

Kühllastberechnung für Bauteilanlagen

**C.A.T.S.-Newsletter Dezember 2007
HLH Bd. 59 (2008), Nr. 2, S. 49-52**

**CSE Nadler
Dipl.-Ing. Norbert Nadler
Arnstädter Str. 7, 16515 Oranienburg
Tel. : (03301) 579 39-0
Fax : (03301) 579 39-1
E-Mail: n.nadler@cse-nadler.de
Website: www.cse-nadler.de**

Oranienburg, den 8. Januar 2009

Im Vorgriff auf die zukünftigen Kühllastprogramme nach der VDI 6007 [7] ist es mit dem im Folgenden vorgestellten Kühllastprogramm schon jetzt möglich, RLT- sowie Bauteilanlagen für die Solltemperaturen Luft- und Operativtemperatur zu dimensionieren. Das mathematisch grundlegende Prinzip ist dabei immer noch das seit Jahren bewährte EDV-Verfahren der VDI 2078 [1].

Die Kühllastberechnung nach VDI 2078 schließt die Bauteilkühlung mit hohen Strahlungsanteilen in der Wärmeabfuhr aus [1, Fußnote 1, S. 6]. Das in der Folge erschienene Blatt 1 der VDI 2078 [2] beschäftigt sich zwar mit der Thematik, gibt aber keine konkreten Rechenvorschriften für die Kühllastberechnung an. Im Rahmen der Weiterentwicklung des Verfahrens wurde festgestellt, dass auch die Kühllast für Bauteilanlagen ohne Änderung des grundsätzlichen Verfahrens aus den vorhandenen Gleichungen durch algebraische Umstellungen ermittelt werden kann. Die hieraus resultierenden Algorithmen wurden im C.A.T.S.-Kühllastprogramm umgesetzt und deren Ergebnisse werden in diesem Beitrag vorgestellt und kritisch untersucht. Aus den Erkenntnissen über die Zusammenhänge zwischen der Thermik im Raum und der Thermik der Anlage lassen sich Planungshinweise für eine optimale Auslegung der Anlage angeben. Mit dem C.A.T.S.-Kühllastprogramm wird auch das notwendige Werkzeug für eine solche Auslegungsmethodik bereitgestellt.

Auf die gleiche Problematik ging bereits 1994 Esdorn in [4] ein. Damals konnten die Empfehlungen jedoch nicht umgesetzt werden, da es bislang an einem geeigneten Rechenverfahren bzw. Programm für die Planungspraxis mangelte. Masuch hat in [5] behelfsmäßige Methoden beschrieben, wie man mit dem Verfahren in [1] näherungsweise Kühldecken berechnen kann. Durch Erscheinen der VDI 6007 [7], auf die die zukünftige VDI 2078 verweisen wird, erlangt das Thema ebenfalls eine weite Verbreitung, da auch in dieser Richtlinie Bauteilanlagen Berücksichtigung finden.

Einführung

Ausgehend von den Korrekturvorschlägen in [3] zur Kühllastberechnung wurde der Rechenkern des C.A.T.S.-Kühllastprogrammes inzwischen um folgende Punkte erweitert:

- Denormierung mit Matrixmethode (Vermeidung des „Energieloches“, s. [3, Bild 8])
- Personenwärme nach DIN EN ISO 7730 (s. [6])
- Weltweite Anwendung bezüglich Klimadaten
- Feuchtebilanz im Raum
- Bauteilkühlung bzw. -heizung
- Auslegung der RLT- oder Bauteilanlagen wahlweise auf Luft- oder Operativtemperatur

