



Zusammenfassung 30. Juni 2010

Operating Agent IEA HPP Annex 32

Economical heating and cooling systems for low energy houses

Auftraggeber:

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

Kofinanzierung:

durch die Teilnehmerländer des IEA HPP Annex 32

Auftragnehmer:

Institut Energie am Bau
Fachhochschule Nordwestschweiz
St. Jakobs-Str. 84
CH-4132 Muttenz
www.fhnw.ch/iebau

Autoren:

Carsten Wemhöner, Institut Energie am Bau, FHNW, carsten.wemhoener@fhnw.ch
Prof. Dr. Thomas Afjei, Institut Energie am Bau, FHNW, thomas.afjei@fhnw.ch

BFE-Bereichsleiter: Andreas Eckmanns, andreas.eckmanns@bfe.admin.ch

BFE-Programmleiter: Prof. Dr. Thomas Kopp, tkopp@hsr.ch

BFE-Vertrags- und Projektnummer: 151885 / 101579

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



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Bundesamt für Energie BFE

Executive Summary IEA HPP Annex 32

Zusammenfassung der Ergebnisse

Erstellt von

Carsten Wemhöner
Institut Energie am Bau
Fachhochschule Nordwestschweiz
E-Mail: carsten.wemhoener@fhnw.ch

Impressum

IEA HPP Annex 32 "Economical heating and cooling systems for low energy houses"

Die hier präsentierten Ergebnisse sind ein Beitrag zum Annex 32 des IEA Heat Pump Programme Implementing Agreement.

Operating Agent (Schweiz):

Institut Energie am Bau, Fachhochschule Nordwestschweiz, Muttenz
Carsten Wemhöner, carsten.wemhoener@fhnw.ch

Projektleiter der Teilnehmerländer im IEA HPP Annex 32

Österreich:

Institut für Wärmetechnik (IWT), Technische Universität Graz
Ao. Univ. Prof. Dr. René Rieberer, rene.rieberer@tugraz.at

Kanada:

Laboratoire des technologies de l'énergie (LTE), Hydro Québec, Shawinigan
Vasile Minea, PhD, minea.vasile@lte.ireq.ca

Frankreich:

Electricité de France, R & D, Moret-sur-Loing
Catherine Martinlagardette, catherine.martinlagardette@edf.fr

Deutschland:

Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme (FhG-ISE), Freiburg (Brsg.)
Marek Miara, marek.miara@ise.fraunhofer.de

Japan:

Graduate School of Engineering, Universität Hokkaido, Sapporo
Prof. Dr. Eng. Katsunori Nagano, nagano@eng.hokudai.ac.jp

Die Niederlande:

Agentschap NL, Utrecht
Onno Kleefkens, onno.kleefkens@agentschapnl.nl

Norwegen:

SINTEF Energy Research, Trondheim
Maria Justo Alonso, maria.justo.alonso@sintef.no, Dr. Ing. Jørn Stene (2006-08), jost@cowi.no

Schweden:

SP Technical Research Institute of Sweden, Borås
Svein Ruud, svein.ruud@sp.se

Schweiz:

Institut Energie am Bau, Fachhochschule Nordwestschweiz, Muttenz
Prof. Dr. Thomas Afjei, thomas.afjei@fhnw.ch

USA:

Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee
Van D. Baxter, baxtervd@ornl.gov, Arun Vohra (2006-07), Department of Energy (DOE), Washington

IEA HPP Annex 32

Der IEA HPP Annex 32 ist ein gemeinsames Forschungsprojekt zu technischer Gebäudeausrüstung mit Wärmepumpen für die Anwendung in Niedrigenergiehäusern.
Das Projekt wird im Wärmepumpenprogramm (HPP) der Internationalen Energie-Agentur (IEA) durchgeführt.

Internet: <http://www.annex32.net>



Executive Summary

Motivation IEA HPP Annex 32

In vielen Ländern sind Gebäude für 40-50% der CO₂-Emissionen verantwortlich. Daher stellen Niedrigenergiegebäude mit deutlich reduziertem Energiebedarf eine Schlüsseltechnologie zum Erreichen der Klimaschutzziele dar.

Seit Mitte der 1990er Jahre ist der Energiebedarf von Neubauten durch Einführung schärferer gesetzlicher Grenzwerte des Heizwärmebedarfs sukzessive reduziert worden. Durch Wärmedämmung der Gebäudehülle, eine kompakte und luftdichte Bauweise, effiziente Verglasung mit optimiertem Gewinn-Verlust Verhältnis und konsequentem sommerlichen Wärmeschutz durch externe Verschattung wurden Gebäude mit einem Heizwärmebedarf bis 15 kWh/(m²·a) nach dem deutschen Passivhausstandard eingeführt (<http://www.passiv.de>).

Während in der Vergangenheit viel Aufmerksamkeit auf die Verbesserung der Gebäudehülle zur Reduktion des Heizwärmebedarfs gelegt wurde, können gegenwärtig im Wesentlichen zwei Konzepte im Hinblick auf hocheffiziente Gebäude unterschieden werden:

- Zum Einen ist das Passivhauskonzept weit verbreitet. Die Grundidee besteht in einer optimierten Gebäudehülle, um das Maximum an passiven Gewinnen zu nutzen und den Heizwärmebedarf soweit wie möglich zu reduzieren. Damit werden die typischen Werte des Heizwärmebedarfs von 15 kWh/(m²·a) erreicht. Die Effizienz der Technik für Heizung (H), Warmwasser (WW), Lüftung und Kühlung kann weitere Verbesserungen bringen, aber wegen der Investition in die Gebäudehülle bekommen die Kosten eine höhere Bedeutung.
- Zum Anderen wird ein Netto-Nullenergiehausansatz verfolgt. Nach gegenwärtiger Definition ist ein Netto-Nullenergiehaus ein netzgekoppeltes Haus, das in der Jahresbilanz soviel Energie aus erneuerbaren Quellen produziert (exportiert) wie es verbraucht (importiert). Dieses Ziel kann entweder durch eine hocheffiziente Gebäudehülle auf Passivhausniveau, womit weniger erneuerbare Energie notwendig ist, oder mit einem guten Niedrigenergiehaus und hocheffizienter Gebäudetechnik mit mehr erneuerbarer Energieerzeugung erreicht werden.

Während Netto-Nullenergiehäuser eher in der Pilot- und Demonstrationsphase sind, wächst der Markt für Niedrigenergie- und Passivhäuser stark, hauptsächlich in den drei zentral-europäischen Ländern Deutschland, Schweiz und Österreich, aber in den letzten Jahren auch in Norwegen. Abb. 1 zeigt die Entwicklung bei Energiesparhäusern nach Förderbedingungen der Regierungsbank KfW (Kreditanstalt für Wiederaufbau, <http://www.kfw.de>) und bei österreichischen Passivhäusern.

