

Modellbasierte prädiktive Regelung mit Pulsbreitenmodulation für Kleinwärmepumpenanlagen

Dr. E. Shafai,
Institut für Mess- und Regeltechnik, ETHZ, Zürich
shafai@imrt.mavt.ethz.ch

1. Zusammenfassung

In diesem Beitrag wird eine neue Regelungsstrategie für Kleinwärmepumpenanlagen als Ersatz für die heute fast ausschliesslich eingesetzte witterungsgeführte Zweipunktregelung vorgestellt. Es handelt sich um einen modellbasierten Regler, dessen stetiges Stellsignal zur Ansteuerung der weitverbreiteten einstufigen Wärmepumpen mittels einer Pulsbreitenmodulation in ein binäres Ein/Aus-Signal umgewandelt wird. Der Regler verwendet im Sinne der modellprädiktiven Regelung (MPC: Model Predictive Control [1]) ein Modell des Wärmennutzungssystems für die optimale Verteilung der Heizpulse über der Zeit in Abhängigkeit eines mutmasslichen zukünftigen Aussentemperaturverlaufs. Damit der Regleralgorithmus in einem industriellen Regler implementiert werden kann, wurde die aus der Regelungstechnik bekannten LQ-Optimierung (LQ: lineares System und quadratisches Gütekriterium) verwendet, deren Lösung in geschlossener Form zur Verfügung steht [2]. Diese neue Regelungsstrategie kam im Rahmen des BFE-Projekts „Pulsbreitenmodulation für Kleinwärmepumpenanlagen“ [3] erfolgreich in einem Einfamilienhaus zum Einsatz.

2. Einleitung

In der Regelungstechnik wird je nach Art des Stellsignals (Ausgangssignal des Reglers) grob zwischen stetigen und nicht-stetigen Reglern unterschieden. Der Hauptvertreter der nicht-stetigen Regler ist der Zweipunkt-Regler, der als Stellsignal ein binäres Ein-/Aus-Signal generiert. Die klassischen stetigen Regler wie P-, PI-, PID-Regler usw. generieren aufgrund des Regelfehlers ein zeit- und wertkontinuierliches Stellsignal. Die genannten Vertreter der stetigen Regler erfüllen ihre Aufgabe normalerweise besser als die nicht-stetigen Regler. Sie sind jedoch nicht in der Lage, bei der Regelung die innere Struktur und somit das dynamische Verhalten des zu regelnden Systems ausreichend zu berücksichtigen. Die ebenfalls stetig funktionierenden, modernen, modellbasierten Regler weisen diesen Nachteil nicht auf, da beim Reglerentwurf ein Modell der Regelstrecke die Struktur des Reglers prägt.

In der Heizungstechnik werden die Kleinwärmepumpenanlagen heute fast ausschliesslich mit witterungsgeführten Zweipunktreglern auf Rücklauf-temperatur geregelt. Bei Niedrigenergiehäusern verlaufen die zugehörigen Heizkurven relativ flach, so dass die Regelbarkeit dadurch stark eingeschränkt wird. Insbesondere kann es vorkommen, dass für ein gegebenes Hystereseband des Zweipunktreglers die Wärmepumpe über einer bestimmten Aussentemperatur (z.B. 5 °C) nicht mehr einschaltet und als Folge die gewünschte Raumtemperatur nicht mehr eingehalten werden kann. Ausserdem lassen sich die Wettervorhersage, die Sperr- und Niedertarifzeiten nicht für einen energie- oder kosteneffizienten Betrieb der Wärmepumpe optimal verarbeiten. Um die Zweipunktregler durch intelligente model-basierte Regler zu ersetzen, stösst man auf ein prinzipielles Hindernis. Bei den heute üblichen Wärmepumpen kann der Kompressor nur ein- und ausgeschaltet werden. Für eine entsprechende Anpassung muss das stetige Stellsignal des modellbasierten Reglers in ein binäres Ein-/Aus-Signal umgewandelt werden. Diese Umwandlung wird durch eine „Pulsbreitenmodulation“ realisiert.

