News aus der Wärmepumpen-Forschung

Wärmepumpen und Sonnenenergie
Thermische Vernetzung und Stromnetze
Wärmepumpen in Gewerbe und Industrie

Mittwoch, 22. Juni 2016 HTI Burgdorf

22. Tagung des Forschungsprogramms
Wärmepumpen und Kälte
des Bundesamts für Energie BFE

Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Bundesamt für Energie BFE

News aus der Wärmepumpen-Forschung

Wärmepumpen und Sonnenenergie
Thermische Vernetzung und Stromnetze
Wärmepumpen in Gewerbe und Industrie

Tagungsband zur
22. Tagung des Forschungsprogramms
Wärmepumpen und Kälte

22. Juni 2016
Berner Fachhochschule
HTI Burgdorf

Herausgeber
Bundesamt für Energie (BFE)

Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Bundesamt für Energie BFE

Impressum

Datum: Juni 2016
Bundesamt für Energie, Forschungsprogramm Wärmepumpen und Kälte
Mühlestrasse 4, CH-3063 Ittigen
Postadresse: CH-3003 Bern

www.bfe.admin.ch

Bezugsort der Publikation: www.bfe.admin.ch/forschung/waermepumpe

Vorwort

News aus der Wärmepumpen-Forschung

Wärmepumpen *leisten einen substantiellen Beitrag zur Verbesserung der Energieeffizienz und zur Reduktion der CO_2-Emissionen im Gebäudebereich. Neben Anlagen für Einfamilienhäuser - hier liegt der Anteil bei Neubauten bei rund 80 % - werden vermehrt grössere Anlagen in Mehrfamilienhäusern, in Fernwärmeversorgungen, und auch im Gewerbe und in der Industrie eingesetzt. Herausforderungen sind die optimale Kombination mit Sonnenergie sowie thermischen und elektrischen Netzen.*

An der ***22. Wärmepumpentagung in Burgdorf*** *werden Sie wiederum Neues über den Stand der Forschung und Entwicklung, aber auch über Erkenntnisse aus der Praxis erfahren. Nach einer Übersicht über die nationale und internationale Forschungszusammenarbeit beschäftigt sich ein erster Themenblock mit der* ***Kombination von Wärmepumpen mit Sonnenenergie*** *und Eisspeichern. Als Gastreferent wird zudem Marek Miara vom Fraunhofer Institut in Freiburg über die Einsatzmöglichkeiten von Wärmepumpen in Mehrfamilienhäusern berichten. Ein Referat über die* ***thermische Vernetzung*** *rundet diesen Teil ab und leitet zum zweiten Themenblock, die Nutzung der* ***Wärmepumpentechnologie in Gewerbe und Industrie*** *über. Als Gastreferent wird Rainer Jakobs vom IZW aus Hannover über Beispiele berichten, die in einem Projekt der Internationalen Energie Agentur (IEA) erarbeitet wurden. Die Kombination von Kühlung und Wärme spielt insbesondere in Einkaufszentren eine Rolle. Sie werden hocheffiziente Lösungen kennenlernen, die in einem vom BFE unterstützten Pilotprojekt gezeigt wurden. Intensiv mit der Wärmepumpentechnologie beschäftigt sich der Computergigant IBM in seinem Forschungslabor in der Schweiz. Mit der Adsorptionstechnologie sollen in der Zukunft Computer hocheffizient gekühlt werden können. Auf Computer setzt schlussendlich auch BKW zur Steuerung ihrer* ***Stromnetze****. Ein gutes Zusammenspiel der Stromnetze und der Wärmepumpen kann beiderseits Vorteile bringen und die Einbindung der additiven Stromerzeugung verbessern.*

Die Tagung bietet Ihnen auch Gelegenheit, sich mit Forschenden sowie mit Herstellern, Planern und Installateuren auszutauschen und in Diskussionen Ihre Meinung einzubringen. Die Burgdorfer Wärmepumpentagung ist das ***jährliche Treffen der Schweizer Wärmepumpenfachleute.***

Carina Alles
Leiterin des BFE-Forschungsbereichs Wärmepumpen und Kälte

Stephan Renz
Leiter des BFE Forschungsprogramms Wärmepumpen und Kälte

Avant-propos

Nouvelles de la recherche sur les pompes à chaleur

*Les **pompes à chaleur** assurent une contribution substantielle à l'amélioration de l'efficacité énergétique et à la réduction des émissions de CO_2 dans le secteur des bâtiments. En dehors des installations pour villas individuelles - dans ce domaine, la part dans les constructions neuves atteint environ 80% - de plus en plus d'installations plus importantes sont utilisées dans les immeubles à plusieurs appartements, les alimentations de chaleur à distance et également dans l'artisanat et l'industrie. Dans ce domaine une combinaison optimale avec l'énergie solaire, de même qu'avec les réseaux thermiques et électriques constitue des véritables défis.*

*Vous prendrez connaissance au **22ème séminaire sur les pompes à chaleur à Berthoud** du nouvel état de la recherche et des développements, de même que de connaissances pratiques. Après un aperçu de la collaboration nationale et internationale de la recherche, un premier ensemble de thèmes sera consacré à la **combinaison des pompes à chaleur et de l'énergie solaire**, ainsi qu'aux accumulateurs de glace. Marek Miara du Fraunhofer Institut de Freiburg, intervenant-hôte, rendra compte des possibilités d'utilisation des pompes à chaleur dans les immeubles à plusieurs appartements. Un exposé sur la **mise en réseau thermique** complète cette partie et conduit au second ensemble de thèmes, l'utilisation de la **technologie des pompes à chaleur dans l'artisanat et l'industrie**. Rainer Jakobs de l'IZW de Hanovre, également intervenant-hôte, rendra compte d'exemples mis en œuvre dans un projet de l'Agence internationale de l'énergie (AIE). La combinaison du refroidissement et de la chaleur joue un rôle important, en particulier dans les centres commerciaux. Il vous sera présenté des solutions hautement efficaces d'un projet-pilote soutenu par l'OFEN. Le géant de l'informatique IBM se consacre intensivement à la technologie des pompes à chaleur dans son laboratoire de recherche en Suisse. Dans l'avenir, des ordinateurs pourront être refroidis très efficacement avec la technologie de l'adsorption. Les FMB comptent aussi finalement sur l'ordinateur pour piloter leurs réseaux. Une bonne combinaison des **réseaux électriques** et des pompes à chaleur peut apporter des avantages des deux côtés et améliorer l'intégration de la production additive du courant.*

*Le séminaire vous offre également la possibilité d'échanger avec des chercheurs, de même que des fabricants, des planificateurs et installateurs et de faire part de votre opinion dans les discussions. Le séminaire sur les pompes à chaleur de Burgdorf est la **rencontre annuelle des spécialistes suisses des pompes à chaleur**.*

Carina Alles
Cheffe du domaine de recherche pompes à chaleur et froid

Stephan Renz
Chef du programme de recherche pompes à chaleur et froid

Referenten

Stephan Renz
Programmleiter des BFE-Forschungsprogramms Wärmepumpen und Kälte
Beratung Renz Consulting
Elisabethenstrasse 44
CH-4410 Basel
renz.btr@swissonline.ch

Jean-Christophe Hadorn
BASE CONSULTANTS SA
8 rue du Nant - CP 6268
CH-1211 Genève 6
jchadorn@baseconsultants.com

Stefan Minder
Weisskopf Partner GmbH
Bau Energie Umwelt
Albisriederstrasse 184 b
CH-8047 Zürich
stefan.minder@weisskopf-partner.ch

Rita Kobler
Marktbereichsleiterin Wärmepumpen
Bundesamt für Energie BFE
CH-3003 Bern
rita.kobler@bfe.admin.ch

Marek Miara
Head of Group Heat Pumps
Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE
Division Thermal Systems and Buildings
Heidenhofstrasse 2
D-79110 Freiburg
marek.miara@ise.fraunhofer.de

Andreas Genkinger
Fachhochschule Nordwestschweiz
Hochschule für Architektur, Bau und Geomatik
Institut Energie am Bau
St. Jakobs-Strasse 84
CH-4132 Muttenz
andreas.genkinger@fhnw.ch

Joachim Ködel
Hochschule Luzern
Technik & Architektur
Technikumstr. 21
CH-6048 Horw
joachim.koedel@hslu.ch

Leszek Wojtan
Key Account Manager - Sales Department
Friotherm AG
Langfeldstrasse 104
CH-8500 Frauenfeld
leszek.wojtan@friotherm.com

Rainer Jakobs
Informationszentrum Wärmepumpen
und Kältetechnik IZW e. V.
Post-box 3007
D-30030 Hannover
Jakobs@IZW-online.de

Jonas Schönenberger
FRIGO-CONSULTING AG
Feldstrasse 30
CH-3073 Gümligen b. Bern
j.schoenenberger@frigoconsulting.ch

Patrick Ruch
IBM Zurich Research Laboratory
Saeumerstr. 4
CH-8803 Rueschlikon
ZRLRUC@ch.ibm.com

Beat Bachmann
BKW Technology Centre
Smart Grid Engineering
Dr. Schneider-Strasse 14
CH-2560 Nidau
Bachmann.Beat@bkw.ch

Tagungs-Moderation

Carina Alles

Bereichsleiterin Industrielle Prozesse, Verbrennung, Wärmepumpen und Kältetechnik
Sektion Energieforschung
Bundesamt für Energie
CH-3003 Bern
carina.alles@bfe.admin.ch

Stephan Renz

Programmleiter des BFE-Forschungsprogramms Wärmepumpen und Kälte
Beratung Renz Consulting
Elisabethenstrasse 44
CH-4410 Basel
renz.btr@swissonline.ch

Inhaltsverzeichnis

Wärmepumpenforschung in der Schweiz und internationale Zusammenarbeit **9**
Stephan Renz

Solaire et pompe à chaleur: Mariage d'amour ou de raison? **21**
Jean Christophe Hadorn

Eisspeicher-Wärmepumpen-Anlagen mit Sonnenkollektoren Wirtschaftlichkeit, Umweltbelastung, Marktpositionierung **34**
Stefan Minder

Effizienz kombinierter Systeme mit Wärmepumpen **48**
IEA HPT Annex 39: A common method for testing and rating of residential HP and AC performance
Andreas Genkinger

Wärmepumpen in Mehrfamilienhäusern **57**
Die Lösung um CO_2-Rduktionsziele zur erreichen?
Marek Miara

Thermische Vernetzung: Schlüsselrolle für Wärmepumpen? **66**
Joachim Ködel

Gewerbliche und industrielle Wärmepumpen-Anwendung weltweit **69**
IEA HPT Annex 35/48
Rainer Jakobs

Effiziente CO_2-Anlagen zum Heizen und Kühlen **78**
Jonas Schönenberger

THRIVE: Thermisch betriebene Adsorptions-Wärmepumpen **88**
Lösung für Recherchencenter und mehr?
Patrick Ruch

Smart Grid Ready für Wärmepumpen? Zwei Bit für die Zukunft von Netzbetreiber, Energielieferant, Anlagenbetreiber und Kunde **100**
Beat Bachmann

Abkürzungsverzeichnis **104**

Nützliche Adressen **105**

Stephan Renz
Leiter Forschungsprogramm Wärmepumpen und Kälte
des Bundesamtes für Energie
c/o Beratung Renz Consulting
4010 Basel
info@renzconsulting.ch
www.bfe.admin.ch/forschungwkk

Wärmepumpenforschung in der Schweiz und internationale Zusammenarbeit

Förderung der Energieforschung in der Schweiz

Die Energieforschung ist ein wichtiges Standbein der Schweizer Energiepolitik. Der Bund setzt dafür jährlich einen Grundbeitrag von rund 200 Millionen Franken ein. Diese Mittel werden für Forschungsarbeiten im ETH-Bereich (ETHZ, EPFL, PSI, Empa) sowie für die Unterstützung von Forschungsprojekten durch den Schweizerischen Nationalfonds (SNF), die Kommission für Technologie und Innovation (KTI) sowie durch das Bundesamt für Energie (BFE, rund 20 Millionen Franken) verwendet. Im Rahmen der Energiestrategie 2050 des Bundes wurden für die Periode 2013 -2016 für den Aktionsplan «Koordinierte Energieforschung» zusätzliche 202 Millionen Franken eingesetzt. Eine Verlängerung des Aktionsplans für die Periode 2017 – 2020 ist beantragt. Für Pilot-, Demonstrations- und Leuchtturmprojekte des BFE stehen für die Beschleunigung der Umsetzung der Energiestrategie 2050 zudem jährlich 35 Millionen Franken zur Verfügung stehen. Die Mitarbeit von Schweizer Forschenden im Forschungsprogramm Horizion 2020 der Europäischen Union wird separat mit Mitteln des Staatssekretariats für Bildung, Forschung und Innovation (SBFI) finanziert.

Hinzu kommen finanzielle Mittel der Kantone, die sie für Fachhochschulen und Universitäten sowie spezielle Innovationsfonds zur Verfügung stellen. Auch die Gas-, Erdöl und Elektrizitätswirtschaft verfügt über Fonds zur Förderung der Energieforschung.
Auf Stufe Bund fördern folgende Organisationen die Energieforschung:

- Im **Schweizerischen Nationalfonds (SNF)**, der die Grundlagenorientierte Forschung fördert, laufen aktuelle zwei Nationale Forschungsprogramme (NFP) zum Thema Energie: Im NFP 70 «Energiewende» werden naturwissenschaftliche/technische und im NFP 71 «Steuerung des Energieverbrauchs» gesellschaftlich/ökonomische Aspekte für die Umsetzung der Energiestrategie 2050 untersucht. [1]
- Das **Bundesamt für Energie BFE** deckt mit seinen 24 *Energieforschungsprogrammen* das gesamte Spektrum der Energieforschung ab. Die Hälfte beschäftigt sich mit dem Thema Energieeffizienz – wozu auch die Wärmepumpenforschung gehört - und die andere Hälfte mit erneuerbaren Energien. Weiter gibt es vier Forschungsprogramme zur Kernenergie und ein sozio-ökonomisches Forschungsprogramm.
  Seit 2013 stehen dem *Pilot- und Demonstrationsprogramm* des BFE zusätzliche Mittel zur Verfügung. Sie sollen die Erprobung und Überführung innovativer Energietechnologien in den Markt beschleunigen und einen Beitrag an die Umsetzung der Energiestrategie 2050

leisten. Dazu gehört auch das Programm für *Leuchtturmprojekte*, das auf die Demonstration von Schlüsseltechnologien fokussiert ist.
Das *Programm EnergieSchweiz* ist auf die Sensibilisierung, Information, Beratung, Aus- und Weiterbildung, Qualitätssicherung, Vernetzung und Förderung fortschrittlicher Projekte in den Bereichen erneuerbare Energien und Energieeffizienz ausgerichtet. [2]

- Die **Kommission für Technologie und Innovation (KTI)** fördert die wettbewerbliche Forschung - nicht nur Energiethemen - bei Kooperationen von Industrie und Hochschulen. Bezahlt wird dabei der Aufwand des Hochschulpartners und der Industriepartner finanziert seine Arbeiten selber.
  Die KTI leitet seit 2013 zudem im Auftrag des Bundesrats den Aktionsplan «Koordinierte Energieforschung Schweiz». Das Ziel ist der Aufbau von interuniversitär vernetzten Forschungskompetenzzentren, den Swiss Compentence Centers for Energy Research (SCCER). In einer ersten Phase 2013 -2016 wurden acht SCCER gegründet. Der Bund stellte dafür 202 Millionen Franken zur Verfügung. Wärmepumpentechnologien werden im *SCCER «Futur Energy Efficient Building & District»* im *SCCER «Efficiency of Industrial Processes»* erforscht. [3]

Ziele des Bundes an die Energieforschung

Energieforschungskonzept des Bundes

Die Energieforschung der öffentlichen Hand richtet sich nach dem Konzept der Energieforschung des Bundes [4]. Dieses wird im 4-Jahres-Turnus durch die Eidgenössische Energieforschungskommission (CORE) verfasst. Das Konzept 2017 – 2020 wurde im April 2016 im Rahmen der alle 4 Jahre stattfindenden Energieforschungskonferenz des Bundes präsentiert. Es gliedert sich in fünf Schwerpunkte mit folgenden Leitsätzen:

- **Sozio-ökonomische und regulatorische Aspekte**
  In Zukunft sollen Energieverbrauch und CO_2-Emissionen substanziell reduziert werden, dies trotz Wirtschaftswachstum. Dazu ist eine weitere Lockerung der Kopplung von Wachstum und Wohlstand einerseits und Energiekonsum andererseits notwendig. Zudem soll ein Umbau des Energiesystems stattfinden, der einen schrittweisen Ausstieg aus der Kernenergie sowie einen vermehrten Einsatz von erneuerbarer Energie beinhaltet. Dieser Umbau sollte möglichst ökonomisch effizient sein und auf einer breiten gesellschaftlichen Akzeptanz aufgebaut werden.
- **Wohnen und Arbeiten der Zukunft:**
  Der Gebäudepark soll in Zukunft klimaneutral und energieeffizient betrieben werden. Er trägt aktiv dazu bei, die Bedarfs- und Produktionsextrema im elektrischen Netz auszugleichen. Die menschlichen Bedürfnisse im Bereich Wohnen und Arbeiten werden auf ressourcenschonende Weise befriedigt.
- **Mobilität der Zukunft:**
  Durch Verkehrstelematik, fortschrittliche Antriebstechnik und innovative Mobilitätskonzepte zu einer attraktiven, leistungsfähigen und emissionsarmen Mobilität – in Zukunft sollen der Gesamtenergieverbrauch sowie die Treibhausgas- und Schadstoffemissionen trotz Mobilitätswachstum substanziell reduziert werden. Dazu ist die Forschung und Entwicklung im Bereich hocheffizienter Transporttechnologien, Treibstoffen aus erneuerbarer Energie und mobiler Speichertechnologien voranzutreiben sowie ein besseres Verständnis zum Nutzerverhalten neuer Mobilitätsformen zu erarbeiten.

- **Energiesyssteme der Zukunft:**
  Intelligent vernetzte Energiesysteme sind das Fundament einer sicheren, belastbaren und nachhaltigen Energieversorgung. Die Integration energetischer Subsysteme erlaubt die ganzheitliche Verknüpfung von Energieträgern wie Strom, Wärme/Kälte, Treibstoffe mit Infrastrukturen wie Hochspannungs-, Wasser- und Transportnetzen, aber auch mit Kommunikationsinfrastrukturen. Das Ziel ist eine optimale Effizienz und ein Minimum an ungenutzten Energiepotenzialen, negativen Umwelteinflüssen und Risiken für die Bevölkerung.
- **Prozesse der Zukunft:**
  Neuartige Verfahren und Werkstoffe werden durch Life-Cycle-Analysis-basierte Entwicklungsprozesse für die Herstellung von ressourcenoptimierten und marktfähigen Produkten eingesetzt. Der Energie- und Materialverbrauch der Produktionsanlagen ist durch hocheffiziente Komponenten minimiert. Informationstechnologien unterstützen die Prozessintegration bis hin zur Energieoptimierung der Produkte im Betrieb. Erneuerbare und gut rezyklierbare Rohstoffe haben Vorrang. Das Ziel ist, in der natürlichen Umwelt einen möglichst kleinen ökologischen Fussabdruck zu hinterlassen.

Die Forschung zu Wärmepumpen und Kältetechnik wird vor allem durch die Schwerpunkte «Wohnen und Arbeiten» sowie «Prozesse» abgedeckt.

Ziele des Bundesamts für Energie an die Wärmepumpenforschung

Basierend auf dem Energieforschungskonzept des Bundes leitet des BFE die Ziele für seine in 24 Fachbereiche gegliederten Forschungsprogramme ab. Für das Forschungsprogramm Wärmepumpen und Kälte gilt für die Periode 2017 - 2020:
«Die Wärmepumpe ist eine hocheffiziente Technologie, die mit geringem Einsatz von Exergie (beispielsweise Elektrizität) eine sonst nicht verwendbare Wärmequelle (Anergie) für Raumheizung, Brauchwarmwasser oder Prozesse nutzbar macht. Die Technologie hat deshalb eine grosse Bedeutung für den zukünftigen Gebäudepark ohne fossile Energieträger, die Effizienzverbesserung im Gewerbe und in der Industrie sowie bei Mobilitätssystemen. Der zunehmende Kühl- und Kältebedarf erfordert auch die Verbesserung der technologisch identischen Kältemaschine.
Wärmepumpen erreichen heute einen Gütegrad von 45 % und liegen damit noch deutlich unter ihrem theoretischen Potential. Durch gezielte Forschung zur Verbesserung des Kreisprozesses - auch für die Anwendung von Arbeitsmedien mit minimalen Umweltauswirkungen - soll der Gütegrad erhöht werden. Evaluiert und erforscht werden sollen neben Zweiphasenkompression oder Expansionsenergienutzung auch vielversprechende, nicht auf Kompressionsmaschinen basierende Systeme. Zudem sollen Mikrosysteme entwickelt werden, beispielsweise Turboverdichter, die geeignet sind für Gebäude mit sehr geringem Wärmebedarf oder für die Nutzung kleiner Abwärmeströme in verfahrenstechnischen Prozessen. Hier sind auch Systeme erforderlich, die auf Temperaturen über 100 °C arbeiten.
Smart Heat Pumps können die Datenvielfalt der oft interdependenten, aber meistens zeitlich und physikalisch nicht steuerbaren Umsysteme für einen hocheffizienten und wirtschaftlichen Betrieb nutzen. Um diese Vision umzusetzen, muss die Wärmepumpe in komplexe Systeme mit Wärmequellen, Wärmeverbrauchern, Speichern und additiven Energiesystemen wie Photovoltaik oder Solarthermie integriert werden, wobei auch externe Einflussfaktoren wie die Verfügbarkeit von Strom, die Belastungssituation der Stromnetze und Meteodaten zu berücksichtigen sind.

Schweizer Unternehmen und Forschungseinrichtungen waren massgeblich an der Entwicklung der Wärmepumpentechnologie beteiligt. Nach wie vor sind Sie international gut positioniert, auch in tragenden Rollen in EU oder IEA Projekten. Durch gezielte Unterstützung zukunftsweisender Innovationen soll die Kompetenz weiter ausgebaut werden». [3]

Wärmepumpen-Forschungsprojekte in der Schweiz

Im Folgenden werden einige vom BFE und dem SNF geförderte Projekte aufgelistet. Die Berichte von abgeschlossenen Projekten werden auf der Website des BFE (www.bfe.admin.ch) publiziert. Zahlreiche der Projekte wurden auch an der BFE-Wärmepumpentagung in Burgdorf vorgestellt und die Berichte dazu im Tagungsband gedruckt.

Sole/Wasser-Wärmepumpen mit kontinuierlicher Leistungsregelung
(BFE, 2012 – 2015, Hochschule Luzern, Prof. B. Wellig)
Im 2011 abgeschlossenen BFE-Projekt „Effiziente Luft/Wasser-Wärmepumpen durch kontinuierliche Leistungsregelung“ wurde eine Verbesserung der Jahresarbeitszahl von von 10% - 50% nachgewiesen. Das Mass der Verbesserung hängt vom Kompressortyp und vom Anwendungsfall ab. Die gewonnenen Erkenntnisse wurden in einem zweiten Projekt für die Anwendung in Sole/Wasser- und Wasser/Wasser-Wärmepumpen (S/W-WP und W/W-WP) genutzt. Das Ziel des Projekts war, die Effizienzsteigerung von S/W-WP durch kontinuierliche Leistungsregelung zu quantifizieren und allgemeingültige Auslegungs- und Planungsgrundlagen für die Realisierung leistungsgeregelter S/W-WP zu erarbeiten. Mittels Simulation und Experimenten wurde eine Regelung entwickelt, welche in Abhängigkeit der Zustände der Wärmequelle und -senke den Kältemitteldurchsatz und die Drehzahl der Sole-Umwälzpumpe optimal regelt. Ein Prototyp einer leistungsgeregelten S/W-WP wurde realisiert und getestet. Es konnte eine Verbesserung der Leistungsziffer im Vergleich zur Ein/Aus-Regelung zwischen 5% - 11 % nachgewiesen werden. Das Ausmass der Verbesserung hängt von der Bohrlochtemperatur und der Vorlauftemperatur der Gebäudeheizung ab.
Präsentation an der 21. Wärmepumpentagung 2015

Entwicklung einer optimalen Einheit aus Wärmepumpe und thermischem Energiespeicher (BFE, 2012 – 2015, Hochschule Luzern, Prof. J. Worlitschek)
Im Rahmen der Energiewende müssen die Produktion und der Verbrauch von Wärme und Elektrizität verstärkt entkoppelt werden. Ziel dieses Projektes ist es, die Kombination von Wärmepumpe und einem innovativen thermischen (technischen) Energiespeicher für Gebäude (für Heizung und Brauchwassererwärmung) zu analysieren, zu modellieren und optimale Auslegungskriterien zu entwickeln. Ein Funktionsmuster dient der experimentellen Verifizierung des Modelles.
Präsentation an der 21. Wärmepumpentagung 2015

Mitwirkung IEA Annex Task 42 „Heat Pumps in Smart Grids“
(BFE, 2013 – 2016, Hochschule Luzern, Prof. J. Worlitschek)
Das laufende Projekt ‚Entwicklung einer optimalen Einheit aus Wärmepumpe und thermischem Energiespeicher ‘ enthält zahlreiche Fragestellungen, die auch im Annex 42 ‚Heat Pumps in Smart Grids‘ des IEA Heat Pump Programme behandelt werden: Um die Flexibilität zwischen Elektrizitätsangebot und Wärmenachfrage für Wärmepumpen zu erreichen, braucht es technisch und betrieblich gut integrierte Einheiten mit thermischen Speichern. Durch die

Mitarbeit im Annex 42 wird der Projektinhalt durch internationale Aspekte erweitert und die Anwendungsmöglichkeiten in Smart Grids konkretisiert.
Präsentation an der 21. Wärmepumpentagung 2015

LEWASEF Leistungsgeregelte Wärmepumpenanlagen mit Solar-Eisspeicher und Fotovoltaik (BFE, 2015 – 2017, Fachhochschule Nordwestschweiz, Prof. Th. Afjei)
Im Projekt LEWASEF werden technische Grundlagen erarbeitet, um innovative und effiziente Wärmepumpenheizsysteme (z.B. Drehzahlgeregelte Wärmepumpe mit Eisspeicher und einer Solarthermie-/Photovoltaik-Kombination) mittels Simulationen näher zu untersuchen und effiziente Systemschaltungen daraus abzuleiten. Im abgeschlossenen Projekt «SOFOWA - Kombination von Solarthermie, Fotovoltaik und Wärmepumpen» haben sich drei vielversprechende Stossrichtungen für die Entwicklung einer zukünftigen, erneuerbaren Wärmeversorgung ergeben. Deshalb wird im Arbeitspaket AP1 die Umsetzung der Kombination Photovoltaik plus Wärmepumpe untersucht. Die weitere Optimierung und Entwicklung von über einen Sole-Zwischenkreis eingebundenen Wärmequellen sowie von Anwendungen in Bestandsgebäuden werden im Arbeitspaket AP2 untersucht. Das Arbeitspaket AP3 stellt die kombinierte solare Strom- und Wärmeerzeugung in den Vordergrund.

CombiVolt - Steigerung des Photovoltaik- Eigenverbrauchs durch intelligente Wärmepumpen (BFE, 2015 – 2019, Institut f. Solartechnik SPF, Dr. Michel Haller)
Im Projekt CombiVolt wird der Nutzen intelligenter Wärmepumpen-Steuerungen für den Photovoltaik-Eigenverbrauch und für die Netzstabilität mit Gesamtsystem-Labortests und Simulationen analysiert. Dabei werden die beiden Optionen thermischer Speicher und elektrischer Speicher zur Lastverschiebung einander vergleichend gegenübergestellt, und es werden auch künftig mögliche Entwicklungen von Strompreismodellen in Szenarien berücksichtigt.

Zweiphasenkompressor für Wärmepumpen
(Mehrere BFE-Projekte 2012 – 2017, Hochschule Rapperswil, Prof. M. Friedl)
Das Forschungsprojekt "Zweiphasenkompressor für Wärmepumpen" hat zum Ziel, die Effizienz von Wärmepumpen durch den Betrieb des Kompressors im Zweiphasengebiet deutlich zu steigern. In Projektphase 1 konnte in der Theorie gezeigt werden, dass eine COP-Steigerung von +20% möglich ist, wenn es gelingt, das Kältemittel in feinen Nebel mit Tropfengrössen der Grössenordnung 4 μm zu zerstäuben und den Kompressor thermisch zu isolieren.
In der abgeschlossenen Projektphase 2a konnte dieser feine Nebel am Prüfstand erzeugt werden. Nun soll in Phase 2b das volle Funktionsmuster des Wärmepumpenkreislaufs gebaut und die Wirkungsgradsteigerung experimentell nachgewiesen werden.
Präsentiert an der 20. Wärmepumpentagung 2014

Ölfreie Radialverdichter für mehrstufige Wärmepumpen
(BFE, 2015 – 2017, EPFL, Neuenburg, Prof. J. Schiffmann)
Das Projekt verfolgt drei Ziele: (1) Das Potential von mit ölfreien, mehrstufigen Radialverdichtern betriebenen Wärmepumpen im unteren Leistungsbereich mit hohen Temperaturhüben experimentell aufzuzeigen, (2) den Effekt von beschaufelten Diffusoren auf den Betrieb (Stabilität, COP, Leistungsmodulierung) von zweistufigen Wärmepumpen experimentell zu erfassen und (3) Richtlinien für das Auslegen von Radialverdichter für thermodynamische WP-Kreisläufe zu erarbeiten und zu publizieren.

AirModul All-In-One: Kombiniertes Lüftungs- und Wärmepumpensystem mit hoher Energieeffizienz (BFE, 2014 – 2015, Interstaatliche Hochschule für Technik Buchs, Prof. Stefan Bertsch u. AirModul AG, Peter Häusler)
Das AirModul All-in-One integriert Lüftung, Wärmepumpe und Verbrennung in einem gemeinsamen System, mit einem Wärmetauscherkamin im Zentrum. Dadurch wird bei geringen Betriebs- und Investitionskosten ein energetisch optimales System erzielt. Im vorliegenden Projekt wird die Idee durch Simulation und Labormessung verifiziert und optimiert. Planungsanweisungen wurden erarbeitet und die Effizienz durch Simulation mit herkömmlichen Systemen verglichen.
Präsentation an der 21. Wärmepumpentagung 2015

Effizienzsteigerung von transkritischen CO_2-Kälteanlagen (BFE, 2012 – 2015),
Frigo Consulting AG, J. Schönenberger, E. Wiedenmann
In der Grossgewerbekälte gewannen die CO_2-Kälteanlagen stark an Bedeutung und sie gelten in dieser sowie anderen Anwendungen als Stand der Technik. Im Rahmen eines Forschungsprojekts wurden diverse Methoden, transkritische CO_2-Kälteanlagen effizienter zu gestalten, theoretisch evaluiert und drei davon in Feldanlagen untersucht. Dazu gehörte eine Anlage mit integrierter Expansionsmaschine, die Kombination aus einer CO_2-Kälteanlage und einer Adsorptionskälteanlage sowie eine CO_2-Kälteanlagen mit Parallelkompression. Als vielversprechende Lösung zeigte sich der Einbau von Ejektoren um die Verdampfungstemperatur anzuheben zu können. In einem ersten Pilot- & Demonstrationsprojekt in Bulle wurde damit die Pluskühlung ausgestattet. Das Ergebnis war eine Reduktion des Stromverbrauchs im 15 %. In einem zweiten P&D-Projekt in Ibach wurde die Tiefkühlseite ebenfalls intergriert und die Anzahl Ejektoren erhöht. Das Ergebnis war eine Verbesserung um 20 %.
Präsentation an der 20. u. 22. Wärmepumpentagung 2014 und 2016

THRIVE Thermally Driven Sorption Heat Pumps for Substitution of Electricity and Fossil Fuels (SNF, 2014 – 2017), IBM Research GmbH, Dr. P. Ruch
Das Projekt gliedert sich in drei Hauptaktivitäten:

- Identifizierung von Anwendungsszenarien für thermisch angetriebene Wärmepumpen in der Schweiz
- Entwicklung und Testen einer Adsorptionswärmepumpe mit minimalem Stromverbrauch für ausgewählte Anwendungszenarien
- Charakterisierung der Adsorptionswärmepumpe mittels einer Nachhaltigkeitsbewertung und Vergleich mit alternativen Technologien

Präsentation an der 22. Wärmepumpentagung 2016

Internationale Zusammenarbeit

Die Internationale Zusammenarbeit ist ein wichtiger Faktor für die Verstärkung der Energieforschung in der Schweiz. Einerseits wird damit die Wissensbasis verbreitert, in dem Forschungsarbeiten mit Dritten diskutiert und mit deren Erkenntnissen ergänzt werden. Andererseits wird der Wirkungskreis der Schweizer Energieforschung erweitert, weil Ergebnisse direkt in andere Forschungsarbeiten einfliessen oder an andere Forschende bis hin zu Entscheidungsträgern vermittelt werden. Dies beispielsweise durch die Publikation in gemeinsamen Projektberichten oder Referaten an internationalen Konferenzen. Die Forschungspro-

gramme des BFE sind deshalb in zahlreichen Zusammenarbeitsprogrammen der IEA sowie in Forschungsprogrammen der EU vertreten.

Internationale Energie Agentur (IEA) (www.iea.org)

Die IEA wurde 1974 in Folge der Erölkrise von den OECD gegründet. Im Hauptquartier (IEA Executive Office) in Paris werden beispielsweise die Entwicklung des Energieverbrauchs observiert und prognostiziert (World Energy Outlook) und Empfehlungen für Energietechnologien (Energy Technology Perspektives) abgeben. Die IEA führt aber auch ein Technologie Netzwerk, in dem Vertreter aus der Verwaltung, aus Hochschulen und Forschungseinrichtungen, aber auch aus der Industrie zusammenarbeiten. Das Ziel ist die internationale Zusammenarbeit zwischen öffentlichen Institutionen und der Industrie zu unterstützen und damit schneller Lösungen zur Bewältigung der langfristigen Herausforderungen einer sicheren und umweltfreundlichen Energieversorgung zu finden und umzusetzen. Aktuell sind 39 Technology Collaboration Programme aktiv, welche insgesamt über 6000 Forschende und Experten vereinigen.

Dazu gehört seit 1978 auch das Kooperationsprogramm für die Erforschung, Entwicklung, Demonstration und Promotion der Wärmepumpentechnologien (IEA Technology Collabortation Programme on Heat Pumping Technologies). Es vereint aktuell 16 Länder, wovon 12 europäische sowie Kanada, USA, Japan und Südkorea. Die Vertreter dieser Länder treffen sich jährlich zwei Mal an Executive Committee Meetings und beraten über Projekte, die in Expertengruppen bearbeitet werden. In zahlreichen dieser sogenannten Annexes arbeiten auch Experten aus der Schweiz mit. Die IEA stellt dafür jedoch keine finanziellen Mittel zu Verfügung. Die Experten bringen ihre Arbeiten ein (Task shared) und tauschen sich mit den Kollegen aus anderen Ländern aus. Ein Annex dauert in der Regel drei bis vier Jahre und die Ergebnisse werden dann in einem Bericht publiziert. Die Berichte sind auf der Website des HPT verfügbar. Zur Unterstützung der Arbeit in den Annexes und Verstärkung der unabhängigen Informationsvermittlung führt das IEA HPT ein «Heat Pump Centre» (http://www.heatpumpcentre.org). Dieses betreibt die Website und publiziert viermal jährlich einen News Letter. Zudem organisiert das IEA HPT alle drei Jahre eine Internationale Heat Pump Conference. Diese richtet sich an Forschende aus der Hochschullandschaft aber auch an Vertreter der Industrie. Die nächste findet vom 15. – 18. Mai 2017 in Rotterdam statt (http://hpc2017.org).

Der Vorteil dieser Kooperationsplattform ist ein einfacher Zugang für den internationalen Austausch von Informationen und die Möglichkeit der Zusammenarbeit – und dies nicht nur im meist bekannten europäischen Umfeld. Ein Nachteil ist, das Fehlen von Fördermitteln, die von den Teilnehmern für ihre Arbeiten selber beigesteuert werden müssen.

Einige Beispiele von laufenden Projekten des IEA HPT [5] und
http://www.heatpumpcentre.org:

Annex 40: Heat pump concepts for near zero-energy buildings (2012 – 2015)
Optimisation of concepts for buildings in order to reach Nearly Zero Energy consumption applying heat pumps as core component of the building technology
Operating Agent: C. Wemhöner, HSR, Switzerland
Participating Countries: Canada, Finland, Germany, Japan, Netherlands,
Norway, Sweden, Switzerland, USA

Results so far:

- Case studies and technology comparison for HVAC systems in nZEB across different countries and regions in Europe, Canada and Japan regarding system performance and cost confirm that heat pumps range among the most energy- and cost-effective solutions.
- Prototype developments of integrated heat pump solutions and combinations with other generators have been evaluated. Results include lab-testing and field monitoring of prototypes covering different building functions.
- Field monitoring of heat pumps in nZEB confirm the good performance and remaining optimisation potential in true operation. Field monitoring results also comprise the first evaluations of heat pumps in Nordic nZEB, in Norway.
- Demand-response has been evaluated in field monitoring of heat pumps for residential and office use with e-mobility. Evaluations show a reduction of gridinteraction by the load shift options with the heat pump.

Präsentation an der 20. Wärmepumpentagung 2014

Annex 41 - Cold climate heat pumps (2012 – 2016)
(Improving low ambient temperature performance of air-source heat pumps)
Field test of different fuel driven heat pumps. Compare different system configurations e.g. different sources. Evaluate different technologies for different applications e.g. retrofit versus new buildings. Classification of system schemes, generic system layout
Operating Agent: Van Baxter, Oak Ridge National Laboratory, USA
Participating countries: Austria, Canada, Japan, USA
Results so far:

- Technology solutions exist that can significantly improve the performance of air-source heat pumps in cold and very cold climates.
- All of the solutions identified will result in more complex equipment designs to a greater or lesser degree. The cost-effectiveness and, therefore, market impact of these approaches is yet to be seen.

Annex 42 - Heat Pumps in Smart grids (2014 – 2016)
Arranging the information on heat pumping technologies in such a way that it will lead to better understanding of the opportunities and using these in the right way in order to reduce the use of primary energy consumption and the CO2-emissions as well as energy costs.
Operating Agent: Peter Wagener, Business Development Holland, the Netherlands
Participating countries: Austria, Denmark, France, Germany, Netherlands, South Korea, Switzerland, United Kingdom, USA
Results so far:

- Completion of scenario tool for smart grids by BDH (Dutch national team). This tool is also available for Annex 42 participants for running scenario's.
- The participants are making scenario's per individual country
- In the start of the Annex, the topic was mainly focused on heat pump in smart grids. In the meantime storage is developing itself to a more dominant component/element in this technology field.

