

Neuausgabe der VDI-Kühllastregeln -VDI 2078/1993-

Erläuterungen zum EDV-Verfahren

Gewidmet Dr. rer. nat. Matthias Jakob†

Dr.-Ing. Axel Jahn, Dipl.-Ing. Norbert Nadler, Dr.-Ing. Jianxiong Guo

In der Neuausgabe der VDI 2078 "Berechnung der Kühllast klimatisierter Räume (VDI-Kühllastregeln)" wird neben der Handrechenmethode (Kurzverfahren) erstmals ein EDV-Verfahren vorgestellt, welches die Algorithmen für die Bearbeitung auf einem Computer festlegt. Das wesentliche Unterscheidungsmerkmal des EDV-Verfahrens der Neuausgabe zur früheren Ausgabe der VDI-Richtlinie ist dabei die freie Vorgabe der zeitlichen Belastungsverläufe. Bisher konnte in der Kühllastberechnung nur mit festgelegten Belastungsverläufen und einer weitgehenden Übereinstimmung der Bauart gearbeitet werden. Es war z.B. nicht möglich, die Kühllast unter Berücksichtigung wandernder Schatten, unterbrochener Betriebsweise, begrenzter Kühlleistung und vom Sollwert abweichender Raumlufttemperatur mit ausreichender Genauigkeit zu ermitteln. Durch das EDV-Verfahren erfolgt eine Auftrennung in die vom Planer definierte Belastung und in das weiterhin von der Richtlinie vorgegebene thermisch-dynamische Verhalten des Baukörpers. Gegenüber der früheren Ausgabe sind in der neuen VDI 2078 zwei weitere Raumtypen hinzugekommen. Die bisherigen thermischen Bauschweren, Bauart I jetzt Raumtyp L und Bauart II jetzt Raumtyp M, wurden durch eine leichtere Bauart Raumtyp XL und eine schwerere Bauart Raumtyp S ergänzt.

Aufgabenstellung

Bei der Entwicklung des EDV-Verfahrens stand eine möglichst einfache und PC-taugliche Methode im Vordergrund. Im Hinblick auf eine Jahresrechnung sollte das Verfahren auch mit geringen Rechenzeiten und Speicherplätzen auskommen. Die geforderte Genauigkeit richtete sich nach der in der Praxis umsetzbaren Ausführung des Baukörpers, der Anlagen und nach den verfügbaren Eingabedaten. Das Verfahren erhebt nicht den Anspruch einer Computersimulation des Gebäudes. Insofern stellt es nur eine Ergänzung des Kurzverfahrens hinsichtlich der frei wählbaren Randbedingungen dar. Das vorrangige Ziel des EDV-Verfahrens ist weiterhin die Berechnung der Kühllast zur Anlagendimensionierung. Darüber hinaus wird eine Methode angegeben, mit der die sich einstellende Raumlufttemperatur bei begrenzter Kühlleistung für die Typräume ermitteln läßt.

Für einen exakten Übergang vom Zustand aufgeprägten Raumklimas zum freischwingenden Zustand sind die in den früheren Ausgaben der VDI 2078 verwendeten Verfahren nicht geeignet. Es ist daher ein Algorithmus erforderlich, der ausschließlich im Zeitbereich arbeitet.

Als besonders geeignet für die vorliegende Aufgabenstellung erwies sich die sog. Gewichtungsfaktorenmethode. Hierbei werden die zurückliegenden Ereignisse entsprechend ihrer Entfernung vom aktuellen Zustand entsprechend gewichtet. Durch die Verwendung einer rekursiven Form konnte die Anzahl der notwendigen Faktoren erheblich reduziert werden.

Die Gewichtungsfaktorenmethode läßt sich auf lineare, zeitinvariante Übertragungssysteme anwenden. Zum besseren Verständnis dieser wichtigen Voraussetzung wird zuerst kurz auf einige Begriffe der Systemtheorie eingegangen. Grundkenntnisse der Kühllastberechnung werden allerdings vorausgesetzt. Hier nicht näher erläuterte Bezeichnungen sind in der VDI 2078 enthalten.

Übertragungssysteme

Als Übertragungssystem wird hier ein technisches System definiert, bei dem eine Aktion am Eingang eine Reaktion am Ausgang des Systems bewirkt.

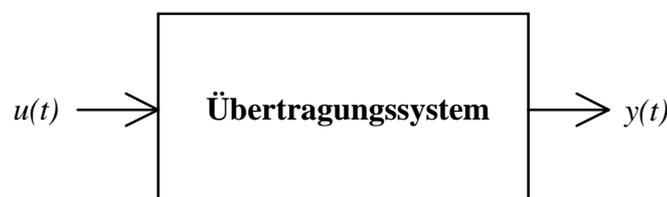


Bild 1: Übertragungssystem mit einer Eingangsgröße u und einer Ausgangsgröße y .

Liegt eine zeitlich veränderliche Eingangsgröße (Aktion) vor, spricht man von einer Eingangszeitfunktion $u(t)$. Als Reaktion erhält man eine entsprechende Ausgangszeitfunktion $y(t)$. Bei trägheitsbehafteten Übertragungsgliedern wird sich die Ausgangszeitfunktion durch eine Dämpfung und eine zeitliche Verschiebung von der Eingangszeitfunktion unterscheiden.

Als Übertragungssystem kann beispielsweise eine Außenwand betrachtet werden. Aktionsgröße wäre z.B. die Außentemperatur, Reaktionsgröße z.B. der Wärmestrom auf der Innenseite der Wand. Dämpfung und Zeitverschiebung zwischen Ein- und Ausgang werden durch die Fähigkeit des Systems zur Wärmespeicherung hervorgerufen. Neben der Masse und der spezifischen Wärmekapazität wird bei Wänden auch die Anordnung der Schichten, wie Wärmedämm- oder Luft-

schichten, einen wesentlichen Einfluß auf die Speicherfähigkeit ausüben (z.B. abgedeckte Speichermassen !).

Ein Beispiel für ein trägheitsloses Übertragungssystem ist z.B. durch einen ideal wärmegeämmten Lüftungskanal gegeben. Eine Temperaturänderung auf der Eingangsseite des Kanals würde ohne Dämpfung, aber mit einer gewissen Zeitverzögerung entsprechend der Luftgeschwindigkeit auf der Ausgangsseite spürbar werden. In diesem Fall spricht man von reinen Totzeitgliedern.

Aus beiden Beispielen ist schon zu erkennen, daß sich die Ausgangsgröße aus dem Berechnungsziel ergibt (Zielgröße z.B. Wärmestrom oder Temperatur). Dagegen wird die Eingangsgröße in der Regel durch vorhandene und die Zielgröße beeinflussende Belastungsgrößen bestimmt.

Reale, technische Übertragungssysteme werden meist durch mehrere Eingangs- und Ausgangsgrößen beschrieben (sog. Mehrgrößensysteme).

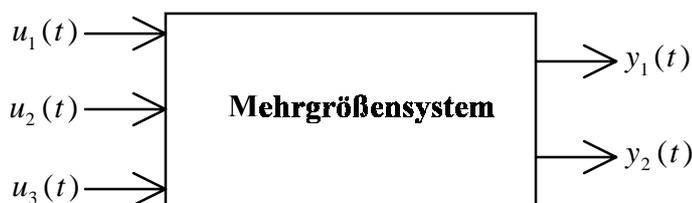


Bild 2: Übertragungssystem mit mehreren Eingangs- und Ausgangsgrößen.

Linearität und Zeitinvarianz

Eine wichtige Voraussetzung für eine mathematische Behandlung von Übertragungssystemen ist die Forderung nach Linearität und Zeitinvarianz. Für lineare Modelle existiert eine abgerundete Theorie. Sind sie zusätzlich zeitinvariant, so lassen sie sich auf relativ einfache Weise analytisch

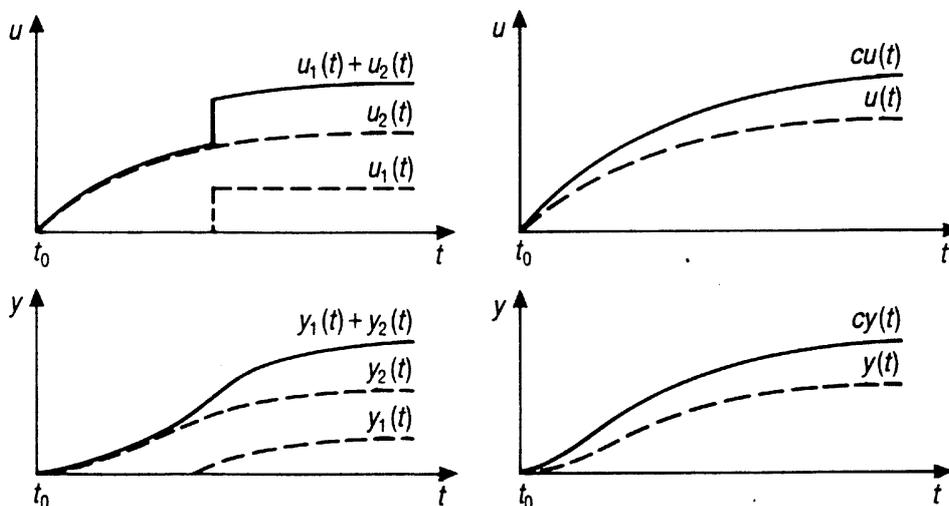


Bild 3: Erläuterung des Überlagerungsprinzips (links) und des Verstärkungsprinzips (rechts)

lösen.

