

Effizientere Wärmepumpenheizungen durch Optimieren des Gesamtsystems

Vorschau zur 7. UAW-Tagung des Bundesamtes für Energie (BFE) vom 9. Mai 2000

Martin Zogg

Für effiziente und kostengünstige Wärmepumpenheizungen ist das Gesamtsystem aus Wärmequelle, Wärmepumpe, eventueller Wärmespeicherung, Wärmeverteilung und Gebäude sorgfältig zu optimieren. Die Regelung muss sich von der konventionellen Heizungsregelung mit Energiekennlinien lösen. Zur Betriebsoptimierung, zum Erhalten der hohen Effizienz und zur Minimierung der Wartungskosten sind Wärmepumpen mit einer automatischen Betriebsüberwachung auszurüsten. In der Auslegung sind künftig allfällige Verluste durch Takten der Wärmepumpen zu berücksichtigen. Wärmepumpenheizungen für Niedrigenergiehäuser sind durch Nutzen der thermischen Trägheit von Gebäude und Wärmeverteilungssystem und einer geschickten Regelung möglichst speicherfrei und damit kostengünstig zu bauen. An der 7. UAW-Tagung des Bundesamtes für Energie vom 9. Mai 2000 werden entsprechende Lösungen aus der BFE-Forschung vorgestellt und diskutiert.

Gesamtsystem mit grossem Optimierungspotential

Wärmepumpenheizungen sind ein System aus Komponenten zur Nutzung der Wärmequelle (Umgebungsluft, Erdwärme, Grundwasser, Seewasser), der Wärmepumpe, (oft) einer Wärmespeicherung, einer Wärmeverteilung in die beheizten Räume und dem Gebäude selbst. Diese Teile des Gesamtsystems sind miteinander gekoppelt und müssen deshalb optimal zusammenarbeiten. Nur dann werden die in [1] erörterten hohe Nutzungsgrade von Wärmepumpenheizungssystemen von 150% bis 200% auch tatsächlich erreicht. Die zweifellos wichtige – aber nicht allein entscheidende - Systemkomponente „Wärmepumpe“ wird heute normalerweise einer eingehenden Prüfung im Wärmepumpentestzentrum in Winterthur-Töss unterzogen [2]. Diese Prüfung verbunden mit dem D-A-CH-Gütesiegel [3] sichert eine erfreulich hohe Effizienz der Wärmepumpen.

Dass dies noch nicht unbedingt eine entsprechende Effizienz des gesamten Wärmepumpenheizungssystems bedeutet, illustriert das Bild 1. Im Auftrag des Bundesamtes für Energie wurden in einer breit angelegten Messkampagne rund 130 Wärmepumpenheizungsanlagen unter die Lupe genommen. Darüber wurde an der UAW-Tagung von 1999 eingehend berichtet [4]. Wie man aus dem Bild 1 erkennt, weisen die untersuchten 61 Luft/Wasser-, 53 Sole/Wasser- und 6 Wasser/Wasser-Anlagen Arbeitszahlen von 1.25 bis 5.75 auf. Während bei den Anlagen mit hohen Arbeitszahlen die hohe Effizienz der eingesetzten Wärmepumpe gut genutzt wird, ist dies leider bei zu vielen Anlagen noch nicht der Fall. Die enorme Streuung der Ergebnisse lässt sich durch die unterschiedlichen Wärmepumpenfabrikate keinesfalls

erklären. So brächte etwa bei Luft/Wasser-Wärmepumpen der Ersatz einer „Mittelfeldwärmepumpe“ durch ein Spitzenfabrikat nur eine etwa um 30% höhere Arbeitszahl.