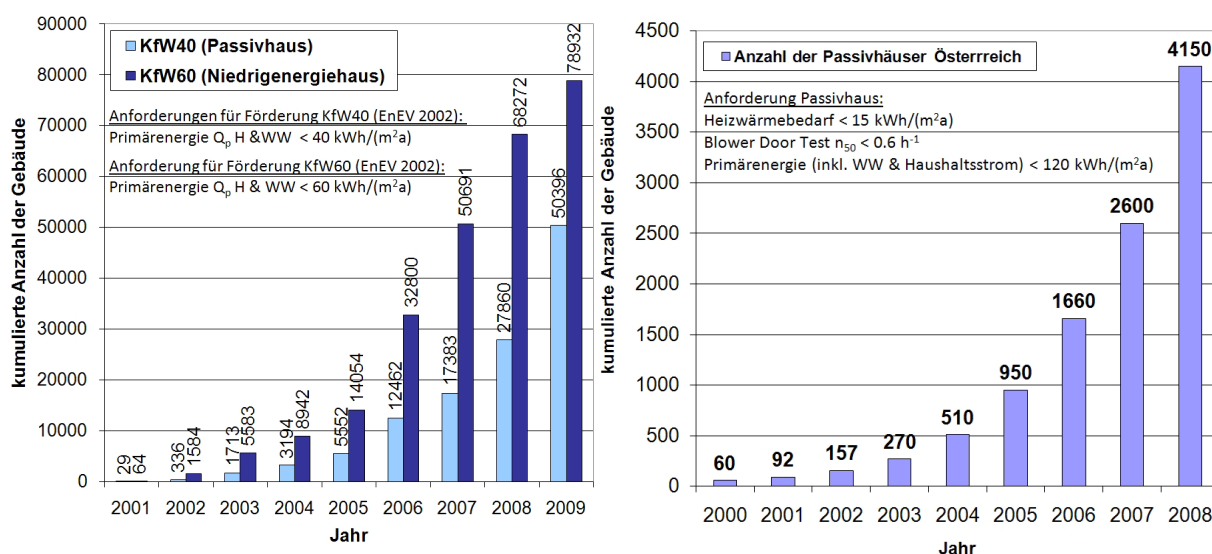


Abb. 1: Entwicklung von KfW-Energiesparhäusern in Deutschland (links) und Passivhäusern in Österreich (rechts) in der letzten Dekade.

Durch niedrigverzinsten Darlehen sind bis 2010 knapp 80'000 Niedrig-¹ und über 50'000 Niedrigstenergiehäuser² gebaut worden. In Österreich hat sich die Anzahl der Passivhäuser von 2006 bis 2008 mit insgesamt 4'150 Häusern mehr als verdoppelt, wie in Abb. 1 rechts dargestellt. In der Schweiz sind zurzeit über 15'000 Gebäude nach MINERGIE® zertifiziert (<http://www.minergie.ch>) und der Marktanteil von MINERGIE®-Wohnneubauten beträgt mittlerweile ca. 25%.

Hinsichtlich solch eines Marktwachstums ist es offensichtlich, dass auch die Gebäudetechnik an die spezifischen Gegebenheiten in Niedrigenergiehäusern angepasst werden sollte, um einen möglichst effizienten Betrieb und die maximale Reduktion von CO₂-Emissionen zu erreichen. In Niedrigenergiegebäuden

- ist der Heizenergiebedarf wesentlich reduziert, so dass das Warmwasser einen höheren Anteil am Gesamtwärmebedarf ausmacht
- ist die Gebäudehülle luftdicht ausgeführt, so dass Wohnungslüftungen erforderlich sind oder aus Komfortgründen installiert werden
- besteht das Risiko der sommerlichen Überhitzung, so dass eine Komfortkühlung zukünftig vor dem Hintergrund des Klimawandels stärker nachgefragt werden könnten.

Mit diesen geänderten Gebäudelasten weisen multifunktionale und integrierte Systeme Vorteile auf, da

- Abwärme von anderen Anwendungen, z.B. einer Kühlfunktion, intern für die WW-Erzeugung genutzt werden kann, je nach Anlagenkonzept auch simultan
- integrierte Systeme als Kompaktaggregate regelungstechnisch besser abgestimmt werden können und meist Vorteile hinsichtlich Platzbedarf und Installationskosten aufweisen.

Obwohl multifunktionale Systeme mit Wärmepumpe (WP) schon auf dem Markt verfügbar sind, insbesondere für die Anwendung in Passivhäusern, sind die Entwicklungen noch nicht abgeschlossen.

Daher verfolgt der Annex 32 im Wärmepumpenprogramm (HPP) der Internationalen Energie-Agentur (IEA) "Economical heating and cooling systems for low energy houses" die Bewertung und Weiterentwicklung von integrierten Wärmepumpensystemen für die Anwendung in Niedrigenergie- und Passivhäusern. Der Annex 32 wird mit den Teilnehmerländern Österreich, Kanada, Frankreich, Deutschland, Japan, den Niederlanden, Norwegen, Schweden, der Schweiz (Projektleitung) und den Vereinigten Staaten von Amerika durchgeführt. Tabelle 1 gibt einen Überblick der nationalen Beiträge.

Tabelle 1: Überblick der Beiträge der Teilnehmerländer im IEA HPP Annex 32

Land	Arbeitsschwerpunkt
AT	• Entwicklung eines 5 kW CO₂ Sole/Wasser (S/W) Prototyps (Labortest und Simulation) • Feldtest von 9 WP mit H & WW und 2 Kompaktgeräten mit passiver Kühlung
CA	• Entwurf und Feldtest von zwei EquilibriumTM Netto-Nullenergiehäusern (NZEB) in Kanada
CH	• Integration energieeffizienter Kühlbetrieb in Wärmepumpensysteme für Heizung und WW • Feldtest von 2 WP mit passiver Kühlung in Niedrigenergiehäusern
DE	• Feldtest von ≈100 Wärmepumpen in Niedrigenergiehäusern und ≈70 Wärmepumpen in Bestandsgebäuden in Zusammenarbeit mit 7 Herstellern und 2 Energieversorgern
FR	• Entwicklung und Feldtest von Luft/Luft (L/L)-Wärmepumpen für Niedrigenergiehäuser
JP	• Optimierung der Auslegungsleistung und des Betriebs von WP-Splitgeräten zum Heizen und Kühlen für gemäßigtes Klima (Tokyo, Kyoto, Osaka) • Machbarkeitsstudien und Feldtests von erdgekoppelten WP für kaltes Klima (Hokkaido)
NL	• Entwicklung Systemlösungen mit WP für die Markteinführung von Niedrigenergiehäusern
NO	• Machbarkeitsstudien von WP mit natürlichen Kältemitteln in Niedrigenergiegebäuden • Feldtest einer neuen 3 kW Propan Wasser-Wasser (W/W) WP für Passivhäuser
SE	• Berechnung und Vergleich von Wärmepumpenlösungen für schwedisches Klima
US	• Prototypentwicklung, Labortests und Simulation einer hochintegrierten multifunktionalen Wärmepumpe für Heizung, WW, Lüftung und Kühlung inkl. Entfeuchtung für NZEB

