte, soweit es das Kriterium der Wirtschaftlichkeit erlaubt, dem reversiblen Prozess angeglichen werden, d.h. das Ausmass der unvermeidlichen Exergieverluste muss minimiert werden. *Die Resultate einer Exergieanalyse sollten Massstab sein für jede Bewertung von Systemen mit Wärmepumpen sowie für die Evaluation von jedem Entwicklungsvorhaben.*

Exergieverlust	Bestimmungsgleichung
Kompressor (Index Kp)	$\dot{E}_{V_{Kp}} = \dot{m}_{KM} \cdot T_U \cdot (s_2 - s_1) \approx \dot{m}_{KM} \cdot \Delta h_V \cdot \frac{1}{\varepsilon_{WP,C}} \cdot \left( \frac{1}{\eta_s} - 1 \right)$
Expansionsventil (Ex)	$\dot{E}_{V_{Ex}} = \dot{m}_{KM} \cdot T_U \cdot (s_4 - s_3) \approx \dot{m}_f \cdot c_{pl} \cdot \frac{\Delta T_{Hub}}{2 \cdot \varepsilon_{WP,C}}$
Verdampfer (V)	$\dot{E}_{V_V} = \dot{Q}_V \cdot T_U \cdot \frac{\Delta T_V}{T_V \cdot (T_V + \Delta T_V)} \approx \dot{Q}_V \cdot T_U \cdot \frac{\Delta T_V}{T_V^2}$
Kondensator (K)	$\dot{E}_{V_K} = \dot{Q}_H \cdot T_U \cdot \frac{\Delta T_K}{T_H \cdot (T_H + \Delta T_K)} \approx \dot{Q}_H \cdot T_U \cdot \frac{\Delta T_K}{T_H^2}$
Heizsystem (H)	$\dot{E}_{V_H} = \dot{Q}_H \cdot T_U \cdot \frac{T_H - T_R}{T_H \cdot T_R} = \dot{Q}_H \cdot T_U \cdot \frac{\Delta T_H}{T_H \cdot T_R}$

Tabelle 2: Gleichungen für die Exergieverluste der L/W-WP und des Heizsystems. ( $s$  = spez. Entropie,  $KM$  = Kältemittel,  $\Delta h_V$  = spez. Verdampfungsenthalpie,  $\eta_s$  = Isentropenwirkungsgrad).

### Erkannte Verbesserungspotenziale

Die Forschung und die Branche haben in den vergangenen Jahren Verbesserungspotenziale erkannt und aufgegriffen. Die grössten Fortschritte wurden in der Kompressor-, Ventilator- und Pumpentechnologie erzielt: Die «Invertertechnologie» eröffnet interessante Möglichkeiten für die Prozessführung und ermöglicht markante Effizienzsteigerungen.

Die Ursache für die mässig gute Effizienz von Wärmepumpen mit Ein/Aus-Regelung liegt in der ungünstigen Betriebscharakteristik, welche aus der Charakteristik des drehzahlkonstanten Kompressors resultiert. Mit steigender Umgebungstemperatur sinkt die vom Gebäude erforderliche Heizleistung und Heiztemperatur. Demgegenüber ist das Verhalten von L/W-WP mit drehzahlkonstantem Kompressor gerade konträr: Je kleiner die erforderliche Heizleistung und Heiztemperatur, umso höher sind die erzeugte Heizleistung und Heiztemperatur. Ein ähnliches Verhalten weisen auch S/W-WP mit drehzahlkonstanten Kompressoren auf: Unter Annahme ungefähr konstanter Erdreichtemperaturen bleibt die erzeugte Heizleistung unabhängig von der Umgebungstemperatur nahezu konstant. Dies hat zur Folge, dass die Temperaturgefälle für die Wärmeübertragung mit steigender Umgebungstemperatur bei Ein/Aus-geregelten L/W-WP ansteigen, während sie bei S/W-WP mit Ein/Aus-Regelung ungefähr konstant bleiben. Mit steigender Umgebungstemperatur entsteht eine deutliche Diskrepanz zwischen erforderlicher und erzeugter Heiztemperatur und der erzeugte Temperaturhub nimmt nicht so stark ab, wie er eigentlich könnte – unnötig grosse Exergieverluste sind die Folge.

Damit die Temperaturgefälle für die Wärmeübertragung mit steigender Umgebungstemperatur abnehmen statt zunehmen, muss die Diskrepanz zwischen erforderlicher und erzeugter Heizleistung und Heiztemperatur vermieden werden. Dazu muss der umgewälzte Kältemittelmassestrom durch Drehzahlregelung des Kompressors geregelt werden. In Bild 8 sind die Exergieflussbilder für den Ein/Aus-Betrieb und den leistungsgeregelten Betrieb einer L/W-WP dargestellt. Die subtraktive Wirkung der Exergieverluste wird unmittelbar sichtbar:

$$\eta_{ex,HS,i} = 1 - \frac{\dot{E}_{V_{Kp}}}{P_i} - \frac{\dot{E}_{V_{Ex}}}{P_i} - \frac{\dot{E}_{V_V}}{P_i} - \frac{\dot{E}_{V_K}}{P_i} - \frac{\dot{E}_{V_H}}{P_i}$$

Durch die kontinuierliche Leistungsregelung kann die Effizienz von L/W-WP im Vergleich zu Werten aus Feldmessungen Ein/Aus-geregelter L/W-WP um bis zu 70% erhöht werden [1]. Bemerkenswert ist, dass das Potenzial bei Sanierungen besonders gross ist. Bei S/W-WP werden Verbesserungen der JAZ bis zu 12% erreicht [2]. Das Potenzial ist geringer als bei L/W-WP, weil der Quellenzustand über die gesamte Heizsaison relativ konstant ist. Die kontinuierliche Leistungsregelung stellt den grössten Technologiesprung der vergangenen Jahre dar. Keine andere Optimierung hat zu ähnlich grossen Effizienzverbesserungen geführt.

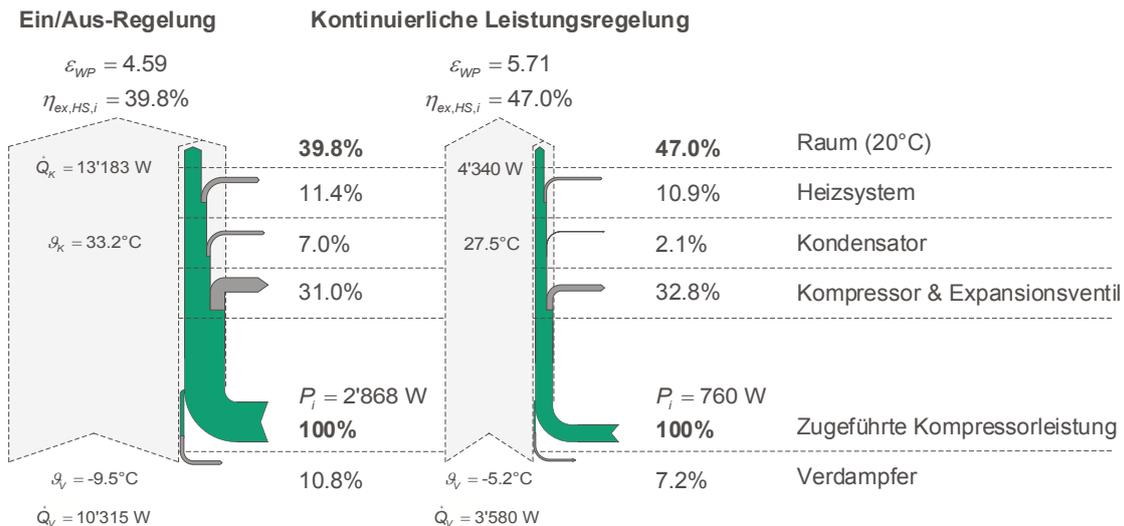


Bild 8: Energie/Exergie-Flussbilder eines Heizsystems mit Ein/Aus-geregelter L/W-WP (links) und kontinuierlich leistungsgeregelter L/W-WP für 0°C Umgebungstemperatur. Die Exergieverluste sind einfachheitshalber auf die innere Kompressorleistung bezogen.

## Entwicklungstendenzen und Forschungsbedarf

In den vergangenen Jahrzehnten waren Schweizer Forschungsinstitutionen und Unternehmen massgeblich an der Entwicklung der Wärmepumpentechnologie beteiligt. Zur weiteren Verbesserung der Energieeffizienz, Betriebssicherheit, Wirtschaftlichkeit und Nachhaltigkeit von Wärmepumpen sind weiterführende Forschungsaktivitäten erforderlich. Während sich einige Entwicklungstendenzen in der Branche bereits abzeichnen, wurden andere Aspekte bisher noch wenig aufgegriffen. Unter anderem gibt es in folgenden Themengebieten, welche nachfolgend erläutert werden, weiteren Forschungsbedarf:

1. Wärmepumpentechnologie
2. Low-GWP Kältemittel
3. Intelligente Regelungen
4. Digitalisierung

### 1) Wärmepumpentechnologie

Heutige Wärmepumpen sind weitgehend ausgereift – sie arbeiten effizient und weisen eine hohe Zuverlässigkeit und Betriebssicherheit auf. Zwar wird die weitere Optimierung des Kreisprozesses angestrebt, es sind jedoch nur noch inkrementelle Effizienzsteigerungen zu erwarten. Die Optimierung von Wärmeübertragern und Expansionsorganen wird ebenfalls zu verhältnismässig geringen Effizienzverbesserungen führen. Das grösste Verbesserungspotenzial

weisen Kompressoren auf. Hier sind verschiedene Entwicklungen im Gange, beispielsweise die Entwicklung von ölfreien, gasgelagerten Turbo-Kompressoren.

Eine Entwicklungstendenz zeichnet sich im Bereich von modular kaskadierbaren Wärmepumpen-Systemen ab. Obwohl eher für grössere Heizleistungen (ab rund 35 kW) geeignet, sollen sie hier nicht unerwähnt bleiben. Die Vorteile solcher Systeme sind weitreichend: höhere Betriebssicherheit infolge (Teil-)Redundanz, verbesserte Leistungsabstufung und Regelbarkeit, geringere Schallemissionen, vereinfachte Einbringung in Gebäude, Möglichkeit einer seriellen Fertigung sowie höhere Wirtschaftlichkeit bei der Umsetzung. Modular kaskadierbare Wärmepumpen stellen einen möglichen Weg vom Anlagenbau und Projektgeschäft hin zum kostengünstigen Produktgeschäft dar. Die Kaskadierung stellt hohe Ansprüche an den Systemaufbau, die Hydraulik und MSR-Technik. Entwicklungsbedarf besteht nicht nur auf Seiten der Anlagenhersteller, sondern auch auf Seite der planenden und umsetzenden Branche.

## 2) Low-GWP Kältemittel

Aufgrund des «Phase-Down» der HFKW-Kältemittel ist die Branche gefordert, Wärmepumpen für neue Kältemittel zu entwickeln. Als Nachfolge-Kältemittel kommen z.B. Hydrofluorolefine (HFO – R1234yf, R1234ze) infrage, welche bereits für die Fahrzeugklimatisierung eingesetzt werden. Ebenfalls möglich ist der Einsatz weiterer synthetischer Kältemittel mit geringeren GWP-Werten, wie z.B. R32, R454B, R452B, R455A, R454C, R450A und R513A. Sämtliche dieser so genannten «Übergangskältemittel» weisen GWP-Werte von 150 bis 700 auf und basieren teilweise auf der Mischung von R32 und R1234yf. Alternativ können natürliche Kältemittel (z.B. R290, R744) verwendet werden, welche ebenfalls geringe GWP-Werte aufweisen und deshalb von den genannten Regulierungen nicht betroffen sind.

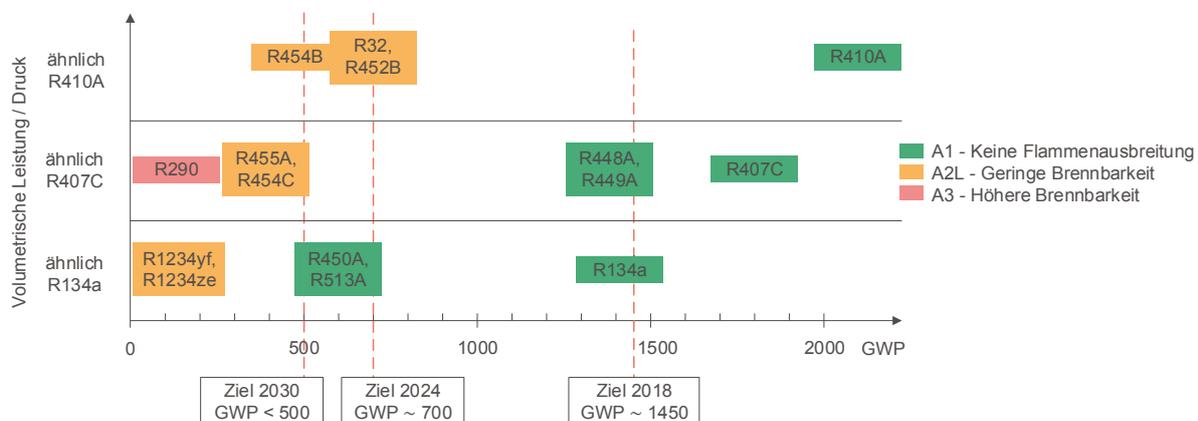


Bild 9: Übersicht über gängige Kältemittel sowie mögliche Nachfolge-Kältemittel.

Nahezu alle verfügbaren Low-GWP Kältemittel unterliegen erhöhten Sicherheitsanforderungen (A2L oder A3). Daneben ergeben sich weitere Herausforderungen: Beispielsweise kann die Beständigkeit der Motorlager von Kompressoren beim Einsatz bestimmter Kältemittel kritisch bzw. unzureichend sein (insbesondere bei R454-Kältemitteln). Die Sicherheitsanforderungen und technischen Herausforderungen gestalten die Entwicklung neuer Produkte schwierig und aufwändig. Die normativen Ansätze, welche bei Verwendung von A2L- oder A3-Kältemitteln anzuwenden sind, können zu einer markanten Erhöhung der Herstellungskosten von Wärmepumpen führen. Auch an den Aufstellungsort werden erhöhte Anforderungen gestellt (SN EN 378), was zu signifikanten Mehrkosten bei der Umsetzung führt. Längerfristig ist eine konsequente Verwendung natürlicher Kältemittel wünschenswert, was die Sicherheitsanforderungen bezüglich Brennbarkeit noch weiter verschärfen wird (z.B. R290).

Im Hinblick auf die zukünftige Verwendung synthetischer Low-GWP oder natürlicher Kältemittel ist es notwendig, effiziente, zuverlässige und wirtschaftliche Produkte und Systeme zu entwickeln. In diesem Zusammenhang sind normative Anpassungen wünschenswert (SN EN 378). Zur Schaffung der Grundlagen sind gezielte Forschungsaktivitäten notwendig. Konkret müssen z.B. einfache und kostengünstige technische Konzepte für den sicheren Umgang mit brennbaren Kältemitteln entwickelt und deren Wirksamkeit nachgewiesen werden. Weiter muss der Einfluss der Low-GWP Kältemittel auf die Effizienz detailliert untersucht werden.

### 3) Intelligente Regelungen

#### a) Vermeidung von Effizienzeinbussen mittels adaptiver Leistungsregelung

Kontinuierlich geregelte Wärmepumpen haben ein grosses Potenzial zur Erreichung hoher Jahresarbeitszahlen. Dies gilt besonders für L/W-WP, da diese stark ändernden Quellentemperaturen ausgesetzt sind. Im Feldbetrieb wird das volle Potenzial der Leistungsregelung noch nicht ausgeschöpft. Die Effizienzwerte liegen teilweise deutlich unter den in den Datenblättern deklarierten Werten. Hauptgründe dafür sind insbesondere die implementierte Regelstrategie sowie Fehleinstellungen durch Servicefachleute und/oder den Betreiber.

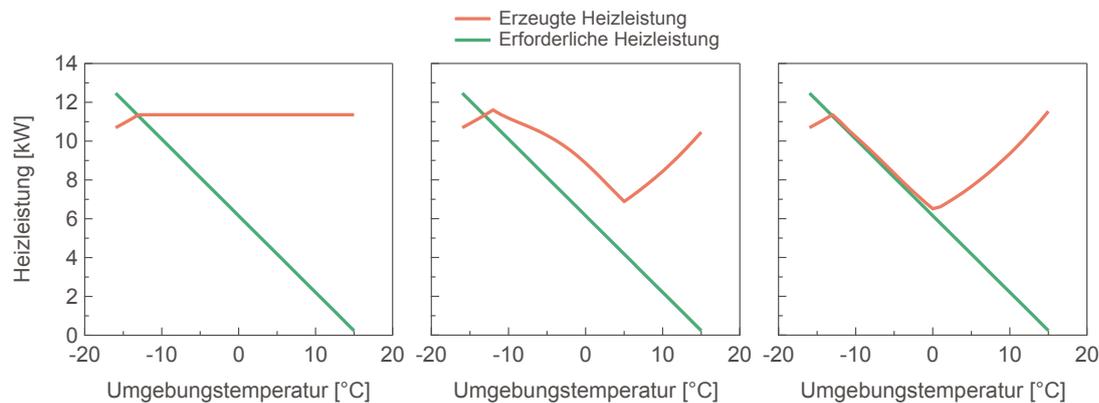


Bild 10: Gängige Regelstrategien von leistungsgeregelten Wärmepumpen – beispielhafte Verläufe für L/W-WP. Links: Regelung von Kompressor und Zusatzaggregaten auf konstante Heizleistung. Mitte: Steuerung von Kompressor und Zusatzaggregaten nach Witterungstemperatur. Rechts: Regelung von Kompressor und Zusatzaggregaten nach Heizkurve (Quelle: Alera energies AG).

Leistungsgeregelte Wärmepumpen verfügen über unterschiedliche Regelstrategien. Wird die Heizleistung unabhängig vom Bedarf des Gebäudes auf eine konstante Heizleistung geregelt (Bild 10, links), kann das Potenzial nur unzureichend ausgenutzt werden. Die mit steigender Umgebungstemperatur resultierende Diskrepanz zwischen erforderlicher und erzeugter Heizleistung wird nur geringfügig reduziert. Signifikante Verbesserungen der Effizienz im Teillastbetrieb sind bei dieser Regelstrategie nicht möglich. Nur wenige Hersteller wenden sie an.

Einzelne Hersteller verwenden keine eigentliche Regelung, sondern eine Steuerung von Kompressor und Zusatzaggregaten in Abhängigkeit der Umgebungstemperatur (Bild 10, Mitte). Bei optimaler Einstellung der Parameter können die erzeugte Heizleistung ausreichend gut der erforderlichen Heizleistung angepasst und das Potenzial ausreichend gut genutzt werden. Bei ungünstiger Parametereinstellung resultieren jedoch markante Effizienzeinbussen.

Die meisten Hersteller setzen auf eine Regelung von Kompressor und Zusatzaggregaten nach Heizkurve (Bild 10, rechts). Bei dieser Regelstrategie hat die Einstellung der Heizkurve auf dem Heizungsregler bzw. der Wärmepumpe einen massgeblichen Einfluss auf das Betriebsverhalten und die Effizienz. Wird die Heizkurve unnötig hoch eingestellt, geht der Vorteil der

Leistungsregelung unter Umständen vollständig verloren: Die Wärmepumpe arbeitet im Teillastbetrieb bei zu hoher Leistung. Es resultieren unnötig tiefe Leistungszahlen (Bild 11, links), welche infolge der Verluste des Frequenzumrichters unter den Effizienzwerten herkömmlicher Ein/Aus-geregelter Wärmepumpen liegen können. Wird die Heizkurve jedoch bestmöglich gemäss effektivem Bedarf eingestellt, ist ein kontinuierlich leistungsgeregelter Betrieb der L/W-WP bei hoher Effizienz möglich (Bild 11, rechts).

Die Einstellung der Heizkurve und/oder weiterer Parameter ist mit erheblichem Aufwand verbunden – mehrfache Anpassungen während des Betriebs sind unumgänglich. Diese Arbeiten sind weder dem Servicefachpersonal noch dem Betreiber zuzumuten. Damit das volle Potenzial der Leistungsregelung genutzt werden kann, ist die Entwicklung *adaptiver Regelungen* erforderlich. Fehleinstellungen bei der Inbetriebnahme werden damit irrelevant. Die Entwicklung solcher Regelungen bedingt umfangreiche Forschungsaktivitäten.

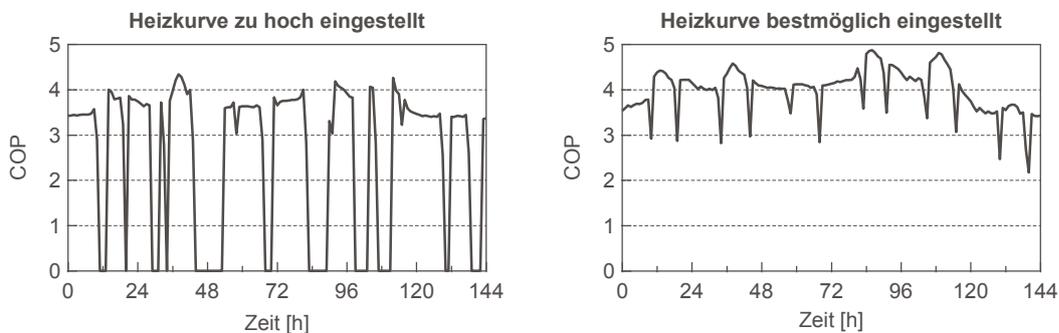


Bild 11: Verlauf des COP-Wertes über 6 Tage einer leistungsgeregelten L/W-WP in einem Niedrigenergiegebäude in Zürich mit «schlechter» und «guter» Einstellung der Heizkurve.

#### b) Intelligente Integration und Regelung von Wärmepumpen in Systemen

Weiteres Potenzial für den ressourcenschonenden Einsatz von Wärmepumpen bietet die Kombination von Wärmepumpen und Photovoltaik (PV). Das Potenzial ist in Niedrigenergiehäusern besonders gross, wo der Warmwasser-Anteil am Gesamtwärmebedarf hoch ist. Wird die PV-Anlage mit einer Einmalvergütung betrieben, besteht für den Betreiber ein wirtschaftlicher Anreiz, einen möglichst hohen Anteil des produzierten Stromes selber zu verbrauchen. Intelligente Eigenverbrauchsoptimierungen mit Wärmepumpe und weiteren Verbrauchern erreichen heute Eigenverbrauchsquoten von über 90%. An sonnigen Tagen in der Übergangszeit reduzieren sich die Kosten für die Heizung und Warmwasseraufbereitung auf null.

Der Markt bietet für die Eigenverbrauchsoptimierung verschiedene Systeme und Komponenten an. Die Schaffung einer optimalen Gesamtlösung ist jedoch aufgrund unzureichender Kommunikationsstandards der einzelnen Komponenten (Wechselrichter, Zähler, Eigenverbrauchsregler, Wärmepumpen usw.) schwierig und zeitaufwändig. Weiter sind die aktuell integrierten Standards (PV-Ready und/oder Smart-Grid-Ready) für eine einwandfreie Eigenverbrauchsoptimierung durch die Wärmepumpe oft unzureichend.

Bei der Planung und Realisierung sind viele Akteure beteiligt (Gebäudetechnik-, Elektro-, Solarplaner, Wärmepumpenhersteller, Installateure) und der Aufwand ist entsprechend gross. Damit nicht jede Anlage zum «Unikat» wird, sind einheitliche Schnittstellen und Standards für die Kombination von Wärmepumpen, PV-Anlagen und weiterer Komponenten (z.B. Ladestationen für Elektrofahrzeuge) anzustreben. Zur Schaffung solcher Standards sind Forschung,

Hersteller und Planer gefordert. Eine Möglichkeit könnte die Erhöhung der Intelligenz der Wärmepumpe darstellen: Wärmepumpen würden damit künftig nicht nur die Wärmebereitstellung, sondern auch die gezielte Eigenverbrauchsoptimierung übernehmen.

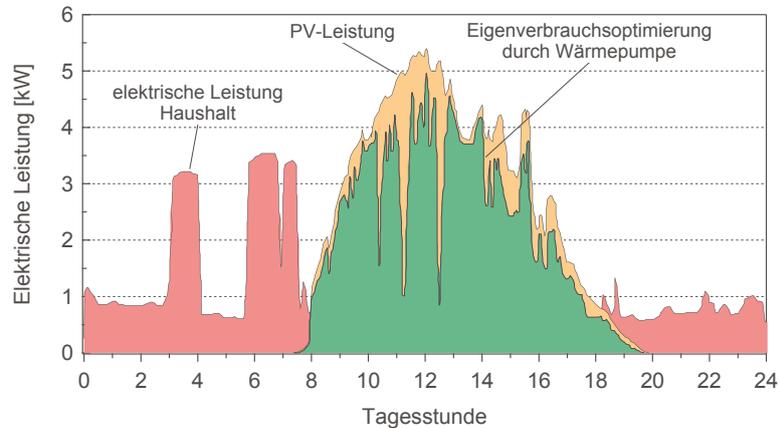


Bild 12: Beispiel Eigenverbrauchsoptimierung von PV-Strom durch L/W-WP. PV 6 kWp, L/W-WP mit kontinuierlicher Leistungsregelung, 15 kW Nennheizleistung. Für diesen Tag (Übergangszeit) beträgt die Eigenverbrauchsquote 82% und der Autarkiegrad 63% (Quelle: Alera energies AG).

#### 4) Digitalisierung

Moderne Wärmepumpen verfügen oft über Touchdisplays, Internetanbindung, App-Lösungen und weitere Kommunikationsschnittstellen. Die «Features» werden durch die rasanten Entwicklungen im Bereich der Smart-Home Lösungen forciert, dienen teilweise jedoch eher als Marketinginstrumente. Grosse Chancen bietet die Digitalisierung hingegen im Hinblick auf den häufig festzustellenden Performance-Gap beim Betrieb von Wärmepumpen. Zu dessen Vermeidung ist die Erfassung verschiedener Daten zwingend notwendig. Die Installation der erforderlichen Messtechnik ist mit erheblichen Mehrkosten verbunden.

Die internen Regelungen von Wärmepumpen verfügen häufig über einen hohen Grad an Intelligenz. Damit bieten sie grundsätzlich beste Voraussetzungen, um Effizienz und Betriebsverhalten des Systems selbständig auszuwerten. Performance-Gaps können erkannt und die Ursachen automatisch behoben oder über eine Schnittstelle gemeldet werden. Zukünftig könnten Wärmepumpen anhand von Datensätzen der Wärmepumpe sowie Metadaten des Gebäudes erkennen, ob die Wärmepumpe (zu) oft taktet, ob sie überdimensioniert oder ob die Heizkurve falsch eingestellt ist. Weiter könnten quantitative Abschätzungen zur System-Effizienz durchgeführt werden. Der Forschungsbedarf zur Schaffung solcher Funktionen ist gross und bedingt eine enge Zusammenarbeit von Herstellern und Forschungsinstitutionen.

Weiter bietet die Digitalisierung die Chance, Wärmepumpen in intelligenten Gesamtsystemen mit gegenseitiger Interaktion der Teilsysteme einzusetzen. Ein mögliches Beispiel ist das intelligente Lastmanagement von Gebäuden in Interaktion mit dem Elektrizitätsnetz und der Speicherkapazität von Elektrofahrzeugen. Die damit verbundenen Anforderungen an mögliche Kommunikationsschnittstellen und Funktionalitäten sind vielseitig und branchenübergreifend. Entsprechende Forschungsaktivitäten mit verschiedenen Akteuren sind notwendig.

## Schlussfolgerungen

Wärmepumpen leisten viel und ihre Bedeutung wird weiter zunehmen. Der breite Einsatz von Wärmepumpen für die Bereitstellung von Raumwärme und Warmwasser ist unumgänglich zur Erreichung der Klimaziele. Der Wärmepumpe gehört ohne Zweifel die Zukunft!

Die Komponenten und Anlagen sind ausgereift, betriebssicher und haben einen hohen Stand der Technik erreicht. Das grösste Verbesserungspotenzial liegt nicht mehr im Wärmepumpen-Kreisprozess oder in Einzelkomponenten, sondern in der Integration der Wärmepumpe in das Gesamtsystem und in der «Intelligenz» der Systeme. Die grossen Verluste entstehen im System – die Forschung und die Branche müssen die entsprechenden Herausforderung gemeinsam angehen. Auch die Umstellung auf neue Kältemittel bildet eine grosse Herausforderung.

Die Schweiz hält in der Forschung und Entwicklung weltweit an der Spitze mit. Das BFE-Forschungsprogramm trägt durch die Unterstützung von innovativen Vorhaben massgeblich dazu bei. Um die Effizienz, Wirtschaftlichkeit und Nachhaltigkeit von Wärmepumpen weiter zu verbessern, ist eine gezielte Förderung weiterhin sinnvoll. Gerade in Themen, welche von der Branche noch nicht aufgegriffen werden, ist eine Förderung wünschenswert. Durch Forschung und Entwicklung kann die Wertschöpfung in der Schweiz erhöht und ein substantieller Beitrag zur nachhaltigen Entwicklung im Gebäudebereich geleistet werden. Die enge Zusammenarbeit zwischen Forschung und Praxis ist dabei von entscheidender Bedeutung.

Wie erwähnt erhebt dieser Übersichtsbeitrag keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Es gibt zahlreiche weitere relevante Forschungsthemen wie beispielsweise die Optimierung der Abtauung, die Erschliessung neuer Wärmequellen, die Kombination mit weiteren Systemen (z.B. Solarthermie), die Entwicklung von Niederhub-Wärmepumpen, die Rolle der Wärmepumpe in Smart Grids oder industrielle Wärmepumpen. Nicht-konventionellen Anwendungen wie z.B. der Einsatz von Wärmepumpen in Elektrofahrzeugen und Haushaltsgeräten kommt ebenfalls eine immer grössere Bedeutung zu. Weiter wird in diesem Beitrag auch das Thema Schall bei L/W-WP nicht aufgegriffen. Die genannten und weitere Themen sind sehr relevant und ebenfalls Inhalt zukünftiger Forschungsvorhaben.

## Danksagung

Der Autor dankt dem Bundesamt für Energie für die finanzielle Unterstützung und vertrauensvolle Zusammenarbeit. Ein weiterer Dank geht an Herrn Lukas Gasser (Alera energies AG) für die wertvollen Diskussionen und Beiträge und an die Herren Dominic Zajonc, Stefan Flück und Lorenz Rast (HSLU) für die Unterstützung bei der Erstellung dieses Beitrages.

## Quellen

- [1] L. Gasser, I. Wyssen, M. Albert, M. Häusermann, M. Kleingries, B. Wellig: Effiziente Luft/Wasser-Wärmepumpen durch kontinuierliche Leistungsregelung, BFE, 2011.
- [2] L. Gasser, I. Wyssen, T. Käch, M. Kleingries, B. Wellig: Sole/Wasser-Wärmepumpen mit kontinuierlicher Leistungsregelung, Bundesamt für Energie BFE, 2015.

Ralf Dott, Christoph Messmer, Manuel Koch  
Institut Energie am Bau – FHNW

# Solarstrahlung als Energiequelle für die Wärmepumpe: Wie nutzen?

## Zusammenfassung

*Drei Konzepte zur Nutzung von Solarstrahlung als Energiequelle für die Wärmepumpe in kleineren Wohngebäuden wurden untersucht.*

*Jahressimulationen mit einem Regler zur PV-Überschuss-Nutzung mit der Wärmepumpe resultieren in einer Reduktion des Netzbezugs um 1 - 3% und einer Reduktion der Netzeinspeisung um 1 - 7%. Dies erhöht die energetische Autarkie, verringert aber die Energieeffizienz. Labortests geben einen Einblick in eine aktuelle Reglerumsetzung.*

*Die Nutzung von Solarstrahlung als Wärmequelle zeigt sich als deutlich weniger relevant als konvektive Wärmegewinne. Die Vermeidung des elektrischen Aufwands für einen Ventilator trägt wesentlich stärker zu einer verbesserten Systemeffizienz bei und zeigt einen interessanten Ansatz zur Systemoptimierung. Wasser wird als bestes Speichermedium für einen erdvergrabenen Latentspeicher identifiziert. Ein Schmelzpunkt von 0°C führt wegen der effizienten Nutzung von Erdwärme zur höchsten Systemeffizienz bei geringem Speichervolumen.*

*Bei PVT-Kollektoren als direkter Wärmequelle für Wärmepumpen sind die Anbindung an die konvektiven Wärmegewinne sowie die thermische Leitfähigkeit im Modul für eine gute Energieeffizienz entscheidend.*

## Summary

*Three concepts using solar irradiation as energy source for heat pumps in smaller dwellings were evaluated.*

*Annual simulations with a controller using surplus PV electricity in a heat pump result in a reduction of grid electricity consumption of 1 – 3% and a reduction of grid feed-in of 1 – 7%. This increases the energetic self-sufficiency, but reduces energy efficiency. Laboratory test give a view into actual controller technology.*

*The use of solar irradiation as heat source is clearly less relevant than convective heat gains. Avoiding the electrical effort of an air-source fan adds significantly to improve system efficiency and shows an interesting approach to system optimisation. Water is identified as best storage medium for a buried latent heat storage. A melting point of 0°C leads the highest system efficiency with low storage volume due to the efficient use of geothermal heat.*

*For PVT collectors as direct heat source for heat pumps, the availability of convective heat gains as well as the thermal conductivity in the module are decisive for a good energy efficiency.*

## Einleitung

Dieser Beitrag fasst die Ergebnisse aus dem Projekt LEWASEF «Leistungsgeregelte Wärmepumpenanlagen mit Solar-Eisspeicher und Fotovoltaik» zusammen, in dem Grundlagen erarbeitet wurden, um innovative und effiziente Wärmepumpenheizsysteme mittels Simulationen zu untersuchen. Ziel sind standardisierte Systeme, welche die ambitionierten Anforderungen an den Klimaschutz erfüllen können. Ein Ansatz zur Steigerung der Energieeffizienz und Integration von erneuerbaren Energien ist die Nutzung von Solarenergie als Energiequelle für die Wärmepumpe (s. Bild 1), entweder thermisch (ST) oder elektrisch (PV) oder beides kombiniert (PVT). Dazu sind geeignete Speicher (z.B. Wärmespeicher, Batterie, Eisspeicher) mit einer optimierten Lade- und Entladestrategie von Vorteil. LEWASEF möchte einen Beitrag leisten, dass abgestimmte Komponenten und effiziente Systemkonfigurationen für Kombinationen von Solartechnik und Wärmepumpen verfügbar sind. Aus der Arbeit im Projekt SOFOWA «Kombination von Solarthermie, Fotovoltaik und Wärmepumpen» [1], welches auf eine eher breitere Abklärung der Systemkombinationen angelegt war, haben sich drei Stossrichtungen gezeigt, wie Solarstrahlung als Energiequelle für Wärmepumpen für eine zukünftige, vorwiegend erneuerbare Wärmeversorgung vielversprechend genutzt werden können. Diese wurden auch im Hinblick auf die Umsetzbarkeit der Konzepte an Bestandsgebäuden ausgewählt. Sie bilden die Basis der im Folgenden definierten Arbeitspakete für die weitere Untersuchung in LEWASEF.

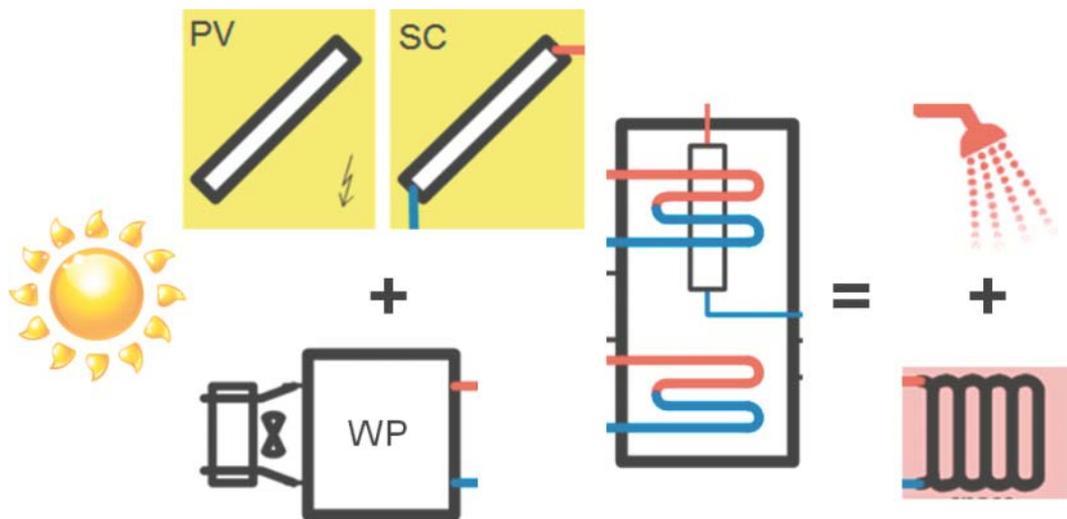


Bild 1: LEWASEF – Systemkonzepte

## Photovoltaik als elektrische Energiequelle

Photovoltaik kombiniert mit leistungsgeregelten Luft/Wasser-Wärmepumpen ist eine effiziente, finanziell attraktive und flexible Lösung für eine auf erneuerbaren Energien basierende Wärmeerzeugung. Die Nutzung von selbst erzeugtem Photovoltaik-Strom, sowie sich ergebende Konsequenzen für den lokalen Elektrizitätsnetzausbau sind aktuell viel diskutierte Themen. Dieser Ansatz ist flexibel einsetzbar. Das gilt sowohl für die Gebäudetypen (Bestands- oder Neubauten) als auch für den zeitlichen Ablauf bei der Anlagen-Errichtung oder -Erneuerung (erst Wärmeerzeugung, dann Solartechnik, oder umgekehrt). Im Fokus des Projektes stand die praxistaugliche Umsetzung solcher Lösungen, die eine optimierte Eigennutzung ermöglichen und in das lokale Stromnetz gut eingebunden werden können.

Die folgenden Abbildungen zeigen den grundsätzlichen hydraulischen (Bild 2) und elektrischen (Bild 3) Aufbau der betrachteten Anlage und die prinzipielle Darstellung des Aufbaus für die Labormessung. Hydraulisch wird eine klassische Wärmepumpenanlage ohne Pufferspeicher betrachtet. Als wärmespeichernde Elemente stehen ein klassisch dimensionierter Warmwasser-Registerboiler und die thermische Gebäudemasse insbesondere der Fussbodenheizung zur Verfügung.

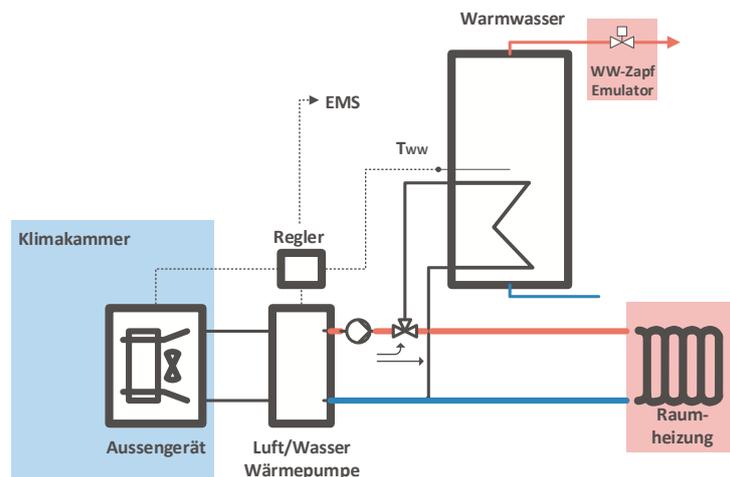


Bild 2: hydraulisches Prinzipschema des Systems Wärmepumpe plus Photovoltaik

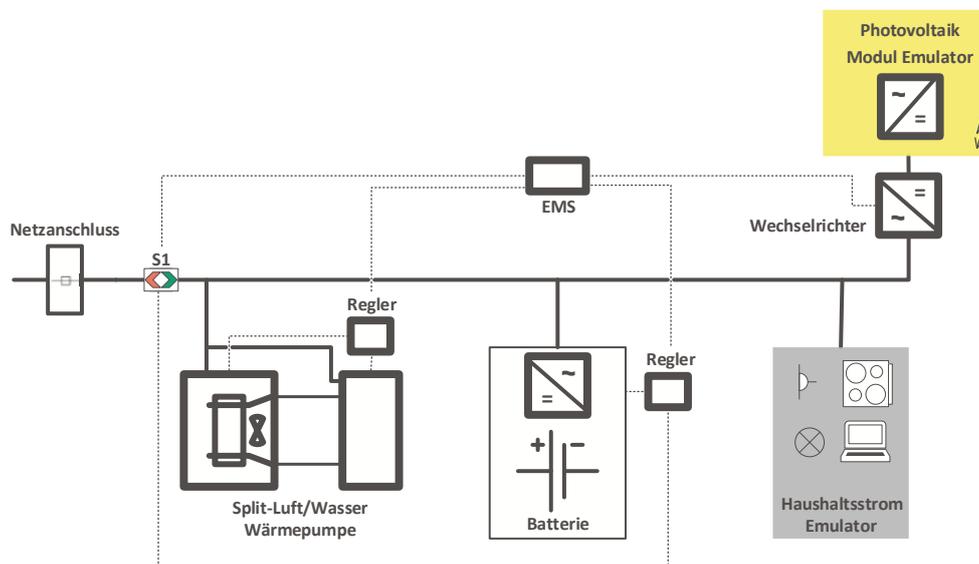


Bild 3: elektrisches Prinzipschema des Systems Wärmepumpe plus Photovoltaik

Untersucht wurden Wärmepumpen-Heizsysteme mit Photovoltaik und Batterie und die Wirkung einer am Energieangebot orientierten Regelung der Wärmepumpe in diesem Kontext. Die betrachteten Komponenten waren ein Einfamilienhaus mit ca. 150 m<sup>2</sup> Fläche und einem Heizwärmebedarf zwischen 15 und 100 kWh/m<sup>2</sup>/a sowie einem Warmwasser-Wärmebedarf von ca. 1500 – 4250 kWh/a bei einem Warmwasser-Speicher mit ca. 400 Litern Volumen. Die Wärme wurde von einer Luft/Wasser-Wärmepumpe mit 6 oder 8 kW Heizleistung bereitgestellt, welche für diese Situation einen elektrischen Energiebedarf zwischen 2300 – 4500 kWh/a verursachte. Ebenso berücksichtigt wurde ein Haushaltsstrombedarf von ca. 2500 – 3400 kWh/a und eine 5 kW<sub>peak</sub> PV-Anlage, welche ca. 5000 kWh/a elektrischen Energieertrag bereitstellt. Alle Betrachtungen erfolgen auf der Basis von Minuten-Zeitschritten.

### Systemanalyse

Die Analyse der elektrischen Energieflüsse zeigt häufigen, kurzzeitigen Energieüberschuss oder -mangel (Bild 4 links), wobei der Minimalwert der täglichen Über- oder Unterproduktion am häufigsten im Bereich 3 – 7 kWh/d liegt (Bild 4 rechts). Das heisst, eine Batterie mit einer Kapazität im Bereich von ca. 3 – 8 kWh wird am häufigsten im gewünschten, teilweise geladenen Zustand betrieben und kann diese tägliche Über- oder Unterproduktion gut ausgleichen.

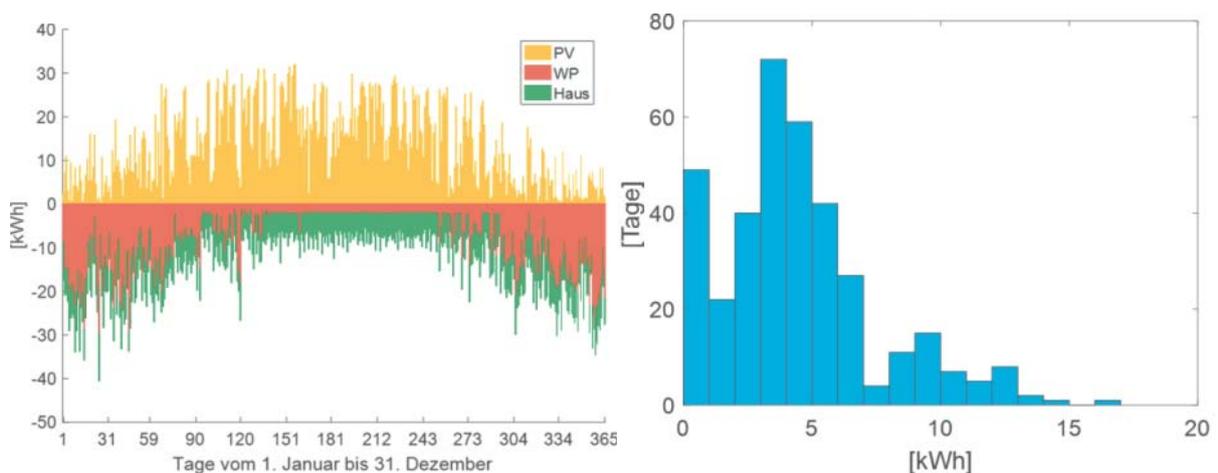


Bild 4: tägliche elektrische Energie aus PV, für WP und Haushalt (links)

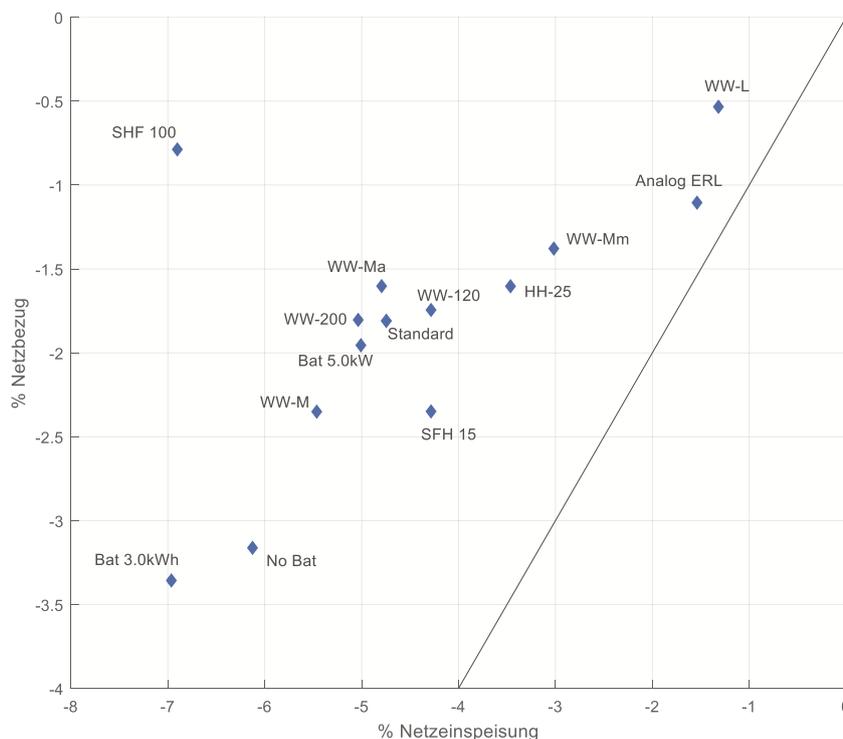
Häufigkeitsverteilung nicht direkt genutzter Über- & Unterproduktion der PV-Anlage (rechts)

In der Systemumsetzung in den nachfolgenden Simulationen und Labor-Messungen kommen jeweils zwei Regler-Konzepte zum Einsatz, die gegenübergestellt werden, eine Bedarfsregelung und eine Angebotsregelung. Die Bedarfsregelung reagiert auf die Raumtemperatur, die Vor- bzw. Rücklauftemperatur der Heizung und die Temperatur des Warmwasser-Speichers. In Abhängigkeit davon werden sowohl die Teillast der Wärmepumpe wie auch der Massenstrom der Zirkulationspumpe geregelt. Die Angebotsregelung ist prinzipiell gleich aufgebaut wie die entsprechende Bedarfsregelung, mit dem Unterschied, dass abhängig von der PV-Überproduktion am Netzanschlusspunkt die Solltemperaturen der Heizung und des Warmwasser-Speichers leicht erhöht werden respektive der WW-Ladebetrieb prädictiv auf den erwarteten Zeitraum mit PV-Überproduktion verschoben wird.

### Simulationen

In den Simulationen wird der Einfluss von Gebäudetyp, Regelprinzip, Warmwasser-Entnahme, Haushaltsstrom, Batterie-Kapazität und -Maximalleistung untersucht. Dabei wird die Dimensionierung der Komponenten im Normalfall nicht angepasst und somit der Einfluss der Randbedingungen und Regler aufgezeigt.

Durch ein Energiemanagement-System zeigte sich eine Reduktion des Netzbezuges für das gesamte Jahr im Bereich 1 – 3% bei einer Reduktion der Netzeinspeisung im Bereich von 1 – 7% (Bild 5). Die Reduktion des Netzbezuges beträgt also in etwa die Hälfte der Reduktion der Netzeinspeisung, der andere Teil der vermiedenen Netzeinspeisung deckt zusätzliche Verluste. Im Vergleich zur Batteriekapazität von 3 – 8 kWh aus der statistische Analyse zeigt eine Batteriekapazität von 5.9 kWh eine vergleichbare, eine Batteriekapazität von 3 kWh eine nur leicht reduzierte und eine Batteriekapazität von 0 kWh eine stark reduzierte Wirkung auf Eigennutzung und Eigendeckung. Insgesamt ist die Wirkung der Batterie auf die Eigennutzung und Eigendeckung deutlich grösser als die des Energiemanagement-Systems für die Wärmepumpe. Im Umkehrschluss heisst das, dass ohne Batterie die Installation eines Energiemanagement-Systems deutlich wirkungsvoller ist als mit.



*Bild 5: Relative Änderung von Netzbezug und Netzeinspeisung bei Wechsel von Bedarfs- zu Angebotsregelung der Wärmepumpe*

Die Wirkung des Energiemanagement-Systems auf die Warmwasser-Nutzung hat in dieser Untersuchung Priorität und die Wirkung über das gesamte Jahr ist grösser als im Heizbetrieb. Allerdings zeigt sich, dass das Nutzungsverhalten mit der Warmwasserentnahme einen grossen Einfluss auf die Wirksamkeit hat. Entnahmeprofile mit einer im Vergleich zum Inhalt des Warmwasser-Speichers grossen Entnahme pro Tag erzwingen Nachladungen im Anschluss an diese grosse Warmwasser-Entnahme, wodurch das Potenzial zur Verschiebung des Ladebetriebes stark eingeschränkt wird. Bild 6 zeigt über das Jahr gemittelte Tagesverläufe der elektrischen

schen Leistung, links für das Warmwasser-Entnahmeprofil «M» mit deutlichem Verschiebepotenzial, rechts für ein adaptiertes Entnahmeprofil «M» mit Konzentration der grossen Entnahmen am Morgen, woraus ebenfalls eine Nachladung des Warmwasserspeichers am Morgen resultiert und nahezu kein Verschiebepotenzial. Das hier eingesetzte Warmwasser-Speichervolumen von 400 Litern bietet noch relativ viel Verschiebepotenzial im Vergleich zu deutlich kleineren, heute ebenfalls typischen Speichervolumina im Bereich bis 200 Liter.

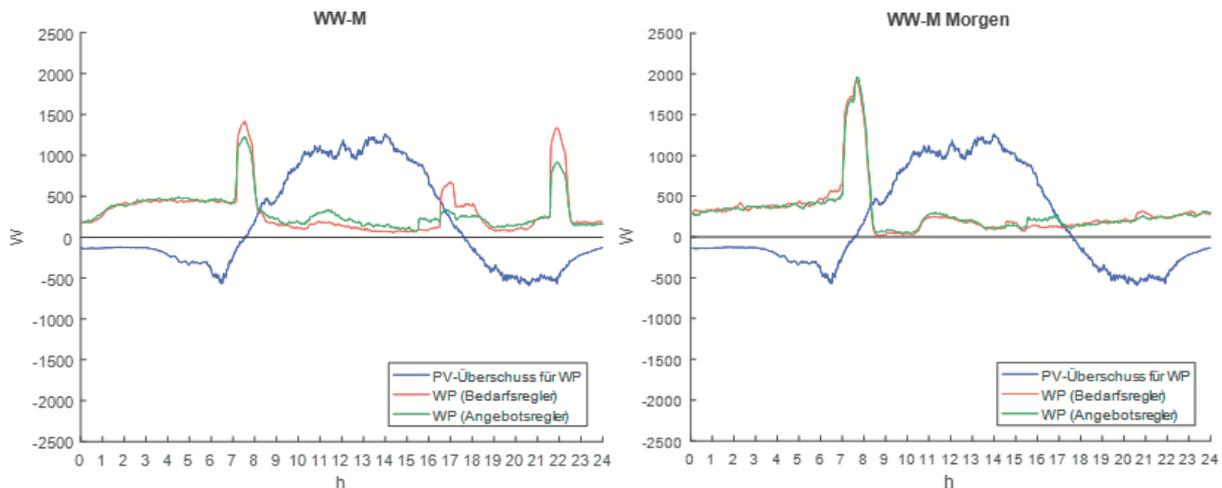


Bild 6: Über das Jahr gemittelte Tagesverläufe der elektrischen Leistung für das Warmwasser-Entnahmeprofil «M» (links) und ein adaptiertes Entnahmeprofil «M» mit Konzentration der grossen Entnahmen am Morgen

Die Wirkung eines Energiemanagement-Systems auf den Heizbetrieb kann vereinfachend wie folgt zusammengefasst werden. Unabhängig vom Wärmedämmstandard und Wärmeabgabesystem können bei einem am Stromangebot orientierten Betrieb der Wärmepumpe im Vergleich zu einem am Wärmebedarf orientierten Betrieb der Wärmepumpe zwei Ladezyklen des am Wärmebedarf orientierten Betriebes zusammengefasst werden. Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass in etwa die Dauer eines Ladezyklus ausgelassen werden kann, ohne dass die Behaglichkeit im Raum oder der Energiebezug negativ beeinflusst werden (Details siehe [2]). Dies kann beispielsweise dadurch erreicht werden, dass das Regelband der Fussboden-Solltemperatur von im Normalfall  $\pm 1$  K auf  $\pm 2$  K erhöht wird und dadurch eine Temperaturabsenkung oder -erhöhung erreicht wird.

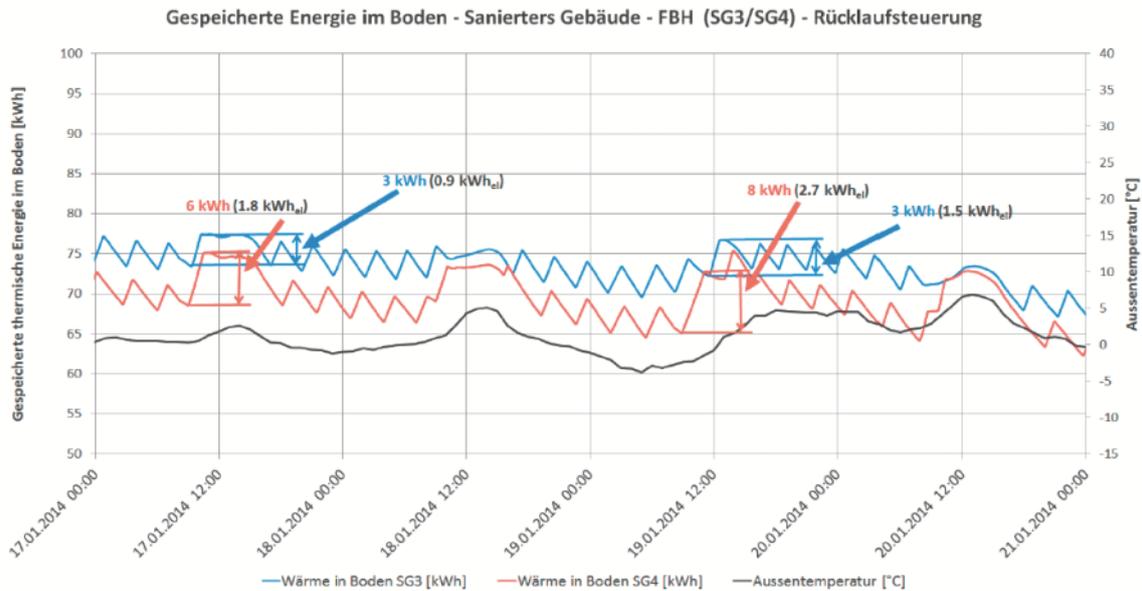


Bild 7: Temperaturverlauf der Fussbodenheizung bei durchschnittlich gedämmtem Gebäude

Bild 7 und Bild 8 zeigen die Verläufe der Fussbodentemperatur für ein durchschnittlich und ein gut gedämmtes Gebäude. Während die Heizung mit einer ein/aus-geregelten Wärmepumpe bei Aussentemperaturen um 0°C und bei durchschnittlicher Dämmung ca. acht Ladezyklen pro Tag durchläuft, sind es bei guter Dämmung nur zwei Ladezyklen pro Tag. In beiden Fällen kann vereinfachend zusammengefasst werden, dass mit einer wärmespeichernden Steuerung zwei Ladezyklen zu einem Ladezyklus zusammengefasst werden können und davor oder danach eine längere Stillstandszeit möglich ist. In Bezug auf die Gebäudesteuerung bedeutet dies, dass die Steuerung eines gut gedämmten Gebäudes deutlich mehr Freiheiten bereitstellt, Heizzyklen auf Zeiten mit PV-Überschuss und hohen Aussentemperaturen zu verschieben.