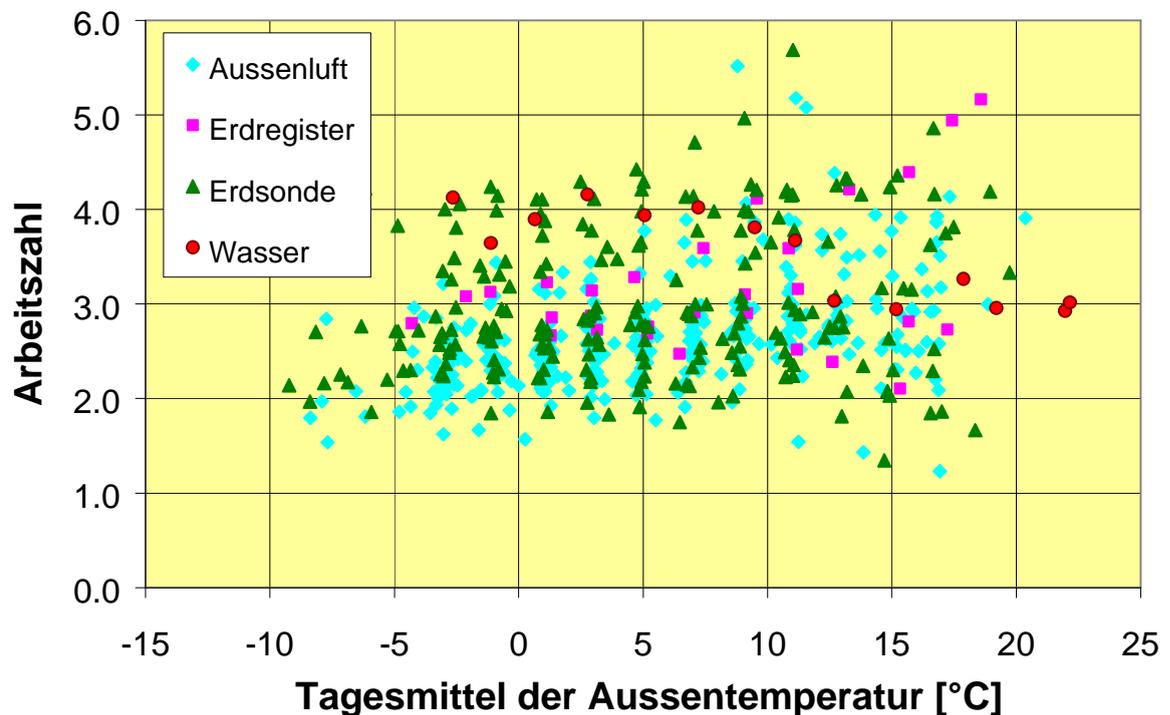


Bild 1: Im BFE-Projekt „Feldanalyse Wärmepumpenanlagen“ an rund 130 Anlagen gemessene Arbeitszahlen in Abhängigkeit der mittleren Tagestemperatur für Wärmepumpenanlagen ohne Warmwasserbereitung für unterschiedliche Wärmequellen (aus [4]).

Als Ursachen für die gegenüber den Bestwerten teilweise bedenklichen Ergebnisse des Gesamtsystems kommen in Frage:

1. Überdimensionierte Hilfsantriebe (Solepumpe, Ventilator) für die Nutzung der Wärmequelle.
2. Schlechte hydraulische Einbindung der Wärmepumpe ins Wärmeverteilsystem.
3. Falsche Auslegung des Wärmeverteilsystems (zu hohe Vor-/Rücklauftemperaturen).
4. Falsches Regelungskonzept mit Energiekennlinie (oder „Heizkurve“).
5. Reduktion der Effizienz (und der Lebensdauer) der Wärmepumpe durch zu häufiges Ein-/Ausschalten.
6. Nicht erkannte Fehlfunktionen/Fehleinstellungen der Komponenten des Wärmepumpenheizungssystems.

Zum Punkt 3 ist das Wissen zum Auslegen guter Anlagen vorhanden – es muss nur korrekt angewandt werden. Den Punkten 1 und 2 wird in folgenden BFE-Projekten

durch detaillierte Computersimulationen von Schaltungen mit gutem Nutzen-/Kostenverhältnis nachgegangen. Ziel dieser geplanten Untersuchungen ist die Empfehlung standardisierter hydraulischer Schaltungen mit einfachen Dimensionierungsrichtlinien. Selbstverständlich werden in diese Arbeiten auch die Erkenntnisse aus dem BFE-Projekt *Feldanalyse Wärmepumpenanlagen* einfließen. Zu den Punkten 4 bis 6 laufen mehrere BFE-Forschungsprojekte, andere wurden bereits abgeschlossen. Über diese wird im Folgenden berichtet.

Es gibt keine sinnvolle Energiekennlinie

Heute werden Wärmepumpen im Allgemeinen mit einer durch die Aussentemperatur geführten Vor- oder Rücklauftemperaturregelung betrieben. Dieses Konzept wurde aus der konventionellen Kesselheizung übernommen. Da bei der Wärmepumpe dem Betrieb mit minimaler Vor-/Rücklauftemperatur aber wesentlich grössere Bedeutung zukommt, eignet es sich aber für die Wärmepumpenheizung noch schlechter als für die konventionelle Kesselheizung. Es vermag denn auch nicht zu erstaunen, dass die Erfahrungen kritischer Fachleute durch die Ergebnisse der *Feldanalyse Wärmepumpenanlagen* [4] bestätigt wurden: Die eingestellten Energiekennlinien verlangen im Allgemeinen nach unnötig hohen Vor-/Rücklauftemperaturen.

Kann hier Abhilfe durch eine automatische Adaption der Energiekennlinie an den Leistungsbedarf des Gebäudes geschaffen werden? Nein - das Konzept der Energiekennlinie mit der willkürlichen Entkoppelung des Heizwärmebedarfs vom Gebäude mit thermischer Trägheit und erheblichem Einfluss der Solarstrahlung ist grundsätzlich falsch!

