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: 78 (1987)

Heft: 7

Artikel: Manuelle und automatische Einstellung eines Heizungsreglers

Autor: Tödtli, J.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-903845

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: 09.07.2025

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

Manuelle und automatische Einstellung eines Heizungsreglers

J. Tödtli

Es werden einige manuelle und automatische Verfahren zur Einstellung der Heizkurve eines Heizungsreglers vorgestellt. Es wird gezeigt, dass es für den Entwurf solcher Einstellverfahren zwei grundsätzlich verschiedene Vorgehensweisen gibt: Bei der ersten wird das Problem als ein Reglerentwurfsproblem aufgefasst und bei der zweiten als ein Identifikations- oder Schätzproblem. Automatische Verfahren zur Einstellung der Heizkurve haben unter der Bezeichnung adaptive Heizkurve in mehreren der neuen, digital arbeitenden Heizungsregler Einzug gefunden.

Quelques méthodes manuelles et automatiques pour ajuster une «courbe de chauffage» d'un régulateur de chauffage sont présentées. Il est montré qu'il existe deux approches essentiellement différentes pour concevoir une telle méthode d'ajustement: dans la première on considère le problème comme un problème de conception d'un régulateur et dans la seconde comme un problème d'identification ou d'estimation. Ces méthodes automatiques pour ajuster de la courbe de chauffage sont utilisées dans plusieurs des régulateurs de chauffage modernes.

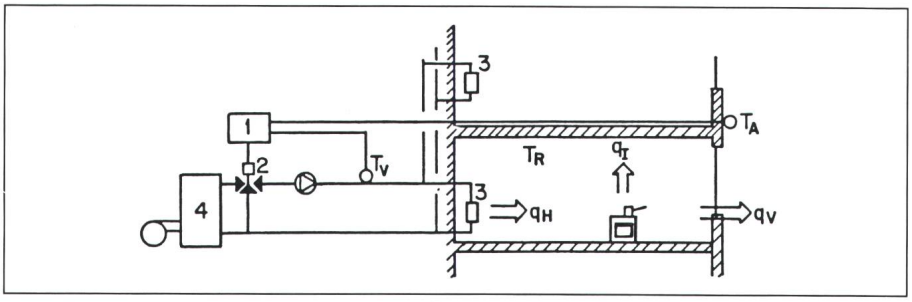
Adresse des Autors
Dr. *Jürg Tödtli*, Zentrallabor,
Landis & Gyr Zug AG, 6301 Zug.

1. Einführung

Die meisten zentralen Warmwasserheizungen sind heute mit einer witterungsgeführten Vorlauftemperaturregelung ausgerüstet. Ihr Prinzip ist anhand von Figur 1 erklärt. Dabei wird angenommen, dass der gezeichnete Heizkörper 3 nicht mit einem thermostatischen Heizkörperventil ausgerüstet ist. Der Heizungsregler 1 wirkt auf das Mischventil 2, und als Messwerte werden dem Heizungsregler die Vorlauftemperatur T_V und die Aussentemperatur T_A zugeführt. Diese beiden Messwerte verwendet er wie folgt: Durch Verstellen des Mischventils 2 regelt er die Vorlauftemperatur T_V auf einen Sollwert T_{VS}. Diesen Sollwert T_{VS} wählt der Heizungsregler in Abhängigkeit von der Aussentemperatur T_A, und zwar gemäss der sogenannten Heizkurve (in Fig. 2 mit HK bezeichnet). Die Heizkurve verläuft so, dass T_{VS} mit abnehmendem T_A grösser wird (Fig. 2). Das hat folgenden Grund. Bei abnehmender Aussentemperatur nimmt der Wärmestrom q_v, der vom Raum nach aussen führt, zu. Um zu verhindern, dass die Raumtemperatur T_R abnimmt, soll der vom Heizkörper zum Raum fliessende Wärmestrom q_H erhöht werden, was durch Erhöhen der Vorlauftemperatur erreicht werden kann.

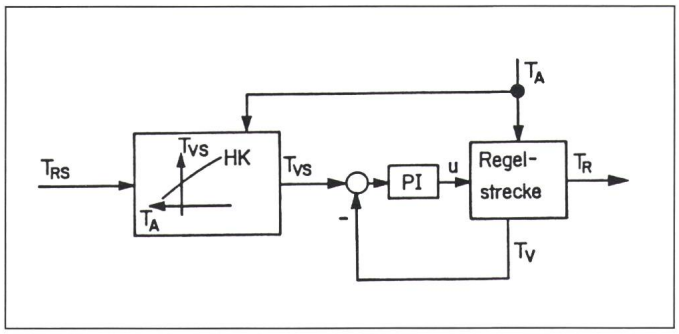
Die Heizkurve muss bei jeder Anlage individuell eingestellt werden. Gewöhnlich stehen dazu auf der Frontplatte des Heizungsreglers zwei Drehknöpfe oder zwei Schieber zur Verfügung, mit denen entweder die Steilheit und Höhe der Kurve (Fig. 3) oder die Vorlauftemperaturwerte bei zwei verschiedenen, fixen Aussentemperaturwerten eingegeben werden können (Fig. 4). Die Definitionen von Steilheit und Höhe in Figur 3 sind als Beispiel aufzufassen, sie variieren von Gerät zu Gerät.

Eine Heizkurve wird im folgenden korrekt oder richtig eingestellt genannt, wenn zu Zeiten ohne starken Windeinfluss in einem Raum, in welchem die Heizkörperventile geöffnet sind und in welchem der Wärmestrom q_I von internen Wärmequellen (elektrische Apparate, Menschen) und absorbierter Sonnenstrahlung nicht grösser als ein konstanter, dauernd vor-



Figur 1 Schematische Darstellung zur witterungsgeführten Vorlauftemperaturregelung

1 Heizungsregler 2 Mischventil 3 Heizkörper 4 Heizkessel
T_A Aussentemperatur T_R Raumtemperatur T_V Vorlauftemperatur
q_V Wärmestrom, der aus dem Raum nach aussen fliesst (Transmissionswärmeleistung und Lüftungsverluste)
q_I Wärmeleistung interner Wärmequellen (elektrische Apparate, Menschen usw.) und der absorbierten Sonnenstrahlung
q_H Wärmestrom, den der Heizkörper an den Raum abgibt



Figur 2 Signalflussplan zur witterungsgeführten Vorlauftemperaturregelung

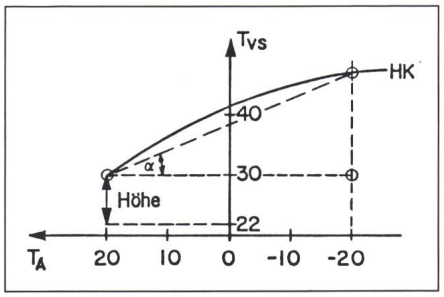
u Stellung des Mischventils
PI Regler und Antrieb für Stellventil (angenähert ein Proportional-Integral-Verhalten)
HK Heizkurve

handener Anteil q_{IC} ist, die Raumtempertur T_R in einem stationären Zustand gleich einem vorgegebenen Sollwert T_{RS}, z.B. 20°C, ist. Bei einer solchen Heizkurveneinstellung – im folgenden mit HK_{opt} bezeichnet – muss bei starken Windeinflüssen ein Unterschreiten des Sollwertes T_{RS} in Kauf genommen werden. In Zeitperioden, in denen der Wärmestrom q_I den Wert q_{IC} übersteigt, wird, wenn die Heizkörperventile nicht entsprechend geschlossen werden, die Temperatur T_R den Wert T_{RS} überschreiten und der Energieverbrauch über den zur Aufrechterhaltung des Sollwertes T_{RS} nötigen Betrag steigen.

Das Einstellen der Heizkurve ist eine schwierige Aufgabe. Sie wird häufig «zu hoch» eingestellt, was zwar gewährleistet, dass die Raumtemperatur T_R nicht unter den gewünschten Wert T_{RS} geht, aber gewöhnlich Energieverschwendung zur Folge hat. Pro 1 °C, um welches T_R zu hoch ist, muss mit einem jährlichen Energiemehrverbrauch von ungefähr 6 bis 7% gerechnet werden.

Auch wenn alle Räume mit thermostatischen Heizkörperventilen ausgerüstet sind, kann – entgegen einer verbreiteten Meinung – mit einer korrekt eingestellten Heizkurve Energie gespart werden. Wird zum Beispiel durch Öffnen der Fenster gelüftet, ohne dass das Thermostatventil auf die Stellung 0 gedreht wird (und wer tut das schon!), dann öffnet das Ventil automatisch. Die Wärme, die der Heizkörper dabei abgibt, ist weitgehend verloren. Bei einer richtig eingestellten Heizkurve ist dieser Verlust wegen der tieferen Vorlauftemperatur kleiner als bei einer zu hoch eingestellten.

