

**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:** 10

**Artikel:** Kurztestmethode für Wärmepumpenanlagen

**Autor:** Zogg, Martin

**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-855553>

### **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:** 15.04.2026

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

# Kurztestmethode für Wärmepumpenanlagen

## Parameteridentifikation und Fehlerdiagnose für das Teilsystem Wärmepumpe

Im Rahmen der Betriebsüberwachung einschliesslich der Inbetriebnahme, der Abnahme und der Betriebsoptimierung von Heizungsanlagen mit Wärmepumpen ist das Erfassen des richtigen Funktionierens der Wärmepumpe ein zentrales Anliegen. In der Phase 4 des BFE-Projekts Kurztestmethode für Wärmepumpenanlagen wurden deshalb Methoden zum Erkennen allfälliger Fehlfunktionen der Wärmepumpe erarbeitet. Diese beruhen auf detaillierten physikalischen Modellen oder einfachen mathematischen Modellansätzen. Die damit aus Messungen gefundenen Parameter werden mit jenen einwandfrei arbeitender Maschinen verglichen. Aus allfälligen Abweichungen werden die entsprechenden Fehlfunktionen über eine Fuzzy-Logik angezeigt. Das neue Betriebsüberwachungssystem wird deshalb als «FuzzyWatch» bezeichnet (Bild 1).

### Physikalisches Modell

Die **detaillierte (nichtlineare) physikalische Modellierung** einer einstufigen Wärmepumpe mit Sauggasüberhitzer führte auf ein komplexes Differenzialgleichungssystem. Dieses konnte durch geschickte Zusammenfassungen

von Grössen für den stationären und den instationären Betrieb wesentlich vereinfacht werden. Für den stationären Betrieb erhält man damit ein algebraisches Gleichungssystem zur laufenden Bestimmung der relevanten 13 physikalischen Grössen einer Wärmepumpe im Betrieb aus 10 Messgrössen. Es sind dies der

Wärmedurchgangskoeffizient im Verdampfer ( $k_V$ ), im Kondensator ( $k_{KK}$  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 den Liefergrad ( $\lambda$ ) des Verdichters, die Überhitzung nach der Verdampfung ( $\Delta T_{\dot{U}}$ ) und die Ventilöffnung ( $s_V$ ). Bild 2 zeigt die erreichten Identifikationsgenauigkeiten für die einzelnen Grössen anhand der Auswertung einer Messreihe an einer Wärmepumpenanlage in einem Einfamilienhaus.

In einem technischen Überwachungssystem eingesetzt, bedingt diese Methode zunächst eine Interpretation der 13 Parameter durch den Inbetriebsetzer oder den Servicemonteur. Eine erste Realisierung erfolgt in einem Gerät zur Überwachung von Wärmepumpen und Kälteanlagen. Später soll die Implementierung in eine Wärmepumpensteuerung erfolgen.

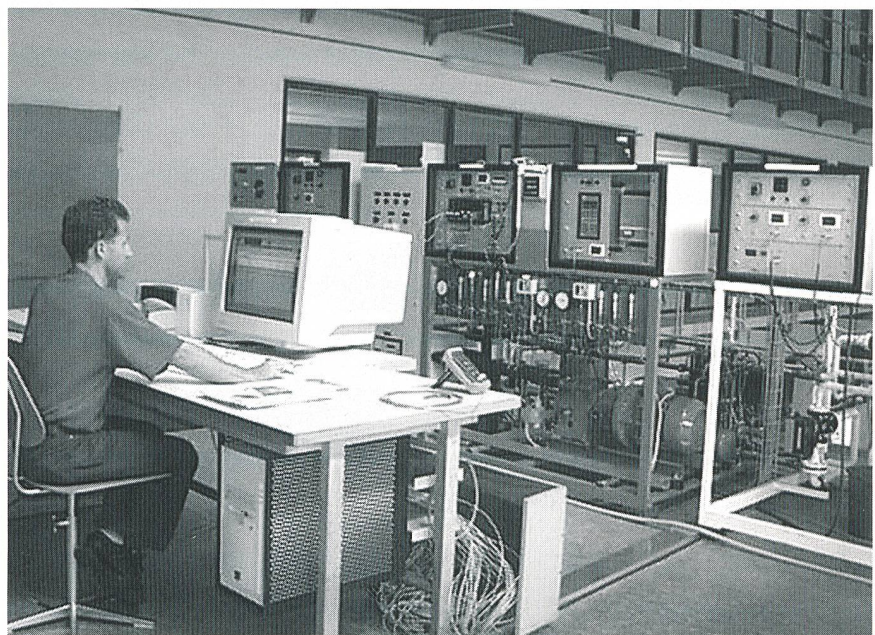


Bild 1 Versuchswärmepumpe an der Zürcher Hochschule Winterthur zur Erprobung von FuzzyWatch (Bild aus Schlussbericht).