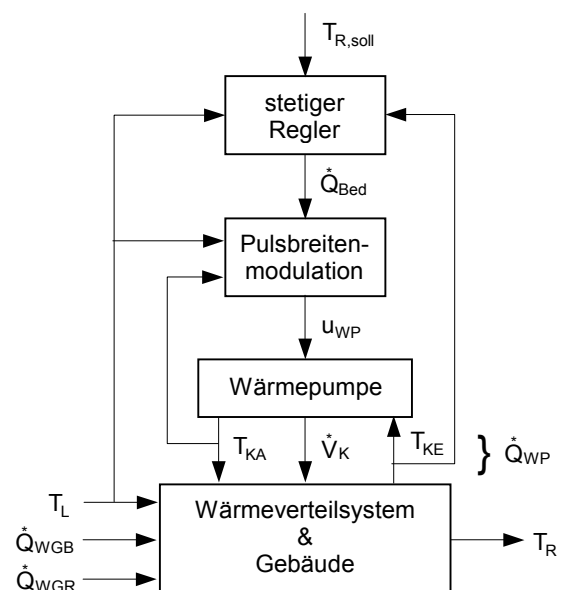


Bild 1: Signalflussbild des Regelkonzepts mit einem stetigen Regler und Pulsbreitenmodulation

Im Bild 1 ist die Regelung einer Wärmepumpenanlage mit einem stetigen Regler und einer Pulsbreitenmodulation in Form eines Blockschaltbildes dargestellt.

Der stetige Regler, der im vorliegenden Fall modellbasiert und prädiktiv (im Sinne von MPC-Regelung) entworfen ist, berechnet basierend auf der Rücklauf­temperatur T_{RL} , der Sollraumtemperatur $T_{R,soll}$ und einer Prädiktion der Aussenlufttemperatur T_L (ohne Messung der Raumtemperatur T_R) den momentan erforderlichen Wärmestrom \dot{Q}_{Bed} . Dieser Wärmestrom wird dann im Modul "Pulsbreitenmodulation" (PBM) in das Einschalt-/Ausschalt­signal u_{WP} umgeformt, welches direkt die Wärmepumpe ansteuert. Diese gibt den Wärmestrom \dot{Q}_{WP} , der durch den Kondensatorvolumenstrom \dot{V}_K , die Vorlauf- und die Rücklauf­temperatur (T_{VL} und T_{RL}) bestimmt wird, an das Wärmeverteil­system und somit an das Wärmenutzungs­system ab.

Aus dem gelieferten Wärmestrom \dot{Q}_{WP} , der effektiven Aussenlufttemperatur T_L und den äusseren und inneren Wärmegewinnen im Raum \dot{Q}_{WGR} und im Boden \dot{Q}_{WGB} ergeben sich mit der thermischen Dynamik des Wärmeverteil- und Wärmenutzungs­systems (Gebäude) die Raumtemperatur T_R und die Rücklauf­temperatur T_{RL} .

3. Prinzip der Pulsbreitenmodulation

Die Pulsbreitenmodulation (vgl. Bild 2) benötigt den Heizleistungsbedarf des Hauses $\dot{Q}_{Bed}(t)$ im Zeitpunkt t zu Beginn eines jeden zu erzeugenden Heizpulses.

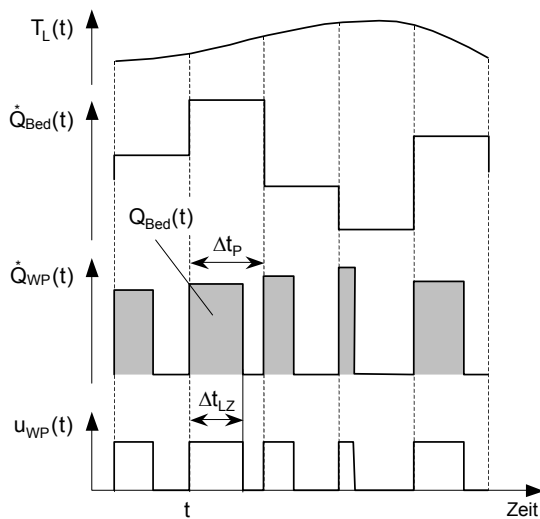


Bild 2: Prinzip der Pulsbreitenmodulation

Die Wärmepumpe liefert in Abhängigkeit von der momentanen Aussenluft- und Vorlauf­temperatur den Wärmestrom $\dot{Q}_{WP}(T_L, T_{VL})$.

