

Kostengünstige Niedrigtemperaturheizung mit Wärmepumpe

Phase 2: Ökologischer und ökonomischer Vergleich, Systemoptimierung, intelligente Regelung, Versuche

Niedrigenergiehäuser mit **Energiekennzahlen unter 160 MJ/m²a** stellen neue Anforderungen an die Heizsysteme. Der Heizleistungsbedarf von Gebäuden sinkt auf rund die Hälfte konventioneller Bauten. Damit steigt der Wärmebedarf für die Warmwasserbereitung auf 30 bis 40% des gesamten Wärmebedarfs. Auch grosse Fensterflächen gegen Süden zur Erhöhung der passiven Solarenergienutzung wirken sich stärker aus als bei konventionellen Bauten. Um das Ziel eines hohen Komforts kostengünstig und mit möglichst geringer Umweltbelastung zu erreichen, sind Wärmeerzeugung, Wärmeverteilung und Gebäude als **ganzes System** zu behandeln. Im Vordergrund der Untersuchung steht die Wärmeerzeugung durch Wärmepumpen. Sie wird aber mit konventionellen Systemen verglichen.

Was wurde untersucht?

Das Gesamtsystem Gebäude-Heizung-Warmwasserbereitung wird mit realistischer Erfassung solarer Wärmegevinne durch eine dynamische Computersimulation mit dem Simulationsprogramm TRNSYS erfasst: Abb 1.

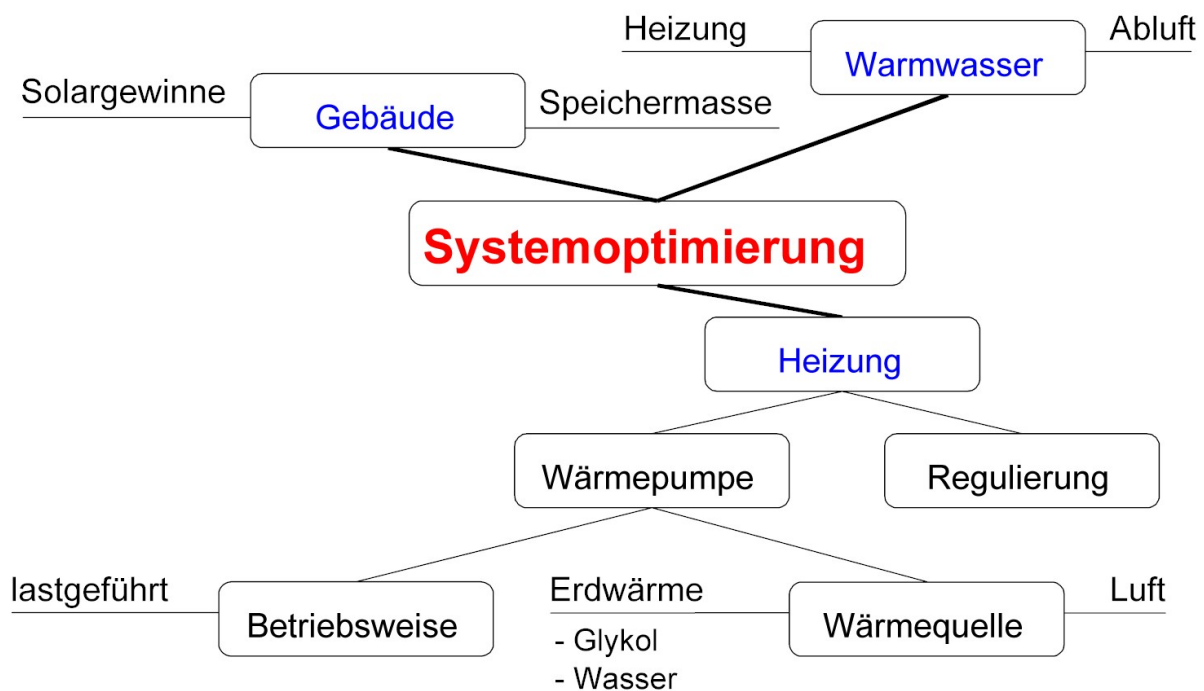


Abb. 1: Optimierung des Gesamtsystems Gebäude-Heizung-Warmwasserbereitung durch dynamische Simulation (aus [SB]).

