

# **Korrekturvorschläge zum EDV-Verfahren der VDI 2078<sup>\*)</sup>**

**CSE Nadler**

**Dipl.-Ing. Norbert Nadler**

**Arnstädter Str. 7, 16515 Oranienburg**

**Tel. : (03301) 579 39-0**

**Fax : (03301) 579 39-1**

**n.nadler@cse-nadler**

**www.cse-nadler.de**

**Oranienburg, den 22. Dezember 2004**

---

<sup>\*)</sup> Veröffentlicht in 4 Teilen :

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

**Die Kühllastberechnung nach dem EDV-Verfahren der VDI 2078 [1, 2] zeigt im Vergleich mit den Ergebnissen von Simulationsprogrammen einige Abweichungen [3, Teil 2]. Die Abweichungen konnten aufgeklärt werden und resultierten zum Teil aus Druckfehlern. Durch eine vollständige Überarbeitung der Algorithmen und des Zahlenmaterials entstanden die hier vorgeschlagenen Korrekturen mit leichten Modifikationen zum EDV-Verfahren. In Teil 1 werden die Algorithmen und die notwendigen Zahlenwerte vollständig angegeben. Teil 2 demonstriert anhand von Vergleichsrechnungen die Unterschiede zur aktuellen VDI 2078 bzw. zum Simulationsprogramm.**

## **Teil 1: Algorithmen**

### **Einleitung und Aufgabenstellung**

Als vor ca. 20 Jahren mit der Entwicklung des heutigen EDV-Verfahrens in der VDI 2078 [1] begonnen wurde, waren die Personalcomputer noch längst nicht so leistungsfähig wie heute. Die damaligen Anforderungen an ein Verfahren zur Ermittlung der Kühllast klimatisierter Räume sollten im Vergleich zu einem Simulationsprogramm entsprechend geringe Rechenzeiten aufweisen und mit wenig Speicherplätzen auskommen. Dazu ist ein überschaubares, nachvollziehbares und in ausgewählten Punkten relativ leicht überprüfbares Berechnungsverfahren notwendig.

Inzwischen laufen Simulationsprogramme auch auf Personalcomputern. Die damaligen Anforderungen sind heute zwar nicht mehr zwingend erforderlich, sie erwiesen sich jedoch aus anderen Gründen als richtungsweisend für die Veröffentlichung von Berechnungsmethoden in DIN-Normen und VDI-Richtlinien.

Die Softwarehäuser hatten einige Probleme bei der Umsetzung der Algorithmen aus der VDI 2078. Die Probleme ergaben sich nicht nur durch Fehlinterpretationen und Mißverständnisse, sondern resultierten auch aus Druckfehlern, vor allem im Gründruck zur heutigen VDI 2078. Leider sind in der aktuellen Ausgabe der VDI 2078 [1] immer noch Druckfehler enthalten.

Derartige Probleme zeigten sich inzwischen auch in anderen Bereichen, etwa bei den Algorithmen zur EnEV. Dort werden sogar zusätzliche DIN-Normen herausgegeben, die nur Berichtigungen enthalten.

Insofern stellt sich die Frage, ob ein umfangreicher und komplizierter Algorithmus überhaupt normungsfähig ist.

Aus diesen Erfahrungen muß gefolgert werden, daß eine für VDI-Richtlinien und DIN-Normen ausgewiesene Berechnungsmethode zumindest in Teilen durch ein kleines BASIC-Programm oder durch ein Tabellenkalkulationsprogramm überprüfbar ist. Die kommerziellen Softwareprogramme müssen hierfür entsprechende Zwischenergebnisse ausgeben.

Der Algorithmus der *VDI 2078* [1] fand inzwischen auch Eingang im Entwurf zur *VDI 2067* Blatt 11 vom Juni 1998 (Rechenverfahren zum Energiebedarf beheizter und klimatisierter Gebäude). Für eine Überarbeitung müssen daher auch Jahresrechnungen eine stärkere Berücksichtigung finden.

Im folgenden werden Kenntnisse der aktuellen *VDI 2078* vorausgesetzt. Hier nicht näher erläuterte Bezeichnungen sind der Richtlinie zu entnehmen.

### **Planungsrechtliche Aspekte**

Der Bauherr hat grundsätzlich einen Anspruch auf eine für sein Gebäude individuelle Planung in der detailliert auf die spezifische Bauausführung rechnerisch eingegangen wird. Für den hier betrachteten Fall einer thermischen Berechnung zur Dimensionierung einer technischen Anlage stellt nach gegenwärtig durchführbarer Arbeitstechnik die Verwendung von Simulationsprogrammen den höchsten Detaillierungsgrad dar. Diese Programme sind allerdings sehr datenintensiv und erfordern eine programmiertechnische Wartung sowie einen hohen Kenntnisstand. Bisher wurden sie nur für besondere Baukonstruktionen und gegen zusätzliche Honorierung eingesetzt.

Allerdings wachsen mit zunehmender Detaillierung die Planungskosten derart an, daß auch der Bauherr an einer Vereinfachung interessiert sein dürfte.

Für Standardkonstruktionen werden vereinfachte Berechnungsmethoden angewendet, die in Normen und Richtlinien festgelegt sind. Dies führt auch zu einem einheitlichen Rechengang, der von anderen Planungsingenieuren kontrolliert und weitergeführt werden kann sowie in der Lehre vermittelbar ist.

Für den Fall einer Lastberechnung zur Dimensionierung einer technischen Anlage könnte die Vereinfachung durch eine Verallgemeinerung vollzogen werden. Eine sicherlich zu starke Verallgemeinerung wäre die Angabe einer für alle Gebäudetypen gültigen flächenbezogenen Last von z.B. 100 W/m<sup>2</sup>. Hierdurch könnten zwar die Planungskosten sehr gering ausfallen, der Anspruch an individuelle Planung ist jedoch bei weitem nicht erfüllt.

Für die Verallgemeinerung ist also ein Kompromiß zwischen Planungsaufwand, Genauigkeitsansprüchen und Detaillierungsgrad der Berechnung zu finden.

## **Grundprinzipien**

Traditionell wird mit der VDI 2078 instationär, d.h. unter Berücksichtigung der Wärmespeichervorgänge in der Baukonstruktion gerechnet. Die Berücksichtigung der Speichereffekte bringt eine bis zu 50 %-tige Reduktion des Kühllastmaximums. Nachteil dieser Berechnungsweise ist, daß die instationäre Wärmeleitungsgleichung gelöst werden muß. Trotz vereinfachender Annahmen, wie z.B. Eindimensionalität und konstante Stoffwerte, ist eine analytische Lösung dieser von Fourier stammenden partiellen Differentialgleichung nur für spezielle Randbedingungen möglich.

Ziel der Richtlinie ist daher, bezüglich des dynamisch thermischen Verhaltens fertige Lösungen für typische Konstruktionen bereitzustellen. Dagegen soll das stationäre Verhalten bzw. das Anfangsverhalten weitgehend vom Anwender für die konkrete Baukonstruktion berechnet werden.

## **Übertragungssysteme**

Aus der Regelungstechnik ist bekannt, daß ein dynamisches Verhalten durch Zeitkonstanten beschrieben werden kann. Die Anzahl der Zeitkonstanten legt die Systemordnung fest. Für Proportionalglieder mit einer Verzögerung n. Ordnung stellt die Regelungstechnik eine abgerundete Theorie zur Verfügung.

Leider ist diese Theorie nicht ohne weiteres auf die Wärmetechnik übertragbar, da die Zeitkonstanten hier wesentlich komplizierter miteinander verknüpft sind. Betrachtet man jedoch nur das Ein- und Ausgangsverhalten eines thermischen Übertragungssystems, ist die Kenntnis über die innere Systemstruktur nicht notwendig.

Ein Übertragungssystem kann mehrere Eingänge (Aktionen) und mehrere Ausgänge (Reaktionen) besitzen. Die Reaktion wird durch das Berechnungsziel bestimmt, z.B.

Kühllast oder Ist-Raumlufttemperatur. Diejenigen Größen, die auf die Reaktion physikalisch einwirken und als bekannt vorausgesetzt werden dürfen, sind als Aktionen zu definieren. Kann Linearität und Zeitinvarianz angenommen werden, ergibt sich die Gesamtreaktion auf mehrere Aktionen durch Addition der Teilreaktionen.

Zur anschaulichen Darstellung des thermischen Übertragungsverhaltens eignen sich besonders die Übergangsfunktionen als Reaktion auf eine bestimmte sprungförmig geänderte Aktion. Der Einfluß der jeweils anderen Aktionen sowie der Ausgangszustand (Startwerte) wird durch Nullsetzen ausgeschlossen. Mit Hilfe eines Simulationsprogrammes werden die Übergangsfunktionen für die Kühllast bei verschiedenen Aktionen berechnet.

Aus der Übergangsfunktion ist das Anfangsverhalten zum Zeitpunkt  $t = 0$  (Durchgriff), der Trend zum stationären Endwert ( $t \rightarrow \infty$ ) und das dynamische Verhalten anhand des Kurvenverlaufes ersichtlich. Durch die Normierung

$$h_n(t) = \frac{h(t) - h(0)}{h(\infty) - h(0)} \quad (1)$$

$h(t)$	Übergangsfunktion aus Simulationsprogramm in W, abhängig von der Zeit
$h(0)$	Anfangswert der Übergangsfunktion bei $t = 0$ (Durchgriff) in W
$h(\infty)$	stationärer Endwert der Übergangsfunktion in W
$h_n(t)$	normierte Übergangsfunktion
$t$	Zeit

wird allein das dynamische Verhalten hervorgehoben. In dieser Form nehmen alle hier betrachteten normierten Übergangsfunktionen Werte zwischen 0 und 1 an.

## Raumaufbau

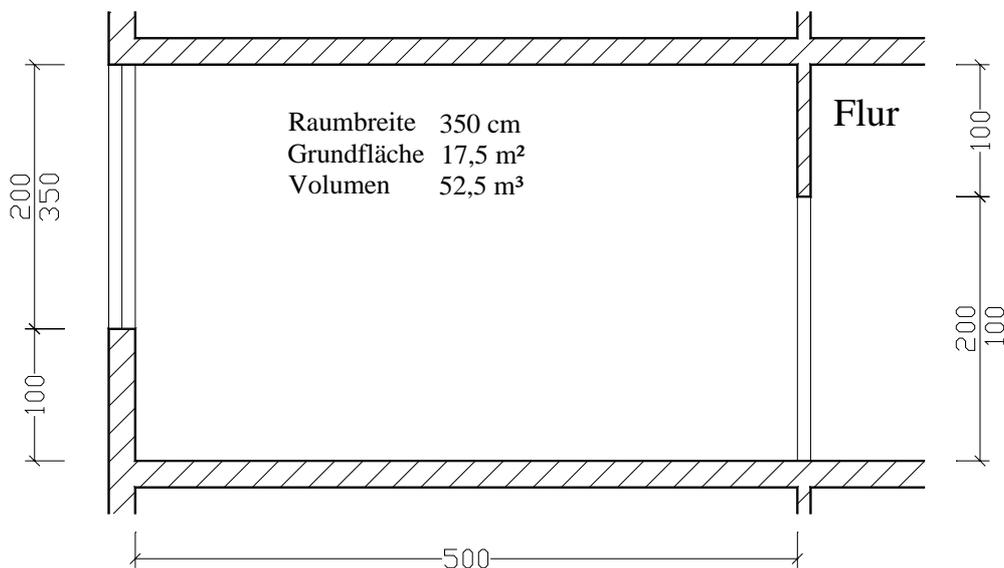
Für die Berechnung der Übergangsfunktionen sollte ein möglichst realistischer Typ-Raum gewählt werden. Bisher wurde der Typ-Raum der VDI 2078 als zu seinen Nachbarräumen adiabatisch angesehen. Dabei ging man von der Annahme aus, daß alle angrenzenden Räume auf dem Temperaturniveau des betrachteten Raumes liegen (gleiche Belastung und gleiche Lastabfuhr). Über die angrenzenden Innenflächen strömt somit keine Wärme zu den Nachbarräumen. Es verbleibt nur die Wärmespeicherwirkung der Innenflächen, bei der Wärme in das Bauteil hinein und zu anderen Zeiten wieder hinaus strömen kann. Bei symmetrischem Schichtaufbau einer adiabaten Wand ist in der Mitte der Wand die Grenze,

über die keine Wärme überströmt. An dieser Grenze ist der Wärmestrom zu allen Zeiten Null.

Für Realräume mit nicht-adiabaten Innenflächen, d.h. mit Temperaturunterschieden zwischen betrachtetem Raum und Nachbarräum wurde hilfsweise der stationäre Wärmedurchgang den Ergebnissen überlagert. Die Wärmespeicherfähigkeit von nicht-adiabaten Innenflächen wurde dadurch nicht korrekt behandelt.

Ein häufig vorkommender Fall ist, daß der angrenzende Flur nicht klimatisiert wird und während der Betriebszeit eine wesentlich höhere Temperatur (z.B. die Gebäudekern-temperatur) aufweist. Um solche Verhältnisse besser zu berücksichtigen, wird hier die Rückwand mit Innentür zum Flur als nicht-adiabat und speicherbehaftet behandelt. Die restlichen Innenflächen werden für die Berechnung der Übergangsfunktionen als adiabat angenommen.

Die geometrischen Abmessungen und die Schichtaufbau der Wände entsprechen weiterhin der *VDI 2078* [1].



**Bild 1:** Geometrie der Typ-Räume

Ebenso wird hier die Einschränkung der speicherlosen Fenster aufgegeben. Diese unnötige Annahme hätte komplizierte Formeln für die Berechnung des Durchgriffs am Fenster zur Folge. Der Schichtaufbau des Fensters geht aus **Tabelle 1** hervor. Die Annahme der speicherlosen Raumluft bleibt jedoch erhalten. Dadurch sollen Zeitvarianzen durch zeitabhängige Luftmassenströme vermieden werden (vgl. [2]).

**Tabelle 1:** Wärmetechnische Daten des Fensters (bei allen Raumtypen gleich)

Aufbau von außen	d m	$\lambda$ W/(m K)	$\rho$ kg/m <sup>3</sup>	c J/(kg K)	$\alpha$ W/(m <sup>2</sup> K)	R m <sup>2</sup> K/W
Fenster :	k =	2,107	W/(m <sup>2</sup> K)	(m c)/A =	3,504	Wh/(m <sup>2</sup> K)
Gesamtenergiedurchlaßgrad	g <sub>direkt</sub> =	0,751	-	g <sub>diffus</sub> =	0,632	-
ges. Wärmeübergang außen					25,0	0,040
Fensterglas	0,0060	1,000	2500	840		0,006
Luftschicht	0,0120	0,041	1,2	1007		0,293
Fensterglas	0,0060	1,000	2500	840		0,006
konv. Wärmeübergang innen					2,7	
ges. Wärmeübergang innen					7,7	0,130
Summe	0,0240					0,475

In **Tabelle 2** sind die Kennwerte der Typ-Räume zusammengestellt, wie sie für die weitere Rechnung benötigt werden. Zusätzlich enthält die Tabelle Angaben über den Zeichensaal aus dem Berechnungsbeispiel in der *VDI 2078* [1]. Fußboden und Decke des Zeichensaals wurden aus dem Raumtyp L übernommen. Um eine raumwinkelgerechte (d.h. Berechnung mit Einstrahlzahlen) Strahlung zu ermitteln, werden nur die lichten Innenmaße des Zeichensaals benutzt. Die rechnerische Analyse des Zeichensaals soll beispielhaft Aufschluß über die Zuordnung eines Real-Raumes zu einem Typ-Raum geben.

**Tabelle 2:** Kennwerte für die Typ-Räume und Zeichensaal

Bauart	Fläche A m <sup>2</sup>	k W/(m <sup>2</sup> K)	k*A W/K	(m c)/A Wh/(m <sup>2</sup> K)	(m c)/A <sub>RU</sub> Wh/(m <sup>2</sup> K)	$\alpha_K$ W/(m <sup>2</sup> K)	$\alpha_K$ *A W/K
<b>Raumtyp XL</b>							
Decke	17,5	0,679		0,327	0,07	1,7	29,8
Fußboden	17,5	0,679		0,048	0,01	1,7	29,8
Innenwand	30,0	0,521		2,132	0,74	2,7	81,0
Innenwand (zum Flur)	8,5	0,521	4,43	2,132	0,21	2,7	23,0
Innentür	2,0	1,833	3,67	7,000	0,16	2,7	5,4
Außenwand	3,5	0,595	2,08	3,548	0,14	2,7	9,5
Fenster	7,0	2,107	14,75	3,504	0,29	2,7	18,9
Summe	86,0		24,93		1,62		197,2
<b>Raumtyp L</b>							
Decke	17,5	0,735		1,390	0,28	1,7	29,8
Fußboden	17,5	0,735		19,425	3,95	1,7	29,8
Innenwand	30,0	1,787		21,000	7,33	2,7	81,0
Innenwand (zum Flur)	8,5	1,787	15,19	21,000	2,08	2,7	23,0
Innentür	2,0	1,833	3,67	7,000	0,16	2,7	5,4
Außenwand	3,5	0,597	2,09	4,060	0,17	2,7	9,5
Fenster	7,0	2,107	14,75	3,504	0,29	2,7	18,9
Summe	86,0		35,69		14,25		197,2

**Tabelle 2:** (Fortsetzung)

Bauart	Fläche A m <sup>2</sup>	k W/(m <sup>2</sup> K)	k*A W/K	(m c)/A Wh/(m <sup>2</sup> K)	(m c)/A <sub>RU</sub> Wh/(m <sup>2</sup> K)	α <sub>K</sub> W/(m <sup>2</sup> K)	α <sub>K</sub> *A W/K
<b>Raumtyp M</b>							
Decke	17,5	1,095		1,390	0,28	1,7	29,8
Fußboden	17,5	1,095		64,400	13,10	1,7	29,8
Innenwand	30,0	1,787		21,000	7,33	2,7	81,0
Innenwand (zum Flur)	8,5	1,787	15,19	21,000	2,08	2,7	23,0
Innentür	2,0	1,833	3,67	7,000	0,16	2,7	5,4
Außenwand	3,5	0,595	2,08	54,192	2,21	2,7	9,5
Fenster	7,0	2,107	14,75	3,504	0,29	2,7	18,9
Summe	86,0		35,69		25,44		197,2
<b>Raumtyp S</b>							
Decke	17,5	1,629		105,070	21,38	1,7	29,8
Fußboden	17,5	1,629		15,569	3,17	1,7	29,8
Innenwand	30,0	1,453		45,500	15,87	2,7	81,0
Innenwand (zum Flur)	8,5	1,453	12,35	45,500	4,50	2,7	23,0
Innentür	2,0	2,221	4,44	9,800	0,23	2,7	5,4
Außenwand	3,5	0,601	2,11	129,343	5,26	2,7	9,5
Fenster	7,0	2,107	14,75	3,504	0,29	2,7	18,9
Summe	86,0		33,65		50,69		197,2
<b>Zeichensaal</b> (mit lichten Innenmaßen gerechnet)							
Decke	240,0	0,735		1,390	0,49	1,7	408,0
Fußboden	240,0	0,735		19,425	6,90	1,7	408,0
Innenwände	42,5	1,661	70,49	41,667	2,62	2,7	114,6
Innentüren	4,8	2,003	9,61	7,000	0,05	2,7	13,0
Außenwand	110,3	0,650	71,68	133,646	21,82	2,7	297,7
Fenster	37,8	3,000	113,40	5,253	0,29	2,7	102,1
Summe	675,3		265,19		32,18		1343,3

## Aktionsgrößen

Durch die Einführung nicht-adiabater Innenflächen treten zusätzliche Aktionsgrößen hinzu. Zur begrifflichen Vereinfachung werden auch die Außenflächen zu den nicht-adiabaten Raumumschließungsflächen (NAB-Flächen) hinzugezählt. Nicht-adiabate Innenbauteile, die wie in der aktuellen VDI 2078 behandelt werden (z.B. DE und FB), erhalten die gleiche Systematik. Sie unterscheiden sich nur durch die unten angegebenen Filterkoeffizienten.  $(k A)_{NR}$  erscheint somit nicht mehr im Wärmepotential und Luftwert (s. *Tabelle 3*).

Aufgeprägte konvektive Wärmebelastungen innen (Aktion 1, [1]) und konvektive Wärmepotentiale (Aktion 2, [1]) werden zu einer Aktionsgröße zusammengefaßt. Der sonstige Zuluftmassenstrom  $\dot{m}_{sonst}$  und die Lufttemperatur sonstiger Zuluftströme  $\vartheta_{sonst}$  sind unregelte, d.h. von der Raumlufttemperatur unabhängige Größen.

Der heute überwiegende Anteil der Regelgeräte führt einen Soll/Ist-Vergleich für die Raumlufttemperatur und nicht für eine empfundene Temperatur durch. Die Bezugstemperatur für die Kühllast bleibt daher weiterhin die Raumlufttemperatur, deren Sollwert in der Aktion TL vorgegeben wird. Eine empfundene Temperatur wird allerdings im Anschluß berechnet und ist für die Überprüfung behaglicher Zustände verwendbar.