¹ Hauptanforderung: Primärenergie für Heizung und WW < 60 kWh/(m²a) nach der deutschen Energieeinsparverordnung EnEV 2002

² Hauptanforderung: Primärenergie für Heizung und WW < 40 kWh/(m²a) nach der deutschen Energieeinsparverordnung EnEV 2002

Schwerpunkt der Forschungsarbeiten im IEA HPP Annex 32 sind einerseits die Prototypentwicklung von hochintegrierten Wärmepumpen und andererseits die Sammlung von Felderfahrung mit marktverfügbaren Systemen und den Neuentwicklungen hinsichtlich Funktionalität, Nutzungsgrad und Optimierungspotenzial für Weiterentwicklungen.

Ergebnisse Task 1: Marktüberblick integrierte Wärmepumpen

Hauptsächlich in Ländern mit deutlichem Marktwachstum im Niedrigenergiehausbereich sind integrierte Wärmepumpensysteme bereits auf dem Markt. Wegen der reduzierten Heizlast und oft installierter mechanischer Lüftung wird Abluft zur interessanten Wärmequelle, insbesondere für Passivhäuser.

Wohnungslüftungsanlagen können in Abluftanlagen und balancierte Lüftungen, die einen Zu- und Abluftstrang aufweisen, unterschieden werden. Abluftanlagen werden hauptsächlich für die WW-Erzeugung eingesetzt, aber es sind auch integrierte Systeme für die Heiz- und WW-Funktion auf dem Markt. Balancierte Lüftungsanlagen bieten die Möglichkeit einer passiven Wärmerückgewinnung über einen Wärmeübertrager zwischen Zu- und Abluftstrang, der in Passivhäusern erforderlich ist und die Lüftungsverluste um 60%-80% reduziert. An das balancierte Lüftungssystem gekoppelte Abluftwärmepumpen sind hauptsächlich auf die Heizfunktion ausgerichtet, die eventuell durch eine Kühlfunktion im Umkehrbetrieb der Wärmepumpe ergänzt wird. Die Fortluft dient als Wärmequelle (Heizbetrieb) oder Wärmesenke (Kühlbetrieb) und die Zuluft als Übergabesystem. Durch Umschalten auf einen Warmwasserspeicher kann zusätzlich auch die WW-Erzeugung integriert werden. Diese Systemkonfiguration wird als Lüftungskompaktgerät bezeichnet. Sie werden vor allem in Passivhäusern eingesetzt.

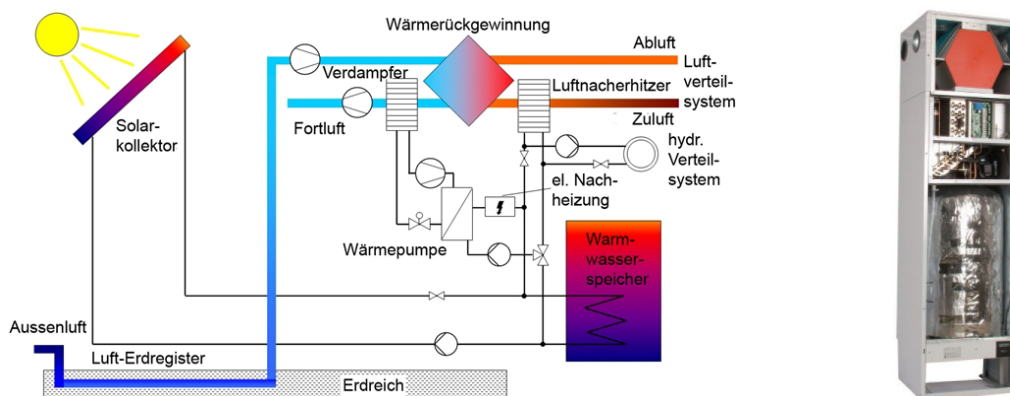


Abb. 2: Beispielhaftes Hydraulikschema eines Lüftungskompaktgeräts mit Abluftwärmepumpe mit zusätzlichen Komponenten (links) und offenes Gerät (rechts)

Allerdings ist die Leistung der Abluft-WP nach einer passiven Wärmerückgewinnung je nach Luftvolumenstrom auf 1.0-1.5 kW begrenzt, so dass optional Systemerweiterungen zum Einsatz kommen, um die Quellenleistung zu erhöhen. Beispielsweise kommen Erdregister zur Vorwärmung und Temperaturerhöhung, ein zusätzlicher Aussenluftvolumenstrom für den Verdampfer der Wärmepumpe, eine kleine Erdanbindung oder eine vollständig erdgekoppelte Wärmepumpe, sowie Solarkollektoren, meist für die WW-Erzeugung zum Einsatz. Abb. 2 links zeigt eine typische Systemkonfiguration und optionale Systemerweiterungen sowie in Abb. 2 rechts ein offenes Gerät, das auf dem Markt ist.

Anlagen mit integrierter Kühlfunktion, die nicht an die Lüftung gekoppelt ist, können in erd- oder grundwassergekoppelte passive Kühlung und aktive Kühlsysteme mit Umkehrbetrieb der WP differenziert werden. Weiterhin kann nach der Wärmequelle unterschieden werden. Für kombinierten Heiz- und Warmwasserbetrieb sind alternativ und simultan arbeitende Anlagen auf dem Markt. In Europa wird hauptsächlich der Alternativbetrieb durch Umschalten der Wärmepumpe vom Heiz- auf das Warmwassersystem installiert, während in Nordamerika der Einsatz von Enthitzern verbreiteter ist.

Anlagen mit nur einer Betriebsart, meist der Heiz- oder Warmwasserbetrieb, haben hohe Marktanteile in verschiedenen Ländern erreicht, z.B. werden über 75% der Einfamilienhaus-

Neubauten in der Schweiz mit Wärmepumpen ausgestattet. CO₂-WP-Warmwassererwärmer (sog. Eco-Cute) haben in Japan in den letzten Jahren einen hohen Marktanteil erreicht.