Auf die beiden letztgenannten Punkte soll hier näher eingegangen werden. Für jede Stunde des Tages wird nach [3, Tabelle 7] eine maximale Kühl- und Heizleistung vorgegeben. Ist der Eingabewert durch ein Kürzel (z.B. „u“ für unbegrenzt) entsprechend hoch, entspricht die sich einstellende Temperatur dem vorgegebenen Sollwert. Bei Eingabe von „0“ ist die Anlage ausgeschaltet und es wird die sich einstellende Temperatur ermittelt. In der hier besprochenen Programmerweiterung ist neben den max. Anlagenleistungen auch der Konvektivanteil der Kühl- bzw. Heizanlage einzutragen. Weiterhin ist

anzugeben, ob die Kühllast wie bisher für eine Soll-Raumlufttemperatur oder nunmehr für eine Soll-Operativtemperatur (empfundene Temperatur) zu berechnen ist. **Die Auswahl dieser beiden neuen Eingabemöglichkeiten sollte nicht ohne Sachkenntnis über das Zusammenwirken von Raum und Anlage erfolgen!**

Bauteilanlagen sind z.B. Kühldecken, Kühlsegel, Deckenstrahlplatten, Heizkörper, in Beton oder Putz eingelegte Heiz- bzw. Kühlregister und ähnliches. Sie unterscheiden sich von den RLT-Anlagen bzw. von Anlagen mit Ventilatorconvektoren dadurch, dass die Wärmezu- bzw. -abfuhr auch über langwellige Strahlung erfolgen kann. Im Folgenden wird vornehmlich die Bauteilkühlung betrachtet.

Man muss streng zwischen geregelten und ungeregelten Anlagen trennen. Manche Softwarehersteller haben die Ausführungen in [2] so verstanden, dass man im Kühllastprogramm nur negative Lasten für die Aktionen „aufgeprägte Strahlung“ und „konvektive Wärmebelastung“ (aufgeteilt nach einem vorgegebenen Konvektivanteil) eintragen muss, um die Kühllast für Bauteilkühlung zu berechnen. Diese Methode kann dazu führen, dass selbst bei Minusgraden im Raum immer noch gekühlt wird. Werden zudem die Ergebnisse Ist-Kühllast und Ist-Raumlufttemperatur nicht in einer Druckausgabe gleichzeitig angezeigt, so wie es von den Entwicklern des EDV-Verfahrens vorgesehen war, können diese Fehlberechnungen auch nicht sofort sichtbar werden. In einem Fall ist es dem Autor nur unter großem Aufwand gelungen, dieses Fehlverhalten aufzudecken, bei dem bei -15 °C Raumlufttemperatur immer noch gekühlt wurde. Allerdings war dieser Fall der Anlass zur Weiterentwicklung des EDV-Verfahrens hinsichtlich der Bauteilkühlung.

Eine Bauteilkühlung mit negativer Lastvorgabe für die Kühlleistung kann man als unregelmäßig oder auch zeitgesteuerte Bauteilanlage bezeichnen, da sie unabhängig von der Temperatur im Raum kühlt. Diese Anlagen sind allenfalls als Grundlastkühlung geeignet, wozu die Kühldecken jedoch nicht zählen.

Dagegen wird für geregelte Bauteilanlagen die Soll-Kühllast zu jeder Stunde derart bestimmt, dass ein vorgegebener Sollwert erreicht wird. Die notwendigen Berechnungsformeln hierzu sind aus dem EDV-Verfahren der VDI 2078 [1] bzw. aus den Korrekturvorschlägen [3] ableitbar.

Wie bereits von Esdorn [4] ausgeführt, sollte die Kühllastberechnung für die Sollwertvorgabe „Operativtemperatur“ statt für die Soll-Raumlufttemperatur nach VDI 2078 [1] erfolgen. Dies begründet Esdorn damit, dass die Operativtemperatur je nach thermischer Raumbelastung derart über der Raumlufttemperatur liegen kann, dass unbehagliche Zustände erreicht werden, ohne dass der Anwender des Berechnungsverfahrens hierüber etwas erfährt. In [3, Tabelle 9] wurde daher eine Berechnungsformel für die Operativtemperatur nachgereicht, damit der Anwender eine Kontrollmöglichkeit erhält.

Gegen die Auslegung der Anlage nach der Operativtemperatur spricht der Umstand, dass die meisten Fühler des Raumtemperaturreglers die Lufttemperatur erfassen. D.h., die Operativtemperatur wird von der Regelung der Anlage nicht erfasst und kann somit nicht direkt beeinflusst werden.