In der nun abgeschlossenen Phase 2 wurden Computersimulationen mit ergänzenden Laborversuchen zur Wärmepumpenregelung für die in der Tabelle 1 zusammengestellten Reihen-Einfamilienhäuser durchgeführt. Eine mechanische Förderung der Abluft (Zuluft über Mauerventile) wurde nur bei der Variante L/W-Wärmepumpe mit Abluft-Wärmepumpe durchgeführt. Die teilweise natürliche Lüftung entspricht den hygienischen Anforderungen der Bewohner. Zum Vergleich mit herkömmlichen Gebäuden wurde ein "Grenzwerthaus" in die Untersuchungen einbezogen. Auf eine aktive Solarenergienutzung wurde aus Kostengründen verzichtet. **Geringe Kosten** werden durch den direkten Anschluss der Wärmepumpe ohne Wärmespeicher und ohne Mischventile ans Wärmeverteilsystem erreicht. Dies stellt an die Regelung des Heizungssystems allerdings hohe Ansprüche.

Wärmepumpen	Gebäude
<p>Luft/Wasser L/W-WP (mit einer und zwei Leistungsstufen)</p> <p>Warmwasserbereitung mit</p> <p>Abluft-Wärmepumpenboiler (Gebäude mit mechanischer Lüftung) Arbeitsmittel Propan, R407C gemessene Kennlinienfelder</p>	<p>Grenzwerthaus</p> <p>Energiekennzahl nach SIA 380/1: 274 MJ/m²a. Wärmeleistungsbedarf nach SIA 384/2: 4.8 kW.</p> <p>U-Werte: Aussenwand 0.55, Dach 0.40, Boden EG 0.46, Fenster 1.4 W/m²K.</p>
<p>Sole/Wasser S/W-WP</p> <p>Warmwasserbereitung mit</p> <p>Beistellboiler über Wärmepumpe (Gebäude mit natürlicher Lüftung) Arbeitsmittel Propan, R407C gemessene Kennlinienfelder</p>	<p>Niedrigenergiehaus</p> <p>Energiekennzahl nach SIA 380/1: 174 MJ/m²a. Wärmeleistungsbedarf nach SIA 384/2: 3.2 kW</p> <p>U-Werte: Aussenwand 0.29, Dach 0.22, Boden EG 0.25, Fenster 1.1 W/m²K.</p>
<p>Steuerung der Wärmepumpen</p> <p>aussentemperaturgeführte</p> <p>Rücklauf temperaturregelung und modellbasierte Regelung Berücksichtigung von EW-Sperren</p> <p>von 6..7, 11..12 und 22..24</p>	<p>SIA2010-M in Massivbauweise</p> <p>Energiekennzahl nach SIA 380/1: 134 MJ/m²a. Wärmeleistungsbedarf nach SIA 384/2: 3.2 kW</p> <p>U-Werte: Aussenwand 0.20, Dach 0.15, Boden EG 0.20, Fenster 1.1 W/m²K</p>
	<p>SIA2010-L in Leichtbauweise</p> <p>Energiekennzahl nach SIA 380/1: 134 MJ/m²a. Wärmeleistungsbedarf nach SIA 384/2: 3.2 kW</p> <p>U-Werte: Aussenwand 0.20, Dach 0.15, Boden EG 0.20, Fenster 1.1 W/m²K</p>
<p>Wärmeverteilung: Fussbodenheizung mit Auslegungsbetriebstemperaturen von 30/25 °C (beim Grenzwerthaus 35/30 °C) bei einer Aussentemperatur von -11 °C, speicherfrei, Heizungsumwälzpumpe mit einer Leistungsaufnahme von 30 W. (Beim Unterschreiten der Heizkurve dauernd in Betrieb.)</p>	
<p>Benützerverhalten: Warmwasserbedarf für alle Gebäude 120 Liter pro Tag, normiertes Tagesverlaufsprofil mit Berücksichtigung von Ausstossverlusten.</p>	
<p>Wärmegewinn durch elektrische Apparate und Beleuchtung: 52 MJ/m²a (8 MJ/m²a unter dem Wert für den Minergiestandard).</p>	