Präsentation an 20. Wärmepumpentagung 2014

Annex 43 - Fuel-driven sorption heat pumps (2014 – 2017)
The scope of the work is the use of fueldriven sorption heat pumps in domestic and small commercial or industrial buildings and applications. If applicable, the additional possibility of

supplying cooling may be considered. The main goal is to extend the use of fuel-driven heat pumps by accelerating technical development and market readiness of the technology, as well as to identify market barriers and supporting measures.
Operating Agent: Peter Schossig, Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE, Germany
Participating countries: Austria, France, Germany, Italy, South Korea, United Kingdom, USA. (Observers: Poland, Sweden)
Results so far.

- Two new gas driven heat pumps on sale – Vitosorp 200-F since 04/14 and (Robur K18) in since 09/2015. Two more (Junkers, Buderus) to start summer 2016.
- International Sorption Conference with more than 100 participants organized by Annex 43 members with positive feedback.
- Full session about gas driven heat pumps at the 2015 International heat pump summit organized by Annex 43 with positive feedback.

Präsentation an der 21. Wärmepumpentagung 2015

Annex 44 – Performance indicators for Energy efficient Supermarket buildings (2014 – 2017)
Define system boundaries for evaluation of the energy performance of supermarket buildings; Define performance indicators that will allow the evaluation of energy efficiency of existing single supermarkets as well as in relation to other supermarkets; Describe monitoring systems for energy performance and related parameters
Operating Agent: Sietze van der Sluis, Saint Trofee, Netherlands
Participating countries: Denmark, Sweden, Netherlands
Results so far:
Analysis of NL data / electrical energy consumption shows “unconventional” characteristics:

- Correlations with classical parameters (sales area, opening hours) do not show the “conventional” expected trends.
- Analysis show that non-technical parameters need more focus to understand and reduce energy consumption in supermarkets.

Annex 45 – Hybrid Heat Pumps (2015 – 2018)
Investigate the potential of energy and emission of greenhouse gases emission reduction by the increased implementation of hybrid heat pumps. Both through replacement of boilers, and by means of upgrading the systems’ efficiency in existing running installations. The focus of this Annex is on the residential sector, as well as the light commercial sector, where the market overview shows potential.
Operating Agent: Peter Wagener, Business Development Holland, the Netherlands
Participating countries: Austria, France, Germany, Italy, Netherlands, UK
Results so far: Just started, still open for participation

Annex 46 – Heat Pumps for Domestic Hot Water (2015 – 2018)
The objective is to analyse the information on DHW-heat pumping technologies and structure it to the market - ranging from end user to consultant, building constructor, and policy maker - in a way that leads to better understanding of the opportunities, and implementing them in order to reduce the use of primary energy consumption and CO2-emissions and lower energy costs.
Operating Agent: Onno Kleefkens, Phetratico, Netherlands

Participating countries: France, Japan, Netherlands, South Korea, United Kingdom.
Results so far: Just started, still open for participation

Annex 47 – Heat pumps in District Heating and Cooling systems (2015 – 2018)
Gather information and ideas for policy makers and decision makers and planners of energy systems in urban areas concerning the possibilities and barriers related to the implementation of heat pumps in DHC systems. Suggest how heat pumps can be implemented in both new and old district heating systems in the best way. The different types of integration will be described.
Operating Agent: Svend Pedersen, Danish Technological Institute, Denmark
Participating countries: Denmark, Sweden, still open for participation
Results so far: Just started,

Annex 48 – Industrial heat pumps, second phase (2015 – 2018)
The main goal of the new Annex is to overcome difficulties and barriers for the market introduction of industrial heat pumps; Collected cases studies of industrial branches with a large potential, should be analyzed through well-founded energy audits focused on waste heat recovery and an international information data base created. Development of a web-based information platform for heat pumps in the industry Creating information material for IHP (training) courses. The IHP potential for more efficient use of energy and reduction of greenhouse gas emission should be prepared for policy makers. The development of a simplified model for the integration of a heat pump into a process
Operating Agent: R. Jakobs, Informationszentrum Wärmepumpen und Kältetechnik (IZW), Germany
Participating countries: France, Germany, Japan, still open for participation
Results so far: Just started
Präsentation an der 22. Wärmepumpentagung 2016

Annex 49 – Heat pumps in multi-family buildings (2016 – 2019)
This annex will focus on solutions for multi family houses, new build and retrofitted, try to identify barriers for these markets and how to overcome them.
a) Increase the use of heat pumps in multi-family houses. b) Development and demonstration of concepts for the application of heat pumps in energetically renovated buildings and in buildings without improved building envelope. c) Finding the optimal (multi) heat source and operating mode (fuel driven, electric driven, hybrids) solutions depending on building type and ecologiceconomic situation. d) Demonstration and monitoring of technical solutions close to the market. e) Close cooperation with companies in all relevant technology areas as well as with the housing societies
Operating Agent: Marek Miara, Fraunhofer ISE, Germany
Participating countries: Austria, France, Germany, still open for participation
Results so far: Just started
Präsentation an der 22. Wärmepumpentagung 2016

Horizon 2020: EU Framework Programm for Research and Innovation

Horizon 2020 ist das grösste Forschungs- und Innovationsprogramm der EU mit einem Fördervolumen von fast 80 Milliarden Euro, verfügbar über 7 Jahre von 2014 bis 2020. Das Vorgängerprogramm war das Framework Programm FP7. Mit dem Programm soll die Zusam-

menarbeit von Forschenden aus öffentlichen Institutionen und der Industrie in Europa verbessert und damit die Wettbewerbsfähigkeit gesichert werden. Horizon 2020 ist in verschiedene Sektionen unterteilt. In der Sektion «Societal Challenges» wird die Erforschung einer sicheren, sauberen und effizienten Energieversorgung (Secure, Clean and Efficient Energy) unterstützt. Prioritäten haben Energy Efficiency (EE), Low Carbon Energy Technologies (LCE), Smart Cities & Communities sowie Policy Driver. Für die Vergabe von Fördermitteln publiziert die EU jeweils ein Arbeitsprogramm über 2 Jahre mit «Calls» für die Eingabe von Projekten. Im Call 2014-2015 [6] wurden Wärmepumpen in 3 Projenten namentlich erwähnt. In der Periode 2016 -2017 [7] werden Wärmepumpen bereits in 9 Projekten namentlich erwähnt. Zudem werden sie als wichtige Technology für die LCE aufgelistet. Projekte sind [7].

- EE-07-2017: Waste heat recovery from urban facilities and re-use to increase energy efficiency of district or individual heating and cooling systems
- EE-03-2016: Standardised installation packages integrating renewable and energy efficiency solutions for heating, cooling and/or hot water preparation
- EE-04-2016-2017: New heating and cooling solutions using low grade sources of thermal energy
- EE-09-2016-2017: Engaging and activating public authorities
- EE-20-2017: Bringing to market more energy efficient and integrated data centres
- LCE-01-2016-2017: Next generation innovative technologies enabling smart grids, storage and energy system integration with increasing share of renewables: distribution network
- LCE-02-2016: Demonstration of smart grid, storage and system integration technologies with increasing share of renewables: distribution system
- LCE-17-2017: Easier to install and more efficient geothermal systems for retrofitting buildings
- LCE-21-2017: Market uptake of renewable energy technologies. Im WP 2: **Heat Pumps**: Accelerate the penetration of heat pumps for heating and cooling purposes: Heating and cooling represents almost 50% of the final EU energy consumption and cooling demand is increasing. The cost associated with the purchase and installation of heat pumps remains an obstacle for a wider penetration on the market. In order to accelerate the penetration of heat pumps for heating and cooling purposes, proposals should address the following challenges:
  a. identification of the most promising cost reduction options for CAPEX, installation costs, and OPEX as well as development of EU wide scenarios of deployment; proposed prioritisation of R&I investments;
  b. development of solutions for innovative system integration and integrated power management for household/industrial buildings.

Schweizer Beteiligung in Wärmepumpenprojekten der EU
Die Beteiligung von Schweizer Forschenden an EU Horizon 2020 Projekten ist nach wie vor möglich. Die Finanzierung erfolgt über Staatssekretariat für Bildung,
Aktuell sind Schweizer Forschende nur in einem laufenden EU-Projekt zum Thema Wärmepumpen engagiert (wurde 2012 unter FP7 gestartet und endet 2016) [8]:

Next Generation of Heat Pumps working with Natural fluids (2012 – 2016)
The main objective of the project is the development of several reliable, safe, high efficiency and high capacity heat pumps working with the two most promising natural refrigerants: Hy-

drocarbons and CO2, together with a set of improved components and auxiliary devices adequate for the efficient and safe use of the two refrigerants.
In diesem Projekt ist die École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL) mit dem Institute Laboratory of Heat and Mass Transfer (LTCM) beteiligt.
Präsentation an der 21. Wärmepumpentagung 2015

Quellen

[1] Schweizerischer Nationalfonds zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung, Medienmitteilung 15.01.2015
[2] Bundesamt für Energie, Energieforschungskonzept 2017 - 2020, 2016
[3] Kommission für Technologie und Innovation KTI, Förderprogramm Energie, Website www.kti.admin.ch, 27.04.16
[4] Eidgenössische Energieforschungskommission (CORE), Konzept der Energieforschung des Bundes 2017 – 2020, 2016
[5] Annual Report 2015 IEA Technology Collaboration Programm on Heat Pumping Technologies, 2016
[6] European Commission, Horizon 2020 Workprogramme 2014 – 2015 10. „Secure, Clean and Efficient Energy“, Revised, 2015
[7] European Commission, Horizon 2020 Workprogramme 2016 – 2017 10. „Secure, Clean and Efficient Energy“, 2016
[8] Next Generation of Heat Pumps working with Natural fluids, http://www.nxthpg.eu, 2016

Jean-Christophe Hadorn
Operation Agent of Task 44 (2010-2014) for the Swiss Federal Office of Energy
BASE Consultants SA
1211 Genève
jchadorn@baseconsultants.com
www.baseconsultangs.com

Solar and heat pumps: a fair partnership

Why solar and heat pumps?

Solar and heat pumps go together on the market since 10 years. There are advantages to this combination that we will see in this paper thanks to an international project of the SHC Solar Heating and Cooling Programme and the HPP Heat Pump Programme of the IEA.

SHC Task 44 / HPP Annex 38 started in January 2010 and ended in December 2013. Its scope considered solar thermal collectors and storage in combination with heat pumps, for the supply of domestic hot water and heating in family houses. The main target market was small systems in the range of 5 to 20 kW. Any type of solar collector was considered: using a liquid heat transfer fluid, air, hybrid collectors, or even hybrid thermal and photovoltaic or "PV/T" collectors, glazed or unglazed.
Any type of source of heat for the heat pump was considered: air, water or ground source.

The Task was a joint effort of the Solar Heating and Cooling Programme (SHC) and the Heat Pump Programme (HPP) of the International Energy Agency. It was called Task 44 for SHC and Annex 38 for HPP therefore abbreviated T44A38.

Participating countries from HPP: Finland, Germany, Switzerland (Operating Agent), and from SHC: Austria, Belgium, Canada, Denmark, France, Germany, Italy, Spain, Sweden, Switzerland (Operating Agent), USA.

Task organization: from theory to monitoring

The Task (or project) was organized in four Subtasks each lead by an expert and the choice of topics for each subtask proved to be adequate:

Subtask A: Solutions and generic systems (Lead Country: Germany, Fraunhofer ISE, Sebastian Herkel). The objective of Subtask A was to collect, create and disseminate information about the current and future solutions for combining solar thermal and heat pump to meet heat requirements of a one family house. Subtask A dealt with pre-manufactured systems and systems installed and monitored during 1 or 2 years.

Subtask B: Performance assessment (Lead Country: Austria, AIT, Ivan Malenkovic 2010-2012 and Michael Hartl in 2013). The objective of this subtask was to reach a common definition of the figures of merits of solar + heat pump systems and how to assess them. This work lead to prenormative definition on how to test and report the performance of a combined solar and heat pump systems.

Subtask C: Modeling and simulation (Lead Country: Switzerland, SPF, Michel Haller). The objective was here to provide modeling tools of all generic solar and heat pump systems and to report sensitivity analysis on most of the systems such as being able to pinpoint important features and marginal ones in a given system configuration. Sizing of systems and optimizing their control are also possible using the output of this Subtask, with the computing tools and the framework developed.

Subtask D: Dissemination and market support (Lead Country: Italy, EURAC, Wolfram Sparber). The objective was to provide information to the external world during the course of T44A38 so that value added created by the participants could be transferred as fast as possible to a growing market. A second objective was to deliver the final book of T44A38 aimed as a reference document in the field of solar heat and heat pumps.

Subtask A: Market development and the 4 generic systems found

- In a survey organized by Subtask A leader, more than eighty manufacturers from eleven countries provided information on their SHP systems available on the market during the period 2010-2012. It was a surprise to see the number of marketed systems in a technical and standardization environment that was not at all established. Performances were announced without clear definition and without any reliable benchmark and on top without any standard for the definition of a SHP hybrid system performance!
- The survey showed that the idea of combining solar collectors and a heat pump (SHP) was a followed idea in the HVAC industry. A clear market objective of the industry for one family house is to deliver complete pre-fabricated systems rather than components that installers should assemble reducing the chance of wrong installation and misconnection. And the SHP combination can deliver both heating and domestic hot water all year long with a high renewable fraction performance. A criteria that the market can value! Not all the market but a segment of environmentally concerned buyers.

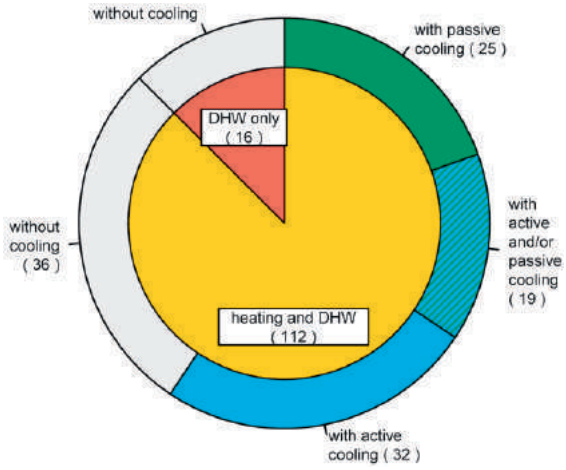


Figure 1a: *Survey output: SHP system classification according to the supplied building load (the combisystem is the vast majority of SHP systems on the market) (source: Fraunhofer ISE)*

- A great variety of combinations of solar collectors and heat pump was found on the market. The industry has not yet clarified the best options for a given application. As always in hybridization of systems, real installations and behaviour proved to be more complex than just the juxtaposition of components. Task 44 showed some best practice examples in this direction.

- The work of Task 44 has brought some order and clarification into the systems by establishing a clear classification of solutions, as follows:

- the parallel system where solar delivers heat mainly to the domestic hot water (DHW) tanks and heat pump does the heating and the back up of the DHW. There is no connection between the collectors and the evaporator of the heat pump. Often chosen with air/water heat pump this combination is the big market share. This is by far the simplest system idea. It deserves however careful design specially when the heat storage is shared between the two producers: the solar collectors and the heat pump.

- The serial concept where solar heat can be used by the evaporator of the heat pump enhancing the temperature of evaporation and thus the heat pump coefficient of performance (COP). Often unglazed collectors are used to avoid problems with condensation in glazed collectors operating below the dew point of the collector atmosphere or the outdoor air.

- The regenerative concept for ground source heat pump, where the solar collectors can regenerate the heat into the borehole when there is excess of solar energy collected. Most of the time the basic system is a serial system in this case and the collectors are often unglazed collectors. The gain of the regeneration is not always decisive as Task 44 showed in simulations.

- More Complex systems where all systems components can be linked together in different arrangement, with 3-way valves and dedicated controller, but at the price of a more complex installation and sometimes a delicate control strategy. Those systems are found in bigger installations and where various users (heating and cooling) at different levels of temperature have to be supplied.

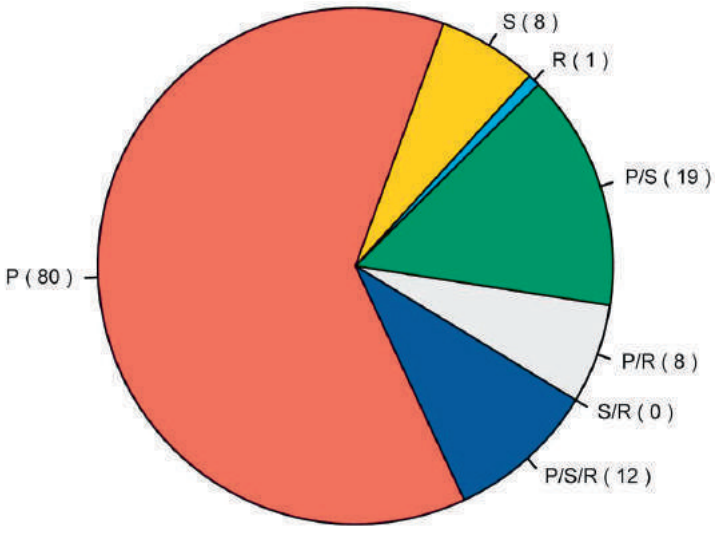


Figure 1b: *Survey output: Most systems are parallel solar and heat pump (source: Fraunhofer ISE)*

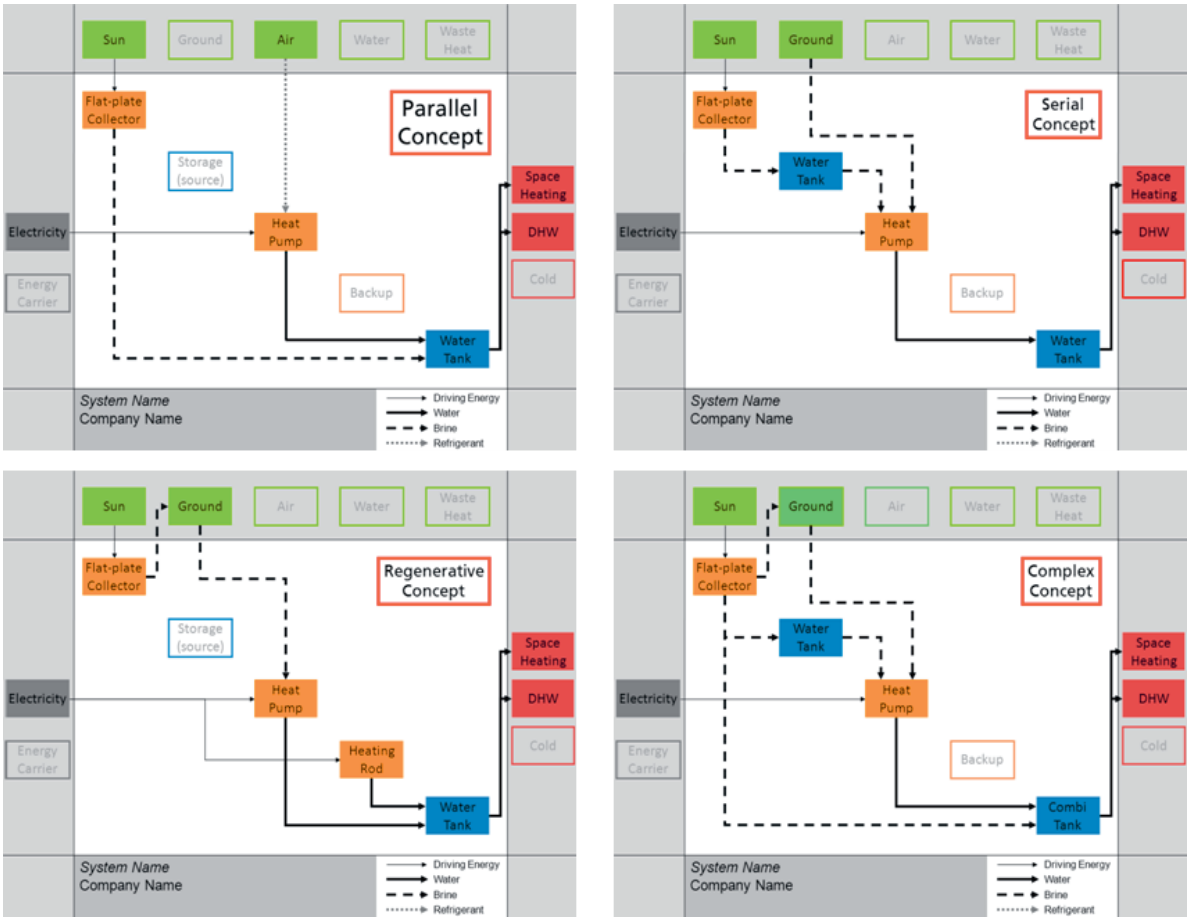


***Figure 2**: the four generic SHP systems according to Task 44 depicted with the "energy flow chart" designed by Task 44 (source: Fraunhofer ISE)*

- Task 44 has established a way to represent any combination of solar and heat pump system and more generally any energy system in a systematic "energy flow chart" diagram that simplifies the rapid understanding of a system configuration and the energy flows, without losing information compared to a classical hydraulic scheme. This chart is available as a simple Excel tool from the task web site. As an example figure 2 shows all basic concepts of SHP with such a chart.

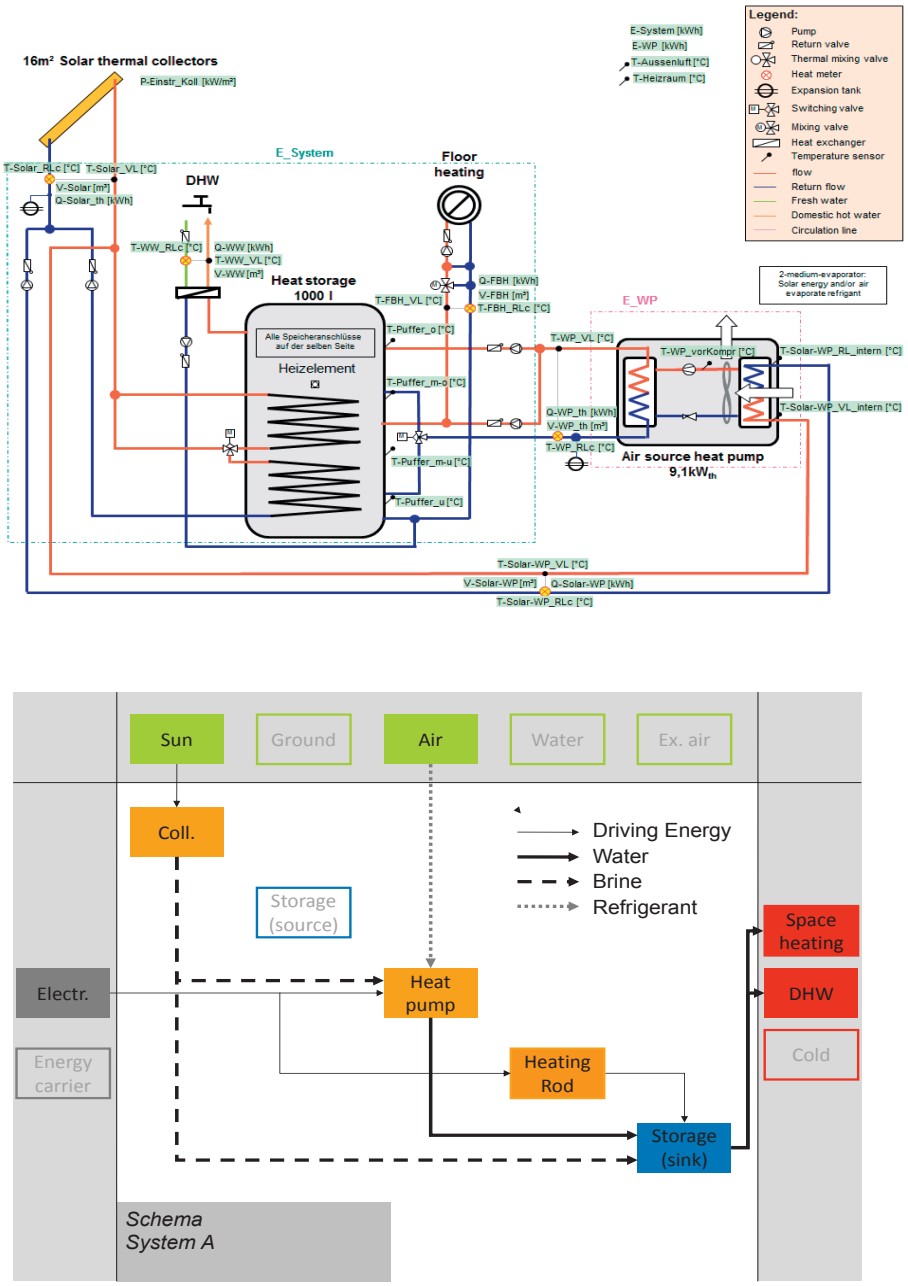


Figure 3: *a parallel system described with the hydraulic scheme and with the Task 44 energy flow chart (source: Austria)*

- The survey made by Subtask A showed also that there was a need for test methods and performance factor definitions, since a combination of solar heating and heat pumps was still to be considered as a complex system and no standard was existing at golbal level even at national level.

Systems monitored in-situ

- Participants in the Task have provided 1 to 2 years of monitored results from 50 different systems in seven countries, covering not only the variety of systems on the market but also prototype systems. The variance of performances was however found to be large. Seasonal performance factors (SPF) from as low as 1.5 to a very good 6 were measured.

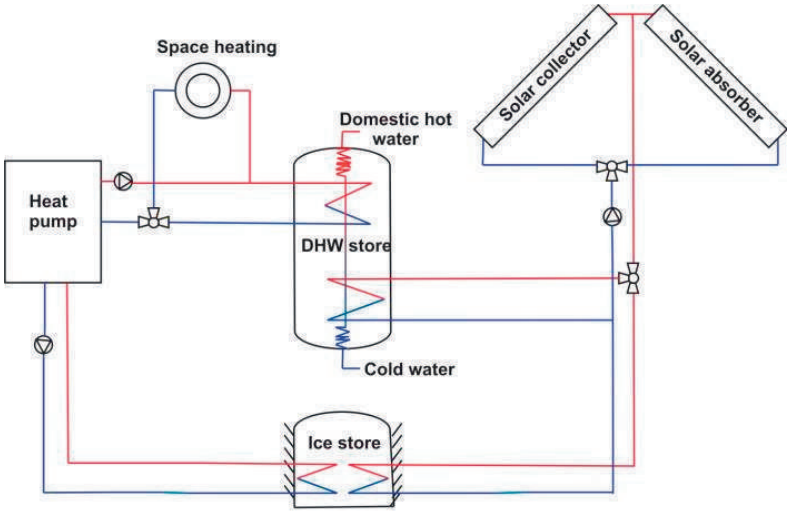


***Figure 4**: a SHP concept with an ice storage (Source: ITW, Germany)*

Reasons for the variety of results have been analyzed and are explained in the Subtask A reports as well as in the handbook of Task 44.

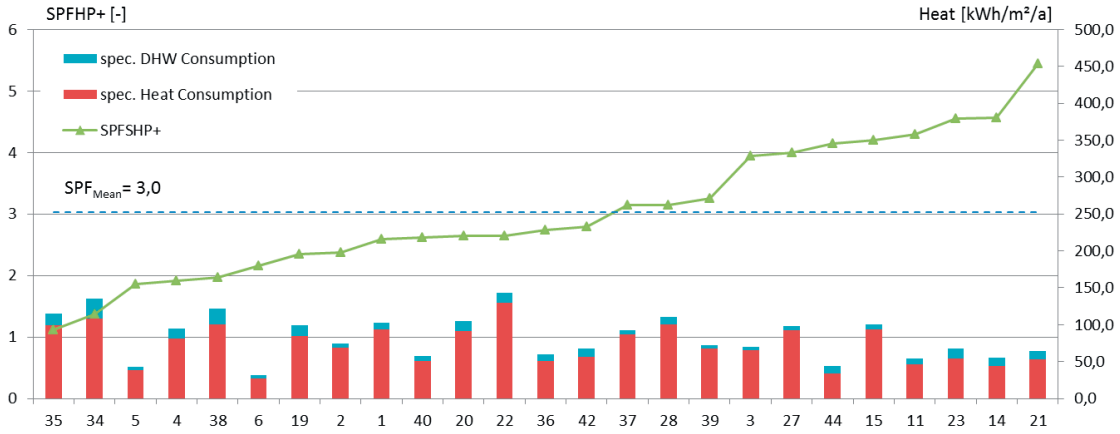


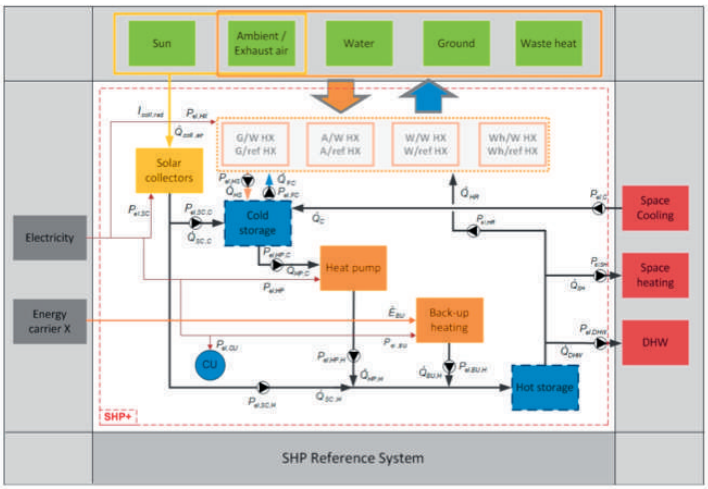
***Figure 5:** Monitored results on 25 SHP systems. The SPF can range from bad systems to excellent ones (copyright: Fraunhofer ISE)*

- Although parallel systems are the most common and the simplest to operate, well-performing systems were found in all four identified categories (P/S/R/C), and good integration of all components was shown to be possible. Some best practice examples have been reported in the handbook.

Subtask B Performance assessment – The many SPFs!

Performance assessment

- In terms of reporting performance of a SHP installation, Task 44 showed that there is a need for different performance figures for different purposes. Those can be: energy evaluation, environmental analysis or economic aspects. Those various performance factors have been derived in a Subtask B report where all equations and system boundaries are given.



$$SPF_{SHP+} = \frac{\int \left(\dot{Q}_{SH} + \dot{Q}_{DHW} + \dot{Q}_{C} \right) dt}{\int \left(\sum P_{el,H,SHP+} \right) dt}$$

$$\sum P_{el,SHP+} = P_{el,SC} + P_{el,SC,C} + P_{el,SC,H} + P_{el,HP} + P_{el,HP,C} + P_{el,HP,H} + P_{el,HS} + P_{el,BU} + P_{el,BU,H} + P_{el,SH} + P_{el,DHW} + P_{el,C} + P_{el,FC} + P_{el,HR} + P_{el,HX} + P_{CU}$$

***Figure 6**: The definition of SPF_{SHP+} according to Task 44*

- There is also a necessity to take all components into account in any performance calculation. The auxiliary components such as pumps, controllers, displays, fans, valves, sensors,… must be accounted for since this can make the difference between a good system and an unacceptable one, i.e. with too low a seasonal performance factor (SPF) when auxiliary electricity is considered. And auxiliary electricity should be considered in all cases for a fair comparison between different heating technologies.

- System boundaries have been clearly defined in order to calculate all relevant performance indicators. The method to fix the boundaries uses the energy flow diagram describing all flows in a system and can be applied to any kind of energy system (solar cooling for instance), and not only to solar and heat pump systems.

- Subtask C has derived the correct definitions for System Performance Factors (SPF) that take the overall system into account. Engineers and manufacturers can refer to this work to specify the SPF within common boundaries: this is a necessary basis for any system comparison.

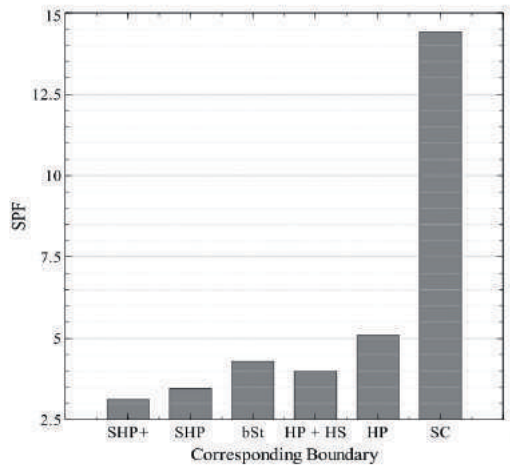


Figure 7: *SPF depends strongly on the boundary considered (for definitions of boundaries in this figure refer to Subtask B reports)*

Laboratory testing:

- Laboratory testing is important, since SHP combinations are complex systems with dynamic interactions. Solar energy is intermittent and highly variable during a day and provides dynamical situation in a solar based system. Testing the whole system is thus fundamental to the process of developing SHP systems and can provide relevant information for performances, failures, default behaviour etc. in a rather short period of time. Those lab tests should therefore be encouraged my authorities.

- Test sequences over twelve days with variable meteorological conditions have been used to test several types of SHP systems in several European solar laboratories. The methodology used by Task 44 proved to be accurate and reliable.

- There are different methods of testing SHP in laboratory over this predefined sequence of twelve days. Subtask B has described the main methods that are in use in the participating laboratories. Pros and Cons of each method are analyzed in a technical report.

Subtask C: Modeling and simulation – The tools are available

- Task 44 has shown that basic models for simulating components in solar and heat pump systems are available. Features of the most relevant models for solar collector, heat pump, heat storage, borehole, have been analyzed and reported. Recommendations for choosing an adequate model have been formulated in Subtask C reports. The best ones have been integrated into the Trnsys framework of the Task 44.

- Simulation models of components are essential in order to be able to simulate systems. Four working groups on solar collector, ground heat exchanger, heat pump, and heat storage, have surveyed on existing models. A new Heat Pump Model (Type 877) for TRNSYS has been developed. Its validation is in progress before it can be used for optimisation purposes.

- Modeling the frost conditions and water condensation heat exchange on solar absorbers for night operating conditions was also done. The model has been tested on laboratory results and proved to be adequate. However it was found in the Task that heat

gain from the condensation on the surface of the solar collectors is not very important in the annual balance of heat supplied. Solar radiation and air exchange dominate.

- Simulations and also field monitoring have shown the great importance of the storage component in a combined system. Also the storage stratification is very important to ensure better performance.
- Task 44 also showed that there is a need of monitored data for modeling variable-capacity or variable-speed heat pumps, and special heat pumps based on advanced concepts. Models are not available at present for those complex machines and this reduces the capacity of researchers to find optimal combinations.
- There is also a lack of simulation models for complex hydrothermal effects that was shown to appear in water storage tanks. Namely, the mixing of heated water and the loss of exergy due to high velocities of incoming flow or due to a poorly design introduction geometry. Current CFD (Computational Fluid Dynamics) 3D software can be used for design purposes but they are massive and slow and not adapted for system optimization where computation time is critical.

Task 44 has developed a range of tools to simulate all kind of solar and heat pump combinations. National teams have used these tools and the task framework to optimize several aspects of a solar and heat pump combination. One of this aspect concerns the heat storage which is shared by the solar collectors and the heat pump in the most common parallel arrangement.

As an example, recommendations derived from many simulations have been formulated:

1. The position of the DHW sensor for boiler charging control must be placed at a safe distance from the space heating zone of the storage
2. The return from the storage to the heat in DHW mode must be placed above the space heating zone of the storage
3. It can be advantageous to bypass the storage when the heat pump runs in the space heating mode.

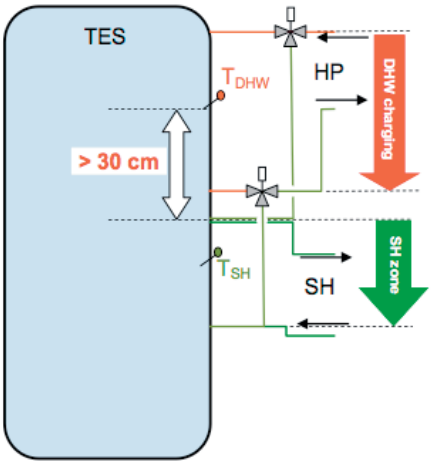


***Figure 8**: The DHW charging zone in the upper part of a tank must be respected in a combistore (copyright: SPF Switzerland)*

- Task 44 has devoted the first year of the Task to set up a framework for simulating SHP systems in different climates and for different loads. The framework is an international collaborative work and proved to be very useful for national work as well. All relevant documents for this framework are available on the Task web site.

- Participants in task 44 simulated more than 20 different system concepts using the common tools. Several simulation platforms were used and the framework was adapted to each platform.

- Simulation results show that the solar benefit contribution to an SHP system can be substantial when optimal arrangement and a good control strategy are considered. Figure 9 shows the increase of SPF that installing collectors can bring in a parallel system with an air/water heat pump. Installing 8 m2 of collectors on a one family house, can bring the SPFSHP+ to 3.5 from a usual 2.8 for a non solar air heat pump. Combisystems (having a single storage for DHW and heating) can also benefit from adding solar collectors in a system. The SPF can reach 4.0 with 15 m2 of collectors from the 2.8 reference case.

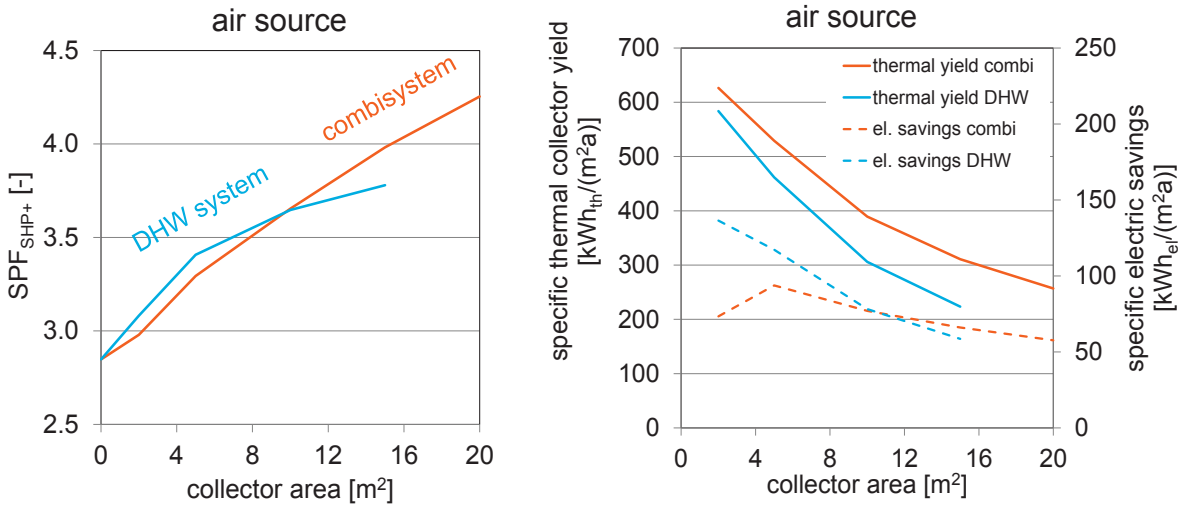


Figure 9: *What does solar heating add to the whole? Performance of air-source solar and heat pump systems, where solar heating is used for DHW only (DHW) or for a combined system with combined storage (combi). (Simulations of SPF in reference conditions.) For more results refer to the final book*

- Simulations of different system configurations have been made by several teams participating in the Task with the same boundary conditions and in the same climate. This was a great common effort. Figure 10 shows the overall results in terms of SPF achieved by each system concept in the same conditions.