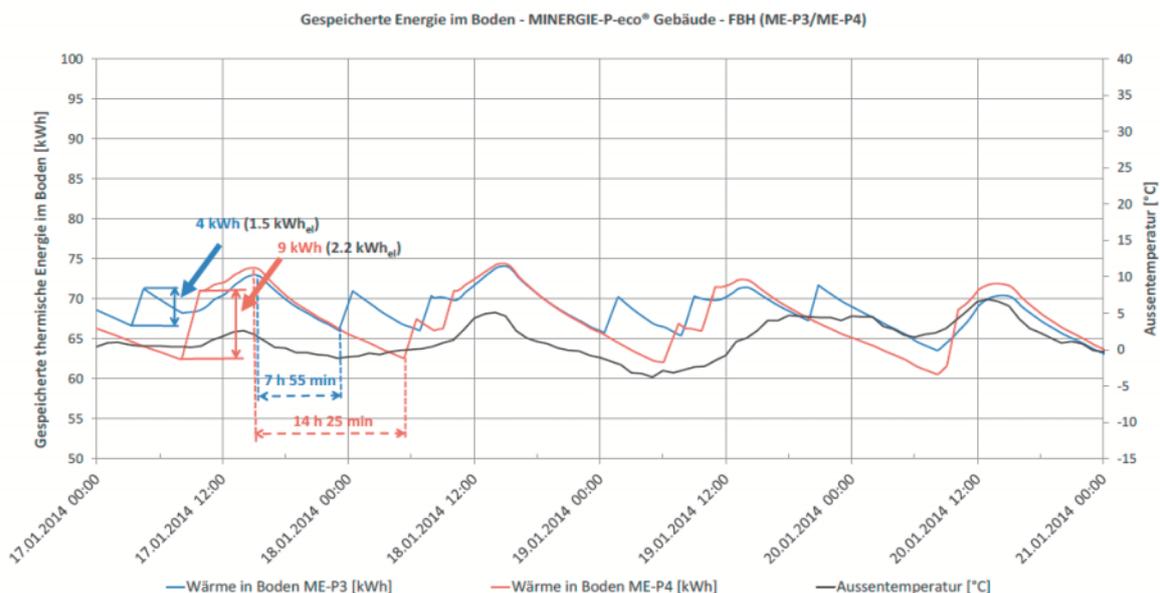


Bild 8: Temperaturverlauf der Fussbodenheizung bei gut gedämmtem Gebäude

### Labormessungen

Im Labor wurde die Umsetzbarkeit solcher Konzepte an einer realen Anlage überprüft. Hierfür wurde ein virtuelles elektrisches Hausnetz mit den Komponenten PV-Anlage mit 5 kW<sub>peak</sub>, Batterie mit 5.9 kWh Kapazität und 2.3 kW AC-Leistung, Wärmepumpe mit 6 kW Nenn-Heizleistung für Raumheizung und Warmwasserentnahme eines 160 m<sup>2</sup> Einfamilienhauses und Haushaltsstrombezug erfolgreich aufgebaut. Ziel war typische Tagessituationen reproduzierbar abzubilden (siehe Bild 9 und Bild 10). Die Labormessungen zeigen für eine Situation mit annähernd ausgeglichener, elektrischer Energiebilanz den angestrebten Einsatz und Betrieb der Batterie. Das Batteriesystem zeigt eine Ladeeffizienz von 96%, eine Entladeeffizienz von 88% und eine Stand-by-Leistung von 15 W. Die Messungen zeigen die Funktionalität des evaluierten EMS. Die prädiktive Ladung des Warmwasserspeichers erhöht die Systemautarkie unter den gewählten Randbedingungen signifikant. Die Labortests mit einem solchen System unter günstigen Bedingungen resultieren in einer Erhöhung der Eigennutzung von 47% auf 61% bei einem elektrischen Mehrverbrauch von 0.9 kWh/d. Bild 9 und Bild 10 zeigen jeweils im oberen Teil die elektrische Netzanschlussleistung und die elektrische Wärmepumpenleistung für die Warmwasser-Bereitung sowie im unteren Teil die Temperatur des Warmwasser-Speichers am Sensor. Bei der Messung ohne EMS in Bild 9 fallen Überschussleistung am Netzanschlusspunkt und WP-Leistung nicht zusammen, die WW-Speichertemperaturen werden auf 50°C Solltemperaturen mit 10 K Hysterese geregelt. Bei der Messung mit EMS in Bild 10 fallen die elektrische Überschuss- und Wärmepumpen-Leistung zusammen, sodass die Eigennutzung erhöht wird. Hierfür wird über einen prädiktiven Algorithmus die WW-Solltemperatur auf 55°C erhöht.

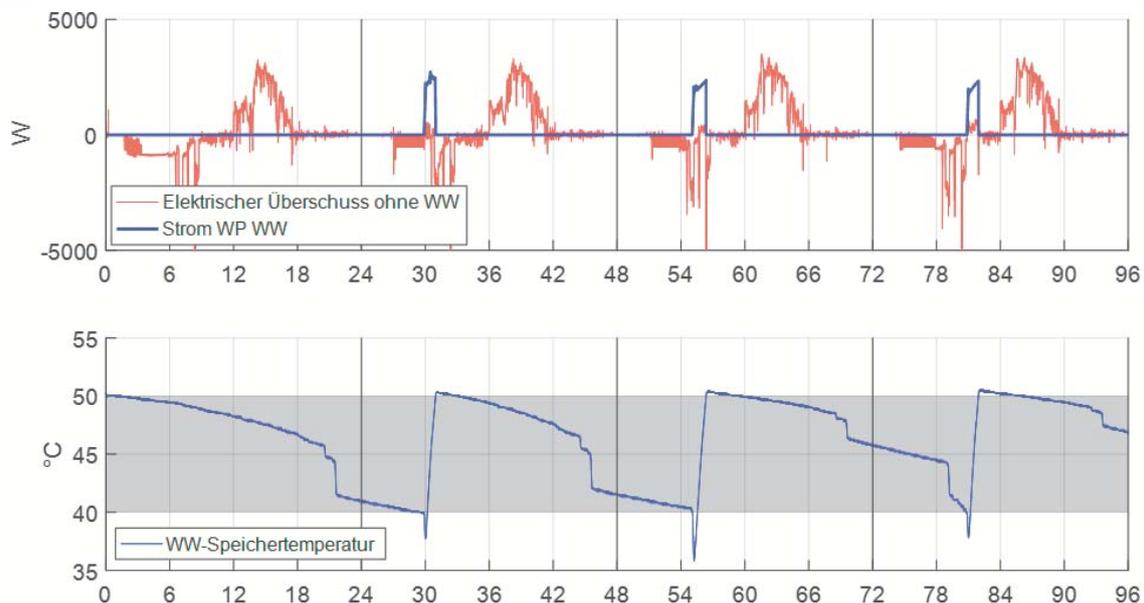
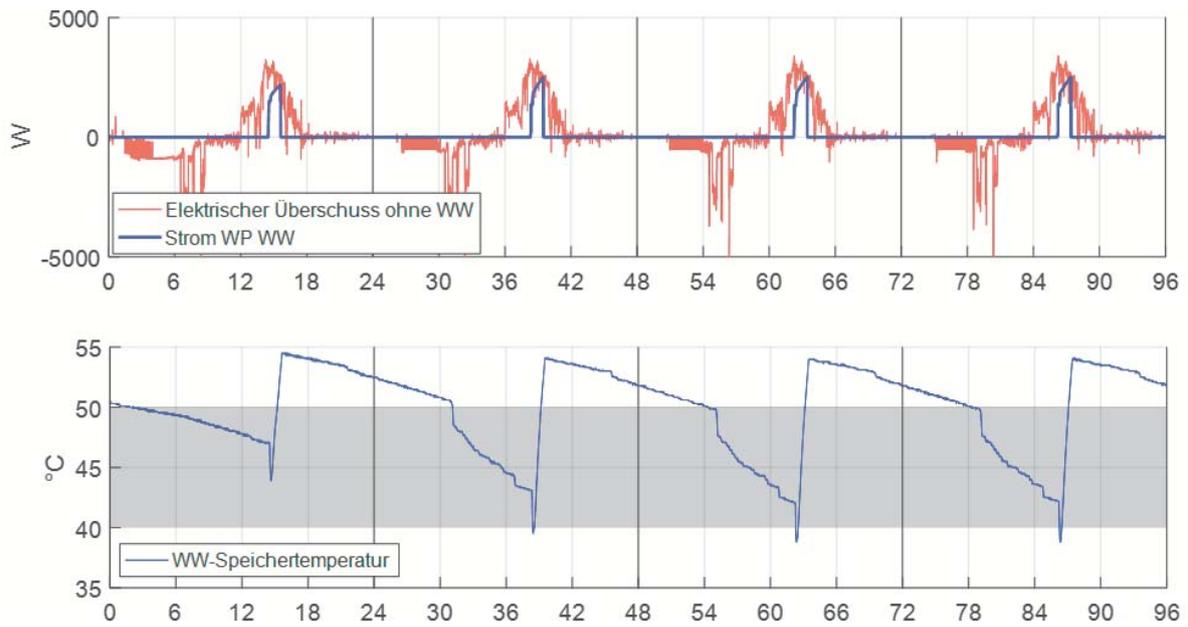


Bild 9: Messung ohne EMS

- (1) Elektrische Netzanschlussleistung WP-Strom für Warmwasser-Bereitung
- (2) Temperatur des Warmwasser-Speichers am Sensor



*Bild 10: Messung mit EMS*

- (1) Elektrische Netzanschlussleistung WP-Strom für Warmwasser-Bereitung*
- (2) Temperatur des Warmwasser-Speichers am Sensor*

## Solarstrahlung als Wärmequelle

Im folgenden Abschnitt über die Nutzung von Solarstrahlung als Wärmequelle für die Wärmepumpe werden zur Wahrung der vollständigen Darstellung des Projektes LEWASEF die Ergebnisse verkürzt zusammengefasst dargestellt, da diese bei der Tagung im Jahre 2017 [3] bereits ausführlich dargestellt wurden. Hierbei stand die Weiterentwicklung von Wärmepumpensystemen im Vordergrund, welche die Wärme vorwiegend aus Umgebungsluft und Solarstrahlung gewinnen und mit einem Sole-Zwischenkreis auf der Quellenseite arbeiten. Bild 11 zeigt den Systemaufbau und das Hydraulikschema der Anlage zur Nutzung von Solarstrahlung als Wärmequelle für die Wärmepumpe, welches den Ausgangspunkt der Untersuchungen darstellt, und mit guten Jahresarbeitszahlen überzeugt, vergleichbar mit Erdwärmesonden-Anlagen.

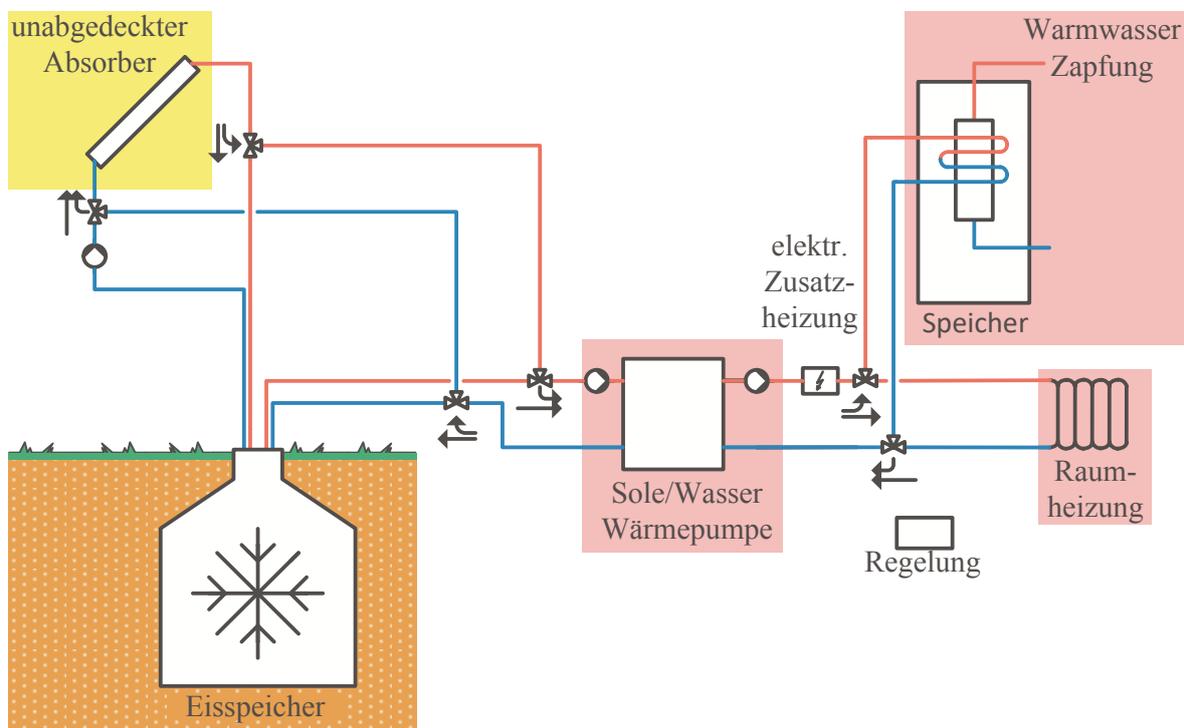


Bild 11: Systemaufbau und Hydraulikschema der Anlage zur Nutzung von Solarstrahlung als Wärmequelle für die Wärmepumpe

Im Solar-Eisspeicher-System, dargestellt in Bild 11, wird die Wärme für Raumheizung oder Trinkwarmwasser von einer Sole/Wasser-Wärmepumpe bereitgestellt. Diese bezieht die Quellenwärme primär von einem unverglastem Solarabsorber, in welchem die Wärme aus solarer Einstrahlung und konvektiven Wärmegewinnen bezogen wird. Ein erdvergrabener Eisspeicher bildet die sekundäre Wärmequelle für die Wärmepumpe in den Zeiten, in denen der Solarabsorber entweder keine Wärme bereitstellen kann, oder sein Betrieb aufgrund der Randbedingungen zu ineffizient wäre. In Zeiten ohne Wärmepumpenbetrieb kann der Solarabsorber den Eisspeicher erwärmen. Der hydraulische Anschluss des Solarabsorbers und des Eisspeichers erfolgt alternativ parallel an die Quellenseite der Wärmepumpe. Für die Erwärmung des Eisspeichers aus dem Solarabsorber existiert ein separater hydraulischer Kreislauf.

Die Nutzung des erdvergrabenen Latentspeichers mit Wasser/Eis als Phasenwechselmaterial lässt dabei die Frage offen, ob eine höhere oder tiefere Schmelztemperatur des Phasenwechselmaterials Vorteile für die Energieeffizienz des Gesamtsystems hat. In diesem System dient der

Latentspeicher hauptsächlich einer Funktion. Er soll die Temperatur der Wärmequelle auf eine minimale Temperatur nahe der Phasenwechsel-Temperatur begrenzen und kommt daher immer dann zum Einsatz, wenn die Temperatur der Haupt-Wärmequelle Solar-Luft-Absorber niedriger ist. Mit einer höheren Phasenwechsel-Temperatur könnte diese minimale Quelltemperatur ebenfalls angehoben werden und die Systemeffizienz verbessert werden. Es zeigt sich jedoch, dass ein geänderter Schmelzpunkt auch sehr stark die Wärmegewinne aus dem Erdreich beeinflusst. Ein höherer Schmelzpunkt führt mit einer geringeren Temperaturdifferenz zum umgebenden Erdreich und damit zu deutlich geringeren Wärmegewinnen. Hierdurch wird, bei gleichem Wärmeentzug, die energetische Kapazität des Phasenwechselmaterials schneller ausgeschöpft und der Zustand vollständiger Erstarrung eher erreicht. Bei vollständiger Erstarrung sinkt die Temperatur der Wärmequelle sehr schnell deutlich unter die Phasenwechsel-Temperatur und häufig auch unter die Einsatzgrenze der Wärmepumpe. Im Variantenvergleich zeigt sich ein Schmelzpunkt von 0°C als Variante mit der höchsten Systemeffizienz. Daher wird Wasser aus Effizienz-, Kosten- und ökologischen Gründen als das bevorzugte Speicherfluid für einen erdvergrabenen Latentspeicher als Wärmequelle für eine Wärmepumpe beurteilt.

Mit dem Solar-Luft-Absorber wird im Gesamtsystem Solar-Eisspeicher-Wärmepumpe der mit Abstand grösste Anteil Wärme konvektiv aus der Umgebungsluft gewonnen. Daher wurden im Projekt LEWASEF Wärmequellen ohne Solarstrahlung untersucht, im ersten Ansatz ein Luft/Sole-Wärmeübertrager mit Ventilator. Basierend auf vorausgehenden Detailuntersuchungen einzelner Systembausteine wurde für das Gesamtsystem in Simulationen analysiert, worin der grösste Anteil zur Differenz der energetischen Systemeffizienz zu einer Luft/Wasser-Wärmepumpe steckt (siehe Tabelle 1). Das Solar-Eisspeichersystem (Bild 11) weist eine Jahresarbeitszahl von 4.47 aus, für eine Luft/Wasser-Wärmepumpe wurde eine Jahresarbeitszahl von 3.48 ermittelt. Den grössten Einfluss in diesem Vergleich haben der Eisspeicher mit einem Einfluss auf die Jahresarbeitszahl von 0.31 sowie der elektrische Energiebedarf des Ventilators mit einem Einfluss auf die Jahresarbeitszahl von 0.47. Hieraus können die Schlussfolgerungen gezogen werden, dass effiziente Wärmepumpen-Anlagen mit Luft/Sole-Wärmeübertrager und Sole-Zwischenkreis möglich sind und, dass die Reduktion der elektrischen Energieaufnahme des Ventilators oder die Vermeidung eines Ventilators energetisch attraktiv und technisch möglich sind. Die Bauform des Solarabsorbers ist besonders geeignet für konvektive Wärmegewinne. Dies eröffnet auch neue Möglichkeiten bei der Platzierung. Ein Einsatz als stille Wärmequelle ist denkbar, insbesondere an Orten, an denen besonders hohe Anforderungen an Schallemissionen von Aussenluft-Wärmepumpen gestellt werden.

Variante					JAZ	JAZ ohne Eis- speicher
1	System Ursprungssystem	Solarabsorber	plus	Eisspeicher	4.47	4.16
2	System ohne solare Einstrahlung	Solarabsorber	plus	Eisspeicher	4.45	
3	System ohne solare Einstrahlung, mit halbiertes	Solarabsorber	plus	Eisspeicher	4.35	
4	System ohne Kondensation, ohne elektr.	Wärmepumpe mit	Luft/Sole-Wärmeübertrager		4.18	
5	System ohne Kondensation, mit elektr.	Wärmepumpe mit	Luft/Sole-Wärmeübertrager		3.71	
6	System mit Kondensation, mit elektr.	Wärmepumpe mit	Luft/Sole-Wärmeübertrager		3.77	3.48

Tabelle 1: Systemeffizienz (JAZ) aus der Analyse der Systemkonfigurationen

## Photovoltaisch-thermische Absorber als Strom- und Wärmequelle

Kombinierte Solarthermie/Photovoltaik-Kollektoren (PVT) bieten Potenzial für eine maximierte Energieerzeugung mit begrenzten Flächen. Eingesetzt als Quelle für die Wärmepumpe können sie mit einem verhältnismässig niedrigen Kollektortemperaturniveau zu einem erhöhten elektrischen Ertrag führen. Eisspeicher stellen sich dabei als eine günstige Komponente für einen sicheren und effizienten Wärmepumpenbetrieb dar. Die Untersuchung zu diesem System hat einen eher mittelfristig angelegten technologischen Forschungsfokus. Ziel ist die Ermittlung der Systemkonfiguration und von Komponenteneigenschaften mit denen bei erhöhtem solarem Energiegewinn energetische Effizienzen vergleichbar mit Erdwärmesondenanlagen erreicht werden können. Hierzu werden die Erkenntnisse der Eisspeichersysteme herangezogen und daraus Anforderungen an PVT-Kollektoren abgeleitet.

Der Wärmegewinn  $\dot{Q}$  pro Fläche  $A$  für PVT-Kollektoren definiert Gl.1 in Abhängigkeit der Parameter solare Einstrahlung  $G''$ , der Windgeschwindigkeit  $u$ , der mittleren Fluidtemperatur  $\theta_m$  sowie der Umgebungstemperatur  $\theta_a$ :

$$\frac{\dot{Q}}{A} = G'' * \eta_0 * (1 - b_u * u) - (b_1 + b_2 * u) * (\theta_m - \theta_a) \quad (\text{Gl.1})$$

Da eine solche Anlage für die ungünstigsten Bedingungen (d.h. Wintermorgen und -abende) ausgelegt werden muss, wird nachfolgend  $G'' = 0$  angenommen. Mit  $\Delta T = \theta_a - \theta_m$  lässt sich Gl.1 zum windabhängigen UA-Äquivalent in Gl.2 umformen:

$$\frac{\dot{Q}}{\Delta T} = (b_1 + b_2 * u) * A \quad (\text{Gl.2})$$

Aus einer Literatur-Recherche wurden die Parameter für typische PVT-Module entnommen und mit dem ungedämmten Rohrrarfenabsorber Viessmann SLK ergänzt (siehe Tabelle 2).

Absorber-Modell	Konversionsfaktor	Windabhängigkeit Konversionsfaktor	Wärmeverlust- Koeffizient	Windabhängigkeit Wärmeverlust- Koeffizient
	$\eta_0$	$b_u$	$b_1$	$b_2$
		s/m	W/m <sup>2</sup> K	Ws/m <sup>3</sup> K
TÜV HTC [4]	0.67	0.044	21.5	3.66
ISFH PVT-A [4]	0.54	0.09	10.2	1.15
TÜV LTC [4]	0.31	0.09	6.81	0.46
Nicht-abgedeckt ungedämmt [5]	0.58	0.05	12.5	1.5
Nicht-abgedeckt, [5] Rückseite gedämmt	0.6	0.05	8	1.5
Viessmann SLK [1]	0.978	0.021	27.5	47.1

Tabelle 2: Optische und thermische Modell-Parameter von PVT-Modulen

Es ist zu sehen, dass der Wärmeübergang des Rohrrarfenabsorbers deutlich höher ist als der der PVT-Module. Dies gilt besonders für den windabhängigen Wärmeübergang, visualisiert in Bild 12 links. Bild 12 rechts vergleicht die berechneten UA-Äquivalente für eine Fläche von 50 m<sup>2</sup> mit einem gemessenen Referenzwert für den Wärmeübertrager einer kommerziellen Um-

gebungsluft-Wärmepumpe mit einer Nennleistung von 6 kW sowie dem ungedämmten Rohrrharfenabsorber mit einer Fläche von 10 m<sup>2</sup>. Die geringere Fläche des Rohrrharfenabsorbers begründet sich mit der Annahme, dass die restlichen 40 m<sup>2</sup> Dachfläche für Photovoltaik verwendet werden können. Es ist zu sehen, dass die Werte für die PVT-Anlagen mit Ausnahme des TÜV HTC deutlich unter dem UA-Wert des Referenz-Wärmetauschers liegen.

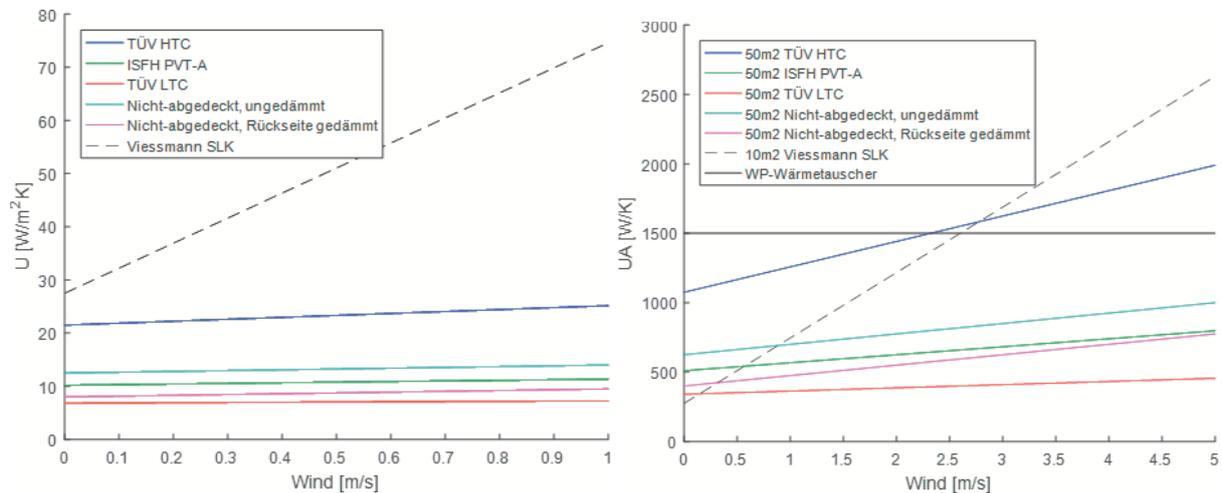


Bild 12: windabhängige U-Werte von PVT-Modulen (links), windabhängige UA-Werte für PVT-Systeme, solarthermische Kollektoren & Luft/Sole-Wärmeübertrager-WP (rechts)

Vergleicht man die PVT-Module mit dem ungedämmten Rohrrharfenabsorber, fällt primär der deutlich geringere Einfluss der Windgeschwindigkeit auf. Die Analyse der Verteilung der Windgeschwindigkeit für Strasbourg kann für alle Jahreszeiten gleich angenommen werden. Unter der Annahme, dass die Windgeschwindigkeit an einem Hausdach in bebauter Umgebung ca. die Hälfte der ungestörten Windgeschwindigkeit beträgt, kann man einen Mittelwert von ca. 1.5 m/s annehmen. Bei diesem Wert hat der Rohrrharfenabsorber einen höheren Wärmeübergang als alle PVT-Module mit Ausnahme des TÜV HTC.

Aus diesen Beobachtungen ist zu schliessen, dass der Ersatz einer Umgebungsluft-Wärmepumpe oder eines reinen Solarkollektors mit einer PVT-Anlage eine Optimierung der PVT-Module für diese Anwendung erfordert.

Zusätzlich sind beim Vergleich von PVT-Anlagen mit Umgebungsluft-Wärmepumpen zu bedenken, dass Vereisung und Schnee die konvektiven Wärmegewinne der PVT-Anlage massiv senken können und, dass die Umwälzpumpe einer PVT-Anlage tendenziell weniger Strom als der Ventilator einer Aussenluft-Wärmepumpe verbraucht.

Wird aus dem UA-Wert des Luft/Sole-Wärmetauschers von 1500 W/K für eine Wärmepumpe mit 6 kW Heizleistung ein erforderlicher UA-Wert von 250 W/K pro kW Heizleistung abgeleitet, lässt sich aus den obigen Werten die erforderliche PVT-Fläche pro kW Heizleistung abschätzen, dargestellt in Bild 13.

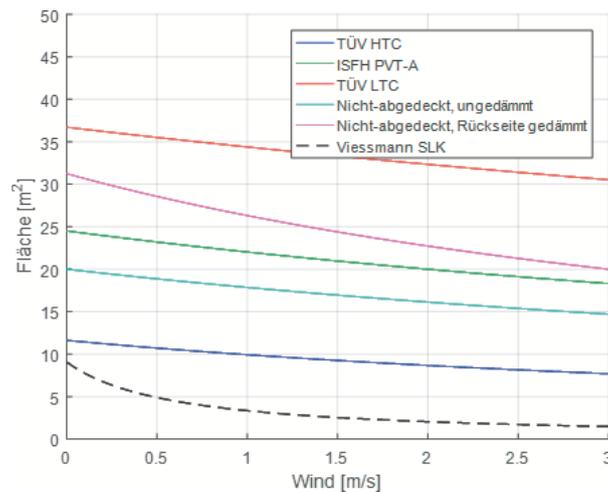


Bild 13: erforderliche PVT-Fläche pro kW Heizleistung

Es sind deutliche Unterschiede zwischen den Kollektortypen zu sehen. Unter der obigen Annahme einer mittleren Windgeschwindigkeit am Dach von 1.5 m/s benötigt das leitfähigste PVT-Modul («TÜV HTC») ca. 10 m<sup>2</sup> Fläche pro kW Heizleistung. Dieser Wert liegt im anwendbaren Bereich für ein Einfamilienhaus nach aktuellen Baustandards.

$$A_{PVT} = \frac{P_{WP}}{U_{PVT} \cdot \Delta T_{WP}} \quad (\text{Gl.3})$$

Gl.3 definiert einen Richtwert zur Planung einer solchen Anlage.  $A_{PVT}$  ist die benötigte PVT-Fläche,  $P_{WP}$  ist die thermische Leistung der Wärmepumpe,  $U_{PVT}$  ist der U-Wert des PVT-Moduls bei 1.5 m/s Windgeschwindigkeit ohne solare Einstrahlung.  $\Delta T_{WP}$  ist die Temperaturspreizung der Wärmepumpe auf der Quellenseite, welche hier mit 5 K angesetzt wird.

## Schlussfolgerung

Ende 2018 konnte das Projekt LEWASEF erfolgreich abgeschlossen werden und dabei Wege zur sinnvollen Nutzung von Solarstrahlung als Energiequelle für die Wärmepumpe aufgezeigt werden. Eine gute und effektive Umsetzung von PV-Strom in Wärme mit hoher Effizienz ist ein wichtiges Element zukünftiger Wärmeversorgung. Ein Solezwischenkreis kann als sinnvolle Flexibilisierungsoption zur Einbindung weiterer Wärmequellen dienen. Hierfür gibt es sich etablierende, erfolgreiche Umsetzungsbeispiele. PVT-Module als primäre Wärmequelle für Wärmepumpen brauchen verbesserte konvektive Eigenschaften für den Wärmegewinn aus Umgebungsluft.

## Dank

Die Autoren bedanken sich beim Bundesamt für Energie für die finanzielle Unterstützung und Projektbegleitung sowie für die Unterstützung durch die Viessmann Werke GmbH & Co. KG.

## Quellen

- [1] Dott R., Afjei T., Winteler C., Genkinger A., SOFOWA Kombination von Solarthermie, Fotovoltaik, Wärmepumpen und Eisspeicher, Schlussbericht, IEBau-FHNW im Auftrag des Bundesamtes für Energie BFE, Muttenz, CH, Apr 2016
- [2] Müller A., Bichsel J., Afjei T., Dott R., Gebäude als Wärmespeicher - Nutzung der thermischen Speicherfähigkeit von Gebäuden zum Lastmanagement von Elektrizitätsnetzen. Bericht der Fachstelle Energie und Gebäude-technik im Amt für Hochbauten der Stadt Zürich, Zürich, CH, Mrz 2018
- [3] Dott R., Messmer C., Leistungsgeregelte Wärmepumpenanlagen mit Solar-Eisspeicher und Fotovoltaik, 23. Tagung des BFE-Forschungsprogramms «Wärmepumpen und Kälte», Burgdorf, CH, Juni 2017
- [4] Adam M., Wirth H.-P., Radosavljevic R., Verbundprojekt: Standardisierung und Normung von multifunktionalen PVT Solarkollektoren (PVT-Norm) Teilvorhaben: PVT-Systemanwendungen und Simulationen, Schlussbericht, FH-Düsseldorf im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie, Düsseldorf, DE, Jan 2015
- [5] Zenhäusern D., Bamberger E., Baggenstos A., PVT Wrap-Up Energiesysteme mit Photovoltaisch-Thermischen Solarkollektoren, Schlussbericht, Institut für Solartechnik SPF im Auftrag des Bundesamtes für Energie BFE, Rapperswil, CH, Mrz 2017



Evelyn Bamberger, Robert Haberl, Mattia Battaglia, Dr. Michel Haller  
SPF Institut für Solartechnik, Hochschule für Technik Rapperswil

## Wärmepumpen und Photovoltaik: Gibt es den idealen Speicher?

### *Zusammenfassung*

*Mit Hilfe eines neuen Testverfahrens, mit dem PV-Wärmepumpensysteme in einem 6-Tage Testzyklus im Labor geprüft werden können, wurden vier unterschiedliche Systeme von vier verschiedenen Herstellern mit Steuerungen zur Eigenverbrauchssteigerung vermessen. Die vier Systeme erreichen bei einer PV-Anlagengrösse, die bei einem effizienten System für ein Netto-Nullenergie Gebäude ausreicht, Eigenverbrauchsquoten von 42-58 %, Autarkiegrade von 35-57 % und Netzaufwandszahlen von 20-37 %. Zwei der vier vermessenen Systeme schöpfen das mit der jeweiligen Systemvariante mögliche Potential zur Eigenverbrauchssteigerung bereits nahezu aus, bei den anderen beiden Systemen zeigen sich deutliche Verbesserungsmöglichkeiten.*

*Netzeinspeise- und Netzbezugsspitzen werden mit Steuerungen zur Eigenverbrauchssteigerung nicht oder nur geringfügig gesenkt. In Simulationen wird gezeigt, wie dies durch eine angepasste Regelstrategie wirkungsvoll erreicht werden kann. Aus der erstellten Ökobilanz geht hervor, dass aus ökologischer Sicht thermische Speicher gegenüber Batterien zu bevorzugen sind. Im Kontext der Ökobilanzierung des gesamten PV-Wärmepumpensystems spielen beide Speicherarten aber eine eher untergeordnete Rolle.*

### *Summary*

*With the help of a new test procedure, with which PV heat pump systems can be tested in the laboratory in a 6-day test cycle, four different systems from four different manufacturers with controls to increase their self-consumption were measured. The four systems achieve self-consumption ratios of 42-58 %, self-sufficiency ratios of 35-57 % and grid purchase ratios of 20-37 % when operated with a PV system size that is for an efficient system sufficient for a net zero energy building. Two of the four tested systems are already almost fully exploiting their potential for increasing self-consumption with the respective system variant, while the other two systems show significant potential for improvement.*

*Grid feed-in and grid consumption peaks are not or only slightly reduced by controls that seek to increase self-consumption. Simulations show how this can be effectively achieved by an adapted control strategy. From the conducted life cycle assessment it can be seen that, from an ecological point of view, thermal storage is preferable to batteries. When considering the life cycle assessment of the entire PV heat pump system, however, both types of storage play a rather subordinate role.*

## Ausgangslage

Mit einer PV-Anlage in Kombination mit einer Wärmepumpe kann der komplette Bedarf an Wärme und Strom eines Gebäudes prinzipiell selbst erzeugt werden. Erzeugung und Energiebedarf fallen allerdings nicht immer gleichzeitig an. Für eine hohe Eigenversorgung muss daher Energie zwischengespeichert werden. Dies kann über die Wärmepumpe in einem thermischen Speicher oder elektrochemisch in einem Batteriespeicher erfolgen.

Mit steigender Nachfrage haben im Laufe der letzten Jahre immer mehr Wärmepumpenhersteller Steuerungen auf den Markt gebracht, die einen möglichst hohen PV-Eigenverbrauch ermöglichen sollen. Ebenfalls denkbar, wenn auch bisher kaum realisiert, sind Steuerungen, die ein möglichst netzdienliches Verhalten des PV-Wärmepumpensystems ermöglichen. Sie steuern beispielsweise auf bestimmte, vom Elektrizitätsversorgungsunternehmen (EVU) vorgegebene Stromtarife oder versuchen, Netzeinspeise- und Netzbezugsspitzen zu senken.

Ziel des vom Bundesamt für Energie geförderten Projekts CombiVolt war es, solche Systeme anhand von Gesamtsystem-Labortests umfassend zu beurteilen und ihre Potentiale unter verschiedenen Randbedingungen mit Hilfe von Simulationsstudien zu analysieren. Ein Teil der Projektergebnisse wird im Folgenden vorgestellt.

## Systemtests

Der Concise Cycle Test (CCT) ist eine Testmethode zur Prüfung kompletter Heizsysteme unter realen Bedingungen. Mit dem Hardware-in-the-Loop-Verfahren wurden zunächst thermische Kollektoren in Kombination mit Öl-, Gas- und Pelletkesseln [1] und schliesslich auch Wärmepumpen [2] getestet. Neu wurden das Verfahren und die zugehörige Testinfrastruktur um PV-Systeme und Haushaltsstromlasten erweitert. Damit hat sich das Prüfverfahren von einem Prüfverfahren für Heizungsanlagen, die Raumwärme und Warmwasser bereitstellen, zu einem Prüfverfahren für Anlagen zur Wärme- und Stromversorgung von Gebäuden entwickelt. Eine Beschreibung der Testmethode ist auf der Homepage des SPF in der Rubrik „Testing/Systeme“ zu finden [3].

Auf dem Prüfstand wird der realitätsnahe Betrieb einer kompletten Heizungsanlage im dynamischen Betrieb ermöglicht. Während eines 6-tägigen Prüfzyklus simuliert und emuliert der Prüfstand ein komplettes Gebäude, dessen Wärme- und Strombedarf gedeckt werden muss. Diese Nachbildung umfasst auch die Gebäudehülle mit einer Photovoltaikanlage, die Umweltwärme als Wärmepumpenquelle (Umgebungsluft- oder Erdwärmesonden) und den elektrischen Energiebedarf von Haushaltsgeräten (Haushaltsstrom). Die angewandten Lasten für Raumwärme, Warmwasser und Haushaltsstrom sind vordefiniert, um eine identische Last zu gewährleisten und so einen direkten Vergleich der geprüften Systeme zu ermöglichen. Innerhalb der sechs Tage werden die unterschiedlichen Anforderungen aller Jahreszeiten berücksichtigt. Die im Test ermittelten Werte sind direkt repräsentativ für den Betrieb des Systems im Feld über ein Jahr.

Im Projekt CombiVolt wurden Systemtests an vier verschiedenen Komplettsystemen durchgeführt. Die getesteten Systeme zielten darauf ab, den PV-Eigenverbrauch zu erhöhen und die Stromkosten für den Haushalt zu senken. Zu diesem Zweck war in jedem der geprüften Systeme

ein Regler enthalten, der den vorhandenen PV-Überschuss und die im System verfügbaren Speicherkapazitäten möglichst intelligent verwendet. In Tabelle 1 ist eine Beschreibung der im Prüfstand gemessenen Systeme zu finden. Die Bezeichnung der Systeme setzt sich jeweils aus drei Teilen zusammen: Thermischer Speicher, Elektrochemischer Speicher und die Quelle der Wärmepumpe. Die Bezeichnung KombiBatLuft bedeutet entsprechend, dass es sich um ein System mit Kombispeicher, Batterie und einer Luft-Wasser-Wärmepumpe handelt.

		<b>2SpSole</b>	<b>KombiBatLuft</b>	<b>KombiLuft</b>	<b>KombiBatSole</b>
<b>Thermischer Speicher</b>		WW + Heizungs- puffer	Kombispeicher	Kombispeicher	Kombispeicher
Volumen	[l]	390 + 500	600	900	900
Brauchwarmwasser		WW-Speicher	Frischwasser-mo- dul	Interner Wärme- übertrager	Tank-In-Tank
Warmwasser- volumen	[l]	400	-	300	200
<b>Elektrochemischer Speicher</b>		Nein	Ja	Nein	Ja
Kapazität (total)	[kWh]	-	6.5	-	6.9
Max. Entladetiefe	[-]		0.9		0.9
Max. Beladeleistung	[kW]		2.1		2.1
Max. Entladeleistung	[kW]		1.9		1.9
<b>Wärmepumpe</b>					
Quelle		Sole	Luft	Luft	Sole
Wärmeleistung 0/35	[kW]	14.3		14.0	3.3
Wärmeleistung 0/50	[kW]	10.5		k.A.	2.9
Max. Vorlauftemperatur (Verdichterbetrieb)	[°C]	60	60	k.A.	65

*Tabelle 1: Beschreibung der im Prüfstand gemessenen Systeme.*

Je zwei der geprüften Systeme verwenden eine Luft-Wasser-Wärmepumpe, respektive eine Sole-Wasser-Wärmepumpe. Zur Warmwasserbereitung werden vier verschiedene Konzepte verwendet: Ein Warmwasserspeicher, ein interner Wärmeübertrager in einem Kombispeicher, ein Frischwassermodul sowie ein Tank-In-Tank-Speicher. Je ein System mit Luft-Wasser-Wärmepumpe und mit Sole-Wasser-Wärmepumpe beinhaltet einen elektrochemischen Energiespeicher in Ergänzung zu den thermischen Speichern.

Die wichtigsten Kennzahlen der vier getesteten Systeme sind in Bild 1 dargestellt. Das PV-Ertragsverhältnis beschreibt das Verhältnis von PV-Ertrag zu elektrischem Gesamtenergieverbrauch. Aufgrund unterschiedlicher Effizienz der verschiedenen getesteten Systeme und dadurch unterschiedlichem elektrischem Gesamtenergieverbrauch kann das PV-Ertragsverhältnis trotz gleich grosser PV-Anlage und gleichem Nutzenergiebedarf unterschiedlich sein. Im Test erreichte das System KombiBatSole aufgrund des niedrigsten Gesamtenergieverbrauchs den höchsten Wert im PV-Ertragsverhältnis. Ein PV-Ertragsverhältnis von 1 bedeutet ein Netto-Null-Energiegebäude. In diesem Fall müssen Eigenverbrauchsquote und Autarkiegrad identisch sein. Die Messungen bestätigen diese Gesetzmässigkeit.

Das System KombiBatSole erreicht sowohl die höchste Eigenverbrauchsquote (58 %) als auch den höchsten Autarkiegrad (57 %). Die Eigenverbrauchsquote des Systems KombiBatLuft ist mit 56 % die zweithöchste im Test. Gleichzeitig weist das System den höchsten elektrischen Gesamtenergieverbrauch, zu erkennen am niedrigsten PV-Ertragsverhältnis, und auch den

höchsten verbleibenden Netzbezug auf (vgl. Bild 1 rechts). Die Messungen bestätigen die theoretischen Überlegungen aus [4], wonach die Eigenverbrauchsquote bei ineffizienten Systemen steigt. Auch der Autarkiegrad ist bei dem System KombiBatLuft höher als bei dem System KombiLuft obwohl das System KombiBatLuft einen höheren Netzbezug aufweist. Die Messungen zeigen somit diese Schwäche von Eigenverbrauchsquote und Autarkiegrad als Zielgrößen auf.

Bereits in [4] wurde deshalb mit der Netzaufwandszahl eine neue Kennzahl eingeführt. Sie gibt an, welcher Anteil des Gesamt-Nutzenergiebedarfs (die Summe aus Raumwärmebedarf, Warmwasserbedarf und Haushaltsstrom, also eine Mischung aus thermischen und elektrischen Größen) durch Netzbezug gedeckt werden muss. Dieser Wert sollte so niedrig wie möglich sein. Das System KombiBatSole erreicht den niedrigsten und damit den besten Wert. Auch hier ist das System KombiLuft positiv zu bewerten, da es mit relativ einfachen Mitteln (Luft-Wasser-Wärmepumpe, keine Batterie) einen vergleichsweise guten, d.h. niedrigen Wert erreicht. Eine Netzaufwandszahl von 20 % bei KombiBatSole bedeutet, dass zur Deckung des Gesamt-Nutzenergiebedarfs nur 20 % durch Netzbezug aufgewendet werden mussten. Mit anderen Worten, das System lieferte fünfmal mehr Nutzenergie, als es Strom aus dem Netz verbrauchte.

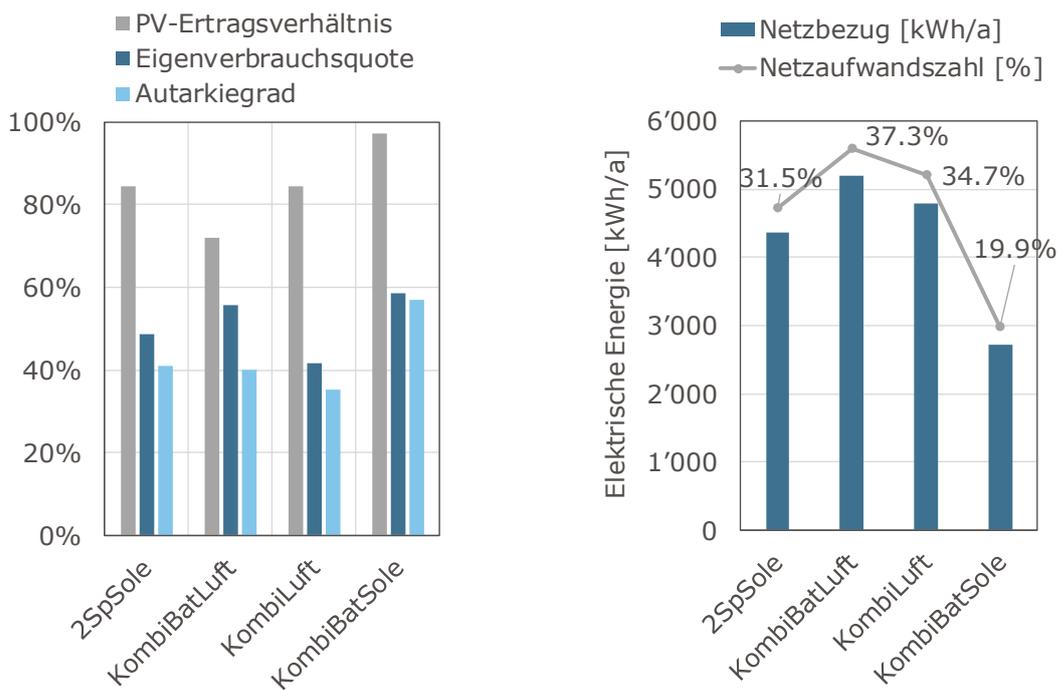


Bild 1: Kennzahlen der vier geprüften Systeme

## Batteriesysteme als zusätzliche Speicher

Zwei der geprüften Systeme verwenden neben dem thermischen Energiespeicher auch einen elektrochemischen Speicher. Die Beschreibung der geprüften Systeme zeigt, dass die verwendeten Batterien eine ähnliche Speicherkapazität aufweisen. Die Lade- und Entladestrategie der Batterien war einfach: PV-Überschüsse, die von der Wärmepumpe nicht in Wärme umgewan-

delt wurden, werden in die Batterie geladen. Sobald der Bedarf an Haushaltsstrom und der Heizungsanlage höher ist als der verfügbare PV-Strom, wird die Batterie wieder entladen. Keines der beiden Systeme hat während der Entladung zwischen Haushaltsstrom und dem Bedarf des Heizsystems unterschieden.

Bild 2 und Bild 3 zeigen die elektrische Leistung der Be- und Entladung der Batterien und die kumulierte Energie während des 6-tägigen Tests. Der Ladezustand der Batterien wurde stündlich überprüft. Er war in beiden Fällen zu Beginn und am Ende des Tests identisch. Damit entspricht der Endwert der Energiebilanz den Verlusten der Batterie. Diese Verluste bestehen aus den Umwandlungsverlusten im Batteriewechselrichter, den Verlusten der Batteriemodule und einem Standby-Verbrauch des Batteriesystems einschliesslich seiner Steuerung. Die Zykleneffizienz der Batteriesysteme betrug 74 % (KombiBatLuft) und 65 % (KombiBatSole).

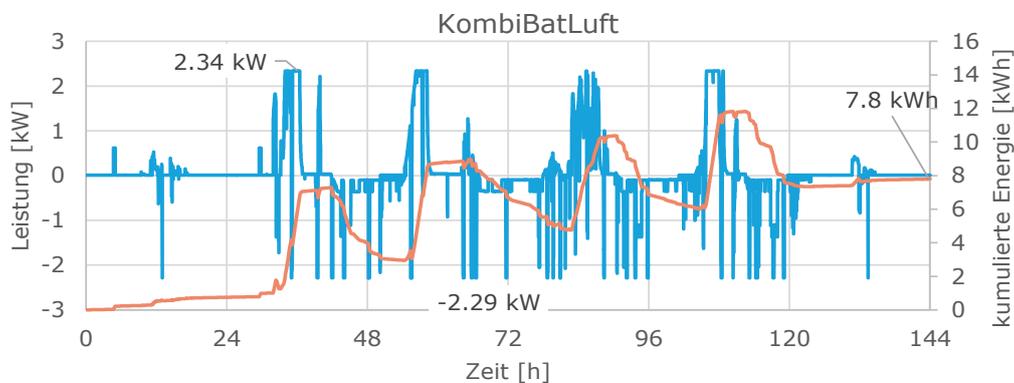


Bild 2: Batterie im System KombiBatLuft: Elektrische Leistung der Be- und Entladung während des Tests sowie kumulierte Energie.

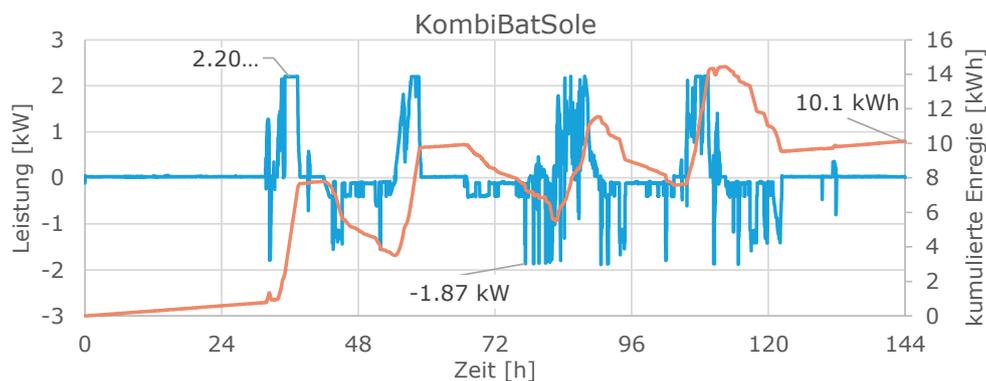


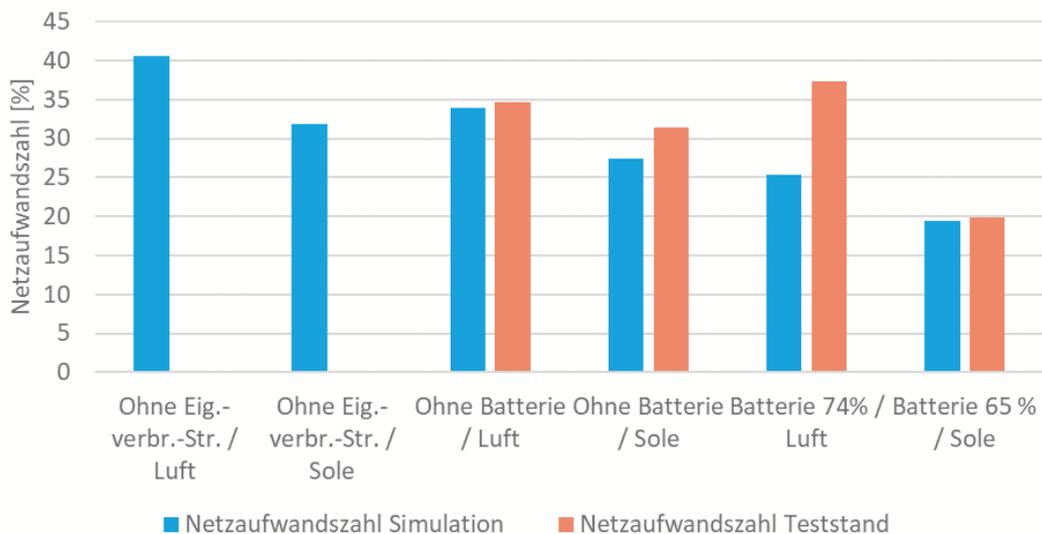
Bild 3: Batterie im System KombiBatSole: Elektrische Leistung der Be- und Entladung während des Tests sowie die kumulierte Energie.

## Ergänzende Simulationen zu den Systemtests

Die vier getesteten Systeme unterscheiden sich wesentlich im hydraulischen Aufbau, den verwendeten Speichern, der Wärmequelle der Wärmepumpe und der gewählten Regelstrategie. Aufgrund der grossen Anzahl unterschiedlicher Systemkomponenten ist es nicht ohne weiteres

möglich, auf Basis der Systemtestresultate die Gründe für die unterschiedlichen Werte der Systeme einzugrenzen. Aus diesem Grund wurden ergänzende Simulationen durchgeführt, die sich jeweils lediglich um einen entscheidenden Parameter unterscheiden.

Auf diese Weise wurde sowohl der Einfluss des Batteriesystems als auch der Quelle der Wärmepumpe auf die im Systemtest ausgewiesenen Kennzahlen untersucht. Dazu wurden Simulationen über die sechs Tage der im Systemtest verwendeten Klima- und Verbrauchsprofile durchgeführt. Als hydraulische Variante wurde ein Kombispeicher mit einem Volumen von 900 l verwendet. Die Eigenverbrauchssteuerung überheizt den Speicher auf eine maximale Speichertemperatur von 58 °C im Warmwasserteil und 48 °C im Raumheizungsteil. Es wurden mit 64 % und 74 % zwei unterschiedliche im Teststand beobachtete Zykluseffizienzen des Batteriesystems untersucht. In Anlehnung an die gemessenen Werte wurde der Unterschied in der Zykluseffizienz mit einer Anpassung der Standby-Verluste von 10 W auf 30 W erreicht. Letzteres entspricht dem Standby-Verbrauch, der für die Batterie mit Zykluseffizienz 64 % gemessen wurde.



*Bild 4: Netzaufwandszahlen der vier getesteten Systeme und Vergleich mit Simulationsergebnissen, die das Potential des jeweiligen Systems aufzeigen*

Bild 4 zeigt einerseits die simulierte Netzaufwandszahlen für Systeme ohne Eigenverbrauchssteuerung (Steuerung nach Wärmebedarf) für ein System mit Luft-Wasser und ein System mit Sole-Wasser-Wärmepumpe. Zum anderen werden die im Teststand gemessenen Netzaufwandszahlen der vier vermessenen Systeme den simulierten Werten gegenübergestellt. In der Simulation wird mit der Basisregelung eine Netzaufwandszahl von 40.6 % beim System mit Luft-Wasser-Wärmepumpe und 31.8 % beim System mit Sole-Wasser-Wärmepumpe erreicht. Durch die Bewirtschaftung des Kombispeichers mit einer Temperaturdifferenz von 10 K kann die Netzaufwandszahl im System mit Luft-Wasser-Wärmepumpe um 6.6 Prozentpunkte auf 34 % gesenkt werden. Bei dem System mit Sole-Wasser-Wärmepumpe beträgt diese Reduktion 4.4 Prozentpunkte und resultiert in einer Netzaufwandszahl von 27.4 %. Eine Batterie mit einer Kapazität von 6 kWh reduziert die Netzaufwandszahl um weitere ca. 8 Prozentpunkte auf 25.4 bzw. 19.5 %.

Ein Vergleich der Simulationsresultate mit den Kennzahlen aus dem Teststand zeigt, dass sämtliche simulierten Varianten eine tiefere Netzaufwandszahl aufweisen, als die getesteten Varianten mit ähnlichen Komponenten. Die Werte des Systems KombiBatSole liegen dabei mit 19.9 % im gemessenen und 19.5 % im simulierten Fall sehr nahe beieinander. Ebenfalls vergleichbare Resultate zeigt die Variante KombiLuft mit 34.7 % für das gemessene und 34.0 % für das simulierte System.

Die grösste Abweichung weist das System KombiBatLuft auf, mit einer Netzaufwandszahl von 37.3 % im Test, in der Simulation konnte mit einem vergleichbaren System ein Wert von 25.4 % erreicht werden. Bei diesem System wurde im Prüfstand der thermische Speicher nicht zur Eigenverbrauchssteigerung verwendet. Aus der Simulation eines solchen Systems ohne Erhöhung des Eigenverbrauchs durch thermische Zwischenspeicherung resultiert eine Netzaufwandszahl von 28.3 %. Somit können lediglich 2.9 Prozentpunkte der Differenz zum gemessenen System mit der fehlenden Nutzung des thermischen Speichers erklärt werden.