Weiterhin gibt es auch Anwendungsfälle, in denen eine bestimmte Raumlufttemperatur aufrechterhalten

werden soll, z.B. um eine konstante relative Feuchte in Museen zu erreichen. Für diese Fälle würde sich die Raumlufthtemperatur als Sollwert bzw. Berechnungsziel der Kühllastberechnung anbieten.

Ein weiteres Argument von Esdorn [4] für die Operativtemperatur als Sollwert ist die Vergleichbarkeit der Kühllast für Kühldecken und RLT-Anlagen. Sollte eine Entscheidung darüber getroffen werden, welcher Anlagentyp eingebaut werden soll, ist natürlich für die Dimensionierung der Anlage der gleiche thermische Komfort zugrunde zu legen. Berechnet man die Kühllast nach der Raumlufthtemperatur wäre für Kühldecken eine sehr viel höhere Leistung notwendig, als für eine RLT-Anlage. Der Grund liegt im Strahlungsanteil der Kühldeckenleistung, der die Raumlufthtemperatur nicht direkt beeinflussen kann.

Man erkennt aus Vorstehendem, dass Kühllastalgorithmen für eine geregelte Bauteil- sowie RLT-Anlage für die Sollwertart „Raumlufthtemperatur“ als auch „Operativtemperatur“ bereitzustellen sind. Diese wurden aus den Gleichungen der Korrekturvorschläge in [3] abgeleitet und im Rechenkern des neuen C.A.T.S.-Kühllastprogrammes eingearbeitet.

Die Kontrolle dieser neuen Algorithmen kann dadurch erfolgen, indem man den Strahlungs- und Konvektivanteil in Watt aus dem Kühllastergebnis herausrechnet und für eine zweite Berechnung diese beiden Größen als neg. Last einträgt. Das neue Kühllastergebnis muss nun den Wert Null ergeben.

Im Folgenden werden die Ergebnisse des Programms für einige Varianten dargestellt und diskutiert. Hieraus ergibt sich eine sinnvolle Vorgehensweise für die Auslegung derartiger Anlagen.

Physik des Zusammenwirkens zwischen Raum und Anlage

Die physikalischen Vorgänge hierzu sind nach [2] extrem komplex. Daher soll eine systematische Erläuterung mit Grenzwertbetrachtungen zum Verständnis der Vorgänge beitragen.

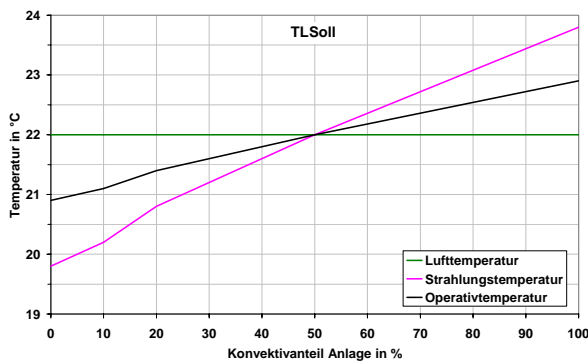
Operativtemperatur

Für die Betrachtung der Sollwertart „Operativtemperatur“ wird in Glg (1) der Zusammenhang zur Raumlufth- und Strahlungstemperatur gezeigt.

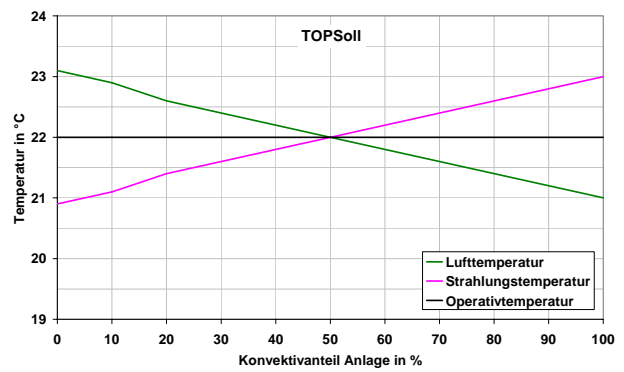
$$\vartheta_{OP} = \beta_{Hu} \vartheta_{LR} + (1 - \beta_{Hu}) \vartheta_{SR} \quad (1)$$