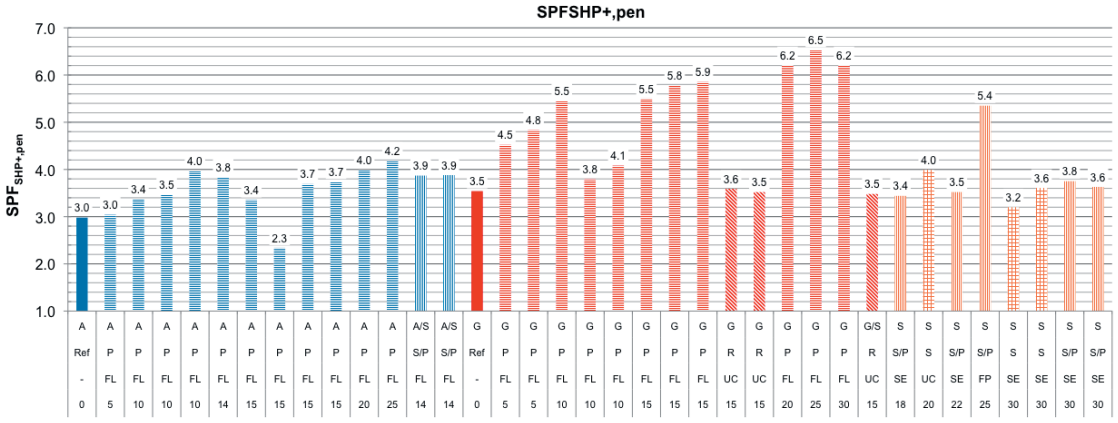


Figure 10: *the results for all systems simulated with the same boundary conditions are compared in Chapter 7 of the final handook.*

Subtask D: Dissemination – the IEA SHC method

Subtask D had the mission to disseminate the added value created by the other subtasks. It did so by:

- issuing 3 newsletters (2011, 2012, 2013) largely distributed by mail and through our web site,
- by opening a Wikipedia page "solar and heat pump systems",
- by preparing in 2010 a document regrouping some teaching material on solar and heat pumps
- by organizing several industry workshops held locally in conjunction with the Task meeting where industry experts could exchange their vision with our Task R&D experts.

The T44A38 final handbook reflects the work in all aspects of SHP: practical experience, performance indicators definition, standard testing, component modelling, system simulations, comparison and guidelines for planning good systems.

All reports from T44A38 can be found on the Task web site:

1. Technical reports on monitored systems
2. Map of generic systems with pros and cons
3. New set of performance indicators
4. Procedure to test combined solar and heat pump systems
5. Technical reports on systems tested in laboratory
6. New reference framework for simulating solar and heat pumps systems
7. New components models or compiled existing ones
8. Website with all major reports and papers
9. Educational material on the website

11. Papers at international conferences
12. Three Newsletters along the T44A38 duration
13. Final handbook (about 200 pages) with all methods developed and all results

Conclusion

In conclusion, Task 44 has delivered much information on the assessment, the design and the performance of combined solar and heat pump systems. Participants have developed tools to simulate any type of system combination, as well as performance indicators that should be calculated for fair comparisons between systems. Comprehensively monitored systems have shown that high SPF values can be delivered if design and commissioning are carefully carried out.

Solar heating can be a good heat source for heat pumps as an alternative or a complement to air and ground sources.

We investigate the range 5 to 120 kW with some projects up to 200 kW in Geneva. More considerations to big projects should be given especially with the combination: absorbers + ice storage + heat pump. We have several P+D projects going on in Switzerland with this combination for dwellings.

All References can be found at:
http://task44.iea-shc.org/

Stefan Minder
Weisskopf Partner GmbH
Albisriederstrasse 184b
stefan.minder@weisskopf-partner.ch
www.weisskopf-partner.ch

Eisspeicher-Wärmepumpen-Anlagen mit Sonnenkollektoren

Wirtschaftlichkeit, Umweltbelastung und Marktpositionierung

Zusammenfassung
Eisspeicher-Wärmepumpen-Anlagen verwenden quellenseitig einen Wasser/Eis Latentspeicher und Solarkollektoren. Mit gut abgestimmten und eingeregelten Eisspeicher-WP werden ähnliche Systemnutzungsgrade wie mit Erdsonden-WP erreicht. In einer von EnergieSchweiz beauftragten Studie wurde gezeigt, dass die Wärmegestehungskosten von Eisspeicher-WP-Kompaktanlagen im besten Fall im ähnlichen Bereich liegen wie bei Erdsonden- oder Luft/Wasser-WP. Die Kosten können aber auch bis zu 50% darüber liegen (je nach Technologie). Der Einsatz ist heute aus wirtschaftlicher Sicht also vertretbar, macht aber vor allem da Sinn, wo Erdsonden nicht möglich oder nicht erwünscht sind. Für die Betrachtung aus der Umweltperspektive ist der Stromverbrauch während der Lebensdauer der Anlage dominierend. Die Umweltbelastung durch den Stromverbrauch ist im Fall eines typischen Strommix (Schweiz oder Europa) um ein vielfaches höher als die Umweltbelastung durch Erstellung und Entsorgung der Anlage. Die Eisspeicher-Anlagen positionieren sich daher, aufgrund des guten Systemnutzungsgrades, ähnlich wie die Erdsonden-WP und deutlich besser als die Luft/Wasser-WP.

Abstract
Heat pump systems with ice storage and solar collectors, if well designed and run, reach very good system performance factors, comparable to geothermal heat pumps. In a study mandated by "EnergieSchweiz" the economic viability and the environmental impact of this technology was evaluated and compared to geothermal and air/water heat pumps. The heat generation cost of heat pumps with ice storage is at best similar to the costs of geothermal and air/water systems. However, depending on the technology choices, costs can reach up to 50% above geothermal heat pumps. The technology is economically justifiable when a high efficiency heating system is desired or requested and geothermal probes are not permitted or possible. The environmental impact of all heat pump systems is dominated by the consumption of electric energy over the service time. The impact of electricity generation for driving the heat pump is a multiple of the impact of manufacturing and disposal of the equipment (Swiss or EU electricity mix). The environmental impact of heat pumps with ice storage is thus comparable with geothermal heat pumps and significantly lower than for air/water heat pumps.

Eisspeicher-Wärmepumpen

Eine Eisspeicher-Wärmepumpenanlage besteht aus einer Sole/Wasser-Wärmepumpe, einem auf der Quellenseite eingebundenen Niedertemperatur-Latentspeicher (Eisspeicher) und Niedertemperatur-Solarkollektoren oder Solar-Luft-Absorbern. Die Eisspeicher sind üblicherweise mit normalem Trinkwasser gefüllte Speicher mit innenliegenden, spiralförmigen Kunststoffschlauch-Wärmetauschern. Das Wasser im Eisspeicher kann Umweltwärme (Solar, Luft, Erdreich) zwischenspeichern und an die Wärmepumpe abgeben. Beim Wärmeentzug durch die Wärmepumpe kann das Wasser gefrieren und damit einen grossen Teil der gespeicherten Wärme bei konstanter Temperatur abgeben. Im Winter ist die Quellentemperatur dadurch stabiler und im Durchschnitt höher als bei einer Luft/Wasser-Wärmepumpe. Dadurch werden bessere Jahresarbeitszahlen der Wärmepumpe erreicht.

Als Hauptwärmequelle und zur Regeneration des Eisspeichers werden Solarkollektoren bzw. Solar-Luft-Absorber eingesetzt. Die Kollektoren können bei tiefer Temperatur betrieben werden, was sich positiv auf den Kollektor-Wirkungsgrad auswirkt. Durch die Verwendung von unverglasten Absorbern oder durch aktive Belüftung wird auch Wärme von der Umgebungsluft einbezogen. Wenn verglaste und/oder selektive Kollektoren verwendet werden, kann die Solarwärme auch auf höherer Temperatur direkt für Heizung und/oder Brauchwarmwasser genutzt werden. Bild 1 stellt die Hauptkomponenten und die verschiedenen möglichen Wärmeströme dar.

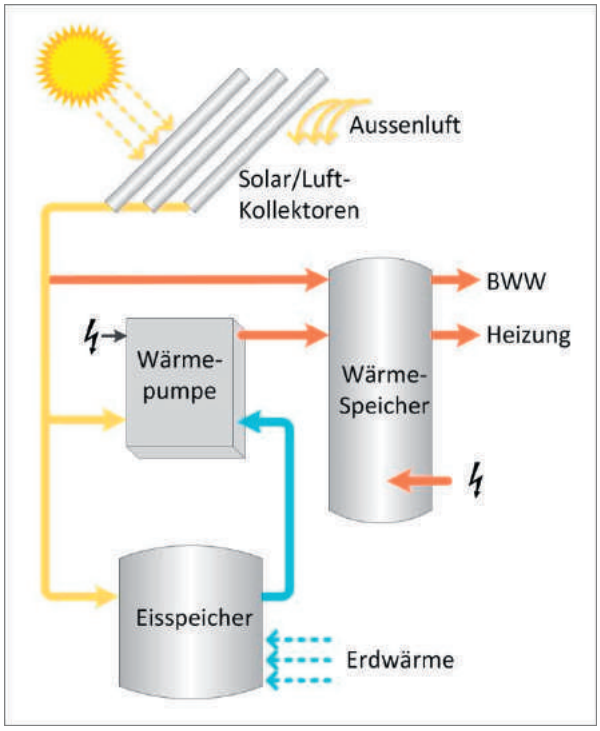


Bild 1: *Schematische Darstellung der möglichen Energieströme, Wärmequellen und Komponenten einer Eisspeicher-Solar-Wärmepumpe.*

Eisspeicher-Wärmepumpen werden heute in der Schweiz von vier Anbietern als Komplettanlagen für den Einfamilienhaus-Bereich angeboten. In der Schweiz sind weniger als 50 Anlagen der verschiedenen Anbieter in Betrieb. Die Ansätze der Anbieter unterscheiden sich hauptsächlich im verwendeten Kollektortyp, dem Aufbau und der hydraulischen Integration des Eisspeichers, der Eisspeicherkapazität und der Einbindung der Kollektorwärme:

- Das Komplettsystem von Viessmann im Heizleistungsbereich 6 - 17 kW verwendet einfache, unverglaste Kunststoffabsorber und ein oder zwei im Erdreich vergrabene Eisspeichern mit je knapp 10 m^3 Inhalt.

- Das Solaera Komplettsystem von Consolar (D) mit 6.9 kW Heizleistung verwendet selektiv beschichtete, verglaste Flachkollektoren, welche zur Nutzung der Umgebungswärme mit einem Ventilator aktiv belüftet sind. Der kleine 320 Liter Eisspeicher ist im Systempaket mit Wärmepumpe, Hydraulik und Regler in einem Schrank integriert und kann im Haus aufgestellt werden.

- Energie Solaire verwendet das Consolar Solaera Kompaktsystem (Wärmepumpe, Eisspeicher, Hydraulik und Regler) mit einem eigenen, unverglasten, nicht aktiv belüfteten aber selektiv beschichteten Kollektor, welcher auch voll dachintegriert als Dachhautersatz eingesetzt werden kann.

- Poly Solar Solutions (PSS) ist neu auf dem Markt und konnte in den BFE Studien [1] und [2] noch nicht berücksichtigt werden. PSS verwendet PV/Thermische Hybridkollektoren, um von der gleichen Fläche sowohl Strom als auch Wärme zu ernten. Das System wurde bisher in einem Referenzobjekt eingesetzt.

In [1] wurde aufgezeigt, dass mit Eisspeicher-Solar-Wärmepumpen ähnliche Systemnutzungsgrade erreicht werden, wie mit Erdsonden-Wärmepumpen. Die Technologie ist zwar noch relativ neu, Messungen an bestehenden Anlagen in der Schweiz und in Deutschland bestätigen jedoch das grundsätzliche Potenzial. Es wurde ebenfalls aufgezeigt, dass die Anlagen gut eingeregelt sein müssen, um die optimalen Nutzungsgrade zur erreichen. Das gilt zwar grundsätzlich für alle Heizungsanlagen, ist aber bei Eisspeicher-Solar-Wärmepumpen, aufgrund der erhöhten Komplexität, besonders wichtig.

Aus technischer Sicht ist der Einsatzbereich von Eisspeicher-WP-Anlagen weitgehend gleich wie derjenige von klassischen WP-Anlagen. Tiefe Vorlauftemperaturen für die Heizung sind zu bevorzugen. Besondere Anforderungen für Eisspeicher-WP-Anlagen sind der Platzbedarf für den Eisspeicher (erdverlegt oder innen aufgestellt) und für die Kollektoren bzw. Absorber. Der Einsatz ist dort besonders interessant, wo Erdsonden-Bohrungen nicht möglich oder bewilligt sind und trotzdem hohe Nutzungsgrade erreicht werden sollen. Die Eisspeicher-WP Technologie wird auch in Grossanlagen eingesetzt. Diese werden spezifisch auf das Objekt ausgelegt, mit individuell zusammengestellten Komponenten und Steuerungen. Diese Speziallösungen wurden im Rahmen der Studie [2] zu Wirtschaftlichkeit und Umweltbelastung nicht näher untersucht.

Methodik

Für die Untersuchung der Wirtschaftlichkeit und Umweltbelastung wurden vier Gebäudetypen und vier Anlagentypen definiert. Die Gebäudetypen umfassen ein Neubau-Einfamilienhaus (EFH) erstellt nach den Vorgaben der Mustervorschriften der Kantone im Energiebereich (MuKEn 2014), ein energetisch saniertes EFH, ein Bestandsbau mit hohen Vorlauftemperaturen und ein Doppel-Einfamilienhaus nach MuKEn 2014. Die Anlagentypen sind eine Erdsonden-Wärmepumpe, eine Luft/Wasser Wärmepumpe und zwei typische Konfigurationen für Eisspeicher-WP-Anlagen:

- Ein grosser, erdverlegter Eisspeicher mit 10-20 m^3 Inhalt mit unverglasten, nicht selektiven Solar-Luft-Absorbern (System Viessmann)
- Ein im Kompaktsystem integrierter, kleiner Eisspeicher mit einigen hundert Litern Inhalt, in Kombination mit selektiven Solarkollektoren (System Consolar und Energie Solaire)

Die vier Anlagentypen wurden jeweils für die vier Gebäudetypen ausgelegt, so dass maximal 16 Anlagen/Gebäude-Kombinationen entstanden. Für diese Matrix wurden die erforderlichen technischen und wirtschaftlichen Annahmen für ein Referenzszenario getroffen. Die Annahmen für Investitionskosten und Wirkungsgrade (JAZ bzw. Systemnutzungsgrade SNG) wurden mit unterschiedlichen Quellen gegenseitig validiert, insbesondere auch mit Daten von effektiv realisierten Anlagen und den Resultaten der Feldstudie [5]. Für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung wurden die wichtigsten Annahmen/Parameter zusätzlich variiert um die Sensitivität auf diese Parameter aufzuzeigen.

In Bild 2 ist das Vorgehen für die Erarbeitung der wirtschaftlichen Kennzahlen schematisch dargestellt. In der Tabelle 1 sind die Referenz-Annahmen für die in der Wirtschaftlichkeitsberechnung verwendeten Parameter zusammengefasst.

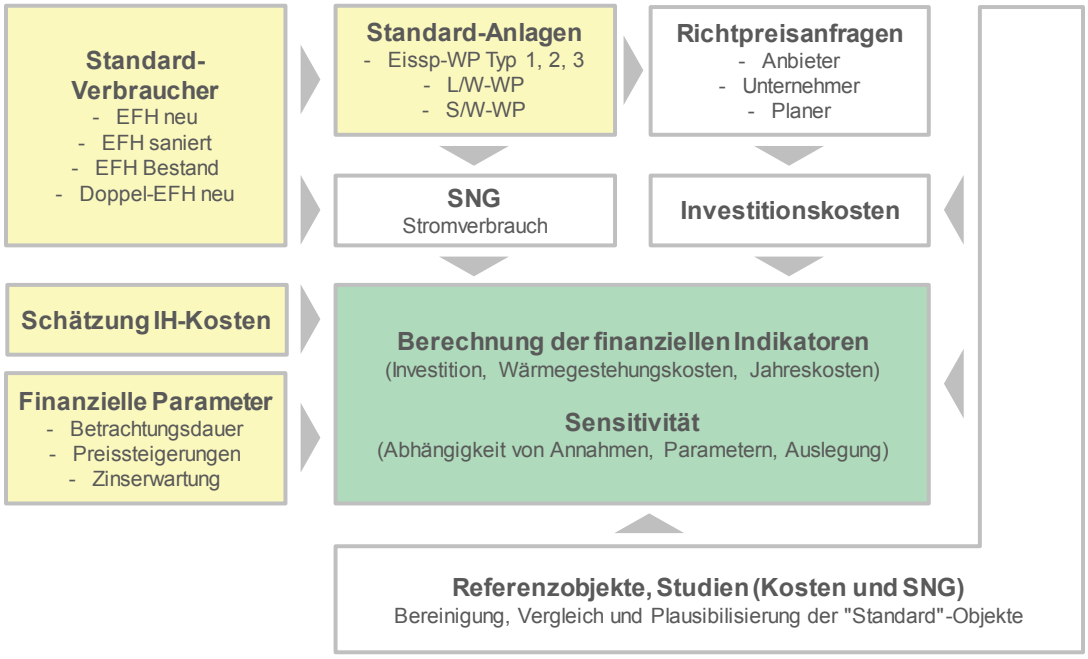


Bild 2: *Methodik für den Vergleich der Wirtschaftlichkeit von verschiedenen Wärmepumpen-Anlagentypen im EFH-Bereich.*

Parameter	**Annahme für Referenzszenario**
Anlagenstandort [1]	Zürich
Wärmebedarf [1]	Entsprechend der 4 definierten Gebäudetypen und individueller Auslegung der Anlagen
Verhältnis BWW/RH	
Systemnutzungsgrad SNG [1]	
Technische Lebensdauer der Komponenten	Eisspeicher erdverlegt, Erdsonden: 50 Jahre Hydraulik, Speicher: 30 Jahre Kollektoren, Elektroinstallationen: 25 Jahre Wärmepumpe: 20 Jahre
Wirtschaftliche Betrachtungsdauer	20 Jahre
Instandh. Erdsonden- und Luft/Wasser-	250.- CHF/a

[1] Parameter oder Annahme, welche in der Sensitivitätsanalyse variiert wird.

WP	
Instandh. Eisspeicher-WP-Anlagen	350.- CHF/a
Inflation	1%
Stromtarif [1]	18 Rp./kWh
Preissteigerung Stromtarif	2%
Kalkulationszinssatz (nominal) [1]	2.5%
Förderung Sole/Wasser-WP[1]	Bei Ersatz: CHF 4'500.-
Förderung Luft/Wasser-WP [1]	Bei Ersatz: CHF 2'500.-
Förderung Kollektoren [1]	Schwimmbadkollektor: keine Selektiv: 1'500.- + 150.- CHF/m^2 Verglast: 1'500.- + 200.- CHF/m^2

Tabelle 1: *Annahmen für die Berechnung der Wirtschaftlichkeitskennzahlen (Referenzszenario).*

Wirtschaftlichkeit

Für die verschiedenen Szenarien (Gebäudetypen und Anlagentypen) wurden die Investitionskosten, die wiederkehrenden Kosten, die Kapitalkosten und die Wärmegestehungskosten gerechnet. Die finanziellen Kennzahlen sind mit der dynamischen Methode nach der SIA Norm 480 berechnet. Der Schwerpunkt der Resultate liegt im Vergleich der untersuchten Systeme untereinander. Die Einordnung gegenüber anderen Heizsystemen wurde nicht vorgenommen.

Bild 3 zeigt die Investitionskosten für die verschiedenen Szenarien. Der mit der Box dargestellte Bereich entspricht der Streuung der Angaben aus den verschiedenen Quellen. Die Investitionskosten beinhalten alle Komponenten der Wärmeerzeugung bis zum Verteiler/Heizgruppe, inklusive Speicher, Bauliches, Elektro- und Planungsarbeiten. Nicht enthalten sind Verteilung und Wärmeabgabe, sowie eventuelle Kosten für Abbau und Entsorgung einer bestehenden Wärmeerzeugung.

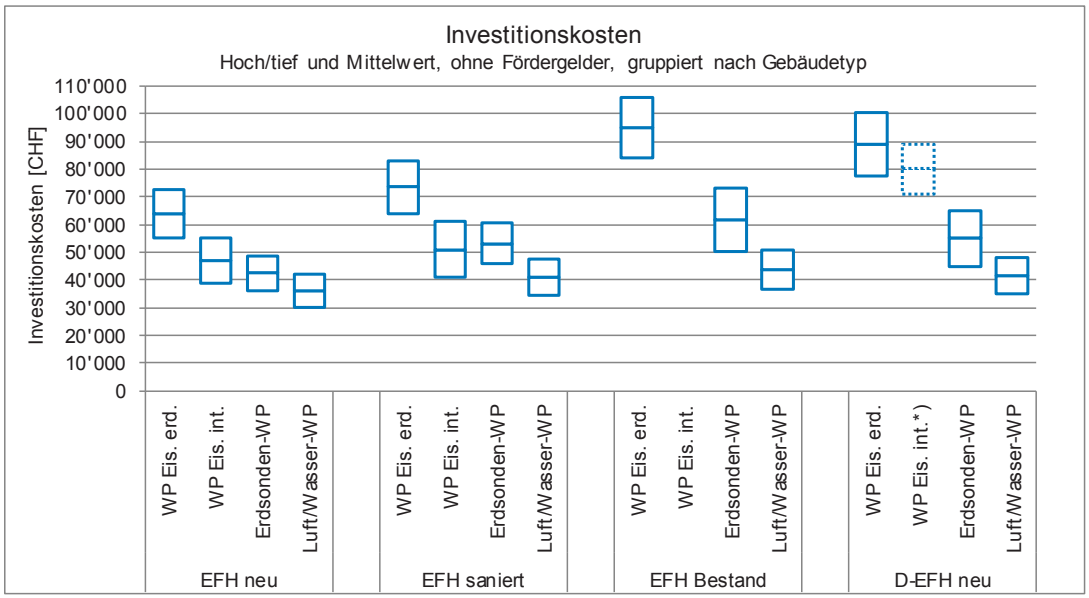


Bild 3: *Investitionskosten der verschiedenen WP-Systeme, Gruppiert nach Gebäudetyp, angegeben als Bereich, ohne Fördergelder, mit innen aufgestelltem Eisspeicher, jedoch nicht als integriertes Kompaktsystem.*

Bild 4 und 5 zeigen die jährlichen Ausgaben für Instandhaltung und Strom für die verschiedenen Referenzszenarien, ohne und mit Berücksichtigung der Kapitalkosten, jeweils bezogen auf m^2 Energiebezugsfläche (EBF).

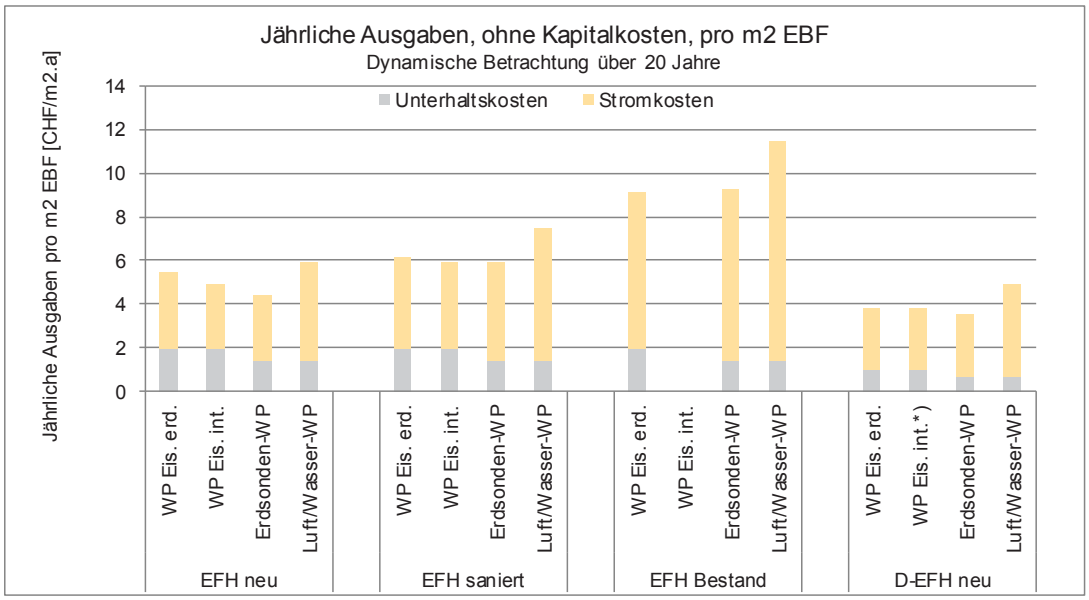


Bild 4: *Jährliche Ausgaben für Instandhaltung und Strom pro m^2 EBF (Stromtarif 18 Rp/kWh, ohne Kapitalkosten).*

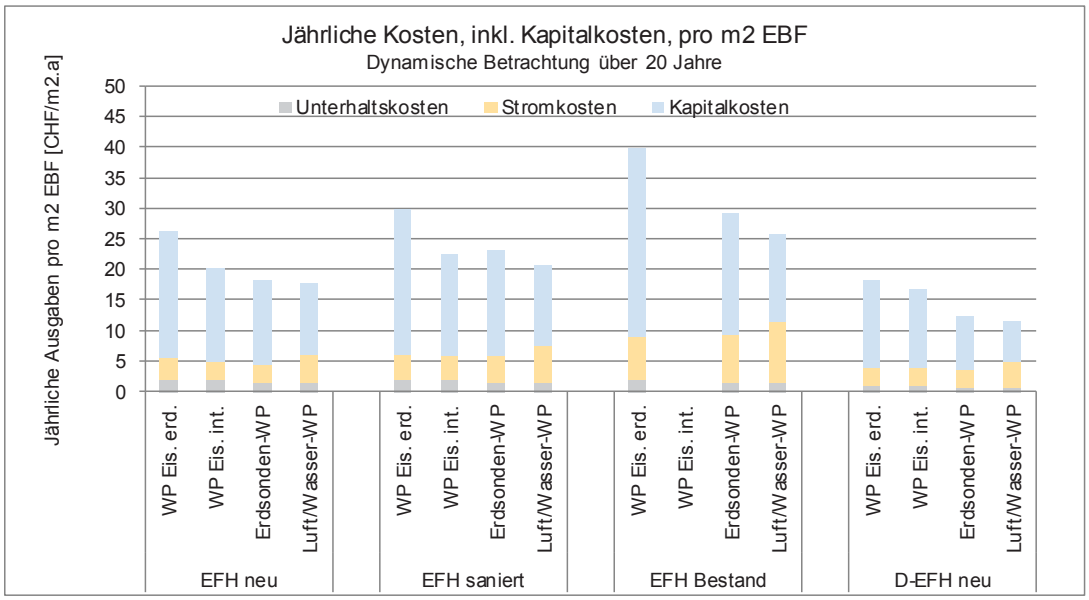


Bild 5: *Jährliche Kosten pro m2 EBF, inkl. Kapitalkosten, ohne Fördergelder (Stromtarif 18 Rp/kWh, Nominalzins 2.5%, Inflation 1%).*

Bild 6 und 7 stellen schliesslich die nach SIA 480 berechneten Wärmegestehungskosten dar, einmal ohne Fördergelder und einmal mit finanzieller Förderung von Kollektoren und Wärmepumpen entsprechend den in Tabelle 1 beschriebenen Annahmen.

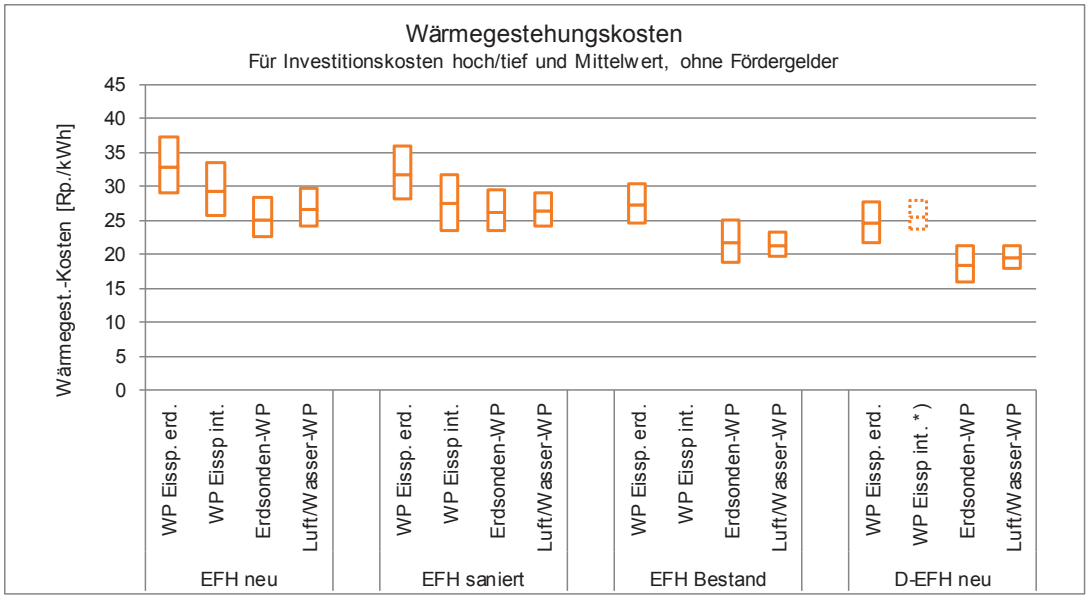


Bild 6: *Wärmegestehungskosten für Investitionskosten tief/mittel/hoch, ohne Fördergelder.*

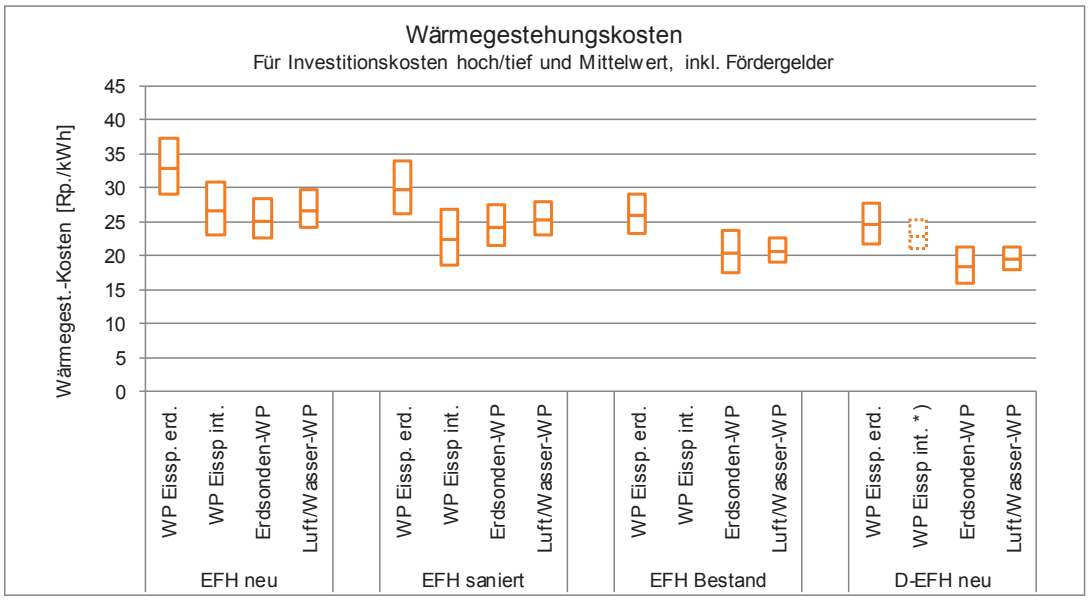


Bild 7: *Wärmegestehungskosten für Investitionskosten tief/mittel/hoch, mit Fördergeldern (Annahmen siehe Tabelle 1).*

Die Abhängigkeit der Gestehungskosten von einer Reihe von Parametern wurde in einer Sensitivitätsanalyse untersucht. Dabei wurde jeweils nur ein Parameter variiert und alle übrigen Annahmen und Parameter konstant gehalten. Die Grafik in Bild 8 fasst die Resultate in normalisierter Form zusammen.

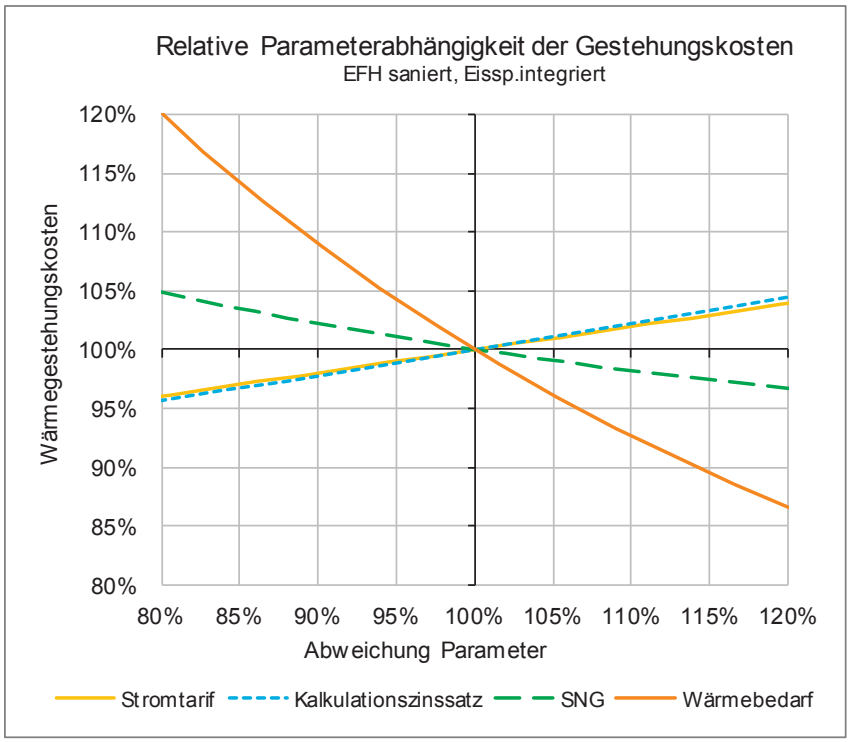


Bild 8: *Relative Parameterabhängigkeit der Wärmegestehungskosten am Beispiel des Anlagentyps "WP mit integriertem Eisspeicher und verglasten Kollektoren".*

In Bezug auf die Wirtschaftlichkeit positionieren sich die Eisspeicher-WP-Anlagen also wie folgt:

- Die jährlichen Kosten für Strom und Unterhalt sind vergleichbar mit einer Erdsonden-WP und können je nach Objekt leicht nach unten oder oben abweichen. Luft/Wasser-WP haben den höchsten Stromverbrauch und sind aus dieser Sicht (jährliche Ausgaben) am teuersten.

- Ausschlaggebend für die Gesamtwirtschaftlichkeitsbetrachtung sind aber die Kapitalkosten und damit vor allem die Investitionskosten für die Erstellung der Anlage. Die heute auf dem Markt verfügbaren Eisspeicher-WP-Komplettsysteme sind tendenziell teurer als Erdsonden-WP-Anlagen. Dabei fällt vor allem der erdverlegte Eisspeicher ins Gewicht. Während die Investitionskosten für das Kompaktsystem mit integriertem Eisspeicher gleich hoch oder geringfügig höher ist als für die Erdsonden-WP, ist das System mit erdverlegtem Eisspeicher deutlich teurer und resultiert im höchsten Wärmegestehungspreis. Der Einsatz macht aus wirtschaftlicher Sicht also vor allem da Sinn, wo Erdsonden nicht möglich oder nicht erwünscht sind

- Wenn die finanzielle Förderung von Solarkollektoren und Wärmepumpen mitberücksichtigt wird, verschiebt sich das Bild leicht. Je nach Kanton und Annahme der Förderhöhe und -Art liegen die Wärmegestehungskosten für Eisspeicher-WP (integrierter Eisspeicher), Erdsonden-WP und Luft/Wasser-WP gleichauf. Der Anlagentyp mit erdverlegtem Eisspeicher und Solar-Luft-Absorber ist unter dieser Betrachtung benachteiligt, da nicht-selektive, nicht verglaste Kollektoren als Wärmepumpen-Quelle in keinem Kanton gefördert werden.

Die Stückzahlen der Eisspeicher-WP Komplettsysteme sind noch klein. Mittelfristig ist daher zu erwarten, dass die Kosten noch sinken und sich weiter der Erdsonden-WP angleichen.

Umweltbelastung

Für den Vergleich der Umweltbelastung wurde die gleiche Typisierung verwendet, wie bei der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung. Für die verschiedenen Szenarien wurden die drei Indikatoren Umweltbelastungspunkte (UBP'13), nicht erneuerbarer Primärenergieverbrauch (PE) und Treibhausgas-Emissionen (THG) berechnet. Die Kennwerte für die einzelnen Komponenten basieren auf der ecoinvent Datenbank, KBOB und bestehenden Studien [3], [4].

Für alle drei Indikatoren für die Umweltbelastung ist der Stromverbrauch während der Lebensdauer der Anlage dominierend. Die Umweltbelastung durch den Stromverbrauch ist im Fall eines typischen Strommix (Schweiz oder Europa) um ein vielfaches höher als die Umweltbelastung durch Erstellung und Entsorgung der Anlage. Die Eisspeicher-Anlagen positionieren sich daher, aufgrund des guten Systemnutzungsgrades, grundsätzlich ähnlich wie die Erdsonden-WP und besser als die Luft/Wasser-WP (Bild 9 bis 11).

