

Wärmeübertragung

Dynamisches Raummodell

Teil 1

Bernd Glück, Jößnitz (Plauen)

Die derzeitigen Forderungen, thermisch aktive Bauteile und vor allem Latentspeicherschichten energetisch und wärmephysiologisch bewerten zu können, führten zu wesentlichen Erweiterungen des bekannten Algorithmus. Ein Programmsystem, wie das Dynamische Raummodell, soll dem ambitionierten Nutzer helfen, in Gebäuden gute wärmephysiologische Werte mit niedrigen Energieaufwendungen zu erreichen.

Derzeit gibt es vielfältige Entwicklungen bei der Gestaltung der Raumumfassungen – Leichtbaumaterialien mit sehr großer Wärmedämmung bis hin zu Latentspeichermaterialien mit hoher Umwandlungswärme beim Phasenwechsel im zulässigen Raumtemperaturbereich – und den

Raumheiz- sowie Kühltechniken. Der angestrebte niedrige Primärenergieverbrauch verbunden mit einer hohen Nutzung von Umweltenergie erfordert in der Regel raumnahe Wärmeträgertemperaturen, weshalb vielfach großflächige, sehr häufig auch in die Bauteile integrierte Rohr- oder Kanalsysteme zum Einsatz kommen. Des Weiteren sind die Wärmequellen im Raum – beispielsweise in Büros – sehr bedeutungsvoll geworden, so dass die Art ihrer Wärmeabgabe einer detaillierten Beachtung bedarf. Schließlich interessiert vor allem das sich einstellende thermische Raumklima (Lufttemperatur, Verteilung der Strahlungstemperatur und ihre Asymmetrie). Das Dynamische Raummodell berücksichtigt die angesprochenen Besonderheiten und ermöglicht eine komplexe Simulation auf PC-Basis.

Einleitung

Die Grundlage für die Anlagenbemessung bildet eine sachgerechte Lastberechnung. Sie sollte üblicherweise einen mittleren Extremwert darstellen. Zur Ermittlung der Heiz- und Kühllast von Räumen könnte grundsätzlich der gleiche Algorithmus Verwendung finden. Da aber der Tagesgang des Außenklimas auf die Heizlast von geringerer Bedeutung ist und innere Wärmequellen unbeachtet bleiben, sind Vereinfachungen gegenüber der Kühllastberechnung möglich. Nachfolgend werden einige Ansätze diskutiert:

□ In der Vergangenheit hatte bei den Lastberechnungen in der Regel die Lufttemperatur eine zentrale Bedeutung bei der Formulierung der Wärmeströme. Die Wärmeübertragung durch Strahlung wurde meistens im Gesamtwärmeübergangskoeffizienten „versteckt“. Die Berechnung erforderte dann kein geome-

trisch exaktes Modell sondern nur die Flächengrößen ohne Beachtung der Zuordnungen. So fand sich beispielsweise in der VDI 2078 (1994) der Hinweis, dass Kühldecken im Algorithmus nicht eingeschlossen sind. Das ergänzende Blatt 1 (2002) löst die Problematik nicht grundsätzlich, sondern versucht lediglich eine näherungsweise Anpassung an das bestehende Verfahren.

□ Die inneren Wärmequellen bzw. -senken werden vielfach in ähnlicher Weise modelliert, indem man zunächst nur Konvektionswärmeströme zwischen den Oberflächen und der Luft betrachtet. Die mit beiden Modellierungen verbundenen Abweichungen sind in [1] quantitativ bewertet worden.

□ Die pauschale Berücksichtigung der Speichereigenschaft von Bauteilen oder ganzer Räume beispielsweise in Form von definierten Typräumen bewirkt große Unsicherheiten gegenüber den Gegebenheiten des modernen Bauens. Die genauen Wärmespeichervorgänge werden nicht abgebildet.

In [2] ist diese Thematik ausführlich angesprochen worden.

Die Leistung der Anlagenkomponenten kann üblicherweise Normprüfverfahren entnommen werden. Die Umrechnung auf die Einsatzbedingungen ist meistens problemlos, solange diese stationär wirken und die Raumheiz- bzw. Kühlanlagen keine Speichereffekte aufweisen. Für einige moderne Systeme trifft dies jedoch nicht zu, der derzeitige Sachstand ist somit zum Teil völlig ungenügend:

□ Bei der thermischen Bauteilaktivierung – z.B. Betondecken mit wasserführenden Rohrregistern – findet der instationäre Vorgang in der Regel keine korrekte Beachtung. Bei der größten Darstellung wird nur mit mittleren pauschalen Wärmestromdichten gearbeitet, indem man