ϑ_{OP}	Operativtemperatur (empfundene Temperatur)
ϑ_{LR}	Raumlufthtemperatur (hier als örtlich unabhängige Mischlufthtemperatur)
ϑ_{SR}	Strahlungstemperatur (mittlere innere Oberflächentemperatur der Raumumschließung)
β_{Hu}	Verhältnis des konvektiven zum Gesamtwärmeübergangskoeffizienten am menschlichen Körper ($\beta_{Hu} \approx 0,5$)

β_{Hu} hängt i.a. von den Umgebungsbedingungen des menschlichen Körpers ab, soll hier aber – wie in der Literatur üblich – mit 0,5 angenommen werden. Damit liegt die Operativtemperatur immer in der Mitte zwischen der Raumlufthtemperatur und der Strahlungstemperatur (s. Bild 1).



a)



b)

Bild 1: Temperaturen im Raum bei der Sollwertart
a) Raumlufttemperatur (TLSoil) und b) Operativtemperatur (TOPSoil)
Konvektivanteil der Belastung: 50 %

In Bild 1 ist auf der Abszisse der Konvektivanteil der Anlage aufgetragen. Dieser Parameter ist im Folgenden ein Synonym für den Anlagentyp. Ein Konvektivanteil der Anlage von 100 % entspricht einer reinen RLT-Anlage. Je kleiner der Konvektivanteil ist, desto größer ist der Strahlungsanteil der Bauteilkühlung. Der Konvektivanteil von 0 % ist ein theoretischer Grenzfall, in dem die Wärme nur noch über die langwellige Zustrahlung auf die Kühldecke abgeführt wird.

Zu unterscheiden ist vom Konvektivanteil der Belastung. Dringt viel Sonnenstrahlung in den Raum ein, so wird der Konvektivanteil der Belastung geringer ausfallen. Er steigt an, wenn die inneren Wärmequellen die umgebende Raumluft auf direktem Wege aufheizen könnten, sofern nicht gekühlt wird, z.B. durch Lüfter im PC.

Sind die Konvektivanteile für Belastung und Anlage gleich groß, gilt die Temperaturgleichheit $\vartheta_{OP} = \vartheta_{LR} = \vartheta_{SR}$.

Strahlungswärmebelastung

Die hauptsächlich durch Sonneneinstrahlung aufgeprägte Strahlung im Raum (Aktion QS) trifft auf die inneren Oberflächen und wird von diesen absorbiert. Je nach Bauschwereklasse des Raumes führt dies zu einem mehr oder weniger starken Anstieg der Strahlungstemperatur. Bauteile im Raum mit großer Wärmespeicherfähigkeit auf der inneren Oberfläche werden die absorbierte Strahlungswärme zwischenspeichern und damit einen größeren Anstieg der Oberflächentemperatur vermeiden. Die zwischengespeicherte Wärme wird wieder an den Raum abgegeben, wenn die Umgebungstemperaturen des Bauteils dies zulassen, i.d.R. aber nach Wegfall der absorbierten Strahlung. Dieser Vorgang wirkt sich bei der rein konvektiven Kühlung dämpfend, d.h. kühllastmindernd aus, da die volle Belastung nicht sofort abgeführt werden muss.

Bei einer Bauteilkühlung im Raum, z.B. mit einer Kühldecke mit nennenswertem Strahlungsanteil, wird aufgrund der niedrigen Kühldeckenoberflächentemperatur das Eindringen der absorbierten Wärme in den speichernden Baukörper unterbunden bzw. verringert. Die Kühldecke „saugt“ die Wärme aus den Wänden und es kann keine Zwischenspeicherung erfolgen. Der Baukörper wirkt daher thermisch gesehen

„leichter“ und die sofortige Abfuhr der Strahlungswärme über das Kaltwassersystem der Kühldecke erhöht die Kühllast.