Tabelle 1: Komponenten der untersuchten Gesamtsysteme. Grenzwerthaus: Derzeitige Vorschriften des Kantons Zürich für Neubauten werden gerade noch erfüllt. SIA2010: Für optimale passive Nutzung der Sonneneinstrahlung optimierte Niedrigenergiehäuser, Zielwert des Absenkpfeils nach SIA für das Jahr 2010. Erfüllt in Bezug auf den Heizenergiebedarf den Minergie-Standard.

Ergebnisse der dynamischen Simulationen des Gesamtsystems

- Die **Behaglichkeit** nach dem PPD-Indikator (percentage of persons dissatisfied) wird bei guter Wärmepumpenregelung im speicherlosen Betrieb in allen untersuchten Fällen – ausser beim Gebäude SIA2010-L in Leichtbauweise – problemlos erreicht.
- Bei der Optimierung des Niedrigenergiehauses durch Vergrössern der südseitigen Fensterfläche **zur passiven Solarenergienutzung** wurde nur bei der Massivbauweise (Gebäude SIA2010-M) eine deutliche Reduktion des Heizenergiebedarfs erreicht. Sie betrug gegenüber dem "gewöhnlichen" Niedrigenergiehaus 13%. Infolge häufiger Betätigung der Beschattungseinrichtungen wird der Solarenergiegewinn bei der Leichtbauweise (Gebäude SIA2010-L) eingeschränkt, weil die Überschusswärme nicht zwischengespeichert werden kann.
- Gegenüber dem Betrieb mit konstanter Leistung ergab die **L/W-Wärmepumpe mit zwei Leistungsstufen** (60%, 100%) eine Erhöhung der Jahresarbeitszahl von 3.4 bei konstanter Drehzahl um rund 18% auf 4.0 bei zwei Drehzahlen. Die höheren Wärmepumpenkosten für zwei Leistungsstufen lassen sich bei den derzeitigen Strompreisen beim geringen Heizenergiebedarf von Niedrigenergiehäusern leider kaum amortisieren
- Der Einfluss der **Wärmeleitfähigkeit des Erdreichs** auf die Soletemperatur und damit auf die Jahresarbeitszahl der **S/W-Wärmepumpe** wurde mit dem Erdsondenmodul EWS und dem Simulationsprogramm TRNSYS untersucht. Bei einer Änderung der Wärmeleitfähigkeit des Erdbodens um 1 W/mK ergaben die Simulationsrechnungen für eine Bezugswärmeleitfähigkeit von 2 W/mK eine erstaunlich geringe Änderung der Soletemperatur um rund 2 K und der Jahresarbeitszahl um rund 3.5%. Dabei wurde allerdings von einem laminaren Betrieb der Sonde ausgegangen.
- Bei richtiger Sondenbelastung lassen sich **Erdwärmesonden mit Wasser** als Wärmeträger betreiben. Der Energiebedarf der Umwälzpumpe lässt sich dann erheblich reduzieren. Entsprechende Sondenbelastungsgrenzkurven sind im **Bild 2** aufgezeichnet. Man kann damit in Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit des Erdreichs (Ordinate), der minimalen Verdampfaustrittstemperatur (1.5°C, 2.0°C und 2.5°C) und der Temperaturdifferenz des Wassers im Verdampfer die spezifische Sondenbelastung (Wärmestromdichte) für die im SB beschriebene Sondengeometrie ablesen.