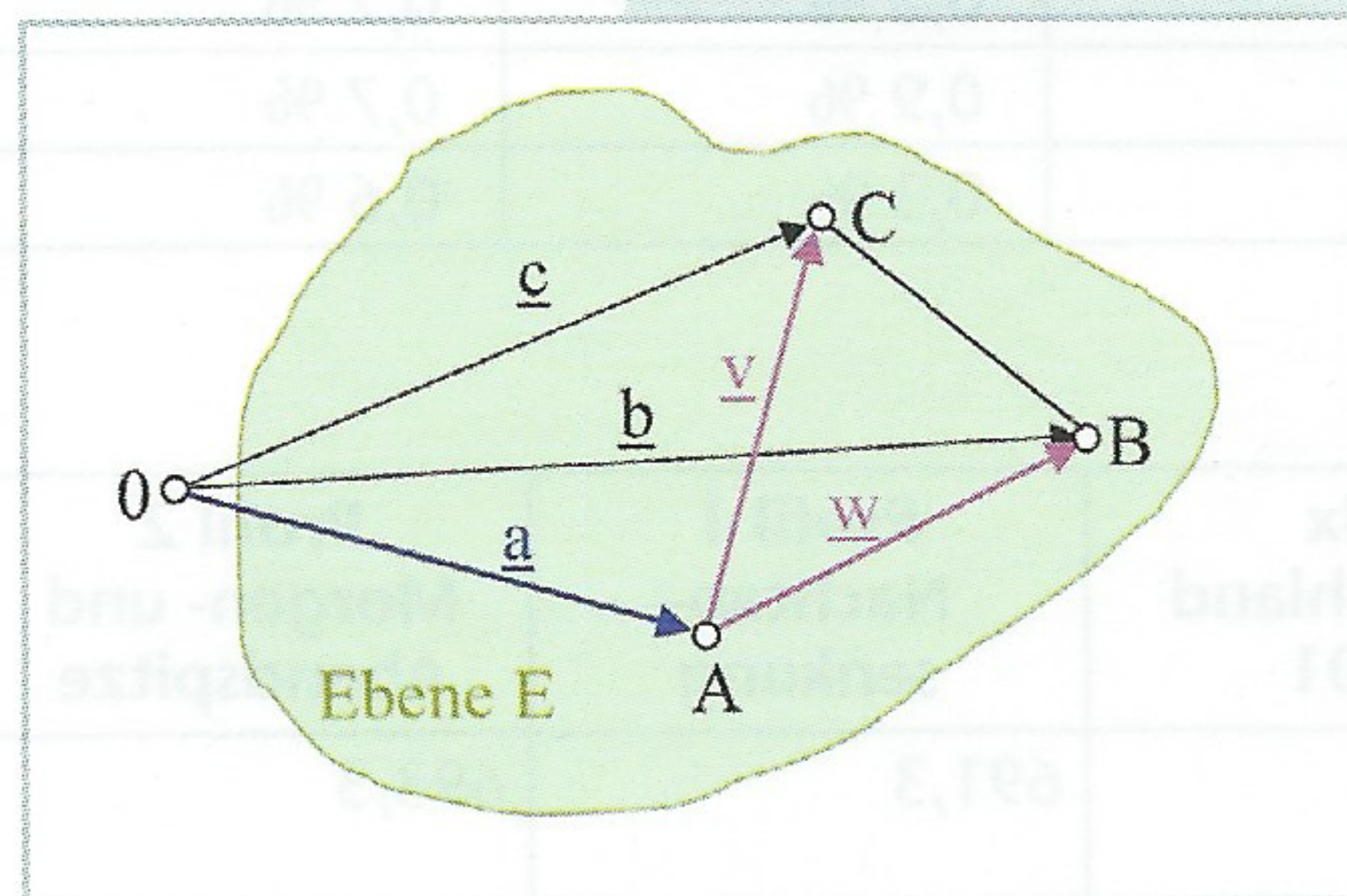


Bild 1

Definition einer Ebene durch die drei Punkte A, B, C mit den Zuführungsvektoren $\underline{a}$, $\underline{b}$, $\underline{c}$
Das Dreieck ABC wird durch die beiden Vektoren $\underline{v} = \underline{c} - \underline{a}$ und $\underline{w} = \underline{b} - \underline{a}$ aufgespannt.

Autor



Prof. Dr.-Ing. habil. Bernd Glück, Jahrgang 1942, betreibt ein Forschungs- und Entwicklungsbüro für Technische Gebäudeausrüstung. Gleichzeitig ist er als Honorarprofessor an der Westsächsischen Hochschule Zwickau (FH) tätig.

beispielsweise einer Speicherdecke während der Raumnutzungszeit die Kühlleistung von 30 W/m^2 zuordnet. Bei einigen Simulationsverfahren geht man von einer mittleren Bauteiltemperatur in der Ebene der Rohrregister aus und berechnet daraus die zeitabhängigen Leistungen der Systeme. Dies ist aber nur eine Vortäuschung einer exakten Betrachtung, da die Rohrabstände unbeachtet bleiben und damit die mindestens zweidimensionale Wärmeleitung ignoriert wird. In [3] ist der Einfluss des Rohrabstandes hinsichtlich der Speicherkapazität und der Dynamik umfassend dargestellt und als sehr relevant erkannt worden.

□ In letzter Zeit werden verstärkt Bauteile mit *Latentspeichermaterialien*, deren Phasenwandel im Raumtemperaturbereich liegt, zur Erhöhung der Wärmespeicherkapazität diskutiert und auch realisiert. Zur Aktivierung bieten sich wiederum wasserdurchflossene Rohrregister an. Simulationen sind nur dann aussagekräftig, wenn diese die Temperatur- und damit die Phasenwandeldynamik zwischen den Rohren und auch längs der Rohre gemäß Durchflussrichtung genau – d. h. dreidimensional – erfassen.

□ Völlig unzureichend wird in der Regel der in Übergangszeiten wechselnde Heiz-/Kühlbetrieb untersucht. Ein Beispiel ist in [4] vorgestellt worden.

Zusammenfassend muss festgestellt werden, dass in den meisten Fällen

- die Lastberechnung der Räume
- die Leistungsbestimmung der Anlagenkomponenten
- die Ermittlung des thermischen Raumklimas

genauer zu gestalten sind. Dies betrifft vor allem:

- das korrekte Einbeziehen und Ermitteln der operativen Raumtemperatur
- die wärmetechnisch richtige Darstellung des Strahlungsaustausches
- die exakte Berücksichtigung der Wärmespeicherung in den Bauteilen.

Letztere kann differenziert erfolgen, indem die Wärmeleitung in Sandwichbauteilen mit jeweils homogenen Schichten folgendermaßen betrachtet wird:

- eindimensional bei passiver Speicherung (z.B. Wärmeströme nur über die Bauteiloberflächen)
- zweidimensional bei aktiver sensibler Speicherung (z.B. Betondecke mit Rohrregister)
- dreidimensional bei aktiver latenter und sensibler Speicherung (z.B. Latentspeicherputz mit Rohrregister).

