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: 89 (1998)

Heft: 24

Artikel: Regelung einer Wärmepumpe mit Fuzzy Control

Autor: Ginsburg, Simon / Geering, Hans P.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-902148

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: 04.07.2025

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

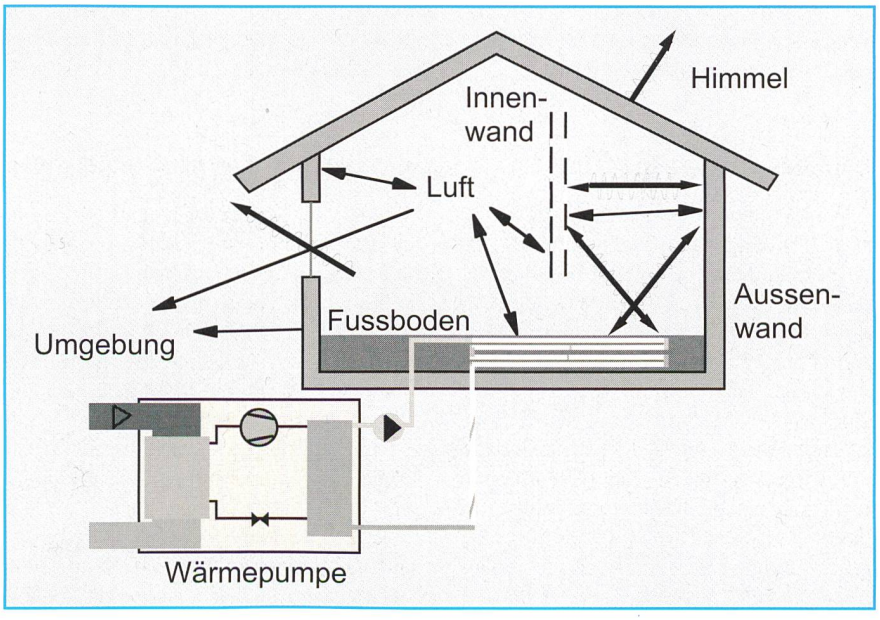
In der Schweiz wird ein grosser Teil des Gesamtenergiebedarfs für die Raumheizung aufgewendet. Die Wärmepumpentechnologie trägt einen wichtigen Beitrag zum Energiesparen bei. Sie kann dies aber nur, wenn die Anlagen gut geregelt sind. Die Wärmepumpe soll immer nur soviel Wärme bereitstellen, wie effektiv benötigt wird. In diesem Artikel wird ein Regelungskonzept beschrieben, das mit einer Kurzzeitwetterprognose den zukünftigen Energiebedarf vorausberechnet und so eine Wärmeüberproduktion vermeidet. Die Reglerstruktur besteht aus mehreren Teilstrukturen. Mit modellbasierten Ansätzen werden Teile entworfen, die sich durch mathematische Gleichungen einfach formulieren lassen. Für schlecht oder nicht durch mathematische Gleichungen beschreibbare Teile werden Fuzzyregler entworfen. Da eine ausführliche Beschreibung der Funktionsweise der einzelnen Reglerteile den Rahmen dieses Artikels sprengen würde, beschränkt sich dieser Artikel auf die Vorstellung des Grobkonzeptes. Die Arbeiten wurden durch Fördermittel des Projekt- und Studienfonds der Elektrizitätswirtschaft (PSEL) unterstützt.

Regelung einer Wärmepumpe mit Fuzzy Control

■ Simon Ginsburg und Hans P. Geering

Ausgangslage

In heutigen Wärmepumpenreglern werden fast ausschliesslich Zweipunktregler (mit Hysterese) eingesetzt, die die Rücklauftemperatur des Heizwassers mit einer von der Aussentemperatur abhängigen Referenztemperatur vergleichen. Ausgehend von dieser Struktur wird die Referenztemperatur noch mit weiteren Differenztemperaturen überlagert, womit



Diese Arbeiten wurden als Projekt Nummer 35 durch Fördermittel des Projekt- und Studienfonds der Elektrizitätswirtschaft (PSEL) unterstützt.