Beim System 2SpSole ist die Differenz zwischen Simulation und Messung zwar kleiner, aber mit 4.1 Prozentpunkten dennoch deutlich. Beide Systeme weisen aufgrund von Ineffizienzen im System einen erhöhten elektrischen Gesamtenergieverbrauch und in der Folge auch einen höheren Netzbezug auf, was zu den höheren Netzaufwandszahlen führt. Ein wesentlicher Punkt war die Verbindung zwischen der Wärmepumpe und den thermischen Speichern. Während in einem System die Anordnung der Wärmeübertrager in bestimmten Betriebszuständen sich als ungünstig erwies, wurde im anderen System durch die hohen Volumenströme der Wärmepumpe die thermische Schichtung negativ beeinflusst. Das Resultat in beiden Fällen war, dass die Wärmepumpe auf einem höheren Temperaturniveau als nötig arbeiten musste. Dies verschlechtert den COP und erhöht somit den elektrischen Energieverbrauch.

Ein Vergleich der Simulationsresultate der Systeme mit unterschiedlicher Zykluseffizienz des Batteriesystems zeigt, dass sich die Netzaufwandszahl der beiden simulierten Fälle mit Sole-Wasser-Wärmepumpe um 0.9 Prozentpunkte und diejenige mit Luft-WP um 1.0 Prozentpunkte unterscheiden, wobei eine bessere Effizienz wie erwartet eine tiefere Netzaufwandszahl ermöglicht. Wird die Luft-Wasser-Wärmepumpe durch eine Sole-Wasser-Wärmepumpe ersetzt, so verringert sich im System ohne Batterie die Netzaufwandszahl von 34.0 % auf 27.4 %. Die Resultate der Simulationen mit Batterie liefern vergleichbare Unterschiede. Aus diesen Resultaten kann geschlossen werden, dass ca. 1 Prozentpunkt der Differenz in der Netzaufwandszahl im Systemtest auf die unterschiedliche Batterieeffizienz und ca. 5-7 Prozentpunkte auf die Wärmequelle zurückgeführt werden kann. Die restlichen Differenzen sind durch Unterschiede in den hydraulischen Varianten und der Regelung begründet.

Zusammenfassend schöpfen zwei der vier vermessenen Systeme (KombiBatSole und KombiLuft) das mit der jeweiligen Systemvariante mögliche Potential bereits nahezu aus, bei den anderen beiden Systemen zeigen sich deutliche Verbesserungsmöglichkeiten.

## Ökobilanz von thermischen und elektrochemischen Speichern

Life Cycle Assessment (LCA, Ökobilanz) ist eine Methode zur systematischen Bewertung der Umwelteinwirkungen eines Produktes oder Prozesses. Dabei analysiert die Ökobilanz den ge-

samten Lebenszyklus des betrachteten Produktes bzw. Prozesses und berücksichtigt für die Bestimmung der Umwelteinwirkungen alle Produktionsschritte von der Rohmaterialgewinnung bis zur Abfallaufbereitung. Mit Hilfe einer Ökobilanz können die grössten Umwelteinwirkungen eines Produktes innerhalb seines Lebenszyklus identifiziert und allfällige Verbesserungen vorgenommen werden. Des Weiteren werden Ökobilanzen dazu genutzt, verschiedene Produkte und Prozesse zu vergleichen.

Die Ökobilanz soll einerseits dazu dienen, thermische und elektrochemische Speicher zu vergleichen. Andererseits können so beide Speichermöglichkeiten in den Gesamtzusammenhang eines PV-Wärmepumpensystems gesetzt werden. Für den Vergleich von thermischem und elektrochemischem Speicher wird ein 800 l Kombispeicher und eine Lithium-Ionen-Batterie mit einer nutzbaren Kapazität von 4 kWh gewählt. In einem 800 l Kombispeicher kann über eine Wärmepumpe in etwa ein Äquivalent zu 4 kWh elektrischer Energie gespeichert werden, die beiden Systeme haben also eine vergleichbare Kapazität (siehe auch [9]).

Die in dieser Ökobilanz verwendeten Materialangaben basieren auf den Sachbilanzdaten der Ecoinvent-Datenbank 3.3 [5] sowie dem KBOB-Ökobilanzdatenbestand 2016 und UVEK-Ökobilanzdatenbestand 2018 [6]. Die Zusammenstellung aller verwendeten Komponenten für die Ökobilanz wurde mit Hilfe der SimaPro-Software durchgeführt.

Als Datensatz für das Batteriemodul wird die in [7,8] dokumentierte Lithium-Nickel-Cobalt-Mangan (NCM) Batterie verwendet. Die Kathode basiert auf  $\text{Li}(\text{Ni}_x\text{Co}_y\text{Mn}_z)\text{O}_2$ , die Anode auf Graphit. Die Bilanz wurde ursprünglich für ein Elektrofahrzeug aufgestellt. Diese Einheit wird um einen Batteriewechselrichter und ein Gehäuse zu einem stationären Heimspeicher ergänzt. Die verschiedenen Speichergrössen und -varianten für thermische Speicher werden basierend auf dem Ecoinvent-Eintrag „hot water tank 600 l“ berechnet.



Bild 5: Vergleich des kumulierten Energieaufwands für einen Kombispeicher und eine Lithium-Ionen-Batterie für 4 kWh Stromspeicheräquivalent

Bild 5 zeigt, dass eine Lithium-Ionen-Batterie etwa den 3.5-fachen Energieaufwand eines 800 l Kombispeichers benötigt. Diese Tendenz bleibt auch für unterschiedliche untersuchte Gewichtsvarianten, Kapazitäten, Materialien und Methoden der Wirkungsabschätzung bestehen.

Um den Einfluss der Speicher im gesamten PV-Wärmepumpensystem einordnen zu können, wurden ein PV-System mit 7.2 kWp inklusive PV-Module, PV-Wechselrichter, Montagesystem, Verkabelung, Netzanschluss und Installation, eine Luft-Wasser-Wärmepumpe und weitere Installationsmaterialien einbezogen. In Bild 6 ist zu erkennen, dass im gesamten PV-Wärmepumpensystem Speicher eine eher untergeordnete Rolle spielen. Hier dominiert mit fast drei Viertel des kumulierten Energieaufwands das PV-System.

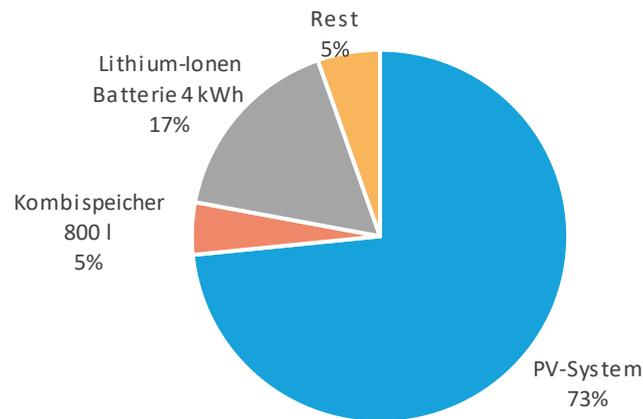


Bild 6: Aufteilung des kumulierten Energieaufwands für ein PV-Wärmepumpensystem mit 7.2 kWp PV-Anlage

## Reduktion von Netzeinspeisespitzen

Die bisher in den Systemtests und ergänzenden Simulationen untersuchten Steuerungen sind auf Eigenverbrauchssteigerung ausgelegt und nicht darauf, die maximale Netzeinspeisung zu reduzieren. Dies ist für einen sonnigen Beispieltag in *Bild 7* dargestellt. Die Eigenverbrauchssteuerung führt dazu, dass bei Speicherkapazitäten, die signifikant kleiner sind als der PV-Ertrag an sonnigen Tagen, der Speicher bereits vor der Mittagsspitze vollständig beladen ist. Dies hat zur Folge, dass die Netzeinspeisespitzen nicht reduziert werden.

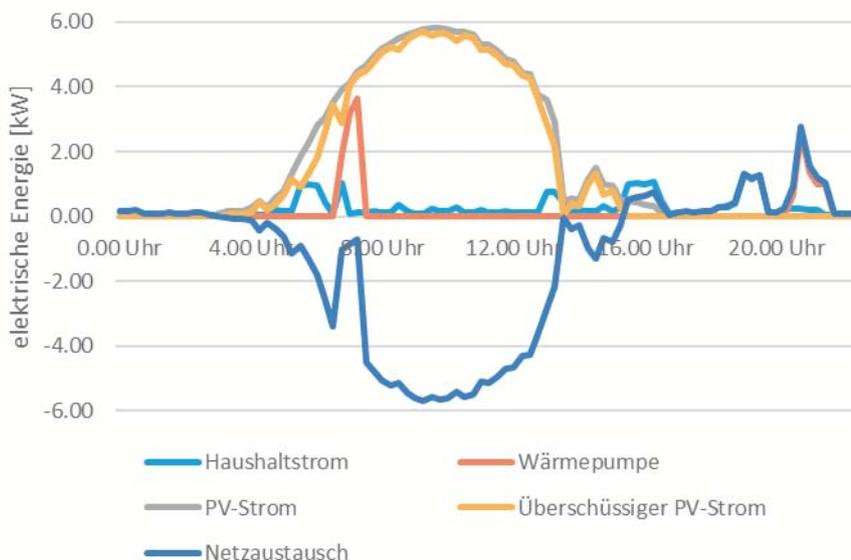
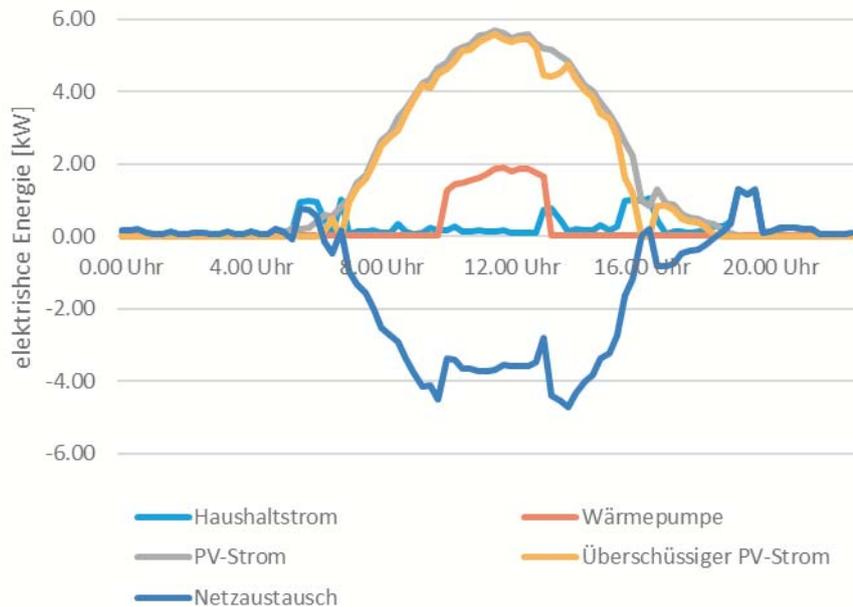


Bild 7: Stromproduktion, Stromverbrauch und Netzaustausch an einem sonnigen Beispieltag mit Steuerung zur Eigenverbrauchssteigerung und 800 l Kombispeicher

Eine alternative Regelungsstrategie, welche die Verringerung der Mittagsspitzen mit Hilfe der Wärmepumpe zum Ziel hat, ist in *Bild 8* dargestellt. Bei dieser Regelungsstrategie wird eine Cutoff-Einspeiseleistung definiert, welche möglichst nicht überschritten werden soll. Auf der Basis der Wetterprognose wird für jeden Tag bestimmt, ob die erwartete PV-Leistung die

Cutoff-Leistung übersteigen wird. Ist dies der Fall, so wird mit der Beladung des Speichers gewartet bis die PV-Leistung über der Cutoff-Leistung liegt.



*Bild 8: Stromproduktion, Stromverbrauch und Netzaustausch an einem sonnigen Beispieltag bei Steuerung mit Cutoff-Leistung (50%) und 800 l Kombispeicher*

Die resultierende Netzeinspeisung ist als Jahresdauerlinie in 15-Minutenmittelwerten für ein System mit Luft-Wasser-Wärmepumpe, 7.2 kWp PV-Anlage und 800 l Kombispeicher (ohne Batterie) sowie Cutoff-Leistungen von 30 %, 50 % und 70 % in Bild 9 dargestellt. Die Resultate zeigen, dass mit der modifizierten Steuerung im Vergleich zur reinen Eigenverbrauchssteuerung die absolute Einspeisespitze leicht gesenkt werden kann. Vor allem kann aber im höheren Leistungsbereich die Einspeisung signifikant reduziert werden.

Eine Cutoff-Leistung von 30 % führt bei der gewählten Speichergösse und der gewählten PV-Leistung dazu, dass immer noch viele Mittagsspitzen nicht abgedeckt werden können. Die besten Resultate werden mit einer Cutoff-Leistung von 50 % der Maximalleistung erreicht. Diese Steuerung ist nicht mehr rein auf maximalen Eigenverbrauch ausgelegt und so steigt gegenüber der Eigenverbrauchssteuerung der Netzbezug um 6.3 % an.

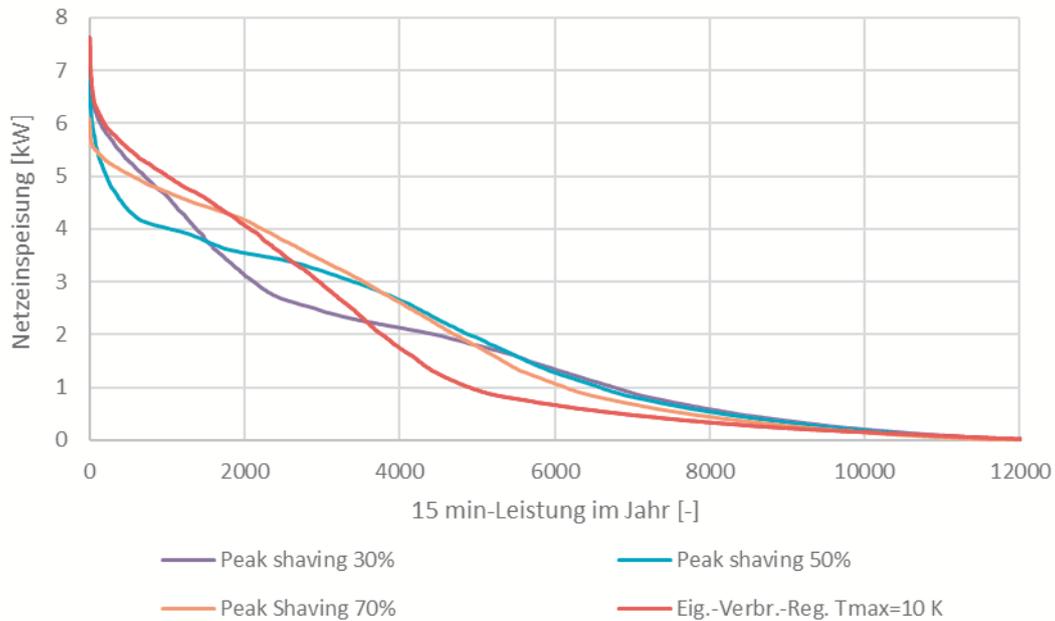


Bild 9: Jahresdauerlinien der Netzeinspeisung bei Steuerung mit Cutoff-Leistung (PV-Leistung im Vergleich zur maximalen PV-Leistung (7.2 kWp), ab welcher die Wärmepumpe beginnt einzuspeichern) im Vergleich zur Eigenverbrauchssteuerung

## Reduktion von Netzbezugsspitzen

Wie die maximale Netzeinspeiseleistung, wird auch die maximale Netzbezugsleistung mit einer Eigenverbrauchssteuerung nicht reduziert. Der thermische Speicher bietet in Kombination mit der thermischen Masse des Gebäudes jedoch die Möglichkeit, die Wärmepumpensteuerung auf den Haushaltsstrom so abzugleichen, dass die Wärmepumpe abgeschaltet wird, sobald der Haushaltsstrom ein Limit übersteigt. In einer Simulation wurde geprüft, inwiefern eine Steuerung, die einen möglichst asynchronen Bezug von Wärmepumpe und Haushaltsstrom zum Ziel hat, die Leistung reduzieren kann. In *Bild 10* ist die Jahresdauerlinie des Netzbezugs in 15-Minutenmittelwerten für die 80 Stunden des Jahres mit der höchsten Bezugsleistung dargestellt. Im Beispielsystem mit Luft-Wasser-Wärmepumpe und 7.2 kWp PV-Anlage kann die Bezugsspitze so um ca. 1.7 kW reduziert werden. Eine weitere Reduktion ist über die Wärmepumpe nicht möglich, da die verbleibende Spitze durch den Haushaltsstrom verursacht wird.

Um die Bezugsspitze weiter zu senken, kann ein Batteriespeicher eingesetzt werden. Für den Vergleich wurde für den Batteriespeicher ebenfalls eine Steuerung implementiert, welche die Reduktion der Bezugsleistung zum Ziel hat. Hierzu wurden zu erreichende Bezugslimits von 2 kW, 3 kW und 4 kW geprüft. Die Steuerung sorgt dafür, dass die Batterie jeweils in der Nacht unter Berücksichtigung des Bezugslimits beladen wird, wobei eine Kapazität gleich dem aus der Wetterprognose bekannten PV-Ertrag des nächsten Tages freigehalten wird. Um auch Bezüge am Morgen decken zu können, beträgt die Mindestbeladung zudem 30 %. Tagsüber wird jeder Netzbezug über dem definierten Limit von der Batterie übernommen. Die Jahresdauerlinie in *Bild 10* zeigt, dass mit einem Batteriesystem mit 6 kWh Kapazität und einer maximalen

Be- und Entladeleistung von 6 kW eine Reduktion auf eine Netzbezugsleistung von max. 3 kW erreicht werden kann.

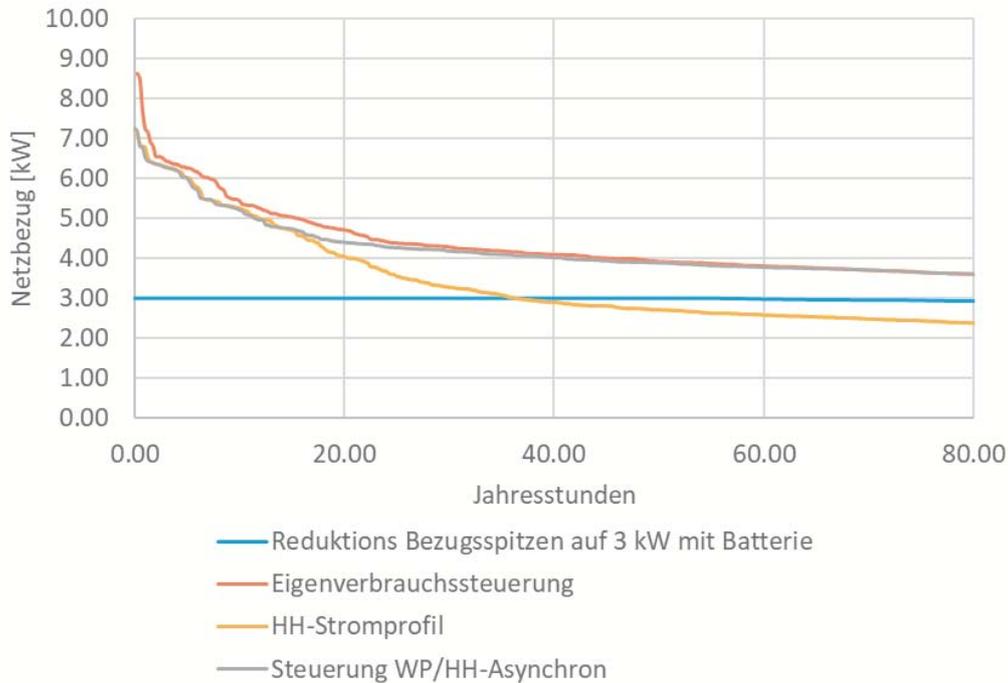


Bild 10: Jahresdauerlinien des Netzbezugs für verschiedene Steuerungsvarianten sowie das Haushaltsstromprofil zum Vergleich

## Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Als Kennzahlen für PV-Wärmepumpensysteme zur Eigenverbrauchssteigerung werden heute meist Eigenverbrauchsquote und Autarkiegrad angegeben. Beide eignen sich allerdings nicht als einzige Ziel- oder Optimierungsgrößen, da sie falsche Anreize setzen. Verluste und Ineffizienzen können auf beide Kennzahlen positiv wirken. Daher sollten sie als Zielgrößen um die Kennzahlen Netzbezug oder Netzaufwandszahl ergänzt oder ersetzt werden. Allerdings haben auch diese beiden Größen Nachteile. Zahlen zum Netzbezug sind nicht ohne Weiteres vergleichbar, es fehlt der Bezug zum Gesamtenergieverbrauch. Die Netzaufwandszahl, die Netzbezug ins Verhältnis zum Gesamt-Nutzenergiebedarf setzt, hat den Nachteil, dass die benötigten Werte im Feld meist nicht bekannt sind. Beide Zahlen berücksichtigen auch nicht die verbleibende Netzeinspeisung. Eine einfach messbare, vergleichbare und auch in Bezug auf Effizienz sinnvolle Zielgröße für Systeme zur Eigenverbrauchssteigerung fehlt bisher.

Mit Steuerungen zur Eigenverbrauchssteigerung werden Netzbezugs- und Netzeinspeisespitzen nicht oder nur geringfügig gesenkt. Netzbetreiber und EVUs haben aber die Option mit passenden Tarifmodellen ein netzdienliches Verhalten des PV-Wärmepumpensystems anzureizen. Es wurde gezeigt, dass mit einer angepassten Steuerung Netzbezugs- und Netzeinspeisespitzen deutlich gesenkt werden können. Zielgröße aus Endkundensicht ist dabei eine möglichst geringe Stromrechnung.

Speicher- und Effizienzverluste sollten verstärkt Berücksichtigung finden. Da die heute üblichen Kennzahlen diese nicht berücksichtigen, sind Effizienzeinbussen durch Steuerungen zur Eigenverbrauchssteigerung bei Herstellern, Installateuren und Endkunden bisher kaum ein Thema. Wie die Messungen im Systemtest zeigen, sollte bei Batterien auf die Zykluseffizienz des gesamten Batteriesystems unter realistischen Betriebsbedingungen geachtet werden. Für eine effiziente thermische Speicherung ist wesentlich, dass der COP der Wärmepumpe bei höheren Speichertemperaturen möglichst wenig abnimmt. Die Speicherschichtung sollte durch Steuerungen zur Eigenverbrauchssteigerung nicht verschlechtert werden. Insbesondere beim Einsatz eines Kombispeichers sind das Speichermanagement und eine gute Temperaturschichtung entscheidend für die Systemeffizienz. In diesen Bereichen zeigten zwei der getesteten Systeme deutliche Defizite.

Daher bildet für eine erfolgreiche Eigenverbrauchssteuerung immer ein gutes, korrekt installiertes System mit aufeinander abgestimmten Komponenten die Grundlage. Ansonsten hilft auch die beste Speicherstrategie wenig. Grundsätzlich gilt vor allem für den thermischen Speicher: Es sollte nur zwischengespeichert werden, wenn in absehbarer Zeit auch eine sinnvolle Nutzung möglich ist. Beispielsweise macht es wenig Sinn, im Sommer Wärme für die Raumheizung zu speichern.

Thermische Speicher können für Wärmeanwendungen Batteriekapazität ersetzen, aber nicht die Batterie selbst, da sie offensichtlich keinen Beitrag zum Haushaltsstromverbrauch liefern können. Da thermische Speicher aktuell kostengünstiger und ökologischer als Batterien sind, sollte der als thermische Energie benötigte Anteil für Warmwasser und Raumwärme auch thermisch gespeichert werden. Dabei ist es sinnvoll zunächst bereits vorhandene thermische Masse zu nutzen (Warmwasserspeicher, thermische Masse des Gebäudes, ggfs. Pufferspeicher). Für die Abdeckung des als elektrische Energie benötigten Haushaltsstroms kann zusätzlich ein Batteriespeicher installiert werden. Werden zusätzliche Speicher installiert, sollte die Speicherkapazität für Warmwasser (thermischer Speicher) und Haushaltsstrom (Batteriespeicher) gemäss dem durchschnittlichen täglichen Verbrauch ausgelegt werden, um ein gutes Kosten-Nutzen-Verhältnis zu erreichen.

## Quellen

- [1] R. Haberl, E. Frank, P. Vogelsanger, Holistic System Testing – 10 Years of Concise Cycle Testing, in: Proc. SWC 2009, Johannesburg, South Africa, 2009.
- [2] R. Haberl, M.Y. Haller, E. Frank, Solare Wärmepumpensysteme auf dem Prüfstand - Systemtests von 11 verschiedenen Systemen, in: 24 OTTI Symp. Thermische Solarenergie, OTTI e.V., Regensburg, Kloster Banz, Bad Staffelstein, Germany, 2014.
- [3] R. Haberl, A. Reber, M.Y. Haller, Concise Cycle Test - Beschreibung der Prüfmethode, (n.d.). [http://www.spf.ch/fileadmin/user\\_upload/Testing/Systeme/kombi/SPF\\_CCT-Methode\\_v1.0.pdf](http://www.spf.ch/fileadmin/user_upload/Testing/Systeme/kombi/SPF_CCT-Methode_v1.0.pdf) (accessed November 25, 2018).
- [4] M. Haller, M. Battaglia, R. Haberl, A. Reber, E. Bamberger, M. Borner, Steigerung des Photovoltaik-Eigenverbrauchs durch intelligente Wärmepumpen, in: 23 Tag. BFE-Forschungsprogramms, HTI Burgdorf, 2017.
- [5] R. Frischknecht, N. Jungbluth, H.-J. Althaus, G. Doka, R. Dones, T. Heck, S. Hellweg, R. Hischier, T. Nemecek, G. Rebitzer, M. Spielmann, The ecoinvent Database: Overview and Methodological Framework (7 pp), Int. J. Life Cycle Assess. 10 (2005) 3–9. doi:10.1065/lca2004.10.181.1.
- [6] KBOB-Ökobilanzdatenbestand 2016 und UVEK-Ökobilanzdatenbestand 2018, (2018). [http://www.dflca.ch/inventories/Kommunikation\\_Oekobilanzdatenbestand\\_KBOB-2016\\_UVEK-2018.pdf](http://www.dflca.ch/inventories/Kommunikation_Oekobilanzdatenbestand_KBOB-2016_UVEK-2018.pdf) (accessed January 10, 2019).
- [7] L.A.-W. Ellingsen, G. Majeau-Bettez, B. Singh, A.K. Srivastava, L.O. Valøen, A.H. Strømman, Life Cycle Assessment of a Lithium-Ion Battery Vehicle Pack: LCA of a Li-Ion Battery Vehicle Pack, J. Ind. Ecol. 18 (2014) 113–124. doi:10.1111/jiec.12072.
- [8] P. Stolz, A. Messmer, R. Frischknecht, Life Cycle Inventories of Road and Non-Road Transport Services, (n.d.) 134.
- [9] M. Battaglia, R. Haberl, E. Bamberger, M. Haller, Increased self-consumption and grid flexibility of PV and heat pump systems with thermal and electrical storage, Energy Procedia. 135 (2017) 358–366. doi:10.1016/j.egypro.2017.09.527.

Gregor Steinke, Andreas Genkinger, Prof. Thomas Afjei  
Institut Energie am Bau – FHNW

# Integration von Luft/Wasser- Wärmepumpen im städtischen Kontext

## Zusammenfassung

*Luft/Wasser-Wärmepumpen sind eine wichtige Option beim Ersatz fossiler Wärmeerzeuger in Wohngebäuden. Für den dicht bebauten städtischen Kontext wurden in dieser Studie für die Städte Zürich und Basel Herausforderungen beim Einsatz von Luft/Wasser-Wärmepumpen bezüglich des Lärmschutzes, der gestalterischen Integration und der Bewilligung untersucht. Eine Marktanalyse hat gezeigt, dass die Schallleistungspegel von Standardgeräten in einem weiten Bereich streuen. Für kleinere bestehende Wohngebäude mit einem Wärmeleistungsbedarf bis 15 kW sind leise Luft/Wasser-Wärmepumpen als Innen-, Split und Aussengeräte verfügbar, die die Lärmschutzanforderung auch in beengten baulichen Situationen erfüllen. Beim Systemvergleich schneiden innen aufgestellte Luft/Wasser-Wärmepumpen im Untergeschoss oder aussen aufgestellte Kompaktgeräte im Erdgeschoss insgesamt besser ab, als die Aufstellung im Dachbereich. Dachlösungen bieten für bestehende Gebäude im städtischen Kontext Potential und sollten weiterentwickelt werden. Gute gestalterische Integration kann durch die Hersteller mit modularem Gerätedesign und der Auswahlmöglichkeit verschiedener Materialien unterstützt werden. Es wird empfohlen, einen Leitfaden mit Standardlösungen zur gestalterischen Integration für Planende, Unternehmer und Bauherrschaften zu erarbeiten.*

## Summary

*Air/water heat pumps are an important option when replacing fossil heating systems. For the densely built-up urban context, this study examines challenges for the cities of Zurich and Basel in the use of air/water heat pumps with regard to noise protection, design integration and building permit. A market analysis has shown that the sound power levels of standard devices vary over a wide range. For smaller existing residential buildings with a thermal power requirement of up to 15 kW, quiet air/water heat pumps are available as indoor, split and outdoor units that meet the noise protection requirements even in dense building situations. When comparing systems, indoor air/water heat pumps in the basement or outdoor compact units on the ground floor perform better overall than roof-mounted units. Roof solutions offer potential for existing buildings in an urban context and should be further developed. Good design integration can be supported by the manufacturers with modular device design and the choice of different materials. It is recommended to develop a guideline with standard solutions for design integration for planners, entrepreneurs and building owners.*

## Einleitung und Motivation

In diesem Beitrag werden Ergebnisse einer im Auftrag der Stadt Zürich und dem Kanton Basel-Stadt 2017/18 durchgeführten Studie zur Integration von Luft/Wasser-Wärmepumpen im städtischen Kontext dargestellt [1]. Das Projekt wurde durch das Institut Energie am Bau und das Institut Industrial Design der FHNW bearbeitet.

Luft/Wasser-Wärmepumpen sollen bei der Umsetzung der Energiestrategie 2050 eine wichtige Rolle in der Wärmeversorgung übernehmen. Etwa zwei Drittel der Liegenschaften in Basel-Stadt haben derzeit ein fossiles Heizsystem (Stand 2018). In der Stadt Zürich trifft dies für 77 % der Wohnungen zu. Erneuerbare Wärmeerzeugung mit Fernwärme ist nicht überall verfügbar und Sole/Wasser-Wärmepumpen mit Erdsonden sind nicht immer möglich. Luft/Wasser-Wärmepumpen nutzen mit der Energie der Aussenluft erneuerbare Quellen. Erneuerbarer Strom kann für den Betrieb verwendet werden. Derzeit stösst die Luft/Wasser-Wärmepumpe im urbanen Raum allerdings noch auf Hindernisse. Luft/Wasser-Wärmepumpen gelten als laut, ästhetisch unbefriedigend und wenig energieeffizient. Aussen aufgestellte Anlagen können Lärmklagen auslösen oder wegen einer mangelhaften Berücksichtigung der gestalterischen Integration auf Ablehnung stossen. Jedoch gibt es bereits heute leise, effiziente und gestalterisch gut integrierbare Luft/Wasser-Wärmepumpen.

In Fortführung der Studie «Stadtverträgliche Luft/Wasser-Wärmepumpen als Hauptwärmeerzeuger» von 2014 [2] werden im hier dargestellten Projekt eine Marktanalyse mit aktualisierten und erweiterten Schall- und Energieeffizienzdaten erstellt. Die damaligen Anforderungen an Effizienz und Schall werden aktualisiert und präzisiert und konkrete Lösungen für die gestalterische Integration dokumentiert und erarbeitet. Im Weiteren werden Ideen und Vorschläge für eine Vereinfachung der Bewilligungspraxis vorgestellt. In der Studie werden Serienmodelle von Luft/Wasser-Wärmepumpen verschiedener Bauart für Einfamilienhäuser und kleine Mehrfamilienhäuser im Leistungsbereich von 4 bis etwa 50 kW betrachtet, vor allem für den Ersatz bestehender Wärmeerzeuger.

## Marktangebot an leisen und energieeffizienten Luft/Wasser-Wärmepumpen

Beim Einsatz von Luft/Wasser-Wärmepumpen ist besonders im städtischen Kontext der Lärmschutz von grosser Bedeutung. Die Schallemissionen marktverfügbarer Geräte streuen in einem weiten Bereich. Im Verlauf der letzten Jahre sind einige sehr leise Wärmepumpen auf den Markt gekommen. Es ist anzunehmen, dass sich dieser Trend künftig fortsetzt. Die Vergleiche mit der letztmaligen Auswertung [2] zeigen, dass die Schalleistungspegel im Mittel um 4 dB(A) sanken. Die Summenhäufigkeitsverteilung der Schalleistungspegel stellt sich wie folgt dar:

Schalleistungspegel Nacht max.	≤ 50 dB(A)	≤ 55 dB(A)	≤ 60 dB(A)	≤ 65 dB(A)	≤ 70 dB(A)
Summenhäufigkeit	12 %	37 %	70 %	87 %	98 %

*Tabelle 1: Summenhäufigkeitsverteilung der Schalleistungspegel aller 358 ausgewerteter Geräte. Lesehilfe zur Tabelle, z.B. 3. Spalte von links: 37 % der ausgewerteten Geräte haben einen Schalleistungspegel Nacht max. von weniger oder gleich 55 dB(A).*

Die Schallleistungspegel der ausgewerteten Splitgeräte weisen im Vergleich zu den anderen Gerätetypen die grösste Streuung auf, aber es gibt auch einzelne Splitgeräte mit sehr guten Schallwerten. Aussen aufgestellte Luft/Wasser-Kompaktwärmepumpen haben bauartbedingt höhere Schallemissionen als innen aufgestellte Geräte und Splitgeräte. Der für den Lärmschutznachweis erforderliche Schallleistungspegel «Nacht max.» marktverfügbarer Luft/Wasser-Wärmepumpen ist differenziert nach Gerätetyp in Bild 1 dargestellt.

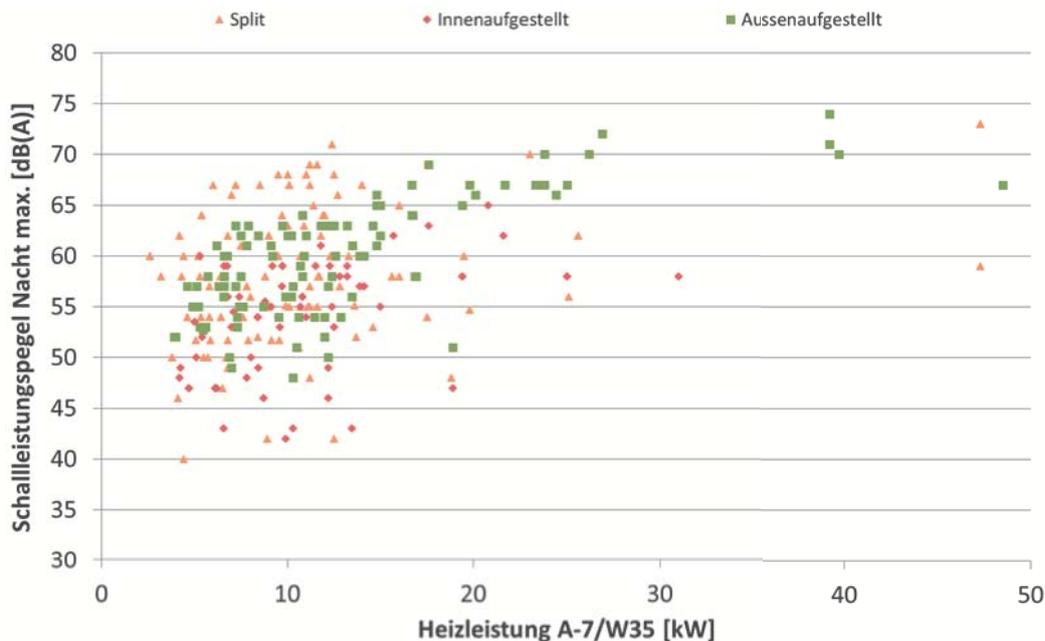


Bild 1: Schallleistungspegel «Nacht max.» marktverfügbarer Luft/Wasser-Wärmepumpen in Bezug zur Heizleistung, differenziert nach Gerätetypen. Datengrundlage: FWS-Schalldatenverzeichnis [3] und eigene Recherche (Stand 06.2018)

Aus den Schallleistungspegeln der leisen Geräte der jeweiligen Leistungsbereiche wurden die Mindestdistanzen der Schallquelle zum Empfänger gemäss den Anforderungen für den Lärmschutz in Zürich bzw. Basel berechnet. Für die in städtischen Wohnquartieren relevante Empfindlichkeitsstufe ES II sind nach Lärmschutzverordnung [4] und cercle bruit [5] je nach Gerätetyp und Ort die folgenden Mindest-Distanzen erforderlich.

- Für Geräte mit einer Heizleistung von ca. 5 bis 10 kW sind in Zürich je nach Gerätetyp mindestens 1.5 bis 4.5 m, in Basel 1 bis 3 m Distanz notwendig. Dabei ist zu beachten, dass es in Zürich einen zusätzlichen Vorsorgezuschlag von 3 dB gibt und somit strengere Anforderungen als in Basel gelten.
- Bei einer Heizleistung von ca. 15 bis 20 kW sind für Splitgeräte in Zürich etwa 3 bis 6 m und bei innen aufgestellten Luft/Wasser-Wärmepumpen ca. 5 bis 10 m Abstand bis zum für den Lärmschutznachweis relevanten Fenster erforderlich. Aussen aufgestellte Kompaktgeräte in diesem Leistungsbereich benötigen 5 bis 16 m Distanz.
- In Basel beträgt der erforderliche Abstand bei dieser Heizleistung für Splitgeräte etwa 2 bis 4 m und 3 bis 7 m Abstand bei innen aufgestellten Luft/Wasser-Wärmepumpen. Aussen aufgestellte Geräte benötigen bei einer Heizleistung von ca. 15 bis 20 kW gut 3 bis 11 m Distanz.

- Für 25 kW sind in Zürich ca. 7 m bei Splitgeräten, 14 m bei innen aufgestellten Luft/Wasser-Wärmepumpen und 25 m bei aussen aufgestellten Wärmepumpen notwendig, was im städtischen Kontext nur schwer realisierbar ist. Bei ca. 30 kW benötigen die leisesten Splitgeräte 8 m und innen aufgestellte Wärmepumpen bereits 14 m Abstand. Aussen aufgestellte Luft/Wasser-Wärmepumpen stossen hier ohne zusätzliche Lärmschutzmassnahmen an ihre Grenzen, da ca. 28 m Mindestdistanz notwendig wären. In Basel sind für 25 kW ca. 5 m bei Splitgeräten, 10 m bei innen aufgestellten Luft/Wasser-Wärmepumpen und 18 m bei aussen aufgestellten Wärmepumpen notwendig. Bei ca. 30 kW benötigen die leisesten Splitgeräte gut 5.5 m und innen aufgestellte Wärmepumpen bereits 10 m Abstand. Für aussen aufgestellte Luft/Wasser-Wärmepumpen wären ca. 20 m Mindestdistanz notwendig.

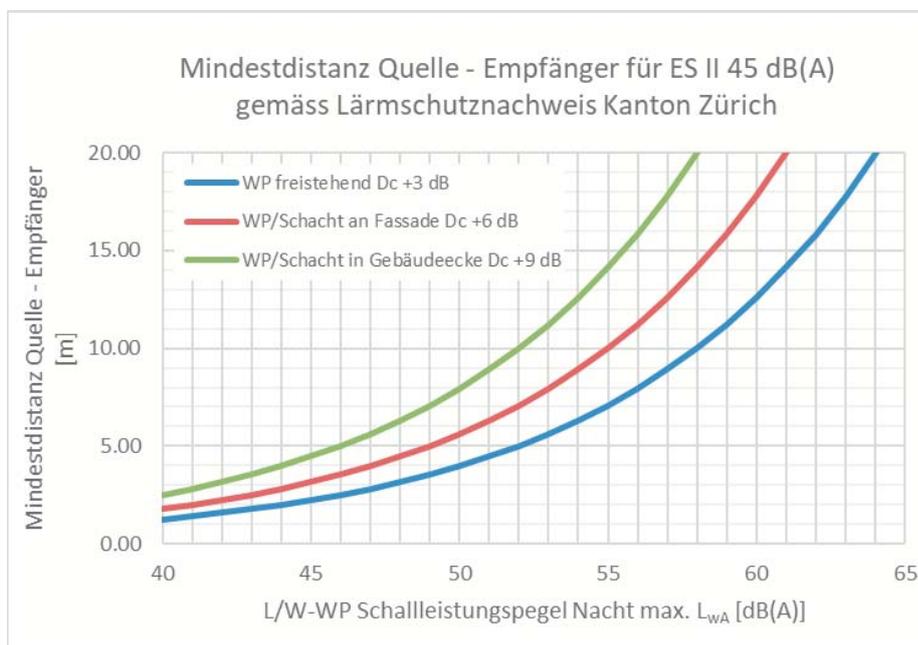


Bild 2: Mindestdistanz der Schallquelle zum Empfänger in Abhängigkeit des Schalleistungspegels «Nacht max.» der Luft/Wasser-Wärmepumpen und der Aufstellungssituation zur Erfüllung des Planungswerts ES II 45 dB(A) gemäss LSV [4] für die Stadt Zürich. Das Richtwirkungsmass  $D_c$  hängt von der Aufstellungssituation ab.

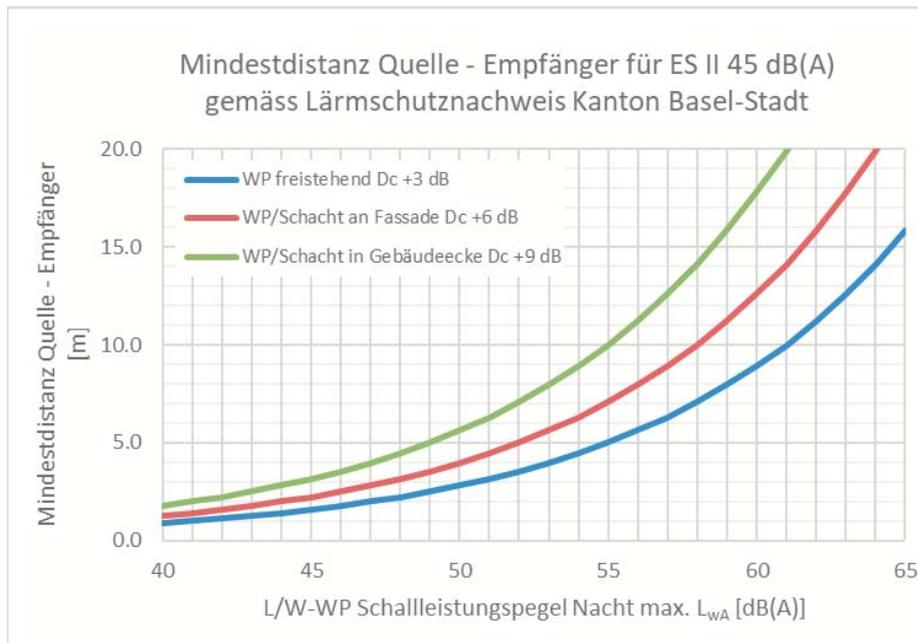


Bild 3: Minstdistanz der Schallquelle zum Empfänger in Abhängigkeit des Schalleistungspegels «Nacht max.» der Luft/Wasser-Wärmepumpen und der Aufstellungssituation.

Als grafische Planungshilfe für die Geräteauswahl und –aufstellung wurden Diagramme erarbeitet, die den Schalleistungspegel in Abhängigkeit zur Aufstellungssituation (Wärmepumpe freistehend, Wärmepumpe/Schacht an Fassade, Wärmepumpe/Schacht in Gebäudeecke) und zum minimalen Abstand zum Immissionsort gemäss Lärmschutznachweis der Stadt Zürich und des Kantons Basel-Stadt zeigen (Bild 2 und 3). Mit Hilfe der Darstellungen lassen sich einerseits für konkrete bauliche Situationen auf Basis der vorhandenen Distanz der Quelle zum Empfangsort die maximal möglichen Schalleistungspegel der Geräte ermitteln. Andererseits kann aus den Grafiken für ein gewähltes Gerät mit bekanntem Schalleistungspegel «Nacht max.» der Mindestabstand von Schallquelle zum Empfänger bestimmt werden.

Im Bereich der Energieeffizienz hat die Aktualisierung der Daten ergeben, dass gegenüber der 2014 erstellten Studie «Stadtverträgliche Luft/Wasser-Wärmepumpen als Hauptwärmeerzeuger» [2] keine wesentlichen Änderungen feststellbar sind.

Als Basis für die Energieeffizienz wird heutzutage vermehrt der sogenannte «Seasonal Coefficient Of Performance» (SCOP) verwendet. Beim SCOP handelt es sich um einen mit Meteorologischen Daten gewichteten, mittleren COP-Wert, der den jahreszeitlichen Schwankungen gerecht wird. Der SCOP soll mittelfristig den COP als Effizienzkriterium für Wärmepumpen-Heizanlagen ablösen.

Tabelle 2 zeigt die vorgeschlagenen Mindest-Werte für den SCOP für stadtverträgliche Luft/Wasser-Wärmepumpen (fett gedruckt).

		SCOP 35 °C		
		3.7	<b>3.9</b>	4.1
SCOP 55 °C	2.7	98 %	80 %	63 %
	<b>2.9</b>	94 %	78 %	62 %
	3.1	76 %	68 %	60 %

*Tabelle 2: Vorschlag für Mindest-SCOP-Werte und Erfüllungsgrad von Wärmepumpen-System-Modul Geräten in Abhängigkeit variabler Anforderungen an den SCOP 35 °C und SCOP 55 °C. Lesehinweis zur Tabelle: Wenn man für 35 °C Vorlauftemperatur einen SCOP von 3.9 und für 55 °C Vorlauftemperatur einen SCOP von 2.9 vorschreibt, dann erfüllen 78 % der Wärmepumpen-System-Modul-Geräte diese Anforderung.*

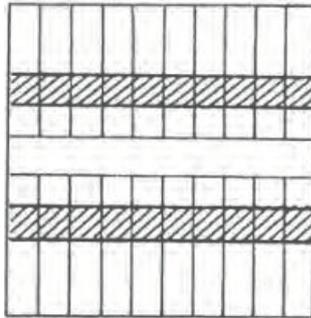
Im Rahmen der Marktanalyse wurden auch Gerätemasse, Konstruktionsprinzipien und Gestaltung betrachtet. Die Abmessungen nehmen mit zunehmender Leistung aufgrund der höheren erforderlichen Luftmenge zu. Je tiefer die Schallemissionen von Geräten mit gleicher Leistung und gleichem Typ, umso grösser sind meist die Geräte. Dies liegt daran, dass bei grösseren Geräten aufwändigere Massnahmen zur Schalldämmung möglich sind und auch grössere, langsam laufende und damit leisere Ventilatoren zum Einsatz kommen. Ausseneinheiten von Splitgeräten sind kleiner als Luft/Wasser-Kompaktwärmepumpen.

## Integration im städtischen Kontext und am Gebäude

Neben Energieeffizienz und Lärmschutz ist die gestalterische Integration im urbanen Kontext in Zürich und Basel von grosser Bedeutung. In der hier dargestellten Studie werden sechs verschiedene bauliche Situationen, die für den Einsatz von Serienmodellen von Luft/Wasser-Wärmepumpen geeignet sind, charakterisiert und beurteilt. Exemplarisch sind in Bild 4 und 5 zwei typische bauliche Situationen dargestellt.

Es bestehen - im vom öffentlichen Stadtraum nicht einsehbaren Privatgarten - eine hohe Gestaltungsfreiheit und Stadtbildtoleranz, jedoch ist dieser Bereich sehr lärmsensibel. Im Gegensatz dazu ist die Integration im städtischen Kontext in beengten Vorgartensituationen schwieriger zu bewerkstelligen.

### Bauliche Situation Beispiel 1: Einfamilienhaus EFH Reihe – geschlossene Struktur

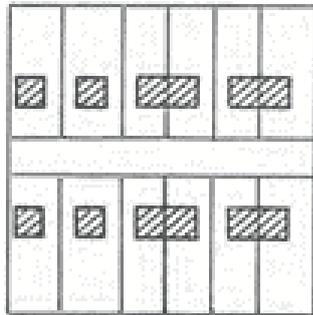


Baustruktur:	strassenbegleitende Bebauung, Reihung, geschlossene Struktur
Geschosse:	2
Ausnützungsziffer:	40 – 70 %
Wohneinheiten:	je 1
Erschliessung:	strassenseitig
Freibereiche:	strassenseitiger Vorgarten, Privatgarten
Energiebezugsfläche:	80 - 200 m <sup>2</sup>
Heizleistung:	ca. 4 - 15 kW
Abstände Schall:	ca. 3 - 15 m (Emissionsort zum Immissionsort)



*Bild 4: Typische und charakteristische Situation bei Einfamilienhäusern im Kanton Basel-Stadt. Die Nutzung und Gestaltung der Vorgärten ist im Bau- und Planungsgesetz geregelt. Die Aufstellung der Geräte ist im Privatgarten (z. T. sehr tief) oder mit Einschränkung im Vorgarten / Vorbereich (z. T. aber sehr geringe Tiefe) möglich. Die Vorgärten sind stark stadtbildprägend, daher erfordert die gestalterische Integration hier grosse Sorgfalt.  
Quellen [6] [7] [8]*

## Bauliche Situation Beispiel 2: Mehrfamilienhaus MFH freistehend – urbane Struktur



Baustruktur:	strassenbegleitende Bebauung; Einzel-, Doppel- oder kurze Reihengebäude, urbane Struktur
Geschosse:	2 – 4
AZ:	50 – 100 %
Wohneinheiten:	je 2 - 12
Erschliessung:	strassenseitig oder seitlich
Freibereiche:	strassenseitiger Vorgarten, Zone zwischen den Gebäuden, rückwärtiger Gemeinschaftsgarten
Energiebezugsfläche:	250 - 1200 m <sup>2</sup>
Heizleistung:	ca. 10 - 90 kW
Abstände Schall:	ca. 3 - 15 m (Emissionsort zum Immissionsort)



*Bild 5: Typische und charakteristische Situation bei Mehrfamilienhäusern in der Stadt Zürich. Die erforderliche Heizleistung liegt bei grösseren, bis zu viergeschossigen Bestandsgebäuden im oberen Bereich. Die Aufstellung ist im rückwärtigen, aber lärmsensibleren Garten, in der Zwischenzone neben den Gebäuden oder mit Einschränkung im Vorgarten möglich. Die Vorgärten können stark stadtbildprägend sein und die gestalterische Integration kann grosse Sorgfalt erfordern. Quellen [6] [7] [9]*

### Systemvarianten

Verschiedene Systemvarianten zur Anordnung von Luft/Wasser-Wärmepumpen im Gebäudekontext werden in Tabelle 3 verglichen und bewertet. Es wird bei der Betrachtung von einem bestehenden Wohngebäude im städtischen Kontext ausgegangen. Der Vergleich ist nach dem Aufstellort der Wärmepumpe und dem Gerätetyp (innen, aussen, Split) gegliedert. Neun einzelne Kriterien werden mit 1 bis 5 Punkten bewertet. Je besser eine Variante bei den Einzelkriterien im Vergleich zu den anderen Varianten zu bewerten ist, desto höher die Punktzahl. Bei der Berechnung der Mittelwerte in Tabelle 3 werden alle Einzelkriterien gleich gewichtet. Im Folgenden werden zunächst die einzelnen Kriterien und Bewertungen kurz erläutert.

- **Baulicher Aufwand**

Aussen aufgestellte Luft/Wasser-Kompaktwärmepumpen erfordern im Vergleich den geringsten baulichen Aufwand, falls sie aussen direkt an der Aussenwand des Gebäudes platziert werden können. Bei der Aussenaufstellung von Komponenten von Luft/Wasser-Wärmepumpen ist ein statisch tragfähiger Untergrund gemäss Herstellerangaben erforderlich und der Ablauf anfallenden Kondensats muss sichergestellt sein. Heizleitungen von Luft/Wasser-Kompaktwärmepumpen müssen frostsicher verlegt werden. Mit zunehmender Entfernung vom Gebäude steigt daher der bauliche Aufwand für Erdarbeiten an. Für innen aufgestellte Luft/Wasser-Wärmepumpen ist der bauliche Aufwand wesentlich von der konkreten baulichen Situation abhängig. Bei einem grosszügig dimensionierten

Aufstellraum im UG mit vorhandenen Fenstern oder Lichtschächten, die sich für den Luftansaug und -ausblas nutzen lassen, ist der Aufwand relativ gering. Je beengter die Platzverhältnisse, je ungünstiger die Raumgeometrie und je aufwendiger die Luftführung, desto höher der bauliche Aufwand.

Wenn die Luft/Wasser-Wärmepumpe im Dachbereich aufgestellt wird, sind zusätzlich Arbeiten an der Dachkonstruktion und Dacheindeckung notwendig, falls die Luftführung über Öffnungen in der Dachfläche erfolgt. Zudem kann bei Dachkonstruktionen im Leichtbau ein erhöhter baulicher Aufwand für den Schallschutz gegen Körperschall erforderlich sein, um lärmsensible Räume im Dachbereich zu schützen.

- **Platzbedarf innen**

Bei aussen aufgestellten Luft/Wasser-Kompaktwärmepumpen ist der Platzbedarf im Gebäude am geringsten. Innen aufgestellte Luft/Wasser-Wärmepumpen haben den grössten Platzbedarf und können in Flächenkonkurrenz zu Wohnnutzungen im Dachbereich oder Nebenutzungen im Untergeschoss treten.

- **Stadtbildintegration**

Je weniger die Komponenten von Luft/Wasser-Wärmepumpen und Elemente der Luftführung vom öffentlichen Stadtraum aus sichtbar sind, desto höher ist die Stadtbildverträglichkeit. Dabei ist der Aussenbereich im Erdgeschoss am Gebäude sensibler als der Dachbereich. Die sichtbare Aufstellung im Vorgarten hat den grössten Einfluss auf das Stadtbild. Im Dachbereich sind verschiedene gebäudetechnische Elemente, wie Kamine, Antennen, Lüftungselemente oder Solarkollektoren üblich und gestalterisch gut integrierbar.

- **Aufwand Bewilligung**

Die Bewilligung von Luft/Wasser-Wärmepumpen wird in Basel und Zürich unterschiedlich gehandhabt. In Zürich besteht für innen aufgestellte Wärmepumpen ein vereinfachtes Bewilligungsverfahren mit verkürzten Bearbeitungsfristen. Für Luft/Wasser-Wärmepumpen mit aussen aufgestellten Komponenten ist derzeit ein ordentliches Baubewilligungsverfahren mit Publikation im Amtsblatt erforderlich. In Basel-Stadt ist derzeit für alle Luft/Wasser-Wärmepumpen-Typen immer ein ordentliches Baubewilligungsverfahren notwendig. Aussen aufgestellte Luft/Wasser-Wärmepumpen im Vorgartenbereich sind in Basel-Stadt in der Regel nicht bewilligungsfähig. Das Bewilligungsverfahren wird in Basel-Stadt momentan überarbeitet und voraussichtlich vereinfacht.

- **Lärmschutz innen**

Aussen aufgestellte Luft/Wasser-Kompaktwärmepumpen verursachen die geringste Lärmbelastung im Gebäude. Die Innenaufstellung von Luft/Wasser-Wärmepumpen im Dachbereich ist für den Schallschutz innen am sensibelsten, da im Dachbereich oftmals Wohn- und Schlafräume angeordnet sind. Die Körperschallübertragung ans Gebäude muss durch geeignete Massnahmen der Schallentkopplung gemäss Herstellerangaben sichergestellt werden. Neben der Aufstellung der Geräte sind dabei auch Anschlüsse der Luftkanäle, Kältemittel-, Heiz-, Kondensat- und Elektroleitungen zu beachten. Bei aussen aufgestellten Luft/Wasser-Kompaktwärmepumpen sind die Gefahren der Körperschallübertragung ans Gebäude geringer als bei innen aufgestellten Wärmepumpen. Bei der Aufstellung im Dachbereich können bei Holzleichtbaukonstruktionen der obersten Geschossdecke und der Dachkonstruktion zusätzliche und aufwendige Massnahmen zur Vermeidung der Körperschallübertragung erforderlich sein.