Kühllastdefinition

Die Soll-Kühllast ist die erforderliche Kühlleistung, um eine bestimmte Soll-Temperatur zu erreichen. Dagegen entspricht der Ist-Kühllast die tatsächlich installierte Kühlleistung im Raum. Bisher war die Kühllast bzw. Kühlleistung als rein konvektive Leistung für die Sollwertart „Raumlufttemperatur“ definiert. Da nunmehr im erweiterten Berechnungsverfahren die Kühlleistung auch einen Strahlungsanteil beinhalten kann und der Bezug auf die Operativtemperatur möglich ist, muss eine Umdefinition erfolgen:

„Die errechnete Kühllast bzw. Kühlleistung bezieht sich auf die durch den Konvektivanteil gewählte Anlage und auf die gewählte Sollwertart.“

Berechnungsbeispiele

In den folgenden Beispielen werden verschiedene Raumtypen und Räume mit dem Rechenkern des C.A.T.S.-Kühllastprogrammes KLProg 4.4 berechnet. Zunächst wird dem Raum eine innere Last von 8-18 Uhr in Höhe von 1000 W aufgeprägt (Beispiel 1). Alle anderen Lasten sind Null. Der Konvektivanteil der Last wird in Schritten 0, 50 und 100% variiert. Der Konvektivanteil der Anlage in Schritten 0, 10, 20, 50, 100%.

Der Sollwert ist in beiden Fällen der Sollwertart 22 °C. Die betragsmäßige Gleichheit der Sollwerte ist nicht zwingend vorgeschrieben, wird aber in der vorliegenden Untersuchung – wie auch in [4] – aus Gründen der Vergleichsmöglichkeit gewählt. In der Praxis sollte man bei Anwendung des bisherigen Kühllastberechnungsverfahrens den Sollwert für die Raumlufttemperatur 1-2 K unterhalb einer gewünschten Operativtemperatur wählen.

Aufgetragen wird jeweils die max. Kühllast im eingeschwungenen Zustand bezogen auf die Last von 1000 W über den Konvektivanteil der Anlage. Dies ergibt den max. Kühllastfaktor, der sowohl Strahlung als auch Konvektion in der Leistung enthält. Bei einem max. Kühllastfaktor von 1 entspricht die erforderliche Anlagenleistung der Größe der Belastung.

Aus Bild 2 ist ersichtlich, dass der max. Kühllastfaktor auch größer als 1 werden kann. Dies bedeutet, dass die Anlage für eine größere Leistung ausgelegt werden muss, als es durch die Höhe der Belastung vorgegeben ist. Eine solche Auslegung wäre aus Energieeffizienzgründen abzulehnen. Bei der bisherigen Berechnung der RLT-Anlagen (Konvektivanteil Anlage 100%) war der max. Kühllastfaktor nur dann 1, wenn die Belastung rein konvektiv war. Dies gilt auch für die Sollwertart TOPSoll. Sobald die Belastung einen Strahlungsanteil enthielt, ergaben sich aufgrund der Zwischenspeicherung Werte < 1 , was auch aus dem Bild 2 hervorgeht.