Ergebnisse Task 2: Entwicklung von Prototypen

Die im Annex 32 entwickelten Prototypen berücksichtigen hauptsächlich drei Aspekte, die bei marktverfügbaren Systemen zu Beginn des Annex 32 noch wenig zu finden waren:

- Integration einer zusätzlichen Kühlfunktion
- Zusätzliche Entfeuchtungsfunktion (Grundanforderung in den USA)
- Einsatz eines natürlichen Kältemittels mit vernachlässigbarem Treibhauspotenzial

Die meisten der im IEA HPP Annex 32 entwickelten Prototypen sind multifunktionale integrierte Wärmepumpen im typischen Leistungsbereich von Niedrigenergie-Einfamilienhäusern (EFH) von 3-5 kW. Passive Kühlfunktionen sind von verschiedenen Herstellern inzwischen integriert worden, auch auf Grundlage der Kooperationen im Annex 32.

Machbarkeitsstudien von CO₂-WP und 3 kW Propan Wasser/Wasser Prototyp in Norwegen

In Norwegen sind Machbarkeitsstudien von CO₂-Wärmepumpen durchgeführt worden. Die Simulationsergebnisse eines CO₂-WP-Warmwassererwärmers für die Anwendung in Niedrigenergie-Appartmenthäusern ergaben einen Jahresnutzungsgrad von 3.7 bei einer konstanten Quellentemperatur von Wasser mit 7°C und einer WW-Temperatur von 65°C. Im Vergleich zu gängigen WW-Anlagen werden beträchtliche Primärenergieeinsparungen erreicht, die das System auch wirtschaftlich interessant machen:

- ca. 75% Einsparung gegenüber der verbreiteten direkt-elektrischen WW-Erzeugung
- ca. 25% Einsparungen im Vergleich zu typischen solaren WW-Anlagen mit 50% solarem Deckungsgrad und direkt-elektrischer Nachheizung

Für kombinierten Heiz- & WW-Betrieb in EFH zeigen Laboruntersuchungen und Simulationen eines 6.5 kW CO₂-WP Prototyps (siehe Abb. 3 links), dass ab einem Warmwasseranteil von 55% die besten konventionellen H-FKW WP übertroffen werden. Für eine verbesserte CO₂-Technologie (besserer Kompressor, Ejektor) mit 10% höherem Coefficient of Performance (COP) wird der Schwellenwert bei 45% WW-Anteil erreicht (siehe Abb. 3 rechts).

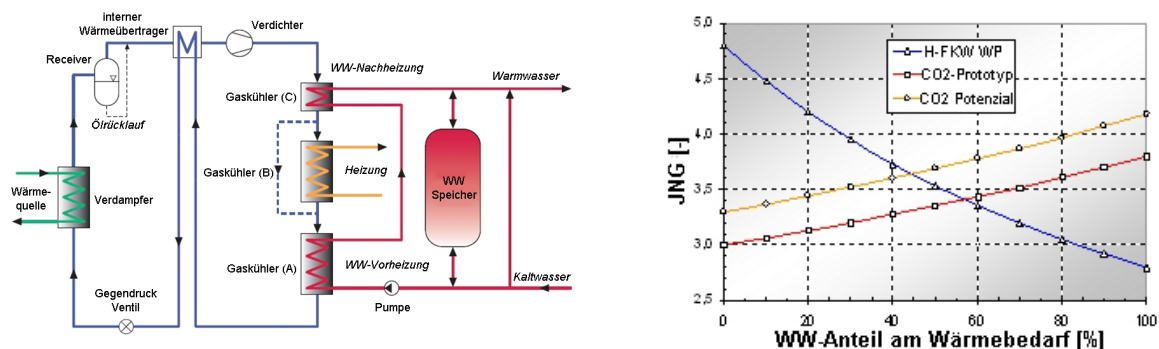


Abb. 3: Prototyp 6.5 kW Sole-Wasser (S/W)-CO₂-Wärmepumpe (links) und Vergleich des Prototyps und einer verbesserten CO₂-Wärmepumpe zum Stand der Technik (rechts) (Stene, 2008)

Darüber hinaus wurde eine integrierte 3 kW W/W-WP mit dem natürlichen Kältemittel Propan entwickelt. Das integrierte System ist für Heiz- und WW-Simultanbetrieb mit Enthitzer ausgelegt. Die Systemkonfiguration ist in Abb. 4 links dargestellt. Die Konfiguration umfasst zwei Speicher, einen 300 l Niedertemperaturspeicher zur Vorwärmung des WW und für die Fussbodenheizung sowie einen 300 l Hochtemperaturspeicher zur Nachheizung des WW. Der Sauggasüberhitzer wird hauptsächlich zur Erhöhung der Verdichteraustrittstemperatur genutzt, um das Potenzial der Enthitzung für die WW-Erzeugung zu erhöhen, wie in Abb. 4 rechts gezeigt wird. Im Feldtest in einem Passivhaus in Südnorwegen über zwei Heizperioden erreichte das System mit der Wärmequelle Seewasser (5-15°C) einen Nutzungsgrad von 3.7 auf Grundlage der genutzten Wärme und Elektrizität für WP und einen Nutzungsgrad von 3.1 auf Basis der genutzten Wärme und Elektrizität aller Komponenten.

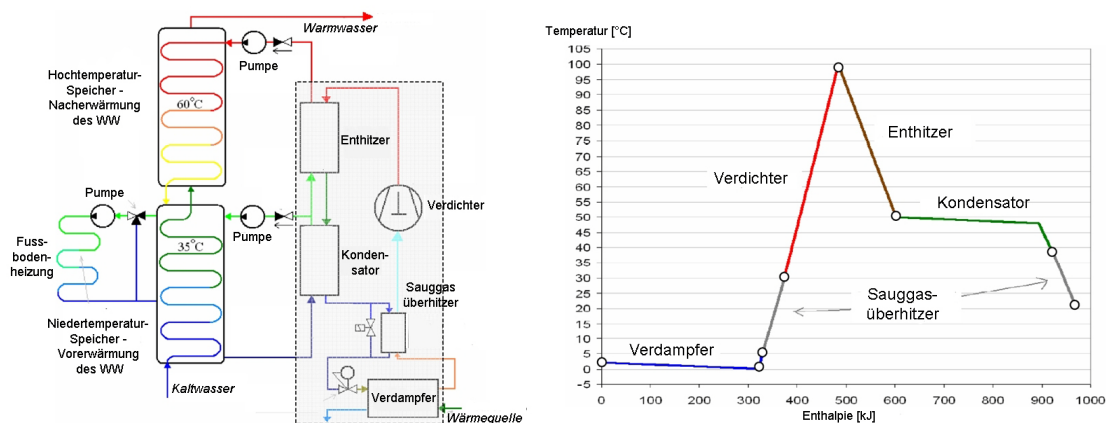


Abb. 4: Konzept des Prototyps einer Propan Wasser-Wasser Wärmepumpe (links) und Einsatz des Sauggasüberhitzers (rechts) (Stene, 2008)