- **Lärmschutz aussen**

Innen aufgestellte Luft/Wasser-Wärmepumpen und Splitgeräte verursachen im Aussenbereich im Vergleich zu aussen aufgestellten Luft/Wasser-Kompaktwärmepumpen eine geringere Lärmbelastung, falls jeweils möglichst leise Geräte gewählt werden. Bei Aussenkomponenten ist der Aufstellort und bei innen aufgestellten Luft/Wasser-Wärmepumpen die Anordnung der Luftansaug- und Luftausblasöffnungen entscheidend. Die Lärmbelastung kann durch zusätzliche Lärmschutzmassnahmen verringert werden.

- **Energieeffizienz**

Luft/Wasser-Kompaktwärmepumpen weisen eine etwas höhere Energieeffizienz als Splitanlagen auf. Die Energieeffizienz bei Splitanlagen nimmt mit zunehmender Länge der Kältemittelleitungen ab.

- **Investitionskosten**

Bei Splitanlagen sind die Investitionskosten meist geringer als bei Luft/Wasser-Kompaktwärmepumpen. Die Kosten sind vom baulichen Aufwand und von allenfalls notwendigen zusätzlichen Lärmschutzmassnahmen abhängig.

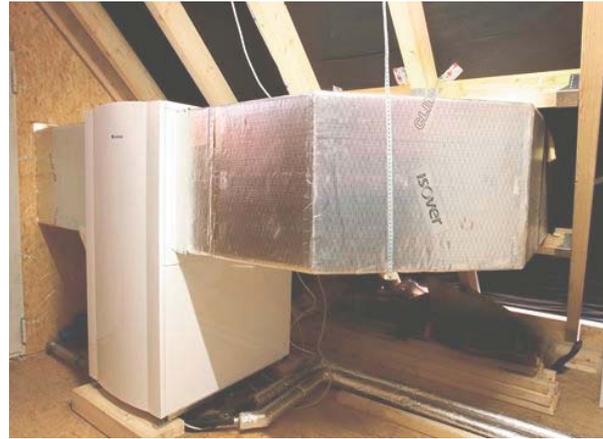
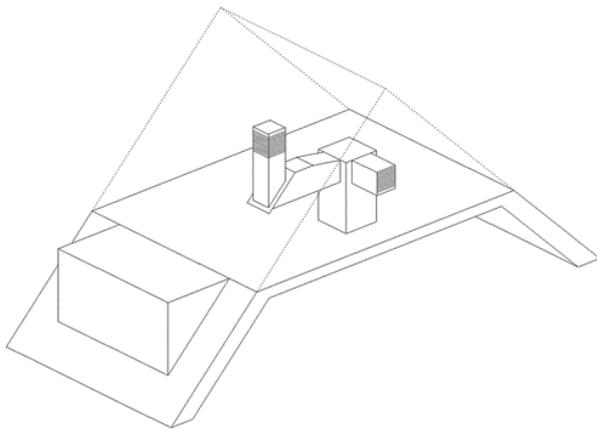
- **Betriebskosten**

Im Betrieb fallen Kosten für Elektrizität und Wartung an. Bei Splitwärmepumpen sind die Betriebskosten im Vergleich zu Luft/Wasser-Kompaktwärmepumpen höher, da eine häufigere Überprüfung des Kältemittelkreislaufs durch einen Fachunternehmer notwendig ist. Zudem ist die Energieeffizienz etwas geringer und somit der Stromverbrauch höher als bei Luft/Wasser-Kompaktwärmepumpen. Aussen aufgestellte Komponenten sind der Witterung ausgesetzt und daher etwas wartungsintensiver. Falls die Komponenten schwer zugänglich sind (z. B. Aussenaufstellung auf dem Dach), ist der zeitliche Aufwand für die Wartung höher.

Aufstellort	Typ	a. Baulicher Aufwand 1 hoch / 5 gering		b. Platzbedarf innen 1 hoch / 5 gering		c. Stadtbildintegration 1 schwierig / 5 einfach		d. Aufwand Bewilligung 1 hoch / 5 gering		e. Lärmschutz innen 1 schwierig / 5 einfach		f. Lärmschutz aussen 1 schwierig / 5 einfach		g. Energieeffizienz 1 tief / 5 hoch		Mittelwert Einzelkriterien a. bis g.	h. Investitionskosten 1 hoch / 5 tief		i. Betriebskosten 1 hoch / 5 tief		Mittelwert Einzelkriterien h. und i. (Kosten)
UG innen	L/W-WP	3	2	5	5	3	3	5	3.7	3	5	4	3	3	3	3.6	3	3	3	3	3.0
UG innen	Split	2	3	5	5	3	4	3	3.6	3	3	4	3	3	3.3	4	4	4	4	4.0	
EG aussen Vorgarten	L/W-WP	5	5	1	1	5	2	4	3.3	4	4	4	4	4	3.6	4	4	4	4	4.0	
EG aussen Seitenzone	L/W-WP	5	5	2	2	5	2	4	3.6	4	4	4	4	4	3.7	4	4	4	4	4.0	
EG aussen Privatgarten	L/W-WP	5	5	3	3	5	1	4	3.7	4	4	4	4	4	3.0	5	2	2	2	3.5	
EG aussen Vorgarten, UG	Split	4	4	1	1	4	4	3	3.0	5	2	2	2	2	3.3	5	2	2	2	3.5	
EG aussen Seitenzone, UG	Split	4	4	2	2	4	4	3	3.3	5	2	2	2	2	3.4	5	2	2	2	3.5	
EG aussen Privatgarten, UG	Split	4	4	3	3	4	3	3	3.4	5	2	2	2	2	3.1	2	5	5	5	3.5	
DG innen	L/W-WP	2	1	5	4	1	4	5	3.1	2	5	5	5	5	3.0	2	3	3	3	2.5	
DG innen	Split	1	2	5	4	1	5	3	3.0	2	3	3	3	3	2.7	1	1	1	1	1.0	
DG aussen, DG innen	Split	1	3	3	2	2	5	3	2.7	1	1	1	1	1							

Tabelle 3: Bewertungsmatrix verschiedener Systemvarianten von Luft/Wasser-Wärmepumpen bezüglich des Aufstellortes und des Wärmepumpentyps. Quelle: FHNW

Beim Vergleich verschiedener Systemvarianten im Gebäudekontext sind innen aufgestellte Luft/Wasser-Wärmepumpen für die Integration ins Stadtbild und für den Lärmschutz im Außenbereich von Vorteil. Die Varianten der Aufstellung im Dachbereich schneiden aufgrund des höheren baulichen und schallschutztechnischen Aufwands insgesamt schlechter ab als die Aussenauflistung im Erdgeschossbereich oder die Innenaufstellung im Untergeschoss. Dennoch sollten auch Dachlösungen zukünftig weiter betrachtet werden. Die individuelle Bewertung der Systemvarianten ist stark von der konkreten baulichen Situation und der Priorität einzelner Kriterien abhängig. Eine Integrationsmöglichkeit im Dachbereich zeigt beispielhaft Bild 6.



*Bild 6: Innenaufstellung im Dachgeschoss. Quelle: FHNW; Junkers*

Die Integration aussen aufgestellter Geräte im städtischen Kontext kann beispielsweise auch durch das Verbergen der Luft/Wasser-Wärmepumpen hinter bestehenden oder neuen baulichen Elementen unterstützt werden (Bild 7).



*Bild 7: Verbergen durch Verkleidung. Quelle: Wärmepumpen FFB; Nathan AG; Zaugg AG*

Die Integration in typische bauliche Ausstattungselemente von Vorgärten, Velounterstand und Geräteschuppen zeigen die Konzepte in Bild 8 und 9. Mit dem modularen Konstruktionsprinzip kann auf verschiedene Situationen reagiert werden. Die Einhausung kann zusätzlichen Schallschutz ermöglichen. Zudem ist beispielsweise die Kombination mit Briefkastenanlagen oder Kehrtonnenabstellflächen denkbar. Idealerweise würden die Konzepte in Kooperation zwischen Herstellern von Wärmepumpen und Anbietern von Gartenelementen weiterentwickelt, um die technischen Anforderungen der Wärmepumpen, wie Luftzirkulation und Zugänglichkeit für Wartung, optimal zu berücksichtigen.

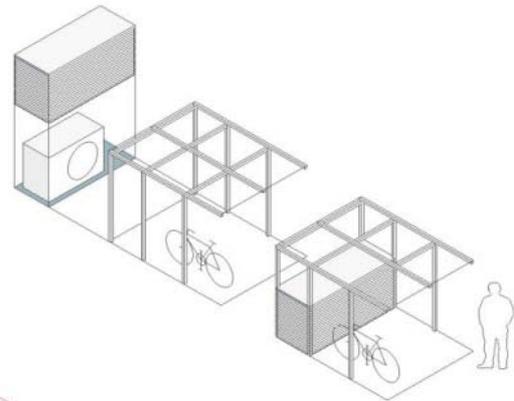


Bild 8: Integration in Velounterstand. Quelle: FHNW

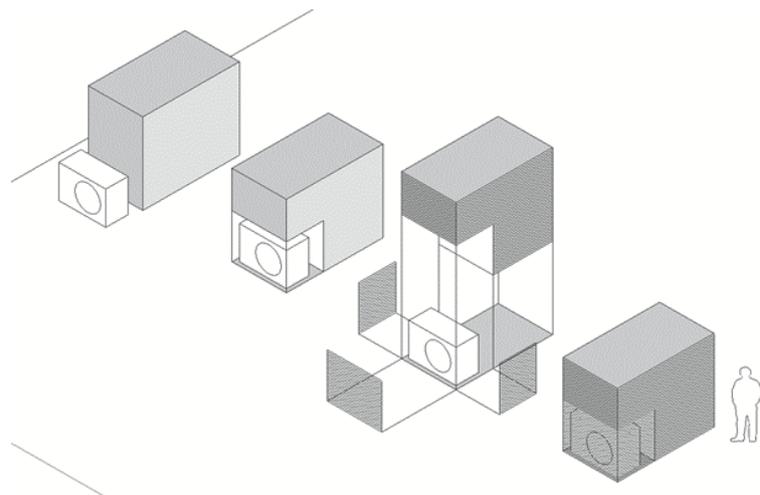


Bild 9: Integration in Geräteschuppen. Quelle: FHNW

## Empfehlungen und Ideen für die Produktentwicklung

Für die Integration von Luft/Wasser-Wärmepumpen im städtischen Kontext besteht bei folgenden Punkten Entwicklungspotenzial:

Schallemissionen der Geräte weiter markant reduzieren. Dies ist für die Einsatzmöglichkeiten und Akzeptanz von Luft/Wasser-Wärmepumpen im städtischen Kontext von grosser Bedeutung, insbesondere bei hoher Bebauungsdichte und geringen Abständen zum Immissionsort.

- An der Erarbeitung eines einheitlichen Messverfahrens für die Bestimmung von Geräteschall-daten für den Lärmschutznachweis mitwirken und dieses umsetzen. Dies schafft Vertrauen in die Schalldaten und die Qualität des Lärmschutznachweises und hilft Lärmklagen vorzubeugen.
- Zurückhaltendes Gerätedesign etablieren. Individuelle Anpassungsmöglichkeiten anbieten.

- Lösungen für die Integration in bauliche Elemente am Gebäude entwickeln (z.B. Geräteschuppen, Velounterstand, Briefkastenanlage).
- Lösungen für die Innenaufstellung bei beengten Platzverhältnissen in Bestandsgebäuden weiterentwickeln, z. B. modularer Geräteaufbau.
- Für die Aufstellung im Dachbereich vorgefertigte Elemente für den Luftansaug und Luftausblas weiterentwickeln.

## **Bewilligungspraxis**

Das Bewilligungsverfahren für Luft/Wasser-Wärmepumpen ist derzeit aufwendiger und die Bearbeitungsdauer ist länger als bei anderen Wärmeerzeugern. Dabei spielt zum einen die gestalterische Integration aussen aufgestellter Luft/Wasser-Wärmepumpen ins Stadtbild eine wichtige Rolle. Zum anderen werden durch die Schallemissionen von Luft/Wasser-Wärmepumpen Interessen Dritter berührt, weshalb die Einhaltung der Lärmschutzanforderungen nachgewiesen und geprüft werden muss. Bei einer Weiterentwicklung und Vereinfachung des Bewilligungsverfahrens für eine Luft/Wasser-Wärmepumpe müssen die gestalterische Integration und der Lärmschutz sichergestellt werden, um eine gute Akzeptanz der Luft/Wasser-Wärmepumpe im städtischen Kontext zu erreichen. Dies ist insbesondere bei Überlegungen zur Einführung eines Meldeverfahrens zu beachten.

Im Folgenden werden Ansatzpunkte der Autoren für die Weiterentwicklung des Bewilligungsverfahrens aufgezeigt:

- **Grundsätzliches Ziel**  
Das Bewilligungsverfahren für eine Luft/Wasser-Wärmepumpe soll möglichst einfach und die Bearbeitungsdauer möglichst kurz sein. Die gestalterische Integration ins Stadtbild, die Einhaltung der gesetzlichen Anforderungen und die Respektierung der Interessen Dritter (insbesondere Lärmschutz) müssen sichergestellt werden.
- **Start bzw. Weiterführung eines Prozesses in der Verwaltung zur Vereinfachung des Bewilligungsverfahrens**
- **Definition von Standardfällen für weiterentwickelte Verfahren und Erarbeitung eines Leitfadens**

### **Situation gestalterisch einfach**

Aufstellort und Luft/Wasser-Wärmepumpen vom öffentlichen Stadtraum nicht sichtbar

Standardlösungen für Aufstellung

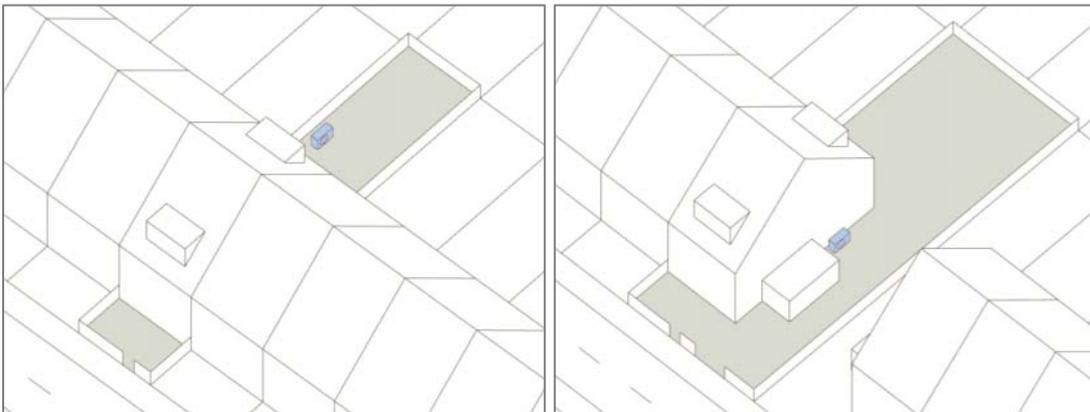
keine vom öffentlichen Stadtraum sichtbaren, neuen räumlichen baulichen Elemente (Ausnahme Gitter)

- innen aufgestellte Luft/Wasser-Wärmepumpen; flächenebene Gitter können vom Stadtraum aus sichtbar sein: Luftschächte bodeneben, Gitter in Aussenwand oder Dachfläche (Bild 10)

- räumliche Luftansaug- und -ausblaselemente, welche vom öffentlichen Stadtraum nicht sichtbar sind
- aussen aufgestellte Luft/Wasser-Wärmepumpen im Privatgarten, hinter dem Gebäude (Bild 11 links)
- aussen aufgestellte Luft/Wasser-Wärmepumpen im Seitengarten, verborgen hinter bestehenden Elementen (Bild 11 rechts)  
z. B. Garage, Mauern, Geräteschuppen, Bepflanzung
- aussen aufgestellte Luft/Wasser-Wärmepumpen im Vorgarten verborgen hinter bestehenden Elementen



*Bild 10: Vom öffentlichen Stadtraum aus sichtbare Luftgitter innen aufgestellter Luft/Wasser-Wärmepumpen im Erdgeschoss (links) und Dachbereich (rechts).*



*Bild 11: Vom öffentlichen Stadtraum aus nicht sichtbare aussen aufgestellte Luft/Wasser-Wärmepumpen im Privatgarten (links) und Seitengarten (rechts).*

### **Situation gestalterisch anspruchsvoll**

Aufstellort, Luft/Wasser-Wärmepumpen oder andere räumliche technische Elemente vom öffentlichen Stadtraum sichtbar

- **Qualität der Gesuchs- und Meldeunterlagen und Information fördern**  
Informations- und Schulungsangebote der Gemeinden, Städte, Kantone und des Bundes senken den Beratungs- und Prüfaufwand in den Behörden; Nachbesserungen der Gesuche und Anlagen werden reduziert;  
Informationen zur Bewilligung im Internet bündeln und gut auffindbar machen
- **Informationen für Bauherrschaften zu Luft/Wasser-Wärmepumpen erarbeiten**  
Fokus auf den Ersatz von Wärmeerzeugern mit fossilen Energieträgern legen; Bauherrschaften zur Planung des Wärmeerzeugersatzes motivieren

## Dank

Die Studie wurde durch die Stadt Zürich - Umwelt- und Gesundheitsschutz (UGZ) und den Kanton Basel-Stadt - Amt für Umwelt und Energie (AUE) finanziert. Die Autoren danken den Mitgliedern der Projektgruppe, Begleitgruppe und den Teilnehmenden des Projektworkshops für die wertvollen Inputs.

## Quellen

- [1] Steinke G., Genkinger A., Afjei T. et al, „Integration von Luft/Wasser-Wärmepumpen im städtischen Kontext“; FHNW Institut Energie am Bau; Muttenz; November 2018
- [2] Dott R., Afjei T., „Stadtverträgliche Luft/Wasser Wärmepumpen als Hauptwärmeerzeuger“; FHNW Institut Energie am Bau; Muttenz; August 2014
- [3] Schalldaten-Verzeichnis der Fachvereinigung Wärmepumpen Schweiz FWS;  
<http://www.fws.ch/verzeichnis.html>; zuletzt abgerufen am 21.6.2018
- [4] „SR 814.41 Lärmschutz-Verordnung (LSV)“ vom 15. Dezember 1986 (Stand am 1. August 2010); Der Schweizerische Bundesrat; Bern; 2010
- [5] „Cercle Bruit, Vollzugshilfe 6.21: Lärmtechnische Beurteilung von Luft/Wasser-Wärmepumpen“; Vereinigung Kantonaler Lärmschutzfachleute; verfügbar unter:  
[http://www.cerclebruit.ch/cerclebruit/a\\_front\\_d/frame-set\\_d.html?cerclebruit/vollzugsordner/6/621.html](http://www.cerclebruit.ch/cerclebruit/a_front_d/frame-set_d.html?cerclebruit/vollzugsordner/6/621.html); Mrz. 2013
- [6] Curdes G.; „Stadtstruktur und Stadtgestaltung“; Kohlhammer; Stuttgart; 1993
- [7] <http://maps.google.ch>, Bilder aus Quartieren mit Anwendungspotenzial von Luft/Wasser-Wärmepumpen in den Stadtgebieten Zürich und Basel
- [8] <https://map.geo.bs.ch/>, Geoportal Kanton Basel-Stadt
- [9] <https://www.maps.stadt-zuerich.ch/zueriplan3/Katasterauskunft.aspx>, Katasterauskunft Stadt-Zürich



Dr. Cordin Arpagaus, Dr. Frédéric Bless, Prof. Stefan S. Bertsch  
Institut für Energiesysteme, NTB Buchs  
Prof. Jürg Schiffmann  
Laboratory for Applied Mechanical Design, EPFL

## Wärmepumpen für die Industrie: Eine aktuelle Übersicht

### *Zusammenfassung*

*Industrielle Wärmepumpen mit Vorlauftemperaturen im Bereich von 100 bis 160 °C werden in den kommenden Jahren zunehmend kommerzialisiert und in industrielle Prozesse integriert, insbesondere für Anwendungen der Abwärmenutzung und Wärmerückgewinnung. Abwärme auf einem niedrigen Temperaturniveau kann effizient in nutzbare Prozesswärme umgewandelt werden. Mit dem Umstieg weg von fossilen Energieträgern und der Steigerung der Energieeffizienz können die CO<sub>2</sub>-Emissionen drastisch reduziert werden.*

*Dieser Beitrag gibt eine aktuelle Übersicht zu verschiedenen industriellen Wärmepumpen, die bereits heute auf dem Markt erhältlich sind, sowie Hemmnisse am Markt. Bereits praktisch umgesetzte industrielle Anwendungen finden sich in verschiedenen Prozessen wie Trocknung, Verdampfung, Sterilisation, Pasteurisierung, Dampferzeugung, Papierherstellung, Lebensmittelzubereitung. Im Bereich der Technologieentwicklung von industriellen Wärmepumpen gibt es eine hohe Forschungsaktivität auf internationaler Ebene. Die Hauptforschungsziele sind die Erweiterung der Quellen- und Senktemperaturen auf höhere Niveaus, die Verbesserung der Wärmepumpeneffizienz, die Erprobung neuer umweltfreundlicher Kältemittel, und insbesondere der Scale-up vom Labor- in den Industriemassstab.*

### *Summary*

*Industrial heat pumps with supply temperatures in the range of 100 to 160 °C will be increasingly commercialised and integrated into industrial processes in the coming years, especially for applications of excess heat recovery. Excess heat at a low temperature level can be efficiently converted into usable process heat. By changing from fossil fuel systems to heat pump systems and increasing energy efficiency, CO<sub>2</sub> emissions can be drastically reduced.*

*This article provides an up-to-date overview of various industrial heat pumps that are already available on the market, as well as market barriers. Industrial applications that have already been implemented in practice can be found in various processes such as drying, evaporation, sterilisation, pasteurisation, steam generation, paper production, and food preparation. In the field of technology development of industrial heat pumps, there is a high level of research activity on an international level. The main research objectives are to increase heat source and heat sink temperatures to higher levels, improve heat pump efficiency, test new environmentally friendly refrigerants, and especially scale-up from laboratory to industrial scale.*

## Motivation und Einleitung

Das Thema *Wärmepumpen für die Industrie* ist sehr aktuell, insbesondere für Anwendungen der Abwärmenutzung und Wärmerückgewinnung. Mit dem Umstieg weg von fossilen Energieträgern und der Steigerung der Energie- und Ressourceneffizienz kann der CO<sub>2</sub>-Footprint drastisch reduziert werden.

In der Regel fällt ein grosser Teil der in einem Prozess eingesetzten Wärme in Form von Abwärme an, z.B. als Kühlflüssigkeit, Abwasser, warme Druckluft von Kompressoren, oder feuchte Abluft (Bild 1). Aufgrund des relativ hohen Temperaturniveaus von etwa 20 °C bis circa 100 °C stellt industrielle Abwärme für Wärmepumpen aus energetischer Sicht eine besonders wertvolle Wärmequelle dar, die deutlich höher ist als typischerweise genutzte Wärmequellen von Heizungswärmepumpen wie Umgebungsluft, Erdwärme oder Grundwasser.

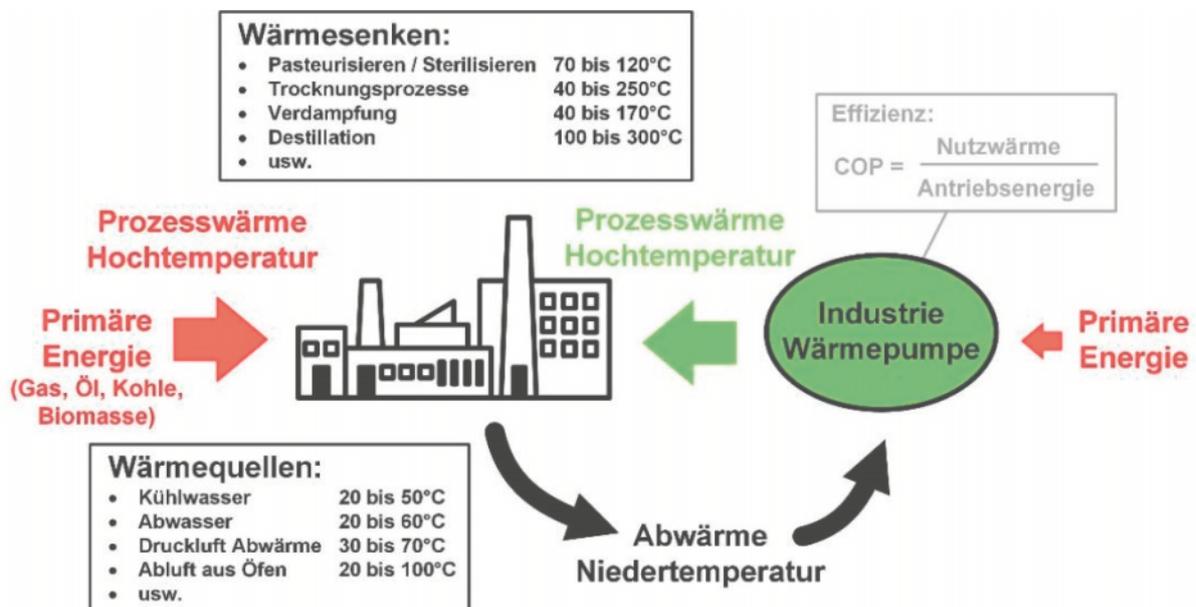


Bild 1: Schematische Darstellung des Prinzips der innerbetrieblichen Abwärmenutzung mittels industrieller Wärmepumpen (Graphik aus [1]).

Die Einteilung und Klassifizierung von Wärmepumpentechnologien führt über offene und geschlossene Systeme (Bild 2) [1], [2]. Elektrisch angetriebene Kompressionswärmepumpen mit einem geschlossenen Kältemittelkreislauf spielen hier als effiziente Wärmetransformatoren für Heiz- und Kühlaufgaben eine Schlüsselrolle, da dieser Typ Wärmepumpe am weitesten verbreitet und in einer Vielzahl von Grössen für verschiedene Anwendungen erhältlich ist.

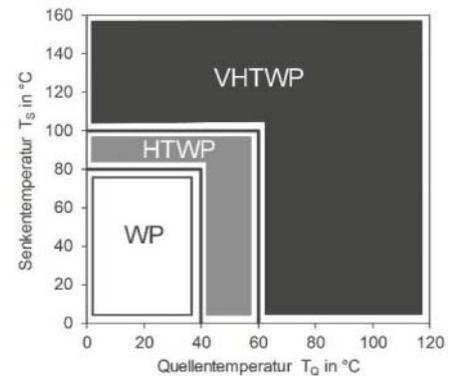
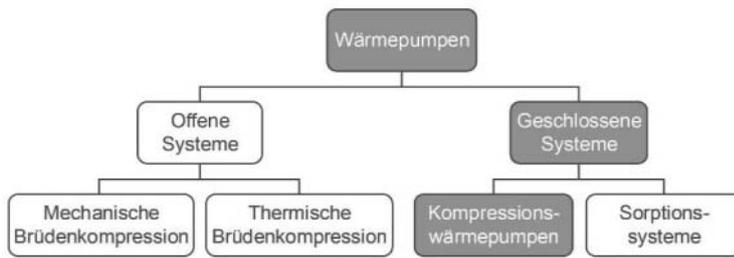


Bild 2: Klassifizierung von industriellen Wärmepumpen und Entwicklung der Temperaturniveaus. WP: konventionelle Wärmepumpen bis etwa 80 °C Senktemperatur, HTWP: Hochtemperatur-Wärmepumpen (80 bis 100 °C), VHTWP: Höchsttemperatur-Wärmepumpen >100 °C. Zur Wärmerückgewinnung wird Abwärme als Wärmequelle eingesetzt (Graphiken aus [1], [2]).

Im Rahmen des Projektes *Annex 35/48 Industrial Heat Pumps* des IEA HPT TCP (Technology Collaboration Programme on Heat Pumping Technologies der Internationalen Energieagentur) wurde der Begriff *Industriewärmepumpe* mit «Wärmepumpen für höhere Temperaturen von bis zu 150 °C im mittleren und hohen Leistungsbereich, die zur Wärmerückgewinnung und -aufbereitung in industriellen Prozessen, aber auch zum Heizen, Kühlen und Klimatisieren in industriellen und gewerblichen Gebäuden sowie Mehrfamilienhäuser und zur Fernwärme eingesetzt werden» definiert [3]. Der Begriff *Hochtemperatur-Wärmepumpe* (HTWP) wird häufig in Verbindung mit industriellen Wärmepumpen verwendet [1], [2], [4], hauptsächlich bei der Nutzung von Abwärme in der Prozessindustrie für die innerbetriebliche Prozesswärmeversorgung, da das Niveau der Nutzttemperaturen und auch das Temperaturniveau der Wärmequelle deutlich höher liegen als bei konventionellen Wärmepumpen für Warmwasser oder Heizung im Wohnbereich. Das Bild 2 (rechts) veranschaulicht die Entwicklungsperspektiven von industriellen Wärmepumpen zur Wärmerückgewinnung in Funktion der Quellen- und Senktemperatur. Das Temperaturniveau in konventionellen Wärmepumpen (WP) erreicht Senktemperaturen bis etwa 80 °C. Darüber wird allgemein von einer industriellen HTWP gesprochen. Über 100 °C wird auch gerne der Begriff *Höchsttemperatur-Wärmepumpe* (VHTWP, engl. Very High Temperature Heat Pump) verwendet [5]. Thermodynamisch betrachtet ist 100 °C auch die Temperatur, bei welcher Wasser bei 1 bar verdampft und Anwendungen zur Dampferzeugung ermöglicht.

## Industrieller Prozesswärmebedarf

Das theoretische Anwendungspotenzial für den Einsatz von Wärmepumpen in industriellen Prozessen lässt sich aus dem Wärmebedarf der einzelnen Industriezweige und den Temperaturniveaus der angewandten industriellen Prozesse abschätzen. Die Graphiken in Bild 3 zeigen die Verteilung des industriellen Wärmebedarfs in der Schweiz nach Branche und Temperaturniveau. Neben Raumwärme und Warmwasser besteht in der Industrie ein grosser Bedarf an Prozesswärme für die Herstellung, Verarbeitung und Veredlung von Produkten. Im Allgemeinen wird Prozesswärme oberhalb von etwa 80 °C zugeführt.

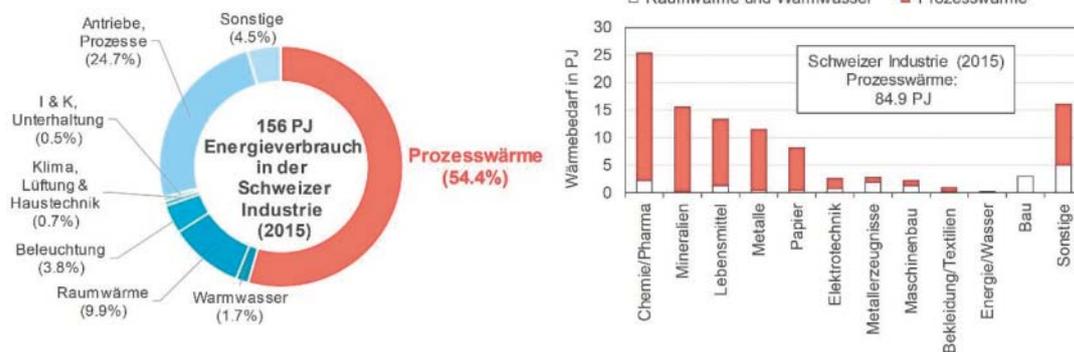


Bild 3: Industrieller Energieverbrauch in der Schweiz (2015) nach Verwendungszweck [6]. Wärmebedarf aufgeteilt nach Industriezweigen und Temperaturbereichen, der mit industriellen Wärmepumpen erreicht werden kann (Graphiken aus [1]).

Laut Bundesamt für Statistik [6] gehen in der Schweiz rund 19% des gesamten Endenergieverbrauchs an den Industriesektor (Stand 2015). Dies entspricht einer totalen Energiemenge von 156 PJ, also dem grössten Energieverbraucher (Bild 3, links). Der Energieverbrauch der Industrie lässt sich wiederum nach Verwendungszweck unterscheiden, wobei die Prozesswärme rund 54 % bzw. 84.9 PJ des gesamten Wärmebedarfs ausmacht. Die wichtigsten Potenziale für Prozesswärme liegen in den Bereichen Chemie/Pharma, Mineralien, Nahrung/Getränke, Metall und Papier (Bild 3, rechts).

In einer Europastudie haben Nellissen und Wolf [7] für industrielle Wärmepumpen ein technisches Potenzial von etwa 626 PJ (174 TWh) evaluiert bei Wärmesenktemperatur bis 150 °C (Bild 4). Etwa 116 PJ oder 19 % des Potenzials liegen zwischen 100 und 150 °C und wurden für industrielle VHTWP als erreichbar erachtet. Der Temperaturbereich über 150 °C ist für die Wärmepumpentechnik aufgrund der begrenzten Verfügbarkeit von VHTWP-Produkten auf dem Markt nur beschränkt zugänglich. Das grösste Potenzial für den Einsatz von VHTWP liegt in der Lebensmittel- und Tabakindustrie, der chemischen Industrie und der Papierindustrie, wo energieintensive Produktionsprozesse zu finden sind.

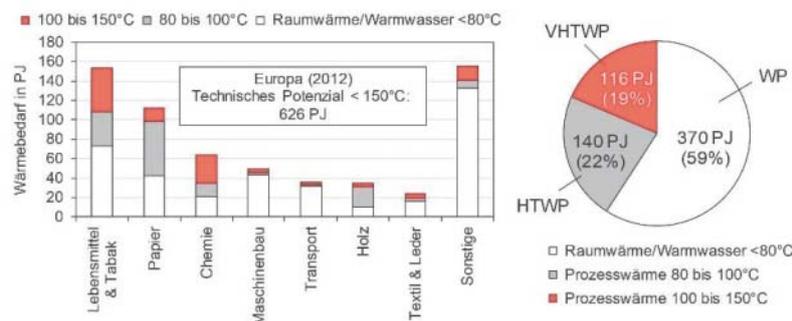


Bild 4: Technisches Potenzial der Prozesswärme in Europa, gegliedert nach Industriezweig, das mit industriellen Wärmepumpen erschlossen werden kann (basierend auf Eurostat-Daten von 33 EU-Mitgliedsländern aus dem Jahre 2012 [7]).

Bild 5 gibt einen Überblick über typische Prozesse in verschiedenen Industriezweigen, welche mittels industriellen Wärmepumpen bereitgestellt werden können. Die typischen Prozesstemperaturen liegen in Bereichen zwischen 20 und 200 °C. Die Betriebstemperaturen sind jeweils in Bandbreiten angegeben, da sie vom jeweils eingesetzten Verfahren abhängen. Zusätzlich

sind die Temperaturbandbreiten entsprechend der verfügbaren Wärmepumpentechnik gekennzeichnet, welche den Technologie-Reifegrad von industriellen Wärmepumpen darstellt.

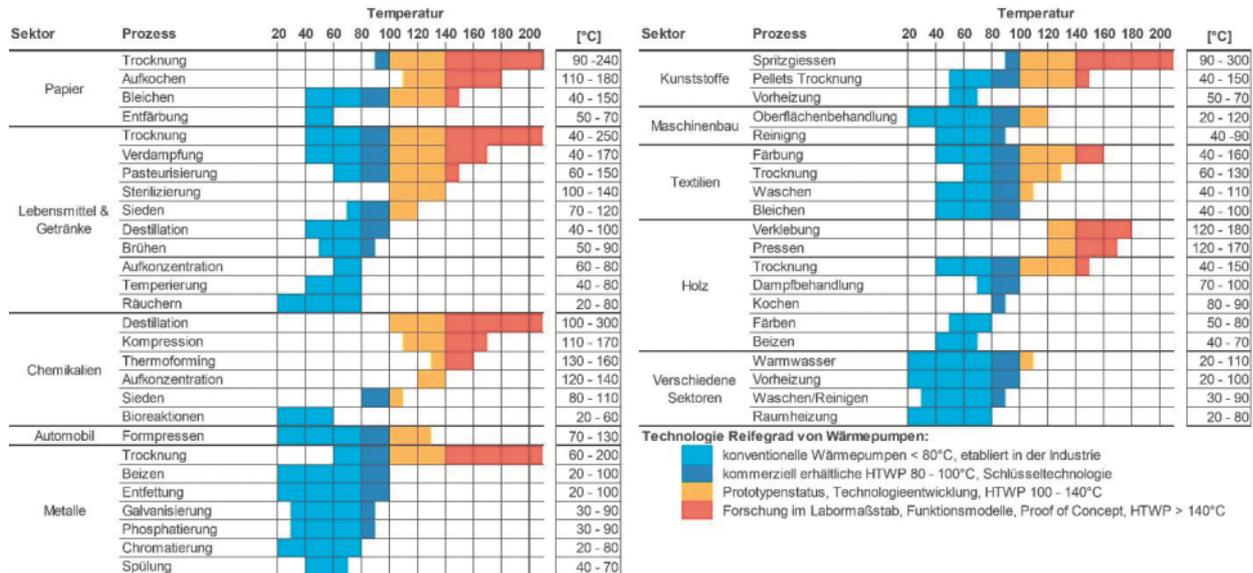


Bild 5: Industrieprozesse, gegliedert nach typischen Betriebstemperaturen zwischen 20 und 200 °C, welche mittels industriellen Wärmepumpen bereitgestellt werden können. Überlagert ist der Technologie-Reifegrad von industriellen Wärmepumpen [1].

Ein Grossteil der aufgeführten thermischen Produktionsprozesse mit Temperaturniveaus bis 100 °C kann bereits mit der heutigen Wärmepumpentechnik versorgt werden. Trotzdem erfolgt die Wärmebereitstellung dafür meist fossil mittels Gas, Öl oder Kohle. Im Temperaturbereich bis 100 °C gibt es viele Anwendungsmöglichkeiten wie Trocknen, Eindampfen, Destillieren, Sterilisieren, Pasteurisieren, Kochen, Pressen, Färben oder Bleichen.

Tendenziell befinden sich ab 100 °C VHTWP-Produkte in der Entwicklung, wobei es bereits vereinzelte Modelle von industriellen Wärmepumpen auf dem Markt gibt (siehe Bild 6). Ab etwa 140 °C sind mehrheitlich Laboranlagen in der Erforschung. Zur Erzeugung von Niederdruck-Prozessdampf besteht insbesondere industrielles Interesse, das Spektrum der Wärmenutzungstemperaturen von Kompressionswärmepumpen auf über 120 °C zu erweitern. Der erzeugte Dampf kann dann durch mehrstufige Brüden Kompression auf höhere Drücke erhöht werden.

Eine Marktstudie [8] im Jahre 2017 über die Anwendung von Grosswärmepumpen in der Schweizer Industrie ergab, dass die Bedeutung von industriellen Wärmepumpen in den nächsten 5 Jahren in grossem Umfang zunimmt, insbesondere in der Lebensmittel-, Chemie-, Pharma- und Papierindustrie. Die grösste Forschungslücke wurde in den Bereichen Kältemittel (mit niedrigem Treibhauspotenzial), erreichbarer Temperaturbereich, Komponentenoptimierung (z.B. temperaturbeständige Kompressoren), Kreislaufoptimierung und Demonstrationsprojekte identifiziert, während der höchste Entwicklungsbedarf bei der Erweiterung des Temperaturbereichs, der Kostensenkung (Investition, Wartung und Betrieb), der Effizienzsteigerung und der Bereitstellung von mehr (modularen) Standardprodukten festgestellt wurde.

## Industrielle Wärmepumpen auf dem Markt

Das Angebot an Wärmepumpen mit hohen Heizleistungen und hohen Vorlauftemperaturen ist in den letzten Jahren stetig gewachsen. Eine Auswahl von über 26 Wärmepumpenprodukten von 15 Herstellern für den Einsatz in Industrie und Gewerbe, die in der Lage sind, mindestens 90 °C Wärme zu liefern sind in Bild 6 und Tabelle 1 aufgelistet.

Die Firmen Kobe Steel (Japan), Viking Heat Engine SA (Norwegen), Ochsner Energie Technik GmbH (Österreich), Frigopol (Österreich), Mayekawa (Japan), Hybrid Energy AS (Norwegen), Combitherm (Deutschland), ENGIE (ex-Dürr Thermea) (Deutschland), Friotherm (Schweiz) und Oilon (Finnland) zeigen Pionierarbeit mit ihren Wärmepumpen im industriellen Massstab mit Senktemperaturen über 100°C. Die Produkte Kobelco SGH 120/165, HeatBooster, IWWDS, IWWHS, Eco Sirocco, HWW 245fa, thermeco2 und ChillHeat stellen mit Vorlauftemperaturen von 100 bis 165 °C den industriellen Benchmark dar.

Die Höhe der maximal erreichbaren Senktemperatur wird in erster Linie durch die Wahl des Kältemittels, die Auslegung des Kreislaufs und des Verdichtertyps bestimmt.

Bild 6 zeigt die Auswahl industrieller Wärmepumpen, sortiert nach deren maximaler Vorlauftemperatur, Heizleistung (logarithmisch aufgetragen), und Kompressortyp. Das Leistungsspektrum der angebotenen Wärmepumpen reicht von etwa 20 kW bis zu 20 MW. Durch Parallelbetrieb (z.B. TWIN-Schaltungen) werden die Heizleistungen angepasst. Als Kältemittel werden hauptsächlich R245fa (ÖKO1), R717 (Ammoniak, NH<sub>3</sub>), R744 (CO<sub>2</sub>), R134a, oder R1234ze(E) eingesetzt. Das neue HFO-Kältemittel R1336mzz(Z) kommt bei der Firma Viking Heat Engine erstmals zum Einsatz. Mit den neuen HFO-Kältemitteln erfüllen die Hersteller bereits heute Kältemittelanforderungen, die weit über 2020 hinaus gelten. Das Treibhauspotenzial (GWP Global Warming Potential) ist im einstelligen Bereich und damit natürlichen Kältemitteln fast gleichzusetzen.

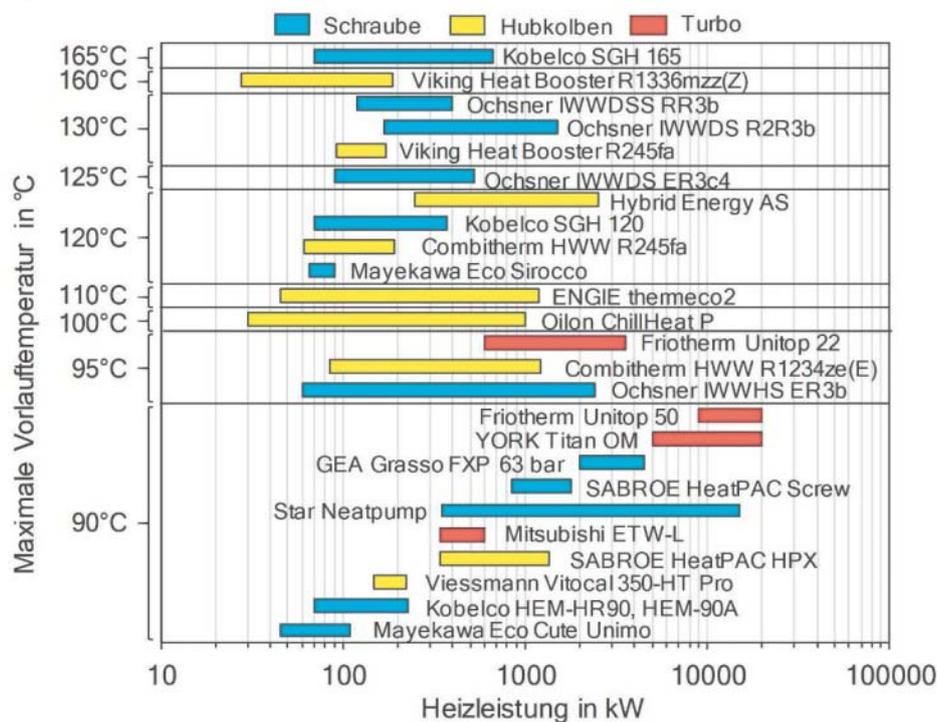


Bild 6: Auswahl an kommerziell erhältlichen industriellen Kompressionswärmepumpen, sortiert nach maximaler Vorlauftemperatur (Wärmesenktemperatur) und Heizleistung. Die eingesetzten Verdichtertypen sind farblich gekennzeichnet (blau: Schrauben-, gelb: Hubkolben-, rot: Turbokompressoren) (Graphik adaptiert aus [1]).

Hersteller	Produkte	Kältemittel	Max. Vorlauf- temperatur	Heizleistung	Kompressor Typ
Kobe Steel (Kobelco steam grow heat pump)	SGH 165	R134a/R245fa	165 °C	70 – 660 kW	Doppelschraube
	SGH 120	R245fa	120 °C	70 – 370 kW	
	HEM-HR90,-90A	R134a/R245fa	90 °C	70 – 230 kW	
Viking Heating Engines AS	HeatBooster	R1336mzz(Z)	160 °C	28 – 188 kW	Hubkolben (4 parallel)
	HeatBooster S4	R245fa	130 °C	92 – 172 kW	
Ochsner	IWWDS R2R3b	R134a/ÖKO1	130 °C	170 – 750 kW	Schraube (TWIN bis 1,5 MW)
	IWWDS ER3b	ÖKO1 (R245fa)	130 °C	120 – 400 kW	
	IWWHS ER3b	ÖKO1 (R245fa oder R1233zd)	95 °C	60 – 640 kW	
Frigopol (& AIT)	HighButane 2.0	R600	130 °C	50 kW	Hubkolben
Hybrid Energy	Hybrid Heat Pump	R717 (NH <sub>3</sub> )	120 °C	0.25 – 2.5 MW	Hubkolben
Mayekawa	Eco Sirocco	R744 (CO <sub>2</sub> )	120 °C	65 – 90 kW	Schraube
	Eco Cute Unimo	R744 (CO <sub>2</sub> )	90 °C	45 – 110 kW	
Combitherm	HWW 245fa	R245fa	120 °C	62 – 252 kW	Hubkolben
	HWW R1234ze	R1234ze(E)	95 °C	85 – 1301 kW	
ENGIE (ex-Dürr thermea)	Thermeco <sub>2</sub> HHR	R744 (CO <sub>2</sub> )	110 °C	45 – 1'200 kW	Hubkolben (bis zu 6 parallel)
Oilon	ChillHeat	R134a	100 °C	30 – 1'000 kW	Hubkolben (bis zu 6 parallel)
	P60 bis P450	R1234ze(E)			
Friothersm	Unitop 22	R1234ze(E)	95 °C	0.6 – 3.6 MW	Turbo (zweistufig)
	Unitop 50	R134a	90 °C	9 – 20 MW	
Star Refrigeration	Neatpump	R717 (NH <sub>3</sub> )	90 °C	0.35 – 15 MW	Schaube (Vfilter VSSH 76 bar)
GEA Refrigeration	GEA Grasso FX P 63 bar	R717 (NH <sub>3</sub> )	90 °C	2 – 4.5 MW	Doppelschraube (63 bar)
Johnson Controls	HeatPAC HPX	R717 (NH <sub>3</sub> )	90 °C	326 – 1'324 kW	Hubkolben (60 bar) Schraube Turbo
	HeatPAC Screw	R717 (NH <sub>3</sub> )	90 °C	230 – 1'315 kW	
	Titan OM	R134a	90 °C	5 – 20 MW	
Mitsubishi	ETW-L	R134a	90 °C	340 – 600 kW	Turbo (zweistufig)
Viessmann	Vitocal 350-HT Pro	R1234ze(E)	90 °C	148 – 390 kW	Hubkolben (2 bis 3 Stück parallel)

Tabelle 1: Auswahl an industriellen Kompressionswärmepumpen mit Vorlauftemperaturen von  $\geq 90$  °C (Graphik adaptiert aus [1]).

In der Regel kommen einstufige Kreislaufkonzepte zum Einsatz, die sich insbesondere im verwendeten Kältemittel und Verdichtertyp unterscheiden. Zum Einsatz kommen vor allem Schraubenverdichter (Ochsner, GEA, Kobelco), zweistufige Turbokompressoren (Friothersm, Mitsubishi) und mehrere parallel angeordnete Hubkolbenkompressoren (Viking Heat Engines, Combitherm, Viessmann, ENGIE, Oilon). Tendenziell beherrschen Hubkolbenverdichter kleinere Leistungen. Kreislaufoptimierungen werden durch den Einsatz eines internen Wärmeübertragers (Sicherstellung genügender Überhitzung), mit parallel geschalteten Verdichtern, Economiser-Kreisläufen mit Zwischeneinspritzung oder zweistufigen Kaskaden erreicht.

Ochsner, Combitherm und Kobelco verwenden R245fa. Mayekawa und ENGIE setzen auf das natürliche Kältemittel CO<sub>2</sub>. Durch den transkritischen CO<sub>2</sub>-Kreislauf und den im Gaskühler vorhandenen Temperaturgleit sind CO<sub>2</sub>-Wärmepumpen aufgrund tiefer Rücklauftemperaturen besonders effizient bei der Warmwasserbereitung. Star Refrigeration, GEA Grasso und Johnson Controls setzen NH<sub>3</sub> ein mit entsprechend optimierten Verdichtern für hohe Drücke.

Bild 7 stellt die experimentellen COP-Werte für verschiedene industrielle Wärmepumpen in Funktion des jeweiligen Temperaturhubs dar. Die COP-Werte liegen zwischen 1,6 und 5,8 bei einem Temperaturhub von 130 bis 25 K und nehmen mit höherem Temperaturhub tendenziell ab (gemäss Carnot-Beziehung). Die folgende Fit-Kurve (Gl. 1) beschreibt die angegebenen COP-Werte bei 45 % Gütegrad (Carnot-Effizienz,  $\eta = \text{COP}/\text{COP}_{\text{Carnot}}$ ):

$$\text{COP}_H = 68.455 \cdot \Delta T_{\text{Hub}}^{-0.76} \quad (\text{Gl. 1})$$

Mit:  $\text{COP}_H$ : Leistungszahl im Heizungsfall  
 $\Delta T_{\text{Hub}}$ : Temperaturhub der Wärmepumpe von Quelle zu Senke in K

Der mittlere COP dieser Datenzusammensetzung liegt bei etwa 3,2 bei einem durchschnittlichen Temperaturhub von 61 K (Standardabweichung:  $\pm 1.0$  COP und  $\pm 23$  K). Ausserdem sind die COP-Carnot-Kurven dargestellt (Annahme: 120 °C Vorlauftemperatur  $T_s$ ). Die meisten experimentellen Daten liegen zwischen 40 und 60 % Gütegrad.

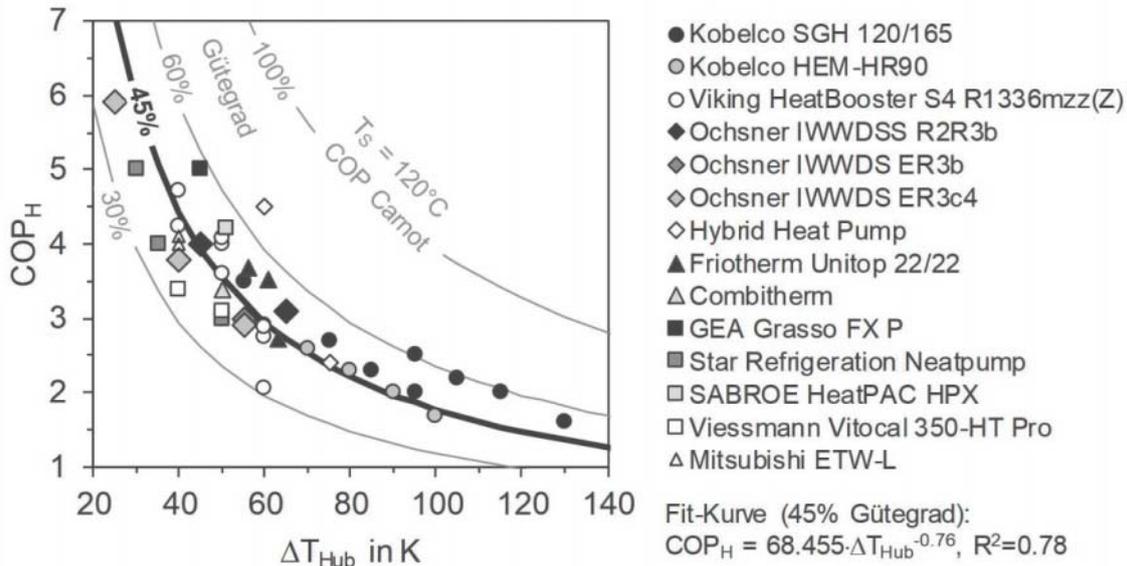


Bild 7:  $COP_H$  verschiedener industrieller Wärmepumpen in Abhängigkeit vom Temperaturhub. Durchschnittlicher  $COP_H = 3.2 \pm 1.0$ ,  $\Delta T_{Hub} = 61 \pm 23$  K. Fit-Kurve (45% Gütegrad):  $COP_H = 68.455 \cdot \Delta T_{Hub}^{-0.76}$ ,  $R^2 = 0,78$  (Graphik aus [1]).

Positive Auswirkungen auf den COP haben ein geringerer Temperaturhub ( $< 50$  K), ein Dauerbetrieb vorzugsweise unter Vollast und die gleichzeitige Nutzung von Wärme und Kälte aus der Wärmepumpe. Wird gleichzeitig auf der Wärmequellenseite auch eine Kühlanwendung angeschlossen, erhöht sich der Nutzen der Wärmepumpe und der Gesamt-COP erhöht sich gemäss Gl. 2 um einen Faktor von etwa 1,5 bis 1,8 (bei 40 bis 90 K Temperaturhub).

$$COP_{H+K} = COP_H + COP_K = 2 \cdot COP_H - 1 \quad (\text{Gl. 2})$$

Mit:  $COP_{H+K}$ : Gesamt-COP (Heizen und Kühlen)  
 $COP_H$ : COP Heizen  
 $COP_K$ : COP Kühlen

## Neue Wärmepumpen-Technologien

Des Weiteren gibt es neue, zukunftssträchtige Wärmepumpen-Technologien wie die Rotationswärmepumpe K7 von ECOP Technologies GmbH mit 400 bis 700 kW Heizleistung, oder die SPP HighLift Wärmepumpen von Olvono Technology AS mit einer typischen Heizleistung von 500 kW. Beide Technologien nutzen ein Arbeitsmedium, das während des gesamten Zyklus in der Gasphase verbleibt und eine hohe Temperaturflexibilität bietet.

Die SPP HighLift Wärmepumpe basiert auf dem Sterling-Kreislauf mit Helium (R704) und erreicht eine maximale Temperatur von 195 °C bei hohem Wirkungsgrad. Bei Abwärmenutzung bei 45 °C und Warmwasserbereitung bei 120 °C wird ein COP von 2,2 erreicht.

Die Rotationswärmepumpe K7 nutzt Fliehkräfte zur Verdichtung und anschließenden Temperaturerhöhung, um einen effizienten Joule-Prozess zu realisieren. Im Vergleich zu einem konventionellen Zwei-Phasen-Zyklus ist die Wärmeübertragung an der Wärmesenke und – quelle sensibel und der Temperaturbereich des Prozesses kann je nach Anwendung eingestellt werden. Als Arbeitsgas wird ein natürliches Edelgasgemisch verwendet (GWP = 0), das Argon, Helium und Krypton enthält. Temperaturen bis 150 °C sind möglich. Detaillierte Berechnung in Kombination mit Messungen ergeben COPs von 5,5 bei 60 °C Wärmequelle (30 K Temperaturgleit) und 100 °C Senktemperatur (40 K Temperaturgleit). Die Technologie der Rotations-Wärmepumpe eignet sich sehr gut für Trocknungsprozesse.

## Verkaufte Wärmepumpen im Schweizer Markt

Bild 8 zeigt die Anzahl der verkauften Wärmepumpen auf dem Schweizer Markt in den letzten Jahren mit der Verteilung der Heizleistungsbereiche. Im Jahr 2017 wurden rund 20'000 neue Wärmepumpenanlagen installiert. Die Heizleistung der meisten dieser Anlagen war für den Wohnbereich bestimmt. Der Marktanteil der Wärmepumpen im Wohnungsmarkt (z.B. neue Einfamilienhäuser) liegt nach Angaben des BFE bei rund 80%.

