

Zur Anlaufrechnung bei der Kühllastberechnung nach dem EDV-Verfahren der VDI 2078 –Abstract-

Im EDV-Verfahren der VDI 2078 [1] werden die Begriffe Anlauf- und Einschwingrechnung verwendet. Diese etwas undeutlich beschriebenen Definitionen führen immer wieder zu Rückfragen und Verständnisschwierigkeiten. In diesem Beitrag soll die grundlegende Gleichung des EDV-Verfahrens anhand eines einfachen Modells und die damit verbundenen Anforderungen an die Durchführung der Rechnung verdeutlicht werden.

Das EDV-Verfahren ist grundsätzlich für beliebige Belastungsverläufe geeignet. In der VDI 2078 werden jedoch nur Tagesgänge der Außenklimadaten angegeben, die beim EDV-Verfahren maximal 14 Tage andauern sollen. Es handelt sich hierbei um ein zeitlich begrenztes Tagesgangverfahren, welches sich durch eine Abhängigkeit vom gewählten Startwert auszeichnet. Diese Abhängigkeit wird im folgenden Beitrag näher untersucht.

Einführung

Bis zur Ausgabe 1977 der VDI 2078 wurden nur rein periodische Belastungen betrachtet, die unendlich oft wiederkehren. Die Problematik der Anlaufrechnung besteht bei dieser sog. quasi-stationären Methode nicht. Die 24 Ergebnisse eines Tages stellen den eingeschwungenen Zustand dar, der sich nicht mehr verändert und in einer Einschwingrechnung mit sich wiederholenden Tagesgängen des Außenklimas ermittelt wird. Das Kurzverfahren der aktuellen VDI 2078 stellt ebenfalls den rein periodischen Fall dar.

Durch Erkenntnisse in der Meteorologie wurde bekannt, dass eine Schönwetterperiode nur max. 14 Tage andauert. Auch durch die Zerlegung eines Test-Reference-Years (TRYs) in seine spektralen Komponenten, lässt sich ein deutliches Abheben der Amplitude bei der 14-Tage-Periode nachweisen.

Neben weiteren Erfordernissen einer realen Betriebsweise, z.B. die tägliche Abschaltung der RLT-Anlage, wurde mit der Ausgabe des Gründruckes zur aktuell gültigen VDI 2078 im Jahr 1990 ein neues Rechenverfahren vorgestellt.

Die Berechnung erfolgt bei diesem neuen sog. EDV-Verfahren mittels rekursiver Filter, bei denen sowohl die zurückliegenden Aktionswerte als auch die zurückliegenden Reaktionswerte gewichtet aufaddiert werden.

$$y_k = \sum_{m=0}^{Na-1} a_m u_{k-m} + \sum_{n=1}^{Nb} b_n y_{k-n} = a_0 u_k + a_1 u_{k-1} + a_2 u_{k-2} + \dots + b_1 y_{k-1} + b_2 y_{k-2} + \dots \quad (1)$$

$y_k, y_{k-1}, y_{k-2}, \dots$ Reaktionswerte (Teil-Kühllast) zum Zeitpunkt $k \Delta t$ und die N_b zurückliegenden Reaktionswerte

$u_k, u_{k-1}, u_{k-2}, \dots$ Aktionswerte (Sonnenstrahlung, Außentemperatur, usw.) zum Zeitpunkt $k \Delta t$ (z.B. als Mittelwert der letzten Stunde) und die N_a-1 zurückliegenden Aktionswerte

Δt Zeitschrittweite, in der VDI 2078 [1] $\Delta t = 1$ Stunde

k Laufzähler für die diskreten äquidistanten Zeitschritte

N_a Anzahl der a-Filterkoeffizienten

N_b Anzahl der b-Filterkoeffizienten (Filterordnung)