Damit die vom Gebäude benötigte Wärmemenge für die Periodendauer Δt_p in Form eines Wärmepaketes geliefert wird, muss die Laufzeit der Wärmepumpe Δt_{LZ} für die aktuelle Periode wie folgt berechnet werden:

$$\dot{Q}_{Bed} \cdot \Delta t_p \stackrel{!}{=} \int_{\Delta t_{LZ}} \dot{Q}_{WP}(T_L(t), T_{VL}(t)) \cdot dt$$

Die Wärmepumpe wird somit zum Zeitpunkt t für die Laufzeit Δt_{LZ} eingeschaltet. Nach Ablauf dieser Zeit wird sie abgeschaltet und bleibt bis zum Erreichen der Periodendauer Δt_p ausgeschaltet. Die Periodendauer Δt_p kann dabei im Allgemeinen variabel gewählt werden. Sie kann insbesondere energetisch im Sinne einer Maximierung der Arbeitszahl der Wärmepumpe optimiert werden (vgl. Kapitel 4).

4. Optimale Pulsbreitenmodulation

Um die optimale Laufzeit $\Delta t_{LZ,opt}$ und damit die optimale Periodendauer $\Delta t_{p,opt}$ der Pulsbreitenmodulation zu ermitteln, wurde das Verhalten einer Luft-Wasser-Wärmepumpe und eines Hauses anhand von Simulationsmodellen untersucht. Dabei wurde für das Haus das im Rahmen des BFE-Projektes „Kurztestmethode für Wärmepumpenanlagen“ [4] entwickelte Modell verwendet.

Für die Wärmepumpe wurde ein einfaches Modell basierend auf den Herstellerdaten (die Heizleistung $\dot{Q}_{WP}(T_L, T_{VL})$ und die elektrische Leistungsaufnahme $P_{WP}(T_L, T_{VL})$ der Wärmepumpe in Funktion von Aussenlufttemperatur T_L und Vorlauf­temperatur T_{VL}) verwendet (vgl. Bild 3).

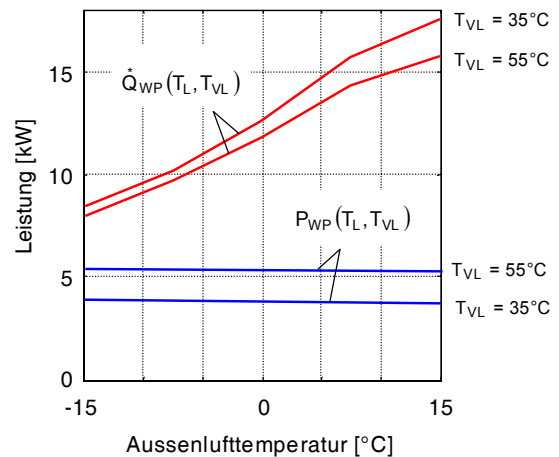


Bild 3: Prinzip der Pulsbreitenmodulation

Die Ein- und Ausschalt­transiente der Wärmepumpe wurde dabei durch ein asymmetrisches Tiefpasselement erster Ordnung mit 60s Ein- und 6s Ausschaltzeitkonstante modelliert.

Für eine konstante Aussenlufttemperatur T_L erreicht die momentane Leistungszahl $\varepsilon(t)$ (vgl. Bild 4) schon nach kurzer Zeit sein Maximum (mit '*' markiert).

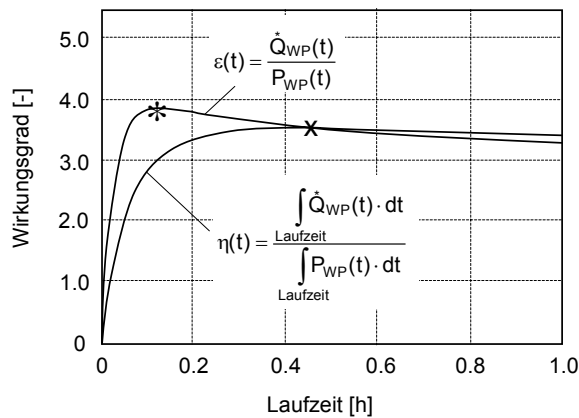


Bild 4: Verlauf der Leistungszahl $\varepsilon(t)$ und des energetischen Wirkungsgrads $\eta(t)$ in Funktion der Laufzeit.