Lineare Systeme kann man durch das sogenannte Überlagerungsprinzip (Superpositionsprinzip) und das Verstärkungsprinzip charakterisieren. Als *linear* bezüglich der Eingangsgrößen wird es dann bezeichnet, wenn man den Eingangszeitfunktionen

$$c_1 u_1(t) + c_2 u_2(t)$$

(c_1 und c_2 als Systemkoeffizienten) die Ausgangszeitfunktion

$$y(t) = c_1 y_1(t) + c_2 y_2(t)$$

zuordnen kann (*Bild 3*). D.h., wenn sich die Gesamtreaktion aus den Teilreaktionen additiv ermitteln läßt. Dabei könnten $u_1(t)$ und $u_2(t)$ z.B. zwei verschiedene Eingangsgrößen, oder auch zwei verschiedene harmonische Schwingungen einer Eingangsgröße darstellen. Die Erweiterung auf mehrere Eingangsgrößen ist ohne Einschränkung möglich.

Im allgemeinen erhält man bei realen Systemen nichtlineare Modelle, deren mathematische Behandlung wesentlich schwieriger ist und keine Aussagen von so großer Allgemeingültigkeit zuläßt. Unter speziellen Voraussetzungen ist es jedoch erlaubt, nichtlineare Systeme in einem gewissen Bereich um einen festgelegten Arbeitspunkt mit ausreichender Genauigkeit durch lineare Systeme zu ersetzen.

In der Gebäudethermodynamik und der Heiz- und Raumluftechnik werden vor allem die temperaturabhängigen Wärmeübergangskoeffizienten zu Nichtlinearitäten führen. Angesichts der Unsicherheiten bei der Ermittlung des konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten und der Spannweite der vorkommenden Temperaturen kann man das Rechnen mit mittleren Koeffizienten rechtfertigen.

Ein dynamisches System heißt *zeitinvariant*, wenn bei einer zeitlichen Verschiebung der Eingangszeitfunktion um ein beliebiges Intervall τ dieselbe Form der Ausgangszeitfunktion, verschoben um das gleiche Zeitintervall τ , erzeugt wird (vgl. *Bild 4*). Zeitinvarianz wird durch die Konstanz der Systemfaktoren (z.B. c_1 und c_2) erreicht. Sind solche Faktoren von der Zeit abhängig, muß man versuchen, für die zugehörigen Eingangsgrößen entsprechend andere Größen zu wählen.

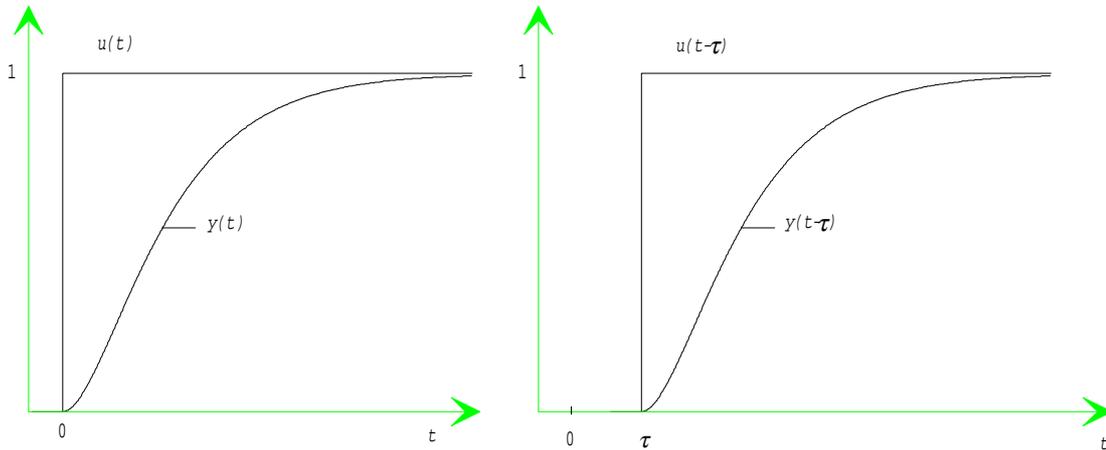


Bild 4 : Erläuterung der Zeitinvarianz

Soll z.B. die horizontale Direktstrahlung als Eingangsgröße verwendet werden, so ergibt sich eine Zeitvarianz bei der notwendigen Umrechnung der Strahlung auf die vertikale Wandfläche (vgl. auch VDI 2078)

$$I_{dir,vert.}(t) = \frac{\cos \eta(t)}{\sin h(t)} I_{dir,hor.}(t) = c(t) I_{dir,hor.}(t)$$

- $\eta(t)$ zeitabh. Einfallswinkel der Strahlung
- $h(t)$ zeitabh. Sonnenhöhe
- $c(t)$ Systemkoeffizient, hier zeitabhängig

Wählt man dagegen als Eingangsgröße z.B. die von der Wandfläche absorbierte Sonnenstrahlung, ist die Zeitinvarianz wieder hergestellt. Gleiche Überlegungen müssen auch für die im Raum wirksame Sonnenstrahlung angestellt werden. Hier ist die Winkelabhängigkeit des Transmissionsgrades von Glas zu beachten.

Für die Berechnung der Transmission durch Außenbauteile müssen daher als Eingangsgrößen bei den nichttransparenten Wänden die außen auftreffende Strahlung und für die transparenten Flächen die Strahlung hinter der Verglasung angegeben werden.

Das Problem der Zeitvarianz läßt sich oft durch eine günstige Auswahl der Eingangsgrößen umgehen. Jedoch erkennt man am vorstehenden Beispiel, daß die Anzahl der Eingangsgrößen damit erhöht wird. Anstelle der Globalstrahlung der Sonne wird die Sonnenstrahlung auf eine Außenwand und hinter der Verglasung für die jeweilige Flächenorientierung verwendet.

Bei linearen, zeitinvarianten Systemen läßt sich das Mehrgrößensystem "Raum" in lineare Eingrößensysteme zerlegen.

Faltungsprinzip und rekursive Filter

Praktische Bedeutung erhält die Linearität und Zeitinvarianz auch durch die Möglichkeit, die Reaktion eines Übertragungsgliedes auf ein beliebiges Eingangssignal aus bekannten Ausgangsfunktionen spezieller Testsignale (Sprung, Impuls, Schwingung usw.) umzurechnen.

Wählt man beispielsweise als Testsignal den Einheitssprung von 0 auf 1, erhält man als Reaktion die Übergangsfunktion. Der Impuls ist der differenzierte Sprung, folglich ist die Gewichtsfunktion die differenzierte Übergangsfunktion. Näheres hierzu siehe z.B. bei Jahn [1,2] und Dobesch-Sulanke [3].

Die Rechenvorschrift für kausale Systeme wird durch das sog. Faltungsintegral definiert

$$y(t) = \int_0^{\infty} g(\tau) u(t - \tau) d\tau \quad (1)$$

$y(t)$	Ausgangszeitfunktion
$u(t)$	Eingangszeitfunktion
$g(t)$	Gewichtsfunktion (Antwort auf einen Impuls)
t	Berechnungszeitpunkt

Der Begriff "Faltung" erklärt sich aus einer graphischen Lösung der vorstehenden Gleichung.

Im zeitdiskreten Modell wird die "Faltungssumme" verwendet

$$y_k = \sum_{i=0}^{\infty} g_i u_{k-i} = g_0 u_k + g_1 u_{k-1} + g_2 u_{k-2} + g_3 u_{k-3} + \dots \quad (2)$$

Die Zeitschrittweite ist dabei entsprechend der Aufgabenstellung und der Zeitkonstanten des Übertragungssystems zu wählen. Aus der Faltungssumme ist deutlich die Wichtung der zurückliegenden Eingangswerte zu erkennen. Die Wichtung erfolgt entsprechend der Auswirkung der älteren Eingangswerte auf den aktuellen Zeitpunkt.

Für träge Systeme kann die notwendige Anzahl von Gewichtsfaktoren sehr groß sein (bis zu 200 bei Räumen und 1 Stunde Zeitschrittweite). In der Systemtheorie haben sich daher die "rekursiven Filter" durchgesetzt, nicht zuletzt auch wegen der Einführung speicherprogrammierbarer Steuerungen. Dabei werden auch die früheren Werte des Ausgangssignals in die Berechnung des gegenwärtigen Wertes einbezogen. Der Hintergrund dieser Vorgehensweise ist, daß sich in den zurückliegenden

Ausgangswerten der größte Teil der historischen Entwicklung des Eingangssignalverlaufes widerspiegelt.