Diese Zahlen zeigen, dass Haushaltswärmepumpen in der Schweiz gut etabliert sind. In grösserem Massstab, d.h. bei industriellen Wärmepumpen, werden jedoch andere Wärmeerzeugungssysteme mit fossilen Brennstoffen bevorzugt. Lediglich 89 bis 145 Wärmepumpenanlagen mit einer Heizleistung von mehr als 100 kW werden jährlich neu installiert. Trotz der eher geringen Stückzahlen stellen grosse Wärmepumpen ein wichtiges Energiepotenzial dar, und die Verkaufszahlen sind stabil.

Insgesamt entsprach die installierte Heizleistung von Industriewärmepumpen (>100 kW) in den letzten fünf Jahren durchschnittlich rund 36 MW pro Jahr. Bei spezifischen Investitionskosten (inkl. Installation) von etwa 480 bis 750 CHF/kW [8] entspricht dies einem potenziellen Investitionsvolumen von rund 17 bis 27 Mio. CHF für industrielle Wärmepumpen in der Schweiz. Leider liegen keine Marktdaten mit Informationen über das Temperaturniveau der industriellen Wärmepumpen vor. Auch ist die Anzahl der installierten Industriewärmepumpen europaweit weitgehend unbekannt, da von der EHPA (European Heat Pump Association) keine Verkaufszahlen veröffentlicht werden und es keine klare Unterscheidung der Hersteller zwischen Kälteanlagen und Wärmepumpen gibt.

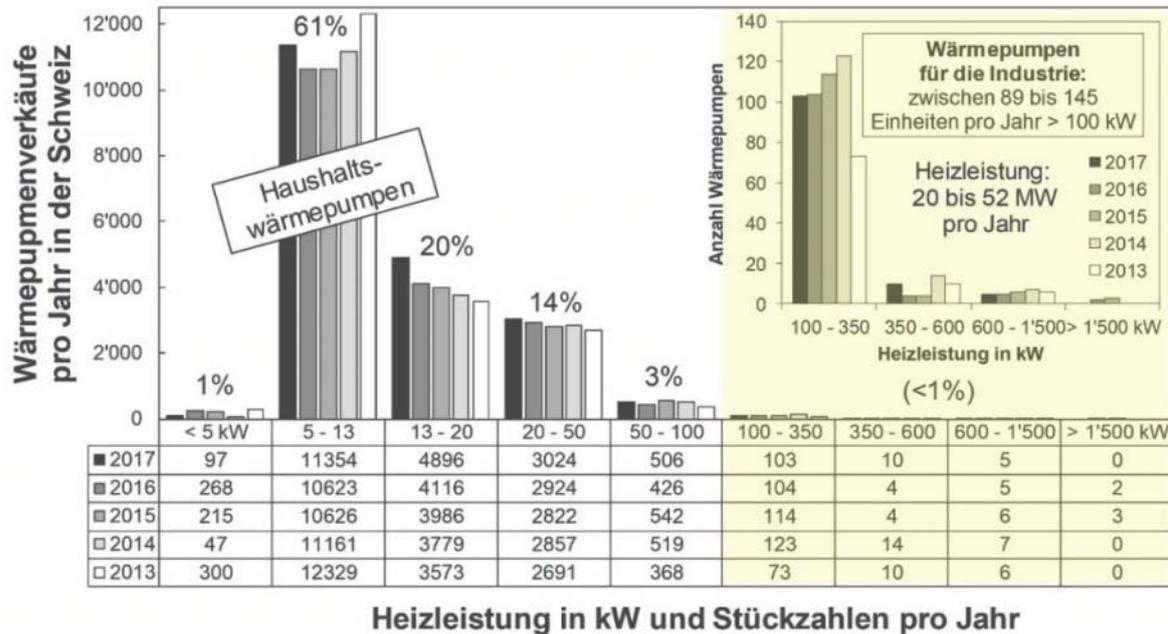


Bild 8: Jährliche Wärmepumpenverkäufe in der Schweiz (2013 bis 2017) in verschiedenen Leistungsklassen (Datenquelle: [www.fws.ch](http://www.fws.ch)).

## Hemmnisse für die weitere Verbreitung von industriellen Wärmepumpen

Trotz des grossen ökologischen Potenzials und den bereits kommerziell verfügbaren Wärmepumpenprodukten gibt es heute noch einige Hemmnisse für die weitere Marktdurchdringung industrieller Wärmepumpen. Unter anderem werden folgende Gründe genannt [1]–[4], [8]:

- Geringer Bekanntheitsgrad der technischen Möglichkeiten und der wirtschaftlich realisierbaren Anwendungspotenziale von industriellen Wärmepumpen bei Anwendern, Beratern, Investoren, Anlagenplanern, Herstellern und Installateuren
- Mangelndes Wissen über die Integration von Wärmepumpen in bestehende industrielle Prozesse. Massgeschneiderte Designs führen zu einer kostenintensiven Integration
- Zu lange Amortisation Zeiten, die grösser sind als bei gas- oder ölbefeuerten Kesseln (gefordert sind  $\leq 3$  Jahre, zum Vergleich Prozesstechnik  $\leq 2$  Jahre, Gebäude/Heizung  $\leq 6$  bis 8 Jahre). Mit sinkenden Strom- und steigenden Gaspreisen werden geringere Amortisationszeiten erreicht.
- Konkurrierende Heizungstechnologien, welche hohe Temperaturen mit fossilen Brennstoffen zu niedrigen Energiepreisen erzeugen (hängt ab von Strom/Gas-Preis und CO<sub>2</sub>-Steuer).
- Anforderungen im Bereich Wärmespeicherung, um den zeitlichen Versatz zwischen Bedarf und Angebot auszugleichen (z.B. WP für Bandlast, Gaskessel für Leistungsspitzen)
- Mangel an verfügbaren Kältemitteln im Hochtemperaturbereich mit niedrigem Treibhauspotenzial (GWP, engl. Global Warming Potential) und Ozonabbaupotenzial (ODP, engl. Ozone Depletion Potential) von Null
- Fehlen von Pilot- und Demonstrationssystemen, Schulungen und Veranstaltungen, welche die Verbreitung von Wärmepumpen-Wissen zusätzlich unterstützen

Eine grosse Hürde für die beschleunigte Marktdiffusion der Wärmepumpentechnologie im Industriebereich liegt in der Wirtschaftlichkeit. Zum einen sind grosse Wärmepumpen individuell und speziell entwickelt oder Produkte, die in kleinen Losgrössen hergestellt werden. Grössere Losgrössen würden die Produktivität aufgrund von Skaleneffekten erhöhen. Ein

möglicher Weg wäre eine stärkere Modularisierung der Wärmepumpen, so dass einige Teile des Wärmepumpenkreises oder der hydraulischen Integration in grösseren Mengen produziert werden können. Steht beim Kunden genügend Bauraum zur Verfügung, können mehrere Standardwärmepumpen an ein grosses Wärmepumpensystem angeschlossen werden.

Die zeitliche Verschiebung zwischen Wärmebereitstellung und Verfügbarkeit der Wärmesenke in industriellen Prozessen ist von entscheidender Bedeutung. Die Speicherung der produzierten Wärme kann dazu beitragen, den nicht zeitgleichen Bedarf und die Abwärmenutzung zu optimieren.

Eine weitere Hürde ist der Mangel an verfügbaren Verdichtern und Kältemitteln, was die Preise nochmals erhöht. Zu diesem Thema wurden in den letzten Jahren weltweit verstärkte Forschungsanstrengungen gestartet. Schliesslich ist es nicht immer einfach, eine Wärmepumpe in eine bestehende Anlage zu integrieren, da sie eine durchdachte Integration auf der Wärmesenken- und Wärmequellenseite erfordert. Um diese Hürde zu nehmen, müssen erfolgreiche Integrationen nachgewiesen und veröffentlicht werden.

Das IEA HPT TCP hat bereits mehrere Projekte zum Thema industrielle Wärmepumpen durchgeführt. Derzeit werden im IEA HPT Annex 48 Projekt (Industrielle Wärmepumpen, Phase 2) von 2016 bis 2019 Lösungswege erarbeitet, um bestehende Hemmnisse für die Markteinführung industrieller Wärmepumpen zu überwinden.

Die NTB Buchs nimmt dabei im Auftrag des BFE die Ländervertretung der Schweiz wahr und informiert die Schweizer Fachbranche über die aktuellen Ergebnisse. Das Hauptziel ist die Evaluation von nationalen Fallstudien von erfolgreichen Anwendungen von industriellen Wärmepumpen und die Aufbereitung der Informationen für die Schweizer Fachwelt.

Die im Rahmen des Swiss Competence Center for Energy Research Efficiency of Industrial Processes (SCCER EIP, [www.sccer-eip.ch](http://www.sccer-eip.ch)) erarbeiteten Forschungsergebnisse über HTWP werden im Projekt eingebracht.

## Stand der Forschung

Im Bereich der Technologieentwicklung von industriellen Wärmepumpen laufen derzeit auf internationaler Ebene verschiedene experimentelle Forschungsprojekte mit Senktemperaturen über 100 °C, um die Grenzen der erreichbaren COPs und Senktemperaturen im Vergleich zu kommerziell erhältlichen Industriegewärmepumpen auf ein höheres Niveau zu heben [1], [2] (siehe Tabelle 2). Die Entwicklung wird vor allem von Forschungsgruppen in Österreich, Frankreich, Deutschland, Japan, Norwegen, den Niederlanden, der Schweiz, Korea und China vorangetrieben.

Die meisten der untersuchten Wärmepumpenkreisläufe sind einstufig und enthalten teilweise einen internen Wärmeübertrager (IHX) und/oder einen Economiser-Zyklus mit Zwischeneinspritzung in den Kompressor. Vereinzelt gibt es auch experimentelle Beispiele von zweistufigen Zyklen und Studien mit zusätzlichen Unterkühlern/Wärmeübertrager für die kombinierte Warmwasserbereitung. Die Heizleistungen der Versuchsanlagen reichen von etwa 1,8 bis 12 kW, um die technische Machbarkeit im Labor zu demonstrieren. Grössere Prototypen können mehrere 100 kW Wärme erzeugen. Kolbenkompressoren werden hauptsächlich im Labormassstab eingesetzt. Die Bandbreiten der COPs liegen bei 120 °C Senktemperatur und 30 K Temperaturhub zwischen 5.7 bis 6.5 und zwischen 2,2 bis 2,8 bei 70 K Hub. Mit dem Kältemittel R1336mzz(Z) werden höchste Senktemperaturen von fast 160 °C erreicht verwendet.

Organisation, Projektpartner	Bereiche der Wärmequellen- (grau) und -senken (schwarz) Temperaturen in °C	Max. Vorlauf- temperatur in °C	Heizleistung in kW	Zyklus- typ	Kompressor	Kältemittel
Austrian Institute of Technology (AIT), Wien, Chemours, Bitzer, Österreich		160	12	einstufig mit IHX	Hubkolben	R1336mzz(Z)
Austrian Institute of Technology (AIT), Wien, Chemours, Bitzer, Österreich		150	12	einstufig	Hubkolben	R1336mzz(Z)
NTB Interstaatliche Hochschule für Technik Buchs, SCCER EIP, Schweiz		150	3 bis 10	einstufig mit zuschaltbarem IHX	Hubkolben	R1233zd(E)
PACO, Universität Lyon, EDF Electricité de France		145	300	Flash Tank	Doppel-Schraube	R718
Institut für Luft- und Kältetechnik (ILK), Dresden, Deutschland		140	12	einstufig	Hubkolben	HT 125
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen- Nürnberg, Siemens AG, Deutschland		140	10	einstufig mit IHX	Hubkolben	LG6 (CF6)
Alter ECO, EDF Electricité de France		140	50 bis 200	einstufig mit IHX und Unterkühler	Doppel-Scroll	ECO3 (R245fa)
Tokyo Electric Power Company, Japan		135	150 bis 400	einstufig	Schraube	R601
Austrian Institute of Technology (AIT), Wien, Edmayer, Ochsner, Österreich		130	250 bis 400	einstufig mit Economiser	Schraube	ÖKO1 (R245fa)
Tianjin Universität, China		130	16 bis 19	einstufig	Scroll	BY-5
Kyushu Universität, Fukuoka, Japan		125	1,8	einstufig	Doppel-Rotations- kompressor (zweistufig)	R1234ze(Z)
ECN, SmurfitKappa, IBK, Bronswerk, Niederlande		125	160	einstufig mit IHX und Unterkühler	Hubkolben	R600
Korea Institute of Energy Research, Daejeon, Süd-Korea		125	20 bis 40	einstufig mit Dampferzeugung	Hubkolben	R245fa/R718
GREE Electric Appliances, Zhuhai, China		120	6 bis 12	einstufig	Hubkolben	R245fa
Norwegian University of Science and Technology, SINTEF, Norwegen		115	20 bis 30	zweistufige Kaskade	Hubkolben	R600/R290
TU Graz, Österreich		110	20 bis 40	einstufig mit IHX	Hubkolben	R600
Tianjin University, China		110	44 bis 141	einstufig	Doppel-Scroll	BY-4
EDF Electricité de France, Johnson Controls		105	300 bis 500 900 bis 1'200	einstufig mit IHX und Economiser	Doppel-Schraube, Turbo	R245fa

Tabelle 2: Eine Auswahl an internationalen Forschungsprojekten im Bereich HTWP sortiert nach maximaler Vorlauf-temperatur (Senke) mit weiteren Informationen zu Organisation, Projektpartner, Heizleistung, Wärmepumpenzyklus, Kompressortyp und Kältemittel [1], [2].

Die Hauptforschungsziele richten sich vor allem auf die folgenden Bereiche:

- Erweiterung der Grenzen der Quellen- und Senkentemperaturen auf höhere Werte
- Entwicklung und Erprobung neuer synthetischer HFO Kältemittel mit niedrigem GWP
- Einsatz natürlicher Kältemittel wie Kohlenwasserstoffe (R600, R601), CO<sub>2</sub> oder Wasser
- Steigerung der Effizienz von Wärmepumpen (z. B. durch mehrstufige Kreisläufe und die Kombination mit ölfreien Kompressoren)
- Entwicklung temperaturbeständiger Komponenten (z.B. Kompressoren, Ventile)
- Optimierungen und Entwicklung von Wärmepumpen-Systemen mit neuen Regelungsstrategien für höhere Temperaturen
- Scale-up von Funktionsmodellen in den industriellen Massstab (Demonstrationsprojekte)

Mit Verschärfung der F-Gase Verordnung dürfen bis 2022 nur noch Kältemittel mit einem niedrigen Treibhauspotenzial (GWP < 150) in neuen Wärmepumpen für den gewerblichen Einsatz verwendet werden. Die treibhauswirksamen teilfluorierten Kohlenwasserstoffe (HFKW) R134a, R245fa und R365mfc (GWP von 1'430, 858 und 804) werden deshalb in den meisten Industrieländern einem *Phase-down* unterzogen (d.h. Reduktion von Produktion und Verbrauch). In der Schweiz sind die rechtlichen Grundlagen für Kältemittel in der Chemikalien-Risikoreduktions-Verordnung (ChemRRV) geregelt und industrielle Wärmepumpen mit Leistungen > 600 kW (Wärmequelle) sind vom HFKW-Verbot betroffen. Ersatzkältemittel mit niedrigem GWP werden zurzeit entwickelt und erforscht. Verschiedene Kältemittelhersteller

wie Chemours, ARKEMA, Honeywell, AGC Chemicals, Solvay, oder 3M arbeiten mit Hochdruck an der Entwicklung neuer synthetischer Kältemittel (4. Generation) mit verringertem Treibhauspotenzial (GWP).

Natürliche Kältemittel wie Wasser (R718), CO<sub>2</sub> (R744), Butan (R600) und Pentan (R601) sind vielversprechende umweltfreundliche Ersatzstoffe. Allerdings sind spezielle Ausführungen des Wärmepumpenzyklus mit mehrstufiger Verdichtung (z.B. Brüden Kompression) oder ausgeklügelte Sicherheitsmassnahmen aufgrund der Brennbarkeit (Sicherheitsklasse A3) nötig, was die Systemkosten erhöhen kann.

Verschiedene Hydrofluorolefine (HFO) und Hydrochlorfluorolefine (HCFO) wurden entwickelt, welche sehr niedrige GWPs aufweisen, nicht brennbar sind und ein grosses Potenzial für den Einsatz in industriellen Wärmepumpen haben. Die thermodynamischen Eigenschaften dieser synthetischen Kältemittel erlauben einen Wärmepumpenbetrieb bei Kondensationstemperaturen von 140 bis zu 160 °C. HFO-Kältemittel sind von der ChemRRV uneingeschränkt zugelassen, ebenso wie natürliche Kältemittel.

Speziell geeignet für HTWP sind die Kältemittel R1336mzz(Z), R1336mzz(E), R1233zd(E), R514A, R1234ze(Z), R1234ze(E) und R1224yd(Z). Simulationsstudien zeigen [1], [2], dass je nach Kältemittel ein Kompromiss zwischen COP (Effizienz) und VHC (volumetrische Wärmeleistung) gefunden werden muss. R1336mzz(Z) ist beispielsweise der nächste «Drop-in» Ersatzstoff für R365mfc, wobei R1224yd(Z), R1234ze(Z) und R1233zd(E) näher an R245fa liegen. Aber es fehlt noch an Forschung zu diesen Kältemitteln.

## Hochtemperatur-Wärmepumpe im Labor der NTB Buchs

An der NTB Buchs wurde im Rahmen des SCCER EIP Projektes eine HTWP-Laboranlage entwickelt, welche es ermöglicht, verschiedene HFO- und HCFO-Kältemittel, wie R1336mzz(Z), R1233zd(E) und R1224yd(Z), bei Quellentemperaturen von 40 bis 80 °C und Senkentemperaturen von 80 bis 150 °C zu testen [9] (siehe Bild 9). Die Wärmepumpe erreicht eine Heizleistung von circa 5 bis 10 kW. Die Wärmesenke simuliert eine mögliche industrielle Anwendung (z.B. Dampferzeugung oder Trocknungsprozess) und die Quelle potenzielle Abwärme. Für den Versuchsaufbau wurden handelsübliche Standardkomponenten verwendet.

Die HTWP ist einstufig aufgebaut und enthält einen drehzahlvariablen Hubkolbenverdichter, einen Ölabscheider und einen stufenlos zuschaltbaren internen Wärmeübertragers (IHX), um eine ausreichende Überhitzung des Kältemittels zu gewährleisten. Ein Expansionsventil steuert die Überhitzung (5 K) nach dem Verdampfer (vor dem IHX). In Anlehnung an die Norm DIN EN 14511 wurde eine Temperaturspreizung von 3 K auf der Quellenseite und 5 K auf der Senkenseite eingestellt. Bild 9 visualisiert das Prinzipschema. Dieser Wärmepumpenzyklus bietet eine einfache Konfiguration und erfordert nur eine minimale Anzahl von Gerätekomponenten. Erste experimentelle Testergebnisse einer Parameterstudie mit dem handelsüblichen HFCO-Kältemittel R1233zd(E) sind in Bild 10 (A) bis (F) veranschaulicht. Im Referenzpunkt (W60/W110, 50 K Temperaturhub) wurde ein COP von 2.8 (ohne IHX) und 3.1 (mit IHX) gemessen (Bild 10 A). Die Messresultate zeigen, dass durch den Einsatz des IHX die Effizienz gegenüber einem einfachen Wärmepumpenkreislauf im Schnitt um etwa 15% erhöht werden kann [9]. Der COP steigt mit einem kleineren Temperaturhub gemäss der Carnot-Beziehung. Die leicht abnehmende COP-Kurve bei 70 K Hub ist ein Resultat des schmaleren Zweiphasengebietes für die Kondensation nahe der kritischen Temperatur sowie der steigenden Wärmeverluste des Systems durch natürliche Konvektion und Strahlung bei erhöhten Temperaturen.

Bild 10 (B) veranschaulicht die Heizleistung in Funktion der Wärmequellentemperatur bei konstantem Temperaturhub. Die Heizleistung nimmt stetig zu und beträgt bei Ref-Bedingungen

circa 5.8 kW und steigt beim Betriebspunkt W80/W110 bis auf etwa 10 kW. An dieser Stelle erreicht der Wärmepumpen-Aufbau seine physikalischen Kapazitätsgrenzen.

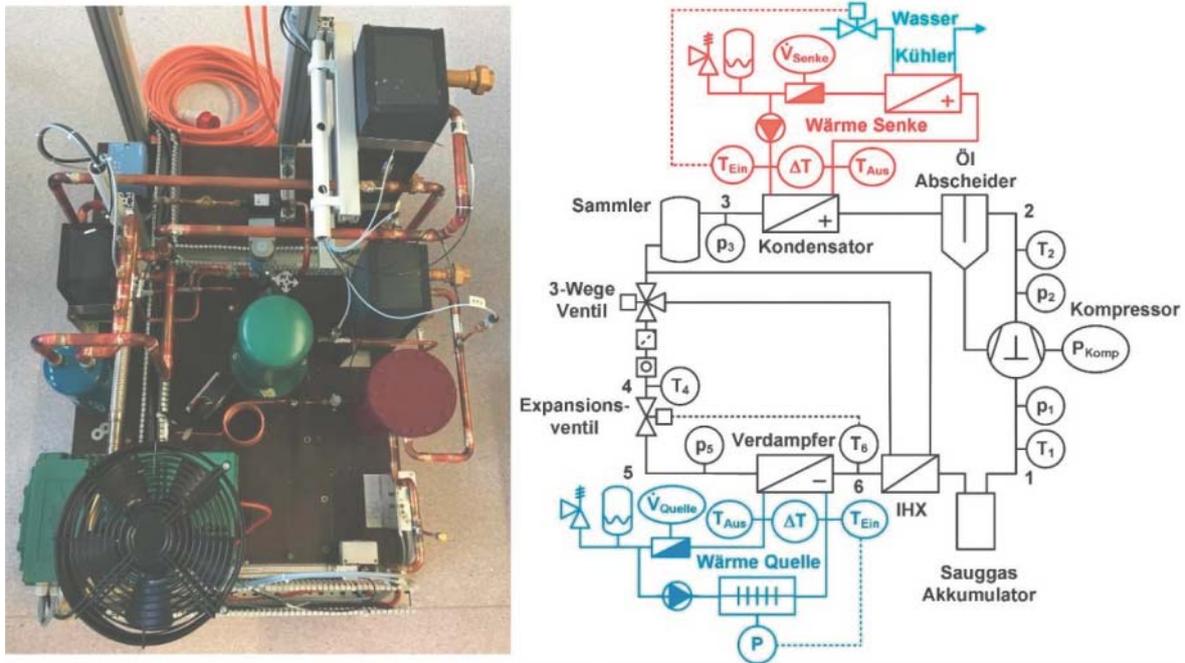


Bild 9: Experimenteller Aufbau und Prinzipschema der HTWP-Laboranlage für Senktemperaturen bis 150 °C an der NTB Buchs (thermisch nicht isoliert) (Graphik aus [9]).

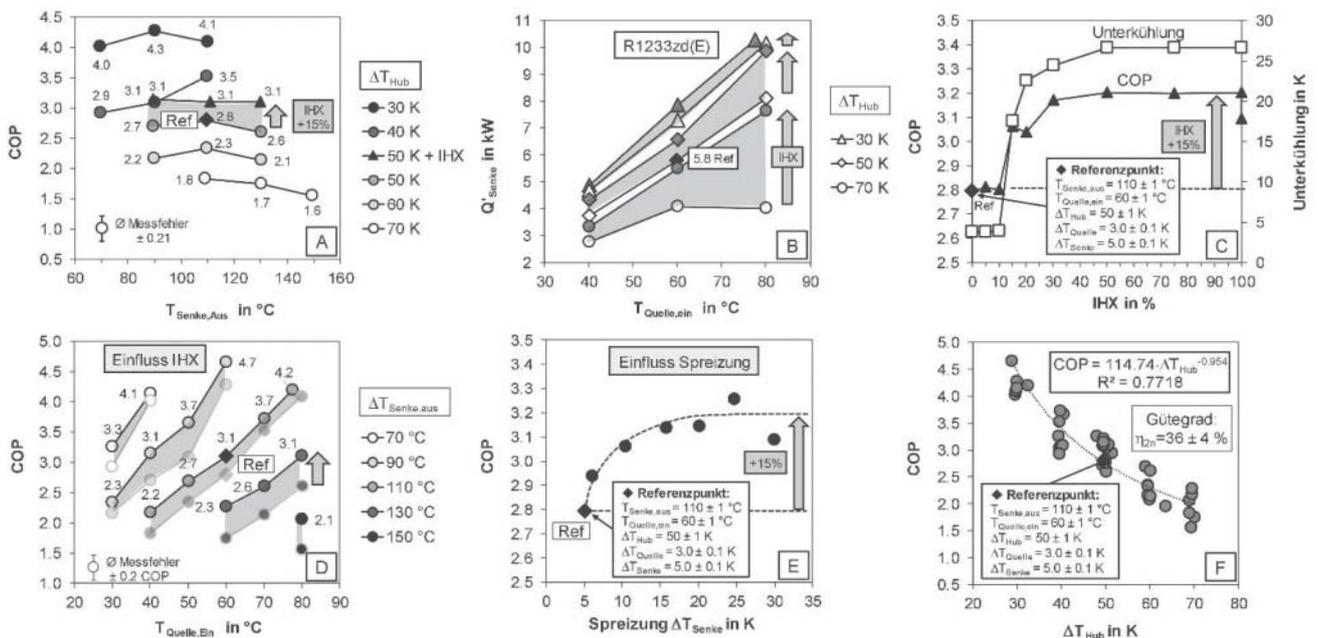


Bild 10: Experimentelle Resultate der untersuchten HTWP-Laboranlage mit Kältemittel R1233zd(E). (A) Betriebskennfeld des einfachen Wärmepumpenkreislaufs, (B) Heizleistung in Funktion der Quelltemperatur, (C) Einfluss des IHX auf den COP im Referenzpunkt (W60/W110), (D) Betriebskennfeld mit und ohne IHX, (E) Effizienzsteigerung durch Temperaturspreizung auf der Senke, (F) COP Messdaten vs. Temperaturhub (Quelle- zu Senktemperatur) mit einem Gütegrad von 36 ± 4 % (Graphiken aus [9]).

Bild 10 (C) zeigt den Einfluss des IHX auf den COP über den gesamten Öffnungsgrad von 0 bis 100 % des 3-Wege-Ventils am Referenzpunkt. Der variabel zuschaltbare IHX führt zu einer zusätzlichen Flexibilität bei der Überhitzungsregelung für Kältemittel, die hohe Überhitzungsanforderungen erfordern (stark überhängendes Nassdampfgebiet im Druck-Enthalpie-Diagramm). Bild 10 (D) illustriert das gesamte Betriebskennfeld der Wärmepumpe mit und ohne IHX bei gleichen experimentellen Temperaturbedingungen. Die Effizienzsteigerung durch den Einsatz des IHX ist klar ersichtlich. Bild 10 (E) zeigt den Einfluss einer höheren Senkenspreizung auf den COP als Beispiel für einen Aufwärmprozess. Mit steigendem Temperaturgleit von 5 auf 30 K (bei gleichbleibender Senktemperatur) verbessert sich die Wärmeübertragung im Kondensator und erhöht den COP um circa 15 %. Bild 10 (F) stellt die ermittelten COPs der gesamten Messdaten in Funktion des jeweiligen Temperaturhubs dar. Die COP-Werte nehmen mit höherem Temperaturhub tendenziell ab (gemäss Carnot-Beziehung) und liegen auf einer Kurve mit  $36 \pm 4$  % Gütegrad.

Die experimentellen Messergebnisse sind vielversprechend, da die entwickelte HTWP-Laboranlage die Erprobung weiterer HFO- und HCFO-Kältemittel wie beispielsweise R1336mzz(Z) und R1224yd(E) in Zukunft ermöglicht. Die Grundfunktionalität des entwickelten HTWP-Systems konnte erbracht werden. Weitere Effizienzsteigerungen lassen sich durch die Reduzierung der Wärmeverluste bei erhöhten Temperaturen durch eine bessere Isolierung der Wärmepumpenkomponenten und -leitungen erreichen.

## Schlussfolgerungen

Grosse Anwendungspotenziale für industrielle Wärmepumpen ergeben sich vor allem in der Lebensmittel-, Papier-, Metall- und Chemieindustrie. Bereits praktisch umgesetzte Anwendungsbeispiele zur Abwärmenutzung und Wärmerückgewinnung sind:

- Heissluftherzeugung und Luft-Vorwärmung für Trocknungsprozesse (Holz, Papier, Klärschlamm, Stärke, Ziegel, Tiernahrung) durch Abwärmenutzung
- Prozessdampferzeugung (Niederdruckdampf) für die Sterilisation und Pasteurisierung von Lebensmitteln (z.B. Milch) durch Nutzung von Kühlwasser oder feuchter Abluft
- Heisswassererzeugung für Wasch- und Reinigungsprozesse (Lebensmittel, Fleisch, Produktwäschen) in Kombination mit Kälteerzeugung
- Wärmerückgewinnung durch Rauchgaskondensation in Biomasseverbrennungen
- Fertigung von Spritzgussbauteile aus Kunststoffen (Erwärmung im Extruder und Abkühlung in der Spritzgussform)
- Nah- und Fernwärmenetze (z.B. von Stadtwerken und Kommunen)

Das Angebot von industriellen Wärmepumpen auf dem Markt mit grosser Leistung und hohen Vorlauftemperaturen ist in den vergangenen Jahren stetig gewachsen. Über 26 Hochtemperatur-Wärmepumpen (HTWP, Kompressionswärmepumpen) von 15 Herstellern wurden identifiziert mit Vorlauftemperaturen über 90°C. Der Dampferzeuger Kobelco SGH 165 von Kobe Steel (Japan) mit 165 °C, der HeatBooster von Viking Heat Engines AS (Norwegen) mit 160 °C, gefolgt von den Höchsttemperatur-Wärmepumpen (IWWDSS, IWWDS, IWWHS) von Ochsen (Österreich) mit 130 °C stellen den industriellen Benchmark dar. Die Produkte Eco Sirocco (Mayekawa), HWW 245fa (Combitherm), thermeco2 (ENGIE) und ChillHeat (Oilon) erreichen 100 bis 120 °C. Die experimentell gemessenen COP-Werte für die verschiedenen industriellen Wärmepumpen folgen in erster Näherung der Fit-Funktion  $COP_H = 68,455 \cdot \Delta T_{Hub}^{-0,76}$  (H: Heizen,  $\Delta T_{Hub}$  Quelle zu Senke in K, bei 45% Gütegrad) und liegen zwischen 2,4 und 5,8 bei einem

Temperaturhub von 95 bis 40 K. Die hohe internationale Forschungsaktivität und die Vielzahl laufender Demonstrationsprojekte deuten darauf hin, dass industrielle Wärmepumpen mit Senktemperaturen von 120 bis 160 °C in den kommenden Jahren verstärkt Marktreife erlangen werden. Dennoch liegt der Schwerpunkt dieser Forschungsprojekte noch immer auf der Technologieentwicklung, der automatisierten Steuerung und der Kostensenkung. Der Forschungsbedarf liegt insbesondere in:

- Erprobung neuer synthetischer HFO- und HCFO-Kältemittel mit  $GWP < 10$
- Einsatz von natürlichen Kältemitteln wie R600, R601, CO<sub>2</sub>, und H<sub>2</sub>O
- Steigerung der Effizienz (z. B. durch mehrstufige Kreislaufe, mit ölfreien Kompressoren)
- Neue Regelungsstrategien und Scale-up

Im Rahmen des Projekts SCCER-EIP wurde an der NTB Buchs eine HTWP im Labor entwickelt. Die Grundfunktionalität wurde bei Wärmequellentemperaturen von 40 bis 80 °C und Senktemperaturen zwischen 70 und 150 °C gezeigt. Im Bezugspunkt W60/W110 (50 K Temperaturhub) wurde mit dem handelsüblichen HCFO R1233zd(E) ein COP von 3,1 gemessen. Insbesondere erhöht der Einsatz eines internen Wärmetauschers den Wirkungsgrad im gesamten Betriebskennfeld um etwa 15% im Vergleich zu einem einfachen Wärmepumpenzyklus. Eine weitere COP-Steigerung von circa 15% wurde durch eine höhere Temperaturspreizung von 5 auf 30 K auf der Senkenseite erreicht. Zukünftige Arbeiten untersuchen die Eignung verschiedener HFO- und HCFO-Kältemittel mit niedrigem GWP für ihren Einsatz als Kältemittel in HTWP.

## Danksagung

Dieses Forschungsprojekt ist Teil des Swiss Competence Center for Energy Research Efficiency of Industrial Processes (SCCER EIP) der Schweizer Innovationsagentur Innosuisse.

## Quellen

- [1] C. Arpagaus, Hochtemperatur-Wärmepumpen: Marktübersicht, Stand der Technik und Anwendungspotenziale. Offenbach: VDE Verlag, 2018.
- [2] C. Arpagaus, F. Bless, M. Uhlmann, J. Schiffmann, und S. S. Bertsch, High Temperature Heat Pumps: Market Overview, State of the Art, Research Status, Refrigerants, and Application Potentials, *Energy*, 2018, 152, 985–1010.
- [3] R. M. Jakobs, Commercial and Industrial Heat Pump Application, IEA HPT Annex 35/48, 22. Tagung des BFE-Forschungsprogramms Wärmepumpen und Kälte, Burgdorf, 22. Juni 2016, 69–77.
- [4] N. Calame, F. Rognon, und O. Sari, High Temperature Heat Pumps for Industrial Processes, 23. Tagung des BFE-Forschungsprogramms Wärmepumpen und Kälte, Burgdorf, 14. Juni 2017, 1–17.
- [5] J.-L. Peureux, F. Sicard, and D. Bobelin, French industrial heat pump developments applied to heat recovery, 11<sup>th</sup> IEA Heat Pump Conference, Montréal, 12. Mai 2014.
- [6] A. Kemmler, S. Kreidelmeyer, P. Wüthrich, M. Keller, M. Jakob, and G. Catenazzi, Analyse des schweizerischen Energieverbrauchs 2000-2015 nach Verwendungszwecken, 2016, 1–96.
- [7] P. Nellissen und S. Wolf, Heat Pumps in Non-Domestic Applications in Europe: Potential for an Energy Revolution, 8<sup>th</sup> EHPA European Heat Pump Forum, Brüssel, 28. Mai 2015, 1–17.
- [8] S. Wolf, R. Flatau, und P. Radgen, Rahmenbedingungen für die Anwendung von Grosswärmepumpen in der Schweizer Industrie, 23. Tagung des BFE-Forschungsprogramms Wärmepumpen und Kälte, Burgdorf, 14. Juni 2017, 1–10.
- [9] C. Arpagaus et al., Hochtemperatur-Wärmepumpe mit HFO- und HCFO-Kältemitteln, *KI Kälte Luft Klimatechnik*, 12/2018, 45–53.



Dr. Anna Sophia Wallerand  
Industrial Process and Energy Systems Engineering Group, EPFL

# Prozessintegration von Wärmepumpen: Ein modellbasierter Ansatz

## Zusammenfassung

*Obwohl ihre Funktionalität wiederholt unter Beweis gestellt wurde, fehlt eine umfassende Realisierung industrieller Wärmepumpen [1,2]. Gründe dafür sind ein Defizit an klaren Leitfäden, Integrationsmethoden und öffentlicher Berichterstattung über Systeme, die auf dem neuesten Stand der Technik sind. Das bildet die Motivation für das Projekt Annex 48 Wärmepumpen für industrielle Anwendungen des Collaboration Programme on Heat Pumping Technologies der IEA (IEA HPT Annex 48) und das damit verbundene BFE-Projekt.*

*Der Bericht zeigt eine Zusammenfassung der Ergebnisse des 3-jährigen BFE-Projekts, für das eine neuartige, «intelligente» Methode zur Wärmepumpenplanung, die in ein mathematisches Softwaremodell eingebettet ist, entwickelt wurde. Eine umfassende Liste von Wärmepumpenfunktionalitäten wurde unter Berücksichtigung der technischen Einschränkungen modelliert. Im Vergleich zu Ergebnissen aus bisherigen Studien konnten die kostenoptimierten Lösungen um 5-30% verbessert werden. Im Bericht wird zudem gezeigt wie die Methode einem grösseren Anwenderkreis dienen kann: (1) Die Möglichkeit die besten ökonomischen Bedingungen für die Integration von industriellen Wärmepumpen zu ermitteln. (2) Die Einsparpotenziale durch Wärmepumpen in verschiedenen Branchen zu bestimmen. (3) Empfehlungen für Hersteller auszusprechen, sodass Komponenten zukünftig besser an die Prozessanforderungen angepasst werden können.*

*Für den IEA HPT Annex 48 wurde darüber hinaus ein Leitfaden für «intelligente» Wärmepumpenintegration entwickelt und auf eine Fallstudie angewendet.*

## Summary

*Although their functionality has been repeatedly proven, wide-scale implementation of industrial heat pumps is still lacking [1,2]. A deficit for clear implementation guidelines, integration methods, and reporting of state-of-the-art systems has been identified which motivates the IEA HPT Annex 48 Industrial Heat Pumps and the underlying BFE project.*

*This report shows the results of a 3-year (BFE) project for which a novel heat pump synthesis method embedded in a computational framework was derived. The superstructure-based approach is solved using mathematical programming. A comprehensive list of heat pump features is incorporated while considering technical limitations. Benchmarking was completed on a set of literature cases which yielded 5-30% cost improved solutions.*

*The report further elaborates in which way this method could serve a wider audience: (1) in offering the possibility to compare different economic scenarios and identify the most fertile environment for industrial heat pump integration (2) in providing a foundation for analysis of heat pump saving potentials in different industries, and further (3) in giving directions for experimentalists and equipment manufacturers to adapt and develop heat pump equipment to better fit the process needs.*

*It further elaborates the contribution done within the framework of the IEA HPT Annex 48, for which a set of guidelines was developed and applied to a case-study.*

## Die Rolle von Industrierärmepumpen

Der Schweizer Industrie- und Dienstleistungssektor repräsentiert mit etwa 30% den zweitgrössten Verursacher von CO<sub>2</sub> Emissionen in der Schweiz [3] (nach dem Verkehr). Industrierärmepumpen können durch einen dreifachen Vorteil einen zentralen Beitrag zur Emissionsminde- rung leisten: (1) Sie sind strombetrieben und verursachen damit viel geringere Emissionen als herkömmliche Wärmequellen, die auf der Verbrennung fossiler Brennstoffe beruhen. (2) Sie ermöglichen Prozess-Abwärme aufzubereiten und damit aufzuwerten. (3) Indem sie eine (Ab)Wärmequelle nutzen, ist der Elektrizitätsbedarf im beispielsweise im Vergleich zu einem elektrischen Ofen sehr niedrig und der Wirkungsgrad sehr hoch.

Bild 1 zeigt warum die Schweiz ein besonders interessanter Standort für (industrielle) Wärmepumpen ist: hohe Gaspreise und niedrige Treibhausgasemissionen des ab dem Versorgungsnetz gelieferten Stroms (Stromnetzemissionen). Die niedrigen Stromnetzemissionen hängen mit dem Schweizer Strom-Mix zusammen, der vor allem auf Atom- und Wasserkraft beruht.

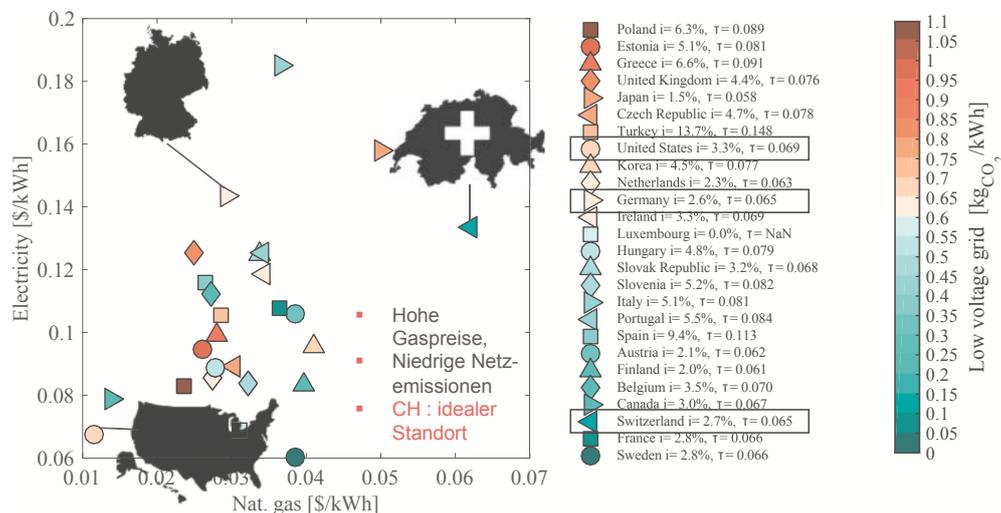


Bild 1: Ressourcenpreise (2017) [4] [\*], Kreditzinsen für Geschäftsbanken (i) [5] (hauptsächlich 2015), Annualisierungsfaktor ( $\tau$ ) (20-jährige Lebensdauer), Niederspannungs-Stromnetzemissionen [6] (Bezugsjahr 2014, ICC 2013, GWP 100a). [\*] Gaspreis Japan [241] (2015).

## «Intelligente» Integration

Wenn von intelligenter Integration Industrieller Wärmepumpen gesprochen wird, muss man auch die Pinch Analyse erwähnen.

Die Pinch Analyse ist eine Methode, die in den 1970er Jahren von Linnhoff und Flower [7,8] entwickelt und umfangreich von Kemp [9] beschrieben wurde. Sie ermöglicht eine Abschätzung des maximalen Energiegewinnungspotenzials von industriellen Prozessen. Dies erfordert die Aufgliederung eines Prozesses in seine thermodynamischen Anforderungen. Das Ergebnis ist ein Satz von heißen (Nettokühlbedarf) und kalten (Nettowärmebedarf) thermischen Strömen. Die grosse zusammengesetzte Verbundkurve (Grand Composite Curve, GCC), die in Bild 2 dargestellt ist, repräsentiert den Netto Heiz- und Kühlbedarf eines industriellen Prozesses sowie deren Temperaturniveaus unter der Annahme einer maximalen Wärmerückgewinnung oder eines minimalen Energiebedarfs (MER). Die Pinchtemperatur wird durch das Auftreffen der

Verbundkurve auf der Temperaturachse markiert. Oberhalb der Pinchtemperatur zeigt der Prozess einen Nettowärmebedarf und darunter einen Nettokühlbedarf.

Der Abstand von der Temperaturachse bei der höchsten und niedrigsten Temperatur repräsentiert den minimalen Energiebedarf für heizen ( $MER_{\text{heiss}}$ ) und kühlen ( $MER_{\text{kalt}}$ ).

Mithilfe der Pinchtemperatur lassen sich drei Thermodynamische Regeln ableiten, die sogenannten Pinchregeln [7,8]:

1. Wärmequellen sollten nur bei Temperaturen oberhalb der Pinchtemperatur installiert werden.
2. Kühlung sollte nur unterhalb der Pinchtemperatur platziert werden.
3. Es sollte kein Wärmeaustausch über die Pinchtemperatur hinweg erfolgen.

Townsend und Linnhoff [10] haben die theoretischen Grundlagen für die optimale Platzierung von Wärmepumpen in industriellen Prozessen auf Grundlage der Pinch Analyse abgeleitet: *Wärmepumpen sollten immer über die Pinchtemperatur hinweg platziert werden, wenn Energieeinsparungen gewünscht werden (wie dargestellt in Bild 2).*

Energieeinsparungen werden dann im Wesentlichen durch Rückgewinnung von Abwärme unterhalb der Pinchtemperatur und Rückführung der mit mechanischer Arbeit aufgewerteten Wärme oberhalb der Pinchtemperatur erreicht.

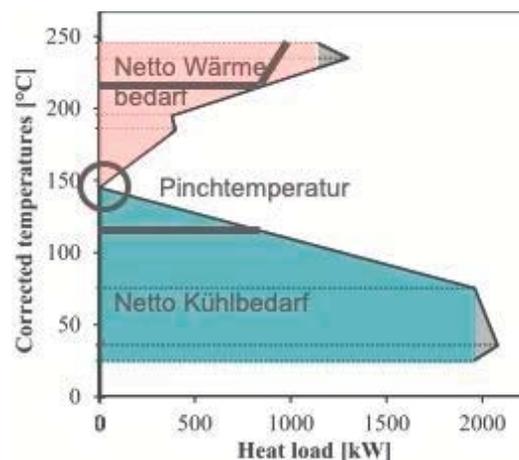


Bild 2: Verbundkurve, netto Wärme- und Kühlbedarf [11] und Wärmepumpe über die Pinchtemperatur hinweg.

Es gibt einen entscheidenden Faktor, der die Leistungszahl von Wärmepumpen beeinflusst: der erforderliche Temperaturhub und damit das Verdichterverhältnis. Bei industrieller Abwärmennutzung steht der Temperaturhub in direktem Zusammenhang mit der "Schärfe" des Pinches, das heisst der Form der Verbundkurve nahe der Pinchtemperatur.

Bild 3 zeigt die Verbundkurve der Prozesse (A) und (B). Prozess (A) hat einen scharfen Pinchpunkt mit einem kleinen Temperaturanstieg. Während Prozess (B) einen glatten Pinchpunkt zeigt, mit Heiz- und Kühlungsanforderungen, die sich über einen weiten Temperaturbereich erstrecken. Die Integration verschiedener mechanischer Wärmepumpensysteme wird ausgehend von einer einstufigen Wärmepumpe mit einem Kühlmittel (umgekehrter Rankine-Kreislauf) in Bild 3 (A) und (B) dargestellt. Wenn ein hoher Temperaturhub erforderlich ist, wie in Bild 3 (B) dargestellt, wird der Wirkungsgrad von Standard-Wärmepumpen (einstufig mit einem Kühlmittel) drastisch verschlechtert.

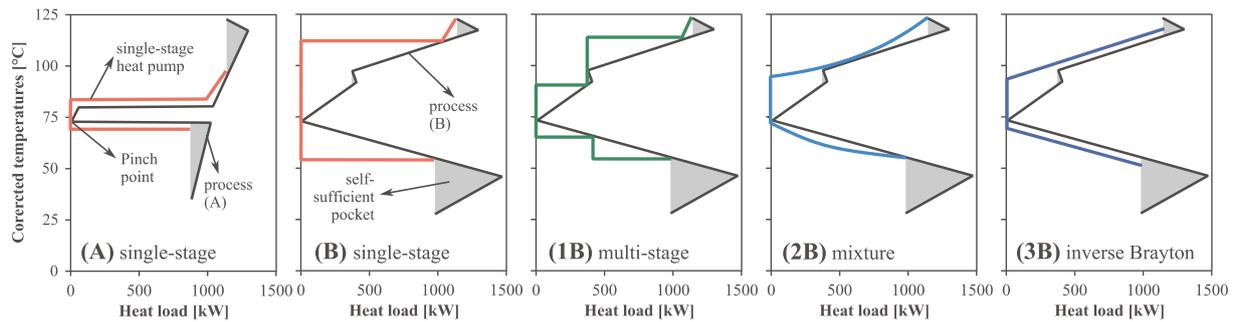


Bild 3: Verschiedene Wärmepumpentypen integriert mit einer Verbundkurve. (A) Verbundkurve mit "scharfem" Pinchpunkt und einstufiger Wärmepumpe (WP), (B) "glatter" Pinchpunkt und einstufige WP, (1B) "glatter" Pinchpunkt und mehrstufige WP, (2B) Kühlstoffgemisch WP, (3B) inverse Brayton WP [11].

In der Literatur werden mehrere Möglichkeiten zur Überwindung dieses Problems diskutiert, die auch in Bild 3 (1B-3B) dargestellt sind. Die wichtigste Innovation sind mehrstufige Wärmepumpenzyklen basierend auf mehrstufiger Kompression und / oder Expansion und möglicherweise einer Kaskade von Zyklen, siehe Bild 3 (1B).

Die Pinch Analyse hilft die generellen Temperaturniveaus und Größenordnung einer industriellen Wärmepumpe zu bestimmen, nicht aber die detaillierte Planung hinsichtlich der Betriebsbedingungen, des Kühlmittels, der Frage nach einstufiger oder mehrstufiger Kompression/ Expansion, Unterkühlung, Vorerhitzen oder einem Entspannungskessel.

Zu diesem Zweck wurde in diesem Projekt eine neuartige Methode zur «intelligenten» Wärmepumpenplanung, die in ein Softwaremodell eingebettet ist, entwickelt. Die Methode verwendet die Prinzipien der Pinch Analyse, aber bedient sich mathematischer Optimierung um komplexe Wärmepumpensysteme genauer zu betrachten. Der Ansatz basiert auf einem Superstruktur (Überbau)-Modell, das eine weitreichende Liste an Wärmepumpenfunktionalitäten verwendet wobei technische Einschränkungen berücksichtigt werden. Weil die Methode eine Reihe von Lösungen bereitstellt, kann bei der Entscheidungsfindung auf ein Expertenurteil vertraut werden. Das Superstruktur-Modell ist dargestellt in Bild 4.

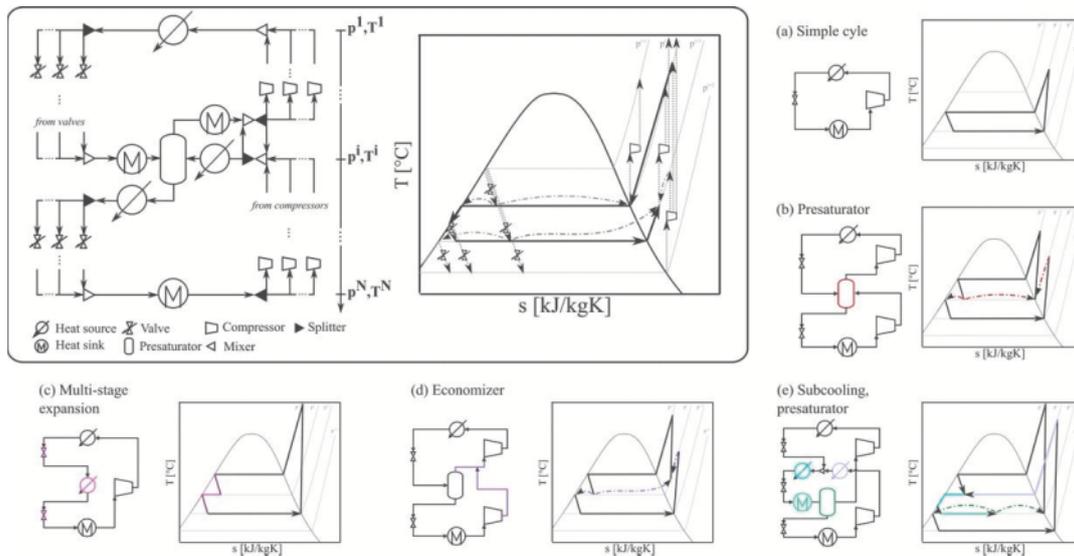


Bild 4: Flussdiagramm und Temperatur-Entropie-Diagramm des Superstruktur-Modells mit Beispielkreisläufen.

Ein Literaturvergleich wurde durchgeführt mit bekannten Studien aus dem Bereich mathematisch optimierter Industriewärmepumpen. Die Ergebnisse wurden zunächst reproduziert und später wurde versucht verbesserte Resultate zu erzielen. Die Ergebnisse dieser Analyse sind dargestellt in Tabelle 1. Im Vergleich zu den zuvor präsentierten Resultaten konnten die kostenoptimierten Lösungen mit der präsentierten Methode zwischen 5% und 30% Verbesserung liefern.

Problem			E2 [12]		Ethylene [13]		Cold Tray [14]	
			Ref.	[15]	Ref.	[15]	Ref.	[15]
Betriebskosten	Kühlwasser	\$/y	0	0	25'020	23'150	29'930	4'810
	Dampf	\$/y	10'460	10'370	0	0	287'090	39'310
	Strom	\$/y	27'620	28'040	327'580	223'340	96'370	189'900
Investitionskosten	Kompressor	\$/y	54'710	49'630	230'810	159'140	56'380	109'220
	Total	\$/y	92'790	88'050	583'410	405'630	469'770	343'230
Verbesserung		%		5.1		30.5		26.9

Tabelle 1: Literaturvergl. zwischen bekannten Studien und der präsentierten Methode [15].

Darüber hinaus können mit der Methode weitere hilfreiche Analysen durchgeführt werden. Bild 5 zeigt zum Beispiel die Kosten-Emissionen-Kurven für einen Molkereibetrieb in der Schweiz, Deutschland und den USA. Hierbei können verschiedene Schlussfolgerungen gezogen werden: In der Schweiz können die höchsten Emissionsminderungen lediglich durch eine

Wärmepumpeninstallation erreicht werden, was mit den niedrigen Stromnetzemissionen in der Schweiz zusammenhängt (siehe Bild 1). Darüber hinaus hängen die reduzierten Emissionen auch mit einer 30% Minderung der jährlichen Kosten zusammen, was an den hohen Gaspreisen in der Schweiz liegt (siehe Bild 1). Im Vergleich dazu gibt es in den USA keine wirtschaftlich rentable Lösung, die die Emissionen reduziert, da die Energiepreise so niedrig sind und es sich daher nicht lohnt in neue Technologien zu investieren. In Deutschland benötigen die Lösungen mit der höchsten Emissionsminderung Wärmepumpen und Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen (WKK), da die Stromnetzemissionen zu hoch sind, um durch Wärmepumpen allein die gesamten Emissionen der Molkerei zu senken.

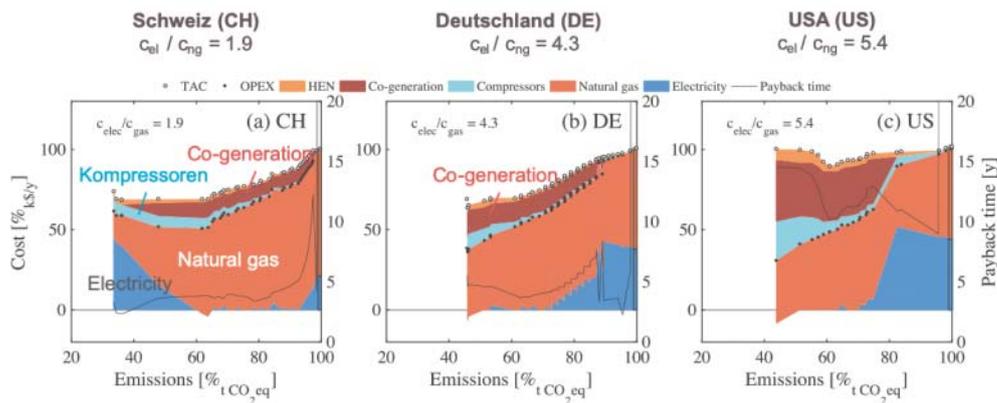


Bild 5: Kosten-Emissionen Kompromisskurven für einen Molkereibetrieb in (a) der Schweiz, (b) Deutschland und den (c) USA [11,16].

Die entwickelten Methoden können auch dazu genutzt werden besonders vielversprechende Branchen zu identifizieren in denen die Einsparpotenziale durch Wärmepumpen besonders gross sind. Eine solche Studie ist momentan in Bearbeitung [17].

Darüber hinaus können Empfehlungen für Gerätehersteller identifiziert werden, sodass Geräte zukünftig besser an die Prozessanforderungen angepasst werden können. Die Grundlagen für diese Analyse werden momentan ausgewertet.

## Leitfaden

Task 3 im IEA HPT Annex 48 soll praktische Richtlinien und Erkenntnisse für die Anwendung bestehender Modelle und Software-Tools liefern, um die systematische Integration von Wärmepumpen in industrielle Prozesse zu unterstützen. Die Ziele von Task 3 wurden hauptsächlich aus den Schlussfolgerungen abgeleitet, die im vorangegangenen IEA HPT Annex 35 [18], Task 2, gezogen wurden. Die wichtigsten Schlussfolgerungen aus dem Bericht beziehen sich auf die eingeschränkte Verbreitung und eingeschränkte Verwendbarkeit der verfügbaren Software-Tools. Es wurde festgestellt, dass eine grossflächige Nutzung der meisten verfügbaren Software-Tools durch ihre Komplexität und die erforderlichen spezifischen Schulungen gehemmt wird sowie häufig die theoretischen Grundlagen nicht klar genug sind.

Die in Task 3 unternommenen Anstrengungen, die in einem Report veröffentlicht werden, sind daher in vier Punkten zusammengefasst.

- Der theoretische Hintergrund für die systematische Wärmepumpenintegration mit industriellen Prozessen wurde effizient zusammengefasst und prägnant dargestellt (Pinch Analyse).
- Eine Analyse der verfügbaren Werkzeuge wurde durchgeführt und eine Übersicht wurde in einer einzigen Vergleichstabelle bereitgestellt. Eine Übersicht der Resultate befindet sich in Bild 6.

