

# TRNSYS 17: DAS 3D-STRAHLUNGSMODELL

Johannes Aschaber<sup>1</sup>, Marion Hiller<sup>1</sup> und Robert Weber<sup>2</sup>

<sup>1</sup>TRANSSOLAR Energietechnik GmbH, Stuttgart, Deutschland

<sup>2</sup>EMPA, Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt, Bautechnologien, Dübendorf, Schweiz

## KURZFASSUNG

Für die Bewertung innovativer Energiekonzepte von Gebäuden kann eine detaillierte Abbildung des 3-dimensionalen Strahlungstransports im Gebäude erforderlich sein. Die kommende Version 17 des dynamischen Simulationspaketes TRNSYS wird diesen Anforderungen mit einem neuen, bedarfsorientiert aktivierbaren Strahlungsmodell gerecht. In diesem Beitrag wird dieses in das Mehrzonenmodell integrierte geometrische Konzept für kurz- und langwellige Strahlung erläutert.

Das neue Modell basiert auf den so genannten Gebhartfaktoren, welche die Sichtfaktoren als maßgebliche Komponente enthalten. Der Austausch diffuser Strahlung im lang- und kurzwelligen Bereich wird zwischen allen Raumumschließungsflächen explizit gerechnet. Punktquellen werden analog behandelt.

Für die detaillierte Berechnung der kurzwelligen Direktstrahlung in einer Zone werden zeitabhängige externe Verschattungsfaktoren sowie geometrische Verteilfaktoren verwendet. Die Berechnung dieser Faktoren ist nicht Bestandteil dieses Beitrags.

Um die Geometrieingabe zu vereinfachen und zu visualisieren, kann in TRNSYS 17 eine graphische Schnittstelle genutzt werden. Die damit erzeugten Geometrieinformationen werden für die Bestimmung der Sicht-, Verschattungs- und Verteilfaktoren in einem Vorverarbeitungsschritt verwendet.

## ABSTRACT

Evaluating innovative building energy concepts may make detailed modeling of 3-dimensional energy transport by radiation within the building necessary. The upcoming version 17 of the dynamic simulation package TRNSYS meets these demands with a new radiation model integrated into the multizone building model. This paper briefly describes the new geometrical model for long-wave and short-wave radiation handling within a thermal zone.

The new radiation model applies the so-called Gebhart factors which are based on view factors. The long-wave and short-wave diffuse radiation exchange between all surfaces of an enclosure are calculated explicitly including all possible paths. Point sources are treated similarly.

In addition, external shading factors of solar radiation can be handled automatically and the incoming beam radiation is distributed depending on the sun's position, the external shading and the geometry of the thermal zone.

For convenient geometry input and visualization a graphical interface will be available for TRNSYS 17. From the resulting geometric information the required inputs such as view factors, shading factors and distribution factors are calculated in a preprocessing step.

## MOTIVATION

Die Einführung eines detaillierten 3D-Strahlungsmodells eröffnet vor allem hinsichtlich der Simulation von Atrien und Doppelfassaden neue Möglichkeiten. So kann eine thermische Zone nun in mehrere Luftknoten unterteilt werden, um z.B. die thermische Schichtung abzubilden. Der Strahlungstransport findet davon unberührt über die gesamte thermische, oder besser formuliert, über die radiative Zone statt.

Die Berücksichtigung der 3D-Geometrie einer Zone ermöglicht eine genauere Berechnung des Strahlungsaustausches sowie eine positionsabhängige Komfortbestimmung. Dabei können unterschiedliche langwellige Emissionsgrade der Bauteiloberflächen berücksichtigt werden.

Neben der langwelligen erfolgt auch die kurzwellige Strahlungsverteilung über die gesamte radiative Zone.

## GRUNDLAGEN

Das neue dreidimensionale Strahlungsmodell verwendet zur Berechnung der strahlungsinduzierten Wärmeströme die so genannten Gebhartfaktoren. Zentraler Bestandteil eines Gebhartfaktors ist der Sichtfaktor, der im Folgenden näher erläutert wird.

Der Sichtfaktor  $F_{A \rightarrow B}$  ist definiert als jener diffuse Strahlungsanteil, der von einer Fläche A ausgehend auf direktem Wege auf eine Fläche B auftrifft (Siegel et al., 2002). In der englischsprachigen Literatur sind die Begriffe view factor, configuration factor, form factor oder seltener auch shape factor gebräuchlich. Der Sichtfaktor ist ausschließlich von den geometrischen Verhältnissen der beiden Flächen und nicht von

deren optischen Eigenschaften (wie etwa dem Emissions- oder Reflexionsgrad) abhängig.