Die Aktionen 1 bis 3 sind raumspezifische Aktionsgrößen, die restlichen Aktionen sind flächenspezifisch. Da NAB-Flächen trotz gleicher Art unterschiedliche außen anliegende Temperaturen aufweisen können, sind die flächenspezifischen Aktionsgrößen für jede NAB-Fläche einzeln anzusetzen. Alternativ ist auch eine gewichtete Zusammenfassung der außen anliegenden Temperaturen möglich, wodurch sich die Anzahl der Aktionen und damit die Anzahl der rekursiven Filter verringert. In der folgenden Darstellung wird jedoch davon ausgegangen, daß jede NAB-Fläche ein eigenes rekursives Filter erhält. Zur Ausgabe von Zwischenergebnissen, z.B. für die Teilreaktionskühllasten, könnte eine gewichtete Zusammenfassung der flächenspezifischen Aktionen vorteilhaft sein.

**Tabelle 3:** Aktionsgrößen und Luftwert

Aktion I		Aktionsgrößen	
Nr	Art		
1	QK	konvektive Wärmebelastungen innen (aufgeprägte und Wärmepotentiale) in W	$E(1)_k = \dot{Q}_P^{(K)} + \dot{Q}_B^{(K)} + \dot{Q}_M^{(K)} + \dot{Q}_S^{(K)} + \dot{Q}_H^{(K)}$ $+ \dot{m}_{FL} c_L (\vartheta_{La} - B\vartheta) + \sum_{NR} \dot{m}_{NR} c_L (\vartheta_{NR} - B\vartheta)$ $+ \dot{m}_{sonst} c_L (\vartheta_{sonst} - B\vartheta)$
2	QS	aufgeprägte absorbierte Strahlungswärme innen in W	$E(2)_k = \dot{Q}_P^{(S)} + \dot{Q}_B^{(S)} + \dot{Q}_M^{(S)} + \dot{Q}_S^{(S)} + \dot{Q}_H^{(S)}$
3	TL	Soll-Raumlufttemperatur in K	$E(3)_k = S\vartheta_{LR} - B\vartheta$
4	FE	Außentemperatur vor transparenter Außenfläche (Fensterglasfläche) in K	$E(4)_k = \vartheta_A - B\vartheta$
5	AW	Kombinierte Außentemperatur vor nichttransparenter Außenfläche (Außenwände, Dächer) in K	$E(5)_k = \frac{a_S I}{\alpha_A} + \vartheta_A - B\vartheta$
6	IT	Nachbarraumtemperatur vor Innentür in K	$E(6)_k = \vartheta_{NR,IT} - B\vartheta$
7	IW	Nachbarraumtemperatur vor Innenwand in K	$E(7)_k = \vartheta_{NR,IW} - B\vartheta$
8	DE	desgleichen über Decke in K	$E(8)_k = \vartheta_{NR,DE} - B\vartheta$

**Tabelle 3:** Fortsetzung

Aktion I		Aktionsgrößen	
Nr	Art		
9	FB	desgleichen unter Fußboden in K	$E(9)_k = \vartheta_{NR,FB} - B\vartheta$
Luftwert: $L_k = (\dot{m}c)_{FL,k} + \sum_{NR} (\dot{m}c)_{NR,k} + (\dot{m}c)_{sonst,k}$			

Aus der VDI 2078 Ausgabe 10/1994 ging nicht eindeutig hervor, daß in die Aktionsgröße E(5) nach Abschnitt 7.5 die kombinierte Außentemperatur einzutragen ist. Eine Klarstellung wurde mit der Ausgabe 7/1996 erreicht (vgl. Glg. (7.7) beider Ausgaben). In **Tabelle 3** ist eine gleichwertige Schreibweise für E(5) angegeben.

Die kombinierte Außentemperatur setzt sich aus der Außentemperatur und einem Term für die Absorption der kurzwelligigen Sonnenstrahlung zusammen. Die Außentemperatur berücksichtigt die Ausstrahlung der Fläche in die Atmosphäre und die atmosphärische Gegenstrahlung bei klarem Himmel. Diese Effekte können eine rechnerische Absenkung unter der Außenlufttemperatur von max. 6 K bewirken.

Die kombinierte Außentemperatur nach Nehring gem. *VDI 2078* [1, Glg. (5.17)] berücksichtigt allerdings nicht die mehrfachen Reflexionen im Außenraum zwischen Himmel, Erde und Wandoberfläche. Außerdem liegen inzwischen neuere Erkenntnisse über den Emissionsgrad der Gegenstrahlung vor. In der *VDI 2078* wird dieser Wert mit konstant  $\epsilon_G = 0,74$  angenommen, ist aber abhängig von der momentanen Außenlufttemperatur (s.u.).

In [4] wird eine Gleichung angegeben, welche die mehrfachen Reflexionen berücksichtigt und es werden die Ergebnisse einiger Vergleichsrechnungen vorgestellt. Die Unterschiede können besonders bei niedrigen Emissionsgraden beträchtlich sein.

Es ist zu beachten, daß es sich hier um ein EDV-Verfahren handelt, bei dem der Anwender die Parameter einer Gleichung frei eingeben kann. Z.B. wäre ein niedriger Emissionsgrad bei Parkplatzflächen vor dem Gebäude oder bei Gebäuden mit Aluminiumfassade denkbar. Für solche Fälle darf die Gleichung nicht unsinnige Werte liefern, die vom Anwender u.U. nicht zu erkennen sind, da sie als Zwischenergebnis vom Programm nicht ausgegeben

werden. Mit der kombinierten Außentemperatur nach Nehring sind rechnerische Außentemperaturabsenkungen von bis zu 30 K erreichbar.

Weiterhin ist anzumerken, daß die genannten Effekte selbstverständlich auch an der äußeren Oberfläche von transparenten Flächen auftreten und somit auch in die Aktionsgröße E(4) einfließen müssen. Es wird daher eine einheitliche Definition der Außentemperatur sowohl für Außenwände und Dächer, als auch für Fenster vorgeschlagen.

Für den Fall, daß die terrestrische Umgebungstemperatur gleich der Außenlufttemperatur ist, gilt für die Außentemperatur nach [4]

$$\vartheta_A = \vartheta_{La} - \frac{\varepsilon_W C_S}{\alpha_A} \left[ (1 - \varphi_{W,U} \varepsilon_U) (1 - \varepsilon_G) \right] \left( \frac{\vartheta_{La} + 273,15}{100} \right)^4 \quad (2)$$

$\vartheta_A$	Außentemperatur in °C
$\vartheta_{La}$	Außenlufttemperatur in °C für die Kühllastzonen 1-4
$\varepsilon_W$	Emissionsgrad der Wandoberfläche
$\varepsilon_G = 0,099 \left( \frac{\vartheta_{La} + 273,15}{100} \right)^2$	Emissionsgrad der Gegenstrahlung
$\varepsilon_U$	Emissionsgrad der terrestrischen Umgebung
$C_S$	Strahlungskonstante des schwarzen Körpers 5,67 W/(m <sup>2</sup> K <sup>4</sup> )
$\varphi_{W,U} = 1 - \frac{1 + \cos \gamma_F}{2}$	Einstrahlzahl für Wandfläche auf terrestrische Umgebung
$\gamma_F$	Neigungswinkel gegen die Horizontale
$\alpha_A$	äußerer Wärmeübergangskoeffizient in W/(m <sup>2</sup> K)

Der äußere Wärmeübergangskoeffizient ist temperaturabhängig. Es sollte mindestens zwischen Sommer- und Winterfall unterschieden werden :

Winterfall nach DIN 4701 [5] :  $\alpha_A = 25,0 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$

Sommerfall nach CEN TC89/WG6 N. 225 [6] :  $\alpha_A = 13,5 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$

Bei der heutigen Wärmedämmung werden die Auswirkungen dieser Veränderung auf den Wärmedurchgangskoeffizienten k gering sein.

Die Außenlufttemperaturen für die Kühllastzone 1-4 wurden nicht mit der endgültigen Hollan-Korrektur ermittelt. Eine Überarbeitung befindet sich in [7]. Die Unterschiede betragen max. 0,4 K (s.a. Datei `klzon.asc` auf der Homepage des Autors).

## Übergangsfunktionen

Das Problem der Ermittlung des thermisch-dynamischen Verhaltens von Räumen liegt in der Lösung der eindimensionalen, instationären Wärmeleitungsgleichung von Fourier. Analytische Lösungen existieren nur für Spezialfälle. Man muß daher auf numerische Lösungen zurückgreifen, wie sie z.B. in Simulationsprogrammen vollzogen werden.

Die Berechnungen haben den Zweck, das thermisch-dynamische Verhalten durch Approximationsgleichungen mit Ordnungsreduktion in einer einfacheren Form abzubilden. Das Simulationsprogramm erzeugt dabei für bestimmte Eingangstestsignale eine Datenmenge, die einer sog. Prozeßidentifikation unterzogen werden. Der zu identifizierende Prozeß (bzw. Modell) sollte dabei eine geringere Ordnung aufweisen, als das Originalmodell im Simulationsprogramm. Für die Auswahl der zahlreichen Verfahren zur Prozeßidentifikation spielt der Verlauf und die Form des Datenmaterials für die Aktionsgrößen eine wesentliche Rolle. Es sind folgende Verfahren denkbar :

- Identifikation anhand der Antwort auf Pseudo-Rausch-Binär-Signale (PRBS)  
Das PRBS stellt eine Annäherung an das weiße Rauschen dar, bei dem alle Frequenzen die gleiche Amplitude aufweisen. Es hat daher den Vorteil, daß alle im Verlauf der Aktionsgröße enthaltenen Frequenzen gleichmäßig bewertet bzw. identifiziert werden.
- Frequenzgangapproximation  
Der Frequenzgang der Kühllast läßt sich analytisch berechnen. Für kontinuierlich und rein periodisch verlaufende Aktionsgrößen wäre hier eine exakte Lösung schon gefunden. Bei der Approximation durch Übertragungsglieder einfacher Natur könnte man die Frequenzen sogar selbst festlegen, für die eine Genauigkeitsschranke einzuhalten wäre.
- Identifikation anhand der Sprungantwort  
Das Sprungsignal enthält Frequenzen mit unterschiedlicher Amplitudenstärke. Dadurch werden bestimmte Frequenzen bevorzugt identifiziert. Die Ergebnisse sind nur auf Eingangssignale mit Treppenverlauf oder Rechteckverläufe unterschiedlicher Andauer anwendbar. Bei einem Sprung von 0 auf 1 bezeichnet man die Sprungantwort als Übergangsfunktion.

In der vorliegenden Arbeit und in der aktuell gültigen *VDI 2078* [1] kommt das letztgenannte Verfahren zur Anwendung. Der Grund liegt in dem zur Verfügung stehenden Datenmaterials des Planers. Die Außenklimadaten werden von den Meteorologen als Stundenmittelwerte veröffentlicht und haben daher einen treppenartigen Verlauf. Lediglich der Verlauf der Sonnenstrahlung an klaren Tagen ist als kontinuierliche Funktion berechenbar. Die innere Belastung erfolgt zumeist schlagartig, z.B. durch Licht einschalten oder Personenbelegung. Hier wäre nur zu überlegen, ob Filterkoeffizienten für eine Zeitschrittweite von einer halben Stunde notwendig sind.

Für die oben definierten Typ-Räume und Aktionsarten wurden die Übergangsfunktionen mit anderen Programmen (TGASim und RANAL) als bisher berechnet.

### **TGASim (Thermisches Gebäude- und Anlagenssimulationsprogramm)**

Die Wandschichten der Raumschließungsflächen werden bei diesem Programm in kleine Abschnitte unterteilt. Jedem dieser Abschnitte wird eine Stützstellentemperatur zugeordnet. Für jede Stützstellentemperatur wird eine Differentialgleichung 1. Ordnung aufgestellt. Die betrachtete Stützstellentemperatur ist von den beiden benachbarten Stützstellentemperaturen abhängig. Durch diese Anbindung ergibt sich für die gesamte Wand ein Modell höherer Ordnung.

Die Koeffizienten der Differentialgleichung werden aus einer mathematischen Struktur und nicht aus einem analogen elektrischen Modell (RC-Glieder, sog. Beukenmodell) abgeleitet. Die thermisch-elektrische Analogie existiert eigentlich nur für das elektrische Kabel. Die Effekte Widerstand und Speicherung bzw. elektr. Kapazität treten im Kabel und im Schichtmaterial gleichzeitig auf (System mit verteilten Parametern). Bei den elektrischen Schaltkreisen sind die Widerstände und Kondensatoren örtlich voneinander getrennt (System mit konzentrierten Parametern). Der örtliche Diskretisierungsfehler hängt sogar davon ab, ob die R- und C-Bauteile in T-, Π- oder L-Schaltung angeordnet sind [8]. Nur eine hohe Anzahl von RC-Gliedern kann diesen Fehler verringern.

Die Temperatur der speicherfähigen Raumluft formuliert sich aus einer konvektiven Wärmebilanz ebenfalls zu einer Differentialgleichung 1. Ordnung. Um eine Übereinstimmung mit den Voraussetzungen der *VDI 2078* zu erreichen, wird in der Dateneingabe  $(c \rho)_{\text{Luft}}$  auf einen sehr niedrigen Wert gesetzt.

Unter Berücksichtigung der Strahlungsankopplung an die anderen inneren Oberflächen sowie die Ankopplung an die Raumlufthtemperatur entsteht ein gekoppeltes Differentialgleichungssystem, welches alle Stützstellentemperaturen der Wände und Fenster sowie die Raumlufthtemperatur umfaßt. Dieses System hoher Ordnung wird mit der Zustandsraummethode analytisch für den Fall konstanter Aktionsgrößen innerhalb der Zeitschrittweite gelöst. Für die numerische Auswertung müssen Matrizenmultiplikationen als Reihenentwicklungen durchgeführt werden, wobei nach Erreichen der gewünschten Genauigkeit die Reihenentwicklung abgebrochen wird.

Die Zustandsraummethode ist sehr übersichtlich und ermöglicht u.a. die Berücksichtigung temperaturabhängiger Wärmeübergangskoeffizienten. Im Gegensatz zu den impliziten Differenzenverfahren ist die Zeitschrittweite praktisch frei wählbar. Fehlerquellen können sich durch eine zu grobe Stützstelleneinteilung und durch eine zu geringe Reihengliederauswertung ergeben. Ein Nachteil des Verfahrens ist der hohe Speicherplatzbedarf. Nähere Einzelheiten s.a. `zustr.a.pdf` auf der Homepage des Autors.

### **RANAL (Raum-Analyse-Programm)**

Die Fourier'sche Wärmeleitungsgleichung in eindimensionaler, instationärer Form läßt sich für periodisch und kontinuierlich verlaufende Aktionsgrößen analytisch lösen. Durch Berücksichtigung der Strahlungs- und Luftankopplung erhält man ein lineares Gleichungssystem für die Oberflächentemperaturen im Raum (*Masuch* [9]). Aus den Oberflächentemperaturen läßt sich die Kühllast für jede Kreisfrequenz  $\omega$  berechnen. Die Übergangsfunktion erhält man aus dem komplexen Kühllast-Frequenzgang  $F(j\omega)$  durch

$$h(t) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \operatorname{Re}[F(j\omega)] \frac{\sin(\omega t)}{\omega} d\omega \quad (3)$$

$\operatorname{Re}[F(j\omega)]$       Realteil des komplexen Frequenzganges

$\omega$                       Kreisfrequenz

$t$                         Zeit

$j = \sqrt{-1}$             imaginäre Einheit

Die einzige Fehlerquelle in diesem Verfahren liegt in der numerischen Lösung dieses Integrals. Der besondere Vorteil bei dem Frequenzgangverfahren ist die Möglichkeit der analytischen Grenzwertbildung für den stationären Zustand ( $\omega = 0$ ) und dem Anfangs-

zustand (Durchgriff) bei  $\omega = \infty$ . Diese beiden Eckwerte lassen sich ohne numerische Integration ermitteln.

## Ergebnisse

Die leistungsbezogenen Aktionsgrößen QK und QS werden aus einem Beharrungszustand heraus zum Zeitpunkt  $t = 0$  von 0 auf 1 W angehoben, die restlichen temperaturbezogenen Aktionsgrößen (TL...IW) von 0 auf 1 K. Die jeweils anderen Aktionsgrößen bleiben dabei auf konstant 0. Die aus diesem Vorgang erforderliche positiv gezählte Kühllast stellt die Übergangsfunktion dar, die für 21 Tage berechnet wurde. Sie strebt dabei gegen einen stationären Endwert, der sich merklich nicht mehr verändert.

Die Berechnung und Darstellung der Aktionsgröße QK kann entfallen, da die Übergangsfunktion hierfür sofort zum Zeitpunkt  $t = 0$  den stationären Endwert von 1 annimmt. Dies liegt an der Definition der Kühllast als eine rein konvektive Last.

Trotz völlig verschiedener Algorithmen lieferten beide Programme eine sehr gute Übereinstimmung. Die Unterschiede sind grafisch nicht darstellbar, weshalb in den folgenden Bildern nur die Ergebnisse des TGASim-Programmes gezeigt werden. Zur Verdeutlichung ist die Zeitachse auf 120 Stunden begrenzt.

Bis auf die Aktion TL starten alle Übergangsfunktionen im Nullpunkt. Für die Erhöhung der Raumlufthtemperatur  $\vartheta_{LR}$  von 0 auf 1 K bei der Aktion TL wird eine Heizlast (negative Kühllast) benötigt, die sofort zum Zeitpunkt  $t = 0$  ihr Maximum von  $\sum \alpha_K A (\vartheta_{LR} - 0) = 197,2 \text{ W}$  annimmt. Erst durch die Erwärmung der Raumschließungsflächen sinkt die Temperaturdifferenz und die Heizlast nimmt allmählich ab. Diese sofortige Reaktion wird als Durchgriff bezeichnet und ergibt sich aus der Annahme einer speicherlosen Raumlufth.

Aufgrund der unterschiedlichen Wärmedurchgangskoeffizienten bei der Innenwand und Innentür zwischen den einzelnen Raumtypen erreichen die Übergangsfunktionen nicht mehr einen gemeinsamen stationären Endwert (vgl. [2]). Da die Übergangsfunktionen ohnehin normiert werden, besteht hierfür auch keine Notwendigkeit.

Die Abweichungen der dargestellten Übergangsfunktionen zu den hier nicht aufgeführten Übergangsfunktionen der Aktionen QS, TL, FE und AW für den adiabaten Typ-Raum gem. aktueller VDI 2078 sind vernachlässigbar gering. Größere Abweichungen sind

allerdings zu erwarten, wenn alle Innenflächen nicht-adiabat sind. Bei Räumen mit nicht-adiabaten Bauteilen fällt die Speicherwirkung geringer aus.