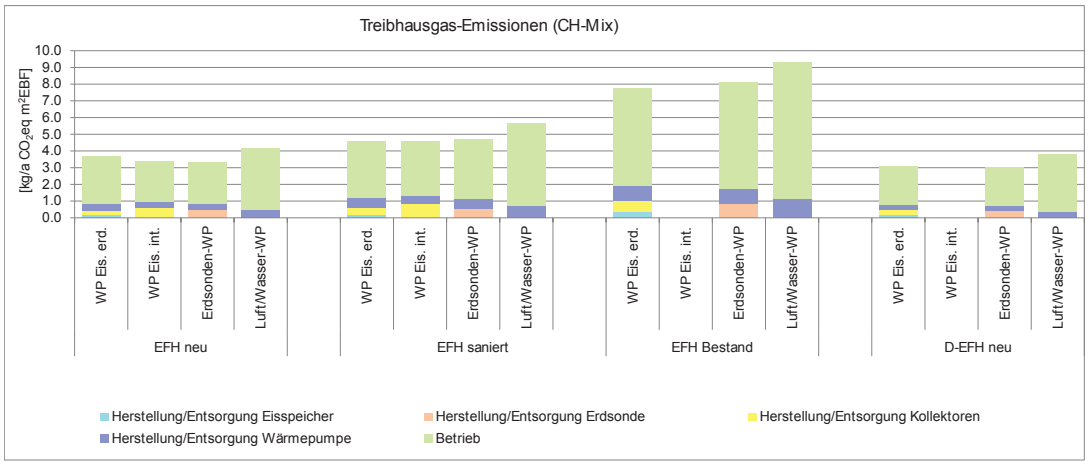


Bild 9: *Nicht erneuerbarer Primärenergiebedarf (Herstellung/ Betrieb/ Entsorgung) mit CH-Strommix.*

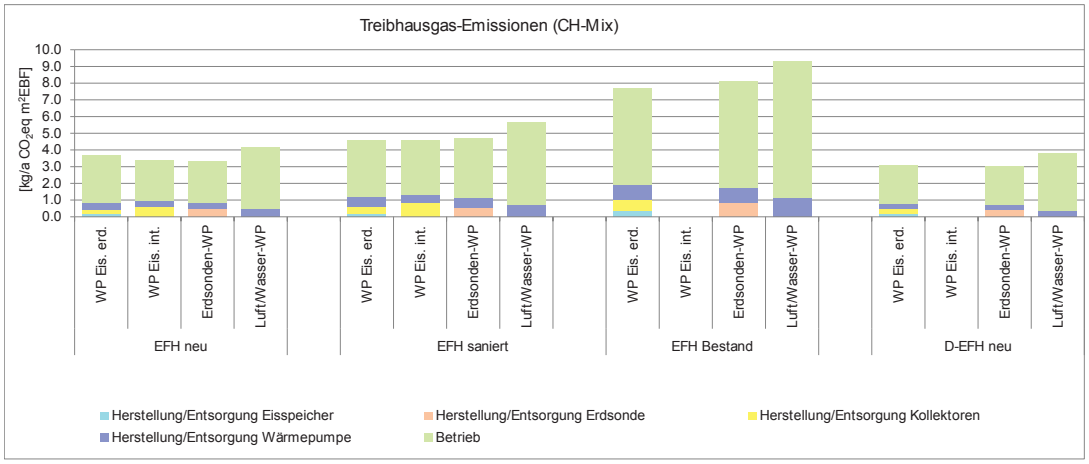


Bild 10: *Treibhausgas-Emissionen (Herstellung/Betrieb/Entsorgung) mit CH-Strommix.*

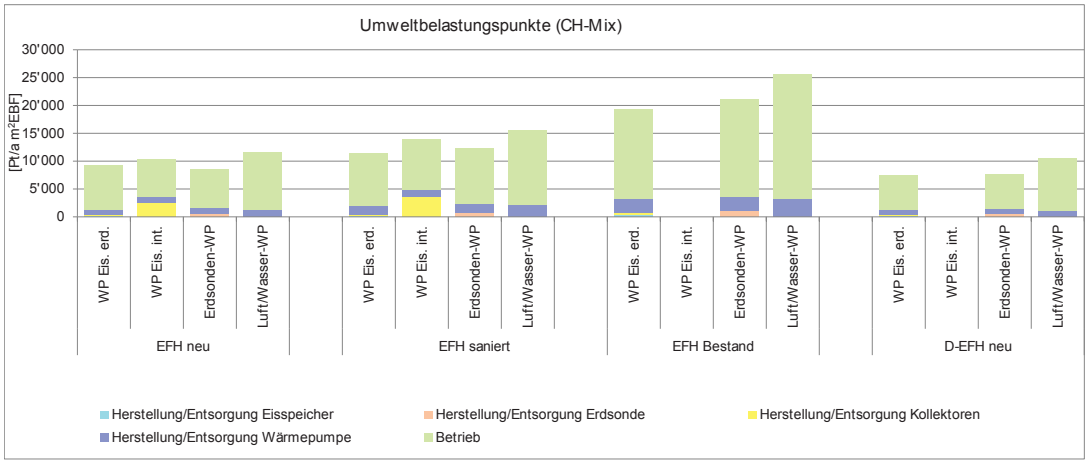


Bild 11: *Umweltbelastungspunkte (Herstellung/Betrieb/Entsorgung) mit CH-Strommix.*

Wird die Wärmepumpe mit einem erneuerbaren Strommix betrieben, ist der Einfluss des Stromverbrauchs auf die Umweltbelastung kleiner als die Belastung durch Erstellung und Entsorgung. Die Positionierung verschiebt sich in diesem Fall und die Luft/Wasser-WP schneidet, aufgrund des geringen Materialaufwandes, am besten ab. Solche Resultate müssen in einer globalen Perspektive allerdings mit Vorsicht interpretiert werden, da erneuerbarer Strom mittelfristig ein knappes Gut bleibt.

Marktpositionierung

Aus technischer Sicht positionieren sich die Eisspeicher-WP-Anlagen als grundsätzlich geeignete und effiziente Heizsysteme für den EFH-Bereich. Die Systemnutzungsgrade von gut eingestellten Anlagen sind vergleichbar mit Erdsonden-Wärmepumpen und besser als bei Luft/Wasser-Wärmepumpen. Da keine Erdsondenbohrung nötig ist, können die Eisspeicher-WP-Anlagen auch in Gebieten installiert werden, wo Erdsonden nicht bewilligt werden. Dafür muss, je nach System, ausreichend Platz für die Einbringung eines Eisspeichers ins Erdreich und Platz für die Aufstellung der Solar-Luft-Absorber vorhanden sein. Wegen der Komplexität dieses Anlagentyps können im EFH-Bereich nur Komplettsysteme mit aufeinander abgestimmten Komponenten und Steuerung empfohlen werden.

Die Positionierung der Systeme in Bezug auf Wirtschaftlichkeit und Umweltbelastung ist in der folgenden Grafik illustriert. Die beiden Eisspeicher-WP Anlagentypen und die Erdsonden-WP sind mit dem Referenzsystem Luft/Wasser-WP verglichen. Die Abweichung der Wärmegestehungskosten und der Umweltbelastung ist in % dargestellt. Die drei Umweltbelastungs-Indikatoren (PE, THG, UBP'13) können für diese Einordnung unterschiedlich gewichtet werden. Im gezeigten Beispiel ist die Gewichtung gleich.

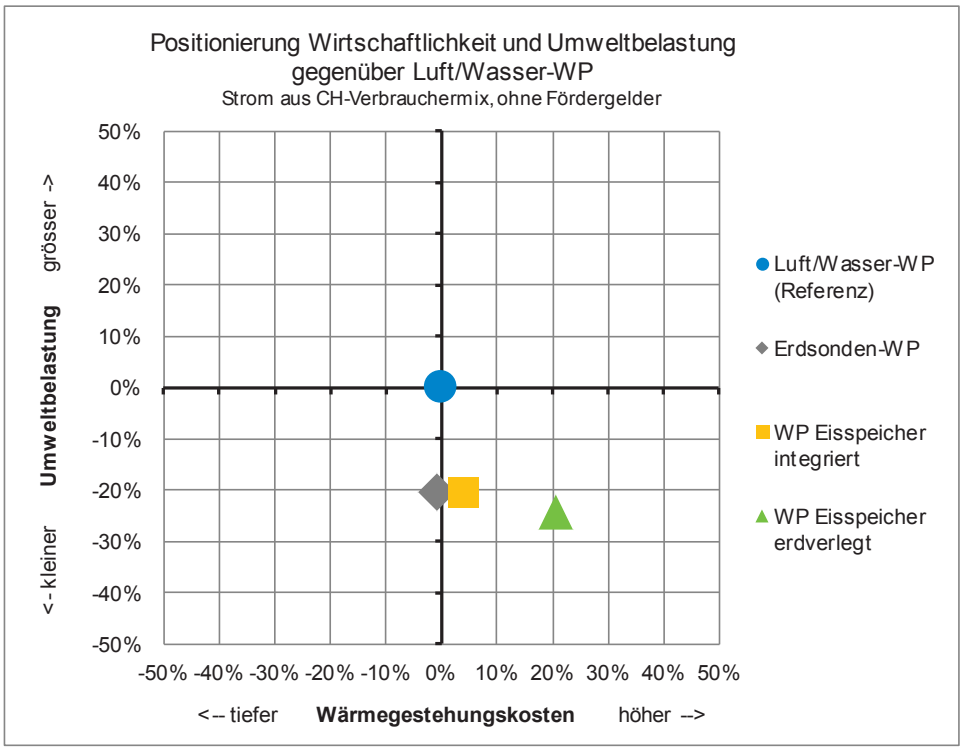


Bild 12: *Positionierung der untersuchten Anlagetypen gegenüber der Luft/Wasser-WP für den Referenzfall EFH saniert, Strom CH Verbrauchermix, ohne Förderung (oben) und mit Förderung von WP und Kollektoren (unten)*

Quellen

[1] S. Minder, R. Wagner, M. Mühlebach, T. Weisskopf, Eisspeicher-Wärmepumpen-Anlagen mit Sonnenkollektoren, Technologiestudie, EnergieSchweiz, Bundesamt für Energie BFE, 2014.

[2] S. Minder, R. Hefti, N. Ettlin, T. Weisskopf, Eisspeicher-Wärmepumpen-Anlagen mit Sonnenkollektoren, Wirtschaftlichkeit, Umweltbelastung und Marktpositionierung, EnergieSchweiz, Bundesamt für Energie BFE, 2015.

[3] D. Philippen, D. Carbonell, D. Zenhäusern, M. Granzotto, M. Haller, S. Brunold, "High-Ice System development for high solar thermal gains with ice storage and heat pump", Final Report, SPF Institut für Solartechnik, Hochschule für Technik Rapperswil HSR, Bundesamt für Energie BFE, 2015.

[4] T. Kägi, F. Dinkel, "Ökobilanz Wärmeerzeugungssysteme", Carbotech AG, 2012

[5] P. Hubacher, C. Bernal, QS-WP/QP: Fortsetzung des Feldmonitorings von WP-Anlagen (2011-2014), Bundesamt für Energie BFE, 2015.

[6] D. Sigrist, S. Kessler, Harmonisiertes Fördermodell der Kantone (HFM 2015), Schlussbericht, Bundesamt für Energie BFE, 2015.

Thomas Afjei, Prof., Dr. sc. techn. ETH; Dozent Gebäudetechnik
Andreas Genkinger, dipl. Physiker; wiss. Mitarbeiter
FHNW Institut Energie am Bau, St. Jakob-Strasse 84
4132 Muttenz
andreas.genkinger@fhnw.ch
www.iebau.ch

Effizienz kombinierter Systeme mit Wärmepumpen

Leistungsgeregelte Wärmepumpen, allenfalls mit solarthermischer Unterstützung, sind hocheffizient in der Bereitstellung von Wärme. Mit Hilfe von Systemsimulationen wurde ein mögliches Norm-Rechenverfahren entwickelt, wie deren Jahreseffizienz normativ bestimmt werden könnte. Dabei wird grösstenteils auf gut verfügbare Eingangsdaten und etablierte Verfahren abgestützt. Auf Basis der Bin-Methode gemäss Norm SIA 384/3 und Prüfdaten nach Europäischer Norm EN 14825 lassen sich bereits gute Ergebnisse erzielen, die durch kleine Modifikationen im Rechengang noch verbessert werden können. Gesetzliche Anforderungen sichern dabei eine gute Verfügbarkeit von Prüfwerten. Damit können auch Energieverbräuche im Standby-Betrieb abgeschätzt werden. Diese können im Bereich bis 10 % des gesamten jährlichen Elektrizitätsbezuges liegen.

Variable capacity controlled heat pumps, eventually combined with a solar thermal heat generator are highly efficient in heat production. By means of system simulations, a possible standard calculation method how to estimate the yearly performance of such systems has been developed. Using readily available data and established methods has been a major goal of this work. Based on a bin method according to Swiss standard SIA 384/3 and rated data from EN 14825 fairly good results could be reached. Some minor modifications can even improve the accuracy. Thereby, European regulations ensure the wide availability of required input data, such that even standby electricity consumption can be calculated. As these can make up around 10 % of yearly consumption, revised standards should also include this contribution.

Ausgangslage

Seit einigen Jahren drängen vermehrt leistungsgeregelte Kleinwärmepumpen für den Heizbetrieb auf den Markt. Es bestehen aber noch keine gängigen Verfahren wie die Effizienz solcher Geräte – auch im Verbund mit thermischen Solaranlagen – im Planungsprozess bestimmt werden kann.
Diese Lücke wird durch dieses Projekt geschlossen. Es werden Wege aufgezeigt, wie die Jahreseffizienz („Jahresarbeitszahl“) einer Wärmepumpe aus allgemein zugänglichen Prüfdaten bestimm werden kann. Dabei wurde speziell darauf Wert gelegt, möglichst viel von etablierten Verfahren weiter nutzen zu können.
Das hier vorgestellte Projekt „EFKOS“ (**EF**fizienz **KO**mbinierter **S**ysteme mit Wärmepumpe) wurde vom BFE unterstützt und ist Schweizer Beitrag zum IEA HPP Annex 39 „A common method for testing and rating of residential HP and AC annual/seasonal performance”.

Lösungsansatz

In einem ersten Schritt wurden bestehende oder in Entstehung befindliche Norm-Rechenverfahren zu Wärmepumpenheizungen nach Inhalten zu Leistungsregelung und Umgang mit kombinierten Systemen (d.h. solche mit mehreren Wärmeerzeugern) durchsucht. Daraus ergaben sich Hinweise, wie ein vollständiger Rechengang aussehen könnte. Für drei verschiedene Systemvarianten mit jeweils einer Luft/Wasser Wärmepumpe als Hauptwärmeerzeuger und optionaler solarthermischer Unterstützung (Warmwasser und/oder Raumheizung) wurden danach Simulationsmodelle der Wärmepumpe entwickelt, die Gesamtsysteme modelliert und die Ergebnisse von Jahressimulationen mit Resultaten von Normrechenverfahren verglichen. Wo nötig wurden Anpassungen zur Berücksichtigung der Leistungsregelung (gegenüber Ein/Aus geregelten Geräten) gemacht, wobei jeweils ein typisches und nicht ein hoch optimiertes Regelverhalten angenommen wurde. Bei den Vergleichen dienen die Simulationsergebnisse jeweils als Referenz. Die „Robustheit" der Normrechnungen wurde anhand der Variation der Grösse der Solaranlage geprüft, wobei nebst einem typischen je eine knappe und grosszügig dimensionierte Variante betrachtet wurde. Details finden sich im Schlussbericht [1].

Normenübersicht

Von Interesse waren Rechengänge zur Bestimmung von Effizienzkennwerten leistungsgeregelter Wärmepumpen (COP) an beliebigen Arbeitspunkten, das grundlegende Rechenverfahren zur Bestimmung der Jahreseffizienz (Aussentemperaturklassen- oder kurz Bin-Verfahren, Zeitschrittverfahren) und ob resp. wie aus einem Jahresverbrauch an Heizwärme Q_h die Bedarfe für jeden Rechenschritt bestimmt werden können (Tabelle 1).

Norm	COP-Kennfeld	Methode	BIN-Bedarf aus Q_h	Komb. Systeme[2)]	Warm-wasser
EN 15316-4-2[1)]	Nein	Bin	Ja	Nein	Ja
SIA 384/3	Nein	Bin	Ja	Ja	Ja
EN 14825	Nein	Bin	Nein	Nein	Nein
ISO 13612-2	Ja	Zeitschritt	Nein	Nein	Ja

[1)]Ausgabe 2008 [2)] ausser direktelektrische Nachheizung

Tabelle 1: *Wichtige Normen im Wärmepumpenbereich*

Massgebenden Einfluss auf das weitere Vorgehen hatte die Neubearbeitung der Europäischen Norm EN 14825 [2], welche einerseits Grundlage für die Europäische Marktzulassung ist, andererseits aber ebenso die Basis der kürzlich eingeführten Energieetikette für Wärmeerzeuger im Bereich Wärmepumpen bildet. Damit einher geht jeweils die Pflicht, detaillierte Produktedaten zu veröffentlichen. Aufgrund dieser gesetzlichen Anforderungen wird davon ausgegangen, dass diese Daten künftig breit verfügbar und deshalb ideal geeignet für ein Norm-Rechenverfahren sein werden. Die Norm befasst sich gleichwertig sowohl mit „herkömmlich"

Ein/ Aus geregelten als auch mit leistungsgeregelten Wärmepumpen und definiert im Wesentlichen verschieden Heizkurven (unterschiedliche Anwendungsfälle und unterschiedliche Klimata) anhand derer die Wärmepumpen-Austritttemperatur im Prüfverfahren eingestellt werden muss (Tabelle 2). Die Norm beschreibt ebenso einen Rechengang zur Bestimmung der „saisonalen Arbeitszahl" SCOP, stützt sich dabei aber einzig auf Daten zum Gerät und dessen Betriebsweise und nicht auf solche der tatsächlichen Last (Gebäude). Nicht behandelt werden kombinierte Systeme sowie ein allfälliger Warmwasserbetrieb.

	A-10	A-7	A2	A7	A12
Variable Austrittstemperatur	35 ºC	34 ºC	30 ºC	27 ºC	24 ºC

Tabelle 2: *Heizkurve gemäss Definition EN 14825 im mittleren Klima für Anwendung bei niedriger Temperatur (Luft/Wasser-Gerät). Eine ideale leistungsgeregelte Wärmepumpe würde die Austrittstemperaturen exakt einhalten.*

All diese Aspekte greift die 2013 erschienene Norm SIA 384/3 [3] „Heizungsanlagen in Gebäuden - Energiebedarf" auf, mögliche Ansätze zur Generierung des Kennfeldes des COP leistungsvariabler Geräte wiederum werden in der internationalen Norm ISO 13612-2 (Ausgabe 2014) [4] beschrieben.
Die ebenfalls genannte Norm EN 15316-4-2 [5] stammt in aktueller Fassung aus dem Jahr 2008 und wird zurzeit komplett überarbeitet. Sie spielte daher eine untergeordnete Rolle.

Systemwahl

Sämtliche Simulationen und Normrechnungen wurden anhand dreier typischer Systemvarianten (Tabelle 3) durchgeführt.

	Einheit	Systemvariante						
Solarunterstützung	-	Keine	Warmwasser			Heizung + Warmwasser		
Anzahl Kollektoren	-	-	1	2[1)]	3	4	6[1)]	8
Aperturfläche	m^2	-	2.3	4.7[1)]	7.0	9.4	14.0[1)]	18.7
Speichervolumen	l	300	500[2)]	500[2)]	500[2)]	800[3)]	1000[3)]	1200[3)]

[1)]typische Variante [2)] Warmwasserspeicher [3)]Kombispeicher

Tabelle 3: *Untersuchte Systemvarianten mit Luft/Wasser-Wärmepumpe und optionaler Unterstützung einer solarthermischen Anlage.*

Das einfachste System (ohne Solaruntersstützung) wird in Bild 1 gezeigt. Eine direktelektrische Zusatzheizung kam in keinem der Systeme zur Anwendung (Monovalente Auslegung).

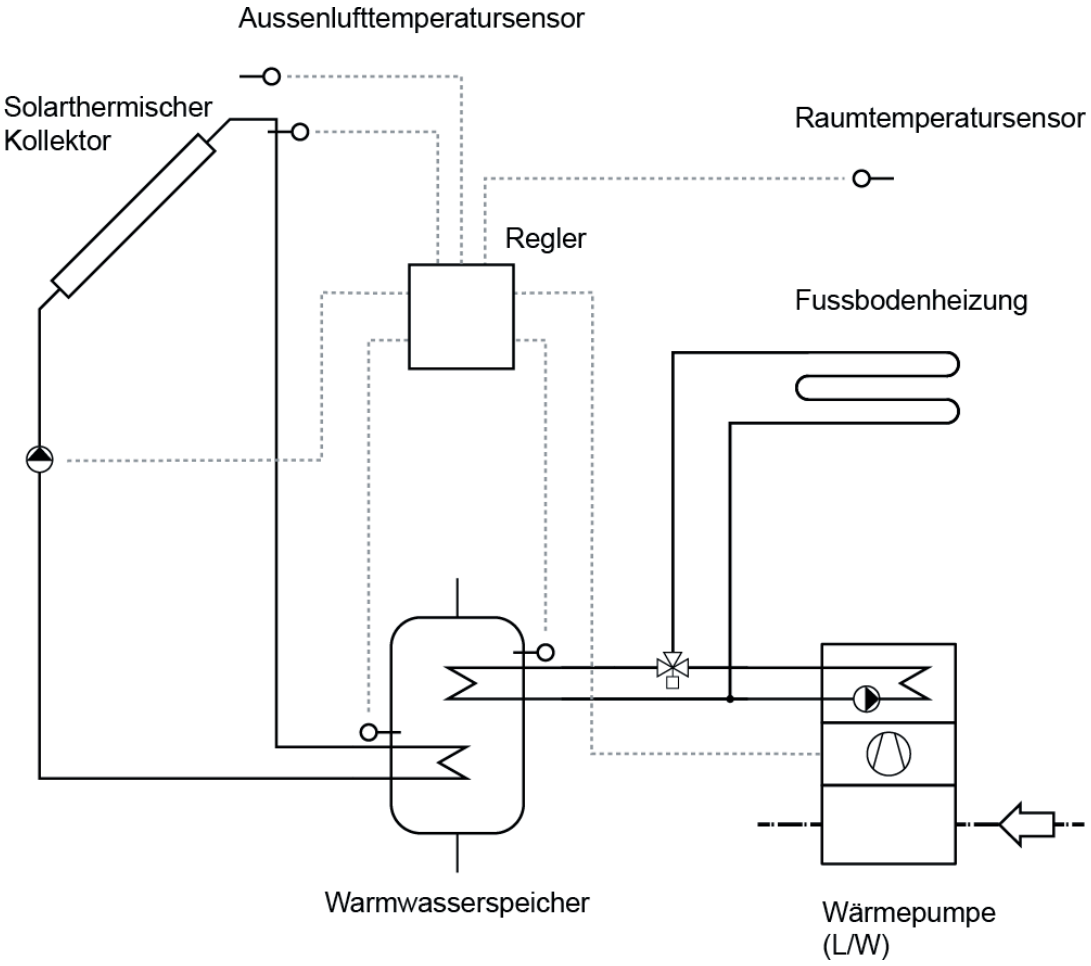


Bild 1: *Prinzipschema Systemvariante ohne Solarthermie.*

Als Last wurde eine leicht modifizierte Version des in [6] vorgestellten Einfamilienhauses „SFH45“ verwendet, als Warmwasserverbrauch wurden 155 Liter je Tag angenommen (50 ºC). Der gewählte Standort Bern-Liebefeld entspricht einer typischen Situation im Schweizerischen Mittelland, das Klima stimmt auch relativ gut mit dem Europäischen Referenzklima „mittel“ für den Standort Strassburg überein. Das Gebäude wird über den Fussboden beheizt, ein Pufferspeicher für den Heizbetrieb ist nicht vorhanden (ausser im System mit solarer Heizungsunterstützung).
Jedes System wurde sowohl mit einer Ein/Aus geregelten als auch mit einer leistungsvariablen L/W-Wärmepumpe gleicher Maximalleistung als Hauptwärmeerzeuger untersucht. Das Verhalten im Warmwasserbetrieb wurde bei beiden Wärmepumpentypen – mit oder ohne Leistungsregelung – als identisch angenommen, das Gerät läuft dabei stets mit maximaler Leistungsabgabe.

Simulationen

Sämtliche Simulationen wurden in der Simulationsumgebung Matlab®/Simulink® mit der Gebäudetechnik-Bibliothek CARNOT durchgeführt.
Das bereits in [7] vorgestellte Simulationsmodell für Ein/Aus geregelte Wärmepumpen wurde auf leistungsgeregelte Geräte erweitert, wobei im Wesentlichen folgende Eigenschaften angenommen wurden:

a) Die Heizleistung lässt sich im Bereich 30…100% der jeweiligen Maximalleistung einstellen
b) Die Grädigkeit am Verdampfer/Kondensator ist nicht konstant, sondern proportional zur momentan übertragenen Leistung

Das Verhalten kann damit bereits gut angenähert werden. In den Simulationen wird die gewünschte Heizleistung aussentemperaturabhängig angefordert, das Ein- resp. Ausschaltsignal kommt aber in beiden Fällen (konventionelle Ein/Aus resp. leistungsgeregelte Wärmepumpe) vom Referenzraum-Temperatursensor, wodurch die winterlichen Raumtemperaturen grösstenteils im Bereich ±1 ºC um das eingestellte Soll von 20 ºC gehalten werden konnten.

Normrechnungen

Die „Jahresarbeitszahlen“ wurden jeweils gemäss SIA 384/3, EN 14825 und mit dem Rechenprogramm WPesti ermittelt. Letzteres implementiert in den neueren Versionen ab V8.1 die Norm SIA 384/3. Da die Norm EN 14825 im Wesentlichen zur Gerätebewertung dient werden nur die passenden Prüfpunkte genutzt, die Jahresarbeitszahl aber gemäss SIA 384/3 bestimmt. Diese gestattet den Bezug auf objektspezifische Daten (in diesem Fall das „SFH45“ Gebäude am Standort Bern-Liebefeld) und kann sowohl Heiz- als auch Warmwasserbetrieb, jeweils mit oder ohne Solarunterstützung berücksichtigen. Der Modellierung der Wärmepumpe entsprechend wird hier die Methode mit (lokal) konstantem Gütegrad zur Bestimmung der Wärmepumpen-Leistungskennwerte im jeweiligen Betriebspunkt angewendet. Speziell betrachtet werden im Folgenden Rechengänge für leistungsgeregelte Wärmepumpen. Es wurde mit drei leicht unterschiedlichen Varianten gerechnet:

EN 14825 Prüfdaten: Es wird angenommen, die Leistungskennwerte entlang der Heizkurve entsprächen genau den Prüfwerten nach EN 14825 „Anwendung bei niedriger Temperatur“ (35 ºC Austrittstemperatur im Auslegungsfall) in der „Referenzheizperiode mittel“ (Klima Strassburg). Dies wird – je nach tatsächlicher Auslegung des Wärmeabgabesystems – kaum zutreffen, repräsentiert aber den rechnerisch einfachsten Fall.

SIA 384/3 Prüfdaten: Als Idealfall wurde mit EN 14825 vergleichbaren „Prüfdaten“ gerechnet, welche aber exakt den Durchfluss- und Temperaturbedingungen gemäss SIA 384/3 entsprechen. Diese Eingangsdaten stammen aus Simulationen, sind so in Realität aber nicht verfügbar.

EN 14825 modifiert: Die EN 14825 Prüfdaten wurden so modifiziert, dass sie den Bedingungen der SIA 384/3 am ehesten entsprechen. Hierbei wird im Wesentlichen angenommen, die abgegebenen Wärmeleistung in jedem Aussentemperatur-Bin entspräche genau derjenigen

des tatsächlichen Bedarfes (nach SIA 384/3). Der Rechengang führt danach weiter über die Annahme eines (lokal) konstanten Gütegrades.

Als Eingangsdaten der Wärmepumpe wurden stets solche verwendet, die auf einem „virtuellen Prüfstand“ mit dem gleichen Wärmepumpenmodell erzeugt wurden, welches auch den Simulationen zugrunde liegt. Dadurch sollen Abweichungen zwischen Simulation und Norm-Rechenverfahren welche aus unterschiedlichen Basisdaten entstehen vermieden werden.

Ergebnisse

Die Tabelle 4 zeigt eine Gegenüberstellung der berechneten Jahreseffizienzen für alle drei oben erwähnten Rechenvarianten. Bei der Auswertung wurde die Systemgrenze durch das Wärmepumpengerät festgelegt (JAZ_{WP}). Im reinen Heizbetrieb ($JAZ_{WP,H}$) kann bereits mit unveränderten EN 14825 Prüfdaten ein gutes Ergebnis erreicht werden: Die Abweichung liegt unter 5 % gegenüber der Simulation und damit im Bereich der Messunsicherheit einzelner COP-Werte. Durch eine leichte Modifikation lässt sich das Ergebnis noch weiter an die als Referenz betrachtete Simulation annähern, es entspricht damit nahezu der als Idealvariante angesehenen Lösung mit „imaginären“ SIA 384/3 Prüfdaten.
Auffällig sind die gegenüber der Simulation deutlich höheren Arbeitszahlen im Warmwasserbetrieb ($JAZ_{WP,WW}$), was sich natürlich auch auf die Auswertung beider Betriebsmodi ($JAZ_{WP,HWW}$) durchschlägt. Weitere Untersuchungen zeigten, dass sich dies durch dynamische Effekte (Aufheizen der thermischen Masse in der Wärmepumpe) erklären lässt, welche im Normrechenverfahren nicht berücksichtigt werden.

Berechnung	$JAZ_{WP,H}$	$JAZ_{WP,WW}$	$JAZ_{WP,HWW}$
Simulation	4.6	3.2	4.1
SIA 384/3 (EN 14825 Prüfdaten)	4.8	3.7	4.5
SIA 384/3 (SIA 384/3 Prüfdaten)	4.5	3.7	4.4
SIA 384/3 (EN 14825 modifiziert)	4.6	3.7	4.4

Tabelle 4: *Auswertung der Jahresarbeitszahlen JAZ (Systemgrenzen Wärmepumpe) im Heizbetrieb ($JAZ_{WP,H}$), im Warmwasserbetrieb ($JAZ_{WP,WW}$) und für beide Betriebsarten ausgewertet ($JAZ_{WP,HWW}$). Vergleich der unterschiedlichen Rechenvarianten mit dem Simulationsergebnis. System ohne Solarunterstützung.*

Die Betrachtung aller Systemvarianten in Bild 2 zeigt vergleichbare Resultate auch bei den Systemen mit Solarunterstützung. Das etablierte Bin-Verfahren eignet sich also auch für Systeme mit leistungsgeregelten Wärmepumpen mit oder ohne solare Unterstützung.

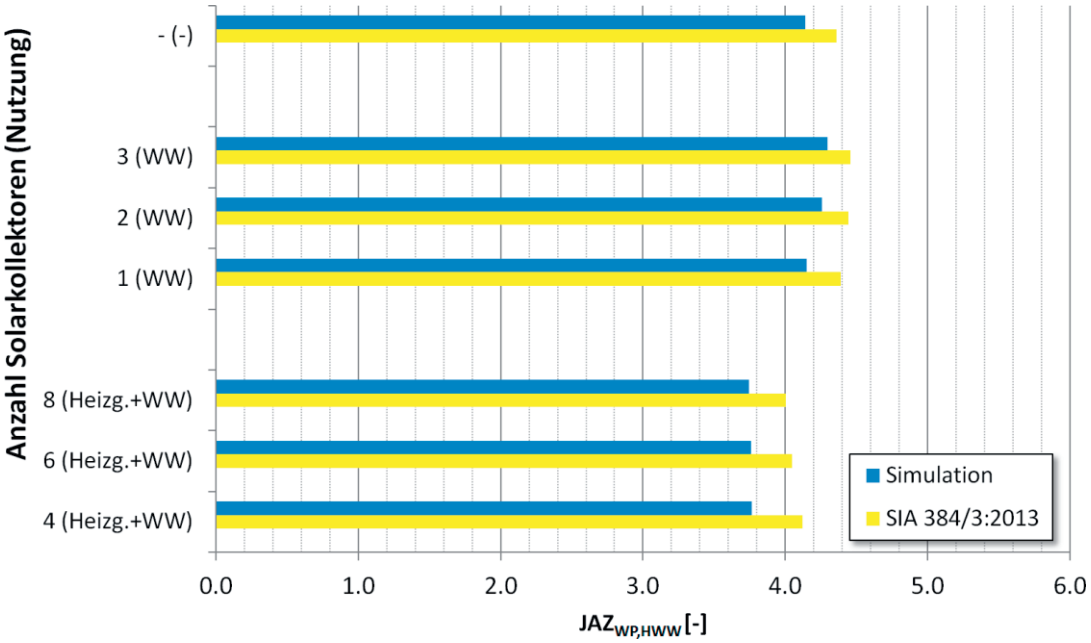


Bild 2: *Vergleich der Simulationen mit dem Normrechenverfahren, alle Systeme. Die Abweichung stammt grösstenteils aus der Vernachlässigung dynamischer Effekte des Warmwasserbetriebs gemäss Norm-Rechenverfahren.*

Werden leistungsgeregelte mit nicht-leistungsgeregelten Wärmepumpen verglichen, so kann durch die Leistungsregelung im günstigsten Fall eine 18 % grössere Jahresarbeitszahl erreich werden ($JAZ_{WP,H}$). Diese Steigerung kann grösstenteils durch die Anpassung der Leistungsabgabe erklärt werden, wodurch sich im Mittel eine um 4.2 ºC tiefere Wärmepumpen-Austrittstemperatur ergibt (Bild 3). Dafür erhöht sich die Laufzeit der Wärmepumpe im Heizbetrieb um 50 %.

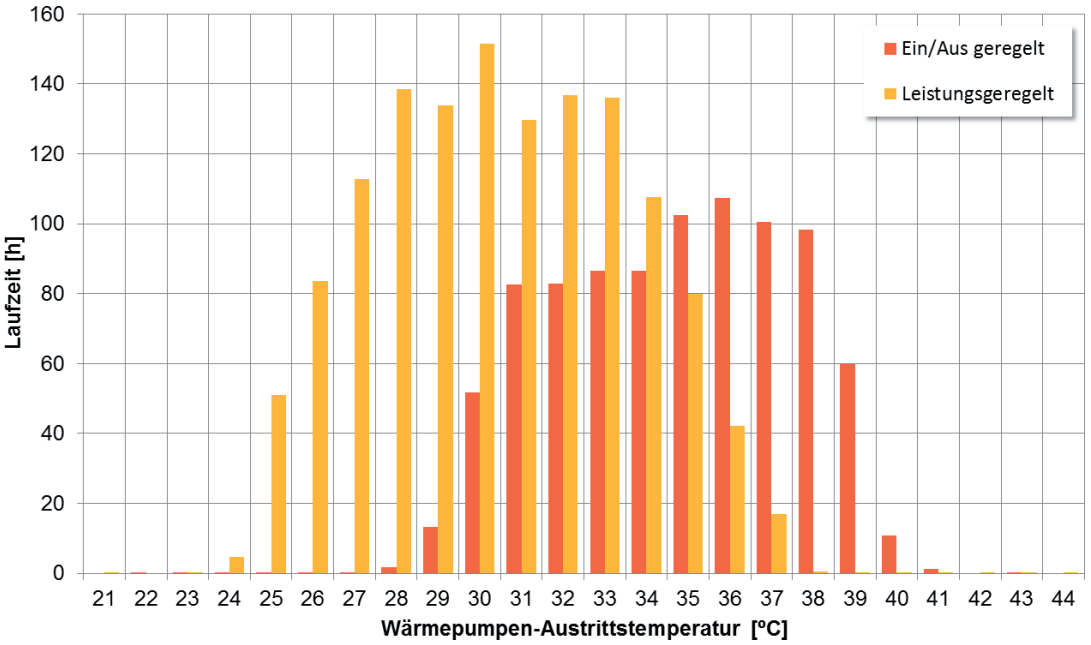


Bild 3: *Die Leistungsregelung führt zu tieferen Wärmepumpen-Austrittstemperaturen, was die höhere Jahreseffizienz erklärt.*

Wesentlich zum Elektrizitätsverbrauch einer Heizungsanlage kann auch der Standby-Betrieb beitragen, weil die Geräte mehrheitlich in diesem Modus verweilen. Die hier getroffene Annahme beträgt durchschnittliche 46 W Leistungsaufnahme für die betrachtete Wärmepumpe mit einer Heizleistung von etwas über 7 kW am Prüfpunkt A-7/W35. Diese „Leerlauf-Leistungsaufnahme“ verringert die Jahreseffizienz um 0.4 „JAZ-Punkte“ oder runde 10 %, und zwar unabhängig davon, ob das Gerät die Heizleistung regeln kann oder nicht (Tabelle 5).

Wärmepumpentyp	Standby-Dauer	$JAZ_{WP,HWW}$ (exkl. Standby)	$JAZ_{WP,HWW}$ (inkl. Standby)
Leistungsgeregelt	7131 h	4.1	3.7
Ein/Aus geregelt	7571 h	3.7	3.3

Tabelle 5: *Einfluss des Standby-Betriebes auf die Jahresarbeitszahl. Simulationsergebnisse. System ohne Solarunterstützung.*

Schlussfolgerungen

Die Untersuchungen zeigen, dass sich leistungsgeregelte Wärmepumpen – auch im Verbund kombinierter Systemen – auf relativ einfache Art und mit guter Genauigkeit in das bestehende Normenwerk einbauen lassen. Als erste Annahme reicht es bereits aus, unmodifizierte Prüfdaten gemäss EN 14825 in einem Bin-Verfahren zu verwenden, auch wenn die Wärmepumpe im tatsächlichen Objekt leicht anders betrieben wird. Da über die Europäische Gesetzgebung auch weitere Leistungsdaten einer Wärmepumpe – etwa zum Standby-Betrieb – allgemein verfügbar sind macht es Sinn, diesen Elektrizitätskonsum ebenfalls zu berücksichtigen. Der Effekt kann durchaus bedeutsam sein.

Dank

Die Autoren bedanken sich beim Bundesamt für Energie für die finanzielle Unterstützung und die Projektbegleitung.

Quellen

[1] A. Genkinger: EFKOS – Effizienz kombinierter Systeme mit Wärmepumpe, Schlussbericht, FHNW IEBau, 2015.