Als ausreichend genau erwies sich in der VDI 2078 die Einbeziehung von vier a-Faktoren für die Eingangswerte und zwei rekursiven b-Faktoren für die Ausgangswerte mit einer Abtastzeit von einer Stunde. Den Ausgangswert für die Stunde k erhält man durch

$$y_k = \sum_{m=0}^3 a_m u_{k-m} + \sum_{n=1}^2 b_n y_{k-n} = a_0 u_k + a_1 u_{k-1} + a_2 u_{k-2} + a_3 u_{k-3} + b_1 y_{k-1} + b_2 y_{k-2} \quad (3)$$

Rekursive Filter lassen sich sofort aus der Differenzengleichung, welche sich durch Zeitdiskretisierung aus der Differentialgleichung für Übertragungssysteme ergibt, ableiten. Durch die Wahl von zwei b-Faktoren wird das tatsächliche Übertragungsverhalten durch ein Modell 2. Ordnung approximiert.

Das thermische Übertragungssystem Raum

Der Aufbau des EDV-Verfahrens wurde unter der Maßgabe gewählt, mit möglichst wenigen Aktionsgrößen bei ausreichender Genauigkeit auszukommen. Entsprechend der früheren Ausgabe der VDI-Richtlinie und dem Kurzverfahren wird der Raum weiterhin als adiabat betrachtet. D.h., für die angrenzenden Räume wird eine gleichartige Temperaturverteilung angenommen. Ein Wärmetransport über die Innenwände ist bei dieser Annahme nicht vorhanden. Für die Wärmespeicherung werden aber Teile der Innenwand dem Raum zugeordnet. Die Berücksichtigung angrenzender Räume mit anderen Raumlufthtemperaturen erfolgt in der VDI 2078 näherungsweise durch eine Überlagerung der stationären Transmission. Bei nicht-adiabaten Räumen würde jede Nachbarraumtemperatur eine zusätzliche Aktionsgröße darstellen.

Für die vorliegende Aufgabe "Ermittlung der Kühllast in klimatisierten Räumen" wird die konvektive Wärmelast des Raumes (negative Kühllast) als Reaktionsgröße gewählt. Die Aktionsgrößen ergeben sich aus einer Wärmebilanz über den Raum. Zu den grundsätzlichen Aktionsgrößen zählen u.a.:

- die Außenlufttemperatur
- die Raumlufthtemperatur
- die absorbierte Sonnenstrahlung auf der Außenseite
- die absorbierte Strahlung innen
- die konvektiven Wärmebelastungen innen

Da die letztgenannte Aktionsgröße direkt, d.h. ohne Dämpfung und Zeitverschiebung, auf die Reaktionsgröße Wärmelast einwirkt, bezeichnet man sie in der Systemtheorie auch als "Durchgriff". Bei den konvektiven Wärmebelastungen wird noch in eine aufgeprägte konvektive Wärmebelastung (unabhängig von der Raumlufitemperatur) und einem konvektiven Wärmepotential (abhängig von der Raumlufitemperatur) unterschieden. Ein stationärer Transmissionswärmestrom über die Innenwände wird dem konvektiven Wärmepotential zugerechnet.

Die anderen Aktionsgrößen wirken auf die Außen- bzw. Innenwände und unterliegen damit der Wärmespeicherung, für die eine Dämpfung und Zeitverschiebung berücksichtigt werden muß. Letztlich wird dadurch immer die maximale Kühllast verringert, sofern die Aktionsgrößen zeitveränderlich sind.

Da der Transmissionsgrad von Fensterglas vom Einfallswinkel der Sonnenstrahlung und damit von der Zeit abhängig ist, wird zum Erhalt der Zeitinvarianz als Aktionsgröße die Sonnenstrahlung hinter den Scheiben verwendet. Weiterhin muß eine konstante Aufteilung der Strahlung auf die Raumumschließungsflächen gefordert werden. Dies ist nach Messungen von Todorovic [4] bei vorgezogenem Sonnenschutz und durch die Reflexion der Strahlung an den Innenflächen zulässig.

Zur Berücksichtigung der Möblierung im Raum wird nur ein Teil der einfallenden Strahlungsleistung den Wänden aufgeprägt. Der Rest wird der konvektiven Wärmebelastung zugeschlagen, siehe Masuch [5].

Neben der Sonnenstrahlung enthält die Aktionsgröße "absorbierte Strahlung innen" auch alle anderen Strahlungsquellen im Raum, z.B. Beleuchtung, Personen, Maschinen und gesteuerte Heizflächen. Vereinfachend wird die letztgenannte langwellige Strahlungsquelle als gleichartig der aufgeprägten Strahlung angesehen. D.h., die Temperaturabhängigkeit der Strahlungsleistung wird vernachlässigt.

Ähnlich der Behandlung der Sonnenstrahlung ist für die genannten inneren Belastungsgrößen jeweils eine Aufteilung in einen sofort wirksamen Konvektivanteil und einen speicherfähigen Strahlungsanteil notwendig.

Bei den Außenflächen läßt sich die absorbierte Sonnenstrahlung und die Außenlufttemperatur zu einer kombinierten Außentemperatur zusammenfassen. Im Zahlenmaterial für Strahlung hinter Zweifachverglasung ist jedoch die in den Scheiben absorbierte Strahlung bereits enthalten. Daher wird für Außenwände die kombinierte Außentemperatur und für die transparenten Flächen (Glasfläche) die Außenlufttemperatur als Aktionsgröße gewählt.

Im Hinblick auf eine veränderliche Raumlufthtemperatur (gleitende Fahrweise oder einstellend bei begrenzter Anlagenleistung) zählt auch diese zu den Aktionsgrößen.

Eine Übersicht über die berücksichtigten thermischen Raumbelastungen und ihre Zusammenfassung in Aktionsgrößen gibt die TABELLE 7 in der VDI 2078. Mit den Bezeichnungen der VDI 2078 erhält man das in *Bild 5*, links, dargestellte Modell.

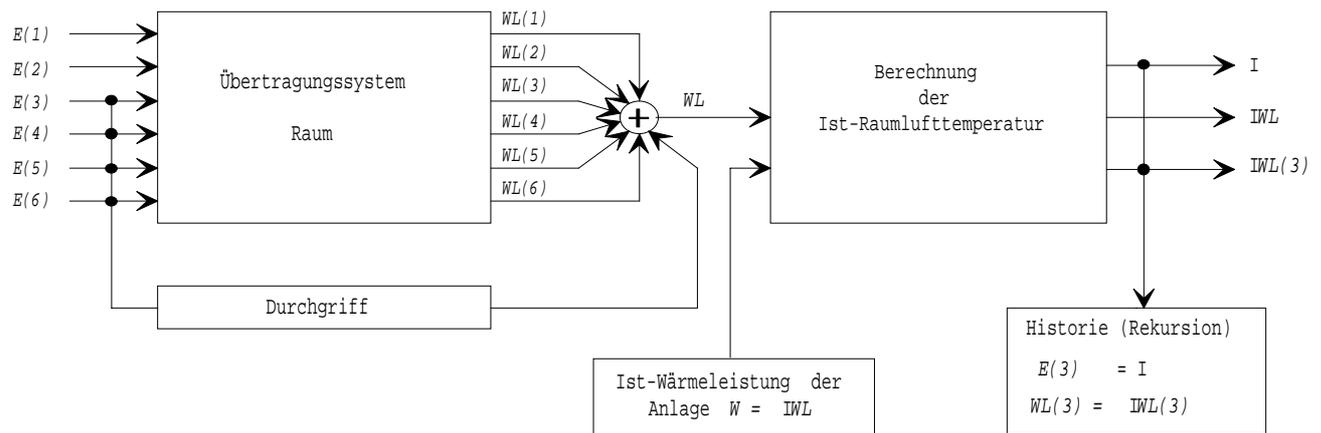


Bild 5 : Modell zur Kühllastberechnung nach dem EDV-Verfahren

Typ-Räume

Um den Berechnungsaufwand für den Planer in Grenzen zu halten, wird das thermisch-dynamische Verhalten durch vier unterschiedliche Typ-Räume charakterisiert. Der Unterschied zwischen den Typ-Räumen sollte nur im Speicherverhalten (Summenzeitkonstante) zum Ausdruck kommen. Die Wandaufbauten der Typ-Räume wurde so gewählt, daß die Wärmedurchgangszahlen der Außenwände für alle Typräume gleich sind.

Der Vorteil dieser Vorgehensweise ist, daß die Eingabe von Wandschichtaufbauten mit den zugehörigen Stoffdaten und Raumgeometrien für den jeweiligen zu berechnenden Real-Raum entfällt.

In den früheren Ausgaben der VDI 2078 wurden die Speicherfaktoren für zwei Bauarten I und II angegeben. Die Außenwände waren thermisch nicht an den Raum angekoppelt und wurden separat mit dem Verfahren der äquivalenten Temperaturdifferenzen behandelt. Mit Ausnahme der Außenwand, die in den Typ-Raum integriert ist, sind diese beiden Bauarten als Typ L und M auch in der Neuausgabe enthalten. Die neu hinzu gekommenen Bauarten (Typ XL und S) wurden der Arbeit von Jahn [1] entnommen. Für eine bessere Erfassung der langwelligen Strahlungskopplung im Raum wird

nun die Außenfläche in eine Fenster- und eine Außenwandfläche unterteilt. Im Kurzverfahren sind die Außenflächen weiterhin nicht an die anderen Raumflächen thermisch gekoppelt.