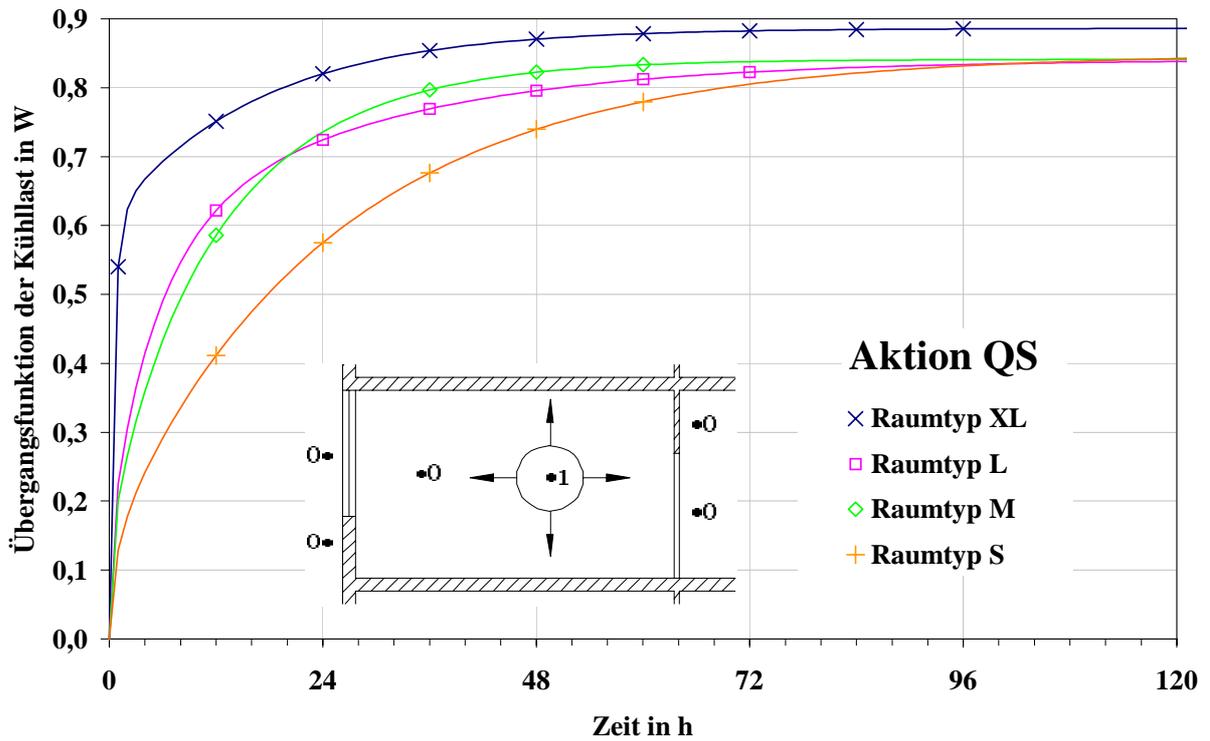
Die Fläche oberhalb einer Übergangsfunktion bis zur Grenze des stationären Endwertes stellt die gespeicherte Wärmemenge dar. Die gespeicherte Wärmemenge ist proportional der Summenzeitkonstante  $T_{\Sigma}$

$$Q_{sp} = [h(\infty) - h(0)] T_{\Sigma} \quad (4)$$

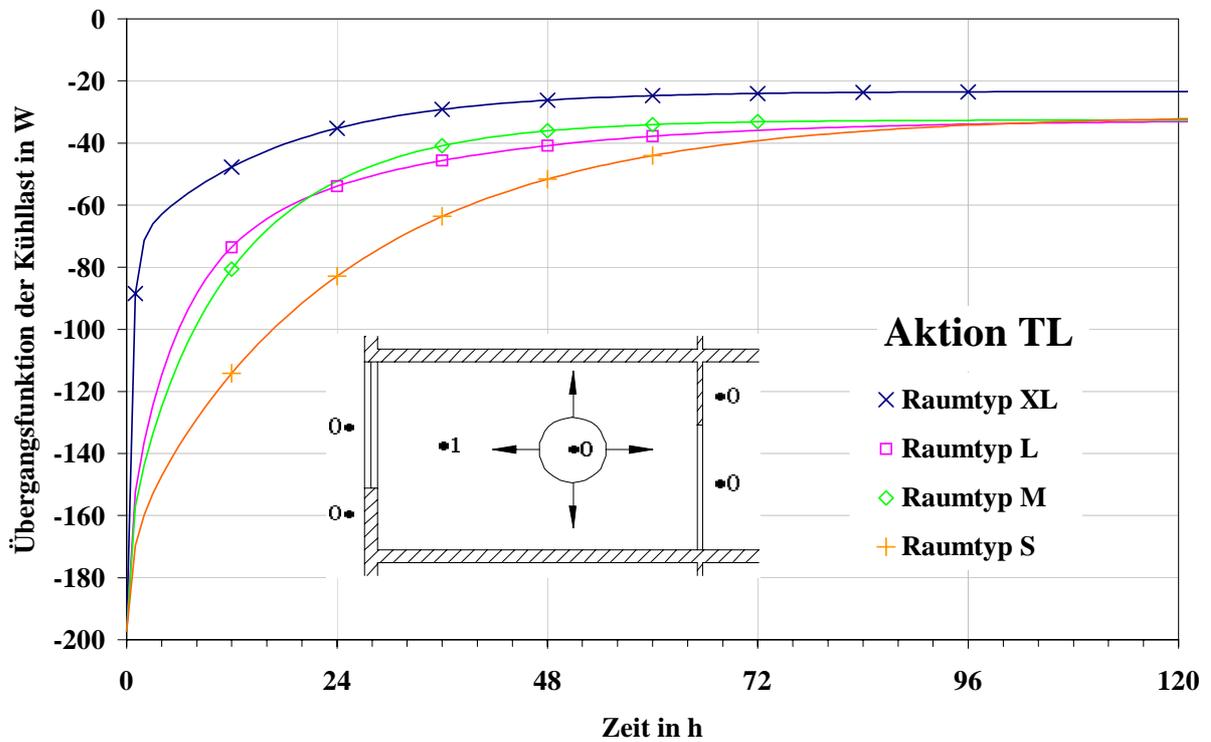
$Q_{sp}$  gespeicherte Wärmemenge in Wh

$T_{\Sigma}$  Summenzeitkonstante in h

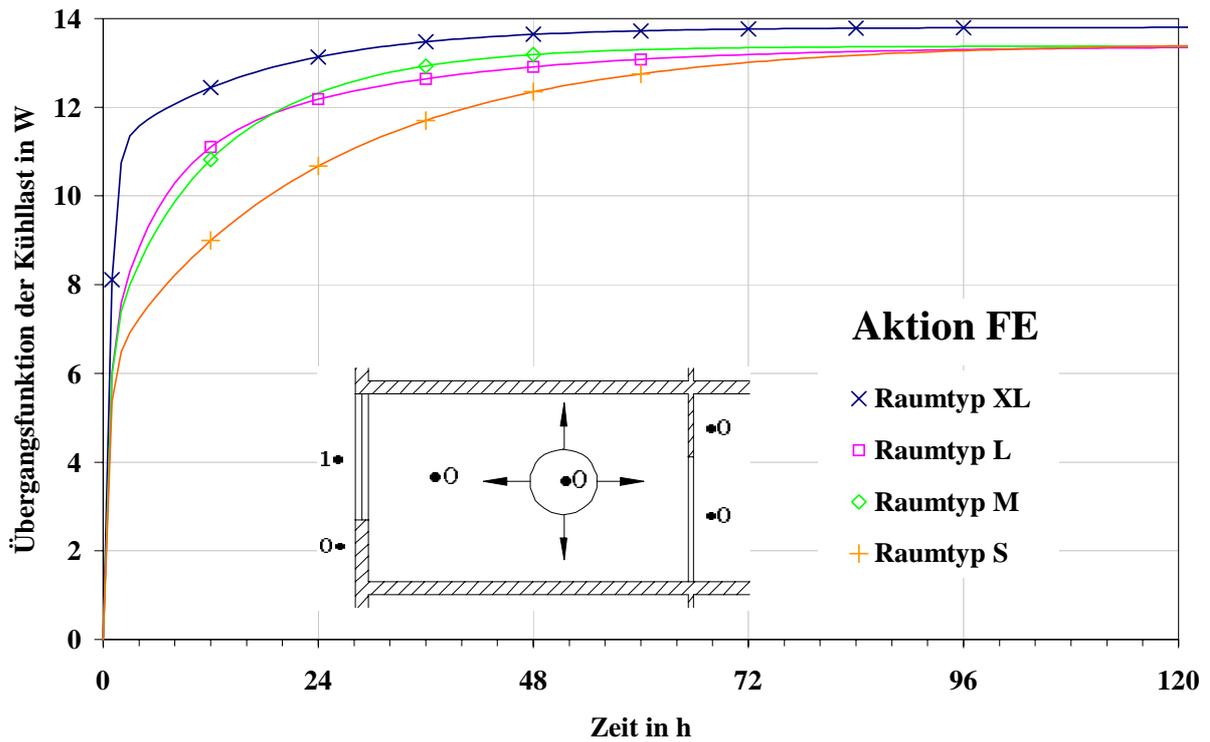
Bei einem Proportionalglied mit Verzögerung n. Ordnung (PTn-Glied) ist die Summenzeitkonstante gleich der Summe der Zeitkonstanten  $T_1 \dots T_n$ . Die Vorhaltzeit (bzw. Differenzierzeit)  $T_V$  bei einem Proportional-Differentialglied mit Verzögerung 1. Ordnung (PDT<sub>1</sub>-Glied) geht bei dieser Summenbildung negativ ein ( $T_{\Sigma} = T_1 - T_V$ ).



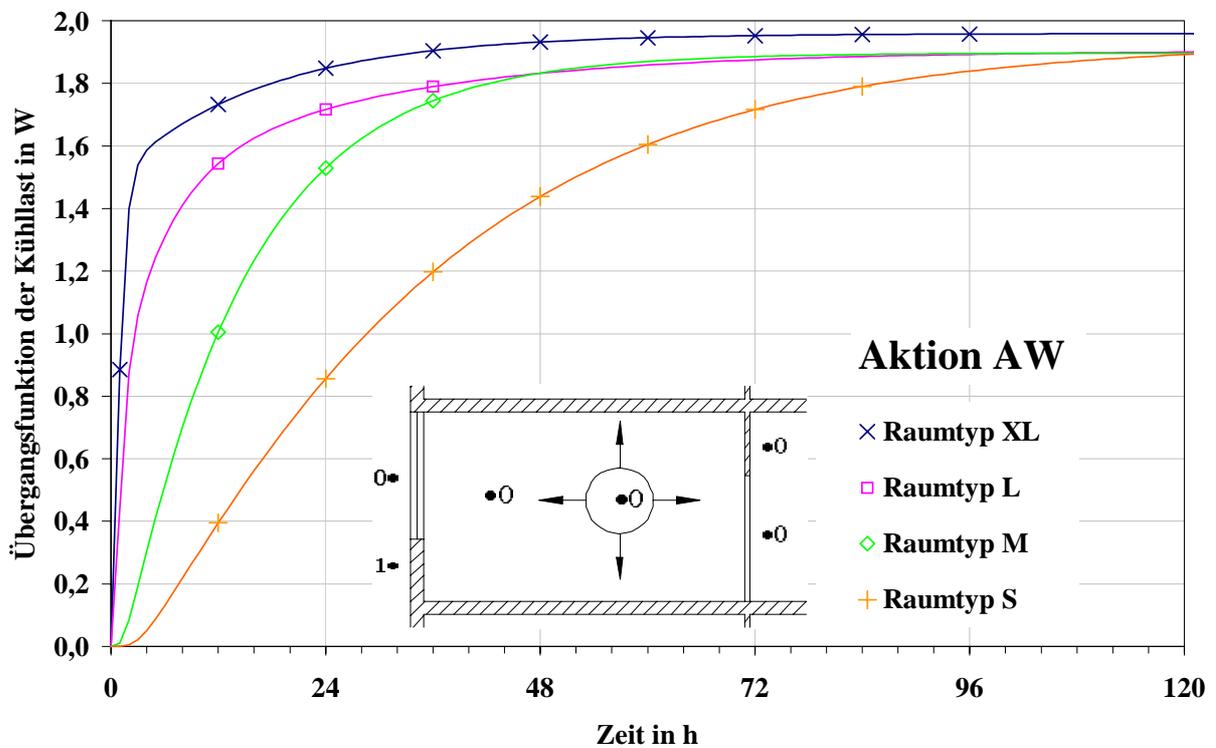
**Bild 2:** Übergangsfunktionen der Aktion "aufgeprägte absorbierte Strahlungswärme innen"



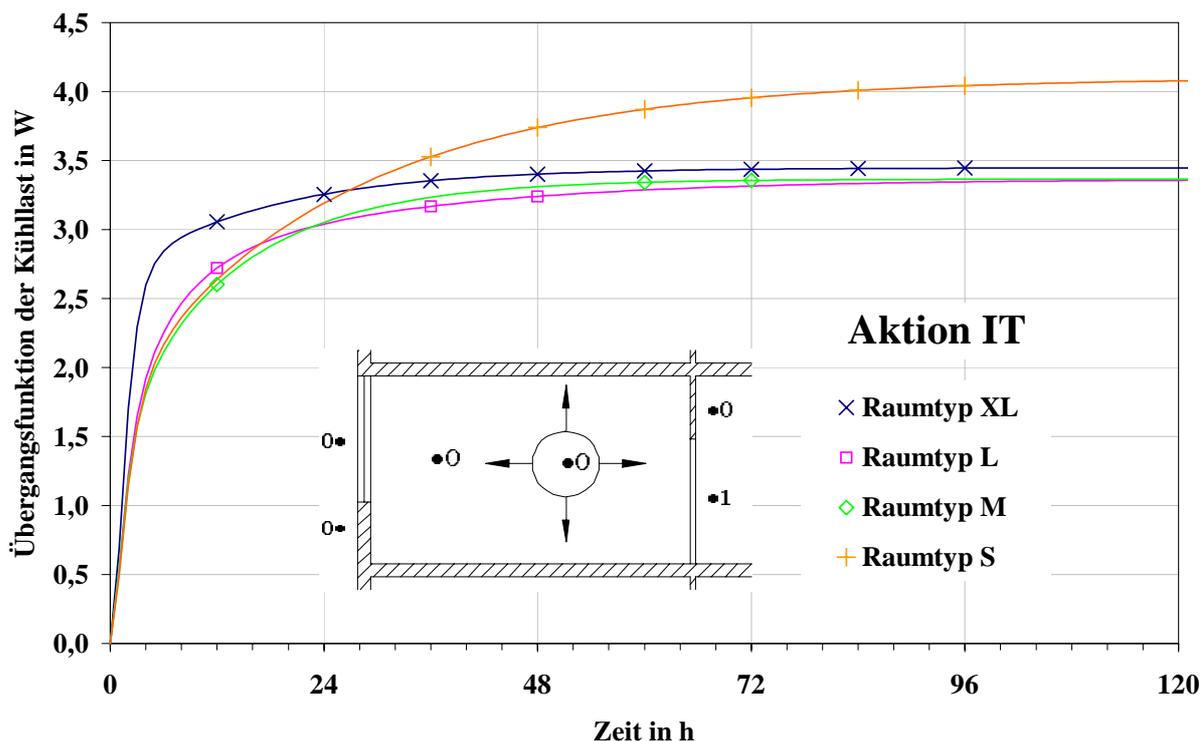
**Bild 3:** Übergangsfunktionen der Aktion "Soll-Raumlufttemperatur"



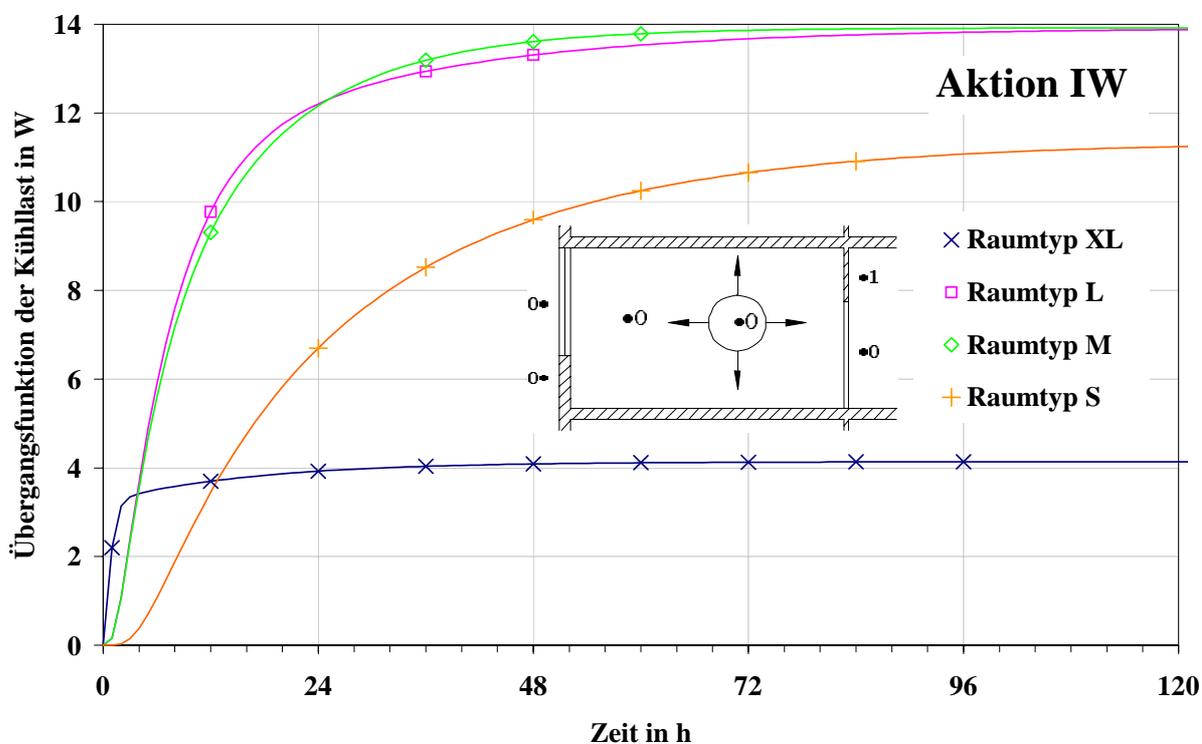
**Bild 4:** Übergangsfunktionen der Aktion "Außentemperatur vor transparenter Außenfläche"



**Bild 5:** Übergangsfunktionen der Aktion "Kombinierte Außentemperatur vor nichttransparenter Außenfläche"



**Bild 6:** Übergangsfunktionen der Aktion "Nachbarraumtemperatur vor Innentür"



**Bild 7:** Übergangsfunktionen der Aktion "Nachbarraumtemperatur vor Innenwand"

**Tabelle 4** stellt die stationären Endwerte bei  $t = \infty$  für alle Aktionen und Raumtypen zusammen. Zum Vergleich sind die Stationärwerte angegeben, wie sie sich aus den Wärmedurchgangskoeffizienten \* Fläche ( $k \cdot A$ ) nach **Tabelle 5** berechnen. Das Analyse-

programm RANAL errechnet den stationären Zustand für die gewählte Aktion getrennt nach konvektivem und langwelligem raumwinkelgerechten Strahlungswärmeübergang. Es werden alle inneren Oberflächentemperaturen ermittelt, wodurch auch das sog. "Energieloch" (vgl. [2]) Berücksichtigung findet.

**Tabelle 4:** Kennwerte für jede Aktion und Raumtyp

Aktion	Stationärwerte			Summenzeit- konstante in h	Gespeicherte Wärmemenge in Wh
	RANAL	mit k*A	Fehler in %		
<b>Raumtyp XL</b> Durchgriff der Aktion TL: -197,2 W/K					
QS	0,89	0,87	-1,4	5,7	5
TL	-23,37	-24,93	6,7	5,2	912
FE	13,81	14,75	6,8	4,2	58
AW	1,96	2,08	6,3	4,8	9
IT	3,45	3,67	6,3	5,5	19
IW	4,14	4,43	7,0	4,4	18
<b>Raumtyp L</b> Durchgriff der Aktion TL: -197,2 W/K					
QS	0,84	0,82	-2,6	11,4	10
TL	-32,59	-35,69	9,5	10,9	1788
FE	13,38	14,75	10,2	7,8	105
AW	1,90	2,09	9,7	8,8	17
IT	3,37	3,67	8,9	9,1	31
IW	13,92	15,19	9,1	12,7	177
<b>Raumtyp M</b> Durchgriff der Aktion TL: -197,2 W/K					
QS	0,84	0,82	-2,6	10,4	9
TL	-32,59	-35,69	9,5	10,0	1646
FE	13,38	14,75	10,2	6,9	93
AW	1,90	2,08	9,7	15,3	29
IT	3,37	3,67	8,9	8,5	29
IW	13,92	15,19	9,1	12,0	167
<b>Raumtyp S</b> Durchgriff der Aktion TL: -197,2 W/K					
QS	0,85	0,83	-2,4	21,6	18
TL	-30,87	-33,65	9,0	20,9	3472
FE	13,46	14,75	9,6	14,2	191
AW	1,93	2,11	9,1	35,7	69
IT	4,10	4,44	8,3	15,8	65
IW	11,36	12,35	8,7	27,5	312
<b>Zeichensaal</b> Durchgriff der Aktion TL: -1343,3 W/K					
QS	0,84	0,80	-4,0	23,5	20
TL	-239,12	-265,19	10,9	23,6	26022
FE	101,91	113,40	11,3	14,9	1515
AW	64,45	71,68	11,2	35,6	2297
IT	8,74	9,61	10,1	16,4	144
IW	63,89	70,49	10,3	26,0	1660

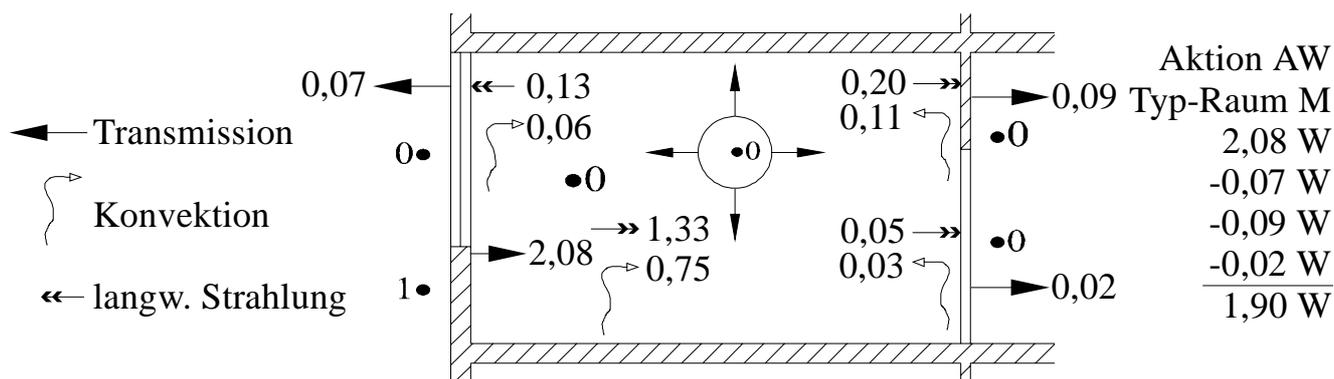
**Table 5:** Algorithmen für die Denormierung und Berechnung der Soll-Kühllast