Forschungsprojekt im Forschungsprogramm  
«Umgebungs- und Abwärme, Wärme-Kraft-  
Kopplung (UAW)»  
des Bundesamts für Energie (BFE).

Adresse des Autors  
Prof. Dr. Martin Zogg  
BFE-Forschungsprogrammleiter UAW  
Kirchstutz 3  
3414 Oberburg

[martin.zogg@bluewin.ch](mailto:martin.zogg@bluewin.ch)  
[www.waermepumpe.ch/fe](http://www.waermepumpe.ch/fe)

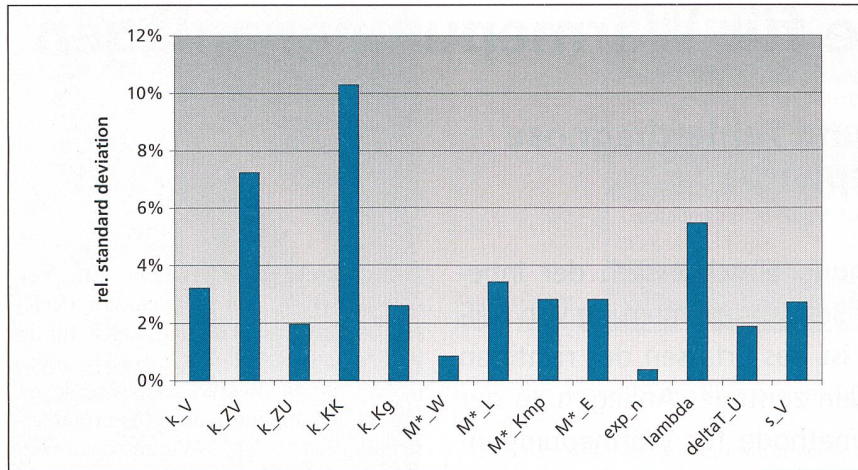


Bild 2 Relative Standardabweichungen der laufenden Parameterbestimmung mit dem detaillierten physikalischen Modell aus Messungen während 24 Stunden an einer Einfamilienhaus-Wärmepumpenanlage. Bedeutung der Symbole im Text (Bild aus Schlussbericht).

Für die Nutzung der Informationen beim instationären Betrieb einer Wärmepumpe (Abtauen, Stillstand nach dem Ausschalten, Wiederanfahren) erwies sich das detaillierte physikalische Modell als zu komplex. Es wurde deshalb eine vereinfachte physikalische Modellierung durchgeführt. Diese erlaubt mit modernen mathematischen Methoden die iterationsfreie Identifikation der Modellparameter auch bei instationärem Betrieb.

## Grey-Box-Modell

Einfache mathematische Modellansätze («Black-Box-Modelle») mit möglichst einfachen Zusammenhängen zwischen den Eingangs- und Ausgangssi-

gnalen führen zu einem minimalen Identifikationsaufwand. Die damit ermittelten Parameter haben aber keine physikalische Bedeutung mehr. Deshalb wurde in einem weiteren Schritt nach einem Kompromiss («Grey Box») zwischen physikalischer Modellbildung («White Box») mit physikalischer Bedeutung der identifizierten Parameter und einfachen mathematischen Ansätzen (leichte Identifizierbarkeit der Parameter) gesucht. Es wurde ein bezüglich Sensorkonfiguration sehr flexibles Grey-Box-Modell mit paralleler Struktur für die einzelnen Ein- und Ausgangssignale gefunden und mit Messungen an einer Laborwärmepumpe erprobt. Für die einzelnen ungefilterten Messsignale werden die Modellparameter mit je vier mathemati-

schon Ansätzen identifiziert und mit den gemessenen Signalen verglichen. Die Ansätze mit der besten Übereinstimmung zwischen Messung und Rechnung werden gewählt. Dieses als Betriebsmodelltraining bezeichnete Prozedere wurde vollständig automatisiert. Das Grey-Box-Modell wird dadurch für unterschiedliche Wärmepumpentypen, Kälteanlagen und andere thermische Anlagen universell einsetzbar. Ein grosser Vorteil dieses Modells ist auch, dass zur Betriebsüberwachung und Fehlererkennung wesentlich weniger Sensoren als beim physikalischen Modell benötigt werden und dass die einzelnen Messsignale ungefiltert verwendet werden können.