In Abschnitt 2 werden einige manuelle Verfahren zur Einstellung der Heizkurve vorgestellt. In Abschnitt 3 werden anhand von Beispielen automatische Einstellverfahren behandelt, wie sie heute unter dem Namen «adaptive Heizkurve» in etlichen modernen digitalen Heizungsreglern anzutreffen sind [1]. Neben diesen Beispielen werden in Abschnitt 2 und 3 zwei Vorgehensweisen für den Entwurf solcher manueller und automatischer Einstellverfahren vorgestellt: Beim ersten wird das Problem als ein Reglerentwurfsproblem aufgefasst, beim zweiten als ein Identifikations- oder Estimationsproblem. Es wurde bereits in [2] darauf hingewiesen, dass fast alle in der Praxis anzutreffenden automatischen Einstellverfahren als Resultat einer dieser beiden Vorgehensweisen betrachtet werden können. Wie sich die vorgestellten automatischen Einstellverfahren in die verbreiteten Klassifizierungsschemen für adaptive Steuerungen und Regelungen einordnen lassen, wird am Schluss von Abschnitt 3 untersucht.



Figur 3 Beispiel für eine Heizkurveneinstellung mittels Steilheit und Höhe

$$\text{Steilheit} = \text{tg}\alpha = \frac{T_{VS}(-20\,°C) - T_{VS}(+20\,°C)}{40\,°C}$$

2. Manuelle Einstellverfahren

Der Person, welche die Heizkurve einstellt – im folgenden Betriebswart genannt – sollte zur Messung von T_A und T_R ein Aussenthermometer und mindestens ein Thermometer in einem Innenraum zur Verfügung stehen. Bei der Auswahl dieses Innenraums – im folgenden Referenzraum genannt – sollte auf folgendes geachtet werden:

– Der Wärmestrom q_I (interne Wärmequellen und absorbierte Sonnenstrahlung) soll klein sein. Oder zum mindesten sollte es im Referenzraum hie und da längere Zeitperioden geben, während welcher q_I klein ist und welche nicht in einer Absenkphase (z.B. reduzierter Betrieb während der Nacht) liegen. Gemessen wird in einem solchen Fall am Ende dieser Zeitperiode. (In Wohnhäusern: Zimmer auf der Nordseite im allgemeinen geeignet, Küche ungeeignet.)

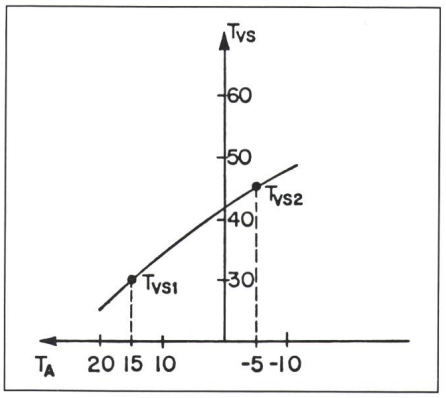
– Der Raum sollte wenn möglich mit konventionellen Heizkörperventilen ausgerüstet sein, die während der ganzen Einstellzeit in der gleichen Stellung bleiben (ganz oder fast ganz geöffnet). Gibt es keinen geeigneten Raum mit nur konventionellen Heizkörperventilen, so sollen die thermostatischen Heizkörperventile auf maximale Stellung gebracht werden. Bei Raumtemperaturen unter 26 °C entspricht dies etwa einem geöffneten konventionellen Ventil.

Vor dem Einstellen muss noch der Wert T_{RS} für die Raumtemperatur festgelegt werden.

Zunächst werden nun zwei manuelle Einstellverfahren (Verfahren 1a und 1b) von der Art, wie sie in etlichen Gebrauchsanweisungen von Heizungsreglern anzutreffen sind, beschrieben. Danach wird ein manuelles Verfahren vorgestellt (Verfahren 2), das der Lösung eines Identifikations- oder Schätzproblems entspricht.

2.1 Verfahren 1a und 1b

Das Verfahren 1a ist für Geräte geeignet, bei denen die Heizkurve wie in Figur 4 über zwei Vorlauftemperatur-



Figur 4 Beispiel für eine Heizkurveneinstellung mittels zweier Vorlauftemperaturwerte T_{VS1} und T_{VS2}

Messung		Korrekturen			
		Verfahren 1a		Verfahren 1b	
		T_{VS1}	T_{VS2}	Höhe	Steilheit
$T_A > 5\,°C$	$T_R > T_{RS}$	verkleinern	-	verkleinern	-
	$T_R < T_{RS}$	vergrössern	-	vergrössern	-
$T_A < 5\,°C$	$T_R > T_{RS}$	-	verkleinern	-	verkleinern
	$T_R < T_{RS}$	-	vergrössern	-	vergrössern
Max. Korrektur		5°	5°	5°	1/8[1]

Tabelle I Einstellen der Heizkurve bei den Verfahren 1a und 1b
[1] Bei einer Definition der Steilheit wie in Figur 3

werte eingestellt wird, und das Verfahren 1b für Geräte, bei denen sie wie in Figur 3 über die Parameter Steilheit und Höhe eingestellt wird. In Tabelle I ist gezeigt, wie bei den beiden Verfahren vorzugehen ist.

Dabei sollen folgende Hinweise beachtet werden:

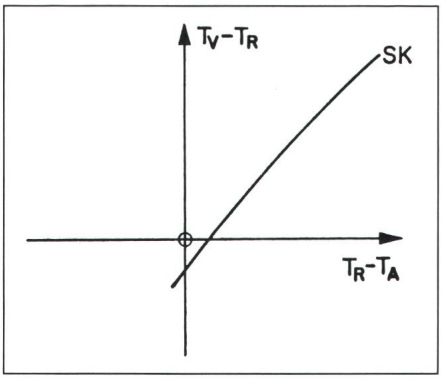
1. Höchstens alle zwei Tage eine Korrektur vornehmen.
2. Nicht aufgrund von Messwerten korrigieren, die bei instationärem thermischem Zustand des Gebäudes und der Anlage aufgenommen wurden. Solche Fälle treten nach Sollwertsprüngen - verursacht durch die Nachtabsenkung - oder nach einer grossen sprunghaften Änderung der Aussentemperatur auf (bei einem Aussentemperatursturz von 10° C kann es bei massiven Gebäuden eine Woche dauern, bis das Gebäude in der Nähe eines stationären Zustandes ist).
3. Nicht nach oben korrigieren, wenn die Leistungsgrenze der Heizung überschritten ist. Dies erkennt man daran, dass die Vorlauftemperatur T_V unter dem von der Heizkurve verlangten Sollwert T_{VS} liegt (das Mischventil ist am Anschlag, und der Brenner läuft ohne Unterbruch).

Das Verfahren 1b unterscheidet sich vom Verfahren 1a hauptsächlich darin, dass bei mildem Wetter ($T_R > 5\,°C$) die rechte Seite der Heizkurve ebenfalls korrigiert wird. Beiden Verfahren ist gemeinsam, dass sich der Betriebswart beim Einstellen der Heizung wie ein (Abtast-)Regler verhält. Er misst einen Istwert T_R, vergleicht ihn mit einem Sollwert T_{RS} und bestimmt aus der Regelabweichung $T_{RS}-T_R$ eine Korrektur. T_R spielt also die Rolle der Regelgrösse, T_{RS} jene der Führungsgrösse, T_{VS1} und T_{VS2} (bzw. Höhe und Steilheit) jene zweier Steuergrössen und T_A jene einer aufgeschalteten Störgrösse. Beim Entwurf eines solchen Einstellverfahrens wird das Problem also als ein *Reglerentwurfsproblem* aufgefasst.

2.2 Verfahren 2

In diesem Abschnitt soll auf eine ganz andere Vorgehensweise ein manuelles Einstellverfahren entworfen werden[1]. Das Problem wird dabei als ein *Identifikations- oder Schätzproblem* aufgefasst. Und zwar wird es darum gehen, eine Kurve zu bestimmen (zu identifizieren, zu schätzen), die den Zusammenhang zwischen den Grössen T_A, T_V und T_R im stationären Zustand beschreibt. Ausgehend von dieser Kurve kann dann, wie noch gezeigt wird, die richtig eingestellte Heizkurve HK_{opt} bestimmt werden. Das Verfahren wird im folgenden Schritt für Schritt entwickelt.