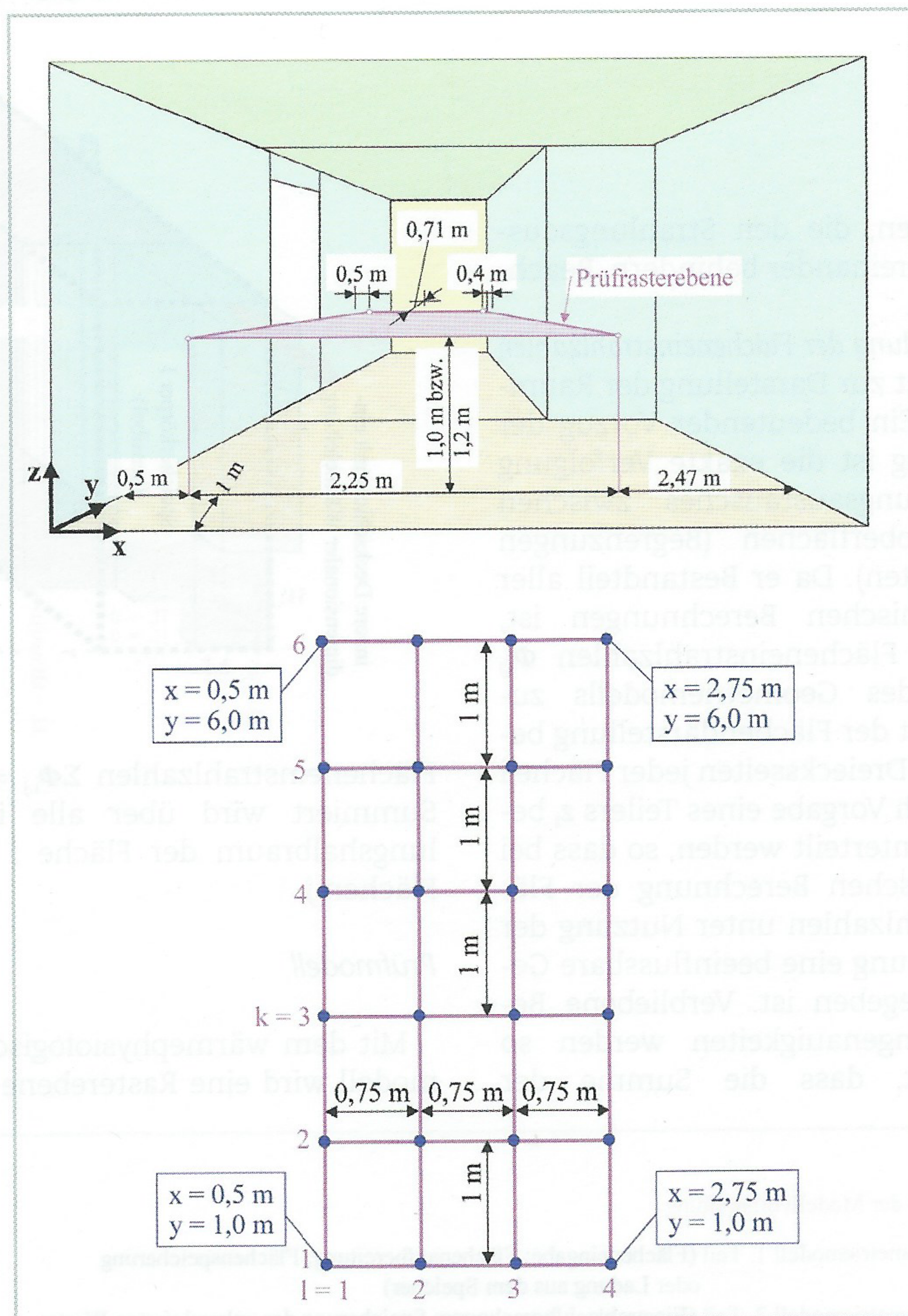


Bild 2

Beispiel für eine Einordnung der Prüfrasterebene im Raum mit detaillierter Maßskizze der Gitterebene

Geometriemodell

Das Geometriemodell beinhaltet zunächst die genaue Erfassung der inneren Raumboflächen in Koordinatenform. Die Flächen i werden als Dreiecke mit den Koordinaten der Eckpunkte eingegeben (Bild 1). Dies hat den Vorteil, dass mit Kenntnis der Eckpunkte die Lage der Fläche und auch die Flächenbegrenzung determiniert sind. Rechteckflächen müssen somit in mindestens zwei Dreiecke zerlegt werden, was innerhalb der Eingabeprozedur auch automatisierbar ist. Die Wahl der Flächenunterteilung hat nach geometrischen und wärmetechnischen Gesichtspunkten zu erfolgen. So ist die Flächenauflösung nach der Flächenorientierung (Wand, Decke), dem Flächenaufbau (Wand, Fenster) und den wärmetechnischen Randbedingungen (zu ermittelnde oder vorgegebene Oberflächentemperatur, fixierte Wärmestromdichte, thermisch aktive Flächen usw.) vorzunehmen.

Raumeinbauten können beispielsweise Raumteiler, Möbel, freistehende Heizflächen usw. sein. In der Regel wird man Möbel nicht berücksichtigen. Geschlossene Raumteiler sind dagegen unbedingt als separate Raumboflächen darzustellen. Dies ist erforderlich, um den Wärmeaustausch im Raum möglichst genau nachzubilden, wobei auch Verschattungen zwischen den Raum-

Damit ist die grundlegende Anforderung an das wärmetechnische Raummodell und gegebenenfalls an die Auflösung der wärmetechnischen Vorgänge in den Raumumfassungen determiniert.

Bei Vorhandensein eines thermisch aktiven Speichersystems als Anlagenkomponente sind Lastermittlung und Leistungsbestimmung bei exakter Betrachtung nicht voneinander trennbar.

Grundlagen des Raummodells

Das neuentwickelte Dynamische Raummodell stellt eine erhebliche Weiterentwicklung von [5] aus dem Jahre 1997 dar. Während die früheren Untersuchungen den stationären Bedingungen galten, sind nunmehr auch die instationären Vorgänge Hauptgegenstand der Simulation. Die Stoffdarbietung erfolgt in Bausteinform, die in der Regel einen theoretischen Teil, die programmtechnische Umsetzung und die Verifikation von Beispielrechnungen beinhaltet. Die Schwerpunkte der Modellierung werden nachfolgend vorgestellt.

begrenzungen, die den Strahlungsaustausch untereinander behindern, Beachtung finden.

Die Ermittlung der Flächeneinstrahlzahlen gehört direkt zur Darstellung der Raumgeometrie. Ein bedeutender Vorzug der Modellierung ist die exakte Verfolgung des Strahlungsaustausches zwischen den Raumboflächen (Begrenzungen und Einbauten). Da er Bestandteil aller wärmetechnischen Berechnungen ist, werden die Flächeneinstrahlzahlen $\Phi_{i,j}$ innerhalb des Geometriemodells zusammen mit der Flächendarstellung bestimmt. Die Dreiecksseiten jeder Fläche i können nach Vorgabe eines Teilers z_i beliebig fein unterteilt werden, so dass bei der numerischen Berechnung der Flächeneinstrahlzahlen unter Nutzung der Vektorrechnung eine beeinflussbare Genauigkeit gegeben ist. Verbliebene Berechnungsungenauigkeiten werden so kompensiert, dass die Summe der

Flächeneinstrahlzahlen $\sum \Phi_{i,j} = 1$ ergibt. Summiert wird über alle im Strahlungshalbraum der Fläche i liegenden Flächen j .