[2] EN 14825:2013, Luftkonditionierer, Flüssigkeitskühlsätze und Wärmepumpen mit elektrisch angetriebenen Verdichtern zur Raumbeheizung und -kühlung – Prüfung und Leistungsbemessung unter Teillastbedingungen und Berechnung der saisonalen Arbeitszahl, CEN, 2013

[3] SIA 384/3, Heizungsanlagen in Gebäuden – Energiebedarf, Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein (SIA), 2013

[4] ISO 13612-2, Heating and cooling systems in buildings — Method for calculation of the system performance and system design for heat pump systems — Part 2: Energy calculation, ISO, 2014

[5] EN 15316-4-2:2008, Heizungsanlagen in Gebäuden - Verfahren zur Berechnung der Energieanforderungen und Nutzungsgrade der Anlagen - Teil 4-2: Wärmeerzeugung für die Raumheizung, Wärmepumpensysteme, CEN, 2008

[6] R. Dott: The Reference Framework for System Simulations of the IEA SHC Task 44 / HPP Annex 38, Part B: Buildings and Space Heat Load, A 14825

[7] T. Afjei: Wärmepumpe und Solarthermie – Kurzberichte zu den Projekten SOFOWA und EFKOS. In News aus der Wärmepumpenforschung, Tagungsband zur 18. Tagung des Forschungsprogramms Wärmepumpen und Kälte, Bundesamt für Energie (BFE), 2012.

Marek Miara, Dr.-Ing.
Gruppenleiter „Wärmepumpen und Sorptionssysteme“
Heidenhofstraße 2
79110 Freiburg
marek.miara@ise.fraunhofer.de
www.ise.fraunhofer.de

Wärmepumpen in Mehrfamilienhäusern
Die Lösung um CO_2-Reduktionsziele zur erreichen?

Der Gebäudesektor spielt für den Energieverbrauch in den meisten Ländern eine maßgebliche Rolle und ist nach der Stromerzeugung und dem Verkehr der wichtigste Sektor hinsichtlich der Emission klimarelevanter Spurengase. Die massive Minderung der CO_2-Emissionen von Gebäuden gehört deshalb zu den wichtigsten klimapolitischen Zielen der Bundesregierung in Deutschland.

Der bauliche Wärmeschutz und die umfassende, massive Senkung der spezifischen CO_2-Emissionen (Dekarbonisierung) der Wärmebereitstellungstechniken sind die zwei wichtigsten Hebel, um die genannten Ziele bei Gebäuden zu erreichen. Die Geschwindigkeit der Zielerreichung hängt dabei entscheidend von der Sanierungsrate und der Austauschrate für Bestandsheizgeräte ab.

Wärmepumpen haben ein erhebliches Potenzial zur Absenkung der spezifischen CO_2-Emissionen für die Wärmebereitstellung. Zugleich haben sie ein großes Potenzial für den Einsatz in energetisch sanierten Gebäuden. Allerdings sind damit spezielle Anforderungen sowohl an die Wärmeübergabesysteme zur Raumheizung bzw. die Warmwasserbereitung (Wärmesenke) als auch die Nutzbarmachung von Umweltwärme (Wärmequelle) verbunden. Es gilt besonders für den Einsatz der Wärmepumpen in Mehrfamiliengebäuden.

The building sector plays a decisive role for energy consumption in most countries. Besides the electricity generation and the transport sector, the building sector is the major sector with regard to the emission of greenhouse gases. According to that, massive reduction of CO_2 emissions of buildings is one of the main climate objectives of the federal government in Germany.

The thermal insulation and the comprehensive and intensive reduction of specific CO_2 emissions (decarbonization) of techniques to supply heat are the most important levers to reach the objectives defined above. The speed of target achievement decidedly depends on the renovation rate and the exchange rate of heaters in stock.

Heat pumps have a considerable potential for lowering specific CO_2 emissions for heat delivery. Yet, they have a potential for being used for heat provision in buildings that have undergone energy-efficient refurbishment. However they are connected to specific requirements regarding DHW and heating as well as with the utilization of environmental heat (heat source). This is particularly appropriate for multi-family buildings.

Hintergrund

Der Gebäudesektor bedingt rund 40 % des Endenergieverbrauchs in Deutschland. Davon entfallen mehr als vier Fünftel auf Raumwärme und Warmwasser [1]. Im Jahr 2008 waren Raumwärme und Warmwasser zugleich für rund 20 % der energiebedingten CO_2-Emissionen Deutschlands verantwortlich [2].
Politisches Ziel ist es, die gesamten Treibhausgas-Emissionen – und entsprechend die energiebedingten CO_2-Emissionen – bis zum Jahr 2030 in Deutschland um 55 % (bezogen auf den Referenzwert des Kyoto-Protokolls) abzusenken. Bezogen auf die einzelnen Verbrauchssektoren wird hier für Raumwärme/Warmwasser die größte relative Absenkung erwartet.

Langfristige Klimaschutzziele für die Wärmebereitstellung

Tabelle 1 zeigt, welche Absenkung gegenüber dem Jahr 2008 für die Sektoren Raumwärme/Warmwasser, Verkehr, Industrie/GHD, Stromerzeugung und sonstige Umwandlungssektoren im Rahmen der Klimaschutzpolitik erwartet wird [2]. Demnach wird im Bereich Raumwärme/Warmwasser der größte relative Beitrag, eine Absenkung um 62 %, erwartet, gefolgt von der Stromerzeugung mit 57 %. Für die Sektoren Verkehr und Industrie/GHD werden bis 2030 dagegen nur vergleichsweise geringe Absenkungen um 22 % (Verkehr) bzw. um 10 % (Prozesse in Gewerbe und Industrie) erwartet.

	Reduktion energiebedingter CO_2-Emissionen von 2008 bis 2030	
Sektor	**um**	**auf dann**
Raumwärme/Warmwasser	62%	68 Mio t
Verkehr	22%	144 Mio t
Industrie/GHD	10%	62 Miot t
Stromerzeugung	57%	162 Mio t
Sonstige Umwandlungssektoren	35%	21 Mio t
SUMME	45%	447 Mio t

Tabelle 1: *Klimapolitisch vorgesehene, sektorbezogene CO_2-Einsparungen von 2008 bis 2030 (nach [1], (UBA, 2013))*

Die Analyse unterstreicht einerseits, dass die Wärmebereitstellung in Gebäuden (Raumwärme, Warmwasser) einen bedeutsamen Anteil der energiebedingten CO_2-Emissionen ausmacht. Andererseits wird deutlich, dass erhebliche Anstrengungen notwendig sind, um die klimapolitisch erwünschten Absenkungen an CO_2-Emissionen in diesem Sektor innerhalb von nur rund 2 Dekaden zu erreichen.

Für die Absenkung von CO_2-Emissionen zur Bereitstellung von Raumwärme und Warmwasser gibt es zwei grundlegende Ansätze, die sich gegenseitig ergänzen: einerseits die Reduktion des Raumwärmebedarfs durch Maßnahmen des baulichen Wärmeschutzes (energetische Sanierung) und andererseits die Dekarbonisierung der Techniken zur Wärmebereitstellung. Dekarbonisierung der Techniken zur Wärmebereitstellung bedeutet, dass pro Einheit bereit gestellter Nutzwärme geringere CO_2-Emissionen anfallen, also eine Reduktion der spezifischen CO_2-Emissionen. Maßnahmen zur Reduktion spezifischer CO_2-Emissionen für die Wärmebereitstellung sind die Nutzung erneuerbarer Energien (z.B. Solarthermie, Biomasse),

die anteilige Nutzung von Umweltwärme durch Wärmepumpen (seien es elektrisch oder thermisch (mit Brennstoffen) angetriebene Wärmepumpen) oder die gekoppelte Erzeugung von Strom und Wärme. Die Verwendung elektrischer Wärmepumpen führt in Abhängigkeit des Anteils erneuerbarer Energien im Strommix zu einer mehr oder weniger hohen Absenkung spezifischer CO_2-Emissionen für die Wärmebereitstellung. Mit einer erwarteten und bereits erfolgenden zunehmenden Durchdringung der Stromerzeugung durch Strom aus Sonne und Wind, werden elektrische Wärmepumpen somit zu einer zentralen Technologie mit reduzierten spezifischen CO_2-Emissionen.
Bild 1 zeigt, zu welcher Reduktion energiebedingter CO_2-Emissionen welches Zusammenspiel aus reduziertem Raumwärmebedarf und reduzierten spezifischen CO_2-Emissionen führt; im oberen Teil des Bildes 1 sind Absolutwerte und im untere Teil Relativwerte aufgeführt.

Endenergie RW	Endenergie RW + WW	spezifische CO_2-Emissionen für Raumwärme (RW) und Warmwasser (WW) in g pro kWh																			
EE_{RW}	$EE_{RW}+EE_{WW}$	213	205	200	195	190	185	180	175	170	165	160	155	150	145	140	135	130	125	120	115
TWh	TWh	CO_2-Emissionen für Raumwärme und Warmwasser in Millionen t																			
733	832	177.3	170.6	166.4	162.2	158.1	153.9	149.8	145.6	141.4	137.3	133.1	129.0	124.8	120.6	116.5	112.3	108.2	104.0	99.8	95.7
696	795	169.5	163.0	159.1	155.1	151.1	147.1	143.2	139.2	135.2	131.2	127.3	123.3	119.3	115.3	111.3	107.4	103.4	99.4	95.4	91.5
660	759	161.7	155.5	151.7	147.9	144.2	140.4	136.6	132.8	129.0	125.2	121.4	117.6	113.8	110.0	106.2	102.4	98.6	94.8	91.0	87.3
623	722	153.9	148.0	144.4	140.8	137.2	133.6	130.0	126.4	122.7	119.1	115.5	111.9	108.3	104.7	101.1	97.5	93.9	90.3	86.6	83.0
586	685	146.1	140.5	137.1	133.7	130.2	126.8	123.4	119.9	116.5	113.1	109.7	106.2	102.8	99.4	96.0	92.5	89.1	85.7	82.2	78.8
550	649	138.2	133.0	129.8	126.5	123.3	120.0	116.8	113.5	110.3	107.0	103.8	100.6	97.3	94.1	90.8	87.6	84.3	81.1	77.9	74.6
513	612	130.4	125.5	122.4	119.4	116.3	113.2	110.2	107.1	104.1	101.0	97.9	94.9	91.8	88.8	85.7	82.6	79.6	76.5	73.5	70.4
476	575	122.6	118.0	115.1	112.2	109.3	106.5	103.6	100.7	97.8	94.9	92.1	89.2	86.3	83.4	80.6	77.7	74.8	71.9	69.1	66.2
440	539	114.8	110.5	107.8	105.1	102.4	99.7	97.0	94.3	91.6	88.9	86.2	83.5	80.8	78.1	75.4	72.7	70.0	67.4	64.7	62.0
403	502	107.0	102.9	100.4	97.9	95.4	92.9	90.4	87.9	85.4	82.9	80.3	77.8	75.3	72.8	70.3	67.8	65.3	62.8	60.3	57.7
367	466	99.2	95.4	93.1	90.8	88.4	86.1	83.8	81.5	79.1	76.8	74.5	72.2	69.8	67.5	65.2	62.8	60.5	58.2	55.9	53.5
330	429	91.4	87.9	85.8	83.6	81.5	79.3	77.2	75.0	72.9	70.8	68.6	66.5	64.3	62.2	60.0	57.9	55.8	53.6	51.5	49.3
293	392	83.6	80.4	78.4	76.5	74.5	72.6	70.6	68.6	66.7	64.7	62.8	60.8	58.8	56.9	54.9	52.9	51.0	49.0	47.1	45.1

Endenergie RW	Endenergie RW + WW	spezifische CO_2-Emissionen für Raumwärme (RW) und Warmwasser (WW) in % bezogen auf den Wert in 2008																			
EE_{RW}	$EE_{RW}+EE_{WW}$	100%	96%	94%	92%	89%	87%	84%	82%	80%	77%	75%	73%	70%	68%	66%	63%	61%	59%	56%	54%
% (2008)	% (2008)	CO_2-Emissionen für Raumwärme und Warmwasser in % bezogen auf den Wert in 2008																			
100%	100%	100.0	96.2	93.9	91.5	89.2	86.8	84.5	82.1	79.8	77.4	75.1	72.7	70.4	68.0	65.7	63.4	61.0	58.7	56.3	54.0
95%	96%	95.6	92.0	89.7	87.5	85.2	83.0	80.7	78.5	76.3	74.0	71.8	69.5	67.3	65.0	62.8	60.6	58.3	56.1	53.8	51.6
90%	91%	91.2	87.7	85.6	83.4	81.3	79.2	77.0	74.9	72.7	70.6	68.5	66.3	64.2	62.0	59.9	57.8	55.6	53.5	51.4	49.2
85%	87%	86.8	83.5	81.4	79.4	77.4	75.3	73.3	71.3	69.2	67.2	65.2	63.1	61.1	59.1	57.0	55.0	52.9	50.9	48.9	46.8
80%	82%	82.4	79.2	77.3	75.4	73.4	71.5	69.6	67.7	65.7	63.8	61.9	59.9	58.0	56.1	54.1	52.2	50.3	48.3	46.4	44.5
75%	78%	78.0	75.0	73.2	71.4	69.5	67.7	65.9	64.0	62.2	60.4	58.5	56.7	54.9	53.1	51.2	49.4	47.6	45.7	43.9	42.1
70%	74%	73.6	70.8	69.0	67.3	65.6	63.9	62.1	60.4	58.7	57.0	55.2	53.5	51.8	50.1	48.3	46.6	44.9	43.2	41.4	39.7
65%	69%	69.2	66.5	64.9	63.3	61.7	60.0	58.4	56.8	55.2	53.6	51.9	50.3	48.7	47.1	45.4	43.8	42.2	40.6	38.9	37.3
60%	65%	64.8	62.3	60.8	59.3	57.7	56.2	54.7	53.2	51.7	50.1	48.6	47.1	45.6	44.1	42.5	41.0	39.5	38.0	36.5	34.9
55%	60%	60.4	58.1	56.6	55.2	53.8	52.4	51.0	49.6	48.1	46.7	45.3	43.9	42.5	41.1	39.7	38.2	36.8	35.4	34.0	32.6
50%	56%	55.9	53.8	52.5	51.2	49.9	48.6	47.3	45.9	44.6	43.3	42.0	40.7	39.4	38.1	36.8	35.4	34.1	32.8	31.5	30.2
45%	52%	51.5	49.6	48.4	47.2	46.0	44.7	43.5	42.3	41.1	39.9	38.7	37.5	36.3	35.1	33.9	32.7	31.4	30.2	29.0	27.8
40%	47%	47.1	45.3	44.2	43.1	42.0	40.9	39.8	38.7	37.6	36.5	35.4	34.3	33.2	32.1	31.0	29.9	28.8	27.7	26.5	25.4

Bild 1: *Resultierende CO_2-Emissionen für Raumwärme und Warmwasser bei Zusammenwirken der Reduktion des Nutzenergiebedarfs für Raumwärme (baulicher Wärmeschutz) und der Absenkung spezifischer CO_2-Emissionen für die Wärmebereitstellung (oben absolute Größen, unten relative Größen; Bezugsjahr 2008). Die Zellen unterhalb der fett markierten Linie markieren Werte innerhalb des Zielbereichs entsprechend [2].*

Die Darstellung macht deutlich, dass die klimapolitisch erwünschten Zielwerte nur durch einen Mix aus baulichem Wärmeschutz und dem Einsatz von Techniken mit deutlich reduzierten spezifischen CO_2-Emissionen erreichbar sind.

Notwendige Marktentwicklung im Bereich Heizungstechnik

Um das klimapolitische Ziel für Raumwärme und Warmwasser bis 2030 zu erreichen, müssen demnach einerseits ambitionierte Maßnahmen erfolgen (weitgehende energetische Sanierungsmaßnahmen, Wärmebereitstellung durch Techniken mit deutlich abgesenkten spezifischen CO_2-Emissionen) und andererseits müssen diese Maßnahmen auch ausreichend schnell erfolgen. Dies bedeutet eine erhöhte Sanierungsrate im Bereich des baulichen Wärmeschutzes und einen beschleunigten Austausch alter Heizungsanlagen. Dabei reicht es im Sinne einer Zielerreichung nicht, heutige Öl- oder Gaskessel, die den Bestand der Heizungsanlagen dominieren, durch neue Gasbrennwertkessel zu ersetzen, da hierdurch keine ausreichende Absenkung spezifischer CO_2-Emissionen erreicht werden kann. Eine Zielerreichung erfordert deshalb einerseits eine deutliche Steigerung der Verwendung erneuerbarer Energien und andererseits eine erheblich ausgeweitete Nutzung von Anlagen, die Umweltenergien verwenden, also Wärmepumpen (seien es elektrisch oder brennstoffbetriebene Geräte); Techniken, die den Energiegehalt von Brennstoffen (fossil, biogen) durch einfache Verbrennung nutzen, gilt es dagegen möglichst rasch zu verdrängen.

Bild 2 zeigt beispielhaft ein hinsichtlich der Einführung neuer Technologien für die Wärmeversorgung von Gebäuden ambitioniertes Szenario, in dem vor allem Wärmepumpen (elektrisch, Gas) sehr bald große Marktanteile einnehmen und in dem die Installation thermischer Solaranlagen kontinuierlich gesteigert wird. Dabei wird angenommen, dass ab 2016 keine neuen Ölkessel mehr installiert werden und ab 2026 keine neuen Gaskessel.

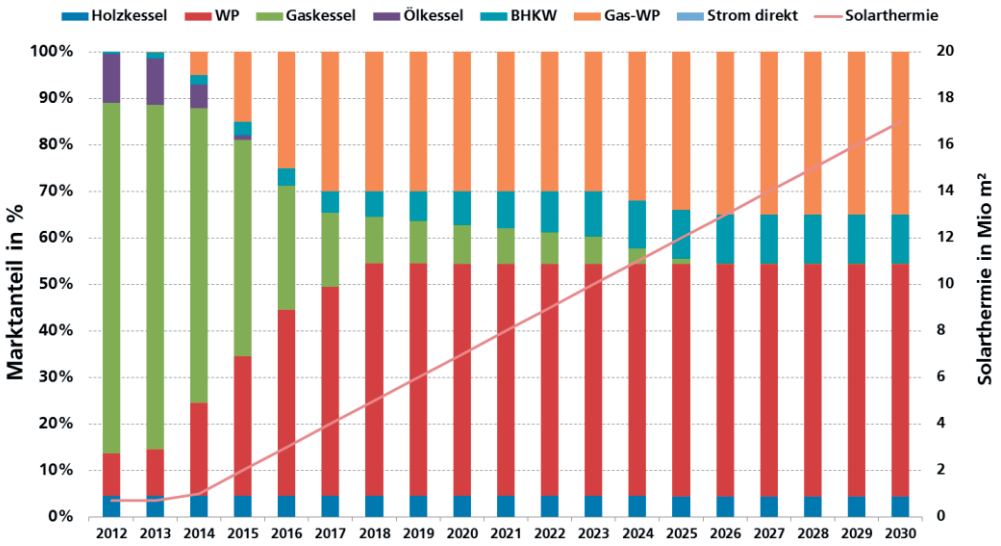


Abbildung 2: *Ambitioniertes Szenario zur Einführung neuer Heizungstechniken mit einem hohen Anteil an Wärmepumpen (elektrisch, Gas). Die Darstellung zeigt den relativen Anteil an installierter Wärmeleistung der im jeweiligen Jahr installierten Technologien (linke Achse) und die jährliche installierte Kollektorfläche für Solarthermieanlagen (rechte Achse).*

Im Bild 3 ist die Entwicklung des Endenergiebedarfs für Raumwärme und Warmwasser bis zum Jahr 2030 dargestellt, die sich auf Basis der im Bild 2 gezeigten Marktentwicklung ergibt. Und es wurde angenommen, dass der Raumwärmebedarf bis 2030 durch Maßnahmen der energetischen Sanierung um insgesamt 35 % gegenüber dem heutigen Stand abnimmt und

es wurde eine deutlich gesteigerte Austauschrate für alte Heizungsanlagen unterstellt. Zugleich wurde von einem geringen Ausbau von Wärmenetzen ausgegangen, die in 2030 18 % des Wärmebedarfs abdecken (heute 14 %). Es resultiert ein Endenergiebedarf von rund 360 TWh im Jahre 2030 gegenüber einem Wert von rund 830 TWh heute; dabei wurde eine Gutschrift für Strom aus Blockheizkraftwerken eingerechnet. Die CO_2-Emissionen für Raumwärme/Warmwasser sinken entsprechend Bild 4 von heute rund 177 Mio t auf rund 67 Mio t. Dieser Wert liegt innerhalb des Zielbereichs für das Jahr 2030 (entsprechend Bild 1). Die spezifischen CO_2-Emissionen belaufen sich bei den hier angenommenen Randbedingungen im Jahr 2030 auf rund 118 g pro kWh Wärme. Im Ergebnis zeigt sich die immense Relevanz von Techniken, die Umweltenergien nutzen, für die zukünftige Wärmeversorgung in Gebäuden. Trotz des angenommenen starken Ausbaus von Solarthermieanlagen (siehe Bild 2) tragen diese in 2030 nur rund 8.5 % zur dann benötigten Wärme bei.

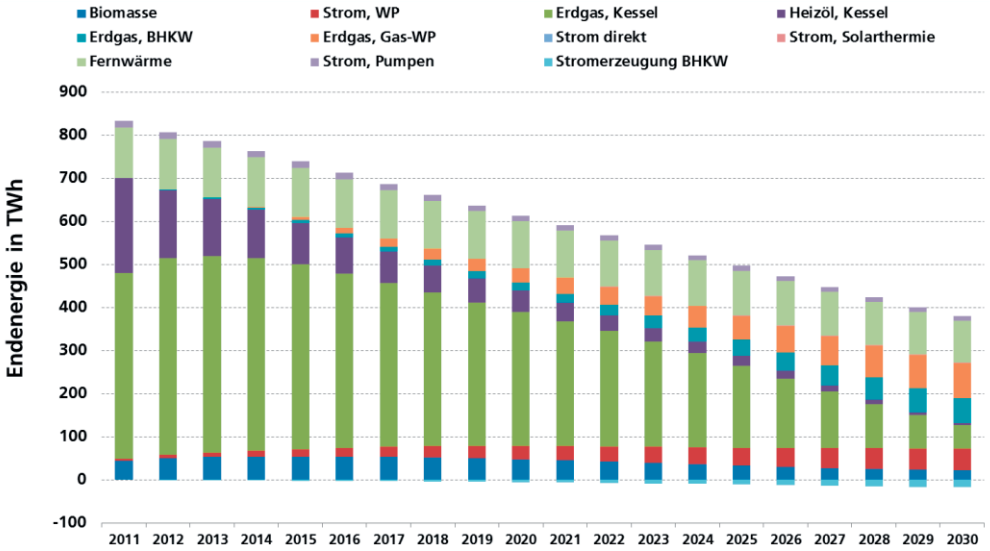


Abbildung 3: *Entwicklung des Endenergiebedarfs bis 2030 für Raumwärme und Warmwasser im beispielhaft dargestellten ambitionierten Szenario entsprechend Abbildung 2*

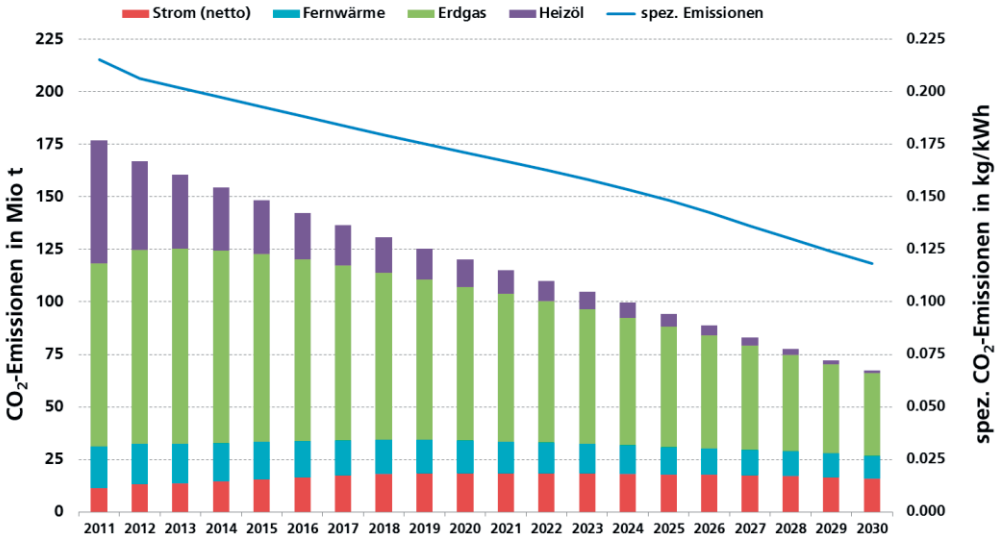


Abbildung 4: *Entwicklung der CO2-Emissionen, aufgeteilt nach Energieträgern (linke Achse) und der spezifischen CO2-Emissionen (rechte Achse) für Raumwärme und Warmwasser im beispielhaft dargestellten ambitionierten Szenario entsprechend Abbildung 2.*

Ein ähnliches Ergebnis hinsichtlich der zukünftigen Entwicklung von Heiztechniken liefert eine ganzheitliche, umfassende und alle Verbrauchssektoren übergreifende Analyse eines zukünftigen deutschen Energiesystems, in dem die Klimaschutzziele der Bundesregierung für das Jahr 2050 erreicht werden [3,4]. Hier zeigt sich insbesondere die hohe Relevanz von Strom im zukünftigen Energiesystem und die Notwendigkeit einer gesteigerten Stromnutzung in allen Verbrauchssektoren einschließlich Wärme und Verkehr, um negative Residuallasten der Stromerzeugung im Gesamtsystem sinnvoll nutzen zu können. Insofern kommt auch aus einer solchen Perspektive elektrischen Wärmepumpen eine zentrale Rolle zu. Für die nicht durch Strom gedeckten Wärmeverbraucher sind effiziente Wandlungsketten, z.B. durch Nutzung von brennstoffbasierten Wärmepumpen essentiell, um die verbleibende geringe Menge an kostbaren Brennstoffen möglichst effizient zu nutzen.

Wärmepumpen in Mehrfamilienhäuser

Wärmepumpen können mit elektrischer Energie oder mit Brennstoffen (bzw. mit Wärme hoher Temperatur) angetrieben werden. Ihr Einsatz setzt allerdings voraus, dass Heizungssysteme mit möglichst niedrigen Vorlauftemperaturen zur Verfügung stehen, um möglichst hohe Jahresarbeitszahlen zu erreichen. Außerdem ist die Verfügbarkeit einer geeigneten Niedertemperaturwärmequelle notwendige Voraussetzung. Für den Einsatz von Wärmepumpen in Bestandsgebäuden ist deshalb ein umfassender Ansatz notwendig, der die gesamte Wandlungskette von der Umweltwärmequelle bis zur Wärmeabgabe im Raum bzw. an den Warmwasserbereiter umfasst. Es werden demnach LowEx-Konzepte benötigt, die alle Glieder der Wandlungskette umfassen.

Mehrfamilienhäuser bringen eine Reihe von Wärmebedarfseigenschaften mit sich. Zum einen variieren der Bedarf zur Warmwasserbereitung Raumwärme (abhängig von Baustandart und Klimazone). Zum anderen ist das Temperaturniveau des Heizsystems vom Wärmebedarf so-

wie dem installierten Wärmeübertragungssystem beeinflusst. Die Vielfalt der Wärmebedarfscharakteristik bring die Herausforderung mit sich, Wärmepumpen in Mehrfamilienhäusern weiter zu verbreiten.

Als Beispiel für eine zentrale Fragestellung ist die Einbindung der Warmwasserbereitung in die Wärmeversorgungskonzepte zu nennen. Es ist notwendig unterschiedliche Konzepte zu entwickeln und diese in Demonstrationsgebäuden zu untersuchten. Dazu gehören Frischwasserstationen, zweistufige Wärmepumpen zur Sicherstellung von ausreichend hohen Systemtemperaturen für die Legionellenvermeidung in zentralen Frischwasserspeichern oder bivalente Lösungen mit getrennten Einheiten für Raumwärme und Warmwasser.

Annex MFH

Im Rahmen des Wärmepumpenprogrammes der internationalen Energie Agentur (IEA HPT) wird zum Sommer 2016 ein Annex mit dem Titel *„Heat Pumps in Multi-Family Buildings for space heating and DWH"* starten. Ziel des Projektes ist es, die Potentiale des Einsatzes von Wärmepumpensystemen zur Wärmeversorgung von Mehrfamilienhäusern zu untersuchen und einen Beitrag zur Überwindung von Marktbarrieren zu leisten. Dazu werden die jeweiligen Bedingungen in den teilnehmenden Ländern identifiziert und angepasste Lösungsansätze für die unterschiedlichen – technischen, wirtschaftlichen, rechtlichen und markt-politischen Herausforderungen erarbeitet.

Die Komponente des Eigentumsrechts variiert zwischen den Mitgliedsländern der IEA HPT Umsetzungsvereinbarung. Während Mehrfamilienhäuser in einigen Ländern im Eigentum von Städten, Gemeinden oder Wohnungsgesellschaften stehen, sind die Gebäude bzw. die einzelnen Wohnungen in anderen Ländern im privaten Besitz unterteilt.

Momentan fokussiert sich kein Annex der Wärmepumpentechnologien ausschließlich auf Mehrfamilienhäuser. Einige Einschränkungen, die bereits im Abschlussbericht von Annex 30 thematisiert wurden, sind bereits geklärt. Nichtsdestotrotz gibt es teilweise noch technische und nichttechnische Hürden, die eine breite Einführung von Wärmepumpen in Mehrfamilienhäusern (neue und bereits vorhandene Gebäude) hindern. Neben den bereits erwähnten Aspekten, bestärken der potenziell eher begrenzte Raum für Wärmequellen, die Regelung von bivalenten Anlagen sowie die hohen Investitionskosten die Schwierigkeiten.

Entsprechend den Anforderungen der einzelnen Länder werden Anwendungen in Neubauten und sanierten Altbauten ebenso wie in Gebäuden mit einem höheren Wärmebedarf untersucht. Als Wärmepumpentechnologie werden sowohl elektrisch als auch thermisch angetriebene Wärmepumpen in das Projekt einbezogen und sowohl monoenergetische als auch bivalente Systeme betrachtet.

In dem Annex stehen folgende Aspekte im Mittelpunkt:

a) Marktanalyse u.a. im Bereich des Wohnungsbaues bezüglich rechtlichen Randbedingungen, Besitzer- und Betreiberstrukturen sowie Gebäudeeigenschaften und vorhandener Wärmeversorgungskonzepte.
b) Weiterentwicklung der Wärmepumpentechnologie:

- Klassifikation am Markt verfügbarer bzw. kurz vor der Markteinführung stehender Produkte,
- Identifikation von MFH-spezifischen Anforderungen an Wärmepumpen,
- Begleitung laufender Entwicklungsarbeiten „MFH-optimierter“ Wärmepumpengeräte und -komponenten (modulierbare, skalierbare Heizleistung, hohe Betriebstemperaturen, Hybridsysteme, etc.),
- Identifikation von weiterem Forschungs- und Entwicklungsbedarf.

c) Systemkonzeption und – analyse:
- Entwicklung einheitlicher Bewertungsansätze (Kennwerte zur Effizienz, Bilanzgrenzen, …),
- Simulationsbasierte Untersuchung unterschiedlicher Systemlösungen unter verschiedenen Randbedingungen (Gebäudestandart, Klimastandort, …) u.a. hinsichtlich folgender Fragestellungen:
  i. zentrale versus dezentrale Lösungen,
  ii. Wahl der Wärmequelle(n),
  iii. Regelung bivalenter bzw. hybrider Systeme,
- Bewertung der Einbindung von Wärmepumpen in vorhandene Verteil- und Wärmeübergabesysteme versus der (Teil-)Erneuerung dieser (abhängig baulicher und finanzieller Randbedingungen),
- Monitoring von realen Anlagen,
- Anwendungsmatrix: Entwicklung von Empfehlungen für optimale Lösungen in unterschiedlichen Anwendungsfällen (Gebäudecharakteristiken, Klimazone, ökonomische Randbedingungen).

d) Demonstration:
- Monitoring von wärmepumpenbasierten Wärmeversorgungskonzepten in (sanierten) Altbauten,
- Datenbank realisierter Anlagen (Anlagenbeschreibungen und Monitoringergebnisse, falls vorhanden).

e) Dissemination:
- Zusammenarbeit mit Wärmepumpenherstellern, Systemplanern und Wohnungsbauunternehmen,
- Publikation in jeweiligen Branchenmedien,
- Einbeziehung von politischen Gremien.

Der Annex sollte die dargestellten Fragestellungen innerhalb von 4 Jahren bearbeiten. Die Teilnahme in dem Annex haben bereits mehrere Länder bestätigt.

Quellen

[1] Zahlen und Fakten – Energiedaten. Erstellt vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, Referat III C 3. August 2013

[2] Politikszenarien für den Klima-schutz VI - Treibhausgas-Emissionsszenarien bis zum Jahr 2030„. Öko-Institut et al. im Auftrag des Umweltbundesamtes (UBA), März 2013

[3] H-M Henning, A. Palzer, Energiesystem Deutschland 2050 - Sektor- und Energieträgerübergreifende, modellbasierte, ganzheitliche Untersuchung zur langfristigen Reduktion energiebedingter CO2-Emissionen durch Energieeffizienz und den Einsatz

Erneuerbarer Energien. Studie des Fraunhofer-Instituts für Solare Energiesysteme, November 2013. Download unter:
http://www.ise.fraunhofer.de/de/veroeffentlichungen/veroeffentlichungen-pdf-dateien/studien-und-konzeptpapiere/studie-energiesystem-deutschland-2050.pdf

[4] A, Palzer, H-M. Henning, A future German energy system with a dominating contribution from renewable energies: a holistic model based on hourly simulation. Energy Technology 2014, 2, pp 13 – 28

Joachim Ködel, Dipl.-Ing.
Dozent Hochschule Luzern Technik & Architektur
Technikumstrasse 21
CH-6048 Horw
Joachim.koedel@hslu.ch
www.hslu.ch/technik-architektur

Thermische Netze: Schlüsselrolle für Wärmepumpen?

Zusammenfassung:
Thermische Netze tragen bei zur Umsetzung der Energiestrategie 2050. Mit dem Ziel, regionale Energiequellen besser nutzen zu können, bieten thermische Netze ein breites Einsatzfeld für Wärmepumpen. Insbesondere zur Anwendung bei Versorgungsstrukturen, die auf Abwärme und niedertemperierter Wärme basieren, finden flexible und effiziente Wärmepumpen in Zukunft verstärkt Anwendung.

Einführung

Der Bund hat mit der Energiestrategie 2050 übergeordnete Ziele des Landes für die Energiepolitik definiert, die den Atomausstieg und die Reduktion der CO_2-Emissio-nen beinhalten. Die Erhöhung des Anteils erneuerbarer Energien, die Verringerung der Auslandsabhängigkeit, der Ausbau der inländischen Wertschöpfung und die Erhöhung der Energieeffizienz sind daraus resultierende Teilziele.

Ziel des Programmes „Thermische Netze“ ist fundiertes Wissen und Grundlagen zur leitungsgebundenen thermischen Energie für alle relevanten Akteure der Branche zu sammeln, zu erarbeiten und zu vermitteln. Damit können Entscheidungsträger wie Gemeinden, Bauherren oder Planer sich an fundierten Methoden orientieren und eine hohe Planungssicherheit gewinnen.

Das Programm „Thermische Netze“ richtet sich insbesondere aus auf geographisch gebundene Energiequellen, wobei Bilanz-Überschüsse und –Unterdeckungen identifiziert und einbezogen werden. Energiequellen liefern oft niederwertige Energieströme, d.h. Wärme auf tiefem Temperaturniveau. Zur Bereitstellung der Nutzenergie dienen Wärmepumpen, die zentral oder dezentral installiert, den erforderlichen Temperaturhub bringen.

Wärmepumpen nehmen heute ein breites Feld in der Wärmeversorgung ein als beispielsweise Luft / Wasser – Wärmepumpen, häufig im kleinen Leistungsbereich, aber auch Wasser / Wasser – Wärmepumpen im allen Leistungsbereichen. Durch das Programm „Thermische Netze“ zeichnet sich bereits jetzt ab, dass zukünftig Wärmepumpen in verschiedensten Leistungsklassen mit äusserst differenzierten technischen Charakteristika benötigt werden.

Anwendungsfälle

Die folgenden Beispiele für Anwendungssituationen zeigen auf, welche technischen Ausrichtungen für Wärmepumpen sich durch thermische Netze ergeben.

Fall	Quelle	Vorgang	Temperaturhub
1	Umweltwärme >0°C (Seewasser, Flusswasser)	Anhebung der Temperatur eines primären Netzes auf ca. 8°C	2 – 8 K
2	Umweltwärme +/-0°C (Erdsonden, Luft)	Anhebung der Temperatur auf ein Mediennetz wegen Frostschutz.	2 – 25 K
3	Ab/Wärmequelle > 20°C	Versorgung Heizung 35°C	5 – 15 K
4	Ab/Wärmequelle > 20°C	Versorgung Warmwasser 60°C	bis 40 K
5	Abwärme bei ≥ 35°C	Versorgung Heizung 50°C	5 – 15 K
6	Netzrücklauf Fernwärme 50°C	Versorgung Heizung > 50°C	5 – 15 K
7	Hohe Rücklauftemperatur bei Verbraucher	Rücklaufsenkung durch Wärmepumpe	5 – 25 K
8	Fernwärmenetz mit bottle-neck	Erhöhung der Temperatur-spreizung durch Senkung der Rücklauftemperatur	5 – 30 K

Tabelle 1: *Einige Anwendungsfälle von Wärmepumpen in thermischen Netzen*

Die Zusammenstellung zeigt Fälle für den Einsatz von Wärmepumpen auf, die sich durch geringen Temperaturhub auszeichnen. Des Weiteren werden Wärmepumpen benötigt, die eine hohe Quellentemperatur flexibel nutzen können.

Die Betrachtung von Anwendungsfällen für das Programm „Thermische Netze“ zeigt für die Zukunft einen grossen Bedarf an Wärmepumpen

- mit geringem Temperaturhub
- mit teils hohen Quellentemperaturen
- in allen Leistungsbereichen
- für flexible Betriebsweise
- mit hoher Effizienz.