Prototyp Sole/Wasser-CO₂-Wärmepumpe in Österreich

Auf Grundlage von Systemkonfigurations- und Kältekreisvergleichen wurde am IWT der TU Graz in Österreich ein 5 kW CO₂-S/W-Prototyp gebaut und im Labor vermessen, der in Abb. 5 dargestellt ist. Systemsimulationen für Heizung, WW sowie passiven und aktiven Kühlbetrieb in einem typischen Niedrigenergiehaus ergaben einen Gesamtnutzungsgrad von 3.2 bezogen auf die Nutzenergie nach dem Speicher ohne Verteil- und WW-Pumpe.

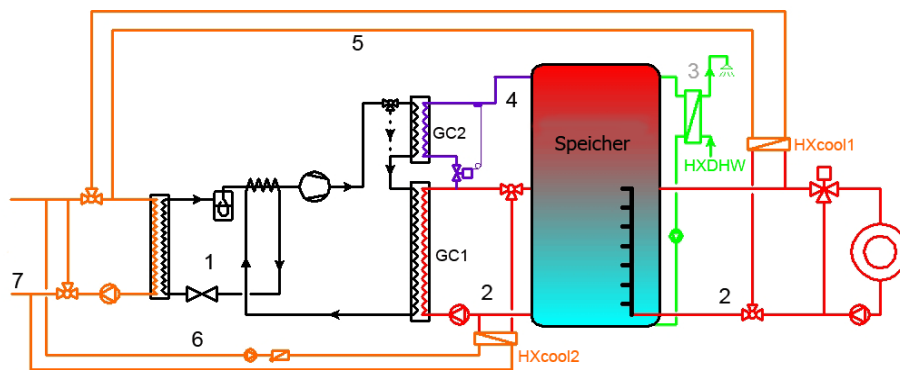


Abb. 5: Systemkonfiguration des österreichischen Prototyps (Heinz und Rieberer, 2010)

Im Fall höherer Kühllasten in Extremsommern steigt der Nutzungsgrad durch die gute Effizienz des passiven Kühlbetriebs. Weitere Systemverbesserungen werden in der Komponentenentwicklung (Kompressoreffizienz für kleine Leistungen, Ejektor) wie auch in der Systemintegration des Pufferspeichers und der Regelung gesehen.

Gebäudeintegrierte Fotovoltaik/Thermie (BIPV/T) und Wärmepumpe für NZEB in Kanada

In Kanada sind im Rahmen der EQUilibriumTM Netto-Nullenergiehaus Pilot und Demonstrations-Initiative der Canadian Mortgage and Housing Corporation zwei Häuser mit gebäudeintegrierten PV/T-Anlagen im kalten Klima von Montreal ausgerüstet worden, sowohl für eine direkte Heizanwendung als auch als Quelle für eine Luft/Wasser-Wärmepumpe. Durchgeführte Systemsimulationen bestätigen, dass die Gebäude fast die Netto-Null-Jahresenergiebilanz erreichen. Beide Häuser befinden sich im Feldtest.

Hochintegrierter Luft/Luft- und Sole/Luft-Wärmepumpenprototyp in den USA

Am Oak Ridge National Laboratory (ORNL), USA, wurde je ein hochintegrierter Luft/Luft (L/L)- und Sole/Luft (S/L)-WP-Prototyp entwickelt, im Labor getestet und simuliert, der alle Funktionen einschliesslich Entfeuchtung übernimmt. Jahressimulationen für ein 167m² NZEB für 5 Klimazonen der USA ergaben Energieeinsparpotenziale von 46-67% (52-65%) für das L/L- (S/L-) System verglichen mit marktverfügbaren, modularen Komponenten gleicher Funktionalität nach minimalen Effizienzanforderungen des US-Department of Energy (DOE). Statische Amortisationszeiten wurden zu 5-10 (6-15 inkl. Quelle) Jahren ermittelt.

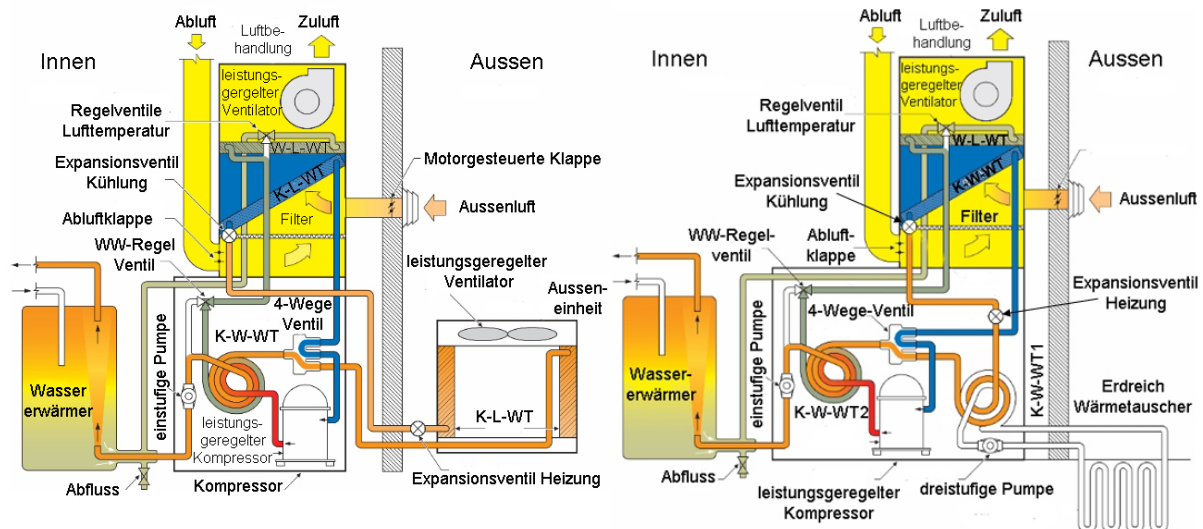


Abb. 6: L/L- (links) und erdgekoppelte Prototyp Integrated Heat Pump (IHP) (rechts) im simultanen Entfeuchtungs- und WW-Betrieb (Baxter 2008)