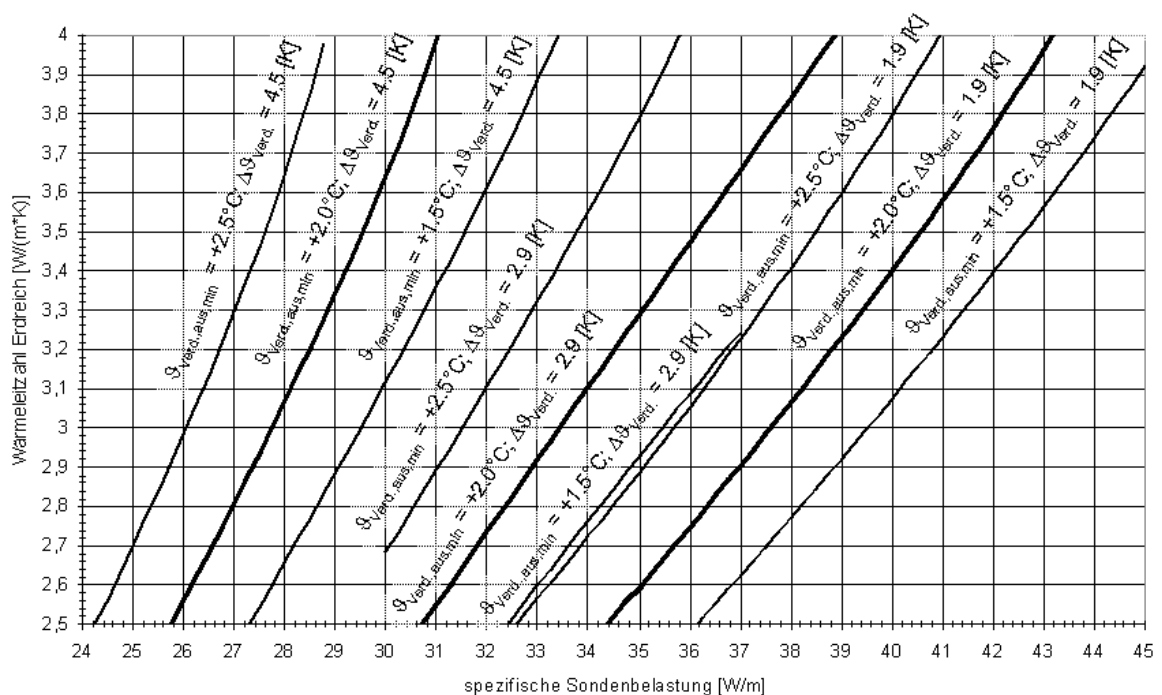


Abb. 2: Sondenbelastungsgrenzkurven für Erdwärmesondenbetrieb mit Wasser als Wärmeträger für die untersuchte Erdwärmesonde.

Neue Wärmepumpenregelung

Um zu kostengünstigen Lösungen zu kommen, sind Sensoren ausserhalb der Wärmepumpe möglichst zu vermeiden (hohe Installationskosten!). Fussbodenheizungssysteme weisen im allgemeinen Einzelraumthermostatventile und einen Bypass auf. Die Einzelraumthermostatventile

reagieren auf die aktuelle Raumtemperatur. Sie werden deshalb in einem neuen Regelungskonzept als "Temperatursensoren" benützt, indem in der Wärmepumpe der Druckabfall über der Umwälzpumpe erfasst wird. Gegenüber der üblichen Zweipunktregelung sind von einem neuen, modellbasierten Regelkonzept mit Pulsbreitenmodulation ein besseres "Verkrafen" von Sperrzeiten der EWs und eine bessere Nutzung von Niedertarifperioden trotz speicherlosem Betrieb zu erwarten. Die zusätzliche Installation eines Solarimeters zur Messung der einfallenden Sonnenstrahlung ergab in den bisherigen Simulationsrechnungen keine signifikanten Vorteile. Die neue Regelung wurde an einer Versuchsanlage mit einer realen Wärmepumpe und einem über eine PC-Regelung nachgebildeten künstlichen Wärmeverbraucher erfolgreich erprobt: Abb. 3.