Für die Zuordnung eines Real-Raumes zu einem der Typ-Räume werden in der VDI-Richtlinie die Wandaufbauten (s. TABELLE 4, VDI 2078) detailliert beschrieben. Dabei ist besonders auf die Lage der Wärmedämm- bzw. Luftschichten zu achten. Läßt sich die Zuordnung nicht aus der Erfahrung ableiten, kann die in der VDI empfohlene Orientierungshilfe verwendet werden.

Bisher ist noch kein Verfahren bekannt, welches die Ermittlung einer kennzeichnenden Summenzeitkonstante für Räume in einer einfachen Form beschreibt. Man kann jedoch davon ausgehen, daß die Wärmespeicherfähigkeit in einem engen Zusammenhang zur Wärmekapazität $\sum (m \cdot c \cdot A)$ stehen wird. Hieraus läßt sich durch den Bezug auf eine maßgebliche Fläche eine Kenngröße für die Typ-Räume ableiten. Die TABELLE 4a in der VDI 2078 stellt einige bezogene Kenngrößen für die Typ-Räume zusammen. Der Berechnungsalgorithmus berücksichtigt die Anordnung der Wärmedämmschichten und bei Innenflächen die Aufteilung der Speichermassen auf die angrenzenden Räume. Die Lage der Dämmschicht kann erheblich die Wirksamkeit einer speichernden Schicht beeinflussen. Eine Dämmschicht wird in der Neuauflage der VDI 2078 durch die Angabe eines zweistufigen Grenzbereiches für den Wärmeleitwiderstand R genauer spezifiziert. Die Bewertung der nachfolgenden Speicherschicht richtet sich nach der Einordnung in diese Grenzbereiche. Bei Innenwänden mit symmetrischer Belastung und Aufbau ist der Wärmestrom in der Mitte der Wand immer Null (adiabater Abschluß). Die wirksame Speichermasse kann für den betrachteten Raum daher nur zur Hälfte in Ansatz gebracht werden. Für die Größe der zuzuordnenden Wärmekapazität ist auch hier die Anordnung der Dämmschicht zu beachten.

Bei einiger Übung wird man eine Zuordnung zu einem Typ-Raum auch durch "scharfes Hinsehen" erhalten. Aufmerksamkeit sollte man auch der Möblierung schenken. Z.B. können Einbauschränke wie Wärmedämmschichten wirken.

Übergangsfunktionen für die Typ-Räume

Das thermisch-dynamische Verhalten des Raumes wird durch die Angabe der Übergangsfunktionen für die ausgewählten Aktionsgrößen vollständig beschrieben (Voraussetzung: lineare zeitinvariante Systeme). Übergangsfunktionen können meßtechnisch aufgenommen oder numerisch mittels einer Computersimulation berechnet werden. Letzteres ist die übliche Methode und wurde auch in der VDI 2078 angewandt. Die Grundlagen des Simulationsmodells (Programm KST-PROMETHEUS) werden ausführlich in [1] dokumentiert.

Mit der Computersimulation wurden für vier Typ-Räume (XL, L, M und S) die Übergangsfunktionen berechnet. Die Anpassung der Übergangsfunktionen an die rekursive Filtergleichung (3)

erfolgte mit der Methode der kleinsten Fehlerquadrate. Die errechneten a- und b-Gewichtsfaktoren sind in einer normierter Form in der VDI 2078 vertafelt.

In den *Bildern 6-9* sind Übergangsfunktionen für die Aktionsgrößen 3 bis 6 aufgetragen. Für die Aktionsgrößen 1 und 2 erübrigt sich eine Darstellung, da diese wegen des rein konvektiven Charakters sofort von 0 auf -1 übergehen, d.h. sofort voll wirksam werden.

Die gepunkteten Linien stellen die approximierten Übergangsfunktionen, berechnet mit den denormierten a- und b-Faktoren, dar. Die recht gute Übereinstimmung mit den von KST-PROMETHEUS errechneten durchgezogenen Linien bestätigen die ausreichende Wahl eines Ersatzmodells 2. Ordnung.

Kennzeichnend ist, daß sich alle Kurven einem stationären Endwert nähern. Bis auf die Aktionsgröße 5 enthalten alle Übergangsfunktionen einen ohne Verzögerung wirksamen konvektiven Anteil (Durchgriff).

Dem Vergleich der Übergangsfunktionen für die einzelnen Bauarten kann man entnehmen, daß der Typraum XL nur im Kurzzeitverhalten schneller reagiert. Dagegen ist er im Langzeitverhalten eher den Bauschweren "leicht" bzw. "mittel" zuzuordnen. Dieses Verhalten kann durch die Abdeckung der Speichermassen mittels einer innen aufgebrachtten Wärmedämmung (bzw. Luftzwischenraum) erklärt werden. Die damit verbundene größere Zeitverschiebung bewirkt langfristig ein trägeres Verhalten. Hier wird der Vorteil einer genaueren mathematischen Behandlung der Wärmeleitvorgänge in Wänden erkennbar. Bei den sog. Ein- bzw. Zweispeicher-Ersatzmodellen für Wände bleibt die Reihenfolge des Schichtaufbaus unberücksichtigt. Zusätzliche Langzeitspeichereffekte durch die Abdeckung der Speichermassen sind daher bei diesen Modellen nicht feststellbar.

Die hier getroffene Wahl eines Approximationsmodells 2. Ordnung ist als eine rein rechnerische Vereinfachung zu interpretieren. Die Berechnung der Übergangsfunktion erfolgte mit einem Verfahren hoher Genauigkeit (Finite Differenzen) unter Berücksichtigung des Schichtaufbaus. Erst danach wurde das Modell durch eine Approximation vereinfacht.

Aktionsgröße 3 : Raumlufttemperatur (*Bild 6*)

Wird die Raumlufttemperatur sprunghaft von 0 auf 1 erhöht, liegt hierfür eine Wärmelast entsprechend der Übergangsfunktion in *Bild 6* vor. Im ersten Moment werden die Oberflächentemperaturen der Raumumschließungsflächen (ausgenommen speicherlose Bauteile) keine Reaktion zeigen. Die Temperaturdifferenz zwischen Raumlufte und Wandoberfläche, bzw. bei speicherlosen Bauteilen (z.B. Fenster) zur Temperatur hinter diesen Bauteilen (Außentemperatur), hat zu diesem Zeitpunkt

den Maximalwert von 1 K. Vernachlässigt man die Speicherkapazität der Raumluft, erreicht die Wärmelast zum Zeitpunkt 0 ihr Maximum. Die Erwärmung der Wand durch die konvektive Wärmeaufnahme führt zu kleineren Temperaturdifferenzen und damit zu einer abnehmenden Wärmelast. Nach unendlich langer Zeit erreichen alle Kurven einen stationären Endwert, der sich nur noch aus dem Transmissionswärmestrom durch die Außenbauteile zusammensetzt. Da die einzelnen Typ-Räume gleiche k-Zahlen und Flächen aufweisen, besteht zwischen ihnen auch kein Unterschied im Endwert.

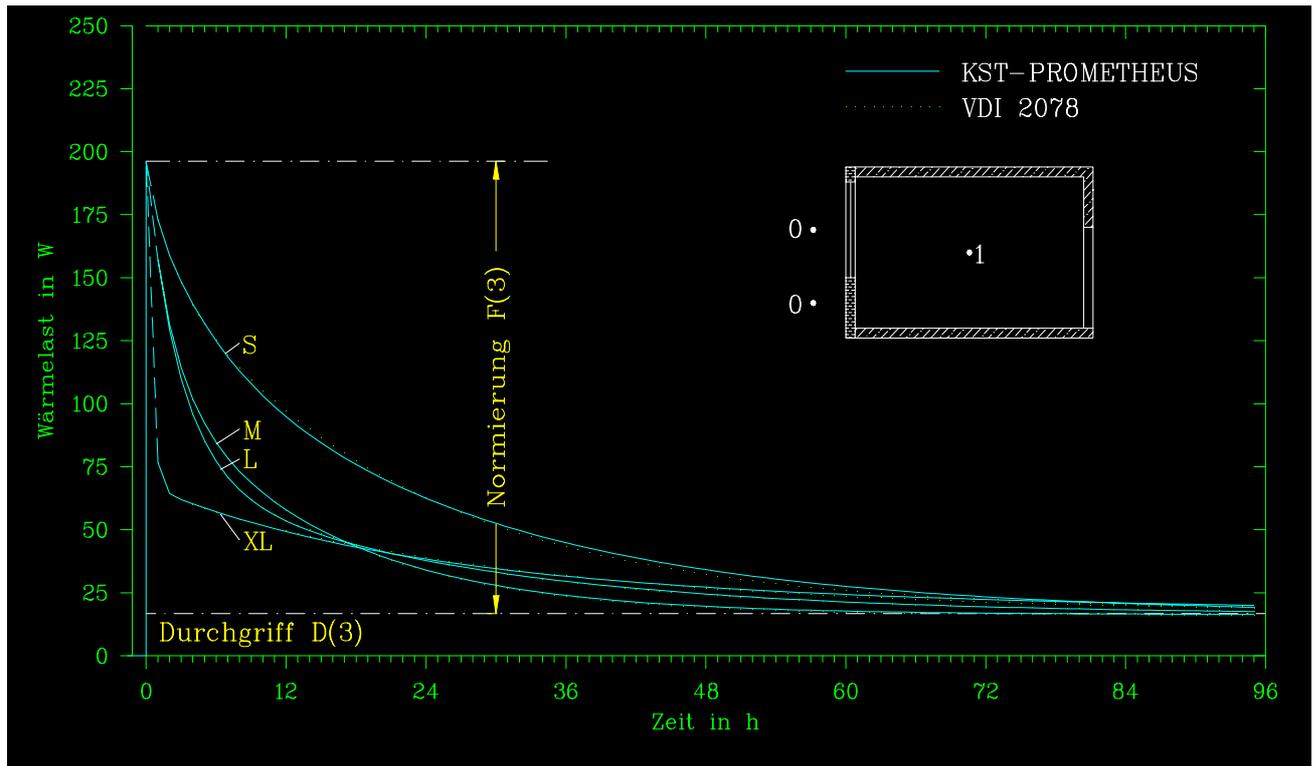


Bild 6: Übertragungsfunktionen für Typräume der VDI 2078. Aktion 3: Raumlufttemperatur

Die Oberflächentemperaturen der einzelnen Bauteile im Raum werden jedoch entsprechend ihrer Konstruktion unterschiedlich reagieren. Die einzelnen Kurven im *Bild 6* stellen daher überlagerte Werte von Übergangsfunktionen der einzelnen Raumflächen dar.