Aktion $l$		Stationärwert $S(l)$	Durchgriff $D(l)$
Nr	Art		
1	QK	1	1
2	QS	$1 - \frac{\sum (k A)_{NAB}}{\sum_{RU} (\alpha_K A)_{RU}}$	0
3	TL	$-\sum_{NAB} (k A)_{NAB}$	$-\sum_{RU} (\alpha_K A)_{RU}$
4	FE	$(k A)_{FE}$	0
5	AW	$(k A)_{AW}$	0
6	IT	$(k A)_{IT}$	0
7	IW	$(k A)_{IW}$	0
8	DE	$(k A)_{DE}$	0
9	FB	$(k A)_{FB}$	0
<b>Denormierung</b>			
$A(l)_m = a(l)_m [S(l) - D(l)] \left. \vphantom{A(l)_m} \right\} \text{für } \begin{cases} l = 1 \dots N_{Akt} \\ m = 0 \dots N_a - 1 \\ n = 1 \dots N_b \end{cases}$ $B(l)_n = b(l)_n$			
<b>Soll-Kühllast des Raumes</b>			
$SKL(l)_k = \sum_{m=0}^{N_a-1} A(l)_m E(l)_{k-m} + \sum_{n=1}^{N_b} B(l)_n KL(l)_{k-n}$ $\text{Soll - Kühllast : } SKL_k = \sum_{l=1}^{N_{Akt}} [SKL(l)_k + D(l) E(l)_k] - L_k E(3)_k$			

Zur Verdeutlichung dieses Vorganges sind in **Bild 8** die beteiligten Wärmeströme im stationären Zustand beispielhaft erfaßt. Durch die Anhebung der kombinierten

Außentemperatur von 0 auf 1 K vor der Außenwand entsteht ein Transmissionswärmestrom nach innen in Höhe von 2,08 W. Die damit verbundene Erhöhung der inneren Oberflächentemperatur auf der Außenwand führt zu einer direkten konvektiven Wärmeabgabe in Höhe von 0,75 W und zu einer langwelligen Strahlungswärmeabgabe an andere Raumbooberflächen in Höhe von 1,33 W. Die Erwärmung der anderen Oberflächen durch die Außenwand wird zum Teil in Konvektion umgesetzt, zum Teil wird durch die nicht-adiabaten Flächen Transmissionswärme aus dem Raum abgeführt. Die Strahlungswärmeabgabe an die adiabaten Raumbooberflächen wird vollständig in Konvektion umgewandelt. Die rein konvektive Kühllast setzt sich also aus einem direkten Anteil an der Außenwand und einem Sekundäranteil durch die Strahlungsumwandlung an den anderen Oberflächen zusammen. Da die äußeren Temperaturen der nicht-adiabaten Flächen auf konstant 0 gehalten werden, führt das Temperaturgefälle nach außen zu einer Minderung der Kühllast von 2,08 W auf tatsächlich 1,90 W.

Diese Vorgänge werden durch eine Berechnung mit  $k \cdot A$  nicht erfaßt. Die in **Tabelle 5** ausgewiesenen Formeln für die Stationärwerte stellen daher nur eine Näherung dar, wodurch die in **Tabelle 4** aufgeführten Fehler von bis zu 11 % entstehen. Die Problematik wird durch die Einführung nicht-adiabater Innenflächen verschärft. Allerdings ist zu bemerken, daß die Wärmebedarfsberechnung nach *DIN 4701* [5] das "Energieloch" durch Strahlungsankopplung ebenfalls nicht berücksichtigt.



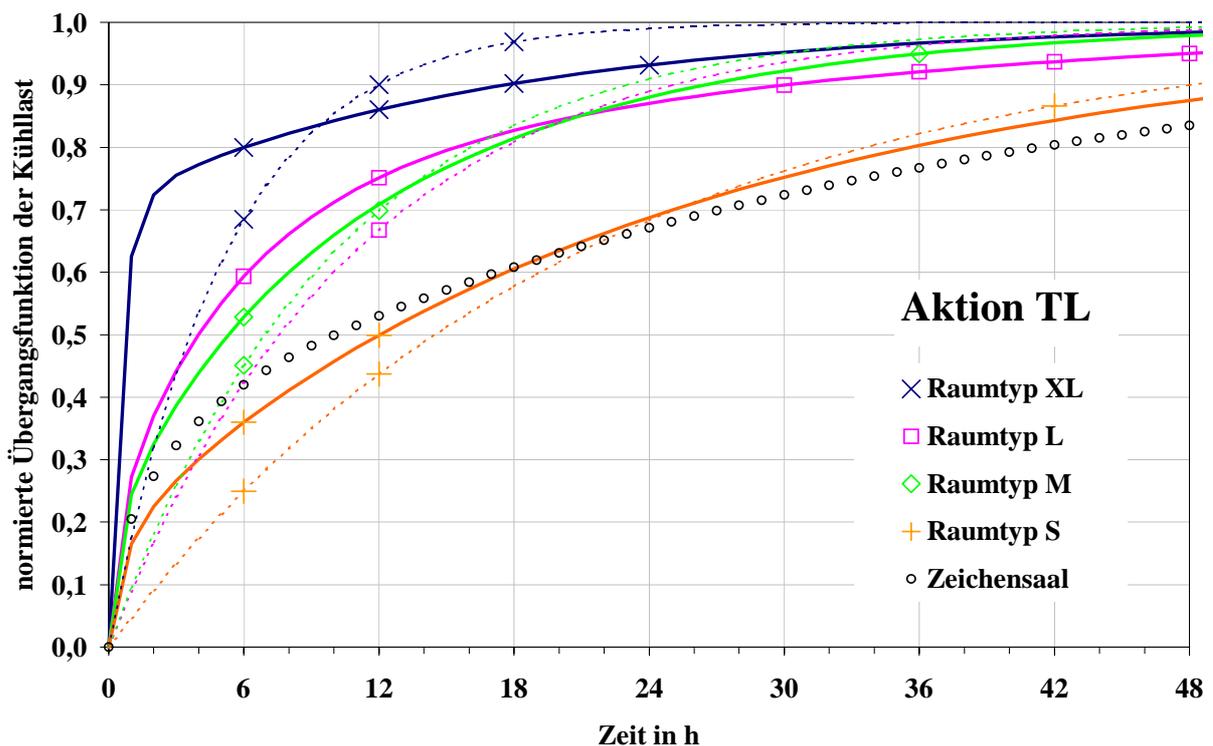
**Bild 8:** Stationäre Wärmeströme an den nicht-adiabaten Flächen im Typ-Raum M bei der Aktion AW

Der Vergleich der Summenzeitkonstante bzw. der gespeicherten Wärmemenge mit dem Stationärwert ergibt ein interessantes Ergebnis. Die Fenster haben bei allen Raumtypen die gleiche Konstruktion. Die Stationärwerte für das Fenster unterscheiden sich daher bei den Raumtypen nicht. Bei der Summenzeitkonstante liegen dagegen erhebliche Differenzen vor. Dies läßt sich auch bei der Innentür für die Typ-Räume XL, L und M und bei der

Innenwand für die Typ-Räume L und M ablesen. Offenbar wird die Speicherfähigkeit eines Bauteils über die Strahlungsankopplung an andere Bauteile umso stärker beeinflusst, je leichter das Bauteil ist. Die Einschätzung der Wärmespeicherfähigkeit einer nicht-adiabaten Fläche für Aktionen von außen ist daher sinnlos, wenn man nur das einzelne Bauteil isoliert betrachtet.

## Filterkoeffizienten

Die Normierung aller vorstehenden Übergangsfunktionen erfolgt hier grundsätzlich mit der *Glg.* (1) in zeitdiskreter Form und mit den Ergebnissen aus dem Programm RANAL. Am Beispiel der Aktion TL sind in **Bild 9** die normierten Übergangsfunktionen dargestellt. Zusätzlich eingetragen ist der Verlauf der Übergangsfunktion für ein Verzögerungsglied 1. Ordnung (gestrichelte Kurve mit der Farbe des zugehörigen Raumtyps). Als Zeitkonstante hierfür wurde die Summenzeitkonstante eingesetzt. Die Flächen oberhalb der durchgezogenen und der dazugehörigen gestrichelten Kurve sind damit identisch.



**Bild 9:** Normierte Übergangsfunktionen der Kühllast für die Aktion TL in den Typ-Räumen und Zeichensaal. Gestrichelte Kurven: Verzögerungsglied 1. Ordnung

Die große Abweichung zwischen gestrichelter und ausgezogener Kurve belegt, daß eine Approximation mittels Verzögerungsglied 1. Ordnung nicht für alle Aktionen und Raumtypen geeignet ist (vgl. Rouvel und Zimmermann [3, Teil 1, Glg. 4]). Zur besseren Anpassung wird statt dessen eine Ansatzfunktion höherer Ordnung benötigt, welche die

mehrfachen unterschiedlich hohen Zeitkonstanten in der Übergangsfunktion berücksichtigen kann.

Eine solche "biegsame" Ansatzfunktion ist das rekursive Filter in der Form

$$y_k = \sum_{m=0}^{N_a-1} a_m u_{k-m} + \sum_{n=1}^{N_b} b_n y_{k-n} \quad (5)$$

$y_k, y_{k-1}, y_{k-2}, \dots$	Reaktionsgröße (Kühllast) zum Zeitpunkt $k \Delta t$ und die $N_b$ zurückliegenden Reaktionsgrößen
$u_k, u_{k-1}, u_{k-2}, \dots$	Aktionsgröße zum Zeitpunkt $k \Delta t$ (z.B. als Mittelwert der letzten Stunde) und die $N_a-1$ zurückliegenden Aktionsgrößen
$\Delta t$	Zeitschrittweite, in der <i>VDI 2078</i> [1] $\Delta t = 1$ Stunde
$k$	Laufzähler für die diskreten äquidistanten Zeitschritte $> 0$
$N_a$	Anzahl der a-Filterkoeffizienten
$N_b$	Anzahl der b-Filterkoeffizienten (Filterordnung)

Das rekursive Filter darf nicht mit der Faltungssumme in zeitdiskreter Form (s. *VDI 2078* [1, Glg. 7.1a]) verwechselt werden. Die darin enthaltenen Gewichtungsfaktoren stehen in keinem Zusammenhang zu den a- und b-Koeffizienten des rekursiven Filters als Approximationsfunktion. Von der Bezeichnung "Gewichtungsfaktoren" (vgl. *VDI 2078* [1, Tab. A23]) sollte man daher Abstand nehmen, da sie zu Fehlinterpretationen führte. Hier wird die Bezeichnung "Filterkoeffizienten" verwendet. Die Ausführung der *Glg.* (5) wird jedoch als "rekursive Faltung" bezeichnet.

Die Filterkoeffizienten ermitteln sich aus den normierten Übergangsfunktionen mit Hilfe der Methode der kleinsten Fehlerquadrate. Bei Kenntnis dieser Koeffizienten kann für jede beliebige Treppenfunktion der Aktionsgröße der Verlauf der Reaktionsgröße zu diskreten Zeitpunkten berechnet werden.

Für Eingangsfolgen mit  $u_k = 1..∞ = u = \text{const.}$  erhält man den stationären Endwert zu

$$y_{\infty} = \left\{ \frac{\sum_{m=0}^{N_a-1} a_m}{1 - \sum_{n=1}^{N_b} b_n} [h(\infty) - h(0)] + h(0) \right\} u = \{ h_n(\infty) [h(\infty) - h(0)] + h(0) \} u \quad (6)$$

$h_n(\infty)$  stationärer Endwertfaktor der normierten Übergangsfunktion

Hieraus ist zu erkennen, daß der stationäre Endwertfaktor den Wert 1 annehmen muß, damit sich der tatsächliche stationäre Endwert von  $y_{\infty} = h(\infty) u$  einstellen kann.

Bei der neu durchgeführten Approximation der normierten Übergangsfunktionen mittels rekursiver Filter wurde ein Optimierungsverfahren bezüglich der a-Koeffizientenanzahl und der Filterordnung angewandt. Es wurden zunächst einige Kombinationen von  $N_a$  und  $N_b$  berechnet. Zur Auswahl gelangten diejenigen Filter, die folgende Kriterien erfüllten :

- Durch die rekursive Berechnung können sich kleine Fehler "hochschaukeln" und führen zu einem unsinnigen Ergebnis. Es gilt daher als absolute Voraussetzung für die Eignung eines Filters eine Stabilitätsbedingung einzuhalten, die hier nicht näher erläutert wird.
- Der stationäre Endwertfaktor muß sehr nahe bei 1 liegen.
- Die Standardabweichung sollte sehr klein sein.
- Der maximale Approximationsfehler darf 1 % nicht überschreiten.
- Die Ordnung  $N_b$  sollte möglichst gering sein.

Aus der so erhaltenen Filterkollektion wurde das Filter mit der geringsten Anzahl von Koeffizienten ausgewählt. Die Anzahl der Nachkommastellen für die Filterkoeffizienten wurde erhöht, damit sich Fehlerfortpflanzungen durch die wiederholte Benutzung der Koeffizienten verringern.

**Tabelle 6** stellt die ermittelten Filterkoeffizienten zusammen. Im Unterschied zu den Filterkoeffizienten in der VDI 2078 [1] mit  $N_b = 2$  und  $N_a = 4$  variiert hier die Anzahl der a- und b-Koeffizienten je nach Aktionsgröße. Teilweise war zur Einhaltung o.g. Bedingungen die 4. Ordnung notwendig.



Durch die Filterkoeffizienten für DE und FB werden nicht-adiabate Decken und Fußböden ähnlich der aktuellen VDI 2078 behandelt. Um die Innentür und die Rückwand des Raumes zum Flur ebenfalls als nicht-adiabate Flächen ohne Speicherwirkung zu berechnen, sind die Filterkoeffizienten für IT und IW durch die Eintragungen für DE bzw. FB zu überschreiben. Das Filterkoeffizienten für DE bzw. FB gelten auch für alle Flächentypen, die hier nicht weiter aufgeführt sind, z.B. für Innenfenster, Außentür oder Dach.

Im Raumtyp KS sind alle Bauteile speicherlos. Die Einführung dieses Raumtyps hat den Zweck, daß die Ergebnisse des EDV-Programmes überprüft werden können. Die Teilreaktionskühllasten sind für den Raumtyp KS mit den Aktionsgrößen zahlenmäßig identisch. Die rekursive Faltung und der Verlauf der Aktionsgrößen können damit außerhalb des EDV-Programmes nachvollzogen werden. Außerdem erhält man obere und untere Grenzwerte, die zudem den Unterschied zur Berechnung mit Berücksichtigung der Wärmespeicherfähigkeit verdeutlichen.

## **Berechnungsgang**

Nach Einlesen der Filterkoeffizienten müssen diese für jede Aktionsgröße  $l$  mit der Differenz  $S(l) - D(l)$  denormiert werden. Die Anzahl der Aktionsgrößen  $N_{Akt}$  variiert dabei in Abhängigkeit des zu berechnenden Real-Raumes.

Adiabate Innenflächen müssen im EDV-Programm nicht eingegeben werden! Zur Ermittlung von  $\sum_{RU} (\alpha_K A)_{RU}$  ist allerdings die Kenntnis über die gesamte

Raumumschließungsfläche notwendig. Wegen den unterschiedlichen konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten sollte diese nach horizontalen und vertikalen Flächen unterteilt werden.

Aus *Tabelle 5* wird auch die Stärke des Verfahrens deutlich. Der Anwender muß nur die Wärmedurchgangskoeffizienten der nicht-adiabaten Raumumschließungen und die Flächengrößen beschaffen und eingeben. Aufbauten der Wände und Fenster mit Dicke, Wärmeleitfähigkeit, Dichte und spez. Wärmekapazität jeder Schicht sind nur notwendig, wenn die Schwere des Raumes (Zuordnung zur Raumtypklasse) rechnerisch ermittelt werden muß.

Hier sollte die Möglichkeit offen gehalten werden, die Stationärwerte ohne "Energieloch"

mittels anderer Verfahren unter Berücksichtigung der Strahlungs- und Luftankopplung zu berechnen, z.B. mit der Annahme einer flächenproportional verteilten Strahlung.

Speicherlose Bauteile könnten allein mit dem Durchgriff berechnet werden. Zur Beibehaltung der gleichen Systematik wurden jedoch für die flächenspezifischen Aktionsgrößen in **Tabelle 6** Filter mit den Koeffizienten  $N_a + N_b = 1$ ,  $N_b = 0$  und  $a_0 = 1$  eingeführt.

Eine Besonderheit liegt beim Raumtyp KS vor. Da alle Bauteile dieses Raumes speicherlos sind, ist der Durchgriff für diesen Fall bei allen Aktionen mit dem Stationärwert identisch. Für die Anwendung der Gleichungen in **Tabelle 5** ist beim Raumtyp KS für alle  $l$   $D(l) = S(l)$  zu setzen. Für die folgenden Gleichungen gilt beim Raumtyp KS  $A(3)_0 = 0$ .

Wird der Wärmedurchgangskoeffizient z.B. nach *DIN EN ISO 6946* [10] berechnet, ist das Ergebnis  $U$  in den Ausdruck  $k$  der **Tabelle 5** einzusetzen.

### **Startwerte**

Für die Auswertung der Filtergleichung müssen zunächst die zurückliegenden Aktions- und Reaktionsgrößen mit Startwerten belegt werden. Dabei wird zwischen Anlauf- und Einschwingrechnung unterschieden. Die Anlaufrechnung soll realistische Startwerte für die Einschwingrechnung liefern.

Anlauf- und Einschwingrechnung sollen jeweils max. für 14 Tage durchgeführt werden. Der Grund liegt in der Aussage der Meteorologen, daß Wetterperioden max. 14 Tage andauern. Auch die Spektralzerlegung des Testreferenzjahres (TRY) zeigt eine deutliche Ausprägung der 14-tägigen Periode.

Im Hinblick auf eine Anwendung der Algorithmen bei einem Jahresdurchgang sollte für die Anlaufrechnung nicht von Mittelwerten (vgl. Glg. 7.14 bis 7.16, *VDI 2078* [1]) ausgegangen werden. Es wird hier die Vereinfachung empfohlen, alle Startwerte für die Anlaufrechnung auf "Null" zu setzen. Durch die Einführung der Bezugstemperatur  $B_{\theta} = 22$  °C bedeutet dies einen Start aus einem Beharrungszustand heraus, bei dem alle inneren und äußeren Temperaturen auf 22 °C liegen und keine inneren Lasten vorhanden sind.

Die Durchführung der Anlaufrechnung ist problematisch, da in der *VDI 2078* keine

realistischen Wetterdaten hierfür zur Verfügung stehen. Die Empfehlung im Abschnitt 7.12 Pkt. 2 ist auch nicht immer sinnvoll anwendbar, besonders nicht bei der Untersuchung von Extremsituationen. Einige Softwarehersteller sind diesen Empfehlungen auch nicht gefolgt und haben eigene Anlaufrechnungen entwickelt.

Solange für die Anlaufrechnung keine geeigneten Wetterdaten vorliegen, wird hier vorgeschlagen, die Kühllast grundsätzlich für den eingeschwungenen (quasistationären) Zustand zu ermitteln, sofern sie zur Dimensionierung von Anlagen verwendet wird. Das Abbruchkriterium für den eingeschwungenen Zustand ist in der *VDI 2078* [1] angegeben. Damit sind die Ergebnisse unabhängig vom gewählten Startwert bzw. von der Anlaufrechnung.

Bei Jahresrechnungen mit dem TRY-Daten wird empfohlen, den Berechnungsbeginn auf den 1. Dezember zu legen und für die Auswertung der Ergebnisse am 1. Januar zu beginnen.

### **Vorgabe der Soll-Raumlufttemperatur**

Gemäß *DIN 1946 Teil 2* [12] kann die Raumtemperatur mit der Außenlufttemperatur ansteigen. Dies wurde jedoch häufig als Fahrkurve für den Sollwert interpretiert und führte teilweise zu unsinnigen Ergebnissen (*Masuch* [13]). Da nicht zu erwarten ist, daß die Reglereinstellung im Raum in Abhängigkeit von der Außenlufttemperatur kurzfristig verstellt wird, wird die Vorgabe eines konstanten Sollwertes für die Raumlufttemperatur empfohlen. Der konstante Sollwert kann bei der Kühllastberechnung soweit erhöht werden, bis die operative Raumtemperatur (s.u.) die zulässige Grenze erreicht.

Bei Jahresberechnungen wäre jedoch die Programmierung einer von der Außenlufttemperatur und deren Andauer abhängigen Sollwertverstellung sinnvoll.