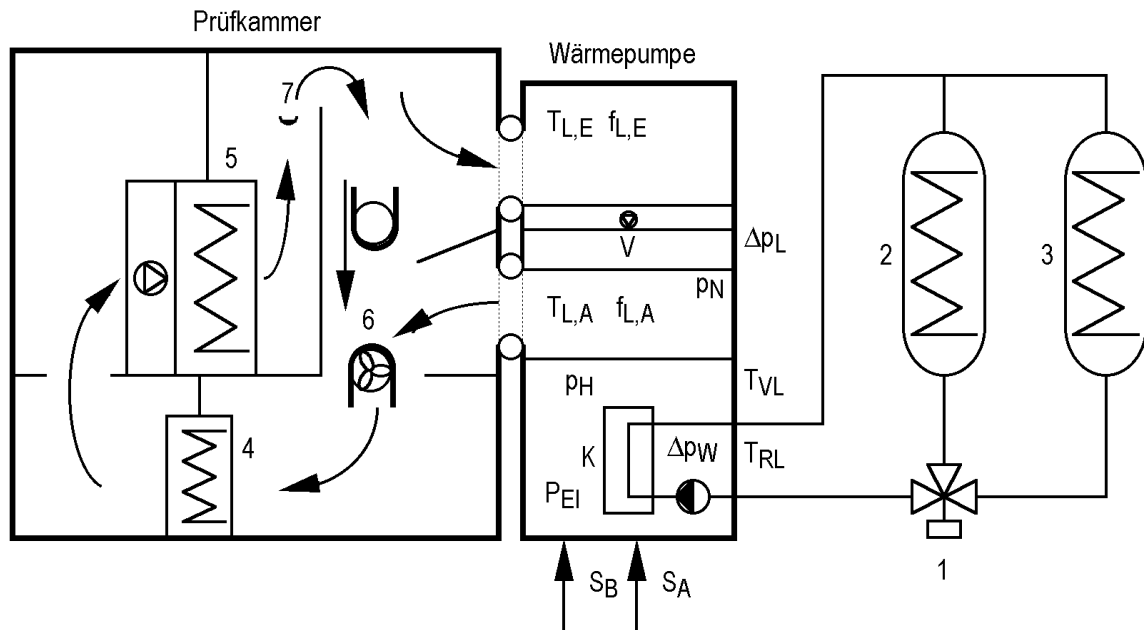


Abb. 3: Versuchsanlage zum Erproben der neuen Wärmepumpenregelung mit emuliertem Wärmeverbraucher. 2: beheizter Behälter, 3: gekühlter Behälter.

Vergleich der Wärmepumpen mit konventionellen Wärmeerzeugungssystemen

Zum wirtschaftlichen und ökologischen Vergleich des Sole/Wasser-Wärmepumpenheizsystems mit Beistellboiler (S/W/4.9/B-B) und des Luft/Wasser- Wärmepumpenheizsystems mit Abluft-Wärmepumpenboiler (L/W/4.6/AWP) für Niedrigenergiehäuser wurde die Raumheizung und die Warmwasserbereitung mit modernen Kesselheizungen verglichen. Für die Ölheizung mit Beistellboiler wurde mit einem Jahresnutzungsgrad von 94% (Oel 16 kW – BB) und für die Gasheizung mit Beistellboiler (Gas – BB) mit einem Jahresnutzungsgrad von 97% gerechnet. Weiter wurde auch eine zentrale Holzheizung mit Zu- und Abluftsystem (Holzofen – WT) und einer Luft/Luft-Wärmepumpe mit Wärmerückgewinnung (L/L-WRG) verglichen. Um die Vergleichbarkeit der Systeme zu ermöglichen, wurden bei den fossilen Heizungen und bei der Sole/Wasser-Wärmepumpe die Kosten für eine Lüftungsanlage hinzuaddiert, beim Abluft-WP-Boiler wurden lediglich die Kosten für die Luftführung extra ausgewiesen,. Bei der Luft/Luft-Wärmepumpe mit WRG sind systembedingt die Kapitalkosten für die Lüftung in der Heizung enthalten. Die Auswertung von Offerten führte auf die im Abb. 4 dargestellten Jahresgesamtkosten (aus Investitions-, Betriebs- und Unterhaltskosten).