[1] Dem Verfasser ist nicht bekannt, ob das hier beschriebene Verfahren bereits publiziert wurde. Entsprechende Hinweise nimmt er gerne entgegen.



Figur 5 Typischer Verlauf einer «Systemkurve», die den stationären Zusammenhang zwischen T_A, T_V und T_R beschreibt

Unter bestimmten hinreichenden Bedingungen kann der stationäre Zusammenhang zwischen T_V, T_A und der Raumtemperatur T_R eines Referenzraumes durch eine Kurve in einem Koordinatensystem mit den Achsen T_R-T_A und T_V-T_R dargestellt werden. Diese Kurve wird im folgenden *Systemkurve* (SK) genannt (Fig. 5). Als hinreichende Bedingungen sind in erster Linie die vier folgenden zu nennen[2]:

- stationärer Zustand,
- $q_I = q_{IC}$ (konstanter, dauernd vorhandener Anteil von q_I),
- konstanter Durchfluss durch Heizkörperventil,
- geringer Windeinfluss.

Zuerst wollen wir annehmen, dass die Systemkurve SK bereits bekannt sei, und überlegen, wie wir aus ihr die zu einem vorgegebenen Sollwert T_{RS} korrekt eingestellte Heizkurve HK_{opt} erhalten. Schreiben wir in Figur 5 T_{RS} für T_R, so gibt uns die Kurve SK zu jedem Wert T_A genau die Vorlauftemperatur T_V, die nötig ist, um T_{RS} stationär zu halten. Die Kurve SK ist also gerade die gesuchte Heizkurve HK_{opt} im Koordinatensystem mit den Achsen T_V-T_{RS} und $T_{RS}-T_A$. Die korrekt eingestellte Heizkurve HK_{opt} erhält man also, indem man das Diagramm mit der Kurve SK auf die in Figur 6 gezeichnete Weise in das Koordinatensystem mit den Achsen T_A und T_{VS} einträgt. Die Kurven HK_{opt} und SK fallen aufeinander.

In Wirklichkeit kennt der Betriebswart die Kurve SK jedoch nicht, wenn er mit der Heizkurveneinstellung beginnt. Die Heizkurve, die zu diesem Zeitpunkt vorliege, bezeichnen wir mit HK_0. Wie findet der Betriebswart nun die Systemkurve SK und damit die korrekt eingestellte Heizkurve HK_{opt}? Zur Identifizierung dieser Kurve bestimmt er einige Punkte dieser Kurve. Für jeden dieser Punkte muss ein stationärer Betriebszustand ausgemessen werden. Die im ersten solchen Zustand gemessenen Werte seien T_{A1} für T_A und T_{R1} für T_R. Den Wert T_{V1} findet er mit Hilfe der Kurve HK_0. Damit sind die Koordinaten $T_{V1}-T_{R1}$ und $T_{R1}-T_{A1}$ des gesuchten Punktes P_1 im Koordinatensystem mit den Achsen T_V-T_R und

[2] Die theoretische Begründung (Energiebilanz) und weitere Voraussetzungen gehen aus Überlegungen in Abschnitt 3 hervor.

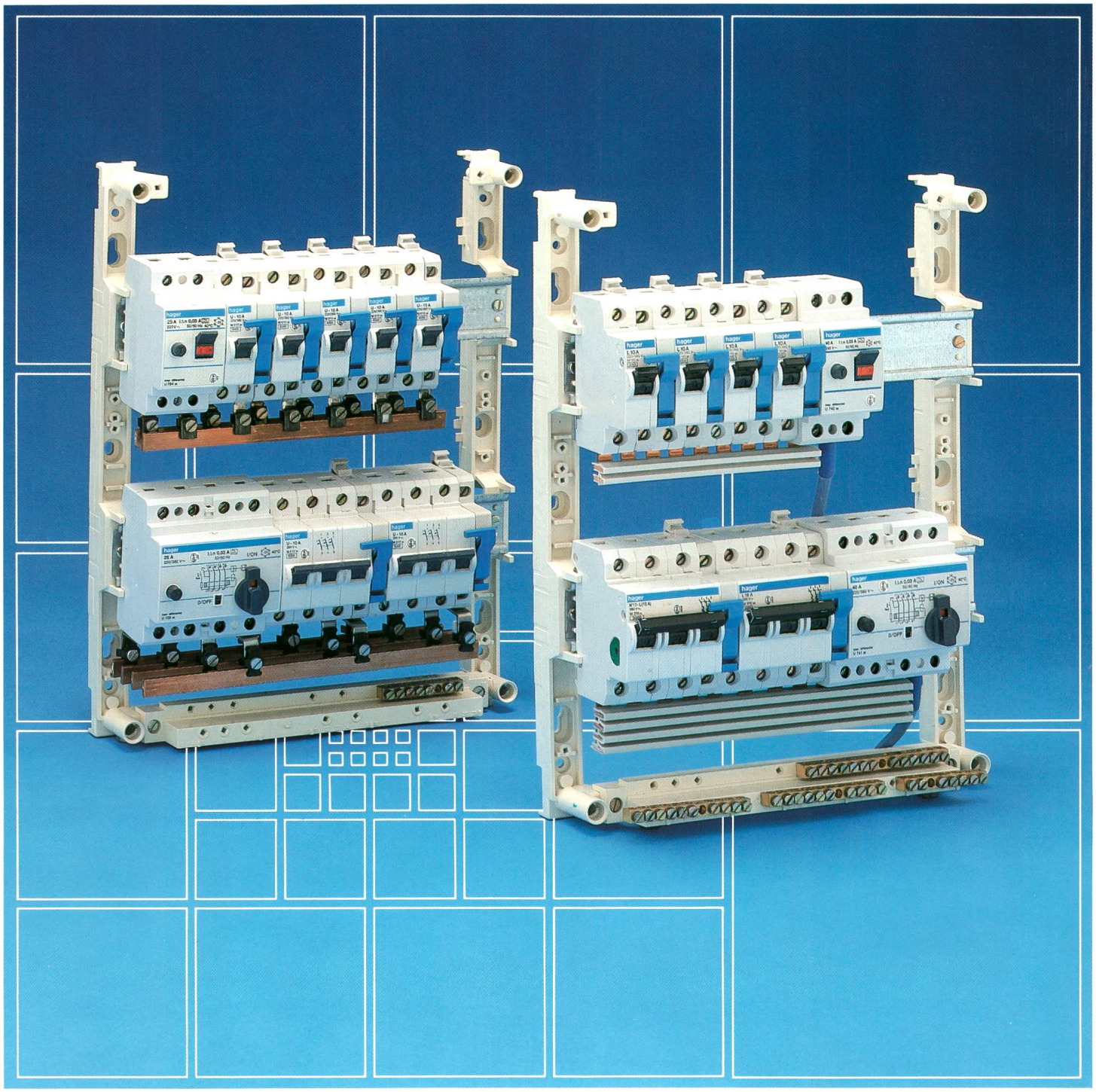
hager

Pontage

- barre de pontage
- connecteurs

Verdrahtungssysteme

- Kammschienen
- Anschlußstücke

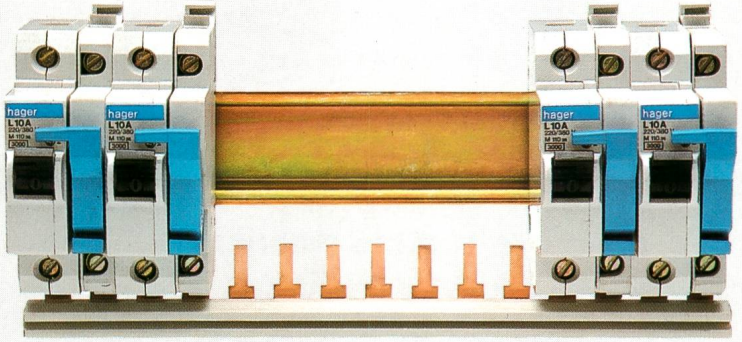


Q 511.87S.