Der energetische Wirkungsgrad $\eta(t)$, welcher für die optimale Laufzeit massgebend ist, erreicht jedoch erst nach längerer Zeit den höchsten Wert (mit 'x' markiert) und verläuft relativ flach an dieser Stelle. Da dieses Optimum relativ flach verläuft, muss die optimale Laufzeit $\Delta t_{LZ,opt}$ und damit die optimale Periode $\Delta t_{P,opt}$ nicht genau eingehalten werden. Für die Implementierung der MPC-Regelung in einem industriellen Regler (Vgl. Kapitel 5) wurde aus diesem Grund eine konstante Periode von 2 Stunden ausgewählt.

5. Optimaler Wärmestrombedarf

Bei der vorliegenden Regelungsstrategie wird der momentane Wärmestrombedarf des Hauses \dot{Q}_{Bed} modellbasiert und prädiktiv im Sinne der MPC-Regelung [1] basierend auf der Rücklauftemperatur T_{RL} , der Sollraumtemperatur $T_{R,soll}$ und einer Prädiktion der Aussenlufttemperatur T_L (ohne Messung der Raumtemperatur T_R) optimiert.

Als Modell des Wärmenutzungssystems wird hier ebenfalls (wie im Kapitel 4) das im Rahmen des BFE-Projektes „Kurztestmethode für Wärmepumpenanlagen“ [4] entwickelte lineare Modell verwendet.

Für die Optimierung ist das folgende quadratische Gütekriterium verwendet, das jeweils von aktueller Zeit t für die Prädiktionshorizont Δt_{hor} minimiert wird:

$$J = \int_t^{t+\Delta t_{hor}} \{R \cdot \dot{Q}_{Bed} + Q \cdot [T_R(t) - T_{R,soll}(t)]^2\} dt$$

Als Prädiktionshorizont Δt_{hor} wird ein Zeitfenster von 24 Stunden ausgewählt. Im Gütekriterium wird mit dem Gewichtungsfaktor R der Wärmestrom \dot{Q}_{Bed} und mit dem Gewichtungsfaktor Q die Abweichung der Raumtemperatur T_R von ihrem Sollwert $T_{R,soll}$ für die Optimierung gewichtet.

Durch entsprechende Wahl der zeitabhängigen Gewichtungsfaktoren $R(t)$ und $Q(t)$ können die Sperrzeiten (falls im voraus bekannt) und die Stromtarifstruktur berücksichtigt werden. Dabei muss z.B. R für die Dauer der Sperrzeit sehr gross gewählt werden, damit die Optimierung den Wärmestrombedarf \dot{Q}_{Bed} bewusst auf Null setzt, so dass die Steuerung der Heizung nicht durch eine allfällige Sperrung überrascht wird.

Mit dem linearen Modell des Wärmenutzungssystems und dem quadratischen Gütekriterium liegt ein LQ-MPC-Optimierungsproblem vor, dessen Lösung in geschlossener Form aus der Regelungstechnik bekannt ist [2].

Dieser Lösungsalgorithmus wurde erfolgreich in einem industriellen Regler implementiert und an einem realen Haus erprobt. Für die Details zum implementierten Algorithmus und für die Mess- und Simulationsresultate wird auf die Publikation [5] verwiesen.

Literatur

- [1] E. F. Camacho and C. Bordons: Model Predictive Control, Springer, London, 1999.
- [2] H. P. Geering: Regelungstechnik, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, fünfte Auflage, 2000.
- [3] H.R. Gabathuler, H. Mayer, E. Shafai, and R. Wimmer: Pulsbreitenmodulation für Kleinwärmepumpen. Phase 2, Zwischenbericht, Bundesamt für Energie, Bern, Juni 2001.
- [4] G. Reiner, E. Shafai, R. Wimmer, D. Zogg, H.R. Gabathuler, H. Mayer, and H.U. Bruderer: Kurztestmethode für Wärmepumpenanlagen, Phase 1 bis 3: Messung, Modellierung und Erprobung der Parameteridentifikation, Schlussbericht ENET-Nr. 965740, Bundesamt für Energie, Bern, November 1998.
- [5] R. Wimmer, E. Shafai und H. P. Geering: Model Predictive Control for Heat Pump Heating Systems, Proceedings of the IASTED International Conference CONTROL AND APPLICATIONS, June 27-29, 2001, Banff, Alberta, Canada.