Das Gesamtsystem Wärmepumpe-Wärmeverteilsystem-Wärmeabgabe-Gebäude wurde in [5] physikalisch modelliert: Bild 2. Das Modell für den Wärmeverbraucher (Wärmeabgabe und Gebäude) enthält 6 physikalische Parameter. Das Wärmepumpenmodell deren 11. Der Seriespeicher im Wärmeverteilsystem wurde mit 6 thermischen Zonen modelliert.

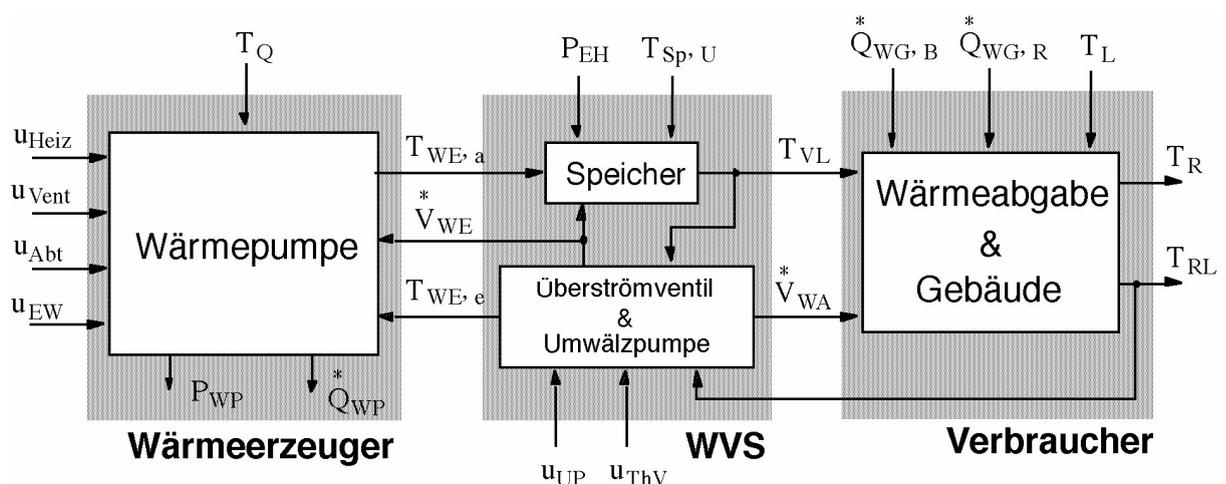


Bild 2: Signalflussbild des Gesamtsystems. WVS: Wärmeverteilsystem (aus [5]).

Die Parameter der Modelle aller Teilsysteme wurden durch Messungen an einem Einfamilienhaus während der Heizsaison 97/98 im normalen Betrieb der Wärmepumpenanlage und anschliessender rechnerischer Auswertung bestimmt. Als

Ergebnis dieser Parameteridentifikation werden im Bild 3 die identifizierten Energiekennlinien für einige Wochen im Winter 97/98 herausgegriffen. Statt einer Energiekennlinie ergeben sich für die einzelnen Wochen Kennlinienscharen. Sie liegen alle unter der bei der Planung erhaltenen Energiekennlinie. Das Bild belegt deutlich, dass die Regelung nach einer Energiekennlinie nicht optimal funktionieren kann.

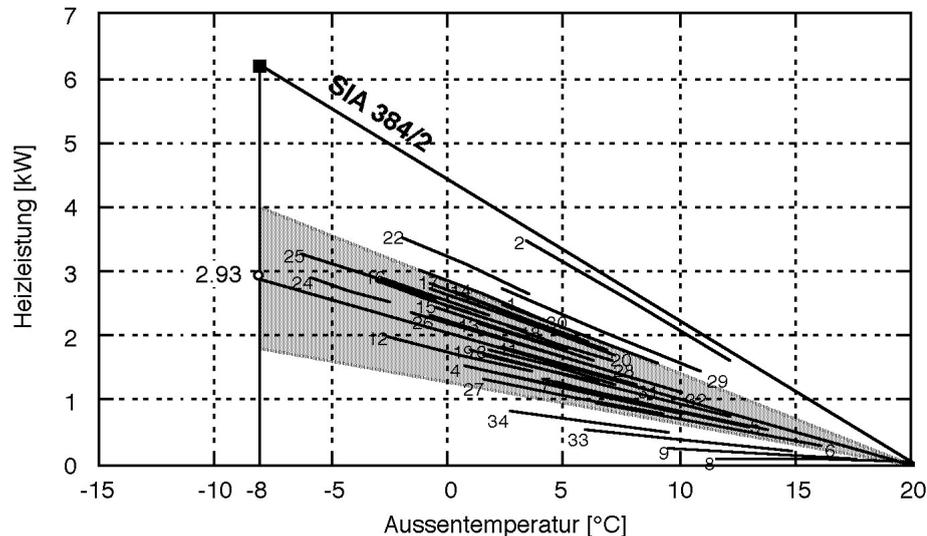


Bild 3: Oben: Energiekennlinie (Tagesheizleistungskennlinie) gemäss der Planung – unten durch Parameteridentifikation im realen Wärmepumpenbetrieb in einem Einfamilienhaus während der Heizperiode 97/98 wochenweise ermittelte tatsächliche Energiekennlinien (aus [5]).