Die a- und b-Koeffizienten ergeben sich aus der Approximation einer normierten Übergangsfunktion, welche mit einem hochwertigen Simulationsprogramm ermittelt wurde. In der VDI 2078 [1] wurden die normierten Filterkoeffizienten (dort als Gewichtungsfaktoren bezeichnet) für alle Aktionen einheitlich mit $N_a = 4$ und $N_b = 2$ angegeben. In der korrigierten Fassung [2] variiert die Anzahl der Koeffizienten um eine höhere Genauigkeit zu erreichen. Die Maximalwerte betragen hier $N_a = 7$ und $N_b = 4$. Für die

Durchführung der Berechnung bedeutet das eine Rückwärtsbetrachtung der Reaktionswerte von max. 4 Stunden. Im Fall einer Abweichung der Ist-Raumlufttemperatur vom Sollwert, z.B. bei der Berechnung der sich einstellenden Raumlufttemperatur ohne Anlagenleistung, können sich nach [2] max. die letzten 5 Stunden auf das Ergebnis zur Stunde k auswirken. Zu Beginn der Rechnung ($k = 1$) sollten daher geeignete Startwerte vorliegen, die in einer sog. Anlaufrechnung ermittelt werden können.

Die Besonderheiten dieser Anlaufrechnung sollen anhand eines stark vereinfachten Modells erklärt werden.

Ein einfaches Modell

Anhand eines einfachen Übertragungsmodells (Speicherglied 1. Ordnung) soll die obige Gleichung beispielhaft angewendet werden. Speicherglieder 1. Ordnung treten z.B. dann auf, wenn die Wärmeleitfähigkeit der Bauteile sehr hoch ist. Der Vorteil dieses Modells ist, dass die Übergangsfunktion und die a - und b -Filterkoeffizienten analytisch bestimmbar sind. D.h., ein Simulationsprogramm und eine Approximation werden nicht benötigt.

Aus dem rekursiven Filter für ein Speicherglied 1. Ordnung läßt sich ableiten, dass eine Differenz im Ergebnis für die Teil-Kühllast Δy_k bezogen auf den Unterschied im gewählten Startwert Δy_0 wie folgt auswirkt

$$\frac{\Delta y_k}{\Delta y_0} = e^{-\frac{k \Delta t}{T}} \quad (2)$$

Einfluss des Startwertes

Der Gleichung ist zu entnehmen, dass die Wichtung des Startwertes y_0 mit zunehmender Zeit abnimmt. Im eingeschwungenen Zustand wird $k \Delta t$ sehr groß, der Faktor geht gegen Null und der Startwert hat keinen Einfluss mehr.

Je höher die Zeitkonstante T ist, desto stärker wird der Startwert gewichtet. Als Zeitkonstante wird nun die Summenzeitkonstante des Typ-Raumes nach [2] eingesetzt. Danach steuert die maximale Zeitkonstante in [2, Tabelle 4] nach Ablauf von 14 Tagen nur noch einen geringen Anteil zum Endergebnis bei.

Beispiel: Zeitkonstante $T = 35,7$ h, $k \Delta t = 14$ Tage \times 24 h = 336 h $\rightarrow \frac{\Delta y_k}{\Delta y_0} = e^{-\frac{336}{35,7}} = 8,2 \cdot 10^{-5}$

D.h., auf eine Anlaufrechnung kann für alle Typ-Räume verzichtet werden. Es genügt daher, alle Aktions- und Reaktionswerte in *Glg. (1)* für $k < 1$ auf Null bzw. auf Bezugstemperatur zu setzen.

Eine Ausnahme bildet die Aktion TL, wenn durch Minderleistung der Anlage der Ist-Wert vom Soll-Wert abweicht, z.B. beim unterbrochenen Betrieb (Nachtabstaltung) oder bei der frei schwingenden Raumlufttemperatur mit ausgeschalteter RLT-Anlage. Dieser Fall unterscheidet sich von den aufgeprägten Soll-Wertänderungen der Raumlufttemperatur, bei der die Anlage weiterhin in Betrieb ist.