Darüber hinaus sind, zur Erzielung einer hohen Effizienz, hohe Wirkungsgrade und präzise Modulierbarkeit der Wärmepumpen erwünscht. Insbesondere bei grösseren Versorgungsstrukturen können mehrstufige Wärmepumpen bereits bei geringen Temperaturhüben Anwendung finden. Sowohl ändernden Leistungen wie sich ändernden Temperaturen der Quellen und der Senken sollen Wärmepumpen gerecht werden können.

Herausforderungen

Bereits heute zeigt der Markt für Wärmepumpen eine Vielzahl von Produkten, die in Bezug auf Leistung, Effizienz und Flexibilität den prognostizierten Anforderungen durch thermische

Netze sehr nahekommen. Durch einen steigenden Bedarf an spezifisch und individuell gestalteten Wärmepumpen können auch Produkte zur Marktreife kommen, die bis heute ein Nischendasein hatten oder wenig Anwendung fanden.
Mit steigendem Anspruch an die Effizienz der Wärme- und Kälteversorgung steigen die Ansprüche an komplexere Maschinen und damit auch an Wärmepumpen. So wird bei modernen Systemen zur Versorgung mit thermischer Energie der Gesamtbedarf an Energie für die Versorgungskette bedeutend, beginnend bei der grauen Energie für alle Komponenten bis hin zum Gesamtbedarf an Energie für die Bereitstellung der Nutzenergie bis zum Verbraucher. Gerade im Programm Thermische Netze wird durch den vermehrten Einsatz von Wärmepumpen der gesamte Strombedarf zur Bereitstellung der Nutzenergie beim Verbraucher, dem Elektrothermischen Verstärkungsfaktor (ETV) des Systems bedeutend. Damit steigen zum einen die Anforderungen an die Effizienz und Flexibilität der Wärmepumpen. Zum anderen steigen die Anforderungen an ausgeklügelte Konzepte. Hier sind ausser den Systemlieferanten und Maschinenherstellern auch die Planer und Prozesstechniker gefragt.

Entwicklungspotenzial, Ausblick

Die Branche der Energieversorgung und die Hersteller, sowie Lieferanten von Wärmepumpen können gemeinsam profitieren vom Austausch über Ziele und Ausrichtungen der zukünftigen Energieversorgung, um damit Produktportfolien zu gestalten. Es benötigt für die heute absehbaren Erfordernisse an die Technik voraussichtlich keine grundlegend neuen Entwicklungen im Wärmepumpensektor. Mit der Nutzung heute verfügbarer Technologie und Kenntnis kann wohl ein breiter Bereich des zu erwartenden Bedarfs an Maschinen bereits bedient werden.
Viele in den letzten Jahren geplante oder umgesetzte Anlagen verdeutlichen, dass nicht einzig die Investitionen der maschinellen Ausrüstung für den wirtschaftlichen Erfolg eines Projektes thermischer Netze entscheidend sind, sondern dass ausgereifte Konzepte mit hoher Effizienz massgeblich werden.

Quellen

[1] Bundesamt für Energie. Projekt „Thermische Vernetzung“ Konzeptvorschlag 11. März 2015.

Rainer M. Jakobs, Dr.-Ing., DKV e.V., ASHRAE
Geschäftsleitung IZW e.V.
Büro Mitte
Kreuzfeldstr. 10
64747 Breuberg, Deutschland
Jakobs@izw-online.de
www.izw-online.de

Commercial and Industrial Heat Pump application

IEA HPT Annex 35/48

Abstract
Securing a reliable, economic and sustainable energy supply as well as environmental and climate protection are important global challenges of the 21st century. Renewable energy and improving energy efficiency are the most important steps to achieve these goals of energy policy. While impressive efficiency gains have already been achieved in the past two decades, energy use and CO_2 emissions in manufacturing industries could be reduced further, if best available technologies were to be applied worldwide.
The project collected totally 39 examples of R & D-projects and 115 case studies. These examples show successful integration of heat pumps. Payback periods, which are lower than 1.5 years are possible in some cases. CO_2-emissions and energy cost can be reduce by more than 80 % in some cases.
There is a great potential for industrial heat pumps to reduce the energy consump-tion and related greenhouse gas emissions of the industry. However, further investi-gations are necessary to reduce the present barriers of the application of heat pumps in industry.

Background

The world rising greenhouse gas emissions and environmental concern set focus on energy conservation and use of renewable energy sources.
In this context, the IEA HPP-IETS Annex 35/13 "Application of industrial Heat Pumps", a joint venture of the International Energy Agency (IEA) Implementing Agreements "Industrial Energy-Related Technologies and Systems" (IETS) and "Heat Pump Programme" (HPP) has been initiated in order to actively contribute to the reduction of energy consumption and emissions of greenhouse gases by the increased implementation of heat pumps in industry.
While the residential market may be satisfied with standardised products and instal-lations, most industrial heat pump applications need to be adapted to unique conditions. In addition, a high level of expertise is crucial. Industrial heat pumps are defined here as heat pumps in the medium and high power ranges which can be used for heat recovery and heat upgrading in industrial processes, but also for heating, cooling and air-conditioning in industrial, commercial and multi-family residential buildings as well as district heating. The main advantage to use heat pumps in industrial application is to recover waste heat, as to use free renewable energy sources.

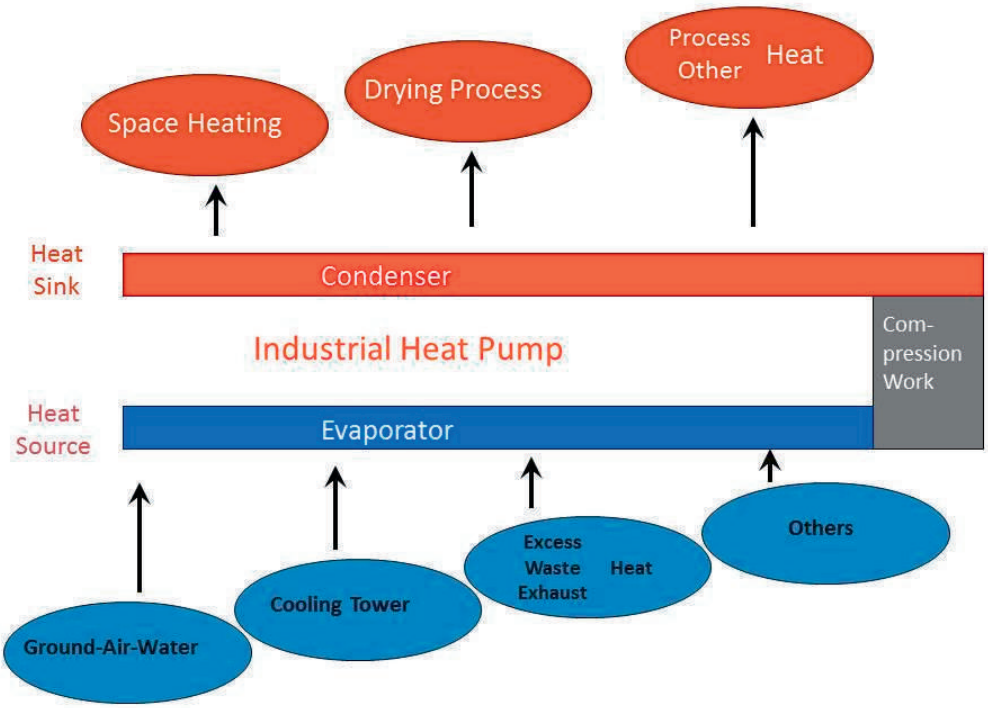


Figure 1: *Possible heat sources and heat sinks for Industrial Heat Pumps (IHPs)*

Annex 35/13 started on April 1, 2010 and was concluded on April 30, 2014, with 15 participating organizations from Austria, Canada, Denmark, France, Germany (Operating Agent), Japan, the Netherlands, South Korea and Sweden.
The Annex comprised an overview in the participating countries of the industrial energy situation and use, the state of the art and R&D projects in heat pumping and process technologies and its applications, as well as analysing business cases on the decision-making process in existing and new applications and in the wider application of industrial heat pumping technologies. The annex has been subdivided in the following tasks:

Task 1: Market overview, barriers for application
Task 2: Modelling calculation and economic models
Task 3: Technology
Task 4: Application and monitoring
Task 5: Communication.

The work programme has been mainly concentrated on collection of statistical energy and environmental data and information related to industry, as well as the present status of R&D and the application of heat pumps in industry. A total of 39 R&D projects and 115 applications of heat pump in industry - in particular the use
of waste process heat as the heat source - have been presented and analysed by the participating countries.

Market overview, barriers for applications

The report summarized the present energy situation in general and the industrial energy use and related heat pump market subdivided into participating countries. Based upon these findings focus will be given to further work to meet the challenges for the wider application of industrial heat pumping technologies.
Although heat pumps for the industrial use became available on the markets in the participating countries in recent years, just very few carried out applications can be found. To distinguish the reasons for this situation, application barriers were also a part of the survey:

Lack of knowledge:
The integration of heat pumps into industrial processes requires knowledge of the capabilities of industrial heat pumps, as well as knowledge about the process itself. Only few installers and decision makers in the industry have this combined knowledge, which enables them to integrate a heat pump in the most suitable way.
Low awareness of heat consumption in companies:
In most companies knowledge about heating and cooling demands of their processes is quite rare. This requires expensive and time consuming measurements to find an integration opportunity for an industrial heat pump.
Long payback periods:
Compared to oil and gas burners, heat pumps have relatively high investment cost. At the same time companies expect very low payback periods of less than 2 or 3 years. Some companies were willing to accept payback periods up to 5 years, when it comes to investments into their energy infrastructure. To meet these expectations heat pumps need to have long running periods and good COPs to become economical feasible.
High temperature application:
From the technical point of view one barrier can be identified regarding to the temperature limits of most commercially available heat pumping units. Many applications are limited to heat sink temperatures below 65 °C the theoretical potential for the application range of IHP increases significantly by developing energy efficient heat pumps including refrigerants for heat sink temperatures up to and higher than 100 °C.

On the other side, IHPs have the following advantages in comparison to heat pumps for space heating:

High coefficient of performance (COP) due to low temperature lift and/or high temperature levels
Long annual operating time
Relatively low investment cost, due to large units and small distance between heat source and heat sink
Waste heat production and heat demand occur at the same time.

The barriers can be solved, as shown in the results of the Annex: short payback periods are possible (less than 2 years), high reduction of CO_2-emissions (in some cases more than 50 %), temperatures higher than 100 °C are possible, supply temperatures < 100 °C are standard.

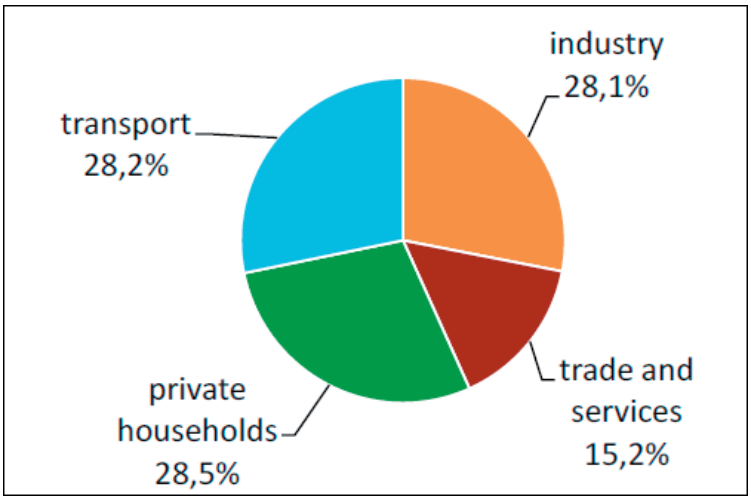


Figure 2: *Final energy consumption (9,060 PJ) in Germany 2010 by sector /BMWi 2012/*

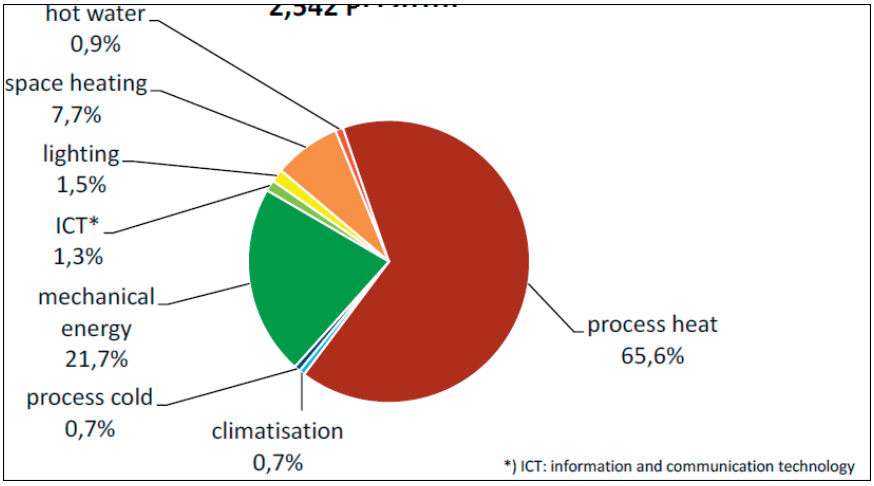


Figure 3: *Final energy consumption (2,542 PJ) in the German industry 2010 /BMWi 2012/*

The country reports show that the industrial energy consumption in the partici-pating countries varies between 17 to 58 % with great differences of the manufac-turing sectors:

For **pulp and paper** in Austria 20 %, in Canada 28 % and Sweden 52 %;

Wood needs in Austria, Canada, Denmark and Sweden between 3 and 8 % of the energy,

Metal production needs between 10 and 36 % (Germany),

Chemical and petrol industry between 8 and 59 % (Netherlands),

The energy demand of the **food industry** varies between 1 and 26 % (Denmark).

Technology

Commercially available heat pumps can supply heat only up to 100 °C. As indus-trial waste heat, available at low-temperatures, represents about 25 % of the total energy used by the manufacturing industry, R&D work has to be focused on high-temperature heat pumps able to recover heat at relatively low temperatures, generally between 5 °C and 35 °C for hot water supply, hot air supply, heating of circulating hot water and steam generation at temperatures up and higher than 100 °C.
EDF (France) is working on the development of high temperature industrial heat pumps with new working fluids to reach temperature higher than 100 °C. The three main projects are:

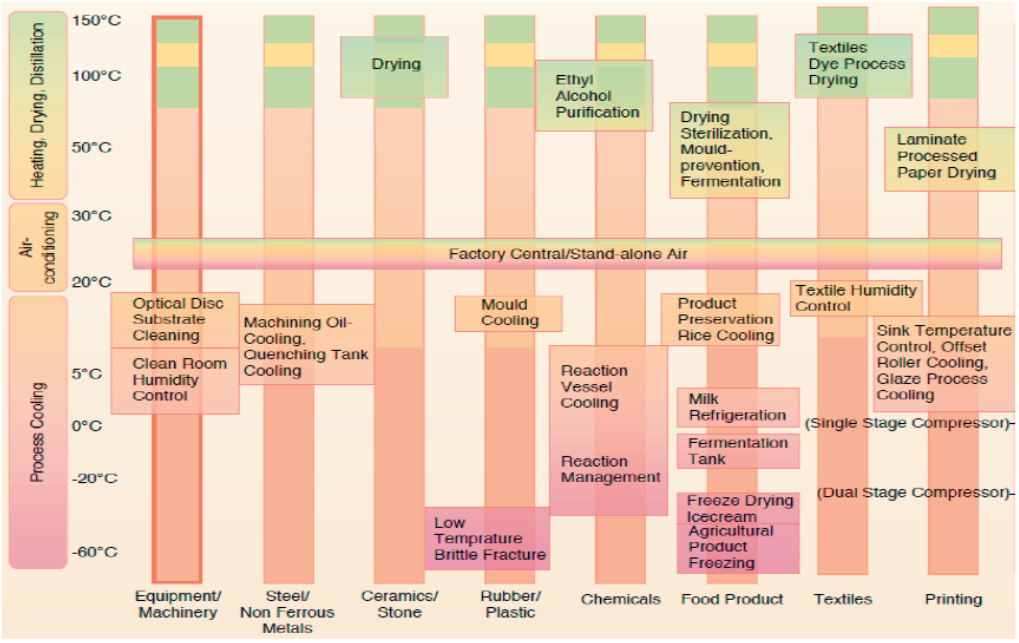
Figure 4: *EDF projects to reach temperatures higher than 100 °C [01, p 302]*

Some development of the industrial heat pump using R-134a, R-245fa, R-744, etc. has been made recently. However, except for R-744 which is a natural refrigerant with extremely low global warming potential (GWP), HFCs such as R-134a and R-245fa have high GWP values, and the use of HFCs are likely to be regulated in the viewpoint of global warming prevention in the foreseeable future. Therefore, development of alternative refrigerants with low GWP has been required.

At present, as substitutes of R-134a, R-1234yf and R-1234ze (E) are considered to be promis-ing, and R-1234ze (Z) is attractive as a substitute of R-245fa. R-365mfc is considered to be suitable as a refrigerant of heat pump for vapour generation using waste heat, but its GWP value is high. Therefore, it seems that development of a substitute of R-365mfc should be furthered.

Appropriate heat pump technology is important for reducing CO_2 emissions and primary energy consumption as well as increasing amount of renewable energy usage in industrial processes. The expansion of industrial applications is also important for enhancing these effects further more. In particular, development and dissemination of high-temperature heat pumps for hot water supply, heating of circulating hot water, and generation of hot air and steam are necessary. Specific problem areas are:
Lack of refrigerants in the interesting temperature range
Lack of experimental and demonstration plants

Case Studies



1: Industrial heat pump applications

***Figure 5**: Industrial and commercial heat pump application [1, p 554]*

The report focused on operating experiences and energy effects of representative industrial heat pump implementations, in particular field tests and case studies.

Industrial heat pumps are a class of active heat-recovery equipment that allows the temperature of a waste-heat stream to be increased to a higher, more useful temperature. Consequently, heat pumps can facilitate energy savings when conventional passive-heat recovery is not possible.

The economics of an installation depends on how the heat pump is applied in the process. Identification of feasible installation alternatives for the heat pump is therefore of crucial importance. Considerations of fundamental criteria taking into account both heat pump and process characteristics, are useful. The initial procedure should identify a few possible installation alternatives, so the detailed project calculations can concentrate on a limited number of options.

The commercially available heat pump types each have different operating characteristics and different possible operating temperature ranges. These ranges overlap for some types. Thus, for a particular application, several possible heat pump types often exist. Technical, economic, ecological and practical process criteria determine the best suited type. For all types, the payback period is directly proportional to installation cost, so it is important to investigate possibilities for decreasing these cost for any heat pump installation.

The case studies have tried to present good examples of heat pump technology and its application in industrial processes, field tests and commercial applications along with an analysis of operating data, when available, in accordance with the annex definition of industrial heat pumps, used for heating, ventilation, air-conditioning, hot water supply, heating, drying, dehumidification and other purposes.
The participating countries identify several projects and case studies in different application in which industrial heat pumps are used.

Industrial heat pump applications are rather seldom in **Austria** up to now; several applications in various industrial sectors have been identified. Eight examples and one feasibility studies are described in detail [1, p 419ff].

Canada's report [1, page 452ff] focuses on low- and high-temperature heat pump applications in small- and medium-sized industrial manufacturing processes, not only for heat recovery, but also for heating industrial buildings, when possible. These include food and beverage plants because they use large amounts of primary energy, mostly for heating, via gas-fired boilers to produce hot water and cooling processing operations via electrically driven mechanical refrigeration devices. Wood drying is a very important application in Canada.

Denmark reports about four projects from the food industry, district heating, green houses and the metal industry [1, p 485ff].

France identifies 10 projects with industrial heat pumps, eight in the food industry and two for district heating [1, p 499].

German partners report about 24 projects and case studies. Mainly (18) of them are located in Germany and represent several industrial branches [1, p 500ff].

Japan has many industrial heat pumps in practical use. Among the many installed cases, here they focus on heat pump technologies of simultaneous production of heating and cooling, vapour recompression, high temperature heat production and agricultural use because they are growing in sales and also expect further growth in the future. 6 cases were picked out as typical examples of above mentioned prospective industrial heat pump technologies and their details, such as backgrounds of installation, system specifications and effects from economic and energy saving points of view, are explained. In total, about 29 case studies are reported in factsheets [1, p 553ff + appendix].

In the industrial sector, as a solution for energy saving, the number of heat pump installation and operation increases in **South-Korea**. They identify 10 representa-tive heat pump installation and operation cases in industrial sector [1 p 589ff].

Over the past 20 years several feasibility studies and project realizations of heat pump projects have been performed in **The Netherlands**. These are evaluated in this study. Some of them are more than 20 years running and they are still in use.
[1, p 601ff + appendix]

Selection of application around the world:

Application, Industry	Member Country	Year	System	Refrigerant	**C**ooling **H**eating **D**rying **W**aste heat	Heating Capacity	Supply tempe-rature	Pay back period	Reduction CO_2	Reduction energy/cost	Report page
Food: meat, sausage	A	eld	Mech Compr	R-134a	W	257 kW	55 °C		75%		420
Ice rink	A	2013	Mech Compr	R-717	W	413 kW	60 °C		75%		422
Food: brewery	A	2012	Mech Compr	R-717	W	370 kW	63-77 °C	5.7 a		64,000 €/a 18.3 %	426
Fish farm	CDN	eld	Mech Compr	R-22	H	109	10–12 °C	1.3 a			460
Wood drying low temp	CDN	eld	Mech Compr		D	5.6 kW	n. a.			21.5%	463
Wood drying high temp	CDN	eld	Mech Compr		D	2 x 65 kW	Up to 100 °C			50%	471
Washing metal items	DK	2011	Mech Compr	R-134a	H	25 kW	60 °C	2.5 a	20 t/a	50%	493
Food: Slaughter-house	D	2011	Mech Compr	R-744	C&H	800 kW	90 °C		510 t/a		500
Food: Dairy	D	2011	Mech Compr	R-717	W	3.45 MW	58 °C		30-40%		506
Coating Powder	D	2012	Mech Compr		D	240 kW	45 °C	5 a			531
Food: Malt production	D	2010	Mech Compr	R-717	D	3,250 kW	35 °C				546
Food: Brewery	D	2012	Mech Compr	R-134a	H	77 kW	55 °C	< 6 a			547
Food: Noodle production	Jap	2008	Mech Compr	R-744 trans.	C & H	C 56 kW H 72 kW	5 °C 90 °C	8.2 a	31%	25%	557
Transformer casing (painting)	Jap	2009	Mech Compr	R-744 trans.	D	110 kW	80–120 °C		13%	12%	565
Automotive (painting)	Jap	2009	Mech Compr	R-407E	D	566 kW	n. a.	3 – 4 a	47%	63%	569
Automotive – Washing process	Jap	2009	Mech Compr	R-134a	C & H	8 x 45.3 kW 6 x 22,3 kW	65 °C		86%	73%	575
Greenhouse	Jap	2010	Mech Compr	R-410A		6 x 18 kW	20 °C		63%	50%	580
Food: Drying of french fries	NL	2012	Mech Compr	R-717	D	880 kW	70 °C	4 a		70%	NL-06
Greenhouse Tomatoes	NL	2003	Mech Compr	R-134a	C&H	3 x 1.25 MW	42-50 °C	> 10 a	40-60 %	29%	NL-27

Figure 6: *Selection of the case studies of different application and countries*

The survey with a total of more than 150 projects and case studies has tried to present good examples of heat-pump technology and its application in industrial processes, field tests and commercial applications along with an analysis of operating data, when available, in accordance with the annex definition of industrial heat pumps, used for heating, ventilation, air-conditioning, hot water supply, heating, drying, dehumidification and other purposes.

Summary

There is a great potential for industrial heat pumps to reduce the energy consumption and related greenhouse gas emissions in the industry.
The main objectives of the project included market overviews in the participating countries, systems aspects and opportunities, apparatus technologies and system technologies.
The project collected totally 39 examples of R&D projects and 115 case studies worldwide, showing the successful integration of heat pumps in the industry and how to overcome barriers: Short payback periods are possible (less than 2 years), high reduction of CO_2-emissionen (in some cases more than 50 %), temperatures higher than 100 °C are possible, supply temperatures below 100 °C are standard.
Further main results are the lack of experiences with and the acceptance of indus-trial heat pumps integrated in industrial processes at different temperature levels, are the main barriers for their larger scale market introduction in many companies (and especially in SMEs).

Outlook

Main Goal of the new HPT Annex 48 is to overcome difficulties and barriers for the market introduction of industrial heat pumps.
Based on the experiences and collected information the main priorities are:

Collected cases studies of industrial branches with a large potential, should be analysed through well-founded energy audits focused on waste heat recovery and an international information data base created
Development of a webbased information platform for heat pumps in the industry
Creating information material for IHP (training) courses
The **IHP potential** for more efficient use of energy and reduction of greenhouse gas emission should be prepared for policy makers
The development of a **simplified model for the integration** of a heat pump into a process
Arranging the information on heat pumping technologies for industry, for policy-makers, industrial planers and designers, stake holders as well as heat pump manu-factures in such way that it will lead to a better understanding of the opportunities and using these in the right way for the reduction of primary energy consumption, CO_2-emissions as well as energy cost of industrial processes.

References

[1] IEA HPP Annex 35, Final Report, May 2015,
www.izw-online.de/annex35/index.php?
www.heatpumpcentre.org
http://www.heatpumpcentre.org/en/projects/completedprojects/annex35/publications/Sidor/default.aspx
Operating Agent: Information Centre on Heat Pumps & Refrigeration IZW e.V. Germany, represented by Hans-Jürgen Laue and Rainer M. Jakobs
Laue.izw@t-online.de / jakobs@izw-online.de

Jonas Schönenberger, B.Sc. Systemtechnik
Leiter Forschung und Entwicklung
Feldstrasse 30
CH-3073 Gümligen
j.schoenenberger@frigoconsulting.ch
www.frigoconsulting.ch

Effiziente CO_2-Systeme zum Heizen und Kühlen

Zusammenfassung
CO_2-Kälteanlagen gewinnen stark an Bedeutung und sie gelten in verschiedenen Anwendungen als Stand der Technik. Die grossen Schweizer Supermarkt- und Grosshandels-Ketten installieren derzeit ausschliesslich transkritischeCO_2-Kälteanlagen. So sind in diesem Bereich inzwischen über 600 solcher Systeme für die Kälteerzeugung in Betrieb (Schweiz). Vermehrt kommen CO_2-Systeme zum Einsatz, welche den gesamten Bedarf an Wärme und Kälte im Gebäude oder Supermarkt abdecken können. Die Versorgung sämtlicher Wärme- und Kältebadarfe mittels eines Systems birgt Potential für eine Effizienzsteigerung. Darüber hinaus können Installations-, Betriebs- und Unterhaltskosten reduziert und der Platzbedarf gesenkt werden. Im Folgenden wird ein Konzept mit zusätzlichem Aussenverdampfer und Klimawärmetauscher erläutert, wie es zunehmend in Supermärkten zum Einsatz kommt.

Abstract:
CO_2 refrigerating systems are becoming increasingly important and they are used in various applications as prior art. Well known Swiss supermarkets and wholesale chains are installing almost entirely transcritical CO_2 refrigerating systems. In this application there are over 600 transcritical CO_2 systems for commercial refrigerating in operation (Switzerland). There is a trend towards CO_2 refrigerating systems which allow covering the total demand of heating and cooling in the building or supermarket. This trend contains potential to further reduce energy consumption and increase efficiency. Installation costs, operating costs and service costs can further be reduced as well as the demand for installation space can be reduced. On the following pages a concept with additional evaporator for heating and heat exchanger for air conditioning is explained, as it increasingly is used in supermarkets to cover the total demand for heating and cooling.

CO_2 als Kältemittel

CO_2 ist ein alt bekanntes Kältemittel, welches seit den ersten Entwicklungen in der Kältebranche zum Einsatz kam. Zwischen 1930 und 1940 wurde CO_2 als Kältemittel durch die seinerzeit als sicher angepriesenen synthetischen Kältemittel grösstenteils vom Markt verdrängt. Anfangs der Neunziger Jahre, seit den Publikationen von Gustav Lorentzen erlebt CO_2 als Kältemittel eine Renaissance und kommt zunehmend in CO_2-Kälteanlagen zum Einsatz.
Im Retailbereich gewannen die CO_2-Kälteanlagen stark an Bedeutung und gelten in dieser sowie anderen Anwendungen als Stand der Technik. Die grössten Schweizer Supermarkt- und Grosshandels-Ketten installieren derzeit ausschliesslich transkritische CO_2-Kälteanlagen. So sind in der Schweiz in diesem Anwendungsbereich inzwischen über 600 transkritische CO_2-Kälteanlagen, geplant durch Frigo-Consulting, für die Kälteerzeugung in Betrieb und weisen im Jahresmittel gegenüber Kälteanlagen mit synthetischen Kältemitteln bereits etwa 20% bessere Leistungszahlen auf.
In dieser Anwendung sind meist zwei Temperaturniveaus, eine Plus- und eine Minuskühlung, gefordert. Dadurch gewinnt das Booster-Anlagenkonzept aufgrund dessen Einfachheit an Bedeutung und löst in vielen Fällen ein Kaskaden-Anlagenkonzept oder ein Konzept von zwei getrennten Anlagen ab. Dabei werden zwei Verdichtungsstufen für die Plus- und Minuskühlung sowie eine dreistufige Entspannung mit einem Mitteldrucksammler und einem Flashgasbypass eingesetzt.

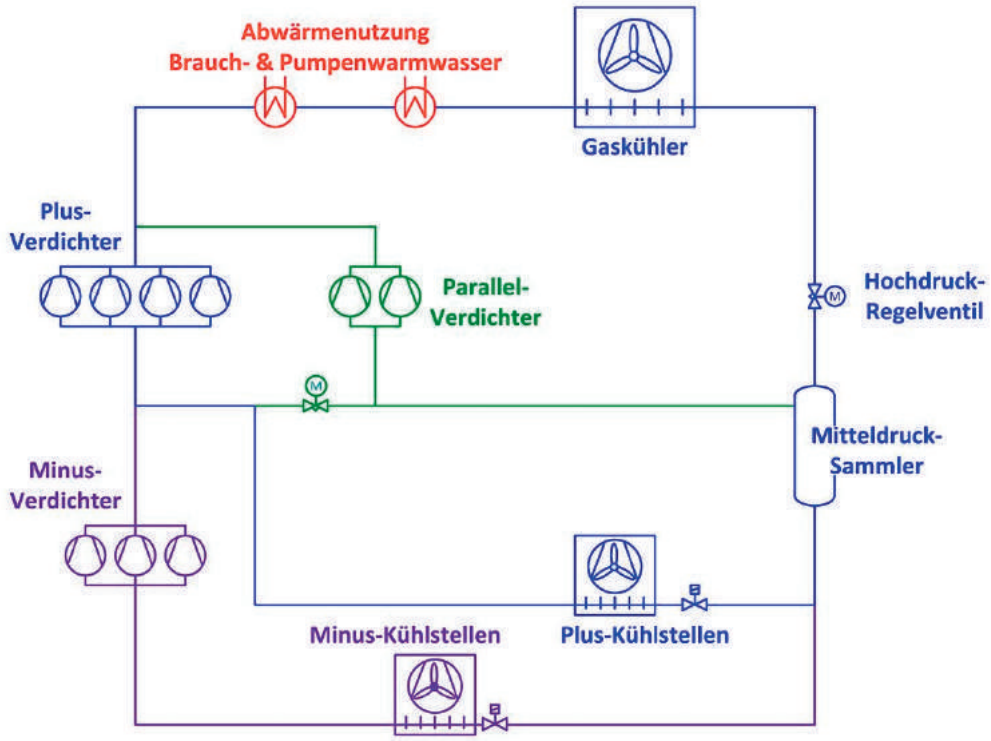


Bild 1: *Prinzipschema einer transkritischen CO_2-Booster-Kälteanlage, wie sie heute in der gewerblichen Kältetechnik als Stand der Technik gilt.*

Die Verdichter komprimieren das Kältemittel von Saug- auf Hochdruck. Je nach Anwendung und Kältebedarf werden mehrere Hubkolbenverdichter parallel angeordnet. Das Aufbereiten von Brauchwarmwasser und Pumpenwarmwasser mittels Heissgas nach den Verdichtungsstufen wird gesetzlich vorgeschrieben, hat sich bewährt und gehört zum Stand der Technik. Überschüssige Wärme, welche nicht für die Aufbereitung von Brauch- oder Pumpenwarmwasser verwendet werden kann, wird mittels eines meist luftgekühlten Gaskühlers an die Umgebung abgegeben. Die Wärmeabgabe vom CO_2 findet je nach Hochdruck im sub- oder transkritischen Bereich statt. Die Regelung des Hochdrucks in einem transkritischen System ist von grundlegender Bedeutung, um optimale Leistungszahlen und genügende Kälteleistung sowohl im sub- als auch im transkritischen Betrieb zu erzielen. Das Kältemittel gelangt nach dem Hochdruck-Regelventil und dem Wärmetauscher zur Überhitzung des Flashgases in den Mitteldruck-Sammler. Durch eine erste Entspannung im Hochdruck-Regelventil befindet sich das Kältemittel im Zweiphasengebiet und liegt im Mitteldruck-Sammler flüssig und gasförmig vor. Interne Wärmetauscher werden häufig eingesetzt um die Verdichter vor Flüssigkeitsschlägen zu schützen und die Effizienz oder Kälteleistung der Kälteanlage zu steigern. Bei der Flüssigkeitsunterkühlung wird die Flüssigkeit vom Mitteldruck-Sammler in einem zusätzlichen internen Wärmetauscher unterkühlt. Die Flüssigkeitsunterkühlung ist bei einstufigen Pluskühlanlagen energetisch neutral und bei zweistufigen Tiefkühlanlagen energetisch von Vorteil. Die unterkühlte Flüssigkeit wird mittels elektronischen Einspritzventilen kontrolliert den meist parallel angeordneten Kühlstellen zugeführt. Unter Wärmeaufnahme, meist von der Luft, wird das flüssige CO_2 direkt in den Kühlstellen verdampft was zum gewünschten Kühleffekt führt.

Abwärmenutzung mit CO_2

Das Heissgas der Plus- und Minusverdichter wird mittels Plattenwärmetauscher enthitzt, bevor die restliche Wärme mittels Gaskühler oder Druckgasenthitzer an die Umgebung abgegeben wird. Dabei spielt die Abwärmenutzung der Plusverdichter eine deutlich übergeordnete Rolle. Erfahrungsgemäss erfolgt die Enthitzung vom CO_2 von +120°C bis zu einer Temperatur von ca. +30°C. Die limitierende Grösse ist dabei das Temperaturregime vom Heizungsnetz. Grundsätzlich gilt, je tiefer die Rücklauftemperatur vom Heizungsnetz, desto effizienter, respektive umso mehr Wärme kann dem CO_2-System entzogen werden und für Heizzwecke genutzt werden.
Bild 2 zeigt den Kreisprozess im Log-p-h-Diagramm. Bei einem Hochdruck von 50 bar und einer CO_2-Austrittstemperatur vom +30°C am Austritt vom Plattenwärmetauscher für Abwärmenutzung, beträgt das Verhältnis aus nutzbarer Abwärmeleistung zu nutzbarer Kälteleistung gerade mal 0.22. Diese Abwärme steht ohne zusätzlichen elektrischen Mehraufwand zur Verfügung, da die Kälteanlage ohnehin läuft um den Kältebedarf abzudecken. Geht man von einer nutzbaren Kälteleistung von 50 kW aus (Beispiel Lastprofil Plus- und Minuskühlung im Teillast-Betrieb), so resultiert eine nutzbare Abwärmemenge von 11 kW. In diesem Betriebspunkt wird gerade mal 18% der Abwärme zurückgewonnen. Der grösste Teil wird im Gaskühler durch die Kondensation im subkritischen Betrieb an die Umgebung abgegeben.

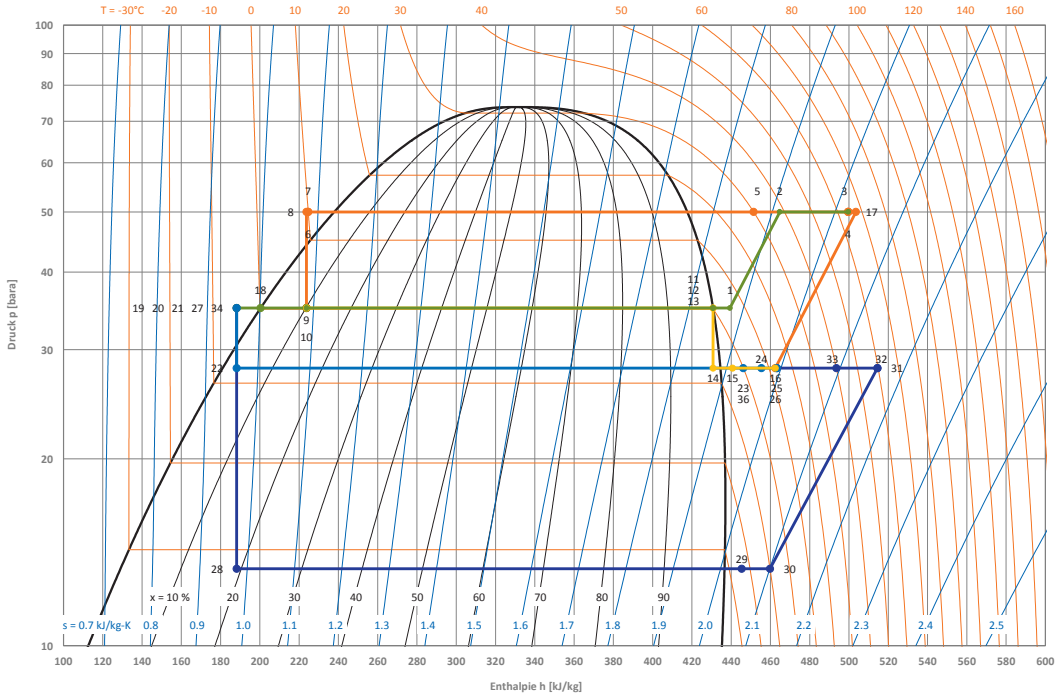


Bild 2: *Kreisprozess einer transkritischen CO_2-Kälteanlage bei einem Hochdruck von 50 bar und einer Enthitzung vom CO_2 von +65°C auf +30°C am Austritt vom Plattenwärmetauscher für Abwärmenutzung, dargestellt im Log-p-h-Diagramm.*

Wird nun bei gleichen Aussenbedingungen wie in Bild 2 dargestelltem Prozess, der Hochdruck mittels Hochdruck-Regelventil auf 80 bar erhöht, ergibt sich bei minimal höherem Aufwand eine viel grössere Abwärme Leistung (siehe Bild 3). Dies ist darauf zurück zu führen, dass die +30°C Temperaturverlaufskurve (Isotherme) ober halb vom kritischen Punkt stark nach links verläuft. In Bild 3 ist derselbe Prozess mit Hochhaltung auf 80 bar aufgezeichnet. Es wird sofort ersichtlich, dass die nutzbare Abwärmemenge stark zunimmt. Das Verhältnis von nutzbarer Abwärmeleistung zur nutzbaren Kälteleistung liegt nun bei 1.12. In anderen Worten, geht man wieder von einer nutzbaren Kälteleistung von 50 kW aus (Beispiel Lastprofil Plus- und Minuskühlung im Teillast-Betrieb), so steht eine nutzbare Abwärmeleistung von 56 kW zur Verfügung. Durch die Hochdruck-Anhebung von 50 bar auf 80 bar kann im transkritischen Betrieb nun 80% der Abwärme genutzt werden.