Prüfmodell

Mit dem wärmephysiologischen Prüfmodell wird eine Rasterebene im Raum

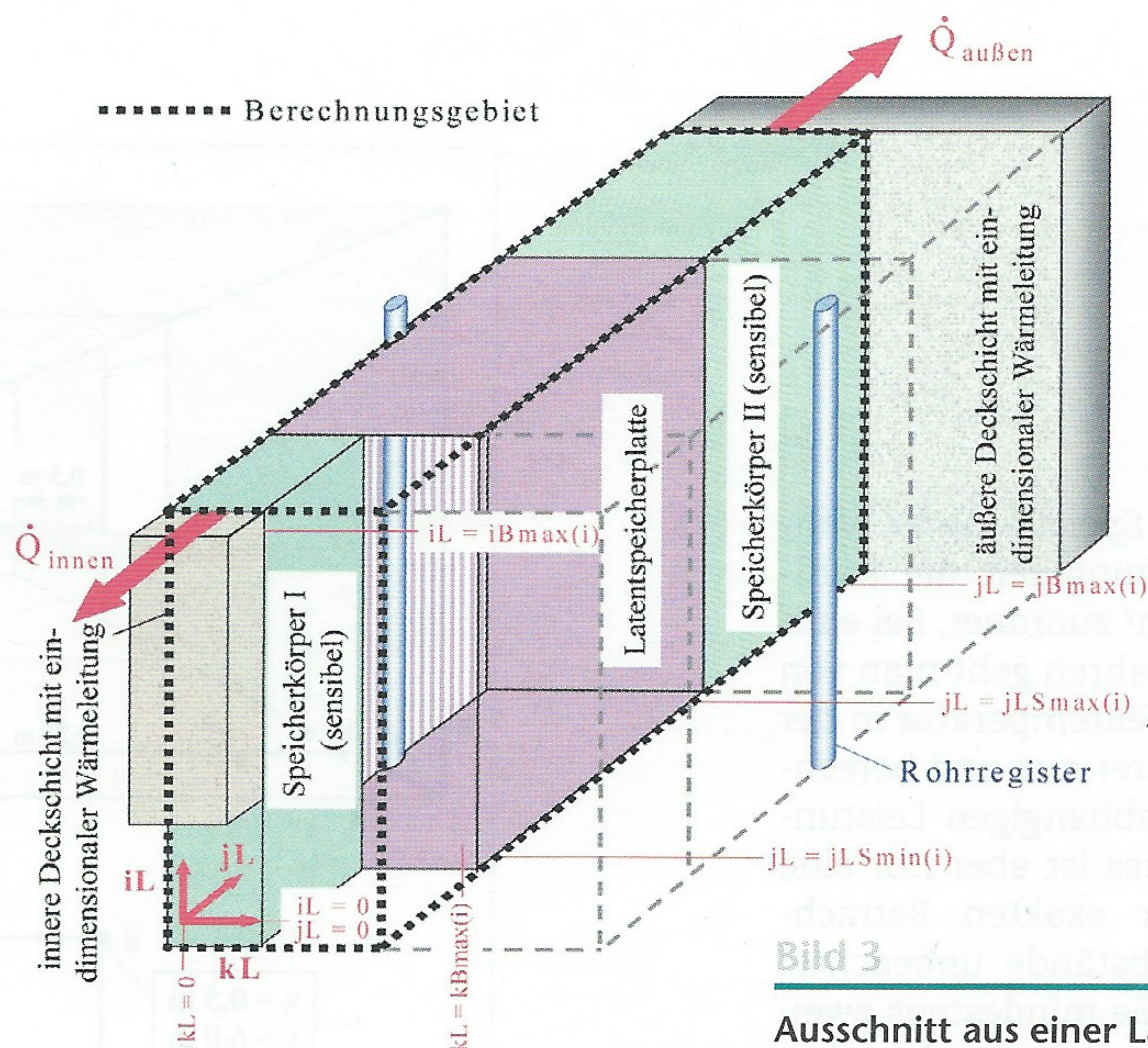


Bild 3

Ausschnitt aus einer Latentspeicherplatte zwischen zwei benachbarten Rohren des Registers und angrenzenden sensiblen Speicherkörpern, die die Tiefe des Berechnungsgebietes bilden mit Angabe des bauteilinternen Koordinatenursprungs $iL = 0$, $jL = 0$, $kL = 0$

Die Koordinatenlage berücksichtigt die Abmessungen der Volumenelemente. Die Breite des Berechnungsgebietes erstreckt sich von der Rohrachse bis zur Mitte zwischen zwei Rohrachsen (Symmetriebedingung). Im Berechnungsgebiet wird die Wärmeleitung dreidimensional betrachtet. Die innere bzw. äußere Deckschicht wird jeweils nur als Wärmeleitwiderstand R_i bzw. R_a erfasst

in beliebiger Größe, Lage und Unterteilung definiert (Bild 2). An den Rasterpunkten erfolgt der Ausweis der thermischen Behaglichkeitsgrößen. Sie setzen die Ermittlung von Elementeinstrahlzahlen für die Flächenelemente eines Prüfwürfels $\phi_{k,i}$ zur Ermittlung der Strahlungstemperatur-Asymmetrie und für ein Kugelelement („Punkt“) $\phi_{k,i}^0$ zur Bestimmung der Strahlungstemperatur der Umgebung und der Empfindungstemperatur voraus. Das numerische Berechnungsverfahren entspricht im Grundaufbau dem für die Flächeneinstrahlzahlen, wobei wiederum vorhandene Verschattungen im Strahlengang Berücksichtigung finden. Es erfolgt auch hier eine abschließende Fehlerkompensation.

Interieursimulation

Außer der exakten Darstellung von Flächen im Raum, denen eine feste Temperatur oder eine fixe Wärmestromdichte aufgeprägt ist, können Interieurwärmequellen bzw. -senken (Laufvariable: inter) auch vereinfacht dargestellt wer-

Bild 4

Schema der komplexen Abarbeitung des Raummodells für stationäre Bedingungen

Beginn der Modellvorbereitung

- Geometriemodell 1. Teil (Flächeneingabe; Flächenaufbereitung; Flächenspeicherung oder Ladung aus dem Speicher)
- Geometriemodell 2. Teil (Einstrahlzahlberechnung; Speicherung der unkorrigierten Werte; Fehlerkompensation der Einstrahlzahlen; Einstrahlzahlspeicherung oder Ladung aus dem Speicher)
- Prüfmodell 1. Teil (Prüfmodelleingabe; Prüfmodellaufbereitung; Prüfmodellspeicherung oder Ladung aus dem Speicher)
- Prüfmodell 2. Teil (Elementeinstrahlzahlberechnung mit Korrektur; Elementeinstrahlzahlspeicherung oder Ladung aus dem Speicher)
- Interieursimulation (Interieurwärmequelleneingabe; Interieursimulation; Interieurspeicherung oder Ladung aus dem Speicher)

Wärmetechnische Simulation mit Konvektionsmodell (Mehrzonen), Strahlungsmodell und Wärmeleitmodell (stationär)