Barre de pontage

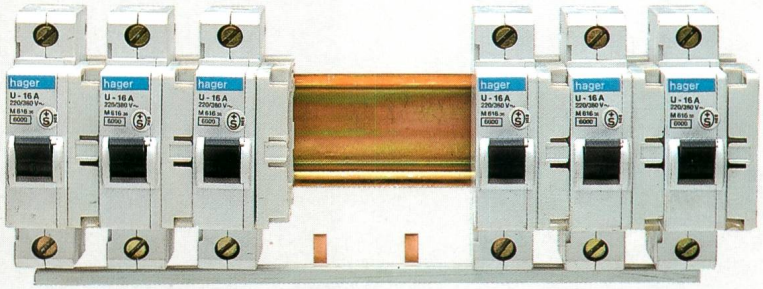
nouveau
neu

Avec sectionneur de neutre
mit Neutralleitertrenner



avec barre de neutre
mit Neutralleiterschiene

1 P + N
(K 273)

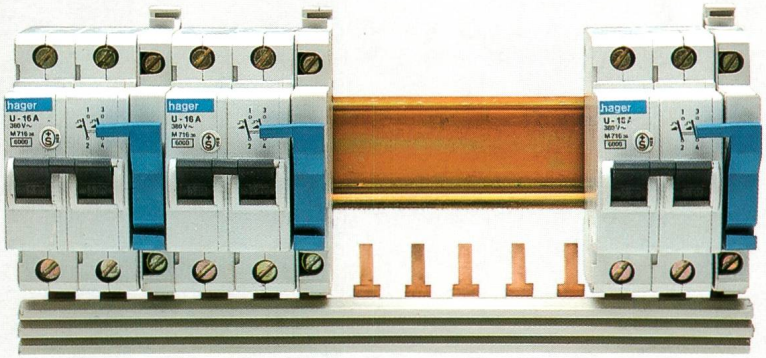


sans barre de neutre
ohne Neutralleiterschiene

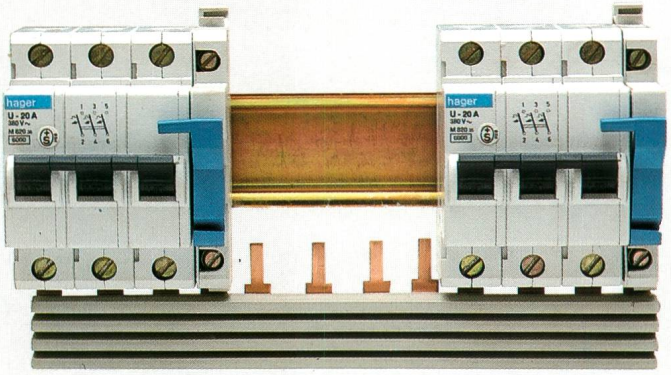
1 P + N
(K 173)

Le sectionneur de neutre est remplacé par un intercalaire (L060) pour pontage RST vertical.

für senkrechte Verdrahtung RST wird der Neutralleitertrenner durch Füllstück (L060) ersetzt.



2 P + N
(K 373)



3 P + N
(K 473)

Pour les distributions de 1 à 3 pôles, a
1P, 2P, 3P); les barres permettent un r
se fait soit directement avec le fil soup
l'appareil, soit par une borne de raccor

Bei 1 bis 3poliger Einspeisung, mit od
3P+N, 1P, 2P, 3P) ermöglichen diese
Verdrahtung. Anschluß direkt mit Litze
des Gerätes, oder durch Anschlußklem

	n° de réf. Best. N		
	longueur Länge		
	13	24	1
avec sectionneur de neutre mit Neutralleitertrenner			
1 P+N*	—	—	K
1 P+N	—	—	K
2 P+N	—	—	K
3 P+N	—	—	K
sans sectionneur de neutre ohne Neutralleitertrenner	ⓐ	ⓑ	
1 P	**K 163**	**K 171**	K
2 P	**K 264**(1)	**K 271**	K
3 P	**K 363**	**K 371**	K

* sans barre de neutre
ohne Neutralleiterschiene

(1) fin 1er semestre 87
Ende 1. Semester 87

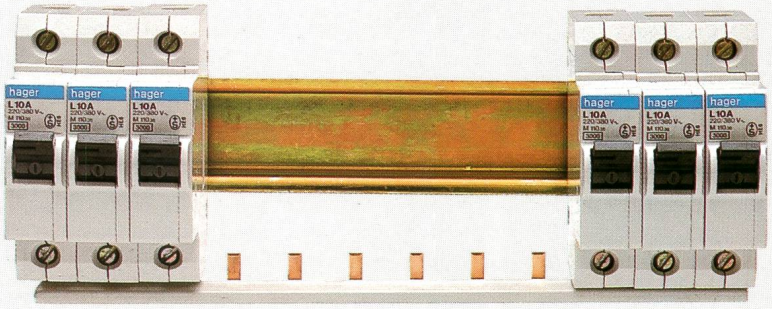
(2) 10 jeux
10 Sätze

Kammschienen

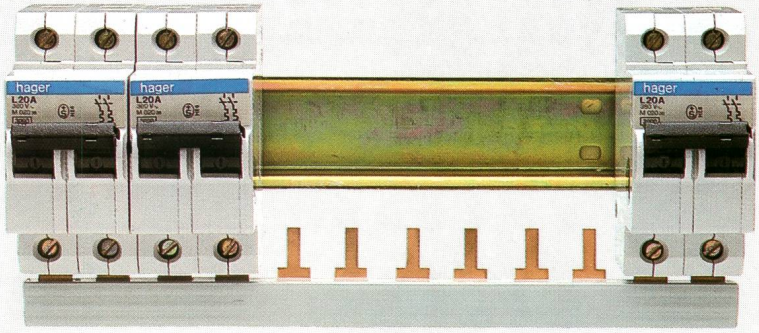
Sans sectionneur de neutre
ohne Neutralleitertrenner

ɔu sans neutre, (1P+N, 2P+N, 3P+N,
rdement simple et rapide. L'alimentation
rigide de 16□ maxi. dans la borne de
ent jusqu'à 35□. Les barres sont **isolées**.

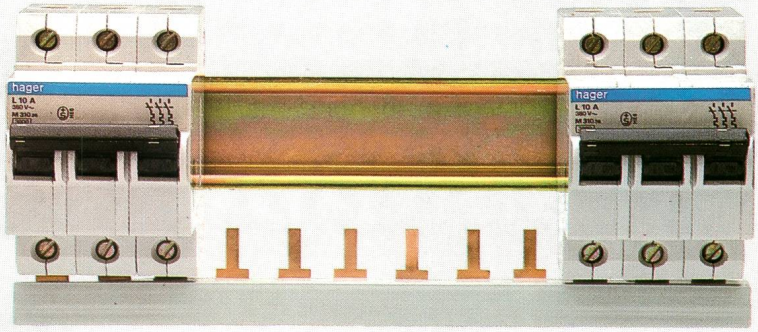
ne Neutralleitertrenner (1P+N, 2P+N,
nschienen eine einfache und schnelle
· Draht von max. 16□ in die Käfigklemme
ı bis 35□. Die Schienen sind **isoliert**.



1 P



2 P



3 P

In/A			Section Sektion			Pas Schritt	Emballage Verpackung		
120			20□			1 ▮ ½	50		
120			20□			1 ▮ ½	10		
90			15□			2 ▮ ½	10		
90			15□			3 ▮ ½	15		
ⓐ	ⓑ	ⓒ	ⓐ	ⓑ	ⓒ		ⓐ	ⓑ	ⓒ
60	120	120	10□	20□	20□	1 ▮	50	10	50
60	60	90	10□	10□	15□	2 ▮	10(2)	10	20
60	60	90	10□	10□	16□	3 ▮	10(2)	10	20

Accessoires

bornes de raccordement
à languettes
pour câbles 25□ et 35□
serrage du câble par 2 vis,
avec chapeau isolant.

K 183 (isol.)

AS 35 S

AS 25 S
(isol.)