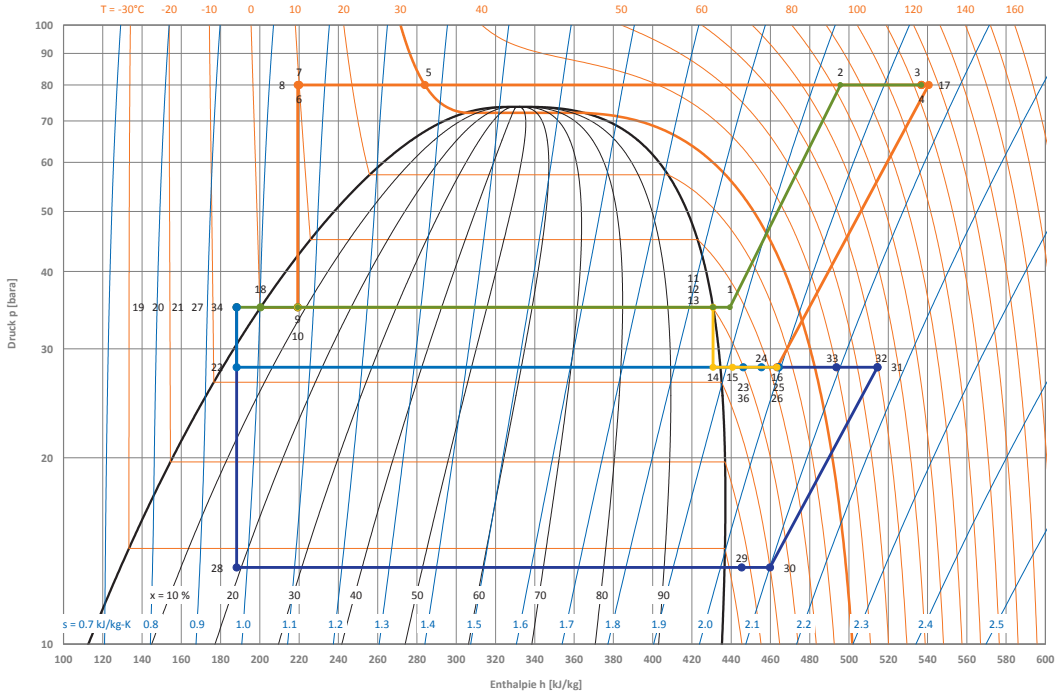


Bild 3: *Kreisprozess einer transkritischen CO_2-Kälteanlage bei einem Hochdruck von 80 bar und einer Enthitzung vom CO_2 auf +30°C am Austritt vom Plattenwärmetauscher für Abwärmenutzung, dargestellt im Log-p-h-Diagramm.*

Das Anheben auf 80 bar geht natürlich einher mit einem elektrischen Mehraufwand gegenüber dem Betrieb bei 50 bar Hochdruck. Setzt man die zusätzliche Abwärmemenge ins Verhältnis zum elektrischen Mehraufwand, so resultiert ein „Heiz-COP“ oder „Hochhaltungs-COP“, welcher bei 5.48 liegt und keine Abhängigkeit zur Aussentemperatur hat. Dieser „Heiz-COP“ steht jenen Leistungszahlen von alternativen Heizungssystemen gegenüber, beispielsweise einer unabhängigen Wärmepumpe. Im Vergleich wird rasch ersichtlich, dass eine herkömmliche Wärmepumpe, insbesondere bei tiefen Quellentemperaturen, nicht mithalten kann.

Energiebilanz im Supermarkt

Supermärkte haben gleichzeitigen Bedarf an Wärme und Kälte. Lebensmittel werden durchgehend gekühlt, bestimmte Räumlichkeiten zusätzlich klimatisiert oder beheizt und Brauchwarmwasser wird fortlaufend erwärmt. Das Bild 4 stellt beispielhaft den Bedarf an Wärme und Kälte in einem Supermarkt, als Funktion der Aussentemperatur dar.

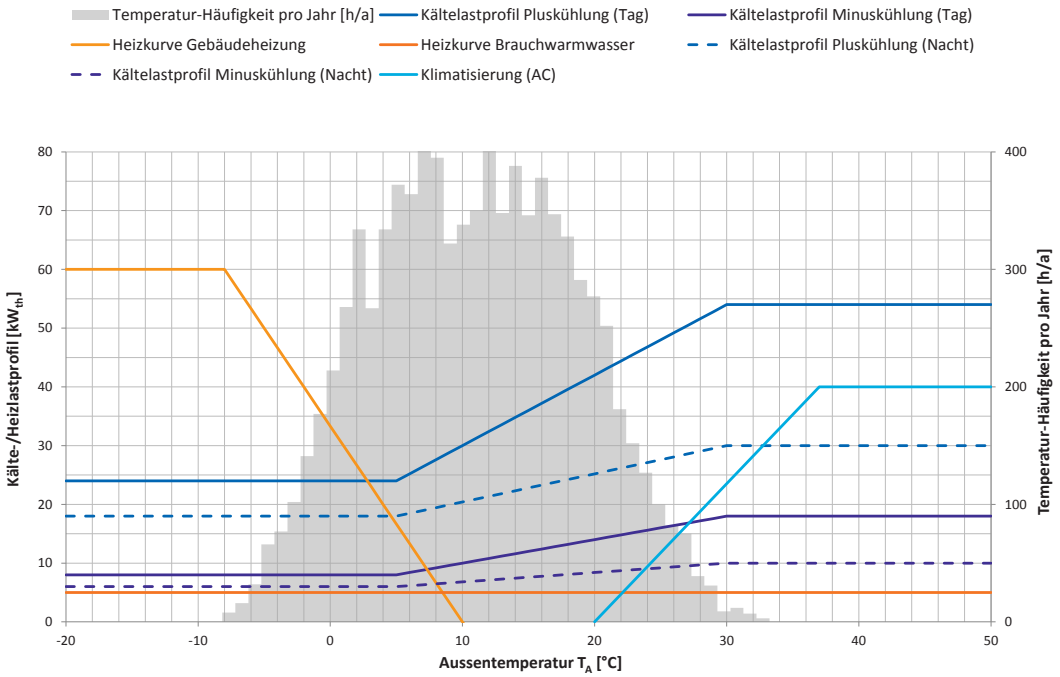


Bild 4: *Heiz- und Kühlkurve verschiedener Wärme- und Kälteverbraucher als Funktion der Aussentemperatur in einem Supermarkt.*

Es gibt verschiedene Ansätze eine bedarfsgerechte Abdeckung dieser Wärme und Kälte in einem Supermarkt sicherzustellen. Als gängige Praxis gilt es, den Bedarf meist losgelöst oder unabhängig voneinander aufbereiten, sprich die Kälteanlage kühlt die Lebensmittel sowie eine Klimaanlage und eine Heizung sorgen für ein angenehmes Klima. Für die Klimatisierung und Heizung werden dazu vermehrt reversible Wärmepumpen eingesetzt, welche Heizen oder Kühlen. Unterstützend respektive priorisierend zum Heizbetrieb der Wärmepumpe wird die Abwärme der Plus- und Minuskühlung für die Heizung und Aufbereitung von Brauchwarmwasser eingesetzt.

Je nach Jahreszeit überwiegt der Wärme- resp. der Kältebedarf im Supermarkt. Der jeweils grössere Bedarf von beiden definiert, ob zusätzliche Wärme von aussen zugeführt oder überschüssige Wärme an die Umgebung abgegeben wird. Im Sommer wird üblicherweise Wärme an die Umgebung abgegeben. Im Winter hingegen wird meist Wärme von aussen zugeführt. Die exakte Bilanz ist massgeblich von der Gebäudehülle und der Aussentemperatur abhängig. Im Idealfall entspricht der Kältebedarf dem Heizbedarf, so muss keine Wärme an die Umgebung abgegeben oder von aussen zugeführt werden.

Wird der Bedarf an Wärme und Kälte anhand der Temperaturhäufigkeit hochgerechnet, so lässt sich das Ergebnis in Kilowattstunden beispielsweise als Funktion des Monats darstellen. Das untenstehende Bild 5 stellt die Energiebilanz eines Beispiel-Markes im Raum Luzern dar, basierend auf den im Bild 4 dargestellten Kurven. Dabei wird der Fokus auf die Abwärmemenge der Kälteanlage und den Bedarf an Wärme für die Gebäudeheizung gemacht.

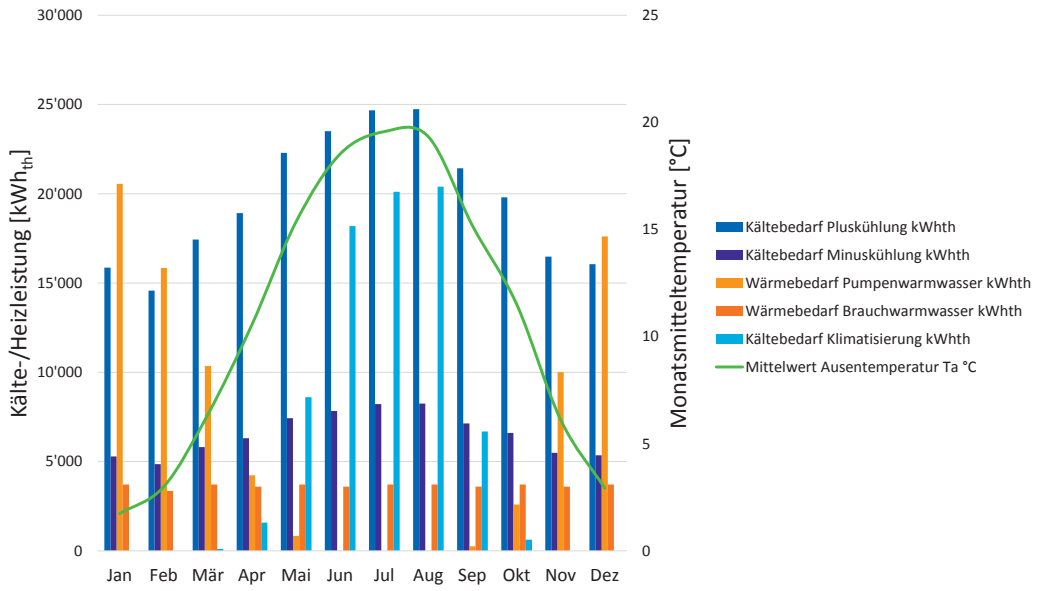


Bild 5: *Monatliche Energiebilanz verschiedener Wärme- und Kälteverbraucher im Supermarkt.*

Zusätzliche Wärmequelle

Der limitierende Betriebspunkt, sprich jener der relevant für die maximale Kälteleistung der Kälteanlage ist, liegt üblicherweise bei hohen Aussentemperaturen. In anderen Worten ist die Anlage in den kühleren Jahreszeiten überdimensioniert. Es ist naheliegend, dass mittels eines Aussenverdampfers die Leistungsreserve in Winter genutzt werden kann, um die Wärmemenge zu steigern. Wärme und nicht Abwärme, weil diese zusätzlich generiert wird und nicht als Beiprodukt der Kühlung entsteht. Diese Betriebsart entspricht im eigentlichen Sinne einer herkömmlichen Wärmepumpe, einzig werden mit einem System gleichzeitig, Pluskühlung, Minuskühlung und Wärmepumpenbetrieb gefahren. Vorausgesetzt es besteht keine Möglichkeit, Erdwärme oder eine sonstige Wärmequelle, besser als Luft zu verwenden, so kann der Aussenverdampfer entweder als separates Gerät oder als ein Gerät kombiniert mit dem Gaskühler ausgeführt werden. Unabhängig von der Platzierung kann die Kältemittelseitige Einbindung gemäss untenstehendem Bild 6 erfolgen.

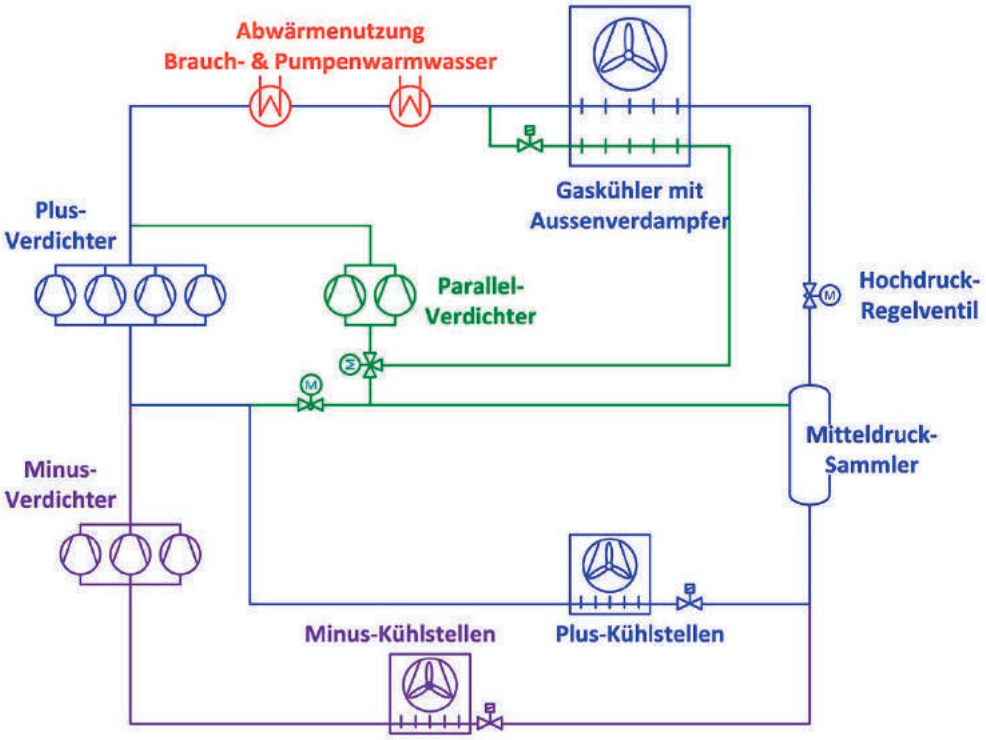


Bild 6: *Prinzipschema einer transkritischen CO_2-Booster-Kälteanlage mit einem zusätzlichen Aussenverdampfer, untergebracht im bestehenden Gaskühler.*

Der Vorteil für eine Kombination von Gaskühler und Aussenverdampfer liegt im Abtauen des Aussenverdampfers. Während dem Abtauen kann am Gaskühler Wärme abgegeben werden, welche den Aussenverdampfer abtaut. Darüber hinaus ist kein zusätzlicher Platzbedarf für den Aussenverdampfer notwendig und die Kosten liegen tiefer als für zwei separate Geräte.

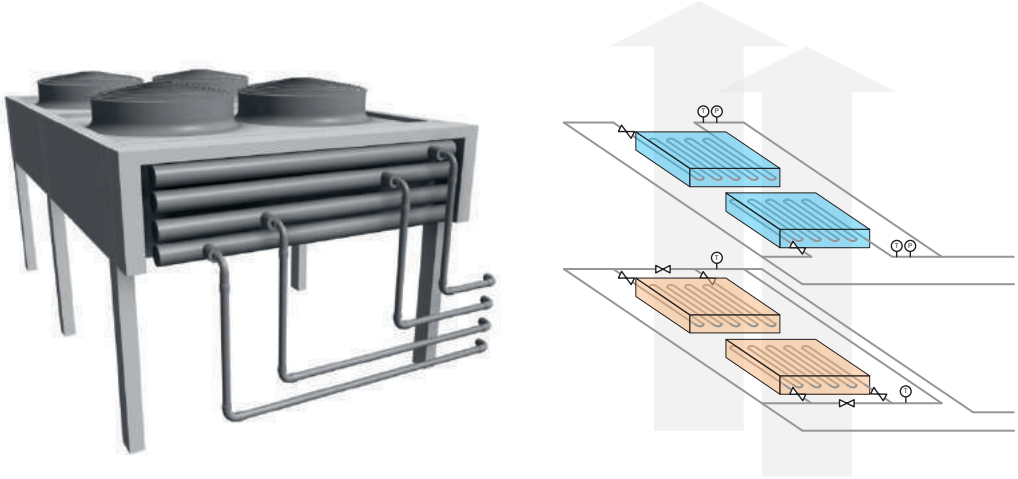


Bild 7: *Modelle eines Gaskühlers mit zusätzlichem Register für einen Aussenverdampfer.*

Grundsätzlich ändert sich nichts am Prozess für die Plus- und Minuskühlung. Einzig kommt ein weiteres Verdampfungsniveau hinzu, welches in Abhängigkeit der Aussentemperatur geschoben wird.

Klimatisierung

Vorwiegend in grösseren Supermärkten ist der Kälteeintrag der Plus- und Minuskühlung nicht ausreichend, um den Verkaufsbereich ausreichend zu klimatisieren. Insbesondere dann nicht, wenn die Kühlmöbel mit Glastüren bestückt sind und der Kälteeintrag in den Verkaufsbereich 30 bis 60% kleiner ausfällt. Folglich bedarf es während warmen Aussentemperaturen einer zusätzlichen Klimatisierung. Diese wird wie eingangs erläutert meist mit einer separaten Einheit oder mit einer reversiblen Wärmepumpe realisiert. Vermehrt wird die Klimatisierung mit der gleichen Supermarkt-Kälteanlage realisiert, indem mittels zusätzlichen Verdampfers zur Klimatisierung, Kaltwasser aufbereitet wird. Je nach Gebäudekonzept kann die Verteilung mittels Luft, Wasser oder mittels Direktverdampfung erfolgen. Im folgenden Beispiel wird Wasser als Wärme- und Kälteträger eingesetzt, mit dem Vorteil, dass dieselben Deckengeräte zum Heizen und Klimatisieren verwendet werden können.

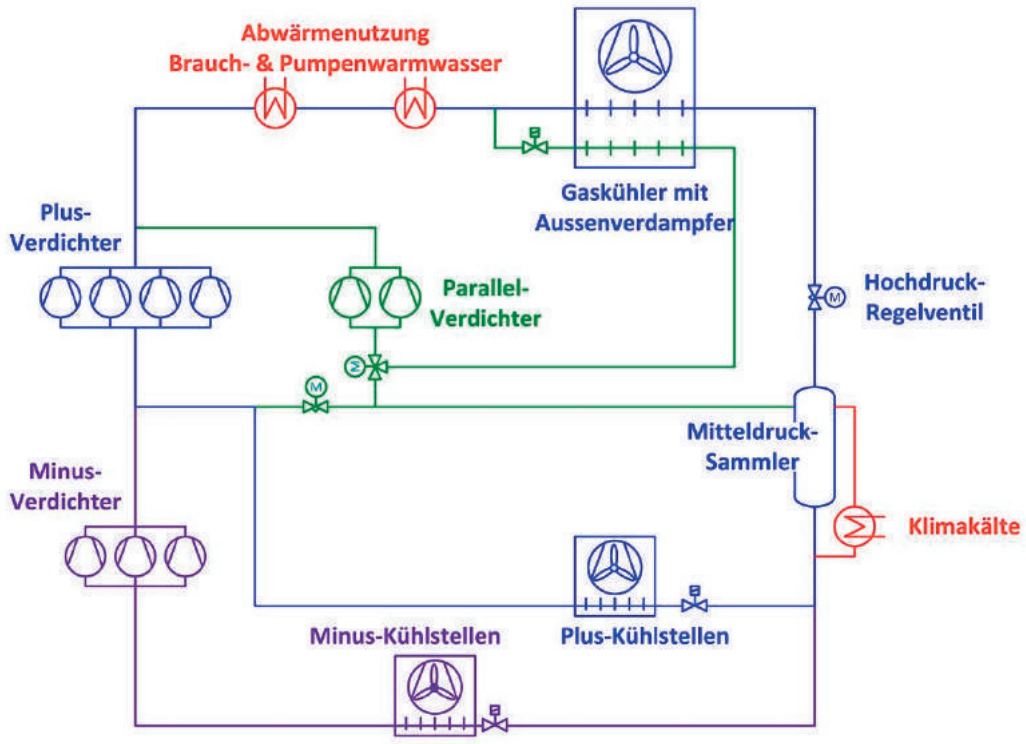


Bild 8: *Prinzipschema einer transkritischen CO_2-Booster-Kälteanlage mit einem zusätzlichen Aussenverdampfer, untergebracht im bestehenden Gaskühler und einen zusätzlichen Wärmetaucher für Klimakälte.*

Schlussfolgerung und Ausblick

Transkritische CO_2-Kälteanlagen in Kombination mit optimierter Abwärmenutzung, zusätzlichem Aussen- sowie Klimaverdampfer werden insbesondere im Retailbereich und in der industriellen Kältetechnik unter Kältefachleuten als eine der zukünftigen Kombinationen gesehen. Die Abdeckung und die Versorgung sämtlicher Wärme- und Kältebedarfe mittels eines Systems birgt Potential für eine Effizienzsteigerung. Darüber hinaus können Installations-, Betriebs. und Unterhaltskosten reduziert werden und der Platzbedarf nimmt ab. Diese wesentlichen Vorteile führen zu einer zunehmenden Nachfrage solcher Systeme über den gesamten Leistungsbereich hinweg. Des Weiteren lassen sich solche Systeme mit anderen zukunftsweisenden Technologien wie Ejektoren kombinieren.
Die Integration bringt aber auch neue Herausforderungen mit sich. Bei der Planung und Entwicklung solcher Systeme ist mit einem erhöhten Aufwand zu rechnen, denn sämtliche Betriebsfälle sind sorgfältig zu berechnen und dessen Abdeckung zu überprüfen. Darüber hinaus nimmt die Komplexität solcher Systeme weiter zu, was das Service- und Unterhaltspersonal zusätzlich fordert. Nach Einschätzung der Autorenschaft ist es trotzdem nur eine Frage der Zeit, bis solche Systeme, insbesondere im Bereich von Retail und Industrie, vermehrt zum Einsatz kommen.

Patrick W. Ruch*, Dr.
Jens Ammann, MSc.
Bruno Michel, Dr.
IBM Research GmbH
Säumerstrasse 4
8803 Rüschlikon
** ruc@zurich.ibm.com*
http://ibm.biz/sorptionheatpump

THRIVE: Thermisch betriebene Adsorptionswärmepumpen

Lösung für Rechenzenter und mehr?

Zusammenfassung
Thermisch getriebene Wärmepumpen können einen wichtigen Beitrag liefern zur Senkung von CO_2-Emissionen und des Stromverbrauchs durch die Nutzung von Abwärme und erneuerbaren Wärmequellen. Insbesondere Adsorptionswärmepumpen haben das Potential, in der Praxis Abwärme bereits ab 55°C zu nutzen und bei minimalem Stromverbrauch Nutzkälte oder –wärme zu generieren. Die Leistung und Effizienz dieser Anlagen ist stark abhängig von den drei Temperaturniveaus, bei denen Wärme zu- bzw. abgeführt wird. Für einen optimalen Einsatz von Adsorptionswärmepumpen müssen Kältemittel und Adsorptionsmaterialien auf die Anwendung abgestimmt sein. Um wirtschaftlich zu sein, muss die Leistungsdichte von Adsorptionswärmepumpen verbessert werden, was primär durch eine Intensivierung des Wärme- und Stoffübergangs erreicht werden kann. Im Projekt THRIVE, welches Teil des Nationalen Forschungsprogramms 70 „Energiewende“ ist, soll eine verbesserte Adsorptionswärmepumpe für ausgewählte Anwendungen in der Schweiz entwickelt und charakterisiert werden.

Abstract:
Thermally driven heat pumps may provide an important contribution toward the lowering of CO_2 emissions and electricity consumption via the utilization of waste heat and renewable heat sources. Adsorption heat pumps in particular have the potential to effectively use waste heat at temperatures as low as 55°C, and to generate heating or cooling with minimal electricity need. The performance and efficiency of these systems depends strongly on the three temperature levels at which heat is supplied or released. For ideal operation, the refrigerant and adsorbent material need to be matched to the application. In order for adsorption heat pumps to be truly competitive, the power density must be improved. The most promising approach to achieve high power densities is through intensification of heat and mass transfer within the adsorption heat exchangers. Project THRIVE, which is part of the National Research Program 70 “Energy Turnaround”, aims to develop and characterize an improved adsorption heat pump for selected application scenarios in Switzerland.

Einführung

Mittels der Energiestrategie 2050 soll eine sichere, umweltverträgliche und preiswerte Energieversorgung der Schweiz sichergestellt werden [1]. Um diese Vision zu erreichen soll die Energieeffizienz gesteigert werden, erneuerbare Energien ausgebaut werden sowie ein Austieg aus der Kernenergie stattfinden. Der Energieverbrauch pro Person bis 2035 soll um 43% gesenkt werden im Vergleich zum Referenzjahr 2000 und der Stromverbrauch pro Person im selben Zeitrahmen um 13% reduziert werden. Der Wärmeverbrauch in der Schweiz stellt einen Grossteil des Energie- und Stromverbrauchs dar. Knapp die Hälfte der Endenergie wird für Raumwärme (29%), Warmwasser (6%) und Prozesswärme (13%) aufgewendet, wobei der Bedarf überwiegend durch fossile Energieträger gedeckt wird [2]. Beispielsweise wird die Heizenergie für Raumwärme zu ca. 70% durch Öl und Gas gedeckt. Der Einsatz dieser wertvollen Energieträger muss reduziert und so weit wie möglich durch andere Wärmequellen ersetzt werden, um CO_2-Emissionen zu reduzieren und volatile Brennstoffpreise zu vermeiden. Beim Stromverbrauch entfallen 36-41% auf Wärme- und Kälteanwendungen [2, 3]. Starke tägliche sowie saisonale Schwankungen des Heiz- und Kühlbedarfs können die Stromnetze belasten. Durch die Einbindung von erneuerbaren Energien mit variablem Ertrag wird diese Situation noch verschärft. Technologien zur Reduktion des Stromverbrauchs für Heizen und Kühlen sind also nicht nur erstrebenswert, sondern unverzichtbar um die gesteckten Ziele zu erreichen.

Eine Umverteilung der Wärme- und Kältelasten von Stromnetze auf thermische Netze stellt eine attraktive Möglichkeit dar, um den Stromverbrauch zu senken. So wurde in 2014 beispielsweise 3.9% des Raumwärmebedarfs durch Fernwärme gedeckt [2], welche in der Schweiz zu über 80% aus Kehrrichtverbrennungsanlagen erzeugt wird [4]. Dies entspricht immerhin knapp die Hälfte des Raumwärmebedarfs, welcher durch herkömmliche Wärmepumpen abgedeckt wird (8.3%). Bisher unzureichend charakterisiert ist die Menge an industrieller Abwärme, welche in Wärmeverbünden oder lokal genutzt werden könnte. In 2014 wurden in der Schweiz 26 TWh für industrielle Prozesswärme verwendet [4]. Es wird geschätzt, dass rund die Hälfte dieser Prozesswärme weiter genutzt werden könnte [5]. Wärmerückgewinnung kann bei einer Vielzahl von Prozessen und Industrien in Betracht gezogen werden, z.B. Waschen und Trocknen in der Papier-, Textil-, Pharma- und Lebensmittelindustrie [6, 7], Kühlwasser bei Produktionsmaschinen [8] oder Serverkühlung in Rechenzentren [9]. Als erneuerbare Wärmequellen für Wohngebäude und Privathaushalte, welche nicht an einen Wärmeverbund angeschlossen sind, eignen sich Solarthermie und Biomasse-Heizkessel. Die Verwendung von Gas als Brennstoff ist aus Gründen der Effizienz und CO_2-Intensität gegenüber Heizöl vorzuziehen.

Ein wichtiges Hindernis für die Nutzung von Abwärme ist die Diskrepanz zwischen den Temperaturniveaus auf der Angebot- und Nachfrageseite. Bei verbesserter Gebäudeisolation und –heiztechnik genügen Vorlauftemperaturen um 40°C zur Bereitstellung von Raumwärme. Wärmenetze der sogenannten 4. Generation können künftig Wärme bei einem dem Endverbraucher angepassten tiefen Temperaturniveau liefern [10]. Der Wärmeertrag aus Blockheizkraftwerken, industriellen Prozessen oder Gasbrennern fällt jedoch meist bei deutlich höheren Temperaturen an. Analog zu der Infrastruktur für eine effiziente Stromversorgung benötigt es für eine optimale Nutzung der Wärme eine Art Wärmetransformator. Thermisch angetriebene Wärmepumpen können diese Funktion erfüllen und sowohl für Heiz- wie auch Kühlzwecke eingesetzt werden. Diese Technologie könnte aufgrund des geringen Strom-

verbrauchs eine attraktive Alternative zu herkömmlichen Kompressionswärmepumpen darstellen, wenn die nötige Antriebswärme durch Abwärme oder erneuerbaren Wärmequellen vorhanden ist. Thermisch angetriebene Wärmepumpen können bei geeigneter Auslegung Wärme bereits ab 50-55°C nutzen, was die Erschliessung neuer Wärmequellen ermöglichen könnte. Heute werden Wärmequellen bei Temperaturen unterhalb von 60°C nur selten erfasst, da sie bisher nicht sinnvoll genutzt werden konnten. Besonders interessant sind in diesem Zusammenhang thermisch angetriebene Wärmepumpen, welche auf dem Prinzip der Adsorption beruhen. Diese Technologie ist weniger ausgereift als diejenige der Absorptionswärmepumpen, weist aber in der Praxis tendentiell tiefere Antriebstemperaturen und höhere elektrische Wirkungsgrade aus. Zudem wird der Adsorptionstechnologie mehr Optimierungspotential zugesprochen [11], inklusive der Möglichkeit, durch eine Vielfalt an Adsorptionsmaterialien die Anlagen an bestimmte Anwendungszenarien anzupassen.

An der letztjährigen Wärmepumpentagung wurden thermisch angetriebe Gaswärmepumpen behandelt, welche von mehreren Herstellern als die nächste Generation der effizienten Gasheizung angeboten werden [12]. Während bei der Gas-Brennwerttechnik Wirkungsgrade von bis zu 98% erreicht werden, werden in Gaswärmepumpen aufgrund der zusätzlichen Nutzung von Umweltwärme noch höhere Wirkungsgrade von bis zu 140% erreicht.

In diesem Beitrag werden zunächst das Funktionsprinzip und der Aufbau von thermisch angetriebenen Adsorptionswärmepumpen beschrieben inklusive deren Anwendungen. Schliesslich wird das Projekt THRIVE (Thermally Driven Sorption Heat Pumps for Substitution of Electricity and Fossil Fuels) vorgestellt, welches Anwendungszenarien und Technologieentwicklung für Adsorptionswärmepumpen in der Schweiz im Rahmen des NFP 70 erarbeitet.

Grundlagen und Anwendungen der Adsorptionswärmepumpe

Im Gegensatz zur Absorptionswärmepumpe, bei der ein gasförmiges Kältemittel in einem flüssigen Lösungsmittel gelöst wird, beruht die Adsorptionswärmepumpe auf der Adsorption eines gasförmigen Kältemittels auf der inneren Oberfläche eines porösen Feststoffs. Dieses Phänomen ist allgemein bekannt durch die Aufnahme von Feuchtigkeit durch Trockenmittelbeutel, welche Silikagel enthalten. Das Material wurde bereits 1925 in Kombination mit dem Kältemittel Schwefeldioxid (SO_2) als Adsorptionswärmepumpe für die Kühlung von Eisenbahnwagen verwendet [13]. In den 1930er Jahren hat die Amundsen Refrigerator Co. in Oslo eine Kältemaschine beruhend auf Methanol (CH_3OH) als Kältemittel und Aktivkohle als Adsorbens für Haushaltzwecke hergestellt [14]. In der Zeit danach wurden elektrische Antriebe und Kompressoren für Kompressionswärmepumpen wesentlich zuverlässiger, effizienter und preiswerter, so dass die Entwicklung von Adsorptionswärmepumpen stark verlangsamt wurde. Das Interesse an der Technologie nahm in den 1970ern wieder zu, als der Zusammenhang zwischen dem Ozonloch und Fluorchlorkohlenwasserstoffen (FCKW) von Kältemitteln aus Kompressionswärmepumpen deutlich wurde [15]. Zudem wurde aufgrund der Energiekrise zur selben Zeit eine bessere Nutzung von Abwärme und erneuerbaren Energien wie die Solarthermie angestrebt. In den späten 1980ern wurden Silikagel-Wasser Adsorptionswärmepumpen von den japanischen Herstellern Nishiyodo und Mayekawa gefertigt. Heute gibt es mehrere Anbieter auf dem Markt, welche unterschiedliche Leistungssegmente mit Einheiten von 8 kW bis 1 MW Kälteleistung bedienen.

Das Funktionsprinzip einer Adsorptionswärmepumpe lässt sich anhand eines einfachen Experiments beschreiben (Bild 1a). Wird ein Gefäss mit Wasser mit einem zweiten Gefäss mit Silikagel verbunden, so wird Wasser aus der Gasphase vom Silikagel adsorbiert. Der Adsorptionsprozess ähnelt demjenigen der Kondensation, wird aber durch die Wechselwirkung zwischen Wasser und Silikagel begünstigt und findet deshalb bereits deutlich unterhalb vom Sättigungsdampfdruck statt. Während der Adsorption wird Wärme freigesetzt (Bild 1b, rechtes Gefäss). Da der Dampfdruck während des Adsorptionsvorgangs sinkt, kommt es zur Verdampfung und somit Abkühlung des flüssigen Wassers (Bild 1b, links). Der Effekt ist besonders ausgeprägt, wenn zuvor die nicht-kondensierbaren Gase sowie die bereits aufgenommene Feuchtigkeit aus dem Silikagel mittels einer Vakuumpumpe aus dem System evakuiert werden.

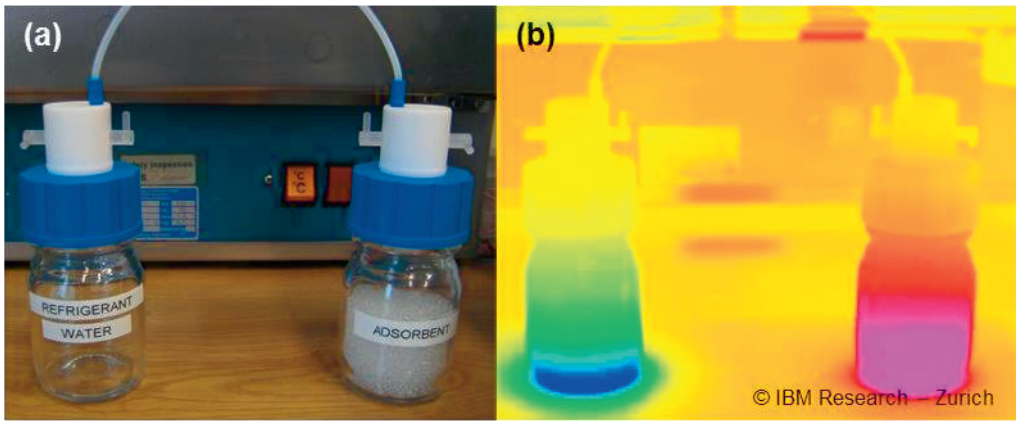


Bild 1: *(a) Versuchsaufbau mit zwei verbundenen Glasgefässen mit Wasser (linkes Gefäss) und Silikagel (rechtes Gefäss). (b) Infrarot-Aufnahme, bei der die Erwärmung des rechten Gefässes aufgrund der Adsorption von Wasserdampf auf Silikagel sichtbar ist sowie die Abkühlung des linken Gefässes aufgrund der Verdampfung des flüssigen Wassers.*

Das Experiment in Bild 1 stellt also eine sehr einfache Form einer Wärmepumpe dar, bei der Wärme von einem tiefen Temperaturniveau an ein höheres Temperaturniveau übertragen wird. Dies findet gänzlich ohne mechanisch verrichtete Arbeit statt und beruht lediglich auf der Affinität des Kältemittels (Wasser) zum Adsorbens (Silikagel). In der Praxis wird noch eine Wärmequelle für die Regeneration (Trocknung) des Silikagels benötigt. Der entsprechende Kreisprozess einer Silikagel-Wasser Adsorptionswärmepumpe ist im Druck-Temperatur Zustandsdiagramm in Bild 2a für ein Beispiel mit Niedertemperatur T_e = 15°C, Mitteltemperatur T_c = 30°C und Hochtemperatur T_h = 65°C eingezeichnet. Wie bei einer herkömmlichen Kompressionswärmepumpe wird Wärme von einem Verdampfer bei niedriger Temperatur T_e und niedrigem Druck p_e (Zustand 5) an einen Kondensator bei mittlerer Temperatur T_c und Druck p_c abgegeben (Zustand 6). Die Verdichtung des Wasserdampfs erfolgt dabei nicht über mechanische Kompression, sondern thermisch. Im Zustand 1 befindet sich das Silikagel im Gleichgewicht mit dem Druck des Verdampfers und erreicht eine maximale Beladung von 22.5 Gewichtsprozent (22.5 g Wasser pro 100 g Silikagel Trockenmasse).