Wärmetechnische Eingaben (Eingabe der stationären wärmetechnischen Daten und Speicherung oder Ladung aus dem Speicher)

Ende der Modellvorbereitung

Beginn der äußeren Iterationsschleife

Ziel: Ermittlung der Leistung zum Erreichen der Raumsolltemperatur oder Ermittlung der Raumtemperatur bei passiver Raumnutzung

Programm: Stationäre Komplexsimulation

Beim Erstdurchgang Schätzung der Oberflächentemperaturen

Beginn der inneren Iterationsschleife

Ziele: Bestimmung der Oberflächen- und der Zonenlufttemperaturen durch Abgleich der Wärmebilanzen an allen Oberflächen und der Enthalpie- sowie Massestrombilanzen für alle Luftzonen

Unterprogramm: Temperaturanpassung aller Oberflächentemperaturen

Innerhalb des Unterprogramms werden weitere Unterprogramme aufgerufen:

Strahlungsmodell

Mehrzonen-Konvektionsmodell

Stationäres Wärmeleitmodell

Ende der inneren Iterationsschleife

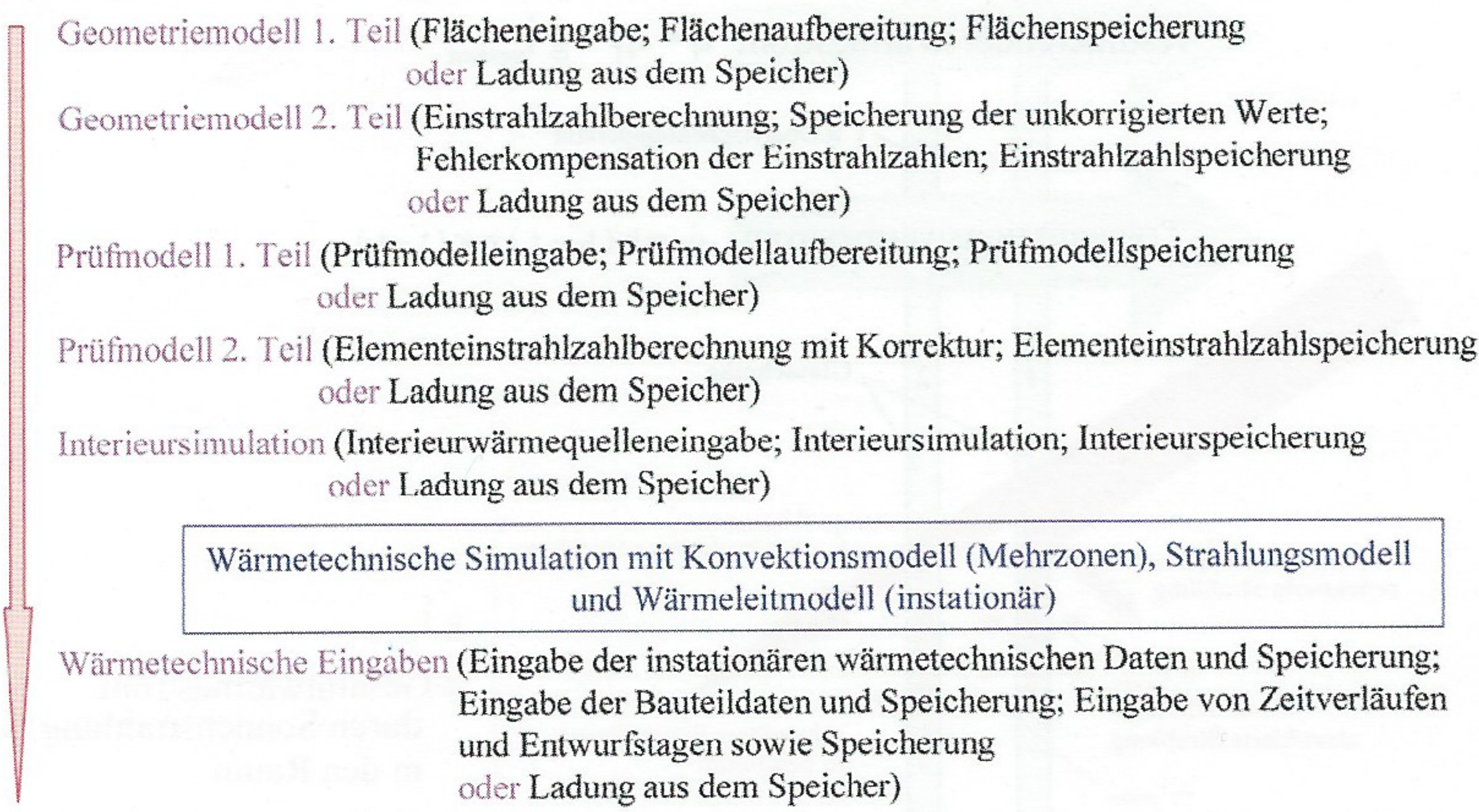
Ende der äußeren Iterationsschleife

Beginn der Modellauswertung

- Behaglichkeitssimulation 1. Teil (Berechnung der Strahlungstemperatur)
- Behaglichkeitssimulation 2. Teil (Berechnung der Strahlungsasymmetrie)
- Behaglichkeitssimulation 3. Teil (Berechnung der Empfindungstemperatur)
- Diverse Ausdrücke in detaillierter und komplexer Form sowie Grafiken

Ende der Modellauswertung

Beginn der Modellvorbereitung



Ende der Modellvorbereitung

Abarbeitung des Algorithmus in Zeitschritten Δt bis zum Ende des Simulationszeitraumes

Ziel: Ermittlung der Leistung zum Erreichen der Raumsolltemperatur oder Ermittlung der Raumtemperatur bei passiver Raumnutzung

Programm: Instationäre Komplexsimulation

Beim Erstdurchgang Schätzung der Oberflächentemperaturen

Unterprogramm: Temperaturanpassung aller Oberflächentemperaturen

Innerhalb des Unterprogramms werden weitere Unterprogramme aufgerufen:

Strahlungsmodell

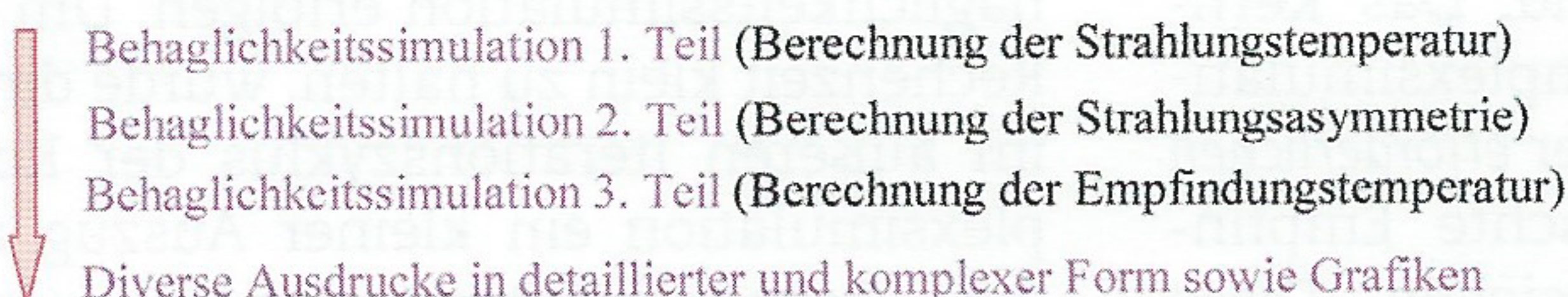
Mehrzonen-Konvektionsmodell

Instationäres Wärmeleitmodell

Der Abgleich der Wärme- bzw. Enthalpiebilanzen sowie der Massestrombilanzen wird in der Zeitfolge erreicht, womit die Oberflächen- und die Lufttemperaturen bestimmt sind.

Ende der Simulationszeit

Beginn der Modellauswertung



Ende der Modellauswertung

Bild 5

Schema der komplexen Abarbeitung des Raummodells unter instationären Bedingungen

den. Beispielsweise als Kugel im Wärmeschwerpunkt der realen Quelle, von der aus gemäß einem vorgegebenen Anteil ($Ant_{rad,inter}$) Wärmestrahlung an die umgebenden Flächen i und der Rest als Konvektion an die Luft übertragen wird. Die Aufteilung der Strahlung an die Umgebungsflächen erfolgt nach den Einstrahlzahlen $\phi_{inter,i}$, die zu diesem Zweck separat ermittelt werden. Eine gröbere Darstellung der Wärmequelle ist bei rein konvektiver Wärmeabgabe möglich, wobei der Leistungseintrag über die Raumhöhe verteilt erfolgt.

Behaglichkeitssimulation

Sie beinhaltet die neuesten wärme-physiologischen Erkenntnisse und deren mathematische Formulierung. Die operative Raumtemperatur kann auf der Grundlage der DIN EN ISO 7730 dem jeweiligen Heiz-/Kühlsystem angepasst werden. Die Auswahl basiert u. a. auf [6;

7]. Ermittelt werden: Verteilungen der Strahlungstemperatur, der Empfindungstemperatur und der Strahlungstemperatur-Asymmetrie für alle Prüfrasterpunkte. Daraus folgen weiter die jeweiligen Extremwerte.

Strahlungsmodell

Die Strahlungswärmeströme werden sehr genau nach der Bruttomethode berechnet, wobei alle Raumboberflächen gleichzeitig in den Algorithmus einbezogen sind. Die Einführung der sogenannten Flächenhelligkeiten für jede Fläche f_i berücksichtigt die temperaturbedingte Eigenemission $\dot{e}_i$ plus alle reflektierten Anteile der zugestrahlten Flächenhelligkeiten. Damit werden keine Strahlungsanteile vernachlässigt, wie dies früher bei der bilateralen Betrachtung – dem Strahlungsaustausch zwischen zwei beliebig orientierten Flächen – der Fall war. Zur Lösung des Gleichungssystems, das zahlenmäßig der Flächenanzahl i_{max} entspricht, wird der Gaußalgorithmus verwendet. Die berechneten „Flächenhelligkeiten“ finden außerdem bei der Ermittlung der Strahlungstemperatur zur Bewertung der thermischen Behaglichkeit Verwendung.

Konvektionsmodell

Es erfolgt eine umfangreiche Modellierung der Konvektionswärmeströme an allen Oberflächen des Raumes und für die Interieurwärmequellen oder -senken im Raum. Daraus ergeben sich die vertikalen Luftvolumenströme. Die Untersuchungen basieren auf der Grundlage von horizontalen Zonen (Laufvariable: zone). Üblicherweise sollte $zone_{max} = 10$ gewählt werden. Innerhalb der Zonen werden die Enthalpie- und Masseströme mit dem Ziel bilanziert, den vertikalen Lufttemperaturgradienten im Raum zu ermitteln. Dies ist vorteilhaft, denn die meisten energetischen Simulationsmodelle gehen im gesamten Raum von einer konstanten Lufttemperatur aus. Andererseits kann das verwendete Konvektionsmodell selbstverständlich nicht die Aussagekraft einer Strömungssimulation erreichen. Dennoch zeigten vergleichende Untersuchungen für Quellsimulationen oder quellsimulationähnliche Strömungsformen, dass das Konvektionsmodell für die Ermittlung des vertikalen Lufttemperaturgradienten gut geeignet ist. Die Einbindung wiederholender Strömungssimulationen – beispielsweise über den Zeitraum einer instationären Untersuchung – würde derzeit noch unrealistische Rechenzeiten und einen nicht büroüblichen Hardwareeinsatz erfordern. Selbst wenn zukünftig diese Beschränkungen überwunden wären, müsste der Einsatz der Strömungssimulation in diesen Fällen überdacht werden. Denn das genaue Nachempfinden der Luftströmung im Raum setzte auch das Beachten der realen Möblierung voraus, was wiederum die praktische Allgemeingültigkeit des Ergebnisses einschränkte. Ein sinnvoller Ausweg könnte die weitere Verbesserung des jetzt impli-

zierten Modells durch Einarbeiten von Ergebnissen der Strömungssimulation für typische Lüftungssysteme darstellen.

Wärmeleitung

Die Wärmeleitung in den Raumumfassungen kann stationär und instationär untersucht werden. Sehr genau werden die *instationären* Wärmeleitvorgänge in mehrschichtigen Bauteilen mit sensiblen und auch latenten Wärmespeichereigenschaften nachgebildet. Eine Neuheit stellt auch die genaue Simulation der *instationären*, dreidimensionalen Wärmeleitung in durch Rohrregister beheizten oder gekühlten Bauteilen (**Bild 3**) dar, die sowohl die Temperaturverteilung zwischen den Rohren als auch längs der Rohre in Abhängigkeit des Mediendurchsatzes ermittelt. Diese hohe Abbildungsgenauigkeit der Realität ist notwendig, wenn beispielsweise die temperatur- und damit ortsabhängigen Phasenwandeleffekte berücksichtigt werden sollen. Überschlägige Berechnungen wären hierbei nicht aussagekräftig. Zur detaillierten Berechnung wurde ein explizit arbeitendes Finite-Volumen-Verfahren, das eine sehr gute Anpassung an die realen Gegebenheiten erlaubt, entwickelt. Der Aufbau ist in [8] umfassend dargelegt. Die vorgenommene Detaillierung erlaubt es, Aussagen zum Temperaturfeld und zum Phasenzustand im Bauteil zu erhalten. Weiterhin können Wärmetransporte durch entsprechende Summierungen – beispielsweise an den Rohrgrenzen – quantitativ ermittelt werden. Die Rechenzeit wird vor allem durch die Gitterteilung, die zusammen mit den Stoffwerten Einfluss auf die zulässige Zeitschrittweite nimmt, bestimmt.