Die Überwachung einer Anlage erfolgt mit diesem Modell in zwei Schritten (Bild 3). 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 ausgewertet. Bei signifikanten Parameterabweichungen liegt ein Anlagenfehler vor. Alternativ zum experimentellen Betriebsmodelltraining kann dieses mit geringerem Aufwand auch durch eine validierte Computersimulation der Wärmepumpe erfolgen.

## Fehlerklassifizierung – FuzzyWatch

Die Zuordnung zwischen Parameterabweichungen vom Normalbetrieb zu bestimmten Fehlern an der Anlage – die so genannte Fehlerklassifizierung – erfolgt nach dem Prinzip der Fuzzy-Logik (Bild 4). Das Expertenwissen wird im Überwachungssystem in der Form von Fuzzy-Regeln gespeichert. Diese Regeln können zum Beispiel anhand eines Fehlerbaums manuell eingegeben werden. Dies käme insbesondere bei Verwendung des eingangs beschriebenen detaillierten physikalischen Modells in Frage.

Die Anlagenüberwachung im Betrieb soll aber mit möglichst wenigen Temperatur- und nötigenfalls Drucksensoren auskommen. Hierzu ist das Grey-Box-Modell mit paralleler Struktur besonders geeignet. Das Überwachungssystem kann dabei die Fuzzy-Regeln in der Trainingsphase selbst lernen. Diese können bei Bedarf manuell ergänzt werden. Es besteht auch eine Erweiterungsmöglichkeit durch die Darstellung des Fuzzy-Systems als neuronales Netz. Das Überwachungssystem würde damit auch während dem Betrieb einer Anlage lernfähig.

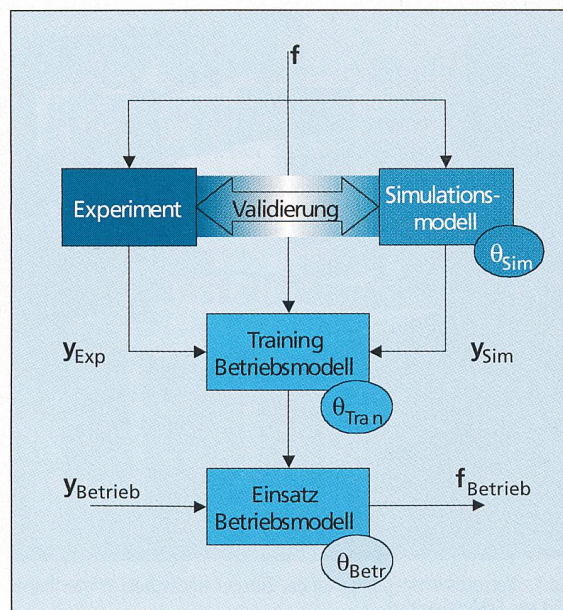


Bild 3 Vorgehen zur Überwachung einer Anlage mit dem Grey-Box-Modell (Bild aus Schlussbericht).

## Experimentelle Untersuchungen

FuzzyWatch, die neue Betriebsüberwachung mit dem automatischen Betriebsmodelltraining nach dem Grey-Box-Modell mit paralleler Struktur und der automatischen Fuzzy-Regelbildung, wurde an einer Wärmepumpe in einem Laborprüfstand erprobt (Bild 1). 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 Kältemittelkreislauf (Bypass im Kältemittelkreislauf)). Der Trainingszeitbedarf betrug pro Fehler etwa eine halbe Stunde.

Die experimentellen und theoretischen Untersuchungen werden zur zuverlässigen Erkennung weiterer Wärmepumpenstörungen mit minimalem messtechnischem Aufwand weiterverfolgt.

Der ausführliche Schlussbericht zu diesem BFE-Forschungsprojekt

D. Zogg, E. Shafai: Kurztestmethode für Wärmepumpenanlagen, Phase 4: Parameteridentifikation und Fehlerdiagnose für das Teilsystem Wärmepumpe, Bundesamt für Energie 1999,

kann unter der ENET-Nummer 9817822 bezogen werden bei

ENET, Administration und Versand  
Postfach 130, 3000 Bern 16  
Telefon (\*41) 31 350 00 05  
n+1@email.ch  
Telefax (\*41) 31 352 77 56