### **Begrenzung der Anlagenleistung**

Wurde die Soll-Kühllast für die Soll-Raumlufttemperatur nach **Tab. 5** ermittelt, erfolgt ein Vergleich mit einer vom Anwender vorgegebenen max. Anlagenleistung. Ist der eingegebene Wert entsprechend hoch gewählt, ergeben sich keine Unterschiede zwischen Ist- und Sollwert der Raumlufttemperatur. Hier besteht jedoch die Möglichkeit, die max. Anlagenleistung zu begrenzen und die Auswirkung auf die Raumlufttemperatur bzw. auf die Empfindungstemperatur (operative Raumtemperatur, s.u.) zu untersuchen.

In der **Tabelle 7** wird davon ausgegangen, daß eine bestimmte Leistung von der Anlage

vorgehalten werden kann. Im allgemeinen ist die Anlagenleistung jedoch eine Funktion der Raumlufttemperatur und damit ein Potential. Der Zusammenhang ist bei RLT-Anlagen für einige Anlagentypen analytisch bekannt. Die als Anregung gemeinte notwendige Umformung der Glg. 7.24 in der VDI 2078 [1] wurde jedoch nicht von allen Softwareherstellern umgesetzt. Für zukünftige Ausgaben der VDI 2078 sollte man davon ausgehen, daß nur die Algorithmen programmiert werden, die in der Richtlinie auch angegeben sind.

**Tabelle 7:** Ist-Raumlufttemperatur bei Leistungsregelung

<b>Leistungsbegrenzung</b>	
$K_k = \begin{cases} C_{\max} & \text{für } SKL_k > C_{\max} \\ -H_{\max} & \text{für } SKL_k < -H_{\max} \\ SKL_k & \text{sonst} \end{cases}$	$\begin{array}{ll} C_{\max} & \text{max. Kühlleistung in W} \\ H_{\max} & \text{max. Heizleistung in W} \end{array}$
<b>Ist-Raumlufttemperatur</b>	
$\Delta\vartheta_{LR,k} = \frac{K_k - SKL_k}{A(3)_0 + D(3) - L_k}$	$I\vartheta_{LR,k} = \Delta\vartheta_{LR,k} + S\vartheta_{LR,k}$

**Tabelle 8** zeigt am Beispiel einer Volumenstromregelung die Ermittlung der Ist-Raumlufttemperatur für eine Mischluft- und eine Quellluftanlage. Für letztere wurden die Algorithmen aus [11] verarbeitet<sup>1)</sup>. Wird die Quellluftanlage zusammen mit einer Kühldecke betrieben, gelten wieder die Mischluftverhältnisse (s. [11]). Die Iteration bei der Quellluftanlage konvergiert bereits nach wenigen Durchläufen.

Bei einer Kühllastberechnung für extrem heiße Tage sollte die Heizleistung  $H_{\max} = 0$  gesetzt werden, da nicht davon auszugehen ist, daß an diesen Tagen die Heizaggregate in Betriebsbereitschaft sind.

Für die Betriebsbereitschaft der Kühlaggregate wurde bisher empfohlen, einen durchgehenden Betrieb an heißen Tagen anzunehmen. Da die Regler nicht in die Zukunft blicken können, ist diese Empfehlung fragwürdig.

<sup>1)</sup> s.a. Rechenbeispiele in der Homepage unter modt1.pdf

**Tabelle 8:** Ist-Raumlufttemperatur bei Volumenstromregelung von Mischluftanlagen und Quellluftanlagen ohne Kühldecke

<b>Zuordnung der Zulufttemperatur</b>	
$\vartheta_{ZU,k} = \begin{cases} \vartheta_{ZU,min} & \text{für } SKL_k > 0 \\ \vartheta_{ZU,max} & \text{für } SKL_k \leq 0 \end{cases}$	$\Delta\vartheta_{ZU,k} = S\vartheta_{LR,k} - \vartheta_{ZU,k}$
<b>Volumenstromermittlung bei Mischluftanlagen</b>	
$S\dot{V}_{ZU,k} = \begin{cases} \frac{SKL_k}{(c\rho)_{ZU} \Delta\vartheta_{ZU,k}} & \text{für } \Delta\vartheta_{ZU,k} \neq 0 \\ 0 & \text{für } \Delta\vartheta_{ZU,k} = 0 \end{cases}$	
<b>Volumenstromermittlung bei Quellluftanlagen</b>	
<p>Abkürzung <math>C = \frac{\sum (\alpha_K A)_{RU}}{SKL_k} \Delta\vartheta_{ZU,k} + 1</math></p>	<p>Iteration : <math>\kappa = C - e^{-\kappa}</math></p>
<p>mit Startwert <math>\kappa = \begin{cases} C - e^{-\sqrt{2(C-1)}} &amp; \text{für } C \leq 2.582 \\ C &amp; \text{für } C &gt; 2.582 \end{cases}</math></p>	$S\dot{V}_{ZU,k} = \frac{\sum (\alpha_K A)_{RU}}{(c\rho)_{ZU} \kappa}$
<b>Thermischer Raumbelastungsgrad</b>	
<p>Mischluftanlage: <math>\mu_t(0) = 1</math></p>	<p>Quellluftanlage: <math>\mu_t(0) = \frac{\kappa + e^{-\kappa} - 1}{\kappa}</math></p>
<b>Volumenstrombegrenzung</b>	
$I\dot{V}_{ZU,k} = \min( S\dot{V}_{ZU,k} , \dot{V}_{ZU,max})$	
<b>Ist-Raumlufttemperatur</b>	
$\Delta\vartheta_{LR,k} = \frac{I\dot{V}_{ZU,k} (c\rho)_{ZU} \Delta\vartheta_{ZU,k} - SKL_k}{A(3)_0 + D(3) - L_k - \frac{I\dot{V}_{ZU,k} (c\rho)_{ZU}}{\mu_t(0)}}$	$I\vartheta_{LR,k} = \Delta\vartheta_{LR,k} + S\vartheta_{LR,k}$
<b>Ist-Kühlleistung</b>	
$K_k = \frac{I\dot{V}_{ZU,k} (c\rho)_{ZU}}{\mu_t(0)} (I\vartheta_{LR,k} - \vartheta_{ZU,k})$	

$\vartheta_{LR}$

Raumlufttemperatur als Mischlufttemperatur in °C

$\vartheta_{ZU}$

Zulufttemperatur in °C

$\vartheta_{ZU,min}$	min. Zulufttemperatur für Kühlen in °C
$\vartheta_{ZU,max}$	max. Zulufttemperatur für Heizen in °C
$\vartheta_{AB}$	Ablufttemperatur in °C
$S\dot{V}_{ZU,k}$	Soll-Zuluftvolumenstrom in m³/h
$\dot{V}_{ZU,max}$	max. Zuluftvolumenstrom in m³/h
$I\dot{V}_{ZU,k}$	Ist-Zuluftvolumenstrom in m³/h
$(c\rho)_{ZU}$	volumetrische spezifische Wärmekapazität der Zuluft in Wh/(m³ K)
$\mu_t(0) := \frac{\vartheta_{LR} - \vartheta_{ZU}}{\vartheta_{AB} - \vartheta_{ZU}}$	thermischer Raumbelastungsgrad in der Höhe $z \approx 0$

## Operative Raumtemperatur

Für die Überprüfung zul. Grenzen der thermischen Behaglichkeit wird nach *DIN 1946 Teil 2* [12] die operative Raumtemperatur herangezogen. Aus der konvektiven Wärmebilanz läßt sich eine mittlere Oberflächentemperatur der Raumumschließungsflächen berechnen. Daraus folgt mit

$$\vartheta_{OP} = \beta_{Hu} I\vartheta_{LR} + (1 - \beta_{Hu}) I\vartheta_{SR} \quad (7)$$

$\beta_{Hu}$  Verhältnis des konvektiven zum Gesamtwärmeübergangskoeffizienten am menschlichen Körper

$I\vartheta_{SR}$  Istwert der mittleren Oberflächentemperatur im Raum (Strahlungstemperatur)

die in **Tabelle 9** angegebene operative Raumtemperatur  $\vartheta_{OP}$ . In diese Gleichung geht auch die tatsächlich abgeführte Kühlleistung der Anlage ein.

**Tabelle 9:** Berechnung der operativen Raumtemperatur und Abschluß der rekursiven Faltungsoperation für einen Zeitschritt

<b>operative Raumtemperatur</b>	
$\vartheta_{OP,k} = I\vartheta_{LR,k} + (1 - \beta_{Hu}) \frac{K_k - E(1)_k + L_k (I\vartheta_{LR,k} - B\vartheta)}{\sum_{RU} (\alpha_K A)_{RU}}$	$\beta_{Hu} \approx 0,5$
<b>Überschreiben</b>	
$E(3)_k = E(3)_k + \Delta\vartheta_{LR,k}$	$KL(3)_k = SKL(3)_k + A(3)_0 \Delta\vartheta_{LR,k}$

Die Aktions- und Reaktionsgrößen im rekursiven Filter legt man am besten in Schieberegistern ab. Bevor der nächste Zeitschritt ausgeführt wird, muß das letzte (jüngste) Register mit der Ist/Soll-Abweichung der Raumlufttemperatur korrigiert werden (s. **Tab. 9**). Danach werden die Registerinhalte um einen Zeitschritt nach hinten verschoben und die Berechnung des nächsten Zeitschrittes vorbereitet.

## **Zuordnung zu den Typ-Räumen**

Der Anwender des EDV-Verfahrens muß vor Durchführung der Berechnung seinem zu berechnenden Real-Raum einen Typ-Raum und damit ein Speicherverhalten zuordnen. Ursprünglich sollte diese Zuordnung anhand objektiver Merkmale wie Baumaterial und Lage der Dämmschichten erfolgen. Die Einschätzung der Wärmespeicherklasse wird z.B. auch in jeder zentralen Heizungsregelung ohne Berechnung vorgenommen.

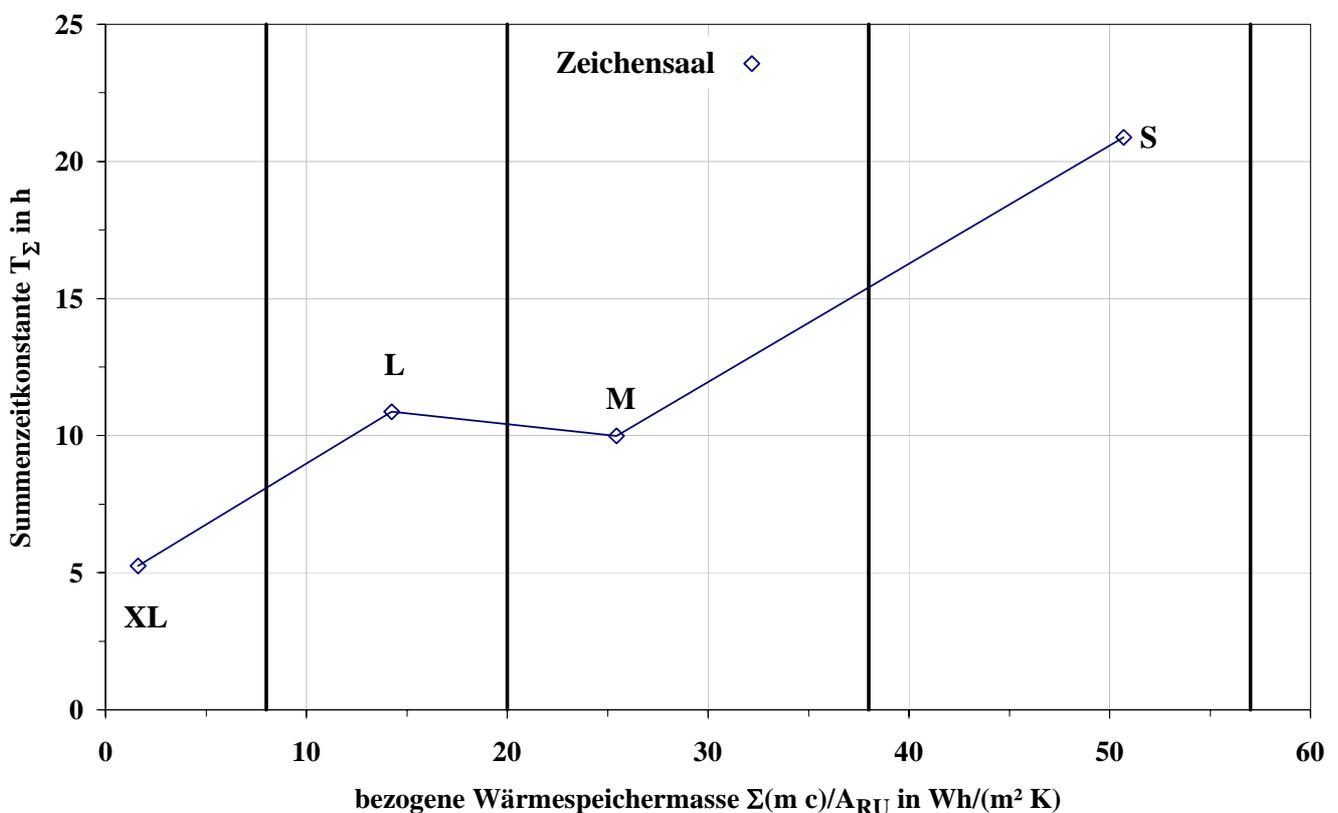
Für unerfahrene Anwender und für kritische Grenzfälle ist in der *VDI 2078* [1] dennoch eine Orientierungshilfe angegeben. Der Nachteil dieser Berechnung ist, daß alle Raumumschließungsflächen mit deren Schichtaufbauten einzubeziehen sind. Die Zuordnung kann sich jedoch auf einige repräsentative Räume im Gebäude beschränken.

Betrachtet man die oben dargestellten Übergangsfunktionen, ist zu erkennen, daß die Typ-Räume L und M in ihrem Speicherverhalten nur bei der Aktion AW stark voneinander abweichen. Dies wird auch durch den Vergleich der Summenzeitkonstanten  $T_{\Sigma}$  in der **Tabelle 4** belegt. Der Raumtyp M ist demnach ein leichter Raum mit einer schweren Außenwand. Nach der Orientierungshilfe in der *VDI 2078* [1, Tab. 4] müßte der Raumtyp M jedoch eine fast doppelt so hohe Speicherwirksamkeit als der Raumtyp L aufweisen.

Die Orientierungshilfe sieht mehrere Möglichkeiten der Zuordnung vor. Es kann die wirksame Baumasse oder die wirksame Speichermasse sowie als Bezugsgröße die Fußboden- oder die Raumumschließungsfläche verwendet werden. Bei zu starker Abweichung der Geometrie des Real-Raumes von den Typ-Räumen ( $A_{RU} / A_{FB} \neq 4,9$ ) soll die bezogene Wärmespeichermasse  $\Sigma(m c) / A_{RU}$  zur Anwendung kommen. Der Zeichensaal müßte bei Bezug auf die Fußbodenfläche mit  $\Sigma(m c) / A_{FB}$  in die Typklasse L und bei Bezug auf die Raumumschließungsfläche mit  $\Sigma(m c) / A_{RU}$  in die Typklasse M

fallen<sup>2)</sup>, weist aber deutlich höhere Summenzeitkonstanten als diese beiden Raumtypen aus. Da  $m c$  für alle Flächen im Raum ermittelt wird, ist der Bezug auf die Raumumschließungsfläche sicherlich sinnvoller.

Nach **Tabelle 4** haben die Summenzeitkonstanten für die Aktionen QS und TL die gleiche Größenordnung. Außerdem besitzen diese Aktionen den dominierenden Einfluß auf die Kühllast. Die Bedingungen bei der Aktion TL (veränderliche Raumlufttemperatur bei äußerer Temperatur der Bauteile von konstant 0) wären daher geeignet, das Speicher-verhalten eines Raumes zu beurteilen.



**Bild 10:** Zusammenhang zwischen Summenzeitkonstante der Aktion TL und bezogener Wärmespeichermasse für die Typ-Räume und Zeichensaal

In **Bild 10** ist die Summenzeitkonstante der Aktion TL über die auf die Raumumschließungsfläche bezogene Wärmespeichermasse aufgetragen. Zusätzlich sind die Grenzen nach **Tabelle 10** durch senkrechte Linien markiert.

<sup>2)</sup> Im Rechenbeispiel der VDI 2078 wird die Bauart L für den Zeichensaal angenommen ( $A_{RU}/A_{FB}$  beträgt ca. 2,8).

**Tabelle 10:** Zuordnung der Speicherklasse

Bauart	zugeordneter Raumtyp	$\frac{1}{A_{RU}} \sum_{RU} (m c)_{RU}$ in Wh/(m <sup>2</sup> K)
keine Speicherung	KS	0
extrem leicht	XL	0 bis 8
leicht	L	8 bis 20
mittel	M	20 bis 38
schwer	S	38 bis 57

Die Raumtypen L und M liegen auf der Abzisse zu weit auseinander und der Zeichensaal reiht sich in den dargestellten Zusammenhang nur unzureichend ein. Nach der Summenzeitkonstante und nach der Übergangsfunktion in **Bild 9** wäre eine Zuordnung des Zeichensaals zum Raumtyp S adäquat.

Nach objektiven Merkmalen wäre ebenfalls eine Zuordnung zum Raumtyp S vorzunehmen. Innenwände, Außenwände und Fußboden bestehen auf der Innenseite aus schweren Baumaterialien. Sie haben zusammen einen Flächenanteil von 58 %.

Eine Empfehlung aus vorgenanntem Sachverhalt könnte lauten:

- Für eine rechnerische Zuordnung grundsätzlich  $\sum(m c)/A_{RU}$  verwenden.
- Für eine Zuordnung anhand objektiver Merkmale :

<b>Bauart</b>	<b>zugeordneter Raumtyp</b>
leicht	XL
mittel	L bei leichter Außenwand M bei schwerer Außenwand
schwer	S

## Teil 2: Vergleichsrechnungen

In diesem Teil 2 wird dokumentiert, daß die Algorithmen aus Teil 1 im Vergleich zur aktuellen Ausgabe der *VDI 2078* [1] zu quantitativ genaueren Ergebnissen führen. Im Unterschied zu vielen anderen Vergleichsstudien wird hier nur die Reaktion auf einzelne Aktionen untersucht. Damit wird ausgeschlossen, daß sich gegenläufige Fehler gegenseitig aufheben. Außerdem sind die Ergebnisse leichter zu überprüfen und nachvollziehbar.

### Testbeispiele nach VDI 6020 [14]

In der *VDI 6020* [14] werden die Ergebnisse verschiedener Simulationsprogramme von insgesamt 13 Testbeispielrechnungen zusammengestellt. Für die Überprüfung der hier vorgestellten Algorithmen sind nur die ersten 7 Testbeispiele relevant.

Die Ergebnisse in der *VDI 6020* [14] sind in Diagrammform angegeben und gestatten nur einen visuellen Vergleich. Um die Abweichungen deutlicher zu machen, sind in den folgenden Beispielen auch die Ergebnisse des Simulationsprogrammes TGASim aufgeführt.

Damit stehen sich 3 Programme gegenüber, deren unterschiedlichen Ergebnisse folgende Bezeichnung erhalten :

VDI 2078/1996	Programm nach den Algorithmen der <i>VDI 2078</i> [1]
Vorschlag	Programm nach den Korrekturvorschlägen in Teil 1
TGASim	Simulationsprogramm

Die Raumaufbauten entsprechen den Raumtypen L und S mit adiabaten Innenflächen gem. *VDI 2078* [1]. Die **Tabelle 4** ist für diese Räume nicht zutreffend. Als Ersatz wurde die **Tabelle 11** erstellt. Dem Vergleich beider Tabellen ist zu entnehmen, daß sich die Stationärwerte deutlich verändern. Die Fehler durch die Berechnung mit  $k \cdot A$  sind geringer, was sich günstig auf die Denormierung nach **Tabelle 5** auswirkt. Die Summenzeitkonstanten ändern sich nicht wesentlich. Der max. Unterschied von 1,5 h liegt beim Raumtyp S mit der Aktion TL vor. Damit ist zum Teil belegt, daß die Filterkoeffizienten aus **Tabelle 6** auch auf den Raumtyp mit adiabaten Innenflächen anwendbar sind.