Modellbasiertes Regelungskonzept mit Pulsbreitenmodulation

Ein neues Regelkonzept für Wärmepumpen, die modellbasierte Pulsbreitenmodulation, kann diese Nachteile bei günstigem Preis sowie hoher Montage- und Bedienerfreundlichkeit beseitigen [6]. Bei der neuen Pulsbreitenmodulation ist nicht wie bei konventionellen Wärmepumpenreglern die Vor- oder Rücklauftemperatur Regelgrösse, sondern die für einen längeren Zeitabschnitt (z.B. für 24 h) benötigte Wärmemenge. Diese wird dem Heizungssystem dann durch möglichst lange, unterbrechungsfreie Betriebsperioden der Wärmepumpe optimal zugeführt. Dabei können Sperrzeiten optimal bewirtschaftet und Niedertarifzeiten soweit wie möglich genutzt werden. Die benötigte Wärmemenge wird z.B. aus dem Temperaturverlauf des Vortags mit laufender Korrektur durch die aktuelle Aussentemperatur errechnet.

Das neue Regelungskonzept weist folgende Vorteile auf:

- volle Nutzung der Wärmekapazität des Gebäudes und des Wärmeverteilsystems (möglichst speicherfreier Betrieb),
- minimale Anzahl Ein-/Ausschaltungen: Bild 4,
- keine Thermostatventile im Wohnraum,

- optimale Nutzung der Heizbetriebsunterbrüche für die Warmwasserbereitung,
- Erfassen aller benötigten Messgrößen in der Wärmepumpe (mit Ausnahme der Aussentemperatur, Verzicht auf Raumtemperaturfühler),
- einfacheres Nachjustieren durch den Benutzer durch einen einzigen Knopf mit der Funktion „mehr/weniger warm“.

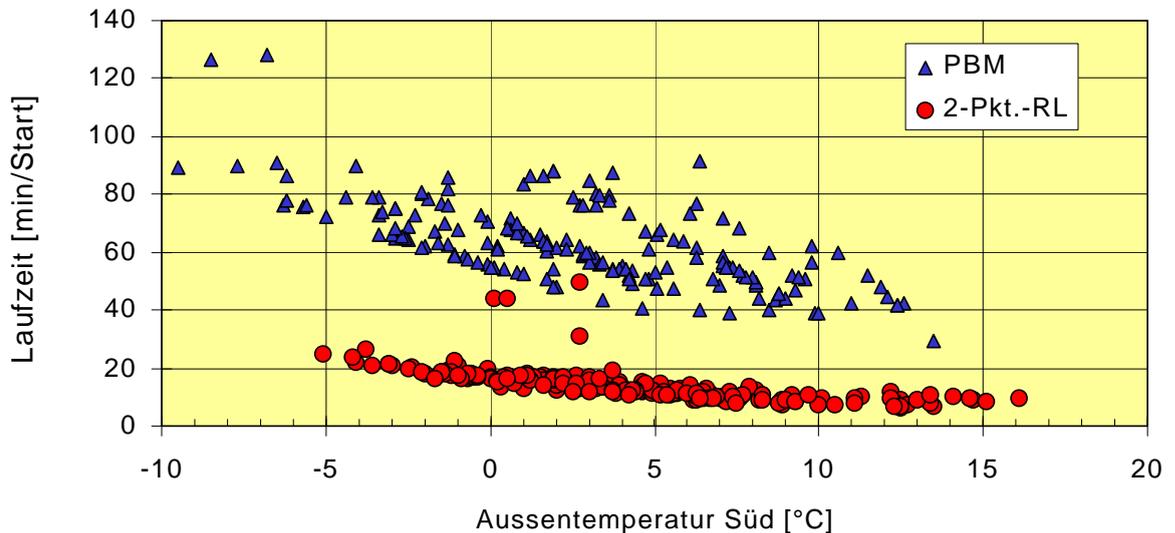


Bild 4: Vergleich der mittleren Wärmepumpenlaufzeit in einem Einfamilienhaus in Abhängigkeit der Aussentemperatur mit Pulsbreitenmodulation (PBM) und mit konventioneller witterungsgeführter Zweipunkt-Rücklauf temperaturregelung. Messperiode Winter 98/99 (aus [6]).

