Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 91 (2000)

Heft: 24

Artikel: Effizientere Wärmepumpenheizungen durch Optimieren des Gesamtsystems

Autor: Zogg, Martin

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-855631

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 14.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Effizientere Wärmepumpenheizungen durch Optimieren des Gesamtsystems

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 Wärmeverteilsystem und einer geschickten Regelung möglichst speicherfrei und damit kostengünstig zu bauen.

■ Martin Zogg

Gesamtsystem mit grossem Optimierungspotenzial

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 hohen 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 einer UAW-Tagung 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.

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.

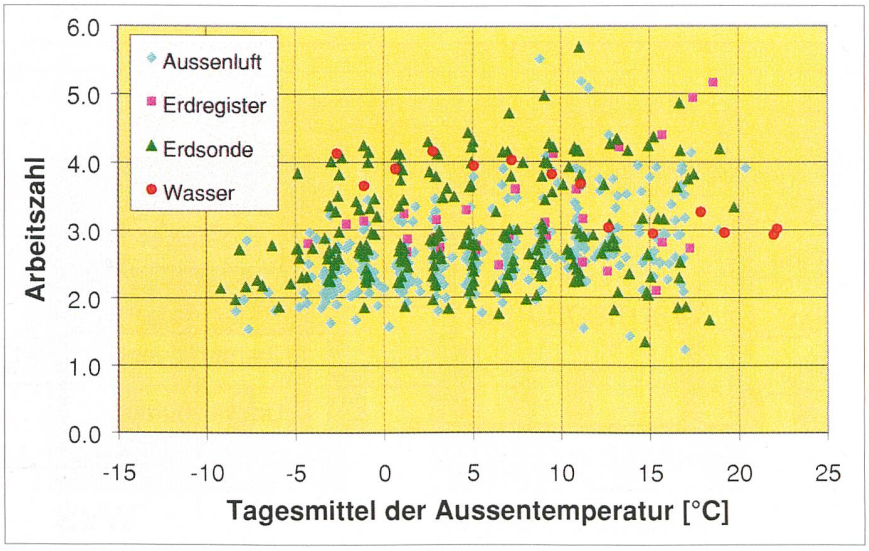

Bild 1 Im BFE-Projekt «Feldanalyse Wärmepumpenanlagen» an rund 130 Anlagen gemessene Arbeitszahlen in Abhängigkeit der mittleren Tagestemperatur für Wärmepumpenanlagen ohne Warmwasserbereitung für unterschiedliche Wärmequellen (aus [4]).

Adresse des Autors
Dr. *Martin Zogg*
Leiter des BFE-Forschungsprogramms Umgebungswärme, Wärme-Kraft-Kopplung, Abwärme
3414 Oberburg
martin.zogg@bluewin.ch
www.waermepumpe.ch/fe

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-Kosten-Verhältnis 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 Rücklauf-Temperaturregelung 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 sechs physikalische Parameter. Das Wärmepumpenmodell deren elf. Der Seriespeicher im Wärmeverteilsystem wurde mit sechs thermischen Zonen modelliert.

Die Parameter der Modelle aller Teilsysteme wurden durch Messungen an einem Einfamilienhaus während der Heizsaison 1997/98 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 1997/98 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.

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, unterbruchsfreie Betriebsperioden der Wärmepumpe optimal zugeführt. Dabei können Sperrzeiten optimal bewirtschaftet und Niedertarifzeiten soweit wie möglich genutzt werden. Die benötigte Wärmemenge wird zum Beispiel 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