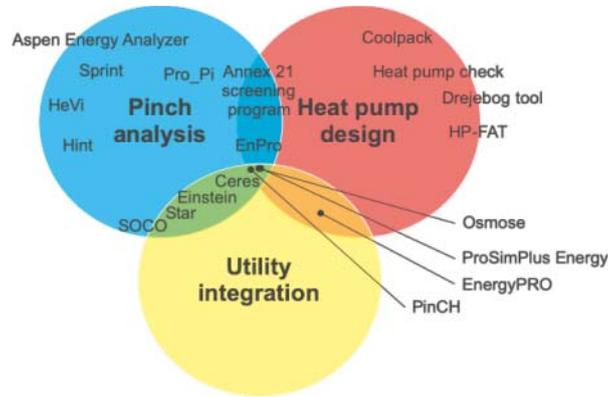


Bild 6: Kategorien zum Gruppieren relevanter Software-Tools für die intelligente Wärmepumpenintegration.

- Es wurde ein benutzerfreundlicher Satz von Richtlinien für die Anwendung in der Praxis abgeleitet, der mit oder ohne Software-Tools und speziellem Training verwendet werden kann.
- Die Anwendung bestehender Software-Tools auf eine reale Fallstudie auf der Grundlage der Richtlinien (vom vorherigen Punkt), siehe Bild 7.

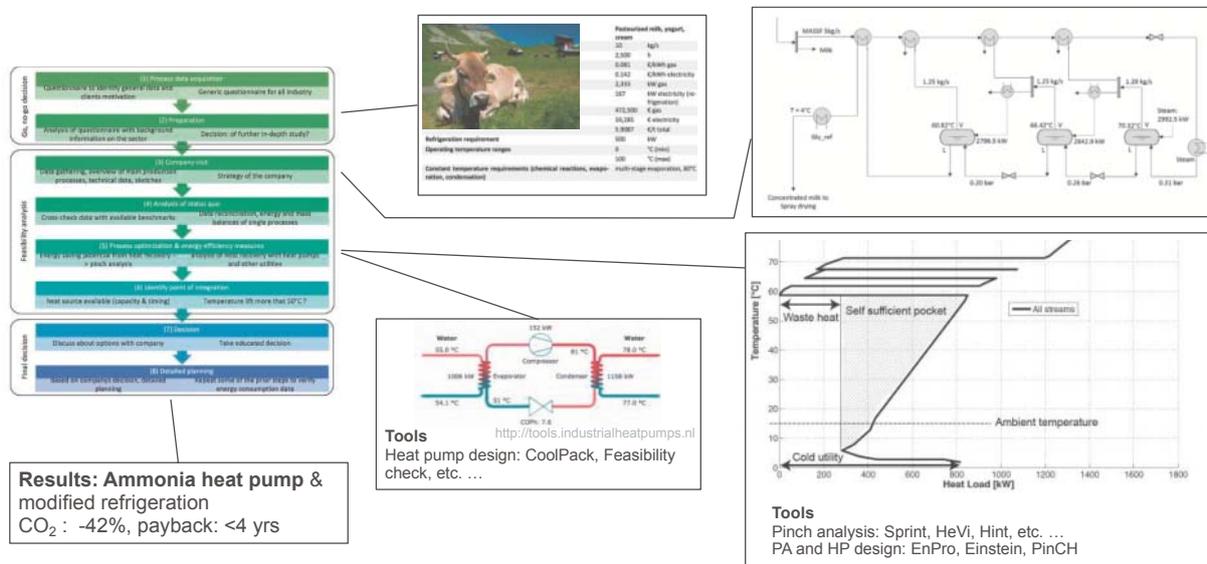


Bild 7: Anwendung der Richtlinien auf eine reale Fallstudie.

## Schlussfolgerung

Drei Themen wurden in diesem Beitrag angesprochen: Zum ersten wurde auf das grosse Emissionsminderungs-Potential von Industriegewärmepumpen in der Schweiz hingewiesen, die durch hohe Gaspreise und niedrige Stromnetzemissionen begünstigt werden. Zum zweiten wurden die theoretischen Grundlagen erörtert, die dabei unterstützen «intelligente» Wärmepumpenintegration in der Industrie vorzunehmen. Es wurde aber auch darauf hingewiesen, dass diese Grundlagen nicht ausreichen, um tatsächliche Wärmepumpenplanung vorzunehmen. Deshalb wurde eine neuartige Methode zur Erleichterung einer solchen Planung vorgestellt. Abschliessend wurde auf einen Leitfaden hingewiesen, der im Rahmen des IEA HPT Annex 48 entwickelt wurde, und der es erleichtern soll, die theoretischen Grundlagen einer modellbasierten «intelligenten» Integration zu verstehen und mit einfachen Software-Tools auf eine Fallstudie anzuwenden.

## Quellen

- [1] IEA. Application of Industrial Heat Pumps: Executive Summary. HPT - Heat Pump Technol 2014. <http://heatpumpingtechnologies.org/publications/application-of-industrial-heat-pumps-executive-summary/> (accessed November 17, 2016).
- [2] Chua KJ, Chou SK, Yang WM. Advances in heat pump systems: A review. Appl Energy 2010;87:3611–24. doi:10.1016/j.apenergy.2010.06.014.
- [3] BAFU [Bundesamt für Umwelt]. Kenngrößen zur Entwicklung der Treibhausgasemissionen in der Schweiz 1990-2015 2017.
- [4] International Energy Agency (iea). Key World Energy Statistics 2017. 2018.
- [5] Wikipedia. List of countries by commercial bank prime lending rate. Wikipedia 2017.
- [6] Ecoinvent. ecoinvent 3.4 – ecoinvent n.d. <https://www.ecoinvent.org/database/ecoinvent-34/ecoinvent-34.html> (accessed March 3, 2018).
- [7] Linnhoff B, Flower JR. Synthesis of heat exchanger networks: I. Systematic generation of energy optimal networks. AIChE J 1978;24:633–42. doi:10.1002/aic.690240411.
- [8] Linnhoff B, Mason DR, Wardle I. Understanding heat exchanger networks. Comput Chem Eng 1979;3:295–302. doi:10.1016/0098-1354(79)80049-6.
- [9] Kemp IC. Pinch Analysis and Process Integration: A User Guide on Process Integration for the Efficient Use of Energy. Butterworth-Heinemann; 2011.
- [10] Townsend DW, Linnhoff B. Heat and power networks in process design. Part I: Criteria for placement of heat engines and heat pumps in process networks. AIChE J 1983;29:742–8. doi:10.1002/aic.690290508.
- [11] Wallerand AS. Integration of solar energy with industrial processes 2018. doi:10.5075/epfl-thesis-8635.
- [12] Shelton MR, Grossmann IE. Optimal synthesis of integrated refrigeration systems I. Mixed-integer programming model. Comput Chem Eng 1986;10:445–59. doi:10.1016/0098-1354(86)85014-1.
- [13] Colmenares TR, Seider WD. Synthesis of cascade refrigeration systems integrated with chemical processes. Comput Chem Eng 1989;13:247–58. doi:10.1016/0098-1354(89)85002-1.
- [14] Colmenares TR, Seider WD. Heat and power integration of chemical processes. AIChE J 1987;33:898–915. doi:10.1002/aic.690330604.
- [15] Wallerand AS, Kermani M, Kantor I, Maréchal F. Optimal heat pump integration in industrial processes. Appl Energy 2018;219:68–92. doi:10.1016/j.apenergy.2018.02.114.
- [16] Wallerand AS, Kantor I, Kermani M, Maréchal F. Method for generic pre-feasibility assessment of industrial energy integration measures: part I. submitted to Applied Energy n.d.
- [17] Wallerand AS, Kantor I, Kermani M, Moret S, Maréchal F. Energy saving potentials in the main industrial sectors. Perparation n.d.
- [18] Laue HJ. Annex 35 Final Report - Application of Industrial Heat Pumps, Part 1. IEA; 2014.



Lorenz Brenner, Stefan Rohrer, Markus Krütli, Prof. Frank Tillenka  
Institut für Energiesysteme und Fluid-Engineering, ZHAW

# Energieeffizienz von Klimakälteanlagen: Praxis und Theorie

## Zusammenfassung

*Mit der Energiestrategie des Bundes werden höhere Anforderungen an die Energieeffizienz von Klimakälteanlagen gestellt. Um dem steigenden Energieverbrauch entgegenzuwirken wurde ein Aktionsplan im Rahmen des BFE-Programms EnergieSchweiz ausgearbeitet, welcher Projekte zur Schaffung von Tools sowie Informationsgrundlagen für die verschiedenen Akteure der Branche und zur Umsetzung im Markt beinhaltet.*

*In diesem Rahmen wird einerseits die hydraulische Einbindung von bestehenden Kälteanlagen untersucht, um häufig auftretende Probleme zu eruieren. In einer Marktbefragung wurde als häufigstes Problem eine mangelhafte regelungstechnische Abstimmung zwischen Erzeuger und Verbraucher angeführt. Weiter genannt wurde eine mangelhafte Wartung, die Fehldimensionierung von Komponenten sowie eine mangelhafte Inbetriebnahme.*

*Andererseits wird ein exergetisches Effizienzbewertungsverfahren für Klimakälteanlagen mit Kaltwassersätzen entwickelt. Durch die Verfolgung der hochwertigen Energie im Gesamtsystem können Verluste lokalisiert und deren Grössenordnung bestimmt werden, was die Grundlage für Optimierungen liefert. Eine erste Anwendung des Systems konnte anhand Feldmessdaten durchgeführt werden.*

## Summary

*The energy strategy of the federal government makes higher demands on the energy efficiency of refrigeration systems. In order to combat rising energy consumption, an action plan was developed as part of the SFOE-programme "EnergieSchweiz", which includes projects to create tools as well as informational documents for the various players in the industry and to implement them in the market.*

*On one hand, the hydraulic integration of existing refrigeration systems is being investigated in order to identify frequently occurring problems. In a market survey, the most frequent problem cited was inadequate control system coordination between the producer and consumer. Other problems mentioned were insufficient maintenance of the system, incorrect dimensioning of components and poor initial operation of the system.*

*On the other hand, an exergetic efficiency assessment procedure for vapour compression refrigeration plants with cold water distribution is being developed. By tracking the high-quality energy in the overall system, losses can be localized and their magnitude can be determined, providing the basis for optimization. A first application of the system has been carried out on the basis of field measurements.*

## Einleitung

Zwei Projekte, welche am Institut für Energiesysteme und Fluid-Engineering an der ZHAW (ZHAW-IEFE) in Winterthur bearbeitet werden, haben das Ziel, die Effizienz von Klimakälteanlagen zu untersuchen und zu verbessern. Dabei soll die Effizienz des Gesamtsystems im Vordergrund stehen.

Im Rahmen einer Marktbefragung, wurde die hydraulischen Einbindung von bestehenden Kälteanlagen untersucht, um häufig auftretende Problemstellungen in der Praxis zu eruieren. Dadurch sollen Schwerpunkte erkannt werden, damit eine Lösung für die schwerwiegendsten Probleme systematisch weiterverfolgt werden kann.

In einem weiteren Projekt wird ein Tool entwickelt, welches eine einheitliche Effizienzbewertung von Klimakälteanlagen sicherstellen soll. Mithilfe des Tools soll es möglich sein, die Effizienz jedes einzelnen Teilsystems einer Klimakälteanlage (z.B. Kältemaschine, Rückkühlung, Kühlstellen, etc.) zu bewerten. Dadurch wird eine ganzheitliche Beurteilung der Anlage sichergestellt und zudem können die auftretenden Problem scharf abgegrenzt werden. Das neue Tool soll auch als konsistentes Bewertungskriterium für eine Effizienzbeurteilung von Klimakälteanlagen dienen. Hierfür soll die Vergleichbarkeit unter verschiedenen Anlagen sichergestellt werden und die Ergebnisse des Tools von Personen ohne Fachkenntnisse interpretiert werden können, damit es verbreitet eingesetzt werden kann.

## Häufig auftretende Problemstellungen bei der hydraulischen Einbindung von Kältemaschinen

Eine Untersuchung der ZHAW [1] zeigt auf, dass bei der hydraulischen Integration von Kältemaschinen oftmals Probleme bestehen. Dies lässt die Vermutung zu, dass die Performance einer Kältemaschine verbessert werden kann, wenn diese korrekt ins hydraulische Netz eingebunden wird. Um die bestehenden Probleme in der Praxis systematisch zu erheben wurde eine Marktbefragung unter Akteuren der Kältebranche durchgeführt. Ziel des Projekts war eine Kategorisierung von verschiedenen Problemen, welche bei der hydraulischen Einbindung von Kältemaschinen auftreten können. Primär sollen Schwerpunkte in dieser sehr breit gestreuten Thematik gefunden werden. Dafür wurden die Meinungen von verschiedenen Branchenvertretern ausgewertet und die wichtigsten Problemstellungen identifiziert. Insgesamt wurden 26 Personen befragt, wobei die Vertretung der verschiedenen Fachgebiete in der Umfrage in Bild 1 dargestellt wird<sup>1</sup>.

Durch die Studie konnten die am häufigsten auftretenden Mängel bei der hydraulischen Einbindung von Kältemaschinen eruiert werden. Daraus wurden mögliche Massnahmen zur Reduktion der erkannten Probleme abgeleitet.

<sup>1</sup> Die Mehrheit der befragten Personen konnten mehreren Fachgebieten zugeteilt werden, was zu Doppelzuweisungen in den Fachgebieten führt.

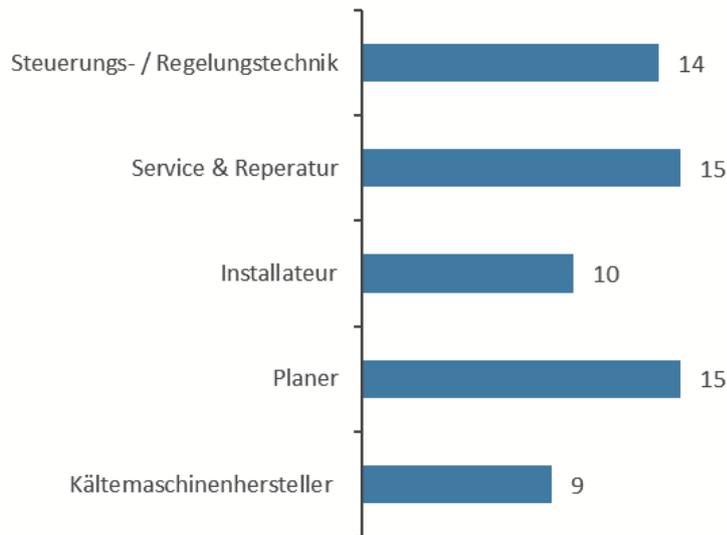


Bild 1: Anzahl befragter Personen eines bestimmten Fachgebiets (Mehrfachzuteilung in verschiedene Fachgebiete möglich)

Die aufgedeckten Probleme und Mängel in der Praxis sind vielseitig. Durch eine relative Gewichtung konnten jedoch klare Schwerpunkte erkannt werden. Bild 2 zeigt die Priorisierung der Themen, welche durch die Umfrageteilnehmer vorgenommen wurde. Aus den Ergebnissen kann geschlossen werden, dass der Fokus der Teilnehmer auf Themen liegt, welche das Zusammenspiel der einzelnen Systemkomponenten betrifft. Insbesondere Themen in Zusammenhang mit der Steuer- / Regelstrategie der hydraulischen Anlage werden stark gewichtet.

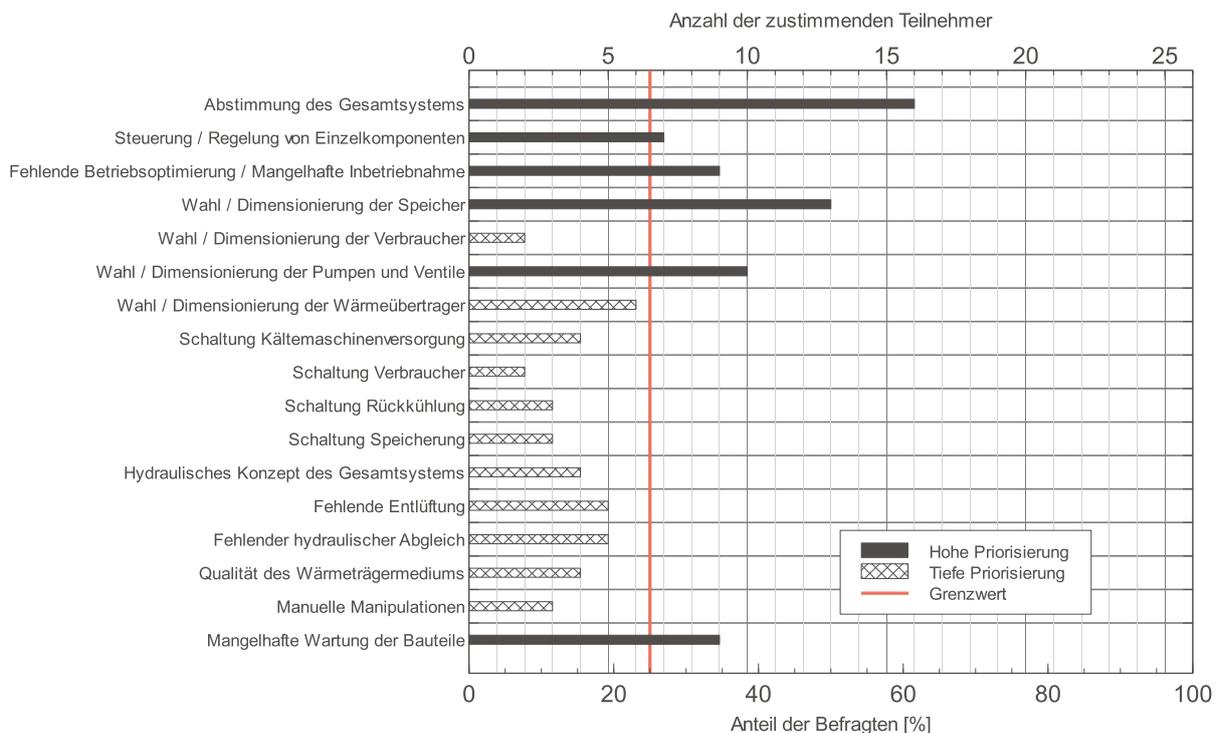


Bild 2: Priorisierung der Themen durch die Umfrageteilnehmer, unterteilt in hohe und tiefe Priorisierung, bezogen auf den Grenzwert (mehr als sechs zustimmende Teilnehmer).

## Abstimmung des Gesamtsystems

Als häufigstes Problem wurde eine mangelhafte regelungstechnische Abstimmung zwischen Erzeuger und Verbraucher angeführt. Damit zusammenhängend wurden häufig unzureichende Führungsgrössen für die Maschinensteuerung erwähnt. So werden zum Beispiel Leistungserhöhungen durch das übergeordnete Gesamtsystem gefordert, welche auf Grund der Trägheit der Maschinen nicht umgesetzt werden können. Einzelne Anmerkungen deuten darauf hin, dass hydraulische Konzepte teilweise zu kompliziert geplant werden und daher steuerungs- / regelungstechnisch nicht korrekt umgesetzt werden können.

Die eindeutige Identifizierung der Fehlerquelle ist jedoch oft problematisch, da teilweise konzeptionelle Mängel in der Dimensionierung von Bauteilen mit Hilfe einer Anpassung in der Steuerung / Regelung korrigiert werden. Dies ist oft mit weniger Aufwand verbunden, kann aber unter Umständen die vorhandenen Probleme nicht komplett kompensieren, was eine eindeutige Zuweisung der Fehlerquelle oft schwierig gestaltet. Dies kann mitunter ein Grund sein, weshalb das Augenmerk vieler Teilnehmer stark auf dem Thema der Steuerung / Regelung liegt.

Die Ursache dieser Probleme können oft auf mangelndes fachübergreifendes Know-how zurückgeführt werden. Zudem wird gemäss den Umfrageteilnehmern die fachübergreifende Zusammenarbeit vernachlässigt. Dies legt nahe, die Kommunikation zwischen Planungsinstanz und Steuerungs- / Regelungstechniker zu intensivieren. Durch die Förderung von fachübergreifendem Wissen kann dies erleichtert werden. Unterstützend sollten klar definierte Abläufe erarbeitet werden, welche die Anforderungen an die Schnittstellen sowie die Zuständigkeiten genau definieren.

## Betriebsoptimierung und Inbetriebnahme

Ein weiterer Schwerpunkt sind Probleme bei der Inbetriebnahme und / oder der Betriebsoptimierung. Durch eine mangelhafte Inbetriebnahme und / oder fehlende Betriebsoptimierung werden Probleme im Betrieb der Anlage nicht erkannt - können also auch nicht behoben werden. Dies bedeutet, dass Fehler und Mängel, die z.B. durch mangelhafte Abstimmung zwischen Erzeuger und Verbraucher verursacht werden, durch eine korrekte Inbetriebnahme und eine gründliche Betriebsoptimierung früh erkannt und vermieden werden könnten. Jedoch ist eine Betriebsoptimierung oder eine gründliche Inbetriebnahme immer mit Kosten verbunden. Zudem setzt eine versierte Betriebsoptimierung, welche nicht bloss die Effizienz der Maschine beurteilt, sondern auch Ursachen und geeignete Massnahmen definiert, ein tiefes und umfassendes Fachwissen voraus und ist mit grossem Aufwand verbunden.

Bei den Betreibern und Investoren fehlt jedoch das Bewusstsein, dass Betriebsoptimierungen für einen möglichst effizienten Betrieb nötig sind. Investitionen für Betriebsoptimierungen werden daher oft hinterfragt. Weiter erschwerend ist, dass Einsparungen im Voraus nur schwer beziffert werden können. Dadurch ist die Argumentation für Investitionen in Betriebsoptimierungen oft schwierig, da diese mit einem finanziellen Risiko verbunden sind und ggf. nicht amortisiert werden können. Weiter fehlen finanzielle Anreize für Betriebsoptimierungen, da die Betriebskosten (elektrische Energie) im Vergleich zu den Investitionen in Betriebsoptimierungen sehr gering sind. Die Anreize fehlen zudem gänzlich, wenn der Maschinenbetreiber die

Energiekosten nicht selber trägt<sup>2</sup>. Durch die fehlende Investitionsbereitschaft der Betreiber/Investoren fehlt auch der Anreiz bei Unternehmer und Planer Betriebsoptimierungen vorzusehen. Zudem werden Betriebsoptimierungen in der Offerte ggf. nicht vorgesehen um die Konkurrenzfähigkeit zu wahren.

Ein weiteres Problem besteht darin, dass die Zuständigkeiten für die Begleitung der Betreiber bei der Bewirtschaftung nicht klar definiert ist. Es wird häufig bemängelt, dass die Betreiber dadurch nicht ausreichend über nötige Massnahmen (Betriebsoptimierung / Wartung) aufgeklärt werden.

## **Klimakälteanlagen**

Neben konkreten Problemen wurde eine Erhebung zu unterschiedlichen Fehlerhäufigkeiten bei verschiedenen Anwendungen vorgenommen. Das Teilnehmerfeld ist sich fast einstimmig einig, dass die Fehlerhaftigkeit bei Klimakälteanwendungen grösser ist, als bei Industrie- oder Gewerbeanwendungen.

Die Gründe sind primär in der komplexeren Dimensionierung der Anlagen zu suchen, denn bei Klimakälteanwendungen sind die benötigten Lasten oft schwieriger zu definieren als im Industrieresektor. Als weiterer Grund für die öfter auftretenden Fehler wird das Know-how der beteiligten Akteure im Klimakältebereich erwähnt. Ausschlaggebend ist hierbei vor allem die Erfahrung in der Planung von Kälteanlagen.

Fehler im Klimakomfortbereich sind zudem meist gutmütiger. Benutzer der klimatisierten Räume (z.B. Büroräume) fordern selten, dass das Temperaturniveau strikt gehalten werden muss. Dementsprechend werden Fehler kaum bemerkt und nicht korrigiert.

## **Schlussfolgerungen aus der Marktbefragung**

Die Resultate der Marktbefragung zeigen, dass Probleme oder deren Ursachen nicht erkannt werden und dadurch keine Optimierungen stattfinden. Damit Probleme gar nicht erst entstehen, sollte die Kompetenz im Bereich der Kälteanlagen erhöht werden. Im Fokus muss dabei fachübergreifendes Wissen stehen, welches Schnittstellenkompetenz fördert. Dies könnte mit einem geeigneten Schulungsmodell erreicht werden.

Um Fehler im Betrieb zu erkennen, müsste eine einheitliche Definition des Umfangs sowie der Zuständigkeiten für eine sachkundige Inbetriebnahme und eine gründliche Betriebsoptimierung definiert werden. Wird diese durch alle Akteure konsequent umgesetzt, können dafür nötigen Investitionen begründet und eingefordert werden.

Um Probleme und dessen Ursachen besser zu erkennen, ist ein Bewertungssystem sinnvoll, welches nicht nur die Kältemaschine, sondern auch andere Teilsystem in der Kälteverteilung beurteilt. Die Interpretation des Systems müsste zudem durch Laien durchführbar sein. Denn nur wenn auch fachfremde Personen Probleme erkennen, können diese schnell registriert und behoben werden. Dies hilft insbesondere die Betreiber und auch die Investoren für den Zustand ihrer Anlagen zu sensibilisieren.

<sup>2</sup> z.B. wenn die Betriebskosten an Nutzer abgewälzt werden können, was häufig in Klimakälteanwendungen der Fall ist.

## Exergie-Ansatz zur Beurteilung der Effizienz von Klimakälteanlagen

Für eine einheitliche Bewertung von Klimakälteanlagen soll ein Effizienzbewertungstool entwickelt werden, welches breit zum Einsatz kommen kann. Dafür muss einerseits die Umsetzung kostengünstig möglich sein und andererseits müssen die Resultate ohne Fachkenntnisse interpretiert werden können. Es sollten keine Fachkräfte erforderlich sein, um feststellen zu können, ob bei einer Anlage Handlungsbedarf besteht. Erst nach Indikation durch das Betriebspersonal werden Fachleute zur Optimierung oder Fehlerbehebung herbeigezogen. Gegebenenfalls wird bei der Genauigkeit bewusst ein Kompromiss eingegangen.

Die beschriebenen Erkenntnisse aus den Untersuchungen bezüglich hydraulischer Einbindung der Kälteanlagen haben aufgezeigt, dass eine alleinige Betrachtung der Kältemaschine nicht ausreicht, um die Effizienz der ganzen Anlage zu quantifizieren, da Wechselwirkungen zwischen einzelnen Teilsystemen bestehen. Um den Energiebedarf von kältetechnischen Anlagen zu reduzieren, ist es in einem ersten Schritt unerlässlich, durch Messungen den Betriebszustand zu erfassen und das Optimierungspotential ausfindig zu machen. Um dies zu realisieren, wurde ein Konzept für die Effizienzbewertung auf Basis von normierten Kennzahlen entwickelt [2] und fortlaufend optimiert, welches eine Bewertung einzelner Untersysteme in Klimakälteanlagen zulässt. Es basiert auf einer exergetischen Betrachtungsweise und liefert Resultate, die ohne Fachkenntnisse interpretiert werden können.

## Theoretische Grundlagen

Die Arbeitstemperaturen sind ein wichtiges Merkmal des Anlagenzustandes. Mängel äussern sich oft in einer Verschiebung des Temperaturniveaus, verursacht entweder durch Mischung in der Hydraulik, durch schlechte Wärmeübergänge in den Wärmeübertragern oder einer ungünstigen Regelstrategie. Eine Anlage kann aber auch schlicht mit ungünstigen Sollwerten betrieben werden. Bei einer rein energetischen Bewertung, typischerweise mit dem Coefficient of Performance (COP) [3], dem Energy Efficiency Ratio (EER) [4] oder der Jahresarbeitszahl (JAZ), wird das Temperaturniveau nicht direkt mitberücksichtigt. Ein wichtiger Indikator fliesst somit nur untergeordnet in die Effizienzbewertung ein. Dies kann jedoch mit einem Exergieansatz realisiert werden.

Exergieanalysen wurden bereits bei verschiedene Anwendungen in der Gebäudetechnik durchgeführt, z.B. für Wärmepumpen [5], Kältemaschinen [6] und in der Photovoltaik [7]. Exergie ist definiert als der unbeschränkt umwandelbare Anteil der Energie, welche aus einer beliebigen Energieform bei reversibler, d.h. verlustfreier Wechselwirkung mit einer definierten Referenzumgebung gewinnbar ist [8]. In anderen Worten ist die Exergie ein Mass für die Arbeitsfähigkeit der Energie und stellt das Gegenstück zum nicht nutzbaren Anteil, der Anergie, dar. Mechanische Arbeit und elektrische Energie sind per Definition vollständig in andere Energieformen umwandelbar und sind deshalb reine Exergie. Bei der Energie von Stoffströmen und Wärmeenergie ist die Umwandelbarkeit begrenzt. Wärme enthält nur einen gewissen Anteil hochwertige Energie, welche im Idealfall, d.h. in einem reversiblen Carnot-Prozess, vollständig in Arbeit umgewandelt werden kann (2. Hauptsatz der Thermodynamik). Die Exergie ist im Vergleich zur Energie keine konservative Grösse, d.h. in realen irreversiblen Prozessen wird die Energie entwertet bzw. tritt ein Exergieverlust auf. Mit dem Transport von Wärme erfolgt dementsprechend auch ein Transport von Exergie, wobei ein Bedarf an Wärme zwangsläufig auch mit einem Bedarf an Exergie einhergeht. Durch die Bewertung der Exergie wird gegenüber der

rein energetischen Betrachtung ein zusätzlicher Aspekt, die Qualität der Wärme, berücksichtigt. Die Beurteilung wird auf diese Weise strenger. Ein exergetisch günstiges System arbeitet zwangsläufig auch energetisch gut.

Zur Veranschaulichung der Thematik wird die thermische Exergie  $\dot{E}_{therm}$  betrachtet, welche wie folgt definiert ist [9]:

$$\dot{E}_{therm} = \dot{Q} \cdot \left(1 - \frac{T_U}{T_i}\right) = \dot{Q} \cdot \eta_c$$

wobei  $\dot{Q}$  einen Wärmestrom,  $T_U$  die Temperatur der Referenzumgebung und  $T_i$  das Temperaturniveau des Wärmestroms darstellt. Der letztere Term entspricht dem Carnot Wirkungsgrad  $\eta_c$ . Die Exergie von Stoffströmen kann prinzipiell gleich beschrieben werden, wobei dann das logarithmische Mittel der ein- und ausgehenden Temperaturen über die Systemgrenze für  $T_i$  verwendet werden muss. Bei Exergieanalysen ist die Definition der Referenzumgebung entscheidend, um zuverlässige Auswertungen durchführen zu können. In [10] wurden verschiedene mögliche Varianten überprüft, wobei die aktuell herrschende Umgebungstemperatur als beste Option angesehen wird. Dementsprechend wird dies in der vorliegenden Arbeit adaptiert. Des Weiteren hat der Exergiestrom die Eigenschaft seine Flussrichtung in Bezug zum Wärmestrom in Abhängigkeit des Temperaturniveaus zu ändern. Ist  $T_i > T_U$  so wird der Carnot-Faktor positiv und der Exergiefluss hat die gleiche Strömungsrichtung wie der Wärmestrom. Jedoch hat der Exergiestrom die entgegengesetzte Flussrichtung, wenn  $T_i < T_U$ . Mit anderen Worten fließt die thermische Exergie immer zur Referenzumgebung. Shukuya beschreibt dies als warme und kalte Exergie, in Abhängigkeit ob das Temperaturniveau höher oder tiefer liegt wie die Referenz [11].

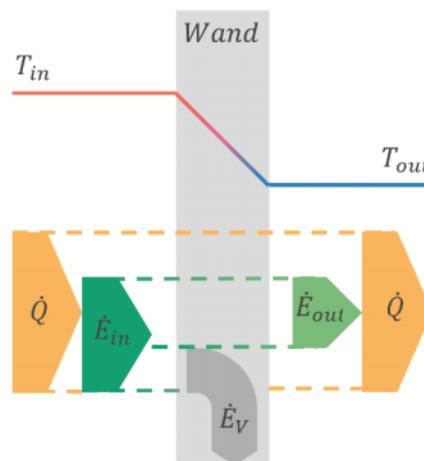


Bild 3: Schematische Darstellung des Wärmetransfers durch eine ebene Wand mit dem Energie- und Exergiefluss sowie dem Temperaturverlauf

In Bild 3 wird der Wärmetransfer durch eine ebene Wand betrachtet, wobei der Energie- und Exergiefluss sowie das Temperaturniveau exemplarisch dargestellt sind. Die Temperaturen  $T_{in}$  und  $T_{out}$  seien grösser als die Referenztemperatur  $T_U$ . Der nutzbare Teil des Wärmestromes, der Exergiestrom  $\dot{E}_{in}$  bei Temperaturniveau  $T_{in}$ , wird im Verlauf durch die Wand aufgrund des

Temperaturgradienten verringert oder in anderen Worten wird durch die Reduktion des thermodynamischen Potentials Exergie zerstört ( $\dot{E}_V$ ). Der resultierende ausgehende Exergiestrom  $\dot{E}_{out}$  bei Temperaturniveau  $T_{out}$  ist somit kleiner und die Arbeitsfähigkeit der Energie ist reduziert. Da Exergie keine Erhaltungsgrösse ist, muss bei deren Bilanzierung der Exergieverlust  $\dot{E}_V$  berücksichtigt werden. Dieser lässt sich folglich mit einer stationären Exergiebilanz der zu- und abgeführten Exergie bestimmen:

$$\dot{E}_V = \dot{E}_{in} - \dot{E}_{out}$$

Die Quantifizierung dieser Verluste liefert die Grundlage für eine zielgerichtete Effizienzanalyse, da dadurch verschiedene Aspekte der Energienutzung beleuchtet werden. In Klimakälteanlagenanlagen können somit die Exergieströme durch das gesamte System von der eingehenden elektrischen Energie des Kompressors und Nebenaggregate bis hin zur Kühlstelle verfolgt und der Standort sowie die Größenordnung der Verluste in jedem Teilsystem identifiziert werden. Darüber hinaus kann der Energietransport in den Sekundärseiten bewertet werden. Eine geringere Menge an Exergie im Teilsystem der Kälteverteilung resultiert beispielsweise in einem erhöhten Durchfluss um die gewünschte Menge Exergie an die Kühlstellen zu liefern, was zu einem erhöhten Pumpenenergieverbrauch führt. Aus diesem Grund ist der Exergieansatz auch für Systemoptimierungen sinnvoll. Daher werden exergetische Untersuchungen oft auch in Kombination mit Pinch-Analysen für Prozessoptimierungen angewandt [12].

## Systemstrukturierung

In der entwickelten exergetischen Effizienzbewertung wird die gesamte Klimakälteanlage in folgende Teilsysteme strukturiert, um eine detaillierte Bewertung zu ermöglichen:

- Rückkühlung (RK)
- Kältemaschine (KM)
- Kältespeicherung und Transport (KST)
- Kühlstellen (KS)

Eine ähnliche Strukturierung findet man in [13] und [14]. Zu dieser Einteilung führten zudem Überlegungen zur Kennzahlenbildung sowie die Erprobung an R&I-Schemen bestehender Anlagen. Zusätzliche Teilsysteme wie Freecooling oder Wärmenutzung sind ebenfalls integrierbar, werden jedoch im vorliegenden Bericht nicht diskutiert. Bild 4 zeigt ein verallgemeinertes Schema einer typischen Klimakälteanlage mit den Teilsystemen sowie den einzelnen Komponenten und Exergieströmen. Es ist anzumerken, dass das Teilsystem RK immer über der Referenztemperatur liegt und die Exergie daher in die gleiche Richtung wie der abgegebene Wärmestrom des Kondensators fliesst (warme Exergie). Das Gegenteil ist der Fall bei den Teilsystemen KST und KS, welche im Normalfall unter der Referenztemperatur liegen (Sommerbetrieb). Die Exergie fliesst entgegengesetzt der aufgenommenen Wärme im Verdampfer (kalte Exergie).

Es kommt oft vor, dass mehrere Kältemaschinen parallel in eine Anlage eingebunden sind. Entsprechend gibt es mehrere KM-Teilsysteme, so dass jede Maschine einzeln bewertet werden kann. Allfällige Beimischschaltungen sowie Umwälzpumpen werden den angrenzenden Teilsystemen RK und KST zugeordnet. Ähnliches gilt für die Kühlstellen, welche ebenfalls individuell bewertet werden und enthalten weder Pumpen noch Beimischungen. Dies ermöglicht die

Bewertung des Temperaturniveaus, bei welchem die Kühlstelle betrieben wird, welche im Inneren des KS-Systems nicht zugänglich wäre. Die Teilsysteme RK und KST kommen in der Regel nur einmal pro Anlage vor und nehmen die Exergien sämtlicher KM-Systeme auf bzw. versorgen sämtliche KS-Systeme.

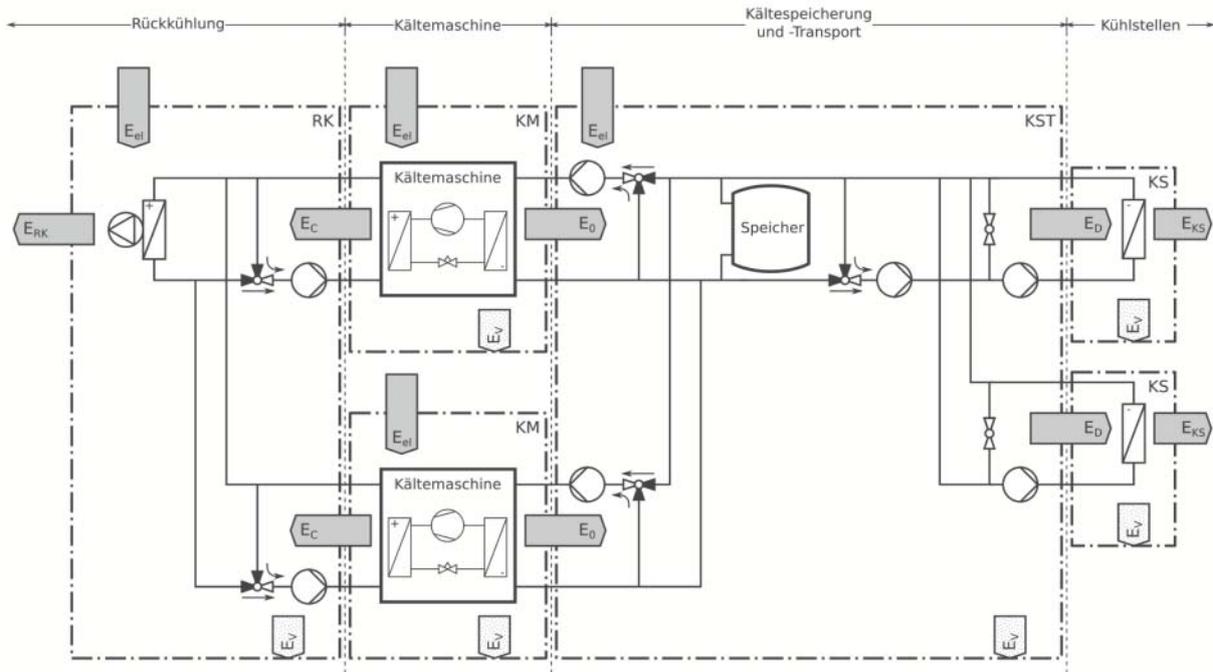


Bild 4: Verallgemeinertes Schema einer typischen Klimakälteanlage und die Aufteilung in Teilsysteme. Die hydraulische Schaltung soll nicht die optimale Einbindung darstellen, sondern die Zuordnung von Nebenaggregaten zu den Teilsystemen veranschaulichen.

Durch das Ziehen von Systemgrenzen ist auch die Feinheit der Bewertung definiert. Beim Festlegen der Systemgrenzen im Schema einer realen Anlage sind gewisse Freiheiten erlaubt, wenn man Teile bewusst aus der Bewertung ausschliessen möchte. Es ist jedoch darauf zu achten, dass alle Exergieströme messtechnisch erfasst sind, welche die Systemgrenze der auszuwertenden Teilsysteme überschreiten. Es muss stets möglich sein, die vollständige Exergiebilanz eines Teilsystems aufzustellen. Weiter ist darauf zu achten, dass sich zwischen zwei Teilsystemen die untereinander Exergie austauschen keine weiteren Komponenten befinden. Beispielsweise müssen Verteilleitungen mit Abgängen, T-Verbindungen, 3-Weg Ventilen etc. vollständig einem Teilsystem zugeordnet sein. Während Verteilleitungen bei energetischen Betrachtungen kaum eine Rolle spielen, können in ihnen exergetische Verluste (etwa durch Mischvorgänge) auftreten, die unbedingt zu erfassen sind.

## Kennzahlenbildung

Die Grundlage für einen systematischen Ansatz zur Kennzahlenbildung ist eine Bilanz der Exergieströme über die Systemgrenzen. Diese können danach in geeigneter Weise zueinander in Bezug gesetzt werden, woraus verschiedene Aspekte eines Systems bewertet werden können. Die Kennzahlen basieren auf der Bildung des exergetischen Wirkungsgrades, welcher im Allgemeinen das Verhältnis zwischen exergetischem Nutzen (ausgehender Exergiestrom) zu Aufwand (eingehender Exergiestrom) darstellt und wie folgt definiert ist [9]:

$$\eta_{ex} = \frac{\dot{E}_{aus}}{\dot{E}_{ein}} = 1 - \frac{\dot{E}_V}{\dot{E}_{ein}}$$

wobei  $\dot{E}_{aus}$  den ausgehenden und  $\dot{E}_{ein}$  den eingehenden Exergiestrom über die Systemgrenzen darstellt. Der Wirkungsgrad wird 1, wenn ein reversibler Prozess untersucht wird und 0, wenn die Energie komplett entwertet wird. Der exergetische Wirkungsgrad lässt somit ein relativer Vergleich unterschiedlicher Systeme zu.

Ein absoluter Vergleich der Effizienz ist jedoch schwierig, da sich der exergetische Wirkungsgrad auf das thermodynamische Optimum bezieht. Untersucht man z.B. zwei Kälteanlagen A und B mit den exergetischen Wirkungsgraden  $\eta_{ex,A} = 0.3$  und  $\eta_{ex,B} = 0.4$ , so ist sofort klar, dass Anlage B effizienter als Anlage A ist. Es ist jedoch nicht bekannt, ob die Kälteanlage B im Vergleich zum Stand der Technik weiteres Optimierungspotential aufweist, was mehr Praxisrelevanz hat. Um dieses Problem zu lösen wird die Bildung einer Kennzahl  $\zeta$  (Exergy Efficiency Ratio) vorgeschlagen, welche wie folgt definiert wird:

$$\zeta = \frac{\eta_{ex}}{\eta_{ex}^*} = \frac{\frac{\dot{E}_{aus}}{\dot{E}_{ein}}}{\frac{\dot{E}_{aus}}{\dot{E}_{ein}^*}} = \frac{\dot{E}_{ein}^*}{\dot{E}_{ein}}$$

wobei  $\eta_{ex}$  den effektiven exergetischen Wirkungsgrad anhand Messungen und  $\eta_{ex}^*$  einen Referenzwirkungsgrad anhand technischer Normen und Standards darstellt.  $\dot{E}_{ein}^*$  beschreibt dementsprechend den technisch idealen exergetischen Aufwand im System. Für erste Untersuchungen wurden folgende Normen herbeigezogen:

- SIA 382/1 (Lüftungs- und Klimaanlage - Allgemeine Grundlagen und Anforderungen) [15]
- VDMA 24247-8 (Energieeffizienz von Klimakälteanlagen. Teil 8: Komponenten - Wärmeübertrager) [16]
- SWKI 2003-3 (Rückkühlung) [17]

Die Effizienzbewertung basiert somit auf dem Verhältnis des effektiven zum technisch idealen Aufwand gemäss Normen, wobei der gleiche Nutzen erzielt werden soll. Die Bewertung eines Teilsystems erfolgt unter der Annahme, dass sich die benachbarten Teilsysteme gleich verhalten und somit die Kennzahl angibt, wie sich das reale System im Vergleich zum Referenzsystem in genau der gleichen Situation verhalten würde.

Zudem soll die Auswertung der Kennzahlen über einen sinnvollen Zeitraum geschehen, da Momentaufnahmen nicht zwingend aussagekräftig sind. Da bei Klimakälteanlagen die Kühllast typischerweise einem Tagesrhythmus folgt, ist es naheliegend die Kennzahlen tageweise auszuwerten. So werden auch zeitlich versetzt auftretende Exergieströme (z.B. in Speichern) korrekt miteinbezogen. Dementsprechend werden die anhand Messdaten berechneten Exergieströme über den vorhandenen Messintervallen numerisch integriert und die resultierenden Exergien über den ganzen Tag aufsummiert:

$$\zeta = \frac{\sum_{t=0h}^{24h} E_{ein}^*}{\sum_{t=0h}^{24h} E_{ein}}$$

Durch die Normierung des exergetischen Wirkungsgrades wird die Interpretation der Resultate stark vereinfacht (siehe Bild 5a). Ein Wert von 1 ist mit gutem Engineering erreichbar. Wird die Kennzahl grösser 1 werden die technischen Mindestanforderungen übertroffen und ein Wert kleiner 1 deutet auf Verbesserungspotential hin bzw. die Möglichkeiten der eingesetzten Technologie wird nicht voll ausgeschöpft. Dies liefert die Grundlage, weitere Abstufungen anhand Grenzwerten für die Anlagenbewertung zu definieren, z.B. optimaler, zulässiger und unzureichender Betrieb (siehe Bild 5b).

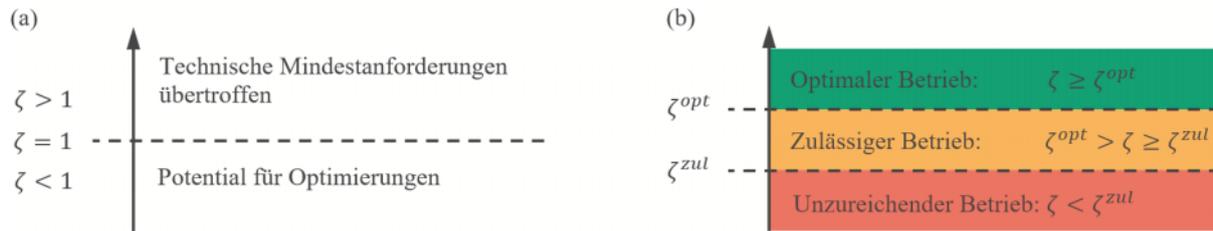


Bild 5: Kennzahl  $\zeta$  mit (a) einer grundlegenden und (b) einer erweiterten Bewertung mit mehreren Grenzen und Betriebszuständen.

## Anwendungsbeispiel

Eine erste Anwendung des Beurteilungssystems mit einer grundlegende Auswertung wurde anhand Messdaten einer Kälteanlage mit Reinraumkonditionierung und Büroräumkonditionierung durchgeführt. Folgend wird die Berechnung der Kennzahl und deren Auswertung am Beispiel des Teilsystems Rückkühlung (RK) aufgezeigt. Gemäss Bild 6 wird dem Teilsystem RK Exergie über den Verflüssiger, die Umwälzpumpe und den Rückkühlventilator zugeführt.

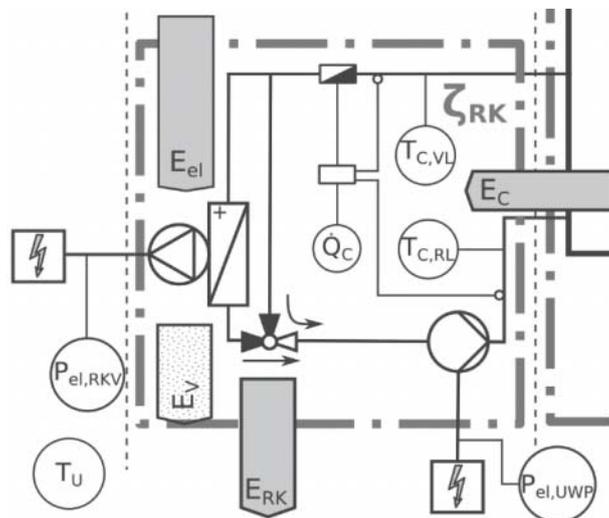


Bild 6: Relevante Messstellen und Exergieflüsse des Teilsystems Rückkühlung.

Die Kennzahl  $\zeta_{RK}$  der Rückkühlung wird dementsprechend wie folgt berechnet:

$$\zeta_{RK} = \frac{\sum_{t=0h}^{24h} (E_C^* + E_{el}^*)}{\sum_{t=0h}^{24h} (E_C + E_{el})}$$

Der Exergiebeitrag des Verflüssigers  $E_C$  ist:

$$E_C = Q_C \left( 1 - \frac{T_U}{T_C} \right)$$

mit der logarithmischen Mitteltemperatur  $T_C$ :

$$T_C = \frac{T_{C,VL} - T_{C,RL}}{\ln \left( \frac{T_{C,VL}}{T_{C,RL}} \right)}$$

wobei  $T_{C,VL}$  der Vorlauf- und  $T_{C,RL}$  der Rücklauf-temperatur des Verflüssigers entspricht.  $Q_C$  beschreibt die abgegebene Wärme über den Kondensator. Da elektrische Energie reine Exergie darstellt, entspricht der Exergieeintrag durch die Nebenaggregate der aufgewendeten bzw. gemessenen Arbeit der Umwälzpumpe  $W_{UWP}$  und Rückkühlventilator  $W_{RKV}$ :

$$E_{el} = W_{UWP} + W_{RKV}$$

Die Referenzexergie des Verflüssigers  $E_C^*$  wird berechnet nach:

$$E_C^* = Q_C \left( 1 - \frac{T_U}{T_C^*} \right)$$

mit der Referenztemperatur  $T_C^*$  gemäss:

$$T_C^* = T_U + \Delta T_{KGA} + \frac{T_{C,VL} - T_{C,RL}}{2}$$

wobei  $\Delta T_{KGA}$  dem Kühlgrenzabstand in Trockenkühlern, d.h. der Differenz zwischen Wärmeträger-Austrittstemperatur und Luft-Eintrittstemperatur, nach Norm VDMA 24247-8 [16] entspricht (siehe Tab. 1).

	$\Delta T_{KGA}$ [K]
anzustreben	$\leq 6$ K
zulässig	$\leq 8$ K

Tabelle 1: Kühlgrenzabstände für Trockenkühler nach VDMA 24247-8 [16].

Die Referenzexergie der Nebenaggregate ist definiert mit:

$$E_{el}^* = \left( \frac{1}{f_{el,th,RKV}} + \frac{1}{f_{el,th,UWP}} \right) Q_C$$

wobei  $f_{el,th,RKV}$  und  $f_{el,th,UWP}$  thermo-elektrische Leistungsfaktoren gemäss SIA 382/1 [15] darstellen (siehe Tab. 2).

	$f_{el,th}$ [-]
Rückkühlventilator	$\geq 28$
Umwälzpumpe	$\geq 85$

Tabelle 2: Thermo-elektrische Leistungsfaktoren einzelner Komponenten nach SIA 382/1 [15].

Die Berechnung wurde anhand Messdaten im Zeitraum Ende April bis Ende Juni durchgeführt und ist in Bild 7 dargestellt.

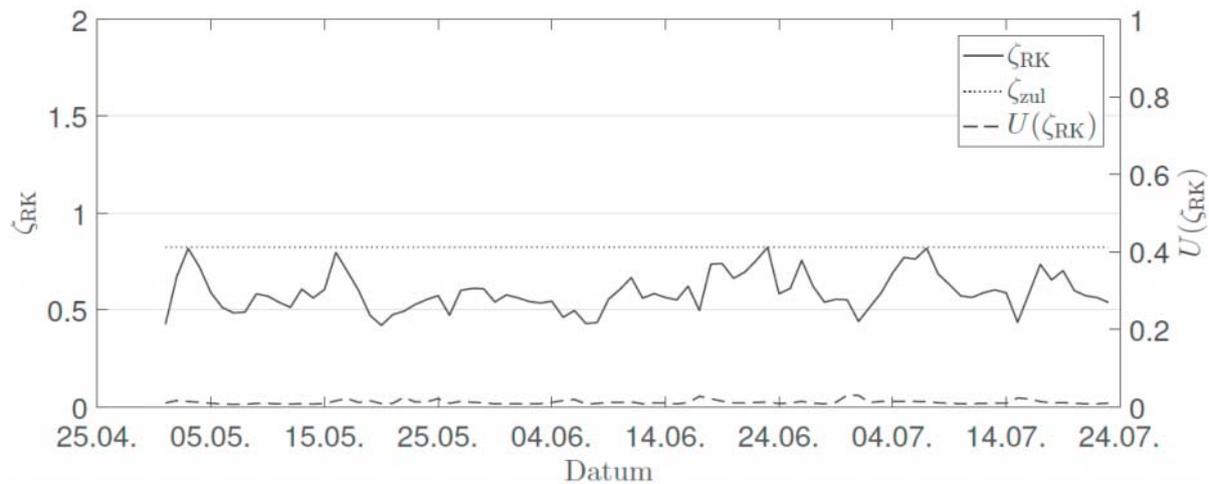


Bild 7: Exergetische Beurteilung des Teilsystems Rückkühlung mit der Kennzahl  $\zeta_{RK}$  und  $\zeta_{zul}$ .

Die Kennzahl streut stark jedoch mit einer konstanten Breite über den gesamten Zeitraum. Sie bleibt stets deutlich unter dem Wert 1, was auf eine erhöhte Rückkühltemperatur zurückzuführen ist. Mögliche Gründe sind eine aktive Hochhaltung durch Beimischung, Rezirkulation der Luft bei den Wärmetauschern oder Verschmutzung derselben. Die gepunktete Linie beschreibt den Verlauf von  $\zeta_{zul}$ , den minimal zulässigen Wert der Kennzahl  $\zeta_{RK}$ . Die Berechnung erfolgte identisch dem beschriebenen Vorgehen, jedoch unter Verwendung des zulässigen Kühlgrenzabstandes gemäss Norm (siehe Tab. 1). Das Rückkühlsystem arbeitet demnach immer unterhalb der zulässigen Grenze und müsste dementsprechend dringend auf mögliche Mängel hin untersucht werden.

Die gestrichelte Linie in Bild 7 beschreibt die Messunsicherheit  $U$  der Kennzahl  $\zeta_{RK}$ . Sie ist stets  $< 0.03$ , was zu einem maximalen relativen Fehler von 6.8% führt. Mit einem durchschnittlichen relativen Fehler von rund 2% ist die Auswertung ausreichend genau für eine Aussage.

## Stand der Arbeiten

Die erste Erprobung des Beurteilungssystems hat gezeigt, dass nicht alle Referenzwerte über Normen bestimmt werden können (z.B. Referenzwert für das Teilsystem der Kältemaschine im Teillastbetrieb). Um die fehlenden Grössen zu erhalten, muss auf thermodynamische Modelle oder repräsentative Feldmessungen von gut laufenden Anlagen zurückgegriffen werden, was aktuell Stand der Arbeit ist. Zudem setzt die Kennzahlenbildung mit dem exergetischen Ansatz

eine grössere Anzahl an Messtellen voraus, als bei einer rein energetischen Betrachtung. Da bei der untersuchten Anlage nicht alle nötigen Messgrössen vorhanden waren, konnten dementsprechend nicht alle vorgesehenen Auswertungen durchgeführt werden. Dies zeigt, dass nicht alle bestehenden Anlagen genügend gut instrumentiert sind, um das Konzept wie beschrieben anzuwenden. Dies lässt die Fragestellung aufkommen, inwiefern sich bestehende Klimakälteanlagen zur Anwendung des Beurteilungssystems eignen. In einem laufenden BFE-Projekt soll daher eine Bestandsaufnahme der Instrumentierung bestehender Anlagen durchgeführt werden. Ziel ist eine Beurteilung, ob sich eine Nachinstrumentierung der Anlagen zur Bildung von Referenzwerten und Anwendung der exergetischen Effizienzbewertung lohnt.