Eine analytische Behandlung des nicht durchgehenden Anlagenbetriebes ist zu aufwendig, da über die Berechnung der sich einstellenden Ist-Raumlufttemperatur alle anderen Aktionsgrößen mitwirken (vgl. VDI 2078 [1, Glg. 7.24 und 7.19]). Ein Ausweg findet sich in der Festlegung der Raumlufttemperatur statt der Kühllast als Reaktionsgröße (Alternativmodell). Auch hierfür lassen sich Frequenzgänge berechnen, aus denen sich eine Summenzeitkonstante ergibt. Für die Typ-Räume XL...S und den verschiedenen Aktionsgrößen ergeben sich dabei Summenzeitkonstanten von 40 bis 150 h. Unterschiede

im Startwert werden für diesen Sonderfall nach 14 Tagen mit maximal ca. 11 % gewichtet und sind daher nicht vernachlässigbar.

Beispiel: Zeitkonstante $T = 150$ h, $k \Delta t = 14$ Tage $\times 24$ h = 336 h $\rightarrow \frac{\Delta y_k}{\Delta y_0} = e^{-\frac{336}{150}} = 0,106$

Anlaufrechnung

Da der Abbruch der Berechnung vor dem Erreichen des eingeschwungenen Zustandes vom gewählten Startwert beeinflusst werden kann, gibt die VDI 2078 einige Hinweise zum Erhalt realistischer Startwerte für die Reaktionswerte. Vor dem eigentlichen Einschwingvorgang mit Abbruch nach 14 Tagen unter Verwendung der extremen Klimadaten aus der VDI 2078 (Schönwetterperiode) wird eine Anlaufrechnung mit abgemilderten Klimadaten und Belastungen empfohlen.

Als Klimadaten sollen Außenlufttemperaturen für trübe Tage aus der DIN 4710 verwendet werden. Die Sonnenstrahlung ist durch Nullsetzen auszuschalten. Außerdem sind keine konvektiven inneren Lasten in Ansatz zu bringen. Der Einschwingvorgang für die Anlaufrechnung ist ebenfalls nach 14 Tagen abzubrechen.

Ob diese Annahmen zu realistischen Startwerten für die Schönwetterperiode führen, dürfte sehr fraglich sein. Zu Bedenken ist auch, dass für die Aktionen „aufgeprägte Strahlung“ und „konvektive innere Lasten“ eine Zuschaltung erst zu Beginn der Schönwetterperiode erfolgt. D.h., die Startwerte für diese Aktionen sind zu Null angenommen. Im Alternativmodell „Reaktion ist Raumlufttemperatur“ mit seinen hohen Zeitkonstanten wurde oben nachgewiesen, dass damit ein nicht unerheblicher Einfluss des Startwertes verbleibt.

Zusammenfassung

Mit dem EDV-Verfahren der VDI 2078 ist es möglich, auch nicht periodische instationäre Vorgänge zu berechnen. Man könnte daher vom bisherigen Tagesgangverfahren abrücken und die Erkenntnis umsetzen, dass Schönwetterperioden nur maximal 14 Tage andauern. Die in der VDI 2078 zur Verfügung gestellten Klimadaten umfassen jedoch nur Tagesgänge der Außenlufttemperatur und Sonnenstrahlung. Somit kam man überein, ein Tagesgangverfahren mit Wiederholungsbegrenzung einzuführen.

In diesem Beitrag wurde anhand eines vereinfachten Übertragungsmodells nachgewiesen, dass für den durchgehenden Anlagenbetrieb keine Bedenken gegen eine 14-malige Wiederholung der Außenklima-Tagesgänge bestehen. Da die Startwerte nach 14 Tagen Einschwingrechnung einen vernachlässigbaren Einfluss haben, können sie auch allesamt auf Null bzw. Bezugstemperatur gesetzt werden.

Für den unterbrochenen Anlagenbetrieb sind jedoch wesentlich höhere Zeitkonstanten wirksam. Man gewinnt diese Zeitkonstanten aus einem Alternativmodell zum EDV-Verfahren der VDI 2078, bei dem die Reaktionsgröße nicht die Kühllast, sondern die Raumlufttemperatur ist. Die hohen Zeitkonstanten verstärken die Wichtung des Startwertes nach $k \Delta t$ Stunden. Folglich wäre nur für diesen Fall eine Anlaufrechnung mit abgemilderten Klimadaten zum Erhalt realistischer Startwerte für die Schönwetterperiode notwendig.