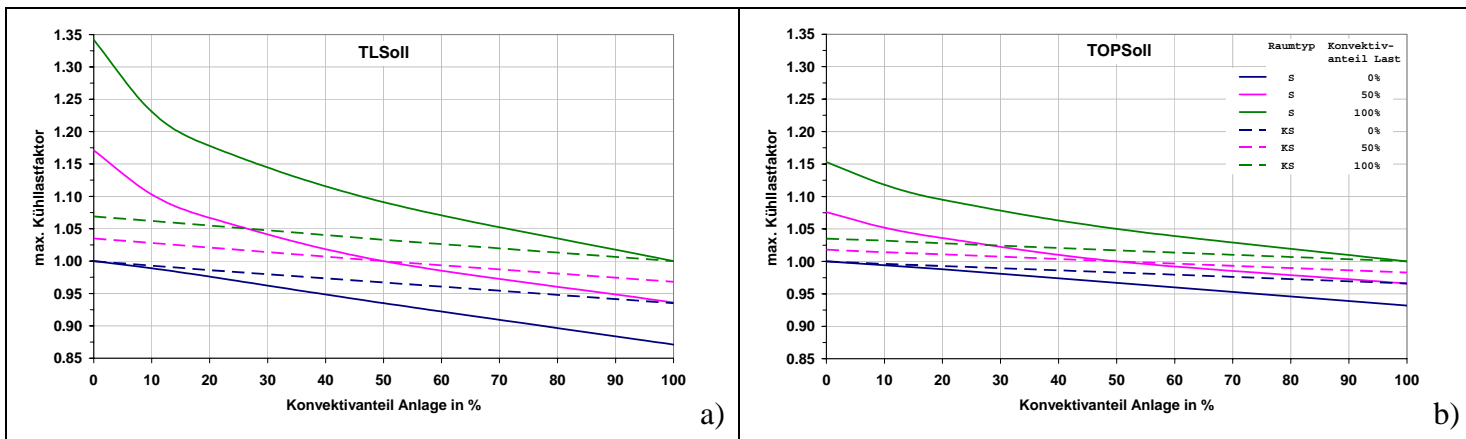


Bild 2: Maximaler Kühllastfaktor für die Sollwertart

a) Raumlufttemperatur (TLSoll = 22 °C) und b) Operativtemperatur (TOPSoll = 22 °C)

Beispiel 1: Testbelastung 1000 W

Zwischen durchgezogener Linie (Raumtyp Schwer) und gestrichelter Linie (Raumtyp Keine Speicherung) wird der Bereich der Bauartschweren abgebildet. Auffällig ist der Schnittpunkt beider Linien. In diesem Schnittpunkt entspricht der Konvektivanteil der Belastung dem Konvektivanteil der Anlage. Die Bauartschwere hat hier keinen Einfluss mehr. Insofern relativieren sich auch die verschiedenen dynamischen Berechnungsverfahren (z.B. [1] und [7]) zur Berücksichtigung der Bauartschwere. D.h., in diesem Punkt könnten auch statische Verfahren zur Anwendung kommen.

Links von diesem Schnittpunkt wird es für die Anlage immer schwieriger, die gewünschte Sollwertanforderung mit geringer Leistung zu erfüllen. D.h., die Kühlleistung muss entsprechend höher dimensioniert werden. Hier wirkt sich die Bauartschwere sogar negativ aus, da die Wände abgekühlt werden müssen, um den konvektiven Anteil der Last aufzunehmen.

Für eine optimale Auslegung sollte der Konvektivanteil der Anlage mindestens dem Konvektivanteil der Belastung entsprechen. D.h., der Konvektivanteil der Anlage $\beta_{K,Anl}$ sollte die Ungleichung

$$\beta_{K,Anl} \geq \frac{E(1) - L (I\vartheta_{LR} - B\vartheta)}{K} \quad (2)$$

E(1) konvektive Wärmebelastung innen in W, s. [3, Tabelle 3, Aktion QK]

L Luftwert in W/K

$I\vartheta_{LR}$ Ist-Raumlufttemperatur in °C

$B\vartheta = 22\text{ °C}$ Bezugslufttemperatur in °C

K Ist-Kühllast in W

erfüllen. Ist dies nicht möglich, sind Leichtbauweisen zu bevorzugen bzw. dem Architekten zu empfehlen.

Den Konvektivanteil der Belastung kann man ermitteln, wenn man Glg. (2) iterativ anwendet, bis $\vartheta_{LR} = \vartheta_{OP}$ erfüllt ist.

In einem weiteren Beispiel 2 wurden die Räume verändert und mit einer äußeren und inneren realen Belastung beaufschlagt. Bild 3a zeigt, dass der max. Kühllastfaktor noch stärker ansteigen kann als in Bild 2a. Das grundsätzliche Verhalten bleibt erhalten. Bei beiden Bildern 2 und 3 ist zu erkennen, dass der Anstieg des max. Kühllastfaktors mit abnehmendem Konvektivanteil der Anlage geringer ausfällt, wenn die Operativtemperatur als Sollwert verwendet wird. Die Kurven unter TOPSoll verlaufen flacher, was sich bei der Kühldecke günstig auswirkt.