Für *stationäre Wärmeleitvorgänge* gelten selbstverständlich vereinfachte Berechnungen, die auf der Zugrundelegung von Teilwärmedurchgangskoeffizienten κ_i basieren. Sie sind von der jeweiligen raumseitigen Oberfläche i bis zum Nebenraum bzw. der Außenatmosphäre definiert.

Strategien der Komplexsimulation

Generell wird bei der Abarbeitung zwischen der *Simulation unter stationären und instationären Randbedingungen* unterschieden.

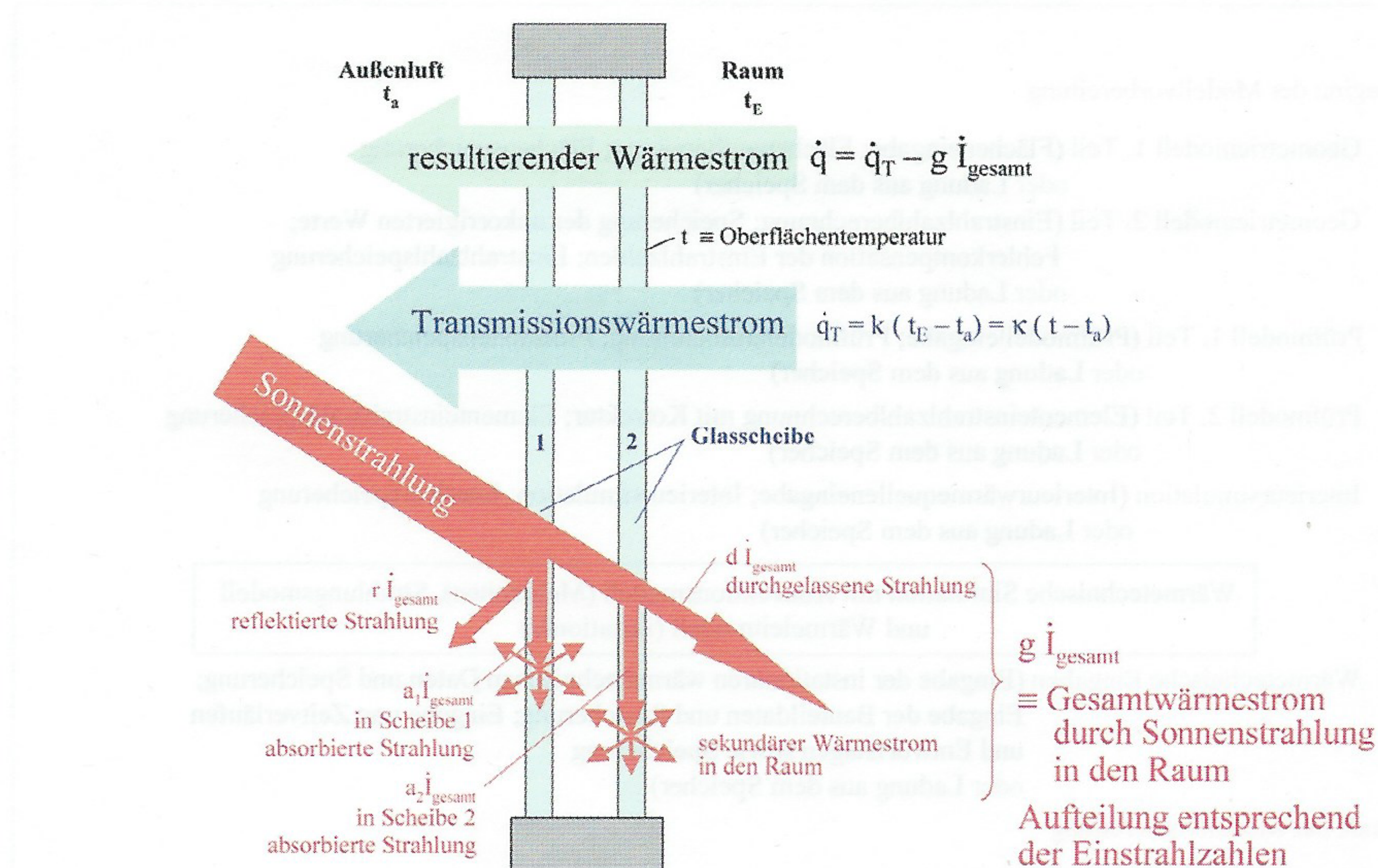


Bild 6

Wärmeströme gemäß der üblichen vereinfachten Berechnungsmethodik für transparente Bauteile mit getrennter Ermittlung des Transmissionswärmestromes und der durchgelassenen kurzwelligen Strahlung einschließlich der sekundären Wärmeabgabe der Verglasung (Erfassung durch g_{iFw})

Stationäre Simulation

Bild 4 zeigt den schematischen Ablauf. Die Vorbereitung der Modellierung und die Auswertung am Ende der Simulation sind selbsterklärend. Das Kernstück der stationären Komplexsimulation dient der Ermittlung der erforderlichen Leistung, um die gewünschte Empfindungstemperatur zu erreichen. Diese kann als Mittelwert über dem Prüfraster oder als minimaler Wert bei der sogenannten „Schlechtwertregelung“ definiert sein. Generell sind nachfolgende raumtechnische Anlagen programmintern modelliert:

- thermisch aktive Flächen (z.B. eine Fußboden- oder Wandheizung, eine Kühldecke usw.)
- konvektive Wärmequelle im Raum
- Zuluftheizung
- Umluftheizung.

Außer der Leistung werden systemabhängig die Stellgrößen Wassertemperatur, Zu- oder Umlufttemperatur bestimmt.

Im Sonderfall kann auch eine *passive Raumnutzung* betrachtet werden. Hierbei wird die sich einstellende Empfindungstemperatur unter den gegebenen Randbedingungen berechnet.