Adresse der Autoren

Simon Ginsburg
Prof. Dr. *Hans P. Geering*
Institut für Mess- und Regeltechnik
ETH Zentrum
8092 Zürich

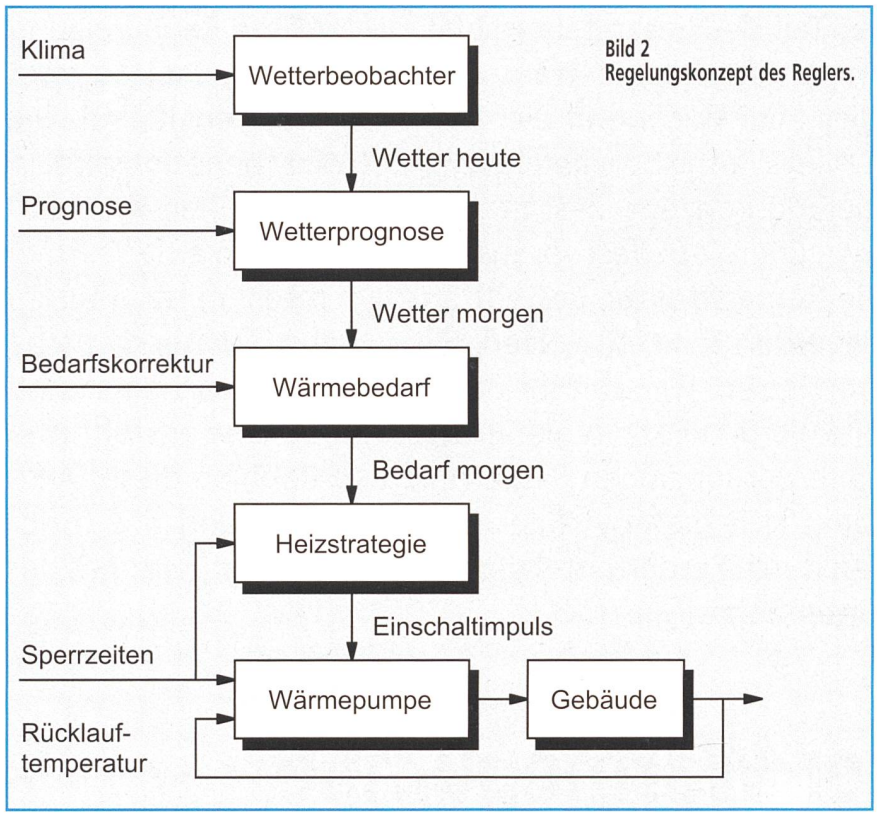


Bild 2
Regelungskonzept des Reglers.

zusätzliche Einflüsse kompensiert werden. Ein Zweipunktregler bleibt aber primär ein statischer Regler, der jeweils auf den Zeitpunkt wartet, in dem ein Zielwert einen Schwellwert über- oder unterschreitet. Nur auf Umwegen und durch Anwendung von Kniffen können dynamische Effekte berücksichtigt werden. Um die thermodynamischen Zusammenhänge einer Wärmepumpenheizung richtig im Regler abbilden zu können, müssen bereits bei der Wahl der Reglerstruktur dynamische Komponenten miteinbezogen werden. Damit betritt man jedoch im Bereich der Wärmepumpenregelung Neuland, so dass ein grösserer Entwicklungsaufwand erforderlich wird.

Wahl des Gebäudemodells

Wenn für die Reglerauslegung von Modellbildung gesprochen wird, so meint man damit fast ausschliesslich dynamische Modelle. Bei der Wahl des Detaillierungsgrades wird man ein Modell immer nur gerade so detailliert aufbauen, wie es die Regelungsaufgabe erfordert. Eine stärkere Detaillierung wird einen grösseren Aufwand des Entwurfes ohne Verbesserung der Reglerfähigkeiten nach sich ziehen. Deshalb scheinen für einen Reglerentwurf aufgestellte Modelle für den Laien in der Regel etwas grob zu sein.

Das Gebäudemodell soll in erster Linie die verschiedenen Energieströme im Gebäude nachvollziehen. Das Gebäude wird in wenige Elemente aufgeteilt und die Energieströme zwischen den Elementen aufgeschlüsselt. In Bild 1 sind die wichtigsten Zusammenhänge am Beispiel eines Einfamilienhauses, das mit Luft-Wasser-Wärmepumpe über Fussbodenschlangen beheizt ist, dargestellt.

Aus der Quantifizierung der Zusammenhänge lassen sich physikalische Differentialgleichungen ableiten. Aus diesen lassen sich wiederum neben den stationären Gleichgewichtszuständen vor allem die relevanten Zeitkonstanten des Gebäudes herauslesen.