AS 35 S-L

Zubehör

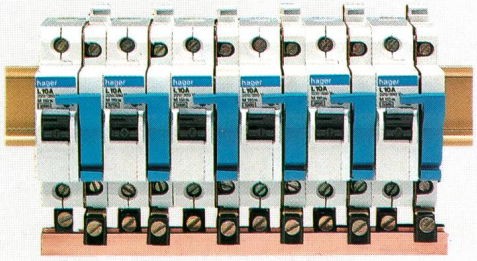
Anschlußklemmen
mit Steg
für Kabel 25□ und 35□
Drahtbefestigung mit 2
Schrauben, mit Isolierkappe

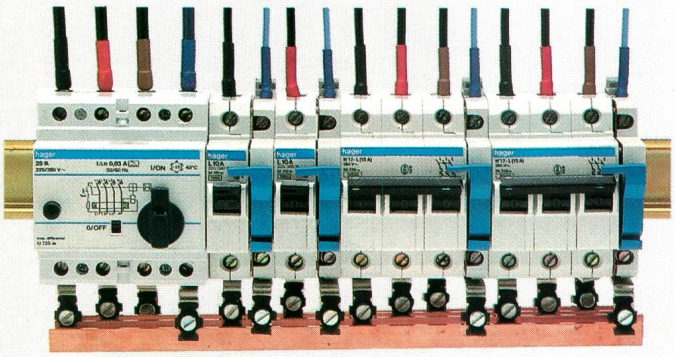
section Sektion	emball. Verp.	Nº de réf. Best. Nr.
25□	10	**K 183**
25□	10	**AS 25 S**
35□	50	**AS 35 S**
35□	50	**AS 35 S-L**

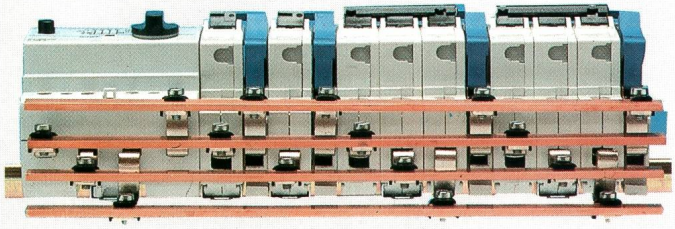
Phasen und Neutralleiter-Anschlußstücke

Les connecteurs de phases et de neutres ci-dessous permettent le raccordement direct entre divers types d'appareillage: disjoncteurs séries M3, M6, interrupteurs différentiels, etc..., le cas échéant en combinaison avec les sectionneurs de neutre.
Les connecteurs sont reliés par des barres en cuivre rondes ou méplats.
L'alimentation se fait directement, avec le fil souple ou rigide de 16□ maxi, dans la borne de l'appareil ou par une borne maxi. de 35□.

Die Phasen und Neutralleiter-Anschlußstücke ermöglichen eine direkte Einspeisung verschiedener Geräte wie LS-Schalter Serie M3, M6, FI-Schutzschalter, eventuel kombiniert mit den Neutralleitertrennern.
Diese Anschlußstücke werden mit Rund- oder Flachkupferschienen verbunden.
Anschluß direkt mit Litze oder Draht von max. 16□ in die Käfigklemme des Gerätes oder durch eine Klemme max. 35□.







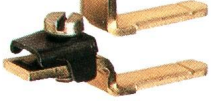
Pontage mono + neutre ou biphasé

Phase und Neutralleiter- Einspeisung (oder 2-phasig)

désignation Bezeichnung	emb. Verp.	n° de réf. Best. Nr.
Connecteur de phase Phase-Anschlußstück	50	**K 552**
Connecteur de neutre Neutralleiter-Anschlußstück	50	**K 551**

nouveau
neu

Pontage multipolaire mehrpolige Einspeisung



Connecteur de neutre N Neutralleiter-Anschlußstück N	50	**K 560**
Connecteur de phase R Phasen-Anschlußstück R	50	**K 561**
Connecteur de phase S Phasen-Anschlußstück S	50	**K 562**
Connecteur de phase T Phasen-Anschlußstück T	50	**K 563**

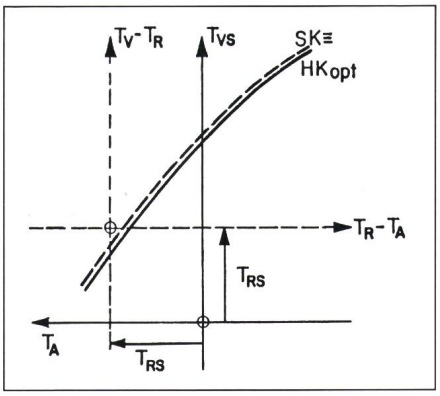
hager

votre partenaire pour le modulaire
Ihr Partner für alle modulare Einbaugeräte

S.A. Hager Modula A.G.
Chemin du Croset 3
Case postale n° 191
1024 ECUBLENS/VD
Tél. (021) 359848
Télex 454712

Hager Electro S.A.
132, Bld d'Europe
F 67210 OBERNAI
Tél. 88.95.61.15
Télex 870640
France

Distribué par : Verkauf durch :



Figur 6 Zusammenhang zwischen der Systemkurve *SK* und der korrekt eingestellten Heizkurve HK_{opt}

$T_R - T_A$ (Fig. 6) bekannt. Die Koordinaten im Koordinatensystem mit den Achsen T_A und T_{VS} ergeben sich aus den Gleichungen:

$$T_A = T_{RS} - (T_{R1} - T_{A1}) = T_{A1} + \Delta_1 \quad (1)$$

$$T_{VS} = T_{RS} + (T_{V1} - T_{R1}) = T_{V1} + \Delta_1 \quad (2)$$

wobei

$$\Delta_1 = T_{RS} - T_{R1} \quad (3)$$

Von einem bekannten Punkt Q_1 mit den Koordinaten T_{A1} und T_{V1} kommt man also zum gesuchten Punkt P_1, indem man zu jeder Koordinate den Wert Δ_1 hinzuzählt.

In Figur 7a ist das Verfahren für ein Beispiel gezeigt, bei dem der Betriebswart in zwei verschiedenen stationären Zuständen die Aussentemperatur und die Raumtemperatur misst. Er erhält die Werte T_{A1}, T_{A2}, T_{R1} und T_{R2}. Mit Hilfe der Kurve HK_0 bestimmt er die Punkte Q_1 und Q_2. Dann rechnet er die Abweichungen $\Delta_1 = T_{RS} - T_{R1}$ und $\Delta_2 = T_{RS} - T_{R2}$ und zeichnet wie in Figur 7a gezeichnet die Punkte P_1 und P_2 ein. Es liegen nun zwei Punkte der Kurve SK vor. Da die korrekt eingestellte Heizkurve im Idealfall mit der Kurve SK zusammenfällt, wird die Heizkurve so eingestellt, dass sie durch diese beiden Punkte geht. Es geht aus dem Konstruktionsprinzip unmittelbar hervor, dass für eine gute Einstellung die beiden T_A-Werte T_{A1} und T_{A2} nicht zu nahe beieinander liegen dürfen. Es empfiehlt sich deshalb, eine Messung bei mildem und eine bei kaltem Wetter vorzunehmen.

Bei Heizkurven, die wie in den genannten Beispielen durch zwei Parameter festgelegt sind, genügen zwei Punkte. Werden in diesem Fall mehr als zwei Punkte der Kurve SK gemessen, so wird es im allgemeinen nicht möglich sein, die Heizkurve so zu legen, dass sie durch alle diese Punkte geht. Dies kann zwei Ursachen haben. Die zu Beginn dieses Abschnittes genannten vier hinreichenden Bedingungen sind nicht für alle Punkte erfüllt (solche Punkte liegen nicht auf der Kurve SK), oder die vom Gerätehersteller vorgegebene Krümmung der Heizkurve verunmöglicht eine exakte Anpassung an die Kurve SK. Der Betriebswart wird Punkte, bei denen vermutet wird, dass eine der hinreichenden Bedingungen stark verletzt ist, streichen und die Kurve HK_{opt} an die verbleibenden Punkte möglichst gut anpassen.

Meist möchte der Betriebswart mit Verstellen der Heizkurve nicht zuwarten, bis er zwei Punkte bestimmt hat. Die Figur 7b zeigt, wie er in diesem Fall vorgehen kann. Mit HK_1 ist die Heizkurve bezeichnet, die er nach der ersten Messung eingestellt hat. Er kann sie zum Beispiel so legen, dass sie durch den Punkt P_1 geht. Dieses Verfahren kann durch Messung weiterer Punkte beliebig lange fortgesetzt werden.

Falls bei einer Messung die Leistungsgrenze der Heizung überschritten ist ($T_V < T_{VS}$), wird man die Ordinate des Punktes Q_i nicht mit der Heizkurve HK_0 (bzw. HK_{i-1}) bestimmen, sondern durch Messung. Q_i wird unter diese Kurve zu liegen kommen.

3. Automatische Einstellverfahren

In diesem Abschnitt werden zwei automatische Einstellverfahren entworfen. Es werden dabei die beiden im Abschnitt 2 beschriebenen Vorgehensweisen angewendet. Beim Verfahren 3 wird das Problem als ein Reglerentwurfsproblem aufgefasst und beim Verfahren 4 als ein Estimationsproblem.