Automatische Betriebsüberwachung

Damit eine modellbasierte Regelung die ursprünglich eingestellten Parameter selbst den tatsächlichen Verhältnissen anpassen kann, müssen die Modellparameter im Betrieb bestimmt werden. Grosse Bedeutung kommt bei komplexeren Heizungssystemen auch dem Erkennen allfälliger Fehlfunktionen und Fehleinstellungen zu. Durch eine gezielte Fehlererkennung kann der optimale Betrieb bei minimalen Wartungskosten sichergestellt werden. Da eine solche Lösung mit möglichst wenig Sensoren auskommen muss, automatisch ablaufen soll und weil für die Betriebsoptimierung nach der Inbetriebnahme einer Wärmepumpe wie auch für die Fehlererkennung nur wenig Zeit bleibt, wird im BFE-Projekt „Kurztestmethode für Wärmepumpenanlagen“ eine Lösung gesucht, die mit Messperioden von einer Woche auskommt. Nach der automatisierten Bestimmung der wesentlichen Parameter des gesamten Wärmepumpenheizungssystems [5] wurden für die Wärmepumpe als wichtigste Systemkomponente Methoden zur detaillierteren Bestimmung der wichtigsten Kenngrößen und zur detaillierten Betriebsüberwachung im Betrieb entwickelt und erprobt [7].

Für den stationären Betrieb einer einstufigen Wärmepumpe mit Sauggasüberhitzer ist es gelungen, aus einer detaillierten physikalischen Modellierung eine iterationsfreie Lösung zur laufenden Bestimmung der relevanten 13 physikalischen Größen im Betrieb zu finden. Es sind dies der Wärmedurchgangskoeffizient im Verdampfer (k_V),

im Kondensator (k_{Kg} für die Heissgasabkühlung, k_{KK} für die Kondensation) und im Sauggasüberhitzer (k_{ZV} für die Restverdampfung, k_{ZU} für die Überhitzung), der Wassermassenstrom auf der Wärmeabgabeseite (M^*_W), der Luftmassenstrom auf der Wärmequellenseite (M^*_L), der Arbeitsmittelmassenstrom durch den Kompressor (M^*_{Kmp}), der Arbeitsmittelstrom durch das Expansionsventil (M^*_E), ein Wert aus dem Polytropenexponenten (n_{exp}) und der Liefergrad (λ) des Verdichters, die Überhitzung nach der Verdampfung ($\Delta T_{Ü}$) und die Ventilöffnung (s_V). Das Bild 1 zeigt die erreichten Identifikationsgenauigkeiten für die einzelnen Grössen anhand der Auswertung einer Messreihe an einer Wärmepumpenanlage in einem Einfamilienhaus.

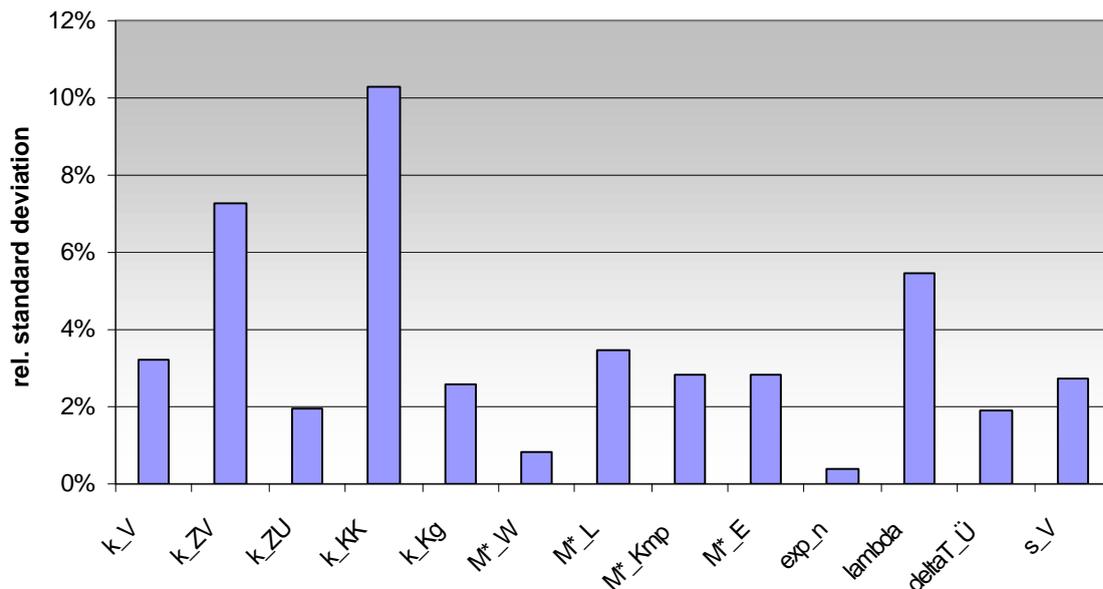


Bild 5: Relative Standardabweichungen der laufenden Parameterbestimmung mit dem detaillierten physikalischen Modell aus Messungen während 24 Stunden an einer Einfamilienhaus-Wärmepumpenanlage im Normalbetrieb. Bedeutung der Symbole im Text (Bild aus [7]).