Formulierung der Regelungsziele

Damit der Regler für einen Einsatz optimiert werden kann, muss feststehen, aufgrund welchen Kriteriums die Optimalität erfüllt sein muss. Dafür lassen sich drei Hauptforderungen aufstellen:

1. Im Gebäude soll sich die Raumlufttemperatur immer in einem behaglichen Bereich befinden.
2. Die Heizenergie ist zu minimieren.
3. Die Heizkosten sind zu minimieren.

Es ist klar, dass sich diese Forderungen klar widersprechen. Den Forderungen 2 und 3 kann am besten entsprochen werden, wenn gar nicht geheizt wird, und die Forderung 1 realisiert man durch Variation der Fensterlüftung mit konstant eingeschalteter Wärmepumpe! An diesen Extremsituationen ist zu erkennen, dass eine Verbesserung der einen Seite immer nur mit Konzessionen auf der anderen Seite erreichbar ist. Auch kann eine billigere Strategie durchaus mehr Energie benötigen, wenn dafür der Nachttarif besser genutzt wird.

Regelungskonzept

Mittels Methoden von Fuzzy-Control [1] soll aufgrund einer Wetterprognose über die jeweils folgenden 24 Stunden ein Entschluss über die zu verfolgende Heizstrategie getroffen werden. Dazu wird zuerst auf Basis der aktuellen Wetterbedingungen um das Gebäude mit Hilfe der Wetterprognose einer Referenzstation (z.B. Meteorologische Zentralanstalt) eine lokale Prognose des Wetters des nächsten Tages berechnet. Diese Prognose wird benötigt, um den zeitlichen Verlauf des Wärmebedarfs des Gebäudes über die nächsten 24 Stunden zu prognostizieren. Da für das Gebäude eine Modellstruktur existiert, wird ein modellbasierter Regler eingesetzt. Aufgrund des Verlaufs des Wärmebedarfes wird die Heizstrategie für den Betrieb der Wärmepumpe definiert. Falls die Stromversorgung der Wärmepumpe vom Elektrizitätswerk zwangsunterbrochen werden kann, sind diese EW-Sperrzeiten zu erfassen und müssen in die Heizstrategie einfliessen, damit das Gebäude während der Sperre nicht unterkühlt. In Bild 2 ist die Grobstruktur des Reglers dargestellt.

Wetterprognose

Die Berechnung der Wetterprognose kann auf zwei Wegen erfolgen. Beim direkten Verfahren wird aus der aktuellen Wettersituation direkt eine Prognose der Wettersituation des Folgetages berechnet. Ein indirektes Verfahren greift auf die Wetterprognose einer Referenzstation in der Nähe zurück, so zum Beispiel auf die Kurzzeitwetterprognose des Flughafens Kloten. Aus der lokalen Wettersituation und der Wetterprognose der Referenzstation wird anschliessend die lokale Wetterprognose berechnet. Da die primäre Zeitkonstante eines Einfamilienhauses zwischen einem Tag und drei Tagen liegt, wird eine 24-Stunden-Prognose für Heizungszwecke ausreichen.

Der Aufbau einer Wissensbasis für die lokale Wetterprognose kann auf zwei Arten durchgeführt werden. Entweder vergleicht man die Wettersituation für jeden

Tag mit oder ohne Referenzprognose mit der Situation am Folgetag und leitet für jedes Situationspaar eine Prognose ab. Die Summe aller Prognosen bildet dann direkt die Wissensbasis. Ein Beispiel einer solchen Wissensbasis ist in Bild 3 dargestellt. Wenn zur Generierung einer «guten» Prognose viele Wetterdaten verarbeitet werden, wird auch der Umfang der Wissensbasis enorm, da für eine oft vorkommende Wettersituation viele gleichlautende Prognosen separat gespeichert werden. Eine wesentlich elegantere Methode besteht darin, den Datensatz von Wetterverläufen auf Anhäufungen von ähnlichen Situationen hin zu durchsuchen. Dann wird eine repräsentative Durchschnittssituation gebildet und nur diese in die Wissensbasis aufgenommen. Diese Methode wird «fuzzy clustering» [2] genannt. Je grösser das Volumen einer solchen Anhäufung (cluster) gewählt wird, desto weniger generellere Regeln werden gebildet. Durch Gewichtung der einzelnen Regeln kann in der Wissensbasis auf die Häufigkeit eines Vorkommnisses Rücksicht genommen werden, so dass die Prognose eine häufiger vorkommende Situation eher berücksichtigt als eine Ausnahmesituation.