Ergebnisse Task 3: Feldmessungen

Im Rahmen des Annex 32 sind mehr als 100 marktverfügbare Wärmepumpen für alternativen Heiz- und WW-Betrieb in neugebauten Niedrigenergiehäusern im Feldtest untersucht worden. Jahresergebnisse des Jahres 2008 sind in Abb. 7 dargestellt. Die mittleren Wärmeerzeugernutzungsgrade (WNG) für Heizung & WW auf Grundlage der erzeugten Wärme und des Elektrizitätsaufwandes für WP, Quelle und eventuell installierter Nachheizung von 43 erdgekoppelten WP (sowohl horizontale Kollektoren als auch Erdwärmesonden) beträgt 3.8. Der elektrische Aufwand für die Quelle beträgt im Mittel 6%, der Nachheizanteil ist mit 2% vernachlässigbar. Der mittlere WW-Anteil beträgt 22%. 6 Aussenluft-Wasser Wärmepumpen erreichten im Mittel einen WNG von 3.0 bei durchschnittlich 7% Quellenaufwand und mit einem ebenfalls vernachlässigbaren Nachheizanteil von 2%.

Die Ergebnisse eines österreichischen Feldtests von 9 Wärmepumpen für Heiz- bzw. Heiz&WW-Betrieb bestätigen die Ergebnisse des deutschen Feldtests. Die Gesamt-WNG von erdgekoppelten WP (horizontal und vertikale Wärmequelle) liegen im Bereich von 4, Aussenluft-Wasser Wärmepumpen im Bereich von 3. Die Quellenenergie kann aufgrund des Messkonzepts nicht getrennt bewertet werden.

In Deutschland ist ein weiterer Feldtest mit 75 WP als Ersatz von Kesseln in Bestandsgebäuden durchgeführt worden. Mittlere Gesamt-WNG für S/W-WP liegen bei 3.3, während Luft-Wasser Systeme durchschnittlich Gesamt-WNG von 2.6 erreichen. Die Ergebnisse zeigen deutlich den Einfluss der höheren Vorlauftemperaturen in Bestandsgebäuden. Der WW-Anteil lag mit ca. 13% niedriger als in den Niedrigenergiehäusern.

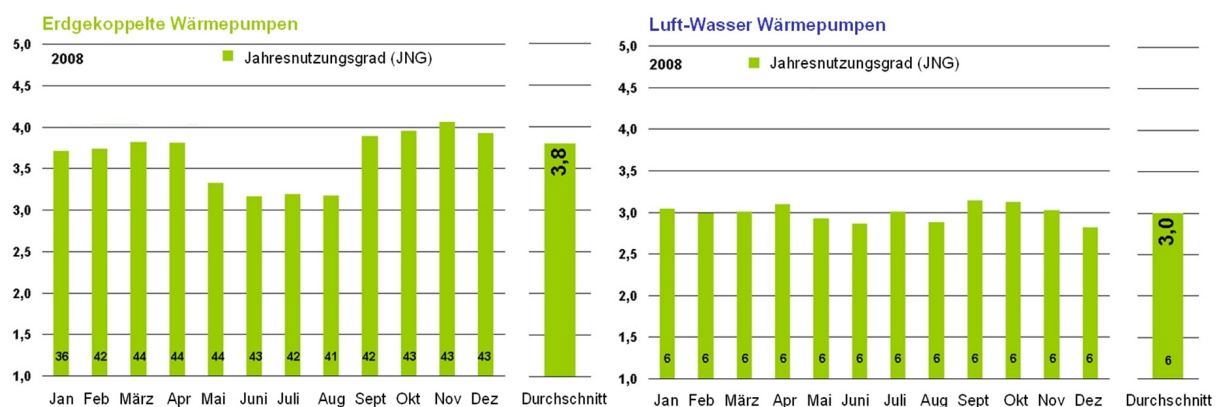


Abb. 7: Wärmeerzeugernutzungsgrade von S/W- und L/W-Wärmepumpen in neugebauten Niedrigenergiehäusern (Miara 2009)

Einige der vermessenen erdgekoppelten Anlagen im Annex 32 waren mit einer passiven Kühlung, die auch als direkte, natürliche oder freie Kühlung bezeichnet wird, ausgestattet, da im passiven Kühlbetrieb nur Hilfsenergie für die Pumpen anfällt. Nutzungsgrade hängen stark von der abgeführten Wärmemenge, also der Kühllast ab, da die Pumpenenergie bei gleicher Pumpenlaufzeit nahezu unabhängig von der Wärmemenge konstant bleibt. Vermessene Anlagen im Feld erreichten Werte von 8, während Simulationen bei höheren Kühllasten Werte bis 25 ergaben, wenn die Pumpen für das Quellen- und Übergabesystem berücksichtigt werden.

In Japan wurden zwei invertergeregelte, erdgekoppelte WP in Niedrigenergiehäusern im kalten Klima von Hokkaido vermessen. Heiz-COPs grösser 5 wurden in Kombination mit einer Fussbodenheizung mit Auslegung 35°C/30°C erreicht, und Gesamt-WNG (Heizung & WW) liegen bei 3.8. Verglichen mit konventionellen Gebäuden und Heizsystemen der Region, die hauptsächlich mit Ölkesseln ausgestattet sind, wurden CO₂-Emissionseinsparungen von 50-60% errechnet, welche sowohl von Verbesserungen der Gebäudehülle auf Niedrigenergiehausniveau (≈40-50%) als auch von der effizienteren Gebäudetechnik (≈50-60%) herrühren. Abb. 8 links zeigt die Umweltauswirkungen anhand des Primärenergienutzungsgrades der dokumentierten Best-Practice Anlagen in DE, AT und CH. Verglichen mit Gas-Brennwertkesseln tragen die Best-Practice Anlagen in Niedrigenergiehäusern bei Primärenergiefaktoren von 3.0 für Elektrizität und 1.15 für Erdgas zur Primärenergieeinsparung bei.

In Abb. 8 rechts sind die Arbeitszahlen von S/W Wärmepumpen in Abhängigkeit der Systemkonfigurationen dargestellt. Die Abbildung zeigt, dass einfachere Konfigurationen oft höhere Nutzungsgrade erreichen. Komplexe Anlagen mit Speichern erzielen oft nicht die erwarteten Nutzungsgrade, eine Aussage, die auch in früheren Feldtests schon festgestellt wurde und im Schweizer Projekt STASCH als Grundlage für die Systemwahl diente.