Es ist im Allgemeinen nicht möglich, für jede beliebige geometrische Konfiguration den Sichtfaktor mit einem analytischen Ausdruck zu beschreiben. Daher kommen häufig numerische Verfahren zum Einsatz (Cohen et. al., 1993), die sich allerdings bezüglich Genauigkeit und Rechenaufwand nachteilig auswirken können. Für TRNSYS 17 werden für den Strahlungsaustausch zwischen Wänden und Fenstern (Polygon↔Polygon) zurzeit zwei Methoden getestet: Ein numerisches Verfahren nach Walton, 2002 und eine analytische Methode nach Schröder et. al., 1993. Für die lokale Komfortbewertung bzw. für Punktstrahlungsquellen (differentielle Kugel↔ Polygon) wird ein analytischer Algorithmus eingesetzt.

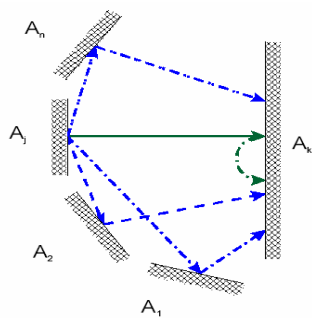


Abbildung 1: Einzeleinflüsse der Fläche  $A_j$  auf  $A_k$  für langwellige Strahlung

Der so genannte Gebhartfaktor ist definiert als jener Anteil der Emission der Fläche  $A_j$ , der die Fläche  $A_k$  erreicht und absorbiert wird, wobei alle möglichen Pfade (d.h. Mehrfachreflexionen) eingeschlossen sind. Das bedeutet, dass neben den geometrischen Verhältnissen, die durch die Sichtfaktoren abgebildet werden, die (wellenlängenabhängigen) optischen Eigenschaften der Flächen zusätzlich berücksichtigt werden. Die für die Gebäudesimulation gängige Unterteilung des elektromagnetischen Strahlungsspektrums in lang- und kurzwellig hat zur Folge, dass auch die Gebhartfaktoren dieser Kategorisierung unterliegen. In Weber, R. et al., 1999 wird gezeigt, wie die Gebhartfaktoren in Abhängigkeit von Sichtfaktoren und Emissions- bzw. Reflexionsgraden für alle Spektralbereiche berechnet werden können.

Es ist für die einfache Berechnung der Wärmeströme von Vorteil, die Gebhartfaktoren für  $n$  Flächen in eine  $n \times n$  Matrix  $G$  zu schreiben und in eine algebraisch umgewandelte Form  $G^*$  zu bringen. Damit können die strahlungsinduzierten Wärmestromvektoren nach Tabelle 2 für alle Strahlungsarten einfach bestimmt werden.

Tabelle 2

Wärmeströme für unterschiedliche Strahlungsarten in Abhängigkeit der modifizierten Gebhartmatrix  $G^*$

STRAHLUNGSART	WÄRMESTROM
Langwellig-Flächenquelle	$\dot{Q}_{ir} = G_{ir}^* T^4$
Langwellig-Punktquelle	$\dot{Q}_{ps} = G_{ps}^* \dot{Q}^\circ$
Kurzwellig-diffus	$\dot{Q}_{difsol} = G_{difsol}^* I_{difsol}$

Es gelten folgende Variablen bzw. Abkürzungen:

$T$  ... Oberflächentemperatur  
 $\dot{Q}^\circ$  ... langwellige Strahlungsleistung der Punktquelle  
 $I_{difsol}$  ... transmittierte diffuse Solarstrahlung  
 $ir$  ... langwellig  
 $ps$  ... Punktquelle  
 $difsol$  ... diffuse (kurzwellige) Solarstrahlung

Auf diese Weise können die Wärmeströme auf jede Fläche mittels einer simplen Multiplikation der  $G^*$ -Matrizen mit der jeweiligen Ursache, den „treibenden Kräften“  $T^4$ ,  $\dot{Q}^\circ$  und  $I_{difsol}$  bestimmt werden. Die Annahmen für die Gültigkeit der Zusammenhänge sind in Weber, R. et al., 1999 erläutert.

### INTEGRATION IN DAS MEHRZONEN-GEBÄUDEMODELL (TYPE56)

Sichtfaktoren, zeitabhängige externe Verschattungsfaktoren sowie geometrische Verteilfaktoren werden in einem Vorverarbeitungsschritt aus ein und derselben dreidimensionalen Geometriebeschreibung für jede radiative Zone des Gebäudes bestimmt. Aus dem Geometriemodell werden dazu die relevanten Informationen extrahiert und in ein für die Faktorroutinen lesbares Eingabeformat umgewandelt.

Die Sichtfaktoren werden zwischen allen Flächen und von den gegebenenfalls angegebenen Punktpositionen (für Quellen und lokale Komfortbetrachtungen) zu allen Flächen innerhalb jeder radiativen Zone bestimmt. Die berechneten Sichtfaktoren sind niemals vollständig exakt, was sich vor allem bei komplexen Geometrien in Ungenauigkeiten der Sichtfaktoren bemerkbar macht. Deshalb müssen Symmetrie- und Energieerhaltung kontrolliert und bei Bedarf mit einem Glättungsverfahren wiederhergestellt werden. Die Ergebnisse werden in Matrix- bzw. Vektorform in einer Sichtfaktordatei abgelegt, welche während der dynamischen Simulation vom Type 56 eingelesen und weiterverarbeitet wird. Ändern sich die optischen Eigenschaften über die Simulationsdauer nicht, so müssen Gebhartmatrizen nur bei der Initialisierung

einmalig bestimmt werden und die Wärmeströme werden dann nach Tabelle 2 berechnet. Im Falle eines beweglichen innenliegenden Sonnenschutzes muss die langwellige Gebhartmatrix gegebenenfalls aber zu jedem Iterationsschritt neu berechnet werden.