Für die reine Betriebsüberwachung wurde eine weitere Methode auf der Basis mathematischer Ansätze entwickelt, welche die zusätzlichen Informationen beim instationären Wärmepumpenbetrieb (einige Zeit nach dem Einschalten) nutzt und mit wesentlich weniger Messgrössen auskommt. Diese als *Grey Box Modell* bezeichnete Methode wird für unterschiedliche Wärmepumpentypen, Kälteanlagen und andere thermische Anlagen universell einsetzbar. Die Überwachung einer Anlage erfolgt mit diesem Modell in zwei Schritten: Bild 6. Durch Messungen im Labor oder bei der Inbetriebsetzung einer Anlage wird ein Betriebsmodell vollautomatisch trainiert. Im anschliessenden Betrieb der Anlage werden die Messwerte mit dem trainierten Betriebsmodell verglichen. Bei signifikanten Parameterabweichungen liegt ein Anlagenfehler vor. Alternativ zum experimentellen Betriebsmodelltraining kann dies mit viel geringerem Aufwand auch durch eine validierte Computersimulation der Wärmepumpe erfolgen.

Die eigentliche Fehlererkennung erfolgt nach dem Prinzip einer automatischen Fuzzy-Regelbildung und wird deshalb als *FuzzyWatch* bezeichnet. *FuzzyWatch* wurde bereits an einer Laborwärmepumpe erprobt. Dabei konnten mit nur vier

Temperatursensoren folgende durch manuelle Eingriffe in der Versuchsanlage erzeugten fünf Fehler zuverlässig erkannt werden: Kompressor arbeitet mangelhaft, Expansionsventil arbeitet mangelhaft, Störung im Kältemittelkreislauf (Änderung des Kältemittelinhalts, Verschmutzung) und veränderter Kältemittelkreislauf (Bypass im Kältemitteltank). Der Trainingszeitbedarf betrug pro Fehler etwa eine halbe Stunde.

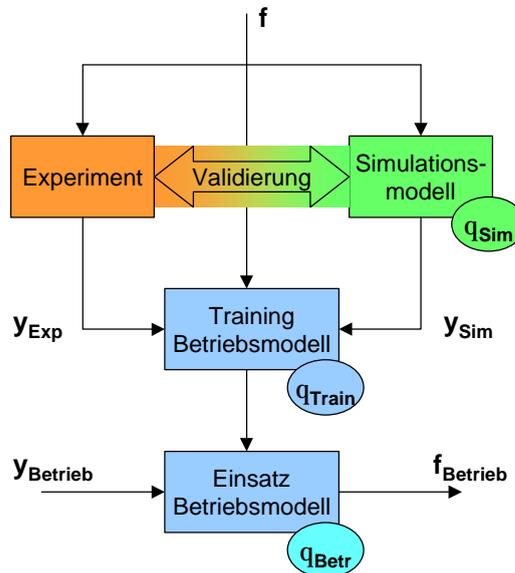


Bild 6: Vorgehen zur Überwachung einer Anlage mit dem Grey Box Modell (Bild aus [7]).

Dynamischer Wärmepumpentest

Der Wärmepumpentest in Töss [2] erfolgt bei stationärem Betrieb der Wärmepumpen. Beim taktendem Betrieb können Anfahrverluste aber zu einer Reduktion der Wärmeleistung und der Effizienz von Wärmepumpen führen: Bild 7. Diese Verluste sollten beim künftigen Wärmepumpentest als weiteres Qualitätsmerkmal mitgemessen werden können. Zum Verständnis der sich beim Ein- und Ausschalten abspielenden Vorgänge wurde zunächst ein detailliertes physikalisches Modell aufgestellt [8]. In weiteren Schritten soll unter Nutzung der Erkenntnisse aus [5 und 7] ein normierter Testzyklus zum einfachen direkten Vergleich von Wärmepumpen in Bezug auf die Anfahrverluste entwickelt werden.