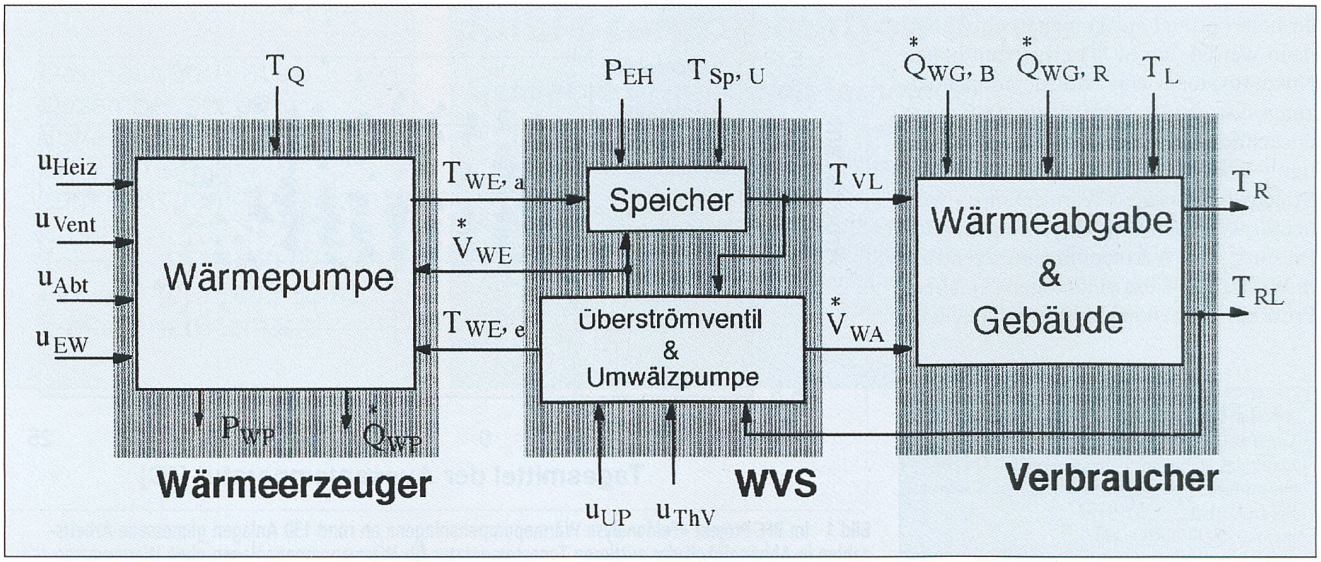

Bild 2 Signalflussbild des Gesamtsystems (WVS: Wärmeverteilsystem [5]).

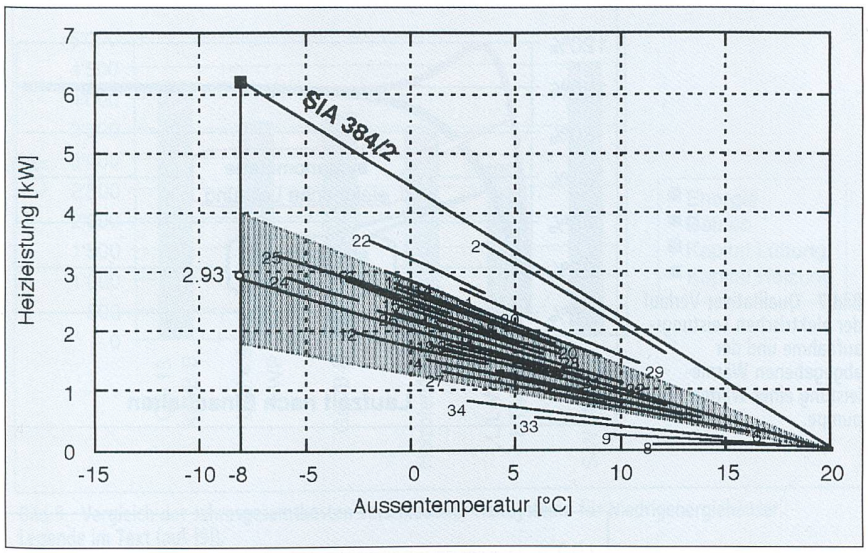

Bild 3 Energiekennlinie (Tagesheizleistungskennlinie) gemäss der Planung (oben) – unten die durch Parameteridentifikation im realen Wärmepumpenbetrieb in einem Einfamilienhaus während der Heizperiode 1997/98 wochenweise ermittelte tatsächliche Energiekennlinien (aus [5]).