3.1 Herleitung der Heizkurvenformel

Als Vorbereitung wird noch eine algebraische Formel für die Heizkurve HK hergeleitet, die in einem digital arbeitenden Heizungsregler zur Berechnung von T_{VS} aus T_A und T_{RS} verwendet werden kann. Dazu wird zuerst die Kurve SK durch eine Formel ausgedrückt. Im stationären Zustand gilt die Energiebilanzgleichung (1. Hauptsatz der Thermodynamik):

$$q_H + q_I = q_V \quad (4)$$

q_V setzt sich aus dem Transmissionswärmeleistungsstrom q_{TW} durch die Wand, dem Transmissionswärmeleistungsstrom q_{TF} durch die Fenster und dem durch die Lüftungsverluste verursachten Wärmeleistungsstrom q_{LV} zusammen. Also

$$q_V = q_{TW} + q_{TF} + q_{LV} \quad (5)$$

Für die Summe q_V gilt näherungsweise

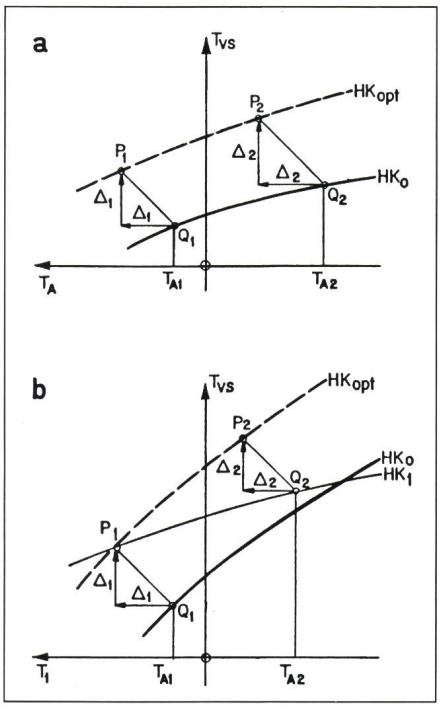
$$q_V = (T_R - T_A)\, K_1 \quad (6)$$

und für q_H

$$q_H = (T_V - T_R)^{\gamma} K_2 \quad (7)$$

Die Konstante K_1 enthält die K-Werte und Flächen der Wände und Fenster sowie die Anzahl Luftwechsel pro Zeiteinheit. K_2 ist eine vom Heizkörper und vom Mengenstrom durch den Heizkörper abhängige Konstante. Für γ wird zum Beispiel $\gamma = 1{,}3$ vorgeschlagen. Aus den Gleichungen (4), (6) und (7) folgt

$$(T_V - T_R)^{\gamma} = (T_R - T_A)\, s_g + h_g \quad (8a)$$



Figur 7 Vorgehen beim Verfahren 2

a Verstellen der Heizkurve, wenn 2 Punkte der Systemkurve bekannt sind

b Verstellen der Heizkurve nach jeder Messung

mit

$$s_g = K_1/K_2 \tag{8b}$$

$$h_g = -q_I/K_2 \tag{8c}$$

Wird für K_1 der für Windstille geltende Wert K_{1C} und für q_I sein konstanter, dauernd vorhandener Anteil q_{IC} eingesetzt, so erhält man die Systemkurve SK:

$$(T_V - T_R)^\gamma = (T_R - T_A)\, s + h \tag{9a}$$

mit

$$s = K_{1C}/K_2 \tag{9b}$$

$$h = -q_{IC}/K_2 \tag{9c}$$

Schreibt man T_{VS} anstelle von T_V und T_{RS} anstelle von T_R, so ergibt sich durch Auflösen nach T_{VS} die Gleichung der korrekt eingestellten Heizkurve HK_{opt}:

$$T_{VS} = ((T_{RS} - T_A)\, s + h)^{1/\gamma} + T_{RS} \tag{10}$$

Ausgehend von dieser Gleichung wählen wir für eine beliebig eingestellte Heizkurve HK den Ansatz

$$T_{VS} = ((T_{RS} - T_A)\, \bar{s} + \bar{h})^{1/\gamma} + T_{RS} \tag{11}$$

wobei $\bar{s}$ und $\bar{h}$ zwei Einstellparameter[3] sind. Diese beiden Parameter nennen wir «Steilheit» und «Höhe» der Kurve, weil sie für $\gamma = 1$ diese Bedeutung haben. Diese beiden Parameter $\bar{s}$ und $\bar{h}$ nehmen im Falle der korrekt eingestellten Heizkurve HK_{opt} die folgenden Werte an:

$$\bar{s} = \bar{s}_{opt} = s \tag{12a}$$

$$\bar{h} = \bar{h}_{opt} = h \tag{12b}$$

Beim Entwurf eines automatischen Einstellverfahrens geht es nun darum, einen Algorithmus zu finden, der die Parameter $\bar{s}$ und $\bar{h}$ so verändert, dass sie schliesslich in die Nähe von $\bar{s}_{opt}$ und $\bar{h}_{opt}$ kommen. Anhand zweier Beispiele wird im folgenden gezeigt, dass dabei wieder auf zwei grundsätzlich verschiedene Arten vorgegangen werden kann.

[3] Die Striche über $\bar{s}$ und $\bar{h}$ unterscheiden die Parameter der Heizkurve von denen der Systemkurve.

3.2 Verfahren 3

Die Aufgabenstellung soll hier als Reglerentwurfsproblem betrachtet werden. Eine Möglichkeit besteht darin, das Verfahren 1b zu automatisieren. Dabei sollen aber noch einige Verfeinerungen vorgenommen werden. Die Grundidee von Verfahren 1b ist die, bei hohen Aussentemperaturen nur die Höhe der Heizkurve zu verstellen und bei tiefen Aussentemperaturen nur die Steilheit. Es soll hier entsprechend $\bar{h}$ und $\bar{s}$ verstellt werden. Anstatt dass aber nur immer ein Parameter gleichzeitig verstellt wird, sollen beide verstellt werden, jedoch mit verschiedener Gewichtung: Bei hohen Aussentemperaturen soll der Korrektur von $\bar{h}$ grösseres Gewicht gegeben werden und bei tiefer Aussentemperatur jener von $\bar{s}$.

Auf diese Weise kann man zum Beispiel folgenden Algorithmus erhalten:

$$e(t_k) = T_{RS}(t_k) - T_R(t_k) \tag{13a}$$

$$\bar{h}(t_k) = \bar{h}(t_{k-1}) + v_1(t_k)\, \frac{T_A(t_k) + 15\,°C}{35\,°C}\, e(t_k) \tag{13b}$$

$$\bar{s}(t_k) = \bar{s}(t_{k-1}) + v_2(t_k)\, \frac{T_A(t_k) - 20\,°C}{-35\,°C}\, e(t_k) \tag{13c}$$

wobei $v_1(t_k)$ und $v_2(t_k)$ abnehmende Zahlfolgen sind. t_k sind dabei die Zeitpunkte, zu denen T_A und T_R gemessen und zu denen die Parameterwerte $\bar{h}$ und $\bar{s}$ korrigiert werden.

Die Formeln (13) stellen nun das Gerüst eines möglichen automatischen Einstellverfahrens dar. Um den vollständigen Algorithmus zu erhalten, müssen noch die Zahlfolgen $v_1(t_k)$ und $v_2(t_k)$ festgelegt werden. Weiter muss überlegt werden, wie der Heizungsregler die Zeitpunkte t_k bestimmen soll. Es empfiehlt sich auch, Zusatzmassnahmen zu ergreifen, wie z.B. die Begrenzung des Variationsbereichs von Variablen wie $\bar{h}(t_k)$ und $\bar{s}(t_k)$.

Auch wenn der Entwerfer einmal für ein Grundgerüst wie z.B. die Formeln (13) die Wahl getroffen hat, gibt es also noch viele Entscheidungen zu treffen, bis der vollständige Algorithmus festgelegt ist. Dabei müssen diese Entscheidungen so gefällt werden, dass das resultierende Einstellverfahren bei möglichst allen Anwendungsfällen ohne menschliche Eingriffe funktioniert. Dies umfasst schlecht und gut isolierte Gebäude, leicht gebaute (schnell reagierende) und schwergebaute (träg reagierende) Gebäude sowie solche mit leicht und solche mit stark variierender Fremdwärme q_I. Um gute Entscheide zu fällen, kommt der Entwerfer nicht darum herum, umfangreiche Simulationsstudien durchzuführen, und zwar mit einem Simulationsmodell, das alle die erwähnten Gesichtspunkte berücksichtigt und somit wesentlich komplizierter ist als das Modell der Gl. (8).

3.3 Verfahren 4

Das Problem soll hier nicht als Reglerentwurfs-, sondern als ein Identifikations- oder Schätzproblem aufgefasst werden. Es geht darum, einen Estimator zu entwerfen, der die beiden Parameter s und h des mathematischen Modells (9) des zu steuernden Systems schätzt. Die Schätzwerte, die dieser Estimator zur Zeit t_k ausgibt, werden mit $\hat{s}(t_k)$ und $\hat{h}(t_k)$ bezeichnet und anstelle der unbekannten Parameter s und h in die Heizkurve (11) eingesetzt:

$$\bar{s}(t_k) = \hat{s}(t_k) \tag{14a}$$

$$\bar{h}(t_k) = \hat{h}(t_k) \tag{14b}$$

Für den Estimator gibt es unendlich viele Möglichkeiten, von denen im folgenden eine herausgegriffen wird.