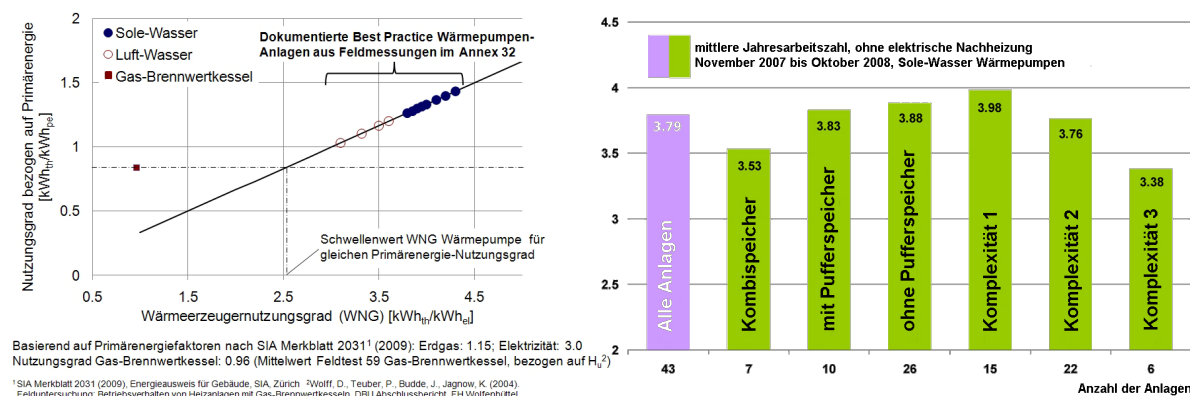


Abb. 8: Vergleich Primärenergienutzungsgrad von WP und Gas-Brennwertkessel (links) und Abhängigkeit des Nutzungsgrads von der Systemkonfiguration von S/W WP (rechts, Miara 2010)

Typische Betriebsprobleme lassen sich nach Design, Installation und Regelung unterteilen. Ein häufig angetroffenes Problem ist die Integration und Regelung von Kombispeichern, die unnötig hohe Vorlauftemperaturen für das Heizsystem verursachen und damit den Nutzungsgrad vermindern. Darüber hinaus sind komplexe hydraulische Schaltungen mit vielen Ventilen fehleranfällig: Ventile, die nicht richtig schliessen und verkehrt eingebaute Rückschlagventile können Wärmeverluste und Speicherentladungen verursachen. Des Weiteren bestehen Optimierungspotenziale hinsichtlich der Pumpenauslegung und -laufzeit. Insbesondere die Quellenpumpen von erdgekoppelten Systemen sind oft überdimensioniert und laufen länger als notwendig, was beides einen hohen Hilfsenergieverbrauch verursacht. Die folgenden Empfehlungen, die teils frühere Feldtesterfahrungen bestätigen, wurden auf Grundlage der deutschen Feldtests für einen guten Anlagenbetrieb abgeleitet:

- Gründliche Auslegung aller Komponenten auf die Lastsituation des Hauses (Wärmequelle, Speicher, Übergabesystem), möglichst niedrige Vorlauftemperaturen
- Überprüfung der Speicherladestrategie, Vorlauftemperaturen des Heizsystems
- Hydraulischer Abgleich, gründliche Isolation der Speicheranschlüsse und Verbindungen, insbesondere für Kombispeicher

- Deaktivierung von unterstützenden direkt-elektrischen Nachheizungen im Fall von S/W Wärmepumpen (ausser bei der Gebäudeaustrocknung wegen der Gefahr der Schädigung der Quelle durch Einfrieren bei Überlast)
- Systemauslegung so einfach und robust wie möglich, da in vielen Feldtests komplexe Schaltungen mit integrierten Speichern nicht die erwartete Effizienz erreichen.

Ergebnisse Task 4: Auslegungsempfehlungen

Für unterschiedliche Systemkonfigurationen wurden im IEA HPP Annex 32 Auslegungs- und Rechenmethoden abgeleitet.

Auslegung von WP-Luftkonditionierungssystemen (Splitgeräte für Heiz- und Kühlbetrieb)

In Japan wurde die Auslegung von Wärmepumpen-Luftkonditionierungssystemen (single- or multi-split Geräte), die in der moderaten Klimazone Standard sind, auf den Einsatz in Niedrigenergiehäusern angepasst. Das bestehende Verfahren einer einfachen Auswahl aus Herstellerkatalogen nach der Auslegungsleistung führt in Niedrigenergiehäusern zu Überdimensionierung und schlechter Effizienz. Im Rahmen des IEA HPP Annex 32 wurde daher eine verbesserte Methode erarbeitet, die kontinuierlichen und intermittierenden Betrieb sowie die Summenhäufigkeit der Heiz- bzw. Kühllast berücksichtigt.

Integration einer Kühlfunktion

Im Schweizer Beitrag wurden mittels Simulationen Auslegungshinweise für die Integration einer Kühlfunktion in Wärmepumpensysteme für Heizung & WW abgeleitet.

Abb. 9 zeigt die Integration der passiven Kühlfunktion in üblichen Konfigurationen für kombinierten Heiz & WW-Betrieb mit Erdwärmesonde. Ein Systemvergleich ergab, dass Luft/Luft-Splitgeräte für die Luftvariante und erdgekoppelte Systeme die besten Nutzungsgrade erreichen, während die Nutzungsgrade des Umkehrbetriebs von Luft/Wasser Wärmepumpen abfallen.

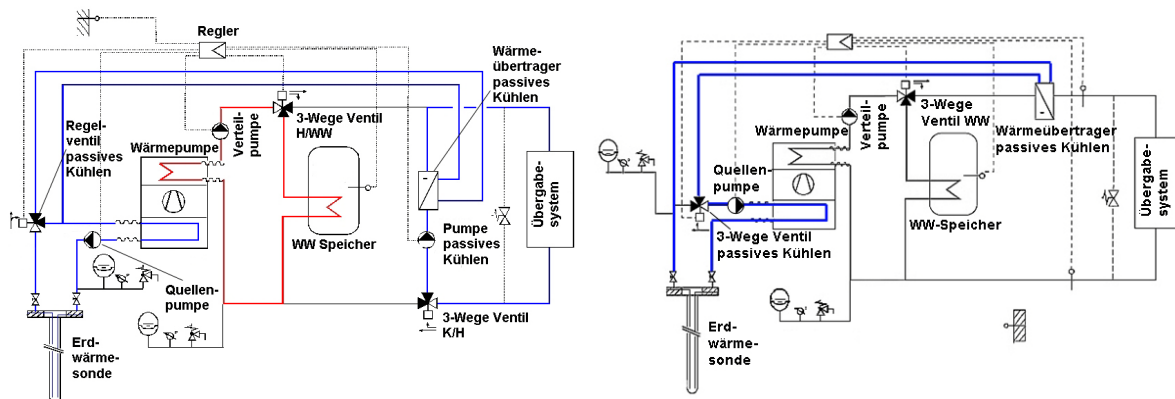


Abb. 9: Hydraulische Integration einer Kühlfunktion für S/W-Wärmepumpen mit Erdwärmesonde mit (links) und ohne (rechts) simultane Kühloption (Dott, Afjei und Huber 2007)