Problematisch für auf Wetterdaten basierten Prognosen ist es, wenn für eine bestimmte Wettersituation keine Daten vorhanden sind. Die Wissensbasis wird in diesem Bereich unbestimmt sein. Dies führt zu einem Problem bei der Prognoseberechnung, da in der Regel ein vordefinierter Fixwert als Lückenfüller eingesetzt wird. Um diese unbestimmten Stellen zu verhindern, ist es sehr wichtig, die triviale Wetterprognose, nämlich dass das morgige Wetter dem heutigen entspricht, immer in die Wissensbasis zu integrieren. Eine schwache Gewichtung der jeweiligen Trivialprognose bewirkt, dass eine aus Wetterdaten gewonnene Prognose nur unwesentlich abgeändert wird. Wo eine solche aber fehlt, ist mindestens die Trivialprognose vorhanden.

Wärmebedarf

Für die Berechnung des Wärmebedarfs werden die Verluste aufaddiert und Wärmegewinne davon subtrahiert. Verluste entstehen durch Transmission durch Hausmauer und Fenster und durch den Luftwechsel mit der Aussenluft durch Ritzen oder vor allem, wenn der Benutzer die Fenster zum Lüften öffnet. Wärmegewinne sind neben der Sonneneinstrahlung ins Gebäude zusätzliche Wärmequellen im Gebäude wie elektrische Geräte und nicht zuletzt die Benutzer selber.

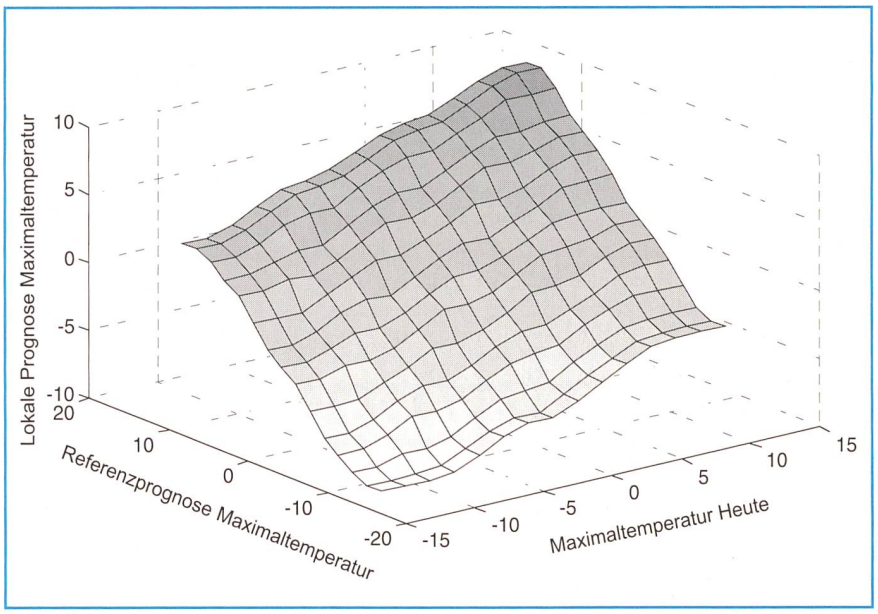


Bild 3 Darstellung einer Wissensbasis der Maximaltemperatur. Dieses Beispiel einer Wissensbasis hat 9 Eingangsfunktionen je Eingangssignal, 15 Funktionen für den Ausgang und 81 «Wetterregeln».

Mit Hilfe des prognostizierten Verlaufs des Wetters wird der Verlauf des zur Erhaltung eines behaglichen Raumklimas notwendige Wärmeleistungsbedarf berechnet. Bei plötzlichen Wetterwechseln wird so gezielt im voraus über- bzw. unterheizt, um die Abweichungen von der gewünschten Raumtemperatur möglichst klein zu halten.

Der vorausgesagte Bedarf kann während der Prognosedauer entsprechend der aktuellen Messdaten überprüft und mit dem effektiven Bedarf verglichen werden. Die Differenz wird mittels einer Korrektur des Bedarfsreglers auf ein Minimum reduziert, wie in Bild 4 dargestellt.