Die auf diese Weise ermittelten Wärmeströme werden auf die Bauteiloberflächen aufgeprägt. Der bisherige Sternknoten im Berechnungsmodell wird damit zum reinen Luftknoten für den Wärmetransport innerhalb des Luftvolumens. Ein iteratives Verfahren im Type 56 berechnet eine konvergente Lösung von Temperaturen und Wärmeströmen unter Berücksichtigung aller gültigen Gleichungen und Randbedingungen für Strahlung, Konvektion und Leitung.

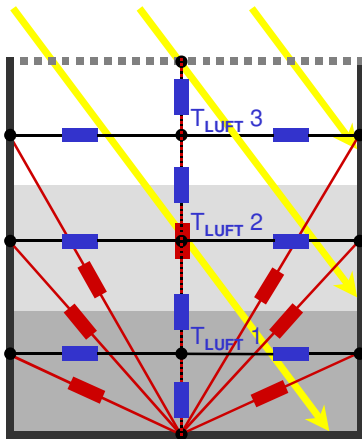


Abbildung 2: Radiative Zone mit drei Luftknoten

Eine radiative Zone kann im detaillierten Strahlungsmodell, wie in Abbildung 2 dargestellt, aus einer oder mehreren so genannten Luftknoten aufgebaut sein.

Einem Luftknoten werden Bauteile und Regimedaten (Heizen, Kühlen, Infiltration, Ventilation etc.) zugeordnet. Dabei sind die Bauteiloberflächen nur konvektiv an den Luftknoten gekoppelt, während sich die kurzwellige Strahlungsverteilung und der langwellige Strahlungsaustausch stets auf die gesamte radiative Zone beziehen. Zwischen zwei Luftknoten einer radiativen Zone erfolgt die Wärmeübertragung ausschließlich über Luftaustausch.

Da es nur für spezielle Zonen notwendig ist, den Strahlungstransport in drei Dimensionen zu berücksichtigen, kann jeder radiativen Zone ein unabhängiger Detaillierungsgrad zugewiesen werden. Bei der direkten kurzwelligen Strahlung ist die Wahl zwischen nutzerdefinierten oder berechneten Verteilungsfaktoren möglich. Der diffus kurzwellige Strahlungsanteil kann flächengewichtet oder mittels Gebhartfaktoren berechnet werden. Im langwelligen Bereich gibt es drei Optionen, ein Sternknotenmodell, ein Einknotenmodell mit kombinierten Wärmeübergangskoeffizienten sowie das beschriebene detaillierte Modell basierend auf den Gebhartfaktoren.

## ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Gegenwärtig befindet sich das beschriebene 3D-Strahlungsmodell im Betastadium bzw. -testing. Die bisher durchgeführten Simulationen zeigen, dass das Modell erfolgreich in TRNSYS integriert wurde und die zu erwartenden Ergebnisse liefert. Die Simulation von Atrien mit mehreren Luftknoten ist durch das neue Modell wesentlich nutzerfreundlicher und weniger fehleranfällig geworden. Der erhöhte Detaillierungsgrad hat bei Standardräumen mit Lochfassade nur einen geringen Einfluss. Die Simulationen zeigen auch, dass noch Optimierungsbedarf hinsichtlich der Rechengeschwindigkeit und Stabilität besteht. Die Validierung mit standardisierten Testroutinen ist noch nicht abgeschlossen. Das Release von TRNSYS 17 mit dem neuen 3D-Strahlungsmodell ist für das Jahr 2009 geplant.

## LITERATUR

- Cohen, M. F., Wallace, J. R. 1993. Radiosity and Realistic Image Synthesis, Academic Press Professional, San Diego
- Gebhart, B. 1971. Heat Transfer, 2. ed, pp. 150-163, McGraw-Hill, New York
- Klein, S.A. et al. 2006. TRNSYS 16: A Transient System Simulation Program, SEL, University of Wisconsin, Madison USA.
- Siegel, R., Howell, J. 2002. Thermal Radiation Heat Transfer, Taylor & Francis, 4. Auflage, New York-London
- Schröder P., Hanrahan P. 1993. On the form factor between two polygons, Proceedings of the 20th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, p.163-164
- Weber, R. et al. 1999. Strahlungsmodell für TRNSYS mit Gebhart-Faktoren, EMPA, Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt, Bautechnologien, Dübendorf, Schweiz.
- Walton G. N., 2002. Calculation of Obstructed View Factors by Adaptive Integration, National Institute of Standards and Technology, NISTIR Report 6925