In allen Fällen erfolgt zu Beginn der stationären Komplexsimulation eine Schätzung der Oberflächentemperaturen anhand der Eingabedaten. Die Simulation arbeitet iterativ mit zwei überlagerten Schleifen gemäß Bild 4, bis die Zonenwärmebilanzen und die Oberflächentemperaturen innerhalb vorgegebener Toleranzgrenzen gegenüber der vorhergehenden Berechnung liegen. Damit sind die Zonenlufttemperaturen $t_{Lzone,zone}$ und die Oberflächentemperaturen t_i angepasst. Die Iteration zur Lei-

tungsanpassung wird solange fortgesetzt, bis $|t_{E,ist} - t_{E,soll}| \leq 0,05 \text{ K}$ erreicht ist.

Die Ermittlung der Empfindungstemperatur könnte durch Aufrufen der Behaglichkeitssimulation erfolgen. Um die Rechenzeit klein zu halten, wurde direkt im äußeren Iterationszyklus der Komplexsimulation ein kleiner Auszug aus der Behaglichkeitssimulation implementiert. Es handelt sich hierbei um die Strahlungstemperaturberechnung für alle Prüfrasterpunkte aus der in Kombination mit der Lufttemperatur in Prüfhöhe die mittlere bzw. die minimale Empfindungstemperatur folgt.

Instationäre Simulation

Im **Bild 5** wird der schematische Ablauf für den instationären Fall dargestellt. Die Modellvorbereitung unterscheidet sich gegenüber der stationären Variante lediglich durch veränderte wärmetechnische Eingaben. Sie werden weiter um die detaillierten Bauteildaten, die für die dreidimensionale Wärmeleitung wichtig sind, ergänzt. Außerdem sind zahlreiche Randbedingungen als *Zeitfunktionen* einbaubar, so z.B. Außentemperatur, mittlere Wassertemperatur für stationär arbeitende Heiz-/Kühlflächen, Wassereintrittstemperatur für Speicherbauteile mit integriertem Rohrregister, Raumlasten, Raumsolltemperatur usw. Weiterhin können auch sogenannte *Entwurfstage* definiert werden, die die Tagesgänge von Außentemperatur sowie die solaren Gesamtstrahlungen und die Abminderungsfaktoren infolge Verschattungsvorrichtungen jeweils für die acht Haupthimmelsrichtungen und die Horizontalflächen in einem Eingabeblock vereinen.

Der bereits vorgestellte Kernalgorithmus für stationäre Berechnungen ist um die Wirkung der Besonnung auf opake und transparente Flächen erweitert. Das Fenstermodell nach **Bild 6** geht vereinfacht von der Superposition des Strahlungsdurchganges und der Transmission aus. In Ansatz kommen: $g_{\perp}$ -Wert für senkrechten Strahlungsdurchgang, Abminderungsfaktoren infolge nicht senkrechter Einstrahlung F_w , infolge Verschattungsvorrichtung F_c und infolge baulicher Verschattung und Rahmenanteil F_{fs} . Die durchgelassene Strahlung wird zu einem Anteil (x_{Fenster}) der inneren Glasoberfläche zugewiesen (z.B. 10 %), der Rest ($1 - x_{\text{Fenster}}$) erfährt eine Aufteilung an die vom Fenster aus sichtbaren Raumumfassungen gemäß der Einstrahlzahlen. Damit kann das Vorhandensein eines echten Geometriemodells gut genutzt werden.

Der Algorithmus dient wie bei der stationären Simulation wiederum der Leistungsanpassung zum Erreichen der Raumsolltemperatur oder bei passiver Nutzung der Ermittlung der sich einstellenden Empfindungstemperatur. Bei der stationären Untersuchung liegt der

Schwerpunkt auf der letztgenannten Variante. Generell könnte man bei der instationären wärmetechnischen Raumsimulation in analoger Weise wie im stationären Fall arbeiten und innerhalb eines jeden Zeitschrittes die beiden überlagerten Iterationsschleifen (siehe Bild 4) einbinden. Die Rechenzeit würde dabei aber unakzeptabel groß. Da die in der Regel sehr kleine Zeitschrittweite von beispielsweise $\Delta\tau = 1$ s ohnehin eine sehr hohe Durchlaufzahl bedingt, wird auf die Iterationsschleifen verzichtet und nur die Wiederholung des Rechendurchlaufs in der Zeitfolge vorgenommen, wobei außer den möglicherweise veränderten Randbedingungen gleichzeitig auch die ermittelten Korrekturen der Zonenlufttemperaturen $t_{\text{Lzone,zone}}$ und der Oberflächentemperaturen t_i Berücksichtigung finden.

Die modellierbaren Heiz-/Kühlsysteme entsprechen der stationären Simulationsvariante, die Berechnung der Empfindungstemperatur ($t_{\text{E, mittel}}$ bzw. $t_{\text{E, min}}$) am Ende eines Zeitschrittes ist ebenfalls identisch und die Schätzung der Oberflächentemperaturen lediglich um die Speicherbauteile ergänzt.

Literatur

- [1] Esdorn, H.: Einzelheiten zur Kühllastberechnung – Einfluss des Raumkühlverfahrens und der Bezugstemperatur auf die Kühllast von Räumen. HLH Bd. 45 (1994) Nr. 4, S. 165–175.
- [2] Zimmermann, F.: Quo vadis VDI 2078? HLH Bd. 55 (2004) Nr. 9, S. 3.
- [3] Glück, B.: Thermische Bauteilaktivierung – Nutzen von Umweltenergie und Kapillarrohren. Heidelberg: C. F. Müller Verlag 1999 (ISBN 3-7880-7674-7).
- [4] Glück, B.: Eine massive Kühl-/Heizdecke – Eine stationäre und instationäre Betrachtung. Technik am Bau TAB 34 (2003) Nr. 3, S. 65–72.
- [5] Glück, B.: Wärmetechnisches Raummodell – Gekoppelte Berechnungen und wärme-physiologische Untersuchungen. Heidelberg: C. F. Müller Verlag 1997 (ISBN 3-7880-7615-1).
- [6] Glück, B.: Neue Definition der operativen Raumtemperatur in Fertigungsstätten. HLH Bd. 55 (2004) Nr. 3, S. 32–37 und Nr. 4, S. 51–55.
- [7] Glück, B.: Ein Vorschlag zur verbesserten Darstellung und Messung der operativen Raumtemperatur. Erscheint im Gesundheits-Ingenieur 2005.
- [8] Glück, B.: Modellierung der instationären Wärmeleitung mit Phasenwechsel für ein neues Raumsimulationsmodell. Gesundheits-Ingenieur 126 (2005) Heft 1, S. 1–11.