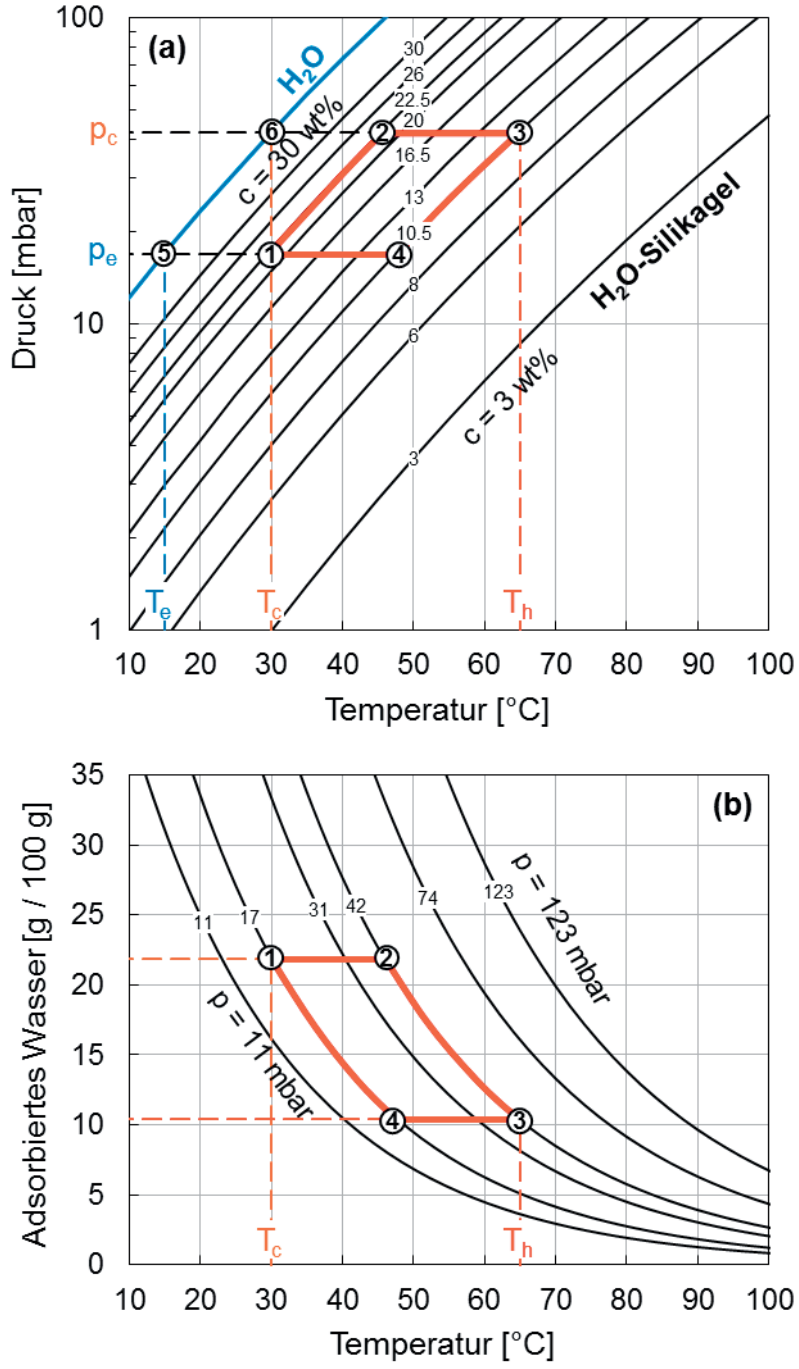


Bild 2: *(a) Druck-Temperatur Zustandsdiagramm für das Arbeitspaar Silikagel-Wasser. Die Sättigungslinie von Wasser ist zusammen mit den Isosteren des Arbeitspaars abgebildet. (b) Isobare Adsorptionskennlinien für dasselbe Arbeitspaar. Die Zustände 1-2-3-4-5-6 sind im Text beschrieben.*

Durch Zufuhr von Wärme vom Temperaturniveau T_h wird das Silikagel erwärmt, wodurch der Druck entlang der Isostere ansteigt (Zustand 1→2). Es kommt zur Desorption des Wassers aus dem Silikagel (Zustand 2→3) und Kondensation des Wasserdampfs im Kondensator (Zustand 6). Erreicht das Silikagel die Temperatur T_h, ist die minimale Beladungsmenge für

diesen Kreisprozess mit 10.5 Gewichtsprozent erreicht (Zustand 3). Nun wird die zugeführte Wärme wieder abgeführt an das mittlere Temperaturniveau T_c, wobei zunächst eine isostere Abkühlung (Zustand 3→4) und schliesslich eine isobare Adsorption (Zustand 4→1) stattfindet, wodurch das Wasser im Verdampfer verdampft und der Ausgangszustand wieder eingestellt wird. Die Spreizung der Beladung, d.h. der Unterschied in den Beladungen zwischen den Zuständen 1 und 3, sollte für die Temperaturniveaus der Anwendung maximal sein. Dies wird durch die Adsorptionskennlinien des Arbeitspaars festgelegt (Bild 2b). Wasser ist für viele Anwendungen ein ideales Kältemittel aufgrund der hohen Verdampfungsenthalpie, allerdings herrscht dann in der Adsorptionswärmepumpe ein Unterdruck (Bild 2a), welcher durch eine entsprechende Konstruktion aufrechterhalten werden muss. Mikroporöses Silikagel ist eines der am häufigsten eingesetzten Adsorptionsmaterialien, da es bereits bei tiefen Antriebstemperaturen regeneriert werden kann (Bild 2b). Allerdings wird die hohe Beladungskapazität für Wasser von bis zu ca. 40 Gewichtsprozent bei Silikagel in der Praxis kaum ausgenutzt, da die Wasseraufnahme über einen grossen Temperatur- und Druckbereich verteilt sind, während bei den meisten Anwendungen nur ein begrenzter Temperatur- und Druckbereich abgefahren wird [16]. Adsorptionsmaterialien mit enger definierten Adsorptionscharakteristiken wie z.B. Aluminophosphate [17] oder MOFs [18] haben das Potential, deutlich bessere Beladungsspreizungen für bestimmte Anwendungen zu realisieren.

In einem kontinuierlich arbeitenden System werden neben Verdampfer und Kondensator zwei zusätzliche Wärmetauscher mit dem Adsorptionsmaterial eingesetzt (Bild 3). Durch den Einsatz von zwei Adsorbern können diese antizyklisch betrieben werden und somit kontinuierlich Kälte und Wärme generieren. Neben der thermodynamisch festgelegten Beladungsspreizung ist die Adsorptionskinetik ein weiterer wesentlicher Faktor, der die Wirksamkeit der Adsorptionswärmetauscher beeinflusst. Während der Sorptionsprozesse müssen sowohl Wasser(dampf) wie auch Wärme möglichst rasch transportiert werden, um die Wärmetauscherfläche bestmöglichst auszunutzen (Bild 3, unten rechts). Das Adsorptionsmaterial wird meist als Pulver oder Kügelchen über ein Beschichtungsverfahren an die Adsorptionswärmetauscher gebunden. Entsprechend muss der Wärmeübergang zur Beschichtung sowie der Massentransport zur Beschichtung optimiert werden, um möglichst kompakte und somit preiswerte Adsorptionswärmetauscher zu realisieren.

Die thermische Leistungszahl (*thermal coefficient of performance*, COP_{th}) einer Adsorptionswärmepumpe ist wie folgt definiert:

$$COP_{th,c} = \frac{Q_e}{Q_{des}} \text{ (Kühlung)}, \; COP_{th,h} = \frac{Q_c + Q_{ads}}{Q_{des}} \text{ (Heizung)} \qquad (1, 2)$$

wobei die Einflussgrössen die zu- bzw. abgeführte Wärme darstellen gemäss Bild 3. $COP_{th,c} \approx 0.6$ ist ein typischer Richtwert für einstufige Adsorptionskältemaschinen unter nominalen Bedingungen. Der Carnot COP für Kühlung lässt sich durch die drei Temperaturniveaus der Anwendung ausdrücken [19]:

$$COP_{th,c,Carnot} = \frac{T_h - T_c}{T_h} \cdot \frac{T_e}{T_c - T_e} \qquad (3)$$

Der Carnot COP für Heizung lässt sich einfach berechnen als $COP_{th,h,Carnot} = COP_{th,c,Carnot} + 1$. Der Gütegrad von Adsorptionskältemaschinen kann bei tiefen Antriebstemperaturen Werte

von ~0.5 erreichen [20]. Interne Wärmerückgewinnung zwischen den beiden Adsorbern ist essentiell, um einen hohen Gütegrad zu erreichen.

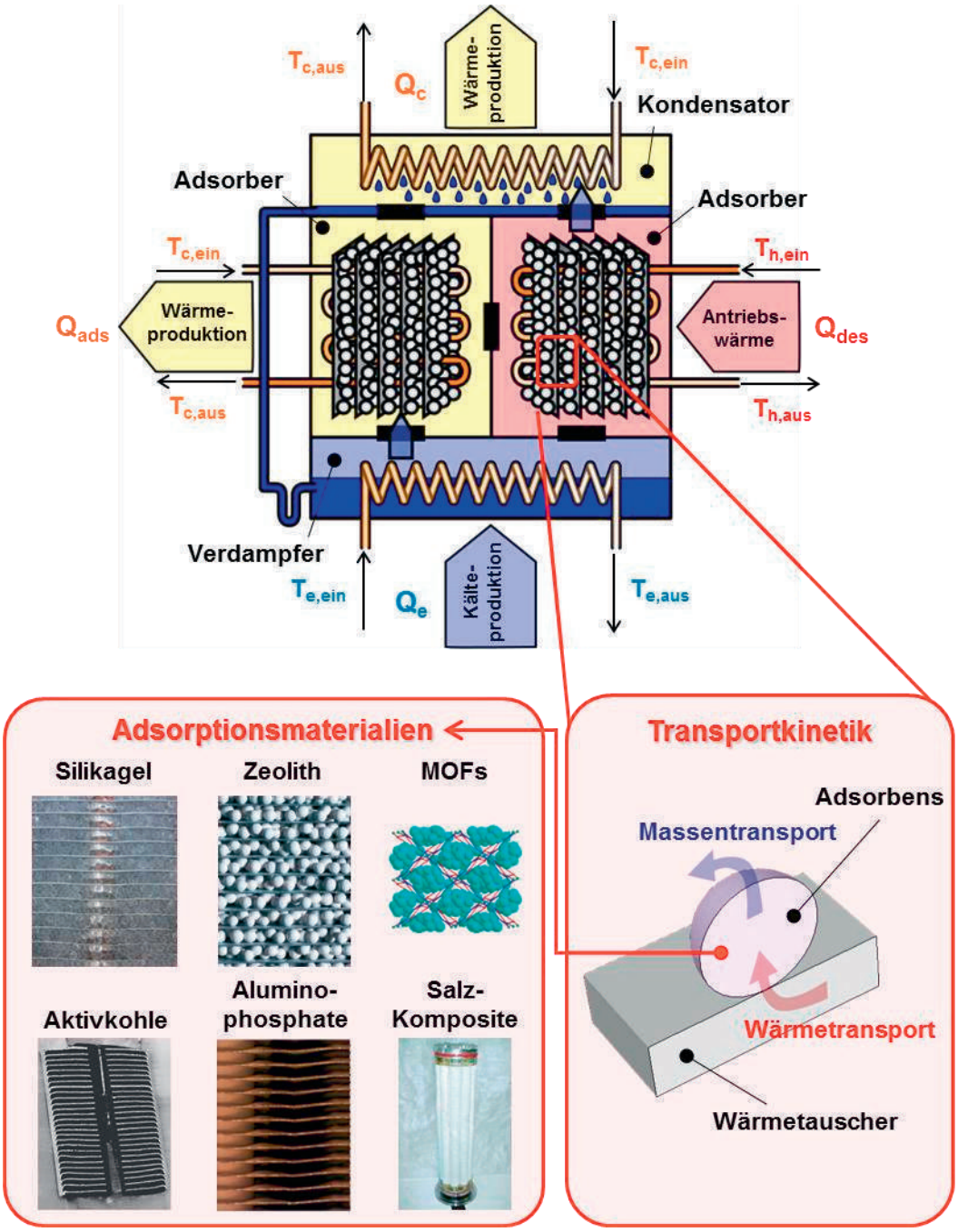


Bild 3: *Schema einer quasi-kontinuierlich arbeitenden Adsorptionswärmepumpe (oben), des Wärme- und Massentransports in Adsorptionswärmetauschern (unten rechts) sowie eine Übersicht über verschiedene Adsorptionsmaterialien [15, 21, 22] (unten links).*

Neben der thermischen Leistungszahl ist auch die elektrische Leistungszahl von Interesse, inbesondere bei der Nutzung von Abwärme. Sie wird wie folgt definiert:

$$COP_{el,c} = \frac{Q_e}{P_{el}} \text{ (Kühlung)}, \; COP_{el,h} = \frac{Q_c + Q_{ads}}{P_{el}} \text{ (Heizung)} \qquad (4, 5)$$

wobei P_{el} die aufgenommende elektrische Energie ist und sich hauptsächlich aus der Leistungsaufnahme der Förderpumpen für die drei äusseren Kreisläufe sowie der Leistungsaufnahme des Rückkühlwerks zusammensetzt. Bei idealer Systemauslegung können heute $COP_{el,c}$ Werte von 10 oder mehr erreicht werden.

Schliesslich kann die Leistungsdichte einer Adsorptionswärmepumpe über eine spezifische Kälteleistung (*specific cooling power*, SCP) oder spezifische Heizleistung (*specific heating power*, SHP) angegeben werden. Diese Grössen sagen aus, wieviel Kälte- bzw. Heizleistung pro Gewicht oder pro Volumen der Anlage geliefert werden kann. Heute sind diese spezifischen Kennwerte etwa dreimal schlechter als bei Kompressionswärmepumpen, was einerseits einen grösseren Platzbedarf für die Adsorptionswärmepumpe bedeutet aber auch die Kosten solcher Anlagen entsprechend höher ausfallen lässt. Die effektivsten Ansätze, um die Leistungsdichte von Adsorptionswärmepumpen zu erhöhen, sind auf die Anwendung zugeschnittene Adsorptionsmaterialien und die Optimierung der Transportkinetik (Bild 3). Beispiele für Anwendungen von Adsorptionswärmepumpen sind die bereits erwähnten Gaswärmepumpen [12], das solare Kühlen [20], die Kombination mit Blockheizkraftwerken für Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung [23] oder die Nutzung von Serverabwärme für das Kühlen von Rechenzentren [24, 25].

Projekt THRIVE (Nationales Forschungsprogramm 70)

Das Projekt THRIVE (Thermally Driven Sorption Heat Pumps for Substitution of Electricity and Fossil Fuels) wird im Rahmen des NFP 70 (www.nfp70.ch) vom Schweizerischen Nationalfonds (SNF) im Zeitraum Dezember 2014 bis November 2017 gefördert. Das Projekt gliedert sich in drei Hauptaktivitäten (Bild 4):

- Identifizierung von Anwendungsszenarien für thermisch angetriebene Wärmepumpen in der Schweiz
- Entwicklung und Testen einer Adsorptionswärmepumpe mit minimalem Stromverbrauch für ausgewählte Anwendungszenarien
- Charakterisierung der Adsorptionswärmepumpe mittels einer Nachhaltigkeitsbewertung und Vergleich mit alternativen Technologien

Besonders hervorzuheben ist bei diesem Ansatz, dass die Technologieentwicklung durch die Anwendungen geprägt wird, und nicht umgekehrt. Die Zusammenarbeit mit Industriepartnern für die Ausarbeitung dieser Anwendungen ist essentiell. THRIVE wird durch ein Umbrella-Projekt geleitet und besteht aus fünf Subprojekten (Tabelle 2).

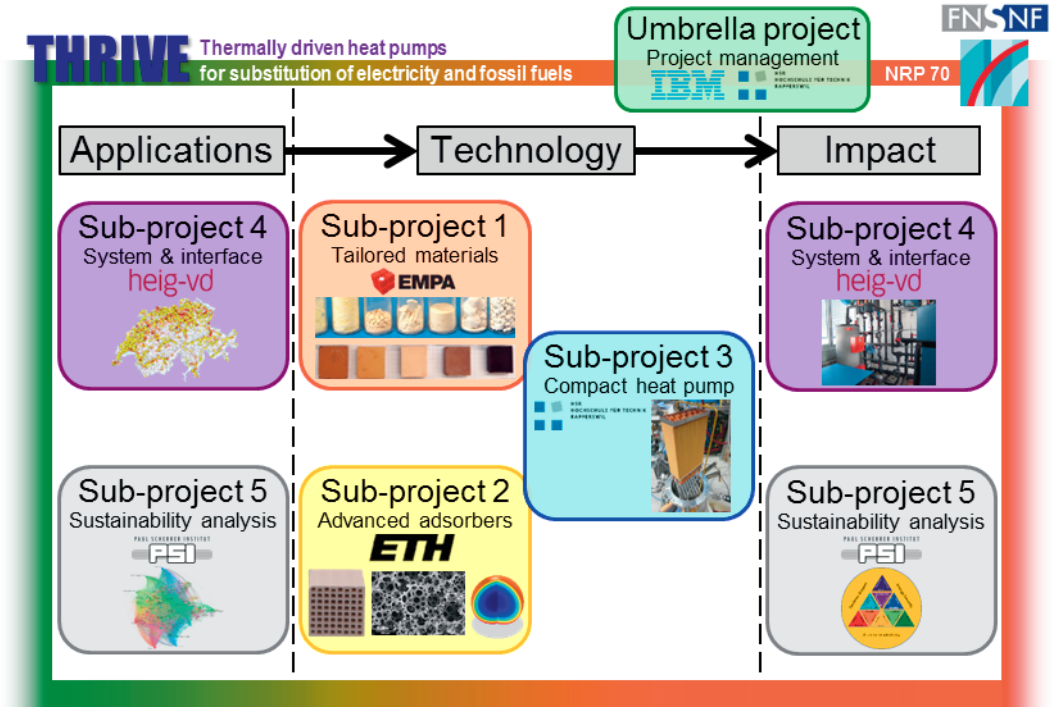


Bild 4: *Darstellung der Wertschöpfungskette und Hauptakteure im Projekt THRIVE.*

Tabelle 2: *Einzelprojekte und verantwortliche Forschungsinstitutionen im Verbundprojekt THRIVE.*

Teilprojekt	**Originaltitel**	**Institution**
Umbrella	Thermally driven heat pumps for substitution of electricity and fossil fuels	IBM Research & Hochschule für Technik Rapperswil
Subprojekt 1	Tailored materials for high-performance adsorption heat pumps	Empa
Subprojekt 2	Materials assembly for high transport rates in adsorber heat exchangers	ETH Zürich
Subprojekt 3	Development of an adsorption heat pump: Component characterization and integration in compact device	Hochschule für Technik Rapperswil
Subprojekt 4	Tests, simulation and validation of applications	Haute Ecole d'Ingénierie et de Gestion du Canton de Vaud
Subprojekt 5	Sustainability analysis of thermally driven heat conversion in Switzerland	Paul Scherrer Institut

In 2015, dem ersten Jahr des Projekts, wurden in enger Zusammenarbeit mit verschiedenen Industriepartnern mögliche Anwendungen definiert. Die technische Bewertung der Anwendungszenarien wurde von der Haute Ecole d'Ingénierie et de Gestion du Canton de Vaud (HEIG-VD) durchgeführt, während eine Nachhaltigkeitsbewertung durch das Paul Scherrer Institut (PSI) von Anfang an in die Bewertung eingebunden wurde. Schliesslich wurden vier Anwendungszenarien erarbeitet, welche als besonders vielversprechend gelten. Zwei davon sehen eine Integration der Adsorptionswärmepumpentechnologie in Wärmeverbünde vor, eine Anwendung visiert eine dezentrale Wärmepumpe für das Beheizen einzelner Gebäude an, und die letzte Anwendung sieht eine Kombination von Prozesswärme und Prozesskühlung für die Industrie vor. Details zu diesen Anwendungsszenarien werden im laufenden Jahr veröffentlicht.

Die Hauptaktivität im Projekt THRIVE in 2016 betrifft die Technologieentwicklung für einen Adsorptionswärmepumpen-Demonstrator mit 10 kW Kälteleistung und 40 kW Heizleistung. Die Auswahl geeigneter Adsorptionsmaterialien und die Synthese neuer Adsorbentien findet im Rahmen des Subprojekts 1 statt, welches von der Empa Dübendorf geleitet wird. Gleichzeitig wird die Einbindung dieser Materialien in Wärmetauscher durch die ETH Zürich und IBM Research in Subprojekt 2 untersucht. In Kombination mit Modellrechnugen an der Empa Dübendorf soll hierbei die Transportkinetik über neue Beschichtungsansätze für ausgewählte Arbeitspaare optimiert werden. Die Auslegung, Fertigung und Charakterisierung der Adsorptionswärmepumpe erfolgt an der Hochschule für Technik in Rapperswil in Subprojekt 3.

In der letzten Phase des Projekts wird in 2017 der Demonstrator unter den Bedingungen der Zielanwendungen an der HEIG-VD getestet. Das PSI wird parallel dazu eine Ökobilanz und eine Analyse der Lebenszykluskosten fertigstellen, womit das System mit alternativen Lösungsansätzen verglichen werden kann.

Zusammenfassung und Ausblick

Für das Erreichen der Ziele der Energiestrategie 2050 sollten alle Möglichkeiten der Effizienzsteigerung und Stromreduktion untersucht werden. Die Nutzung von Abwärme und erneuerbaren Energien für thermisch angetriebene Wärmepumpen könnte dazu einen wichtigen Beitrag leisten. Adsorptionswärmepumpen lassen sich für bestimmte Anwendungen massschneidern und haben insbesondere bei der Leistungsdichte und Kosten Verbesserungspotential. Hier setzt das Projekt THRIVE im Rahmen des NFP 70 an, welches neue Möglichkeiten für Abwärmenutzung in der Schweiz erarbeitet und eine massgeschneiderte Adsorptionswärmepumpe für bestimmte Szenarien für Industrie und Wärmeverbünde entwickelt. Das interdisziplinäre Forschungsteam aus sechs Schweizer Institutionen arbeitet bereits eng mit Partnern aus der Industrie zusammen, um innovative und umsetzbare Lösungen zu finden. Entscheidend für den Erfolg dieses Projekts nach dem Erreichen der technischen Ziele ist das Einbeziehen aller Interessenvertreter und eine klare Kommunikation der Möglichkeiten dieser Technologie, um einen maximalen Nutzen für die Schweizer Energielandschaft zu erreichen.

Quellen

[1] Bundesamt für Energie: *Energiestrategie 2050: Stand nach der Zweitberatung im Nationalrat*, 04.03.2016

[2] Bundesamt für Energie: *Analyse des schweizerischen Energieverbrauchs 2000 – 2014 nach Verwendungszwecken*, 2015

[3] Schweizerischer Verein für Kältetechnik: *Elektrizitätsbedarf fürs Kühlen in der Schweiz*, rev. 3, 2012

[4] Bundesamt für Energie: *Schweizerische Gesamtenergiestatistik 2014*, 2015

[5] A. Kohli: *Abwärmenutzung mittels mobilen Zeolith-Akkumulatoren – Machbarkeitsstudie*, Schlussbericht, Bundesamt für Energie, 2010

[6] M. Dupont und E. Sapora: *The heat recovery potential in the French industry: which opportunities for heat pump systems?*, ECEEE 2009 Summer Study, 1115-1123, 2009

[7] M. Pehnt, J. Bödeker, M. Arens, E. Jochem und F. Idrissova: *Industrial waste heat – tapping into a neglected efficiency potential*, ECEEE 2009 Summer Study, 691-700, 2009

[8] B. Wellig: *Energieeffiziente Produktionsmaschinen; Planungshilfen für die MEM-Industrie; Abwärmenutzung bei Produktionsmaschinen*, EnergieSchweiz und Swissmem, 2012

[9] T. Brunschwiler, B. Smith, E. Ruetsche und B. Michel: *Toward zero-emission data centers through direct reuse of thermal energy*, IBM Journal of Research & Development 53(3), 11:1-13, 2009

[10] H. Lund, S. Werner, R. Wiltshire, S. Svendsen, J.E. Thorsen, F. Hvelplund und B.V. Mathiesen: *4th Generation District Heating (4GDH) – Integrating smart thermal grids into future sustainable energy systems*, Energy 68, 1-11, 2014

[11] A. Kühn: *Thermally driven heat pumps for heating and cooling*, Universitätsverlag der TU Berlin, ISBN 978-3-7983-2596-8 (online), 2013

[12] I. Malenkovic und P. Schossig: *Gaswärmepumpen, Stand der Technik und Energieeffizienz*, 21. Tagung des BFE-Forschungsprogramms „Wärmepumpen und Kälte“, 2015

[13] R. Critoph: *Solid sorption cycles: A short history*, International Journal of Refrigeration 35, 490-493, 2012

[14] R. Plank und J. Kuprianoff: *Die Kleinkältemaschine*, Springer Verlag, Berlin, 1960

[15] R.E. Critoph und Y. Zhong: *Review of trends in solid sorption refrigeration and heat pumping technology*, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering 219, 285-300, 2005

[16] P. Ruch, S. Saliba, C.L. Ong, Y. Al-Shehri, A. Al-Rihaili, A. Al-Mogbel und B. Michel: *Heat-driven adsorption chiller systems for sustainable cooling applications*, Proceedings of the 11th International Energy Agency Heat Pump Conference, Montréal, Kanada, 2014

[17] J. Bauer, R. Herrmann, W. Mittelbach und W. Schwieger: *Zeolite/aluminum composite adsorbents for application in adsorption refrigeration*, International Journal of Energy Research 33, 1233-1249, 2009

[18] C. Janiak und S.K. Henninger: *Porous coordination polymers as novel sorption materials for heat transformation processes*, Chimia 67, 419-424, 2013

[21] S.K. Henninger, H.A. Habib und C. Janiak: *MOFs as Adsorbents for Low Temperature Heating and Cooling Applications*, Journal of the American Chemical Society 131, 2776-2777, 2009

[22] A. Freni, F. Russo, S. Vasta, M. Tokarev, Yu.I. Aristov und G. Restuccia: *An advanced solid sorption chiller using SWS-1L*, Applied Thermal Engineering 27, 2200-2204, 2007

[19] H. Hellmann: *Carnot-COP for sorption heat pumps working between four temperature levels*, International Journal of Refrigeration 25, 66-74, 2002

[20] C.A. Balaras, G. Grossman, H.-M. Henning, C.A. Infante Ferreira, E. Podesser, L. Wang und E. Wiemken: *Solar air conditioning in Europe—an overview*, Renewable and Sustainable Energy Reviews 11, 299-314, 2007

[23] R.Z. Wang und R.G. Oliveira: *Adsorption refrigeration—An efficient way to make good use of waste heat and solar energy*, Progress in Energy and Combustion Science 32, 424-458, 2006

[24] N. Meyer, M. Ries, S. Solbrig und T. Wettig: *iDataCool: HPC with hot-water cooling and energy reuse*, Lecture Notes in Computer Science 7905, 383-394, 2013

[25] P. Ruch, J. Ammann und B. Michel: *Aus warm mach kalt – Effizienzsteigerung in Rechenzentren mit thermisch getriebenen Wärmepumpen*, SEV Bulletin 6/2016

Beat Bachmann, Bsc Umweltingenieurwesen
BKW Energie AG
Dr. Schneider-Strasse 10
2560 Nidau
beat.bachmann@bkw.ch
www.bkw.ch

Smart Grid Ready für Wärmepumpen?

Zwei Bit für die Zukunft von Netzbetreiber, Energielieferant, Anlagenbetreiber und Kunde

Zusammenfassung
Die durch den Betrieb von Wärmepumpen bezogene Energiemenge ist bereits relativ gross und wird in den nächsten fünf bis zehn Jahren weiter stark zunehmen. Die potentiell vorhandene Flexibilität beim Energiebezug dieser Wärmepumpen wird heute noch nicht oder erst ungenügend genutzt. Die Energieversorgungsunternehmen bieten teilweise Tarife für unterbrechbare Verbraucher, unter anderem auch für Wärmepumpen, an. Mit diesen „Break-Tarifen" kann jedoch erst ein kleiner Teil des vorhandenen Flexibilitätspotentials genutzt werden. Deshalb sollten neue und innovative Tarifmodelle und Schnittstellen zur Flexibilisierung des Energiebezugs von Wärmepumpen entwickelt werden. Mit dem Label „Smart Grid Ready" existiert bereits eine standardisierte Schnittstelle, die für diesen Zweck genutzt werden könnte (Bundesverband Wärmepumpe Deutschland). Anstatt den Energiebezug der Wärmepumpen zu gewissen Zeiten einfach zu sperren, können dank dieser Schnittstelle der Wärmepumpe unterschiedliche Betriebszustände signalisiert werden und so der Energiebezug in die gewünschten Zeiträume verschoben werden (Tabelle 1). Die daraus resultierenden Vorteile sind: bessere Netzauslastung für den Netzbetreiber und optimierte Energiebeschaffung für den Energielieferanten. Diese sollten in Form eines attraktiven Tarifes an die Kunden weitergegeben werden.

Bild 1: *SG Ready-Label (www.waermepumpe.de)*

Ausgangslage

Die installierte Leistung von Wärmepumpen für die Brauchwassererwärmung sowie Heizung nimmt in der Schweiz seit dem Jahr 2000 stark zu. Bis zum Jahr 2020 wird sich die durch Wärmepumpen bezogene Energiemenge voraussichtlich von 1 TWh (2010) auf ungefähr 2 TWh pro Jahr verdoppeln. Diese Mengen entsprechen heute 1.5 % und im Jahr 2025 voraus-

sichtlich 3 % der gesamten in der Schweiz bezogenen elektrischen Energie. Da die Wärmepumpen nur einen Teil der pro Tag verfügbaren Zeit in Betrieb sein müssen, um die benötigte Wärme zu erzeugen, besteht bezüglich der Betriebszeiten eine gewisse Flexibilität.

Bisherige Tarifmodelle für sperrbare Verbraucher

Die Energieversorgungsunternehmen in der Schweiz haben im Umgang mit Wärmepumpen bisher unterschiedliche Ansätze gewählt. Der am weitesten verbreitete Ansatz ist der eines eigenen Tarifes für sperrbare Verbraucher. Dabei wird der Energiebezug der Wärmepumpe meist für 2 mal 2 Stunden pro Tag unterbrochen und der Kunde erhält als Gegenleistung einen günstigeren Tarif. Die Sperrung wird dabei bei den meisten Energieversorgungsunternehmen immer zu denselben Tageszeiten vorgenommen. Einige Versorger verschieben die Sperrzeiten auf die Stunden, in denen das Verteilnetz bereits stark belastet ist.

Schnittstelle zwischen Netzbetreiber und Kunde

Der Bundesverband für Wärmepumpen hat in Deutschland mit dem Label „Smart Grid Ready“ bereits eine standardisierte Schnittstelle geschaffen. Diese Schnittstelle wurde zur Einbindung der Wärmepumpen in ein intelligentes Stromnetz entwickelt. Die Definition der Schnittstelle, beziehungsweise der vier Betriebszustände, wird in Tabelle 1 erläutert. Obwohl dieses Label bisher ausschliesslich in Deutschland gültig ist, sind auch in der Schweiz verbaute Wärmepumpen bereits heute teilweise damit zertifiziert.
Der Verband „Gebäude Klima Schweiz“ engagiert sich momentan gemeinsam mit den Herstellern, um eine Einführung dieses Labels in der Schweiz voranzutreiben. Durch die zukünftige Etablierung dieses Labels in der Schweiz ergeben sich für die Energieversorgungsunternehmen neue Möglichkeiten und Chancen bei der Entwicklung von Tarifmodellen.

Heizungswärmepumpen	
Heizungswärmepumpen müssen über einen Regler verfügen, der vier Betriebszustände abdeckt:	
Betriebszustand 1	(1 Schaltzustand, bei Klemmenlösung: 1:0): Dieser Betriebszustand ist abwärtskompatibel zur häufig zu festen Uhrzeiten geschalteten EVU-Sperre und umfasst maximal 2 Stunden „harte“ Sperrzeit.
Betriebszustand 2	(1 Schaltzustand, bei Klemmenlösungen: 0:0): In dieser Schaltung läuft die Wärmepumpe im energieffizienten Normalbetrieb mit anteiliger Wärmespeicher-Füllung für die maximal zweistündige EVU-Sperre.
Betriebszustand 3	(1 Schaltzustand, bei Klemmenlösung 0:1): In diesem Betriebszustand läuft die Wärmepumpe innerhalb des Reglers im verstärkten Betrieb für Raumheizung und Warmwasserbereitung. Es handelt sich dabei nicht um einen definitiven Anlaufbefehl, sondern um eine Einschaltempfehlung entsprechend der heutigen Anhebung.
Betriebszustand 4	(1 Schaltzustand, bei Klemmenlösung 1:1): Hierbei handelt es sich um einen definitiven Anlaufbefehl, insofern dieser im Rahmen der Regeleinstellungen möglich ist. Für diesen Betriebszustand müssen für verschiedene Tarif- und Nutzungsmodelle verschiedene Regelungsmodelle am Regler einstellbar sein:

	Variante 1: Die Wärmepumpe (Verdichter) wird aktiv eingeschaltet. Variante 2: Die Wärmepumpe (Verdichter und elektrische Zusatzheizungen) wird aktiv eingeschaltet, optional: höhere Temperatur in den Wärmespeichern
Optional kann die Raumtemperatur als Führungsgrösse für die Regelung der Systemtemperaturen (Vor- bzw. Rücklauftemperatur) herangezogen werden. Eine Sperrung der Wärmepumpe durch einen Raumthermostaten in Abhängigkeit von der Raumtemperatur ist nicht ausreichend.	
Warmwasserwärmepumpen	
Warmwasserwärmepumpen müssen über einen Regler verfügen, welches mittels einer automatischen Ansteuerung eine Erhöhung der Warmwasser-Solltemperatur zum Zweck der thermischen Speicherung ermöglicht.	

Tabelle 1: *SG Ready-Label (www.waermepumpe.de)*

Zukünftiger Smart Grid Ready Tarif?

Die Smart Grid Ready Schnittstelle könnte durch den Netzbetreiber über die in der Schweiz praktisch flächendeckend vorhandene Rundsteuertechnik angesteuert werden. Dazu sind zwei zusätzliche Rundsteuerkommandos nötig, welche ohne grossen Aufwand eingeführt werden können. Bisher noch nicht geklärt ist jedoch das konkrete Lastverhalten der Wärmepumpen bei einer Nutzung dieser Smart Grid Ready Schnittstelle. Es ist offensichtlich, dass jede einzelne Wärmepumpe unterschiedlich auf die Signalisierung dieser vier Betriebszustände reagieren wird. Um das tatsächliche Potential dieses Lastmanagements beurteilen zu können, bedarf es eines konkreten Pilotprojekts beziehungsweise einer Messkampagne.
Die BKW hat die Absicht, demnächst das Potential bei der Nutzung der Smart Grid Ready Schnittstelle in einem Pilotprojekt detaillierter zu analysieren. Sollten die Ergebnisse den Erwartungen entsprechen und es ist eine signifikante Lastverschiebung möglich, steht der Umsetzung mit einem neuen Tarifmodell nichts mehr im Weg.

Erster Schritt auf dem Weg zum Smart Grid

Die allfällige Umsetzung eines solchen Smart Grid Ready Tarifes wäre ein erster Schritt in Richtung Lastmanagement. Die Funktionalität würde jedoch dadurch eingeschränkt, dass nur vier Betriebszustände möglich sind.
Mittelfristig sollte eine für alle im Haushalt verwendeten Verbraucher gültige Schnittstelle definiert werden, die mehr als nur vier Betriebszustände abdeckt. Gerade auch die Situation für die Kunden die heute bereits Photovoltaikanlagen und teileweise auch Batteriesysteme betreiben und je nach Tarifmodel ihre Eigenverbrauchsquote erhöhen wollen, muss bei einer zukünftigen Schnittstelle mitberücksichtigt werden. Aufgrund dieser Ausgangslage kann ein solcher Smart Grid Ready Tarif nur ein erster Schritt auf dem Weg zu intelligenteren und effizienteren Tarifmodellen sein.

Schlussfolgerung

Bereits heute stellen Wärmepumpen einen wesentlichen Anteil am gesamten Stromverbrauch der Schweiz und dieser wird weiterhin zunehmen. Die damit zur Verfügung stehende Flexibilität wird aber zurzeit durch die Netzbetreiber und Energielieferanten noch gar nicht oder erst mit rudimentären Ansätzen bewirtschaftet. Ein Pilotprojekt der BKW soll das Potential dieser Flexibilität genauer analysieren und damit in naher Zukunft die aktive Bewirtschaftung von Wärmepumpen ermöglichen.

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
FAWA	Feldanalyse von Wärmepumpenanlagen
FWS	Fachvereinigung Wärmepumpen Schweiz
HPP	Heat Pump Program (IEA-Wärmepumpenprogramm)
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
RL	Rücklauf
S/W	Sole/Wasser
SP	Technischer Speicher
Temp.	Temperatur
th	thermisch
VL	Vorlauf
WA	Wärmeabgabe (meist Radiatoren oder Fussbodenheizung)
WP	Wärmepumpe
WPZ	Wärmepumpentest- und Ausbildungszentrum
WW	Warmwasser (gleich wie BWW)
W/W	Wasser/Wasser

Nützliche Adressen

Leiterin des BFE-Forschungsbereichs Wärmepumpen und Kälte

Dr. Carina Alles
Sektion Energieforschung
Bundesamt für Energie
CH-3003 Bern
carina.alles@bfe.admin.ch

Leiterin des BFE-Marktbereichs Wärmepumpen

Rita Kobler
Sektion Erneuerbare Energien
Bundesamt für Energie
CH-3003 Bern
rita.kobler@bfe.admin.ch

www.bfe.admin.ch oder www.energie-schweiz.ch: Alles über das Bundesamt für Energie und EnergieSchweiz (Informationen über Wärmepumpen-Forschung unter www.bfe.admin.ch/forschung/waermepumpe)

Leiter des BFE Forschungsprogramms Wärmepumpen und Kälte

Stephan Renz
Beratung Renz Consulting
Elisabethenstrasse 44
CH-4010 Basel
Tel. 061 271 76 36
renz.btr@swissonline.ch

Fachvereinigung Wärmepumpen Schweiz FWS

Stephan Peterhans, Geschäftsführer, stephan.peterhans@fws.ch
Claudia Müller, Leiterin Informationsstelle, claudia.mueller@fws.ch

- Informationsstelle Wärmepumpen, Steinerstrasse 37, CH-3006 Bern, info@fws.ch
- Centre d'information pour les pompes à chaleur, Rue du Four 11, CH-1400 Yverdon-les Bains, info@pac.ch
- Centro d'informazione per le pompe di calore, Trevano, Casella postale 105, CH-6952 Canobbio, milton.generelli@supsi.ch

Internet: www.fws.ch, www.pac.ch, www.app-si.ch

Eine vertraute Bezugsperson an Ihrer Seite. Denn wir liefern Ihnen alles aus einer Hand. Von der Projektidee bis hin zur Finanzierung vernetzen und bündeln wir unsere Leistungen genauso, wie Sie sie benötigen. Aufgrund der individuell definierten Rahmenbedingungen erarbeiten wir eine massgeschneiderte Lösung, die auf Ihre Bedürfnisse zugeschnitten ist. Wir sind für Sie da – wärme@bkw.ch oder 058 477 55 00.

ENERGIE FÜR MORGEN

BKW