In einem realen Gebäude sind die einzelnen Gewinne und Verluste nicht voneinander separierbar. Die Korrektur kann deshalb nur an der Summe aller Einflüsse erfolgen.

Heizstrategie

Die Heizstrategie sorgt dafür, dass die erforderliche Wärmeenergie zum richtigen Zeitpunkt ins Haus befördert wird. Dabei sind viele Randbedingungen zu berücksichtigen. Die Wärmepumpe kann nicht beliebig oft ein- und ausgeschaltet werden. Je nach Art des Stromliefervertrags sind Sperrzeiten zu vermeiden oder Hochtarifzeiten zu umgehen. Wird eine Luft-Wasser-Wärmepumpe eingesetzt, so hat diese einen über den Tagesverlauf gesehen variablen Wirkungsgrad, der tagsüber besser ist als in der Nacht.

Damit die Auswirkungen von Prognosefehlern und der Einfluss von Störeinflüssen wie Sonnenstrahlung und unterschiedliches Benutzerverhalten kompensiert werden kann, muss die Heizstrategie nicht nur als reine Steuerung, sondern mit einem zusätzlichen Regelungsteil formuliert werden. Mit der H_∞-Methode [3]

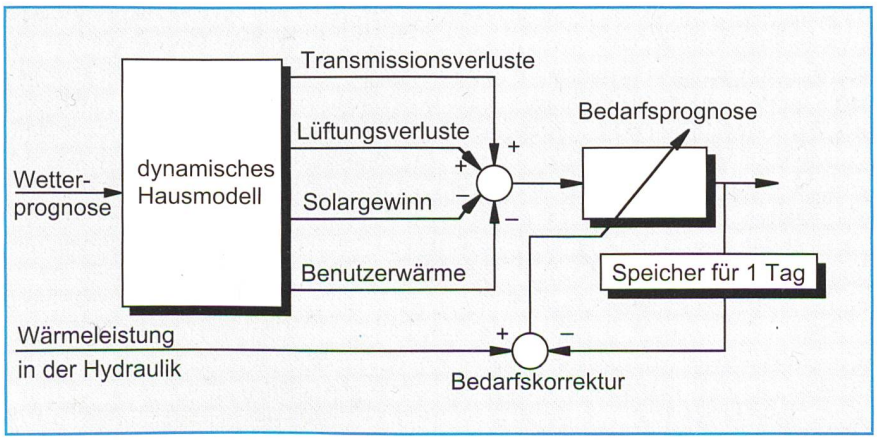


Bild 4 Signalflussbild der Bedarfsberechnung.

wird für den prognostizierten Verlauf des Wärmebedarfs eine Vorsteuerung und für die Differenz mit dem effektiven Verlauf eine Rückführregelung entworfen, mit dem Ziel, die Raumtemperatur in behaglichen Grenzen zu halten. Der Reglerausgang dieses linearen Reglers ist ein zur Heizleistung proportionales kontinuierliches Stellsignal.

Pulsbreitenmodulation

Damit aus dem wertkontinuierlichen Stellsignal des Reglers ein Ein- und Ausschaltsignal für die Wärmepumpe wird, muss dieses Stellsignal mittels Pulsbreitenmodulation in ein binäres Signal umgeformt werden. Es wird zu Beginn einer Periodendauer t_{Takt} als Quotient zwischen Laufzeit τ der Wärmepumpe und der vorgegebenen Periodendauer interpretiert. Bei 0 bleibt die Wärmepumpe über die ganze Periode aus- und bei 1 eingeschaltet. Dazwischen wird die Wärmepumpe gerade für die Laufzeit τ eingeschaltet.

Damit auf Störungen sofort reagiert werden kann und nicht die nächste Periode abgewartet werden muss, kann die Pulsbreitenmodulation jederzeit die Wärmepumpe ein- oder ausschalten, wenn das Eingangssignal Grenzwerte unter- bzw. überschreitet, sofern die Wärmepumpe dabei die minimale Laufzeit nicht unterschreitet. Die Periodendauer kann ebenfalls variiert werden, um die Laufzeiten der Wärmepumpe zum Beispiel auf das Eintreten einer Sperrzeit abzustimmen.