Unter den Parameterschätzverfahren für adaptive Systeme werden die sogenannten Lip-Verfahren, wobei «Lip» für «*L*inear *i*n den *P*arametern» steht, besonders häufig angewandt und in der Fachliteratur diskutiert. Sie basieren auf einem linearen Gleichungssystem für den zu schätzenden Parametervektor $\boldsymbol{p}$, dem sukzessive neue Gleichungen beigefügt werden können. Die zum Zeitpunkt t_k zugefügte Gleichung wird für die folgende Diskussion wie folgt geschrieben:

$$b_k = \boldsymbol{a}_k^T \cdot \boldsymbol{p} \tag{15}$$

wobei b_k und die Komponenten des Vektors $\boldsymbol{a}_k$ Koeffizienten sind, die der Estimator zum Zeitpunkt t_k ($t_1, t_2 \ldots$ ist eine Sequenz aufeinanderfolgender Zeitpunkte) aufgrund der ihm zugeflossenen Information bestimmen kann. Die Gleichungen bildet man aufgrund der A-priori-Information über die Strecke, und sie müssen mindestens approximativ gültig sein. Von den vielen in der Literatur vorgeschlagenen Lip-Parameterschätzverfahren, z.B. [3; 4] sollen hier lediglich fünf erwähnt werden, zwei für konstante Parameter:

- Stochastische Approximation,
- rekursive Methode der kleinsten Quadrate (Recursive least square, RLS),

und drei für variierende Parameter:

- Gradientenverfahren,
- RLS mit exponentiellem Vergessen,
- Kalmanfilter (wobei das Verhalten der Parameter als Random-walk-Modell dargestellt ist).

Alle diese Verfahren besitzen mehr oder weniger viele Entwurfsparameter, deren Werte gewählt werden müssen. Diese Wahl ist zum Teil schwierig, geht es doch wieder darum, dass der Estimator in möglichst allen Anwendungsfällen ohne menschlichen Eingriff funktioniert. Um eine Vorstellung über die Art dieser Parameterschätzverfahren zu vermitteln, sollen die Formeln für das RLS-Verfahren mit exponentiellem Vergessen explizit gegeben werden:

$$\hat{\boldsymbol{p}}_k = \hat{\boldsymbol{p}}_{k-1} + \frac{\boldsymbol{P}_{k-1}\,\boldsymbol{a}_k(b_k - \boldsymbol{a}_k^T\,\hat{\boldsymbol{p}}_{k-1})}{\lambda^2 + \boldsymbol{a}_k^T\,\boldsymbol{P}_{k-1}\,\boldsymbol{a}_k} \tag{16a}$$

$$\boldsymbol{P}_k = \frac{1}{q}\left(\boldsymbol{P}_{k-1} - \frac{\boldsymbol{P}_{k-1}\,\boldsymbol{a}_k\,\boldsymbol{a}_k^T\,\boldsymbol{P}_{k-1}}{\lambda^2 + \boldsymbol{a}_k^T\,\boldsymbol{P}_{k-1}\,\boldsymbol{a}_k}\right) \tag{16b}$$

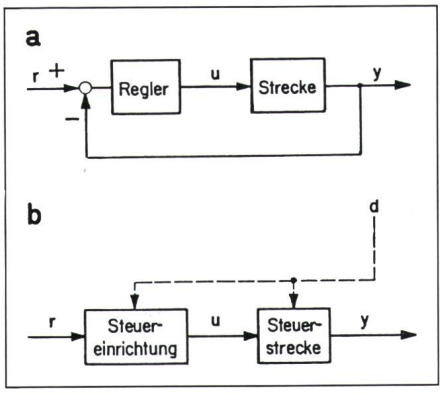
$\hat{\boldsymbol{p}}_k$ ist die Schätzung von $\boldsymbol{p}$, die der Parameterestimator zur Zeit t_k bestimmt. $\boldsymbol{P}_k$ ist eine symmetrische n x n-Matrix (n = Anzahl Elemente von $\boldsymbol{p}$), welche etwas über die Genauigkeit der Schätzung aussagt. Sie wird Kovarianzmatrix genannt. Die beiden Formeln müssen zu jedem Zeitpunkt t_k vom Parameterestimator ausgewertet werden. Entwurfsparameter sind λ, q sowie die Anfangswerte $\hat{\boldsymbol{p}}_0$ und $\boldsymbol{p}_0$. Der Erinnerungsfaktor q z.B. muss $0 < q \leqslant 1$ erfüllen und wird um so kleiner gewählt, je schneller alte Daten vergessen werden sollen.

Zur Illustration wird nun gezeigt, wie dieses RLS-Verfahren mit exponentiellem Vergessen auf das Modell (9) mit den Parametern s und h angewandt werden kann. Man erkennt, dass dieses Modell linear in den Parametern s und h ist und somit die Lip-Schätzverfahren anwendbar sind. Die Gleichung (14) ist in unserem Fall also durch (9) gegeben. Daraus folgt

$$b_k = (T_{VS}(t_k) - T_R(t_k))^{\gamma} \tag{17a}$$

$$\boldsymbol{a}_k^T = [(T_R(t_k) - T_A(t_k)), 1] \tag{17b}$$

$$\hat{\boldsymbol{p}}_k = \begin{bmatrix} \hat{s}\,(t_k) \\ \hat{h}\,(t_k) \end{bmatrix} \tag{17c}$$



Figur 8 Strukturen von Regelsystemen und Steuerketten

a Regelsystem
b Steuerkette

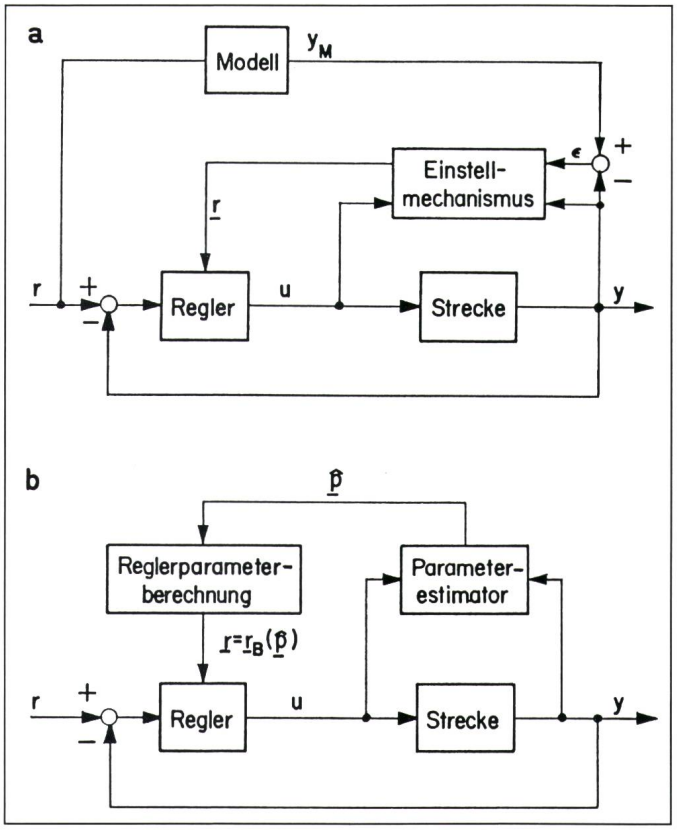
Die Formeln (16), (17) und (14) bilden wie (13) nur das Gerüst des Einstellalgorithmus. Zu diesem Gerüst kommen wieder ein Verfahren zur Bestimmung der Zeitpunkte t_k und Zusatzmassnahmen wie Begrenzungen von Variablen.