Aktionsgröße 4 : Außenlufttemperatur vor transparenten Bauteilen (*Bild 7*)

Bei einer sprunghaften Erhöhung der Außenlufttemperatur vor Fensterflächen wird wegen der als speicherlos angenommenen Konstruktion auf der Innenseite sofort eine konvektive Kühllast (negative Wärmelast) wirksam. Die unverzüglich erhöhte innere Oberflächentemperatur führt zu einer langwelligigen Wärmestrahlung auf die Innenflächen, welche der Wärmespeicherung unterliegt. Die erwärmten Innenwände werden ihrerseits wieder auf die anderen Außenflächen zurückstrahlen

und dadurch die Kühllast verringern. Für den Bereich der Außenwand ergibt sich durch den Wärmetransport von innen nach außen aufgrund der langwelligen Zustrahlung ein "Energieloch". Die erhöhte innere Oberflächentemperatur der Außenwand führt zu einem Wärmetransport nach außen.

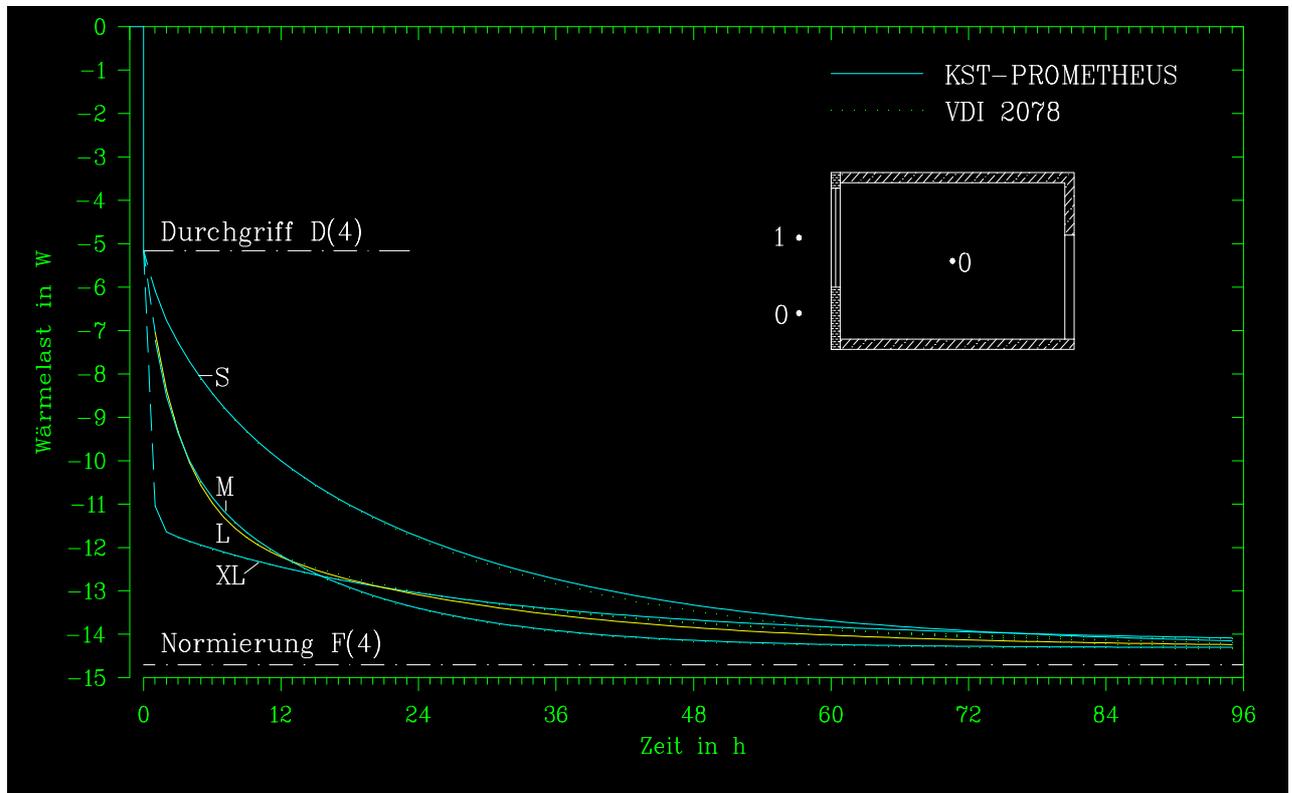


Bild 7: Übertragungsfunktionen für Typräume der VDI 2078.

Aktion 4 : Außenlufttemperatur vor transparenten Bauteilen

Aktionsgröße 5 : kombinierte Außentemperatur vor nichttransparenten Bauteilen (Bild 8)

Grundsätzlich ist dieser physikalische Vorgang mit der Aktion 4 vergleichbar. Der Unterschied liegt im speicherfähigen Material der Außenwand. Ein Durchgriff ist daher nicht vorhanden. Das "Energieloch" resultiert hierbei analog der Aktionsgröße 3 aus der Zustrahlung der Innenwände auf das Fenster.

Bei dieser Übergangsfunktion ist ein merklicher Unterschied zwischen den Typ-Räumen L und M zu verzeichnen (vgl. auch TABELLE 4a, VDI 2078).

Aktionsgröße 6 : absorbierte Strahlung innen (Bild 9)

Bei einer sprunghaften Erhöhung der flächenproportional verteilten Strahlung im Raum wird durch das speicherlose Fenster sofort eine Kühllast wirksam (Durchgriff). Im stationären Endzustand wird die dem Raum zugeführte Strahlungswärme durch den Wärmeverlust der Außenbauteile verringert.

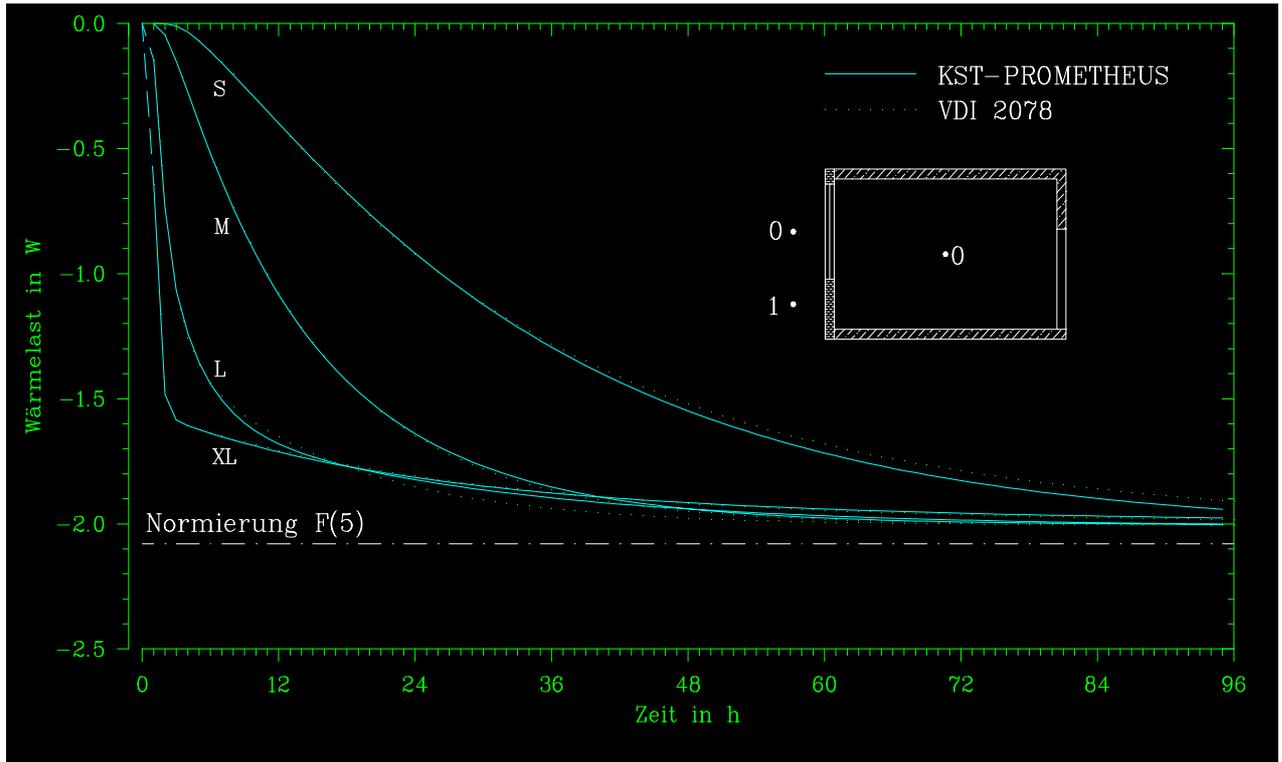


Bild 8: Übertragungsfunktionen für Typräume der VDI 2078.
Aktion 5 : Komb. Außentemperatur vor nichttransparenten Bauteilen