**Tabelle 11:** Kennwerte für jede Aktion und Raumtyp (mit adiabaten Innenflächen)

Aktion	Stationärwerte			Summenzeit- konstante in h	Gespeicherte Wärmemenge in Wh
	RANAL	mit k*A	Fehler in %		
<b>Raumtyp XL</b> Durchgriff der Aktion TL: -197,2 W/K					
QS	0,92	0,91	-0,7	5,8	5
TL	-16,16	-16,83	4,2	5,4	976
FE	14,13	14,75	4,4	4,3	61
AW	2,01	2,08	3,8	4,9	10
<b>Raumtyp L</b> Durchgriff der Aktion TL: -197,2 W/K					
QS	0,92	0,91	-0,7	12,2	11
TL	-16,16	-16,84	4,2	11,7	2121
FE	14,13	14,75	4,4	8,6	121
AW	2,01	2,09	3,8	9,5	19
<b>Raumtyp M</b> Durchgriff der Aktion TL: -197,2 W/K					
QS	0,92	0,91	-0,7	11,1	10
TL	-16,16	-16,83	4,2	10,8	1953
FE	14,13	14,75	4,4	7,7	108
AW	2,01	2,08	3,8	16,0	32
<b>Raumtyp S</b> Durchgriff der Aktion TL: -197,2 W/K					
QS	0,92	0,91	-0,7	23,0	21
TL	-16,18	-16,86	4,2	22,4	4053
FE	14,13	14,75	4,4	15,5	220
AW	2,03	2,11	3,8	37,0	75

Eine Übersicht über die Belastungsvariationen zeigt **Tabelle 12**. Bis auf die Testbeispiele 6 und 7 ist keine Anlagenleistung im Raum wirksam. Unter Anlagenleistung versteht die VDI 6020 die parallele Bereitstellung von Heiz- als auch Kühlleistung. Nach den Ergebnissen in der VDI 6020 ist zu vermuten, daß die Tabelle A3 in [14] für die Testbeispiele 5-7 Druckfehler enthalten muß. Die entsprechenden Korrekturen sind in der **Tabelle 12** unterstrichen.

**Tabelle 12:** Kurzbeschreibung der Testbeispiele nach VDI 6020 [14]

Test- beispiel	Raum- typ	Belastung	Ergebnisse
1	S	1000 W konvektiv, 6-18 Uhr	Raumlufttemperatur
2	S	1000 W strahlend, 6-18 Uhr	Raumlufttemperatur
3	L	1000 W konvektiv, 6-18 Uhr	Raumlufttemperatur
4	L	1000 W strahlend, 6-18 Uhr	Raumlufttemperatur
5	S	konvektive und strahlende gemischte Innenlast von <u>7-17 Uhr</u> , Sonnenstrahlung im Raum <u>und Außentemperaturen</u> für Juli, Zone 2, Süd, variabler Sonnenschutz	Raumlufttemperatur

**Tabelle 12:** Fortsetzung

Test-beispiel	Raum-typ	Belastung	Ergebnisse
6	S	1000 W strahlend, <u>6-18 Uhr</u> , unbegrenzte Anlagenleistung, Soll-Raumlufttemperatur 27 °C von 6-18 Uhr, 22 °C in der restlichen Zeit	Kühllast
7	S	wie Testbeispiel 6 nur mit begrenzter Anlagenleistung von ±500 W	Raumlufttemperatur

Die Ergebnisse werden für den 1., 10. und 60. Tag dargestellt. Der 60. Tag kann praktisch als eingeschwungener Zustand angesehen werden. Im eingeschwungen Zustand besteht ein Zusammenhang zwischen dem Tagesmittelwert der Belastung und dem Tagesmittelwert der Ist-Raumlufttemperatur. Unter der Voraussetzung, daß der stationäre Endwertfaktor  $h_n(\infty)$  gem. *Glg.* (6) für die Aktion TL gleich 1 ist, gilt mit einem Luftwert von  $L_{k=1..24} = 0$  W/K

$$\overline{I\vartheta_{LR}} = \frac{\overline{K} - \sum_{\ell=1}^{N_{Akt}} \overline{E(\ell)} \cdot \overline{S(\ell)}}{\overline{S(3)}} + \overline{S\vartheta_{LR}} \quad (8)$$

$\overline{I\vartheta_{LR}}$  Tagesmittelwert der Ist-Raumlufttemperatur

$\overline{K}$  Tagesmittelwert der Kühlleistung

$\overline{E(\ell)}$  Tagesmittelwert der Aktionsgröße  $\ell$

$\overline{S\vartheta_{LR}}$  Tagesmittelwert der Soll-Raumlufttemperatur

$\overline{S(\ell)}$  Stationärwert der Aktion  $\ell$

Für das Testbeispiel 1 ergibt sich mit **Tabelle 11** für den Raumtyp S z.B.:

$$RANAL: \overline{I\vartheta_{LR}} = \frac{0 - 500 \cdot 1}{-16,18} + 22 = 52,9 \text{ °C} \quad k^* A: \overline{I\vartheta_{LR}} = \frac{0 - 500 \cdot 1}{-16,86} + 22 = 51,7 \text{ °C}$$

**Tabelle 13** vergleicht die stationären Raumlufttemperaturen der verschiedenen Rechenprogramme mit dem "wahren" Wert nach *Glg.* (8). Eine sehr gute Übereinstimmung wird für das Programm TGASim erzielt. Der max. Fehler beim hier vorgestellten Korrekturvorschlag beträgt -1,3 K, bei der aktuellen VDI 2078 -2,9 K.

**Tabelle 13:** Stationäre Endwerte für die Testbeispiele 1-4 nach VDI 6020 [14] im Vergleich mit verschiedenen Rechenverfahren

Test- beispiel	Tagesmittel- wert konvektiv	nach Glg. (8) mit RANAL-Werten aus Tabelle 11	TGASim nach 60 Tagen	Vorschlag nach 60 Tagen	VDI 2078 nach 60 Tagen
	strahlend				
	W	°C	°C	°C	°C
1	500	<b>52,9</b>	52,8	51,6	50,0
	0				
2	0	<b>50,4</b>	50,4	49,1	47,9
	500				
3	500	<b>52,9</b>	53,0	51,7	51,8
	0				
4	0	<b>50,4</b>	50,5	49,1	49,2
	500				

Die berechneten Raumlufttemperaturen in der VDI 6020 [14] erscheinen als unrealistisch hoch. Für den Vergleich von Rechenergebnissen ist dieser Umstand bei linearen, zeitinvarianten Algorithmen jedoch unerheblich, die Fehler treten nur deutlicher hervor. Allerdings besteht die Möglichkeit, daß einige Simulationsprogramme die Wärmeübergangskoeffizienten diesem hohem Temperaturniveau automatisch anpassen bzw. auf ein nichtlineares Berechnungsmodell wechseln und die Temperaturabhängigkeit der Wärmeübergangskoeffizienten in jedem Zeitschritt berücksichtigen. Geht man davon aus, daß sich die in der VDI 6020 angegebenen Ergebnisse auf ein lineares Berechnungsmodell beziehen (ein entsprechender Hinweis hierzu ist leider nicht vorhanden) könnte das wesentlich bessere Programm mit nichtlinearem Modell schlechter bewertet werden.

Mit der Glg. (8) hat der Anwender die Möglichkeit, das Kühllastprogramm durch eine Handrechnung zu kontrollieren. Das Programm sollte hierfür auch den eingeschwungenen Zustand berechnen können. Sollten die Aktionsgrößen nicht explizit ausgegeben werden, ist auf den Raumtyp KS umzuschalten und für die Aktionsgrößen die Werte der Teil-Reaktionsgrößen zu übernehmen.

Leider ist in der VDI 2078 [1] eine etwas unglückliche Definition der Teil-

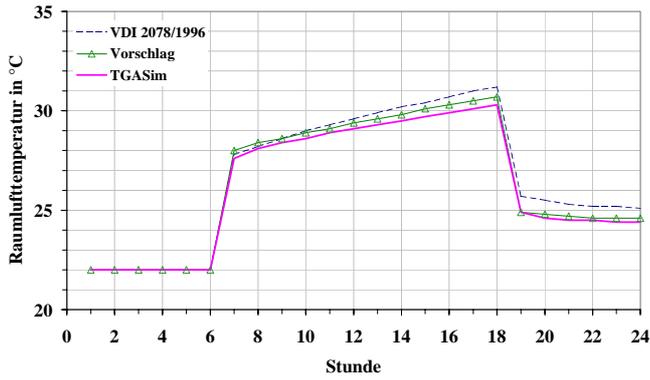
Reaktionsgrößen enthalten. Damit der Anwender zu Recht erwarten kann, daß die Summe der Teil-Reaktionsgrößen die Gesamtreaktionsgröße ergibt, wird hier die Soll-Teil-Reaktionskühlleistung  $STKL_k$  zum Zeitschritt  $k$  wie folgt definiert (vgl. auch *Tabelle 5*)

$$\begin{aligned} STKL_k(\ell) &:= SKL(\ell)_k + D(\ell) E(\ell)_k && \text{für } \ell = 1 \dots N_{Akt} \\ STKL_k(L) &:= -L_k E(3)_k && \text{für Luftwert} \end{aligned} \quad (9)$$

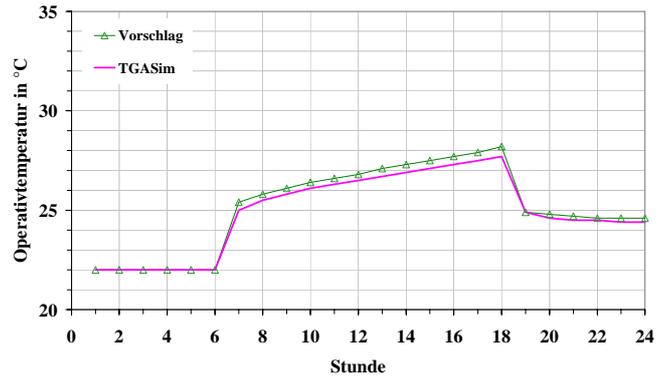
Der Begriff "Soll" folgt eigentlich nur aus der Vorgabe einer "Soll"-Raumlufttemperatur für die Aktion TL. Er wird hier auf alle Aktionsgrößen bewußt angewandt, um eine mögliche Ist-Wertberechnung für andere Aktionsgrößen (analog der Ist-Raumlufttemperaturberechnung) offen zu halten. Die Option, die Soll-Teil-Reaktionskühlleistungen z.B. für Fenster, Außenwände und nicht-adiabate Innenbauteile gewichtet zusammenzufassen -etwa aus Platzmangel bei der Druckausgabe-, bleibt weiterhin bestehen.

Die *Bilder 11a* bis *14* stellen die Ergebnisse für das Testbeispiel 1 grafisch zusammen. Das Simulationsprogramm TGASim wurde auf ein lineares Rechenmodell geschaltet. Der visuelle Vergleich mit dem Ergebnissen des Beukenmodells in der *VDI 6020* [14] ergibt eine sehr gute Übereinstimmung. Aus dem Verlauf der Raumlufttemperatur nach dem Vorschlagverfahren und nach der aktuell gültige VDI 2078 ist zu entnehmen, daß die Abweichungen zu TGASim positiv (s. 10. Tag) und zu anderen Zeitpunkten (s. 60. Tag) negativ sein können. Dies bestätigt auch der Verlauf der Tagesmittel im *Bild 14*, aus dem die Überschneidungen erkennbar sind. Das heißt, eine generelle Aussage über die Fehlerrichtung ist nicht möglich. Z.B. fallen am 21. Tag (481.-504. Stunde) die Abweichungen wesentlich geringer aus.

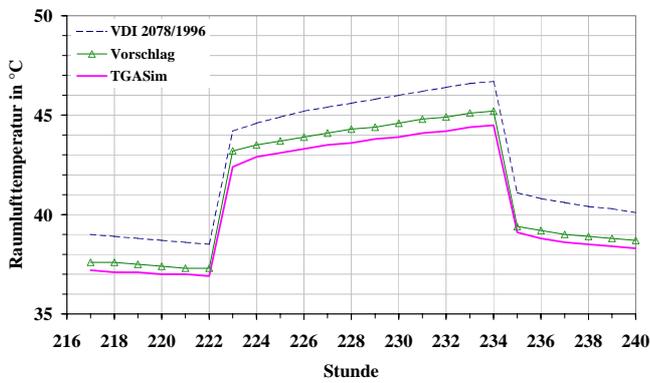
Die Abweichungen bei der zusätzlich dargestellten operativen Raumtemperatur in den *Bildern 11b - 13b* treten nur durch die Fehler bei der Raumlufttemperatur hervor. Das heißt, die Fehler für die Differenz  $\vartheta_{OP,k} - \vartheta_{LR,k}$  aus *Tabelle 9* liegt bei allen Testbeispielen unter 0,2 K. Die Fehlerbetrachtung beschränkt sich daher im Folgenden auf die Raumlufttemperatur bzw. auf die Kühlleistung.



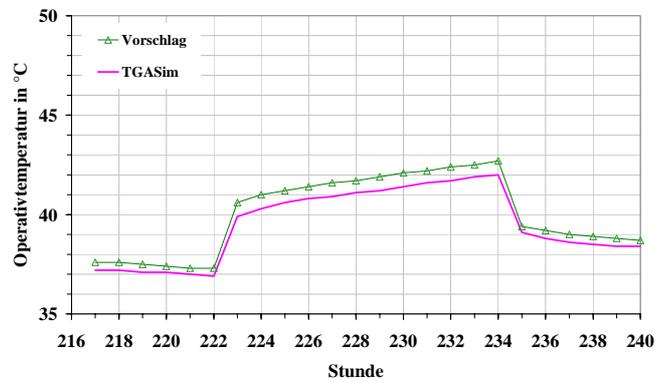
**Bild 11a:** Testbeispiel 1, Raumlufttemperatur, 1. Tag



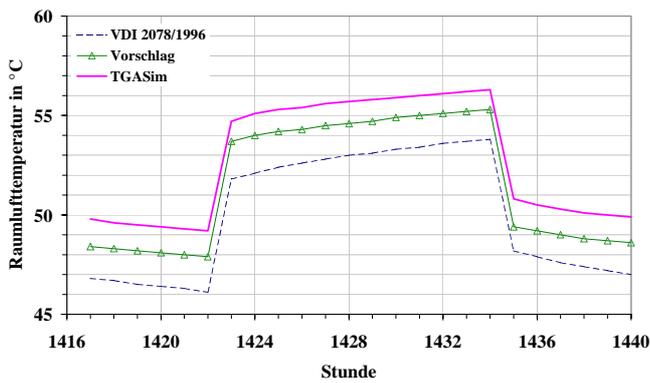
**Bild 11b:** Testbeispiel 1, Operativtemperatur, 1. Tag



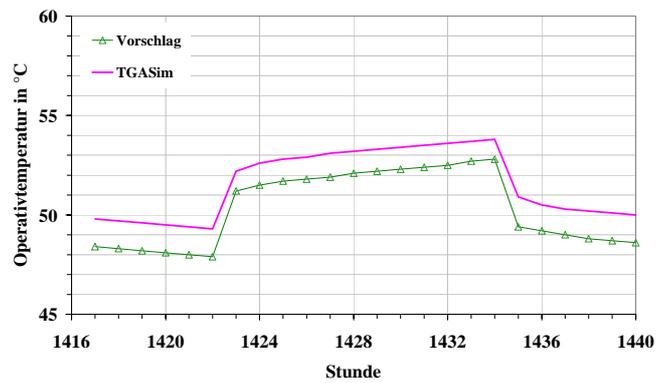
**Bild 12a:** Testbeispiel 1, Raumlufttemperatur, 10. Tag



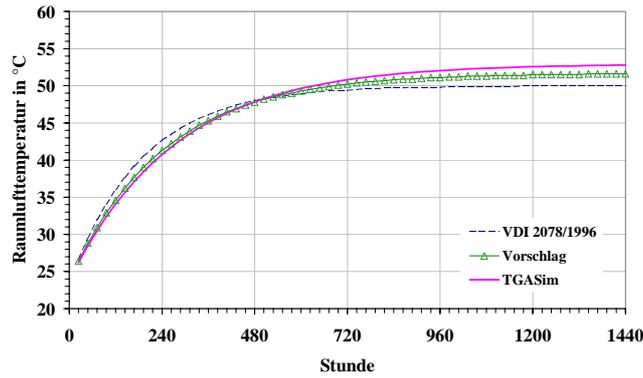
**Bild 12b:** Testbeispiel 1, Operativtemperatur, 10. Tag



**Bild 13a:** Testbeispiel 1, Raumlufttemperatur, 60. Tag

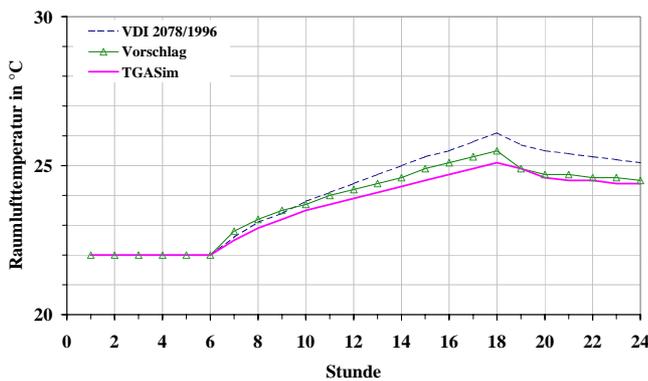


**Bild 13b:** Testbeispiel 1, Operativtemperatur, 60. Tag

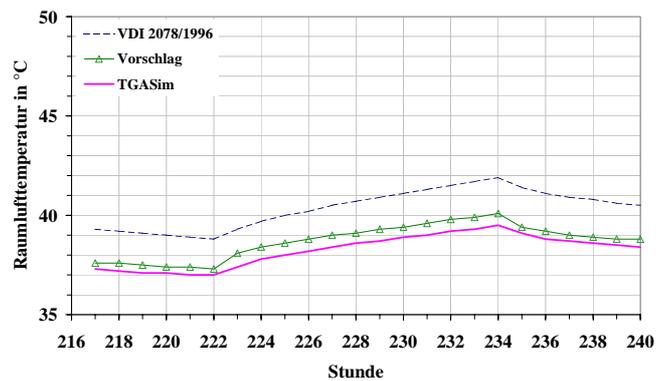


**Bild 14:** Testbeispiel 1, Raumlufttemperatur, Tagesmittelwerte des Einschwingvorganges über 60 Tage

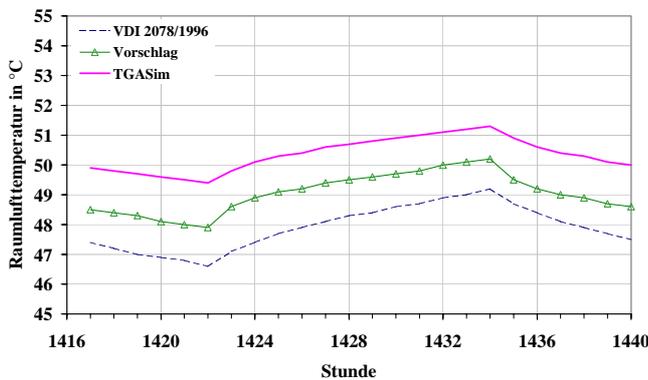
Für die übrigen Testbeispiele liegen ähnliche Verhältnisse vor (s. **Bilder 15** bis **31**). TGASim fügt sich sehr gut in die Ergebnisse nach VDI 6020 ein. Die TGASim-Ergebnisse werden daher als Bezugsmaßstab für eine quantitative Fehlerangabe verwendet.