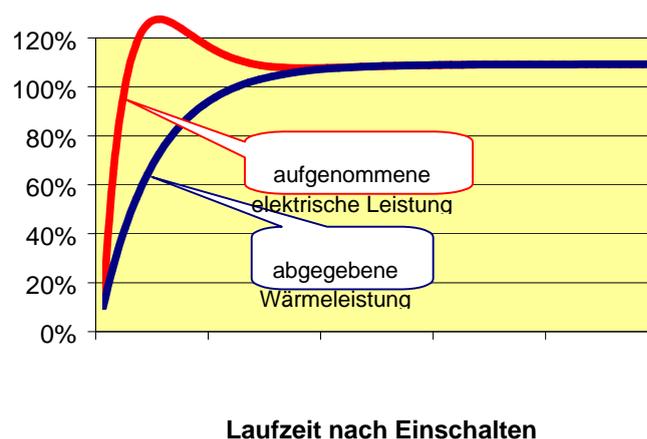


Bild 7: Qualitativer Verlauf der elektrischen Leistungsaufnahme und der abgegebenen Wärmeleistung einer Wärmepumpe.

Wärmepumpenheizungen für Niedrigenergiehäuser

Niedrigenergiehäuser mit Energiekennzahlen unter $160 \text{ MJ/m}^2\text{a}$ 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 auch hier als ganzes System zu behandeln. Im Vordergrund des BFE-Projekts *Kostengünstige Niedrigtemperaturheizung mit Wärmepumpe* [9] steht die Wärmeerzeugung durch Wärmepumpen. Sie wird aber mit konventionellen Systemen verglichen. Das Projekt liefert aufgrund von Computersimulationen, Labor- und Feldversuchen Richtlinien für die Auslegung und optimale Regelung einfacher Wärmepumpenheizungssysteme ohne Wärmespeicher. Als Wärmequellen werden Erdwärme, Umgebungs- und Abluft berücksichtigt. Weiter wird ein ökologischer ([Bild 8](#)) und ökonomischer ([Bild 9](#)) Vergleich zwischen unterschiedlichen Heizsystemen für Niedrigenergiehäuser durchgeführt.

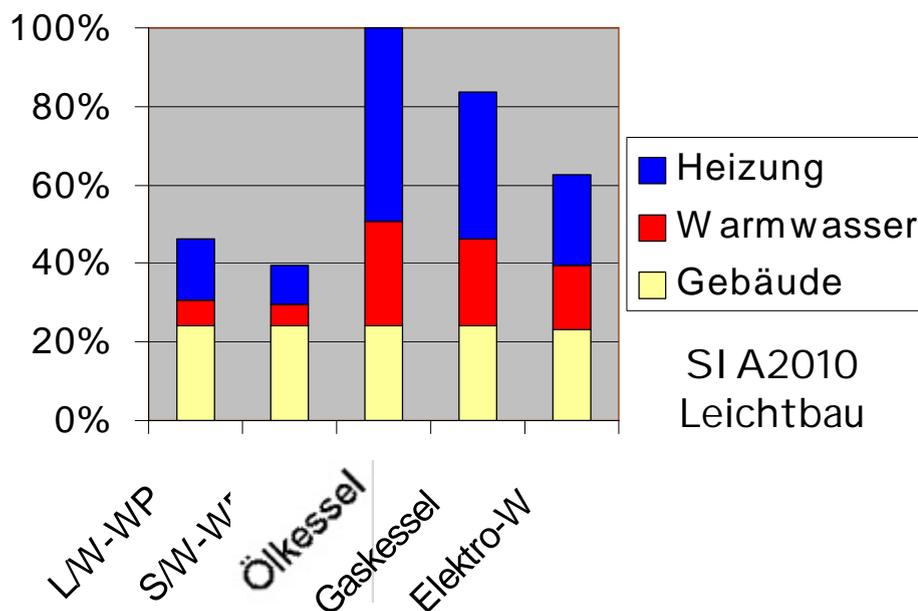


Bild 8: Vergleich des Treibhauseffekts von Heizung, Warmwasserbereitung und Gebäude (graue Energie) für einen Leichtbau und unterschiedliche Wärmeerzeugungssysteme. Berechnung mit dem für die Wärmepumpe ungünstigsten Grenzfall des schweizerischen Strommixes mit vollständigem Verbrauch des Stromimports in der Schweiz (0% Transitanteil).