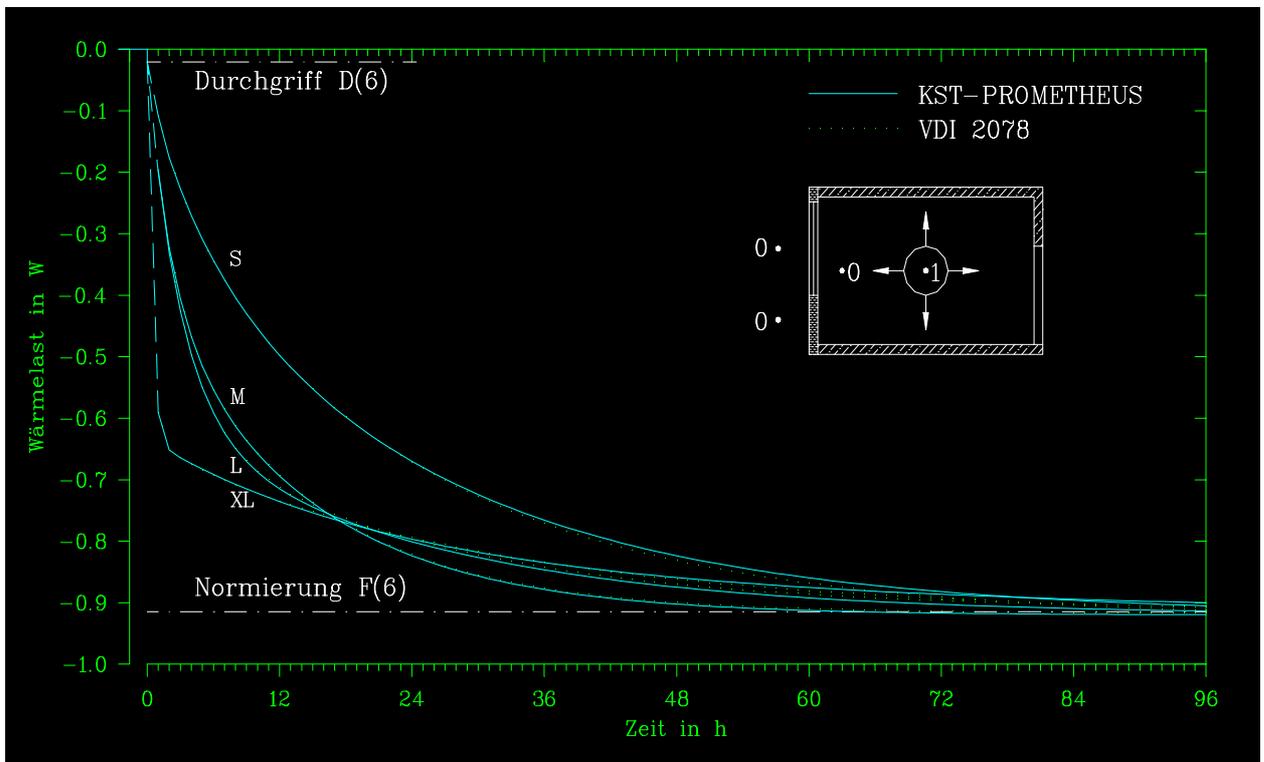


Bild 9: Übertragungsfunktionen für Typräume der VDI 2078.
Aktion 6 : Absorbierte Strahlung innen

Real-Räume und Denormierung

Ein zu berechnender realer Raum wird in der Regel auch in seiner Geometrie und Wärmedämmung vom Typ-Raum der VDI 2078 abweichen. Um einen Bezug vom Typ-Raum zum Real-Raum herzustellen, sind bestimmte Kennwerte zur Umrechnung erforderlich. Mit diesen Kennwerten wird der Typ-Raum normiert und der Real-Raum denormiert.

Die besonderen Eckdaten der Übergangsfunktionen - Durchgriff und stationärer Endwert - sind einer analytischen Berechnung zugänglich und können zur Normierung herangezogen werden. Das thermische Speicherverhalten der Typ-Räume wird dadurch nur noch durch die Summenzeitkonstante vorgehalten.

Im Gründruck zur Neuausgabe der VDI-Richtlinie wurden nur die stationären Endwerte für die Normierung verwendet. Eine ähnliche Vorgehensweise findet sich auch bei den äquivalenten Temperaturdifferenzen. Diese Normierung stellt bei Unterschieden in der Wärmedämmung und ähnlicher Geometrie vom Real-Raum und Typ-Raum eine gute Genauigkeit des zeitlichen Mittelwertes der Kühllast sicher.

Die vielfältigen Anwendungen seit der Ausgabe des Gründruckes gingen über die Berechnung der maximalen Kühllast des Raumes hinaus und erforderten daher eine genauere Untersuchung der Normierung. Insbesondere durch die Einführung einer variablen Soll-Raumlufttemperatur (Aktion 3) und der Möglichkeit zur Berechnung einer vom Sollwert abweichenden Raumlufttemperatur entstand eine erhöhte Anforderung durch den Anwender.

Bei der Normierung auf den stationären Endwert würde sich bei Vergrößerung der Raumtiefe keine Veränderung in der denormierten Übergangsfunktion für Aktion 3 ergeben, obwohl sich dadurch die speicherfähige Masse erhöht hat. Dagegen wird die gesamte Übergangsfunktion nach oben verschoben, wenn sich die k-Zahl der Außenbauteile gegenüber dem Typ-Raum erhöht. Der sofort wirksame Anteil zum Zeitpunkt 0 müßte hierbei aber aufgrund der Konstanz der Raumumschließungsfläche erhalten bleiben.

Für die Aktionsgröße 3 wird aus diesem Grunde die im *Bild 6* eingetragene veränderte Normierung vorgenommen. Vom tatsächlichen Durchgriff wird nur der stationäre Anteil benutzt. Der restliche Anteil wird als Normierungsfaktor $F(3)$ verwendet.

Bild 10 und *11* stellen beispielhaft die denormierten Übergangsfunktionen für den Fall einer Erhöhung der Raumumschließungsfläche um 25 % durch Verlängerung der Raumtiefe und einer Verdoppelung der k-Zahlen der Außenbauteile dar. Der Vergleich mit den Ergebnissen der Computersimulation zeigt eine gute Übereinstimmung. Die Änderung der Übergangsfunktionen für die

anderen Aktionsgrößen durch die Veränderung der Raumgeometrie war bei diesem Beispiel unerheblich. Der Einfluß der Raumgeometrie wird demnach durch dieses Verfahren weitgehend zurückgedrängt. Wegen der als flächenproportional angenommenen Verteilung der Strahlung im Raum sollte jedoch eine gewisse geometrische Ähnlichkeit zum Typ-Raum vorhanden sein.

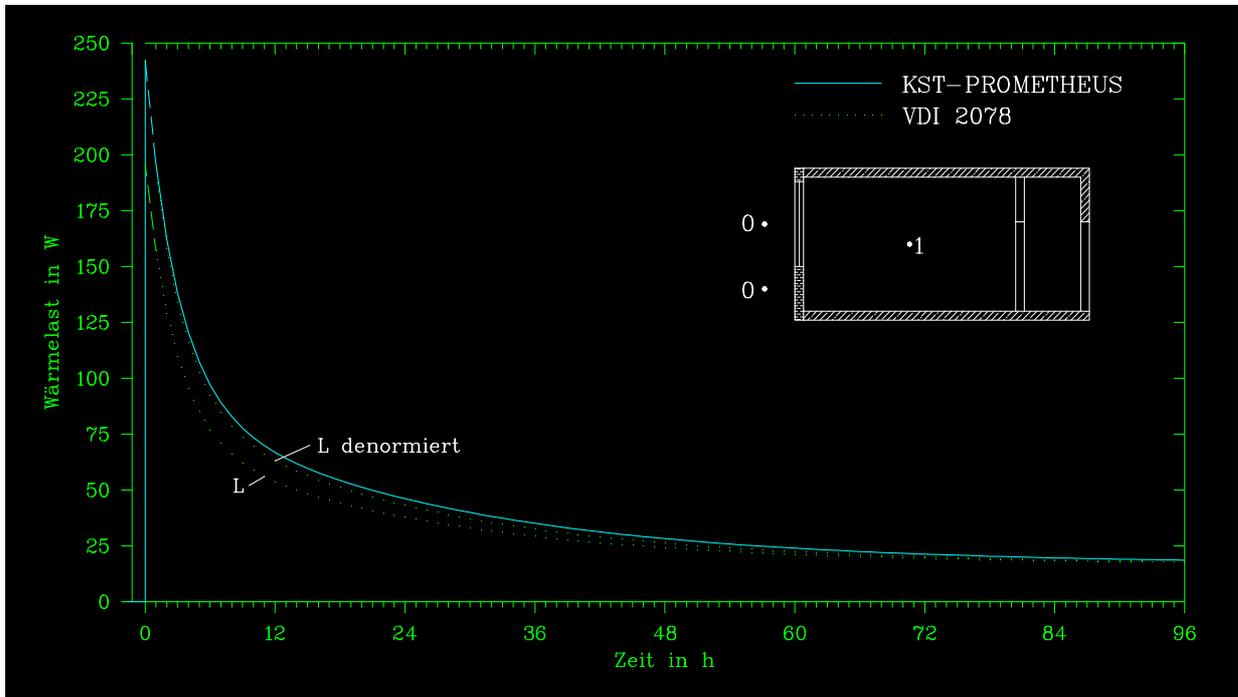


Bild 10: Prüfung der Denormierung von Aktion 3. Verlängerung der Raumtiefe.