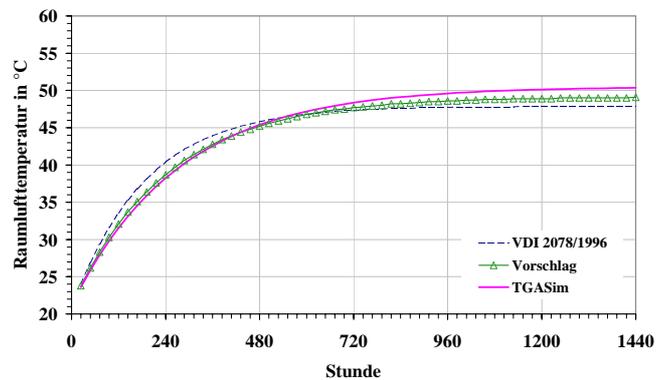
**Bild 15:** Testbeispiel 2, 1. Tag



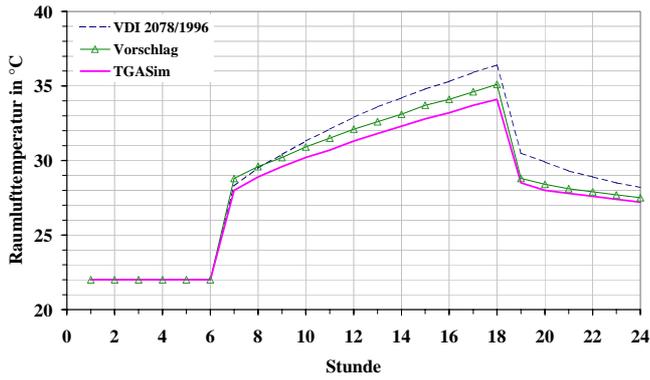
**Bild 16:** Testbeispiel 2, 10. Tag



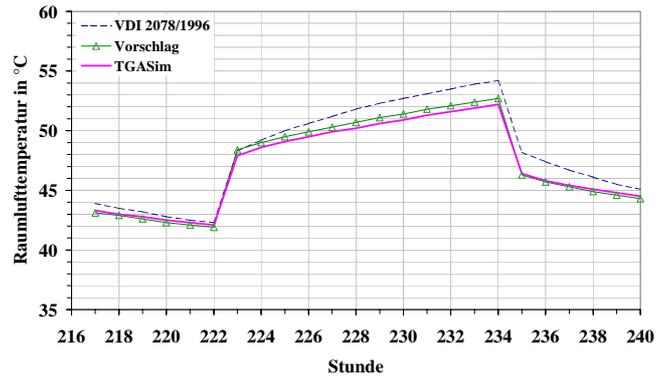
**Bild 17:** Testbeispiel 2, 60. Tag



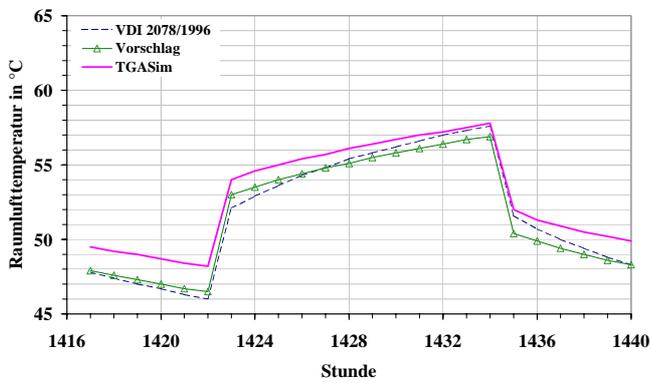
**Bild 18:** Testbeispiel 2, Tagesmittelwerte des Einschwingvorganges über 60 Tage



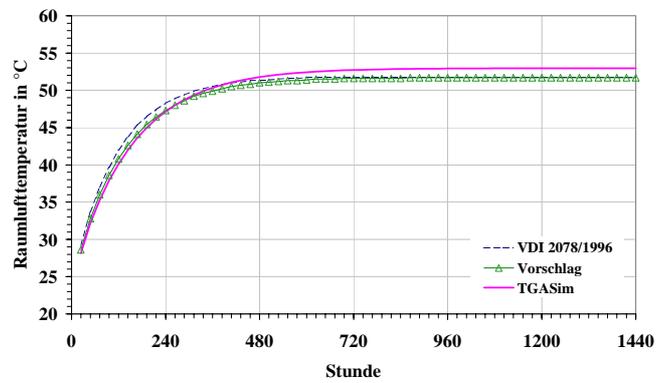
**Bild 19:** Testbeispiel 3, 1. Tag



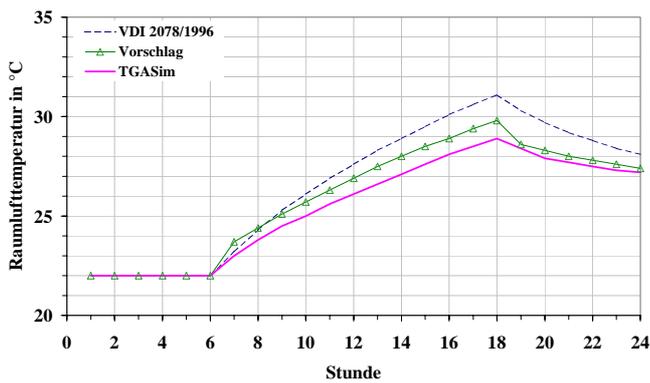
**Bild 20:** Testbeispiel 3, 10. Tag



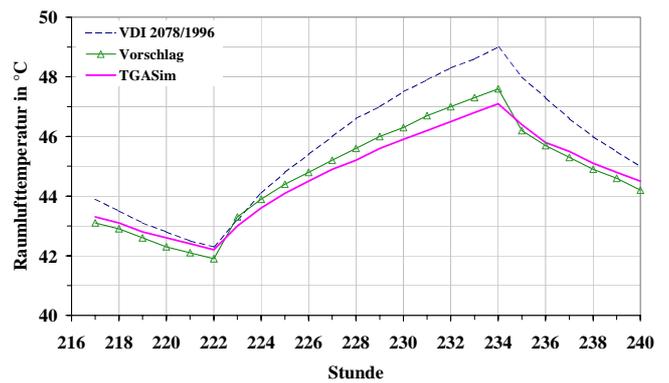
**Bild 21:** Testbeispiel 3, 60. Tag



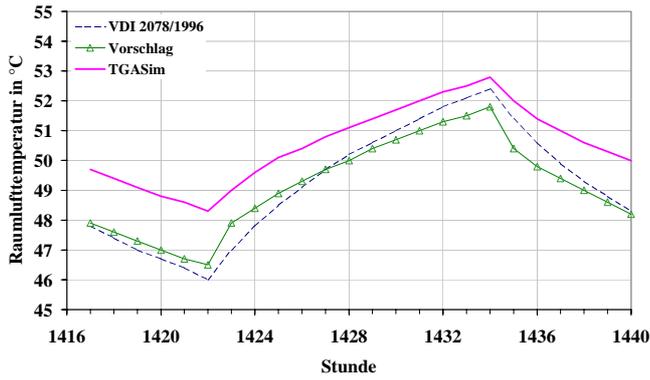
**Bild 22:** Testbeispiel 3, Tagesmittelwerte des  
Einschwingvorganges über 60 Tage



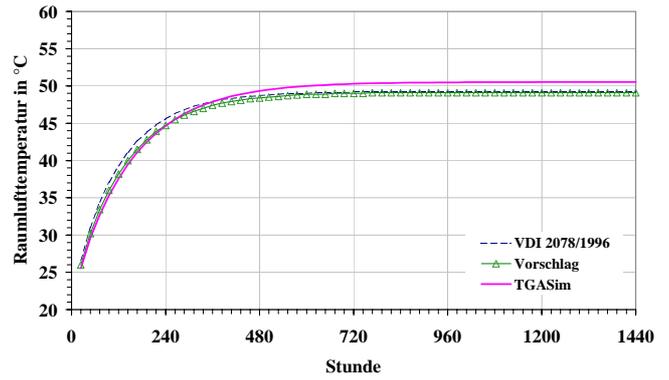
**Bild 23:** Testbeispiel 4, 1. Tag



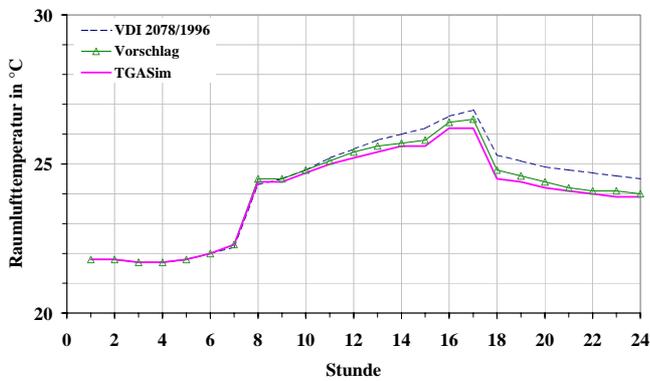
**Bild 24:** Testbeispiel 4, 10. Tag



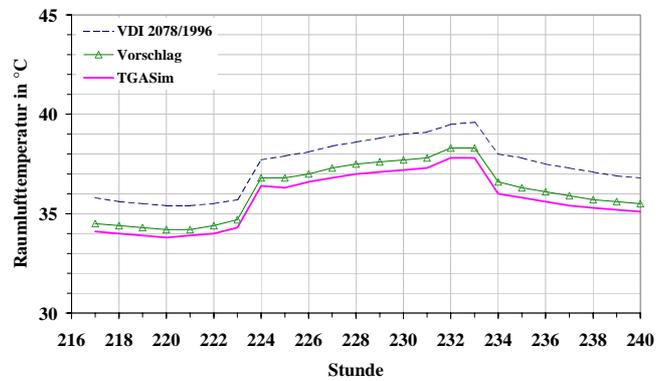
**Bild 25:** Testbeispiel 4, 60. Tag



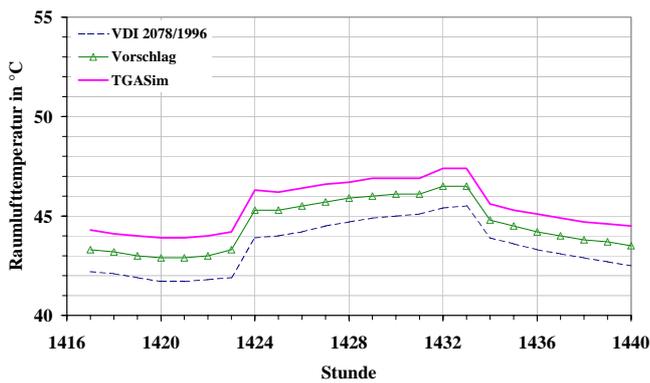
**Bild 26:** Testbeispiel 4, Tagesmittelwerte des  
Einschwingvorganges über 60 Tage



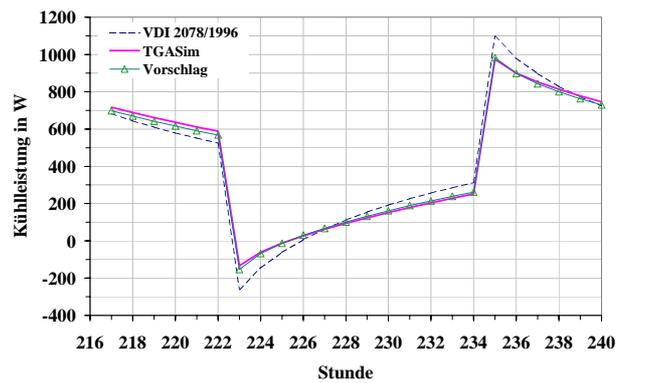
**Bild 27:** Testbeispiel 5, 1. Tag



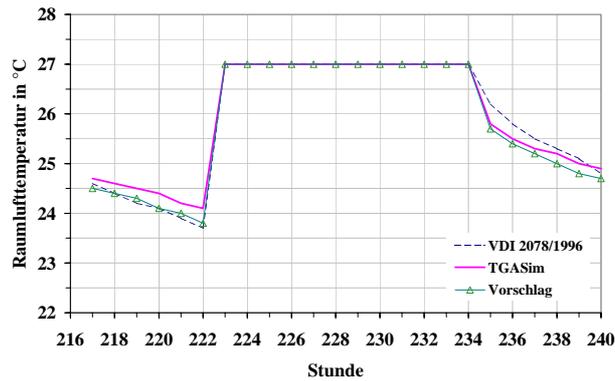
**Bild 28:** Testbeispiel 5, 10. Tag



**Bild 29:** Testbeispiel 5, 60. Tag



**Bild 30:** Testbeispiel 6, 10. Tag



**Bild 31:** Testbeispiel 7, 10. Tag

Die Kurven nach dem VDI 2078-Verfahren weisen in den meisten Fällen deutlich höhere Abweichungen zu den TGASim-Kurven auf, als das Vorschlags-Verfahren. Bemerkenswert ist auch der steilere Anstieg bzw. Abfall bei den VDI 2078-Kurven gegenüber den TGASim-Kurven bei Belastungsänderungen.

Eine Unsicherheit besteht im Testbeispiel 5. Die VDI 6020 macht keine Angaben über einen Konvektivanteil am Sonnenschutz. Der steilere Abfall in der VDI 6020 [14, Bild B5a-B5c] in der 9. und 17. Stunde des Tages im Vergleich zu den **Bildern 27 - 29** legt die Vermutung nahe, daß beim Testbeispiel 5 ein sofort wirkender Konvektivanteil wirksam ist. In den hier vorgestellten Ergebnissen ist dieser nicht enthalten.

**Anmerkung:** Der in der VDI 2078 [1] empfohlene Konvektivanteil für die Verglasung von 5 bzw. 9 % ist zweifelhaft. Bei der Ermittlung der Übergangsfunktionen durch das Simulationsprogramm wurde eine konvektive Wärmebilanz über alle Raumumschließungsflächen durchgeführt. Die konvektive Wärmeentwicklung an der Verglasung durch Strahlung im Raum ist damit bereits in den Filterkoeffizienten enthalten. Der Einsatz eines Konvektivanteiles ist nur für den inneren Sonnenschutz sinnvoll, da hier beim Strahlendurchgang eine zusätzliche Konvektion entsteht, die über die Bedingungen bei der Simulation hinausgeht.

In der **Tabelle 14** sind die maximalen Abweichungen in der Raumlufthtemperatur zum Simulationsprogramm TGASim zusammengestellt. Im Durchschnitt werden die Fehler der VDI 2078 [1] durch die Korrekturvorschläge halbiert.

**Tabelle 14:** Maximale Abweichungen in der Raumlufthtemperatur zum Simulationsprogramm TGASim.

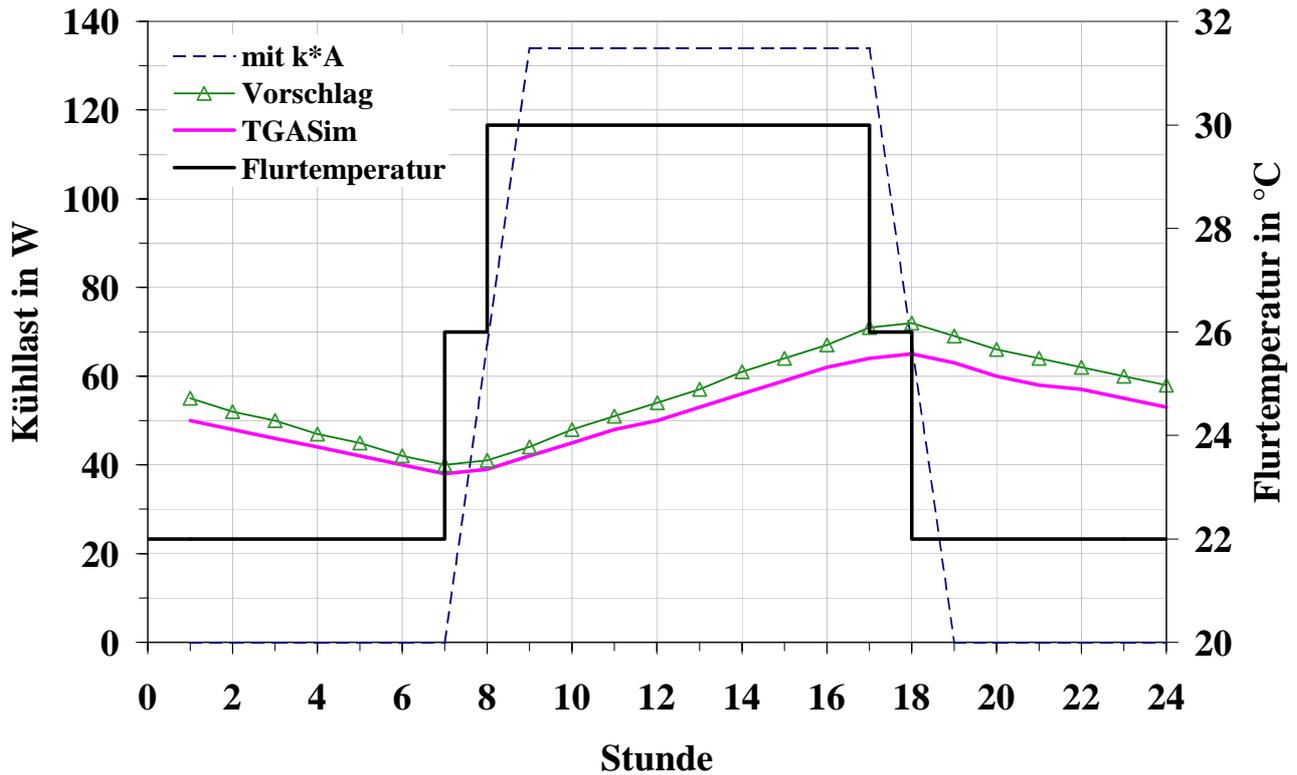
Testbeispiel	Berechnung nach	1. Tag	10. Tag	60. Tag
		K	K	K
1	VDI 2078/1996	0,9	2,2	-3,1
	Vorschlag	0,4	0,8	-1,4
2	VDI 2078/1996	1,0	2,4	-2,8
	Vorschlag	0,4	0,7	-1,5
3	VDI 2078/1996	2,3	2,0	-2,2
	Vorschlag	1,0	0,5	-1,7
4	VDI 2078/1996	2,2	1,9	-2,3
	Vorschlag	0,9	0,5	-1,9
5	VDI 2078/1996	0,8	2,0	-2,3
	Vorschlag	0,2	0,6	-1,0
7	VDI 2078/1996	1,1	0,4	-0,5
	Vorschlag	0,2	-0,3	-0,3

### Kühllast für Aktion Nachbarraumtemperatur

Der Wärmedurchgang durch ein nicht-adiabates Innenbauteil wird in der *VDI 2078* [1] mit  $k \cdot A \cdot \Delta \vartheta$  angenähert. Wärmespeicherwirkungen bleiben unberücksichtigt. Dagegen sind diese Effekte im hier vorgestellten Vorschlagsverfahren durch entsprechende Filterkoeffizienten für die nicht-adiabate Rückwand mit Innentür zum Flur in den Typräumen enthalten. In diesem Beispiel soll gezeigt werden, welche Auswirkungen die beiden Berechnungsmethoden auf die Kühllast haben.

Zunächst wird angenommen, daß der Flur nicht klimatisiert wird. Der Flur wird ständig künstlich beleuchtet und es ist ein Kopierer vorhanden. **Bild 32** zeigt den angenommenen täglichen Verlauf der Flurtemperatur. Zwischen 8 und 17 Uhr liegt die Flurtemperatur bei 30 °C.

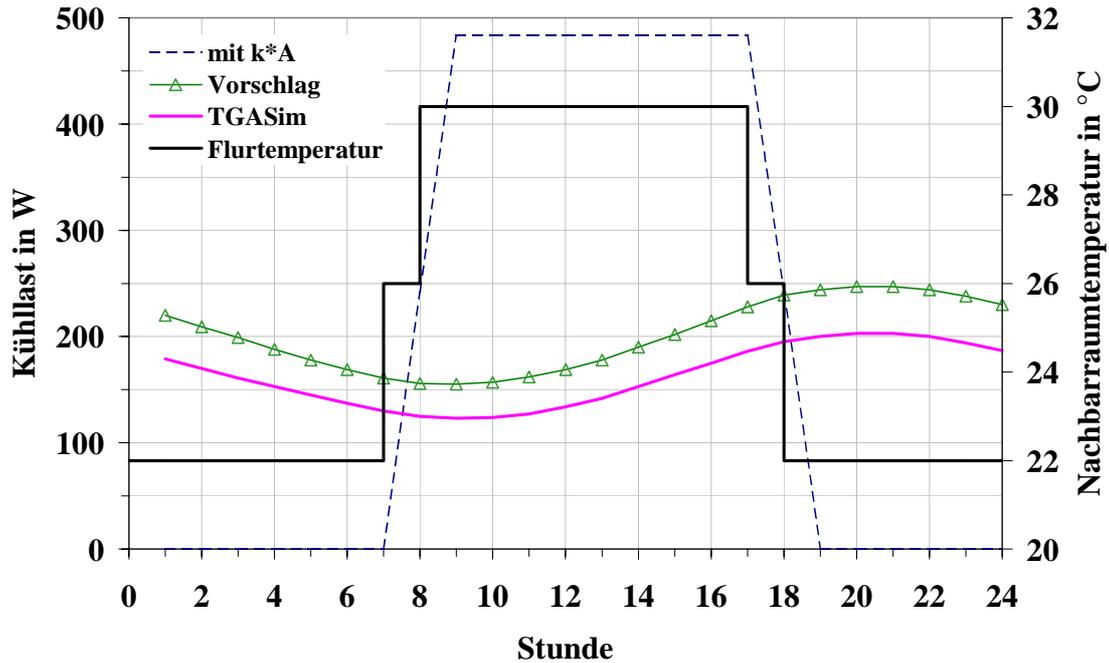
Die gestrichelte Kurve erhält man, wenn die Teil-Kühllast nach der aktuellen *VDI 2078* [1] ermittelt wird. Im Vergleich zu den Kurven für das Vorschlagsverfahren bzw. für TGASim wird damit eine cirka doppelt so hohe maximale Teil-Kühllast berechnet.