Es wurden 57 Unternehmen kontaktiert und die Teilnahmebereitschaft abgeklärt. Insgesamt 24 Anlagen konnten dadurch bezüglich Instrumentierung begutachtet werden (teils mehrere Anlagen von einem Unternehmen). Dabei wurden sämtliche vorhandenen Messgeräte katalogisiert und eruiert, welche Messinstrumente für eine Auswertung fehlen. Die Begutachtung ergab eine grosse Diskrepanz bei der Instrumentierung und der Datenspeicherung. Während einige Anlagen beinahe komplett instrumentiert sind und alle Messwerte aufgezeichnet werden, fehlen bei anderen selbst grundlegende Messinstrumente wie Wärmezähler für die Kälteleistung. Es zeigt sich jedoch, dass Anlagen existieren, bei denen eine exergetische Bewertung gemäss dem ausgearbeiteten Konzept ohne Nachinstrumentierung möglich ist.

## Weiteres Vorgehen

In einem weiteren Schritt wird eine Abschätzung vorgenommen, um den Kostenaufwand der Nachrüstung jeder Anlage zu eruiieren, damit die eine exergetische Beurteilung gemäss Konzept möglich ist. Aus diesen Erkenntnissen lässt sich anschliessend ableiten, ob es finanziell sinnvoll ist bestehende Anlagen für das Beurteilungssystem und die Bildung von Referenzwerten in Betracht zu ziehen.

Gleichzeitig wird die am besten instrumentierte Klimakälteanlage, welche alle nötigen Messgrössen aufzeichnet, auf Basis vorhandener Datensätze & Messdaten nach dem bestehenden Beurteilungssystem ausgewertet (Proof of Concept). Dadurch sollen allfällige Probleme im Vorgehen erkannt und falls möglich erste Referenzwerte gebildet werden.

## Quellen

- [1] St. Rohrer, C. Hablützel, F. Tillenkamp, M. Schneider, Einsparpotential bei der hydraulischen Einbindung von Kältemaschinen. Bundesamt für Energie BFE, 2018
- [2] M. Krütli, C. Hablützel, F. Tillenkamp: Systeme für die Beurteilung der Energieeffizienz von Klimakälteanlagen, IEF Energy Papers, 2016, Vol. 2
- [3] G. Pottker, P. Hrnjak: Experimental investigation of the effect of condenser subcooling in R134a and 300 R1234yf air-conditioning systems with and without internal heat exchanger, International Journal of Refrigeration, 2015, Vol. 50, 104-113.
- [4] H. Fritschi, F. Tillenkamp, R. Löhner, M. Brügger: Efficiency increase in carbon dioxide refrigeration technology with parallel compression, International Journal of Low-Carbon Technologies, 2017, Vol. 12, 171-180.

- [5] L. Gasser, B. Wellig, K. Hilfiker: WEXA: Exergie-Analyse zur Effizienzsteigerung von Luft/Wasser-Wärmepumpen, HSLU, 2008.
- [6] A. Yataganbaba, A. Kilicarslan, I. Kurtbas: Exergy analysis of R1234yf and R1234ze as R134a replacements in a two evaporator vapour compression refrigeration system, International Journal of Refrigeration, 2015, Vol. 60, 26-37.
- [7] S. Dubey, S. Solanki, A. Tiwari: Energy and exergy analysis of PV/T air collectors connected in series, Energy and Buildings, 2009, Vol. 41, 863-870.
- [8] W. Fratzscher, V. M. Brodjanskij, K. Michalek: Exergie, Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 1986.
- [9] H. D. Baehr, S. Kabelac: Thermodynamik, Springer, Berlin Heidelberg, 2012.
- [10] H. Torío, D. Schmidt: Annex 49 final report: Energy Conservation in Buildings and Community Systems (ECBCS) - Low exergy systems for high-performance buildings and communities, Fraunhofer IBP, Stuttgart, 2011.
- [11] M. Shukuya: Exergy: theory and applications in the built environment, Springer, London, 2013.
- [12] M. N. Hamsani, T. G. Walmsley, P. Y. Liew, S. R. Wan Alwi: Combined Pinch and exergy numerical analysis for low temperature heat exchanger network, Energy, 2018, Vol. 153, 100-112.
- [13] J. M. Harrell, J. A. Mathias: Improving efficiency in a campus chilled water system using exergy analysis, ASHRAE Transactions, 2009, Vol. 115, 507–522.
- [14] X. Fang, X. Jin, Z. Du, Y. Wang, W. Shi: Evaluation of the design of chilled water system based on the optimal operation performance of equipments, Applied Thermal Engineering, 2017, Vol. 113, 435–448.
- [15] Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA: Lüftungs- und Klimaanlageanlagen - Allgemeine Grundlagen und Anforderungen, Std. SIA 382/1, 2014.
- [16] Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbauer e.V. VDMA: Energieeffizienz von Klimakälteanlagen. Teil 8: Komponenten - Wärmeübertrager, Std. VDMA 24247-8, 2011.
- [17] Schweizerischer Verein von Wärme- und Klimatechnikern: Richtlinie 2003-3, Rückkühlung, Std. SWKI 2003-3, 2005.



Jonas Schönenberger  
Frigo-Consulting AG  
Konstantin Müller  
EduMedia AG

# CO<sub>2</sub>-Wärmepumpe für Warmwasser und Gebäudeheizung

## Zusammenfassung

*Im Auftrag vom Bundesamt für Energie und dem Amt für Umwelt und Energie des Kantons Basel-Stadt wurde ein Forschungsprojekt über CO<sub>2</sub> (R744)-Wärmepumpen für Warmwasser und Gebäudeheizung durchgeführt. Basierend auf einer Literaturrecherche bisheriger Forschungsaktivitäten über R744-Wärmepumpen, dem Stand der Technik sowie der Transformation der Technologie aus der Kältetechnik, wurden die Grundlagen aufbereitet. Darauf aufbauend wurden eine R407C- und eine R744-Wärmepumpe modelliert und verschiedene Anwendungen für Warmwasser und Gebäudeheizung mit einer totalen Heizleistung von 50 kW energetisch untersucht.*

*Für einen praxisbezogenen energetischen Vergleich solcher Anwendungen ist eine "kombinierte" Betrachtung der aktuell gültigen Normen von Bedeutung. Die Ergebnisse zeigen auf, dass mit der R744-Wärmepumpe je nach Anwendung und Warmwasser-Anteil, eine gleichwertige oder höhere Energieeffizienz erreicht werden kann. Die folgenden Faktoren verschieben die energetischen Vorteile zu Gunsten der R744-Wärmepumpe:*

- *Abnehmende Temperatur-Spreizung der Wärmequelle*
- *Zunehmende Temperatur-Spreizung der Wärmesenke*
- *Bedarf an hohen Vorlauf-Temperaturen und Legionellenprävention*
- *Zunehmender Warmwasser-Anteil am Nutzenergiebedarf*

## Summary

*A research project on CO<sub>2</sub> (R744) heat pumps was commissioned by the Federal Office of Energy and the Office for the Environment and Energy of the Canton of Basel-Stadt. The fundamentals were prepared on a literature review of previous research activities on R744 heat pumps as well as the state of the art and the transformation of technology from refrigeration sector. Based on this, a R407C and an R744 heat pump were modeled and different applications for hot water and facility heating with a total heating capacity of 50 kW energetically investigated.*

*For a practice-related energetic comparison of such applications, a "combined" consideration of the currently applicable standards is of importance. The results show that with the R744 heat pump, depending on the application and hot water content, equal or higher energy efficiency can be achieved. The following factors shift the energy advantages in favor of the R744 heat pump:*

- *Decreasing temperature spread of the heat source*
- *Increasing temperature spread of the heat sink*
- *Need for high usage hot water supply temperatures*
- *Increasing use of warm water content*

## Einleitung

Mitte 19. Jahrhundert taucht R744 (CO<sub>2</sub>) erstmals als Kältemittel auf und gegen Ende desselben Jahrhunderts entwickelt Richard Mollier die erste genaue Dampf-*t*-*s*-Diagramm für R744. In der ersten Hälfte des 20. Jahrhundert wurde R744 durch die sogenannten Sicherheitskältemittel vom Markt verdrängt. Als die FCKW-Ozon-Hypothese 1974 erstmals auftaucht, reagiert die Politik und verabschiedet 1987 das Montreal-Protokoll. Seither nehmen Vorschriften und Verbote für synthetische Kältemittel laufend zu.

Die Erfindung und Publikation über die Hochdruckregelung für transkritische Prozessführung mit R744 durch Gustav Lorentzen (1993) verspricht erstmals eine vergleichbare Kosten- und Energieeffizienz zu herkömmlichen Systemen. Damals schon erkannte Lorentzen das Potenzial von R744 und prophezeit dem Kältemittel eine blühende Zeit voraus. Spätestens seit Anfang des 21. Jahrhunderts, seit der Verjährung der Patentschriften von Gustav Lorentzen, erlebt R744 als Kältemittel insbesondere in der Kältetechnik eine Renaissance. [1, 2]

## Abgrenzung

Im Rahmen dieses Forschungsprojektes wird die Anwendung von R744-Wärmepumpen für die Aufbereitung von Warmwasser, Gebäudeheizung und vor allem die Kombination beider untersucht. Dabei liegt der Fokus, wenn nicht explizit anders erwähnt, auf einer Nenn-Heizleistung von ca. 50 kW. Der Leistungsbereich wird hauptsächlich von den standardmässig verfügbaren Komponenten eingeschränkt und liegt aktuell in der Grössenordnung zwischen 20 kW und 600 kW Nenn-Heizleistung. Wenn nicht anders angegeben, beziehen sich die Ergebnisse dieses Forschungsprojektes auf den Standort Basel. Die Ergebnisse und Tendenzen dieses Forschungsprojekt lassen sich mit der nötigen Vorsicht auf andere Anwendungs-, Leistungsbereiche oder Standorte mit ähnlichen Randbedingungen übertragen.

## Grundlagen Kältemittel

R744 (CO<sub>2</sub>) ist ein farbloses, geruchloses Gas, das bei Normbedingungen mit einer Dichte von 1.98 kg/m<sup>3</sup> schwerer ist als Luft. Es ist weder brennbar noch explosiv und ist chemisch nahezu inaktiv. Mit einem GWP-Wert (Greenhouse Warming Potential) von 1 und einem ODP-Wert (Ozone Depletion Potential) von 0, ist davon auszugehen, dass dem Einsatz von R744 als Kältemittel auch in Zukunft keine Vorschriften und Verbote auferlegt werden. R744 wird heute häufig aus einem Nebenprodukt der chemischen Industrie gewonnen. [4, 5]

## Tripelpunkt

Im Tripelpunkt (auch *Dreiphasenpunkt* genannt) sind alle drei Phasen eines Stoffes im Gleichgewicht. Der Tripelpunkt von R744 liegt bei einer Temperatur von -56.6 °C und einem Druck von 5.18 bar. Liegt die Temperatur oder der Druck unterhalb vom Tripelpunkt (-56.6 °C / 5.18 bar) so tritt R744 nur im festen und gasförmigen Zustand auf. Festes R744 wird auch Trockeneis genannt und hat bei Atmosphärendruck eine Temperatur von -78.5 °C. In Bild 1 stellt der Tripelpunkt das untere Ende der Dampfdruckkurve dar. [4, 5]

## Kritischer Punkt

Der kritische Punkt von R744 liegt bei einer Temperatur von +31 °C und einem Druck von 73.6 bar. Oberhalb dieser Bedingungen gibt es keinen physikalischen Unterschied zwischen der flüssigen und der gasförmigen Phase mehr. Je nach Bedingungen ähnelt das Verhalten einer Flüssigkeit oder einem Gas. Der Übergang vom einen zum anderen Verhalten ist kontinuierlich. In Bild 1 stellt der kritische Punkt das obere Ende der Dampfdruckkurve dar. Zustände über

dem kritischen Punkt werden meist „überkritisch“ oder „transkritisch“ genannt. Umgekehrt werden Zustände unter dem kritischen Punkt meist „unterkritisch“ oder „subkritisch“ genannt. [4, 5]

### Dampfdruckkurve im Druck-Temperatur-Diagramm

In Bild 1 sind Dampfdruckkurven verschiedener Kältemittel im Druck-Temperatur-Diagramm dargestellt. Daraus ist der Tripelpunkt wie auch der kritische Punkt verschiedener Kältemittel ersichtlich. Bei herkömmlicher Prozessführung stellen diese zwei Punkte eine Art Grenze dar. Unter der Annahme, dass in gängigen Kälte- und Wärmepumpen-Anwendungen keine Verdampfungstemperaturen unter  $-56.6\text{ °C}$  gefordert sind, wird der Tripelpunkt von R744 an dieser Stelle vorerst ausser Acht gelassen. Der kritische Punkt von R744 ist hingegen mitten im Temperatur-Bereich gängiger Kälte- und Wärmepumpen-Anwendungen und daher für eine effiziente Prozessführung nicht ausser Acht zu lassen. Um auch im transkritischen Bereich einen effizienten Betrieb zu gewährleisten, wird der Hochdruck mittels eines Regelventils entlang der fortgesetzten, gestrichelten, blauen Kurve geregelt. Weiter geht aus Bild 1 hervor, dass der kritische Punkt anderer Kältemittel über dem Temperatur-Bereich gängiger Kälte- und Wärmepumpen-Anwendungen liegt und somit bislang wenig Beachtung bekam.

Weiter ist ersichtlich, dass R744 hinsichtlich des Druck-Niveaus aus der Reihe tanzt. Folglich werden bei Kälte- und Wärmepumpen-Anwendungen mit R744 einzelne Systemabschnitte meist mit bis zu 130 bar(a) abgesichert. Dies liegt deutlich über dem Absicherungsdruck von herkömmlichen Systemen und erfordert zu Beginn der R744-Renaissance entsprechenden Initialaufwand um die Komponenten mit der erforderlichen Druckbeständigkeit zu entwickeln. Heute lässt sich sagen, dass sämtliche Komponenten in einem Leistungsbereich zwischen 20 kW und 600 kW verfügbar sind.

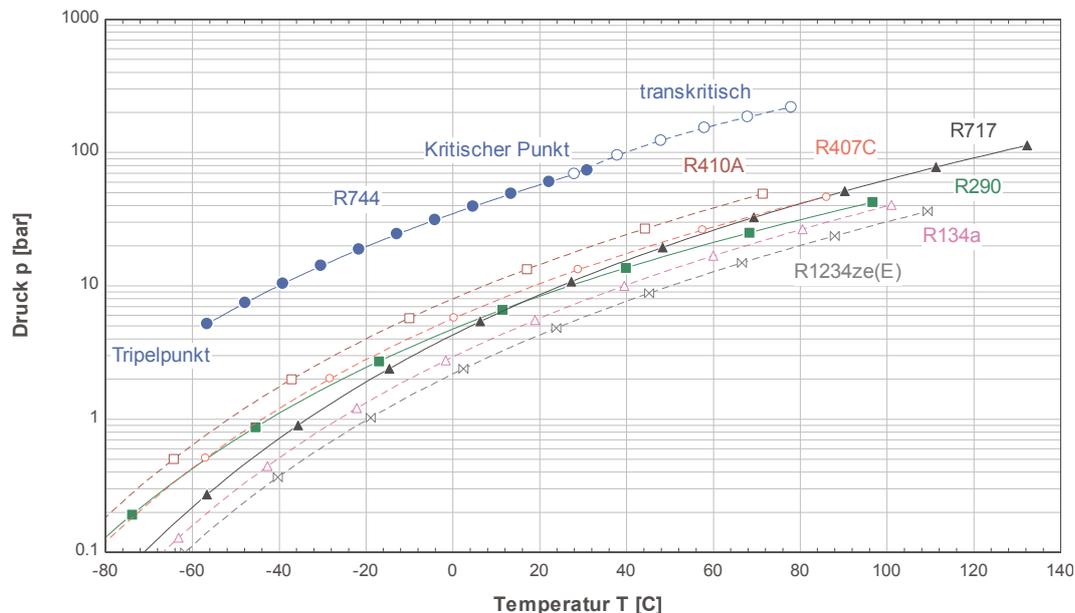


Bild 1: Dampfdruckkurven verschiedener Kältemittel dargestellt im logarithmischen Druck-Temperatur-Diagramm.

### Phasenwechsel verschiedener Kältemittel im Druck-Enthalpie-Diagramm

Das Bild 2 zeigt den Zwei-Phasen-Dom verschiedener Kältemittel im logarithmischen Druck-Enthalpie-Diagramm. Daraus geht hervor, dass die in Betracht gezogenen natürlichen Kältemittel (R744, R717, R290) eine grössere Verdampfungsenthalpie aufweisen als die in Betracht gezogenen synthetischen Kältemittel. Allen voran weist Ammoniak (NH<sub>3</sub>, R717) die grösste Verdampfungsenthalpie auf.

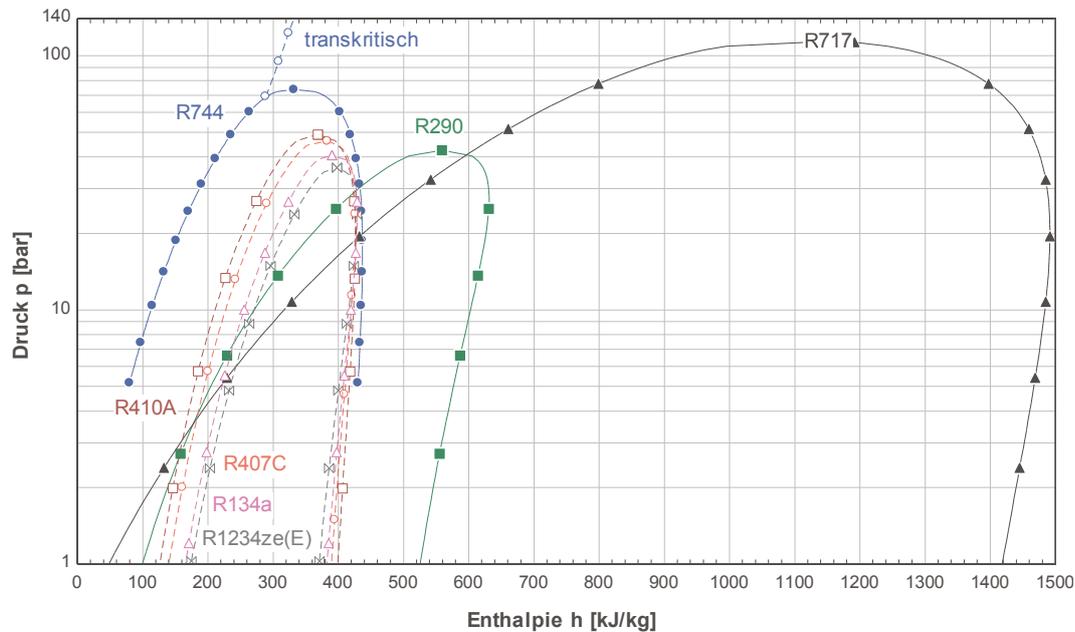


Bild 2: Zwei-Phasen-Dom verschiedener Kältemittel dargestellt im logarithmischen Druck-Enthalpie-Diagramm.

### Volumenbezogene Heizleistung

Aus Bild 3 ist ersichtlich, dass R744 deutlich mehr Energie pro befördertes Volumen enthält. Dies ist unter anderem auf die hohen Drücke und die entsprechend hohe Dichte zurückzuführen.

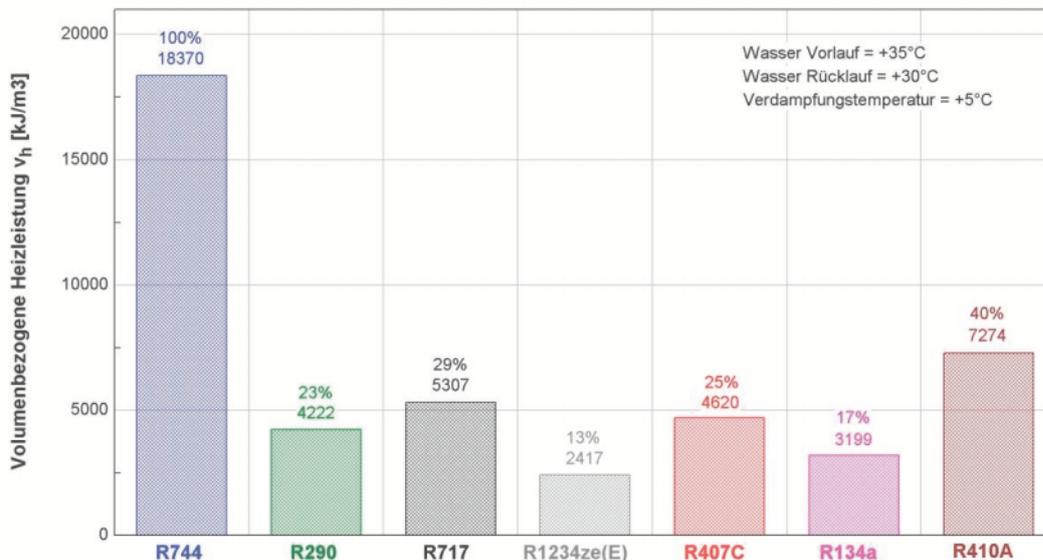


Bild 3: Volumenbezogene Heizleistung verschiedener Kältemittel.

### Sub- und transkritische Enthitzung

Ein wesentlicher Unterschied zwischen R744-Wärmepumpen und solchen mit herkömmlichen Kältemitteln, ist deren Wärmeabgabe an die Wärmesenke. Das Bild 4 zeigt die Wärmeabgabe von R407C und R744 bei zwei verschiedenen Senken-Temperaturen. In der linken Spalte ist R407C und in der rechten Spalte ist R744 dargestellt. Horizontal, pro Zeile wird eine Senken-Temperatur dargestellt. Die Wärmeabgabe vom R407C erfolgt subkritisch. Sie setzt sich zusammen aus Enthitzung, Verflüssigung und Unterkühlung. Dem hingegen erfolgt die Wärmeabgabe von R744 transkritisch. Es findet eine kontinuierliche Enthitzung statt. Dabei tritt kein eigentlicher Phasenwechsel wie bei einer subkritischen Wärmeabgabe auf, die Gas- und Flüssigkeitsphase haben dieselbe Dichte, weshalb keine Phasentrennung stattfindet. Bei hohen Temperaturen verhält sich das Fluid dabei ähnlich wie ein Gas, bei tiefen Temperaturen ähnlich wie eine Flüssigkeit.

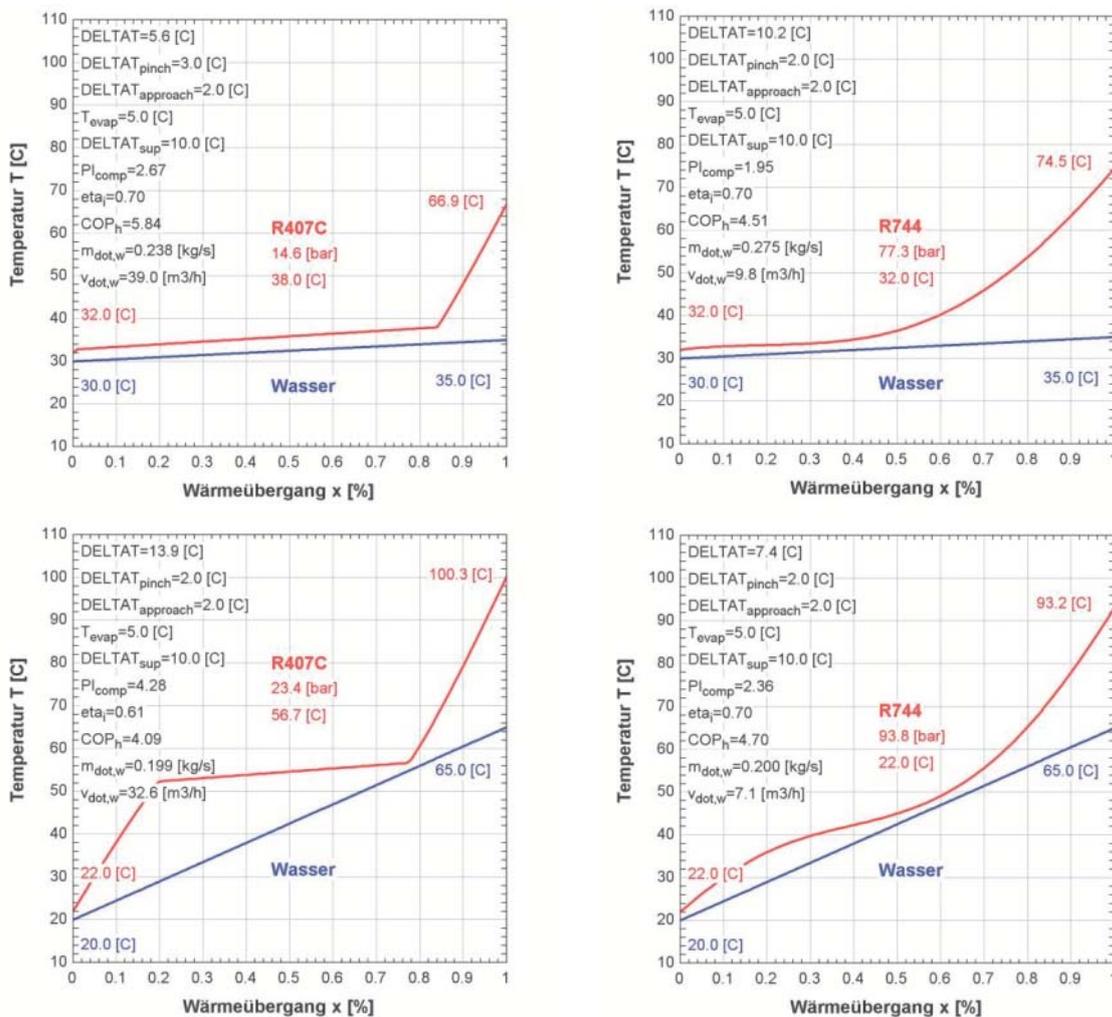


Bild 4: Sub- und transkritische Wärmeabgabe von R407C und R744 bei unterschiedlichen Senken-Temperaturen.

Zusammenfassend betrachtet entspricht die Anwendung von R744 in der Wärmepumpentechnik einem signifikanten technologischen Wandel in der Gebäudetechnikbranche. Dieser technologische Wandel sollte durch eine enge Begleitung mit umfassender Weiterbildungsoffensive durch Bund, Branchenverbände, Hersteller von Wärmepumpen in Zusammenarbeit mit Hochschulen und Berufsschulen gefördert und begleitet werden.

## Entwicklung der R744-Wärmepumpen-Technologie

### Literaturrecherche

Im Rahmen der Literaturrecherche wurden insgesamt 100 international publizierte Forschungsarbeiten über R744-Wärmepumpen im Zeitraum von 2007 bis 2018 untersucht. Daraus konnten insgesamt 41 Arbeiten in den direkten Kontext zur Forschungsarbeit einbezogen werden.

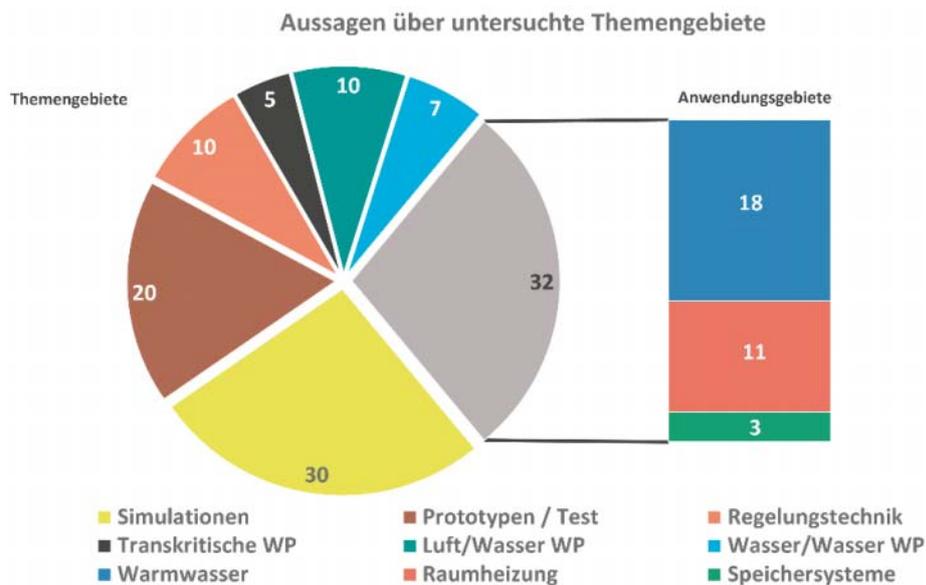


Bild 5: Untersuchte Themengebiete bisheriger Forschungsarbeiten über R744-Wärmepumpen.

Bei der Analyse der erforschten Teilbereiche der R744-Wärmepumpen Technologie fällt auf, dass von insgesamt 114 untersuchten Veröffentlichungen rund 26% theoretische Arbeiten unter Verwendung von mathematischen Simulationen und fast 18% der Untersuchungen mit Prototypen oder Teilen von R744-Wärmepumpen betraf.

Auf dem Kreisdiagramm in Bild 5 zeigt sich mit welchen R744-Wärmepumpen Anwendungsgebieten sich die Arbeiten befassen. Die Produktion von Warmwasser überwiegt die Anwendung für die Raumwärme. Und nur ganz wenige Studien beschäftigten sich mit Speichersystemen.

### Stand der R744-Technologie

Seit Anfang 2000 kommt R744 als Kältemittel vorwiegend in der industriellen sowie gewerblichen Kältetechnik zum Einsatz und gilt in diesen Anwendungen heute als Stand der Technik. Zur Steigerung der Effizienz kommen meist Parallelverdichter in Kombination mit Ejektoren zum Einsatz. Sämtliche Komponenten von Verdichter, Wärmetauscher, Regelventile und Ejektoren sind heute kommerziell verfügbar. Interessant ist die Kosten- und Effizienzentwicklung von R744-Kältesystemen im Retail-Bereich renommierter Schweizer Detailhändler. Im Zeitraum der Jahre 2000 bis 2017 reduzierten sich unter anderem dank der R744-Technologie und dem Einsatz von Ejektoren die Investitionskosten (pro Laufmeter Kühlmöbel) um 35% und die Energiekennzahl (pro Laufmeter Kühlmöbel) um 44%. Die R744-Technologie ist im Retailbereich und Industrieanwendungen deshalb zu einem Standard geworden. Es ist davon auszugehen, dass bis ins Jahr 2020 die Kosten- und Effizienzentwicklungen bis zu knapp etwas über 50% gegenüber dem Jahr 2000 sinken werden. [3]

### **Technologie-Transformation**

R744 als Kältemittel gewinnt in der Kältetechnik laufend an Bedeutung. Darüber hinaus kommt das Kältemittel vermehrt bei sogenannten Integral-Systemen zum Einsatz. Bei diesen steht nebst der bedarfsgerechten Kühlung und Klimatisierung auch die bedarfsgerechte Aufbereitung von Warmwasser und Wärme für die Gebäudeheizung im Fokus. Diese Systeme verfügen meist über einen zusätzlichen Aussenverdampfer und werden als Wärmepumpe betrieben. In anderen Worten werden bereits heute etliche Wärmepumpen mit R744 als Kältemittel betrieben und wertvolle Erfahrungen gesammelt. [3]

### **Normen und Richtlinien**

Sicherheitstechnische, ökologische und energetische Anforderungen an Wärmepumpen werden mittels verschiedenen Normen und Richtlinien geregelt. Je nach Anwendung sind unterschiedliche Normen und Richtlinien in Betracht zu ziehen. Teilweise überschneiden sich die Norminhalte resp. sind verschiedene Normen zu berücksichtigen. Dies gilt insbesondere dann, wenn Wärmepumpen für zwei oder mehrere Anwendungen wie zum Beispiel die Gebäudeheizung und Aufbereitung von Warmwasser eingesetzt werden.

In der Schweiz hat sich das Wärmepumpen Systemmodul für die Planung und Umsetzung von Wärmepumpen für Warmwasser und Gebäudeheizung bis zu einer Heizleistung von 15 kW etabliert und gewährt Transparenz für Entscheidungsträger. Dieses stützt sich unter anderem auf dem Wärmepumpen Gütesiegel der Fachvereinigung Wärmepumpen Schweiz (GWS) und auf den europäischen Prüfnormen EN 14511 und EN 14825. Für die kombinierte, insbesondere simultane Anwendung von Gebäudeheizung und Aufbereitung von Warmwasser existiert aktuell keine spezifische Norm, obschon für einen energetischen Vergleich solcher Anwendungen eine „kombinierte“ Betrachtung der Normen EN 14511 und EN 14825 zwingend erforderlich ist. Bei der alleinigen Betrachtung und Entscheidung basierend auf der einen oder anderen Norm besteht die Gefahr, dass energetisch vorteilhafte Systeme frühzeitig ausgeschlossen werden. Bei R744 ist dies insbesondere dann der Fall, wenn nur die Normbedingungen der Gebäudeheizung, ohne Aufbereitung von Warmwasser berücksichtigt werden. [6, 7, 8]

## Effizienzprognose für Wärmepumpe mit R744 im Vergleich zu R407C

Die Gegenüberstellung der R407C- und R744-Wärmepumpen basiert auf untenstehendem Systemkatalog (siehe Bild 6) für den Standort Basel. Die Klimadaten für den Standort Basel resp. für das Lastprofil wurden mittels Meteonorm 7 generiert [10]. Es wird von einer monoenergetischen Abdeckung des Wärmebedarfs ausgegangen.

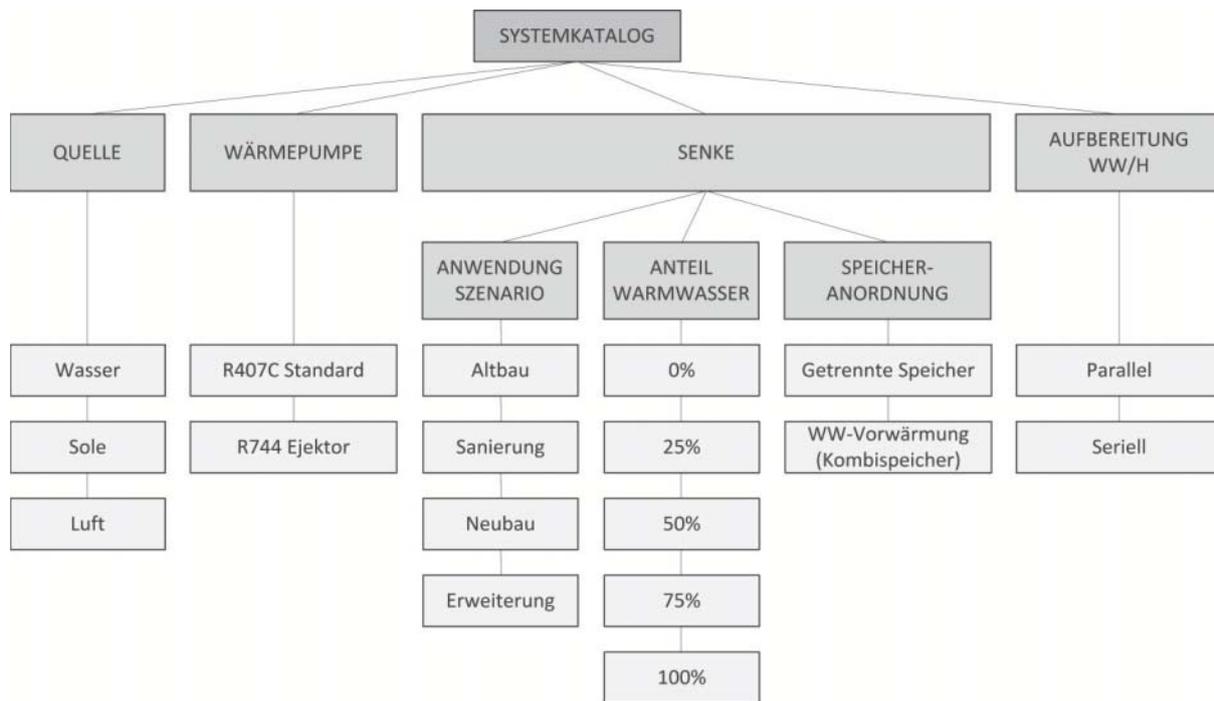


Bild 6: Systemkatalog.

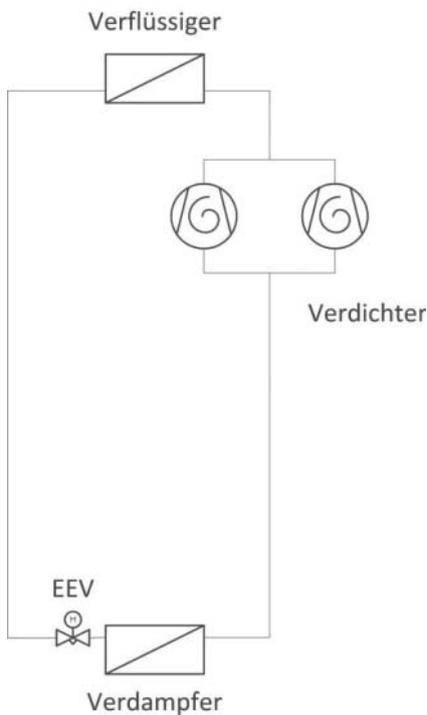
### Quelle

Es werden die drei Wärmequellen Wasser, Sole und Luft untersucht. Bei Wasser wurde über das Jahr eine konstante Temperatur von  $+10^{\circ}\text{C}$  angenommen. Bei der Sole wird basierend auf den Messwerten im Grundwasserbericht 2014, die Temperatur über das Jahr im Bereich von  $+7^{\circ}\text{C}$  bis  $+10^{\circ}\text{C}$  variiert [11]. Bei der Luft wird basierend auf der Meteonorm 7, die Temperatur über das Jahr im Bereich  $-10^{\circ}\text{C}$  bis  $+34^{\circ}\text{C}$  variiert [10]. Basierend auf diesen Annahmen wird für alle drei Quellen ein Temperatur-Profil bestehend aus 8760 Stunden pro Jahr modelliert.

### Wärmepumpe

Die getroffenen Annahmen der R407C Wärmepumpe basieren auf dem Stand der Technik wie sie heute grösstenteils in der Wärmepumpenbranche zum Einsatz kommen. Die Annahmen für die R744-Wärmepumpe wurden aus der Kältetechnik abgeleitet, wie die Technologie dort zum Einsatz kommt. In Bild 7 sind die Prinzipschema der untersuchten und modellierten R407C- und R744-Wasser (Sole)-Wasser Wärmepumpen dargestellt. Mittels mathematischer Modellierung einzelnen Komponenten (siehe Bild 7) und basierend auf den Stoffdaten [12] wird eine Kreisprozessberechnung beider Wärmepumpen im relevanten Anwendungsbereich vollzogen.

R407C Standard



R744 Ejektor

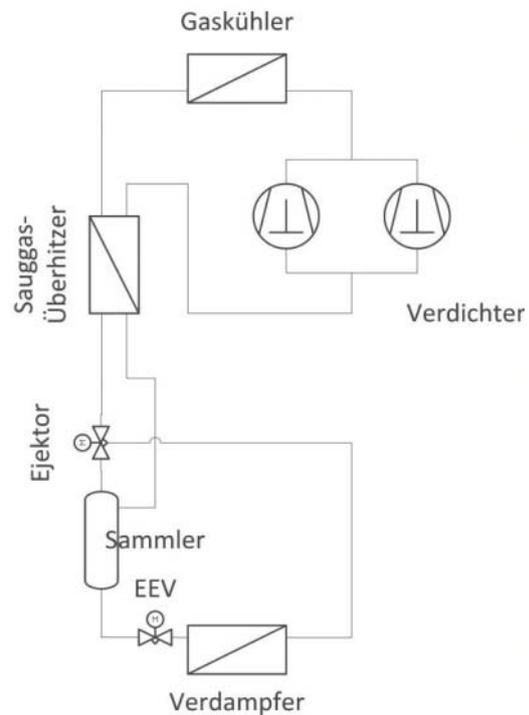


Bild 7: Prinzipschema der R407C- und R744-Wärmepumpe.

### Anwendung/Szenario

Es werden vier verschiedene Szenarien in Betracht gezogen. Die Randbedingungen dieser sind der untenstehenden Tabelle zu entnehmen. Die Randbedingungen wurden in Anlehnung an die aktuell gültigen Normen und Richtlinien definiert [7, 8]. Das Gebäude im Szenario „Neubau“ entspricht dem Stand der Technik und vermag den Heizbedarf mit einer niedrigen Vorlauftemperatur zu decken. Das Gebäude im Szenario „Sanierung“ wurde einer energetischen Sanierung unterzogen (z.B.: Fassade, Fenster) und dessen Heizbedarf kann mit einer intermediären Vorlauftemperatur abgedeckt werden. Das Szenario „Altbau“ geht davon aus, dass keine energetischen Massnahmen am Gebäude unternommen werden und eine mittlere Vorlauftemperatur benötigt wird. Das Szenario „Erweiterung“ geht von einem Gebäude aus, dass mit zwei verschiedenen Temperatur-Niveaus (niedrig, intermediär) beheizt werden kann. Begriffe wie „niedrig“, „intermediär“ oder „mittel“ beziehen sich auf die Norm SN EN 14511-2 [7]. Der Heizbedarf der einzelnen Szenarien wird mittels Heizkurve in Abhängigkeit der Aussentemperatur modelliert.

Anwendung / Szenario	-	-	Neubau	Sanierung	Altbau	Erweiterung
<b>Senke Heizung H</b>						
Temperatur-Niveau	-	-	Niedrig	Intermediär	Mittel	Niedrig/Intermediär
Medium	-	-	Wasser	Wasser	Wasser	Wasser
Heizung Rücklauftemperatur	RL	°C	30.0	40.0	47.0	30.0
Heizung Vorlauftemperatur	VL	°C	35.0	45.0	55.0	45.0

Tabelle 1: Die für die Effizienzuntersuchung herangezogenen Anwendungsszenarien unterscheiden sich in erster Linie auf der Senken-Seite der Heizung.

### Anteil Warmwasser

Basierend auf aktuell gültigen Normen [14] wird ein Zapfprofil mit einer Warmwassertemperatur von +55°C und Frischwassertemperatur von +10°C in ein Lastprofil mit 8760 Stunden pro Jahr umgerechnet. Der jährliche, energetische Warmwasser Anteil wird dabei in 5 Fällen, von 0% bis 100%, in 25% Schritten variiert. Bei 0% Warmwasser-Anteil ist die Last der Wärmepumpe nur vom Heizbedarf des Gebäudes abhängig. Bei 100% Warmwasser-Anteil ist die Last der Wärmepumpe nur vom Warmwasser-Verbrauch abhängig.

### Speicher-Anordnung

Es werden zwei Speicher-Anordnungen untersucht. Bei der einen sind es zwei getrennte Speicher für Warmwasser und Heizung. Bei der anderen ist es ein Kombispeicher, bei welchem eine Warmwasser-Vorwärmung auf dem Temperatur-Niveau der Heizung stattfindet und somit aus Sicht der Wärmepumpe die senkenseitigen Temperatur-Spreizung zunimmt. Die Ermittlung der Wärmepumpen-Rücklauftemperatur basiert auf einem Schichtspeichermodell [13] in Abhängigkeit der definierten Lastprofile (siehe Kapitel „Anwendung/Szenario“ und „Anteil Warmwasser“).

### Aufbereitung Warmwasser/Heizung

Die Aufbereitung von Warmwasser und Heizung kann zeitlich separat (seriell) oder simultan (parallel) erfolgen. Eine parallele Aufbereitung von Warmwasser und Heizung hat aus Sicht der Wärmepumpe eine grössere senkenseitige Temperatur-Spreizung zufolge.

### Ergebnisse

Unabhängig der untersuchten Anwendungen resp. unabhängig von der Temperatur-Spreizung auf der Wärmesenke ist bei R744-Wärmepumpe der Hochdruck mehr oder weniger auf demselben Niveau. In anderen Worten, die Effizienz einer R744-Wärmepumpe hängt im Vergleich zu einer R407C Wärmepumpe kaum von der Temperatur-Spreizung der Wärmesenke ab. Bei der R407C Wärmepumpe hingegen wirkt sich eine zunehmende Temperatur-Spreizung der Wärmesenke negativ auf die Effizienz aus. Folglich verschieben sich die Vorteile bei Anwendungen mit zunehmender Temperatur-Spreizung der Wärmesenke zu Gunsten von R744. Folglich macht die Anwendung einer R744-Wärmepumpe insbesondere bei einer hohen Temperatur-Spreizung der Wärmesenke Sinn.

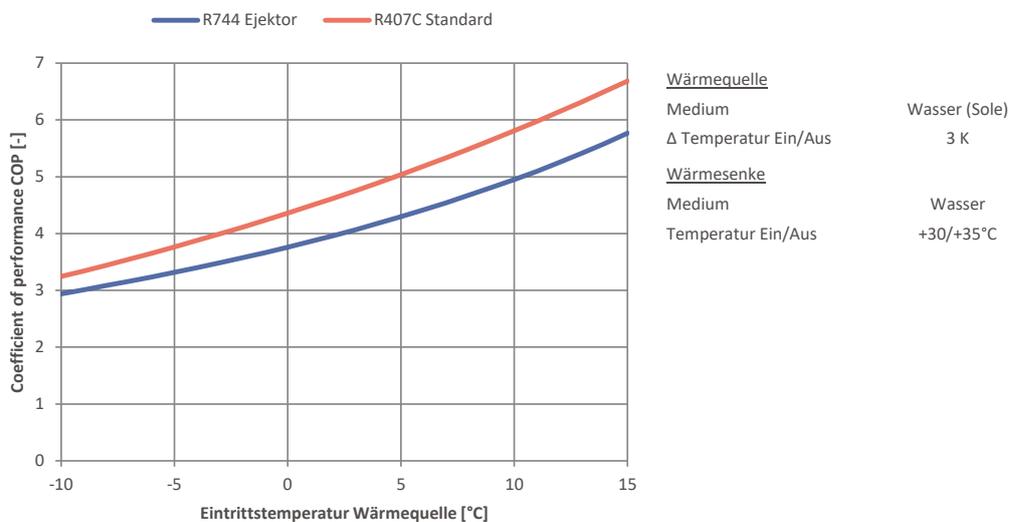


Bild 8: Coefficient of Performance von R744 und R407C Wasser (Sole)/Wasser-Wärmepumpe mit unterschiedlichen Wärmesenken-Temperaturniveau (Fortsetzung auf nächster Seite).

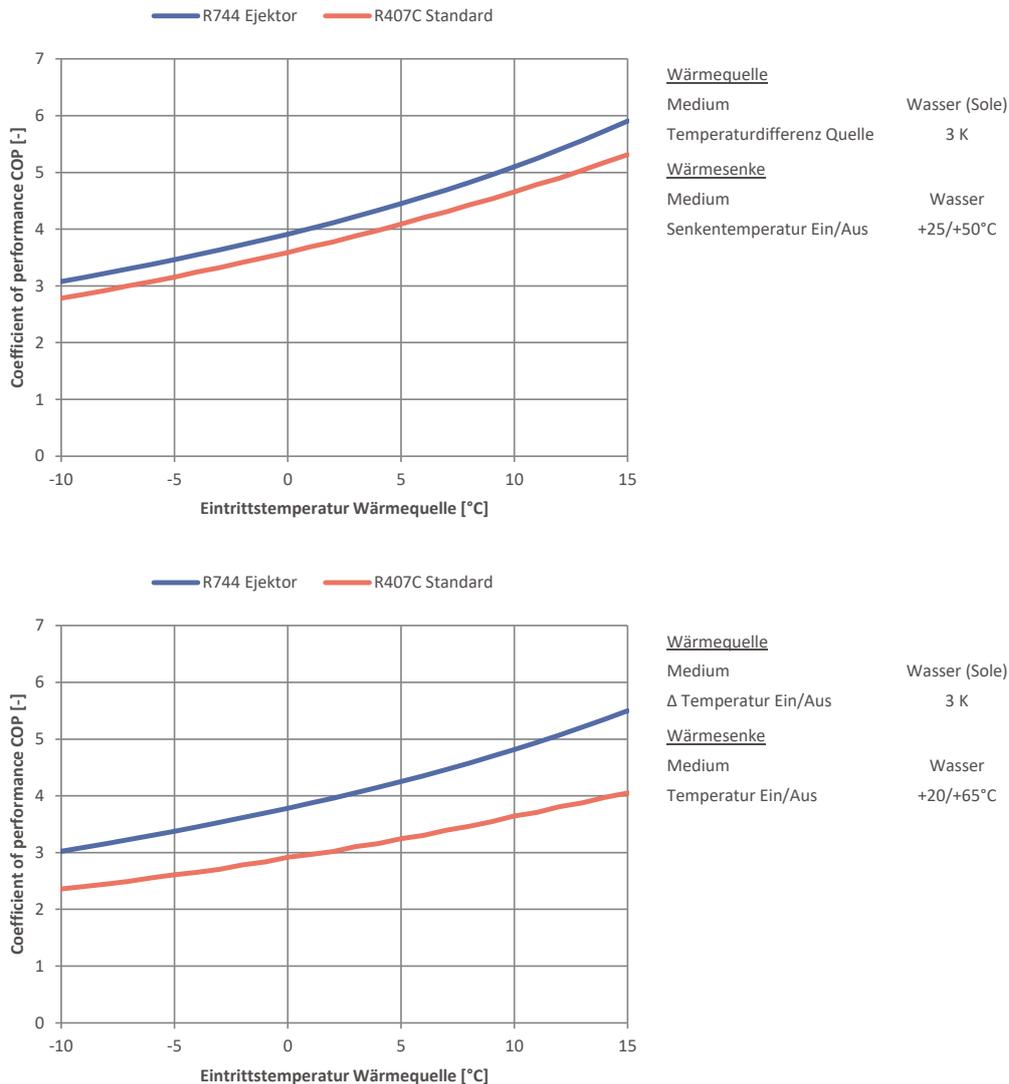


Bild 8: Coefficient of Performance von R744 und R407C Wasser (Sole)/Wasser-Wärmepumpe mit unterschiedlichen Wärmesenken-Temperaturniveau. (Fortsetzung).

Der Einsatz von Ejektoren bei R744 bringt zwei wesentliche Vorteile, zum einen ist dies die Sauggas-Vorverdichtung durch die Ejektoren und zum anderen ist dies das Auskommen mit einer sehr kleinen Überhitzung am Verdampfer. Der letztere Vorteil kommt insbesondere bei Wärmequellen mit kleinen Temperatur-Spreizungen zum Tragen, da die Verdampfungstemperatur massgeblich durch die Wärmesenke-Austrittstemperatur und nicht durch die Überhitzung bestimmt wird. Der Vorteil der Sauggas-Vorverdichtung kommt unabhängig der Temperatur-Spreizung der Wärmequelle zu Tragen. Zusammenfassend bringen die Ejektoren deren grösste Wirkung bei Wärmequellen mit geringen Temperatur-Spreizungen wie zum Beispiel bei Wasser-Wasser oder Sole-Wasser Wärmepumpen.

Die hohen Heissgas-Temperaturen und die kontinuierliche Enthitzung von R744 im transkritischen Betrieb erlaubt es hohe Wasser Vorlauf-Temperaturen zu erzielen. Unabhängig der Quellen-Temperatur kann in allen Betriebspunkten eine Vorlauf-Temperatur von +65°C erreicht werden. Dies bringt insbesondere Vorteile hinsichtlich Legionellenprävention resp. es bedarf keiner zusätzlichen elektrischen Nachheizung bei der Trinkwarmwasser-Erwärmung. Darüber

hinaus ist der Anteil an Enthitzungsenergie bei R744 (ca. 40%) gegenüber R407C (ca. 15%) deutlich grösser. In anderen Worten lässt sich entsprechend ein grösserer Anteil Warmwasser parallel (simultan) auf ein hohes Temperatur-Niveau heben.

Bei R407C Wärmepumpen erfolgt in der Regel die Aufbereitung von Warmwasser und Heizung zeitlich separat voneinander. Der hohe Anteil an Enthitzungsenergie bei R744 ermöglicht aber auch eine simultane Aufbereitung von Warmwasser und Heizung. Daraus resultieren tiefe Rücklauf-Temperaturen zur Wärmepumpe wodurch die Effizienz steigt.

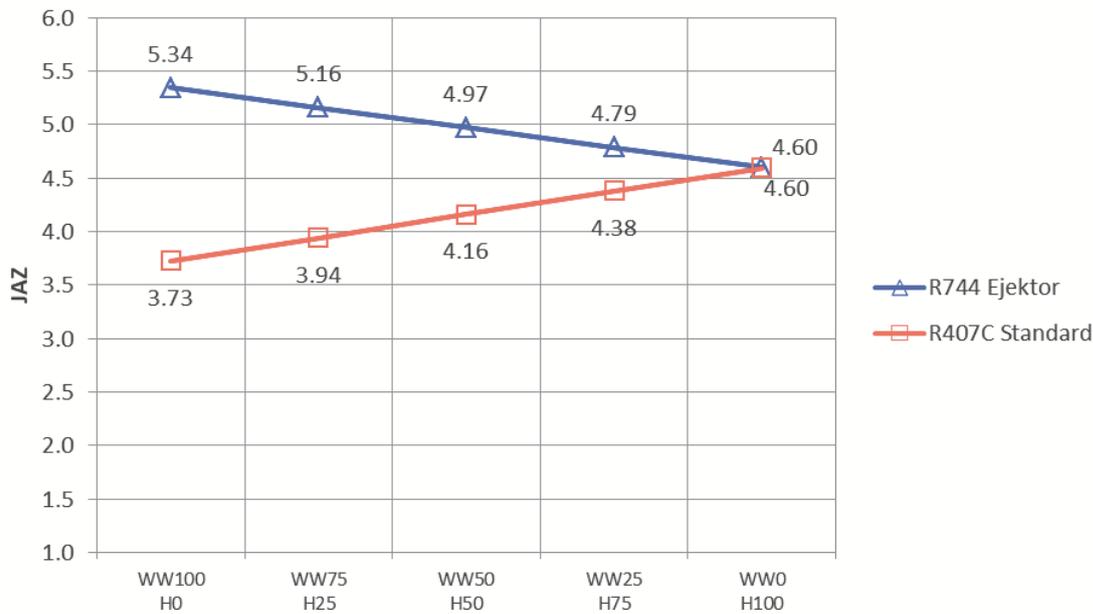


Bild 9: Jahresarbeitszahl JAZ von R744 und R407C Wasser/Wasser-Wärmepumpe beim Szenario Erweiterung mit unterschiedlichem Warmwasser-Anteil.

Zusammenfassend lässt sich sagen, die folgenden Faktoren verschieben die energetischen Vorteile zu Gunsten der R744-Wärmepumpe:

- Abnehmende Temperatur-Spreizung der Wärmequelle
- Zunehmende Temperatur-Spreizung der Wärmesenke
- Bedarf an hohen Vorlauf-Temperaturen und Legionellenprävention
- Zunehmender Warmwasser-Anteil am Nutzenergiebedarf

Bei Anwendungen mit einer Temperatur-Spreizung von mehr als 15 K auf dem Heizungsnetz ist die Effizienz von R744 bereits bei reiner Heizanwendung gleichwertig. Mit zunehmendem Warmwasser-Anteil nehmen die Vorteile zu Gunsten von R744 zu. Bei Wasser-Wasser und Sole-Wasser Wärmepumpen ist R744 ab einem Warmwasser-Anteil von ca. 25% unabhängig der Anwendung energetisch gleichwertig. Mit zunehmendem Warmwasser-Anteil nehmen die Vorteile zu Gunsten von R744 zu. Bei Luft-Wasser Wärmepumpen liegt die energetische Gleichwertigkeit bei ca. 50%. Mit zunehmendem Warmwasser-Anteil nehmen die Vorteile zu Gunsten von R744 zu.