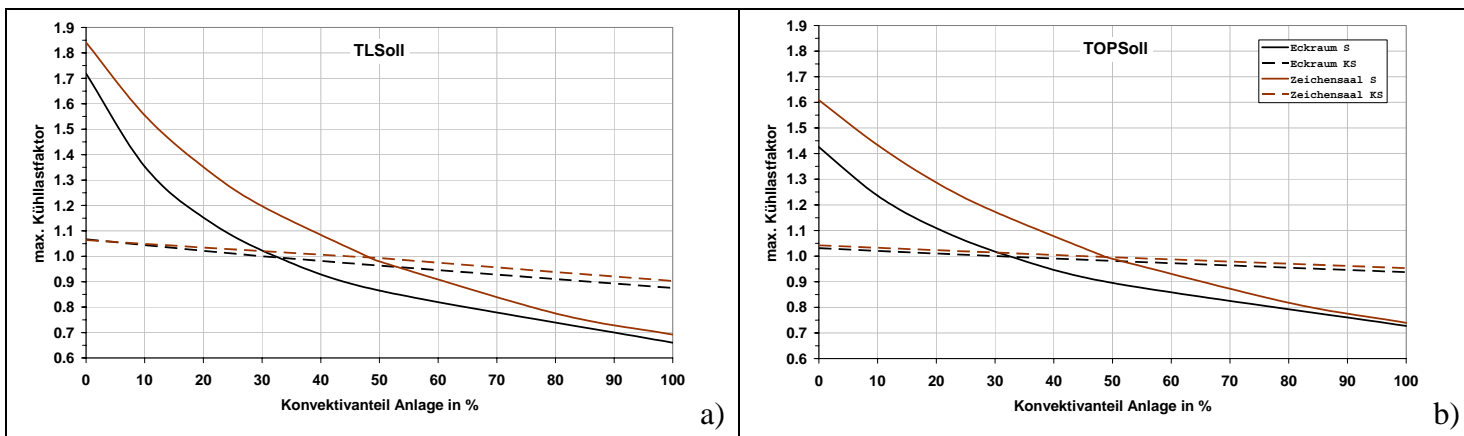


Bild 3: Maximaler Kühllastfaktor für die Sollwertart

a) Raumlufttemperatur (TLSoll = 24 °C) und b) Operativtemperatur (TOPSoll = 24 °C)

Beispiel 2: Reale Belastung

Fazit

Es bleibt abzuwarten, ob sich das Verfahren der VDI 6007 durchsetzen wird, da der Eingabeaufwand bei dem Verfahren nach VDI 2078 wesentlich geringer ist. Die VDI 6007 verlangt detaillierte Schichtdaten sämtlicher Bauteile im Raum, wodurch der Beschaffungsaufwand für den Planer erhöht wird. Ob sich dieser Aufwand hinsichtlich einer Genauigkeitssteigerung auch lohnt, ist noch nicht dargelegt worden.

Die Eignung für das hier vorgestellte korrigierte und erweiterte EDV-Verfahren wird in einem nächsten Bericht anhand der Testbeispiele aus der VDI 6007 demonstriert.

Mit der Feuchtebilanz im Raum (s.o.) wird auch die Grundlage dafür geschaffen, die Auswahl der Systemtemperaturen hinsichtlich der Taupunkttemperatur im Raum zu überprüfen. Für dieses wichtige Auslegungskriterium sieht die VDI 6007 keine Algorithmen vor. Nach DIN EN 1264-3 [8] kann angenommen werden, dass die Erfüllung der Taupunkt-Begrenzung auch den physiologischen Einschränkungen hinsichtlich der Kopfentwärmung genügt.