3.4 Klassifikation der besprochenen Verfahren

Abschliessend sollen wie in [5] noch einige Überlegungen angestellt werden, wie diese Verfahren in die Theorie der adaptiven Steuerungen und Regelungen einzuordnen sind. Meist wird dort zwischen Regelsystemen und Steuerketten unterschieden (Fig. 8). y ist die zu regelnde oder zu steuernde Grösse und r deren Sollwert. u ist die Steuer- oder Stellgrösse, d ist eine allfällig vorhandene und durch einen Sensor erfasste Störgrösse. In der Literatur über adaptive Systeme in der Automatik (z.B. [6]) werden vor allem zwei Haupttypen behandelt. Der 1. Haupttyp ist das *Modelladaptive Regelsystem* (Model reference adaptive control, MRAC). Das gewünschte Verhalten des zugrunde gelegten Regelkreises zwischen Führungsgrösse r und Regelgrösse y ist durch ein Modell spezifiziert, das als Komponente in den Adaptivregler eingeht (Fig. 9a). Das Hauptproblem beim Entwurf eines MRAC besteht darin, einen Einstellmechanismus zu finden, der den Reglerparametervektor $\boldsymbol{r}$ so verändert, dass die Abweichung der Regelgrösse y vom Modellausgang y_M klein ist. Der 2. Haupttyp ist in (Fig. 9b) dargestellt. Er wird häufig *Selbsteinstellender Regler* (Selftuning regulator, STR) genannt, obwohl dieser Begriff oft auch in einem weiteren Sinn gebraucht wird. Diesem Typ liegt die Annahme zugrunde, dass die Streckendynamik durch einen Parametervektor $\boldsymbol{p}$ (z.B. Vektor, dessen Elemente die Koeffi-

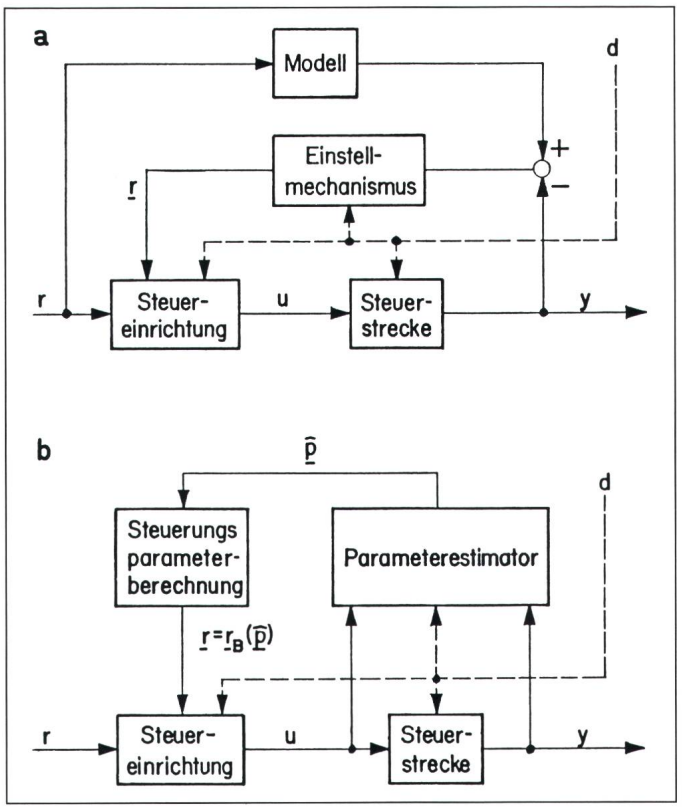
Figur 9 Haupttypen von adaptiven Regelsystemen

a Modelladaptives Regelsystem (MRAC)
b Selbsteinstellendes Regelsystem (STR)



zienten der Übertragungsfunktion $G(s)$ bzw. $G(z)$ der Strecke sind) beschrieben werden kann und dass für den Fall eines zeitlich konstanten $\boldsymbol{p}$ ein Rechenverfahren zur Berechnung der Reglerparameter $\boldsymbol{r}$, im folgenden durch die Abbildung $\boldsymbol{r} = \boldsymbol{r}_B(\boldsymbol{p})$ gekennzeichnet, vorliegt. Der Adaptivregler (Fig. 9b) besteht nun neben dem zugrunde gelegten Regelkreis aus einem Parameterestimator, der aus u und y laufend eine Schätzung $\hat{\boldsymbol{p}}$ des Parametervektors $\boldsymbol{p}$ vornimmt und dem Element «Reglerparameterberechnung» zuführt. Dieses berechnet daraus $\boldsymbol{r} = \boldsymbol{r}_B(\hat{\boldsymbol{p}})$. Es tut also so, als ob die Schätzung $\hat{\boldsymbol{p}}$ der wahre Parameter $\boldsymbol{p}$ wäre (Certainty equivalence control). Oft wird noch ein 3. Haupttyp erwähnt, nämlich das *Gain scheduling*, das aber meist als Spezialfall des 2. Hauptyps aufgefasst werden kann. Den erwähnten Haupttypen ist gemeinsam, dass ihnen allen ein Regelsystem der in Figur 8a dargestellten Art zugrunde liegt.

Wo sind nun die automatischen Einstellverfahren 3 und 4 in diesem Rahmen einzuordnen? Dazu wird der Signalflussplan der witterungsgeführten Vorlauftemperaturregelung in Figur 2 betrachtet. Darin erkennt man das Vorlauftemperaturregelsystem mit der Führungsgrösse T_{VS} als Eingang und der Regelgrösse T_R als Ausgang. Da er die in Figur 8a dargestellte Struktur hat, handelt es sich um ein Regelsystem im strengen Sinne. Da der PI-Regler jedoch fest eingestellt ist, ist dieses Regelsystem nicht adaptiv. Vergleicht man Figur 2 mit Figur 8b, so erkennt man, dass man das Gesamtsystem auch als Steuerkette auffassen kann, mit der Heizkurve HK als Steuereinrichtung und dem Vorlauftemperaturregelsystem als Steuerstrecke, die übrigens nichtlinear ist. T_{RS} entspricht dabei dem Sollwert r, T_{VS} der Steuergrösse u, T_R der Istgrösse y und T_A der mit einem Sensor erfassten Störgrösse d. Falls das System mit einer Vorrichtung zur automatischen Einstellung der Heizkurve versehen ist, kann es also als adaptive Steuerkette aufgefasst werden. Bei den adaptiven Steuerketten können nun aber in Analogie zu den adaptiven Regelsystemen zwei Haupttypen definiert werden: die *Modelladaptive Steuerkette* in Figur 10a und die *Selbsteinstellende Steuerkette* in Figur 10b. Es erweist sich nun, dass das Einstellverfahren 3 eine modelladaptive Steuerkette gibt, mit (11) als Steuereinrichtung, der Übertragungsfunktion $G(z) = 1$ als Modell und den Gleichungen (13) als Einstellmechanismus. Im Gegensatz dazu gibt das Einstellverfahren 4 eine Selbsteinstellende Steuerkette, wobei (11) die Steuereinrichtung beschreibt, (14) den Block «Steuerungsparameter-Berechnung» und die Formeln (16) und (17) den Parameterestimator.



Figur 10
Haupttypen von adaptiven Steuerketten
a Modelladaptive Steuerkette
b Selbsteinstellende Steuerkette

Diese Feststellungen können natürlich verallgemeinert werden. Wenn der Entwurf eines Einstellverfahrens als Reglerentwurfsproblem aufgefasst wird, erhält man eine modelladaptive Steuerkette (Fig. 10a). Fasst man es hingegen als ein Identifikations- oder Estimationsproblem auf, so resultiert eine Selbsteinstellende Steuerkette (Fig. 10b). Ohne weiter darauf einzugehen, soll hier noch auf die Möglichkeit hingewiesen werden, dass die beiden Vorgehensweisen zum Entwurf eines Einstellverfahrens - obwohl ihnen ganz verschiedene Ideen zugrunde liegen - auf algebraisch identische Algorithmen führen. Das ist eine Feststellung, die schon für adaptive Regelsysteme gemacht wurde [6].

Literatur

[1] *W. Gasser:* Moderne Heizungsregelsysteme. Bull. SEV/VSE 76(1985)11, S. 652...656.
[2] *J. Tödtli:* Optimierungsideen für den Betrieb von HLK-Anlagen. Informationstagung des SEV und 55. Tagung der SGA «Regeltechnik im Energiehaushalt von Gebäuden», 29. März 1984. Zürich, SEV, 1984; S. 31...49.
[3] *R. Isermann:* Prozessidentifikation, Identifikation und Parameterschätzung dynamischer Prozesse mit diskreten Signalen. Berlin/Heidelberg, Springer-Verlag, 1974.
[4] *H. Unbehauen, B. Göhring* und *B. Bauer:* Parameterschätzverfahren zur Systemidentifikation. München, Oldenbourg-Verlag, 1974.
[5] *J. Tödtli:* Adaptive Steuerung und Regelung nichtlinerarer Strecken, Landis-und-Gyr-Mitteilungen 32(1985)2, S. 2...7.
[6] *K.J. Aström:* Theory and applications of adaptive control—a survey. Automatica 19(1983)5, p. 471...486.