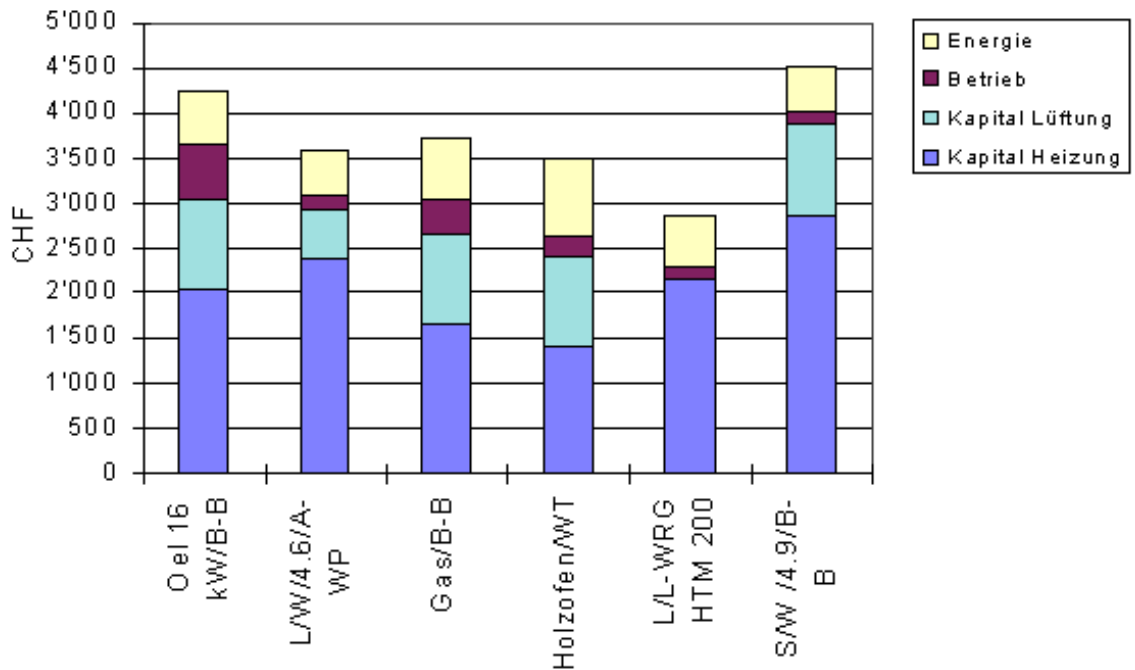


Abb. 4: Vergleich der Jahresgesamtkosten verschiedener Heizsysteme für Niedrigenergiehäuser. Legende im Text.

Das Bild verdeutlicht, dass die Luft/Luft-Wärmepumpe mit Abluftwärmerückgewinnung am kostengünstigsten ist. Diese speziell für Niedrigenergiehäuser geeignete Variante wird deshalb in der Phase 3 noch genauer untersucht. Die Luft/Wasser-Wärmepumpe mit Abluft-Wärmepumpenboiler, der Holzofen und die Gasheizung mit Wohnungslüftung weisen rund 20% höhere Jahreskosten auf und sind ebenfalls noch kostengünstig. Der Ölkessel und die Sole/Wasser-Wärmepumpe in Kombination mit Wohnungslüftung erreichen die höchsten Jahreskosten. Hauptursache dafür sind die Kapitalkosten für die Wohnungslüftung. Liesse man diese weg, würde sich die Rangfolge entsprechend verschieben. Beim Vergleich wurde davon ausgegangen, dass die Zusatzkosten für den Betrieb der Ventilatoren durch Einsparungen bei den Lüftungsverlusten kompensiert werden.