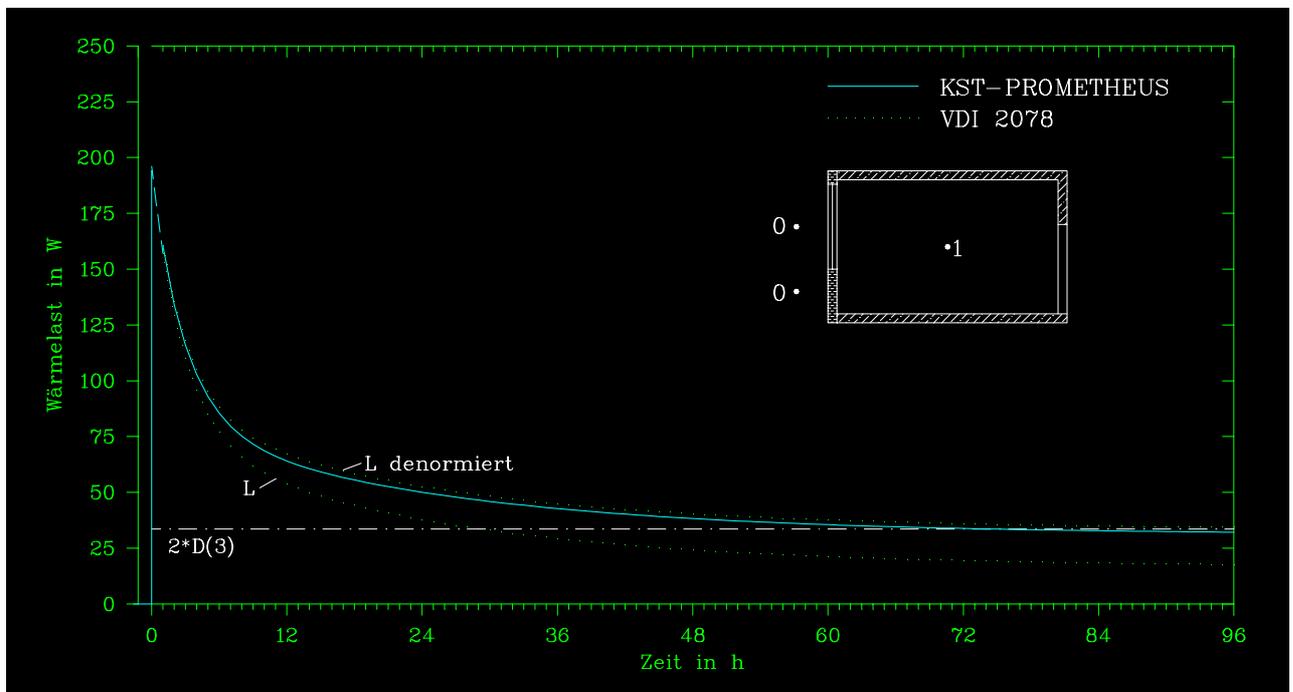


Bild 11: Prüfung der Denormierung von Aktion 3. Verdoppelung der Wärmedurchgangskoeffizienten.

Konsequenterweise wird bei der hier neu vorgestellten Normierung auch der Durchgriff der Aktionsgrößen 4 und 6 berücksichtigt.

Die Gewichtungsfaktoren für die vier verschiedenen Raumtypen und für jede Aktionsgröße sind in den VDI-Kühllastregeln in normierter Form vertafelt (vgl. TABELLE A23, VDI 2078). Vor ihrer Verwendung müssen sie in der angegebenen Weise denormiert werden. Den gesamten Berechnungsalgorithmus stellt *Tabelle 1* zusammen.

Tabelle 1 : Zusammenstellung der Algorithmen für das EDV-Verfahren der VDI 2078

Wärmelast des Raumes		Denormierung
$WL_k = \sum_{l=1}^6 [WL(l)_k + D(l)E(l)_k] + L_k E(3)_k$ $WL(l)_k = \sum_{m=0}^3 A(l)_m E(l)_{k-m} + \sum_{n=1}^2 B(l)_n WL(l)_{k-n}$		$\left. \begin{matrix} A(l)_m = a(l)_m F(l) \\ B(l)_n = b(l)_n \end{matrix} \right\} \text{für } \begin{cases} l = 1 \dots 6 \\ m = 0 \dots 3 \\ n = 1 \dots 2 \end{cases}$
Aktion <i>l</i>	Denormierungsfaktoren <i>F(l)</i>	Durchgriff <i>D(l)</i>
1	1	0
2	1	0
3	$\sum_{RU} (\alpha_K A)_{RU} - \left[\sum_{AW} (kA)_{AW} + \sum_{FE} (kA)_{FE} \right]$	$\sum_{AW} (kA)_{AW} + \sum_{FE} (kA)_{FE}$
4	$\sum_{FE} (kA)_{FE}$	$-\frac{\alpha_{K,FE}}{\alpha_I} \sum_{FE} (kA)_{FE}$
5	$\sum_{AW} (kA)_{AW}$	0
6	$1 - \frac{\sum_{AW} (kA)_{AW} + \sum_{FE} (kA)_{FE}}{\sum_{RU} (\alpha_K A)_{RU}}$	$-\frac{\alpha_{K,FE}}{\alpha_I A_{RU}} \left[A_{FE} - \frac{1}{\alpha_I} \sum_{FE} (kA)_{FE} \right]$
<p>Luftwert $L_k = (\dot{m}c)_{FL,k} + \sum_{NR} (kA)_{NR} + \sum_{NR} (\dot{m}c)_{NR,k} + (\dot{m}c)_{sonst,k}$</p>		

Die Denormierungsfaktoren *F(l)* und den Durchgriff *D(l)* erhält man durch eine konvektive Wärmebilanz jeweils im End- bzw. im Anfangszustand über den Raum. Zu bemerken wäre hierbei, daß die langwellige Strahlungswärmeabgabe der Außenflächen im stationären Endzustand an den adiabaten Innenflächen vollständig in Konvektion umgewandelt wird. Man kann daher für die konvektive Bilanz die Gesamtwärmeabgabe der Außenbauteile in Ansatz bringen ($\sum (k A)$).

Das erwähnte "Energieloch" wurde bei der Normierung vernachlässigt. Für die Typ-Räume zeigt sich der Unterschied des Normierungsfaktors zum Stationärwert der Übergangsfunktionen in den *Bildern 7 und 8*. Durch diese Vernachlässigung bleibt die Raumentwärmung proportional zum Stationärwert konstant. Bei einer Größenordnung des "Energieloches" von 5 % des Stationärwertes ohne Durchgriff und der geringen Schwankungsbreite der Wärmedämmung der Real-Räume im Vergleich zu den Typ-Räumen ist dies zulässig. Insbesondere wenn man bedenkt, daß andernfalls mit viel Berechnungsaufwand Promille eines Ergebnisses beeinflusst würden, welches im Rahmen der Vereinbarungen des Berechnungsverfahrens "genau" ist, jedoch von der praktischen Wirklichkeit des Baues abweichen wird.

Raumlufttemperatur bei begrenzter Wärmeleistung der Anlage

Wird die Wärmeleistung der Anlage W_k auf einen bestimmten Wert begrenzt, stellt sich eine Ist-Raumlufttemperatur $I\vartheta_{LR,k}$ ein. Im Extremfall bei $W_k = 0$ liegt ein System mit frei schwingender Raumlufttemperatur vor. Für $W_k \neq 0$ wird die Restwärmelast zu einer Änderung gegenüber der Soll-Raumlufttemperatur $S\vartheta_{LR,k}$ führen. Die als Aktionsgröße definierte Raumlufttemperatur ist nun die gesuchte Reaktionsgröße. Den Lösungsvorgang bei dieser Modellumkehrung bezeichnet man als "Entfaltung".