**Bild 32:** Kühllast für Aktion Flurtemperatur, Raumtyp S, eingeschwungener Zustand

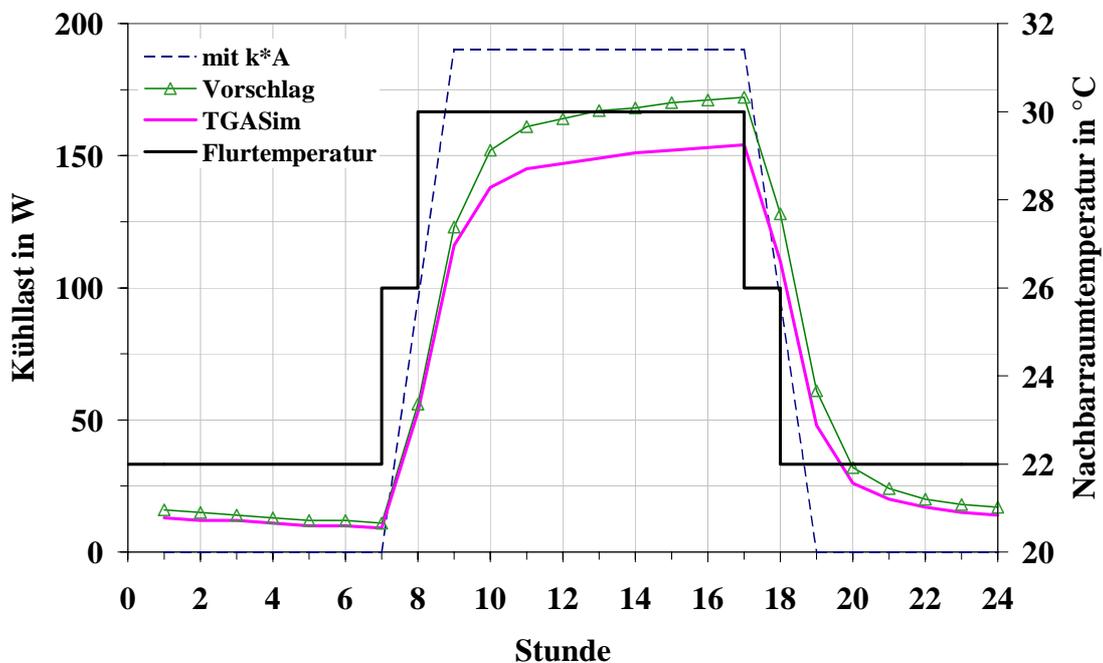
Dieser Fehler ist jedoch im Verhältnis zur Gesamtkühllast eines Raumes zu werten. Außerdem wird der Fehler bei leichteren Bauarten geringer. Der Tagesmittelwert ist bei beiden Berechnungsmethoden identisch.

Weisen alle Nachbarräume im gleichen Geschöß den beschriebenen Temperaturverlauf auf, so ergibt sich der im **Bild 33** dargestellte Verlauf der Teil-Kühllast. Bezüglich der Fehler zur Berechnung mit  $k \cdot A$  gem. *VDI 2078* [1] und der Mittelwerttreue sind keine neuen Erkenntnisse zu entnehmen. Erwähnenswert ist jedoch, daß der Unterschied der Vorschlag-Kurve zur TGASim-Kurve im Rahmen der Genauigkeit des hier vorgestellten Verfahrens liegt. Das bedeutet für die Aktion IW, daß sie nicht nur auf die Rückwand zum Flur, sondern auf alle Innenwände im Raum anwendbar ist. Entsprechendes gilt für die zugehörigen Filterkoeffizienten.



**Bild 33:** Kühllast für Aktion Nachbarraumtemperatur vor allen Innenwänden und Innentür, Raumtyp S, eingeschwungener Zustand

In **Bild 34** wird beleghaft dargestellt, daß diese Aussage auch für leichte Bauarten zutreffend ist.



**Bild 34:** Kühllast für Aktion Nachbarraumtemperatur vor allen Innenwänden und Innentür, Raumtyp XL, eingeschwungener Zustand

Für den Raum mit nicht-adiabaten Innenbauteilen ergeben sich bei den Aktionen „aufgeprägte absorbierte Strahlung“ und „Soll-Raumlufttemperatur“ andere stationäre Endwerte, als für den adiabaten Raum gem. *VDI 2078* [1]. Folglich muß in die Denormierung für diese beiden Aktionsgrößen der Wert  $\sum_{NR} (k A)_{NR}$  einfließen. In der

**Tabelle 5** ist dieser Wert durch die Summierung über alle nicht-adiabaten Außen- und Innenbauteile auch enthalten. Bei der Denormierung gem. *VDI 2078* [1, Glg. 7.10] wird jedoch der stationäre Endwert nur durch  $k \cdot A$  der Außenbauteile (Außenwände und Außenfenster) bestimmt. Damit enthält die *VDI 2078* eine weitere Fehlerquelle bei abweichenden Nachbarraumtemperaturen bezüglich der Aktionen 3 und 6 in [1].

## Verwendung der Operativtemperatur

In diesem Beispiel wird die Verwendung der operativen Raumtemperatur nach **Tabelle 9** demonstriert. Dazu wird eine Beispielrechnung mit den Daten nach **Tabelle 15** durchgeführt. Die Ergebnisse für den eingeschwungenen Zustand sind in **Tabelle 16** und im **Bild 35** enthalten.

**Tabelle 15:** Daten für das Berechnungsbeispiel „Operativtemperatur“

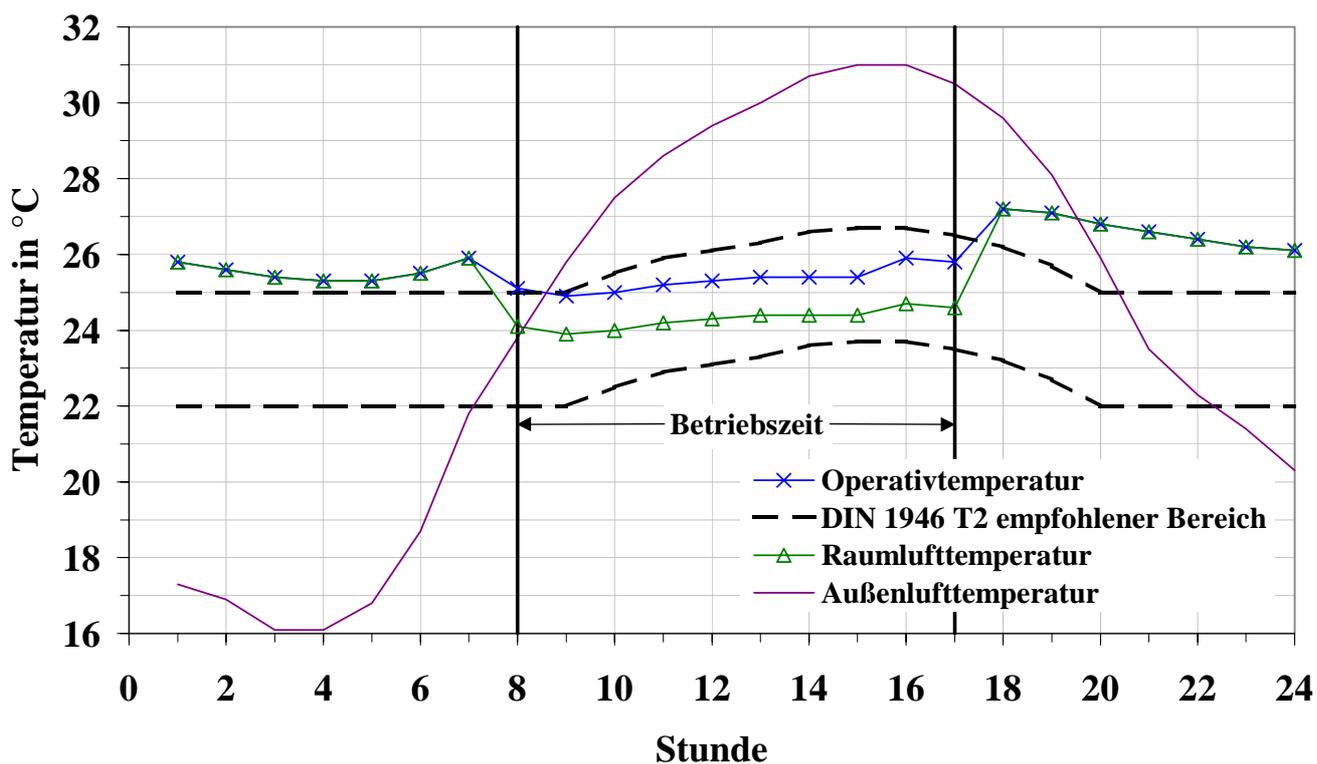
Typraum	M, mit nicht-adiabater Rückwand zum Flur
Außenlufttemperaturen	Juli, Zone 2
Sonnenstrahlung	Juli, Süd, Mittelwerte-Standardabweichung
kombinierte Außentemperaturen	nach Glg (2) mit $\alpha_A = 13,5 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$
Flurtemperaturen	wie in <b>Bild 32</b>
Einstrahlungsgrenzwert der Sonnenstrahlung hinter Zweifachverglasung für Sonnenschutz zu	100 $\text{W}/\text{m}^2$
b-Wert Sonnenschutz	0,15
Betriebszeit	7 bis 17 Uhr
Maschinenwärme konvektiv	200 W
Personenwärme konvektiv/strahlend	80/80 W
Anlagenbetriebszeit	7 bis 17 Uhr für Kühlung, Heizung aus
Soll-Raumlufttemperatur	22 °C, konstant 0 bis 24 Uhr
Zulufttemperatur	19 °C, Mischluftanlage

Es wird von einer unveränderten Sollwerteinstellung von 22 °C am Raumthermostat

ausgegangen. Bei unbegrenztem Zuluftvolumenstrom unterschreitet dabei die operative Raumtemperatur teilweise die untere Grenze des empfohlenen Bereiches nach *DIN 1946 Teil 2* [12, Bild 1], der in Abhängigkeit zur Außenlufttemperatur ermittelt wird. Durch eine nochmalige Rechnung mit erheblicher Reduzierung des max. Zuluftvolumenstromes konnte der im *Bild 35* dargestellte Verlauf der Temperaturen erreicht werden (Berechnung nach *Tabelle 8* und *9*). Während der Betriebszeit liegt die operative Raumtemperatur im behaglichen Bereich. Die max. Kühllast reduziert sich um 21 %.

**Tabelle 16:** Ergebnisse für das Berechnungsbeispiel „Operativtemperatur“

Variation	max. Zuluftvolumenstrom m <sup>3</sup> /h	max. Kühllast W
unbegrenzter Zuluftvolumenstrom	936	933
mit begrenztem Zuluftvolumenstrom	390	739



**Bild 35:** Verlauf der Raumluft- und Operativtemperatur bei begrenztem Zuluftvolumenstrom, eingeschwungener Zustand

## Zusammenfassung

Dieses ursprünglich von *Dr. Jahn* [15] und Mitarbeiter Dr. Jakob † entwickelte EDV-Verfahren ist nunmehr seit fast 10 Jahren erfolgreich in der praktischen Anwendung. Besonders die Ermittlung der Raumlufthtemperatur bei begrenzter Anlagenleistung sorgte für eine neue Vorgehensweise in der Planungsarbeit. Die sorgfältig getrennte Behandlung der Aktionsgrößen verleiht dem Verfahren Übersichtlichkeit und leichtere Überprüfbarkeit.

Das Kurzverfahren in der *VDI 2078* [1] mit festgelegten Belastungsverläufen ist nicht mehr zeitgemäß und erfüllt nicht den vom Bauherren beanspruchbaren Detaillierungsgrad. Leider wird dieses Verfahren immer noch an einigen Universitäten und Fachhochschulen gelehrt. Dies entspricht nicht der Vorbereitung zu einer späteren beruflichen Anwendung. Die Zeit wäre besser genutzt mit einer intensiven Untersuchung verschiedener Belastungssituationen und Gebäudekonstruktionen. Der Student würde dabei Erfahrungen sammeln, die er auch beim Einsatz von Gebäudesimulationen umsetzen kann.

In diesem Beitrag wurde das EDV-Verfahren vollständig überarbeitet, leicht modifiziert und erweitert. Nachfolgend werden die wesentlichen Punkte zusammengefaßt:

- Der Typraum wurde hinsichtlich einer nicht-adiabaten Innenwand und Innentür verändert. Dadurch werden nicht-adiabate Innenwände in der Berechnung genauer berücksichtigt. Das Fenster wird nicht mehr als speicherlos angesehen, wodurch sich die Denormierung einfacher gestaltet.
- Die Aktionen FE und AW werden mit einer einheitlich definierten Außentemperatur berechnet, die auch mehrfache Reflexionen berücksichtigt [4]. Dadurch besteht die Möglichkeit, Umgebungen mit niedrigen Emissionsgraden (Alu-Fassaden, Parkplätze) in die Berechnung einzubeziehen. Für die Temperaturen an der Außenseite von Bauteilen wurden flächenspezifische Aktionen eingeführt. Damit erscheint  $(k A)_{NR}$  nicht mehr im konvektiven Wärmepotential und Luftwert.
- Die Denormierung wurde für alle Aktionen vereinheitlicht und mit einer Raumanalyse untersucht. Durch die vernachlässigte Strahlungs- und Luftankopplung bei der Denormierung mit  $k \cdot A$  kann ein Fehler im stationären Endwert von ca. 11 % entstehen. Der stationäre Endwert stellt auch den Tagesmittelwert im eingeschwungenen Zustand dar. Allerdings ist bei der Bewertung des Fehlers zu berücksichtigen, daß die

Innenoberflächen der Bauteile auch mit der Raummöblierung im Strahlungsaustausch stehen.

- Anhand neu erstellter Übergangsfunktionen wurden neue Filterkoeffizienten (früher Gewichtungsfaktoren) mit größerer Genauigkeit und mit einem neuen Auswahlverfahren ermittelt.
- Die Berechnung der Ist-Raumlufttemperatur wurde um eine Volumenstromregelung für eine Mischluft- und eine Quelluftanlage ergänzt. Dabei wurde die Abhängigkeit der Kühlleistung von der Ist-Raumlufttemperatur eingearbeitet.
- Mit einer Berechnungsformel für die operative Raumtemperatur kann der empfohlene Behaglichkeitsbereich nach *DIN 1946 Teil 2* [12] kontrolliert werden.
- Für die Zuordnung eines Realraumes zu einem Typraum wurde die Orientierungshilfe aus der *VDI 2078* [1] näher untersucht und genauer spezifiziert. Allerdings erwies sich die Summenzeitkonstante als ein geeigneteres Kriterium zur Einordnung der Wärmespeicherfähigkeit von Räumen. Hierüber soll an anderer Stelle ausführlicher berichtet werden.
- Die neuen Algorithmen wurden anhand der Testbeispiele aus der *VDI 6020* [14] untersucht. Der Vergleich der Ergebnisse mit der *VDI 6020* und dem Simulationsprogramm TGASim ergab, daß sich die Fehler gegenüber der aktuellen *VDI 2078* [1] in etwa halbieren. Die Genauigkeit des hier vorgestellten Korrekturvorschlages erreicht damit die gleiche Größenordnung, wie das in [3] angegebene Zweikapazitätenmodell. In der Homepage des Autors wird ein kleines Testprogramm (KLAST) angeboten, mit dem man weitere Vergleichsrechnungen durchführen kann. Als Eingabe werden dabei u.a. 24 Stundenwerte jeder Aktionsgröße in einer ASCII-Datei erwartet.

Es erhebt sich die Frage, warum in [3] ein Modell aus den 70er Jahren vorgeschlagen wird, welches im Vergleich zu den Simulationsprogrammen keinen großen Genauigkeitsgewinn hervorbringt. Darüber hinaus beinhaltet das Zweikapazitätenmodell sehr viele Vereinfachungen, deren Auswirkungen noch nicht bekannt sind.

Will man tatsächlich die Genauigkeit der Kühllastberechnung steigern, so wäre bei der heutigen Computerleistungsfähigkeit z.B. ein Differenzenverfahren geeignet. Zur Vermeidung numerischer Stabilitätsprobleme hat sich das implizite Differenzenverfahren schon mehrfach bewährt. Hierfür ist in jedem Zeitschritt ein Gleichungssystem zu lösen. Fertige Routinen zur Lösung von Gleichungssystemen sind in fast jedem Buch über numerische Mathematik zu finden.

Der Nachteil beim Differenzenverfahren oder beim Zweikapazitätenmodell ist jedoch der erhöhte Eingabeaufwand. Für jeden Raum sind alle Bauteile (adiabate und nicht-adiabate) im Raum mit Flächengröße, Schichtaufbauten und Randbedingung im Programm für die Berechnung einzugeben.

Beim aktuellen EDV-Verfahren der *VDI 2078* [1] sind im Wesentlichen neben den Flächengrößen aller Bauteile im Raum nur die Wärmedurchgangskoeffizienten und Randbedingungen der nicht-adiabaten Bauteile einzugeben. Vergleichbar ist dieser Eingabeaufwand mit einer Wärmebedarfsberechnung.

Diesen Vorteil haben einige Softwarehersteller an ihre Kunden leider nicht weitergegeben. Wenn für die Raumumschließungsfläche nicht gesondert eine Berechnung oder Eingabe erfolgt, muß sich das Programm diese Größe aus der Summation der Angaben in der Bauteilliste ermitteln. In diesem Fall muß die Bauteilliste natürlich alle Bauteile des Raumes erfassen. Bis auf die Flächengröße sind die weiteren Angaben zu den adiabaten Bauteilen, wie z.B. k-Wert und Nachbarräumtemperatur, völlig überflüssig. Bei einem größeren Gebäude können solche nutzlosen Eingaben unnötig Zeit in Anspruch nehmen. Ein entsprechender Hinweis, daß alle Bauteile eines Raumes aufzuführen sind, ist auch nicht bei allen Programmen vorhanden. Vermutlich wird ein großer Anwenderkreis über diese Notwendigkeit gar nicht informiert sein.

Das EDV-Verfahren der *VDI 2078* [1] ist durchaus erweiterungsfähig. So könnte z.B. der Raumtypkatalog um extrem schwere Räume oder um vollständig nicht-adiabate Räume erweitert werden.

Vergleichsbetrachtungen anderer oder zukünftiger Verfahren zur Kühllastberechnung mit dem EDV-Verfahren der *VDI 2078* [1] sollten nur unter Berücksichtigung der hier vorgelegten Korrekturen erfolgen.

## Literatur

- [1] **VDI 2078 Ausgabe Juli 1996** : Berechnung der Kühllast klimatisierter Räume (VDI-Kühllastregeln).
- [2] **Jahn, A; Nadler, N. und Guo, J.:** Neuauflage der VDI-Kühllastregeln VDI 2078. Erläuterungen zum EDV-Verfahren. Gesundheits-Ingenieur 114 (1993) H. 3, S. 117-126.
- [3] **Rouvel, L., Zimmermann, F. :** Ein regelungstechnisches Modell zur Beschreibung des thermisch dynamischen Raumverhaltens.  
Teil 1: Theoretische Grundlagen und deren Anwendung auf die Berechnung von Raumtemperaturen. HLH Bd. 48 (1997), Nr. 10, S. 66-75.  
Teil 2: Vergleich der Berechnungsergebnisse für das regelungstechnische Modell mit anderen Verfahren am Beispiel sommerlicher Raumtemperaturen. HLH Bd. 48 (1997) Nr. 12.
- [4] **Nadler, N.:** Kombinierte Außentemperatur mit langwelligen Reflexionen an der terrestrischen Umgebung. Gesundheits-Ingenieur 118 (1997) Heft 6, Seite 310-315.
- [5] **DIN 4701 Teil 1 und 2 Ausgabe März 1983** : Regeln für die Berechnung des Wärmebedarfes von Gebäuden.
- [6] **CEN TC89/WG6 N. 225, Rev. 4, May 1997** : Thermal Performance of Buildings. Room cooling load calculation. General criteria for a simplified calculation method.
- [7] **Nadler, N.:** Vortragsmanuskripte zum VDI-Kühllastseminar am 6. - 7. November 1997 in Stuttgart. - Außentemperaturen der VDI 2078 -
- [8] **Nadler, N.:** Entwicklung von Rechenprogrammen zur Kopplung eines Digital- und eines Analogrechners zu einem Hybridrechner. Studienarbeit Nr. 61 am Hermann Rietschel Institut der TU Berlin, März 1981.
- [9] **Masuch, J. :** Untersuchung des thermischen Verhaltens klimatisierter Räume bei variabler innerer Lufttemperatur. Diss. TU-Berlin 1971
- [10] **DIN EN ISO 6946 Ausgabe November 1996** : Wärmedurchlaßwiderstand und Wärmedurchgangskoeffizient. Berechnungsverfahren.
- [11] **Nadler, N. :** Modellierung der Raumlufttemperatur bei Quelllüftung und Flächenkühlung. HLH Bd. 46 (1995), Nr. 3, S. 177-181.
- [12] **DIN 1946 Teil 2 Ausgabe Januar 1994** : Raumluftechnik. Gesundheitstechnische Anforderungen (VDI-Lüftungsregeln)
- [13] **Masuch, J. :** Sinn oder Unsinn einer Kühllastberechnung... ..bei mit der Außenlufttemperatur gleitender Raumtemperatur. HLH Bd. 53 (2002), Nr. 10, S. S12-S16.

- [14] **VDI 6020 Blatt 1 Ausgabe Mai 2001** : Anforderungen an Rechenverfahren zur Gebäude- und Anlagensimulation. Gebäudesimulation.
- [15] **Jahn, A.** : Neuausgabe der VDI 2078, Kühllastregeln. Vortrag vor der Gesundheitstechnischen Gesellschaft e.V., technisch-wissenschaftliche Vereinigung, am 20. Februar 1992