Beim **ökologischen Vergleich der Heizungssysteme** wurde von den folgenden für die Wärmepumpe extrem ungünstigen Annahmen ausgegangen:

1. Der ganze importierte Strom wird in der Schweiz verbraucht (CH-Strommix mit 0% Transitanteil). Ein Transitanteil von Null trifft in der Realität sicher nicht zu. Zudem geht dieser Strommix von **Bezugsrechten** und nicht von tatsächlich aus dem Ausland bezogenen elektrischen Energie aus.
2. Es wird mit 100% Leckage des Kältemittels während der ganzen Lebensdauer gerechnet. Tatsächlich liegt der **Leckageanteil** heute bei etwa **20%** und wird laufend kleiner.

Unter diesen Annahmen ergaben sich folgende Ergebnisse:

- Wärmepumpenheizungen sind gegenüber Ölkesselheizungen oder elektrischen Widerstandsheizungen ökologisch klar überlegen. Wie das [Abb. 5](#) illustriert, ist die Wärmepumpenheizung in Bezug auf den Treibhauseffekt auch besser als die Gaskesselheizung. Der Unterschied zu den Kesselheizungen wird noch wesentlich grösser, wenn vom anderen Grenzfall mit 100% Transit des importierten Stroms ausgegangen wird. Der Treibhauseffekt sinkt dann bei den Wärmepumpen auf etwa die Hälfte der Werte nach [Abb. 5](#).
- Im Rahmen der mit Ökobilanzen erreichbaren Genauigkeiten (Abweichungen von $\pm 20\%$ bei den einzelnen Umwelteffekten sind nicht signifikant) sind Gaskesselheizungen und Wärmepumpen in Bezug auf die Gesamtwirkung der übrigen Umwelteffekte etwa gleichwertig.
- Die Ökobilanz des Gesamtsystems Wärmeerzeuger-Gebäude zeigte, dass die Belastung des Ökosystems durch den Bau der Niedrigenergiehäuser in die gleiche Grössenordnung kommt, wie diejenige der lebenslangen Beheizung. Dies wird im [Abb. 5](#) auch für den Treibhauseffekt bestätigt. Dies deutet darauf hin, dass sich der Aufwand für eine noch weitergehende Einsparung an Heizenergie als bei den SIA2010-Häusern (bzw. Minergiehäusern) nicht mehr von vornherein lohnt. Insbesondere bei Wärmepumpenheizungen kann die höhere Belastung durch den bauseitigen Zusatzaufwand die geringere Belastung durch die Beheizung auch überwiegen!