Die folgenden Empfehlungen wurden daraus für S/W-Wärmepumpen abgeleitet:

- Die Auslegung der Erdwärmesonde (EWS) für den Heizbetrieb reicht aus, um ca. 90% des Kühlbedarfs zu decken, d.h. unter den derzeitigen Klimabedingungen in der Schweiz ist bei adäquater System- und Gebäudeauslegung keine aktive Kühlfunktion notwendig.
- Der Wärmeübertrager zwischen EWS und Fussboden beeinflusst entscheidend den Deckungsgrad der Kühlung. Eine Auslegung auf Temperaturdifferenzen von 1 K (3 K) ergibt Deckungsgrade von 94% (66%) bei garantierter Kapazität der EWS von 26 (13) W/m.
- Der simultane Kühl- & WW-Betrieb wird nicht empfohlen, da die Verbesserung der Effizienz mit 1.7% durch den Kurzzeitspeichereffekt der abgeführten Wärme im Erdreich vernachlässigbar ist, d.h. die hydraulische Vereinfachung nach Abb. 9 rechts ist sinnvoll.
- Eine Auslegung des Systems auf Selbstregelung (max. Vorlauftemperatur von 30°C) führt zu weiteren Vereinfachungen der Hydraulik (keine Thermostatventile), maximiertem COP und zu höheren möglichen Vorlauftemperaturen im Kühlbetrieb.

- Jahresnutzungsgrade liegen im Bereich 10-25 und hängen hauptsächlich von der entzogenen Wärme ab, da der Hilfsenergieverbrauch bei gleicher Pumpenlaufzeit annähernd konstant bleibt. Daher ist der Einsatz von effizienten Pumpen zu empfehlen.
- Die erreichbare Innentemperaturabsenkung liegt bei 2-4 K. Eine Taupunktüberwachung ist in der Schweiz im Allgemeinen nicht notwendig, da die lokalen Komfortanforderungen der Fussbodenoberflächentemperatur härtere Anforderungen darstellen. Räume mit höherer Feuchte (Bad, Küche) sollten nicht über Flächensysteme gekühlt werden.
- Zusatzkosten für den passiven Kühlbetrieb sind mit 1'500 € für die erforderlichen Komponenten (Wärmeübertrager, Ventile) und Stromkosten von ca. 12 €/a moderat.

Zusammenfassung und Ausblick

Multifunktionale integrierte Wärmepumpen haben verschiedene Vorteile für den Einsatz in Niedrigenergiehäusern. Insbesondere

- können alle Funktionen mit nur einem Erzeugungssystem abgedeckt werden
- können verschiedene Gebäudetechnikfunktionen simultan und mit Effizienzgewinnen erzeugt werden
- werden bei angemessener Anlagenauslegung hohe Nutzungsgrade erreicht
- besteht nur eine geringe Abhängigkeit von fossilen Energien (abgesehen von der Stromerzeugung), und mit grünem Strom ist ein vollkommen CO₂-freier Betrieb möglich.

Die Forschungsschwerpunkte im IEA HPP Annex 32 lagen in der Entwicklung neuer WP-Prototypen für Niedrigenergiehäuser und in der Felderprobung von Wärmepumpen.

Verschiedene Prototypen wurden entwickelt und im Labor getestet, insbesondere mit erweiterter Funktionalität und dem Einsatz natürlicher Kältemittel, was in marktgängigen Produkten zu Beginn des IEA HPP Annex 32 noch wenig umgesetzt war. Kalibrierte Systemsimulationen auf Grundlage der Laborergebnisse ergaben vielversprechende Energieeinsparungen über 50% im Vergleich zu üblichen Lösungen in Niedrigenergiehäusern. Einige der entwickelten Prototypen werden zur Bewertung von Funktion und Nutzungsgraden im Feldtest weiter untersucht (US Prototyp, kanadische PV/T, norwegische Propan-Wärmepumpe), um die vielversprechenden Simulationsergebnisse auch im realen Betrieb zu verifizieren. Weiterhin zeigen die Feldtests mögliche Systemoptimierungen. Durch den Zeitplan des Annex 32 konnten aber nur Feldergebnisse des norwegischen Prototyps berücksichtigt werden.

Die umfangreichen Feldergebnisse von marktgängigen Wärmepumpen in Niedrigenergiehäusern im Rahmen des IEA HPP Annex 32 bestätigen gute Nutzungsgrade und eine bessere Effizienz und weniger Umweltauswirkungen im Vergleich zu konventionellen Heizsystemen wie kondensierenden Gaskesseln. Weiterhin wurden Auslegungsrichtlinien aus den durchgeführten Simulationsstudien für erweiterte Funktionen von Wärmepumpensystemen abgeleitet. Während der Annex 32 den Schwerpunkt auf die Systemintegration und -auslegung gelegt hat, gehen gegenwärtige Marktentwicklungen auch weiter zu einer Integration von Solartechnik und Wärmepumpe. Besonders für Netto-Nullenergiehäuser, bei denen gebäudeintegrierte erneuerbare Energien ein zentraler Teil des Konzepts ist, bietet diese höhere Integration eventuell weitere Vorteile für Energieeffizienz und Kosten.

Zukünftige Gebäude bestehen daher aus multifunktionalen Komponenten, die dazu beitragen, den Energiebedarf kosteneffizient und umweltfreundlich zu decken. Durch die einzigartigen Eigenschaften stellen Wärmepumpen die zentrale Komponente eines integrierten und umweltfreundlichen Gebäudeentwurfs dar, der die Transformation zu einer nachhaltigen Gesellschaft ermöglicht.

Die Ergebnisse des IEA HPP Annex 32 sind in vier Schlussberichten, "Best-Practice Sheets" für gemessene Anlagen mit guten Nutzungsgraden und "System Concepts Sheets" für den Feldtest von Prototypen und neuen Systemkonzepten zusammengefasst worden. Die Dokumente können auf der Annex 32-Webseite unter <http://www.annex32.net> heruntergeladen werden.