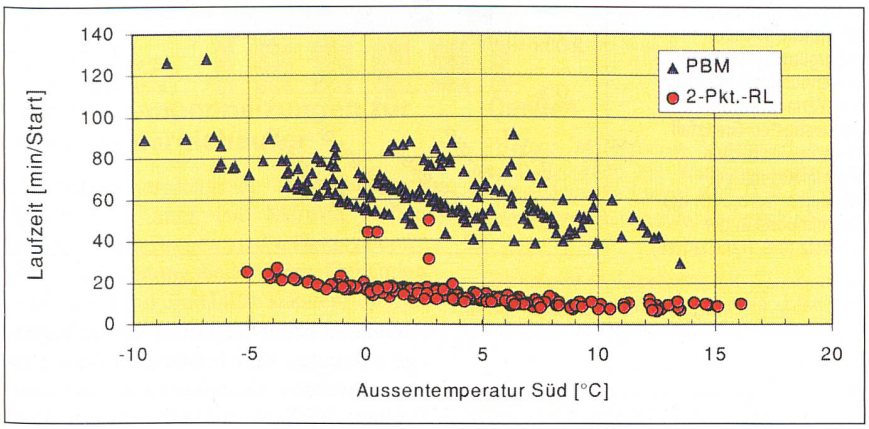

Bild 4 Vergleich der mittleren Wärmepumpenlaufzeit in einem Einfamilienhaus in Abhängigkeit der Aussentemperatur mit Pulsbreitenmodulation (PBM) und mit konventioneller witterungsgeführter Zweipunkt-Rücklauftemperaturregelung (Messperiode Winter 1998/99 [6]).

der Aussentemperatur, Verzicht auf Raumtemperaturfühler),

- einfacheres Nachjustieren durch den Benutzer durch einen einzigen Knopf mit der Funktion «mehr/weniger warm».

Automatische Betriebsüberwachung

Damit eine modellbasierte Regelung die ursprünglich eingestellten Parameter selbst den tatsächlichen Verhältnissen anpassen kann, müssen die Modellparameter in 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 (Lambda) des Verdichters, die Überhitzung nach der Verdampfung (deltaT_Ü) und die Ventilöffnung (s_V). Bild 5 zeigt die erreichten Identifikati-

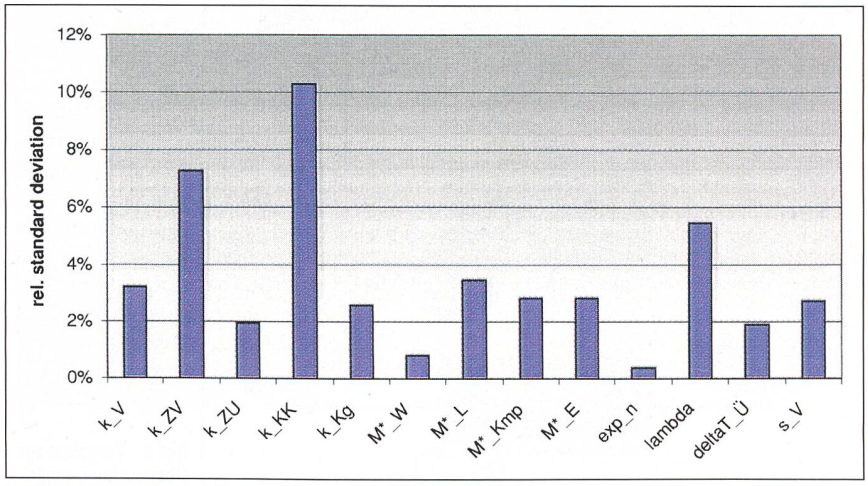

Bild 5 Relative Standardabweichungen der laufenden Parameterbestimmung mit dem detaillierten physikalischen Modell aus Messungen während 24 Stunden an einer Einfamilienhaus-Wärmepumpenanlage im Normalbetrieb. Bedeutung der Symbole im Text (Bild aus [7]).

onsgenauigkeiten für die einzelnen Grössen anhand der Auswertung einer Messreihe an einer Wärmepumpenanlage in einem Einfamilienhaus.