Ordnet man der Ist-Wärmeleistung W_k eine Ist-Wärmelast IWL_k bei Ist-Raumlufttemperatur $I\vartheta_{LR,k}$ und der Soll-Wärmelast WL_k die Soll-Raumlufttemperatur $S\vartheta_{LR,k}$ zu, dann erhält man durch Differenzbildung für den Ist- und Sollzustand die Restwärmeleistung

$$\begin{aligned} W_k - WL_k &= IWL(3)_k - WL(3)_k + [D(3) + L_k] \cdot [I\vartheta_{LR,k} - S\vartheta_{LR,k}] \\ &= [A(3)_0 + D(3) + L_k] \cdot [I\vartheta_{LR,k} - S\vartheta_{LR,k}] \end{aligned} \quad (4)$$

Die anderen Reaktionswärmelasten werden hiervon nicht berührt und sind bei der Differenzbildung entfallen. Voraussetzung für Gl. (4) ist jedoch, daß die Soll-Wärmelast zunächst mit der Soll-Raumlufttemperatur zum Zeitpunkt k und den vergangenen Ist-Werten (Historie) $IWL(3)_{k-n}$ und $I\vartheta_{LR,k-m}$ berechnet wird.

Aus Gl. (4) läßt sich die Ist-Raumlufttemperatur bei vorgegebener Wärmeleistung der Anlage und die Ist-Wärmelast ermitteln.

$$I\vartheta_{LR,k} = \frac{W_k - WL_k}{A(3)_0 + D(3) + L_k} + S\vartheta_{LR,k} \quad (5)$$

Eine Kontrollmöglichkeit ist durch das Gleichsetzen der Anlagenleistung mit der Soll-Wärmelast gegeben. In diesem Fall muß sich als Istwert der Sollwert ergeben.

Die mit dem EDV-Verfahren ermittelte Soll-Wärmelast gibt für den Berechnungszeitpunkt die aktuell erforderliche Wärmeleistung an, um den Raum innerhalb einer Stunde von der vorhergehenden Ist-Raumlufttemperatur auf den vorgegebenen Sollwert zu bringen. Sie wird betragsmäßig von der Soll-Wärmelast für eine zeitlich konstante Raumlufttemperatur abweichen und sollte mit dieser begriffsmäßig auch nicht verwechselt werden. Die Ergebnisinterpretation muß sich daher immer auf die Ist-Wärmelast beziehen und im Zusammenhang mit dem Zeitverlauf der Raumlufttemperatur angegeben werden.

Zu beachten ist bei Anwendung der Gl. (4), daß die Wärmeleistung der Anlage W_k im allgemeinen auch von der Raumlufttemperatur abhängig ist. Ist diese Abhängigkeit analytisch bekannt, kann Gl. (4) entsprechend umgeformt werden. Andernfalls ist eine Iteration notwendig.

Mit dieser Berechnungsmethode können nun auch die in der Praxis vorkommenden Fragen untersucht werden., z.B.

- Welche Raumlufttemperaturen stellen sich ohne einen Kühlbetrieb ein?
- Welche Kühllast ergibt sich, wenn man eine ggf. erforderliche Heizlast in den Nachtstunden nicht erfüllen will?
- Welche Betriebsführung ist zur Einhaltung eines Sollwertbandes bei unterdimensionierter Anlagenleistung erforderlich?

Rechenverfahren

Nach der Denormierung und Festlegung der Belastungsverläufe (Aktionsgrößen E) erfolgt zunächst die Berechnung der Wärmelast des Raumes WL_k für eine vorgegebene Soll-Raumlufttemperatur $S\vartheta_{LR,k}$ gleich $E(3)$ zum Zeitpunkt k (s. *Bild 5*).

Gemäß dem Superpositionsprinzip kann die Berechnung für jede Aktion getrennt erfolgen. Die Wärmelast WL_k ergibt sich durch Addition der Reaktionswärmelasten.

Weicht die Wärmeleistung der Anlage W_k von der Wärmelast des Raumes ab, wird sich eine abweichende Ist-Raumlufttemperatur $I\vartheta_{LR,k}$ einstellen. Man erhält diesen Wert durch die sog. Entfaltung, bei der die gesuchte Eingangsgröße unter Vorgabe einer Ausgangsgröße ermittelt wird.

Diesen Schritt sollte man zur Kontrolle grundsätzlich durchführen, auch wenn die Anlage die ausreichende Wärmeleistung zur Verfügung stellen kann. Wird $W_k = WL_k$ gesetzt, muß sich $I\vartheta_{LR,k} = S\vartheta_{LR,k}$ ergeben. Das Verfahren kontrolliert sich somit selbst.

Als Ergebnis erhält man die Ist-Raumlufttemperatur $I\vartheta_{LR,k}$ und die Ist-Wärmelast IWL_k . Die Raumlufttemperatur und die Reaktionswärmelast der Aktionsgröße 3 müssen wegen der rekursiven Berechnungsmethode vor Ausführung des nächsten Zeitschrittes durch die Istwerte überschrieben werden. Damit gehen die Ist-Werte in die thermische Historie des Raumes ein.

Die Kühllast ist als eine konvektive Last im eingeschwungenen Zustand definiert. D.h. nach einer mehrtägigen Rechnung mit den im Tagesverlauf gleichen Eingangsgrößen dürfen sich die Ergebnisse für jeden Zeitpunkt k nicht mehr ändern. Dabei ist die Anzahl der notwendigen Berechnungstage bei sehr schwerer Bauweise oder bei variabler Raumlufttemperatur im Zusammenhang mit der möglichen Andauer einer Hitzeperiode kritisch zu bewerten. Die VDI 2078 schreibt daher einen Abbruch der Einschwingrechnung spätestens nach 14 Tagen vor.

Um realistische Startbedingungen für die Einschwingrechnung mit den extremen Wetterdaten zu erhalten, wird eine Anlaufrechnung mit einer Anzahl bedeckter Tage empfohlen.

Zusammenfassung

Das in der VDI 2078 vorgestellte EDV-Verfahren basiert auf dem Faltungsprinzip im Zeitbereich. Mittels Gewichtsfaktoren werden die thermisch-dynamischen Übertragungseigenschaften einzelner Systeme beschrieben. Dadurch ist es möglich, für einen frei vorgebbaren Verlauf der thermischen Raumbelastungen die zugehörige Wärmelast des Raumes mit der Kühllast als Sonderfall zu ermitteln.

Durch die Verwendung rekursiver Filter 2. Ordnung sind nur sechs Gewichtsfaktoren notwendig, um das Übertragungsverhalten einer Aktionsgröße ausreichend genau zu approximieren. Verwendet werden 6 Aktionsgrößen, die jeweils aus den thermischen Raumbelastungen entsprechend den Angaben ermittelt werden.

Diese auf lineare zeitinvariante Übertragungssysteme anwendbare Methode stellt ein thermisches Modell 2. Ordnung dar. Die Abgrenzung zu anderen thermischen Modellen liegt in der höheren Ordnung und vor allem in der differenzierten Auswahl der Aktionsgrößen. Dabei wurden sowohl die physikalisch wirksamen Komponenten als auch die Voraussetzung der Zeitinvarianz berücksichtigt.

Für vier verschiedene Typ-Räume mit unterschiedlichem Speicherverhalten, aber gleicher Wärmedämmung der Außenbauteile, sind die Gewichtungsfaktoren für die einzelnen Aktionsgrößen mittels Computersimulation berechnet worden. Anhand der Übergangsfunktionen für die Typ-Räume wurden geeignete Normierungsgrößen abgeleitet und ein entsprechendes Denormierungsverfahren angegeben.

Mit der Denormierung werden die Übertragungseigenschaften eines Typ-Raumes auf einen zu berechnenden Real-Raum anhand von k-Zahlen und Flächen umgerechnet. Für die Zuordnung eines Real-Raumes zu einem Typ-Raum enthält die VDI 2078 im Weißdruck neu überarbeitete Orientierungshilfen.

Das EDV-Verfahren der VDI 2078 bietet dem Planer die Möglichkeit, die zu erstellende RLT-Anlage unter verschiedenen Aspekten vor der Montage näher zu untersuchen. Besonders die Ermittlung der sich einstellenden Raumlufttemperatur bei begrenzter Anlagenleistung kann den Ausschluß ansonsten geeigneter Systeme verhindern. Grundsätzlich kann das EDV-Verfahren auch für Energieverbrauchsberechnungen eingesetzt werden. Dies geht jedoch über den Anwendungsbereich der VDI-Richtlinie 2078 hinaus und setzt entsprechende Erfahrungen voraus.

Literatur

- [1] Jahn, A. : Methoden der energetischen Prozeßbewertung Raumluftechnischer Anlagen und Grundlagen der Simulation. Dissertation TU Berlin, 1978
- [2] Jahn, A.: Das Faltungsprinzip und die Simulation des dynamischen thermischen Raumverhaltens. GI 1977, Heft 10
- [3] Dobesch-Sulanke : Zeitfunktionen. Theorie und Anwendung. VEB Verlag Technik Berlin 1970
- [4] Todorovic, B.: Verteilung der Sonnenstrahlung im Rauminnern als Angabe für die Berechnung der Kühllast von Sonneneinstrahlung durch Fenster. 5. Int. Kongr. für Heizung, Lüftung und Klimatechnik, Kopenhagen 1971, Vol. 1, Polyteknisk Forlag
- [5] Masuch, J.: Die Berücksichtigung von Wärmespeichervorgängen in den VDI-Kühllastregeln. HLH 1970, Nr. 12