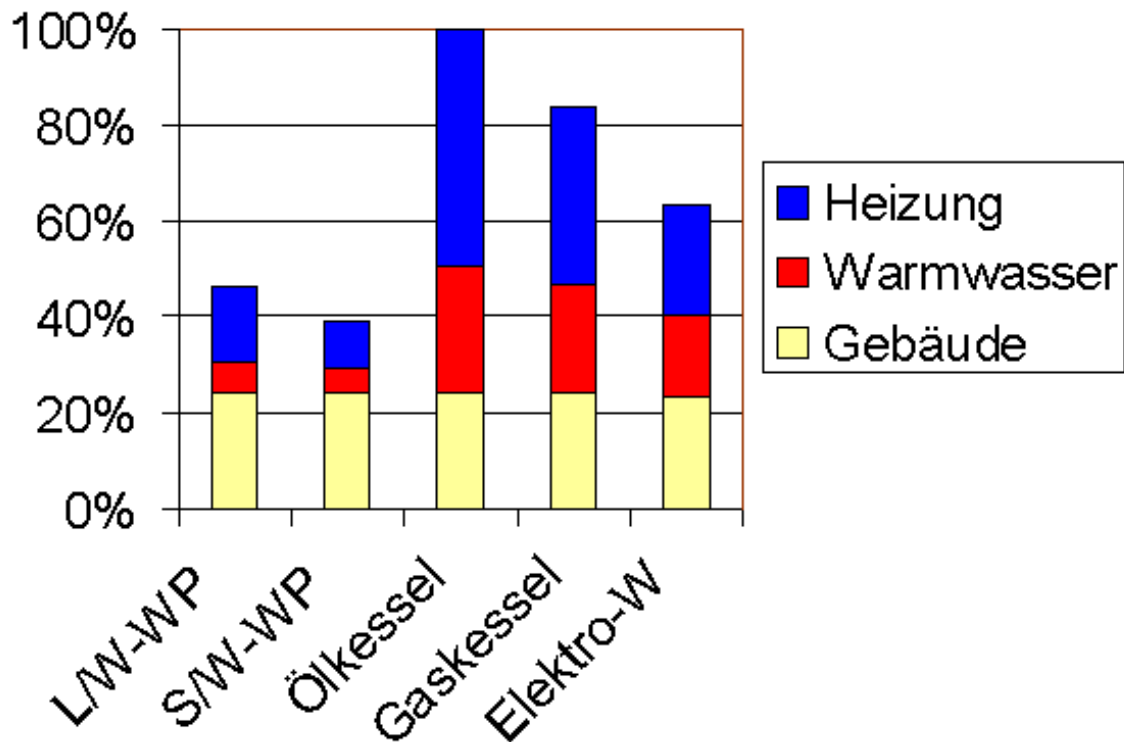


Abb. 5: Vergleich des Treibhauseffekts von Heizung, Warmwasserbereitung und Gebäude ("graue Energie!") für das Gebäude 2010-L und unterschiedliche Wärmeerzeugungssysteme. Berechnung mit dem für die Wärmepumpe ungünstigsten Grenzfall des Schweizerischen Strommixes mit vollständigem Verbrauch des Stromimports in der Schweiz (0% Transitanteil).

Während die bisherigen Versuche noch aufs Labor beschränkt waren, sollen in der Phase 3 drei Funktionsmuster von Wärmepumpen in drei Niedrigenergiehäusern eingebaut und während zweier Heizperioden gemessen werden. Dabei wird auch eine Luft/Luft-Wärmepumpenheizung mit Abluftwärmenutzung untersucht. Das Verhalten der Wärmepumpenheizungssysteme und des Gebäudes wird mit diesen Funktionsmustern im praktischen Betrieb detailliert ausgemessen und mit den Simulationsrechnungen verglichen. In einer dazu parallel gestarteten vierten Phase soll ein Handbuch zur Planung von Wärmepumpenheizungssystemen für Niedrigenergiehäuser ausgearbeitet werden.

Weitere Informationen:

Prof.Dr.M.Zogg, Programmleiter [Forschung UAW](#), Fax +41-(0)34-422 0785, Email martin.zogg@bluewin.ch

Dr. Th. Afjei, Projektleiter [INFEL](#), Fax +41-(0)1-299 4140, Email afjei@infel.ch

Der in **deutscher Sprache** abgefasste **Schlussbericht** zu diesem Projekt

Th.Afjei, W.Betschart, R.Bircher, G.Doka, H.P.Geering,
Th.Giger, S.Ginsburg, A.Glass, A.Huber, E.Shafai,
M.Wetter, D.Wittwer, G.Zweifel:

*Kostengünstige Niedrigtemperaturheizung mit Wärmepumpe,
Phase 2: Ökologischer und ökonomischer Vergleich,
Systemoptimierung, intelligente Regelung, Versuche*

kann unter der ENET-Nummer 9655701 bezogen werden bei

ENET, Administration und Versand, Postfach 130, CH-3000 Bern 16, Schweiz

Tel +41-(0)31-350-0005 Fax +41-(0)31-352-7756, Email n+1@email.ch.