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 je Fehler etwa eine halbe Stunde.

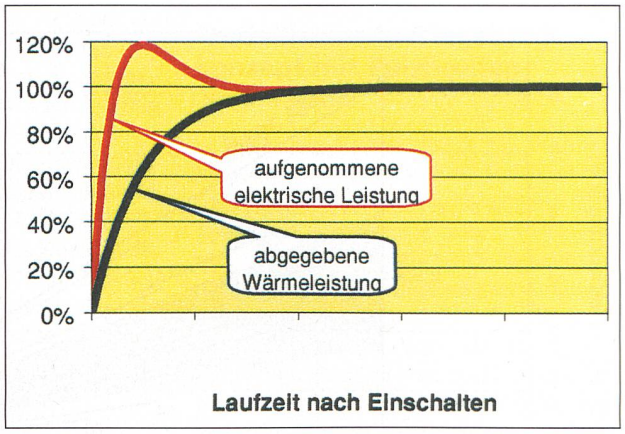

Bild 7 Qualitativer Verlauf der elektrischen Leistungsaufnahme und der abgegebenen Wärmeleistung einer Wärmepumpe.

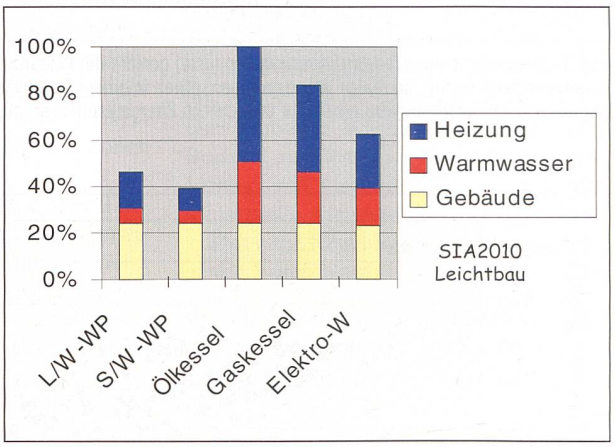

Bild 8 Vergleich des Treibhauseffekts von Heizung, Warmwasserbereitung und Gebäude (graue Energie) für einen Leichtbau und unterschiedliche Wärmeerzeugungssysteme. Berechnung mit dem für die Wärmepumpe ungünstigsten Grenzfall des schweizerischen Strommixes mit vollständigem Verbrauch des Stromimports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

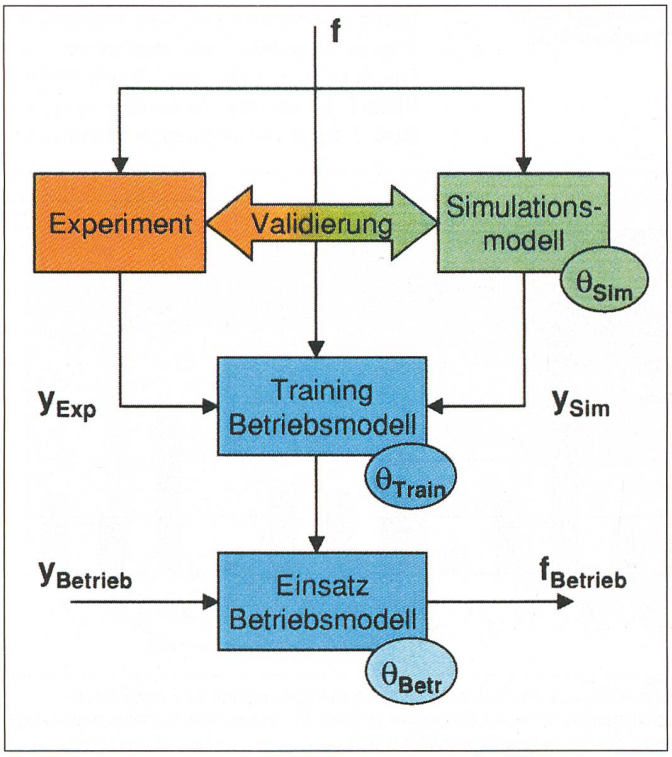

Bild 6 Vorgehen zur Überwachung einer Anlage mit dem Grey Box Modell (Bild aus [7]).