Schlussfolgerungen

Das vorgestellte Regelungskonzept verfolgt neue Wege in der Heizungsregelung. Eine Wetterprognose wird direkt in den Reglerentwurf miteinbezogen und mit modellbasierten Entwurfsmethoden wird auf die Dynamik des Gesamtsystems Rücksicht genommen. Die Pulsbreitenmodulation wird mit der Implementation einer variablen Periodendauer erweitert und kann notfalls sofort reagieren. Ein vereinfachter Regler ohne Wetterprognose wurde im Rahmen eines BfE-Projektes [4] in Simulationen getestet und wird in der kommenden Heizperiode (1998/99) in einem Testgebäude eingesetzt.

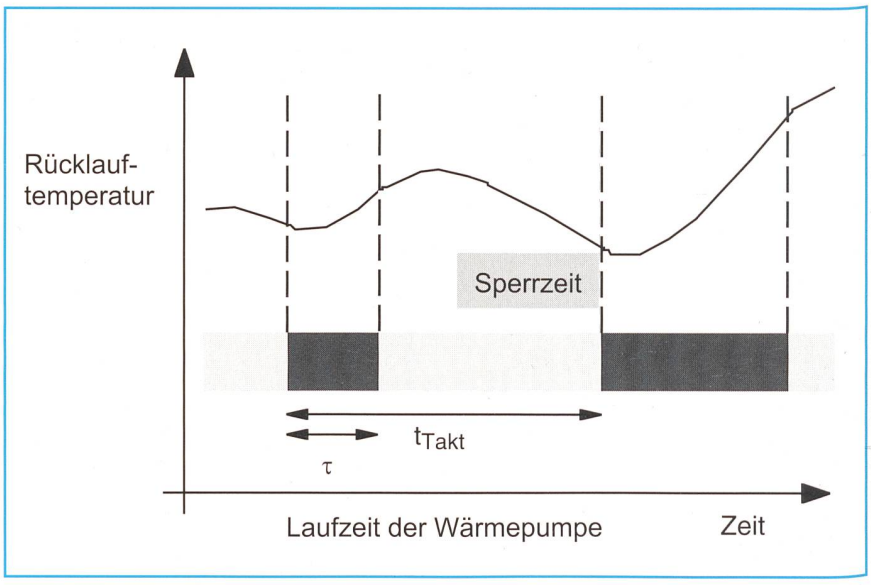


Bild 5 Pulsbreitenmodulation des Stellsignals.

Literaturverzeichnis

[1] *Hans P. Geering*: Introduction to Fuzzy Control. IMRT Press, ETH Zürich, 3. Auflage, Sept. 1998. (http://www.imrt.ethz.ch/~geering/Fuzzy3rd.pdf).

[2] *J. C. Bezdek*: Pattern Recognition with Fuzzy Objective Function Algorithms. Plenum Press, New York, 1981.

[3] *Hans P. Geering*: Robuste Regelung. IMRT Press, ETH Zürich, Dezember 1997. (Internet: http://www.imrt.ethz.ch/~geering/ROBREG/RobRegToc.html).

[4] *Th. Afjei* et al.: Kostengünstige Niedrigtemperaturheizung mit Wärmepumpe. Schlussbericht.

Régulation d'une pompe à chaleur par une commande à logique floue

Une grande partie de la demande globale d'énergie est utilisée en Suisse pour le chauffage des locaux. La technologie des pompes à chaleur contribue nettement à la diminution des besoins en énergie. Pour cela, il faut que les installations soient bien réglées. La pompe à chaleur ne doit mettre à disposition que la quantité de chaleur effectivement demandée. Le présent article décrit un concept de régulation calculant d'avance la future demande d'énergie à l'aide d'une prévision météorologique à court terme et empêchant ainsi une surproduction de chaleur.

La structure des régulateurs est composée de plusieurs structures partielles. Des solutions basées sur des modèles permettent de développer des éléments grâce à des équations mathématiques formulées simplement. Pour les éléments difficilement descriptibles ou ne pouvant l'être par des équations mathématiques, des régulateurs à logique floue sont développés. Etant donné qu'une description exhaustive du fonctionnement des divers éléments du régulateur ferait éclater le cadre du présent article, ce dernier présente simplement le concept dans ses grandes lignes. Les travaux ont été soutenus par le Fonds pour projets et études de l'économie électrique (PSEL).

Der VSE auf dem Internet:
http://www.strom.ch
VSE UCS