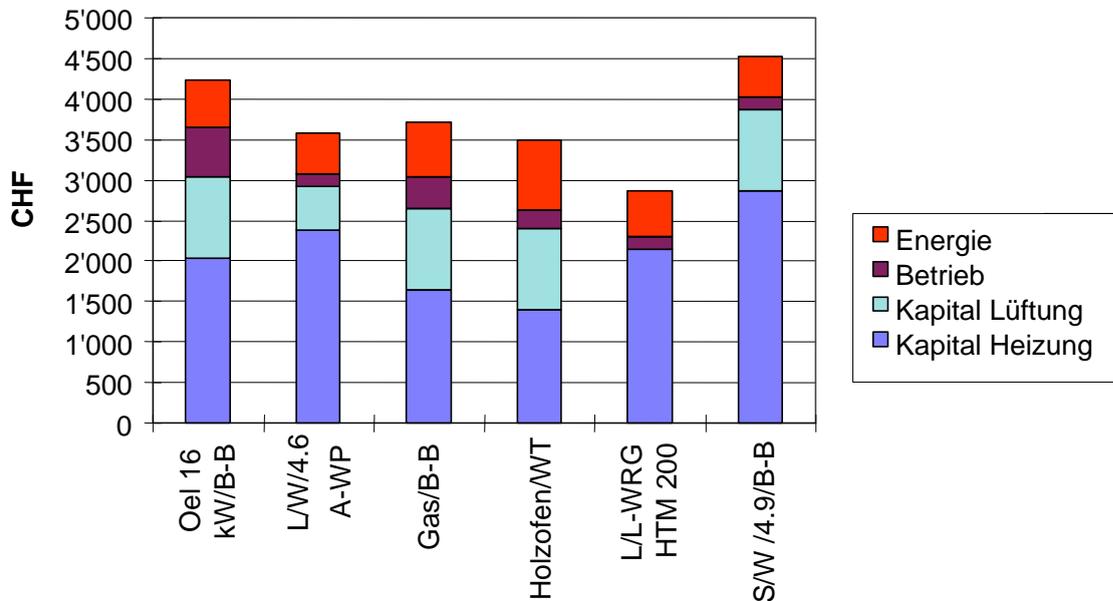


Bild 9: Vergleich der Jahresgesamtkosten verschiedener Heizsysteme für Niedrigenergiehäuser. Legende im Text (aus [9]).

Quellen

- [1] Zogg, M: Maximale Primärenergienutzung und CO₂-Reduktion mit Wärmepumpenheizsystemen, Bundesamt für Energie 1998, ENET-Art.30876; in www.waermepumpe.ch/fe als Download verfügbar.
- [2] Neueste Prüfergebnisse des Wärmepumpentestzentrums Winterthur-Töss können unter <http://www.wpz.ch/> abgerufen werden.
- [3] Anforderungen an das D-A-CH Gütesiegel für Wärmepumpen mit Liste der Wärmepumpenfabrikate mit Gütesiegel in <http://www.fws.ch/technik.htm>
- [4] Rognon, F. (Hrsg.): Wärmepumpen – heute und morgen, Tagungsband zur 6.UAW-Tagung, Bundesamt für Energie 1999, ENET-Artikel 30931.
- [5] G.Reiner, E.Shafai, R.Wimmer, D.Zogg, H.R.Gabathuler, H.Mayer, H.U.Bruderer: Kurztestmethode für Wärmepumpenanlagen, Phasen 1 bis 3: Messung, Modellierung und Erprobung der Parameteridentifikation, Schlussbericht, Bundesamt für Energie, 1998, ENET-Nummer 9657407; Zusammenfassung in www.waermepumpe.ch/fe als Download verfügbar.
- [6] H.R. Gabathuler, H. Mayer, E.Shafai, R.Wimmer : Pulsbreitenmodulation für Kleinwärmepumpenanlagen, Phase I, Bundesamt für Energie 1999, ENET-Nummer 9723972; Zusammenfassung in www.waermepumpe.ch/fe als Download verfügbar.
- [7] D.Zogg, E.Shafai: Kurztestmethode für Wärmepumpenanlagen, Phase 4: Parameteridentifikation und Fehlerdiagnose für das Teilsystem Wärmepumpe, Bundesamt für Energie 1999, ENET-Nummer 9817822; Zusammenfassung in www.waermepumpe.ch/fe als Download verfügbar.

- [8] B.Gubser, L.Wirth, M.Ehrbar: Dynamischer Wärmepumpentest - Modellbildung, Schlussbericht Phase 2, Etappe 2, ENET-Nummer 9720132.
- [9] 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; ENET-Nummer 9655701; *Zusammenfassung in www.waermepumpe.ch/fe als Download verfügbar.*

Effizientere Wärmepumpenheizungen durch Optimieren des Gesamtsystems

7.Tagung des BFE-Forschungsprogramms *Umgebungs- und Abwärme, Wärme-Kraft-Kopplung* am Dienstag, 09.Mai 2000, im Auditorium der HTA Burgdorf.
Vortragsprogramm in www.waermepumpe.ch/fe „Veranstaltungen“. Unterlagen und Anmeldung über 031-350-00-05 oder n+1@email.ch.

Dr. Martin Zogg, Leiter des BFE-Forschungsprogramms Umgebungswärme, Wärme-Kraft-Kopplung, Abwärme, Oberburg martin.zogg@bluewin.ch www.waermepumpe.ch/fe