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

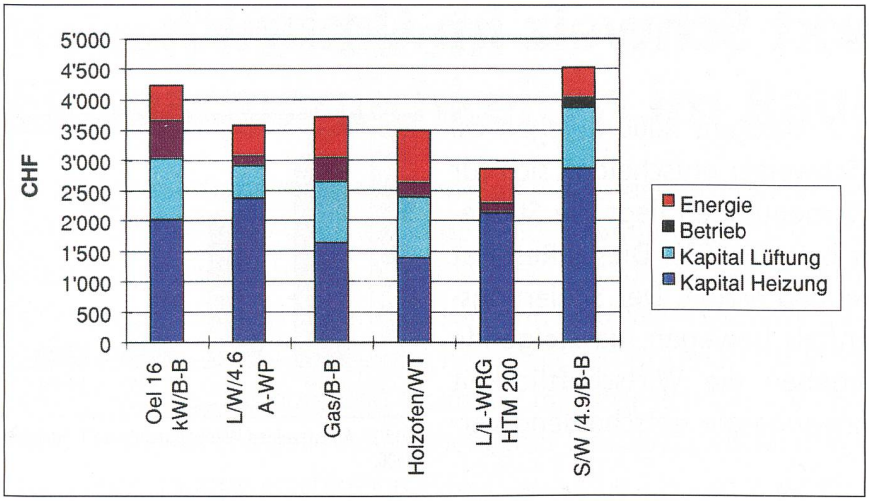

Bild 9 Vergleich der Jahresgesamtkosten verschiedener Heizsysteme für Niedrigenergiehäuser. Legende im Text (aus [9]).

Testzyklus zum einfachen direkten Vergleich von Wärmepumpen in Bezug auf die Anfahrverluste entwickelt werden.

Wärmepumpenheizungen für Niedrigenergiehäuser

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 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 auf Grund 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.

Quellen

[1] *Zogg, M.;* Maximale Primärenergienutzung und CO_2-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.* (Herausgeber): Wärmepumpen – heute und morgen, Tagungsband zur 6. UAW-Tagung, Bundesamt für Energie 1999, ENET-Artikel 30931.

[5] *Reiner, G., Shafai, E., Wimmer, R., Zogg, D., Gabathuler, H.R., Mayer, H., Bruderer, H.U.:* 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] *Gabathuler, H.R., Mayer, H., Shafai, E., Wimmer, R.:* Pulsbreitenmodulation für Kleinwärmepumpenanlagen, Phase I, Bundesamt für Energie 1999, ENET-Nummer 9723972; Zusammenfassung in www.waermepumpe.ch/fe, als Download verfügbar.

[7] *Zogg, D., Shafai E.:* 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] *Gubser, B., Wirth, L., Ehrbar M.:* Dynamischer Wärmepumpentest – Modellbildung, Schlussbericht Phase 2, Etappe 2, ENET-Nummer 9720132.

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

Amélioration des chauffages à pompes à chaleur par l'optimisation globale

Des chauffages à pompes à chaleur efficaces et avantageux impliquent une optimisation soigneuse du système global, à savoir de la source de chaleur, de la pompe à chaleur, d'une éventuelle accumulation de chaleur ainsi que de la répartition de chaleur et du bâtiment. La régulation doit s'écarter de la régulation de chauffage conventionnelle et de ses caractéristiques énergétiques. Afin d'optimiser l'exploitation, maintenir une efficacité élevée et minimiser les frais d'entretien, les pompes à chaleur doivent être équipées d'un système de contrôle automatique de l'exploitation. Pour la conception, il faudra à l'avenir prendre en considération d'éventuelles pertes dues au fonctionnement périodique des pompes à chaleur. Des chauffages à pompes à chaleur sans accumulation ou presque et de ce fait, avantageux pour les maisons à faible consommation d'énergie doivent être réalisés en utilisant l'inertie thermique des bâtiments et systèmes de répartition de la chaleur et une régulation «futée».