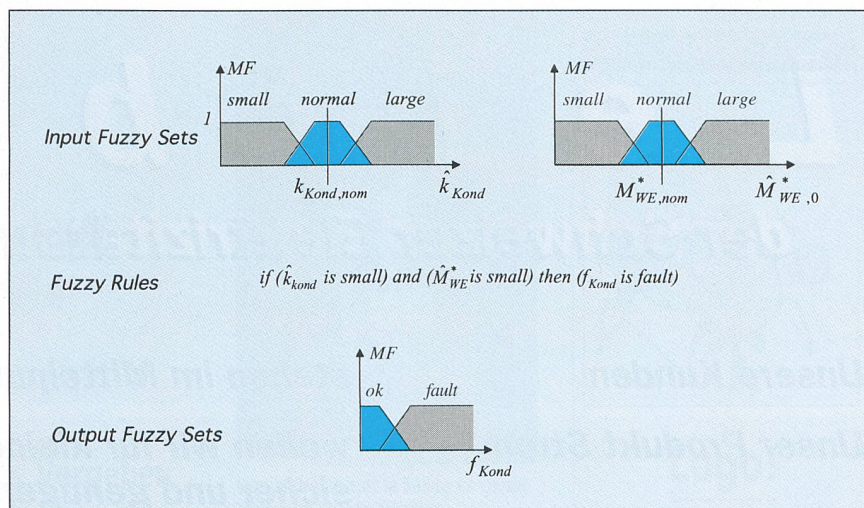


Bild 4 Fehlerklassifikation mit Fuzzy-Logik für das Beispiel einer Verschmutzung des Kondensators. Oben: Bereichsangaben (Input Fuzzy Set) für den Wärmedurchgangskoeffizienten ( $k_{Kond}$ ) und den Wassermassenstrom durch den Kondensator ( $M_{WE}^*$ ). Mitte: Fuzzy-Regel: Bei zu kleinem Wärmedurchgangskoeffizienten und zu kleinem Wassermassenstrom durch den Kondensator ist der Kondensator verschmutzt. Unten: Ausgabe des Fehlers; MF: Membership Function (Bild aus Schlussbericht).

## Méthode du test rapide pour installations de pompes à chaleur

### Identification de paramètres et diagnostic des erreurs pour les systèmes de pompe à chaleur

Le relevé du fonctionnement correct de la pompe à chaleur constitue un des objectifs centraux du contrôle de l'exploitation y compris mise en service, vérification et optimisation de l'exploitation d'installations de chauffage équipées de pompes à chaleur. La 4<sup>e</sup> phase du projet de l'OFEN cité ci-dessus a été consacrée à l'élaboration de méthodes visant à déceler d'éventuelles dysfonctions de pompes à chaleur. Ces méthodes se basent sur des modèles physiques détaillés ou de simples esquisses de modèles mathématiques. Les paramètres tirés des mesures sont comparés à ceux de machines fonctionnant sans problèmes. Les dysfonctions dérivant d'éventuels écarts sont mises en évidence par l'intermédiaire d'une logique «fuzzy». C'est la raison pour laquelle le nouveau système de contrôle est nommé «fuzzywatch».

# **L e i t b i l d**

## **der Schweizer Elektrizitätsunternehmen**

<b>Unsere Kunden</b>	<b>stehen im Mittelpunkt unseres Handelns.</b>
<b>Unser Produkt Strom</b>	<b>wollen wir für kleine und grosse Kunden sicher und genügend, kostengünstig und umweltgerecht beschaffen und verteilen.</b>
<b>Unsere Mitarbeiter</b>	<b>wollen im Dialog mit den Kunden deren Wünsche und Bedürfnisse ergründen und ernst nehmen.</b>
<b>Unsere Dienstleistungen</b>	<b>wollen wir auf die individuellen Bedürfnisse unserer Kunden ausrichten.</b>
<b>Unsere Leistungsfähigkeit</b>	<b>wollen wir täglich neu und flexibel unter Beweis stellen.</b>
<b>Unsere Unternehmen</b>	<b>wollen wichtige Aufgaben im Dialog miteinander lösen.</b>
<b>Unsere Energiezukunft</b>	<b>wollen wir im Dialog mit Kunden, Behörden und Politikern mitgestalten und so unseren Handlungsspielraum erweitern.</b>
<b>Als Branche</b>	<b>wollen wir unsere Anliegen in der Öffentlichkeit einmütig vertreten.</b>

### **Wir leisten damit einen Beitrag an die Schweiz von morgen**

- zur Sicherung des Wirtschaftsstandorts Schweiz
- zur Schonung der Umwelt
- zur Erhaltung der Lebensqualität der Bevölkerung