Die VDI 2078 bietet für die Anlaufrechnung Festlegungen bezüglich des Außenklimas und der inneren Belastungen an, die sehr zweifelhaft sind. Insbesondere könnte die Annahme der Abwesenheit von innerer Strahlungs- und konvektiver Belastung die Anlaufrechnung ad absurdum führen. Unverständlich ist auch, warum die Anlaufrechnung nach 14 Tagen abzubrechen ist. Da es sich hierbei um ein „normales“ Klima handeln soll, wäre doch der startwertunabhängige eingeschwungene Zustand vorzuziehen.

Der unterbrochene Anlagenbetrieb stellt den Regelfall dar, für den jedoch eine realistische Anlaufrechnung aufgrund mangelnder Klimadaten nicht möglich ist. Die Problematik verschärft sich,

wenn neben der Nachtabschaltung noch eine Wochenendabschaltung berücksichtigt werden soll. Dieser Betrieb ist sehr realistisch und würde wahrscheinlich dazu führen, dass montags ein Kühllastmaximum auftritt, welches höher ist, als an den übrigen Tagen. Für die Einschwingrechnung erhöht sich allerdings die Periodenlänge mit veränderlichen Randbedingungen auf eine Woche. Nach zweimaligem Durchlauf müsste dann abgebrochen werden, um das 14-Tage-Kriterium einzuhalten. Spätestens hier dürfte das Tagesgangverfahren mit Wiederholungsbegrenzung nicht mehr geeignet sein.

Es wird daher vorgeschlagen, bis zur Festlegung auf geeignete Klimadaten sowohl für die Schönwetterperiode als auch für die Anlaufrechnung ausschließlich bis zum eingeschwungenen Zustand zu rechnen. Die VDI 2078 selbst beinhaltet eine solche Aussage im Kapitel 7.12, Absatz 4, Satz 1.

Ein Kühllastprogramm sollte die Möglichkeit bieten, sowohl den eingeschwungenen Zustand, als auch den Zustand nach einer vorgebbaren Anzahl von Tagen zu berechnen. Sollte sich ein Unterschied zwischen einer 14-tägigen Berechnung und dem eingeschwungenen Zustand ergeben, wäre der Anwender zumindest gewarnt. Auf die Darstellung des Einschwingvorganges der Raumlufttemperatur, wie sie in der VDI 2078 in Bild 11 bis 13 und 15 enthalten sind, sollte aufgrund der mangelhaften Anlaufrechnung im Programm verzichtet werden.

Einen Ausweg aus der gesamten Problematik wäre durch die Verwendung von Test-Referenz-Jahren für extreme Witterungsverhältnisse gegeben. In [3] sind Klimadatensätze für drei real aufgetretene heiße Sommermonate enthalten. Die angekündigte Ergänzung dieser Arbeit wird praktisch verwertbare TRY's mit einem extremen Winter- und Sommerhalbjahr enthalten.

Literatur

- [1] **VDI 2078 Ausgabe Juli 1996** : Berechnung der Kühllast klimatisierter Räume (VDI-Kühllastregeln).
- [2] **Nadler, Norbert:**
Korrekturvorschläge zum EDV-Verfahren der VDI 2078.
Teil 1a: Algorithmen: HLH Bd. 54 (2003) Nr. 8, S. 59-66
Teil 1b: Algorithmen: HLH Bd. 54 (2003) Nr. 9, S. 62-66
Teil 2a: Vergleichsrechnungen: HLH Bd. 54 (2003) Nr. 10, S. 83-90
Teil 2b: Vergleichsrechnungen: HLH Bd. 54 (2003) Nr. 11, S. 75-78
- [3] **Christoffer, Jürgen; Deutschländer, Thomas; Webs, Monika:**
Test-Referenz-Jahre von Deutschland für mittlere und extreme Witterungsverhältnisse (TRY).
Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes, 2004