Energetische Vorteile von <b>R744 Ejektor</b> gegenüber <b>R407C</b> <b>Standard</b>		ANTEIL JÄHRLICHER ENERGIEVERBRAUCH						
		Warmwasser	100%	75%	50%	25%	0%	
		Heizung	0%	25%	50%	75%	100%	
WÄRMEQUELLE	Wasser	WÄRMESENKE HEIZUNG	Altbau Mittel W47/55	43%	29%	14%	-2%	-19%
			Sanierung Intermediär W40/45	43%	25%	8%	-8%	-23%
			Neubau Niedrig W30/35	43%	25%	10%	-4%	-15%
			Erweiterung Niedrig/Intermediär W30/45	43%	31%	19%	9%	0%
	Sole		Altbau Mittel W47/55	37%	27%	15%	-2%	-12%
			Sanierung Intermediär W40/45	37%	23%	10%	-4%	-17%
			Neubau Niedrig W30/35	37%	26%	11%	-3%	-14%
			Erweiterung Niedrig/Intermediär W30/45	37%	27%	18%	9%	1%
	Luft		Altbau Mittel W47/55	16%	8%	-1%	-11%	-23%
			Sanierung Intermediär W40/45	16%	5%	-6%	-17%	-29%
			Neubau Niedrig W30/35	16%	5%	-8%	-20%	-29%
			Erweiterung Niedrig/Intermediär W30/45	16%	8%	-1%	-9%	-17%

Tabelle 2: Zusammenfassung der Berechnungsergebnisse für Vergleichsszenarien zwischen einer R744- und einer R407C Wärmepumpe

## Quellen

- [1] G. Lorentzen: Revival of carbon dioxide as a refrigerant. Trondheim, Norwegen, International Journal of Refrigeration, 1994.
- [2] Pohlmann: *Taschenbuch der Kältetechnik. Grundlagen, Anwendung, Arbeitstabellen und Vorschriften*. Berlin, VDE Verlag GmbH, 2013.
- [3] J. Schönenberger: Effiziente CO<sub>2</sub>-Anlagen zum Heizen und Kühlen, Frigo-Consulting AG, 2016.
- [4] AIR LIQUIDE Deutschland GmbH. (2009). 1x1 der Gase.
- [5] Asco Kohlensäure AG, Die drei Aggregatzustände von CO<sub>2</sub>, 2004.
- [6] Wärmepumpen-System-Modul: <https://www.wp-systemmodul.ch>. 23. 07 2018.
- [7] SN EN 14511-1,2,3,4, Luftkonditionierer, Flüssigkeitskühlsätze und Wärmepumpen mit elektrisch angetriebenen Verdichtern für die Raumbeheizung und Kühlung (2018). Normen-Komitee INB/NK 181 Kälteanlagen und Wärmepumpen. Winterthur: Schweizerische Normen-Vereinigung (SNV).
- [8] SN EN 14825 Luftkonditionierer, Flüssigkeitskühlsätze und Wärmepumpen mit elektrisch angetriebenen Verdichtern zur Raumbeheizung und -kühlung - Prüfung und Leistungsbemessung unter Teillastbedingungen und Berechnung der saisonalen Arbeitszahl, Normen-Komitee INB/NK 181 Kälteanlagen und Wärmepumpen. Winterthur: Schweizerische Normen-Vereinigung (SNV).
- [9] EES Engineering Equation Solver, Software Version V10.405 Single-User Professional 64-bit (2019).
- [10] Meteonorm 7, Software Version V7.1.11.24422 Vollversion (2019).
- [11] Pfirter, Nyfeler + Partner AG, Grundwasserbericht 2014, Kanton Basel-Landschaft, 2015.
- [12] Coolprop Stoffdatenbank, Software Version 6.2.0, <http://www.coolprop.org>
- [13] M. Markstaler, S. Bertsch: Systemsimulation Effizienz der Brauchwarmwassererwärmung mit Wärmepumpen. NTB Interstaatliche Hochschule für Technik Buchs, 2015.
- [14] SN EN 16147, Wärmepumpen mit elektrisch angetriebenen Verdichtern – Prüfungen, Leistungsbemessung und Anforderungen an die Kennzeichnung von Geräten zum Erwärmen von Brauchwarmwasser (2017). Normen-Komitee INB/NK 181 Kälteanlagen und Wärmepumpen. Winterthur: Schweizerische Normen-Vereinigung (SNV).

Prof. Enrico Da Riva, Martin Schmidt  
HEIG-VD (Haute École d'Ingénierie et de Gestion du Canton de Vaud)

## Transcritical CO<sub>2</sub> heat pump: first experimental test rig results

### Summary

*Heat pumps nowadays available in the market are able to cope with both space heating and Domestic Hot Water (DHW) demands. Thanks to the improvements of materials and thermal design of modern buildings, the ratio of the above demands is continuously shifting towards DHW. In such a context, the transcritical vapour compression cycle with CO<sub>2</sub> may be more favourable than the classical (sub-critical) one in terms of COP. A short insight about the main differences between the two cycles is provided. Experimental performance data of a commercial transcritical CO<sub>2</sub> heat pump are reported and discussed, confirming how this technology is considerably more efficient than the classical one for DHW production, especially when high temperatures are required and in the case of combined cooling demands. Finally, some advices about the proper hydraulic integration are provided.*

### Zusammenfassung

*Alle heutigen Wärmepumpen sind in der Lage den Heiz- und Warmwasserbedarf von Gebäuden zu decken. Dank der Weiterentwicklung von Baumaterialien und dem energietechnisch besseren Design moderner Gebäude sinkt der Heizbedarf von neuen Gebäuden kontinuierlich. Dies hat zur Folge, dass der Warmwasserbedarf einen immer grösseren Anteil des Gesamtenergiebedarfs von neuen Gebäuden einnimmt. Im Bezug auf die Arbeitszahl (COP) könnte der transkritische Zyklus mit CO<sub>2</sub> eine bessere Lösung sein als klassische, nicht transkritische Zyklen. Eine Kurzpräsentation der Hauptunterschiede der zwei Zyklen wird vorgenommen. Experimentelle Leistungsdaten einer kommerziellen transkritischen CO<sub>2</sub>-Wärmepumpe werden vorgestellt und diskutiert. Es wird unter anderem aufgezeigt, dass die transkritische Lösung für Warmwasseraufbereitung deutlich effizienter ist als eine klassische Wärmepumpe, dies insbesondere, wenn höhere Temperaturen benötigt werden und erst recht, wenn ein kombinierter Kältebedarf besteht. Zum Schluss werden Ratschläge zum richtigen hydraulischen Einbau erteilt.*

### Résumé

*Actuellement, les PAC disponibles sur le marché sont capables de répondre à la fois à la demande de production d'eau de chauffage et d'Eau Chaude Sanitaire (ECS). Grâce à l'amélioration des matériaux de construction et à la conception économe en énergie des bâtiments modernes, la proportion de la demande d'ECS augmente sans cesse. Dans ce contexte, le cycle de compression de vapeur transcritique au CO<sub>2</sub> pourrait être plus favorable que le classique (sous-critique) en termes de COP. Un bref aperçu des principales différences entre les deux cycles est fourni. Des mesures expérimentales d'une PAC transcritique commerciale sont traitées et commentées, confirmant ainsi combien cette technologie est considérablement plus efficace pour la production d'ECS. Ces résultats sont spécialement valables lors de hautes températures de production d'eau chaude et avec des demandes de refroidissement combinées. Finalement, des conseils quant à l'installation hydraulique correcte à ce type de PAC sont traités.*

## Introduction

Thanks to the improvement of materials and thermal design of building, the total annual energy demand for space heating is continuously decreasing, while the energy demand for Domestic Hot Water (DHW) cannot be decreased since it's due just to hygienic reasons, and, to a minor extent, to cultural habits. As an example in the Swiss context, while for old buildings the annual ratio of the demand for DHW does not exceed the 10% of the total heating demand, this value is estimated to be 46% for new buildings respecting the 2008 *MuKE*n (“*Mustervorschriften der Kantone im Energiebereich*”) and increases up to 73% for “*Minergie-P*” buildings [1].

Heat pumps nowadays available in the market are based on the classical vapour compression cycle and are able to cope with both space heating and DHW demands but are much more suitable for low-temperature space heating than DHW production. The main reason is the fact that the water temperature rise through the condenser of a classical heat pump should be as low as possible (typically around 5 K) which fits perfectly, for example, to a 30/35°C space heating application. On the other hand, tap water is available from the distribution network at around 10°C, but must be heated up to a much higher temperature (65°C in the tank for protection against legionella according to SIA 385/1). In such a context, the transcritical vapour compression cycle may be more favourable since, as opposite to the classical one, it better fits application with a high water temperature rise through the heat pump.

Such type of thermodynamic cycle is nowadays exploited at commercial level only with the natural refrigerant carbon dioxide, which displays a low enough critical temperature (i.e. 31°C). The evolution of the legislation in terms of refrigerants could be another reason for the rise of this technology, since the HFC refrigerants nowadays used in most heat pumps are going to be progressively banned at Swiss as well as at global level because of environmental reasons and, in the author's opinion, the adoption of natural refrigerants looks like the soundest choice, from both a legislative and a technical point of view (even if the new generation of HFO refrigerant is available). It is interesting to notice how, because of the prohibition of HFC refrigerants nowadays already in force in Switzerland in the field of commercial refrigeration (see *ChemRRV* [2]), already 927 CO<sub>2</sub> refrigeration systems were installed by 2016 [3].

Despite this, CO<sub>2</sub> transcritical heat pumps are still almost unknown at Swiss level. However, this is already a mature technology, as confirmed by the fact that 5 million units (so-called “EcoCute”) have been installed at commercial domestic level in Japan [4], certainly also pushed by state incentives and by the fact that in this country the average ratio of the annual thermal energy demand for DHW is already in the order of 50%.

## PAC-CO<sub>2</sub> project (“Energy District 2050” research program of HES-SO)

The results here reported have been obtained in the context of the project PAC-CO<sub>2</sub> funded by the research program “Energy District 2050” of HES-SO. Experimental test of a commercial transcritical machine are being run in the test rig of HEIG-VD, while experimental data about the actual thermal demands of existing buildings are being analysed by the HES-SO Valais.

The main purpose of the project is to determine the energy scenarios for which the adoption of a CO<sub>2</sub> heat pump is favourable as compared to a classical one.

## Classical (subcritical) vapour compression cycle vs transcritical cycle

An insight about the main differences between a transcritical and a classical (sub-critical) cycle is provided here. An example of a simplified thermodynamic cycle in the pressure-enthalpy diagram approximately corresponding to the testing conditions B0/W35 of a heat pump using the refrigerant R410A is shown in Figure 1. The cycle has been computed under the assumptions of  $-6^{\circ}\text{C}$  evaporating temperature,  $38^{\circ}\text{C}$  condensing temperature, 5 K superheating at the evaporator outlet, 0 K sub-cooling at the condenser outlet and 0.7 compression isentropic efficiency. The isothermal lines corresponding to the condensing temperature and the temperature at the compressor outlet are also plotted in Figure 1 (on the left).

In a classical vapour compression cycle, condensation and evaporation are exploited in order to obtain high heat transfer coefficients and high heat fluxes at the condenser and the evaporator. Another major reason is the fact that the isobaric phase change of a pure fluid is also an isothermal process. In this way, the actual refrigerant thermodynamic cycle can mimic the theoretical Carnot cycle, which would require an isothermal heat transfer process at both the cold source side (evaporator) and the hot source side (condenser).

An example of R410A and water temperature profiles inside the condenser, corresponding to the above reference case, is also shown in Figure 1 on the right. Because of technological limitations, the compression ( $a \rightarrow b$  in the example) can be done only in the vapour phase. Superheated vapour is obtained at the discharge of the compressor (point  $b$ ), therefore some (relatively small) portion of the condenser must be used to cool the refrigerant down to the condensing temperature; starting from this point, the process is isothermal all along the condenser.

In order to maximise the thermodynamic efficiency, any heat transfer process in a thermal machine should be performed with the lowest possible temperature difference between the two fluids. As one can see in Figure 1, in order to achieve this, the water temperature profile in the condenser should be as flat as possible, which means that the water flow rate should be as high as possible. The typical value of 5 K water temperature rise through the condenser arises from a compromise between the above thermodynamic constraint and the technical feasibility (pumping power and heat exchanger sizing constraints).

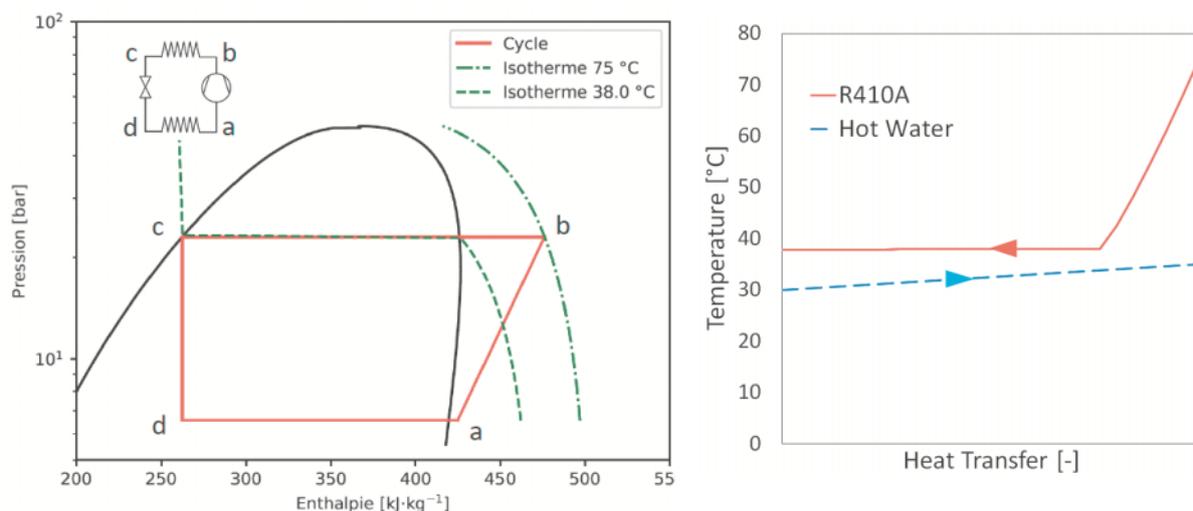


Figure 1: Example of R410A heat pump operation for B0/W35 conditions: simplified thermodynamic cycle (on the left) and temperature profiles in the condenser (on the right).

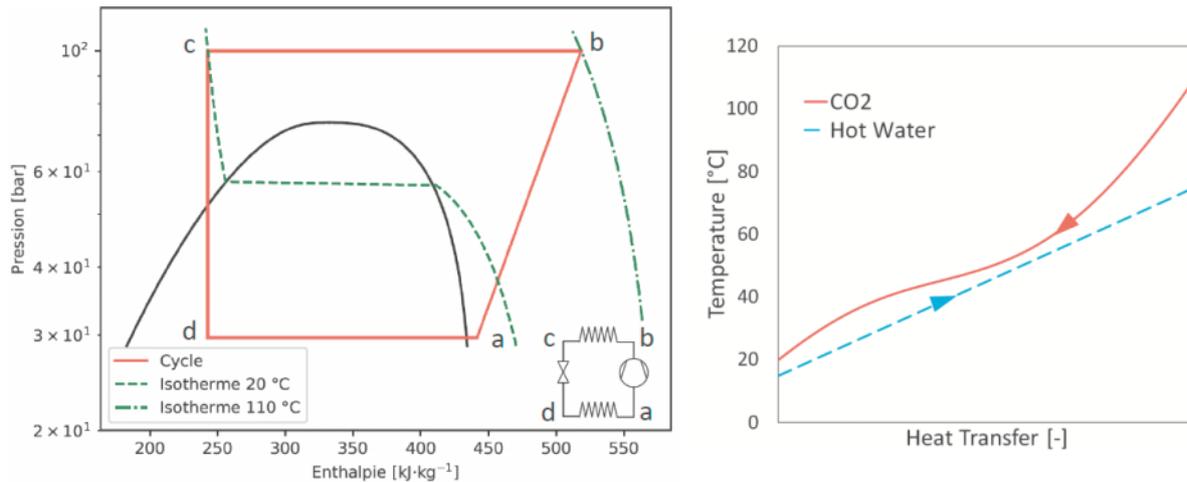


Figure 2: Example of CO<sub>2</sub> heat pump operation for DHW production: simplified transcritical thermodynamic cycle (on the left) and temperature profiles in the gas-cooler (on the right).

In conclusion, a heat pump based on a classical refrigeration cycle must operate with small inlet/outlet temperature rises through the condenser in order to try to maximize the COP.

It should be stressed that it is also possible to split the  $b \rightarrow c$  process into two parts by adopting two different heat exchangers: a classical condenser and a dedicated “desuperheater” were lower flow rates are needed and the water can be risen to temperatures close to the actual compressor discharge. For the sake of simplicity, this case won’t be treated here.

An example of a simplified thermodynamic cycle adapted to the production of DHW at high temperature in a CO<sub>2</sub> heat pump is shown in Figure 2 on the left. The cycle has been computed under the assumptions of -6°C evaporating temperature, 5 K superheating at the evaporator outlet and 0.7 compression isentropic efficiency. Such a cycle is called transcritical because the  $b \rightarrow c$  process occurs at a pressure (100 bar in the example) higher than the fluid critical point. No phase change occurs, but a continuous CO<sub>2</sub> temperature decrease (from 110°C down to 20°C in the present example); for this reason, the heat exchanger is not called condenser, but “gas-cooler”. An example of the corresponding temperature profiles of the refrigerant and the hot water is plotted in Figure 2 on the right. In order to keep the temperature difference between the two fluids as low as possible and maximize the thermodynamic efficiency, in this case, as opposite to Figure 1, water temperature flow rate must be kept low enough and very high temperatures rises must be achieved (from 15°C up to 75°C in the present example).

It is clear from the above analysis that the almost perfectly isothermal refrigerant process inside the condenser of a classical heat pumps requiring small (ideally null) inlet/outlet water temperature rises is well suited for floor heating. In this case the ideal Carnot cycle can be taken as a reference, and the maximum theoretically achievable COP can be computed as follows:

$$COP_{Carnot} = \frac{T_{hot-source} [K]}{T_{hot-source} [K] - T_{cold-source} [K]} \quad (1)$$

where ideally the refrigerant condensing temperature, and the water inlet and outlet temperatures are all identical and corresponding to  $T_{hot-source}$ .

The Carnot cycle, however, cannot be taken as a sound reference for DHW production applications, since tap water available from the network is cold and must be heated up to a much higher temperature. In this case, the so-called Lorentz cycle can be taken as a reference, which differs from the Carnot one because the heat transfer process at the hot-source heat exchanger does take into account an isobaric process with temperature glide, as the one occurring inside the gas cooler of a transcritical heat pump. As first approximation, the maximum achievable heat pump COP can be computed as follows [5]:

$$COP_{Lorentz} = \frac{T_m[K]}{T_m [K] - T_{cold-source} [K]} \quad (2)$$

with:  $T_m = \frac{T_{gas-cooler\_in} + T_{gas-cooler\_out}}{2}$

The actual COP of available classical and transcritical heat pumps cannot achieve the upper limit values given by the Carnot respectively the Lorentz cycle, because of technological limitations. However, Eq. (1) and Eq. (2) are useful to understand the effect of operating conditions changes; as an example it can be seen from Eq. (2) that a transcritical heat pump is expected to benefit from any reduction of  $T_m$ , such as a decrease of the refrigerant temperature at the gas cooler outlet at fixed inlet temperature.

## Heat pump test facility

The heat pump test facility of HEIG-VD allows to experimentally measure the heating power, the cooling power and the electrical power of water/water and glycol/water heat pumps up to around 20 kW heating power. Flow rates and temperatures can be varied at both the hot source and cold source independently. Measurements can be done at the testing conditions required by standards or any other condition allowed by the heat pump control system.

Hydraulic circuits pressure drops (ex. for the measurements of the COP according to the EN 14511 standard) and refrigerant cycle working pressures can also be measured if needed.

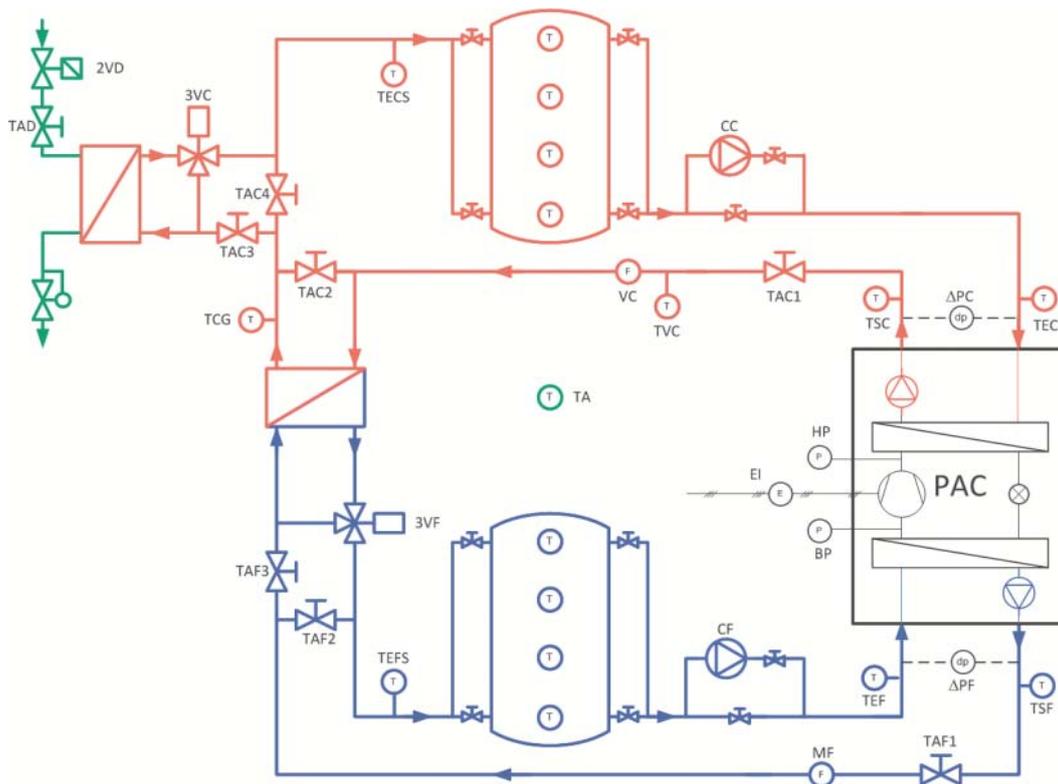


Figure 3: Heat pump test facility schematic.

The hydraulic schematic of the heat pump test facility is shown in Figure 3. The blue colour in the picture is used for the cold source line (30% ethylene glycol mixture in the present tests), the red colour for the hot source line and the green one for the facility cooling water. The heat exchanger between the cold source line and the hot source line allows to fully dissipate the cooling power produced by the evaporator and to partially dissipate the heating power produced by the condenser (or gas cooler, in the present case). In this way, the global cooling demand of the facility is reduced to roughly just the thermal power corresponding to the electrical power of the heat pump.

The three-ways valve 3VF allows to control the cold line temperature TEFS, while the three-ways valve 3VC allows to control the hot line temperature TECS. The two water tanks allow to dump any temperature undesired fluctuation in order to better control the actual inlet temperatures to the heat pump TEC and TEF. Water inlet/outlet positions to the two tanks can be changed in such way to modify the actual water volume contributing to the thermal inertia of the system or to exploit temperature stratification in the tank.

The facility is equipped with variable speed pumps (CC and CF in the schematic) in case the heat pump doesn't have any. The hot and cold test flow rates can be independently set by either adjusting the variable speed pumps frequency or by adjusting the throttling valves TAC1 and TAF1. The flow rates are measured by a Coriolis mass flow meter at the cold side and a magnetic flow meter at the hot side.

The inlet and outlet temperatures to the heat pump are measured by means of three-wires PT100 thermoresistances and an Agilent data acquisition system.

## Test of commercial transcritical CO<sub>2</sub> heat pump for DHW production

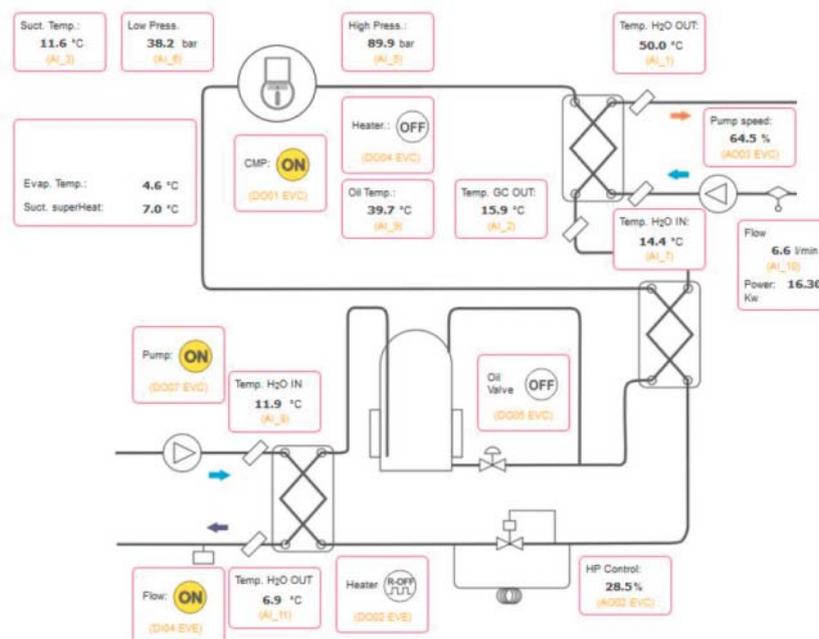
The geothermal transcritical CO<sub>2</sub> heat pump for DHW production GeoHeat18 by Enex Srl has been experimentally tested. A screenshot of the proprietary data monitoring system, displaying also a schematic of the main components of refrigeration cycle, is shown in *Figure 4*.

The control system of the test facility, as well as all the measurements and the data acquisition system used for the reduction of experimental data here reported are totally independent from the data monitoring system of the manufacturer.

A total of 56 experimental data points has been measured, with water/glycol inlet temperatures ranging from 0°C up to 19°C, water inlet temperature to the gas cooler ranging from 13°C up to 35°C and DHW production temperature ranging from 50°C up to 78°C.

All experimental measurements have been compared against the results of a performance calculator provided by the heat pump manufacturer and available online [6]. The experimental COP is on average 10% lower than the values provided by the calculator (standard deviation 3%). As regards to the heating power, the average deviation is -2.6%, with standard deviation 4%. The COP difference is considered acceptable taking into account the measurement uncertainty of the test facility and the two following points:

- Manufacturer data refers to operation with water as cold source, while the test facility uses a 30% ethylene glycol mixture;
- Manufacturer data does not take into account the power consumption of the pumps, while the totality of the electrical power consumption of the heat pump is considered here (i.e. compressor, hot water pump, electronics and lubricant heater).



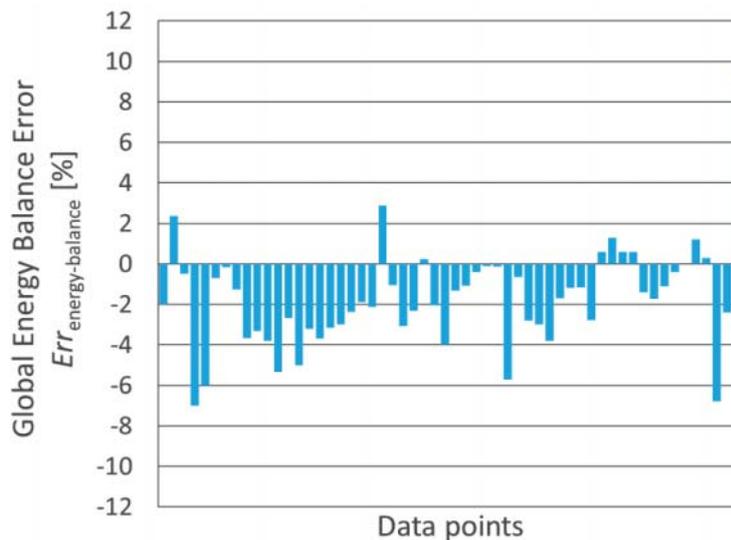
*Figure 4: Screenshot of the heat pump proprietary monitoring system. Courtesy of Enex Srl.*

## Energy balance check

In order to validate the experimental measurements, a double check of the global energy balance has been performed for each data point as follows:

$$Err_{energy-balance} [\%] = \frac{Q_{cool} + W - Q_{heat}}{Q_{heat}} \cdot 100 \quad (3)$$

where  $Q_{heat}$  is the heating power,  $Q_{cool}$  is the cooling power and  $W$  is the global electrical power of the heat pump (hot water pump, electronics and lubricant heater included in this case). As a first approximation this value should be null. Global energy balance error values are reported in Figure 5: the validation of the measurement accuracy is considered fairly acceptable, since the average unbalance is -1.7%, with 1.8% standard deviation.



heat pumps, with nominal heating power from around 7 kW up to around 70 kW and using R410A, R407C or R134a as refrigerant.

A completely fair comparison between transcritical and classical heat pumps is somehow impossible because of the very different operating conditions in terms of hot water production temperature (typically around 30°C to 65°C for most of the “classical” heat pumps available in the market, and around 50°C to 80°C for the transcritical ones, but higher values are possible), as well as inlet-to-outlet temperature rise (around 5 K for the classical ones, minimum around 30 K for the transcritical ones). The actual control strategy of the DHW tank charging should also deserve a more in-depth analysis, since in the case of a classical heat pump, the actual hot water outlet temperature gradually increases all along the charging process. Finally, it must also be stressed how the measurements of the “WPZ” are made with 10°C pure water at the evaporator inlet (instead of 11°C brine) and, according to EN14511, including a part of the electrical power of both circulators in the calculation of the COP, while the evaporator pump is neglected and the DHW circulator is taken into account at 100% for the CO<sub>2</sub> heat pump.

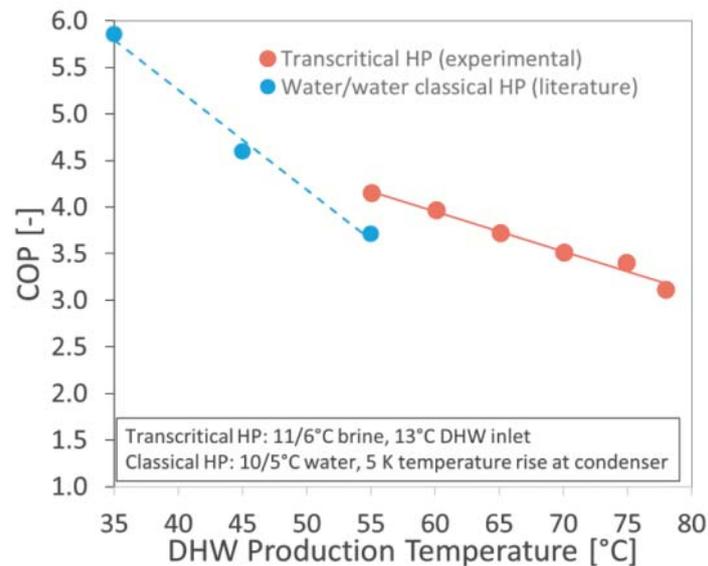


Figure 6: COP as a function of DHW production temperature, comparison between the transcritical heat pump (experimental measurements) and classical ones (literature values [7]).

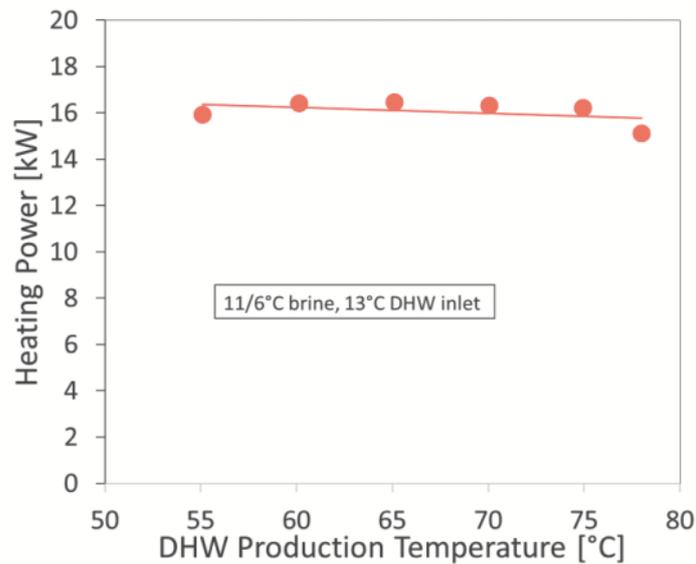


Figure 7: Experimental measurements of transcritical heat pump heating power as a function of DHW production temperature.

The reference values of COP corresponding to the test conditions W10/W35, W10/W45 and W10/W55 [7] are plotted in *Figure 6* against the experimental measurements of the CO<sub>2</sub> heat pump. As one can see, COP drops by increasing the DHW production temperature in both cases, but while for the classical heat pumps such a drop follows the well known rule of thumb of roughly 2%/K, in the case of the tested machine this value is almost the half, in the order of 1~1.5%/K (which is in good agreement with the expected behaviour of a machine with constant exergy efficiency as compared to an ideal Lorentz cycle [see Eq. 2]).

The CO<sub>2</sub> heat pump considerably outperforms the classical ones at 55°C DHW production temperature. When increasing the set point above this value, the transcritical machine becomes better and better as compared to the classical ones. Besides, the maximum achievable temperature is higher as it can reach temperatures as high as 80°C (for the sake of curiosity, the tested commercial model is also available in a higher gas-cooler pressure version which can reach 90°C). In conclusion, the transcritical technology is clearly shown to be considerably more efficient than the classical one for the production of domestic hot water.

On the other hand, a classical heat pump would be considerably more efficient than a CO<sub>2</sub> one in the case of low temperature space heating applications. When decreasing the production temperature set point, it becomes better and better as compared to the transcritical one. Besides, the minimum achievable temperature is much lower and better adapted to applications such as floor heating.

In terms of pure productivity, it can also be noted how the CO<sub>2</sub> heat pump would anyhow be able to provide temperature levels lower than 50°C, simply by mixing hot and cold water, while a classical heat pump would need an auxiliary heating system to reach higher temperatures.

Finally, independently of the technology, it's evident from the COP values reported in *Figure 6* that the combined production of heat and cold water (ex. 12/7°C) should be favoured anytime it's possible.

## The effect of gas-cooler water inlet temperature

A key point for the efficient operation of a transcritical heat pump is the control of the inlet water temperature to the gas-cooler, which should be kept as low as possible. Tests have been run at two different DHW production set points (i.e. 50°C and 65°C) and gas-cooler inlet temperature ranging from 15°C up to 35°C. Experimental measurements of COP, heating power and electrical power are shown in *Figure 8*, *Figure 9* and *Figure 10*. As one can see, any increase of the water inlet temperature to the gas-cooler has a remarkable negative impact on the COP of the transcritical heat pump (see *Figure 8*) as expected from Eq. 2, which is due to a decrease of the heating power (*Figure 9*), while the electric power depends on the gas-cooler water outlet temperature but not on the inlet temperature (*Figure 10*).

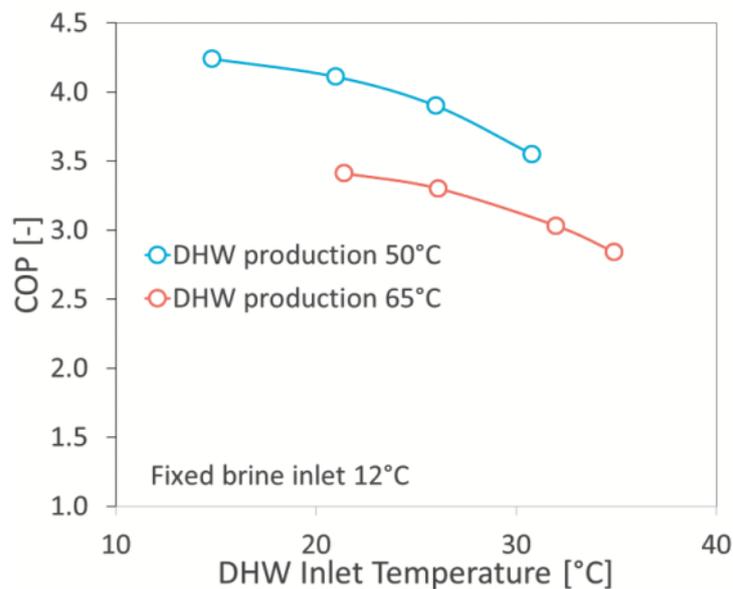


Figure 8: COP versus DHW inlet temperature at fixed 50°C and 65°C outlet temperature.

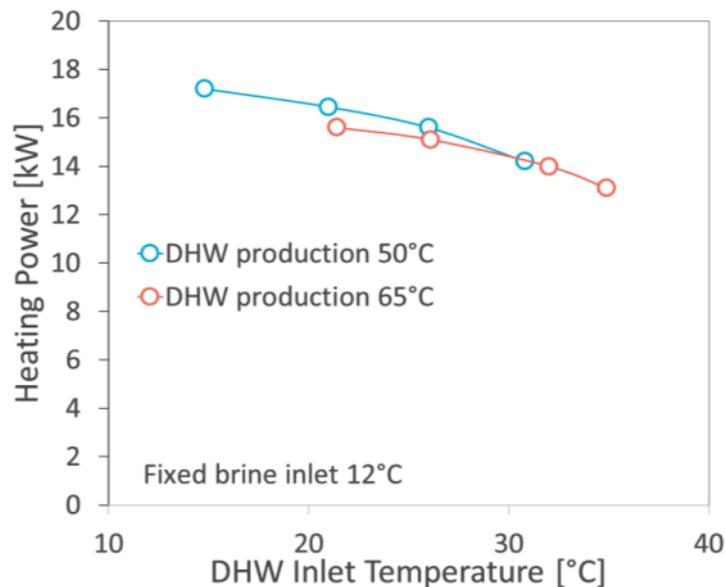


Figure 9: Heating power as a function of DHW inlet temperature.

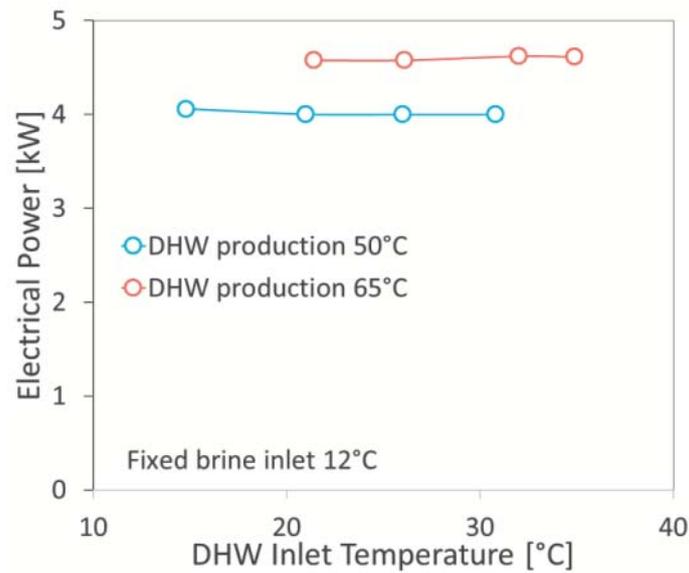


Figure 10: Electrical power as a function of DHW inlet temperature.

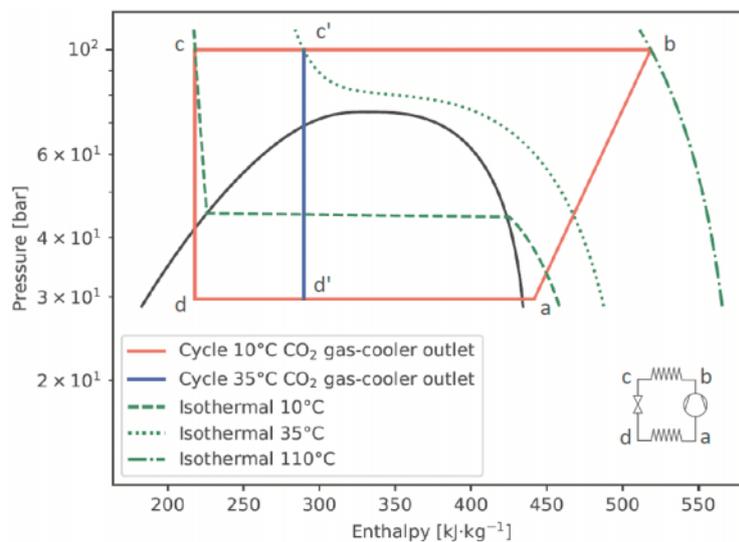


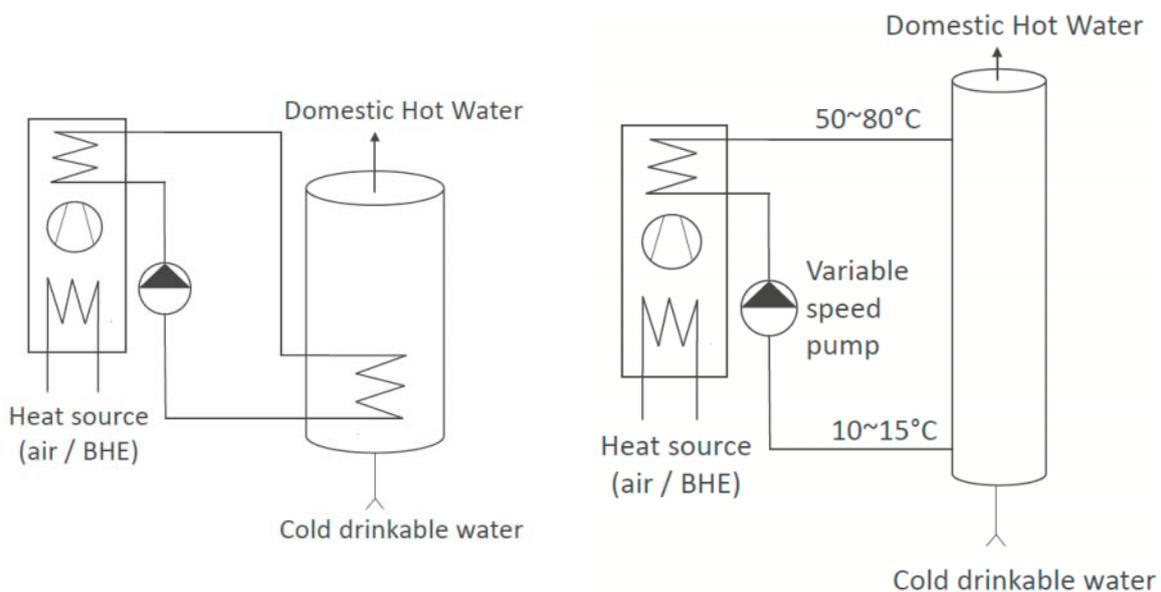
Figure 11: Example of cycle with two different CO<sub>2</sub> gas-cooler outlet temperatures.

The above behaviour can be easily understood by analysing the *Figure 11*, where an example of a simplified transcritical cycle is plotted at two different gas-cooler refrigerant outlet temperatures. Since water and CO<sub>2</sub> flow in the gas-cooler in a counter-current flow configuration, by increasing the water inlet temperature, the CO<sub>2</sub> outlet temperature must increase (from *c* to *c'* in the example): as a consequence, the heating power  $\Delta h_{bc}$  decreases, without any change of the electrical power  $\Delta h_{ab}$ .

The influence of the gas cooler water inlet temperature and the need to operate with very high inlet-to-outlet temperature rises must be considered for a proper hydraulic integration of a transcritical heat pump. Tap water is inherently available at a low enough temperature of around 10°C, but care must be taken in order to assure such a low temperature at the gas-cooler inlet. As an example, the typical hydraulic configuration (see *Figure 12*) based on a heat exchanger coil at the bottom of the DHW tank is suitable for classical heat pumps which display low water temperature rises through the condenser; such a system allows the charging of the tank with a

gradual increase of the condenser water inlet temperatures (as well as low heat exchanger coil inside-to-outside temperature difference) which is certainly favourable for a classical heat pump, but not all for a transcritical one.

In the case of a CO<sub>2</sub> heat pump, the hydraulic configuration shown in *Figure 13* is suggested. Cold tap water must flow directly to the gas cooler inlet avoiding any mixing in order to keep its temperature as low as possible. A variable speed pump must be used in such a way to adapt the flow rate to the required DHW production temperature, which is directly achieved in a single step. The best possible temperature stratification in the tank is mandatory in order to avoid any water mixing.



*Figure 12: Typical hydraulic integration of heat pumps for DHW production (not suitable for transcritical machines).*

*Figure 13: Example of proper hydraulic integration of a transcritical heat pump.*

## Conclusions

- Experimental data of COP and heating capacity of a commercial transcritical CO<sub>2</sub> heat pump are reported and explained by a simplified analysis of the thermodynamic cycle.
- The tested heat pump is shown to be more efficient than classical machines for the production of domestic hot water, especially when high temperature (up to 80°C) is needed.
- On the contrary, classical heat pumps are shown to be more efficient than the tested machine for low temperature space heating (ex. floor heating).
- Classical heat pumps require high water flow rates and provides low water temperature rises in the order of 5 K, on the contrary, transcritical heat pumps require low water flow rates and provide high water temperature rises (e.g. from 10°C up to 80°C).
- Water inlet temperature to a transcritical heat pump should be kept as low as possible since both COP and heating capacity drastically decrease when increasing the inlet temperature.
- A proper hydraulic integration, with the use of a well stratified water tank, low water flow rates and a variable speed circulator is mandatory in order to benefit from the transcritical cycle.

## Acknowledgements

Enex Srl is highly acknowledged for the supply of the heat pump “Geoheat 18” to test.

The HES-SO (University of Applied Sciences and Arts of Western Switzerland) is acknowledged for the financial support of the project “PAC-CO<sub>2</sub>” through the research programme “Energy District 2050”.

Prof. Jessen Page and Dr. Ramanunni Menon are acknowledged for their collaboration in the project “PAC-CO<sub>2</sub>” concerning the analysis of experimental data about existing buildings.

## References

- [1] « *Production efficace de l'eau chaude sanitaire* », pag. 6, Schweizerische Agentur für Energieeffizienz, available on line at: [http://www.energieeffizienz.ch/fr/dam/ratgeber/2017\\_Effiziente\\_Warmwasser\\_Systeme/WEB\\_Effiziente\\_Warmwasser-Systeme\\_201706\\_f.pdf](http://www.energieeffizienz.ch/fr/dam/ratgeber/2017_Effiziente_Warmwasser_Systeme/WEB_Effiziente_Warmwasser-Systeme_201706_f.pdf) (accessed on 29.04.2019)
- [2] “*Verordnung zur Reduktion von Risiken beim Umgang mit bestimmten besonders gefährlichen Stoffen, Zubereitungen und Gegenständen*”, *Graphische Zusammenfassung Stand April 2018*, available online at: [https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/chemikalien/fachinfo-daten/regelung\\_kaelteanlagen-grafischezusammenfassung.pdf.download.pdf/regelung\\_kaelteanlagen-grafischezusammenfassung.pdf](https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/chemikalien/fachinfo-daten/regelung_kaelteanlagen-grafischezusammenfassung.pdf.download.pdf/regelung_kaelteanlagen-grafischezusammenfassung.pdf)
- [3] De Oña, A, Gkizelis, A., Skačanová, K., Boccabella, E., Global market and policy trends for CO<sub>2</sub> and Ammonia as natural refrigerants, Proc. 7<sup>th</sup> IIR Conference: Ammonia and CO<sub>2</sub> Refrigeration Technologies, May 11-13 2017, Ohrid, Republic of Macedonia.
- [4] Saito, K., Latest heat pump technologies in Japan, Proc. 12<sup>th</sup> IEA Heat Pump Conference, May 15-18 2017, Rotterdam, Netherlands.
- [5] Reulens, W., Natural Refrigerant CO<sub>2</sub>, Leonardo project "NARECO2", Ed. KHLim vzw, 2009, ISBN 9789081346733.
- [6] Enex “Heat pumps quick calculator”, available online at: <https://www.enex.it/en/calculator/> (accessed on 29.04.2019)
- [7] WPZ test results of water/water heat pumps based on EN 14511 and EN 14825, pag. 5 to pag. 10, update 30.08.2018, [https://www.ntb.ch/fileadmin/NTB\\_Institute/IES/pdf/Projekte\\_WPZ/PruefResSW180830.pdf](https://www.ntb.ch/fileadmin/NTB_Institute/IES/pdf/Projekte_WPZ/PruefResSW180830.pdf) (accessed on 29.04.2019)

## Abkürzungsverzeichnis

Die im Bereich Wärmepumpe meist gebrauchten Abkürzungen sind nachfolgend alphabetisch aufgelistet

AZ	Arbeitszahl (COP über eine bestimmte Messdauer)
BFE	Bundesamt für Energie
BWW	Brauchwarmwasser (gleich wie WW)
COP	Coefficient of performance
eff.	effektiv
EFH	Einfamilienhaus
El. oder el.	Elektrisch
FKW	Fluor-Kohlen-Wasserstoffe (Kältemittel)
FWS	Fachvereinigung Wärmepumpen Schweiz
HFO	Hydro-Fluor-Olefine (Kältemittel)
HFKW	teilhalogenierte Fluor-Kohlen-Wasserstoffe
HPT	Heat Pumping Technologies (IEA Collaboration Programme)
Hzg.	Heizung
IEA	Internationale Energie Agentur
JAZ	Jahresarbeitszahl (AZ über ein Jahr oder eine Heizperiode gemessen)
L/W	Luft/Wasser
LZ	Leistungsziffer, siehe AZ
Min.	Minimum
Max.	Maximum
PV	Photovoltaik
RL	Rücklauf
S/W	Sole/Wasser
SP	Technischer Speicher
Temp.	Temperatur
th	thermisch
VL	Vorlauf
WA	Wärmeabgabe (meist Radiatoren oder Fussbodenheizung)
WP	Wärmepumpe
WW	Warmwasser (gleich wie BWW)
W/W	Wasser/Wasser

## Adressen Referenten

<b>Beat Vonlanthen</b>	Präsidium Fachvereinigung Wärmepumpen Schweiz Steinerstrasse 37 3006 Bern info@fws.ch
<b>John Dulac</b>	International Energy Agency Energy Technology Policy Division 31-35 rue de la Fédération 75739 Paris john.dulac@iea.org
<b>Beat Wellig</b>	Hochschule Luzern - Technik & Architektur CC Thermische Energiesysteme & Verfahrenstechnik Technikumstrasse 21 6048 Horw beat.wellig@hslu.ch
<b>Ralf Dott</b>	Fachhochschule Nordwestschweiz Hochschule für Architektur, Bau und Geomatik Institut Energie am Bau Hofackerstrasse 30 4132 Muttenz ralf.dott@fhnw.ch
<b>Evelyn Bamberger</b>	SPF Institut für Solartechnik Oberseestrasse 10 8640 Rapperswil evelyn.bamberger@spf.ch
<b>Gregor Steinke</b>	Fachhochschule Nordwestschweiz Hochschule für Architektur, Bau und Geomatik Institut Energie am Bau Hofackerstrasse 30 4132 Muttenz gregor.steinke@fhnw.ch
<b>Cordin Arpagaus</b>	Interstaatliche Hochschule für Technik Buchs NTB Institut für Energiesysteme IES Werdenbergstrasse 4 9470 Buchs cordin.arpagaus@ntb.ch
<b>Sophia Wallerand</b>	École Polytechnique Fédérale de Lausanne EPFL Rue de l'Industrie 17 1950 Sion anna.wallerand@epfl.ch

**Lorenz Brenner**

ZHAW School of Engineering  
Institut für Energiesysteme und Fluid-Engineering  
Technikumstrasse 9  
8401 Winterthur  
breo@zhaw.ch

**Jonas Schönenberger**

Frigo-Consulting AG  
Lerzenstrasse 8  
8953 Dietikon  
j.schoenenberger@frigoconsulting.ch

**Enrico Da Riva**

Haute École d'ingénierie et de Gestion  
du Canton de Vaud HEIG-VD  
Institut de Génie Thermique (IGT)  
Avenue des Sports 20  
1400 Yverdon-les-Bains  
enrico.dariva@heig-vd.ch

## Adressen Organisationsteam

### **Bundesamt für Energie BFE ([www.bfe.admin.ch](http://www.bfe.admin.ch))**

**Stephan Renz**

Leitung Forschungsprogramm  
Wärmepumpen und Kältetechnik  
des Bundesamts für Energie  
c/o  
Beratung Renz Consulting  
Elisabethenstrasse 44  
4010 Basel  
Tel. 061 271 76 36  
[info@renzconsulting.ch](mailto:info@renzconsulting.ch)

**Carina Alles**

Bundesamt für Energie BFE  
Sektion Energieforschung und Cleantech  
3003 Bern  
Tel. 058 462 43 43  
[carina.alles@bfe.admin.ch](mailto:carina.alles@bfe.admin.ch)

**Rita Kobler**

Bundesamt für Energie BFE  
Sektion Erneuerbare Energie  
3003 Bern  
Tel. 058 463 30 14  
[rita.kobler@bfe.admin.ch](mailto:rita.kobler@bfe.admin.ch)

### **Fachvereinigung Wärmepumpen Schweiz FWS ([www.fws.ch](http://www.fws.ch))**

**Stephan Peterhans**  
Geschäftsführer

Informationsstelle Wärmepumpen  
Steinerstrasse 37  
3006 Bern

**Claudia Müller**  
Leitung Informationsstelle

Tel. 031 350 40 65  
[claudia.mueller@fws.ch](mailto:claudia.mueller@fws.ch); [stephan.peterhans@fws.ch](mailto:stephan.peterhans@fws.ch)

Centre d'information pour les pompes à chaleur  
Chemin de Tabac-Rhône 12  
1893 Illarsaz  
[info@pac.ch](mailto:info@pac.ch)

Centro d'informazione per le pompe di calore  
c/o Associazione TicinoEnergia  
Via San Giovanni 10  
6500 Bellinzona  
[milton.generelli@ticinoenergia.ch](mailto:milton.generelli@ticinoenergia.ch)

# WPSYSTEMMODUL

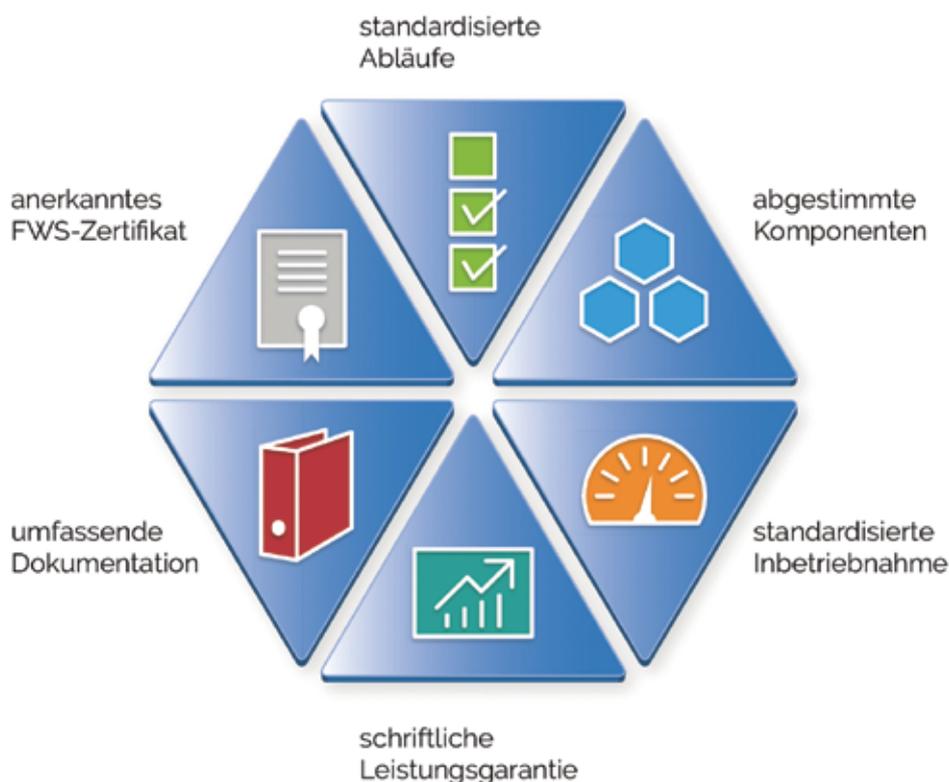
EFFIZIENTE WÄRMEPUMPEN MIT SYSTEM

Das Wärmepumpen-System-Modul ist ein Schweizer Standard für die optimale Planung und Erstellung von Wärmepumpen-Anlagen für Neubau und Sanierung. Das Wärmepumpen-System-Modul baut auf dem bestehenden internationalen Gütesiegel für Wärmepumpen auf.

## Ihre Vorteile:

- > Optimal aufeinander abgestimmte Systemkomponenten sorgen für hohe Qualität.
- > FWS-zertifizierte Wärmepumpen-System-Module sparen Energie und senken Betriebskosten.
- > Verbindlich geregelte und standardisierte Abläufe von der Planung bis zur Inbetriebnahme.

## GARANTIERTER, NACHVOLLZIEHBARER NUTZEN MIT NACHHALTIGER WIRKUNG



Das Wärmepumpen-System-Modul ist eine Initiative von EnergieSchweiz und eine gemeinsame Entwicklung namhafter Wärmepumpen-Hersteller, Lieferanten und führender Branchenverbände.

Weil uns Ihre Zufriedenheit und die Energieeffizienz am Herzen liegen.

[WWW.WP-SYSTEMMODUL.CH](http://WWW.WP-SYSTEMMODUL.CH)

Mit Unterstützung von