Ein sehr wichtiger Parameter bei beiden Verfahren ist der Konvektivanteil der Anlage. Esdorn hat in [4] bereits gefordert, dass diese Größe neben der Norm-Kühlleistung ebenfalls messtechnisch auf den

Prüfständen ermittelt wird. Leider finden sich in den Prüfprotokollen immer noch keine Angaben hierüber. Aufgrund der jetzt praktischen Verwendungsmöglichkeiten muss diese Forderung mit allem Nachdruck unterstrichen werden. Nach Auskunft eines Herstellers hat eine Kühldecke bei Deckeneinbau einen Konvektivanteil von ca. 40 % und als frei hängendes Kühlsegel ca. 60 %. Betrachtet man die Steigung im Bild 3a kann diese Variation schon eine erhebliche Änderung im Kühllastergebnis bewirken. Dabei kann auch der besagte Schnittpunkt eingeschlossen sein.

Ein Problem, welches von beiden Verfahren noch nicht erfasst wird, ist die hohe Zeitkonstante bei bestimmten Anlagentypen, wie z.B. bei der Betonkernaktivierung. Bei der Berechnung geht man davon aus, dass die Anlagenleistung innerhalb einer Stunde erbracht werden kann. Liegt die Zeitkonstante der Anlage über einer Stunde, kann die aktuelle Anforderung nicht erfüllt werden, mit der Folge, dass sich der zeitliche Kühllast- und Raumtemperaturverlauf verändert. Hier besteht noch weiterer Entwicklungsbedarf, um ein derartiges Verhalten in die bestehenden Algorithmen zu implementieren.

Bei der DIN EN 1264-3 [8] werden diese Effekte ebenfalls nicht berücksichtigt. Sie setzt den Auslegungswert der Kühllast als gegeben voraus und verweist auf eine Berechnung nach prEN 15243. Allerdings enthält diese Norm keine Berechnungsalgorithmen für die Kühllast, obwohl dies aus ihrem Titel hervorgeht. Stattdessen verweist sie bezüglich der sensiblen Raumkühllast auf eine weitere Norm aus der EPBD-Reihe (prEN EPBD WI 16), die jedoch noch nicht erhältlich ist.

Literatur

- [1] VDI 2078 Ausgabe Juli 1996: Berechnung der Kühllast klimatisierter Räume (VDI-Kühllastregeln).
- [2] VDI 2078 Blatt 1 Ausgabe Februar 2003: Berechnung der Kühllast klimatisierter Gebäude bei Raumkühlung über gekühlte Raumumschließungsflächen.
- [3] Nadler, Norbert: Korrekturvorschläge zum EDV-Verfahren der VDI 2078.
Teil 1a: Algorithmen, HLH Bd. 54 (2003) Nr. 8, S. 59-66
Teil 1b: Algorithmen, HLH Bd. 54 (2003) Nr. 9, S. 62-66
Teil 2a: Vergleichsrechnungen, HLH Bd. 54 (2003) Nr. 10, S. 83-90
Teil 2b: Vergleichsrechnungen, HLH Bd. 54 (2003) Nr. 11, S. 75-78
- [4] Esdorn, Horst: Einzelheiten zur Kühllastberechnung. Einfluß des Raumkühlverfahrens und der Bezugstemperatur auf die Kühllast von Räumen. HLH Bd. 45 (1994) Nr. 4, S. 165-175.
- [5] Masuch, Jürgen: Thermisches Verhalten unterschiedlicher Kühldeckensysteme. HLH Bd. 49 (1998) Nr. 8, S. 62-65.
- [6] Nadler, Norbert: Zur Personenwärme bei der Kühllastberechnung nach VDI 2078. HLH Bd. 56 (2005) Nr. 7, S. 36-40
- [7] VDI 6007 Ausgabe Oktober 2007: Berechnung des instationären thermischen Verhaltens von Räumen und Gebäuden –Raummodell–.
- [8] DIN EN 1264-3 Norm-Entwurf November 2007: Raumflächenintegrierte Heiz- und Kühlsysteme mit Wasserdurchströmung -Teil 3: Auslegung